



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุน
ระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
Multiple Reservoir Re-Operation System for Long-Term Water Supply
Management in the Greater Chao Phraya River Basin Using Artificial
Intelligence Technique (Phase 2)

โดย รศ.ดร.อารีญา ฤทธิมา และคณะ

15 กันยายน 2565

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยา
ใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)

คณะผู้วิจัย สังกัด

รศ.ดร.อารียา ฤทธิมา

ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

ผศ.ดร.ยุทธนา พันธุ์กมลศิลป์

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและการจัดการภัยพิบัติ มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตกาญจนบุรี

ผศ.ดร.อรันย์ ศรีรัตน ทาบุญานอน

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

อ.ดร.วุฒิชชาติ แสงผล

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยมหิดล

อ.ดร.จิตาภา ไกรสังข์

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยมหิดล

ผศ.ดร.ยุทธนา ตาละลักษมณ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รศ.ดร.วรารุช วุฒิวิณิชย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

รายละเอียดโครงการ

สัญญาเลขที่: กม.52/2564

ชื่อโครงการ (ไทย): การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวใน
ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)

ชื่อโครงการ (อังกฤษ): Multiple Reservoir Re-Operation System for Long-Term Water Supply
Management in the Greater Chao Phraya River Basin Using Artificial Intelligence Technique
(Phase 2)

หัวหน้าโครงการ: รศ.ดร.อารีญา ฤทธิมา สังกัดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

ผู้ประกอบการผู้ร่วมทุน: -

Abstract

This research aims at developing the operational tool for multiple reservoir system re-operation in the Greater Chao Phraya River Basin (GCPYRB) which describes basin-wide water resource management in the central region of Thailand including four main dams namely, Bhumibol (BB), Sirikit (SK), Khwae Noi Bumrungdaen (KNB), Pasakcholasit (PS) Dams. The increase in reservoir water storage at the end of wet season of 15% is aimed to achieve by new operational tool for drought risk reduction affecting to the crop yield production in the area. Two types of multiple reservoir operation model applied by Artificial Intelligence–AI technique; (1) Reinforcement Learning–RL and (2) Constraint Programming–CP combined with Machine Learning–ML for daily reservoir inflow prediction, were accordingly developed. The RL-based model was trained using 7–D predicted inflow, water storage in reservoirs, reservoir water release and flows at downstream station which were identified as a set of state variables to make up the environment for dam–reservoir operation. The operation of BB and SK Dams was determined as the multiple agents which learn to behave in an environment by performing the actions or determination of water release. The improvement in increasing reservoir water storages of the agents by RL-based model was considered based on the maximum positive rewards obtained from the model. The simulation results show 24.45% increase in reservoir water storage in accordance with the generated target storages of four main dams which were established for model development by reinforcement learning. However, the improvement of model structure developed by the RL technique and setting up the dynamic target storages for the multiple reservoir operation in GCPYRB are still needed to increase the model efficiency. For the development of CP model, two types of CP optimization; (1) released–based model and (2) demand–based model, were established to find the solution to dam–reservoir operation system in GCPYRB. The travel time of released water from dams to the target demand nodes was not considered for a sort of released–based model with seasonal and yearly constraints. However, travel time of released water was regarded as main factor for the demand–based model. The CP model developed in this study has the same structure as the mathematical programming model; objective function, a set of decision variables, and constraints. The multi–objective optimization was accordingly formulated and the predicted inflow obtained from Machine Learning (ML) technique was used as key input variable. In addition, the sector–based water demand nodes in the Lower Ping (LP), Lower Nan (LN), and Chao Phraya–Tha Chin (CPY–TC) water distribution zones were

identified. The results of long-term reservoir simulation obtained from CP model show the increase in reservoir water storage of 2,449 mcm per year of the system when the release-based model with seasonal constraint and 20% side flow were identified. Approximately 49.12% of this amount of increased water storage was quantified as potential side flow or equivalent to 1,275 mcm per year. In addition, a sort of the demand-based model with yearly constraint could also provide good results of increased water storage of 1,221 mcm per year at the end of wet season. In other words, approximately 12.98% of water storage could be increased without flood risk problem at some reservoirs. The reduction in the amount of water released from four main dams of -256 mcm per year were apparently existed when the demand-based model with yearly constraint was deployed.

Key word: Artificial Intelligence–AI, Reinforcement Learning Technique–RL, Constraint Programming–CP, Machine Learning–ML, Dam–Reservoir Operation

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาเครื่องมือที่ช่วยในการกำหนดการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำในลักษณะของปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างรูปแบบใหม่อย่างเป็นระบบ (Multiple Reservoir Re-operation System) สำหรับประยุกต์ใช้ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ซึ่งอธิบายการบริหารจัดการน้ำทั้งลุ่มน้ำทางตอนกลางของประเทศไทยซึ่งครอบคลุมเขื่อนหลักที่สำคัญได้แก่ เขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ โดยตั้งเป้าหมายที่จะเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในระยะยาวของระบบให้สูงขึ้น 15% จากฐานข้อมูลปัจจุบัน เพื่อช่วยลดความเสี่ยงในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำจากปัญหาขาดแคลนน้ำที่ส่งผลกระทบต่อผลผลิตทางการเกษตรในพื้นที่ งานวิจัยได้นำเสนอแนวทางการพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำโดยอาศัยหลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence-AI) 2 รูปแบบ ได้แก่ (1) แบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning Technique, RL) และ (2) แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด (Constraint Programming, CP) ร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning) ในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวัน สำหรับแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังได้กำหนดตัวแปรสถานะประกอบด้วย ข้อมูลคาดการณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างล่วงหน้าวันที่ 7 ข้อมูลสถานะของปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Storage) ข้อมูลการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำ และข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัดท้ายเขื่อนเพื่อนำมาใช้ในการตัดสินใจระบายน้ำของแต่ละอ่างเก็บน้ำ โดยเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ได้นำข้อมูลการระบายน้ำมาเรียนรู้พฤติกรรมซึ่งกันและกันในลักษณะ Multiple Agents และการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักจะพิจารณาจากค่ารางวัลเชิงบวกสูงสุดที่ได้รับ ผลการจำลองระบบบ่งชี้ให้เห็นว่า ปริมาณน้ำเก็บกักทั้งระบบเพิ่มสูงขึ้น 24.45% ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายของทั้ง 4 เขื่อนที่สังเคราะห์ขึ้นมาสำหรับใช้ในขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงโครงสร้างของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลังและการสังเคราะห์ปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายแบบพลวัตยังมีความสำคัญ ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิผลของแบบจำลองสำหรับประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ ในส่วนของการพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองใน 2 รูปแบบสำหรับหาค่าการระบายน้ำที่เหมาะสมที่สุดในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ได้แก่ (1) รูปแบบที่ 1 แบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model) และ (2) รูปแบบที่ 2 แบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model) โดยมีลักษณะโครงสร้างของแบบจำลองเหมือนกันกับแบบจำลองการโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ทั่วไปที่ประกอบด้วย ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เซตของตัวแปรสถานะ และข้อจำกัด และกำหนดให้เป็นการหาค่าที่ดีที่สุดหลายวัตถุประสงค์โดยนำข้อมูลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาจากเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลังมาใช้เป็นข้อมูลนำเข้าหลัก อีกทั้งได้กำหนดโหนดความต้องการน้ำแยกตามกิจกรรมการใช้น้ำในโซนส่งน้ำลุ่มน้ำปิงตอนล่าง โซนส่งน้ำลุ่มน้ำน่านตอนล่าง และโซนส่งน้ำลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน สำหรับใช้ในแบบจำลอง ผลการจำลอง

ระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวระหว่างปี พ.ศ. 2543–2563 ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2 ซึ่งไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model) และกำหนดให้เป็นแบบจำลองรายฤดูกาลที่พิจารณา Side Flow เท่ากับ 20% พบว่า ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนทั้งระบบเพิ่มสูงขึ้น 2,469 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งประมาณ 49.12% เป็นส่วนของปริมาณน้ำท่าทางด้านท้ายเขื่อน หรือคิดเป็น 1,275 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ในขณะที่แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8 ซึ่งเป็นแบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model) ให้ค่าปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนทั้งระบบเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับ 1,221 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็น 12.98% โดยที่ปริมาณน้ำเก็บกักของทุกอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่สูงจนเกิดความเสี่ยงที่จะไหลล้นอ่างซึ่งสอดคล้องตามเป้าหมายของงานวิจัย และปริมาณการระบายน้ำทั้งระบบลดลงเฉลี่ย -256 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

คำสำคัญ : หลักปัญญาประดิษฐ์ เทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด เทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง การบริหารเขื่อน-อ่างเก็บน้ำ

บทสรุปผู้บริหาร

โครงการวิจัยเรื่อง “การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)” นี้ มุ่งเน้นที่จะพัฒนาเครื่องมือที่ช่วยในการกำหนดการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำในลักษณะของปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างรูปแบบใหม่อย่างเป็นระบบ (Multiple Reservoir Re-operation System) สำหรับประยุกต์ใช้ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ (Greater Chao Phraya River Basin) ซึ่งถูกนิยามขึ้นสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้เพื่ออธิบายถึงการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำร่วมกันในพื้นที่คลัสเตอร์ลุ่มน้ำทางตอนกลางของประเทศไทยซึ่งประกอบด้วย (1) ลุ่มน้ำปิง (2) ลุ่มน้ำวัง (3) ลุ่มน้ำยม (4) ลุ่มน้ำ่าน (5) ลุ่มน้ำเจ้าพระยา (6) ลุ่มน้ำท่าจีน (7) ลุ่มน้ำป่าสัก และ (8) ลุ่มน้ำสะแกกรัง โดยตั้งเป้าหมายที่จะเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในระยะยาวของระบบให้สูงขึ้น 15% จากฐานข้อมูลปัจจุบัน เพื่อช่วยลดความเสี่ยงในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำจากปัญหาขาดแคลนน้ำที่อาจเกิดขึ้น งานวิจัยได้นำเสนอแนวทางการพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำโดยอาศัยหลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence-AI) 2 รูปแบบ ได้แก่ (1) แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning Technique, RL) และ (2) แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด (Constraint Programming, CP) ร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning) ในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวัน

ผลการพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning, RL) สำหรับประยุกต์ในงานบริหารเขื่อนในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ได้กำหนดองค์ประกอบในลักษณะ Multi-Agent Based System โดยอ่างเก็บน้ำจะถูกแทนเป็น Agent ในแบบจำลองจำนวน 4 Agent ประกอบด้วย (1) Agent เขื่อนภูมิพล (Agent-BB) (2) Agent เขื่อนสิริกิติ์ (Agent-SK) (3) Agent เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน (Agent-KNB) และ (4) Agent เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ (Agent-PS) โดยทุก Agent จะทำหน้าที่ในการเรียนรู้แบบ Deep Q-learning Network (DQN) จากปัจจัยสภาพ Environment ทั้ง 4 ปัจจัยเพื่อนำมาใช้ในการตัดสินใจระบายน้ำ (Action/Release) แต่ละ Agent จะเรียนรู้จาก (1) ข้อมูลคาดการณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างล่วงหน้าวันที่ 7 (7D Forecasted Inflow) (2) ข้อมูลสถานะของปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Storage) (3) ข้อมูลการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Water Release) ในส่วนนี้ได้ออกแบบให้ Agent-BB และ Agent-SK เรียนรู้การระบายน้ำซึ่งกันละกัน กล่าวคือ เขื่อนภูมิพลจะนำข้อมูลการระบายน้ำของเขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนสิริกิติ์จะนำข้อมูลการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลมาเรียนรู้ ในขณะที่ Agent-KNB เรียนรู้การระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ ส่วนเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์จะไม่นำข้อมูลส่วนนี้มาเรียนรู้ (4) ข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัดท้ายเขื่อน (Flows at Downstream Station) โดย Agent-BB, Agent-SK และ Agent-KNB จะนำสภาพของน้ำท่าที่สถานีตรวจวัด C.2 มาเรียนรู้ ส่วน Agent-PS จะพิจารณาสภาพน้ำท้ายเขื่อนเจ้าพระยาที่สถานีตรวจวัด C.13 ในส่วนของการกำหนด Reward เป็นค่าการให้คะแนนแก่ Agent ในการตัดสินใจ Action ในแต่ละช่วงเวลา (Time Step) โดยกำหนดจากค่าความ

คลาดเคลื่อนระหว่างปริมาณน้ำเป้าหมายกับปริมาณน้ำที่ได้จากการคำนวณ รวมถึงค่าความต้องการน้ำกับปริมาณน้ำที่ระบาย

ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ ระหว่างปี พ.ศ. 2552–2564 ด้วยแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังพบว่า ปริมาณน้ำเก็บกักรายวันจากผลลัพธ์ของแบบจำลองให้ค่าสอดคล้องไปกับเส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมาย (Generated Target Storage) ทั้ง 4 เขื่อนที่สังเคราะห์ขึ้นมาใหม่สำหรับใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง โดยกำหนดให้ปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายสูงขึ้น 15% จากค่าเฉลี่ยรายวันระยะยาวสำหรับเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และสูงขึ้น 10% จากค่าเฉลี่ยรายวันระยะยาวสำหรับป่าสักชลสิทธิ์ตามเป้าหมายของงานวิจัยเพื่อให้แบบจำลองเรียนรู้ในการหาโครงสร้างที่เหมาะสมในการกำหนดการระบายน้ำจาก 4 เขื่อนหลัก โดยรูปแบบปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของทุกเขื่อนสูงกว่าปริมาณน้ำเก็บกักตรวจวัด ในขณะเดียวกัน ความผันผวนของปริมาณน้ำเก็บกักที่สะท้อนถึงปัจจัยปริมาณน้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำภายใต้สถานการณ์น้ำแตกต่างกันลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อปรับเปลี่ยนการบริหารเขื่อน-อ่างเก็บน้ำด้วยแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง

ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ ระหว่างปี พ.ศ. 2552–2564 ด้วยแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังพบว่า เขื่อนภูมิพลมีค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยและปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนเท่ากับ 2,686 และ 2,276 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 40.66% และ 28.70% ตามลำดับ และปริมาณการระบายน้ำรายปีลดลง -141.01 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็น -3.04% เขื่อนสิริกิติ์มีค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยและปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนเท่ากับ 1,672 และ 3,494 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 31.25% และ 52.07% ตามลำดับ และปริมาณการระบายน้ำรายปีลดลงเพียงเล็กน้อยเท่ากับ -1.19 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็น -0.02% เขื่อนแควน้อยบำรุงแดนมีค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยและปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนเท่ากับ 136 และ 71 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 29.57% และ 9.33% ตามลำดับ และปริมาณการระบายน้ำรายปีลดลง -18.39 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็น -1.37% และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์มีค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยและปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนเท่ากับ 123 และ 64 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 26.82% และ 7.69% ตามลำดับ และปริมาณการระบายน้ำรายปีลดลง -23.07 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็น -1.16%

แบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังแนะนำรูปแบบและค่าปริมาณการระบายน้ำรายวันที่ให้ค่ารางวัล (Reward) สูงสุดที่ Episode สุดท้ายของการเรียนรู้มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง ซึ่งแตกต่างไปจากปริมาณการระบายน้ำตรวจวัดจริงรายวันที่มีลักษณะต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ลักษณะรูปแบบและค่าปริมาณการระบายน้ำรายปีของทั้ง 4 เขื่อนจากผลลัพธ์ของแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังไม่แตกต่างไปจากปริมาณการระบายน้ำตรวจวัดรายปีมากนัก หรืออาจกล่าวได้ว่า แบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังอาศัยหลักการระบายน้ำรายวันที่สามารถให้ค่าปริมาณน้ำเก็บกักเข้าใกล้เส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายตามที่ได้สังเคราะห์ไว้ในขั้นตอนของการออกแบบและพัฒนาแบบจำลอง ส่งผลให้ปริมาณการระบายน้ำรายวันมีความผันผวนสูงหรือ

อีกนัยหนึ่ง แบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังกำหนดแบบแผนการระบายน้ำ (Water Release Scheme) รายวันที่แตกต่างไปจากแนวทางปฏิบัติงานจริงโดยมุ่งเน้นที่จะเพิ่มน้ำต้นทุนตามเส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายที่ได้กำหนดไว้

ผลการพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการโปรแกรมแบบข้อจำกัด (Constraint Programming, CP) ซึ่งนับเป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพสูงในกลุ่มของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ที่ใช้คอมพิวเตอร์ในการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดจากชุดของคำตอบที่เป็นไปได้ (Combinatorial Search Problem) โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดรูปแบบของแบบจำลองใน 2 รูปแบบคือ (1) รูปแบบที่ 1 แบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model) และ (2) รูปแบบที่ 2 แบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model) โดยได้กำหนดรูปแบบของแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดย่อยเพื่อจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จำนวน 21 กรณี

ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระหว่างปี พ.ศ. 2543–2563 ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2 ซึ่งไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model) และกำหนดให้เป็นแบบจำลองรายฤดูกาลที่พิจารณา Side Flow เท่ากับ 20% พบว่า ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์เพิ่มสูงขึ้นคิดเป็น +15.73% และ +16.36% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องตามเป้าหมายของงานวิจัย อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ลดลง -12.20% และ -3.20% ตามลำดับ ในภาพรวมปริมาณน้ำเก็บกักทั้งระบบเพิ่มสูงขึ้น 2,469 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งประมาณ 49.12% เป็นส่วนของปริมาณน้ำท่าทางด้านท้ายเขื่อน หรือคิดเป็น 1,275 ล้านลูกบาศก์เมตร (หักลบกับผลการจำลองจากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.1) ที่นำมาพิจารณาปรับลดปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ลง อาจกล่าวสรุปได้ว่าแบบจำลองการโปรแกรมข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2 กำหนดบทบาทของทั้ง 4 เขื่อนในการระบายน้ำเพื่อตอบสนองความต้องการน้ำแตกต่างไปจากเดิม กล่าวคือ อัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล: เขื่อนสิริกิติ์: เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน: เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เฉลี่ยระยะยาวจากเดิมเท่ากับ 0.36:0.45:0.07:0.12 ไปเป็น 0.38:0.45:0.06:0.11 โดยในภาพรวมระยะยาวอัตราส่วนการระบายน้ำจากของเขื่อนสิริกิติ์ที่ได้จากแบบจำลองยังคงสูงกว่าเขื่อนภูมิพล และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ยังคงสูงกว่าเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนนี้ผันแปรแตกต่างกันปีน้ำและปัจจัยฤดูกาล อีกทั้งมีการเพิ่มอัตราการระบายน้ำจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์สูงขึ้นจากผลการปฏิบัติงานจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูแล้งของปีน้ำน้อยและปีน้ำปกติ ซึ่งแบบจำลองมีการเพิ่มการระบายน้ำจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนสูงขึ้นจากเดิมในอัตรา 0.09 ไปเป็น 0.12 ในปีน้ำน้อย และอัตรา 0.06 ไปเป็น 0.07 ในปีน้ำปกติ ในขณะที่อัตราส่วนการระบายน้ำในช่วงฤดูฝนของปีน้ำน้อยซึ่งแบบจำลองมีการปรับลดอัตราการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ลงเล็กน้อยแต่ยังคงสูงกว่าเขื่อนภูมิพล และปรับเพิ่มปริมาณการระบายน้ำในช่วงฤดูฝนของปีน้ำปกติและปีน้ำมากสูงขึ้น ในขณะที่

อัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลปรับลดลงอย่างชัดเจนในปีน้ำมากซึ่งแตกต่างจากแนวทางการปฏิบัติงานจริงเดิม

ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระหว่างปี พ.ศ. 2543–2563 ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8 และ 2.16 รวมทั้งแบบจำลองรูปแบบอื่น ๆ ในกลุ่มของแบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model) จำนวน 16 รูปแบบแสดงค่าผลลัพธ์ในลักษณะคล้ายคลึงกันในการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ กล่าวคือ ปริมาณน้ำเก็บกักของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ปรับเพิ่มสูงขึ้นหรือลดลงตามข้อกำหนดของแบบจำลองในแต่ละรูปแบบไม่ว่าจะเป็นข้อกำหนดด้านข้อมูล Side Flow ท้ายเขื่อนที่นำมาพิจารณาปรับลดปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อน ข้อกำหนดของปริมาณน้ำเก็บกักที่ไม่เกินระดับ URC และข้อกำหนดของประเภทข้อมูลความต้องการน้ำที่ใช้ อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำเก็บกักของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ส่วนใหญ่ยังมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและมีแนวโน้มเข้าใกล้ระดับเก็บกักปกติในบางรูปแบบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแบบจำลองในกลุ่มนี้ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ร่วมกับนำปัจจัยของปริมาณน้ำท่าท้ายเขื่อนมาปรับลดปริมาณการระบายน้ำลง และหาค่าที่ดีที่สุดของอัตราส่วนการระบายน้ำของแต่ละเขื่อนตามสถานะน้ำต้นทุนและโหนดความต้องการน้ำที่กำหนดในแต่ละช่วงเวลา ทำให้สามารถจัดส่งน้ำเพื่อตอบสนองโหนดความต้องการในเวลาที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8 ให้ค่าปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนทั้งระบบเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับ 1,221 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็น 12.98% โดยที่ปริมาณน้ำเก็บกักของทุกอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่สูงจนเกิดความเสี่ยงที่จะไหลล้นอ่างซึ่งสอดคล้องตามเป้าหมายของงานวิจัย และปริมาณการระบายน้ำทั้งระบบลดลงเฉลี่ย -256 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดสามารถแก้ปัญหาโจทย์เพื่อหาค่า Sharing Ratio ที่เหมาะสมรายวันแยกตามโหนดความต้องการน้ำในแต่ละกิจกรรมการใช้น้ำในพื้นที่กลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ อีกทั้งแบบจำลองยังดึงศักยภาพของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์มีบทบาทในการเพิ่มการระบายน้ำเพื่อตอบสนองความต้องการน้ำร่วมกัน (Joint Demand) ในภาคเกษตรกรรมและรักษาระบบนิเวศท้ายเขื่อนในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาได้มากขึ้น ส่งผลทำให้สามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ได้ตามเป้าหมายในการเพิ่มน้ำต้นทุนระยะยาวที่ตั้งไว้ ซึ่งการปรับเปลี่ยน Sharing Ratio ทั้งในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งของทั้ง 4 เขื่อนหลักส่งผลทำให้ปริมาณน้ำเก็บกักที่สะท้อนถึงปัจจัยน้ำต้นทุนที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากแบบจำลองกำหนดปริมาณการระบายน้ำตามศักยภาพน้ำต้นทุนและยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายน้ำจากเขื่อน

แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดแบบที่ 1 (ไม่พิจารณาระยะเวลาเดินทางของน้ำถึงโหนดความต้องการน้ำ) ทำให้เขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์สามารถรับมือกับสถานการณ์น้ำล้นอ่างได้ดีขึ้น โดยระบายน้ำส่วนหนึ่งมาช่วยเสริมความต้องการน้ำใน

โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงที่น้ำจะเต็มความจุอ่างเก็บน้ำและระบายน้ำส่วนเกิน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการศึกษาทุกภัยในพื้นที่ลุ่มต่ำทางด้านท้ายเขื่อนได้

การใช้แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดทั้ง 2 รูปแบบทำให้ปริมาณน้ำต้นทุนสูงขึ้น 1,320–1,340 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง ซึ่งสะท้อนผลลัพธ์จากการใช้เทคโนโลยีบริหารเขื่อนสมัยใหม่

การพิจารณา 20% ของข้อมูล Sideflow (สถานีตรวจวัดน้ำท่า W.4A) ท้ายเขื่อนภูมิพล และ 10% ของข้อมูล Sideflow (สถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.14&N.22A) ท้ายเขื่อนสิริกิติ์ในแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดทั้ง 2 รูปแบบทำให้ปริมาณน้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำสูงขึ้น 1,107–1,275 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการนำแหล่งน้ำต้นทุนที่มีศักยภาพทางด้านท้ายเขื่อนมาใช้ให้เกิดประโยชน์เพื่อปรับลดปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อนหลัก อย่างไรก็ตาม การปรับลดปัจจัย Side Flow โดยการพิจารณาเพียง 10% ของข้อมูล Sideflow (สถานีตรวจวัดน้ำท่า W.4A) ท้ายเขื่อนภูมิพล และ 10% ของข้อมูล Sideflow (สถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.14&N.22A) ท้ายเขื่อนสิริกิติ์ในแบบจำลองทำให้ปริมาณน้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำลดลงจากกรณีดังกล่าวประมาณ 378 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

การพิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำที่ระบายจากเขื่อนในแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2 ทำให้รูปแบบการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักแตกต่างจากแบบจำลองรูปแบบที่ 1 (ไม่พิจารณาระยะเวลาเดินทางของน้ำถึงโหนดความต้องการน้ำ) อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำต้นทุนที่เพิ่มขึ้นของทั้งระบบของแบบจำลองทั้ง 2 รูปแบบมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

รูปแบบการระบายน้ำจากแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดแบบที่ 1 (ไม่พิจารณาระยะเวลาเดินทางของน้ำถึงโหนดความต้องการน้ำ) ร่วมกับพิจารณาข้อมูล Side Flow ทางด้านท้ายพบว่า ปริมาณน้ำต้นทุนจะไปเพิ่มใน 2 เขื่อนหลักได้แก่ เขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ ในขณะที่รูปแบบการระบายน้ำจากแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดแบบที่ 2 (พิจารณาระยะเวลาเดินทางของน้ำถึงโหนดความต้องการน้ำ) พบว่า ปริมาณน้ำต้นทุนจะไปเพิ่มทั้ง 4 เขื่อนหลัก เนื่องจากระบายน้ำสอดคล้องกับความต้องการน้ำในกิจกรรมต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

การควบคุมระดับน้ำตอนบนของทุกเขื่อนแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดแบบที่ 2 (พิจารณาระยะเวลาเดินทางของน้ำถึงโหนดความต้องการน้ำ) ทำให้ปริมาณน้ำต้นทุนปรับลดลง 1,072 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี นอกจากนี้ การควบคุมระดับน้ำตอนบนของเขื่อนเฉพาะเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ทำให้ปริมาณน้ำต้นทุนปรับลดลง 973 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

การปรับใช้ข้อมูลความต้องการน้ำในภาคเกษตรกรรมโดยอาศัยข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมร่วมกับกำหนดอัตราร้องขอ (Request Ratio) = 0.60 ในปีที่มีปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำน้อยในแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดแบบที่ 2 (พิจารณาระยะเวลาเดินทางของน้ำถึงโหนดความต้องการน้ำ) ทำให้ปริมาณน้ำต้นทุนสูงขึ้น 1,440 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี เนื่องจากเป็นมาตรการในการปรับลดปริมาณความต้องการน้ำในภาคเกษตรกรรม เมื่อปริมาณน้ำต้นทุนในเขื่อนมีจำกัด (Demand Side Management)

แบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังให้ค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสิ้นสุดฤดูฝนคิดเป็น +24.45% ทั้งระบบ หรือคิดเป็นปริมาณน้ำเก็บกักที่สะท้อนถึงปริมาณน้ำต้นทุนที่เพิ่มสูงขึ้นทั้ง 4 เขื่อนเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนเท่ากับ +5,904 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งสูงกว่าแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2, 2.8 และ 2.16 ที่มีค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสิ้นสุดฤดูฝนอยู่ในช่วง +4.17% ถึง +16.99% ทั้งระบบ หรือคิดเป็นปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มสูงขึ้นทั้ง 4 เขื่อนเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนอยู่ในช่วงเท่ากับ +1,221 ถึง +2,596 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ในขณะที่การลดลงของปริมาณการระบายน้ำจากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังคิดเป็น -1.40% หรือคิดเป็นปริมาณการระบายน้ำสุทธิทั้ง 4 เขื่อนซึ่งลดลงจากผลการปฏิบัติจริงเท่ากับ -184 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี รูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อนที่ลดลงดังกล่าวยังให้ค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2, 2.8 และ 2.16 ซึ่งอยู่ในช่วง -0.94% ถึง -1.86% หรือคิดเป็นปริมาณการระบายน้ำสุทธิทั้ง 4 เขื่อนซึ่งลดลงจากผลการปฏิบัติจริงอยู่ในช่วงระหว่าง -139.03 ถึง -318.27 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
Abstract	i
บทคัดย่อ	iii
บทสรุปผู้บริหาร	v
สารบัญ	xi
สารบัญตาราง	xiii
สารบัญรูป	xx
บทที่ 1 บทนำ	1-1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1-1
1.2 วัตถุประสงค์	1-3
1.3 แผนการดำเนินการ	1-4
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม	2-1
2.1 หลักปัญญาประดิษฐ์ในงานบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (Artificial Intelligence for Water Resources Management)	2-1
2.2 เทคนิคการหาค่าที่ดีที่สุดกับการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ (Optimization Techniques for Reservoir Management)	2-2
2.3 เทคนิคการจำลองระบบกับการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ (Simulation Techniques for Reservoir Management)	2-5
2.4 งานบริหารเขื่อน-อ่างเก็บน้ำแบบอัจฉริยะ (SMART Dam-Reservoir Operation)	2-7
2.5 เทคนิคการพยากรณ์ข้อมูลทางอุทกวิทยา (Hydrological Prediction Techniques)	2-8
2.6 เทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning Technique)	2-19
2.7 แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด (Constraint Programming Model)	2-24
2.8 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย (Tool Used in This Research)	2-25
2.9 พื้นที่ศึกษา (Study Area)	2-27
2.10 การบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ (Water Management in the Greater Chao Phraya River Basin)	2-58
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย	3-1
3.1 กรอบงานวิจัย	3-1
3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย	3-1
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	4-1

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.1 ผลการรวบรวมข้อมูลวิจัย	4-1
4.2 ผลการศึกษาและวิจัย	4-15
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	5-1
5.1 สรุปผลการวิจัย	5-1
5.2 ข้อเสนอแนะ	5-11
เอกสารอ้างอิง	R-1
ภาคผนวก A ผลการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชของโครงการชลประทานและค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrriSAT Adjusted และ Kc-RID ของโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่	A-1
ภาคผนวก B ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันและรายเดือนจากแบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวและแบบหลายอย่างด้วยอัลกอริทึม XGBoost และ LSTM ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	B-1
ภาคผนวก C ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันและรายเดือนจากแบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวและแบบหลายอย่างด้วยอัลกอริทึม XGBoost และ LSTM ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	C-1
ภาคผนวก D ผลการพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	D-1
ภาคผนวก E ผลการดำเนินงานวิจัยผ่านกิจกรรม CO-RUN ในแผนงานวิจัยที่ 3	E-1
ภาคผนวก F รายงานสรุปข้อเสนอแนะเชิงวิชาการและแนวทางการประยุกต์ใช้งาน	F-1
ภาคผนวก G ภาพการจัดฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการเพื่อถ่ายทอดผลงานวิจัยสู่หน่วยงานปฏิบัติและภาพแสดงการศึกษาดูงานเขื่อนในพื้นที่ศึกษาและนำเสนอผลงานวิจัยโดยคณะนักวิจัยแก่หน่วยงานปฏิบัติ	G-1
ภาคผนวก H บทความทางวิชาการจากผลลัพธ์จากงานวิจัย	H-1

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 1-1	แผนการดำเนินงานวิจัยและผลการดำเนินงานจริง	1-4
ตารางที่ 2-1	รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานเขื่อนภูมิพล	2-32
ตารางที่ 2-2	รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำเขื่อนภูมิพล	2-32
ตารางที่ 2-3	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเก็บกัก-พื้นที่ผิวน้ำ-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล	2-33
ตารางที่ 2-4	รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานเขื่อนสิริกิติ์	2-35
ตารางที่ 2-5	รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำเขื่อนสิริกิติ์	2-36
ตารางที่ 2-6	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเก็บกัก-พื้นที่ผิวน้ำ-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์	2-37
ตารางที่ 2-7	รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน	2-38
ตารางที่ 2-8	รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน	2-39
ตารางที่ 2-9	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเก็บกัก-พื้นที่ผิวน้ำ-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน	2-39
ตารางที่ 2-10	รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	2-42
ตารางที่ 2-11	รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	2-42
ตารางที่ 2-12	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเก็บกัก-พื้นที่ผิวน้ำ-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	2-42
ตารางที่ 2-13	รายละเอียดสำคัญของโครงการชลประทานในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	2-44
ตารางที่ 2-14	แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2549-2555	2-51
ตารางที่ 2-15	แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2556-2563	2-52
ตารางที่ 2-16	แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2564	2-53
ตารางที่ 2-17	แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2558	2-54
ตารางที่ 2-18	แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2559-2564	2-55
ตารางที่ 2-19	แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2558	2-56

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 2-20	แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2559-2564	2-57
ตารางที่ 2-21	การกำหนดอัตราการระบายน้ำเพื่อผลักดันน้ำเค็มและการประปาจากรายงานผลการศึกษาของบริษัทเอเคอร์	2-59
ตารางที่ 2-22	ข้อมูลความจุเก็บกักสูงสุดของแม่น้ำสายหลักในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	2-61
ตารางที่ 2-23	ข้อมูลสถานีวัดน้ำท่าหลักในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	2-62
ตารางที่ 2-24	ระยะเวลาในการเดินทางของน้ำที่ระบายจากเขื่อนหลักในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	2-63
ตารางที่ 2-25	ข้อจำกัดการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพล	2-65
ตารางที่ 2-26	ข้อจำกัดการระบายน้ำตามฤดูกาลของเขื่อนสิริกิติ์	2-66
ตารางที่ 2-27	ความสามารถรับน้ำสูงสุดของสถานีตรวจวัดน้ำตลอดลำน้ำน่าน	2-68
ตารางที่ 3-1	ข้อกำหนดปัจจัยความต้องการน้ำของสถานการณ์สมมติ	3-6
ตารางที่ 3-2	ข้อมูลป้อนเข้าในแบบจำลอง WEAP	3-8
ตารางที่ 3-3	กระบวนการคำนวณใน DDPG	3-18
ตารางที่ 4-1	รายชื่อสถานีตรวจวัดฝนของกรมอุตุนิยมวิทยา	4-1
ตารางที่ 4-2	รายชื่อสถานีโทรมาตรตรวจวัดฝนและน้ำท่าในลุ่มน้ำปิงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	4-2
ตารางที่ 4-3	รายชื่อสถานีโทรมาตรตรวจวัดฝนและน้ำท่าในลุ่มน้ำน่านของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	4-3
ตารางที่ 4-4	รายชื่อสถานีตรวจวัดน้ำท่าของกรมชลประทาน	4-4
ตารางที่ 4-5	สถิติข้อมูลฝนรายปีจากสถานีของกรมอุตุนิยมวิทยาระหว่างปี พ.ศ. 2543-2564	4-7
ตารางที่ 4-6	สถิติข้อมูลฝนรายปีจากสถานีโทรมาตรในลุ่มน้ำปิงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2555-2564	4-9
ตารางที่ 4-7	สถิติข้อมูลฝนรายปีจากสถานีโทรมาตรในลุ่มน้ำน่านของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2555-2564	4-9
ตารางที่ 4-8	สถิติข้อมูลน้ำท่าเฉลี่ยรายปีจากสถานีโทรมาตรในลุ่มน้ำปิงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2555-2564	4-11
ตารางที่ 4-9	สถิติข้อมูลน้ำท่าเฉลี่ยรายปีจากสถานีโทรมาตรในลุ่มน้ำน่านของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2555-2564	4-11
ตารางที่ 4-10	รายชื่อผลการรวบรวมข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ	4-12
ตารางที่ 4-11	ข้อมูลพื้นที่โครงการชลประทานในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ในปี พ.ศ. 2564	4-13

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 4-12	สถิติข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพล	4-15
ตารางที่ 4-13	สถิติข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนสิริกิติ์	4-15
ตารางที่ 4-14	แผนการจัดสรรน้ำและการระบายน้ำจริงจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-19
ตารางที่ 4-15	สถิติข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน	4-22
ตารางที่ 4-16	แผนการจัดสรรน้ำและการระบายน้ำจริงจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน	4-24
ตารางที่ 4-17	สถิติข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	4-27
ตารางที่ 4-18	แผนการจัดสรรน้ำและการระบายน้ำจริงจากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	4-29
ตารางที่ 4-19	สถิติข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัดหลักรายเดือนและรายปีเฉลี่ยในพื้นที่ศึกษา	4-34
ตารางที่ 4-20	ช่วงความยาวของฐานข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างและข้อมูลฝนที่นำมาวิเคราะห์สหสัมพันธ์	4-45
ตารางที่ 4-21	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเขื่อนภูมิพลและข้อมูลฝน	4-45
ตารางที่ 4-22	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเขื่อนสิริกิติ์และข้อมูลฝน	4-46
ตารางที่ 4-23	ปริมาณน้ำใต้ดินที่สูบไปใช้ในเขตพื้นที่ภาคกลางตอนบนในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ. 2563 ถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2564	4-47
ตารางที่ 4-24	สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Kc) ที่ได้จากแอปพลิเคชัน IrrisAT ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Kc) ที่ได้จากแอปพลิเคชัน IrrisAT ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563	4-51
ตารางที่ 4-25	แฟคเตอร์ปรับแก้ของ Kc-IrrisAT ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด	4-53
ตารางที่ 4-26	ค่า Kc-IrrisAT Adjusted ในปี พ.ศ. 2563/2564 ที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณความต้องการน้ำของพืชพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่	4-54
ตารางที่ 4-27	ค่าการคายระเหยน้ำของพืชอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณความต้องการน้ำของพืชในปี พ.ศ. 2563/2564 ในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่	4-56

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 4-28	ค่าปริมาณความต้องการน้ำของพีชรายเดือนและรายปีในปี พ.ศ. 2563/2564 ในโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่	4-58
ตารางที่ 4-29	ค่าปริมาณความต้องการน้ำสุทธิที่ได้จากการคำนวณในปี พ.ศ. 2563/2564 ในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่	4-62
ตารางที่ 4-30	ปริมาณน้ำชลประทานที่จัดส่งและประสิทธิภาพการชลประทานที่ได้จากการคำนวณในปี พ.ศ. 2563/2564 ในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่	4-63
ตารางที่ 4-31	ผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานที่ต้องจัดส่งในพื้นที่	4-67
ตารางที่ 4-32	ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563	4-68
ตารางที่ 4-33	ปริมาณน้ำไหลออกจากอ่างคำนวณ (Calculated Outflow) ของ 5 สถานการณ์สมมติ	4-75
ตารางที่ 4-34	ผลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ตอนบน	4-77
ตารางที่ 4-35	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง WEAP เพื่อจำลองสถานการณ์น้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนบน	4-78
ตารางที่ 4-36	ตัวชี้วัดทางสถิติแสดงประสิทธิผลของแบบจำลอง WEAP ในการจำลองฝน-น้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ตอนบนโดยวิเคราะห์จากฐานข้อมูลรายเดือน	4-80
ตารางที่ 4-37	ตัวชี้วัดทางสถิติแสดงประสิทธิผลของแบบจำลอง WEAP ในการจำลองฝน-น้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ตอนบนโดยวิเคราะห์จากฐานข้อมูลรายปี	4-83
ตารางที่ 4-38	ข้อมูลและแหล่งที่มาของข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย	4-84
ตารางที่ 4-39	พิกัดทางภูมิศาสตร์และรหัสของสถานีตรวจวัดสภาพภูมิอากาศในบริเวณพื้นที่ศึกษา	4-85
ตารางที่ 4-40	การกำหนดรูปแบบของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายวันด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	4-89
ตารางที่ 4-41	การกำหนดรูปแบบของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	4-90
ตารางที่ 4-42	รายชื่อ Library ที่เกี่ยวข้อง	4-93

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 4-43	ประสิทธิผลของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายวันของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-94
ตารางที่ 4-44	ประสิทธิผลของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายเดือนของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-95
ตารางที่ 4-45	รูปแบบและประสิทธิผลของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายวันและรายเดือนด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-97
ตารางที่ 4-46	ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการพยากรณ์จากแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายวันด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-99
ตารางที่ 4-47	ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการพยากรณ์จากแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายเดือนด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-100
ตารางที่ 4-48	ค่าประสิทธิผลของแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายวันของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	4-102
ตารางที่ 4-49	ค่าประสิทธิผลของแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายเดือนของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	4-103
ตารางที่ 4-50	ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการพยากรณ์จากแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายวันด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	4-109
ตารางที่ 4-51	ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการพยากรณ์จากแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	4-111
ตารางที่ 4-52	การกำหนดรูปแบบของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่างรายวันและรายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเขื่อนสิริกิติ์และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	4-116

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 4-53	ประสิทธิผลของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่ากรายวันของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-117
ตารางที่ 4-54	ประสิทธิผลของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่ากรายเดือนของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-118
ตารางที่ 4-55	รูปแบบและประสิทธิผลของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่ากรายวันและรายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-118
ตารางที่ 4-56	ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการพยากรณ์จากแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่ากรายวันด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-120
ตารางที่ 4-57	ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการพยากรณ์จากแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่ากรายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-121
ตารางที่ 4-58	ค่าประสิทธิผลของแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่ากรายวันและรายเดือนของเขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน	4-123
ตารางที่ 4-59	ประสิทธิผลของการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่ากระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง	4-128
ตารางที่ 4-60	การกำหนดรูปแบบของแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดสำหรับใช้จำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่ากระยะยาว	4-140
ตารางที่ 4-61	ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่ากระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบต่าง ๆ	4-141
ตารางที่ 4-62	ประสิทธิผลของการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่ากระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2	4-144
ตารางที่ 4-63	ประสิทธิผลของการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่ากระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8	4-158
ตารางที่ 4-64	ประสิทธิผลของการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่ากระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16	4-168

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 4-65	ผลการเปรียบเทียบศักยภาพในการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักและการลดลงของปริมาณการระบายน้ำจากแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำระยะยาว	4-172

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
รูปที่ 2-1	กรอบความเชื่อมโยงการใช้แบบจำลองต่าง ๆ และโครงข่ายการนำเสนอผลผ่านเว็บไซต์	2-8
รูปที่ 2-2	แผนภาพเวกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัญญาประดิษฐ์ การเรียนรู้แบบเครื่อง และการเรียนรู้เชิงลึก	2-10
รูปที่ 2-3	โครงสร้างของระบบโครงข่ายประสาทเทียม	2-11
รูปที่ 2-4	รูปแบบโครงสร้างของ ANFIS สำหรับโมเดล Fuzzy Sugeno แบบสองอินพุตที่มีกฎสี่ข้อ	2-13
รูปที่ 2-5	โครงสร้างแบบจำลองของ XGBoost	2-15
รูปที่ 2-6	ขั้นตอนในการตัดแต่งกิ่งต้นไม้โดยใช้ค่า Gain	2-16
รูปที่ 2-7	โครงสร้างของโครงข่ายประสาท Long Short-Term Memory (LSTM)	2-18
รูปที่ 2-8	แสดงหลักการทำงานของการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning)	2-19
รูปที่ 2-9	ตัวอย่างแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังที่ใช้ Markov Decision Process	2-21
รูปที่ 2-10	แผนที่แสดงลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่และเขื่อนหลัก	2-29
รูปที่ 2-11	แผนที่แสดงฝั้งน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	2-30
รูปที่ 2-12	เขื่อนภูมิพล จังหวัดตาก	2-31
รูปที่ 2-13	โค้งระดับ-พื้นที่-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล	2-34
รูปที่ 2-14	เขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์	2-35
รูปที่ 2-15	โค้งระดับ-พื้นที่-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์	2-37
รูปที่ 2-16	เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน จังหวัดพิษณุโลก	2-38
รูปที่ 2-17	โค้งระดับ-พื้นที่-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน	2-40
รูปที่ 2-18	เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ จังหวัดสระบุรี	2-41
รูปที่ 2-19	โค้งระดับ-พื้นที่-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	2-43
รูปที่ 2-20	แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่โครงการชลประทานในลุ่มน้ำปิงตอนล่าง	2-46
รูปที่ 2-21	แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่โครงการชลประทานในลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน	2-47
รูปที่ 2-22	แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่โครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง	2-48
รูปที่ 2-23	ไดอะแกรมแสดงโซนการส่งน้ำของโครงการชลประทานในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	2-49
รูปที่ 2-24	โค้งแพคเตอร์ปรับลดพื้นที่เพาะปลูกฤดูแล้งของเขื่อนภูมิพล	2-60
รูปที่ 2-25	โค้งแพคเตอร์ปรับลดพื้นที่เพาะปลูกฤดูแล้งของเขื่อนสิริกิติ์	2-61
รูปที่ 3-1	กรอบงานวิจัย	3-1

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 3-2	กรอบงานวิจัยในการศึกษาปริมาณความต้องการน้ำภาคการเกษตรกรรมในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	3-4
รูปที่ 3-3	กรอบงานวิจัยในการศึกษาศักยภาพน้ำเหลือใช้ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนกรอบงานวิจัยในการศึกษาศักยภาพน้ำเหลือใช้ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน	3-7
รูปที่ 3-4	กรอบการวิจัยในการพัฒนาแบบจำลองระบบการวางแผนและประเมินสถานการณ์น้ำในพื้นที่ศึกษา	3-11
รูปที่ 3-5	กรอบการวิจัยในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างในพื้นที่ศึกษา	3-12
รูปที่ 3-6	ระบบแหล่งน้ำของกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	3-17
รูปที่ 3-7	โครงสร้างของแบบจำลองแบบ Multi-Agent System สำหรับระบบปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่างเก็บน้ำในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	3-20
รูปที่ 3-8	กระบวนการตัดสินใจของวิธี Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG)	3-20
รูปที่ 3-9	โครงสร้างของ Actor Network ในระบบ DDPG	3-21
รูปที่ 3-10	โครงสร้างของ Critic Network ในระบบ DDPG	3-21
รูปที่ 3-11	แบบจำลอง Simulink ที่พัฒนาขึ้นสำหรับการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	3-22
รูปที่ 3-12	ผัง Actor-Critic Network โดยชุดเครื่องมือ Deep Learning Designer	3-23
รูปที่ 3-13	เส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายของเขื่อนภูมิพล	3-25
รูปที่ 3-14	เส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายของเขื่อนสิริกิติ์	3-25
รูปที่ 3-15	เส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน	3-26
รูปที่ 3-16	เส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	3-26
รูปที่ 3-17	การกำหนดระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่โดยไม่พิจารณาปัจจัยระยะเวลาในการเดินทางของน้ำ	3-28
รูปที่ 3-18	การกำหนดระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่โดยพิจารณาปัจจัยระยะเวลาในการเดินทางของน้ำ	3-29
รูปที่ 4-1	พื้นที่โครงการชลประทานในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	4-14
รูปที่ 4-2	พื้นที่โครงการชลประทานในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่แยกตามโซนการจัดส่งน้ำ	4-14
รูปที่ 4-3	ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2564	4-18
รูปที่ 4-4	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2564	4-18
รูปที่ 4-5	ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2564	4-18

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 4-6	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2564	4-19
รูปที่ 4-7	แผนการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2550-2564	4-21
รูปที่ 4-8	ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564	4-23
รูปที่ 4-9	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564	4-24
รูปที่ 4-10	แผนการระบายน้ำรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2553-2564	4-26
รูปที่ 4-11	ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2564	4-28
รูปที่ 4-12	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2564	4-29
รูปที่ 4-13	แผนการระบายน้ำรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2564	4-31
รูปที่ 4-14	แนวโน้มปริมาณการระบายน้ำและปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2562-2564	4-32
รูปที่ 4-15	แนวโน้มปริมาณการระบายน้ำและปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2562-2564	4-33
รูปที่ 4-16	อัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์รายวันจากผลการปฏิบัติงานจริง	4-39
รูปที่ 4-17	อัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์แยกตามปีน้ำและฤดูกาลจากผลการปฏิบัติงานจริง	4-40
รูปที่ 4-18	อัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำท่วมใหญ่ พ.ศ. 2554 จากผลการปฏิบัติงานจริง	4-40
รูปที่ 4-19	อัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำแล้ง พ.ศ. 2563 จากผลการปฏิบัติงานจริง	4-41
รูปที่ 4-20	อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่รายวันจากผลการปฏิบัติงานจริง	4-42
รูปที่ 4-21	อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่รายวันจากผลการปฏิบัติงานจริง	4-42
รูปที่ 4-22	อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่แยกตามปีน้ำและฤดูกาลจากผลการปฏิบัติงานจริง	4-43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 4-23	อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่แยกตามปีน้ำและ ฤดูกาลจากผลการปฏิบัติงานจริง	4-43
รูปที่ 4-24	อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ในปีน้ำท่วมใหญ่ พ.ศ. 2554 จากผลการปฏิบัติงานจริง	4-44
รูปที่ 4-25	อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ในปีน้ำแล้ง พ.ศ. 2563 จากผลการปฏิบัติงานจริง	4-44
รูปที่ 4-26	ปริมาณน้ำใต้ดินที่สูบไปใช้ในเขตพื้นที่ภาคกลางตอนบนระหว่างปี พ.ศ. 2563- 2564	4-48
รูปที่ 4-27	การนำเข้าพื้นที่โครงการชลประทานในแอปพลิเคชัน IrrisAT	4-50
รูปที่ 4-28	ปริมาณน้ำเก็บกักและปริมาณน้ำล้นของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนจากสถานการณ์ สมมติ 1	4-69
รูปที่ 4-29	ปริมาณน้ำเก็บกักและปริมาณน้ำล้นของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนจากสถานการณ์ สมมติ 2	4-70
รูปที่ 4-30	ปริมาณน้ำเก็บกักและปริมาณน้ำล้นของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนจากสถานการณ์ สมมติ 3	4-71
รูปที่ 4-31	ปริมาณน้ำเก็บกักและปริมาณน้ำล้นของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนจากสถานการณ์ สมมติ 4	4-72
รูปที่ 4-32	ปริมาณน้ำเก็บกักและปริมาณน้ำล้นของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนจากสถานการณ์ สมมติ 5	4-74
รูปที่ 4-33	การแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยและกำหนดโหนดความต้องการน้ำในการพัฒนาแบบจำลอง WEAP ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนบน	4-76
รูปที่ 4-34	เปรียบเทียบปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลที่ได้จากค่าสังเกตและจาก แบบจำลองรายเดือนหลังการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง	4-80
รูปที่ 4-35	เปรียบเทียบข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัด P.17 ที่ได้จากข้อมูลตรวจวัดและจาก แบบจำลองรายเดือนเฉลี่ยหลังการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง	4-81
รูปที่ 4-36	เปรียบเทียบข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัด W.4A ที่ได้จากข้อมูลตรวจวัดและจาก แบบจำลองรายเดือนเฉลี่ยหลังการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง	4-81
รูปที่ 4-37	เปรียบเทียบข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัด Y.17 ที่ได้จากข้อมูลตรวจวัดและจาก แบบจำลองรายเดือนเฉลี่ยหลังการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง	4-81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 4-38	เปรียบเทียบปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนสิริกิติ์ที่ได้จากค่าสังเกตและจากแบบจำลองรายเดือนหลังการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง	4-82
รูปที่ 4-39	เปรียบเทียบข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัด N.14A ที่ได้จากข้อมูลตรวจวัดและจากแบบจำลองรายเดือนเฉลี่ยหลังการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง	4-82
รูปที่ 4-40	เปรียบเทียบข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัด C.2 ที่ได้จากข้อมูลตรวจวัดและจากแบบจำลองรายเดือนเฉลี่ยหลังการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง	4-82
รูปที่ 4-41	ปริมาณการขาดน้ำในโซนการส่งน้ำลุ่มน้ำปิงตอนล่างจากผลการจำลองด้วยแบบจำลอง WEAP	4-84
รูปที่ 4-42	กระบวนการทำงานในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่วงเดี่ยวด้วยอัลกอริทึม XGBoost ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-86
รูปที่ 4-43	การตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่วงเดี่ยวด้วยอัลกอริทึม XGBoost ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-87
รูปที่ 4-44	การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายวันด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเขื่อนภูมิพล	4-96
รูปที่ 4-45	การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายวันด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเขื่อนสิริกิติ์	4-96
รูปที่ 4-46	การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเขื่อนภูมิพล	4-97
รูปที่ 4-47	การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเขื่อนสิริกิติ์	4-97
รูปที่ 4-48	การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายวันด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเขื่อนภูมิพล	4-105
รูปที่ 4-49	การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายวันด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเขื่อนสิริกิติ์	4-105

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 4-50	การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายวันด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดเชื่อมแควน้อยบำรุงแดน	4-106
รูปที่ 4-51	การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายวันด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดเชื่อมป่าสักชลสิทธิ์	4-106
รูปที่ 4-52	การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดเชื่อมภูมิพล	4-106
รูปที่ 4-53	การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดเชื่อมสิริกิติ์	4-107
รูปที่ 4-54	การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดเชื่อมแควน้อยบำรุงแดน	4-107
รูปที่ 4-55	การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดเชื่อมป่าสักชลสิทธิ์	4-107
รูปที่ 4-56	กระบวนการทำงานในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอย่างด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเชื่อมภูมิพลและเชื่อมสิริกิติ์ร่วมกัน	4-114
รูปที่ 4-57	การตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอย่างด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเชื่อมภูมิพลและเชื่อมสิริกิติ์ร่วมกัน	4-115
รูปที่ 4-58	ตัวอย่างการพัฒนาชุดคำสั่งของ Agent-BB แบบ M-file ในโปรแกรม MATLAB	4-125
รูปที่ 4-59	แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	4-125
รูปที่ 4-60	หน้าต่าง Interface ของแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	4-126
รูปที่ 4-61	ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของเชื่อมภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังและปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมาย	4-132

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 4-62	ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังและปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมาย	4-132
รูปที่ 4-63	ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังและปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมาย	4-133
รูปที่ 4-64	ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังและปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมาย	4-133
รูปที่ 4-65	ผลการเปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังและปริมาณการระบายน้ำตรวจวัด	4-134
รูปที่ 4-66	ผลการเปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังและปริมาณการระบายน้ำตรวจวัด	4-134
รูปที่ 4-67	ผลการเปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังและปริมาณการระบายน้ำตรวจวัด	4-135
รูปที่ 4-68	ผลการเปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังและปริมาณการระบายน้ำตรวจวัด	4-135
รูปที่ 4-69	ปริมาณน้ำเก็บกักและการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง	4-136
รูปที่ 4-70	ปริมาณน้ำเก็บกักและการระบายน้ำรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง	4-136
รูปที่ 4-71	ปริมาณน้ำเก็บกักและการระบายน้ำรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง	4-137
รูปที่ 4-72	ปริมาณน้ำเก็บกักและการระบายน้ำรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง	4-137
รูปที่ 4-73	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2	4-149

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 4-74	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2	4-149
รูปที่ 4-75	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2	4-150
รูปที่ 4-76	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2	4-150
รูปที่ 4-77	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2	4-151
รูปที่ 4-78	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2	4-152
รูปที่ 4-79	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2	4-153
รูปที่ 4-80	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2	4-153
รูปที่ 4-81	อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่รายวันจากผลการจำลองด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2	4-154
รูปที่ 4-82	อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่รายวันจากผลการจำลองด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2	4-155
รูปที่ 4-83	อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่แยกตามปีน้ำและฤดูกาลจากผลการจำลองด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2	4-155
รูปที่ 4-84	อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่แยกตามปีน้ำและฤดูกาลจากผลการจำลองด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบรูปแบบที่ 1.2	4-156
รูปที่ 4-85	อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ในปีน้ำท่วมใหญ่ พ.ศ. 2554 จากผลการจำลองด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2	4-156
รูปที่ 4-86	อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ในปีน้ำแล้ง พ.ศ. 2563 จากผลการจำลองด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2	4-157
รูปที่ 4-87	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8	4-163

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 4-88	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8	4-163
รูปที่ 4-89	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8	4-164
รูปที่ 4-90	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8	4-164
รูปที่ 4-91	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8	4-165
รูปที่ 4-92	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8	4-165
รูปที่ 4-93	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8	4-166
รูปที่ 4-94	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8	4-166
รูปที่ 4-95	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16	4-173
รูปที่ 4-96	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16	4-173
รูปที่ 4-97	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16	4-174
รูปที่ 4-98	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16	4-174
รูปที่ 4-99	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16	4-175
รูปที่ 4-100	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16	4-175
รูปที่ 4-101	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16	4-176
รูปที่ 4-102	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16	4-176

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ภาวะภัยแล้งที่ประเทศไทยเผชิญในปี พ.ศ. 2563 ได้ส่งผลกระทบต่อเป็นวงกว้างในหลายพื้นที่ของประเทศ รัฐบาลได้มีการออกประกาศเขตการให้ความช่วยเหลือผู้ประสบภัยพิบัติกรณีฉุกเฉินจากภัยแล้งเพื่อบรรเทาความเสียหายครอบคลุมกว่าหลายสิบจังหวัด (กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย, 2563) และสถานการณ์ทวีความรุนแรงขึ้นอันเนื่องมาจากปริมาณน้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ทั่วทั้งประเทศมีปริมาณน้ำใช้การเหลืออยู่ค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ซึ่งนับเป็นคลัสเตอร์ลุ่มน้ำหลักที่มีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศทั้งในส่วนของภาคเกษตรกรรมและภาคอุตสาหกรรมทั้งในระดับจุลภาคและระดับมหภาค สถานการณ์น้ำต้นทุนในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนหลักที่สำคัญ ได้แก่ เขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ซึ่งรายงานตัวเลขไว้โดยสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) เมื่อวันที่ 29 มกราคม พ.ศ. 2563 พบว่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำใช้การของอ่างเก็บน้ำมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 21.5% ของปริมาตรเก็บกักใช้การ หรือคิดเป็นปริมาตรน้ำเพียง 3,794 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งหากการคาดการณ์ว่าปีนี้จะเกิดฝนตกน้อยและมาช้ากว่าปกติ และปัจจัยความต้องการน้ำยังคงมีปริมาณสูง ย่อมหมายถึงผลกระทบที่จะมีต่อการใช้น้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งภาคเกษตรกรรมในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ที่มีพื้นที่กว่า 7 ล้านไร่ อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ปริมาณน้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำที่เหลือน้อยนับเป็นสัญญาณบ่งชี้ถึงภาวะภัยแล้งที่อาจจะเกิดขึ้น หรือแม้กระทั่งเหตุการณ์อุทกภัยครั้งใหญ่ที่เคยเกิดขึ้นในภูมิภาคนี้เมื่อปี พ.ศ. 2554 ที่ได้สร้างความเสียหายทางเศรษฐกิจจำนวนมหาศาล เป็นภาพสะท้อนถึงแนวทางการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำที่ผ่านมาที่จะต้องมีการทบทวนและปรับเปลี่ยนด้วยเทคนิคที่มีความทันสมัยและวิเคราะห์อย่างเป็นระบบ ไม่ว่าจะเป็นส่วนของงานด้านการวางแผน (Planning) และงานทางด้านปฏิบัติการ (Operation) รวมทั้งการจัดการระบบฐานข้อมูลทั้งในส่วนของข้อมูลตรวจวัดและข้อมูลพยากรณ์เพื่อนำมาสนับสนุนงานทางด้านการวางแผนและงานทางด้านปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำให้มีประสิทธิภาพ เกิดความมั่นคงและยั่งยืนในระยะยาว

ประเด็นเรื่อง “Reservoir Re-Operation” ได้มีการกล่าวถึงเป็นอย่างมากในเวทีสากลตั้งแต่ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา โดยเล็งเห็นความสำคัญของการพัฒนากระบวนการจัดการน้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำระยะยาว (Long-Term Water Supply Management) ความมั่นคงของน้ำ (Water Security) และความไม่แน่นอนของสภาวะอากาศ (Climate Resiliency) ด้วยเทคนิคที่ไม่ต้องอาศัยสิ่งก่อสร้างใหม่ (New Construction) ด้วยการพัฒนากลยุทธ์การบริหารจัดการปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่ในอ่างเก็บน้ำเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำต้นทุน (Additional Water Supply) แทน หรืออาจกล่าวได้ว่า “Reservoir Re-Operation” เป็นแนวทางการปรับเปลี่ยนวิธีการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operational Method) ในการเก็บกักน้ำ (Storing) และการกำหนดการปล่อยน้ำ (Releasing) ในช่วงเวลาและปริมาณที่เหมาะสมเพื่อสร้างสมดุลระหว่างวัตถุประสงค์ของการใช้น้ำจากอ่างเก็บน้ำ (Pablo Ortiz-Partida et al., 2016; Vonk, 2013) ยกตัวอย่างเช่น การพัฒนา

1 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

และออกแบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถสร้างสมดุลในการจัดสรรน้ำระหว่างวัตถุประสงค์ของการใช้น้ำที่มีความขัดแย้งกัน เช่น การควบคุมน้ำท่วม การอุปโภคบริโภค การเกษตรกรรม และการผลิตพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น

ยิ่งไปกว่านั้น โครงการวิจัยนี้ยังนับเป็นการพัฒนางานวิจัยให้สอดคล้องกับแผนแม่บทการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ 20 ปี (พ.ศ. 2561–2580) ในด้านการสร้างความมั่นคงของน้ำในภาคการผลิตภายใต้ยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561–2580) และเป็นการเสริมสร้างความมั่นคงด้านทรัพยากรน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ซึ่งมีความสำคัญต่อการพัฒนาทางเศรษฐกิจและสังคมของประเทศผ่านแนวคิดการพัฒนาเครื่องมือในการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ เพื่อเพิ่มศักยภาพของน้ำต้นทุนตลอดจนบรรเทาปัญหาอุทกภัยและภัยแล้งในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยมีดังนี้

1.2.1 ศึกษาและวิเคราะห์แนวทางการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำร่วมกันของเขื่อนหลักในปัจจุบัน (Current Multi-Reservoir Operation System) ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ประกอบด้วย เขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ และเขื่อนเจ้าพระยา โดยพิจารณาทั้งในส่วนของปัจจัยปริมาณน้ำต้นทุนทั้งในส่วนของน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน ปริมาณความต้องการน้ำ และแผนการจัดสรรน้ำร่วมกัน

1.2.2 จำลองสภาพฝน-น้ำท่าของพื้นที่ลุ่มน้ำตอนบนเพื่อศึกษาถึงลักษณะทางอุทกวิทยา ปัจจัยน้ำต้นทุน ปัจจัยความต้องการน้ำ สำหรับใช้ในการวิเคราะห์สถานการณ์การขาดน้ำในพื้นที่ปัจจุบัน

1.2.3 พยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่าง (Reservoir Inflow) ล่วงหน้ารายวันและรายเดือนของเขื่อนเก็บกักหลักด้วยหลักปัญญาประดิษฐ์และเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่องทั้งในลักษณะแบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่าเดี่ยว (Univariate Prediction Model) และแบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอ่า (Multivariate Prediction Model) เพื่อตั้งฐานข้อมูลพยากรณ์มาเป็นส่วนหนึ่งในการกำหนดการระบายน้ำจากเขื่อนหลักร่วมกันอย่างเป็นระบบ

1.2.4 พัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำโดยอาศัยหลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence-AI) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการกำหนดการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำในลักษณะของปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่า (Multiple Reservoir Re-operation System) รูปแบบใหม่อย่างเป็นระบบในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ ได้แก่ (1) แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Multi-reservoir System Operation by Reinforcement Learning, RL) และ (2) แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Constraint Programming, CP and Machine Learning, ML)

1.3 แผนการดำเนินการ

แผนการดำเนินงานวิจัยครอบคลุมระยะเวลา 10 เดือน ตั้งแต่วันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2564–วันที่ 16 เมษายน พ.ศ. 2565 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1-1

1 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ตารางที่ 1-1 แผนการดำเนินงานวิจัยและผลการดำเนินงานจริง

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินงาน (เดือน)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
วัตถุประสงค์ที่ 1 : ศึกษาและวิเคราะห์แนวทางการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำร่วมกันของเขื่อนหลักในปัจจุบัน (Current Multi-Reservoir Operation System) ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ประกอบด้วย เขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ และเขื่อนเจ้าพระยา โดยพิจารณาทั้งในส่วนของปัจจัยปริมาณน้ำต้นทุน ปริมาณความต้องการน้ำ และแผนการจัดสรรน้ำร่วมกัน										
1. รวบรวมข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำรายวันของเขื่อนหลักในพื้นที่ศึกษา ได้แก่ ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง ปริมาณการระเหยของน้ำ ปริมาณน้ำเก็บกัก ปริมาณการปล่อยน้ำ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ และข้อมูลอื่น ๆ	[Progress bar for activity 1]									
2. ศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยปริมาณน้ำต้นทุนทั้งในส่วนของน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน ปริมาณน้ำไหลเข้าทางด้านข้าง (Side Flow) ปัจจัยปริมาณความต้องการน้ำในทุกกิจกรรมการใช้น้ำในพื้นที่ศึกษา รวมทั้งศึกษาและทบทวนแผนการจัดสรรน้ำร่วมกันของกรมชลประทานและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	[Progress bar for activity 2]									
3. ศึกษาและวิเคราะห์แนวทางการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่างร่วมกันด้วยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำในอดีตถึงปัจจุบัน ตลอดจนประเมินประสิทธิผลของการปฏิบัติงานในการตอบสนองความต้องการน้ำทุกกิจกรรมการใช้น้ำทางตอนล่าง และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้	[Progress bar for activity 3]									
วัตถุประสงค์ที่ 2 : จำลองสภาพฝน-น้ำท่าของพื้นที่ลุ่มน้ำตอนบนเพื่อศึกษาถึงลักษณะทางอุทกวิทยา ปัจจัยน้ำต้นทุน ปัจจัยความต้องการน้ำ สำหรับใช้ในการวิเคราะห์สถานการณ์การขาดน้ำในพื้นที่ปัจจุบัน										
1. รวบรวมข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำรายวันของเขื่อนหลักในพื้นที่ศึกษา ข้อมูลความต้องการน้ำ ข้อมูลฝน ข้อมูลน้ำท่า และแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทานและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	[Progress bar for activity 4]									

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินงาน (เดือน)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2. การประยุกต์ใช้แบบจำลองระบบการวางแผนและประเมินสถานการณ์น้ำ (Water Evaluation and Planning Model, WEAP) เพื่อจำลองสภาพฝน-น้ำท่า และการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำตอนบน										
วัตถุประสงค์ที่ 3 : พยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่าง (Reservoir Inflow) ล่วงหน้ารายวันและรายเดือนของเขื่อนเก็บกักหลักด้วยหลักปัญญาประดิษฐ์และเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง ทั้งในลักษณะแบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่างเดี่ยว (Univariate Prediction Model) และแบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอ่าง (Multivariate Prediction Model) เพื่อตั้งฐานข้อมูลพยากรณ์มาเป็นส่วนหนึ่งในการกำหนดการระบายน้ำจากเขื่อนหลักร่วมกันอย่างเป็นระบบ										
1. การรวบรวมคลังข้อมูลที่เกี่ยวข้อง										
2. การคัดเลือกตัวแปรนำเข้าในแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ										
3. การพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในลักษณะของแบบจำลองการพยากรณ์อ่างเดี่ยวและแบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอ่าง										
วัตถุประสงค์ที่ 3 : พัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำโดยอาศัยหลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence-AI) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการกำหนดการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำในลักษณะของปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่าง (Multiple Reservoir Re-operation System) รูปแบบใหม่อย่างเป็นระบบในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่										
แนวทางที่ 1 แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Multi-reservoir System Operation by Reinforcement Learning, RL)										
1. พัฒนาแบบจำลองการพัฒนาแบบจำลองเชิงแนวคิด										
2. พัฒนาและออกแบบโครงสร้างแบบจำลอง (Model Formulation) โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning)										
3. ทำการจำลองผลการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำระยะยาว										

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินงาน (เดือน)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
แนวทางที่ 2 การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Constraint Programming, CP & Machine Learning, ML)											
1. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าปริมาณการระบายน้ำที่เหมาะสมในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง	■										
2. ทำการจำลองผลการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำระยะยาวในสถานการณ์ปัจจุบันด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Constraint Programming and Machine Learning) และทำการศึกษเปรียบเทียบับผลการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปัจจุบัน									■		
จัดทำรายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์และจัดอบรมถ่ายทอดเทคโนโลยี										■	
จัดทำรายงานข้อเสนอเชิงวิชาการในการปรับปรุงเกณฑ์และระบบการบริหารเขื่อนจากผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัย										■	

หมายเหตุ : ■ แผนการดำเนินงาน ■ ผลการดำเนินงานจริง

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 กลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ (Greater Chao Phraya River Basin) ถูกนิยามขึ้นเฉพาะสำหรับใช้ใน งานวิจัยนี้เพื่ออธิบายถึงการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำร่วมกันในพื้นที่คลัสเตอร์ลุ่มน้ำหลักในพื้นที่ทางตอนกลาง ของประเทศไทยประกอบด้วย (1) ลุ่มน้ำปิง (2) ลุ่มน้ำวัง (3) ลุ่มน้ำยม (4) ลุ่มน้ำ่าน (5) ลุ่มน้ำเจ้าพระยา (6) ลุ่ม น้ำท่าจีน (7) ลุ่มน้ำป่าสัก และ (8) ลุ่มน้ำสะแกกรัง

1.4.2 แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่อาศัย (1) แบบจำลองการปฏิบัติการระบบ อ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Multi-reservoir System Operation by Reinforcement Learning, RL) และ (2) แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Constraint Programming, CP & Machine Learning, ML) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อหารูปแบบการระบายน้ำครอบคลุมเฉพาะ เชื่อนเก็บกัก (Storage Dam) เท่านั้นประกอบด้วย (1) เชื่อนภูมิพล (2) เชื่อนสิริกิติ์ (3) เชื่อนแควน้อยบำรุงแดน และ (4) เชื่อนป่าสักชลสิทธิ์

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

หลังงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จคาดว่าจะมีเครื่องมือรูปแบบใหม่ที่จะช่วยในการตัดสินใจในลักษณะของการ ปฏิบัติการการระบบอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่าง (Multiple Reservoir Re-Operation System) ร่วมกันอย่างเป็น ระบบในกลุ่มเจ้าพระยาใหญ่ ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยอาศัยเทคนิคการจำลองระบบ (Simulation Technique) ร่วมกับ เทคนิคการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization Technique) โดยอาศัยหลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) มาใช้สำหรับปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ได้แก่ (1) แบบจำลองการปฏิบัติการระบบ อ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Multi-reservoir System Operation by Reinforcement Learning, RL) และ (2) การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบ ข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Constraint Programming, CP & Machine Learning, ML) โดย หน่วยงานภาครัฐได้แก่ กรมชลประทานและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยซึ่งเป็นหน่วยงานปฏิบัติสามารถนำ แบบจำลองและผลสรุปจากงานวิจัยกำหนดแนวทางการจัดสรรน้ำของระบบอ่างเก็บน้ำในกลุ่มเจ้าพระยาใหญ่ที่ เหมาะสมสอดคล้องกับสถานะของน้ำต้นทุน และความต้องการน้ำท้ายเขื่อนที่เปลี่ยนแปลงไปในปัจจุบันโดยอาศัย หลักทฤษฎีสมัยใหม่มาสนับสนุน อีกทั้งสำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติซึ่งเป็นหน่วยงานควบคุมสามารถนำ การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้ประกอบการดำเนินงานเพื่อวางแผนการ ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำและกำหนดนโยบายการบริหารเขื่อนทั้งในช่วงสถานการณ์ปกติในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่อย่าง เป็นระบบ รวมทั้งลดโอกาสเสี่ยงในการบริหารจัดการน้ำในช่วงสภาวะวิกฤติทั้งจากภัยแล้งและอุทกภัย นอกจากนี้ กลุ่มผู้ใช้น้ำทั้งในภาคเกษตรกรรมและนอกภาคเกษตรกรรมในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ได้รับน้ำ เพียงพอสำหรับการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ทำให้ผลผลิตในภาคการเกษตรกรรม ภาคการอุตสาหกรรม ขยายตัวเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มการเจริญเติบโตด้านเศรษฐกิจของประเทศ และลดความเสียหายจากปัญหาน้ำ

1 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุ่นระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ท่วมและน้ำแล้งจากแนวทางการบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น ยังเป็นการเพิ่มศักยภาพความสามารถของผู้ปฏิบัติงานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย กรมชลประทาน หรือผู้สนใจทั่วไปจากกิจกรรมของโครงการวิจัยในรูปของการจัดประชุมเพื่อนำเสนอแนวคิด หลักการ และข้อสรุปจากงานวิจัยเมื่องานวิจัยบรรลุผลสำเร็จ และฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการในการใช้งานเครื่องมือในการวิเคราะห์เพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้จากผลการวิจัยสู่ผู้ปฏิบัติงาน (Capacity Building) โดยจะเชิญผู้แทนจากหน่วยงานภาคปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องในด้านการจัดการทรัพยากรน้ำมาแลกเปลี่ยนความคิดเห็นและเพิ่มองค์ความรู้ที่ทันสมัยที่ได้จากงานวิจัยนี้ และจะเผยแพร่ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในที่ประชุมวิชาการหรือวารสารทางวิชาการทั้งในระดับชาติและระดับนานาชาติหลังดำเนินการวิจัยแล้วเสร็จ

1 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม

2.1 หลักปัญญาประดิษฐ์ในงานบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (Artificial Intelligence for Water Resource Management)

หลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ได้รับความนิยมน้อยมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานด้านการพยากรณ์ข้อมูลทางด้านทรัพยากรน้ำในปัจจุบันแทนที่แบบจำลองทางกายภาพ (Physical Model) และแบบจำลองทางสถิติ (Statistical Model) ที่ใช้กันอยู่เดิม เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่สามารถดำเนินการและประเมินผลได้ง่ายและเร็วทั้งในส่วนของการปรับเทียบแบบจำลองและการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง และยังสามารถพัฒนาขึ้นมาโดยอาศัยข้อมูลนำเข้าน้อย นอกจากนี้ ยังพบว่าให้ค่าประสิทธิภาพในการพยากรณ์สูงกว่า และมีความซับซ้อนน้อยกว่าแบบจำลองทางกายภาพทั่วไป ปัจจุบันได้มีการนำอัลกอริทึมในการเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning) มาประยุกต์ใช้เพื่อการคำนวณตัวแปรต่าง ๆ ทางอุทกวิทยา (Hydrological Parameters) เช่น ระดับน้ำในเขื่อนและปริมาณน้ำไหลเข้าในอดีตเพื่อคำนวณระดับน้ำในเขื่อนในช่วงเวลาข้างหน้า ซึ่งถูกรายงานว่าให้ค่าประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูงในการพยากรณ์ทั้งระยะสั้นและระยะยาว (Mosavi et al., 2018) หากแบบจำลองการพยากรณ์ข้อมูลเหล่านี้มีความแม่นยำเพียงพอก็จะสามารถนำไปใช้ในต่อยอดในการบริหารแผนการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Reoperation Scheme) ได้

เทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่องที่ใช้การพยากรณ์ค่าตัวแปรต่าง ๆ ทางด้านอุทกวิทยามีมากมาย แต่จะยกตัวอย่างเทคนิคสำคัญต่าง ๆ ดังนี้

(1) เทคนิคโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ (Artificial Neural Networks, ANNs) เป็นเทคนิคจำลองระบบประสาทของมนุษย์บนคอมพิวเตอร์ โดยโครงข่ายประสาทมีการประมวลผลกระจายอยู่ในโครงสร้างเป็นชั้น ๆ ซึ่งจะเรียนรู้แบบแผนพฤติกรรมจากชุดข้อมูลที่ป้อนให้โดยอาศัยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในโครงข่ายเพื่อผลการพยากรณ์ที่แม่นยำ ANNs เป็นเทคนิคพื้นฐานและยังคงมีการใช้ในผลงานวิจัยบ้างในปัจจุบัน เช่น การพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าของเขื่อน (El-Shafie & Nouredin, 2011; Valipour, Banihabib, & Behbahani, 2013) การพยากรณ์ปริมาณน้ำฝน เป็นต้น

(2) เทคนิคอนุกรมฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS) (Jang, 1993) เป็นการผสมผสานระหว่างโครงข่ายประสาทประดิษฐ์และระบบฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) เข้าด้วยกัน เทคนิคนี้ได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการพยากรณ์ตัวแปรต่าง ๆ เช่น การพยากรณ์ระดับน้ำในเขื่อน (Chang & Change, 2006; Hipni et al., 2013) การบริหารจัดการน้ำ (Valizadeh & El-Shafie, 2013) และการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝน

(3) แบบจำลองอนุกรมเวลา Auto-Regressive Integrated Moving Average, ARIMA เป็นเทคนิคที่ใช้ในการพยากรณ์ข้อมูลที่เป็นอนุกรมเวลา (Time Series Data) โดยเฉพาะ โดยอาศัยพฤติกรรมของข้อมูลในอดีตเพื่อกำหนดรูปแบบปัจจุบันรวมถึงอนาคต เทคนิคนี้เป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการสร้างแบบจำลองการพยากรณ์เกี่ยวกับตัวแปรน้ำ เพราะไม่ต้องคำนึงถึงปัจจัยแวดล้อมภายนอกมาก ตัวอย่างการ

นำไปใช้ในงานวิจัยเช่น การพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Inflow) ในแต่ละช่วงเวลา (Valipour, Banihabib, & Behbahani, 2013; Rath, Samantaray, Bhoi, & Swain, 2017) หรือพยากรณ์ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำที่ไหลเข้า (Mean Inflow) ในแต่ละช่วงเวลา (Rath, Samantaray, Bhoi, & Swain, 2017) เป็นต้น

(4) เทคนิค Support Vector Machine (SVM) นับเป็นเทคนิคที่เริ่มได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากมีความแม่นยำมากเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ เทคนิคนี้เป็นการหา Hyperplane ที่แบ่งข้อมูลที่ตีที่สุุด ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น การพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าของเขื่อนจากปัจจัยต่าง ๆ ในชุดข้อมูล (Hipni et al., 2013; Babaei, Moeini, & Ehsanzadeh, 2019) เป็นต้น

(5) เทคนิค Extreme Gradient Boosting (XGBoost) เป็นเทคนิคที่พัฒนาจาก Gradient Boosting (8) (Chen & Guestrin, 2016) โดยเป็น Ensemble Learning Method เพื่อใช้ Classification และ Regression เทคนิคนี้จะสร้าง Learner หลาย ๆ ตัวและเรียนรู้เพื่อข้อผิดพลาด (Error) ของแต่ละ Learner และนำข้อผิดพลาดเหล่านั้นมาปรับแก้ไข ส่งผลให้แบบจำลองมีความแม่นยำสูง เทคนิคนี้เริ่มถูกนำมาใช้ในการพยากรณ์ต่าง ๆ เช่น การพยากรณ์ปริมาณการใช้ไฟฟ้า หรือแม้แต่การพยากรณ์ราคาหุ้น เป็นต้น ถึงแม้ว่ายังไม่มิตัวอย่างงานวิจัยทางด้านน้ำมากนัก แต่ด้วยลักษณะของข้อมูลของปริมาณน้ำไหลเข้าเป็นอนุกรมเวลา (Time Series) จึงสามารถปรับใช้เทคนิคนี้ในการพยากรณ์ได้

ผลงานวิจัยส่วนใหญ่นั้นไม่ได้อาศัยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่องเพียงเทคนิคเดียว แต่สร้างแบบจำลองการพยากรณ์ตัวแปรทางน้ำจากหลากหลายเทคนิค เปรียบเทียบค่าความแม่นยำ และหาแบบจำลองพยากรณ์ที่ดีที่สุด ทั้งนี้ล้วนขึ้นอยู่กับปริมาณข้อมูลที่มีอยู่ ลักษณะของข้อมูล ความสมบูรณ์ของข้อมูล การออกแบบ Input และ Output ของแบบจำลอง เป็นต้น ดังที่กล่าวมาข้างต้นว่า อัลกอริทึมทางการเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning) สามารถนำไปคำนวณหาและพยากรณ์ค่าตัวแปรต่าง ๆ โดยตัวแปรนั้นจะสามารถถูกนำไปใช้ต่อยอดในกระบวนการอื่น ๆ ได้

2.2 เทคนิคการหาค่าที่ดีที่สุดกับการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ (Optimization Techniques for Reservoir Management)

การบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Management) หมายถึงกระบวนการดำเนินการอย่างเป็นขั้นตอนเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของอ่างเก็บน้ำตามที่ได้ตั้งไว้ หลักการสำคัญในการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำนั้นจะต้องมองประเด็นของการบริหารจัดการด้านอุปทานน้ำในอ่าง (Water Supply Side Management) ควบคู่ไปกับการบริหารจัดการด้านอุปสงค์น้ำ (Water Demand Side Management) ซึ่งโจทย์หลักของการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำที่สำคัญก็คือทำอย่างไรจึงจะทำให้อุปทานของน้ำที่มีอยู่สามารถตอบสนองกับอุปสงค์น้ำในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้เป็นที่พอใจ ทั้งนี้ ประเด็นของประสิทธิภาพ (Efficiency) ความเสมอภาค (Equity) และความยั่งยืน (Sustainability) จะต้องดึงมาประกอบการพิจารณาเพื่อให้บรรลุถึงเป้าหมายของการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำดังกล่าว

โดยทั่วไปแล้ว อ่างเก็บน้ำจะดำเนินการภายใต้เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operating Rule) ซึ่งเครื่องมือชี้แนวทางในการเก็บกักน้ำและปล่อยน้ำไปใช้ตามวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ของโครงการ การตัดสินใจปล่อยน้ำจากอ่างเก็บน้ำในช่วงเวลาใด ๆ ให้เหมาะสมจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่ในอ่าง (Available Water) ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่าง (Inflow) ปริมาณความต้องการน้ำ (Demand) และช่วงเวลาในปฏิบัติการ (Operating Time) ประกอบการพิจารณา เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่ได้รับความนิยม ได้แก่ โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging (Hedging Rule) เกณฑ์การปล่อยน้ำเชิงเส้น (Linear Release Rule) เกณฑ์การปล่อยน้ำที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimum Release Using Optimization Technique) เป็นต้น เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำบางประเภทพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของความรู้สึก (Intuition and Common Sense) ยกตัวอย่างเช่น การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่างที่พยายามจะจัดสรรน้ำให้เพียงพอกับความต้องการน้ำในกิจกรรมต่าง ๆ สูงสุดที่จำเป็นจะต้องลดหรือควบคุมให้เกิดการการสูญเสียน้ำจากอ่างเก็บน้ำน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ หรือในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับวัตถุประสงค์เพื่อการชลประทาน ผู้ปฏิบัติการอาจปล่อยน้ำเพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดการขาดน้ำรุนแรงกับพืชบางชนิดและยอมให้เกิดความเสี่ยงที่จะเกิดการขาดน้ำกับพืชที่จะปลูกในอนาคต เป็นต้น อ่างเก็บน้ำจำนวนมากยังออกแบบขึ้นมาเพื่อเก็บกักน้ำไว้ใช้ในหลาย ๆ ปีข้างหน้า ด้วยเหตุนี้ นโยบายในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำจึงขึ้นอยู่กับเป้าหมายในระยะยาวที่ตั้งไว้ และการคาดการณ์ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอ่างเก็บน้ำ (Water Availability) จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลระยะยาวในการวิเคราะห์ นอกจากนี้ การคาดการณ์ปริมาณความต้องการน้ำในอนาคตยังเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อกำหนดการปล่อยน้ำจากอ่างเก็บน้ำในระยะยาวให้เหมาะสมนั่นเอง (Jain & Singh, 2003)

การพัฒนาเทคนิคการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำโดยใช้แนวทางการสร้างแบบจำลองการคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองสถานการณ์ควบคู่กับเทคนิคการหาค่าที่ดีที่สุด (Simulation–Optimization Techniques) เป็นแนวทางที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย (Fang et al., 2014; Fayaed et al., 2013; Rani & Moreira, 2010; Wurbs, 1993) และยังมีความท้าทายในเชิงของผลลัพธ์การคำนวณที่ยังอยู่ภายใต้สภาวะที่มีความไม่แน่นอน ทั้งนี้เนื่องจากระบบการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำมีความซับซ้อนสูง มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลากหลายมิติ ทำให้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาได้มีการนำเอาเทคนิคคอมพิวเตอร์ด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) มาประยุกต์ใช้งานมากขึ้น เช่น การพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ (Yang et al., 2017; Rieker & Labadie, 2012) การเตือนภัยน้ำท่วม (Campolo et al., 1999) การประเมินความต้องการน้ำ (Bennett et al., 2013; Liu, 2003) โดยเฉพาะการนำเอาหลักของฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการปล่อยน้ำจากอ่างเก็บน้ำ (Chmielowski, 2016; Chang et al., 2002; Moeini et al., 2001; Cheng & Chau, 2001; Liou & Lo, 2005) งานวิจัยส่วนใหญ่ได้แปลงปัจจัยที่มีความสำคัญในระบบ แต่ไม่สามารถตรวจวัดหรือประเมินออกเป็นค่าตัวเลขได้ชัดเจน ข้อมูลเหล่านี้จะถูกแปลงเป็นข้อมูล Fuzzy Set และนำหลักการควบคุมแบบ Fuzzy Rule–Based Control มาออกแบบระบบควบคุมที่มีความซับซ้อนได้ง่ายและผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือ อย่างไรก็ตาม Jang et al. (1993) ได้นำเทคนิค Artificial Neural Network (ANN) มาใช้ในการสร้างข้อมูล Fuzzy Set และกำหนด Rule–Based

System เพื่อให้ระบบควบคุมมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเรียกว่า Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) ทั้งนี้ ได้มีงานวิจัยที่นำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้ในหลาย ๆ ด้าน (Hsu et al., 2015; Choong et al., 2015; Wei & Hsu, 2008)

เทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning, RL) (Richard, 2017) เป็นกระบวนการเรียนรู้แบบหนึ่งของกการการเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning) ซึ่งมีจุดเด่นอยู่ที่การเรียนรู้แบบลองผิดลองถูกโดยไม่จำเป็นต้องมีข้อมูลมาให้เรียนรู้ องค์ประกอบหลักมีอยู่ 2 ส่วน คือ (1) Agent และ (2) Environment โดยที่ Agent จะทำหน้าที่สั่งการให้ Environment ทำงานโดยการส่ง Action บางอย่างไปให้ Environment และ Environment จะส่ง State กลับไปที่ Agent เพื่อให้ Agent ตัดสินใจว่าจะส่ง Action ใดที่มีค่า Reward สูงสุดให้ Environment โครงสร้างภายในของ RL จะมีกระบวนการเรียนรู้แบบ Q Learning ในสมการ ในการนี้ Mahootchi et al. (2006) และ Wenwu et al. (2018) ได้ประยุกต์ RL ในการประมาณค่าที่ดีที่สุดในการบริหารจัดการน้ำโดยกำหนดปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำแทน State และการปล่อยน้ำ (Release) ในแต่ละรูปแบบเป็น Action และใช้ Q Learning ในการหาค่า Value Function หรือค่าสูงสุดในแต่ละ State ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า RL ให้ค่าความน่าเชื่อถือได้ของการปล่อยน้ำสูงกว่าแนวทางของ Stochastic Dynamic System

การใช้การโปรแกรมเชิงคณิตศาสตร์ (Mathematical Programming) เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น โปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) และโปรแกรมไม่เชิงเส้น (Non-Linear Programming) แต่ในปัจจุบันการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำจะอยู่ภายใต้ความไม่แน่นอน ดังนั้น งานวิจัยส่วนใหญ่จะเริ่มนำการโปรแกรมเชิงเส้น (Kalbali et al., 2015; Wang et al., 2015) และการโปรแกรมเชิงสุ่ม (Stochastic Programming) (Prékopa, 2013; Bravo & Gonzalez, 2009; Housh et al., 2013; Yan & Li, 2018; Zhang et al., 2018) มาใช้ และสามารถเรียกปัญหาเหล่านี้ว่า Constraint Satisfaction Problems (Rossi et al., 2006) โดยสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้โปรแกรมเชิงข้อจำกัด (Constraint Programming) (Rossi et al., 2006) เพื่อนำมาแก้ไขเพื่อหาค่าที่เหมาะสมได้ โปรแกรมเชิงข้อจำกัดสามารถรองรับและแก้ปัญหาได้หลายรูปแบบ เนื่องด้วยโปรแกรมเชิงข้อจำกัดนั้นสามารถกำหนดข้อจำกัด (Constraint) ได้หลายประเภท เช่น ข้อจำกัดที่เป็นตัวเลข ข้อจำกัดเชิงเส้น และข้อจำกัดที่เป็นตรรกะ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ จึงพบว่าหลายงานวิจัยได้แสดงให้เห็นว่าการใช้โปรแกรมเชิงข้อจำกัดสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำได้

การพัฒนาแนวทางเพิ่มปริมาณน้ำต้นทุนให้กับอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการไม่ใช้สิ่งก่อสร้าง (Non-Structural Approach) เป็นมาตรการสำคัญอันหนึ่งในการลดความเสี่ยงจากภาวะความแห้งแล้ง อย่างไรก็ตาม การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operation) มีความซับซ้อนเป็นอันมาก โดยเฉพาะการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของอ่างเก็บน้ำ เนื่องจากมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายด้าน เช่น สภาพภูมิอากาศ ภูมิประเทศ สภาพอุทกวิทยา รวมถึงปัจจัยทางด้านสังคม เป็นต้น นักวิจัยจำนวนมากได้พยายามที่จะพัฒนาเครื่องมือและเทคนิควิธีการเพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจให้กับผู้บริหารในการกำหนดกลยุทธ์การระบายน้ำที่เหมาะสมที่สุด โดยรูปแบบการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำจำเป็นต้องใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ การปฏิบัติการ

อ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) มีการประยุกต์ใช้มานานกว่า 20 ปี จนถึงปัจจุบัน โดยแรกเริ่มนั้นเป็นการนำเทคนิค AI เช่น Expert System, Fuzzy Logic, Neural Networks, Data Mining, Genetic Algorithms หรือ Intelligent Agents มาประยุกต์ร่วมกับแบบจำลองทางด้านคณิตศาสตร์ (Mathematic Model) (Yeh, 1985) ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยหลากหลายด้าน เช่น งานวิจัยเชิงนโยบาย ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Chang, Chen, & Chang, 2005; Jamshid Mousavi, Anzab, Asl-Rousta, & Kim, 2017; Kangrang & Chaleeraktragoon, 2007; Labadie, 2004; Mehta & Jain, 2009; Mokhtar, Ishak, & Norwawi, 2016; Pinthong, Das Gupta, Babel, & Weesakul, 2008; Rieker & Labadie, 2012; Wenwu, Mbanze, & Xueying, 2018) งานด้านพัฒนาแบบจำลองสำหรับปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ รวมถึงงานที่เกี่ยวข้องปัจจัยทางด้านอุทกวิทยา (Allawi et al., 2018; Bai, Chen, Xie, & Li, 2016; Bai, Xie, Wang, & Li, 2016; Kale, Nagdeve, & Wadatkar, 2012; Taghi Sattari, Yurekli, & Pal, 2012) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำยังมีความซับซ้อนหลายด้าน อันเนื่องมาจากลักษณะเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายด้านทั้งเชิงกายภาพ ชีวภาพ และเชิงสังคม ซึ่งไม่สามารถใช้เทคนิคหรือแนวทางใดทางหนึ่งมาบริหารจัดการได้

การพัฒนากลยุทธ์ในการระบายน้ำที่เหมาะสมในช่วงน้ำหลากและน้ำแล้งเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ Yeh (1985) กล่าวว่า ระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่ดีต้องมีความยืดหยุ่น มีระบบที่สามารถคาดการณ์สถานการณ์ล่วงหน้าได้อย่างแม่นยำ ระบบมีความน่าเชื่อถือสามารถตอบสนองต่อความต้องการได้อย่างทั่วถึง ซึ่ง Fuzzy Logic แทนความยืดหยุ่นในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ ANFIS เป็นการผสมผสานจุดเด่นในเรื่อง ANNs เข้ามาในโครงสร้างของ Fuzzy Logic น่าจะทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

2.3 เทคนิคการจำลองระบบกับการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ (Simulation Techniques for Reservoir Management)

ในปัจจุบันเทคนิคการจำลองระบบ (Simulation Technique) ได้รับความนิยมนอย่างมากในการศึกษาและวิจัยในหลากหลายสาขาวิชา รวมถึงในงานด้านทรัพยากรน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่มีการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์และอาศัยเทคนิคการจำลองระบบเพื่อทดสอบการปฏิบัติการตามแผนกลยุทธ์ต่าง ๆ สำหรับนำมาปรับใช้และเพิ่มประสิทธิภาพของการปฏิบัติงานจริงให้ดียิ่งขึ้น โดยทั่วไปแบบจำลองระบบที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำนั้นจะอาศัยหลักการสมดุลของน้ำในอ่างซึ่งประกอบไปด้วยการคำนวณปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างสุทธิ ปริมาณน้ำที่ปล่อยออกจากอ่างสุทธิ และการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำเก็บกัก นอกจากนี้ อาจเกี่ยวข้องกับการประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์อันเนื่องมาจากความเสียหายจากน้ำท่วม ผลประโยชน์ที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำ ผลประโยชน์จากการชลประทาน และอื่น ๆ เป็นต้น อาจกล่าวได้ว่าแนวคิดเรื่องการจำลองระบบค่อนข้างง่ายในการทำความเข้าใจมากกว่าแนวคิดของแบบจำลองอื่น ๆ แบบจำลองระบบสามารถเลียนแบบได้ค่อนข้างเหมือนจริงทั้งในแง่ลักษณะของระบบอ่างเก็บน้ำ ตลอดจนแนวทางในการปฏิบัติการ นอกจากนี้ ยังมีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนตัวแปรที่เกี่ยวข้องอีกด้วย ในขณะที่เดียวกันเวลาในการเตรียมข้อมูลป้อนเข้า ทดสอบแบบจำลอง และการคำนวณอื่น ๆ ยังน้อย

กว่าของแบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุด ยิ่งไปกว่านั้นผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองยังสามารถ Trade-Off โดยเฉพาะอย่างอ่างเก็บน้ำแบบอเนกวัตถุประสงค์ รวมถึงเทคนิคการจำลองระบบยังมีประโยชน์ในการวิเคราะห์หาโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่ดีที่สุดอีกด้วย นอกจากนี้ ในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่เวลาจริงปัจจุบัน (Real Time Operation) ยังต้องการเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำโดยเฉพาะ ซึ่งเทคนิคการจำลองระบบจะช่วยให้สามารถสร้างเกณฑ์การปฏิบัติการดังกล่าวได้ค่อนข้างง่าย ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์จำนวนมากได้ถูกพัฒนาขึ้นและนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ออกแบบ วางแผนและปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำอย่างแพร่หลายมาจนถึงปัจจุบัน ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเตรียมข้อมูลเพื่อใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้าของซอฟต์แวร์หนึ่งสำหรับปัญหาหนึ่ง ๆ ยังสามารถดัดแปลงได้ง่าย ตลอดจนยังสามารถประเมินผลของการออกแบบและตัดสินใจปฏิบัติการกับทางเลือกอื่น ๆ ได้เร็วอีกด้วย

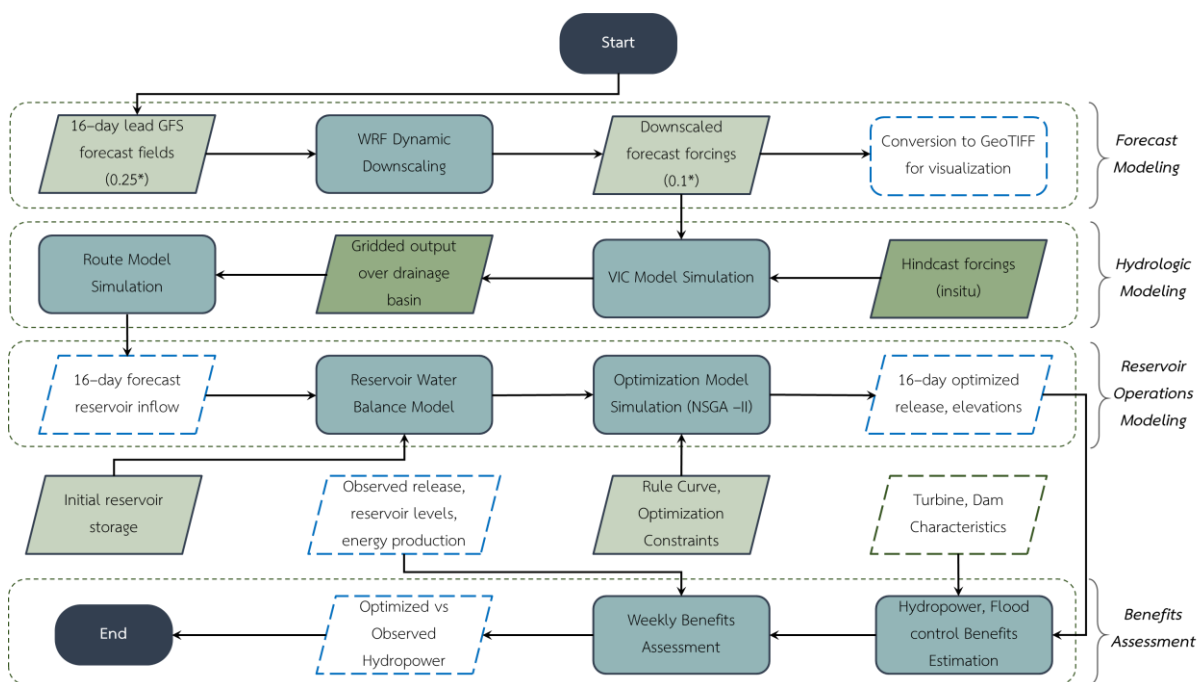
ตัวอย่างของการพัฒนาแบบจำลองระบบนั้นเกิดขึ้นจำนวนมากในช่วงก่อนปี ค.ศ. 1950 โดยเชื่อว่าถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย Harvard Water Program สำหรับแบบจำลองระบบอ่างเก็บน้ำที่มีชื่อเสียงและใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นอย่างมากคือ แบบจำลอง HEC-5 ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย Hydrologic Engineering Center นอกจากนี้ ยังมีแบบจำลองอื่น ๆ ที่ค่อนข้างมีชื่อเสียงอื่น ๆ เช่น แบบจำลองเอเคอร์ (Acres Model) แบบจำลองการสังเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำในลำน้ำและการควบคุมอ่างเก็บน้ำ (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation Model, SSARR) แบบจำลองระบบแม่น้ำปฏิสัมพันธ์ (Interactive River System Operation, IRIS) และแพ็คเกจการวิเคราะห์สิทธิการใช้น้ำ (Water Right Analysis Package, WRAP) Lund และ Ferrera ได้ทำการศึกษาระบบอ่างเก็บน้ำในแม่น้ำ Missouri และพบว่าแบบจำลองระบบใช้ได้ดีกว่าสมการการถดถอยในการกำหนดและปรับปรุงเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ นอกจากนี้ Jain และ Goel ในปี ค.ศ. 1996 ยังได้นำเสนอแบบจำลองเพื่อการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเพื่อการอนุรักษ์ทั้งระบบโดยอาศัยคั้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะมีแบบจำลองเพื่อจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำทั้งระบบจำนวนมาก ความต้องการที่จะพัฒนาแบบจำลองระบบอ่างเก็บน้ำของแต่ละอ่างยังเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อคงไว้ซึ่งลักษณะเฉพาะของอ่างเก็บน้ำนั้น ๆ

แบบจำลองระบบอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่าง (Multireservoir Simulation Models) ซึ่งพัฒนาขึ้นเพื่อประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นจากนโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบต่าง ๆ นั้นนับได้ว่ามีประโยชน์อย่างมากหากนำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลทั้งหมดมาศึกษาเพื่อเปรียบเทียบและประเมินผลที่ได้ซึ่งสามารถทำได้โดยการคำนวณค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าความแปรปรวน (Variance) ตลอดจนการกระจายตัวทางด้านเวลา (Time Distribution) ของดัชนีแสดงผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Performance Indicators) เช่น ปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Storage Volume) ปริมาณน้ำที่ปล่อย (Release) ผลประโยชน์ที่ได้รับ (Associated Benefit) หรือความเสียหายที่เกิดขึ้น (Losses) เป็นต้น ซึ่งดัชนีชี้วัดเหล่านี้สามารถนำมาใช้เพื่อประเมินผลและเปรียบเทียบนโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้ การประเมินผลอาจปรากฏอยู่ในรูปของค่าดัชนีความน่าเชื่อถือได้ (Reliability Index) ดัชนีวัดความรุนแรง (Vulnerability Index) และดัชนีวัดความฟื้นตัวจากความล้มเหลว (Resiliency Index) เป็นต้น อาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองระบบของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำนั้นเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการประเมินผลกระทบ

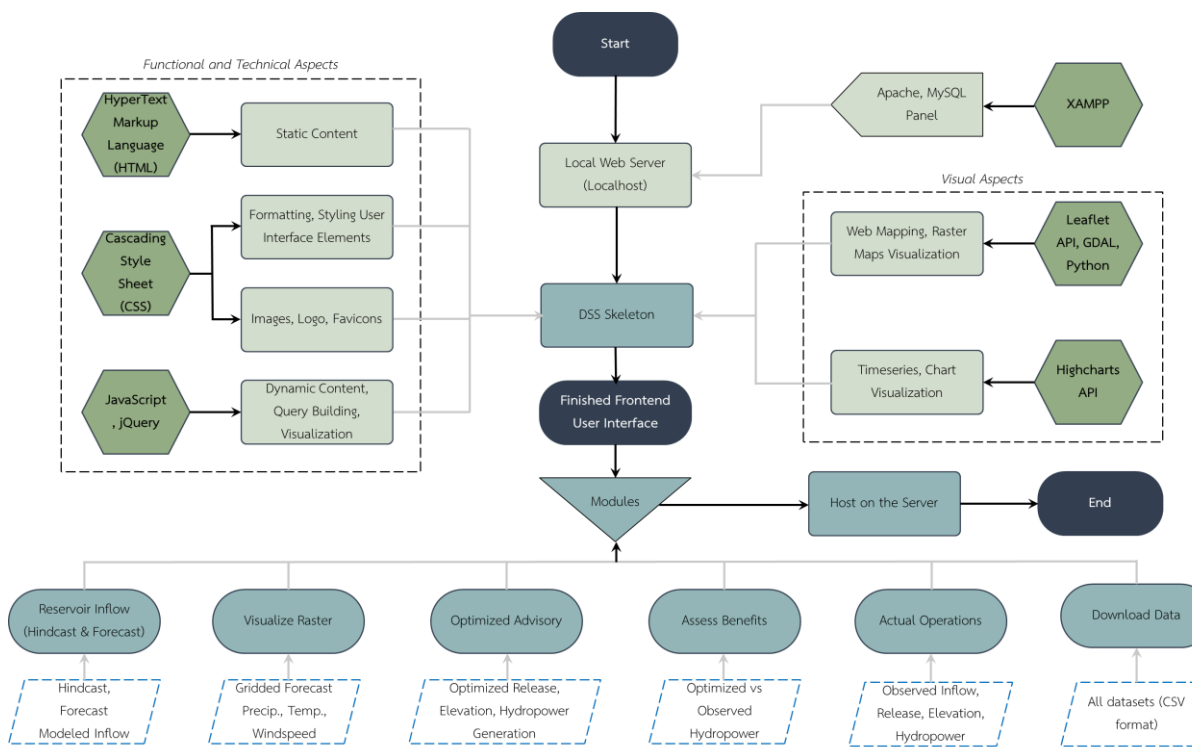
ที่จะเป็นไปได้ของนโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบต่าง ๆ ตลอดจนสามารถทำนายสถานการณ์ของระบบในอนาคต เมื่อกำหนดสถานการณ์สมมติ (Scenarios) ทั้งในรูปของนโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ และผลการคาดการณ์ข้อมูลทางอุทกวิทยาในอนาคต

2.4 งานบริหารเขื่อน-อ่างเก็บน้ำแบบอัจฉริยะ (SMART Dam-Reservoir Operation)

Ahmad และ Hossain (2019) นำเสนอแนวคิดการบริหารเขื่อนแบบอัจฉริยะ (Smart Dam Operation) โดยใช้ระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision Support System, DSS) ซึ่งประยุกต์ใช้แบบจำลองที่มีความซับซ้อนยกตัวอย่างเช่น หลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ที่สอดคล้องกับความต้องการน้ำของประชาชนท้ายเขื่อน เพื่อนำเสนอผลเป็นภาพผ่านเว็บไซต์ (Web-based Visualization) ที่ง่ายในการทำความเข้าใจสำหรับผู้ตัดสินใจด้านการจัดการน้ำ ผ่านการเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์การระบายน้ำด้วยวิธี Smart Dam Operation และการดำเนินการแบบปกติ (Reference) โดยโครงสร้างการทำงานของการพัฒนา Smart Dam Operation ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) การสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ (Forecast Modelling) (2) การสร้างแบบจำลองทางอุทกวิทยา (Hydrologic Modelling) (3) การสร้างแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operation Modeling) และ (4) การประเมินผลลัพธ์ (Benefit Assessment) ดังแสดงกรอบความเชื่อมโยงการใช้แบบจำลองต่าง ๆ และโครงข่ายการนำเสนอผลผ่านเว็บไซต์ในรูปที่ 2-1 ทั้งนี้ Ahmad และ Hossain (2019) ได้ทดสอบการใช้วิธี Smart Dam Operation สำหรับเขื่อน Detroit ในประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่า วิธี Smart Dam Operation ส่งผลเชิงบวกต่อการสร้างพลังงานไฟฟ้าจากเขื่อนโดยไม่เพิ่มความเสี่ยงของการเกิดน้ำท่วม



(a) กรอบความเชื่อมโยงการใช้แบบจำลองต่าง ๆ ของการบริหารเขื่อนแบบอัจฉริยะ



(b) โครงข่ายการนำเสนอผลผ่านเว็บไซต์

รูปที่ 2-1 กรอบความเชื่อมโยงการใช้แบบจำลองต่าง ๆ และโครงข่ายการนำเสนอผลผ่านเว็บไซต์
ที่มา: Ahmad & Hossain (2019)

2.5 เทคนิคการพยากรณ์ข้อมูลทางอุทกวิทยา (Hydrological Prediction Techniques)

2.5.1 เทคนิคทางสถิติสำหรับการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลา (Statistical Techniques for Predicting Time-Based Data)

เทคนิคทางสถิติถูกนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ข้อมูลทางอุทกวิทยาที่มีลักษณะเป็นอนุกรมเวลาเพื่อพยากรณ์ค่าในอนาคตโดยใช้พฤติกรรมของข้อมูลในอดีต วิธีการทางสถิติอย่างง่าย เช่น เทคนิค ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่อย่างง่าย (Simple Moving Average, SMA) และวิธีการปรับให้เรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Smoothing, SES) และแบบจำลองการถดถอยอัตโนมัติ เช่น AR, MA, ARMA และ ARIMA (Abraham & Ledolter, 2005) เป็นต้น ได้รับการนำไปใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลา ส่วนต่อไปนี้จะอธิบายความสำคัญของฟังก์ชันทางสถิติหรือกฎที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าสังเกตกับผลลัพธ์ในอนาคต โดยศึกษาข้อมูลในอดีตของตัวแปรที่มีอิทธิพล ตัวอย่างวิธีการทางสถิติที่สำคัญสำหรับการพยากรณ์ข้อมูลทางอุทกวิทยาจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

2.5.1 เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่าย (Simple Moving Average Technique)

วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่ายตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าข้อมูลแบบลำดับ (Sequential Data) สำหรับช่วงเวลาที่แตกต่างกันและไม่มีความสัมพันธ์กัน กล่าวอีกนัยหนึ่งกระบวนการอนุกรมเวลาเป็นแบบคงที่ (Stationarity) การพยากรณ์ข้อมูลด้วยเทคนิค SMA จะดำเนินการตามค่าสังเกตข้อมูลล่าสุด และการสังเกตทั้งหมดจะได้รับการกำหนดน้ำหนักที่เท่ากัน

ให้ N เป็นจำนวนการสังเกตและ X_t หมายถึงค่าที่แท้จริงของตัวแปร X ณ เวลา t ดังนั้น ค่าพยากรณ์ (F_{t+1}) ของตัวแปร X ที่เวลา $t+1$ จะถูกคำนวณตามสมการที่ 2-1

$$F_{t+1} = \frac{X_t + X_{t+1} + X_{t+2} + \dots + X_{t+1-N}}{N} \quad \text{-----}(2-1)$$

ไม่มีเกณฑ์ที่แน่นอนในการกำหนดจำนวนการสังเกต (N) ควรใช้ค่า N ที่มีค่ามากหากความแปรผันในตัวแปรการพยากรณ์มีค่าคงที่พอสมควร และแนะนำให้ใช้ค่า N เล็กลงเมื่อตัวแปรการพยากรณ์มีค่าแตกต่างกัน ในทางปฏิบัติค่าของ N อยู่ระหว่าง 2-10 (Piriyakul, 2003)

2.5.2 เทคนิคการปรับให้เรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Smoothing Technique)

เทคนิคการปรับให้เรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลถือว่ากระบวนการอนุกรมเวลาที่มีเสถียรภาพเหมาะสำหรับการพยากรณ์ข้อมูลที่ไม่มีแนวโน้มหรือฤดูกาล ค่าสังเกตล่าสุดจะถูกกำหนดให้มีค่าน้ำหนักความสำคัญมากที่สุดและลดลงตามลำดับสำหรับค่าสังเกตก่อนหน้า น้ำหนักความสำคัญที่กำหนดขึ้นอยู่กับค่าคงที่การทำให้เรียบ (α) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และการพยากรณ์สำหรับช่วงเวลาล่วงหน้า $t+1$ (F_{t+1}) คำนวณจากข้อมูลอนุกรมเวลาสำหรับช่วงเวลา t ที่ผ่านมา (F_t) ตามที่แสดงในสมการที่ 2-2

$$F_{t+1} = \alpha X_t + (1 - \alpha)F_t \quad \text{-----}(2-2)$$

การเลือกค่าคงที่การปรับให้เรียบเป็นสิ่งสำคัญในการพยากรณ์ในอนาคตสำหรับเทคนิคการปรับให้เรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ค่าคงที่การปรับให้เรียบที่มีค่ามากแสดงว่าค่าสังเกตล่าสุดมีน้ำหนักความสำคัญมาก ในทางปฏิบัติค่าที่แนะนำของค่าคงที่การปรับให้เรียบจะอยู่ที่ 0.00 ถึง 1.00 (Ravinder, 2013)

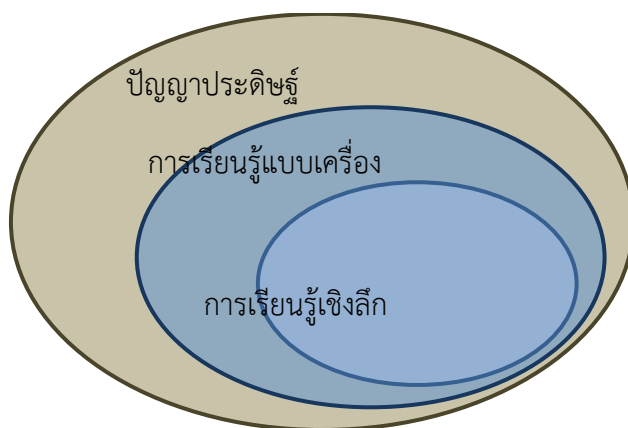
2.5.3 เทคนิคปัญญาประดิษฐ์สำหรับการทำนายข้อมูลทางอุทกวิทยา (Artificial Intelligence Techniques for Hydrological Prediction)

หลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ได้รับการผลักดันอย่างรวดเร็วในการพยากรณ์ข้อมูลทางอุทกวิทยา มีการระบุว่าหลักปัญญาประดิษฐ์ได้แทนที่แบบจำลองทางกายภาพและทางสถิติในปัจจุบัน เนื่องจากหลักปัญญาประดิษฐ์มีความสามารถในการดำเนินการและประเมินการตรวจสอบ

แบบจำลองอย่างก้าวหน้าและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ หลักปัญญาประดิษฐ์ยังมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์มากกว่าและซับซ้อนน้อยกว่าแบบจำลองทางกายภาพแบบดั้งเดิม (Mosavi et al., 2018)

การเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning, ML) เป็นสาขาย่อยของปัญญาประดิษฐ์ในด้านวิทยาการคอมพิวเตอร์ ทำให้ระบบสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องมีปฏิสัมพันธ์กับมนุษย์ การเรียนรู้แบบเครื่องเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ ติความ การค้นพบรูปแบบและโครงสร้างในข้อมูล (Cerqueira, Torgo & Soares, 2019) ส่วนหลักของการเรียนรู้แบบเครื่องเกี่ยวข้องกับการจัดประเภท การคำนวณ ตัวแปรและคุณลักษณะ และความรู้พื้นฐานสำหรับระบบเฉพาะตัว

การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning, DL) เป็นส่วนหนึ่งของการเรียนรู้แบบเครื่องที่อาศัยชั้นของอัลกอริทึมที่เรียกว่าโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network; ANN) (Shafie & Nouredin, 2010) การเรียนรู้เชิงลึกต้องการชุดข้อมูลขนาดใหญ่เพื่อรับรู้รูปแบบของข้อมูลที่สังเกตได้ในอดีตและเพื่อคาดการณ์ผลลัพธ์ในอนาคต ความสัมพันธ์ระหว่างปัญญาประดิษฐ์ การเรียนรู้แบบเครื่อง และการเรียนรู้เชิงลึกแสดงไว้ในรูปที่ 2-2



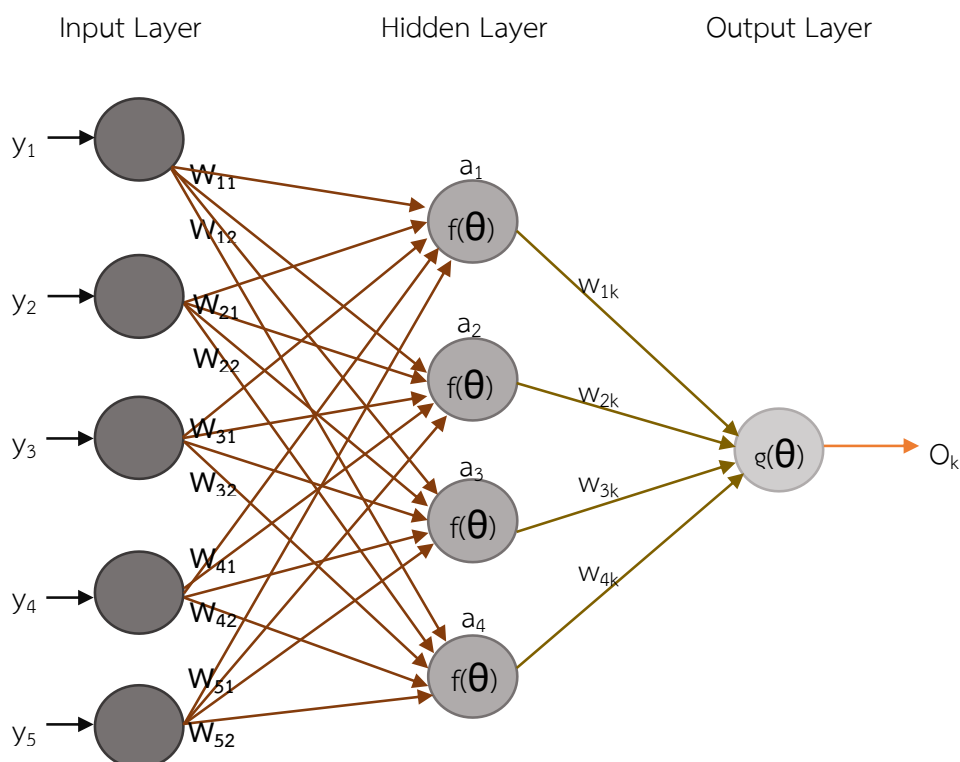
รูปที่ 2-2 แผนภาพเวนนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัญญาประดิษฐ์ การเรียนรู้แบบเครื่อง และการเรียนรู้เชิงลึก

ในปัจจุบันมีเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่องจำนวนมากที่ใช้สำหรับการพยากรณ์ตัวแปรทางอุทกวิทยา อย่างไรก็ตาม ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างบางส่วนของเทคนิคที่สำคัญ

2.5.3.1 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks)

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks, ANNs) คือแบบจำลองของระบบคำนวณที่ได้แรงบันดาลใจจากเซลล์ประสาททางชีววิทยาของมนุษย์ (Linder, Mohamed, De Lorenzo, & Poppl, 2003) โครงข่ายประสาทเทียม ประกอบด้วยชุดสมการทางคณิตศาสตร์ที่เชื่อมโยงถึงกันเพื่อให้คล้ายกับระบบเซลล์ประสาททางชีววิทยา ถือเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการประมาณค่าตัวแปรเอาต์พุตโดยพิจารณาจากตัวแปรอินพุตอิสระ กระบวนการฝึกอบรมที่ใช้ชุดข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่สอดคล้องกันนั้น

จำเป็นสำหรับโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งมีสาม Layer หลักได้แก่ (1) Input Layer (2) Hidden Layer และ (3) Output Layer ดังที่แสดงในรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 โครงสร้างของระบบโครงข่ายประสาทเทียม
ที่มา: Shafie & Nouredin (2010)

Input Layer มีหน้าที่รับผิดชอบในการยอมรับอินพุต โดยโครงข่ายประสาทเทียมต้องมี Input Layer เดียวเสมอและดำเนินการคำนวณเซลล์ประสาท จากนั้นจึงส่งผลไปยัง Layer ถัดไป Hidden Layers เชื่อมต่อกับ Input Layer และ Output Layer โดย Hidden Layers จะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมเหนือกว่าอัลกอริทึมการเรียนรู้แบบเครื่องส่วนใหญ่ เพราะเซลล์ประสาทจะคำนวณผลรวมค่าน้ำหนัก (Weight; W_{ij}) โดยที่ปกติผลคูณของค่าน้ำหนักและอินพุตที่เข้าสู่โครงข่ายนั้น จะถูกนำมารวมกันและส่งผ่านเข้าไปในฟังก์ชัน (Transfer Function) เพื่อที่จะหาเอาต์พุตหรือผลลัพธ์ออกมา โดยกระบวนการนี้นั้นทำให้ง่ายต่อการใช้งานและสามารถนำไปใช้กับโครงสร้างวงจรโครงข่ายอื่นที่ใช้ฟังก์ชันผลรวม (Summing Function) และฟังก์ชันการส่งผ่านที่ต่างกัน โดยสมการทั่วไปของ Hidden Layers แสดงในสมการที่ 2-3

$$a_j = f\left(\sum_{i=1}^n w_{ij}y_i + b_j\right) \quad \text{-----}(2-3)$$

Output Layer มีหน้าที่จัดการและสร้างผลลัพธ์สุดท้าย โดยโครงข่ายประสาทเทียมต้องมี Output Layer เดียวเสมอซึ่งรับอินพุตจาก Layer ก่อนหน้าและทำการคำนวณผ่านเซลล์ประสาท จากนั้นจึงคำนวณเอาต์พุตโดยใช้สมการที่ 2-4

$$O_k = g \left(\sum_{j=1}^m w_{jk} y_j + b_k \right) \quad \text{-----}(2-4)$$

เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมประสบความสำเร็จในการใช้งานสำหรับปัญหามากมายในงานด้านต่าง ๆ รวมถึงการพยากรณ์ข้อมูลทางอุทกวิทยา เช่น ปริมาณน้ำไหลเข้าของอ่างเก็บน้ำ อัตราการไหลของน้ำในแม่น้ำ และข้อมูลปริมาณน้ำฝน เป็นต้น

2.5.3.2 ระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)

เทคนิคการอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS) เป็นการบูรณาการระหว่างโครงข่ายประสาทเทียมและระบบตรรกศาสตร์แบบฟัซซี่โดยถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพระบบอนุมานฟัซซี่และมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการพยากรณ์ตัวแปรทางอุทกวิทยา เช่น ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ (Hipni et al., 2013) กระแสน้ำ และปริมาณน้ำฝน เป็นต้น

ระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้มีความสามารถในการเรียนรู้ จำแนกประเภท และคาดการณ์ข้อมูล ข้อดีของเทคนิคนี้คือความสามารถในการดึงกฎที่คลุมเครือจากข้อมูลตัวเลขและสร้างกฎพื้นฐานที่คลุมเครือได้ อย่างไรก็ตามข้อเสียของเทคนิคนี้คือใช้เวลาค่อนข้างนานสำหรับการฝึกอบรมชุดข้อมูลและค้นหาพารามิเตอร์ของโมเดล (Chang, Chang, & Chang, 2005)

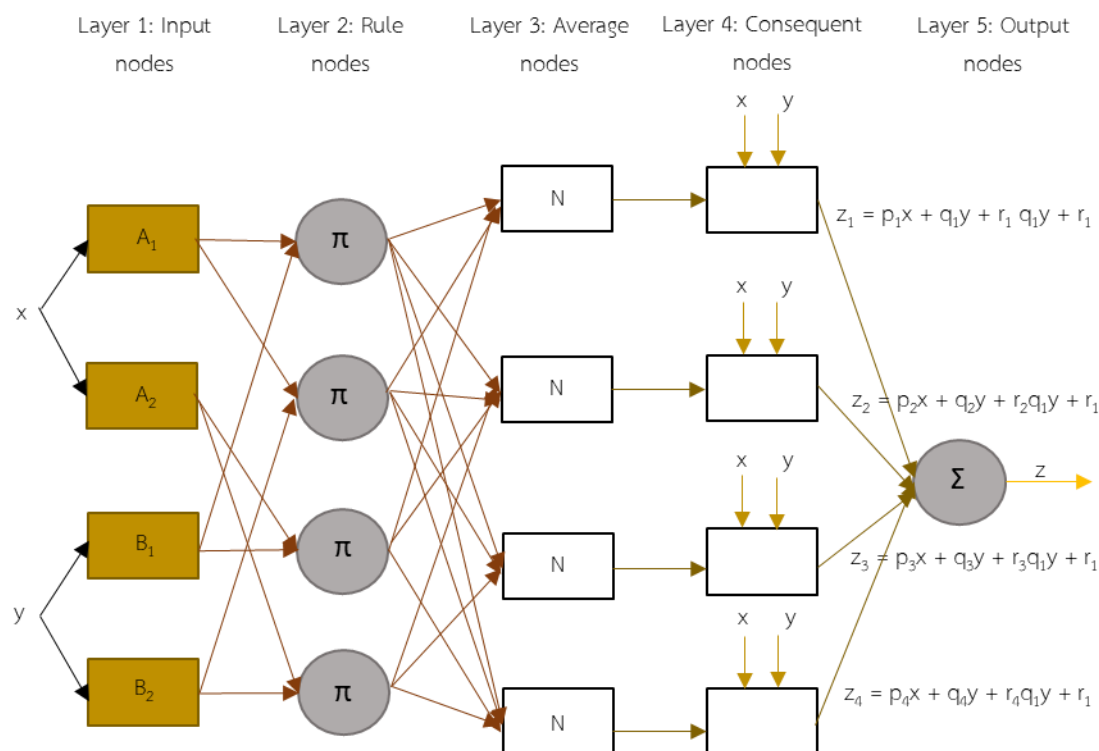
สำหรับโมเดลฟัซซี่ Sugeno จะมีกฎทั่วไปสองข้อในรูปแบบ (ถ้า...แล้ว) กล่าวคือหากระบบอนุมานฟัซซี่มีสองอินพุตคือ x และ y และหนึ่งเอาต์พุตคือ z จะแสดงลักษณะโมเดลได้ดังนี้

กฎข้อ 1: ถ้า x คือ A_1 และ y คือ B_1 แล้ว $z_1 = p_1x + q_1y + r_1$

กฎข้อ 2: ถ้า x คือ A_2 และ y คือ B_2 แล้ว $z_2 = p_2x + q_2y + r_2$

เมื่อ p_i, q_i และ r_i ($i = 1$ หรือ 2) คือ พารามิเตอร์เชิงเส้น

โดยทั่วไประบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้จะมีโหนด 5 ชั้น ได้แก่ (1) Input Nodes (2) Rule Nodes (3) Average Nodes (4) Consequent Nodes และ (5) Output Nodes ดังแสดงในรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 รูปแบบโครงสร้างของ ANFIS สำหรับโมเดล Fuzzy Sugeno แบบสองอินพุตที่มีกฎสี่ข้อ
ที่มา: Chang & Chang (2005)

แต่ละโหนดของ Layer 1 จะสร้างสมาชิกที่เป็นของชุดฟัซซีที่เหมาะสมแต่ละชุดโดยใช้ฟังก์ชันหรือกฎ (Rule Node) ใน Layer 2 ตัวดำเนินการค่าเฉลี่ยของโหนดใน Layer 3 จะถูกนำไปใช้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของเหตุการณ์ก่อนหน้านี้สำหรับ Rule Nodes นั้น ๆ โดยวัตถุประสงค์หลักคือการคำนวณอัตราส่วนของความแม่นยำของกฎข้อที่ i ต่อผลรวมของความแรงในการยิงของกฎทั้งหมด ฟังก์ชันโหนดของเลเยอร์ที่สี่คำนวณการมีส่วนร่วมของกฎที่ i -Th ในแต่ละข้อที่มีต่อเอาต์พุตทั้งหมด และกระบวนการ Defuzzification จะเปลี่ยนผลลัพธ์ฟัซซีของแต่ละกฎให้เป็นเอาต์พุตที่แม่นยำใน Layer สุดท้าย

2.5.3.3 เทคนิค Extreme Gradient Boosting (XGBoost)

Extreme Gradient Boosting (XGBoost) เป็นอัลกอริทึมการเรียนรู้แบบเครื่องที่ริเริ่มในปี 2557 ได้รับการพัฒนาจาก Gradient Boosting เป็นวิธีการเรียนรู้สำหรับปัญหาการจำแนก (Classification) และการถดถอย (Regression) (Chen & Guestrin, 2016; Osman, Ahmed, Chow, Huang, & Shafie, 2020; Qin, Zhang, Bao, Zhang, Liu, & Lui, 2021) มีลักษณะโครงสร้างเลียนแบบจากต้นไม้ที่มีส่วนประกอบของ root node จากราก และส่วนที่เป็น leaf node ซึ่งเป็นส่วนใบของโครงสร้างต้นไม้ ซึ่งแต่ละโหนดจะทำหน้าที่ประเมินคะแนนในส่วนต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผลพยากรณ์ที่มีค่าเหมาะสมที่สุด เนื่องจากประสิทธิภาพการเรียนรู้ที่ยอดเยียมและความรวดเร็วในการฝึกอบรมชุดข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ จึงมีความน่าสนใจอย่างมากในอัลกอริทึม XGBoost สำหรับการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ข้อมูลทางอุทกวิทยา

นอกจากนี้มีการศึกษาว่าอัลกอริทึม XGBoost สามารถเป็นเครื่องมือการพยากรณ์ที่สร้างความแม่นยำในการพยากรณ์มากกว่าอัลกอริทึมที่มีอยู่เช่น Support Vector Machines (SVM), Random Forest (RF) และอัลกอริทึม K-Nearest Neighbor (K-NN) (Wang, Chen, Jin, & Che, 2020) XGBoost ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับปัญหาการเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning Problems) ซึ่งข้อมูลการฝึกอบรม y_i ใช้เพื่อพยากรณ์ตัวแปรเป้าหมาย p_i (Dornpunya et. al, 2021)

องค์ประกอบพื้นฐานของการเรียนรู้ XGBoost คือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ซึ่งต้องการประเมินค่าน้อยที่สุดของฟังก์ชันการสูญเสีย (Training Loss Function) โดย p_i แสดงถึงข้อมูลพยากรณ์หรือข้อมูลเป้าหมายที่ต้องการจากกระบวนการพยากรณ์ โดยหน้าที่ของการฝึกแบบจำลองคือการค้นหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด (θ) ที่เหมาะสมกับข้อมูลฝึกฝน y_i และ ข้อมูลเป้าหมาย p_i ในการฝึกแบบจำลองควรกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้เหมาะสมกับข้อมูลการฝึกอบรม โดยทั่วไปลักษณะของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ประกอบด้วยสองส่วนสำคัญ (1) Training Loss Function และ (2) Regularization Term ดังแสดงในสมการที่ 2-5

$$\text{Obj}(\theta) = L(\theta) + \Omega(\theta) \quad \text{-----}(2-5)$$

โดยที่ $L(\theta)$ = Training Loss Function
 $\Omega(\theta)$ = Regularization Term
 θ = พารามิเตอร์ที่ดีที่สุดที่เหมาะสมกับข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างของการฝึก (y_i) และผลลัพธ์ที่คาดการณ์ไว้ (p_i)

Training Loss Function จะระบุถึงการพยากรณ์ของแบบจำลองที่สัมพันธ์กับข้อมูลการฝึกฝนสองแบบได้แก่ แบบ Regression และแบบ Classification โดยทั่วไปประเภท Training Loss Function คือการประเมินค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดโดยใช้ค่าทางสถิติได้แก่ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error) ตามที่กำหนดในสมการที่ 2-6 สำหรับแบบ Regression และสมการที่ 2-7 สำหรับแบบ Classification

$$L(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - p_i)^2 \quad \text{-----}(2-6)$$

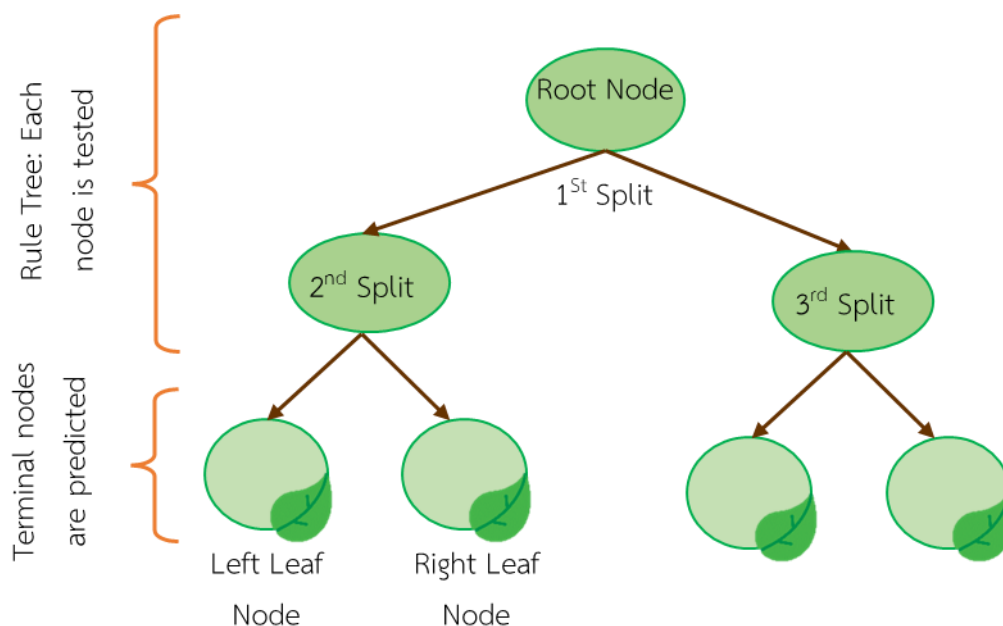
$$L(\theta) = -[y_i \log(p_i) + (1 - y_i) \log(1 - p_i)] \quad \text{-----}(2-7)$$

Regularization Term เป็นหนึ่งในส่วนสำคัญที่ช่วยควบคุมความซับซ้อนของแบบจำลองและหลีกเลี่ยงการ overfitting ซึ่งแสดงในสมการที่ 2-8

$$\Omega(\theta) = \gamma T + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^T O_{\text{value}}^2 \quad \text{-----(2-8)}$$

โดยที่ "γ" คือไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดการลดการสูญเสียขั้นต่ำที่จำเป็นในการสร้างพาร์ติชันเพิ่มเติมบนโหนดปลายสุดของต้นไม้ และ T คือจำนวนโหนดปลายทางหรือใบไม้ของต้นไม้ ในขณะที่ "λ" เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้จัดการส่วน Regularization ของ XGBoost และ O_{value} คือค่าเอาต์พุตสำหรับโครงสร้างของต้นไม้ทั้งหมด

การพยากรณ์สำหรับข้อมูลค่าหนึ่งจะทำโดยการติดตามต้นไม้ที่แบ่งเป็นแต่ละโหนดจนกว่าโหนดสุดท้ายสำหรับการพยากรณ์จะสำเร็จ โครงสร้างของต้นไม้ถูกสร้างขึ้นส่วนราก (Root Node) จากนั้น Root Node จะแยกเป็นส่วนใบ (Leaf Node) ไปทางด้านซ้าย (The Leaf On The Left) และทางด้านขวา (The Leaf On The Right) และแบบจำลองจะเรียนรู้แตกแขนงเหมือนโครงสร้างต้นไม้จนกว่าข้อผิดพลาดหรือค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (MSE) จะมีค่าน้อยที่สุด โดยส่วนประกอบแผนผังการตัดสินใจของ XGBoost แสดงในรูปที่ 2-5

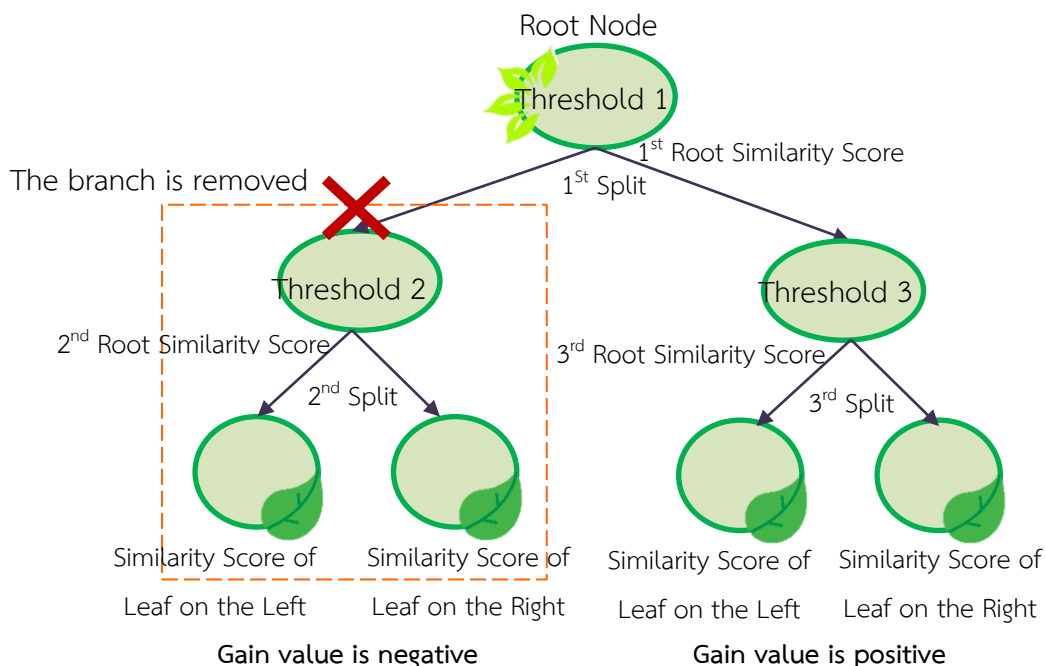


รูปที่ 2-5 โครงสร้างแบบจำลองของ XGBoost

ฟังก์ชันการสูญเสีย $L(\theta)$ จะระบุคะแนนของต้นไม้และใบและสังเกตได้ว่าการเรียนรู้โครงสร้างต้นไม้ที่ซับซ้อนกว่าปัญหาการปรับให้เหมาะสมแบบเดิม ๆ ซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะเรียนรู้ต้นไม้ทั้งหมดพร้อมกัน ดังนั้นจึงใช้กลยุทธ์การแต่งเติมหรือตัดแต่งเพื่อแก้ไขสิ่งที่ได้เรียนรู้และเพิ่มต้นไม้ใหม่ที่ละต้นโดยการประเมินคะแนนความเหมือน (Similarity Score, Sim) ซึ่งคำนวณเพื่อระบุคะแนนของแต่ละโหนดโดยใช้สมการที่ 2-9

$$Sim = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - p_i)}{n + \lambda} \quad \text{-----(2-9)}$$

หลังจากนั้น ค่า Gain จะถูกคำนวณเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของโครงสร้างต้นไม้ชนิดนี้
 แค่นั้น กล่าวคือระบุว่าต้นไม้สามารถแยกไปได้หรือไม่โดยหาค่า Gain เป็นลบ ส่วนใบจะถูกลบออกดังแสดง
 ในรูปที่ 2-6 ซึ่งการดำเนินการลักษณะนี้ของ XGBoost เรียกว่าเทคนิคการตัดแต่งกิ่งในแบบจำลองแบบต้นไม้



รูปที่ 2-6 ขั้นตอนในการตัดแต่งกิ่งต้นไม้โดยใช้ค่า Gain

ตามหลักการแล้ว การแจกแจงต้นไม้ที่เป็นไปได้ทั้งหมดและเลือกต้นไม้ที่ดีที่สุดจะประเมินตาม
 ค่า Gain ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2-10

$$Gain\ Value = Sim_{left} + Sim_{right} + Sim_{root} \quad \text{-----(2-10)}$$

- โดยที่ Sim_{left} = ค่า Similarity ของใบฝั่งซ้ายของกิ่งไม้
- Sim_{right} = ค่า Similarity ของใบฝั่งขวาของกิ่งไม้
- Sim_{root} = ค่า Similarity ของ Root Node ของกิ่งไม้

โครงสร้างแบบต้นไม้ได้รับการทำซ้ำ T รอบจนกว่าจะสร้างแบบจำลองตามจำนวนที่ต้องการ
 ได้ และเมื่อการเรียนรู้ของแบบจำลองสิ้นสุดลง ค่าเอาต์พุต ("Ovalue") ซึ่งคำนวณตามสมการที่ 2-11 สำหรับ
 ใบไม้ทั้งหมดจะถูกคำนวณเพื่อให้ได้ต้นไม้สุดท้ายที่ของแบบจำลองแรก

$$O_{\text{value}} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - p_i)}{n + \lambda} \quad \text{-----}(2-11)$$

นอกจากนี้ ความแม่นยำของแบบจำลองการพยากรณ์ยังถูกควบคุมด้วยอัตราการเรียนรู้ (Learning Rate, ϵ) ซึ่งกำหนดอัตราการเรียนรู้อย่างเหมาะสมเพื่อให้ได้ผลการพยากรณ์ที่แม่นยำและหลีกเลี่ยงการเกิด Overfitting

สำหรับการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าของอ่างโดยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่องของอัลกอริทึม XGBoost ณ เวลา t (p_i^t) เกิดจากผลบวกของการพยากรณ์ก่อนหน้าทั้งหมดที่ได้จากแบบจำลอง กล่าวอีกนัยหนึ่งคือการพยากรณ์ขั้นสุดท้ายคือผลบวกของค่าที่พยากรณ์เริ่มต้น (p_i^0) และผลรวมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์รวมกับ Loss Function และ Regularization ดังแสดงในสมการที่ 2-12

$$p_i^t = p_i^0 + \epsilon \left[\sum_{i=1}^n L(y_i, p_i^0 + O_{\text{value}}) + \frac{1}{2} \lambda O_{\text{value}}^2 \right] \quad \text{-----}(2-12)$$

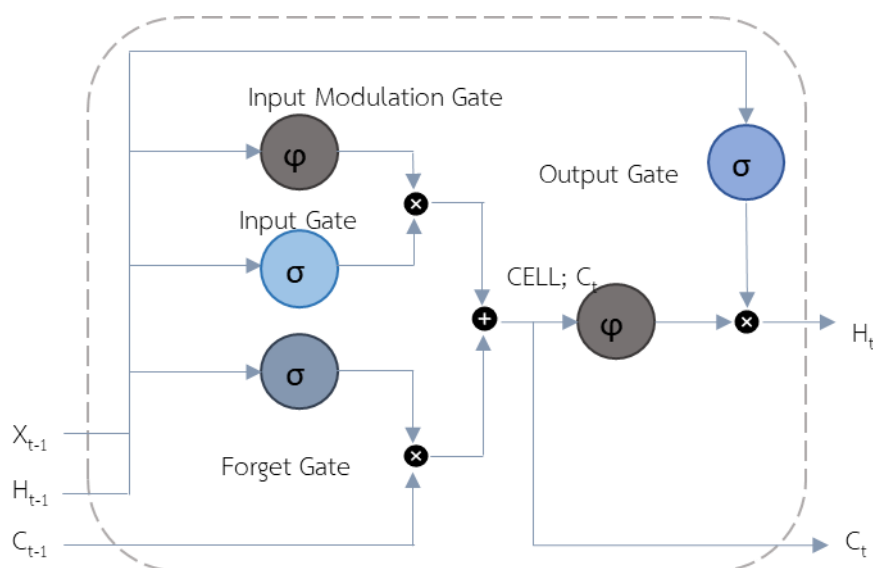
2.5.3.4 เทคนิค Long Short-Term Memory (LSTM)

เทคนิค Long Short-Term Memory (LSTM) เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจาก Recurrent Neural Network (RNN) ซึ่งเป็นการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ซึ่งเหมาะกับปัญหาการพยากรณ์ข้อมูลในลักษณะที่เป็นลำดับหรือข้อมูลอนุกรมเวลา เทคนิค LSTM ถูกเสนอโดย Hochreiter และ Schmidhuber (1997) เพื่อลดข้อจำกัดหรือความบกพร่องของเทคนิค RNN ให้มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์มากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ การเรียนรู้ของแบบจำลองการพยากรณ์โดยอาศัยอัลกอริทึม LSTM คือการศึกษาคุณสมบัติหลักและฟังก์ชันข้อมูลอนุกรมเวลาในระยะยาวและเก็บข้อมูลไว้เพื่อเรียนรู้วนซ้ำไปมา โดยทั่วไป LSTM นิยมนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์หลายตัวแปร (Multivariate Prediction Model)

หลักการทำงานของ LSTM พยายามจดจำข้อมูลที่ผ่านมามาทั้งหมดและลบข้อมูลที่ไม่เกี่ยวข้องออกจากแบบจำลอง ดังนั้น แบบจำลอง LSTM จึงถูกจัดเรียงในรูปแบบของโครงสร้างลูกโซ่ ซึ่งประกอบด้วย 4 ประตู ได้แก่ (1) Forget Gate (2) Input Gate (3) Input Modulation Gate และ (4) Output Gate ซึ่งจะจัดการข้อมูลในสถานะเซลล์ (Cell State) และสื่อสารผ่านฟังก์ชันการเปิดใช้งาน (Activation Function)

รูปที่ 2-13 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม LSTM อินพุตคือสถานะเซลล์ (Cell State, C) สถานะที่ซ่อนอยู่ (Hidden State, H) และข้อมูลอินพุต (X) โดยโครงสร้างของ LSTM ทั่วไปสร้างขึ้นจากบล็อกหน่วยความจำต่างๆ ที่เรียกว่า "เซลล์" โดยสถานะปัจจุบันของเซลล์และสถานะที่ซ่อนอยู่จะถูกถ่ายโอนไปยังเซลล์ถัดไป Forget Gate จะตัดสินใจว่าจะลบหรือบันทึกข้อมูลก่อนหน้าจากสถานะเซลล์ ในขณะที่ Input Gate กำหนดขอบเขตของข้อมูลที่จะเขียนในสถานะเซลล์ และ Input Modulation Gate ถือเป็นส่วนหนึ่งของ Input Gate ซึ่งออกแบบมาเพื่อมอดูเลตข้อมูลใน Input Gate โดยเพิ่มความไม่เป็นเชิง

เส้นให้กับข้อมูลและทำให้ข้อมูลมีค่าเป็นศูนย์ สำหรับ Output Gate จะกำหนดข้อมูลที่จะส่งผ่านเป็น Output Hidden State



รูปที่ 2-13 โครงสร้างของโครงข่ายประสาท Long Short-Term Memory (LSTM)

LSTM (Jozefowicz, Zaremba & Sutskever, 2015) เป็นเทคนิคพิเศษที่ทำหน้าที่เสมือนประตู (Gate) ที่คอยควบคุมข้อมูลที่เข้ามาในแต่ละเซลล์ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันต่าง ๆ ดังแสดงในสมการที่ 2-13 ถึงสมการที่ 2-17

$$C_t = C_{t-1}f_t + (N_t * I_t) \quad \text{-----(2-13)}$$

$$I_t = \sigma[W_i * (H_{t-1}, X_t) + B_i] \quad \text{-----(2-14)}$$

$$N_t = \tanh[W_n * (H_{t-1}, X_t) + B_n] \quad \text{-----(2-15)}$$

$$O_t = \sigma[W_o * (H_{t-1}, X_t) + B_o] \quad \text{-----(2-16)}$$

$$H_t = O_t * \tanh(C_t) \quad \text{-----(2-17)}$$

เมื่อ

C_t = บล็อกหน่วยความจำที่เวลา t

C_{t-1} = บล็อกหน่วยความจำที่เวลา t-1

f_t = Forget Gate ที่เวลา t

N_t = ฟังก์ชัน Hyperbolic Tangent (tanh) ที่เวลา t

W_i, W_n, W_o = Matrices ค่าน้ำหนักของแต่ละ Gates

H_t	=	ค่า Output ของ Cell State ที่เวลา t
H_{t-1}	=	ค่า Output ของ Cell State ที่เวลา $t-1$
X_t	=	ค่า Input ที่เข้ามาใน Cell State ที่เวลา t
B_i, B_n, B_o	=	ค่า Bias ของ Cell State
I_t	=	ฟังก์ชัน Sigmoid (σ) ที่เวลา t
C_t	=	ค่า Candidate ของ Cell State ที่เวลา t
O_t	=	Output Gate ที่เวลา t

2.6 เทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning Technique)

การเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning, RL) เป็นอัลกอริทึมการเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning Algorithm) แบบหนึ่งที่มีหลักการการทำงานเสมือนกับการที่มนุษย์เรียนรู้บางสิ่งบางอย่างด้วยการลองผิดลองถูก และมีการเรียนรู้เกิดขึ้นระหว่างทางว่าการกระทำไหนดีหรือไม่ดี ซึ่งการเรียนรู้แบบเสริมกำลังประกอบด้วยองค์ประกอบหลักดังต่อไปนี้

Agent – ผู้กระทำ Action

Action (a) – การกระทำของ Agent ที่ส่งผลบางอย่างต่อ Environment

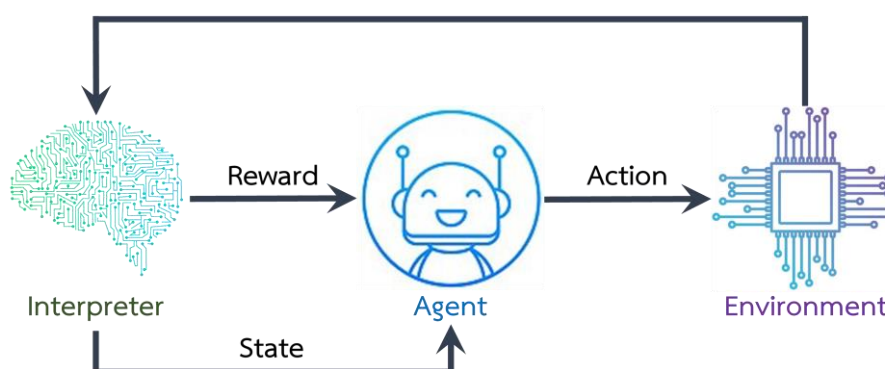
Environment (e) – ระบบที่ Agent ต้องมีปฏิสัมพันธ์ด้วย

State (s) – สถานการณ์ของ Environment ที่ทาง Agent สามารถรับรู้ได้

Policy (π) – หลักการที่ Agent ใช้ในการตัดสินใจเลือก Action หลังจากประเมินสถานการณ์แล้ว

Reward (R) – ตัวประเมินผลลัพธ์ที่เกิดจากการกระทำของ Agent เช่น คะแนน กำไรที่ได้รับ หรือ ผลแพ้ชนะ เป็นต้น

หลักการทำงานของการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning) แสดงในรูปแบบที่ 2-14



รูปที่ 2-14 แสดงหลักการทำงานของการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning)

Agent จะรับรู้สถานการณ์ หรือ State ของ Environment จากนั้นจึงใช้ Policy ในการเลือกทำการกระทำบางอย่าง (Action) ที่ส่งผลต่อ Environment ซึ่งผลจากการกระทำ หรือ Action นั้นจะทำให้

สถานการณ์ของ Environment เปลี่ยนจากสถานการณ์เดิมไปสู่อีกสถานการณ์หนึ่ง (State ใหม่) ดังนั้น หลักการของการเรียนรู้แบบเสริมกำลังคือการเรียนรู้ของ Agent ที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์แบบลองผิดลองถูก ระหว่าง Agent กับ Environment โดย Agent จะสามารถรับรู้สถานการณ์ของ Environment ผ่าน State และเลือกการกระทำ Action ที่ส่งผลต่อ Environment โดยหวังว่าจะได้ผลลัพธ์ Reward ที่ดีที่สุด รวมทั้งเรียนรู้ผ่านข้อผิดพลาดในอดีตที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลรวมของรางวัลตั้งแต่ปัจจุบันจวบจนอนาคต (Cumulative Reward, G_t) อาจถูกนำมาใช้ในการคำนวณผลลัพธ์แทน โดยคำนวณจากผลรวมของ Reward ทุก ๆ ตัวตามสมการที่ 2-13

$$G_t = R_{t+1} + R_{t+2} + R_{t+3} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} R_{t+k+1} \quad \text{-----}(2-13)$$

แต่เนื่องด้วยสาเหตุของความไม่แน่นอน นั่นหมายความว่า ผลลัพธ์ที่คาดหวังไว้ในตอนแรกอาจจะไม่ได้เป็นแบบนั้น ดังนั้น เราจะเรียก Environment จำพวกพวกนี้ว่า Episodic กับอีกประเภทหนึ่งเช่น การเล่นเกมที่มีความสามารถเล่นได้เรื่อย ๆ ไม่มีที่ท่าว่าจะจบเราจะเรียก Environment จำพวกนี้ว่า Non-episodic ซึ่งถ้าหากเป็นประเภทนี้ที่อนาคตนั้นไม่รู้จะไปจบที่ใดนั้น และไม่รู้จะเกิดขึ้นจริงรึเปล่า

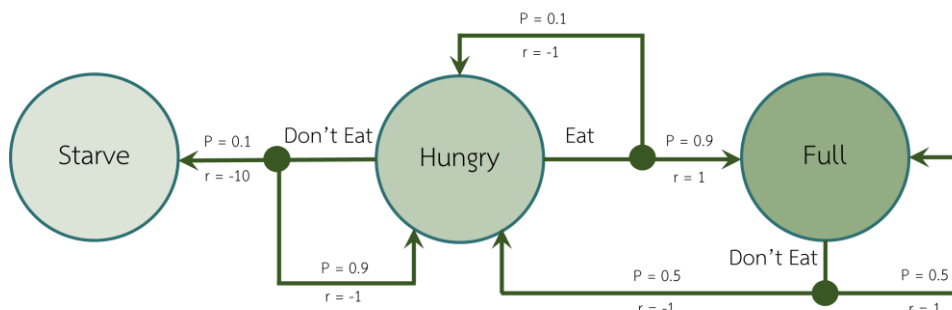
การที่เราจะสามารถคำนวณ Cumulative Reward ได้นั้นจำเป็นที่จะต้องลดความสำคัญของ Reward ที่ห่างไกลออกไปในอนาคต โดยใช้สิ่งที่เรียกว่า Discount Factor (γ) ที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งจะมาช่วยในการจำกัดให้ผลรวมของรางวัลตั้งแต่ปัจจุบันจวบจนอนาคตเป็นจำนวนที่มีค่าจำกัด (Finite) นั่นเอง โดยจะเพิ่มค่านีลงในสมการที่ 2-14 ดังนี้

$$G_t = R_{t+1} + \gamma R_{t+2} + \gamma^2 R_{t+3} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+1} \quad \text{-----}(2-14)$$

หลังจากที่ Agent นั้นทำการประเมินสถานการณ์ปัจจุบันผ่าน Cumulative Reward แล้วก็จะถึงช่วงเวลาที่ต้องตัดสินใจว่าจะเลือกการกระทำใดเพื่อที่จะให้ได้ Cumulative Reward สูงสุด โดย Agent ใช้หลักในการเลือก Policy ที่เป็นตัวกำหนดว่า Agent ควรจะเลือกทำ Action ใด ณ สถานการณ์ (State) นั้น ๆ ตาม Policy ที่เลือกใช้ ซึ่งอาจเป็นการกระทำที่คาดหวังว่าจะได้ผลลัพธ์โดยรวมในระยะยาว (Future Cumulative Reward) มากที่สุด หรืออาจจะทำ Random Action เพื่อสำรวจรูปแบบของการกระทำใหม่ ๆ ทั้งนี้ หากทาง Agent สำรวจลองผิดลองถูกจนสามารถเลือก Action ได้ดีที่สุดในว่าจะอยู่ในสถานการณ์ (State) ใด ๆ หรือก็คือ Agent ที่เราฝึกเป็นผู้เชี่ยวชาญของโจทย์นั้น ๆ แล้ว เราจะเรียกหลักการนั้นว่า Optimal Policy ซึ่งการค้นหา Optimal Policy นั้นถือเป็นหัวใจหลักของการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง

การนำแนวคิดการเรียนรู้แบบเสริมกำลังมาให้คอมพิวเตอร์เข้าใจ และสามารถเรียนรู้ในสิ่งต่าง ๆ ได้ นั้นจำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Markov Decision Process ซึ่งเป็นกรอบสำหรับการตัดสินใจ (Decision Making) ของ Agent เนื่องจาก Environment มีความไม่แน่นอน ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ในบางครั้งไม่แน่นอน (Stochastic) กล่าวคือ การที่ Agent เลือกทำ Action เดิม สำหรับสถานการณ์ (State) เดิม อาจจะได้ผลลัพธ์แบบเดิมเสมอไป เช่น เกมที่มีผู้เล่นหลายคน หรือการทอยเหรียญหัวก้อย เป็นต้น

โจทย์การเรียนรู้แบบเสริมกำลังส่วนใหญ่จะใช้ Markov Decision Process โดยจะมีลักษณะเป็นกราฟที่แสดงถึง Relation ของแต่ละ State, Action และ Reward ดังรูปที่ 2-9 โดยค่า r หมายถึง Reward ที่เกิดจากการทำ Action นั้น ๆ และ p หมายถึงโอกาสที่จะทำให้ไปสู่อีก State ต่าง ๆ เมื่อกระทำ Action นั้น ๆ



รูปที่ 2-9 ตัวอย่างแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังที่ใช้ Markov Decision Process

จากรูปที่ 2-9 แสดงตัวอย่างแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังที่ใช้ Markov Decision Process ซึ่งอยู่ในลักษณะของกราฟ โดย State จะแทนด้วย Node ต่าง ๆ ในกราฟและการกระทำแต่ละ Action จะเป็นเส้นทางไปสู่ State และ Reward ที่ต่าง ๆ กันออกไป โดยในที่นี้จะกำหนด Reward เป็นตัวเลขง่าย ๆ เพื่อให้ Agent ของเราสามารถตัดสินใจได้ว่า จะเลือกทำ Action ไหน โดยจะมีสถานะเริ่มต้นเป็น Hungry

นอกจากนี้ แต่ละ Action ในตัวอย่างจะเป็นแบบ Non-deterministic หมายความว่า การเลือกทำ Action เดิมที่ State เดิม อาจจะให้ผลลัพธ์ที่ไม่เหมือนเดิมได้ ยกตัวอย่างเช่น การที่เรามีสถานะหิว กับเราเลือกที่จะกินจะมีโอกาส ($p = 0.9$) ที่จะทำให้เราเข้าสู่สถานะ Full และมีโอกาส ($p = 0.1$) ที่จะเข้าสู่สถานะ Hungry เหมือนเดิม

โดยเมื่อเราอยู่ในสถานะ Hungry นั้นจะมีทางเลือกสอง Action ให้เลือกระหว่าง การกินอาหาร (Eat) และการไม่กินอาหาร (Don't Eat) ซึ่งเราจะสามารถสรุปสถานการณ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นทั้งหมดได้สองรูปแบบ

- (1) ถ้าหากเราเลือก Don't Eat ก็จะมีโอกาส $p = 0.1$ ที่เราจะอดตาย (Starve) ซึ่งจะได้รับ Reward เท่ากับ $r = -10$ ซึ่งถือว่าเป็น Negative Reward จำนวนมากที่ Agent ไม่ควรจะทำ และยังมีโอกาสอีก $p = 0.9$ ที่เราจะยังหิวเหมือนเดิม (Hungry) ซึ่งจะได้รับ Reward เท่ากับ $r = -1$
- (2) ถ้าหากเราเลือก Eat จะมีโอกาส $p = 0.9$ ที่จะเปลี่ยนสถานะจาก Hungry เป็น Full และได้รับ Reward $r = 1$ แต่ยังมีโอกาสอีก $p = 0.1$ ที่จะกลับมาหิวเหมือนเดิมเนื่องจากเราอาจจะยังกินไม่อิ่ม และได้รับ Reward $r = -1$

ในเมื่อเป้าหมายหลักคือการที่เลือก Decision ที่ทำให้ Cumulative Reward ที่มากที่สุด เพราะฉะนั้นการเลือกทำ Action Eat นั้นมีโอกาสที่จะทำให้ได้รับ Reward สูงสุด

ในโจทย์ของการเรียนรู้แบบเสริมกำลังนั้นส่วนใหญ่จะมีความซับซ้อนกว่านี้มาก State ที่เป็นไปได้ทั้งหมดอาจจะมีจำนวนมาก (เช่น การเล่นเกมหมากรุก) และมี Action ให้เลือกทำมากมาย ซึ่งจะใช้วิธีการต่าง ๆ

โดยในการเลือก Policy นั้นจะต้องตอบปัญหาที่เรียกว่า Explore-Exploit Dilemma โดย Agent จะต้องเลือกว่าจะทำ Action ที่คาดว่าจะได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด หรือลองสุ่ม Action เพื่อสำรวจรูปแบบใหม่ ๆ ตัวอย่างเช่น ถ้าคุณได้ไปร้านอาหารร้านโปรดเจ้าประจำ คุณจะสั่งอาหารเดิมที่คิดว่าอร่อยที่สุดในทุก ๆ รอบที่มารับประทาน หรือว่าคุณจะเริ่มลองสั่งอาหารใหม่ ๆ ในร้านบ้าง ซึ่งการลองสิ่งใหม่ ๆ นี้ อาจจะเจอสิ่งที่ดีหรือแย่กว่าก็ได้ สองทางเลือกนี้คือ

- (1) Explore (Random Action) เป็นการลองสำรวจสิ่งใหม่ ๆ ที่ไม่รู้ว่ามันจะดีหรือร้าย ซึ่งในการเรียนรู้แบบเสริมกำลังจะเป็นการที่ Agent นั้นลองทำ การกระทำแบบสุ่ม ทำให้ Agent ได้เรียนรู้สิ่งใหม่มากขึ้นจากการกระทำใหม่ ๆ
- (2) Exploit (Greedy Action) เป็นการเลือกสิ่งที่ตนคิดว่ามันดีที่สุดในตอนนี้แล้ว ในการเรียนรู้แบบเสริมกำลังจะเป็นการที่ Agent นั้นทำ Action ที่คาดหวังว่าจะให้ผลลัพธ์โดยรวมในระยะยาว (Future Cumulative Reward) ที่เยอะที่สุดนั่นเอง

ปัญหาของ Explore-Exploit Dilemma ก็คือถ้า Agent เลือกที่จะ Exploit อย่างเดียว Agent อาจจะไม่มีความพึงพอใจที่จะเลือก Action ที่ดีที่สุดได้ แต่ถ้าใช้เวลาส่วนใหญ่ไป Explore แทนก็จะไม่มีเวลาไป Exploit ทำให้ได้ Future Cumulative Reward น้อย Agent จึงต้องเลือกวิธีที่เหมาะสมในการตอบปัญหา Explore-Exploit Dilemma โดยวิธีการให้เลือกใช้นั้นมีหลากหลายวิธี ขึ้นอยู่กับประเภทโจทย์ที่ได้รับ โดยจะยกตัวอย่างสองวิธีได้แก่

- (1) Optimistic Initial Values สมมติว่าในตอนแรกนั้นเราคิดว่าทุกเมนูอาหารนั้นอร่อยเลิศไปเสียทุกอย่าง เราจึงเลือกชิมเมนูอาหารที่เราคิดว่าอร่อยที่สุด (เนื่องจากทุกเมนูอร่อยเท่ากันหมดจึงเป็นการสุ่ม) และหลังจากเราชิมไปนั้นก็พบว่าอาหารที่เราชิมมันไม่ได้เลิศเลออย่างที่เราคาดหวังไว้ตั้งแต่แรกเพราะเราได้กำหนดความคาดหวังในตอนเริ่มต้นไว้สูง (เป็นที่มาของชื่อ Optimistic Initial Values) เราจึงลดค่าความอร่อยที่คาดหวังไว้จากอาหารจานนี้ลง เมื่อได้รับค่าความคาดหวังแล้ว เราก็จะชิมอาหารที่คิดว่าอร่อยที่สุดต่อ (Exploit) ซึ่งก็จะเป็นจานอื่นที่ในตอนแรกยังไม่ได้ชิมและอาจจะมีการปรับค่าความอร่อยที่คาดหวังไปเรื่อย ๆ จนท้ายที่สุดเราก็จะรับรู้ได้ว่าอาหารเมนูไหนอร่อยที่สุด ซึ่งการใช้ Optimistic Initial Values นั้น เราไม่ได้สั่งให้ Agent ทำการ Explore โดยตรง เพราะทุกสิ่งที่ Agent ทำคือการ Exploit ให้ได้ Reward มากที่สุด แต่ Agent สามารถเรียนรู้จากหลากหลายเมนูอาหารได้ในช่วงแรกที่มีความคาดหวังของอาหารทุกเมนูเขาถูกตั้งไว้สูง จึงเลือกชิมหลาย ๆ จาน อาจจะเรียกได้ว่า Agent จะ Explore ในช่วงแรก เพราะจะสุ่มอาหารขึ้นมาชิม อย่างไรก็ตาม ปัญหาของวิธีการนี้คือ หาก Environment ที่มี Sample Space ที่เยอะมาก ๆ หรือในกรณีนี้คือการที่ร้านอาหารมีเมนูอาหารเยอะมาก ๆ วิธี Optimistic Initial Values อาจจะไม่เหมาะที่จะเอามาเลือกใช้สักเท่าไร
- (2) Epsilon Greedy สมมติเป็นการเลือกเมนูอาหาร ค่าเป็นความน่าจะเป็นว่ามีโอกาส ϵ ที่คุณจะเลือกกินเมนูอื่น ๆ แบบสุ่ม และโอกาส $1-\epsilon$ ที่คุณจะเลือกกินเมนูที่คุณคิดว่าอร่อยที่สุด โดยตัวแปร ϵ จะมีค่าอยู่ที่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งอาจจะเป็นค่าคงที่ หรือตัวแปรที่แปรผันตามเวลาก็ได้

(ส่วนใหญ่จะนิยามกำหนดค่าเริ่มต้นเป็น 1 เพื่อที่จะเลือกการกระทำ Explore ตอนแรกให้มากที่สุด และเมื่อเวลาผ่านไปจะค่อย ๆ ลดลงเนื่องจากคิดว่า Agent สำรวจจนพอแล้ว) วิธีการนี้จะทำให้ Agent ทั้ง Explore และ Exploit อย่างเหมาะสมเพื่อให้ผลลัพธ์โดยรวมในระยะยาวมีค่าสูง

เมื่อเริ่มต้นนั้นตัว Agent จะไม่มีความรู้ใด ๆ เกี่ยวกับ Environment เลย รวมถึงไม่รู้ด้วยว่า Action ที่ทำไปนั้นจริงๆ แล้วจะได้ Cumulative Reward เป็นเท่าไร? ดังนั้น Agent จึงทำการเดา Cumulative Reward ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น เรียกว่า Expected Cumulative Reward โดยในระหว่างการเรียนรู้ Agent จะเลือกกระทำ Action ที่ State ต่าง ๆ โดยพยายาม Maximize ค่า Expected Cumulative Reward แต่เนื่องด้วยการที่เป็น Expected Cumulative Reward ทำให้มันไม่ตรงกับ Actual Cumulative Reward ที่ได้รับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อตอนเริ่มต้นที่ Agent ไม่มีประสบการณ์พอที่จะคำนวณให้ค่าตรงได้ ดังนั้น Agent จึงเกิดการลองผิดลองถูกเกิดขึ้น (Explore) และมีการปรับแก้ Expected Cumulative Reward ให้ใกล้เคียงกับ Actual Cumulative Reward มากขึ้น เพื่อที่จะได้ทำการ Exploit โจทย์ต่าง ๆ ที่ถูกฝึกมาได้อย่างสมบูรณ์ แบบ ยกตัวอย่างเช่น การขอเงินค่าขนมคุณแม่ เราอาจจะคาดหวังว่าเราได้รับเงิน 100 บาท (Expected Reward) แต่คุณแม่ให้เพียงแค่ 20 บาท (Actual Reward) ดังนั้นครั้งต่อไปเราจะต้องปรับความคาดหวังใหม่ให้ใกล้เคียงกับเงินค่าขนมที่ได้รับจริงมากขึ้น

เมื่อ Expected Cumulative Reward นั้นตรงกับ Actual Reward สำหรับทุก ๆ ความเป็นไปได้ หมายความว่าตัว Agent นั้นได้ทำการ Explore และ Exploit Environment นั้น ๆ จนครบทุกความเป็นไปได้แล้วนั่นเอง ซึ่งก็คือ Optimal Policy นั่นเอง

นอกจากนี้ โจทย์ส่วนใหญ่ในส่วนของ การเรียนรู้แบบเสริมกำลังนั้นจะมีจำนวน State ที่เยอะมากเสียจน Agent ไม่มีทางสำรวจหมดได้ จึงถือเป็นความยากอย่างหนึ่งสำหรับโจทย์การเรียนรู้แบบเสริมกำลังว่าจะหาวิธีแบบไหน เพื่อที่จะได้ให้ Agent สามารถทำการ Exploit โจทย์ ๆ หนึ่งได้อย่างสมบูรณ์แบบ อีกทั้งยังยากที่จะวัดผลได้ว่า วิธีการเรียนรู้ที่เราเลือกใช้ รวมไปถึงสมการรางวัล (Reward function) ที่เราออกแบบมานั้น จะทำให้ Agent สามารถเรียนรู้ที่จะทำโจทย์ต่าง ๆ ได้เก่งขึ้นจริง ๆ

ในโลกปัจจุบันนี้มีโจทย์มากมายที่สามารถใช้การเรียนรู้แบบเสริมกำลังเข้ามาช่วย อีกทั้งยังสามารถพัฒนาตัวเองให้เหนือกว่ามนุษย์ได้เช่น AlphaGo ที่เป็นข่าวโด่งดังในปี ค.ศ. 2017 ว่าสามารถเอาชนะแชมป์โลกได้ หรือ OpenAI ที่สามารถเอาชนะมนุษย์ได้อย่างขาดลอยในมิติของวิดีโอเกม นอกจากนี้ ยังมีการนำไปใช้ประโยชน์อีกมากมายนอกจากการเล่นเกมที่สามารถนำเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลังเข้ามาแก้ปัญหาหรือเพิ่มผลผลิตได้ เช่น การซื้อขายหุ้นให้ได้ผลตอบแทนมากที่สุด (Stock Trading Optimization) การค้นพบสูตรยารักษาโรคแบบใหม่ (Drug Discovery) หรือแม้กระทั่งระบบขับรถยนต์อัตโนมัติ (Self-driving Car) เป็นต้น (<https://bigdata.go.th/>)

2.7 แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด (Constraint Programming Model)

แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด (Constraint Programming Model, CP) ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาโจทย์การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization Problem) โดยได้พัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของการพัฒนาวิทยาการคอมพิวเตอร์ (Computer Science Fundamentals) เช่น การโปรแกรมเชิงตรรกะ (Logic Programming) และทฤษฎีกราฟ (Graph Theory) เป็นต้น ซึ่งมีความแตกต่างไปจากการโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Programming) ทั่วไปซึ่งถูกพัฒนาขึ้นบนหลักการพีชคณิตเชิงเส้นเชิงตัวเลข (Numerical Linear Algebra)

การโปรแกรมแบบข้อจำกัดมีประโยชน์อย่างยิ่งในการแก้โจทย์ปัญหาจริงที่มีลักษณะเป็นปัญหาเชิงซ้อน (Combinatorial Problems) หรือปัญหาจริงที่เกี่ยวข้องกับการจัดลำดับและการจัดตารางที่มีความซับซ้อนสูง (Sequencing and Scheduling Problems) ไม่ว่าจะเป็น การจัดตารางที่เกี่ยวข้องกับคน เครื่องจักร หรือกระบวนการทำงานใด ๆ การโปรแกรมแบบข้อจำกัดสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ หากสามารถระบุความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) กิจกรรม (Activities) และทรัพยากร (Resources) แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดมักจะแสดงในรูปของการประกาศตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) ข้อจำกัด (Constraint) และวัตถุประสงค์ (Objectives) ที่จะทำการหาค่าต่ำสุด (Minimization) หรือการหาค่าสูงสุด (Maximization) ของโจทย์ปัญหานั้น ๆ ยิ่งไปกว่านั้น แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดยังสามารถหาค่าคำตอบของแบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multiobjective Optimization) ได้อีกด้วย (Miettinen, 2012) แนวคิดของการโปรแกรมแบบข้อจำกัดคือการค้นหาค่าคำตอบที่ดีที่สุด โดยสมการข้อจำกัดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องถูกทำให้เป็นที่พอใจในเวลาเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ จึงจะต้องมีการระบุสภาพปัญหาจริงที่ประกอบด้วยตัวแปรที่ไม่ทราบค่าหลายตัวแปร โดยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดจะพยายามค้นหาค่าของทุกตัวแปร โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับเวลาแบ่งออกเป็น (1) การโปรแกรมแบบข้อจำกัดที่เวลาเดียวกัน (Temporal Concurrent Constraint Programming, TCC) และ (2) การโปรแกรมแบบข้อจำกัดที่เวลาไม่พร้อมเดียวกัน (Non-deterministic Temporal Concurrent Constraint Programming, MJV)

ปัญหาความพึงพอใจจากข้อจำกัด (Constraint Satisfaction Problems, CSP) เป็นลักษณะของปัญหาทางด้านคณิตศาสตร์ที่ต้องการแก้ปัญหาหรือหาค่าคำตอบที่มีข้อจำกัด (Constraint) โดยผลลัพธ์ที่ได้จะต้องไม่ขัดกับข้อจำกัดที่วางไว้ (Satisfaction) ปัญหาของ CSP จะประกอบไปด้วย จำนวนตัวแปร (Variable) ที่แน่นอน โดยแต่ละตัวแปรจะมีค่าที่อยู่ในโดเมน (Domain) ที่มีขอบเขต และเซตของข้อจำกัดที่มีการจำกัดค่าของตัวแปร โดยที่คำตอบที่ต้องการหาค่า (Solution) จะมีได้ก็ต่อเมื่อตัวแปรทุกตัวไม่ขัดกับข้อจำกัดที่มีอยู่

ข้อจำกัด (Constraint) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหลายตัวที่จำกัดค่าตัวแปรเหล่านี้ที่จะเกิดขึ้นพร้อมกัน โดยทั่วไป CSP บนโดเมนที่มีขอบเขตจำกัดจะถูกกำหนดด้วย (1) $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ คือเซตของตัวแปรของปัญหา (2) $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ คือเซตของโดเมนของตัวแปร เช่น $\forall k \in [1; n]$ และ $x_k \in D_k$

และ (3) $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ คือเซตของข้อจำกัด โดยที่ $C_i = (X_i, R_i)$ ถูกกำหนดโดยเซตของ $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ของตัวแปร และความสัมพันธ์ $R_i \subset D_{i1} \times \dots \times D_{ik}$ ซึ่งกำหนดชุดของค่าตัวแปรของ X_i

ข้อจำกัด (Constraint) จัดแบ่งออกเป็น 3 ประเภท (1) ข้อจำกัดส่วนขยาย (Extensional Constraints) เป็นข้อจำกัดที่ถูกกำหนดโดยการแจกแจงของค่าที่จะตอบสนอง (2) ข้อจำกัดทางคณิตศาสตร์ (Arithmetic Constraints) เป็นข้อจำกัดทางคณิตศาสตร์ที่ถูกกำหนดโดยนิพจน์เลขคณิต เช่น การใช้ $<, >, \leq, \geq, =, \neq, \dots$ และ (3) ข้อจำกัดทางตรรกะ (Logical Constraints) เป็นข้อจำกัดที่ถูกกำหนดขึ้นด้วยความหมายที่ชัดเจน เช่น AllDifferent, AtMost เป็นต้น

ปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุดแบบข้อจำกัด (Constraint Optimization Problem, COP) เป็นลักษณะของ CSP ที่สัมพันธ์กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) การหาค่าคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) ก็คือการหาค่าคำตอบที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุด (Minimization) และมากที่สุด (Maximization) นั่นเอง ซึ่งในระหว่างการค้นหาคำตอบของ CSP ผู้ใช้งานสามารถหาคำตอบที่ทำให้ทุกข้อจำกัดได้รับการตอบสนอง และพิสูจน์ให้เห็นถึงค่าที่เหมาะสมของคำตอบที่ดีที่สุด และพิสูจน์ความไม่สามารถตอบสนองต่อปัญหานั้น ๆ

ลักษณะของข้อจำกัดที่ใช้กำหนดในแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดมีรูปแบบเฉพาะ อย่งไรก็ดี โดเมนที่นิยมนำมาใช้ประกอบด้วย โดเมนบูลีน (Boolean Domain) โดเมนจำนวนเต็ม (Integer Domain) โดเมนช่วงค่า (Interval Domain) โดเมนเชิงเส้น (Linear Domain) โดเมนขอบเขต (Finite Domain) และ โดเมนผสมผสาน (Mixed Domain) (Rossi et al., 2006)

2.8 เครื่องมือที่ใช้งานวิจัย (Tool Used in This Research)

2.8.1 กล่องเครื่องมือ MATLAB (MATLAB Toolbox)

โปรแกรม MATLAB เขียนขึ้นโดย Dr. Cleve Moler ในช่วงปี ค.ศ. 1970 ซึ่งมีตำแหน่งเป็น Chief Scientist ของบริษัท Math Works, Inc. เริ่มแรกโปรแกรม MATLAB เป็นซอฟต์แวร์เมตริกซ์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับการใช้ในการเรียนการสอนทางด้านเมตริกซ์ พีชคณิต และการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยเฉพาะ หลังจากนั้นบริษัทได้พัฒนากล่องเครื่องมือต่าง ๆ (Toolbox) เพื่อเป็นโมดูลสำหรับใช้งานเฉพาะด้านมากยิ่งขึ้นจนกระทั่งถึงปัจจุบัน

Simulink เป็นเครื่องมือหนึ่งที่อยู่ใน Library Package ของโปรแกรม MATLAB สำหรับใช้วิเคราะห์ทดสอบ และจำลองการทำงานของระบบเชิงพลวัต (Dynamic System Simulation) ทั้งที่เป็นเชิงเส้น ไม่เชิงเส้น ระบบเวลาต่อเนื่อง ไม่ต่อเนื่อง และแบบหลายตัวแปร โดยจะทำงานภายใต้หน้าต่างที่มีการเชื่อมต่อทางรูปภาพของ Simulink เท่านั้น ซึ่งใน Simulink จะประกอบไปด้วย Blockset ที่บรรจุ Block ต่าง ๆ ไว้ แต่ละ Block ก็จะมีลักษณะและการใช้งานแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการระบุค่าให้กับ Block Parameter นั้น ๆ สำหรับขั้นตอนของการจำลองระบบนั้น สามารถกระทำได้โดยการออกแบบแบบจำลอง (Model Design) ตามที่ต้องการ ซึ่งจะต้องประกอบไปด้วย Input Blocks, Operation Blocks และ Output Blocks จากนั้นตั้ง

ค่าพารามิเตอร์ของการจำลองระบบ (Configuration Parameter) โดยครอบคลุมถึงเวลาในการจำลองระบบ (Simulation Time) ขนาดของ Time Step (Step Size) และช่วงค่าความถูกต้อง (Accuracy) ที่ต้องการ ประเภทของ Solver ที่ใช้รูปแบบของการป้อนเข้าและออกของข้อมูลที่ต้องการ ข้อกำหนดทางด้าน Optimization สำหรับแบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุด ตลอดจนยังสามารถกำหนดให้ Simulink แสดงผลในลักษณะตามที่ต้องการ หากตรวจพบความผิดปกติในระหว่างการจำลองระบบ เป็นต้น อาจกล่าวได้ว่า นอกเหนือจากขนาดของแบบจำลองที่ออกแบบแล้ว การตั้งค่าพารามิเตอร์ของการจำลองระบบยังมีผลโดยตรงต่อความเร็วในการจำลองระบบอีกด้วย

2.8.2 ภาษา MiniZinc

ภาษา MiniZinc เป็นภาษาโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในลักษณะของ Open-Source Constraint Modelling สำหรับใช้ในการแก้โจทย์ปัญหาขนาดใหญ่ที่ค่อนข้างรวดเร็วและมีความทันสมัยในยุคปัจจุบัน รวมทั้งยังสามารถใช้งานได้ฟรี การกำหนดรูปแบบปัญหาสามารถระบุได้ทั้งเลขจำนวนเต็มและเลขจำนวนจริง โดย MiniZinc Compiler สามารถแปลงรูปแบบปัญหาให้อยู่ในฟอร์มต่าง ๆ ที่เหมาะกับการแก้โจทย์ปัญหาในหลากหลายรูปแบบ เช่น การโปรแกรมเชิงข้อจำกัด (Constraint Programming, CP) การโปรแกรมเชิงเส้นของเลขจำนวนเต็มผสมผสาน (Mixed Integer Linear Programming, MIP) หรือการแก้ปัญหาโจทย์แบบ Boolean Satisfiability (SAT) ภาษา MiniZinc ยังยอมให้ผู้ใช้กำหนดรูปแบบของโครงสร้างแบบจำลองในลักษณะที่คล้ายคลึงกับการเขียนสูตรทางคณิตศาสตร์ของปัญหาใด ๆ โดยใช้เครื่องหมาย สัญลักษณ์ และ ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน นอกจากนี้ ภาษา MiniZinc ยังถูกออกแบบให้สามารถใช้งานได้ง่ายกับการแก้โจทย์ปัญหาต่าง ๆ ด้วยการแปลงไฟล์ข้อมูลนำเข้าและแบบจำลอง MiniZinc ไปเป็นแบบจำลอง FlatZinc ซึ่งในแบบจำลอง FlatZinc จะประกอบไปด้วยการประกาศตัวแปร (Variable Declaration) และ คำนิยามของสมการข้อจำกัด (Constraints Definition) และคำนิยามของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Definition of Objective Function) ถ้าหากเป็นการแก้โจทย์ปัญหาเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization Problem) (Stuckey et al., 2018)

2.8.3 ภาษา R

R เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์โปรแกรมหนึ่งที่มีความสามารถสูงในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ในปัจจุบัน R เป็นที่รู้จักของนักวิจัยในสาขาต่าง ๆ และถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย สาเหตุที่ R ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันก็เนื่องจาก R เป็นซอฟต์แวร์ประเภท Open-Source ที่ทุกคนสามารถนำมาใช้ได้โดยไม่มีค่าใช้จ่ายใด ๆ และผู้ใช้ไม่ต้องกังวลกับเรื่องของการละเมิดลิขสิทธิ์เหมือนกับโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติอื่น ๆ R เป็นโปรแกรมที่อยู่ภายใต้การดูแลของมูลนิธิที่ไม่แสวงหากำไรชื่อ R Foundation โดยมี Robert Gentleman และ Ross Ihaka จากภาควิชาสถิติ มหาวิทยาลัย Auckland เป็นผู้เริ่มพัฒนา R ขึ้น และมีสมาชิกหลักจำนวนหนึ่งซึ่งดูแลและจัดการเกี่ยวกับ R ให้กับผู้ใช้งานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1997 จนถึงปัจจุบัน R เป็นส่วนหนึ่งในโครงการของ GNU General Public License การใช้ R สามารถใช้ได้ทั้งบนระบบปฏิบัติการ Unix/Macintosh

และ Windows ข้อมูลต่าง ๆ เกี่ยวกับ R และตัวโปรแกรมสามารถหาได้จาก <http://www.r-project.org> R เป็นโปรแกรมสำหรับใช้ในการเรียนรู้ทางสถิติได้เป็นอย่างดี เนื่องจากสามารถทำให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจในกระบวนการทางสถิติได้อย่างเป็นขั้นตอน อีกทั้งยังเป็นโปรแกรมที่มีความยืดหยุ่นในการวิเคราะห์ทางสถิติ จึงทำให้ผู้ใช้งานสามารถขยายกระบวนการวิเคราะห์ออกไปได้ตามความต้องการ เนื่องจาก R เป็น Open-Source ทำให้ผู้ใช้สามารถหามาใช้ได้ง่าย นอกจากนี้ R จะเหมาะกับนักศึกษาเพื่อใช้ในการเรียนรู้ทางสถิติแล้ว R ยังเหมาะกับนักวิจัยที่ต้องการใช้วิธีเชิงสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูลอีกด้วย (วนิดา, 2559)

R มีฟังก์ชันมากมายสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติและภาพกราฟิก โดยภาพกราฟิกนี้แสดงให้เห็นได้ในทันทีในวินโดว์ของมันเอง และยังสามารถถูกบันทึกได้ในหลากหลายฟอร์แมตต์ เช่น jpg, png, bmp, ps, pdf, emf, pictex, xfig เป็นต้น ซึ่งรูปแบบที่มีอาจขึ้นอยู่กับระบบปฏิบัติการ ส่วนผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติถูกแสดงผ่านหน้าจอ โดยผลการวิเคราะห์ที่ปรากฏในทันทีบางค่า เช่น P-values, Regression Coefficients, Residuals สามารถถูกบันทึกและเขียนขึ้นเป็นไฟล์ หรือถูกใช้เพื่อการวิเคราะห์ต่อไป ภาษา R ให้ผู้ใช้งานสามารถทำการโปรแกรมได้ ตัวอย่างเช่น โปรแกรมเป็นแบบทำซ้ำหรือแบบเป็นรอบเพื่อวิเคราะห์ชุดของข้อมูลหลายชุดได้อย่างต่อเนื่อง รวมทั้งยังสามารถรวมฟังก์ชันทางสถิติที่แตกต่างกันหลายฟังก์ชันให้อยู่ในโปรแกรมเดียวเพื่อแสดงการวิเคราะห์ขั้นสูงมากขึ้นได้อีกด้วย (Paradis, 2015)

2.8.4 ภาษา Python

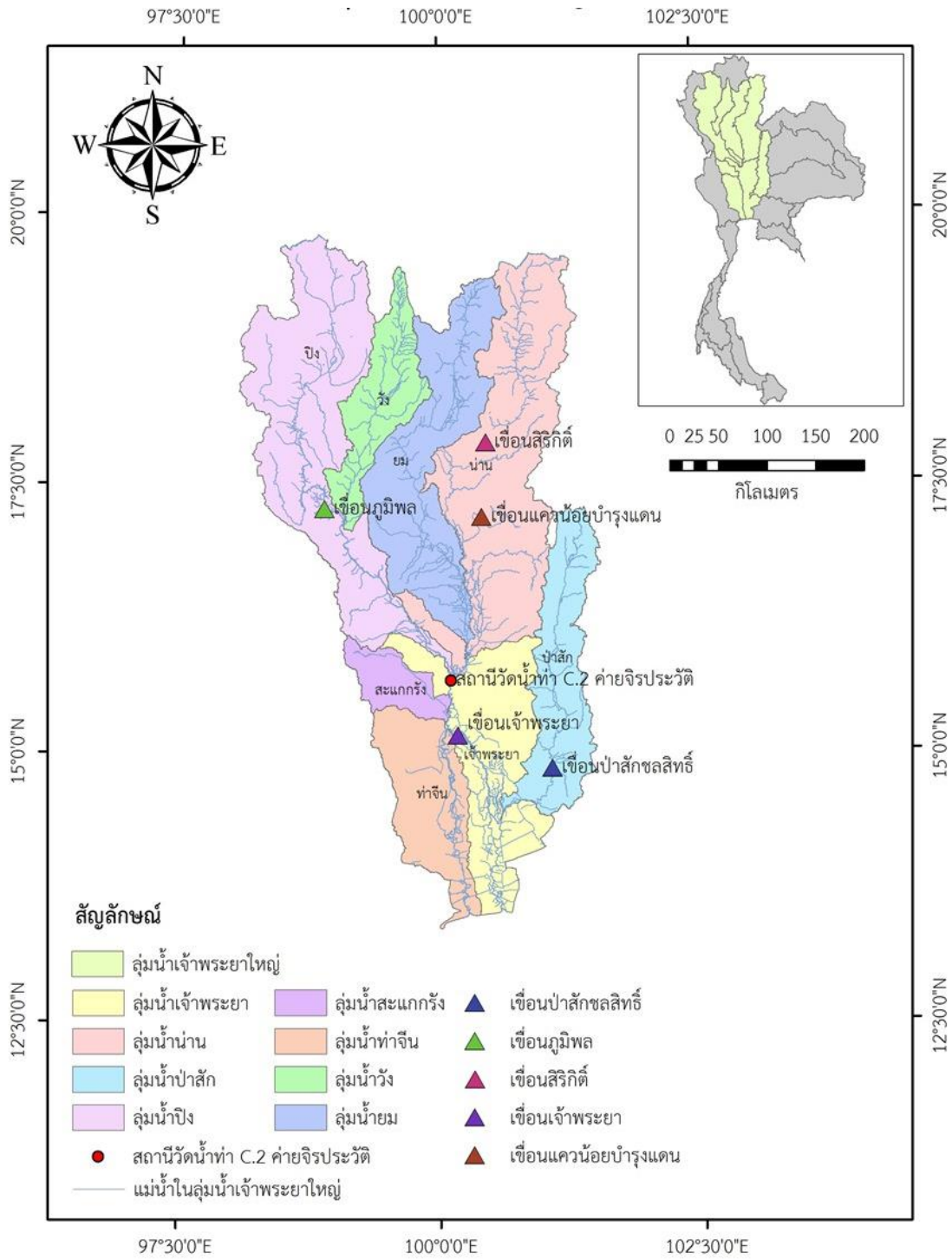
ภาษาโปรแกรม Python เป็นภาษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ระดับสูง โดยถูกออกแบบมาให้เป็นภาษาสคริปต์ที่อ่านง่ายที่ตัดความซับซ้อนของโครงสร้างและไวยากรณ์ของภาษาออกไป ในส่วนของการแปลงชุดคำสั่งที่ผู้พัฒนาเขียนให้เป็นภาษาเครื่อง Python นั้น มีการทำงานแบบ Interpreter คือเป็นการแปลชุดคำสั่งทีละบรรทัด เพื่อป้อนเข้าสู่หน่วยประมวลผลให้คอมพิวเตอร์ทำงานตามที่ผู้พัฒนาต้องการ นอกจากนี้ ภาษาโปรแกรม Python ยังสามารถนำไปใช้ในการเขียนโปรแกรมได้หลากหลายประเภท โดยไม่ได้จำกัดอยู่ที่งานเฉพาะทางใดทางหนึ่ง (General Purpose Language) จึงทำให้มีการนำไปใช้กันแพร่หลายในหลายองค์กรใหญ่ระดับโลก เช่น Google, YouTube, Instagram, Dropbox และ NASA เป็นต้น (9Expert Company Limited, 2022)

2.9 พื้นที่ศึกษา (Study Area)

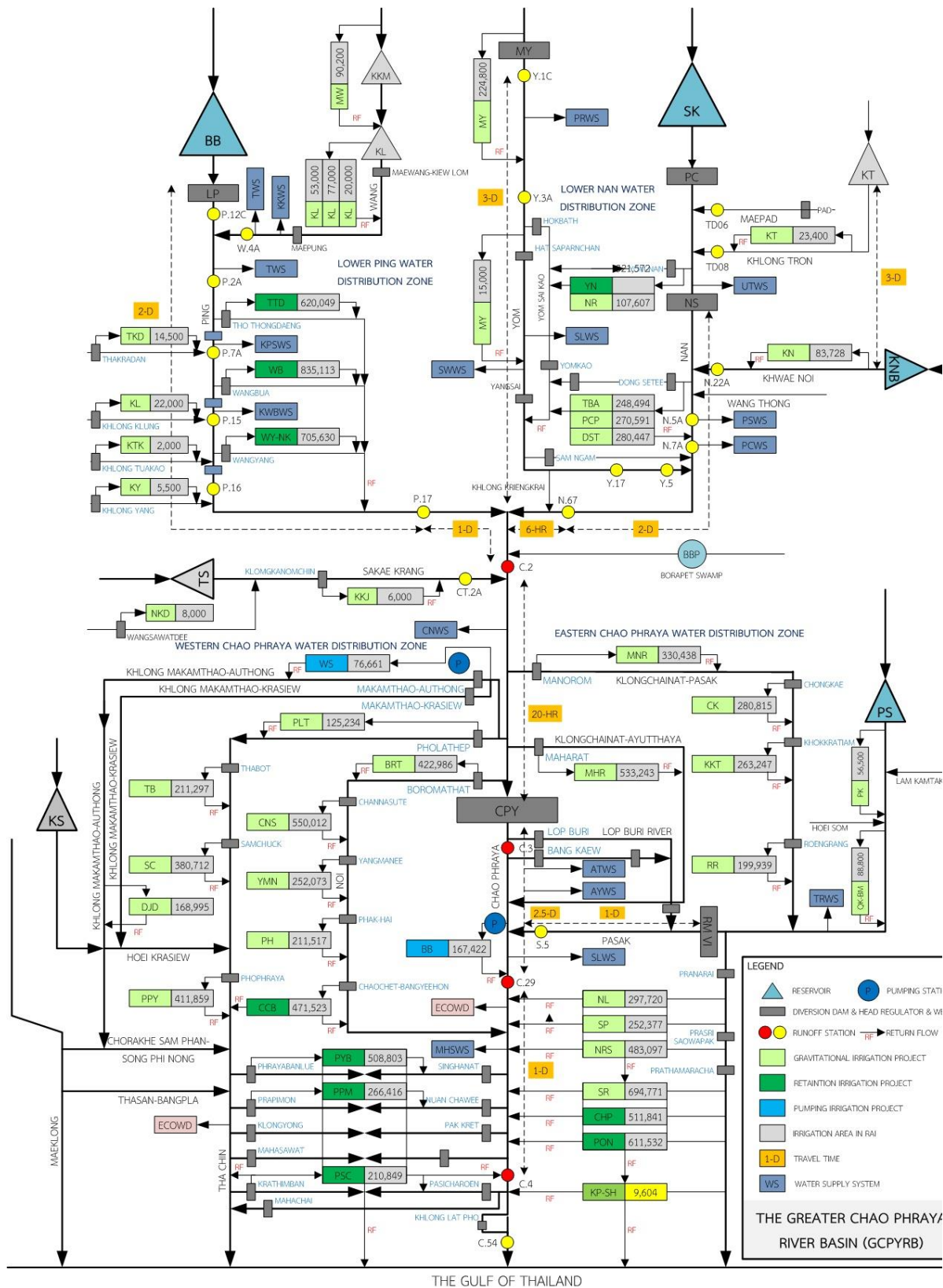
2.9.1 รายละเอียดทั่วไปของข้อมูลลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ (Greater Chao Phraya River Basin) ครอบคลุมพื้นที่ในลุ่มน้ำปิง ลุ่มน้ำวัง ลุ่มน้ำยม ลุ่มน้ำน่าน ลุ่มน้ำป่าสัก ลุ่มน้ำสะแกกรัง ลุ่มน้ำท่าจีน และลุ่มน้ำเจ้าพระยา โดยประกอบด้วยเขื่อนหลักที่สำคัญได้แก่ เขื่อนภูมิพล (Bhumibol Dam, BB) เขื่อนสิริกิติ์ (Sirikit Dam, SK) เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน (Khaewnoi Bumrungdaen Dam, KNB) เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ (Pasakcholasit Dam, PS) และเขื่อนตลิ่งชัน (Chao Phraya Dam, CPY) ดังแสดงในรูปที่ 2-10 โดยน้ำต้นทุนจากเขื่อนเก็บกักหลักได้แก่ เขื่อนภูมิพล และเขื่อนสิริกิติ์ ซึ่งอยู่ในความดูแลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะถูกจัดสรรไป

ใช้ร่วมกันร่วมกับเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเพื่อตอบสนองกิจกรรมความต้องการน้ำทางด้านทำน้ำทางตอนล่าง ได้แก่ ความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภค การอุตสาหกรรม การรักษาระบบนิเวศและการผลักดันน้ำเค็ม การผลิตพลังงานไฟฟ้า และการชลประทานในเขตโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ (Greater Chao Phraya Irrigation Project, GCPYIP) ซึ่งประกอบด้วย โครงการชลประทานในเขตลุ่มน้ำปิงตอนล่าง (Lower Ping Irrigation Scheme, LPIP) จำนวน 3 โครงการ โครงการชลประทานในเขตลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีนฝิ่งซ้ายและฝิ่งขวา (Chao Phraya-Tha Chin Irrigation Scheme, CPY-TCIS) จำนวน 26 โครงการ และโครงการชลประทานในเขตลุ่มน้ำน่านตอนล่าง (Lower Nan Irrigation Scheme, LNIS) จำนวน 5 โครงการ ภายใต้การดูแลของกรมชลประทาน โดยปริมาณน้ำที่ระบายจากเขื่อนภูมิพลและสิริกิติ์จะถูกจัดสรรไปใช้เพื่อการชลประทานผ่านระบบคลองส่งน้ำทางฝิ่งขวาและฝิ่งซ้ายของแม่น้ำเจ้าพระยา โดยมีเขื่อนทดน้ำเจ้าพระยาทำหน้าที่ผันน้ำเข้าระบบคลองส่งน้ำ รวมทั้งระบายน้ำท้ายเขื่อนส่วนหนึ่งเพื่อรักษาระบบนิเวศและช่วยผลักดันน้ำเค็มที่รุกล้ำเข้ามาบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา ดังแสดงแผนผังระบบอ่างเก็บน้ำในรูปที่ 2-11 ด้วยเหตุนี้ การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมโดยเฉพาะจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ซึ่งเป็นเขื่อนเก็บกักหลักขนาดใหญ่ในพื้นที่จึงมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพ ความยั่งยืน และความมั่นคงในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในพื้นที่ราบภาคกลางของประเทศไทย



รูปที่ 2-10 แผนที่แสดงกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่และเขื่อนหลัก



รูปที่ 2-11 แผนที่แสดงผังน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

2 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
 โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

2.9.2 รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานของเขื่อน-อ่างเก็บน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

2.9.2.1 เขื่อนภูมิพล (Bhumibol Dam)

เขื่อนภูมิพล (Bhumibol Dam, BB) เป็นเขื่อนคอนกรีตโค้งอเนกประสงค์แห่งแรกของประเทศไทยดังแสดงในรูปที่ 2-12 เดิมชื่อเขื่อนยันฮี ต่อมาเมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2500 พระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดชได้พระราชทานพระปรมาภิไธยให้เป็นชื่อเขื่อนว่า เขื่อนภูมิพล ลักษณะของเขื่อนเป็นเขื่อนคอนกรีตโค้ง (Concrete Arch Dam) เพียงแห่งเดียวในประเทศไทยและเอเชียอาคเนย์ และเป็นอันดับที่ 8 ของโลก สร้างปิดกั้นลำน้ำปิงที่บริเวณเขาแก้ว อำเภอสามเงา จังหวัดตาก เขื่อนภูมิพลนับเป็นแหล่งกักเก็บน้ำหลักของกลุ่มน้ำปิง โดยมีน้ำจากลุ่มน้ำวังมาสมทบที่บ้านตาก อำเภอสามเงา จังหวัดตาก ซึ่งอยู่ท้ายเขื่อนภูมิพลลงมา ลุ่มน้ำวังปัจจุบันไม่มีแหล่งเก็บน้ำขนาดใหญ่ น้ำจากทั้งสองลุ่มน้ำนี้นับเป็นแหล่งน้ำที่สำคัญที่ช่วยหล่อเลี้ยงภาคเกษตรกรรมตลอดลุ่มน้ำปิงตอนล่างตั้งแต่จังหวัดตาก กำแพงเพชร ลงมาถึงนครสวรรค์ และลุ่มน้ำเจ้าพระยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อการเกษตรกรรมบริเวณพื้นที่ราบภาคกลางสองฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยาในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ รวมพื้นที่มากกว่า 10 ล้านไร่ รวมทั้งเพื่อการอุปโภคบริโภค การอุตสาหกรรม การท่องเที่ยว และการผลักดันน้ำเค็ม ทางตอนล่างของกลุ่มน้ำ หรืออาจกล่าวได้ว่า การบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำปิงนับเป็นส่วนหนึ่งของการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ (กพผ., 2561ก)



รูปที่ 2-12 เขื่อนภูมิพล จังหวัดตาก

ข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญของเขื่อนและอ่างเก็บน้ำได้สรุปรายละเอียดไว้ในตารางที่ 2-1 และข้อมูลโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำและอาคารประกอบของเขื่อนภูมิพลได้สรุปรายละเอียดไว้ในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-1 รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานเขื่อนภูมิพล

ข้อมูลพื้นฐาน	หน่วย	เขื่อน-อ่างเก็บน้ำ
ลักษณะตัวเขื่อน		
ชนิด	-	คอนกรีตโค้ง
ความสูง	เมตร	154
ความยาวของสันเขื่อน	เมตร	486
ความกว้างของสันเขื่อน	เมตร	6
ความกว้างของฐานเขื่อน	เมตร	56
ระดับที่สันเขื่อน	เมตร รทก.	261
ลักษณะของอ่างเก็บน้ำ		
ระดับน้ำเก็บกักสูงสุด	เมตร รทก.	260.00
ระดับน้ำเก็บกักปกติ	เมตร รทก.	260.00
ระดับน้ำเก็บกักต่ำสุด	เมตร รทก.	213.00
ระดับน้ำต่ำสุดที่ผลิตไฟฟ้า	เมตร รทก.	213
ระดับเขตน้ำ	เมตร	47
ระดับน้ำท้ายเขื่อน	เมตร รทก.	138
ปริมาณน้ำเก็บกักสูงสุด	ล้านลูกบาศก์เมตร	13,462
ปริมาณน้ำเก็บกักปกติ	ล้านลูกบาศก์เมตร	13,462
ปริมาณน้ำเก็บกักต่ำสุด	ล้านลูกบาศก์เมตร	3,800
ปริมาณน้ำใช้การ	ล้านลูกบาศก์เมตร	9,662
ปริมาณน้ำไม่ใช้การ	ล้านลูกบาศก์เมตร	3,800
ปริมาณน้ำใช้งานที่ผลิตไฟฟ้า	ล้านลูกบาศก์เมตร	9,662
พื้นที่รับน้ำ	ตารางกิโลเมตร	26,386
พื้นที่ผิวน้ำที่ระดับเก็บกักสูงสุด	ตารางกิโลเมตร	318
ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเฉลี่ย (2555-2563)	ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี	3,913
ปริมาณการสูญเสียจากการระเหยและรั่วซึม	ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี	432

ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2555)

ตารางที่ 2-2 รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำเขื่อนภูมิพล

ข้อมูลพื้นฐาน	หน่วย	โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ			
		1-4	5-6	7	8
Generator	ยูนิต	1-4	5-6	7	8
Installed Capacity	MW	82.2	82.2	115	171/160
Rated Output	MVA	80.3	80.3	121	180
Generator Voltage	KV	13.80			
Power Factor	Lagging	0.95			
Total Installed Capacity	MW	779.20			

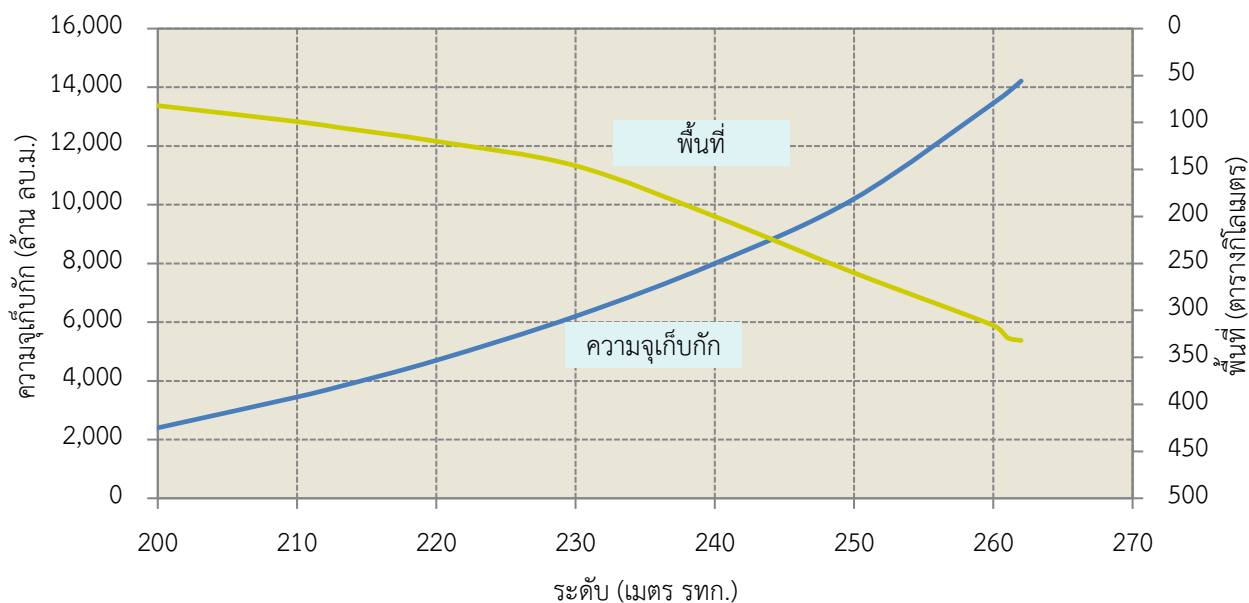
ข้อมูลพื้นฐาน	หน่วย	โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ			
Total Annual Energy	MW-Hr	1,062,000			
Turbine					
Type	-	Francis			
Rated Head	M	100	96	105	96/118-96
Rated Discharge	CMS	85	79.5	139.4	169/120-157
Rated Output	MW	96	96	123	145/152-162
Spillway					
Type	-	Tunnel			
Crest Elevation	M. MSL.	242.90			
Control Gate	Radial	4			
Gate Size	M	11x17.4			
Discharge Capacity	CMS	6,000			
Maximum Discharge Recorded	CMS	4,500			

2.9.3 ข้อมูลลักษณะสำคัญทางกายภาพของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล

ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเก็บกัก-พื้นที่ผิวน้ำ-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล แสดงในตารางที่ 2-3 และรูปที่ 2-19

ตารางที่ 2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเก็บกัก-พื้นที่ผิวน้ำ-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล

ระดับ (ม.รทก.)	พื้นที่ผิวน้ำ (ตร.กม.)	ความจุเก็บกัก (ล้าน ลบ.ม.)
200.00	82	2,400
210.00	99	3,450
213.00	105	3,800
220.00	120	4,700
230.00	146	6,200
240.00	200	8,000
250.00	260	10,200
260.00	316	13,462
261.00	329	13,812
262.00	332	14,212



รูปที่ 2-13 โค้งระดับ-พื้นที่-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล

2.9.2.2 เขื่อนสิริกิติ์ (Sirikit Dam)

เขื่อนสิริกิติ์ (Sirikit Dam, SK) หรือเดิมชื่อว่า “เขื่อนผาช่อม” ดังแสดงในรูปที่ 2-20 เป็นเขื่อนดินที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย ก่อสร้างขึ้นตามโครงการพัฒนาลุ่มน้ำน่าน ตั้งอยู่ที่ตำบลผาเสียด อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ โดยก่อสร้างปิดกั้นแม่น้ำน่านบริเวณเขาผาช่อม ต่อมาได้รับพระบรมราชานุญาตให้เชิญพระนามาภิไธย สมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ พระบรมราชินีนาถ ในรัชกาลที่ 9 ขนานนามว่า “เขื่อนสิริกิติ์” จัดเป็นเขื่อนดินที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทย เขื่อนแห่งนี้เดิมอยู่ในความดูแลของกรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ภายหลังจากที่ได้มีการติดตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ หลังจากนั้นจึงได้มอบให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเป็นผู้รับผิดชอบดูแลต่อไป เขื่อนสิริกิติ์ดำเนินการก่อสร้างโดยกรมชลประทาน เมื่อปี พ.ศ. 2506 แล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2515 ลักษณะของเขื่อนเป็นเขื่อนดิน แกนกลางเป็นดินเหนียว อ่างเก็บน้ำสามารถเก็บกักน้ำได้ 9,510 ล้านลูกบาศก์เมตร ความจุของอ่างมากเป็นที่สามารถจากเขื่อนศรีนครินทร์และเขื่อนภูมิพล โรงไฟฟ้าและองค์ประกอบดำเนินการก่อสร้างโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เมื่อปี พ.ศ. 2511 แล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2515 ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รวม 4 เครื่อง กำลังผลิตเครื่องละ 125,000 กิโลวัตต์ รวมกำลังผลิต 500,000 กิโลวัตต์ ให้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยปีละ 1,000 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง พระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดช บรมนาถบพิตร และสมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ พระบรมราชินีนาถ ในรัชกาลที่ 9 เสด็จพระราชดำเนินพร้อมด้วยสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ไปทรงประกอบพิธีเปิดเขื่อนสิริกิติ์และโรงไฟฟ้าเมื่อวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2520

เขื่อนสิริกิติ์จัดเป็นเขื่อนอเนกประสงค์ที่ใช้ประโยชน์หลากหลายประการ ที่สำคัญได้แก่ การชลประทานในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ โดยน้ำจากอ่างเก็บน้ำจะถูกระบายออกไปยังพื้นที่เพาะปลูกในทุ่งราบสองฝั่งแม่น้ำน่านกับพื้นที่ทุ่งเจ้าพระยาทั้งในฤดูฝนและฤดูแล้งในปริมาณที่ได้มีการตกลงร่วมกันไว้กับกรม

ชลประทาน การบรรเทาอุทกภัยโดยอ่างเก็บน้ำจะทำหน้าที่ช่วยเก็บกักน้ำที่อาจจะไหลบ่าลงมา ช่วยลดการเกิดอุทกภัยในทุ่งราบสองฝั่งแม่น้ำน่าน ตลอดจนทุ่งเจ้าพระยาจนถึงกรุงเทพมหานคร และที่สำคัญเขื่อนยังสามารถผลิตกระแสไฟฟ้า โดยน้ำที่ระบายออกไปเพื่อการชลประทานจะผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 4 เครื่อง ให้พลังไฟฟ้า 500,000 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นการช่วยเสริมระบบไฟฟ้าของประเทศให้มั่นคงยิ่งขึ้น นอกจากนี้ เขื่อนสิริกิติ์ยังช่วยในด้านการประมง การคมนาคมทางน้ำ และการท่องเที่ยวอีกด้วย (กฟผ., 2561ข)



รูปที่ 2-14 เขื่อนสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์

ข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญของเขื่อนและอ่างเก็บน้ำได้สรุปรายละเอียดไว้ในตารางที่ 2-4 และข้อมูลโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำและอาคารประกอบของเขื่อนสิริกิติ์ได้สรุปรายละเอียดไว้ในตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-4 รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานเขื่อนสิริกิติ์

ข้อมูลพื้นฐาน	หน่วย	เขื่อน-อ่างเก็บน้ำ
ลักษณะตัวเขื่อน		
ชนิด	-	เขื่อนดิน
ความสูง	เมตร	114.60
ความยาวของสันเขื่อน	เมตร	800
ความกว้างของสันเขื่อน	เมตร	12
ความกว้างของฐานเขื่อน	เมตร	630
ระดับที่สันเขื่อน	เมตร รทก.	169.00
ลักษณะของอ่างเก็บน้ำ		
ระดับน้ำเก็บกักสูงสุด	เมตร รทก.	165.60
ระดับน้ำเก็บกักปกติ	เมตร รทก.	160.00
ระดับน้ำเก็บกักต่ำสุด	เมตร รทก.	128.00

ข้อมูลพื้นฐาน	หน่วย	เขื่อน-อ่างเก็บน้ำ
ปริมาณน้ำเก็บกักสูงสุด	ล้านลูกบาศก์เมตร	10,500
ปริมาณน้ำเก็บกักปกติ	ล้านลูกบาศก์เมตร	9,510
ปริมาณน้ำเก็บกักต่ำสุด	ล้านลูกบาศก์เมตร	2,850
ปริมาณน้ำใช้การ	ล้านลูกบาศก์เมตร	6,660
ปริมาณน้ำไม่ใช้การ	ล้านลูกบาศก์เมตร	2,850
พื้นที่รับน้ำ	ตารางกิโลเมตร	13,300
พื้นที่ผิวน้ำที่ระดับเก็บกักสูงสุด	ตารางกิโลเมตร	259.60

ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2555)

ตารางที่ 2-5 รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำเขื่อนสิริกิติ์

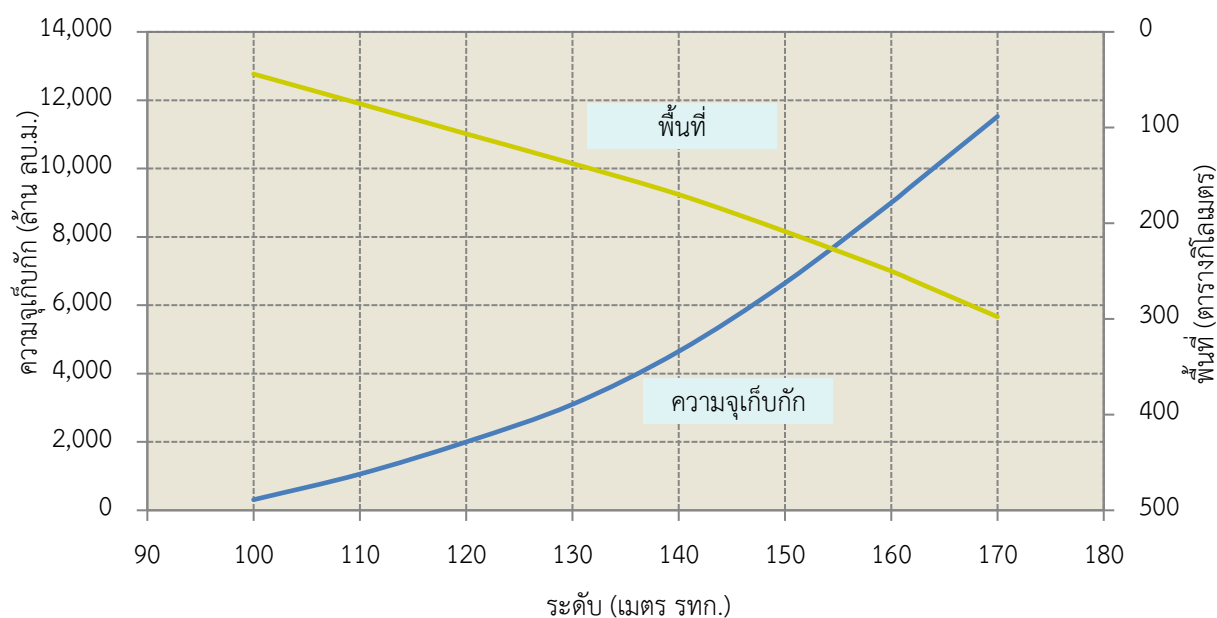
ข้อมูลพื้นฐาน	หน่วย	โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ	
		1-3	4
Generator	ยูนิต	1-3	4
Installed Capacity	MW	125	125
Rated Output	MVA	132	132
Generator Voltage	KV	13.80	
Power Factor	Lagging	0.95	
Total Installed Capacity	MW	500	
Total Annual Energy	MW-Hr	1,000,000	
Turbine			
Type	-	Francis	
Rated Head	M	68	68
Rated Discharge	CMS	183.6	183.6
Rated Output	MW	120.7	120.7
Spillway			
Type	-	2 Tunnel	
Crest Elevation	M. MSL.	150.5	
Control Gate	Radial	2	
Gate Size	M	11.85x15	
Discharge Capacity	CMS	3,250	
Maximum Flood Recorded	CMS	8,000	

2.9.3 ข้อมูลลักษณะสำคัญทางกายภาพของอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์

ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเก็บกัก-พื้นที่ผิวน้ำ-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์ แสดงในตารางที่ 2-6 และรูปที่ 2-15

ตารางที่ 2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเก็บกัก-พื้นที่ผิวน้ำ-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์

ระดับ (ม.รทก.)	พื้นที่ผิวน้ำ (ตร.กม.)	ความจุเก็บกัก (ล้าน ลบ.ม.)
100.00	44	310
110.00	75	1,060
120.00	107	2,000
130.00	138	3,100
140.00	170	4,650
150.00	209	6,650
160.00	250	9,000
162.00	260	9,510
170.00	298	11,525



รูปที่ 2-15 โค้งระดับ-พื้นที่-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์

2.9.2.3 เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน (Khaewnoi Bumrungdaen Dam)

เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน (Khaewnoi Bumrungdaen Dam, KNB) ดังแสดงในรูปที่ 2-16 เป็นส่วนหนึ่งของโครงการเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดพิษณุโลก เป็นโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดช เพื่อช่วยเหลือราษฎรในพื้นที่ลุ่มน้ำแควน้อยตอนล่างที่ประสบปัญหาอุทกภัย รวมทั้งเป็นแหล่งน้ำสำหรับการเพาะปลูกทั่วไปฤดูฝนและฤดูแล้ง ตลอดจนสำหรับการอุปโภคบริโภค เขื่อนแควน้อยบำรุงแดนมีลักษณะเป็นเขื่อนหินถมลาดหน้าด้วยคอนกรีต ความสูง 75 เมตร ความยาว 681 เมตร มีพื้นที่อ่างเก็บน้ำที่ระดับเก็บกักปกติอยู่ที่ 61.39 ตารางกิโลเมตร ความจุอ่างเก็บน้ำที่ระดับเก็บกักปกติ 939 ล้านลูกบาศก์เมตร ส่งน้ำให้พื้นที่การเกษตร 155,166 ไร่

ครอบคลุมพื้นที่อำเภอวัดโบสถ์ อำเภอวังทอง อำเภอเมืองพิษณุโลก และอำเภอบางกระทุ่ม จังหวัดพิษณุโลก กั้นแม่น้ำแควน้อย อาคารโรงไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตั้งอยู่บน ผังซ้ายของเขื่อนแควน้อยบริเวณท้ายน้ำของ River Outlet (กฟผ., 2561ค)



รูปที่ 2-16 เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน จังหวัดพิษณุโลก

ข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญของเขื่อนและอ่างเก็บน้ำได้สรุปรายละเอียดไว้ในตารางที่ 2-7 และข้อมูล โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำและอาคารประกอบของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนได้สรุปรายละเอียดไว้ในตารางที่ 2-8

ตารางที่ 2-7 รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

ข้อมูลพื้นฐาน	หน่วย	เขื่อน-อ่างเก็บน้ำ
ลักษณะตัวเขื่อน		
ชนิด	-	เขื่อนหินถมลาดหน้าด้วยคอนกรีต
ความสูง	เมตร	75
ความยาวที่สันเขื่อน	เมตร	681
ระดับที่สันเขื่อน	เมตร รทก.	135.00
ลักษณะของอ่างเก็บน้ำ		
ระดับน้ำเก็บกักสูงสุด	เมตร รทก.	130.00
ระดับน้ำเก็บกักปกติ	เมตร รทก.	90.00
ระดับน้ำเก็บกักต่ำสุด	เมตร รทก.	88.60
ปริมาณน้ำเก็บกักสูงสุด	ล้านลูกบาศก์เมตร	939
ปริมาณน้ำเก็บกักปกติ	ล้านลูกบาศก์เมตร	769
ปริมาณน้ำเก็บกักต่ำสุด	ล้านลูกบาศก์เมตร	36
ปริมาณน้ำใช้การ	ล้านลูกบาศก์เมตร	733

ข้อมูลพื้นฐาน	หน่วย	เขื่อน-อ่างเก็บน้ำ
ปริมาณน้ำไม่ใช้การ	ล้านลูกบาศก์เมตร	36
พื้นที่รับน้ำ	ตารางกิโลเมตร	4,254
ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเฉลี่ย (2555-2563)	ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี	5,084

ตารางที่ 2-8 รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

ข้อมูลพื้นฐาน	หน่วย	โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ
Generator	ยูนิต	1-2
Installed Capacity	MW	15@2
Total Installed Capacity	MW	30
Total Annual Energy	MW-Hr	146.6

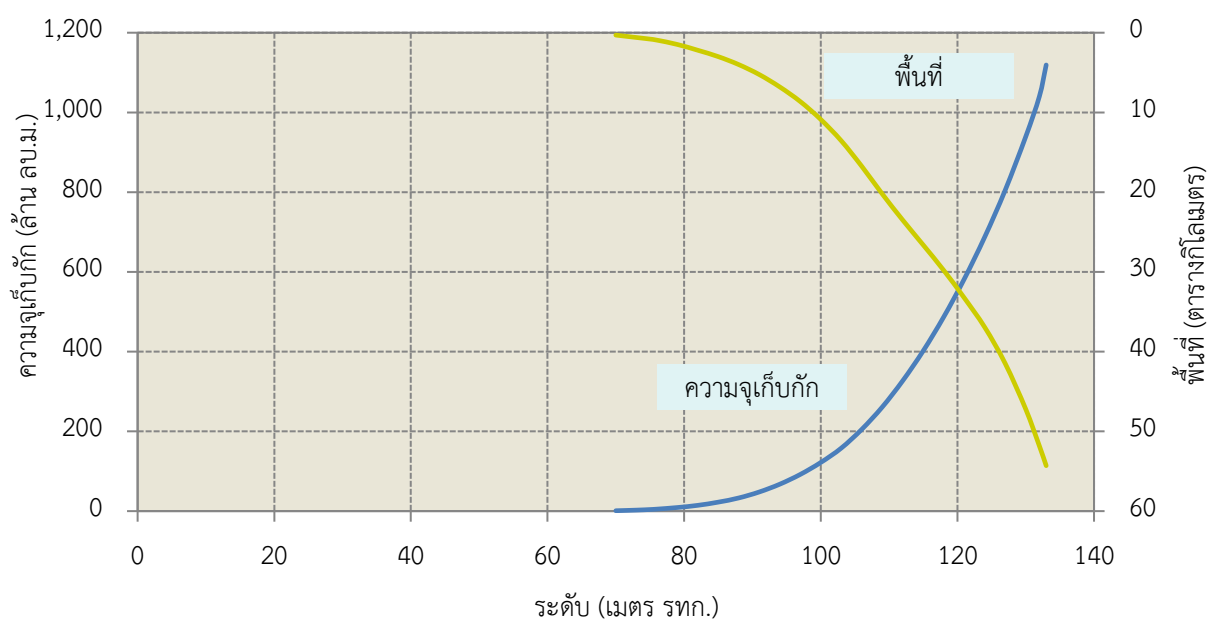
2.9.3 ข้อมูลลักษณะสำคัญทางกายภาพของอ่างเก็บน้ำเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเก็บกัก-พื้นที่ผิวน้ำ-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนแสดงในตารางที่ 2-9 และรูปที่ 2-17

ตารางที่ 2-9 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเก็บกัก-พื้นที่ผิวน้ำ-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

ระดับ (ม.รทก.)	พื้นที่ผิวน้ำ (ตร.กม.)	ความจุเก็บกัก (ล้าน ลบ.ม.)
70.00	0.30	1.00
73.00	0.60	2.50
75.00	0.80	4.00
76.00	0.93	5.00
79.00	1.47	9.00
82.00	2.20	14.50
85.00	3.00	22.50
88.00	4.00	33.00
91.00	5.25	48.00
94.00	6.80	67.50
97.00	8.63	92.00
100.00	10.88	122.00
103.00	13.55	158.00
106.00	16.75	205.00
109.00	20.22	261.00
112.00	23.50	327.00
115.00	26.62	402.00

ระดับ (ม.รทก.)	พื้นที่ผิวหน้า (ตร.กม.)	ความจุเก็บกัก (ล้าน ลบ.ม.)
118.00	29.80	487.00
121.00	33.25	582.00
124.00	36.94	687.5
127.00	41.48	805.00
130.00	47.20	939.00
132.00	51.82	1,040.00
133.00	54.30	1,119.03



รูปที่ 2-17 โค้งระดับ-พื้นที่-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

2.9.2.4 เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ (Pasakcholasit Dam, PS)

เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ (Pasakcholasit Dam, PS) ดังแสดงในรูปที่ 2-18 เป็นโครงการตามพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดชที่ทรงดำริให้สร้างเขื่อนเพื่อเก็บกักน้ำและแก้ไขปัญหาน้ำท่วม โดยพระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดชได้พระราชทานนามว่า “เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์” และเสด็จทรงเปิดเขื่อนฯ เมื่อวันที่ 25 พฤศจิกายน พ.ศ. 2542 บ้านหนองบัว ที่ตั้งเขื่อนอยู่ที่ตำบลหนองบัว อำเภอพัฒนานิคม จังหวัดลพบุรี และบ้านคำพราน ตำบลคำพราน อำเภอวังม่วง จังหวัดสระบุรี

“แม่น้ำป่าสัก” เป็นแม่น้ำสายสำคัญที่สุดสายหนึ่งของชาวจังหวัดลพบุรีและสระบุรี ประชาชนจะได้ประโยชน์จากแม่น้ำป่าสักอย่างมหาศาล ไม่ว่าจะเป็นด้านเกษตรกรรมหรือการประมง แต่ในช่วงเดือนสิงหาคม ถึงเดือนตุลาคมของทุกปี จะเกิดน้ำท่วมฉับพลันในหลายพื้นที่ของจังหวัดลพบุรี เช่น ตำบลมะนาวหวาน ตำบลหนองบัว อำเภอพัฒนานิคม ตำบลลำนายารยณ์ อำเภอชัยบาดาล และหมู่บ้าน

ใกล้เคียงอีกรวมไปถึงจังหวัดสระบุรี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา กรุงเทพมหานคร และปริมาณชล สำหรับในช่วงเดือนมกราคม ถึงเดือนพฤษภาคม พื้นที่ในกลุ่มน้ำป่าสักก็จะประสบภาวะแห้งแล้ง ขาดแคลนน้ำใช้เพื่อการเกษตรและอุปโภค บริโภค ในปี พ.ศ. 2508 กรมชลประทานได้เริ่มศึกษาโครงการเขื่อนเก็บกักน้ำแม่ น้ำป่าสัก แต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายสูงจึงได้ระงับโครงการฯ พระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดชทรงมีพระราชกรณียกิจมากมายหลายด้าน แต่หลายครั้งที่พระองค์เสด็จพระราชดำเนินมาเยี่ยมราษฎรจังหวัดลพบุรีด้วยความห่วงใย และได้เสด็จไปทอดพระเนตรพื้นที่ในเขตอำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรีที่กำลังประสบปัญหาอยู่ด้วยสายพระเนตรอันยาวไกล และด้วยความห่วงใยในพสกนิกรของพระองค์ ด้วยพระอัจฉริยภาพที่ล้ำลึก และเป็นพระมหากษัตริย์นักพัฒนาที่ยิ่งใหญ่ ทรงแก้ปัญหาให้ “ความโหดร้าย” ของแม่น้ำป่าสักกลับกลายเป็น “ความสงบเสงี่ยม” ที่น่านิยม พระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดช ทรงหาทางแก้ไขปัญหาคความเดือดร้อนของประชาชน เมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2532 พระองค์ท่านได้มีพระราชดำริให้กรมชลประทานดำเนินการศึกษาความเหมาะสมของโครงการเขื่อนกักเก็บน้ำแม่ น้ำป่าสักอย่างเร่งด่วน เพื่อแก้ปัญหาความขาดแคลนน้ำ เป็นประโยชน์ต่อพื้นที่เพาะปลูก และบรรเทาอุทกภัยที่เกิดขึ้น (กฟผ., 2561ง)



รูปที่ 2-18 เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ จังหวัดสระบุรี

ข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญของเขื่อนและอ่างเก็บน้ำได้สรุปรายละเอียดไว้ในตารางที่ 2-10 และข้อมูลโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำและอาคารประกอบของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ได้สรุปรายละเอียดไว้ในตารางที่ 2-11

ตารางที่ 2-10 รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

ข้อมูลพื้นฐาน	หน่วย	เขื่อน-อ่างเก็บน้ำ
ลักษณะตัวเขื่อน		
ชนิด	-	เขื่อนดินแกนดินเหนียว
ความสูง	เมตร	31.5
ความยาวที่สันเขื่อน	เมตร	4,860
ระดับที่สันเขื่อน	เมตร รทก.	46.50
ลักษณะของอ่างเก็บน้ำ		
ระดับน้ำเก็บกักสูงสุด	เมตร รทก.	43.00
ระดับน้ำเก็บกักปกติ	เมตร รทก.	42.00
ระดับน้ำเก็บกักต่ำสุด	เมตร รทก.	29.00
ปริมาณน้ำเก็บกักสูงสุด	ล้านลูกบาศก์เมตร	960
ปริมาณน้ำเก็บกักปกติ	ล้านลูกบาศก์เมตร	785
ปริมาณน้ำเก็บกักต่ำสุด	ล้านลูกบาศก์เมตร	3
ปริมาณน้ำใช้การ	ล้านลูกบาศก์เมตร	782
ปริมาณน้ำไม่ใช้การ	ล้านลูกบาศก์เมตร	3
พื้นที่รับน้ำ	ตารางกิโลเมตร	14,520
ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเฉลี่ย	ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี	2,400

ตารางที่ 2-11 รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

ข้อมูลพื้นฐาน	หน่วย	โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ
Generator	ยูนิต	1
Installed Capacity	MW	6.70
Total Installed Capacity	MW	6.70
Total Annual Energy	MW-Hr	34.80

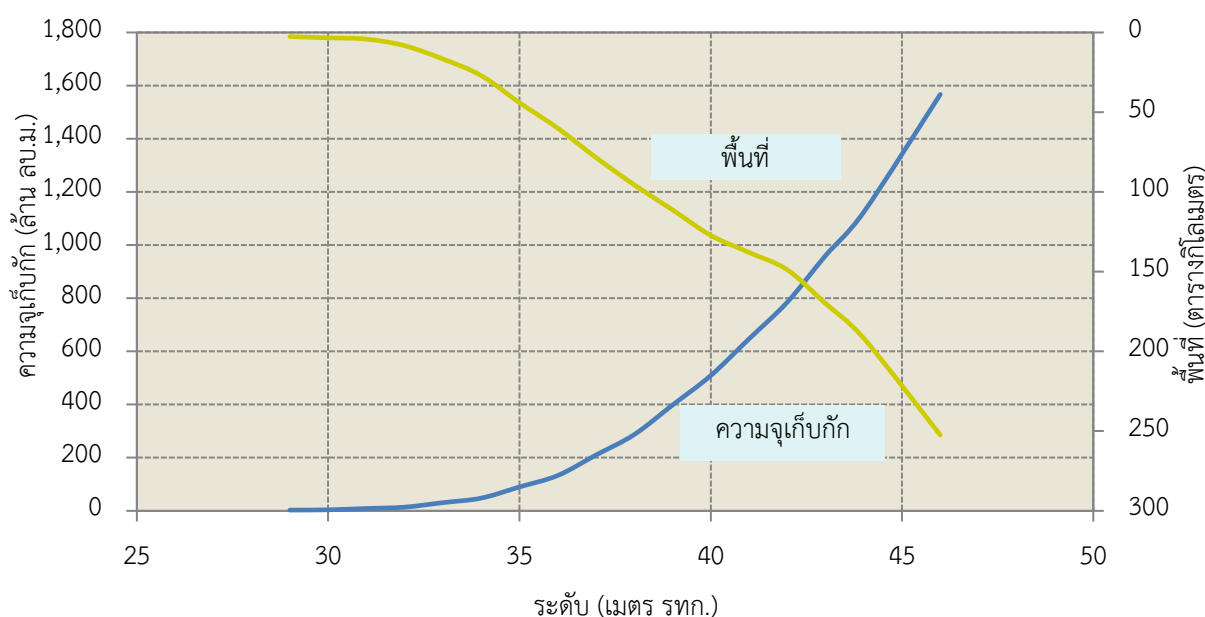
2.9.3 ข้อมูลลักษณะสำคัญทางกายภาพของอ่างเก็บน้ำเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเก็บกัก-พื้นที่ผิวน้ำ-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ในตารางที่ 2-12 และรูปที่ 2-19

ตารางที่ 2-12 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเก็บกัก-พื้นที่ผิวน้ำ-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

ระดับ (ม.รทก.)	พื้นที่ผิวน้ำ (ตร.กม.)	ความจุเก็บกัก (ล้าน ลบ.ม.)
29.00	2.56	3.00
30.00	3.36	4.00
31.00	4.16	9.00

ระดับ (ม.รทก.)	พื้นที่ผิวน้ำ (ตร.กม.)	ความจุเก็บกัก (ล้าน ลบ.ม.)
32.00	8.32	14.00
33.00	16.64	31.00
34.00	27.04	48.00
35.00	44.00	90.00
36.00	60.00	133.00
37.00	78.40	210.00
38.00	95.52	287.00
39.00	111.20	398.00
40.00	127.20	509.00
41.00	137.92	647.00
42.00	148.80	785.00
43.00	169.92	960.00
44.00	191.75	1,124.08
46.00	252.43	1,566.81



รูปที่ 2-19 โค้งระดับ-พื้นที่-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

2.9.4 โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่

โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ (Greater Chao Phraya Irrigation Project) เป็นโครงการพัฒนากลุ่มน้ำเจ้าพระยาเพื่อการเพาะปลูกสำหรับพื้นที่ราบภาคกลางสองฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยา โดยมีขอบเขตตั้งแต่จังหวัดชัยนาทถึงอ่าวไทย เดิมการเพาะปลูกในเขตพื้นที่ต้องอาศัยน้ำฝนเป็นหลัก อย่างไรก็ตาม ในปีฝนแล้ง

เกษตรกรมักได้รับความเดือดร้อนจากปัญหาการขาดแคลนน้ำอยู่เป็นประจำ ทำให้กรมชลประทานได้ทำการพัฒนาโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ขึ้นโดยได้เริ่มเตรียมงานเบื้องต้นในปี พ.ศ. 2494 และเริ่มงานก่อสร้างเขื่อนเจ้าพระยา พร้อมกับระบบคลองส่งน้ำในปี พ.ศ. 2495 จนแล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2500 ในปัจจุบันโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ได้รับการจัดสรรน้ำจากอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ เป็นหลัก โดยมีพื้นที่ชลประทานที่ได้รับการจัดสรรน้ำครอบคลุมโครงการชลประทานลุ่มน้ำปิงตอนล่าง โครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน และโครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง รวมเป็นพื้นที่ชลประทานกว่า 8,848,684 ไร่ ดังแสดงในตารางที่ 2-13 และรูปที่ 2-20 ถึงรูปที่ 2-23 หน่วยงานที่รับผิดชอบในการจัดสรรน้ำในพื้นที่ชลประทานเป็นของสำนักชลประทานที่ 4 ครอบคลุมพื้นที่โครงการชลประทานลุ่มน้ำปิงตอนล่างในเขตจังหวัดตาก กำแพงเพชร และนครสวรรค์ สำนักชลประทานที่ 3 ครอบคลุมพื้นที่โครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่างในเขตจังหวัดอุตรดิตถ์ พิษณุโลก พิจิตร และนครสวรรค์ และสำนักชลประทานที่ 10, 11 และ 12 ครอบคลุมพื้นที่โครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีนในหลายเขตจังหวัดของภาคกลาง ซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมอาคารต่าง ๆ ในระบบคลองส่งน้ำ โดยมีฝ่ายจัดสรรน้ำเป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบในการกำหนดปริมาณน้ำผ่านอาคารหลักที่สำคัญในระบบ และฝ่ายจัดสรรน้ำยังทำหน้าที่ติดต่อประสานงานกับหน่วยงานอื่น ๆ เช่น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เพื่อขอให้ทำการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลและสิริกิติ์ หรือกรมส่งเสริมการเกษตรเพื่อกำหนดเป้าหมายพื้นที่เพาะปลูกในแต่ละช่วงฤดู เป็นต้น (กรมทรัพยากรน้ำ, 2559)

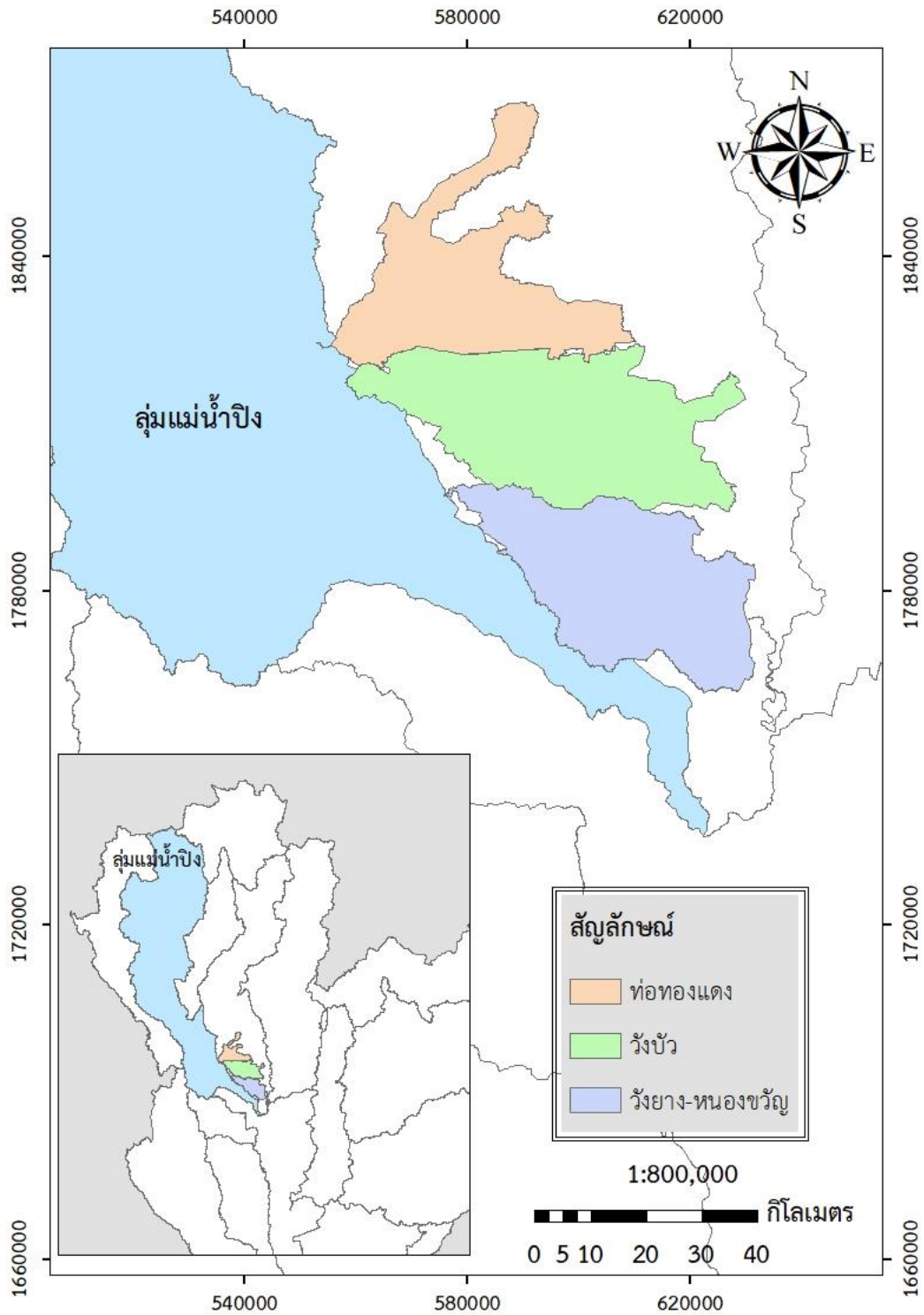
ตารางที่ 2-13 รายละเอียดสำคัญของโครงการชลประทานในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

ลำดับ	โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา	พื้นที่โครงการชลประทาน (ไร่)	สำนักชลประทานที่	ประเภทโครงการประทาน
โครงการชลประทานลุ่มน้ำปิงตอนล่าง				
1	ท่อทองแดง	643,125	4	ชลประทานแบบรับน้ำนอง
2	วังบัว	446,250	4	ชลประทานแบบรับน้ำนอง
3	วังยาง-หนองขวัญ	559,375	4	ชลประทานแบบรับน้ำนอง
รวม		1,648,750		
โครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน				
1	วัดสิงห์	67,744	12	ชลประทานแบบสูบน้ำ
2	บางบาล	137,000	12	ชลประทานแบบสูบน้ำ
3	พลเทพ	96,300	12	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
4	ท่าโบสถ์	196,356	12	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
5	สามชุก	305,000	12	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
6	ดอนเจดีย์	146,000	12	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
7	โพธิ์พระยา	370,000	12	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
8	บรมธาตุ	365,000	12	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
9	ชัยสุตร	448,250	12	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง

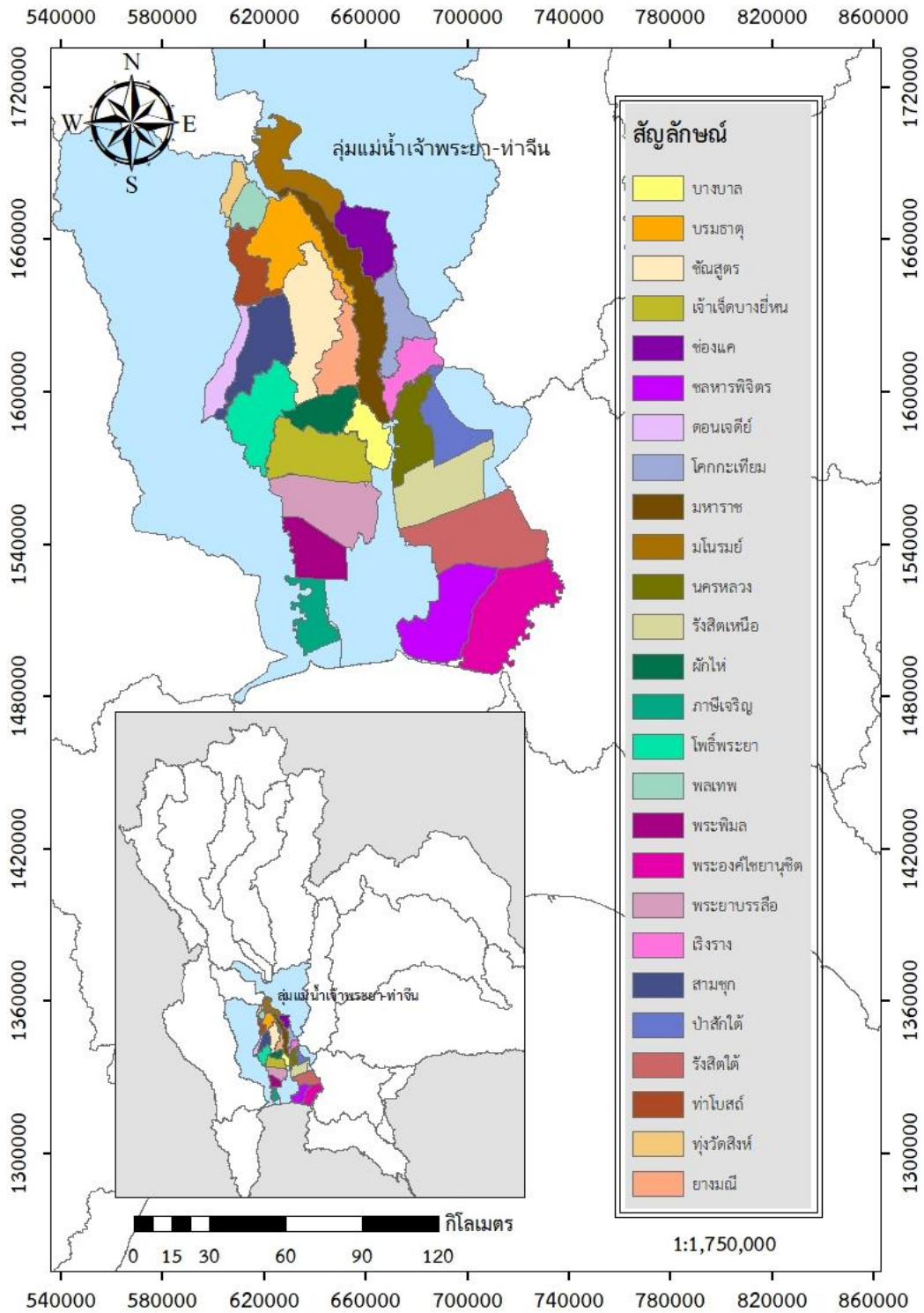
2 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ลำดับ	โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา	พื้นที่โครงการชลประทาน (ไร่)	สำนักชลประทานที่	ประเภทโครงการประทาน
10	ยางมณี	210,321	12	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
11	ฝักไ้	206,000	12	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
12	มหाराช	485,400	10	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
13	มโนรมย์	284,265	10	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
14	ช่องแค	238,739	10	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
15	โคกกระเทียม	205,470	10	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
16	เริงราง	179,000	10	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
17	ป่าสักใต้	240,600	10	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
18	นครหลวง	267,048	10	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
19	รังสิตเหนือ	455,500	11	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
20	รังสิตใต้	526,000	11	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
21	เจ้าเจ็ดบางยี่หน	406,000	11	ชลประทานแบบรับน้ำนอง
22	พระยาบันลือ	358,650	11	ชลประทานแบบรับน้ำนอง
23	พระพิมล	266,000	11	ชลประทานแบบรับน้ำนอง
24	ภาษีเจริญ	124,800	11	ชลประทานแบบรับน้ำนอง
25	คลองด่าน	525,000	11	ชลประทานแบบรับน้ำนอง
26	พระองค์ไชยานุชิต	510,000	11	ชลประทานแบบรับน้ำนอง
รวม		7,620,443		
โครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง				
1	พลายชุมพล	270,481	3	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
2	ดงเศรษฐี	280,359	3	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
3	ท่าบัว	248,419	3	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
4	นเรศวร	107,567	3	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
5	ยมน่าน	321,415	3	ชลประทานแบบรับน้ำนอง
รวม		1,228,241		
รวมพื้นที่		8,848,684		

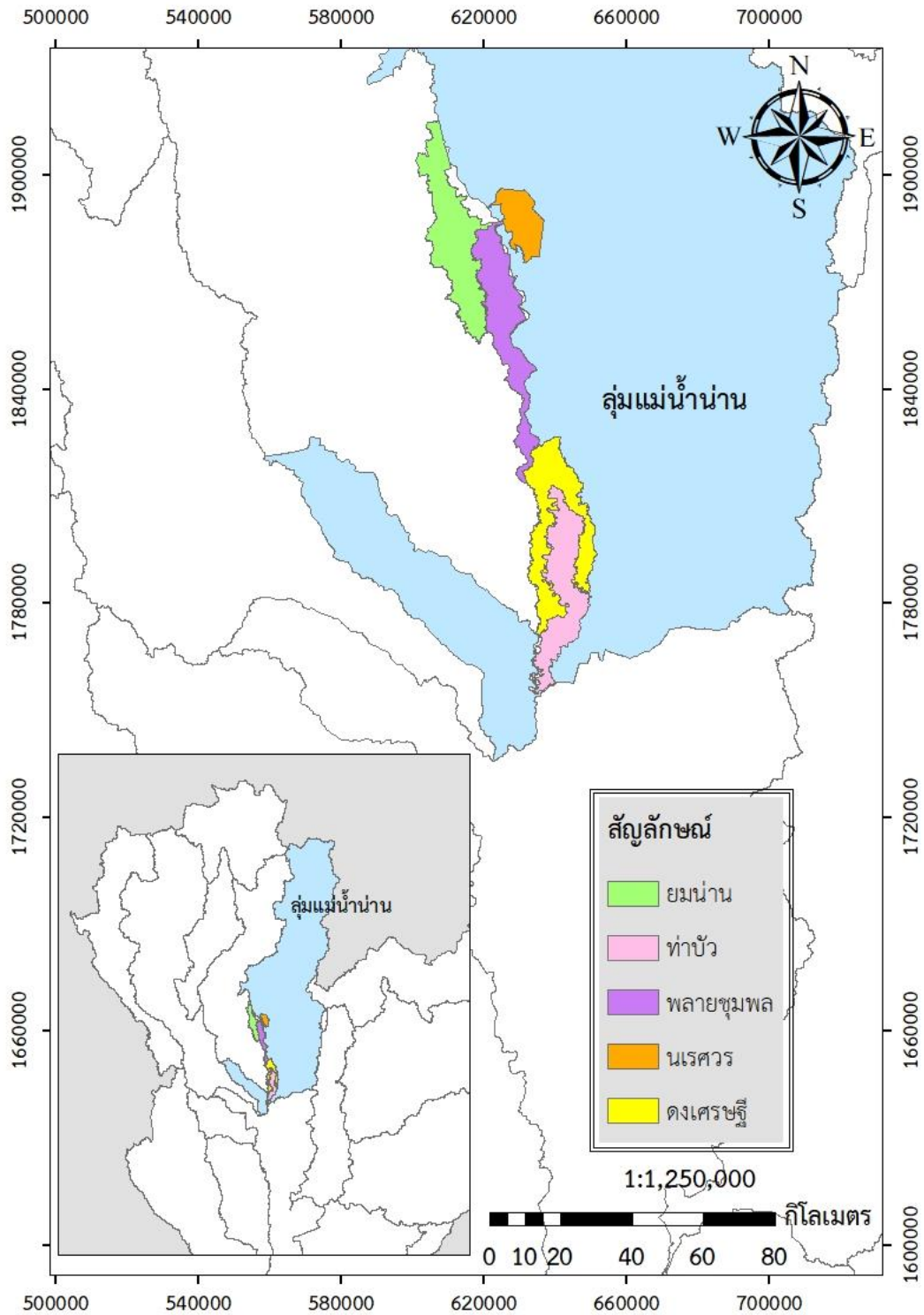
หมายเหตุ: ข้อมูลพื้นที่ชลประทานจาก Shape File ปี พ.ศ. 2560



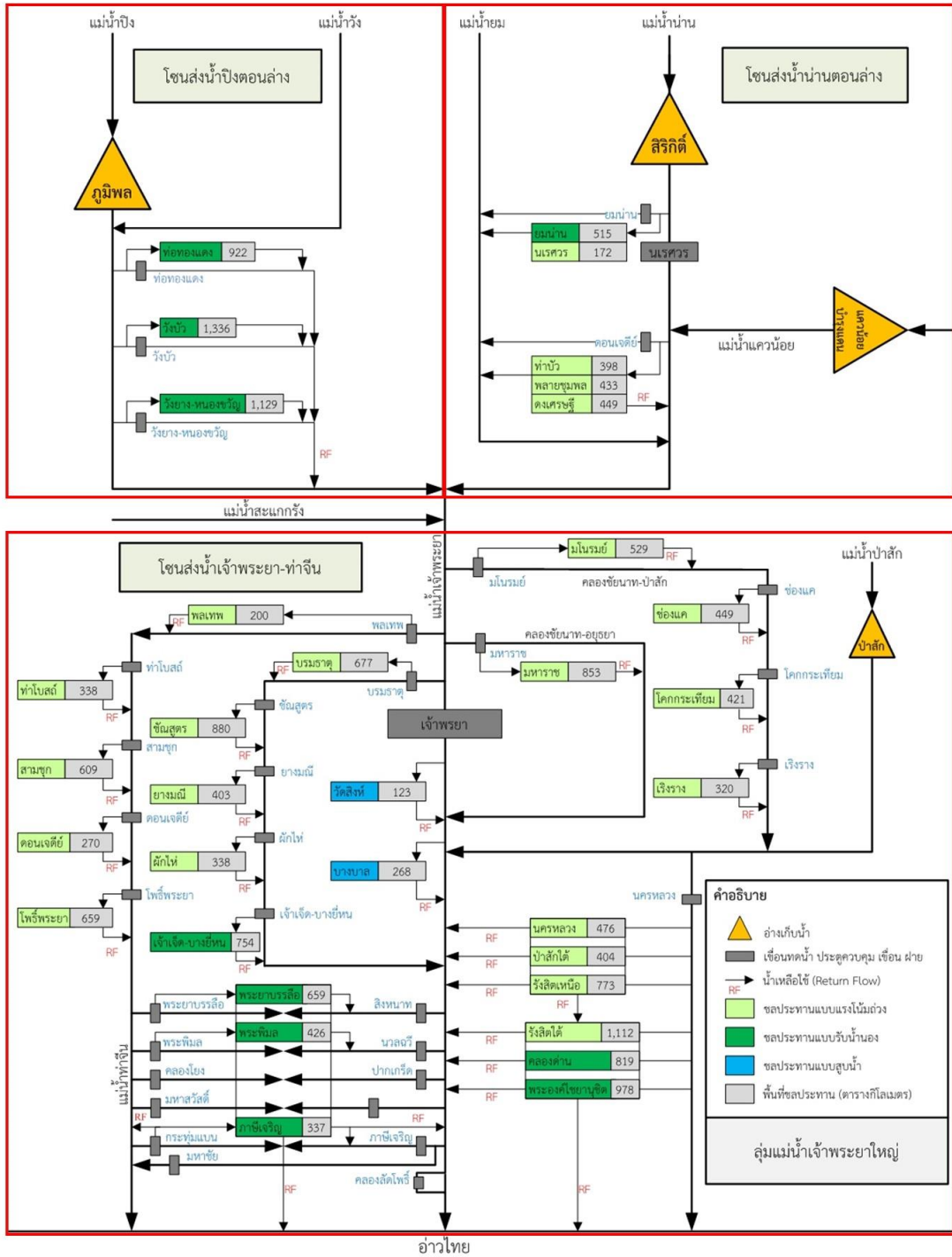
รูปที่ 2-20 แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่โครงการชลประทานในลุ่มน้ำปิงตอนล่าง



รูปที่ 2-21 แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่โครงการชลประทานในลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน



รูปที่ 2-22 แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่โครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง



รูปที่ 2-23 ไดอะแกรมแสดงโซนการส่งน้ำของโครงการชลประทานในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

2.9.5 แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

กรมชลประทานและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้กำหนดหลักเกณฑ์เพื่อใช้ในการกำหนดช่วงเวลาเพาะปลูกพืชฤดูฝนและฤดูแล้งในแต่ละปีของพื้นที่ในแต่ละภูมิภาค สำหรับช่วงเพาะปลูกพืชฤดูฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาให้กำหนดตั้งแต่วันที่ 1 เดือนพฤษภาคมถึงวันที่ 31 เดือนตุลาคม และช่วงเพาะปลูกพืชฤดูแล้ง

2 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 เดือนพฤศจิกายนถึงวันที่ 30 เมษายนของปีถัดไป ซึ่งผลการดำเนินงานที่ผ่านมาได้มีการกำหนดแผนการจัดสรรน้ำในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ตามกิจกรรมการใช้น้ำครอบคลุมถึง ความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรม ความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค ความต้องการน้ำเพื่อการอุตสาหกรรม ความต้องการน้ำเพื่อการรักษาระบบนิเวศ และความต้องการน้ำอื่น ๆ (กรมชลประทาน, 2562) สำหรับแผนการจัดสรรน้ำในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ที่จัดสรรน้ำจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ รวมทั้งผลการปฏิบัติการจริงระหว่างปี พ.ศ. 2549-2564 แสดงในตารางที่ 2-14 ถึงตารางที่ 2-20 โดยพบว่าแผนการจัดสรรน้ำรายปีจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ผันแปรอยู่ระหว่าง 5,390-18,205 ล้านลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ปริมาณการระบายน้ำจริงรายปีจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ผันแปรอยู่ระหว่าง 4,554-17,338 ล้านลูกบาศก์เมตร แผนการจัดสรรน้ำรายปีจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนผันแปรอยู่ระหว่าง 501-2,845 ล้านลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ปริมาณการระบายน้ำจริงรายปีจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนผันแปรอยู่ระหว่าง 641-2,900 ล้านลูกบาศก์เมตร สำหรับเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์พบว่า แผนการจัดสรรน้ำรายปีผันแปรอยู่ระหว่าง 352-4,463 ล้านลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ปริมาณการระบายน้ำจริงรายปีจากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ผันแปรอยู่ระหว่าง 277-4,469 ล้านลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 2-14 แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2549-2555

ปี พ.ศ./ เดือน	2549		2550		2551		2552		2553		2554		2555	
	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง
ม.ค.	1,478	1,540	1,828	1,898	1,523	1,830	1,774	1,846	1,549	1,527	1,731	1,733	2,875	2,984
ก.พ.	1,369	1,436	1,792	1,789	1,414	1,659	1,590	1,710	1,552	1,562	1,729	1,733	2,509	3,135
มี.ค.	1,490	1,550	1,863	1,892	1,354	1,775	1,517	1,892	1,458	1,464	1,272	1,275	2,248	2,453
เม.ษ.	1,410	1,456	1,427	1,593	853	1,909	1,028	1,772	918	925	704	703	1,295	1,688
พ.ค.	843	743	780	534	908	820	745	1,177	756	627	320	321	1,460	1,598
มิ.ย.	547	613	988	1,164	709	749	690	722	719	585	289	288	1,316	973
ก.ค.	458	528	607	1,438	541	879	530	564	662	452	680	676	1,255	811
ส.ค.	453	618	535	1,123	483	600	485	780	648	219	2,266	2,225	1,230	620
ก.ย.	227	391	369	543	395	486	482	538	540	116	2,382	2,506	760	196
ต.ค.	417	1,350	354	304	394	418	438	387	502	166	2,508	2,508	693	275
พ.ย.	313	760	692	811	679	486	630	716	664	323	1,134	1,143	1,018	1,108
ธ.ค.	1,277	1,716	1,167	1,527	1,647	1,433	841	1,503	881	1,106	1,804	1,873	1,546	1,496
รายปี	10,282	12,702	12,402	14,615	10,900	13,044	10,750	13,607	10,849	9,072	16,819	16,985	18,205	17,338

ที่มา: กรมชลประทาน (2562)

ตารางที่ 2-15 แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2556-2563

ปี พ.ศ./ เดือน	2556		2557		2558		2559		2560		2561		2562		2563	
	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง
ม.ค.	1,570	1,745	1,037	1,048	488	492	447	447	933	1,091	1,432	1,529	1,346	1,531	495	537
ก.พ.	1,233	1,274	1,078	1,115	493	495	458	437	813	1,085	1,283	1,537	1,171	1,271	464	473
มี.ค.	928	890	904	914	570	572	524	469	990	1,099	1,247	1,460	1,036	1,303	529	550
เม.ษ.	505	695	652	663	778	782	517	452	570	778	814	1,165	718	1,048	567	538
พ.ค.	1,001	1,058	1,181	1,170	1,498	1,596	469	461	1,138	717	1,464	1,248	1,351	1,384	626	625
มิ.ย.	783	709	777	1,208	1,403	1,093	454	405	1,136	371	1,288	1,094	1,089	1,282	613	523
ก.ค.	487	497	677	835	1,112	653	468	351	1,009	347	1,018	910	725	1,276	588	563
ส.ค.	373	313	323	369	219	471	259	264	241	218	216	1,116	214	565	254	420
ก.ย.	266	205	206	134	181	284	246	130	233	157	227	545	207	231	228	421
ต.ค.	168	142	187	174	187	169	254	110	243	48	237	544	213	687	241	237
พ.ย.	234	233	212	212	365	382	460	188	248	175	905	992	450	635	473	430
ธ.ค.	824	828	400	398	393	402	834	839	1,327	1,357	1,352	1,502	495	584	491	620
รายปี	8,372	8,588	7,633	8,239	7,687	7,392	5,390	4,554	8,881	7,441	11,482	13,640	9,016	11,797	5,569	5,969

ที่มา: กรมชลประทาน (2562)

ตารางที่ 2-16 แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2564

ปี	2564		-		-		-		-		-		-		-	
	แผน	ปฏิบัติการ จริง	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ม.ค.	501	697	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ก.พ.	448	611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
มี.ค.	530	742	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
เม.ษ.	605	608	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
พ.ค.	NA	NA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
มิ.ย.	NA	NA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ก.ค.	NA	NA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ส.ค.	NA	NA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ก.ย.	NA	NA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ต.ค.	NA	NA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
พ.ย.	NA	NA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ธ.ค.	NA	NA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
รายปี	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ที่มา: กรมชลประทาน (2562)

ตารางที่ 2-17 แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2558

ปี พ.ศ./ เดือน	2552		2553		2554		2555		2556		2557		2558	
	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง
ม.ค.	NA	13	94	136	134	149	187	313	133	69	80	157	80	98
ก.พ.	NA	214	85	93	145	227	169	251	121	56	73	87	78	106
มี.ค.	NA	48	90	134	140	113	152	36	125	122	80	87	94	110
เม.ษ.	NA	17	44	164	134	125	27	26	80	199	77	78	90	98
พ.ค.	NA	7	73	73	84	84	27	27	159	192	107	103	134	119
มิ.ย.	NA	116	44	44	161	161	95	95	131	94	104	79	113	69
ก.ค.	NA	187	20	20	195	195	111	111	134	91	107	75	100	54
ส.ค.	NA	144	8	8	410	410	67	67	134	71	82	44	50	34
ก.ย.	NA	38	154	154	860	860	52	52	130	79	0	26	26	25
ต.ค.	NA	10	138	138	366	366	58	58	134	155	0	27	27	16
พ.ย.	17	36	7	99	43	32	11	65	141	160	78	66	32	30
ธ.ค.	71	91	107	133	172	177	130	111	149	246	80	93	34	32
รายปี	-	921	864	1,196	2,845	2,900	1,085	1,211	1,571	1,533	868	924	857	792

ที่มา: กรมชลประทาน (2562)

ตารางที่ 2-18 แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2559-2564

ปี พ.ศ./ เดือน	2559		2560		2561		2562		2563		2564		-	
	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	-	-
ม.ค.	34	32	104	118	128	150	67	111	35	45	35	35	-	-
ก.พ.	32	30	117	151	121	121	60	95	35	32	33	31	-	-
มี.ค.	34	32	149	169	134	134	67	97	49	35	35	35	-	-
เม.ษ.	34	35	113	105	127	124	74	96	63	43	28	34	-	-
พ.ค.	32	36	131	71	80	121	80	76	49	63	NA	NA	-	-
มิ.ย.	36	69	81	58	78	184	78	41	47	75	NA	NA	-	-
ก.ค.	37	171	55	83	77	67	54	54	53	79	NA	NA	-	-
ส.ค.	32	260	30	425	40	40	36	40	36	52	NA	NA	-	-
ก.ย.	31	65	26	561	39	39	26	17	34	75	NA	NA	-	-
ต.ค.	32	42	27	583	36	49	27	58	31	34	NA	NA	-	-
พ.ย.	67	45	55	183	65	51	34	34	34	59	NA	NA	-	-
ธ.ค.	100	148	86	155	67	84	35	35	35	49	NA	NA	-	-
รายปี	502	967	973	2,663	991	1,163	638	756	501	641	-	-	-	-

ที่มา: กรมชลประทาน (2562)

ตารางที่ 2-19 แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2558

ปี พ.ศ./ เดือน	2552		2553		2554		2555		2556		2557		2558	
	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง
ม.ค.	134	112	134	126	134	169	133	160	107	138	134	183	94	117
ก.พ.	121	138	145	160	145	151	146	161	112	116	121	137	85	118
มี.ค.	124	153	140	156	140	65	145	132	135	77	135	135	94	122
เม.ษ.	64	96	73	169	134	76	82	107	130	90	145	86	86	114
พ.ค.	NA	104	NA	58	NA	39	NA	57	82	105	112	86	134	121
มิ.ย.	NA	113	NA	34	NA	277	NA	65	166	47	130	83	113	66
ก.ค.	NA	91	NA	7	NA	496	NA	38	185	28	127	38	101	40
ส.ค.	NA	61	NA	13	NA	556	NA	28	216	29	200	30	48	32
ก.ย.	NA	41	NA	637	NA	1,093	NA	214	313	97	370	190	28	19
ต.ค.	NA	910	NA	1,494	NA	1,356	NA	72	713	1,166	642	31	27	5
พ.ย.	5	147	7	322	0	62	34	32	35	51	48	34	39	42
ธ.ค.	103	176	107	85	93	129	82	81	131	164	94	118	52	51
รายปี	-	2,144	-	3,261	-	4,469	-	1,146	2,325	2,110	2,258	1,151	901	846

ที่มา: กรมชลประทาน (2562)

ตารางที่ 2-20 แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2559-2564

ปี พ.ศ./ เดือน	2559		2560		2561		2562		2563		2564		-	
	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	-	-
ม.ค.	53	54	133	167	134	139	67	78	35	17	35	85	-	-
ก.พ.	50	51	121	192	121	124	61	62	33	14	31	149	-	-
มี.ค.	54	55	142	199	125	94	74	73	49	14	50	119	-	-
เม.ษ.	52	60	117	105	114	117	79	68	66	18	65	51	-	-
พ.ค.	47	61	145	78	107	141	67	58	13	19	NA	NA	-	-
มิ.ย.	45	59	76	45	104	75	77	33	20	14	NA	NA	-	-
ก.ค.	47	139	52	602	90	240	72	23	26	19	NA	NA	-	-
ส.ค.	31	251	28	888	40	587	31	7	15	36	NA	NA	-	-
ก.ย.	30	208	26	274	33	588	26	15	13	29	NA	NA	-	-
ต.ค.	30	913	23	756	27	32	27	63	13	4	NA	NA	-	-
พ.ย.	80	133	86	218	52	60	34	20	34	17	NA	NA	-	-
ธ.ค.	121	114	121	185	67	99	35	48	35	74	NA	NA	-	-
รายปี	640	2,096	1,068	3,706	1,014	2,297	650	547	352	277	-	-	-	-

ที่มา: กรมชลประทาน (2562)

2.10 การบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ (Water Management in the Greater Chao Phraya River Basin)

ในปี พ.ศ. 2522 บริษัทเอเคอร์แห่งแคนาดาได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองระบบสำหรับศึกษาถึงการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยา-แม่กลองโดยอาศัยข้อมูลอุทกวิทยาระหว่างปี พ.ศ. 2495-2519 จำนวน 25 ปี แบ่งพื้นที่ชลประทานจำนวน 62 บล็อก และกำหนดโหนดความต้องการน้ำ (Demand Node) จำนวน 23 จุด และกำหนด Return Flow Node จำนวน 28 จุด และกำหนดโหนดการส่งน้ำจำนวน 5 โหนด ซึ่งใช้น้ำจากอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ประกอบด้วย ความต้องการน้ำร่วม (Joint Demand) ซึ่งเป็นความต้องการน้ำที่จะต้องระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ร่วมกัน และความต้องการน้ำท้ายเขื่อนแยกจากกัน (Local Demand) ซึ่งเป็นปริมาณความต้องการน้ำอย่างน้อยที่สุดที่จะต้องระบายจากเขื่อนนั้น ๆ การศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ระยะคือ การใช้น้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาในปี พ.ศ. 2521, 2528 และ 2533 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำที่สามารถเก็บกักไว้ในอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ไม่เพียงพอในช่วงการเพาะปลูกฤดูแล้ง เพื่อที่จะเพิ่มพื้นที่เพาะปลูกฤดูแล้งเฉลี่ย บริษัทเอเคอร์ได้เสนอแนะให้ใช้ “โค้งแฟคเตอร์ปรับลดพื้นที่เพาะปลูกฤดูแล้ง (Dry Season Area Reduction Factor Curve, DSAR)” เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดพื้นที่เพาะปลูกฤดูแล้งจากข้อมูลปริมาณน้ำเก็บกักไว้ได้ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในช่วงเวลาสิ้นสุดฤดูแล้งหรือสิ้นเดือนพฤศจิกายนของแต่ละปี นอกจากนี้ จากปัญหาการขาดแคลนน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยา บริษัทเอเคอร์ได้เสนอแนะให้ผันน้ำจากแม่น้ำสายต่าง ๆ เช่น แม่น้ำโขง แม่น้ำปาย และแม่น้ำแม่กลอง เป็นต้น มาใช้ในลุ่มน้ำเจ้าพระยา (ฉลอง, 2538)

ในปี พ.ศ. 2527 การรณ (2528) ได้ขยายผลการศึกษาของบริษัทเอเคอร์ โดยอาศัยช่วงข้อมูลอุทกวิทยาเพิ่มเป็น 30 ปี และแบ่งพื้นที่ชลประทานของ 2 ลุ่มน้ำเพิ่มจากจำนวน 62 บล็อกไปเป็น 114 บล็อก และการศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ระยะในลักษณะเดียวกันคือ การใช้น้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาในปี พ.ศ. 2527, 2533 และ 2543 ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่เพาะปลูกข้าวนาปรังในโครงการเจ้าพระยาโดยเกณฑ์เฉลี่ยเท่ากับ 2.91 ล้านไร่ นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาต่อไปว่า ถ้าหากเขื่อนวชิราลงกรณ (เขื่อนเขาแหลมเดิม) ก่อสร้างแล้วเสร็จจะมีน้ำเหลือในลุ่มน้ำแม่กลองเพียงพอที่จะผันไปใช้ในลุ่มน้ำเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนล่างสำหรับการเพาะปลูกฤดูแล้งได้กว่า 700,000 ไร่ รวมทั้งปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลักดันน้ำเค็มที่ปากแม่น้ำสุพรรณบุรีอีกด้วย อย่างไรก็ตามหากการชลประทานในลุ่มน้ำแม่กลองสามารถก่อสร้างได้เต็มศักยภาพ คาดว่าในปี พ.ศ. 2543 จะไม่มีน้ำเหลือเพื่อผันไปใช้ในลุ่มน้ำเจ้าพระยา

วิธีการศึกษาของบริษัทเอเคอร์ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองระบบ โดยประกอบไปด้วย แบบจำลองความต้องการน้ำชลประทาน (Irrigation Demand Model) ซึ่งใช้ในการคำนวณหาปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทาน เนื่องจากระบบชลประทานของโครงการเจ้าพระยาเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน เพื่อให้การคำนวณหาปริมาณความต้องการน้ำชลประทานมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด การศึกษานี้ได้แบ่งพื้นที่ชลประทานออกเป็นบล็อก หากเป็นไปได้พื้นที่ของบล็อกจะล้อมรอบด้วยคลองระบายน้ำและสามารถส่งน้ำผ่านประตูระบายน้ำหลักเข้าไปยังพื้นที่ได้ นอกจากนี้ ในโครงการเจ้าพระยา ยังมีปริมาณน้ำที่เหลือใช้จากโครงการชลประทานเจ้าพระยาตอนบนที่สามารถนำไปใช้ในโครงการชลประทาน

2 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุบระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)

โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

เจ้าพระยาตอนล่างได้ด้วย และคลองส่งน้ำสายใหญ่บางสายที่ใช้เป็นเส้นทางคมนาคม จำเป็นต้องส่งน้ำให้ได้ อย่างน้อยที่สามารถใช้ในการเดินเรือได้ตลอดเวลาอีกด้วย เมื่อคำนวณหาความต้องการน้ำชลประทานได้แล้ว จึงนำไปใช้หาค่าการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำด้วยแบบจำลองระบบอ่างเก็บน้ำ (Reservoir System Simulation Model) สำหรับหลักเกณฑ์ทั่วไปในการจำลองระบบอ่างเก็บน้ำจะพิจารณาจากปริมาณความต้องการน้ำชลประทาน นำค่าที่ได้นี้ไปเปรียบเทียบกับปริมาณฝนใช้การ (Effective Rainfall) ถ้าปริมาณฝนใช้การมากกว่าปริมาณความต้องการน้ำชลประทานก็ไม่จำเป็นต้องส่งน้ำ แต่หากปริมาณฝนใช้การน้อยกว่าปริมาณความต้องการน้ำชลประทาน ต้องนำ Local Inflow หรือ Side Flow มาพิจารณาร่วมด้วย แต่ถ้ายังน้อยกว่าปริมาณความต้องการน้ำชลประทานจึงจำเป็นต้องจัดสรรน้ำจากอ่างเก็บน้ำ แต่หากปริมาณฝนใช้การรวมกับ Sidelow แล้วมากกว่าปริมาณความต้องการน้ำชลประทานก็ไม่จำเป็นต้องจัดสรรน้ำจากอ่างเก็บน้ำ

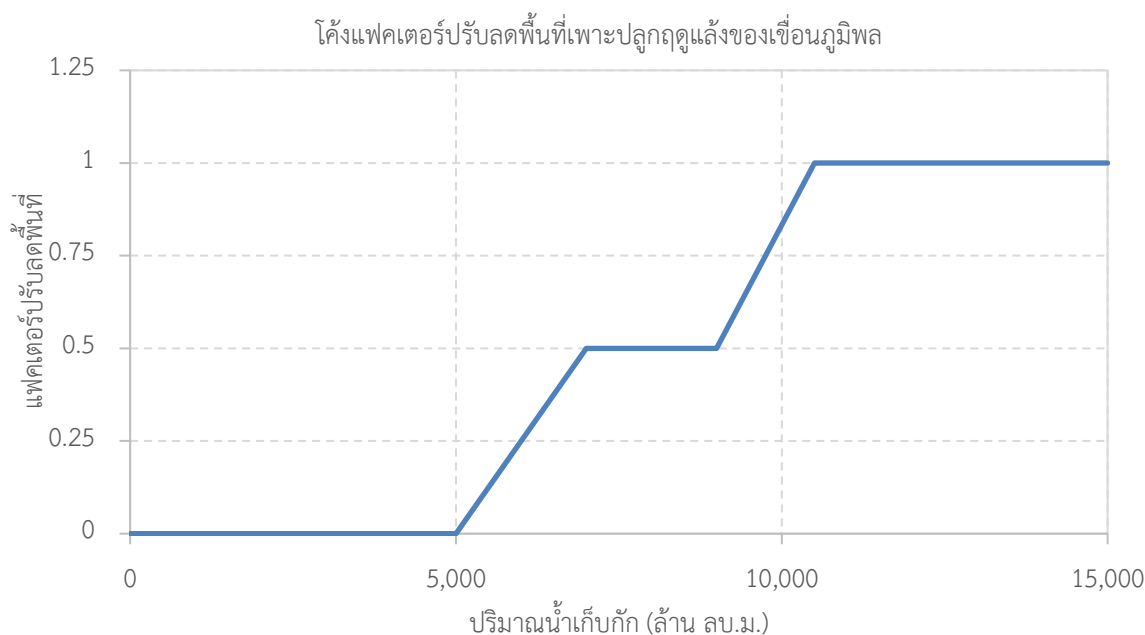
แบบจำลองความต้องการน้ำชลประทาน (Irrigation Demand Model) ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ 1 เป็นการคำนวณหาปริมาณความต้องการน้ำสุทธิของกลุ่มน้ำปิงใต้เขื่อนภูมิพลและลุ่มน้ำน่านใต้เขื่อนสิริกิติ์ โดยได้คำนวณแยกเป็นอิสระเพื่อประมาณค่าปริมาณน้ำที่ต้องการสูงสุดของความต้องการน้ำ 3 กรณีคือ (1) ความต้องการน้ำใต้อ่างเก็บน้ำ (Local Demand) (2) ความต้องการน้ำต่ำสุดเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า และ (3) ปริมาณน้ำเหนือ Flood Rule Curve และส่วนที่ 2 เป็นการคำนวณหาปริมาณความต้องการน้ำร่วมกัน (Joint Demand) ของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ ซึ่งคำนวณได้จากปริมาณความต้องการน้ำสุทธิที่จังหวัดนครสวรรค์ด้วย Local Inflow ปริมาณน้ำสุทธิจากแม่น้ำวังและแม่น้ำยม Return Flow จากพื้นที่เพาะปลูก ตลอดจนปริมาณน้ำนอกภาคการเกษตรกรรมของ Local Demand ที่ต้องระบายจากอ่างเก็บน้ำ นอกจากนี้ การศึกษาของบริษัทเอเคอร์ยังได้กำหนดอัตราการระบายน้ำเพื่อผลักดันน้ำเค็มของแม่น้ำเจ้าพระยาและแม่น้ำสุพรรณบุรีเท่ากับ 80 และ 45 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ในปี พ.ศ. 2528 และปรับเพิ่มอัตราการระบายน้ำเพื่อผลักดันน้ำเค็มของแม่น้ำเจ้าพระยาเป็น 90 และ 100 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ในปี พ.ศ. 2535 และ 2545 ตามลำดับ สำหรับความต้องการน้ำเพื่อใช้ในการประปา กำหนดไว้เท่ากับ 25 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ในปี พ.ศ. 2528 และปรับเพิ่มขึ้นเป็น 40 และ 70 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ในปี พ.ศ. 2535 และ 2545 ตามลำดับ ดังที่สรุปไว้ในตารางที่ 2-21

ตารางที่ 2-21 การกำหนดอัตราการระบายน้ำเพื่อผลักดันน้ำเค็มและการประปาจากรายงานผลการศึกษาของบริษัทเอเคอร์

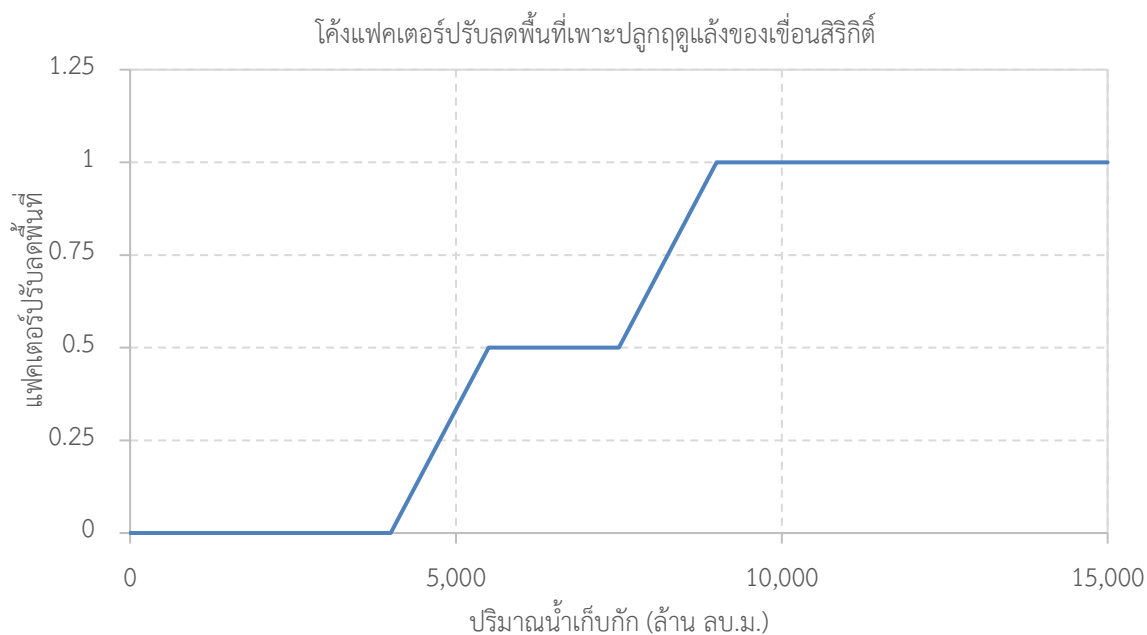
ปี พ.ศ.	อัตราการระบายน้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)		
	แม่น้ำเจ้าพระยา	แม่น้ำสุพรรณบุรี	การประปา
2528	80	45	25
2535	90	45	40
2545	100	45	70

ที่มา: ฉลอง (2538)

แบบจำลองระบบอ่างเก็บน้ำ (Reservoir System Simulation Model) พัฒนาขึ้นโดยอาศัยแนวคิดที่จะกำหนดการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ให้เพื่อให้เพียงพอกับความต้องการน้ำแยกอ่างเก็บน้ำสุทธิ (Local Demand) และความต้องการน้ำร่วมกัน (Joint Demand) มากที่สุด โดยพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ของปริมาณของน้ำในอ่างเก็บน้ำที่อยู่เหนือ Rule Curve ที่พิจารณา ถ้าอ่างเก็บน้ำใดมีเปอร์เซ็นต์สูงกว่าอีกอ่างเก็บน้ำก็จะระบายน้ำจนมีปริมาณอ่างเก็บน้ำเท่ากัน เมื่อถึงจุดที่อ่างเก็บน้ำทั้งสองมีเปอร์เซ็นต์เท่ากันแต่มีปริมาณน้ำที่ระบายยังไม่เพียงพอกับปริมาณความต้องการน้ำร่วมกัน อ่างเก็บน้ำทั้งสองก็จะถูกระบายจนระดับน้ำลดลงไปหา Rule Curve ที่ต่ำกว่าต่อไป สำหรับนโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในช่วงฤดูแล้งนั้นกำหนดให้เมื่อปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำใดอ่างเก็บน้ำหนึ่งต่ำกว่าระดับ Lower Rule Curve ความต้องการน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาและ Return Flow จะปรับลดลงด้วยแฟคเตอร์ปรับแก้พื้นที่เพาะปลูกฤดูแล้ง (มกราคม-มิถุนายน) และฤดูฝน (กรกฎาคม-ธันวาคม) นั่นคือ การเพาะปลูกพืชจะถูกปรับลดพื้นที่เพาะปลูกลง ตลอดจนการผลิตกระแสไฟฟ้าก็จะลดลงจนถึงจุดต่ำสุด การวางแผนการเพาะปลูกพืชฤดูแล้งจะปรับเปลี่ยนไปจากพื้นที่เป้าหมายโดยอาศัยความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำที่ปลายเดือนพฤศจิกายนกับแฟคเตอร์ของการเพาะปลูกที่จะนำไปคูณกับพื้นที่เป้าหมาย ซึ่งเรียกว่า โค้งแฟคเตอร์ปรับลดพื้นที่เพาะปลูกฤดูแล้ง ดังที่แสดงในรูปที่ 2-24 และรูปที่ 2-25 (ฉลอง, 2538)



รูปที่ 2-24 โค้งแฟคเตอร์ปรับลดพื้นที่เพาะปลูกฤดูแล้งของเขื่อนภูมิพล



รูปที่ 2-25 โค้งแพคเตอร์ปรับลดพื้นที่เพาะปลูกฤดูแล้งของเขื่อนสิริกิติ์

2.10 การบริหารการระบายน้ำลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

2.10.1 ข้อมูลพิจารณาในการกำหนดการระบายน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

ในการกำหนดการระบายน้ำท้ายเขื่อนภูมิพล ข้อมูลที่สำคัญที่ใช้ประกอบในการตัดสินใจระบายน้ำที่สถานการณ์น้ำต่าง ๆ ได้แก่ ข้อมูลความจุเก็บกักสูงสุดของแม่น้ำ (Maximum Channel Capacity) ที่จุดวิกฤตทางด้านท้าย และปริมาณ Sideflow จากสถานีตรวจวัดน้ำท่าทางตอนล่างดังสรุปไว้ในตารางที่ 2-22 และตารางที่ 2-23

ตารางที่ 2-22 ข้อมูลความจุเก็บกักสูงสุดของแม่น้ำสายหลักในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

แม่น้ำ	ที่ตั้ง	อัตราการไหลสูงสุด	
		ลบ.ม.	ลบ.ม./วัน
ปิง	อ.เมือง จ.ตาก	1,200	103.68
	อ.เมือง จ.กำแพงเพชร	2,100	181.44
	อ.บรรพตพิสัย จ.นครสวรรค์	1,960	169.34
วัง	อ.สามเงา จ.ตาก	450	38.88
ยม	อ.เมือง จ.แพร่	1,000	86.40
	อ.เมือง จ.สุโขทัย	577	49.85
	อ.สามง่าม จ.พิจิตร	400	35.56
น่าน	อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์	1,250	108.00
	อ.พรหมพิราม จ.พิษณุโลก	1,266	109.38
	อ.ชุมแสง จ.นครสวรรค์	1,370	118.37

เจ้าพระยา	จ.นครสวรรค์	3,500	302.40
	จ.ชัยนาท	2,830	244.51

ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2555)

ตารางที่ 2-23 ข้อมูลสถานีวัดน้ำท่าหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

แม่น้ำ	ที่ตั้ง	ที่ตั้ง
ปิง	ABD	เขื่อนแม่ปิงตอนล่าง
	P.2A	บ้านท่าแค อ.เมือง จ.ตาก
	P.7A	อ.เมือง จ.กำแพงเพชร
	P.17	อ.บรรพตพิสัย จ.นครสวรรค์
วัง	W.4A	บ้านวังหมัน อ.สามเงา จ.ตาก
	W.19	บ้านตาก อ.สามเงา จ.ตาก
ยม	Y.1C	อ.เมือง จ.แพร่
	Y.4	อ.เมือง จ.สุโขทัย
	Y.17	อ.สามง่าม จ.พิจิตร
น่าน	N.12A	อ.ท่าปลา จ.อุตรดิตถ์ (ท้ายเขื่อนบรรจบกับแม่น้ำป่าด)
	N.2B	อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์
	N.36	อ.นครไทย จ.พิษณุโลก
	N.55	อ.ชาติตระการ จ.พิษณุโลก
	N.60	อ.ตรอน จ.อุตรดิตถ์ (แม่น้ำน่าน+คลองตรอน)
	N.22A	อ.วัดโบสถ์ จ.พิษณุโลก
	N.24A	อ.วังทอง จ.พิษณุโลก
	N.27A	อ.พรหมพิราม จ.พิษณุโลก
	N.5A	อ.เมือง จ.พิษณุโลก (แม่น้ำน่าน+แควน้อย)
	N.7A	อ.เมือง จ.พิจิตร
	N.8A	อ.บางมูลนาก จ.พิจิตร
	N.67A	อ.ชุมแสง จ.นครสวรรค์
เจ้าพระยา	C.2	อ.เมือง จ.นครสวรรค์
	C.22	อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี
	C.29	อ.บางไทร จ.พระนครศรีอยุธยา
	C.12	สามเสน กรุงเทพมหานคร
	C.4	สะพานพุทธ กรุงเทพมหานคร
	C.54	ป้อมพระจุล จ.สมุทรปราการ

ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2555; 2563)

ตารางที่ 2-24 ระยะเวลาในการเดินทางของน้ำที่ระบายจากเขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

จุดเริ่มต้น	จุดเป้าหมาย	ระยะเวลาในการเดินทางของน้ำ (ชั่วโมง)
เขื่อนภูมิพล	อ.สามเงา จ.ตาก	1
	อ.บ้านตาก จ.ตาก	8
	อ.เมือง จ.ตาก	16
	อ.วังเจ้า จ.ตาก	28
	อ.เมือง จ.กำแพงเพชร	42
	อ.เมือง จ.นครสวรรค์	82
	เขื่อนเจ้าพระยา จ.ชัยนาท	102
วัง	ต.วังกะพ้อ อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์	16
	อ.ตรอน จ.อุตรดิตถ์	33
	อ.เมือง จ.พิษณุโลก	60
	อ.เมือง จ.พิจิตร	96
	อ.เมือง จ.นครสวรรค์	108
	เขื่อนเจ้าพระยา จ.ชัยนาท	128
เขื่อนเจ้าพระยา	อ.บางไทร จ.พระนครศรีอยุธยา	60
	สะพานพุทธ กรุงเทพมหานคร	84

ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2555; 2563)

2.10.2 แผนการระบายน้ำในสถานการณ์น้ำต่าง ๆ ในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2555) ได้กำหนดแผนการระบายน้ำในช่วงสถานการณ์น้ำปกติ และช่วงสถานการณ์น้ำฉุกเฉินเพื่อใช้ในการบริหารเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ โดยสรุปดังนี้

2.10.2.1 แผนการระบายน้ำในช่วงสถานการณ์น้ำปกติ

ในช่วงสถานการณ์น้ำปกติ แผนกวางแผนปฏิบัติการพลังน้ำ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะประสานงานกับสำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา กรมชลประทาน เพื่อขอทราบปริมาณความต้องการน้ำรายสัปดาห์ของกลุ่มน้ำต่าง ๆ เพื่อนำมาวางแผนการระบายน้ำรายวันในแต่ละสัปดาห์ร่วมกันจากอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ การระบายรายวันของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะคำนึงถึงสภาพความพร้อมของระบบส่งกำลังไฟฟ้า ความพร้อมของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแต่ละเครื่อง และข้อจำกัดในการระบายน้ำในแต่ละลำน้ำ รวมทั้งแผนกวางแผนปฏิบัติการพลังน้ำ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะนำส่งแผนการระบายน้ำรายวันประจำสัปดาห์ให้กับแผนกวางแผนการผลิตไฟฟ้าระยะสั้น เพื่อนำไปใช้ในการวางแผนเพื่อกำหนดการเดินทางเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารายวันของสองเขื่อนหลัก และจัดส่งแผนการผลิตไฟฟ้ารายวันไปยังศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าแห่งชาติสำหรับสั่งการการเดินทางเครื่องผลิตไฟฟ้าแต่ละโรงไฟฟ้าต่อไป

2.10.2.2 แผนการระบายน้ำในช่วงสถานการณ์น้ำอุทกเขิน

ในช่วงสถานการณ์น้ำอุทกเขิน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยมีนโยบายในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำครอบคลุมสถานการณ์ดังนี้

- กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้ามีปัญหา

ในกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้ามีปัญหา เชื่อนมีความจำเป็นที่จะต้องระบายน้ำมากกว่าแผนที่กำหนดไว้ กล่าวคือ เชื่อนภูมิพลอาจจะระบายน้ำมากกว่า 40 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน และเชื่อนสิริกิติ์อาจจะระบายน้ำมากกว่า 35 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน และจะต้องตรวจสอบและติดตามท้ายลำน้ำดังนี้

- (1) ถ้าระบายน้ำจากเชื่อนภูมิพลมากกว่า 40 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน ให้ควบคุมการระบายน้ำโดยตรวจสอบที่จุดวัดน้ำ ABD ต้องไม่เกิน 650 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เพื่อควบคุมลำน้ำปิงที่ จ.ตาก ให้มีปริมาณน้ำไม่เกิน 1,200 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
- (2) ถ้ามีฝนตกท้ายเชื่อนภูมิพลที่ อ.บ้านตาก หรือที่ จ.ตาก มากกว่า 40 มิลลิเมตรต่อวัน หรือมีฝนตกต่อเนื่องนานกว่า 3 ชั่วโมง ต้องแจ้งให้ อคฟ. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยทราบล่วงหน้าเพื่อปรับลดการผลิตไฟฟ้าลงให้อยู่ในเกณฑ์ที่เชื่อนภูมิพลสามารถควบคุมปริมาณน้ำได้ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้
- (3) ถ้าระบายน้ำจากเชื่อนสิริกิติ์มากกว่า 35 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะต้องเฝ้าระวังและติดตามจุดตรวจวัดน้ำต่าง ๆ ในแม่น้ำน่าน ประเมินสถานการณ์ที่อาจจะเกิดผลกระทบต้อพื้นที่ตั้งแต่ท้ายเชื่อนสิริกิติ์จนถึง อ.พิชัย จ.อุตรดิตถ์ อย่างใกล้ชิด และต้องแจ้งให้ อคฟ. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยทราบล่วงหน้าเพื่อปรับลดการผลิตไฟฟ้าลงให้อยู่ในเกณฑ์ที่เชื่อนสิริกิติ์สามารถควบคุมปริมาณน้ำได้ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้

- กรณีน้ำหลาก

ในกรณีที่เกิดน้ำหลากในช่วงฤดูฝน อาจมีเหตุการณ์ที่ปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเชื่อนภูมิพลอยู่ในระดับสูงจนใกล้ระดับ 259.50 เมตร รทก. (ระดับเก็บกักสูงสุด 260.00 เมตร รทก.) เชื่อนจำเป็นที่จะต้องเปิดประตูระบายน้ำเพื่อป้องกันอันตรายจากตัวเชื่อน ในกรณีนี้ กองเดินเครื่องโรงไฟฟ้าเชื่อนภูมิพลจะต้องรายงานผู้อำนวยการเชื่อนและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อวางแผนและเตรียมการขออนุมัติเปิดประตูระบายน้ำอุทกเขิน และตรวจสอบปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเพื่อเพิ่มปริมาณการระบายน้ำตามเงื่อนไขดังนี้

- (1) ที่ระดับเก็บกัก 256.00 เมตร รทก. ให้ระบายน้ำ 30 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ
- (2) ที่ระดับเก็บกัก 257.00 เมตร รทก. ให้ระบายน้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ
- (3) ที่ระดับเก็บกัก 258.00 เมตร รทก. ให้ระบายน้ำ 70 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ

- (4) ที่ระดับเก็บกัก 259.00 เมตร รทก. ให้ระบายน้ำ 100 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ

นอกจากนี้ เขื่อนจะต้องควบคุมปริมาณน้ำในแม่น้ำปิงไม่ให้เกิน 1,200 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีตรงสถานีตรวจวัดน้ำท่า P.2A ที่ปริมาณน้ำจากเขื่อนภูมิพล แม่น้ำวัง ลำน้ำห้วยตาก และลำน้ำห้วยแม่ท้อไหลมารวมกัน

สำหรับเขื่อนสิริกิติ์ในกรณีที่เกิดน้ำหลากในช่วงฤดูฝนและระดับน้ำอยู่ที่ระดับ 158.00 เมตร รทก. และในขณะนั้นบริเวณพื้นที่รับน้ำอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมหรือมีพายุดีเปรสชัน ผู้มีหน้าที่ของกรไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะพิจารณาสั่งการในการเปิดปิดบานระบายของประตูระบายน้ำล้น โดยการเปิดปิดในแต่ละครั้งกระทำเพื่อความปลอดภัยของตัวเขื่อน

- (1) ในกรณีทั่วไป จะเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเต็มที่ โดยกำหนดให้อัตราการระบายน้ำสูงสุดผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 4 เครื่อง ประมาณ 776 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที หรือคิดเป็น 28 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง หรือประมาณ 67 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน
- (2) เมื่อระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำยังสูงขึ้นถึง 158.10 เมตร รทก. จะเปิดบานระบายระยะต่ำสุดเริ่มจาก 0.50 เมตร ทั้ง 2 บาน ทำให้ได้อัตราการระบายน้ำรวม 125 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

- กรณีน้ำแล้ง

ในกรณีที่เกิดสถานการณ์ภัยแล้งโดยปริมาณน้ำเก็บกักต่ำกว่าระดับ Lower Rule Curve การบริหารเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์จะกำหนดการระบายน้ำตามสถานการณ์น้ำและความเหมาะสมของปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่

2.9.2.3 ข้อจำกัดการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

ข้อจำกัดการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2-25 และตารางที่ 2-26

ตารางที่ 2-25 ข้อจำกัดการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพล

วัตถุประสงค์	รายละเอียด	หมายเหตุ
อุปโภคบริโภค	-ต้องระบายน้ำอย่างน้อยวันละ 3-5 ล้าน ลบ.ม. เพื่อให้ชุมชนพื้นที่ อ.สามเงา ใช้อุปโภคบริโภค และให้ผู้ประกอบการกระชังปลา (กรณีน้ำวังน้อยขอเพิ่มเป็น 10 ล้าน ลบ.ม.)	-ปริมาณน้ำจะไม่ไปสมทบกับปริมาณน้ำวังที่บ้านปากวัง อ.บ้านตาก
งานลอยกระทง	-ต้องระบายน้ำเพื่อสนับสนุนกิจกรรมงานลอยกระทง และงานสงกรานต์หลายพื้นที่ปีละ 10 วัน อัตรา 650	-ปริมาณน้ำขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำวังและกำหนดการของผู้ร้องขอ

วัตถุประสงค์	รายละเอียด	หมายเหตุ
	ลบ.ม. ต่อวินาที เดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 5 ยูนิท ช่วงเวลา 02.00-09.00 น.	
การระบายน้ำ	-ระดับเก็บกักน้ำที่มากกว่า 250.00 เมตร รทก. จะก่อให้เกิดปัญหาหน้าท่วมด้านเหนือเขื่อนที่ ดอยเต่า	-พื้นที่การเกษตรของชาวบ้าน และถนนจะถูกน้ำท่วม
การเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	-เขื่อนแม่ปิงตอนล่างสามารถเก็บกักน้ำได้ในปริมาณ 4.7 ล้าน ลบ.ม. ที่ระดับสูงสุด 140.00 เมตร รทก.	
	-BB-H7 ขอเริ่มเดินเครื่องที่ระดับท้ายน้ำตั้งแต่ 137.00 เมตร รทก.	-เนื่องจากปัญหา Cavitation สูง
	-BB-H8 ระดับน้ำต่ำกว่า 226.30 เมตร รทก. เดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ได้	-ระดับน้ำต่ำกว่า Head Design
	-BB-H8 ปัมเดินเครื่องได้ช่วงระดับน้ำ 230.20-250.00 เมตร รทก. และสามารถเดินเครื่องสูบน้ำได้สูงสุด 7 ชั่วโมง	-ระดับน้ำนอกเหนือจากนี้อยู่ นอกเหนือค่า Head Design

ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2555; 2563)

ตารางที่ 2-26 ข้อจำกัดการระบายน้ำตามฤดูกาลของเขื่อนสิริกิติ์

ฤดูฝน	รายละเอียด	หมายเหตุ
พ.ค.-ต.ค.	-ปล่อยน้ำเพื่อการเลี้ยงปลากระชังด้านท้ายน้ำระบายน้ำปกติอยู่ระหว่าง 4.0-8.0 ล้าน ลบ.ม. ต่อวัน โดยเพิ่มลดปริมาณตาม Side Flow จากลำน้ำป่าดหรือ ตามความจำเป็น ทั้งนี้ อาจลดการระบายน้ำได้ แต่ต้องรักษาระดับน้ำที่สถานีวัดน้ำวังกะที่ TD03 ต.วังกะที่ ให้ระดับน้ำไม่ต่ำกว่า 50.8 เมตร ตลอด 24 ชั่วโมง วิธีระบายน้ำเพื่อรักษาระดับน้ำที่ TD03 ให้ไม่ต่ำกว่า 50.8 เมตร ให้แบ่งการระบายน้ำเพื่อเดินเครื่องทั้งช่วงเช้า ช่วงบ่าย และช่วงเย็นของแต่ละวัน	ข้อเสนอแนะประกอบการพิจารณาการปรับลดการระบายน้ำให้พิจารณาปริมาณน้ำที่จุดวัดน้ำ N.12A (น้ำน่าน+น้ำป่าด) ประกอบ เช่น ถ้าปริมาณน้ำไหลผ่าน -น้อยกว่า 20 ลบ.ม. ต่อวินาที ควรระบายน้ำ 8 ล้าน ลบ.ม. ต่อวัน -อยู่ระหว่าง 20-50 ลบ.ม. ต่อวินาที อาจจะลดการระบายให้เหลืออยู่ระหว่าง 8.0-5.5 ล้าน ลบ.ม. ต่อวัน -อยู่ระหว่าง 50-150 ลบ.ม. ต่อวินาที อาจจะลดการระบายให้เหลืออยู่ระหว่าง 4.0-5.5 ล้าน ลบ.ม. ต่อวัน แต่จะต้องคอยติดตามระดับน้ำที่

ฤดูฝน	รายละเอียด	หมายเหตุ
	โดยมีเงื่อนไขคือไม่หยุดการระบายน้ำทั้งหมดเกิน (1) ในกรณีหยุดการเดินเครื่องทั้งหมด 8-10 ชั่วโมง การเริ่มเดินเครื่องครั้งแรกให้เดิน 2 เครื่องเป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง และเดินต่อเนื่องกันตามความเหมาะสมกับปริมาณน้ำอย่างน้อยอีก 1 ชั่วโมง (08.00-10.00 น.) (2) การหยุดเดินเครื่องติดต่อกัน <8 ชั่วโมง สามารถเริ่มเดินเครื่องได้ 1 เครื่อง ต่อเนื่อง 2 ชั่วโมง	จุดวัดน้ำ TD03 (สถานีวัดน้ำวังกะพี้) จะต้องไม่ต่ำกว่า 50.8 เมตร รทก. สำหรับกรณีที่มีน้ำท่วมพื้นที่ อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์ สามารถลดการระบายน้ำทั้งหมดได้
ส.ค.-ต.ค.	<ul style="list-style-type: none"> -ช่วงควบคุมน้ำหลาก (Flood Control) เหนือเขื่อน (อ่างเก็บน้ำ): ใช้ Upper Rule Curve ในการพิจารณาการบริหารจัดการน้ำในอ่างเก็บน้ำ ท้ายเขื่อน: พิจารณาปริมาณน้ำที่จุดวัดน้ำท้ายเขื่อนให้อยู่ในค่าที่ไม่เกินค่าวิกฤต -TD01 (ท้ายเขื่อนบรรจบกับแม่น้ำปาด) ปริมาณน้ำไม่เกิน 920 ลบ.ม. ต่อวินาที -N.2B (อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์) ปริมาณน้ำไม่เกิน 1,250 ลบ.ม. ต่อวินาที -TD04 (N.60) (แม่น้ำน่าน+ คลองตรอน) ปริมาณน้ำไม่เกิน 1,600 ลบ.ม. ต่อวินาที -N.5A (แม่น้ำน่าน+แควน้อย) ปริมาณน้ำไม่เกิน 1,537 ลบ.ม. ต่อวินาที 	<ul style="list-style-type: none"> -ติดตามข้อมูล/ประสานงานชลประทานจังหวัด ชลประทานเขตสำนักงานอุทกวิทยา -ติดตามข้อมูล/ประสานงานหน่วยงานภายใน กฟผ.
ฤดูแล้ง	รายละเอียด	หมายเหตุ
พ.ย.-เม.ย.	-ระบายน้ำเพื่อการทำนาปีใน จ.อุตรดิตถ์ โดยระบายน้ำ 15 ล้าน ลบ.ม. ต่อวัน เพื่อยกระดับน้ำที่จุดสูบน้ำ N.2B สำหรับการสูบน้ำทำนา 34,300 ไร่	-ปริมาณน้ำ 15 ล้าน ลบ.ม. สามารถหยุดช่วง 12.00-13.00 น. และ 17.00-18.00 น. ได้

ฤดูฝน	รายละเอียด	หมายเหตุ
20 ต.ค.-20 พ.ย.	-ระบายเพื่อการสูบน้ำประปาและ สถานีสูบน้ำเพื่อการเกษตรระบายน้ำ วันละ 5.5 ล้าน ลบ.ม.	-ให้การประปาภูมิภาคท้ายเขื่อนและ สถานีสูบน้ำเพื่อการเกษตรท้ายเขื่อน ของ อบต. จำนวน 113 สถานีในจ. อุดรดิตถ์
21-23 ต.ค.	-งานแข่งเรือจังหวัดอุดรดิตถ์ระบาย น้ำไม่ต่ำกว่า 12 ล้าน ลบ.ม. ต่อวัน เริ่มระบายน้ำในช่วงวันที่ 20 ต.ค.-22 ต.ค.	-เพื่อยกระดับน้ำหน้าพระบรมรูป ร.5 ให้มีระดับสูงพอต่อการแข่งเรือ -ปรับเพิ่มลดตาม Side Flow และที่ จุดวัด N.2B
ก.ย.	-งานแข่งเรือจังหวัดพิษณุโลก ระบาย น้ำไม่ต่ำกว่า 13 ล้าน ลบ.ม. ต่อวัน ระบายน้ำก่อนแข่ง 3 วัน	-ปรับเพิ่มลดได้โดยการตรวจสอบ ข้อมูลกับทางเขื่อนนเรศวร
ต.ค.-พ.ย.	- งานแข่งเรือจังหวัดพิจิตร ระบายน้ำ ไม่ต่ำกว่า 13 ล้าน ลบ.ม. ต่อวัน ระบายน้ำก่อนแข่ง 4 วัน	-ปรับเพิ่มลดได้โดยการตรวจสอบ ข้อมูลกับทางเขื่อนนเรศวร
พ.ย.	-ลอยกระทงจังหวัดอุดรดิตถ์ ระบายน้ำไม่ต่ำกว่า 12 ล้าน ลบ.ม. ต่อวัน	-เพื่อยกระดับน้ำหน้าพระบรมรูป ร.5 ให้มีระดับสูงพอต่อการแข่งเรือ -ปรับเพิ่มลดตาม Side Flow
3-5 ธ.ค.	-งานประเพณีไหลเรือไฟ อ. ตรอน จ. อุดรดิตถ์ ระบายน้ำไม่ต่ำกว่า 11 ล้าน ลบ.ม. ต่อวัน	-เพื่อยกระดับน้ำที่ อ.ตรอน ไม่ให้ต่ำ และสูงเกินไปช่วงจัดงาน เนื่องจากเรือ ต้องไหลลอดใต้สะพาน -ปรับเพิ่มลดตาม Side Flow

ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2555; 2563)

ตารางที่ 2-27 แสดงการควบคุมระดับน้ำสูงสุดและความสามารถรับน้ำสูงสุดของสถานี
ตรวจวัดน้ำตลอดลำน้ำน่าน

ตารางที่ 2-27 ความสามารถรับน้ำสูงสุดของสถานีตรวจวัดน้ำตลอดลำน้ำน่าน

ลุ่มน้ำ	สถานี	อำเภอ	จังหวัด	ระดับน้ำ (เมตร รทก.)	อัตราการไหลของน้ำ (ลบ.ม. ต่อวินาที)
น่าน	TD01	ท่าปลา	อุดรดิตถ์	76.90	920
น่าน	N.2B	เมือง	อุดรดิตถ์	59.00	1,250
น่าน	TD04	ตรอน	อุดรดิตถ์	8.26	1,600
น่าน	N.27A	พรหมพิราม	พิษณุโลก	10.24	1,266
น่าน	N.36	นครไทย	พิษณุโลก	7.89	680
น่าน	N.22	วัดโบสถ์	พิษณุโลก	8.33	642
น่าน	N.5A	เมือง	พิษณุโลก	10.54	1,537

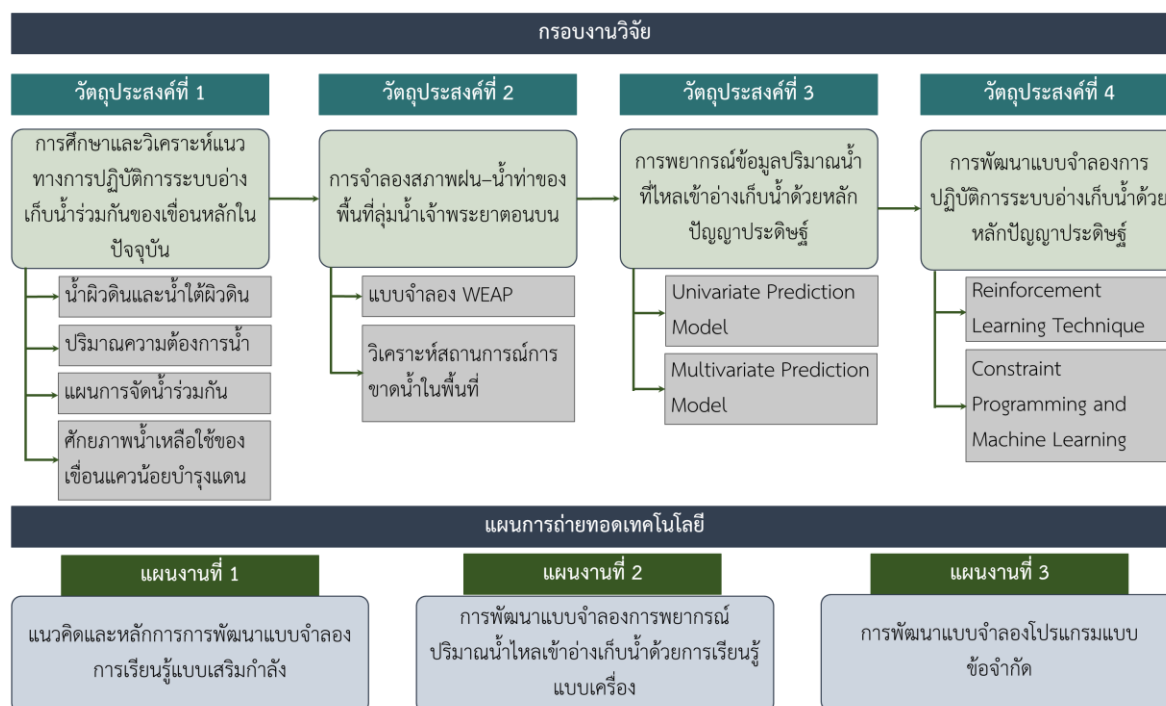
ลุ่มน้ำ	สถานี	อำเภอ	จังหวัด	ระดับน้ำ (เมตร รทก.)	อัตราการไหลของน้ำ (ลบ.ม. ต่อวินาที)
น่าน	N.24A	วังทอง	พิษณุโลก	11.00	393
น่าน	N.55	ชาติตระการ	พิษณุโลก	7.75	259
น่าน	N.7A	เมือง	พิจิตร	10.21	1,425
น่าน	N.8A	บางมูลนาก	พิจิตร	10.87	1,387

ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2555; 2563)

บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 กรอบงานวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยดำเนินการภายใต้แนวคิดและกรอบงานวิจัยในรูปที่ 3-1 โดยมีรายละเอียดของระเบียบวิธีวิจัยแยกตามวัตถุประสงค์ดังนี้



รูปที่ 3-1 กรอบงานวิจัย

3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย

รายละเอียดของระเบียบวิธีการวิจัยแยกตามวัตถุประสงค์ภายใต้กรอบงานวิจัยที่แสดงในรูปที่ 3-1 ข้างต้นมีดังนี้

วัตถุประสงค์ที่ 1: ศึกษาและวิเคราะห์แนวทางการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำร่วมกันของเขื่อนหลักในปัจจุบัน (Current Multi-Reservoir Operation System) ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ประกอบด้วย เขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ และเขื่อนเจ้าพระยา โดยพิจารณาทั้งในส่วนของปัจจัยปริมาณน้ำต้นทุน ปริมาณความต้องการน้ำ และแผนการจัดสรรน้ำร่วมกัน

1. รวบรวมข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำรายวันของเขื่อนหลักในพื้นที่ศึกษา ได้แก่ ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ ปริมาณการระเหยของน้ำ ปริมาณน้ำเก็บกัก ปริมาณการปล่อยน้ำ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ และข้อมูลอื่น ๆ

3 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

2. ศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยปริมาณน้ำต้นทุนทั้งในส่วนของน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน ปริมาณน้ำไหลเข้าทางด้านข้าง (Side Flow) ปัจจัยปริมาณความต้องการน้ำในทุกกิจกรรมการใช้น้ำในพื้นที่ศึกษา รวมทั้งศึกษาและทบทวนแผนการจัดสรรน้ำร่วมกันของกรมชลประทานและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

3. ศึกษาและวิเคราะห์แนวทางการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่างร่วมกันด้วยไค้งเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำในอดีตถึงปัจจุบัน ตลอดจนวิเคราะห์อัตราส่วนการระบายของเขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

4. ศึกษาและวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณฝนตรวจวัดและฝนพยากรณ์

5. ศึกษาและวิเคราะห์เพื่อหาค่าปริมาณความต้องการน้ำภาคการเกษตรกรรมในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่โดยอาศัยหลักการประมาณการค่าความต้องการน้ำของพืชได้อาศัยแอปพลิเคชัน Cloud-Based IriSAT (Hornbuckle et al., 2016) ร่วมกับคำนวณหาประสิทธิภาพการชลประทาน (Scheme Irrigation Efficiency) ภายใต้กรอบการวิจัยในรูปแบบที่ 3-2 โดยขั้นตอนการดำเนินการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

(5.1) ทำการรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ข้อมูลพื้นที่โครงการชลประทานในรูปแบบ GIS Shape File จากกรมพัฒนาที่ดิน ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมแสดงพื้นที่เพาะปลูกของพืชจากสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Kc) และปริมาณการส่งน้ำเพื่อการชลประทานที่อาคารควบคุม จากกรมชลประทาน ข้อมูลสภาพอากาศ จากกรมอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลพืชจากการลงสำรวจพื้นที่ภาคสนาม ตลอดจนรูปแบบปฏิทินการเพาะปลูกพืชที่รวบรวมได้จากเอกสารรายงานจากแหล่งข้อมูลทุติยภูมิ

(5.2) ทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชด้วยแอปพลิเคชัน Cloud-Based IriSAT (Kc-IriSAT) โดยนำเข้าข้อมูลพื้นที่ชลประทานในแอปพลิเคชัน Cloud-Based IriSAT สามารถทำได้โดยแปลง GIS Shape File ไปเป็นไฟล์ Keyhole Markup Language (KML) จากนั้นแอปพลิเคชัน Cloud-Based IriSAT จะประมวลผลผ่านเว็บเซอร์วิสและแสดงผลพร้อมในรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

(5.3) ทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Average Kc-RID) เพื่อตรวจพิสูจน์ผลลัพธ์ที่ได้จากแอปพลิเคชัน Cloud-Based IriSAT โดยการเปรียบเทียบกับค่าจากการตรวจวัดในรูปแบบของ Average Kc-RID ที่ทำการวิเคราะห์โดยอาศัยฐานข้อมูล Kc ตรวจวัดของกรมชลประทาน และข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมจากระบบบริการภูมิสารสนเทศเพื่อการเกษตร GISagro 4.0 Application ของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ที่สามารถติดตามข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกพืช 4 ชนิดหลัก ได้แก่ (1) ข้าว (2) อ้อย (3) ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และ (4) มันสำปะหลัง โดยค่า Average Kc-RID จะคำนวณในรูปแบบของค่าเฉลี่ยรายสัปดาห์เพื่อเป็นตัวแทนของพื้นที่นั้น ๆ ตลอดช่วงเวลาของการเพาะปลูกพืชครอบคลุมทั้งช่วงการเพาะปลูกพืชฤดูฝนและฤดูแล้ง โดยกำหนดให้เป็นฟังก์ชันกับ Kc จากข้อมูลตรวจวัดภาคสนามตามชนิดของพืชที่ได้ทำการทดลองค่าโดยส่วนการใช้น้ำชลประทาน กรมชลประทาน และข้อมูลพื้นที่ปลูกพืชสะสมจากระบบบริการภูมิสารสนเทศเพื่อการเกษตร GISagro 4.0 Application ดังแสดงในสมการที่ 3-1

$$\text{Average } K_c = \frac{(K_{cri} \times \text{Arequi}) + (K_{csu} \times \text{Arequsu}) + (K_{cmi} \times \text{Arequmi}) + (K_{cca} \times \text{Arequca})}{\text{Total Area}} \quad \text{-----}(3-1)$$

โดยที่	K_{cri}	= ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของข้าว
	K_{csu}	= ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อย
	K_{cmi}	= ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์
	K_{cca}	= ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของมันสำปะหลัง
	Arequi	= พื้นที่เพาะปลูกข้าวสะสม
	Arequsu	= พื้นที่เพาะปลูกอ้อยสะสม
	Arequmi	= พื้นที่เพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์สะสม
	Arequca	= พื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลังสะสม

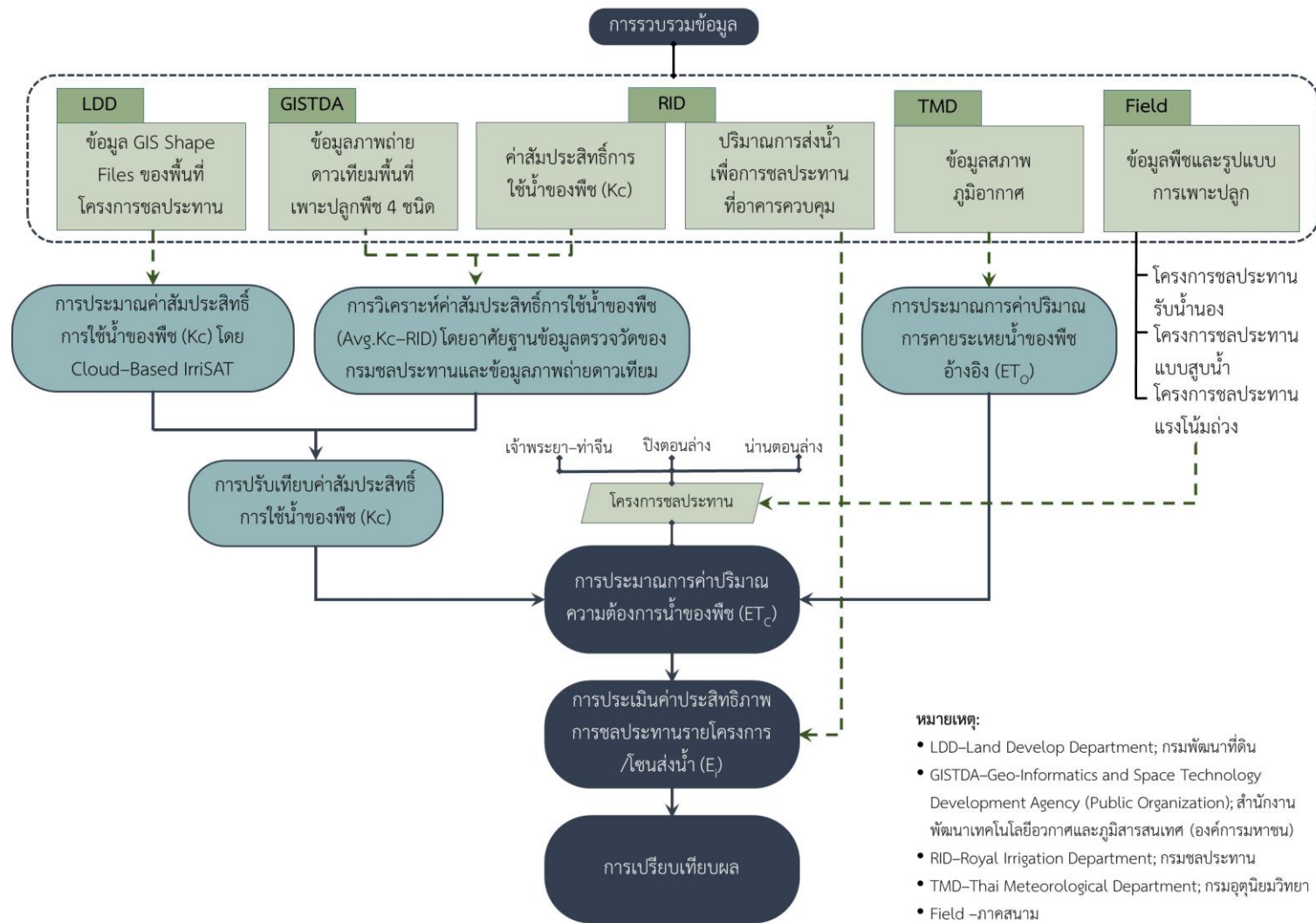
(5.4) ทำการปรับเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (K_c) จากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง K_c -IrriSAT และ Average K_c -RID ที่คำนวณจากข้อมูล 4 ชนิดพืช เพื่อวิเคราะห์หาค่าแฟคเตอร์ปรับแก้ (Adjusted Factor) ในช่วงฤดูการเพาะปลูกซึ่งแบ่งออกเป็นพืชในฤดู (In-Season Crop) และพืชนอกฤดู (Off-Season Crop) ในพื้นที่ โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method)

(5.5) ทำการประมาณค่าปริมาณการคายระเหยน้ำของพืชอ้างอิง (Reference Crop Evapotranspiration, ETo) โดยอาศัยข้อมูลสภาพภูมิอากาศที่รวบรวมได้ในพื้นที่ศึกษา โดยอาศัยสูตรการคำนวณ Penman-Monteith

(5.6) ประมาณการค่าปริมาณความต้องการน้ำของพืช (Crop Evapotranspiration, ETc) แยกตามโครงการชลประทานจำนวน 34 โครงการครอบคลุมพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่

(5.7) ประเมินค่าประสิทธิภาพการชลประทานระดับโครงการ/โซนการส่งน้ำ (Scheme Irrigation Efficiency)

(5.8) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชลประทานที่ได้จากการคำนวณในขั้นตอนข้างต้นเพื่อประเมินสถานะการบริหารจัดการน้ำที่ผ่านมาในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่



รูปที่ 3-2 กรอบงานวิจัยในการศึกษาปริมาณความต้องการน้ำภาคการเกษตรกรรมในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

6. ศึกษาศักยภาพของน้ำเหลือใช้ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเพื่อตอบสนองปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาภายใต้กรอบการวิจัยในรูปแบบที่ 3-3 โดยขั้นตอนการดำเนินการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

(6.1) ทำการรวบรวมข้อมูลและตรวจสอบความถูกต้องเบื้องต้นได้แก่ ข้อมูลภูมิอากาศ (Climate Data) ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (Reservoir Inflow) ปริมาณน้ำไหลออกจากอ่าง (Reservoir Outflow) ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูก (Cultivated Area) และแผนการจัดสรรน้ำ (Water Allocation Plan) ในช่วงฤดูแล้งและฤดูฝนของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน โดยข้อมูลทั้งหมดรวบรวมได้ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563

(6.2) ทำการวิเคราะห์ในรูปแบบของสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) ถึงแนวทางการบริหารเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนในอดีตถึงปัจจุบันจากข้อมูลปริมาณน้ำไหลออกและสถานะของปริมาณน้ำเก็บกักในเขื่อน ทำการศึกษาปัจจัยนำต้นทุนจากข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง และทำการศึกษาปัจจัยความต้องการน้ำในพื้นที่จากข้อมูลแผนการจัดสรรน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

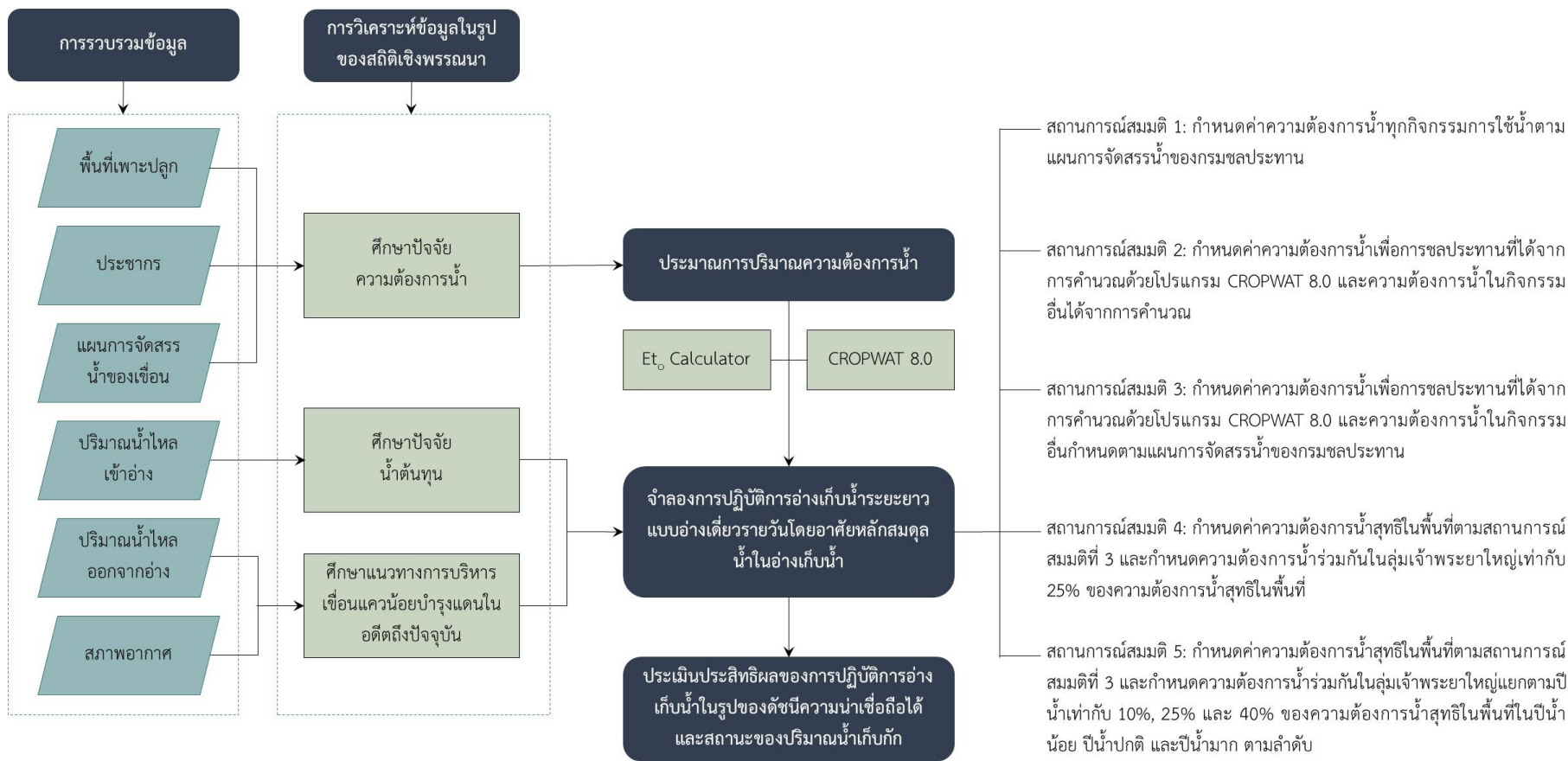
(6.3) ทำการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำสำหรับการชลประทานในพื้นที่ (Local Demand for Irrigation) โดยอาศัยหลักการคำนวณหาปริมาณความต้องการน้ำของพืชโดยใช้โปรแกรม ET_0 Calculator (Ajoy, 2020) และโปรแกรม CROPWAT 8.0 (Clarke et al., 1998) ซึ่งพัฒนาโดยองค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) ร่วมกัน จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้มาคำนวณปริมาณน้ำเพื่อการชลประทานที่ต้องจัดส่งสุทธิในพื้นที่ (Local Demand for Irrigation) โดยคิดประสิทธิภาพการชลประทานเท่ากับ 60% และทำการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค (Municipal Water Demand) จากสถิติข้อมูลจำนวนประชากรใน 4 เขตอำเภอของจังหวัดพิษณุโลกได้แก่ อ.เมือง อ.วัดโบสถ์ อ.วังทอง และ อ.พรหมพิราม รวมประชากรทั้งสิ้น 525,686 คน โดยกำหนดอัตราการใช้น้ำ 200 ลิตรต่อคนต่อวัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรที่ 2, 2562)

(6.4) ทำการศึกษาแนวทางการบริหารเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนด้วยการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำระยะยาวแบบอ่างเดี่ยวรายวัน (Daily Single Reservoir Operation) โดยอาศัยหลักสมดุสน้ำ ทั้งนี้ได้กำหนดสถานการณ์สมมติ 5 รูปแบบตามปัจจัยความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ (Local Demand) และปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ (Joint Demand) ดังนี้ (1) สถานการณ์สมมติ 1: กำหนดค่าความต้องการน้ำทุกกิจกรรมการใช้น้ำตามแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทาน (2) สถานการณ์สมมติ 2: กำหนดค่าความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม CROPWAT 8.0 และความต้องการน้ำในกิจกรรมอื่นได้จากการคำนวณ (3) สถานการณ์สมมติ 3: กำหนดค่าความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม CROPWAT 8.0 และความต้องการน้ำในกิจกรรมอื่นกำหนดตามแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทาน (4) สถานการณ์สมมติ 4: กำหนดค่าความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ตามสถานการณ์สมมติที่ 3 และกำหนดความต้องการน้ำร่วมกันในกลุ่มเจ้าพระยาใหญ่เท่ากับ 25% ของความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ และ (5) สถานการณ์สมมติ 5: กำหนดค่าความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ตามสถานการณ์สมมติที่ 3 และกำหนดความต้องการน้ำร่วมกันในกลุ่มเจ้าพระยาใหญ่แยกตามปีน้ำเท่ากับ 10%, 25% และ 40% ของความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ในปีน้ำน้อย ปีน้ำปกติ และปีน้ำมาก ตามลำดับ ซึ่ง

ข้อกำหนดปัจจัยความต้องการน้ำในแต่ละรูปแบบนั้นได้สรุปไว้ในตารางที่ 3-1 รวมทั้งกำหนดให้ปริมาณน้ำที่ระบายจากเขื่อนเท่ากับปริมาณความต้องการน้ำที่สังเคราะห์ขึ้นในแต่ละรูปแบบ หรืออีกนัยหนึ่งคือปริมาณการขาดน้ำทั้ง 5 สถานการณ์สมมติเท่ากับ 0 นั่นเอง จากนั้นทำการประเมินประสิทธิผลของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในรูปของดัชนีความน่าเชื่อถือได้ (Reliability Index) สถานะปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสุดท้ายของการจำลองระบบ (Ending Storage) และปริมาณน้ำไหลล้นเขื่อน ทั้งนี้เพื่อประเมินรูปแบบของสถานการณ์สมมติที่มีความเหมาะสมสำหรับประเมินศักยภาพน้ำเหลือใช้ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนในการตอบสนองความต้องการน้ำร่วมกันในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

ตารางที่ 3-1 ข้อกำหนดปัจจัยความต้องการน้ำของสถานการณ์สมมติ

สถานการณ์สมมติ	ข้อกำหนดปัจจัยความต้องการน้ำ				
	แผนการจัดสรรน้ำ กรมชลประทาน	ปริมาณความต้องการน้ำในพื้นที่ (Local Demand)			ปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันในกลุ่ม น้ำเจ้าพระยาใหญ่ (Joint Demand)
		การชลประทาน (CROPWAT 8.0)	การอุปโภค บริโภค	รักษา ระบบนิเวศ	
สถานการณ์สมมติ 1	X	-	-	-	-
สถานการณ์สมมติ 2	-	X	X (Estimated)	X (Estimated)	-
สถานการณ์สมมติ 3	-	X	X (Planned)	X (Planned)	-
สถานการณ์สมมติ 4	-	X	X (Planned)	X (Planned)	25% Local Demand
สถานการณ์สมมติ 5	-	X	X (Planned)	X (Planned)	10%, 25%, 40% Local Demand



รูปที่ 3-3 กรอบงานวิจัยในการศึกษาศักยภาพน้ำเหลือใช้ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

วัตถุประสงค์ที่ 2: จำลองสภาพฝน-น้ำท่าของพื้นที่ลุ่มน้ำตอนบนเพื่อศึกษาถึงลักษณะทางอุทกวิทยา ปัจจัยน้ำต้นทุน ปัจจัยความต้องการน้ำ สำหรับใช้ในการวิเคราะห์สถานการณ์การขาดน้ำในพื้นที่ปัจจุบัน

วัตถุประสงค์ของการขั้นตอนนี้ก็เพื่อพัฒนาแบบจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำตอนบน โดยมีขอบเขตพื้นที่ครอบคลุมลุ่มน้ำปิง ลุ่มน้ำวัง ลุ่มน้ำยม และลุ่มน้ำน่านจนถึงสถานีตรวจวัดน้ำ C.2 โดยอาศัยแบบจำลองระบบการวางแผนและประเมินสถานการณ์น้ำ (Water Evaluation and Planning Model, WEAP) โดยขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลอง (Modeling Process) ดังนี้

1. การรวบรวมข้อมูล ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย ข้อมูลอุตุ-อุทกวิทยา ข้อมูลสมมูลน้ำในอ่างเก็บน้ำ ข้อมูลการจัดสรรน้ำ ข้อมูลพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ข้อมูลแผนการจัดสรรน้ำ/ความต้องการใช้น้ำ ข้อมูลลักษณะกายภาพของพื้นที่ศึกษา เชื้อน ระบบอ่างเก็บน้ำ ข้อมูลแผนที่ ตลอดจนข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

2. การประยุกต์ใช้แบบจำลองระบบการวางแผนและประเมินสถานการณ์น้ำ (Water Evaluation and Planning Model, WEAP) เพื่อจำลองสภาพฝน-น้ำท่า และการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำตอนบน โดยมีขอบเขตพื้นที่ครอบคลุมลุ่มน้ำปิง ลุ่มน้ำวัง ลุ่มน้ำยม และลุ่มน้ำน่านจนถึงสถานีตรวจวัดน้ำ C.2 สำหรับใช้ในการวางแผนและประเมินสถานการณ์น้ำทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

(2.1) การกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษาในแบบจำลอง WEAP

การพัฒนาแบบจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำด้วยโปรแกรม WEAP จะเริ่มต้นจากการกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษาซึ่งครอบคลุมถึง ขอบเขตพื้นที่ลุ่มน้ำและองค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบทรัพยากรน้ำเช่น แม่น้ำ (Rivers) อ่างเก็บน้ำ (Reservoirs) โหนดความต้องการน้ำ (Demand Sites) และองค์ประกอบอื่น ๆ เป็นต้น

(2.2) การนำข้อมูลป้อนเข้าแบบจำลอง

ขั้นตอนนี้จะครอบคลุมถึงการแปลความหมายข้อมูลและป้อนข้อมูลเข้าสู่แบบจำลอง WEAP โดยรายละเอียดได้สรุปไว้ในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ข้อมูลป้อนเข้าในแบบจำลอง WEAP

ข้อมูลป้อนเข้า	วัตถุประสงค์	วิธีในแบบจำลอง WEAP	วิธีที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้
ข้อมูลลุ่มน้ำ (Catchment Data)	เพื่อจำลองกระบวนการทางอุทกวิทยาที่เกิดขึ้นในลุ่มน้ำ	(1) Irrigation Demands Only Method (Simplified Coefficient Method) (2) Rainfall-Runoff Method (Simplified Coefficient Method) (3) Rainfall-Runoff Method (Soil Moisture Method)	Rainfall-Runoff Method (Simplified Coefficient Method) เนื่องจากสามารถใช้ข้อมูลอุทกวิทยาอื่น ๆ ในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Evapotranspiration Crop Coefficients) และข้อมูลน้ำท่าจากการจำลองระบบ (Simulated Runoff)

ข้อมูลป้อนเข้า	วัตถุประสงค์	วิธีในแบบจำลอง WEAP	วิธีที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้
		(4) MABIA Method (5) Plant Growth Model (PGM)	
ข้อมูลป้อนเข้า	ประเภทข้อมูล	รายละเอียดสำคัญ	
ข้อมูลอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Data)	ข้อมูลกายภาพของอ่างเก็บน้ำ (Physical Data)	ข้อมูลโค้งความจุ-พื้นที่-ระดับของอ่างเก็บน้ำ ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ ข้อมูลปริมาณน้ำเก็บกัก ข้อมูลการระเหยและการรั่วซึมจากอ่างเก็บน้ำ ข้อมูลการระบายน้ำ	
	ข้อมูลปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Operational Data)	ข้อมูลโซนปริมาตรเก็บกักของอ่างเก็บน้ำ ข้อมูลระดับน้ำเก็บกักของปริมาตรเก็บกักที่ใช้การ ข้อมูลระดับน้ำเก็บกักของโซนบัพเฟอร์ ข้อมูลระดับน้ำเก็บกักของปริมาตรเก็บกักไม่ใช้การ	
ข้อมูลแม่น้ำ (River Data)	ข้อมูลอัตราการไหลของน้ำ (Headflow)	สามารถป้อนเข้าข้อมูลอัตราการไหลของน้ำในแบบจำลองได้ 2 แบบคือ แบบที่ 1 อาศัยค่าที่สังเคราะห์จากวิธีการคำนวณในกลุ่มน้ำ แบบที่ 2 ป้อนเข้าค่าโดยตรงโดยอาศัยวิธีการต่าง ๆ ที่จัดเตรียมไว้ในแบบจำลอง WEAP ได้แก่ วิธีปีน้ำ (Water Year Method) วิธีอ่านค่าจากไฟล์นำเข้า (Read from File Method) และอาศัยสมการ (Expressions)	
ข้อมูล Transmission Links	ข้อมูลอัตราการไหลของน้ำสูงสุด (Maximum Flow Volume)	ข้อมูลอัตราการไหลของน้ำสูงสุดรายเดือน (Maximum Monthly Flow)	
	ข้อมูลการสูญเสียน้ำจากระบบ (Loss from System)	เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำจากการระเหยเทียบกับข้อมูลอัตราการไหลของน้ำผ่านระบบ	
	ข้อมูลการไหลซึมของน้ำผ่านชั้นน้ำใต้ดิน (Loss to Groundwater)	เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำเทียบกับข้อมูลอัตราการไหลของน้ำผ่านโหนดชั้นน้ำใต้ดิน	
ข้อมูลการผันน้ำ (Diversions)	ข้อมูลการผันน้ำสูงสุด (Maximum Diversion)	ข้อมูลการผันน้ำสูงสุดรายเดือน (Maximum Monthly Diversion) ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพ และข้อจำกัดในการปล่อยน้ำ	
	ข้อมูลสัดส่วนการผันน้ำ (Fraction Diverted)	ข้อมูลสัดส่วนของการผันน้ำจากแม่น้ำหลักซึ่งป้อนเข้าในแบบจำลองในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์	
ข้อมูลความต้องการน้ำ (Demand Sites)	ข้อมูลรายละเอียดกิจกรรมการใช้น้ำ	ข้อมูลประเภทกิจกรรมการใช้น้ำต่าง ๆ เช่น การเกษตรกรรม การอุปโภคบริโภค การอุตสาหกรรม เป็นต้น	
	ข้อมูลอัตราการใช้น้ำรายปี	ข้อมูลอัตราการใช้น้ำรายปีของกิจกรรมการใช้น้ำต่าง ๆ	
	ข้อมูลอัตราการใช้น้ำรายเดือน	ข้อมูลสัดส่วนการใช้น้ำรายเดือน (เทียบกับข้อมูลความต้องการน้ำรายปี)	

ข้อมูลป้อนเข้า	วัตถุประสงค์	วิธีในแบบจำลอง WEAP	วิธีที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้
	ข้อมูลอัตราการสูญเสียน้ำ (Loss Rate)	ข้อมูลการสูญเสียน้ำของแต่ละโหนดความต้องการน้ำ	
	ข้อมูลอัตราการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse Rate)	ข้อมูลอัตราการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ของแต่ละโหนดความต้องการน้ำ	

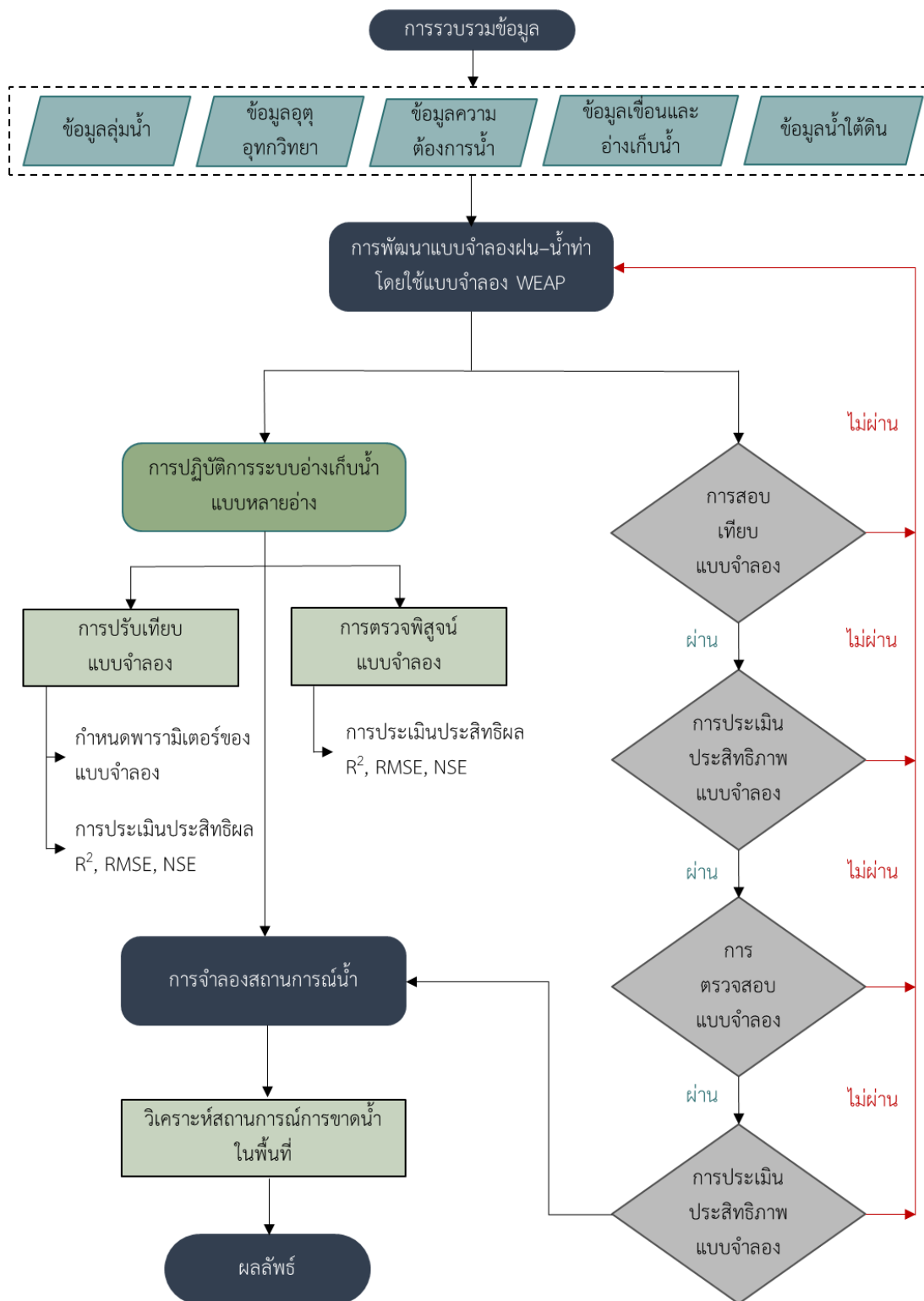
(2.3) การจำลองระบบและปรับเทียบแบบจำลอง (Model Simulation and Calibration)

ขั้นตอนนี้เป็น การปรับเทียบพารามิเตอร์ทางอุทกวิทยาในแต่ละพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย และแนวทางในการปฏิบัติงานระบบอ่างเก็บน้ำของแบบจำลองจนกระทั่งผลลัพธ์ที่ได้แบบจำลองสะท้อนถึงสภาพฝน-น้ำท่า และภาพรวมของการบริหารจัดการน้ำ จากนั้นทำการประเมินประสิทธิผลของแบบจำลองในรูปของ R^2 , RMSE และ NSE ก่อนนำแบบจำลองไปจำลองสถานการณ์น้ำในลุ่มน้ำ

(2.4) การจำลองสถานการณ์น้ำในลุ่มน้ำระยะยาวด้วยแบบจำลอง WEAP และประเมินประสิทธิผล

ในขั้นตอนสุดท้ายจะทำการจำลองสถานการณ์น้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระยะยาวระหว่างปี พ.ศ. 2543–2558 เพื่อประเมินประสิทธิผลในรูปของปริมาณการขาดน้ำ (Unmet Demand) ด้วยแบบจำลอง WEAP ที่ได้จากการพัฒนาข้างต้น

สำหรับรายละเอียดของขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง WEAP และการจำลองผลได้แสดงในรูปที่ 3-4

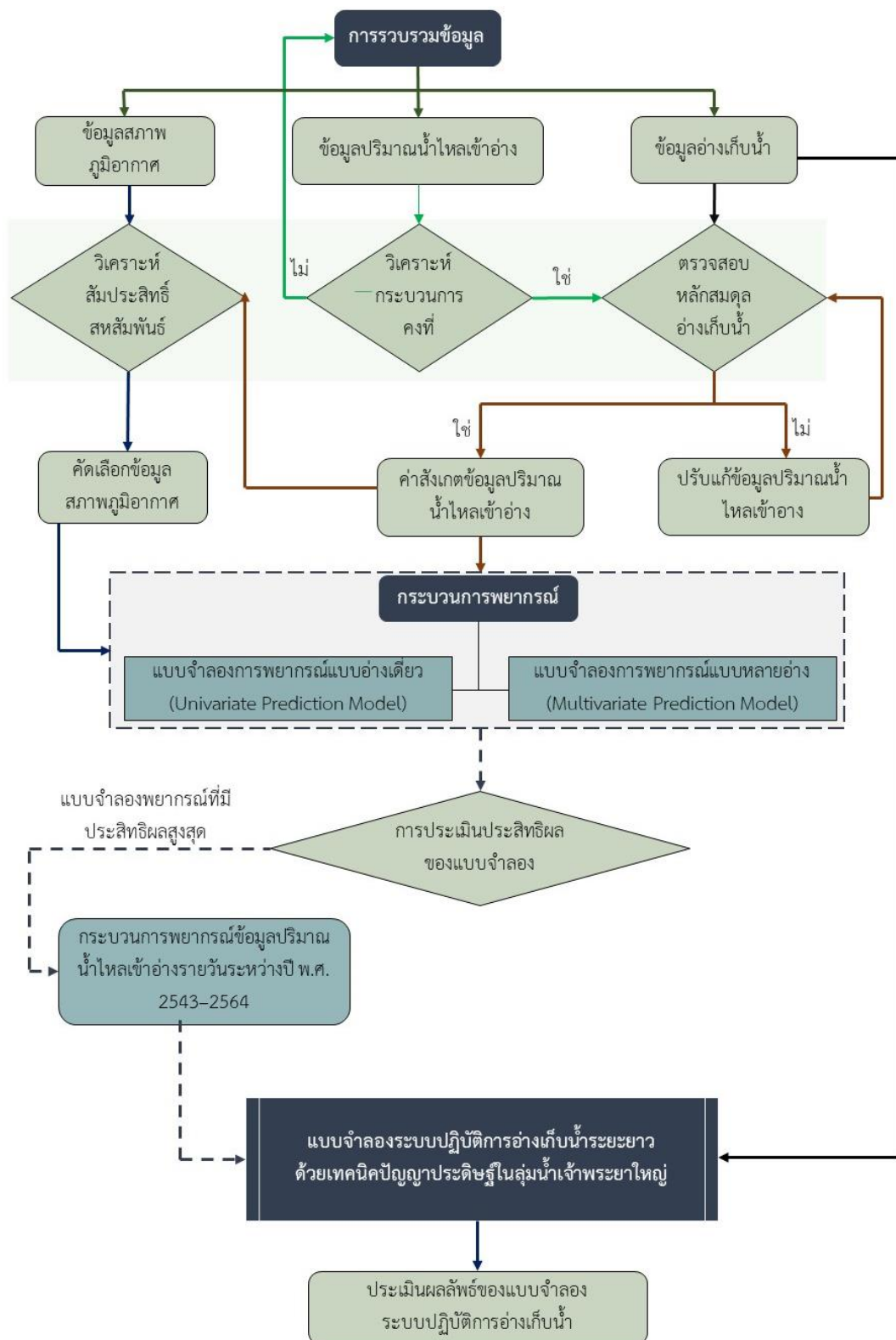


รูปที่ 3-4 กรอบการวิจัยในการพัฒนาแบบจำลองระบบการวางแผนและประเมินสถานการณ์น้ำในพื้นที่ศึกษา

วัตถุประสงค์ที่ 3: พยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่าง (Reservoir Inflow) ล่วงหน้ารายวันและรายเดือนของเขื่อนเก็บกักหลักด้วยหลักปัญญาประดิษฐ์และเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่องทั้งในลักษณะแบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่างเดี่ยว (Univariate Prediction Model) และแบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอ่าง

3 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

(Multivariate Prediction Model) เพื่อตั้งฐานข้อมูลพยากรณ์มาเป็นส่วนหนึ่งในการกำหนดการระบายน้ำจากเขื่อนหลักร่วมกันอย่างเป็นระบบดังแสดงกรอบการดำเนินงานวิจัยในรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-5 กรอบการวิจัยในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างในพื้นที่ศึกษา

1. การรวบรวมคลังข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้จะทำการรวบรวมคลังข้อมูลขนาดใหญ่ในพื้นที่ศึกษาสำหรับใช้ในการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรหลักที่ไม่สามารถควบคุมได้ของอ่างเก็บน้ำ ด้วยเหตุนี้ การรวบรวมข้อมูลวิจัยจะดำเนินการใน 3 ส่วน คือ

- ส่วนที่ 1 ข้อมูลผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนล่วงหน้า (Predicted Precipitation Data) รายวัน จากสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) ซึ่งมีลักษณะเป็นข้อมูลฝนพยากรณ์เชิงพื้นที่ (Grid-Based Rainfall)
- ส่วนที่ 2 คลังข้อมูลสภาพภูมิอากาศโลก (Global Climate Data) จากองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (National Aeronautics and Space Administration, NASA) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบในโครงการอวกาศและงานวิจัยห้วงอวกาศของสหรัฐอเมริกา โดยข้อมูลที่สำคัญได้แก่ ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิต่ำสุด อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิเฉลี่ย ความเร็วลม ความชื้นในดิน ความกดอากาศ และอื่น ๆ (องค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ, 2564)
- ส่วนที่ 3 ข้อมูลอุตุวิทยารายวันของสถานีต่าง ๆ บนภาคพื้นดิน (Hydro-meteorological Data at Ground Stations) ที่ทำการตรวจวัดในพื้นที่ศึกษาจากระบบฐานข้อมูลของกรมอุตุนิยมหาวิทยาลัยซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลฝนและข้อมูลสภาพภูมิอากาศต่าง ๆ

2. การคัดเลือกตัวแปรนำเข้าไปในแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ

คลังข้อมูลภูมิอากาศที่รวบรวมได้ทั้งในลักษณะข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) และข้อมูลรายจุด (Point Data) จะครอบคลุมพื้นที่ด้านเหนืออ่างเก็บน้ำ ตัวอ่างเก็บน้ำ และด้านท้ายอ่างเก็บน้ำ และจะถูกทำการวิเคราะห์และจัดเตรียมในรูปของอนุกรมเวลาของข้อมูลนำเข้ารายวันในช่วงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2563 (ปัจจุบัน) ที่ทำการคัดเลือกจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลภูมิอากาศนำเข้าและข้อมูลปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่าง และรูปแบบของข้อมูลที่สามารถนำเข้าไปในแบบจำลองได้

3. การพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะทำการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำล่วงหน้าทั้งในระยะสั้น (Short-Time Prediction) รายวันที่ช่วงเวลา 1 วัน และระยะยาว (Long-Term Prediction) และรายเดือนที่ช่วงเวลา 1 เดือนล่วงหน้าทั้งในลักษณะของแบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยว (Univariate Prediction Model) และแบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่าง (Multivariate Prediction Model) โดยอาศัยหลักการปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) และเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning) ที่มีความทันสมัยและให้ผลการพยากรณ์ที่ระดับความแม่นยำสูง โดยมีโครงสร้างการทำงานพื้นฐานมาจากระบบโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ (Artificial Neural Networks, ANNs) ร่วมกับหลักการทางสถิติ (Statistical Technique) และอัลกอริทึม eXtreme Gradient Boosting และอัลกอริทึม Long Short-Term Memory (LSTM) ร่วมกันโดยขอยกตัวอย่างการกำหนดรูปแบบของแบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยว ดังนี้

ตัวอย่างการกำหนดรูปแบบของโครงสร้างแบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวของเขื่อนภูมิพล
ดังนี้

(3.1) แบบจำลองการพยากรณ์ระยะสั้นรายวันที่เวลาล่วงหน้า 1 วัน

$$\text{Inflow}_{\text{BBt}+1} = f(\text{Inflow}_{\text{BBt}}, \text{Avg. Inflow}_{\text{BBt}-3}, \text{Avg. Inflow}_{\text{BBt}-7}, \text{Avg. Inflow}_{\text{BBt}-15}, \text{Avg. Temp}_t, \text{Avg. Temp}_{t-3}, \text{Avg. Temp}_{t-7}, \text{Avg. Temp}_{t-15}, \text{Predicted Precip}_t, \text{Predicted Precip}_{t-1}, \text{Predicted Precip}_{t-2}, \text{Predicted Precip}_{t-3}) \quad \text{-----}(3-2)$$

เมื่อ t เป็นข้อมูลรายวัน

(3.2) แบบจำลองการพยากรณ์ระยะยาวรายเดือนที่เวลาล่วงหน้า 1 เดือน

$$\text{Inflow}_{\text{BBt}+1} = f(\text{Inflow}_{\text{BBt}}, \text{Avg. Inflow}_{\text{BBt}-1}, \text{Avg. Inflow}_{\text{BBt}-2}, \text{Avg. Inflow}_{\text{BBt}-3}, \text{Avg. Temp}_t, \text{Avg. Temp}_{t-3}, \text{Avg. Temp}_{t-7}, \text{Avg. Temp}_{t-15}, \text{Predicted Precip}_t, \text{Predicted Precip}_{t-1}, \text{Predicted Precip}_{t-2}, \text{Predicted Precip}_{t-3}) \quad \text{-----}(3-3)$$

เมื่อ t เป็นข้อมูลรายเดือน

ตัวอย่างการกำหนดรูปแบบโครงสร้างของแบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่าง ดังนี้

(3.3) แบบจำลองการพยากรณ์ระยะสั้นรายวันที่เวลาล่วงหน้า 1 วัน

$$\text{Inflow}_{\text{BB, SK, KNB, PSt}+1} = f(\text{Inflow}_{\text{BB, SK, KNB, PSt}}, \text{Avg. Inflow}_{\text{BB, SK, KNB, PSt}-3}, \text{Avg. Inflow}_{\text{BB, SK, KNB, PSt}-7}, \text{Avg. Inflow}_{\text{BB, SK, KNB, PSt}-15}, \text{Avg. Temp}_t, \text{Avg. Temp}_{t-3}, \text{Avg. Temp}_{t-7}, \text{Avg. Temp}_{t-15}, \text{Predicted Precip}_t, \text{Predicted Precip}_{t-1}, \text{Predicted Precip}_{t-2}, \text{Predicted Precip}_{t-3}) \quad \text{-----}(3-4)$$

เมื่อ t เป็นข้อมูลรายวัน

(3.4) แบบจำลองการพยากรณ์ระยะยาวรายเดือนที่เวลาล่วงหน้า 1 เดือน

$$\text{Inflow}_{\text{BB, SK, KNB, PSt}+1} = f(\text{Inflow}_{\text{BB, SK, KNB, PSt}}, \text{Avg. Inflow}_{\text{BB, SK, KNB, PSt}-3}, \text{Avg. Inflow}_{\text{BB, SK, KNB, PSt}-7}, \text{Avg. Inflow}_{\text{BB, SK, KNB, PSt}-15}, \text{Avg. Temp}_t, \text{Avg. Temp}_{t-3}, \text{Avg. Temp}_{t-7}, \text{Avg. Temp}_{t-15}, \text{Predicted Precip}_t, \text{Predicted Precip}_{t-1}, \text{Predicted Precip}_{t-2}, \text{Predicted Precip}_{t-3}) \quad \text{-----}(3-5)$$

เมื่อ t เป็นข้อมูลรายเดือน

ในขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์จะทำการจัดแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุดสำหรับใช้ในการปรับเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) และการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model Validation) และในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการพยากรณ์คือการประเมินความแม่นยำหรือประสิทธิผลของแบบจำลองการพยากรณ์ แบบจำลองการพยากรณ์ที่ดีย่อมให้ผลพยากรณ์มีค่าใกล้เคียงกับค่าสังเกต หรือมีค่าดัชนีที่ใช้ในการชี้วัดประสิทธิผลความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยการเปรียบเทียบประสิทธิผลของแบบจำลองการพยากรณ์ตัวแปรเดียวและแบบจำลองการพยากรณ์หลายตัวแปรจะเปรียบเทียบในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพคือการแสดงกราฟเปรียบเทียบข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการพยากรณ์กับค่าสังเกต ในขณะที่การประเมินความแม่นยำและความถูกต้องของการพยากรณ์ในเชิงปริมาณจะระบุในรูปแบบค่าของตัวชี้วัดประสิทธิผลทางสถิติ (Performance Statistics) ไม่ว่าจะเป็น RMSE, MSE, R, R² และ NSE ดังแสดงในสมการที่ 3-5 ถึงสมการที่ 3-9

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - p_i)^2}{n}} \quad \text{-----}(3-6)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - p_i)^2}{n} \quad \text{-----}(3-7)$$

$$R^2 = \left[\frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(p_i - \bar{p}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2} \right] \quad \text{-----}(3-8)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(p_i - \bar{p})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}} \quad \text{-----}(3-9)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad \text{-----}(3-10)$$

เมื่อ	O_i	=	ค่าสังเกตของปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา i
	\bar{O}	=	ค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตของปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ
	p_i	=	ค่าพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา i
	\bar{p}	=	ค่าเฉลี่ยของค่าพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ
	n	=	จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบ

ค่า R และ R^2 มีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 และ 0 ถึง 1 ตามลำดับ ค่า RMSE และ MSE จะมีค่าอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 0 ในขณะที่ค่า NSE มีช่วงระหว่าง $-\infty$ ถึง 1 โดยผลการพยากรณ์ของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่ให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือได้และมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อค่า R , R^2 และ NSE มีค่าเข้าใกล้ 1 ในขณะที่ค่า RMSE และ MSE ควรมีค่าที่เข้าใกล้ศูนย์

วัตถุประสงค์ที่ 4: พัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำโดยอาศัยหลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence-AI) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการกำหนดการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำในลักษณะของปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่าง (Multiple Reservoir Re-operation System) รูปแบบใหม่อย่างเป็นระบบในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ ได้แก่ (1) แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Multi-reservoir System Operation by Reinforcement Learning, RL) และ (2) แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Constraint Programming, CP and Machine Learning, ML)

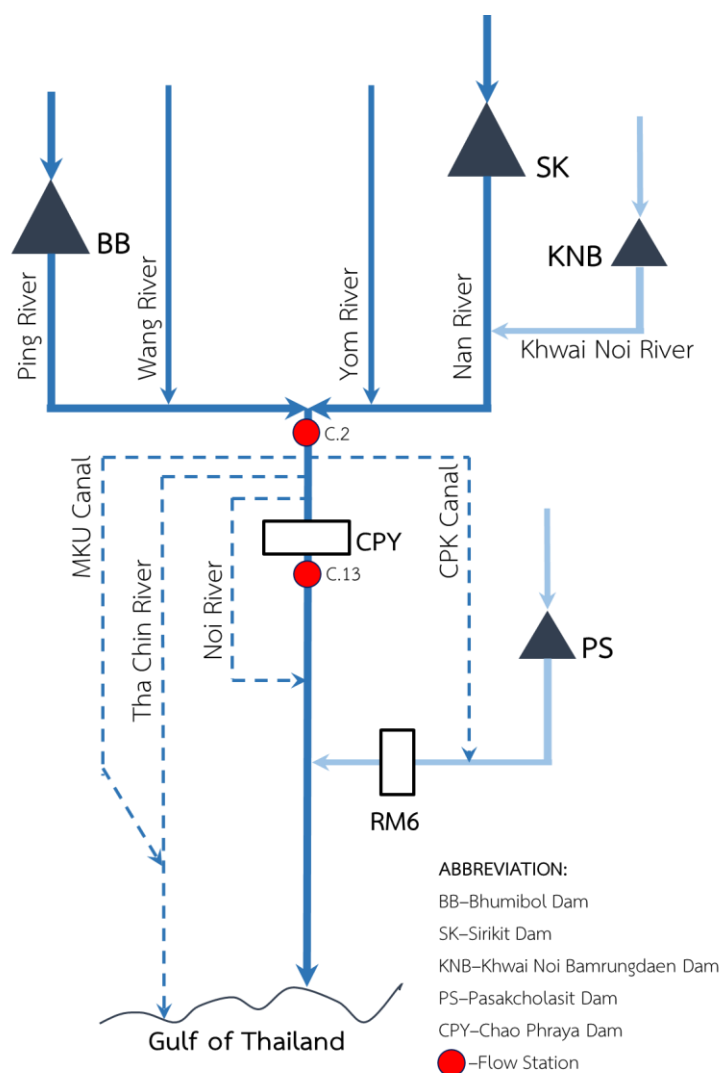
1. แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Multi-reservoir System Operation by Reinforcement Learning, RL)

1.1 การพัฒนาแบบจำลองเชิงแนวคิด (Conceptual Model)

เนื่องจากลุ่มน้ำเจ้าพระยาเป็นลุ่มน้ำขนาดใหญ่ที่มีระบบแหล่งน้ำซับซ้อน ดังนั้น การบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำในลุ่มน้ำจึงเป็นงานที่มีความยุ่งยาก งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองคอมพิวเตอร์โดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อจำลองกระบวนการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนขนาดใหญ่และขนาดกลางจำนวน 4 อ่างคือ (1) อ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล (2) อ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์ (3) อ่างเก็บน้ำเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และ (4) เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ เทคนิค AI ที่นำมาใช้พัฒนาคือ เทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning, RL) โดยแทนระบบเป็นอ่างเก็บน้ำ ซึ่งจะอาศัยกระบวนการแบบลองผิดลองถูกในการระบายน้ำ จากนั้น ระบบจะเรียนรู้ (Learning) เพื่อหารูปแบบการระบายน้ำที่เหมาะสมผ่านพฤติกรรมการระบายน้ำร่วมกับปัจจัยอื่นในสิ่งแวดล้อมที่กำหนดขึ้นในแบบจำลองโดยแสดงระบบอ่างเก็บน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 3-6

เขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์เป็นเขื่อนขนาดใหญ่ ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้าลุ่มน้ำเจ้าพระยา โดยมีเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนทำหน้าที่ควบคุมน้ำและไหลสมทบลงสู่แม่น้ำน่าน ปริมาณน้ำที่ถูกระบายน้ำจากเขื่อนตอนบนจะไหลลงมาสมทบร่วมกับปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงมาจากแม่น้ำวังและแม่น้ำยมที่สถานีตรวจวัดน้ำท่า C.2 ที่ อ. ปากน้ำโพ จ.นครสวรรค์ จากนั้นจะไหลผ่านเขื่อนเจ้าพระยาที่จังหวัดชัยนาท โดยมีสถานีตรวจวัดน้ำท่า C.13 ตั้งอยู่ที่เขื่อน เขื่อนเจ้าพระยาทำหน้าที่บังคับน้ำให้ไหลเข้าพื้นที่ชลประทานของโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ทั้งสองฝั่ง โดยฝั่งขวาไหลเข้าแม่น้ำท่าจีน แม่น้ำน้อย และคลองมะขามเฒ่า-อุทุมพร ส่วนพื้นที่ฝั่งซ้ายไหลเข้าพื้นที่ชลประทานของโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ฝั่งซ้ายผ่านคลองชัยนาท-ป่าสัก คลองอนุสาสนันท์ (คลองชัยนาท-อยุธยา) โดยที่น้ำที่ผันออกทั้งสองฝั่งส่วนใหญ่จะไหลรวมลง

สู่มแม่น้ำเจ้าพระยาอีกครั้งบริเวณจังหวัดปทุมธานี พื้นที่ฝั่งซ้ายของเจ้าพระยายังมีแม่น้ำป่าสัก ซึ่งมีเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ทำหน้าที่บังคับน้ำที่ไหลมาจากพื้นที่ตอนบนของกลุ่มน้ำป่าสัก



รูปที่ 3-6 ระบบแหล่งน้ำของกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

1.2 การพัฒนาและออกแบบโครงสร้างแบบจำลอง (Model Formulation) โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning)

การออกแบบโครงสร้างของแบบจำลองประยุกต์ใช้แนวคิดแบบ Multi-Agent System (MAS) (Ferber & Weiss, 1999) โดยในระบบหนึ่ง ๆ ประกอบด้วย สิ่งแวดล้อม (Environment) และตัวแทนระบบการตัดสินใจ เรียกว่า Agent (หรือตัวแทนปัญหา) ในระบบอาจจะมีหนึ่งหรือหลาย Agent ปฏิสัมพันธ์ (Interactive) ระหว่าง Agent ด้วยกันเอง หรือ Agent กับ Environment แนวคิดนี้ถูกนำไปประยุกต์ในงานหลายด้านโดยเฉพาะงานด้านระบบคอมพิวเตอร์ เช่น การควบคุมระบบอัตโนมัติ หุ่นยนต์ หรือเกม (Villarrubia et al., 2017, González-Briones et al., 2019) เป็นต้น แนวคิดการออกแบบแบบจำลองสำหรับการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่แสดงไว้ดังรูปที่ 3-7 โดยกำหนดให้ Agent

แผนอ่างเก็บน้ำประกอบด้วย (1) อ่างเก็บน้ำภูมิพล (Agent-BB) (2) อ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ (Agent-SK) (3) อ่างเก็บน้ำแควน้อยบำรุงแดน (Agent-KNB) และ (4) อ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์ (Agent-PS) โดย Agent แต่ละตัวทำหน้าที่ตัดสินใจระบายน้ำ (Release) ลงท้ายน้ำ โดยรับค่าสถานะ (State) ของตัวแปรต่าง ๆ เพื่อใช้ในการตัดสินใจจาก Environment รายละเอียดของตัวแปรสถานะเริ่มจาก Agent แรก คือ Agent-BB รับค่าสถานะของข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำล่วงหน้า 7 วัน (7-Day Predicted Inflow) ข้อมูลปริมาณน้ำเก็บกัก (Storage) ข้อมูลปริมาณน้ำที่สถานีตรวจวัดน้ำท่า C.2 และข้อมูลปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ ถัดมาเป็น Agent-SK การรับสถานะของ Agent นี้เหมือนกับ Agent-BB ต่างที่การรับค่าข้อมูลปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล ทั้งนี้ เนื่องจากการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกัน ถัดมาเป็น Agent-KN แผนอ่างเก็บน้ำแควน้อยบำรุงแดน รับค่าการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ หรือ Agent-SK ส่วน Agent-PS จะพิจารณาสถานะท้ายน้ำที่สถานีตรวจวัดน้ำท่า C.13

กระบวนการตัดสินใจของ Agent ใช้เทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning, RL) (Bouchart & Chkam, (1998), Alibabaei et al., 2022) กล่าวคือ Agent จะ Action (การตัดสินใจระบายน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำ) โดยอาศัยการลองผิดลองถูก ซึ่งในการ Action แต่ละรอบ เรียกว่า Episode ใน 1 Episode มีจำนวน Time Step เป็นรายวัน ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการตัดสินใจในแต่ละรอบ Agent จะเลือกตัดสินใจ Action ทางใดทางหนึ่ง จะพิจารณาจากค่า Q-Value ที่มีค่ามากที่สุด โดยการตัดสินใจในแต่ละครั้งของ Agent จะถูกเก็บบันทึกพฤติกรรมไว้ในโครงสร้าง ANN (Artificial Neural Network) รูปที่ 3-8 แสดงกระบวนการตัดสินใจของ RL โดยเทคนิค Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) (González-Briones et al., 2019) มีขั้นตอนการตัดสินใจโดยใช้ Actor-Critic ซึ่งเป็นเทคนิคผสมกันระหว่าง Value-Based (หรือ Q-value) และ Policy-Based (Policy Gradient) โดยที่ Value-Based จะอาศัยการจดจำ Q-Value ไว้ใน Artificial Neural Network (ANN) หรือใน Table และเลือกทำ Action ที่มีค่า Q-Value มากที่สุด ส่วน Policy-Based จะอาศัยการปรับค่า Gradient ใน ANN

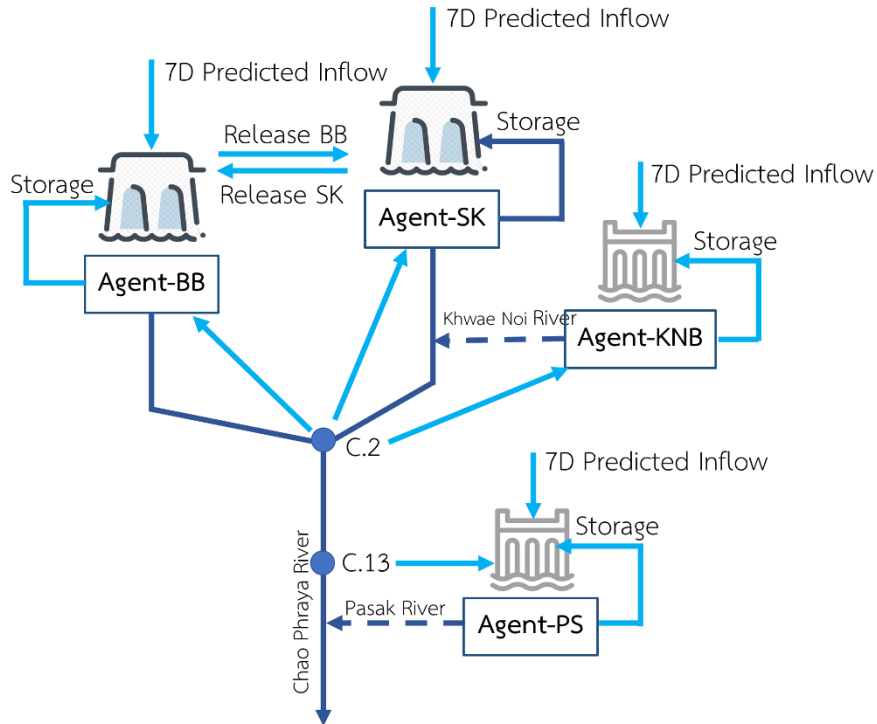
ใน Reinforcement Learning (RL) ได้นำเทคนิค Actor-Critic มาใช้ โดยที่ Actor เป็นส่วนของ Policy-Based ส่วน Critic เป็น Value-Based กระบวนการเริ่มจาก Actor (รูปที่ 3-9) รับค่า State เข้ามาและส่ง Action บางอย่างไปยัง Environment จากนั้น Environment ส่งค่า Reward และ State ไปยัง Critic (รูปที่ 3-9) เพื่อปรับปรุงค่า Q-Value ถัดมา Critic ส่งค่า Q-Value ต่อไปยัง Actor เพื่อทำการปรับค่า Gradient ทั้งนี้ Critic เปรียบคล้ายขั้นตอนแนะนำ Actor ว่าทำ Action ไหนแล้วได้ค่า Q-Value มากสุด กระบวนการคำนวณของ DDPG ดังแสดงในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 กระบวนการคำนวณใน DDPG

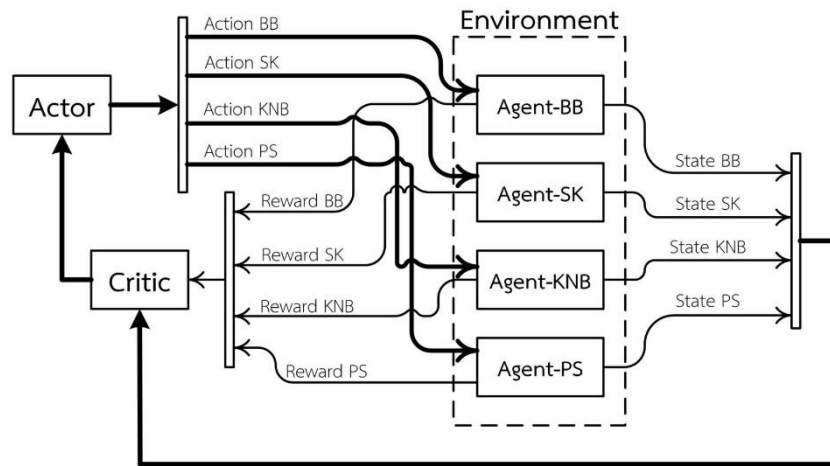
DDPG Algorithm
(1) สุ่มค่าน้ำหนัก θ^Q และ θ^μ ใน Critic Network $Q(S, A \theta^Q)$ และ Actor $\mu(S \theta^\mu)$
(2) กำหนดค่าเริ่มต้นของ Target Network Q' และ μ' ด้วยค่าน้ำหนักที่สุ่มได้ $\theta^{Q'} \leftarrow \theta^Q$ และ $\theta^{\mu'} \leftarrow \theta^\mu$
(3) สุ่มค่า Noise (N) ในกระบวนการ Exploration

- (4) เริ่ม Episode ที่ 1
- (5) รับค่าเริ่มต้นของ State (s_1)
- (6) เลือก Action $a_t = \mu(s_t | \theta^\mu) + N_t$
- (7) คำนวณ a_t และ Reward (r_t) และ ค่า State (s_1)
- (8) เก็บค่า (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) ไว้ในหน่วยความจำ R
- (9) สุ่มค่า (s_i, a_i, r_i, s_{i+1}) จากหน่วยความจำ R ตามขนาดของ Batch Size (64 Bit)
- (10) กำหนด $y_i = r_i + \gamma Q'(s_{i+1}, \mu'(s_{i+1} | \theta^{\mu'}) | \theta^{Q'})$
- (11) ปรับค่าความคลาดเคลื่อนใน Critic โดยค่า Loss Function $L = \frac{1}{N} \sum_i (y_i - Q(s_i, a_i | \theta^Q))^2$
- (12) ปรับค่า Policy Gradient ใน Actor ดังสมการ
- $$\nabla_{\theta^\mu} J \approx \frac{1}{N} \sum_i \nabla_a Q(s, a | \theta^Q) \Big|_{s=s_i, a=\mu(s_i)} \nabla_{\theta^\mu} \mu(s | \theta^\mu) \Big|_{s_i}$$
- (13) ปรับค่า Target Network
- $$\theta^{Q'} \leftarrow \tau \theta^{Q'} + (1-\tau) \theta$$
- $$\theta^{\mu'} \leftarrow \tau \theta^{\mu'} + (1-\tau) \theta^{\mu'}$$

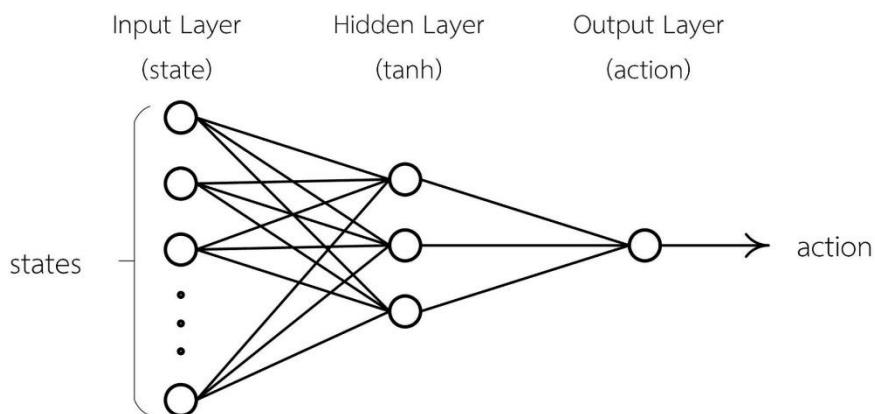
สัญลักษณ์	ความหมาย
θ	ค่าพารามิเตอร์ (เป็นค่า Weight ใน ANN)
$Q(s_t, a_t)$	ค่า Q-Value ใน Deep Q-Network (DQN)
$Q(s_{t+1}, a_{t+1})$	ค่าเป้าหมายของ Q-Value ในขั้นถัดไป
a_t	ค่า Action
a_{t+1}	ค่า Action เป้าหมายในขั้นถัดไป
τ	ค่าการเปลี่ยนน้ำหนัก ANN
N	ค่า Noise ในกระบวนการ Exploration
J	ค่า Score Function สำหรับปรับ Gradient
r	ค่า Reward
γ	ค่า Discount Factor
∇	การปรับค่า Gradient
α	ค่า Learning Rate



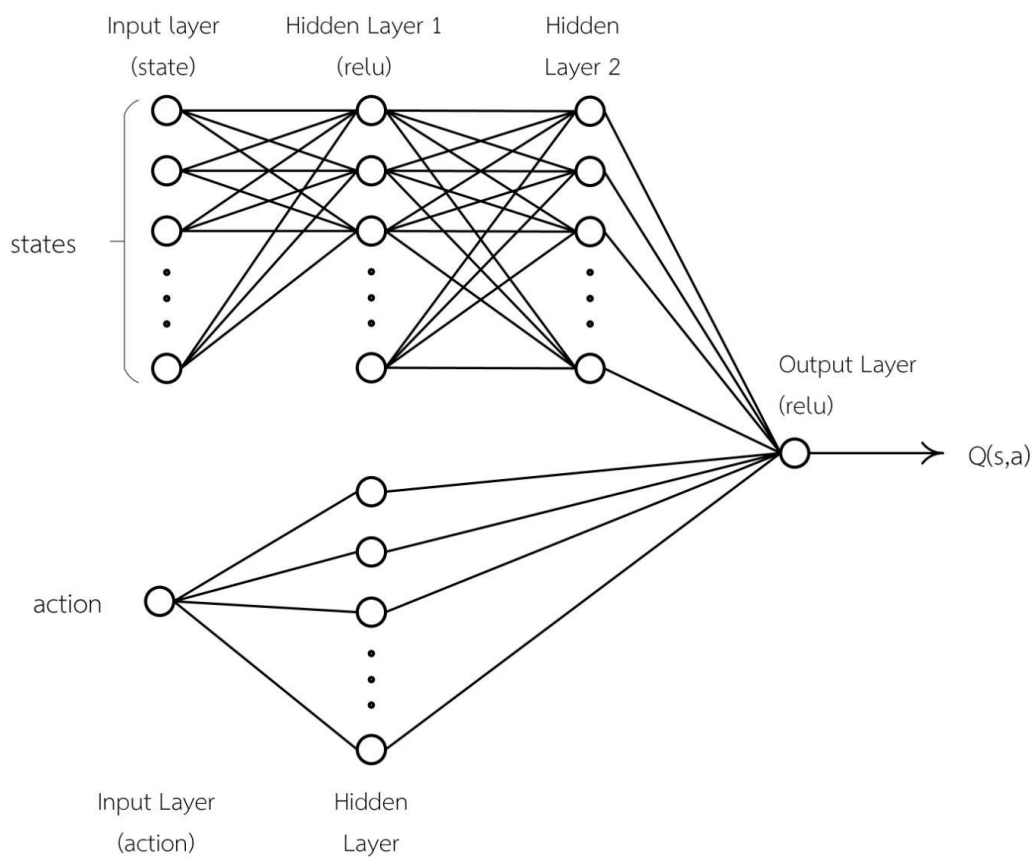
รูปที่ 3-7 โครงสร้างของแบบจำลองแบบ Multi-Agent System สำหรับระบบปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่างเก็บน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่



รูปที่ 3-8 กระบวนการตัดสินใจของวิธี Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG)



รูปที่ 3-9 โครงสร้างของ Actor Network ในระบบ DDPG

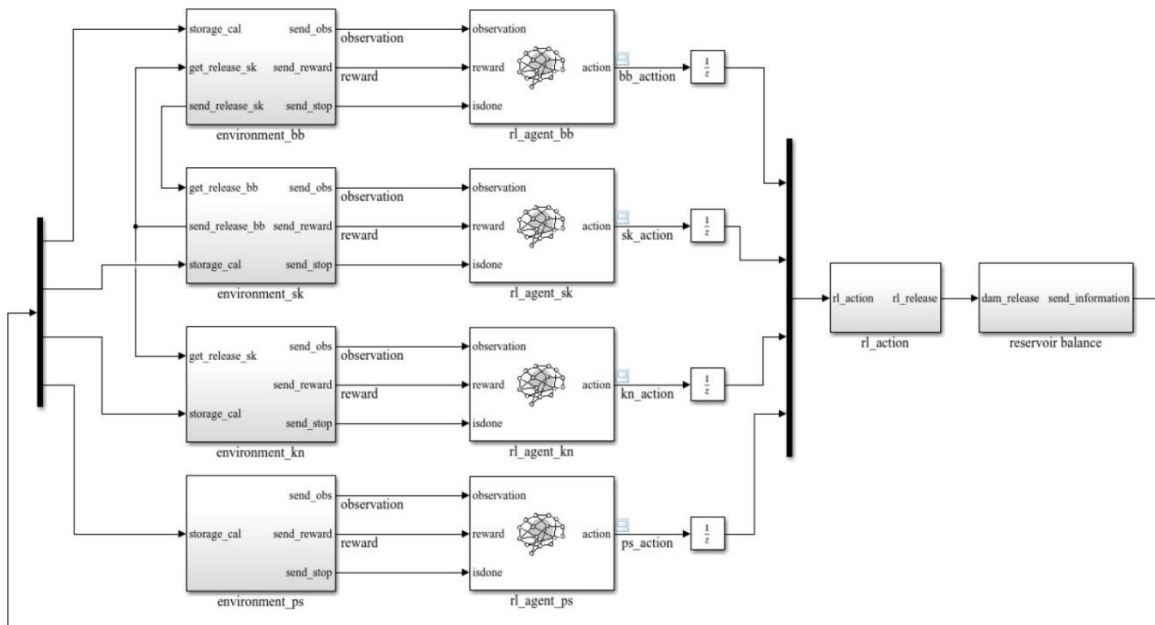


รูปที่ 3-10 โครงสร้างของ Critic Network ในระบบ DDPG

1.3 การพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

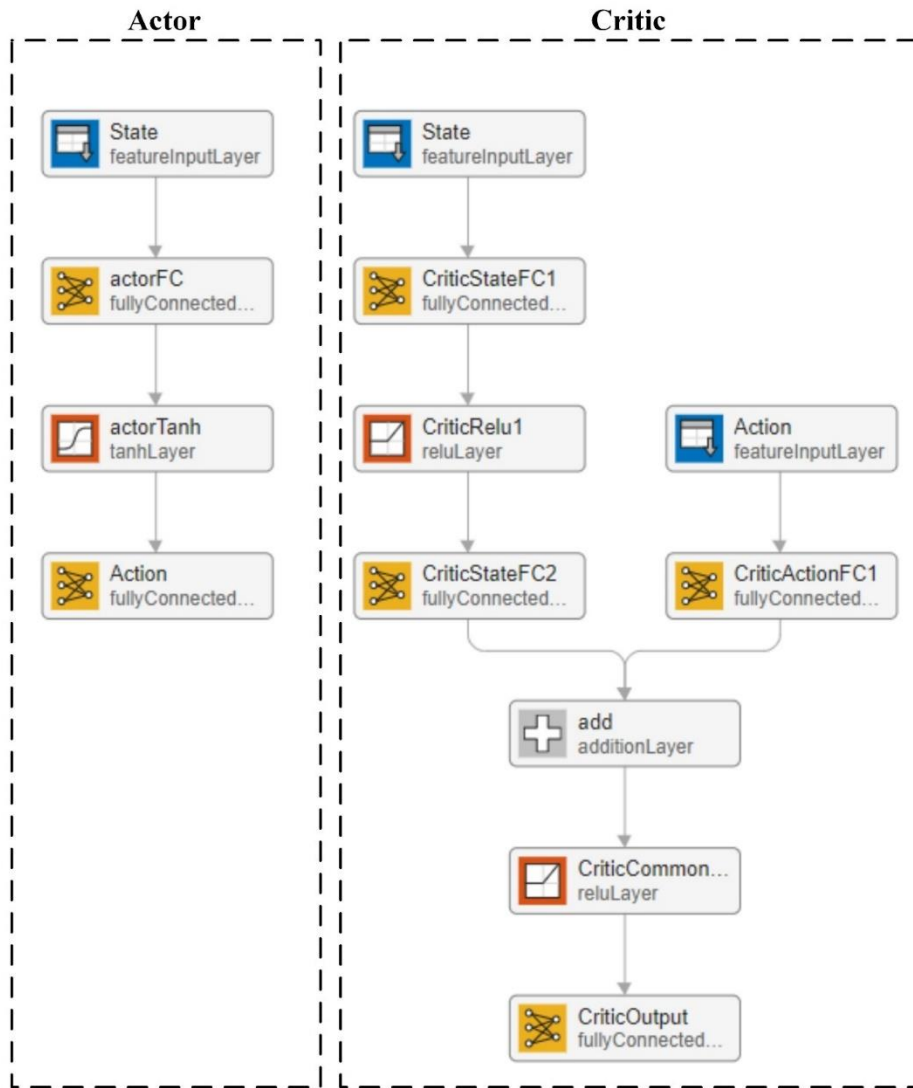
การพัฒนาแบบจำลองเลือกใช้โปรแกรม MATLAB รุ่น 2022a สำหรับเขียนชุดคำสั่ง (Source Code) โดยองค์ประกอบหลัก (Main Module) เขียนชุดคำสั่งเป็นแบบ Live Script (mlx) โดยเลือกชุดเครื่องมือเสริม (library) ประกอบด้วย (1) ชุดสร้าง Simulation คือ Simulink (2) ชุดสร้างกระบวนการตัดสินใจของ Agent

คือ Reinforcement Learning Toolbox และ (3) ชุดออกแบบโครงการการเรียนรู้เชิงลึกคือ Deep Learning Designer โดยในรูปที่ 3-11 แสดง Simulink สำหรับจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำ โดยชุดคำสั่งนี้จะถูก Agent เลือกขึ้นมาใช้ในขั้นตอนการ Learning



รูปที่ 3-11 แบบจำลอง Simulink ที่พัฒนาขึ้นสำหรับการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

ในรูปที่ 3-12 แสดงการออกแบบโครงสร้างของ Actor-Critic Network ใน DDPG โดยใช้ชุดเครื่องมือ Deep Learning Designer การออกแบบได้เลือกโครงสร้างของ Deep Learning ของ Actor (รูปที่ 3-9) และ Critic (รูปที่ 3-10) จากนั้นได้แปลชุดคำสั่ง (Complier) ให้อยู่ในรูปแบบของชุดคำสั่งแบบ mx สำหรับใช้ใน Reinforcement Learning ในบล็อก Simulink



รูปที่ 3-12 พัง Actor-Critic Network โดยชุดเครื่องมือ Deep Learning Designer

1.3.1 การกำหนดตัวแปรสถานะ

การกำหนดตัวแปรสถานะ (State) ของ Agent (s_{agent_t}) ของแต่ละอ่างเก็บน้ำประกอบด้วย

$$s_{agent-BB_t} = \{I_{t+7}, R_{agent-SK_t}, R_{C.2_t}, Es_t, dEs_t\} \text{ -----(3-11)}$$

$$s_{agent-SK_t} = \{I_{t+7}, R_{agent-BB_t}, R_{C.2_t}, Es_t, dEs_t\} \text{ -----(3-12)}$$

$$s_{agent-KNB_t} = \{I_{t+7}, R_{agent-SK_t}, R_{C.2_t}, Es_t, dEs_t\} \text{ -----(3-13)}$$

$$s_{agent-PS_t} = \{I_{t+7}, R_{C.13_t}, Es_t, dEs_t\} \text{ -----(3-14)}$$

3 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

เมื่อ I_{t+7} เป็นข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำล่งหน้า 7 วัน R_t เป็นข้อมูลปริมาณน้ำที่ระบายออกจากอ่างเก็บน้ำ $R_{C.2t}$ และ $R_{C.13t}$ เป็นข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่สถานีตรวจวัด C.2 และ C.13 ในขณะที่ Es_t เป็นข้อมูลปริมาณความคลาดเคลื่อนของปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมาย (Target Water Storage) กับข้อมูลปริมาณน้ำที่ได้จากการคำนวณ (Calculated Storage) และ dEs_t เป็นค่าความลาดชันของ Es_t

1.3.2 การกำหนดตัวแปรการระบายน้ำ

การระบายน้ำของแต่ละอ่างเก็บน้ำกำหนดให้เป็นการ Action ของ Agent โดยกำหนดโครงสร้างของ RL เป็นแบบ Continuous Model กล่าวคือ การ Action ของ Agent กำหนดเป็นปริมาณน้ำที่สามารถระบายได้ในช่วงต่ำสุด-สูงสุดของแต่ละอ่างเก็บน้ำดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$a_{\text{agent-BB}_t} = R_{\min} \leq R_{\text{agent-BB}_t} \leq R_{\max} \quad \text{-----}(3-15)$$

$$a_{\text{agent-SK}_t} = R_{\min} \leq R_{\text{agent-SK}_t} \leq R_{\max} \quad \text{-----}(3-16)$$

$$a_{\text{agent-KNB}_t} = R_{\min} \leq R_{\text{agent-KNB}_t} \leq R_{\max} \quad \text{-----}(3-17)$$

$$a_{\text{agent-PS}_t} = R_{\min} \leq R_{\text{agent-PS}_t} \leq R_{\max} \quad \text{-----}(3-18)$$

1.3.3 การกำหนดค่า Reward

ค่า Reward เป็นค่าการให้คะแนนแก่ Agent ในการตัดสินใจ Action ในแต่ละขั้นเวลา (Time Step) โดยกำหนดจากค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างปริมาณน้ำเป้าหมายกับปริมาณน้ำที่ได้จากการคำนวณ รวมถึงค่าความต้องการน้ำกับปริมาณน้ำที่ระบายดังสมการต่อไปนี้

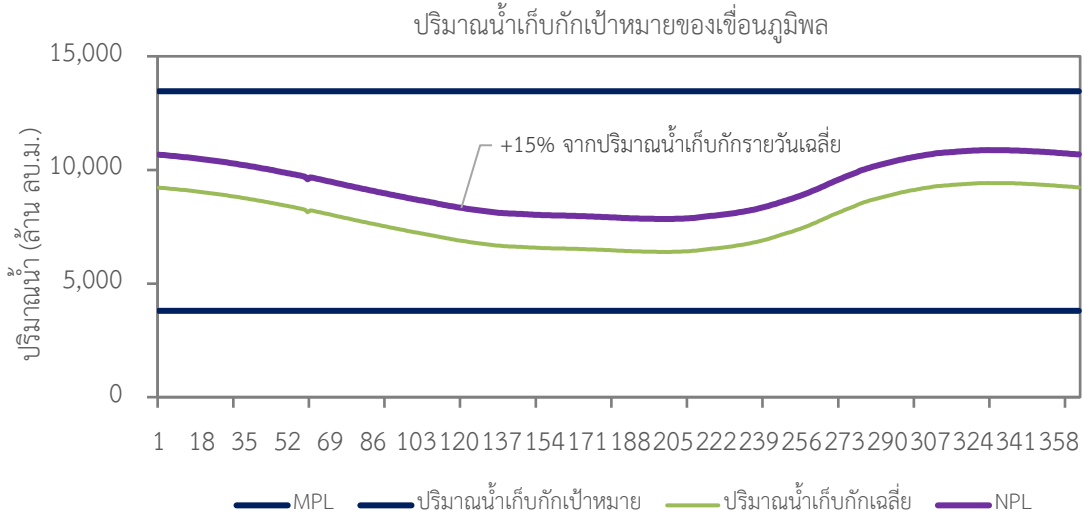
$$\left| s_t - s_{\text{target}_t} \right| > 0.2 * s_{\text{target}_t} \rightarrow r_t = -10 * \left| s_t - s_{\text{target}_t} \right| \quad \text{-----}(3-19)$$

$$\left| s_t - s_{\text{target}_t} \right| < 0.2 * s_{\text{target}_t} \rightarrow r_t = \frac{100}{\Delta Q_{C_t} + 0.01} \quad \text{-----}(3-20)$$

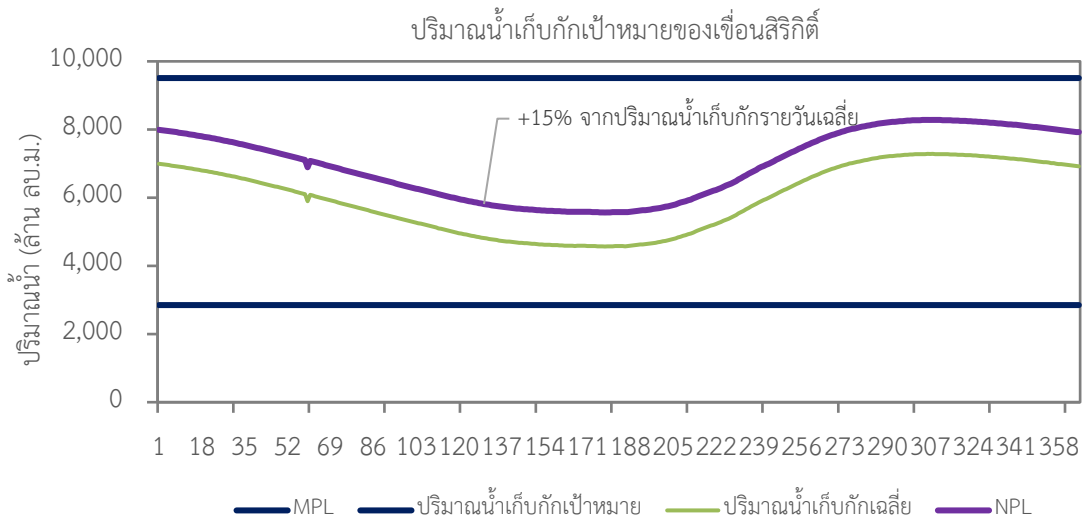
เมื่อ r_t เป็นค่า Reward s_t เป็นข้อมูลปริมาณน้ำเก็บกัก s_{target_t} เป็นข้อมูลปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมาย ΔQ_C เป็นข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างปริมาณน้ำที่ระบายกับปริมาณความต้องการน้ำ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์เส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมาย (Generated Target Storage) สำหรับใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง โดยกำหนดให้ปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายสูงขึ้น 15% จากค่าเฉลี่ยรายวันระยะยาวสำหรับเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และสูงขึ้น

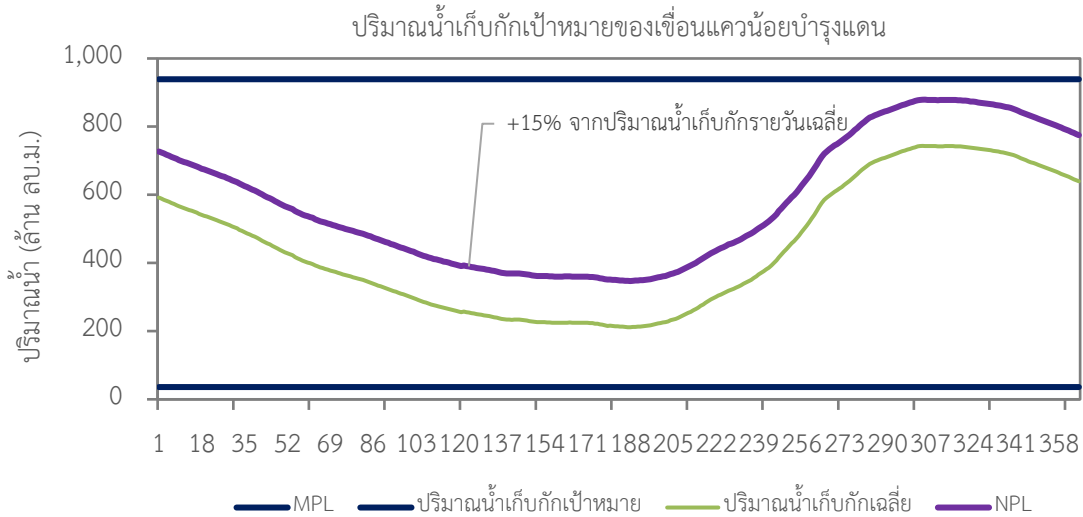
10% จากค่าเฉลี่ยรายวันระยะยาวสำหรับป่าสักชลสิทธิ์ตามเป้าหมายของงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3-13 ถึงรูปที่ 3-16



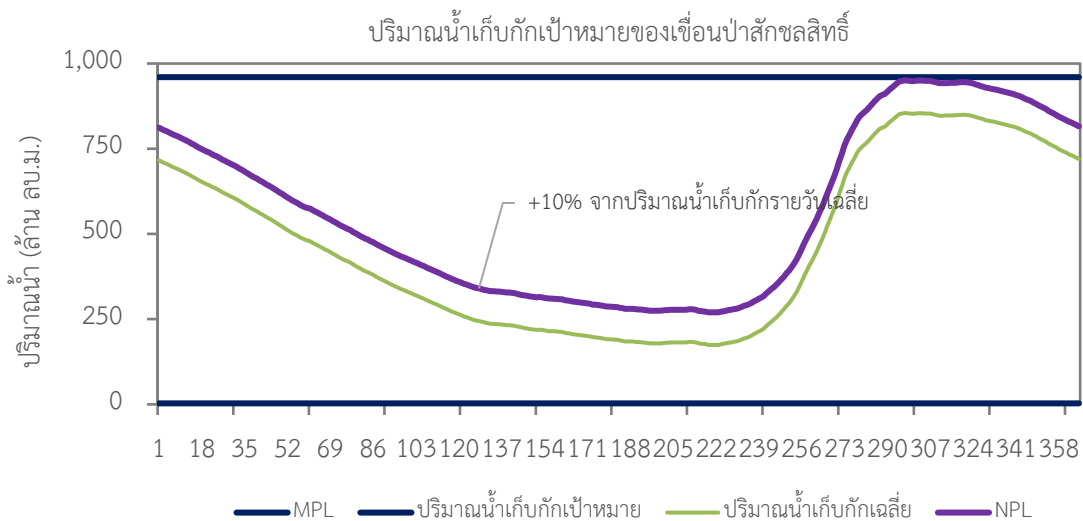
รูปที่ 3-13 เส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายของเขื่อนภูมิพล



รูปที่ 3-14 เส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายของเขื่อนสิริกิติ์



รูปที่ 3-15 เส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน



รูปที่ 3-16 เส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

1.4 การจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำ

ทำการจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่เพื่อประเมินประสิทธิผลของแบบจำลองในการเพิ่มศักยภาพน้ำต้นทุนระยะยาวระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564

2. แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Constraint Programming, CP and Machine Learning, ML)

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าปริมาณการระบายน้ำที่เหมาะสมในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่องโดยอาศัยภาษา Python ซึ่งเป็นภาษาโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในยุคปัจจุบันในการแก้โจทย์

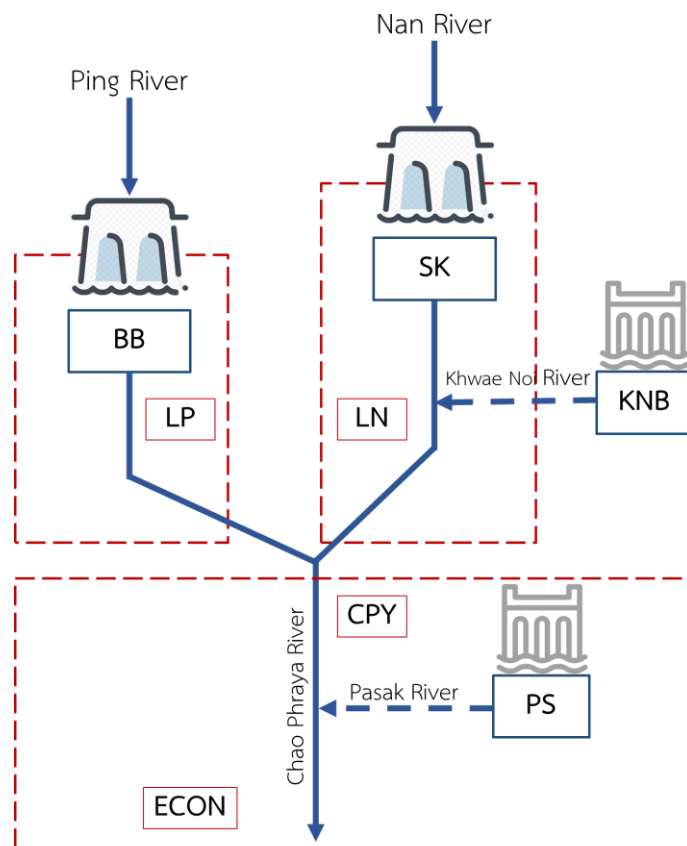
3 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข็มมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ปัญหาขนาดใหญ่ที่ค่อนข้างรวดเร็วและมีความทันสมัย สำหรับการกำหนดรูปแบบปัญหาและการแก้ปัญหา โจทย์จะกำหนดในลักษณะของการหาค่าที่ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) ของระบบอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่าง

2.1 แนวคิดและหลักการในการพัฒนาแบบจำลอง

แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดสำหรับการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำในลักษณะของปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ได้ถูกออกแบบและพัฒนาให้ครอบคลุมอ่างเก็บน้ำของ 4 เขื่อนหลักดังนี้ (1) เขื่อนภูมิพล (2) เขื่อนสิริกิติ์ (3) เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และ (4) เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ โดยในการพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดนั้น คณะผู้วิจัยจะแบ่งการกำหนดระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่เป็น 4 ระบบย่อยตามเขื่อนทั้ง 4 เขื่อน โดยคำนึงถึงความต้องการน้ำทุกกิจกรรมการใช้น้ำ ได้แก่ ความต้องการน้ำภาคการเกษตรกรรม ความต้องการน้ำนอกภาคเกษตรกรรม และความต้องการน้ำเพื่อการรักษาระบบนิเวศท้ายเขื่อน จากรูปที่ 3-17 แสดงองค์ประกอบต่อไปนี้ สีเหลี่ยมสีฟ้าแสดงถึงเขื่อน สีเหลี่ยมสีแดงแสดงถึงโหนดความต้องการน้ำโดยแบ่งตามตัวอักษรดังนี้

- (1) ระบบเขื่อนประกอบด้วย BB คือเขื่อนภูมิพล SK คือเขื่อนสิริกิติ์ KNB คือเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และ PS คือเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์
- (2) โหนดความต้องการน้ำกำหนดใน 2 ลักษณะคือ โหนดความต้องการน้ำในพื้นที่แยกอ่างเก็บน้ำ (Local Demand) ได้แก่ LP ครอบคลุมความต้องการน้ำในภาคเกษตรกรรมและนอกภาคการเกษตรกรรมท้ายเขื่อนภูมิพลในโซนส่งน้ำลุ่มน้ำปิงตอนล่าง (Lower Ping Water Distribution Zone) และ LN ครอบคลุมความต้องการน้ำในภาคเกษตรกรรมและนอกภาคการเกษตรกรรมท้ายเขื่อนสิริกิติ์ในโซนส่งน้ำลุ่มน้ำน่านตอนล่าง (Lower Nan Water Distribution Zone) และ โหนดความต้องการน้ำร่วมกัน (Joint Demand) ได้แก่ CPY ครอบคลุมความต้องการน้ำในภาคเกษตรกรรมและนอกภาคการเกษตรกรรมบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกและฝั่งตะวันออกในโซนส่งน้ำลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน (Chao Phraya-Tha Chin Water Distribution Zone) และ ECON เป็นความต้องการน้ำเพื่อการรักษาระบบนิเวศท้ายเขื่อนเจ้าพระยา



รูปที่ 3-17 การกำหนดระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่โดยไม่พิจารณาปัจจัยระยะเวลาในการเดินทางของน้ำ

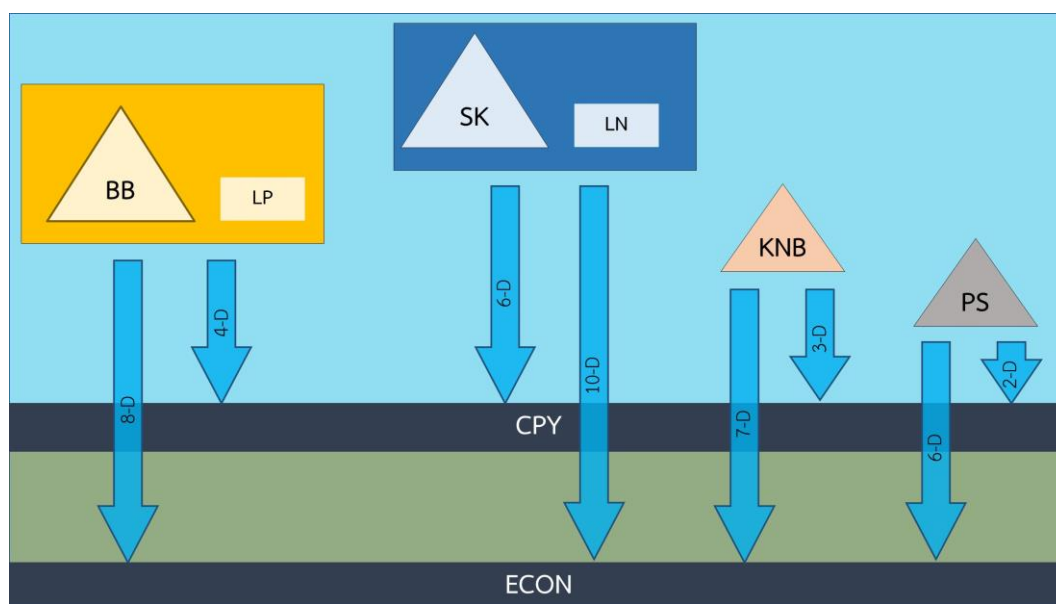
แนวคิดหลักในงานวิจัยนี้จะพิจารณาว่าความต้องการน้ำบริเวณไหนและการระบายน้ำจากเขื่อนไหน จะช่วยในการรับผิดชอบส่วนนั้น ๆ เพื่อนำไปสร้างเป็นสมการแบบข้อจำกัดโดยมีการกำหนดดังนี้

- (1) โหนดความต้องการน้ำ LP อยู่บริเวณท้ายเขื่อนภูมิพล ดังนั้น น้ำจากเขื่อนภูมิพล (BB) จะถูกจัดสรรไปให้กับโหนดความต้องการน้ำนี้
- (2) โหนดความต้องการน้ำ LN จะอยู่บริเวณเขื่อนสิริกิติ์ ดังนั้น น้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ (SK) จะถูกจัดสรรไปให้กับโหนดความต้องการน้ำนี้
- (3) โหนดความต้องการน้ำ CPY กำหนดให้เป็นความต้องการน้ำร่วมกันที่จะต้องได้รับการจัดสรรน้ำจากเขื่อนภูมิพล (BB) เขื่อนสิริกิติ์ (SK) เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน (KNB) และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ (PS) ซึ่งมีปริมาณความต้องการน้ำสูงสุด
- (4) โหนดความต้องการน้ำ ECON ด้านท้ายเขื่อนตลิ่งชันเจ้าพระยาได้กำหนดให้เป็นความต้องการน้ำร่วมกันที่จะต้องได้รับการจัดสรรน้ำจากเขื่อนภูมิพล (BB) เขื่อนสิริกิติ์ (SK) เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน (KNB) และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ (PS)

อย่างไรก็ดี เนื่องจากปริมาณน้ำที่ระบายจากเขื่อนหลักแต่ละเขื่อนมีระยะเวลาเดินทาง (Travel Time) ที่น้ำจะไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3-18 ด้วยเหตุนี้ งานวิจัย

นี้จึงได้นำปัจจัยของระยะเวลาของน้ำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดร่วมด้วย โดยในเบื้องต้นได้กำหนดให้ระยะเวลาในการเดินทางของน้ำขึ้นอยู่กับระยะทางจากที่ตำแหน่งที่ตั้งเขื่อนและโหนดความต้องการน้ำ และกำหนดให้มีหน่วยเป็นวันเนื่องจากเป็นหน่วยข้อมูลที่เล็กที่สุดดังนี้

- (1) โหนดความต้องการน้ำ CPY กำหนดให้ระยะเวลาในการเดินทางของน้ำจากเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เท่ากับ 4, 6, 3 และ 2 วัน ตามลำดับ
- (2) โหนดความต้องการน้ำ ECO กำหนดให้ระยะเวลาในการเดินทางของน้ำจากเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เท่ากับ 8, 10, 7 และ 6 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 3-18 การกำหนดระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่โดยพิจารณาปัจจัยระยะเวลาในการเดินทางของน้ำ

ด้วยเหตุนี้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด (Constraint Programming Model, CP) 2 รูปแบบคือ (1) แบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model) และ (2) แบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model) โดยกำหนดสมมติฐานให้ปริมาณการระบายน้ำทั้งหมดจากทั้ง 4 เขื่อนหลักต้องเพียงพอกับปริมาณความต้องการน้ำทุกโหนดความต้องการน้ำทุกพื้นที่ สำหรับการกำหนดรูปแบบของแบบจำลองมีรายละเอียดดังนี้

2.2 การกำหนดตัวแปร (Data Inputs & Decision Variables)

หลังจากทำการกำหนดกรอบแนวคิดและหลักการ ตลอดจนทำการวิเคราะห์ข้อจำกัดต่าง ๆ ของระบบ เพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดสำหรับกำหนดการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำใน

ลักษณะของปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างแล้ว งานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องออกเป็น 2 ประเภทคือ (1) ตัวแปรนำเข้า และ (2) ตัวแปรการตัดสินใจ โดยแยกรายละเอียดดังนี้

2.2.1 แบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model)

2.2.1.1 ตัวแปรนำเข้าของแบบจำลอง

ตัวแปรนำเข้าของแบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model) ประกอบด้วย

(1) D_t คือปริมาณความต้องการน้ำที่เวลา t ของแต่ละโหนดความต้องการน้ำตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

(2) SF_t คือปริมาณ Sideflow ที่เวลา t ที่พิจารณาจากสถานีตรวจวัดน้ำท่าหลักในระบบ โดยที่แต่ละตัวแปรเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นสำหรับอ่างเก็บน้ำทั้ง 4 อ่างในพื้นที่ศึกษา เช่น ตัวแปรปริมาณ Sideflow ประกอบด้วย SF_{tBB} , SF_{tSK} , SF_{tKNB} , และ SF_{tPS} ซึ่งกำหนดให้เป็นปริมาณ Sideflow ของสถานีตรวจวัดหลักด้านท้ายน้ำของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ เป็นต้น

2.2.1.2 ตัวแปรตัดสินใจของแบบจำลอง

ในส่วนของตัวแปรการตัดสินใจของแบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model) ประกอบด้วย

(1) ปริมาณการระบายน้ำที่เหมาะสมรายวันคาดการณ์ตามโหนดความต้องการน้ำต่าง ๆ (Optimum Daily Release, R_t) ยกตัวอย่างเช่น

– R_{tlpbb} คือปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ของเขื่อนภูมิพลเพื่อตอบสนองโหนดความต้องการน้ำ LP

– R_{tcpybb} คือปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ของเขื่อนภูมิพลเพื่อตอบสนองโหนดความต้องการน้ำ CPY

– R_{tcpysk} คือปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ของเขื่อนสิริกิติ์เพื่อตอบสนองโหนดความต้องการน้ำ CPY

(2) ค่าน้ำหนักในการจัดสรรน้ำให้เพียงพอกับความต้องการน้ำของแต่ละอ่างเก็บน้ำ (Weight, W) เพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) ในการกำหนดปริมาณการระบายน้ำที่เหมาะสมรายวันของแต่ละอ่างเก็บน้ำ

ผลลัพธ์ที่ได้ของตัวแปรการตัดสินใจนี้จะนำไปใช้ต่อในแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด เพื่อการหาปริมาณการระบายน้ำของแต่ละเขื่อนในแต่ละวัน (Release-Based Model) ต่อไปเพื่อหาปริมาณการระบายน้ำที่เหมาะสมรายวันของแต่ละอ่างเก็บน้ำ

2.2.2 แบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model)

2.2.2.1 ตัวแปรนำเข้าของแบบจำลอง

ตัวแปรนำเข้าของแบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model) ประกอบด้วย

- (1) S_t คือปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำที่เวลา t
- (2) I_t คือปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา t
- (3) E_t คือปริมาณน้ำที่สูญเสียจากอ่างเก็บน้ำในรูปของการระเหยที่เวลา t
- (4) S_{URC} คือปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำระดับน้ำควบคุมตอนบนที่เวลา t
- (5) H_t คือระดับความสูงของเฮตน้ำที่เวลา t
- (6) D_t คือปริมาณความต้องการน้ำที่เวลา t ของแต่ละโหนดความต้องการน้ำตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น
- (7) SF_t คือปริมาณ Sideflow ที่เวลา t ที่พิจารณาจากสถานีตรวจวัดน้ำท่าหลักในระบบ

โดยที่แต่ละตัวแปรเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นสำหรับอ่างเก็บน้ำทั้ง 4 อ่างในพื้นที่ศึกษา เช่น ตัวแปรของปริมาณเก็บกักในอ่างเก็บน้ำประกอบด้วย S_{tBB} , S_{tSK} , S_{tKNB} และ S_{tPS} ซึ่งกำหนดให้เป็นปริมาณเก็บกักในอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ เป็นต้น

2.2.2.2 ตัวแปรตัดสินใจของแบบจำลอง

ในส่วนของตัวแปรการตัดสินใจของแบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model) ประกอบด้วย

- (1) ปริมาณการระบายน้ำที่เหมาะสมรายวันของแต่ละอ่างเก็บน้ำ (Optimum Daily Release, R_t)
- (2) ปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำที่เวลา $t+1$ (Ending Water Storage, S_{t+1})
- (3) ค่าน้ำหนักในการจัดสรรน้ำให้เพียงพอกับความต้องการน้ำของแต่ละอ่างเก็บน้ำ (Weight, W) เพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) ในการกำหนดปริมาณการระบายน้ำที่เหมาะสมรายวันของแต่ละอ่างเก็บน้ำ

2.3 การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

2.3.1 แบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model)

สำหรับแบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model) ได้กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) จำนวน 1 ฟังก์ชันหลัก ดังนี้

- (1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการลดปริมาณการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำ (Minimization of Release): $\text{Min}F_5(X) = \text{Min}(R_t)$ เมื่อ R_t เป็นค่าของปริมาณการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำที่เวลา t เพื่อใช้ในการปริมาณคาดการณ์ปริมาณการระบายน้ำเหมาะสมกับโหนดความต้องการในแต่ละพื้นที่

2.3.2 แบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model)

แบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model) ได้กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ประกอบด้วย 5 ฟังก์ชันหลัก ดังนี้

- (1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการตอบสนองความต้องการน้ำเพื่อกิจกรรมต่าง ๆ ทางด้านท้ายเขื่อนโดยลดปัญหาการขาดแคลนน้ำให้เหลือน้อยที่สุด (Minimization of Water Demand Deficit): $\text{Min}F_1(X) = \sum_{t=1}^N (D_{allt} - R_{allt})^2$ เมื่อ $F_1(X)$ เป็นฟังก์ชันผลรวมของผลต่างระหว่างความต้องการน้ำและค่าการปล่อยน้ำยกกำลังสอง (Sum of Squared Deviation of Releases from Downstream Water Demands) ของทุกอ่างเก็บน้ำ ตั้งแต่เวลา $t=1, \dots, t=N$
- (2) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้ได้สูงสุด (Maximization of Hydropower Generation): $\text{Max}F_2(X) = \sum_{t=1}^N e \cdot \gamma \cdot R_t \cdot H_t \cdot \Delta t$ เมื่อ $F_2(X)$ เป็นฟังก์ชันผลรวมของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปีเฉลี่ย (Annual Energy Production) ของทุกอ่างเก็บน้ำตั้งแต่เวลา $t=1, \dots, t=N$
- (3) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำด้วยแนวคิดการลดการปล่อยน้ำส่วนเกินในช่วงน้ำหลาก (Minimization of Surplus Release during Refilled Period): $\text{Min}F_3(X) = \sum_{t=1}^N \text{abs}(S_t - S_{URC})$ เมื่อ $F_3(X)$ เป็นฟังก์ชันผลรวมของผลต่างสัมบูรณ์ระหว่างปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาใด ๆ กับปริมาณน้ำเก็บกักที่เส้นโค้งระดับควบคุมน้ำตอนบน (Upper Rule Curve) ของทุกอ่างเก็บน้ำตั้งแต่เวลา $t=1, \dots, t=N$

- (4) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำในอนาคต (Maximization of Next Day Storage): $\text{Max}F_4(x) = \text{Max}(S_{t+1})$ เมื่อ S_{t+1} เป็นค่าของปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำที่เวลา $t+1$
- (5) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการลดปริมาณการปล่อยน้ำจากอ่างเก็บน้ำ (Minimization of Release): $\text{Min}F_5(x) = \text{Min}(R_t)$ เมื่อ R_t เป็นค่าของปริมาณการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำที่เวลา t

2.4 การพัฒนาสมการข้อจำกัด (Constraint)

รายละเอียดของการกำหนดสมการข้อจำกัดของแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดสำหรับการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำในลักษณะของปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่มีดังต่อไปนี้

2.4.1 แบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model)

- (1) สมการข้อจำกัดของสมดุลอ่างเก็บน้ำ: $S_{t+1} = S_t + I_t - E_t - R_t$
- (2) สมการข้อจำกัดของปริมาณน้ำเก็บกัก: $S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max}$
โดยที่ S_{\min} คือปริมาณน้ำเก็บกักต่ำสุดของแต่ละอ่างเก็บน้ำ และ S_{\max} คือปริมาณน้ำเก็บกักสูงสุดของแต่ละอ่างเก็บน้ำ สำหรับการกำหนดค่า S_{\min} และ S_{\max} นั้นจะกำหนดตามข้อมูลเขื่อนที่ระบุในคู่มือการระบายน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยและกรมชลประทานในหน่วยล้านลูกบาศก์เมตร ดังนี้
- (2.1) BB: $S_{\min} = 3,800$ และ $S_{\max} = 13,462$ ล้านลูกบาศก์เมตร
- (2.2) SK: $S_{\min} = 2,850$ และ $S_{\max} = 9,510$ ล้านลูกบาศก์เมตร
- (2.3) KNB: $S_{\min} = 36$ และ $S_{\max} = 939$ ล้านลูกบาศก์เมตร
- (2.4) PS: $S_{\min} = 3$ และ $S_{\max} = 960$ ล้านลูกบาศก์เมตร
- (3) สมการข้อจำกัดของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้: $G_{\min} \leq G_t \leq G_{\max}$
โดยที่ G_{\min} คือพลังงานไฟฟ้าต่ำสุดที่สามารถผลิตได้ G_{\max} คือพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถผลิตได้ และ G_t คือพลังงานผลิตไฟฟ้าที่เวลา t ใด ๆ ของแต่ละอ่างเก็บน้ำซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ $G_t = \frac{\left(\left(\frac{e}{100} \right) * \gamma * \left(\frac{R_t * 10^6}{24 * 60 * 60} \right) * H_t * \Delta t \right)}{10^3}$ สำหรับค่าประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำสุทธิ (Overall Efficiency) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 91.27% และ γ มีค่าเท่ากับ 9.81 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร
- (4) สมการข้อจำกัดอื่น ๆ: $S_{t+1}, S_t, I_t, E_t, R_t \geq 0$

(5) สมการข้อจำกัดของการระบายน้ำให้สอดคล้องกับโหนดความต้องการน้ำ: การกำหนดสมการข้อจำกัดนี้ได้แนวคิดมาจากรูปที่ 3-10 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้แยกระบบการจัดสรรน้ำจากเขื่อนหลักเป็น 4 ระบบย่อยตามโหนดความต้องการน้ำ รวมทั้งยังได้กำหนดตัวแปรสำหรับโหนดความต้องการน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เพิ่มเติมไว้ด้วย ดังนี้

(5.1) ตัวแปรนำเข้าของความต้องการน้ำ (Water Demand)

(5.1.1) D_{tbb} กำหนดให้เป็นปริมาณความต้องการน้ำที่เวลา t ที่โหนดความต้องการน้ำ LP บริเวณท้ายเขื่อนภูมิพลซึ่งจะต้องได้รับการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลโดยตรง โดยปริมาณความต้องการน้ำนี้ครอบคลุมปริมาณความต้องการน้ำในภาคเกษตรกรรมครอบคลุม 3 โครงการชลประทานหลักได้แก่ โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาท่อทองแดง โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาวังบัว และโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาวังยางและหนองขวัญ รวมทั้งปริมาณความต้องการน้ำนอกภาคเกษตรกรรมท้ายเขื่อนภูมิพล

(5.1.2) D_{tsk} กำหนดให้เป็นปริมาณความต้องการน้ำที่เวลา t ที่โหนดความต้องการน้ำ LN บริเวณท้ายเขื่อนสิริกิติ์ซึ่งจะต้องได้รับการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์โดยตรง โดยปริมาณความต้องการน้ำนี้ครอบคลุมปริมาณความต้องการน้ำในภาคเกษตรกรรมครอบคลุม 5 โครงการชลประทานหลักได้แก่ โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาตงเศรษฐี โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษานเรศวร โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพลายชุมพล โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาท่าบัว และโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษายม-น่าน รวมทั้งปริมาณความต้องการน้ำนอกภาคเกษตรกรรมท้ายเขื่อนสิริกิติ์

(5.1.3) D_{tcpy} กำหนดให้เป็นปริมาณความต้องการน้ำที่เวลา t ที่โหนดความต้องการน้ำร่วมกัน CPY ที่จะต้องได้รับการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน โดยปริมาณความต้องการน้ำนี้ครอบคลุมปริมาณความต้องการน้ำในภาคเกษตรกรรมครอบคลุม 26 โครงการชลประทานหลักในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกและฝั่งตะวันออก รวมทั้งปริมาณความต้องการน้ำนอกภาคเกษตรกรรมในพื้นที่

(5.1.4) D_{tknb} กำหนดให้เป็นปริมาณความต้องการน้ำที่เวลา t ทุกกิจกรรมการใช้น้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

(5.1.5) D_{tps} กำหนดให้เป็นปริมาณความต้องการน้ำที่เวลา t ทุกกิจกรรมการใช้น้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

(5.2) ตัวแปรตัดสินใจของค่าน้ำหนักคาดการณ์ในการระบายน้ำให้เพียงพอกับความ

ต้องการน้ำของแต่ละอ่างเก็บน้ำ (Weight, W)

- (5.2.1) W_{tawsbb} กำหนดให้เป็นค่าน้ำหนักคาดการณ์ในการระบายน้ำที่เวลา t จากเขื่อนภูมิพลให้เพียงพอกับปริมาณความต้องการน้ำ D_{tcpy}
- (5.2.2) W_{tawssk} กำหนดให้เป็นค่าน้ำหนักคาดการณ์ในการระบายน้ำที่เวลา t จากเขื่อนสิริกิติ์ให้เพียงพอกับปริมาณความต้องการน้ำ D_{tcpy}
- (5.2.3) W_{tawsknb} กำหนดให้เป็นค่าน้ำหนักคาดการณ์ในการระบายน้ำที่เวลา t จากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนให้เพียงพอกับปริมาณความต้องการน้ำ D_{tcpy}
- (5.2.4) W_{tawsp กำหนดให้เป็นค่าน้ำหนักคาดการณ์ในการระบายน้ำที่เวลา t จากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ให้เพียงพอกับปริมาณความต้องการน้ำ D_{tcpy}
- (5.2.5) W_{tecobb} กำหนดให้เป็นค่าน้ำหนักคาดการณ์ในการระบายน้ำที่เวลา t จากเขื่อนภูมิพลให้เพียงพอกับปริมาณความต้องการน้ำ D_{teco}
- (5.2.6) W_{tecosk} กำหนดให้เป็นค่าน้ำหนักคาดการณ์ในการระบายน้ำที่เวลา t จากเขื่อนสิริกิติ์ให้เพียงพอกับปริมาณความต้องการน้ำ D_{teco}
- (5.2.7) W_{tecoknb} กำหนดให้เป็นค่าน้ำหนักคาดการณ์ในการระบายน้ำที่เวลา t จากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนให้เพียงพอกับปริมาณความต้องการน้ำ D_{teco}
- (5.2.8) W_{tecops} กำหนดให้เป็นค่าน้ำหนักคาดการณ์ในการระบายน้ำที่เวลา t จากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ให้เพียงพอกับปริมาณความต้องการน้ำ D_{teco}
- (5.3) ตัวแปรตัดสินใจของการหาปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ (Water Release) ของเขื่อนตามปัจจัยความต้องการน้ำ
- (5.3.1) R_{tlpbb} กำหนดให้เป็นปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ที่เวลา t จากเขื่อนภูมิพลเพื่อสนองความต้องการน้ำ LP
- (5.3.2) R_{tcpybb} กำหนดให้เป็นปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ที่เวลา t จากเขื่อนภูมิพลเพื่อสนองความต้องการน้ำ CPY
- (5.3.3) R_{tecobb} กำหนดให้เป็นปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ที่เวลา t จากเขื่อนภูมิพลเพื่อสนองความต้องการน้ำ ECO
- (5.3.4) R_{tlnsk} กำหนดให้เป็นปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ที่เวลา t จากเขื่อนสิริกิติ์เพื่อสนองความต้องการน้ำ LN
- (5.3.5) R_{tcpy กำหนดให้เป็นปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ที่เวลา t จากเขื่อนสิริกิติ์เพื่อสนองความต้องการน้ำ CPY
- (5.3.6) R_{tecosk} กำหนดให้เป็นปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ที่เวลา t จากเขื่อนสิริกิติ์เพื่อสนองความต้องการน้ำ ECO
- (5.3.7) R_{tknb} กำหนดให้เป็นปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ที่เวลา t จากเขื่อนแควน้อย

บำรุงแดนเพื่อโหนดความต้องการน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

(5.3.8) $R_{tcpyknb}$ กำหนดให้เป็นปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ที่เวลา t จากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเพื่อโหนดความต้องการน้ำ CPY

(5.3.9) $R_{tecoknb}$ กำหนดให้เป็นปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ที่เวลา t จากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเพื่อโหนดความต้องการน้ำ ECO

(5.3.10) R_{tpts} กำหนดให้เป็นปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ที่เวลา t จากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เพื่อโหนดความต้องการน้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

(5.3.11) $R_{tcpypys}$ กำหนดให้เป็นปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ที่เวลา t จากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เพื่อโหนดความต้องการน้ำ CPY

(5.3.12) R_{tecops} กำหนดให้เป็นปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ที่เวลา t จากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เพื่อโหนดความต้องการน้ำ ECO

(5.4) หลังจากที่ได้กำหนดตัวแปรข้างต้นแล้ว งานวิจัยนี้ได้กำหนดสมการข้อจำกัดของการระบายน้ำให้เหมาะสมกับความต้องการน้ำ โดยนำปริมาณ Sideflow บริเวณท้ายเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนมาร่วมพิจารณา 20% โดยพิจารณาจากข้อมูลปริมาณน้ำท่าของสถานีตรวจวัดหลักจำนวน 3 สถานีได้แก่ สถานี W.4A ท้ายเขื่อนภูมิพล และสถานี Y.17 และ N.22A ท้ายเขื่อนสิริกิติ์เพื่อปรับลดปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อนลงดังนี้

(5.4.1) สมการข้อจำกัดในการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลเพื่อโหนดความต้องการน้ำ LP:

$$R_{tlpbb} \geq D_{tbb} - (0.2 * SF_{tbb})$$

(5.4.2) สมการข้อจำกัดในการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลเพื่อโหนดความต้องการน้ำ CPY:

$$R_{tcpybb} \geq W_{tawsbb} * D_{tcpy}$$

(5.4.3) สมการข้อจำกัดในการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลเพื่อโหนดความต้องการน้ำ ECO:

$$R_{tecobb} \geq W_{tecobb} * D_{teco}$$

(5.4.4) สมการข้อจำกัดในการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์เพื่อโหนดความต้องการน้ำ LP:

$$R_{tlnsk} \geq D_{tsk} - (0.2 * SF_{tsk})$$

(5.4.5) สมการข้อจำกัดในการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์เพื่อโหนดความต้องการน้ำ CPY:

$$R_{tcpysk} \geq W_{tawssk} * D_{tcpy}$$

(5.4.6) สมการข้อจำกัดในการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์เพื่อโหนดความต้องการน้ำ ECO:

$$R_{tecorsk} \geq W_{tecorsk} * D_{teco}$$

(5.4.7) สมการข้อจำกัดในการระบายน้ำจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเพื่อโหนดความต้องการน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน:

$$R_{tknb} \geq D_{tknb}$$

(5.4.8) สมการข้อจำกัดในการระบายน้ำจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเพื่อโหนดความต้องการน้ำ CPY:

$$R_{tcpynb} \geq W_{tawsknb} * D_{tcpy}$$

(5.4.9) สมการข้อจำกัดในการระบายน้ำจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเพื่อโหนดความต้องการน้ำ ECO:

$$R_{tecoknb} \geq W_{tecoknb} * D_{teco}$$

(5.4.10) สมการข้อจำกัดในการระบายน้ำจากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เพื่อโหนดความต้องการน้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์:

$$R_{tps} \geq D_{tps}$$

(5.4.11) สมการข้อจำกัดในการระบายน้ำจากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เพื่อโหนดความต้องการน้ำ CPY:

$$R_{tcpyps} \geq W_{tawspys} * D_{tcpy}$$

(5.4.12) สมการข้อจำกัดในการระบายน้ำจากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เพื่อโหนดความต้องการน้ำ ECO:

$$R_{tecops} \geq W_{tecops} * D_{teco}$$

(5.4.13) สมการข้อจำกัดเพื่อควบคุมค่าน้ำหนักในการระบายน้ำให้เพียงพอกับความ ต้องการน้ำของทุกอ่างเก็บน้ำ:

$$W_{tawsbb} + W_{tawssk} + W_{tawsknb} + W_{tawspys} = 1$$

$$W_{tecobb} + W_{teconsk} + W_{tecoknb} + W_{tecops} = 1$$

จากสมการข้างต้น งานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องหาค่าน้ำหนักคาดการณ์ในการระบายน้ำให้เพียงพอกับความ ต้องการน้ำของแต่ละอ่างเก็บน้ำ W เนื่องด้วยเงื่อนไขที่ว่าแต่ละเขื่อนต้องระบายน้ำล่วงหน้าเพื่อให้ น้ำที่ ระบายจากเขื่อนเดินทางไปถึงโหนดความต้องการน้ำ CPY และโหนดความต้องการน้ำที่ Eco ซึ่งน้ำที่ระบาย จากแต่ละเขื่อนมีระยะเวลาเดินทางของน้ำเดินทางแตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้ คณะผู้วิจัยได้พัฒนารูปแบบการหาค่า น้ำหนักคาดการณ์ในการรับผิดชอบความต้องการน้ำของแต่ละอ่างเก็บน้ำ W มาทั้งหมด 2 รูปแบบดังนี้

(1) รูปแบบที่ 1

รูปแบบที่ 1 กำหนดให้การคำนวณค่าน้ำหนักคาดการณ์ในการระบายน้ำให้เพียงพอกับความ ต้องการน้ำของแต่ละอ่างเก็บน้ำขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ I_t ของแต่ละเขื่อนซึ่งมีระยะเวลา ในการเดินทางของน้ำจากเขื่อนถึงโหนดความต้องการน้ำที่แตกต่างกันโดยใช้สมการต่อไป นี้

$$I_{cpy} = I_{t-4bb} + I_{t-6sk} + I_{t-3knb} + I_{t-2ps}$$

โดยที่ I_{cpy} คือปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำทั้งหมดของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแคว น้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ที่ต้องระบายน้ำให้เพียงพอกับโหนดความต้องการน้ำ

CPY จากนั้นกำหนดค่าน้ำหนักคาดการณ์ในการระบายน้ำให้เพียงพอกับโหนดความต้องการน้ำ CPY ของแต่ละอ่างเก็บน้ำโดยคิดเป็น $W_{\text{taws}_x} = \frac{I_x}{I_{\text{cpy}}}$ โดยที่ I_x คือปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของแต่ละอ่างเก็บน้ำในแต่ละเวลา

- $I_{\text{eco}} = I_{\text{t-8bb}} + I_{\text{t-10sk}} + I_{\text{t-7knb}} + I_{\text{t-6ps}}$
โดยที่ I_{eco} คือปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำทั้งหมดของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ที่ต้องระบายน้ำให้เพียงพอโหนดความต้องการน้ำ ECO จากนั้นกำหนดค่าน้ำหนักคาดการณ์ในการระบายน้ำให้เพียงพอกับโหนดความต้องการน้ำ ECO ของแต่ละอ่างเก็บน้ำโดยคิดเป็น $W_{\text{teco}_x} = \frac{I_x}{I_{\text{eco}}}$ โดยที่ I_x คือปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของแต่ละอ่างเก็บน้ำในแต่ละเวลา

(2) รูปแบบที่ 2

รูปแบบที่ 2 ได้นำปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการสมดุลน้ำในอ่างเก็บน้ำมาใช้ในการหาค่าน้ำหนักคาดการณ์ในการระบายน้ำให้เพียงพอกับความต้องการน้ำของแต่ละอ่างเก็บน้ำ

- โดยชั้นแรกงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณหาค่าผลรวมของปริมาณน้ำเก็บกักในระบบอ่างเก็บน้ำที่จะต้องระบายน้ำให้เพียงพอกับโหนดความต้องการน้ำ CPY ดังนี้คือ

$$S_{\text{cpy}} = S_{\text{cpybb}} + S_{\text{cpysk}} + S_{\text{cpyknb}} + S_{\text{cypys}}$$

โดยที่ปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำของแต่ละเขื่อนนั้นจะคำนวณด้วยสมการสมดุลน้ำในอ่างเก็บน้ำที่เวลาต่าง ๆ ดังนี้คือ

$$S_{\text{cpybb}} = S_{\text{t-1cpybb}} + (I_{\text{t-4bb}} - E_{\text{t-4bb}} - (R_{\text{t-1cpybb}} + (D_{\text{t-4bb}} - (0.2 * SF_{\text{t-4bb}}))))$$

$$S_{\text{cpysk}} = S_{\text{t-1cpysk}} + (I_{\text{t-6sk}} - E_{\text{t-6sk}} - (R_{\text{t-1cpysk}} + (D_{\text{t-6sk}} - (0.2 * SF_{\text{t-6sk}}))))$$

$$S_{\text{cpyknb}} = S_{\text{t-1cpyknb}} + (I_{\text{t-3knb}} - E_{\text{t-3knb}} - (R_{\text{t-1cpyknb}} + (D_{\text{t-3knb}} - (0.2 * SF_{\text{t-3knb}}))))$$

$$S_{\text{cypys}} = S_{\text{t-1cypys}} + (I_{\text{t-2ps}} - E_{\text{t-2ps}} - (R_{\text{t-1cypys}} + (D_{\text{t-2ps}} - (0.2 * SF_{\text{t-2ps}}))))$$

โดยที่ S_{cpybb} คือปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการจำลองเพื่อโหนดความต้องการน้ำ CPY ของเขื่อนภูมิพล S_{cpysk} คือปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการจำลองเพื่อโหนดความต้องการน้ำ CPY ของเขื่อนสิริกิติ์ S_{cpyknb} คือปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการจำลองเพื่อโหนดความต้องการน้ำ CPY ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และ S_{cypys} คือปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการจำลองเพื่อโหนดความต้องการน้ำ CPY ของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ในที่นี้ ค่าเริ่มต้นของปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการจำลองของเขื่อนต่าง ๆ คำนวณจากปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการจำลองตามระยะเวลาที่น้ำเดินทางมาโหนดความต้องการน้ำ CPY จากนั้นค่าน้ำหนักคาดการณ์ในการระบายน้ำให้

เพียงพอกับความต้องการน้ำ CPY ของแต่ละอ่างเก็บน้ำคิดเป็น $W_{taws_x} = \frac{S_x}{S_{cpy}}$ โดยที่ S_x คือ ปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการจำลองของแต่ละอ่างเก็บน้ำในแต่ละเวลาตาม สมการข้างต้น อย่างไรก็ตาม ถ้าค่า $(R_x + (D_x - (0.2 * SF_x)) < R_{min}$ กำหนดให้ $S_x = I_x - E_x - R_{min}$

- งานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณหาค่าผลรวมของปริมาณน้ำเก็บกักในระบบอ่างเก็บน้ำที่จะต้อง ระบายน้ำให้เพียงพอกับโหนดความต้องการน้ำ ECO ดังนี้คือ

$$S_{eco} = S_{ecobb} + S_{ecosk} + S_{ecoknb} + S_{ecops}$$

โดยที่ปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำของแต่ละเขื่อนนั้นจะคำนวณด้วยสมการสมมูลน้ำในอ่าง เก็บน้ำที่เวลาต่าง ๆ ดังนี้คือ

$$S_{ecobb} = S_{t-1ecobb} + (I_{t-8bb} - E_{t-8bb} - (R_{t-1ecobb} + (D_{t-8bb} - (0.2 * SF_{t-8bb}))))$$

$$S_{ecosk} = S_{t-1ecosk} + (I_{t-10sk} - E_{t-10sk} - (R_{t-1ecosk} + (D_{t-10sk} - (0.2 * SF_{t-10sk}))))$$

$$S_{ecoknb} = S_{t-1ecoknb} + (I_{t-7knb} - E_{t-7knb} - (R_{t-1ecoknb} + (D_{t-7knb} - (0.2 * SF_{t-7knb}))))$$

$$S_{ecops} = S_{t-1ecops} + (I_{t-6ps} - E_{t-6ps} - (R_{t-1ecops} + (D_{t-6ps} - (0.2 * SF_{t-6ps}))))$$

โดยที่ S_{ecobb} คือปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการจำลองเพื่อโหนดความต้องการ น้ำ ECO ของเขื่อนภูมิพล S_{ecosk} คือปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการจำลองเพื่อ โหนดความต้องการน้ำ ECO ของเขื่อนสิริกิติ์ S_{ecoknb} คือปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำที่ได้ จากการจำลองเพื่อโหนดความต้องการน้ำ ECO ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และ S_{ecops} คือปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการจำลองเพื่อโหนดความต้องการน้ำ ECO ของ เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ในที่นี้ ค่าเริ่มต้นของปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการจำลอง ของเขื่อนต่าง ๆ คำนวณจากปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำตามระยะเวลาที่น้ำเดินทางมาถึง โหนดความต้องการน้ำ ECO จากนั้นคำนวณน้ำหนักราคาตลาดการระบายน้ำให้เพียงพอกับ โหนดความต้องการน้ำ ECO ของแต่ละอ่างเก็บน้ำคิดเป็น $W_{teco_x} = \frac{S_x}{S_{eco}}$ โดยที่ S_x คือ ปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการจำลองของแต่ละอ่างเก็บน้ำในแต่ละเวลาตาม สมการข้างต้น อย่างไรก็ตาม ถ้าค่า $(R_x + (D_x - (0.2 * SF_x)) < R_{min}$ กำหนดให้ $S_x = I_x - E_x - R_{min}$

อย่างไรก็ดี ผลการวิจัยพบว่า รูปแบบที่ 2 ให้ค่าน้ำหนักคาดการณ์ในการระบายน้ำให้เพียงพอ กับความต้องการน้ำของแต่ละอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสม เมื่อได้ประยุกต์ใช้กับฐานข้อมูลระยะยาวของอ่างเก็บน้ำ ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จำนวน 21 ปี นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้ดำเนินการพัฒนาแบบจำลองการ โปรแกรมแบบข้อจำกัดใน 2 รูปแบบ โดยกำหนดให้สมการข้อจำกัดแตกต่างกันตามปัจจัยฤดูกาลคือ (1) แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายฤดูกาล (Constraint Programming Model with Seasonal Constraints) และ (2) แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายปี (Constraint Programming Model with Annual Constraints)

with Yearly Constraints) โดยได้ทำการปรับค่าปริมาณความต้องการน้ำภายใต้สมมติฐานที่ว่า ในช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) ศักยภาพของปริมาณน้ำต้นทุนของเขื่อนหลักสามารถระบายน้ำได้อย่างเต็มที่ตามปัจจัยปริมาณความต้องการน้ำโดยคิดเป็น 100% แต่ในฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ษ.) ศักยภาพของปริมาณน้ำต้นทุนของเขื่อนหลักในการตอบสนองปริมาณความต้องการน้ำมีจำกัด ดังนั้น จึงพิจารณาปัจจัยความต้องการน้ำเพียง 80% ที่จะได้รับการจัดสรรน้ำจากเขื่อน

2.4.2 แบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model)

(1) สมการข้อจำกัดของสมดุลอ่างเก็บน้ำ: $S_{t+1} = S_t + I_t - E_t - R_t$

(2) สมการข้อจำกัดของปริมาณน้ำเก็บกัก: $S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max}$

โดยที่ S_{\min} คือปริมาณน้ำเก็บกักต่ำสุดของแต่ละอ่างเก็บน้ำ และ S_{\max} คือปริมาณน้ำเก็บกักสูงสุดของแต่ละอ่างเก็บน้ำ สำหรับการกำหนดค่า S_{\min} และ S_{\max} นั้นจะกำหนดตามข้อมูลเขื่อนที่ระบุในคู่มือการระบายน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยและกรมชลประทานในหน่วยล้านลูกบาศก์เมตร ดังนี้

(2.1) BB: $S_{\min} = 3,800$ และ $S_{\max} = 13,462$ ล้านลูกบาศก์เมตร

(2.2) SK: $S_{\min} = 2,850$ และ $S_{\max} = 9,510$ ล้านลูกบาศก์เมตร

(2.3) KNB: $S_{\min} = 36$ และ $S_{\max} = 939$ ล้านลูกบาศก์เมตร

(2.4) PS: $S_{\min} = 3$ และ $S_{\max} = 960$ ล้านลูกบาศก์เมตร

(3) สมการข้อจำกัดของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้: $G_{\min} \leq G_t \leq G_{\max}$

โดยที่ G_{\min} คือพลังงานไฟฟ้าต่ำสุดที่สามารถผลิตได้ G_{\max} คือพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถผลิตได้ และ G_t คือพลังงานผลิตไฟฟ้าที่เวลา t ใด ๆ ของแต่ละอ่างเก็บน้ำซึ่ง

สามารถคำนวณได้จากสมการ $G_t = \frac{\left(\left(\frac{e}{100} \right) * \gamma * \left(\frac{R_t * 10^6}{24 * 60 * 60} \right) * H_t * \Delta t \right)}{10^3}$ สำหรับค่าประสิทธิภาพ

ของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำสุทธิ (Overall Efficiency) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 91.27% และ γ มีค่าเท่ากับ 9.81 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร

(4) สมการข้อจำกัดอื่น ๆ: $S_{t+1}, S_t, I_t, E_t, R_t \geq 0$

(5) สมการข้อจำกัดของการระบายน้ำให้สอดคล้องกับโหนดความต้องการน้ำ: การกำหนดสมการข้อจำกัดนี้ได้แนวคิดมาจากรูปที่ 3-10 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้แยกกระบวนการจัดสรรน้ำจากเขื่อนหลักเป็น 4 ระบบย่อยตามโหนดความต้องการน้ำ รวมทั้งยังได้กำหนดตัวแปรสำหรับโหนดความต้องการน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เพิ่มเติมไว้ด้วย ดังนี้

(5.1) ตัวแปรนำเข้าของความต้องการน้ำ (Water Demand)

- (5.1.1) D_{tbb} กำหนดให้เป็นปริมาณความต้องการน้ำที่เวลา t ที่ไหนตความต้องการน้ำ LP บริเวณท้ายเขื่อนภูมิพลซึ่งจะต้องได้รับการจัดสรรน้ำจากเขื่อนภูมิพลโดยตรง โดยปริมาณความต้องการน้ำนี้ครอบคลุมปริมาณความต้องการน้ำในภาคเกษตรกรรมครอบคลุม 3 โครงการชลประทานหลักได้แก่ โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาท่อทองแดง โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาวังบัว และโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาวังยางและหนองขวัญ รวมทั้งปริมาณความต้องการน้ำนอกภาคเกษตรกรรมท้ายเขื่อนภูมิพล
- (5.1.2) D_{tsk} กำหนดให้เป็นปริมาณความต้องการน้ำที่เวลา t ที่ไหนตความต้องการน้ำ LN บริเวณท้ายเขื่อนสิริกิติ์ซึ่งจะต้องได้รับการจัดสรรน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์โดยตรง โดยปริมาณความต้องการน้ำนี้ครอบคลุมปริมาณความต้องการน้ำในภาคเกษตรกรรมครอบคลุม 5 โครงการชลประทานหลักได้แก่ โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาตงเศรษฐี โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษานเรศวร โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพลายชุมพล โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาท่าบัว และโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษายม-น่าน รวมทั้งปริมาณความต้องการน้ำนอกภาคเกษตรกรรมท้ายเขื่อนสิริกิติ์
- (5.1.3) D_{txcpy} กำหนดให้เป็นปริมาณความต้องการน้ำที่เวลา tx ที่ไหนตความต้องการน้ำร่วมกัน CPY ที่จะต้องได้รับการจัดสรรน้ำจากเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน โดยปริมาณความต้องการน้ำนี้ครอบคลุมปริมาณความต้องการน้ำในภาคเกษตรกรรมครอบคลุม 26 โครงการชลประทานหลักในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกและฝั่งตะวันออก รวมทั้งปริมาณความต้องการน้ำนอกภาคเกษตรกรรมในพื้นที่
- (5.1.4) D_{txeco} กำหนดให้เป็นปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการรักษาระบบนิเวศที่เวลา tx ที่ไหนตความต้องการน้ำ ECON ท้ายเขื่อนทดน้ำเจ้าพระยา
- (5.1.5) D_{tknb} กำหนดให้เป็นปริมาณความต้องการน้ำที่เวลา t ทุกกิจกรรมการใช้น้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน
- (5.1.6) D_{tps} กำหนดให้เป็นปริมาณความต้องการน้ำที่เวลา t ทุกกิจกรรมการใช้น้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์
- (5.2) ตัวแปรตัดสินใจของค่าน้ำหนักในการระบายน้ำให้เพียงพอับความต้องการน้ำของแต่ละอ่างเก็บน้ำ (Weight, W)
- (5.2.1) $W_{txawsbb}$ กำหนดให้เป็นค่าน้ำหนักในการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลให้เพียงพอับปริมาณความต้องการน้ำ D_{txcpy}

- (5.2.2) $W_{txawssk}$ กำหนดให้เป็นค่าน้ำหนักในการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ให้เพียงพอกับปริมาณความต้องการน้ำ D_{txcpy}
- (5.2.3) $W_{txawsknb}$ กำหนดให้เป็นค่าน้ำหนักในการระบายน้ำจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนให้เพียงพอกับปริมาณความต้องการน้ำ D_{txcpy}
- (5.2.4) W_{txawsp} กำหนดให้เป็นค่าน้ำหนักในการระบายน้ำจากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ให้เพียงพอกับปริมาณความต้องการน้ำ D_{txcpy}
- (5.2.5) $W_{txecobb}$ กำหนดให้เป็นค่าน้ำหนักในการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลให้เพียงพอกับปริมาณความต้องการน้ำ D_{txeco}
- (5.2.6) $W_{txecosk}$ กำหนดให้เป็นค่าน้ำหนักในการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ให้เพียงพอกับปริมาณความต้องการน้ำ D_{txeco}
- (5.2.7) $W_{txecoknb}$ กำหนดให้เป็นค่าน้ำหนักในการระบายน้ำจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนให้เพียงพอกับปริมาณความต้องการน้ำ D_{txeco}
- (5.2.8) $W_{txecops}$ กำหนดให้เป็นค่าน้ำหนักในการระบายน้ำจากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ให้เพียงพอกับปริมาณความต้องการน้ำ D_{txeco}

(5.3) ตัวแปรตัดสินใจในการระบายน้ำ (Final Water Release)

- (5.3.1) FR_{tbb} กำหนดให้เป็นปริมาณการระบายน้ำที่เวลา t จากเขื่อนภูมิพล
- (5.3.2) FR_{tsk} กำหนดให้เป็นปริมาณการระบายน้ำที่เวลา t จากเขื่อนสิริกิติ์
- (5.3.3) FR_{tknb} กำหนดให้เป็นปริมาณการระบายน้ำที่เวลา t จากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน
- (5.3.4) FR_{tps} กำหนดให้เป็นปริมาณการระบายน้ำที่เวลา t จากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

(5.4) หลังจากที่ได้กำหนดตัวแปรข้างต้นแล้ว งานวิจัยนี้ได้กำหนดสมการข้อจำกัดของการระบายน้ำให้เหมาะสมกับความต้องการน้ำ โดยนำปริมาณ Sideflow บริเวณท้ายเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนมาร่วมพิจารณา 20% โดยพิจารณาจากข้อมูลปริมาณน้ำท่าของสถานีตรวจวัดหลักจำนวน 3 สถานีได้แก่ สถานี W.4A ท้ายเขื่อนภูมิพล และสถานี Y.17 และ N.22A ท้ายเขื่อนสิริกิติ์เพื่อปรับลดปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อนลงดังนี้

(5.4.1) สมการข้อจำกัดในการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล:

$$FR_{tbb} \geq R_{txlppb} + R_{txcpybb} + R_{txecobb}$$

$$FR_{tbb} \geq D_{tbb} + (W_{txawspb} * D_{txcpy}) + (W_{txecobb} * D_{txeco}) - (0.2 * SF_{tbb})$$

(5.4.2) สมการข้อจำกัดในการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์:

$$FR_{tsk} \geq R_{txlnsk} + R_{txcpysk} + R_{txecosk}$$

$$FR_{tsk} \geq D_{tsk} + (W_{txawssk} * D_{txcpy}) + (W_{txecosk} * D_{txeco}) - (0.2 * SF_{tsk})$$

(5.4.3) สมการข้อจำกัดในการระบายน้ำจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน:

$$FR_{tknb} \geq R_{txknb} + R_{txcpyknb} + R_{txecoknb}$$

$$FR_{tknb} \geq D_{tknb} + (W_{txawsknb} * D_{txcpy}) + (W_{txecoknb} * D_{txeco})$$

(5.4.4) สมการข้อจำกัดในการระบายน้ำจากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์:

$$FR_{tps} \geq R_{txps} + R_{txcpyps} + R_{txecops}$$

$$FR_{tps} \geq D_{tps} + (W_{txawspss} * D_{txcpy}) + (W_{txecops} * D_{txeco})$$

(5.4.5) สมการข้อจำกัดเพื่อควบคุมค่าน้ำหนักในการระบายน้ำให้เพียงพอกับความ
ต้องการน้ำของทุกอ่างเก็บน้ำ:

$$W_{txawsbb} + W_{txawssk} + W_{txawsknb} + W_{txawspss} = 1$$

$$W_{txecobb} + W_{txeconsk} + W_{txecoknb} + W_{txecops} = 1$$

(5.5) การกำหนดสมการข้อจำกัดเพื่อควบคุมปริมาณน้ำหลากในช่วงฤดูฝนของเขื่อนภูมิ
พลตามแนวทางการระบายน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยดังนี้

$$(5.5.1) (S_{tbb} \geq 12,157.2 \text{ และ } S_{tbb} < 12,483.4) \rightarrow FR_{tbb} \geq 0.3 * I_{tbb}$$

$$(5.5.2) (S_{tbb} \geq 12,483.4 \text{ และ } S_{tbb} < 12,809.6) \rightarrow FR_{tbb} \geq 0.5 * I_{tbb}$$

$$(5.5.3) (S_{tbb} \geq 12,809.6 \text{ และ } S_{tbb} < 13,298.9) \rightarrow FR_{tbb} \geq 0.7 * I_{tbb}$$

$$(5.5.4) (S_{tbb} \geq 13,298.9) \rightarrow FR_{tbb} \geq I_{tbb}$$

เมื่อปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลา t ไต ๆ แสดงผลในหน่วยล้านลูกบาศก์เมตร

จากสมการข้อจำกัดข้างต้นจะเป็นการหาปริมาณการระบายน้ำที่เหมาะสมรายวันของแต่ละอ่างเก็บ
น้ำ ดังนั้น ค่าของตัวแปรนำเข้าต่าง ๆ ที่มาจากแบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึง
โหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based
Model) นั้นจะนำเข้ามาตามช่วงเวลาจากเขื่อนถึงพื้นที่ของความต้องการน้ำเช่น ถ้าคำนวณต้องการหา FR_{tbb}
ของวันที่ t ค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสมการข้อจำกัดสำหรับหาค่า FR_{tbb} โดยที่คำนึงถึงโหนดความต้องการที่
CPY เช่น $R_{txcpybb}$ และ D_{txcpy} เป็นต้น จะต้องใช้ของวันที่ t+4 ตามระยะเวลาที่แสดงในรูปที่ 3-10 ข้างต้น

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลการรวบรวมข้อมูลวิจัย

ผลการรวบรวมข้อมูลวิจัยในช่วงดำเนินการวิจัย 3 เดือนแรกประกอบด้วย ข้อมูลอุทกวิทยาในพื้นที่ศึกษา (ข้อมูลฝน ข้อมูลน้ำท่า) ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ (เขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ และเขื่อนเจ้าพระยา) ได้สรุปรายละเอียดที่สำคัญดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลการรวบรวมข้อมูลอุทกวิทยา

4.1.1.1 ข้อมูลฝน

งานวิจัยนี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลฝนจากแหล่งข้อมูลของอุตุนิยมหาวิทยาลัยทั่วประเทศจำนวน 125 สถานี และได้ทำการคัดเลือกสถานีที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่และทำการต่อเติมฐานข้อมูลฝนรายวันให้สมบูรณ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2564 จำนวน 43 สถานี ดังแสดงในตารางที่ 4-1 รวมทั้งได้รวบรวมข้อมูลฝนจากสถานีโทรมาตรของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ติดตั้งเหนือเขื่อนและท้ายเขื่อนภูมิพลจำนวน 15 สถานี ดังแสดงในตารางที่ 4-2 และเหนือเขื่อนและท้ายเขื่อนสิริกิติ์จำนวน 18 สถานี ดังแสดงในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-1 รายชื่อสถานีตรวจวัดฝนของกรมอุตุนิยมหาวิทยาลัย

ลำดับ	รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ละติจูด	ลองจิจูด	ลักษณะข้อมูล	ช่วงข้อมูล
1	300201	แม่ฮ่องสอน	19.2990	97.9758	รายวัน	2543-2564
2	300202	แม่ฮ่องสอน	18.1667	97.9333	รายวัน	2543-2564
3	303201	เชียงราย	19.9614	99.8814	รายวัน	2543-2564
4	303301	เชียงราย	19.8708	99.7828	รายวัน	2543-2564
5	310201	พะเยา	19.1333	99.9000	รายวัน	2543-2564
6	327202	เชียงใหม่	19.9314	99.0483	รายวัน	2543-2564
7	327501	เชียงใหม่	18.7900	98.9769	รายวัน	2543-2564
8	328201	ลำปาง	18.2833	99.5167	รายวัน	2543-2564
9	328301	ลำปาง	18.3167	99.2833	รายวัน	2543-2564
10	329201	ลำพูน	18.5672	99.0339	รายวัน	2543-2564
11	330201	แพร่	18.1667	100.1667	รายวัน	2543-2564
12	331201	น่าน	18.7797	100.7778	รายวัน	2543-2564
13	331301	น่าน	18.8667	100.7500	รายวัน	2543-2564
14	331401	น่าน	19.1106	100.8025	รายวัน	2543-2564
15	331402	น่าน	19.4119	100.8835	รายวัน	2543-2564
16	351201	อุตรดิตถ์	17.6167	100.1000	รายวัน	2543-2564

4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ลำดับ	รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ละติจูด	ลองจิจูด	ลักษณะข้อมูล	ช่วงข้อมูล
17	373201	สุโขทัย	17.1061	99.8000	รายวัน	2543-2564
18	373301	สุโขทัย	17.1614	99.8617	รายวัน	2543-2564
19	376201	ตาก	16.8783	99.1433	รายวัน	2543-2564
20	376202	ตาก	16.6592	98.5508	รายวัน	2543-2564
21	376203	ตาก	17.2439	99.0025	รายวัน	2543-2564
22	376301	ตาก	16.7500	98.9333	รายวัน	2543-2564
23	376401	ตาก	16.0247	98.8644	รายวัน	2543-2564
24	378201	พิษณุโลก	16.7948	100.2793	รายวัน	2543-2564
25	379201	เพชรบูรณ์	16.4333	101.1500	รายวัน	2543-2564
26	379401	เพชรบูรณ์	16.7736	101.2494	รายวัน	2543-2564
27	379402	เพชรบูรณ์	15.6570	101.1080	รายวัน	2543-2564
28	380201	กำแพงเพชร	16.4868	99.5270	รายวัน	2543-2564
29	386301	พิจิตร	16.4381	100.2925	รายวัน	2543-2564
30	400201	นครสวรรค์	15.6718	100.1324	รายวัน	2543-2564
31	400301	นครสวรรค์	15.3494	100.5303	รายวัน	2543-2564
32	402301	ชัยนาท	15.1500	100.1833	รายวัน	2543-2564
33	415301	พระนครศรีอยุธยา	14.5347	100.7250	รายวัน	2543-2564
34	419301	ปทุมธานี	14.1000	100.6167	รายวัน	2543-2564
35	425201	สุพรรณบุรี	14.4744	100.1389	รายวัน	2543-2564
36	425301	สุพรรณบุรี	14.3036	99.8647	รายวัน	2543-2564
37	426201	ลพบุรี	14.7997	100.6450	รายวัน	2543-2564
38	426401	ลพบุรี	15.2667	101.1874	รายวัน	2543-2564
39	431301	นครราชสีมา	14.6439	101.3319	รายวัน	2543-2564
40	451301	นครปฐม	14.0117	99.9700	รายวัน	2543-2564
41	455201	กรุงเทพมหานคร	13.7264	100.5600	รายวัน	2543-2564
42	455203	กรุงเทพมหานคร	13.7069	100.5681	รายวัน	2543-2564
43	455301	กรุงเทพมหานคร	13.6664	100.6061	รายวัน	2543-2564

ตารางที่ 4-2 รายชื่อสถานีโทรมาตรตรวจวัดฝนและน้ำท่าในกลุ่มน้ำปิงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ลำดับ	รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ละติจูด	ลองจิจูด	ลักษณะข้อมูล	ช่วงข้อมูล
1	PU01	แม่น้ำปิงที่ อ.ตอยหล่อ	18.4543	98.7894	รายวัน	2555-2564
2	PU02	แม่น้ำปิงที่ อ.ฮอด	18.1789	98.6291	รายวัน	2555-2564
3	PU03	อ.อมก๋อย	17.7975	98.3626	รายวัน	2555-2564
4	PU04	ห้วยแม่ตื่นที่ อ.อมก๋อย	17.3876	98.4674	รายวัน	2555-2564
5	PU05	เขื่อนภูมิพล	17.2444	98.9729	รายวัน	2555-2564

ลำดับ	รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ละติจูด	ลองจิจูด	ลักษณะข้อมูล	ช่วงข้อมูล
6	PD01	ท้ายเขื่อนแม่ปิงตอนล่าง	17.2435	99.0163	รายวัน	2555-2564
7	PD02	แม่น้ำปิงที่ อ.บ้านตาก	17.0491	99.0659	รายวัน	2555-2564
8	PD03	ห้วยตากที่ อ.บ้านตาก	17.0417	99.0581	รายวัน	2555-2564
9	PD04	ห้วยแม่ท้อที่ อ.เมือง จ.ตาก	16.8405	99.0683	รายวัน	2555-2564
10	PD05	ห้วยแม่ระกาที่ อ.เมือง จ.ตาก	16.9151	99.3184	รายวัน	2555-2564
11	PD06	แม่น้ำปิงที่ อ.คลองขลุง (P.15)	16.2135	99.7210	รายวัน	2555-2564
12	PD07	การประปาเมืองตาก	16.8837	99.1179	รายวัน	2555-2564
13	PD08	การประปาเมืองกำแพงเพชร	16.4795	99.5187	รายวัน	2555-2564
14	WD01	แม่น้ำวังที่ อ.เถิน (W.3A)	17.6362	99.2315	รายวัน	2555-2564
15	WD02	แม่น้ำวังที่ อ.สามเงา	17.3214	99.0769	รายวัน	2555-2564

ตารางที่ 4-3 รายชื่อสถานีโทรมาตรตรวจวัดฝนและน้ำท่าในกลุ่มน้ำน่านของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ลำดับ	รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ละติจูด	ลองจิจูด	ลักษณะข้อมูล	ช่วงข้อมูล
1	TU01	อ.ทุ่งช้าง	19.4190	100.8791	รายวัน	2555-2564
2	TU02	อ.ท่าวังผา (N.64)	19.0151	100.7809	รายวัน	2555-2564
3	TU03	อ.เมืองน่าน (N.1)	18.7744	100.7775	รายวัน	2555-2564
4	TU04	อ.เวียงสา น่าน (N.13B)	18.5234	100.7761	รายวัน	2555-2564
5	TU05	อ.บ่อเกลือ	19.1487	101.1566	รายวัน	2555-2564
6	TU06	อ.แม่จริม	18.7161	101.0078	รายวัน	2555-2564
7	TU07	อ.เวียงสา น้ำว่า (N.75)	18.5476	100.8084	รายวัน	2555-2564
8	TU08	อ.นาหมื่น	18.3146	100.6938	รายวัน	2555-2564
9	TU09	อ.นาหมื่น	18.1722	100.5071	รายวัน	2555-2564
10	TU10	เหนือเขื่อนสิริกิติ์	17.7625	100.5593	รายวัน	2555-2564
11	TD02	การประปาผาจุก	17.6557	100.2210	รายวัน	2555-2564
12	TD03	กระซังปลาบ้านวังกระพี้	17.5439	100.1043	รายวัน	2555-2564
13	TD04	อ.ตรอน (N.60)	17.4144	100.1238	รายวัน	2555-2564
14	TD05	อ.พากท่า (N.39)	17.9978	100.8803	รายวัน	2555-2564
15	TD06	อ.น้ำปาด (N.33)	17.7185	100.5771	รายวัน	2555-2564
16	TD07	คลองตรอน (N.28B)	17.5855	100.4877	รายวัน	2555-2564
17	TD08	วัดศรีวงกฏ (N.72)	17.4593	100.2731	รายวัน	2555-2564
18	TD09	บ้านหนองบอน (N.40)	17.2206	100.3528	รายวัน	2555-2564

4.1.1.2 ข้อมูลน้ำท่า

งานวิจัยนี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลน้ำท่าจากกรมชลประทานจำนวน 103 สถานี และได้ทำการคัดเลือกสถานีที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่และทำการต่อเติมฐานข้อมูลฝนรายวันให้สมบูรณ์จำนวน 46 สถานีระหว่างปี พ.ศ. 2543-2564 ดังแสดงในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 รายชื่อสถานีตรวจวัดน้ำท่าของกรมชลประทาน

ลำดับ	รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ช่วงข้อมูล
1	P.1	สะพานนารัฐ อ.เมือง จ.เชียงใหม่	1/1/2543-30/4/2562
2	P.2A	บ้านเชียงเงิน อ.เมือง จ.ตาก	1/1/2543-30/4/2562
3	P.4A	บ้านสันมหาพร อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่	1/1/2543-30/4/2562
4	P.5	สะพานท่าสิงห์พิทักษ์ อ.เมือง จ.ลำพูน	1/1/2543-30/4/2562
5	P.7A	สะพานบ้านห้วยยาง อ.เมือง จ.กำแพงเพชร	1/1/2543-30/4/2562
6	P.14	แก่งออบหลวง อ.ฮอด จ.เชียงใหม่	1/1/2543-30/4/2562
7	P.15	บ้านคลองขลุจ อ.คลองขลุจ จ.กำแพงเพชร	1/1/2543-30/4/2562
8	P.16	ขามวรลักษบุรี อ.ขามวรลักษบุรี จ.กำแพงเพชร	1/1/2543-30/4/2562
9	P.17	บ้านท่าจิว อ.บรรพตพิสัย จ.นครสวรรค์	1/1/2543-30/4/2562
10	P.20	บ้านเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่	1/1/2543-30/4/2562
11	P.21	ริมใต้ อ.แมริม จ.เชียงใหม่	1/1/2543-30/4/2562
12	P.24A	สะพานประชาอุทิศ อ.จอมทอง จ.เชียงใหม่	1/1/2543-30/4/2562
13	P.26A	บ้านใหม่ อ.เมือง จ.กำแพงเพชร	1/1/2543-30/4/2562
14	P.35	บ้านปางตาไว อ.คลองขลุจ จ.กำแพงเพชร	1/1/2543-30/4/2562
15	P.42	บ้านแม่บอนใหม่ อ.ทุ่งหัวช้าง จ.ลำพูน	1/1/2543-30/4/2562
16	P.47	บ้านโป่งน้ำร้อน อ.คลองลาน จ.กำแพงเพชร	1/1/2543-30/4/2562
17	P.64	บ้านหลวง อ.อมก๋อย จ.เชียงใหม่	1/1/2543-30/4/2562
18	P.65	บ้านม่วงปือก อ.เวียงแหง จ.เชียงใหม่	1/1/2543-30/4/2562
19	W.1C	สะพานเสตุวรี อ.เมือง จ.ลำปาง	1/1/2543-30/4/2562
20	W.3A	บ้านดอนไชย อ.เถิน จ.ลำปาง	1/1/2543-30/4/2562
21	W.4A	บ้านวังหมัน อ.สามเงา จ.ตาก	1/1/2543-30/4/2564
22	W.5A	เกาะคา อ.เกาะคา จ.ลำปาง	1/1/2543-30/4/2562
23	W.10A	เขื่อนกัวลมล่าง แม่น้ำวัง จ.ลำปาง	1/1/2543-30/4/2562
24	W.16A	บ้านไฮ อ.แจ้ห่ม จ.ลำปาง	1/1/2543-30/4/2562
25	W.17	บ้านหนองนา อ.แจ้ห่ม จ.ลำปาง	1/1/2543-30/4/2562
26	W.17A	บ้านทุ่งทอง อ.แจ้ห่ม จ.ลำปาง	1/1/2543-30/4/2562
27	W.20	บ้านท่าล้อ อ.เมือง จ.ลำปาง	1/1/2543-30/4/2562
28	W.21	บ้านท่าเตือ อ.เมือง จ.ลำปาง	1/1/2543-30/4/2562
29	Y.1C	บ้านน้ำโค้ง อ.เมือง จ.แพร่	1/1/2543-30/4/2562
30	Y.3A	สวรรคโลก อ.สวรรคโลก จ.สุโขทัย	1/1/2543-30/4/2562

ลำดับ	รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ช่วงข้อมูล
31	Y.4	สะพานตลาดธานี อ.เมือง จ.สุโขทัย	1/1/2543-30/4/2562
32	Y.6	บ้านแก่งหลวง อ.ศรีสัชนาลัย จ.สุโขทัย	1/1/2543-30/4/2562
33	Y.13A	บ้านหลวงเหนือ อ.งาว จ.ลำปาง	1/1/2543-30/4/2562
34	Y.14	บ้านดอนระเปียง อ.ศรีสัชนาลัย จ.สุโขทัย	1/1/2543-30/4/2562
35	Y.16	บ้านบางระกำ อ.บางระกำ จ.พิษณุโลก	1/1/2543-30/4/2562
36	Y.17	บ้านสามง่าม อ.สามง่าม จ.พิจิตร	1/1/2543-30/4/2564
37	Y.20	บ้านห้วยสัก อ.สอง จ.แพร่	1/1/2543-30/4/2562
38	Y.21	บ้านนาปลากั้ง อ.วังชิ้น จ.แพร่	1/1/2543-30/4/2562
39	Y.24	บ้านมาง อ.เชียงใหม่ จ.พะเยา	1/1/2543-30/4/2562
40	Y.25	บ้านนาหวายใหม่ อ.บ้านหลวง จ.น่าน	1/1/2543-30/4/2562
41	Y.26	บ้านแม่พูน อ.เถิน จ.ลำปาง	1/1/2543-30/4/2562
42	Y.27	บ้านปากพวก อ.เด่นชัย จ.แพร่	1/1/2543-30/4/2562
43	Y.29	บ้านแม่ฮู้ อ.ศรีสัชนาลัย จ.สุโขทัย	1/1/2543-30/4/2562
44	Y.30	บ้านโป่ง อ.งาว จ.ลำปาง	1/1/2543-30/4/2562
45	Y.31	บ้านทุ่งหนอง อ.เชียงใหม่ จ.พะเยา	1/1/2543-30/4/2562
46	Y.33	บ้านคลองตาล อ.ศรีสำโรง จ.สุโขทัย	1/1/2543-30/4/2562
47	Y.34	แม่หล่าย อ.เมือง จ.แพร่	1/1/2543-30/4/2562
48	Y.36	บ้านป่าคา อ.ปง จ.พะเยา	1/1/2543-30/4/2562
49	Y.37	บ้านวังชิ้น อ.วังชิ้น จ.แพร่	1/1/2543-30/4/2562
50	Y.38	บ้านแม่คำมีต่าหนัก อ.หนองม่วงไข่ จ.แพร่	1/1/2543-30/4/2562
51	Y.40	บ้านบางคลาน อ.โพทะเล จ.พิจิตร	1/1/2543-30/4/2562
52	N.1	ศูนย์ป่าไม้ อ.เมือง จ.น่าน	1/1/2543-30/4/2562
53	N.2B	ในเมือง อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์	1/1/2543-30/4/2562
54	N.5A	ในเมือง อ.เมือง จ.พิษณุโลก	1/1/2543-30/4/2562
55	N.7	ในเมือง อ.เมือง จ.พิจิตร	1/1/2543-30/4/2562
56	N.7A	บ้านราชช้างขวัญ อ.เมือง จ.พิจิตร	1/1/2543-30/4/2562
57	N.8	บ้านบางมูลนาก อ.บางมูลนาก จ.พิจิตร	1/1/2543-30/4/2562
58	N.8A	บ้านบางมูลนาก อ.บางมูลนาก จ.พิจิตร	1/1/2543-30/4/2562
59	N.10A	สะพานหิน อ.สะพานหิน จ.พิจิตร	1/1/2543-30/4/2562
60	N.12A	บ้านหาดไผ่ อ.ท่าปลา จ.อุตรดิตถ์	1/1/2543-30/4/2562
61	N.13A	บ้านบุญนาค อ.เวียงสา จ.น่าน	1/1/2543-30/4/2562
62	N.14A	วัดหลวงพ่อแก้ว อ.ชุมแสง จ.นครสวรรค์	1/1/2543-30/4/2562
63	N.22	บ้านยาง อ.วัดโบสถ์ จ.พิษณุโลก	1/1/2543-30/4/2562
64	N.22A	บ้านยาง อ.วัดโบสถ์ จ.พิษณุโลก	1/1/2543-30/4/2564
65	N.24	บ้านวังนกแอ่น อ.วังทอง จ.พิษณุโลก	1/1/2543-30/4/2562

ลำดับ	รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ช่วงข้อมูล
66	N.24A	บ้านวังนกแอ่น อ.วังทอง จ.พิษณุโลก	1/1/2543-30/4/2562
67	N.27A	ท้ายเขื่อนนเรศวร อ.พรหมพิราม จ.พิษณุโลก	1/1/2543-30/4/2562
68	N.28A	บ้านนากล่า อ.น้ำปาด จ.อุตรดิตถ์	1/1/2543-30/4/2562
69	N.36	บ้านหนองกะท้าว อ.นครไทย จ.พิษณุโลก	1/1/2543-30/4/2562
70	N.37	บ้านทับกฤช อ.ชุมแสง จ.นครสวรรค์	1/1/2543-30/4/2562
71	N.40	บ้านหนองบอน อ.วัดโบสถ์ จ.พิษณุโลก	1/1/2543-30/4/2562
72	N.42	บ้านหาดข้าวสาร อ.เวียงสา จ.น่าน	1/1/2543-30/4/2562
73	N.49	บ้านน้ำยาว อ.ปัว จ.น่าน	1/1/2543-30/4/2562
74	N.53	บ้านพุทธบาท อ.ชนแดน เพชรบูรณ์	1/1/2543-30/4/2562
75	N.54	บ้านวังโป่ง อ.วังโป่ง จ.เพชรบูรณ์	1/1/2543-30/4/2562
76	N.55	บ้านท่าสะแก อ.ชาติตระการ จ.พิษณุโลก	1/1/2543-30/4/2562
77	N.58	บ้านกมะโมง อ.นครไทย จ.พิษณุโลก	1/1/2543-30/4/2562
78	N.59	บ้านนาจาน อ.นครไทย จ.พิษณุโลก	1/1/2543-30/4/2562
79	N.60	บ้านหาดสองแคว อ.ตรอน จ.อุตรดิตถ์	1/1/2543-30/4/2562
80	N.62	บ้านห้วยท่าเฒ่า อ.ชาติตระการ จ.พิษณุโลก	1/1/2543-30/4/2562
81	N.63	บ้านหัวเมือง อ.น่าน้อย จ.น่าน	1/1/2543-30/4/2562
82	N.64	บ้านผาขวาง อ.เมืองน่าน จ.น่าน	1/1/2543-30/4/2562
83	N.65	บ้านปางสา อ.ท่าวังผา จ.น่าน	1/1/2543-30/4/2562
84	N.66	บ้านเนินเพิ่ม อ.นครไทย จ.พิษณุโลก	1/1/2543-30/4/2562
85	N.67	บ้านเกยไชย อ.ชุมแสง จ.นครสวรรค์	1/1/2543-30/4/2562
86	N.68	บ้านท่าตะเคียน อ.เมือง จ.พิษณุโลก	1/1/2543-30/4/2562
87	N.69	บ้านนาทุ่งใหญ่ อ.นครไทย จ.พิษณุโลก	1/1/2543-30/4/2562
88	N.70	บ้านโคกผักหวาน อ.ชาติตระการ จ.พิษณุโลก	1/1/2543-30/4/2562
89	N.74	บางกระท่อม อ.บางกระท่อม จ.พิษณุโลก	1/1/2543-30/4/2562
90	C.2	บ้านไผ่ล้อม อ.เมือง จ.นครสวรรค์	1/1/2543-30/4/2562
91	C.2A	บ้านแก่ง อ.เมือง จ.นครสวรรค์	1/1/2543-30/4/2562
92	C.13	บ้านบางหลวง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท	1/1/2543-30/4/2562
93	S.2	บ้านป่า อ.แก่งคอย จ.สระบุรี	1/1/2543-30/4/2562
94	S.4B	เมือง อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์	1/1/2543-30/4/2562
95	S.7A	วังม่วง อ.วังม่วง จ.สระบุรี	1/1/2543-30/4/2562
96	S.9	บ้านป่า อ.แก่งคอย จ.สระบุรี	1/1/2543-30/4/2562
97	S.10	บ้านหินฮาว อ.หล่มเก่า จ.เพชรบูรณ์	1/1/2543-30/4/2562
98	S.12	บ้านวังท่าดี อ.หนองไผ่ จ.เพชรบูรณ์	1/1/2543-30/4/2562
99	S.13	บ้านท่าเยี่ยม อ.ลำสนธิ จ.ลพบุรี	1/1/2543-30/4/2562
100	S.14	บ้านท่ารวก อ.ชัยบาดาล จ.ลพบุรี	1/1/2543-30/4/2562

ลำดับ	รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ช่วงข้อมูล
101	S.17	บ้านน้ำขุน อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์	1/1/2543-30/4/2562
102	S.31	บ้านปางหูลือ อ.ชัยบาดาล จ.ลพบุรี	1/1/2543-30/4/2562
103	CT.2A	สะแกกรัง	1/1/2543-30/4/2564

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลอุทกวิทยาเบื้องต้น

4.1.2.1 ข้อมูลฝน

ผลการวิเคราะห์สถิติข้อมูลฝนรายปีต่ำสุด ฝนรายปีเฉลี่ย และฝนรายปีสูงสุดของสถานีตรวจวัดฝนกรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งคำนวณโดยวิธีการหาค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของจำนวน 43 สถานีระหว่างปี พ.ศ. 2543-2564 ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่แสดงในตารางที่ 4-5 เท่ากับ 856 มิลลิเมตร 1,309 มิลลิเมตร และ 1,833 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4-5 สถิติข้อมูลฝนรายปีจากสถานีของกรมอุตุนิยมวิทยาระหว่างปี พ.ศ. 2543-2564

ลำดับ	รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ปริมาณฝนรายปี (มิลลิเมตร)		
			ต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	สูงสุด
1	300201	แม่ฮ่องสอน	879	1,313	1,697
2	300202	แม่ฮ่องสอน	735	1,200	1,671
3	303201	เชียงใหม่	1,026	1,763	2,288
4	303301	เชียงใหม่	863	1,645	2,108
5	310201	พะเยา	712	1,151	1,564
6	327202	เชียงใหม่	1,283	1,888	2,392
7	327501	เชียงใหม่	832	1,190	1,612
8	328202	ลำปาง	930	1,245	1,676
9	328301	ลำปาง	892	1,230	1,776
10	329201	ลำพูน	753	1,121	1,761
11	330201	แพร่	903	1,227	1,607
12	331201	น่าน	1,048	1,296	2,023
13	331301	น่าน	906	1,308	2,283
14	331401	น่าน	1,165	1,522	2,020
15	331402	น่าน	1,037	1,657	2,130
16	351201	อุดรดิตถ์	826	1,377	2,241
17	373201	สุโขทัย	836	1,325	1,959
18	373301	สุโขทัย	698	1,222	1,848
19	376201	ตาก	779	1,090	1,409
20	376202	ตาก	889	1,558	2,081

ลำดับ	รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ปริมาณฝนรายปี (มิลลิเมตร)		
			ต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	สูงสุด
21	376203	ตาก	719	1,082	1,651
22	376301	ตาก	1,151	1,531	2,415
23	376401	ตาก	1,233	1,509	1,929
24	378201	พิษณุโลก	891	1,339	1,905
25	379201	เพชรบูรณ์	824	1,187	1,682
26	379401	เพชรบูรณ์	683	1,023	1,394
27	379402	เพชรบูรณ์	915	1,277	1,871
28	380201	กำแพงเพชร	675	1,323	1,864
29	386301	พิจิตร	694	1,233	2,045
30	400201	นครสวรรค์	771	1,228	1,761
31	400301	นครสวรรค์	713	1,233	1,655
32	402301	ชัยนาท	698	1,016	1,425
33	415301	พระนครศรีอยุธยา	605	1,074	1,567
34	419301	ปทุมธานี	699	1,318	1,818
35	425201	สุพรรณบุรี	555	966	1,358
36	425301	สุพรรณบุรี	685	944	1,143
37	426201	ลพบุรี	845	1,120	1,533
38	426401	ลพบุรี	856	1,175	1,596
39	431301	นครราชสีมา	763	1,209	1,527
40	451301	นครปฐม	713	1,054	1,364
41	455201	กรุงเทพมหานคร	1,092	1,749	2,676
42	455203	กรุงเทพมหานคร	864	1,648	2,240
43	455301	กรุงเทพมหานคร	1,184	1,716	2,234
		ต่ำสุด	555	944	1,143
		เฉลี่ย	856	1,309	1,833
		สูงสุด	1,283	1,888	2,676

ผลการวิเคราะห์สถิติข้อมูลฝนรายปีระหว่างปี พ.ศ. 2555-2564 จากสถานีโทรมาตรในกลุ่มน้ำปิงและลุ่มน้ำน่านของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยแสดงในตารางที่ 4-6 และตารางที่ 4-7 โดยพบว่าเขื่อนภูมิพลมีปริมาณฝนรายปีต่ำสุดทั้ง 15 สถานีเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 313-738 มิลลิเมตร ปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 648-1,056 มิลลิเมตร และปริมาณฝนรายปีสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 997-1,999 มิลลิเมตร ปริมาณฝนของสถานีเหนือเขื่อนภูมิพลมีแนวโน้มต่ำกว่าสถานีท้ายเขื่อนโดยมีค่าปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยเท่ากับ 778 มิลลิเมตร บริเวณเหนือเขื่อน และ 902 มิลลิเมตร บริเวณท้ายเขื่อน

สำหรับเขื่อนสิริกิติ์มีปริมาณฝนรายปีต่ำสุดทั้ง 18 สถานีเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 112–1,043 มิลลิเมตร ปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 420–1,863 มิลลิเมตร และปริมาณฝนรายปีสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 727–3,653 มิลลิเมตร ปริมาณฝนของสถานีเหนือเขื่อนสิริกิติ์มีแนวโน้มสูงกว่าสถานีท้ายเขื่อน โดยมีค่าปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยเท่ากับ 1,180 มิลลิเมตร บริเวณเหนือเขื่อน และ 945 มิลลิเมตร บริเวณท้ายเขื่อน อย่างไรก็ตาม ข้อมูลฝนของสถานีที่คัดเลือกบริเวณด้านเหนือเขื่อนและท้ายเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์มีความผันผวนค่อนข้างสูง ส่วนหนึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนสูงของข้อมูลตรวจวัดซึ่งจำเป็นต้องผ่านการตรวจสอบความถูกต้องและทำการปรับแก้ก่อนนำไปใช้งาน

ตารางที่ 4-6 สถิติข้อมูลฝนรายปีจากสถานีโทรมาตรในกลุ่มน้ำปิงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ระหว่างปี พ.ศ. 2555–2564

ปี	ปริมาณฝนรายปี (มิลลิเมตร)											
	PU01	PU02	PU03	PU04	PU05	PD01	PD03	PD04	PD05	PD06	WD01	WD02
2555	877	750	942	–	997	1,999	–	1,123	–	–	817	662
2556	694	791	1,003	964	677	835	882	1,076	1,273	–	1,063	885
2557	336	767	950	850	779	779	–	861	1,171	–	–	907
2558	313	711	800	903	676	611	688	817	815	–	–	786
2559	621	787	891	992	424	–	651	889	902	–	–	682
2560	1,130	1,246	–	1,016	–	–	1,007	853	1,252	–	1,450	1,235
2561	758	844	–	1,104	460	–	461	742	995	–	998	962
2562	600	612	348	1,142	545	–	–	494	738	–	373	619
2563	703	1019	535	679	624	–	–	825	1,061	–	855	602
2564 ^{1/}	138	332	240	310	277	–	–	311	266	190	165	233
ต่ำสุด	313	612	348	679	424	611	461	494	738	–	373	602
เฉลี่ย	670	836	781	956	648	1056	738	853	1026	–	926	816
สูงสุด	1,130	1,246	1,003	1,142	997	1,999	1,007	1,123	1,273	–	1,450	1,235

หมายเหตุ: ข้อมูล ณ วันที่ 24 พฤษภาคม พ.ศ. 2564

ตารางที่ 4-7 สถิติข้อมูลฝนรายปีจากสถานีโทรมาตรในกลุ่มน้ำน่านของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ระหว่างปี พ.ศ. 2555–2564

ปี	ปริมาณฝนรายปี (มิลลิเมตร)											
	TU01	TU02	TU03	TU04	TU05	TU06	TU07	TU08	TU09	TU10	TD02	TD03
2555	1,148	827	647	3,653	1,043	1,169	803	1,055	1,486	1,012	1,363	1,148
2556	373	1,177	763	1,208	2,330	1,120	1,240	808	1,242	1,244	1,416	373
2557	1,512	1,395	1,132	1,440	2,123	756	257	753	993	976	2,242	1,512
2558	1,022	1,132	749	1,073	2,006	1,050	1,283	79	894	617	828	1,022
2559	1,066	1,510	952	617	1,695	272	1,656	373	1,751	1,360	572	1,066

4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

2560	1,911	1,453	915	1,226	1,150	1,052	1,267	312	1,576	-	1,931	1,911
2561	1,517	1,233	572	1,020	2,310	1,455	1,096	178	686	-	2,364	1,517
2562	1,380	1,470	1,217	1,032	1,990	1,362	1,067	605	1,022	-	1,227	1,380
2563	1,160	1,307	1,158	968	2,116	1,566	2,019	978	1,248	-	1,476	1,160
2564 ^{1/}	321	439	183	400	348	286	2,665	347	305	-	280	321
ต่ำสุด	373	827	572	617	1,043	272	257	178	686	617	572	373
เฉลี่ย	1,232	1,278	901	1,360	1,863	1,089	1,188	633	1,211	1,042	1,491	1,232
สูงสุด	1,911	1,510	1,217	3,653	2,330	1,566	2,019	1,055	1,751	1,360	2,364	1,911
	TD03	TD04	TD05	TD06	TD07	TD08	TD09	-	-	-	-	-
2555	1,222	992	889	1,584	334	1,051	727	-	-	-	-	-
2556	717	852	958	980	1,000	1,166	-	-	-	-	-	-
2557	1,125	396	882	218	121	1,015	-	-	-	-	-	-
2558	191	117	141	1,115	-	963	-	-	-	-	-	-
2559	1,268	878	1,180	306	447	574	-	-	-	-	-	-
2560	1,366	700	1,238	1,837	932	1,469	-	-	-	-	-	-
2561	792	318	982	3,056	819	-	13	-	-	-	-	-
2562	747	747	1,021	622	830	-	112	-	-	-	-	-
2563	767	422	1,196	1,007	948	-	-	-	-	-	-	-
2564 ^{1/}	181	91	319	392	349	-	-	-	-	-	-	-
ต่ำสุด	191	117	141	218	121	574	112	-	-	-	-	-
เฉลี่ย	911	602	943	1,192	679	1,040	420	-	-	-	-	-
สูงสุด	1,366	992	1,238	3,056	1,000	1,469	727	-	-	-	-	-

หมายเหตุ: ข้อมูล ณ วันที่ 24 พฤษภาคม พ.ศ. 2564

4.1.2.2 ข้อมูลน้ำท่า

ผลการวิเคราะห์สถิติข้อมูลน้ำท่ารายปีระหว่างปี พ.ศ. 2555-2564 จากสถานีโทรมาตรในกลุ่มน้ำปิงและลุ่มน้ำน่านของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ทำการตรวจวัดข้อมูลน้ำท่าของแม่น้ำสาขาที่ไหลเข้ามาสมทบกับแม่น้ำปิงและแม่น้ำน่านแสดงในตารางที่ 4-8 ถึงตารางที่ 4-9 โดยพบว่า เขื่อนภูมิพลมีปริมาณน้ำท่ารายปีต่ำสุดทั้ง 15 สถานีเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 0-93.34 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 1.10-270.02 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และปริมาณน้ำท่ารายปีสูงสุดในช่วงระหว่าง 3.31-494.60 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที สำหรับเขื่อนสิริกิติ์มีปริมาณน้ำท่ารายปีต่ำสุดทั้ง 18 สถานีเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 2.58-125.53 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 10.85-243.67 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และปริมาณน้ำท่ารายปีสูงสุดในช่วงระหว่าง 16.42-573.29 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที อย่างไรก็ตาม ข้อมูลน้ำท่าของสถานีที่คัดเลือกบริเวณด้านเหนือเขื่อนและท้ายเขื่อนภูมิพล

4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

และเขื่อนสิริกิติ์มีความผันผวนค่อนข้างสูง ส่วนหนึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนสูงของข้อมูลตรวจวัดซึ่งจำเป็นต้องผ่านการตรวจสอบความถูกต้องและทำการปรับแก้ก่อนนำไปใช้งาน

ตารางที่ 4-8 สถิติข้อมูลน้ำท่าเฉลี่ยรายปีจากสถานีโทรมาตรในกลุ่มน้ำปิงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2555-2564

ปี	น้ำท่ารายปีเฉลี่ย (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)											
	PU01	PU02	PU03	PU04	PU05	PD01	PD03	PD04	PD05	PD06	WD01	WD02
2555	26.87	107.86	15.83	322.71	410.94	3.19	3.31	452.94	195.89	494.60	40.62	45.28
2556	32.49	71.44	14.71	449.54	131.97	0.56	2.56	268.98	168.36	314.67	41.66	44.59
2557	-	181.78	4.86	376.25	145.98	0.24	1.28	204.95	152.51	142.43	7.68	40.48
2558	-	9.84	-	167.56	73.53	0.24	1.70	156.15	92.92	59.51	20.78	7.89
2559	-	86.75	-	76.63	51.85	19.48	1.02	128.90	59.82	-	-	-
2560	-	123.48	0.46	65.56	128.56	0.23	1.00	264.87	23.44	-	-	-
2561	-	100.88	0.83	211.52	161.81	0.23	0.00	257.05	51.84	-	-	-
2562	22.77	41.45	5.66	400.17	36.24	0.23	0.12	163.71	141.98	118.30	10.65	16.15
2563	102.59	61.20	13.30	402.10	8.14	-	0.00	191.90	30.96	86.19	0.23	13.11
2564 ^{1/}	-	44.67	14.54	228.17	-	-	0.00	93.34	15.90	89.50	0.00	0.55
ต่ำสุด	22.77	9.84	0.46	65.56	8.14	0.23	0.00	93.34	15.90	59.51	0.00	0.55
เฉลี่ย	46.18	82.94	8.77	270.02	127.67	3.05	1.10	218.28	93.36	186.46	17.37	24.01
สูงสุด	102.59	181.78	15.83	449.54	410.94	19.48	3.31	452.94	195.89	494.60	41.66	45.28

หมายเหตุ: ข้อมูล ณ วันที่ 24 พฤษภาคม พ.ศ. 2564

ตารางที่ 4-9 สถิติข้อมูลน้ำท่าเฉลี่ยรายปีจากสถานีโทรมาตรในกลุ่มน้ำน่านของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2555-2564

ปี	น้ำท่ารายปีเฉลี่ย (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)										
	TU02	TU03	TU04	TU07	TD01	TD02	TD03	TD04	TD06	TD08	TD09
2555	282.09	54.45	421.81	54.71	298.15	252.73	235.58	464.20	12.68	8.27	103.02
2556	157.85	80.22	97.64	62.69	169.29	107.89	102.78	172.59	9.81	7.79	106.59
2557	84.56	87.97	87.41	57.29	250.50	123.73	87.93	176.86	10.98	32.75	106.20
2558	399.17	83.07	144.57	48.93	88.57	51.80	88.58	169.96	7.65	25.13	108.20
2559	238.42	104.87	352.77	71.75	161.95	-	56.63	125.53	12.33	12.01	46.09
2560	83.79	96.16	573.29	69.07	181.55	-	110.44	271.58	14.59	3.25	100.32
2561	88.53	134.29	260.32	62.76	254.52	-	163.66	378.86	12.52	-	59.41
2562	6.88	66.37	181.21	29.49	291.12	62.70	116.25	278.99	8.90	-	12.08
2563	57.80	258.47	117.58	50.29	-	208.46	58.28	175.09	16.42	-	12.10
2564 ^{1/}	7.29	16.01	20.28	11.09	-	283.09	77.97	223.08	2.58	-	12.04

4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ต่ำสุด	6.88	16.01	20.28	11.09	88.57	51.80	56.63	125.53	2.58	3.25	12.04
เฉลี่ย	140.64	98.19	225.69	51.81	211.96	155.77	109.81	243.67	10.85	14.87	66.61
สูงสุด	399.17	258.47	573.29	71.75	298.15	283.09	235.58	464.20	16.42	32.75	108.20

หมายเหตุ: ข้อมูล ณ วันที่ 24 พฤษภาคม พ.ศ. 2564

4.1.3 ผลการรวบรวมข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ

งานวิจัยนี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำรายวันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จาก 2 แหล่งข้อมูลหลักคือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และกรมชลประทาน ทั้งเขื่อนเก็บกักและเขื่อนทดน้ำ จำนวน 11 เขื่อน ดังที่สรุปไว้ในตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 รายชื่อผลการรวบรวมข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ

ลำดับ	เขื่อน	ประเภทเขื่อน	ลักษณะข้อมูล	ช่วงข้อมูล	แหล่งข้อมูล
1	ภูมิพล	เขื่อนเก็บกัก	รายวัน	2512-2564	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
2	สิริกิติ์	เขื่อนเก็บกัก	รายวัน	2517-2564	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
3	แควน้อยบำรุงแดน	เขื่อนเก็บกัก	รายวัน	2552-2564	กรมชลประทาน
4	ป่าสักชลสิทธิ์	เขื่อนเก็บกัก	รายวัน	2546-2564	กรมชลประทาน
5	กิวลม	เขื่อนเก็บกัก	รายวัน	2543-2564	กรมชลประทาน
6	กิวคอหมา	เขื่อนเก็บกัก	รายวัน	2552-2564	กรมชลประทาน
7	กระเสี้ยว	เขื่อนเก็บกัก	รายวัน	2543-2564	กรมชลประทาน
8	ทับเสลา	เขื่อนเก็บกัก	รายวัน	2545-2564	กรมชลประทาน
9	เจ้าพระยา	เขื่อนทดน้ำ	รายวัน	2543-2564	กรมชลประทาน
10	พระรามหก	เขื่อนทดน้ำ	รายวัน	2538-2564	กรมชลประทาน
11	นเรศวร	เขื่อนทดน้ำ	รายวัน	2552-2564	กรมชลประทาน

4.1.4 ผลการรวบรวมข้อมูลพื้นที่โครงการชลประทานในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

ผลการรวบรวมข้อมูลพื้นที่โครงการชลประทาน (Irrigation Command Area) ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จาก GIS Shape File ล่าสุดในปี พ.ศ. 2564 ของกรมชลประทานดังแสดงในตารางที่ 4-11 ที่แสดงขอบเขตพื้นที่โครงการชลประทานซึ่งประกอบไปด้วยพื้นที่เกษตรกรรม (Agricultural Area) ทั้งในส่วน of พื้นที่เพาะปลูก (Cultivated Area) และพื้นที่ทำการปศุสัตว์ ตลอดจนพื้นที่อื่น ๆ เช่น พื้นที่ป่าไม้ แหล่งน้ำชุมชน อุตสาหกรรม พื้นที่เขตคลองและถนน เป็นต้น พบว่า มีการขยายพื้นที่โครงการชลประทานในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่เพิ่มขึ้นจากเดิม 8.85 ล้านไร่ ในปี พ.ศ. 2560 ไปเป็น 12.28 ล้านไร่ในปี พ.ศ. 2564 หรือเพิ่มขึ้นกว่า 3.43 ล้านไร่ หรือคิดเป็น 38.81% จากฐานข้อมูลพื้นที่โครงการชลประทานในปี พ.ศ. 2560 ตามที่ได้สรุปไว้ในบทที่ 2 ตารางที่ 2-14

จากรูปที่ 4-1 และรูปที่ 4-2 แสดงถึงพื้นที่โครงการชลประทานในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่แยกตามโครงการโดยมีขนาดพื้นที่ตั้งแต่เล็กสุด 76,661 ไร่ ในเขตพื้นที่โครงการชลประทานทุ่งวัดสิงห์ ไปจนถึงขนาด

ใหญ่สุด 835,113 ไร่ ในเขตพื้นที่โครงการชลประทานวังบัว และเมื่อแยกตามโซนการส่งน้ำจำนวน 6 โซน โดยแบ่งเป็น (1) ปิงตอนล่าง (2) น่านตอนล่าง (3) เจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน (4) เจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนล่าง (5) เจ้าพระยาฝั่งตะวันออกตอนบน และ (6) เจ้าพระยาฝั่งตะวันออกตอนล่างพบว่ามีความหนาแน่นพื้นที่โครงการชลประทานทั้งสิ้น 2,160,792, 1,228,711, 3,450,291, 986,069, 1,607,682 และ 2,851,338 ไร่ตามลำดับ

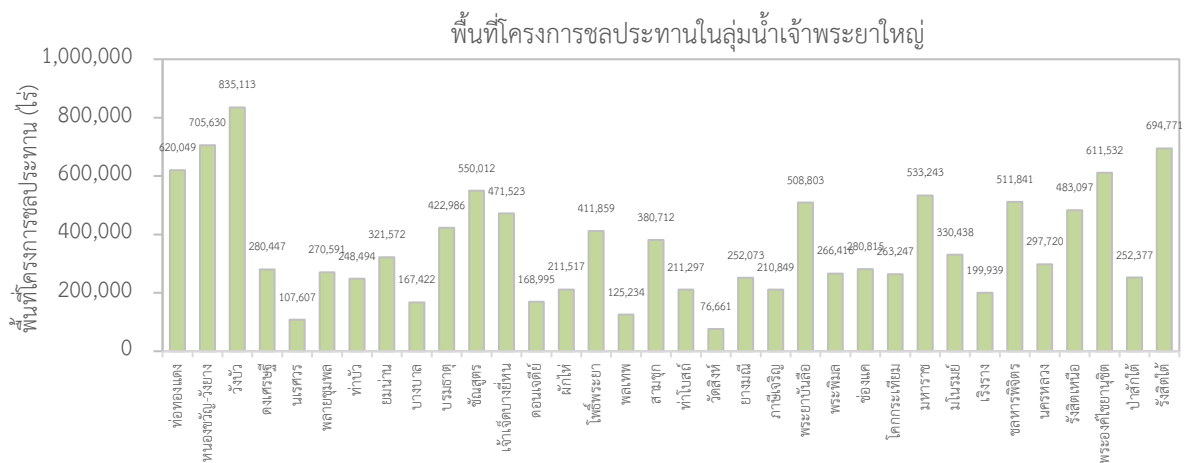
ตารางที่ 4-11 ข้อมูลพื้นที่โครงการชลประทานในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ในปี พ.ศ. 2564

รหัสย่อ	โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา	พื้นที่โครงการชลประทาน (ไร่)	โซนการส่งน้ำ	พื้นที่โครงการชลประทานแยกตามโซนการส่งน้ำ (ไร่)	เปอร์เซ็นต์พื้นที่โครงการชลประทานแยกตามโซนการส่งน้ำ (%)
โครงการชลประทานลุ่มน้ำปิงตอนล่าง					
TTD	ท่อทองแดง	620,049	โซนการส่งน้ำลุ่มน้ำปิงตอนล่าง	2,160,792	17.59
WB	วังบัว	835,113			
WY- NK	วังยางหนองขวัญ	705,630			
โครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง					
DST	ดงเศรษฐี	280,447	โซนการส่งน้ำลุ่มน้ำน่านตอนล่าง	1,228,711	10.00
NR	นเรศวร	107,607			
PCP	พลาญชุมพล	270,591			
TBA	ท่าบัว	248,494			
YN	ยมน่าน	321,572			
โครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน					
BB	บางบาล	167,422	โซนการส่งน้ำลุ่มน้ำเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน	3,450,291	28.09
BRT	บรมธาตุ	422,986			
CNS	ชั้นสูตร	550,012			
CCB	เจ้าเจ็ดบางยี่หน	471,523			
DJD	ดอนเจดีย์	168,995			
PH	ผักไห่	211,517			
PPY	โพธิ์พระยา	411,859			
PLT	พลเทพ	125,234			
SC	สามชุก	380,712			
TB	ท่าโบสถ์	211,297			
WS	ทุ่งวัดสิงห์	76,661			
YMN	ยางมณี	252,073			
PSC	ภาษีเจริญ	210,849	โซนการส่งน้ำลุ่มน้ำเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนล่าง	986,069	8.03
PYB	พระยาบันลือ	508,803			
PPM	พระพิมล	266,416			

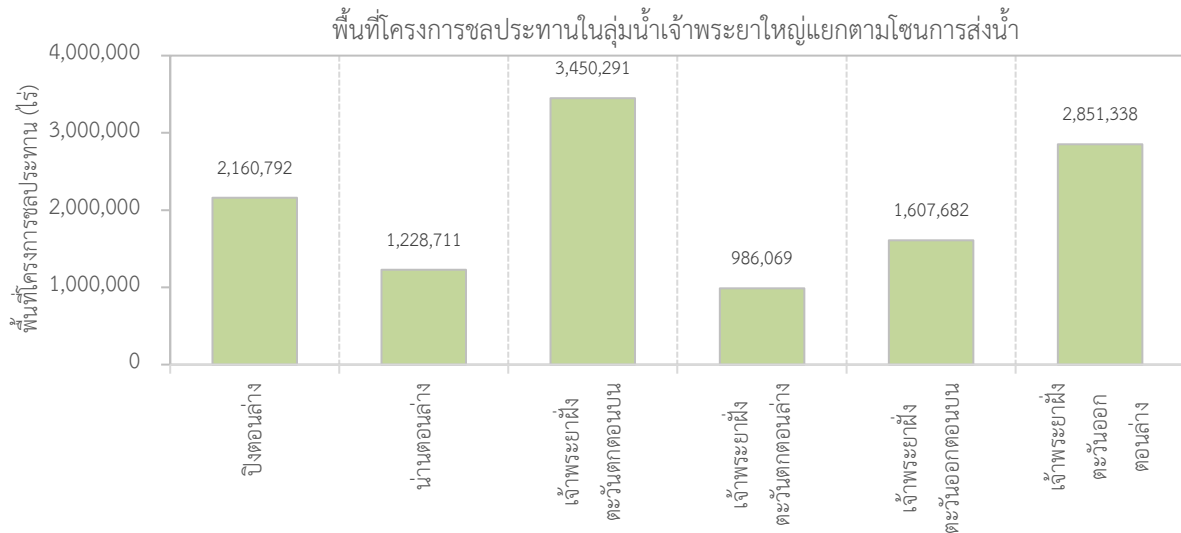
4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

รหัสย่อ	โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา	พื้นที่โครงการชลประทาน (ไร่)	โซนการส่งน้ำ	พื้นที่โครงการชลประทานแยกตามโซนการส่งน้ำ (ไร่)	เปอร์เซ็นต์พื้นที่โครงการชลประทานแยกตามโซนการส่งน้ำ (%)
CK	ช่องแค	280,815	โซนการส่งน้ำ กลุ่มน้ำเจ้าพระยาฝั่ง ตะวันออกตอนบน	1,607,682	13.09
KKT	โคกกระเทียม	263,247			
MHR	มหาราช	533,243			
MNR	มโนรมย์	330,438			
RR	เริงราง	199,939			
CHP	ชลหารพิจิตร (คลองด่าน)	511,841	โซนการส่งน้ำ กลุ่มน้ำเจ้าพระยาฝั่ง ตะวันออกตอนล่าง	2,851,338	23.21
NL	นครหลวง	297,720			
NRS	รังสิตเหนือ	483,097			
PON	พระองค์ไชยานุชิต	611,532			
SP	ป่าสักใต้	252,377			
SR	รังสิตใต้	694,771			
รวมพื้นที่		12,284,883		12,284,883	100.00

หมายเหตุ: ข้อมูลพื้นที่โครงการชลประทานจาก Shape File ปี พ.ศ. 2564



รูปที่ 4-1 พื้นที่โครงการชลประทานในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่



รูปที่ 4-2 พื้นที่โครงการชลประทานในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่แยกตามโซนการจัดส่งน้ำ

4.2 ผลการศึกษาและวิจัย

4.2.1 ผลการวิเคราะห์แนวทางการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำร่วมกันของเขื่อนหลักปัจจุบันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

4.2.1.1 ผลการวิเคราะห์แนวทางการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำร่วมกันของเขื่อนหลัก

4.2.1.1.1 สถานะของปริมาณน้ำต้นทุน ปริมาณการระบายน้ำ และแผนการระบายน้ำ

(1) เขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

สถิติข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายเดือนและรายปีของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2564 (ข้อมูลถึงวันที่ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2564) ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4-12 และตารางที่ 4-13 และแสดงในรูปที่ 4-3 ถึงรูปที่ 4-6 และแผนการจัดสรรน้ำและการระบายน้ำจริงจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์สรุปไว้ในตารางที่ 4-14 และรูปที่ 4-7

ตารางที่ 4-12 สถิติข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพล

ปี	ปีน้ำ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี	ม.ค.-มิ.ย.	ก.ค.-ธ.ค.
ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพล (ล้านลูกบาศก์เมตร)																
2543	NY	109.5	94.7	46.2	176.8	696.3	645.1	483.6	623.3	1,095.7	949.8	518.4	194.4	5,634	1,769	3,865
2544	NY	99.0	29.4	134.5	0.0	234.0	150.0	408.9	1,406.0	758.7	745.8	529.5	193.5	4,689	647	4,042
2545	WY	126.4	48.3	12.3	16.2	379.4	251.2	326.3	945.5	2,990.2	1,111.8	1,286.9	589.4	8,084	834	7,250
2546	NY	384.3	205.3	149.2	65.9	133.7	126.2	354.0	444.4	1,134.9	423.5	137.4	7.7	3,566	1,065	2,502
2547	NY	3.3	0.0	0.0	0.0	350.1	663.1	467.9	795.6	1,454.6	597.6	198.9	109.2	4,640	1,016	3,624
2548	NY	25.9	17.7	23.7	71.2	50.9	240.4	466.1	952.9	2,658.8	1,231.3	848.3	307.9	6,895	430	6,465
2549	WY	143.5	58.6	40.4	150.1	643.0	515.0	705.3	1,274.3	2,762.6	1,633.6	440.3	254.0	8,621	1,551	7,070

ปี	ปีน้ำ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี	ม.ค.-มิ.ย.	ก.ค.-ธ.ค.
2550	NY	163.8	101.8	19.4	0.9	993.9	447.1	320.9	651.5	1,346.5	1,834.4	481.7	221.2	6,583	1,727	4,856
2551	NY	75.2	35.5	0.0	10.3	560.0	289.0	248.6	709.2	1,111.8	1,588.6	1,064.2	218.4	5,911	970	4,941
2552	NY	43.7	0.0	23.6	28.6	390.2	688.1	579.8	663.7	1,452.2	1,969.5	376.1	89.1	6,305	1,174	5,130
2553	NY	30.0	0.1	0.0	0.0	0.0	21.5	150.4	1,123.6	1,508.9	2,067.2	427.1	120.8	5,449	52	5,398
2554	WY	11.6	4.3	157.1	244.0	1017.9	928.9	961.0	2,646.1	2,877.2	2,812.8	670.1	395.5	12,726	2,364	10,363
2555	NY	285.0	75.1	4.9	54.3	345.4	298.3	336.1	674.3	1,518.3	764.3	331.3	119.3	4,806	1,063	3,743
2556	NY	28.2	38.4	56.7	8.6	10.4	45.8	153.4	786.0	1,275.7	1,136.7	516.8	223.6	4,280	188	4,092
2557	DY	67.5	39.5	13.7	35.0	63.0	90.4	244.8	577.5	1,049.8	619.2	361.0	89.3	3,251	309	2,942
2558	DY	117.1	23.3	23.7	16.5	4.0	26.8	170.2	523.8	447.1	329.7	179.1	54.6	1,916	211	1,704
2559	NY	22.7	21.0	7.3	2.8	1.6	150.3	369.2	497.8	1,341.6	866.3	490.9	93.2	3,865	206	3,659
2560	NY	79.2	22.4	13.7	15.0	431.0	389.0	621.7	792.0	1,141.9	2,373.4	509.9	201.6	6,591	950	5,640
2561	NY	129.8	33.8	28.2	23.5	289.9	597.0	657.0	842.0	711.7	1,311.1	395.3	150.1	5,169	1,102	4,067
2562	DY	110.6	34.4	22.9	33.1	69.9	18.2	28.2	894.1	977.3	415.3	166.9	45.1	2,816	289	2,527
2563	DY	22.0	13.1	13.0	21.4	35.8	27.9	90.8	698.8	734.3	483.8	347.5	34.1	2,522	133	2,389
2564	DY*	16.7	10.7	9.0	105.5	75.9	35.6	511.1	245.2*	-	-	-	-	1,010*	253	756*
ต่ำสุด	-	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	18.2	28.2	245.2	447.1	329.7	137.4	7.7	1,916	52	756
เฉลี่ย	-	95.2	41.2	36.3	49.1	308.0	302.0	393.4	853.1	1,445.2	1,203.1	489.4	176.8	5,444	832	4,410
สูงสุด	-	384.3	205.3	157.1	244.0	1017.9	928.9	961.0	2,646.1	2,990.2	2,812.8	1,286.9	589.4	12,726	2,364	10,363
ปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพล (ล้านลูกบาศก์เมตร)																
2543	NY	341.9	592.7	682.2	441.7	280.5	85.5	77.2	332.7	196.3	53.9	110.4	318.4	3,513	2,425	1,089
2544	NY	528.8	651.9	535.3	673.6	411.3	108.7	282.3	132.9	127.9	124.8	83.2	345.7	4,006	2,910	1,097
2545	WY	461.4	584.1	790.8	680.1	541.0	254.8	322.4	207.9	44.0	284.5	1,148.1	736.2	6,055	3,312	2,743
2546	NY	721.9	860.7	993.3	916.1	1,041.4	857.7	430.4	360.0	168.9	217.9	650.9	659.1	7,878	5,391	2,487
2547	NY	617.0	634.9	694.8	599.0	331.9	146.9	356.8	183.6	167.9	228.2	455.3	326.1	4,742	3,025	1,718
2548	NY	446.8	409.6	466.5	388.3	421.1	463.6	279.4	237.1	152.9	187.7	349.9	536.0	4,339	2,596	1,743
2549	WY	735.2	618.3	619.4	591.9	368.9	324.9	305.6	354.4	135.5	936.9	459.8	927.1	6,378	3,259	3,119
2550	NY	959.4	974.9	1041.4	853.0	270.0	663.9	911.6	595.4	266.5	95.8	361.4	884.0	7,877	4,762	3,115
2551	NY	1073.7	985.9	1052.5	1,130.5	331.3	321.3	395.7	251.3	210.1	169.5	155.7	713.6	6,791	4,895	1,896
2552	NY	991.8	919.7	951.8	894.0	493.6	327.7	277.5	387.7	240.4	139.3	362.1	906.1	6,892	4,579	2,313
2553	NY	932.5	972.2	922.2	558.7	376.3	256.9	186.5	86.9	55.9	55.2	142.2	594.7	5,140	4,019	1,121
2554	WY	806.2	805.5	505.4	307.9	108.1	104.7	167.2	666.8	783.3	1,946.5	720.8	1,008.8	7,931	2,638	5,293
2555	NY	1,749.1	1,757.1	1,517.1	926.1	901.3	281.5	332.4	259.4	74.8	84.0	567.0	734.8	9,185	7,132	2,052
2556	NY	861.6	617.3	410.5	349.3	630.6	366.3	219.8	131.1	91.2	54.6	111.7	459.3	4,303	3,236	1,068
2557	DY	527.4	552.2	412.9	271.8	568.9	670.0	310.8	168.2	57.4	80.1	121.2	198.7	3,939	3,003	936
2558	DY	217.8	197.3	217.6	271.7	640.2	369.4	203.6	155.5	92.3	45.9	131.2	137.5	2,680	1,914	766
2559	NY	151.6	145.0	156.1	150.8	144.2	90.9	93.5	93.6	64.2	31.1	47.4	282.5	1,451	839	612
2560	NY	333.6	312.6	344.6	303.3	295.5	126.9	145.1	107.1	68.0	27.6	70.6	590.9	2,726	1,716	1,009
2561	NY	704.6	778.3	716.5	533.5	588.5	548.0	434.1	253.7	220.4	243.8	452.8	718.7	6,193	3,869	2,323
2562	DY	695.4	577.9	599.1	477.0	660.1	666.0	697.9	320.4	74.1	291.5	302.5	266.7	5,628	3,675	1,953
2563	DY	219.2	204.3	219.0	210.8	277.8	200.1	146.6	157.1	141.5	45.6	134.5	201.0	2,158	1,331	826
2564	DY*	201.6	190.0	195.9	181.9	217.5	341.3	209.4	129.5*	-	-	-	-	1,667*	1,328	339*

4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)

โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ปี	ปีน้ำ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี	ม.ค.-มิ.ย.	ก.ค.-ธ.ค.
ต่ำสุด	-	151.6	145.0	156.1	150.8	108.1	85.5	77.2	86.9	44.0	27.6	47.4	137.5	1,451	839	339
เฉลี่ย	-	649.0	651.9	638.4	532.3	450.0	344.4	308.4	253.3	163.5	254.5	330.4	549.8	5,229	3,266	1,801
สูงสุด	-	1,749.1	1,757.1	1,17.1	1,130.5	1,041.4	857.7	911.6	666.8	783.3	1,946.5	1,148.1	1,008.8	9,185	7,132	5,293

หมายเหตุ: * ข้อมูลถึงวันที่ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2564

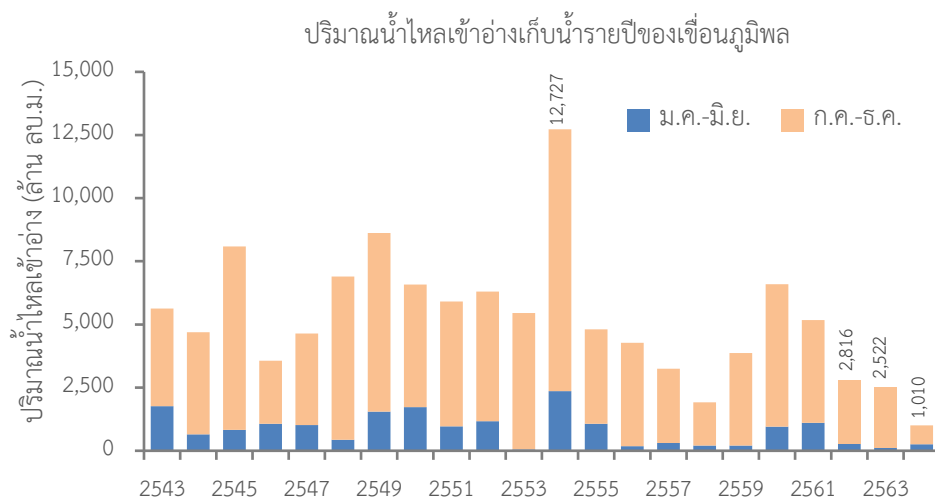
ตารางที่ 4-13 สถิติข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนสิริกิติ์

ปี	ปีน้ำ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี	ม.ค.-มิ.ย.	ก.ค.-ธ.ค.
ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนสิริกิติ์ (ล้านลูกบาศก์เมตร)																
2543	NY	141.7	146.3	101.2	111.1	421.0	517.4	1,181.0	1,054.8	1,433.0	643.2	287.5	175.8	6,214	1,439	4,775
2544	NY	138.3	107.8	201.8	83.3	283.6	333.3	1,202.9	2,740.7	1,642.4	609.8	286.0	176.7	7,807	1,148	6,659
2545	WY	146.4	123.3	91.0	61.4	547.1	653.4	777.7	1,531.1	1,668.5	621.5	327.5	219.9	6,769	1,623	5,146
2546	NY	186.5	143.0	158.8	102.2	120.3	268.0	934.0	1,243.6	1,607.0	370.2	215.7	132.7	5,482	979	4,503
2547	NY	137.7	105.1	81.4	127.1	221.6	665.7	1,239.2	1,596.0	2,225.2	511.3	258.7	178.0	7,347	1,339	6,008
2548	NY	168.5	108.3	111.8	114.2	108.0	450.6	685.8	1,771.7	1,867.7	847.8	322.1	203.3	6,760	1,061	5,698
2549	WY	169.3	124.5	92.5	165.5	467.9	287.2	727.8	2,356.7	1,535.5	936.3	265.8	213.3	7,342	1,307	6,035
2550	NY	163.6	139.9	121.8	105.0	264.6	361.1	391.4	1,091.9	1,035.0	896.1	275.9	184.0	5,030	1,156	3,874
2551	NY	136.8	144.8	103.6	135.7	301.5	772.4	1,503.2	2,095.1	1,136.9	654.1	367.8	223.1	7,575	1,595	5,980
2552	NY	180.7	142.6	129.4	140.8	205.2	329.3	1,103.8	769.6	775.0	466.0	215.9	142.5	4,601	1,128	3,473
2553	NY	135.5	97.4	84.1	68.9	115.0	154.9	634.6	2,288.4	1,761.2	513.0	207.2	188.9	6,249	656	5,593
2554	WY	116.1	93.5	117.3	134.3	525.7	1,237.7	1,945.6	3,096.0	2,320.7	1,031.1	365.0	243.8	11,227	2,224	9,002
2555	NY	215.7	142.9	119.9	147.2	448.4	273.2	628.4	1,290.7	1,211.9	454.0	300.4	211.0	5,444	1,347	4,096
2556	NY	122.5	108.1	92.0	78.5	133.5	160.3	598.3	1,404.2	1,060.0	429.1	198.0	150.7	4,535	695	3,840
2557	DY	118.8	98.4	86.0	88.0	181.7	209.4	728.0	1,094.7	1,287.5	430.8	262.4	126.6	4,712	782	3,930
2558	DY	133.6	94.1	92.3	106.5	127.2	149.5	353.4	944.3	812.2	618.7	215.3	170.7	3,818	703	3,115
2559	NY	117.8	82.6	66.9	46.5	199.0	275.6	799.3	1,919.1	1,407.7	630.1	242.2	143.0	5,930	788	5,141
2560	NY	178.1	94.8	52.4	129.4	209.6	209.1	1,163.1	1,101.7	1,167.4	885.4	266.8	212.2	5,670	873	4,797
2561	NY	178.1	113.8	127.9	179.8	265.2	605.1	1,639.4	1,919.8	1,271.8	493.8	239.3	166.3	7,200	1,470	5,730
2562	DY	132.9	84.5	81.7	72.4	89.5	135.0	133.7	1,817.1	868.3	251.9	130.4	74.2	3,872	596	3,276
2563	DY	66.9	40.3	58.5	67.3	90.2	272.9	333.8	2,026.3	964.7	395.9	163.9	92.1	4,573	596	3,977
2564	DY*	69.5	85.0	103.5	185.1	154.9	423.8	525.9	518.0*	-	-	-	-	2,066*	1,022	1,044*
ต่ำสุด	-	66.9	40.3	52.4	46.5	89.5	135.0	133.7	518.0	775.0	251.9	130.4	74.2	3,818	596	1,044
เฉลี่ย	-	143.4	110.0	103.4	111.4	249.1	397.5	874.1	1,621.4	1,383.8	604.3	257.8	172.8	6,103	1,115	4,804
สูงสุด	-	215.7	146.3	201.8	185.1	547.1	1,237.7	1,945.6	3,096.0	2,320.7	1,031.1	367.8	243.8	11,227	2,224	9,002
ปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนสิริกิติ์ (ล้านลูกบาศก์เมตร)																
2543	NY	599.1	917.3	1,006.4	777.8	452.1	371.5	273.0	333.6	127.6	280.6	332.0	526.7	5,998	4,124	1,874
2544	NY	765.3	894.8	806.7	969.9	406.2	148.2	407.1	724.8	1,280.5	230.3	186.8	479.2	7,300	3,991	3,309
2545	WY	683.4	830.0	979.5	943.0	739.7	379.8	628.7	473.8	42.9	217.1	285.6	244.1	6,447	4,555	1,892
2546	NY	683.5	786.7	847.3	638.8	884.4	494.8	517.3	428.8	96.8	234.3	629.0	549.8	6,791	4,336	2,456
2547	NY	572.8	699.5	802.4	762.8	440.2	167.5	406.3	186.7	372.7	339.3	667.4	830.5	6,248	3,445	2,803
2548	NY	875.6	838.9	948.8	744.8	806.7	420.0	406.1	215.2	101.1	229.2	298.8	683.3	6,568	4,635	1,934
2549	WY	804.9	817.7	930.8	864.5	374.4	288.3	222.5	264.0	255.0	413.5	300.2	788.6	6,325	4,081	2,244

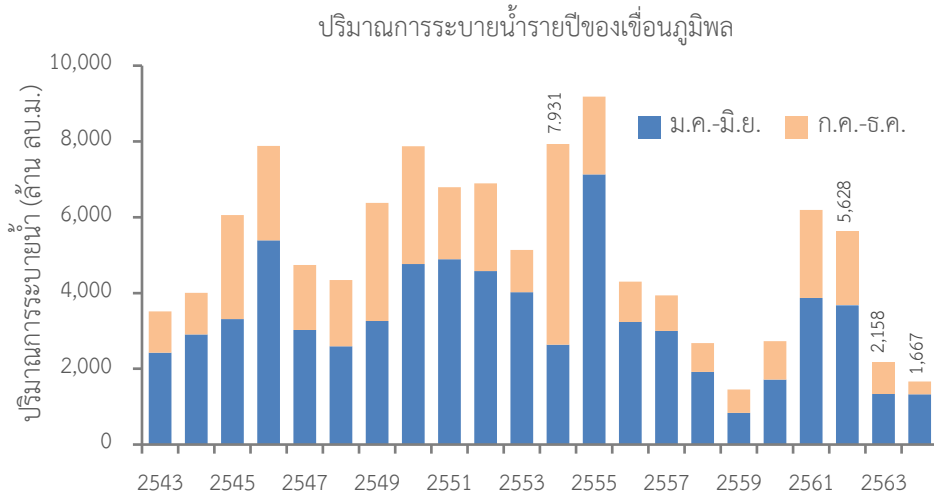
4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)

ปี	ปีน้ำ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี	ม.ค.-มิ.ย.	ก.ค.-ธ.ค.
2550	NY	939.0	813.7	850.3	739.8	264.3	500.2	526.4	527.1	276.3	208.6	449.2	642.6	6,737	4,107	2,630
2551	NY	756.1	673.4	722.0	778.8	488.7	427.4	483.0	349.1	275.7	248.8	330.5	719.0	6,253	3,846	2,406
2552	NY	854.5	790.1	940.3	878.3	683.7	394.4	286.5	392.1	297.3	247.6	354.2	596.6	6,716	4,541	2,174
2553	NY	594.7	589.5	541.6	366.2	250.6	328.5	265.8	131.8	60.0	110.9	180.6	511.7	3,932	2,671	1,261
2554	WY	926.4	927.9	769.6	395.4	213.0	183.1	508.8	1,644.7	1,820.6	903.8	422.7	864.3	9,580	3,415	6,165
2555	NY	1,235.0	1,377.8	935.8	762.0	696.4	691.6	478.9	361.0	121.3	191.2	541.3	760.8	8,153	5,699	2,454
2556	NY	883.3	656.5	479.2	346.0	427.3	342.6	277.2	181.8	113.7	87.5	121.4	368.4	4,285	3,135	1,150
2557	DY	520.3	562.5	501.2	391.3	601.4	537.9	523.7	200.9	76.5	93.9	91.3	199.1	4,300	3,115	1,185
2558	DY	274.6	298.0	354.6	510.7	956.3	723.7	449.5	315.1	191.7	123.2	250.5	264.4	4,712	3,118	1,594
2559	NY	295.8	291.7	312.5	301.5	317.2	313.7	257.5	170.9	65.7	79.2	141.0	556.4	3,103	1,833	1,271
2560	NY	757.0	772.0	754.8	474.7	421.2	243.9	201.5	110.9	88.7	20.4	104.6	765.9	4,716	3,424	1,292
2561	NY	824.0	758.3	743.5	631.5	659.5	545.8	476.0	862.7	324.3	299.9	539.0	783.1	7,448	4,163	3,285
2562	DY	835.7	693.3	703.9	571.0	724.3	616.0	577.9	244.8	156.9	395.4	332.1	317.3	6,169	4,144	2,024
2563	DY	318.0	268.2	330.8	327.1	347.5	322.6	448.1	263.0	279.6	191.4	295.8	419.4	3,811	1,914	1,897
2564	DY*	495.5	420.9	545.6	426.5	440.6	574.6	496.4	270.8*	-	-	-	-	3,671*	2,904	767*
ต่ำสุด	-	274.6	268.2	312.5	301.5	213.0	148.2	201.5	110.9	42.9	20.4	91.3	199.1	3,103	1,833	767
เฉลี่ย	-	704.3	712.7	718.5	618.3	527.1	409.8	414.5	393.3	305.9	245.0	326.4	565.3	5,981	3,691	2,185
สูงสุด	-	1,235.0	1,377.8	1,006.4	969.9	956.3	723.7	628.7	1,644.7	1,820.6	903.8	667.4	864.3	9,580	5,699	6,165

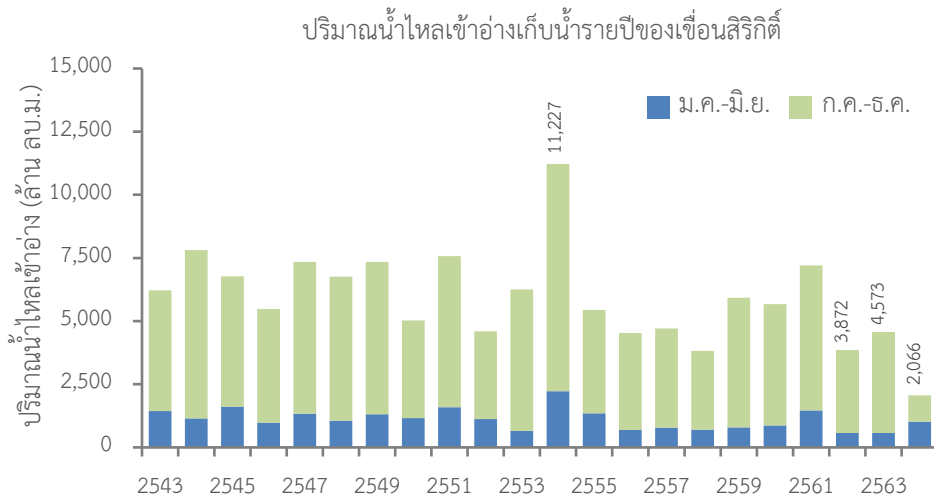
หมายเหตุ: * ข้อมูลถึงวันที่ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2564



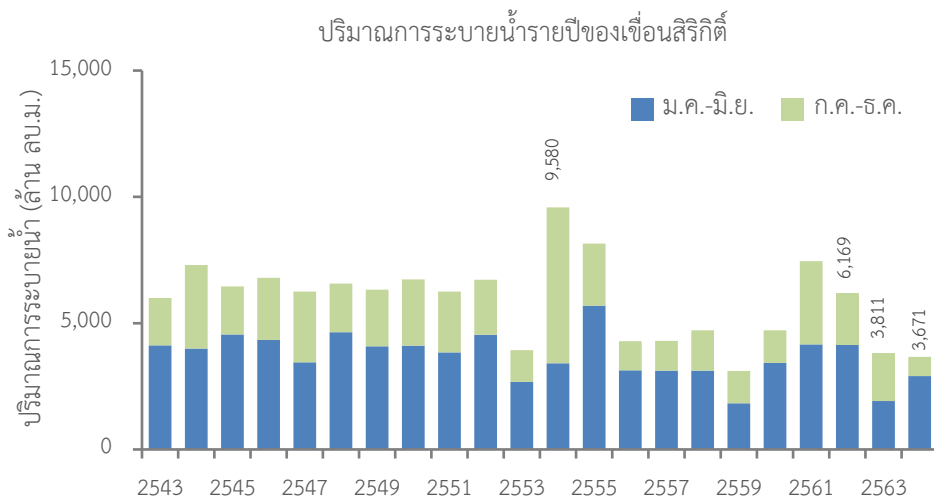
รูปที่ 4-3 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2564



รูปที่ 4-4 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2564



รูปที่ 4-5 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2564



รูปที่ 4-6 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2564

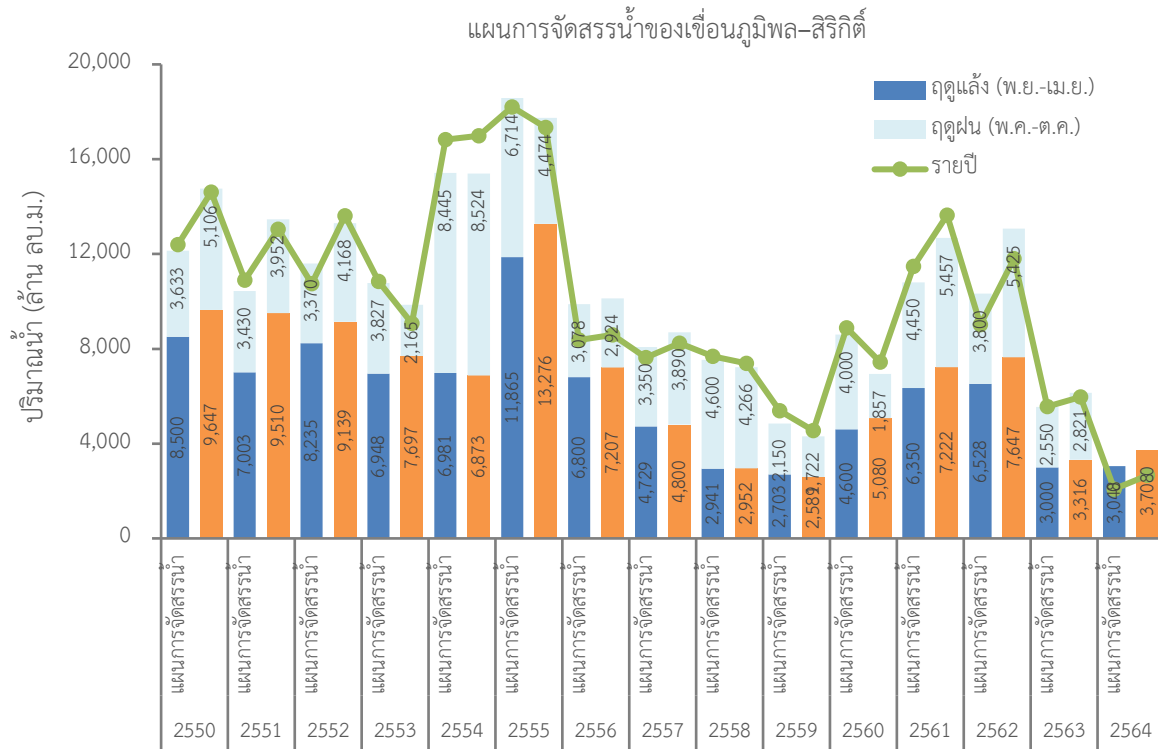
4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ตารางที่ 4-14 แผนการจัดสรรน้ำและการระบายน้ำจริงจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

ปีเพาะปลูก	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	แผนการจัดสรรน้ำ	การระบายน้ำจริง
2549/2550	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	8,500	9,647
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	3,633	5,106
	รายปี	12,402	14,615
2550/2551	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	7,003	9,510
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	3,430	3,952
	รายปี	10,900	13,044
2551/2552	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	8,235	9,139
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	3,370	4,168
	รายปี	10,750	13,607
2552/2553	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	6,948	7,697
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	3,827	2,165
	รายปี	10,849	9,072
2553/2554	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	6,981	6,873
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	8,445	8,524
	รายปี	16,819	16,985
2554/2555	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	11,865	13,276
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	6,714	4,474
	รายปี	18,205	17,338
2555/2556	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	6,800	7,207
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	3,078	2,924
	รายปี	8,372	8,588
2556/2557	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	4,729	4,800
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	3,350	3,890
	รายปี	7,633	8,239
2557/2558	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	2,941	2,952
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	4,600	4,266
	รายปี	7,687	7,392
2558/2559	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	2,703	2,589
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	2,150	1,722
	รายปี	5,390	4,554
2559/2560	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	4,600	5,080
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	4,000	1,857
	รายปี	8,881	7,441
2560/2561	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	6,350	7,222

4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ปีเพาะปลูก	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	แผนการจัดสรรน้ำ	การระบายน้ำจริง
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	4,450	5,457
	รายปี	11,482	13,640
2561/2562	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	6,528	7,647
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	3,800	5,425
	รายปี	9,016	11,797
2562/2563	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	3,000	3,316
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	2,550	2,821
	รายปี	5,569	5,969
2563/2564	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	3,048	3,708
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	2,300	NA
	รายปี	5,348	NA
ค่าเฉลี่ยระยะยาว	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	6,445	7,190
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	4,415	4,365
	รายปี	11,073	11,714
ค่าเฉลี่ยในปีน้ำมาก	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	6,981 (Δ -0.27%)	6,873
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	8,445 (Δ +119.35%)	8,524
	รายปี	16,819 (Δ +55.69%)	16,985
ค่าเฉลี่ยในปีน้ำปกติ	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	7,000	7,930
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	3,850	3,536
	รายปี	10,803	11,322
ค่าเฉลี่ยในปีน้ำน้อย	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	4,049 (Δ -42.16%)	4,485
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	3,320 (Δ -13.77%)	4,101
	รายปี	7,051 (Δ -34.73%)	8,349



รูปที่ 4-7 แผนการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. พ.ศ. 2550-2564

จากข้อมูลในตารางข้างต้นพบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 เท่ากับ 5,444 และ 6,103 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี อย่างไรก็ตามหลังเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ปี พ.ศ. 2554 พบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญกล่าวคือ ระหว่างปี พ.ศ. 2555-2563 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลรายปีเฉลี่ย 3,913 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือลดลงจากค่าเฉลี่ยระยะยาวถึง 1,531 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนสิริกิติ์รายปีเฉลี่ย 5,084 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือลดลงจากค่าเฉลี่ยระยะยาวถึง 1,019 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี นอกจากนี้ ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีมีความผันแปรค่อนข้างสูงในช่วงระหว่าง 1,916-12,726 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี สำหรับเขื่อนภูมิพล และระหว่าง 3,818-11,227 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี สำหรับเขื่อนสิริกิติ์

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์พบว่า ปริมาณการระบายน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 เท่ากับ 5,229 และ 5,981 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ปริมาณการระบายน้ำรายปีมีความผันแปรค่อนข้างสูงในช่วงระหว่าง 1,451-9,185 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี สำหรับเขื่อนภูมิพล และระหว่าง 3,103-9,580 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี สำหรับเขื่อนสิริกิติ์ ยิ่งไปกว่านั้น ปริมาณการระบายน้ำของทั้งสองเขื่อนหลักผันแปรตามแผนการจัดสรรน้ำและพบว่า การระบายน้ำจริงโดยส่วนใหญ่ยังสูงกว่าแผนการจัดสรรน้ำทั้งในช่วงเพาะปลูกฤดูแล้งและฤดูฝน

ผลการวิเคราะห์แผนการจัดสรรน้ำจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์พบว่า ค่าเฉลี่ยระยะยาวของแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีมีค่าเท่ากับ 6,445,

4,415 และ 11,073 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของแผนการจัดสรรน้ำในปีน้ำปกติกล่าวคือในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีมีค่าเท่ากับ 7,000, 3,850 และ 10,803 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ สำหรับในปีน้ำมากพบว่า มีแนวโน้มปรับเพิ่มจากแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีจากปีน้ำปกติเท่ากับ -0.27%, +119.35% และ +55.69% ตามลำดับ และในปีน้ำน้อยพบว่า มีการปรับลดจากแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีจากปีน้ำปกติเท่ากับ -42.16%, -13.77% และ -34.73% ตามลำดับ

(2) เชื้อนแควน้อยบำรุงแดน

สถิติข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายเดือนและรายปีของเชื้อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 (ข้อมูลถึงวันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2564) ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4-15 และแสดงในรูปที่ 4-8 และรูปที่ 4-9 และแผนการจัดสรรน้ำและการระบายน้ำจริงจากเชื้อนแควน้อยบำรุงแดนสรุปไว้ในตารางที่ 4-16 และรูปที่ 4-10

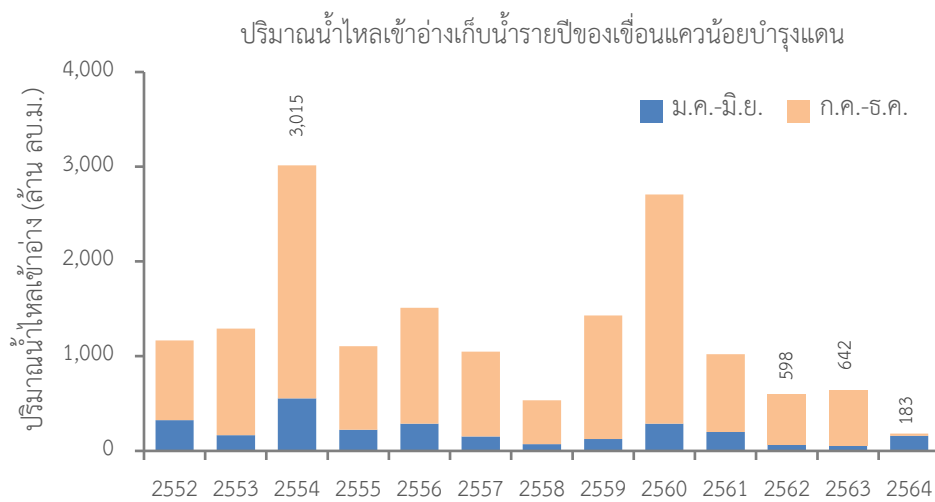
ตารางที่ 4-15 สถิติข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำของเชื้อนแควน้อยบำรุงแดน

ปี	ปีน้ำ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี	ม.ค.-มิ.ย.	ก.ค.-ธ.ค.
ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเชื้อนแควน้อยบำรุงแดน (ล้านลูกบาศก์เมตร)																
2552	NY	17.1	23.2	21.5	29.6	94.0	141.2	179.7	113.1	205.2	231.7	67.7	43.6	1,167	326	841
2553	NY	42.5	25.7	31.2	14.4	19.7	33.4	75.4	215.6	470.2	222.5	72.6	69.3	1,292	167	1,126
2554	WY	36.6	55.6	49.1	55.7	131.8	224.7	257.4	802.0	899.1	438.1	28.6	36.7	3,015	554	2,462
2555	NY	51.3	33.0	17.4	13.6	52.2	56.0	110.5	160.2	372.9	144.7	47.9	45.0	1,105	223	881
2556	NY	25.4	14.3	26.8	26.0	55.7	140.5	133.2	284.9	426.9	276.7	66.8	32.1	1,509	289	1,221
2557	DY	21.6	7.8	14.7	26.5	25.0	55.9	78.3	275.6	333.7	143.5	59.0	7.5	1,049	151	898
2558	DY	8.0	10.1	4.0	12.2	15.2	23.3	76.4	132.4	83.1	133.1	23.9	14.3	536	73	463
2559	NY	10.3	6.5	1.5	1.9	17.7	87.3	313.9	215.7	423.2	276.6	58.1	17.7	1,430	125	1,305
2560	NY	18.1	9.1	9.0	9.3	108.7	133.7	349.6	508.6	722.5	637.0	151.1	50.3	2,707	288	2,419
2561	NY	29.7	11.5	4.0	14.5	66.6	72.6	141.8	249.8	245.4	132.8	32.0	20.0	1,021	199	822
2562	DY	17.6	10.7	7.6	2.5	11.6	14.9	17.5	160.6	291.5	44.7	17.6	1.6	598	65	534
2563	DY	8.9	9.9	0.0	1.5	12.5	21.2	36.2	191.0	135.8	164.0	42.8	18.5	642	54	588
2564	DY*	8.8	6.3	11.4	35.6	37.4	59.1	24.6*	-	-	-	-	-	183*	159	25*
ต่ำสุด	-	8.0	6.3	0.0	1.5	11.6	14.9	17.5	113.1	83.1	44.7	17.6	1.6	536	54	25
เฉลี่ย	-	22.8	17.2	15.3	18.7	49.8	81.8	138.0	275.8	384.1	237.1	55.7	29.7	1,339	206	1,045
สูงสุด	-	51.3	55.6	49.1	55.7	131.8	224.7	349.6	802.0	899.1	637.0	151.1	69.3	3,015	554	2,462
ปริมาณการระบายน้ำของเชื้อนแควน้อยบำรุงแดน (ล้านลูกบาศก์เมตร)																
2552	NY	13.0	214.3	48.1	17.5	6.9	115.6	186.6	144.4	38.0	9.6	35.9	91.1	921	415	505
2553	NY	136.5	92.8	134.3	164.1	72.6	44.1	20.3	7.7	153.8	138.3	99.0	133.0	1196	644	552
2554	WY	148.9	226.5	112.9	125.4	84.3	161.3	194.8	410.3	860.3	366.2	31.9	177.2	2900	859	2041
2555	NY	313.1	250.6	35.9	25.9	26.8	95.0	110.6	67.4	51.8	57.8	65.2	111.3	1211	747	464
2556	NY	69.2	56.3	121.6	199.4	192.2	93.8	90.6	71.2	78.7	154.7	159.8	245.8	1533	733	801

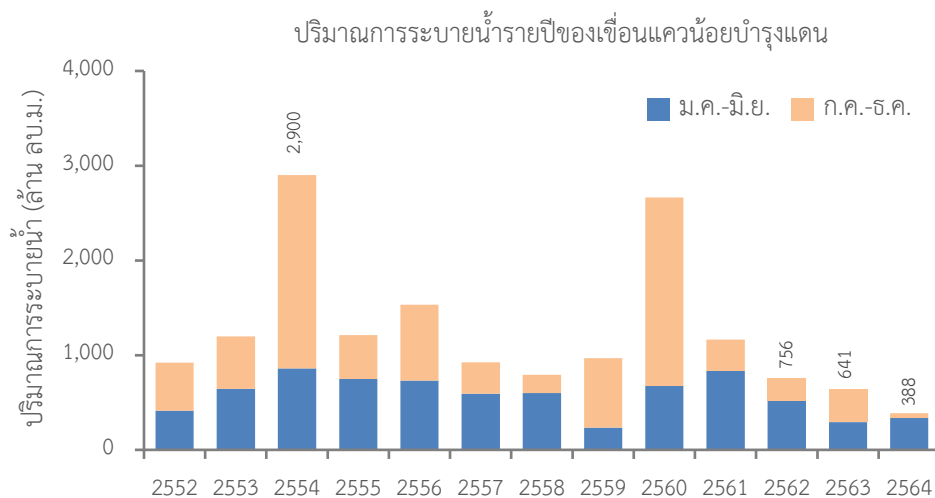
4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ปี	ปีน้ำ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี	ม.ค.-มิ.ย.	ก.ค.-ธ.ค.
2557	DY	157.4	87.3	87.0	77.7	102.9	79.4	75.3	43.8	26.4	26.7	66.2	93.4	924	592	332
2558	DY	98.3	106.3	109.9	98.4	119.4	69.2	53.6	34.5	24.5	16.1	29.6	32.2	792	602	191
2559	NY	32.2	30.2	32.2	35.3	36.5	69.2	171.1	260.2	64.5	42.1	45.5	148.3	967	236	732
2560	NY	118.3	151.3	168.7	105.2	71.4	58.2	83.3	424.5	561.4	582.9	183.0	154.9	2663	673	1990
2561	NY	149.6	121.0	133.9	123.6	120.7	183.6	67.4	40.3	39.0	48.8	50.9	84.1	1163	832	330
2562	DY	111.5	95.0	97.3	96.2	76.3	41.3	54.5	39.9	16.9	58.3	33.9	34.8	756	518	238
2563	DY	45.5	32.5	34.7	42.7	63.2	75.3	78.6	52.0	74.8	34.2	59.3	48.7	641	294	348
2564	DY*	34.8	31.4	34.8	33.7	88.4	113.1	51.8*	-	-	-	-	-	388*	336	52*
ต่ำสุด	-	13.0	30.2	32.2	17.5	6.9	41.3	20.3	7.7	16.9	9.6	29.6	32.2	641	236	52
เฉลี่ย	-	109.9	115.0	88.6	88.1	81.7	92.2	95.3	133.0	165.8	128.0	71.7	112.9	1,306	575	660
สูงสุด	-	313.1	250.6	168.7	199.4	192.2	183.6	194.8	424.5	860.3	582.9	183.0	245.8	2,900	859	2041

หมายเหตุ: * ข้อมูลถึงวันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2564



รูปที่ 4-8 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564



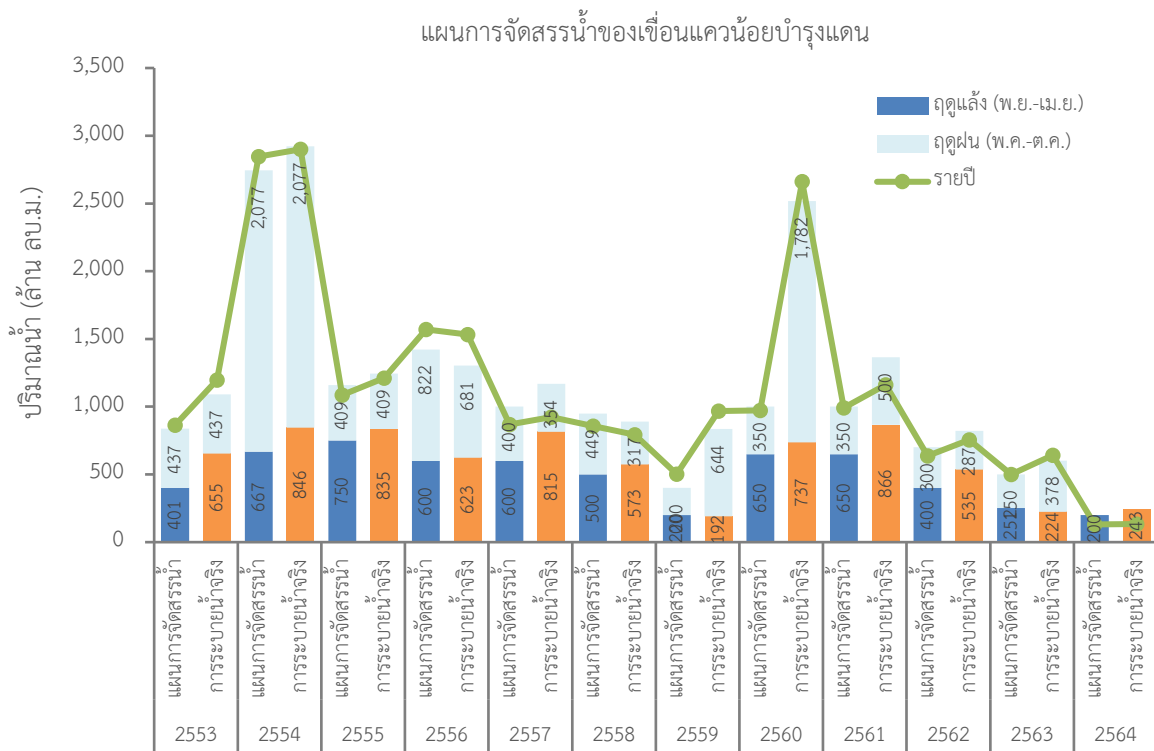
รูปที่ 4-9 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564

ตารางที่ 4-16 แผนการจัดสรรน้ำและการระบายน้ำจริงจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

ปีเพาะปลูก	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	แผนการจัดสรรน้ำ	การระบายน้ำจริง
2552/2553	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	401	655
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	437	437
	รายปี	864	1,196
2553/2554	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	667	846
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	2,077	2,077
	รายปี	2,845	2,900
2554/2555	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	750	835
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	409	409
	รายปี	1,085	1,211
2555/2556	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	600	623
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	822	681
	รายปี	1,571	1,533
2556/2557	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	600	815
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	400	354
	รายปี	868	924
2557/2558	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	500	573
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	449	317
	รายปี	857	792
2558/2559	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	200	192
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	200	644
	รายปี	502	967
2559/2560	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	650	737
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	350	1,782
	รายปี	973	2,663
2560/2561	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	650	866
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	350	500
	รายปี	991	1,163
2561/2562	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	400	535
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	300	287
	รายปี	638	756
2562/2563	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	251	224
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	250	378
	รายปี	501	641
2563/2564	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	200	243

4 | การปฏิบัติกระบวนอย่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ปีเพาะปลูก	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	แผนการจัดสรรน้ำ	การระบายน้ำจริง
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	300	NA
	รายปี	500	NA
ค่าเฉลี่ยระยะยาว	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	489	595
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	549	715
	รายปี	1,063	1,341
ค่าเฉลี่ยในพิน้ำมาก	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	667 ($\Delta+23.06\%$)	846
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	2,077 ($\Delta+385.28\%$)	2,077
	รายปี	2,845 ($\Delta+185.07\%$)	2,900
ค่าเฉลี่ยในพิน้ำปกติ	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	542	651
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	428	742
	รายปี	998	1,456
ค่าเฉลี่ยในพิน้ำน้อย	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	390 ($\Delta-28.04\%$)	478
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	340 ($\Delta-20.56\%$)	334
	รายปี	673 ($\Delta-32.57\%$)	778



รูปที่ 4-10 แผนการระบายน้ำรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2553-2564

จากข้อมูลในตารางข้างต้นพบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563 เท่ากับ 1,339 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี อย่างไรก็ตาม หลังเหตุการณ์น้ำ

ท่วมใหญ่ปี พ.ศ. 2554 พบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนลดลงอย่างมีนัยสำคัญกล่าวคือ ระหว่างปี พ.ศ. 2555-2563 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนรายปีเฉลี่ย 1,178 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือลดลงจากค่าเฉลี่ยระยะยาวถึง 162 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี นอกจากนี้ ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีมีความผันแปรค่อนข้างสูงในช่วงระหว่าง 536-3,015 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนพบว่า ปริมาณการระบายน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563 เท่ากับ 1,306 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ปริมาณการระบายน้ำรายปีมีความผันแปรค่อนข้างสูงในช่วงระหว่าง 641-2,900 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ยิ่งไปกว่านั้น ปริมาณการระบายน้ำของทั้งสองเขื่อนหลักผันแปรตามแผนการจัดสรรน้ำ และพบว่า การระบายน้ำจริงโดยส่วนใหญ่ยังสูงกว่าแผนการจัดสรรน้ำทั้งในช่วงเพาะปลูกฤดูแล้งและฤดูฝน

ผลการวิเคราะห์แผนการจัดสรรน้ำจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนพบว่า ค่าเฉลี่ยระยะยาวของแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีมีค่าเท่ากับ 489, 549 และ 1,063 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของแผนการจัดสรรน้ำในปีน้ำปกติ กล่าวคือในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีมีค่าเท่ากับ 542, 428 และ 998 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ สำหรับในปีน้ำมากพบว่า มีแนวโน้มปรับเพิ่มจากแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีจากปีน้ำปกติเท่ากับ +23.06%, +385.28% และ +185.07% ตามลำดับ และในปีน้ำน้อยพบว่า มีการปรับลดจากแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีจากปีน้ำปกติเท่ากับ -28.04%, -20.56% และ -32.57% ตามลำดับ

(3) เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

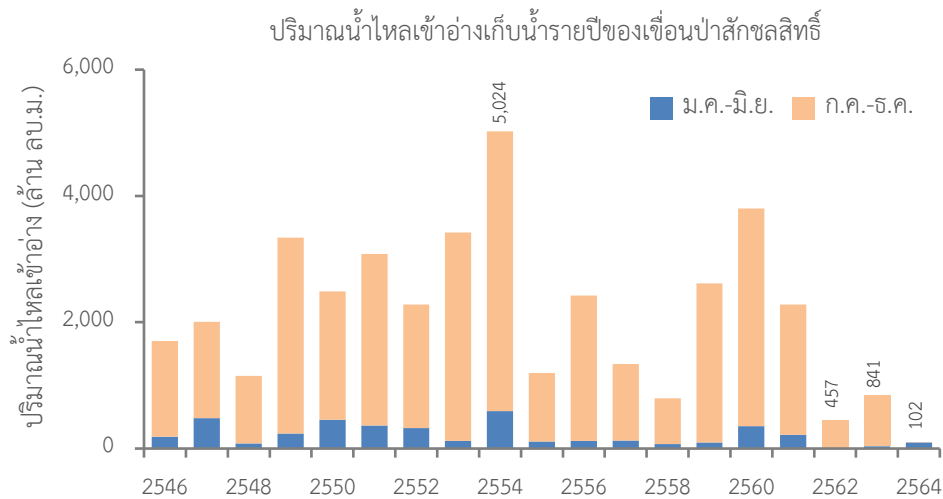
สถิติข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายเดือนและรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 (ข้อมูลถึงวันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2564) ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4-17 และแสดงในรูปที่ 4-11 ถึงรูปที่ 4-12 และแผนการจัดสรรน้ำและการระบายน้ำจริงจากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์สรุปไว้ในตารางที่ 4-18 และรูปที่ 4-13

ตารางที่ 4-17 สถิติข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

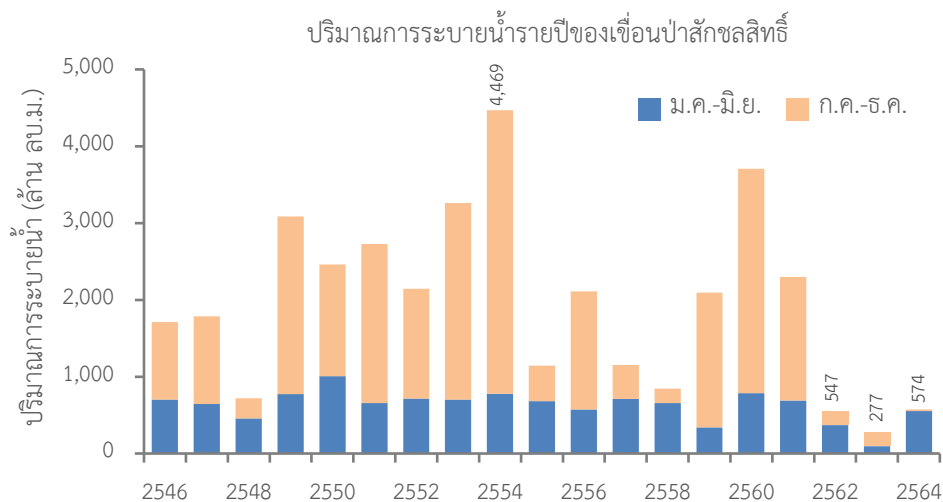
ปี	ปีน้ำ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี	ม.ค.-มิ.ย.	ก.ค.-ธ.ค.
ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ (ล้านลูกบาศก์เมตร)																
2546	NY	20.7	20.7	15.6	6.9	49.1	73.7	128.9	286.9	611.2	420.6	31.1	38.3	1,704	187	1,517
2547	NY	30.2	19.3	30.7	24.5	32.2	344.0	143.8	573.2	568.6	217.5	15.9	9.6	2,010	481	1,529
2548	NY	6.6	12.5	18.0	14.4	13.7	16.8	102.5	130.8	417.4	241.1	170.0	7.7	1,152	82	1,070
2549	WY	6.3	33.1	33.8	28.7	42.2	96.4	322.0	300.1	804.5	1,551.3	101.8	18.5	3,339	240	3,098
2550	NY	19.1	28.2	30.2	37.5	255.2	87.8	34.1	102.9	418.0	1,344.4	95.1	34.2	2,487	458	2,029
2551	NY	31.6	19.4	27.1	30.6	71.3	183.5	177.2	353.2	870.4	843.7	447.8	28.6	3,084	364	2,721
2552	NY	37.3	24.0	32.8	33.8	139.7	56.8	95.5	86.7	488.2	1,135.6	150.2	0.6	2,281	324	1,957
2553	NY	41.1	5.5	19.0	10.2	17.4	27.9	5.7	387.7	1,038.5	1,639.3	207.9	21.9	3,422	121	3,301

ปี	ปีน้ำ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี	ม.ค.-มิ.ย.	ก.ค.-ธ.ค.
2554	WY	27.9	15.4	20.5	17.1	123.9	386.6	320.7	780.9	1,749.2	1,530.3	47.8	3.8	5,024	591	4,433
2555	NY	0.8	27.8	17.2	16.5	10.2	40.5	31.4	108.1	657.6	266.0	12.3	9.5	1,198	113	1,085
2556	NY	16.4	11.9	6.0	21.2	30.3	35.8	22.8	115.3	775.3	1,321.0	51.2	16.1	2,423	122	2,302
2557	DY	26.2	15.3	13.5	19.8	8.8	42.4	51.4	210.6	594.2	202.9	146.0	5.8	1,337	126	1,211
2558	DY	13.9	10.0	19.4	5.7	13.0	11.5	19.2	118.2	164.6	398.3	6.9	13.9	795	74	721
2559	NY	10.8	0.2	0.4	20.2	30.6	34.0	276.6	197.3	767.5	1,123.1	122.5	32.3	2,616	96	2,519
2560	NY	44.7	64.8	35.2	2.4	88.1	121.4	676.4	828.6	542.3	1,137.2	224.3	38.7	3,804	357	3,447
2561	NY	59.9	16.3	5.9	14.5	93.9	29.1	330.5	655.5	963.5	101.8	10.3	0.3	2,282	220	2,062
2562	DY	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	30.2	409.4	14.2	2.2	0.0	457	0	456
2563	DY	0.0	0.0	11.6	1.3	13.4	11.1	8.1	27.8	333.4	360.4	73.8	0.0	841	37	804
2564	DY*	0.0	4.8	15.1	40.0	23.4	15.4	2.9*	-	-	-	-	-	102*	99	3*
ต่ำสุด	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	27.8	164.6	14.2	2.2	0.0	457	0	3
เฉลี่ย	-	20.7	17.3	18.5	18.2	55.6	85.0	144.7	294.1	676.3	769.4	106.5	15.5	2,236	215	1,909
สูงสุด	-	59.9	64.8	35.2	40.0	255.2	386.6	676.4	828.6	1,749.2	1,639.3	447.8	38.7	5,024	591	4,433
ปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ (ล้านลูกบาศก์เมตร)																
2546	NY	100.7	125.3	102.0	191.8	104.1	78.6	189.8	241.2	303.4	179.9	42.8	52.3	1,712	703	1,009
2547	NY	56.6	73.4	138.0	129.0	85.0	161.1	310.1	515.2	67.5	116.5	92.9	39.1	1,784	643	1,141
2548	NY	81.1	101.5	109.8	63.6	72.5	29.6	28.9	45.8	41.6	67.8	43.0	34.7	720	458	262
2549	WY	72.5	118.5	156.3	120.2	146.1	160.7	281.1	257.3	293.9	1,388.3	57.4	34.5	3,087	774	2,313
2550	NY	122.7	127.0	140.4	115.0	124.9	375.1	44.3	40.5	72.4	979.9	207.3	112.1	2,462	1005	1,457
2551	NY	108.3	120.2	153.8	76.9	28.7	170.7	166.3	374.7	398.7	601.8	469.1	58.0	2,727	658	2,069
2552	NY	112.0	138.4	153.0	96.2	104.5	112.9	91.5	60.6	41.2	910.2	146.8	176.4	2,144	717	1,427
2553	NY	126.1	160.1	155.9	168.9	58.4	34.0	7.5	12.9	636.9	1,493.9	321.6	84.7	3,261	703	2,557
2554	WY	169.4	151.4	64.5	75.8	39.0	276.9	496.3	556.1	1,093.3	1,356.0	62.1	128.6	4,469	777	3,692
2555	NY	159.6	160.9	132.1	106.8	57.4	64.7	38.3	27.5	213.6	72.1	31.9	80.8	1,146	682	464
2556	NY	138.0	116.0	76.7	90.5	105.4	47.1	28.2	28.8	97.4	1,166.4	51.3	164.1	2,110	574	1,536
2557	DY	182.8	136.9	135.3	86.0	86.1	82.7	37.5	30.4	189.8	31.3	34.1	118.3	1,151	710	441
2558	DY	117.2	118.0	121.6	113.6	121.1	66.4	39.9	32.3	18.5	4.5	42.4	50.9	846	658	189
2559	NY	53.7	50.8	55.2	59.8	61.0	58.8	138.8	250.6	208.0	912.8	132.9	114.1	2,096	339	1,757
2560	NY	166.9	191.7	198.6	104.5	77.8	44.7	601.7	887.7	274.5	755.7	217.9	184.8	3,706	784	2,922
2561	NY	138.6	124.4	94.4	117.5	141.4	74.6	240.4	587.1	588.1	32.1	59.6	98.8	2,297	691	1,606
2562	DY	77.9	61.9	72.6	68.0	57.8	33.1	22.8	7.2	15.3	62.6	19.7	48.1	547	371	176
2563	DY	17.3	13.7	13.5	18.3	19.0	14.3	19.5	36.2	29.1	4.5	17.2	74.4	277	96	181
2564	DY*	85.4	149.3	118.6	51.2	65.8	84.0	19.7*	-	-	-	-	-	574*	554	20*
ต่ำสุด	-	17.3	13.7	13.5	18.3	19.0	14.3	7.5	7.2	15.3	4.5	17.2	34.5	277	96	20
เฉลี่ย	-	109.8	117.9	115.4	97.6	81.9	103.7	147.5	221.8	254.6	563.1	113.9	91.9	2,030	626	1,327
สูงสุด	-	182.8	191.7	198.6	191.8	146.1	375.1	601.7	887.7	1,093.3	1,493.9	469.1	184.8	4,469	1005	3,692

หมายเหตุ: * ข้อมูลถึงวันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2564



รูปที่ 4-11 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2564



รูปที่ 4-12 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2564

ตารางที่ 4-18 แผนการจัดสรรน้ำและการระบายน้ำจริงจากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

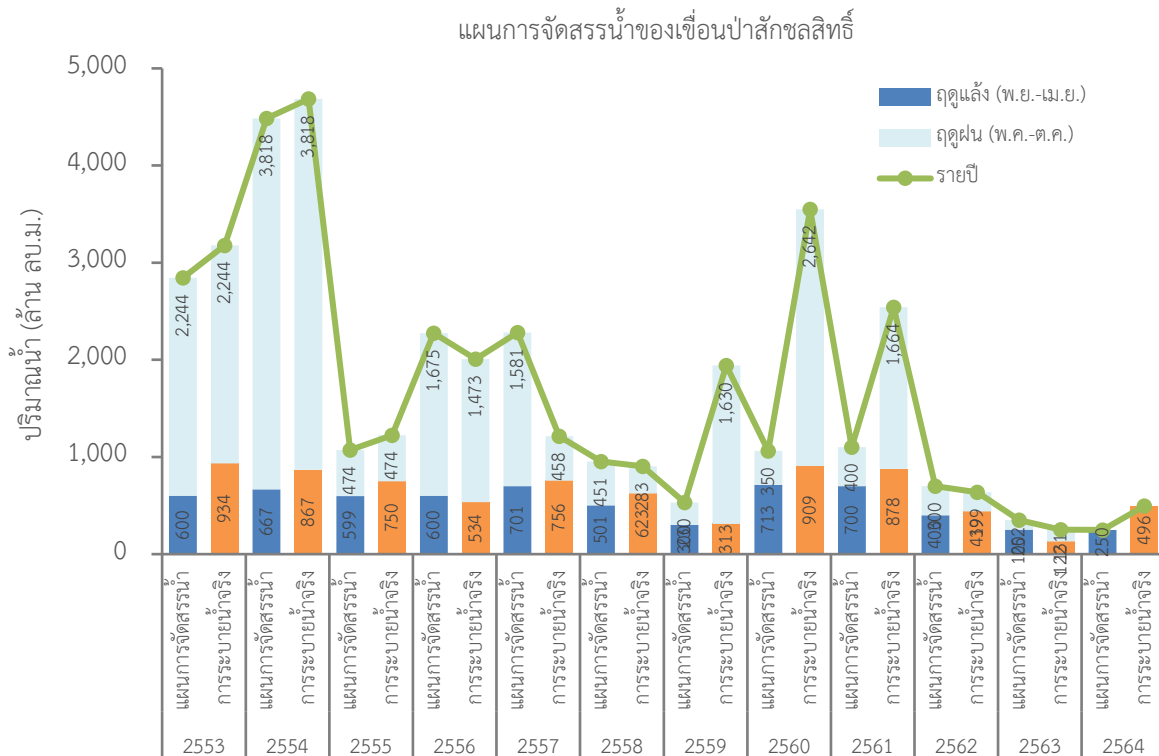
ปีเพาะปลูก	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	แผนการจัดสรรน้ำ	การระบายน้ำจริง
2552/2553	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	600	934
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	2,244	2,244
	รายปี	2,844	3,178
2553/2554	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	667	867
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	3,818	3,818
	รายปี	4,485	4,685
2554/2555	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	599	750
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	474	474
	รายปี	1,073	1,224

4 | การปฏิบัติกระบวนอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ปีเพาะปลูก	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	แผนการจัดสรรน้ำ	การระบายน้ำจริง
2555/2556	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	600	534
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	1,675	1,473
	รายปี	2,275	2,007
2556/2557	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	701	756
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	1,581	458
	รายปี	2,282	1,214
2557/2558	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	501	623
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	451	283
	รายปี	952	905
2558/2559	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	300	313
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	230	1,630
	รายปี	530	1,942
2559/2560	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	713	909
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	350	2,642
	รายปี	1,063	3,551
2560/2561	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	700	878
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	400	1,664
	รายปี	1,100	2,541
2561/2562	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	400	439
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	300	199
	รายปี	700	637
2562/2563	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	252	131
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	100	122
	รายปี	352	253
2563/2564	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	250	496
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	200	NA
	รายปี	450	NA
ค่าเฉลี่ยระยะยาว	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	524	636
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	1,057	1,364
	รายปี	1,605	2,012
ค่าเฉลี่ยในปีน้ำมาก	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	667 ($\Delta+14.02\%$)	867
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	3,818 ($\Delta+326.12\%$)	3,818
	รายปี	4,485 ($\Delta+202.84\%$)	4,685
ค่าเฉลี่ยในปีน้ำปกติ	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	585	720
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	896	1,688

4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข็มมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ปีเพาะปลูก	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	แผนการจัดสรรน้ำ	การระบายน้ำจริง
	รายปี	1,481	2,407
ค่าเฉลี่ยในปีน้ำน้อย	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	421 (Δ -28.03%)	489
	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	526 (Δ -41.29%)	266
	รายปี	947 (Δ -36.06%)	752



รูปที่ 4-13 แผนการระบายน้ำรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2564

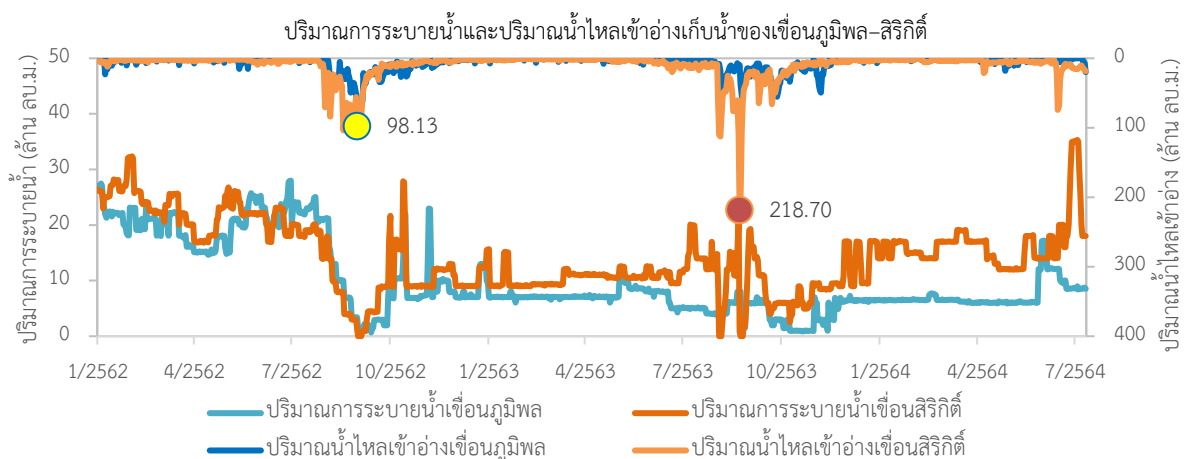
จากข้อมูลในตารางข้างต้นพบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2563 เท่ากับ 2,236 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี อย่างไรก็ตาม หลังเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ปี พ.ศ. 2554 พบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ระหว่างปี พ.ศ. 2555-2563 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์รายปีเฉลี่ย 1,750 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือลดลงจากค่าเฉลี่ยระยะยาวถึง 486 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี นอกจากนี้ ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีมีความผันแปรค่อนข้างสูงในช่วงระหว่าง 457-5,024 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์พบว่า ปริมาณการระบายน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2563 เท่ากับ 2,030 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ปริมาณการระบายน้ำรายปีมีความผันแปรค่อนข้างสูงในช่วงระหว่าง 277-4,469 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ยิ่งไปกว่านั้น ปริมาณการระบายน้ำของทั้งสองเขื่อนหลักผันแปรตามแผนการจัดสรรน้ำ และพบว่าการระบายน้ำจริงโดยส่วนใหญ่ยังสูงกว่าแผนการจัดสรรน้ำทั้งในช่วงเพาะปลูกฤดูแล้งและฤดูฝน

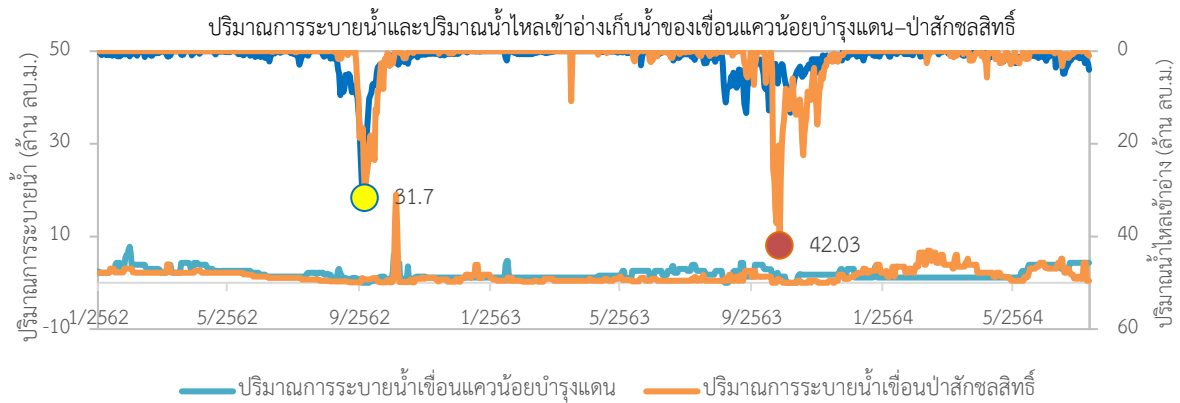
ผลการวิเคราะห์แผนการจัดสรรน้ำจากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์พบว่า ค่าเฉลี่ยระยะยาวของแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีมีค่าเท่ากับ 524, 1,057 และ 1,605 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของแผนการจัดสรรน้ำในปีน้ำปกติ กล่าวคือในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีมีค่าเท่ากับ 585, 896 และ 1,481 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ สำหรับในปีน้ำมากพบว่า มีแนวโน้มปรับเพิ่มจากแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีจากปีน้ำปกติเท่ากับ +14.02%, +326.12% และ +202.84% ตามลำดับ และในปีน้ำน้อยพบว่า มีการปรับลดจากแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีจากปีน้ำปกติเท่ากับ -28.03%, -41.29% และ -36.06% ตามลำดับ

4.2.1.1.2 แนวโน้มการระบายน้ำของเขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแนวโน้มปริมาณการระบายน้ำและปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2562-2564 แสดงในรูปที่ 4-14 และรูปที่ 4-15 ซึ่งพบว่า ปริมาณการระบายน้ำจากทั้ง 4 เขื่อนหลักมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยระยะยาว ทั้งนี้เกิดจากสถานการณ์น้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำมีจำกัดและเกิดขึ้นติดต่อกันตั้งแต่ปี พ.ศ. 2562 มาจนถึงปีปัจจุบัน พ.ศ. 2564 (สิงหาคม) ที่แนวโน้มปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ยังไม่สูงนัก หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการบริหารจัดการน้ำในปีน้ำน้อย อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ข้อมูลในช่วง 3 ปีที่ผ่านมาพบว่า ปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์มีแนวโน้มสูงกว่าเขื่อนภูมิพลจากปัจจัยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่มีสูงกว่า และปริมาณน้ำที่ระบายจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ยังช่วยตอบสนองความต้องการน้ำทั้งภาคเกษตรกรรมและนอกภาคเกษตรกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงการเพาะปลูกพืชฤดูแล้งในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ได้ค่อนข้างสูง



รูปที่ 4-14 แนวโน้มปริมาณการระบายน้ำและปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2562-2564



รูปที่ 4-15 แนวโน้มปริมาณการระบายน้ำและปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2562–2564

4.2.1.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล Sideflow

งานวิจัยนี้ได้รวบรวมข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัดหลักท้ายเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2543–2564 เพื่อพิจารณาเป็นปริมาณน้ำที่ไหลมาสมทบหรือในที่นี้กำหนดให้เป็น Sideflow เพื่อช่วยลดปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อนหลักลงประกอบด้วย สถานี W.4A (แม่น้ำวัง) สถานี Y.17 (แม่น้ำยม) สถานี N.22A (แม่น้ำแควน้อย) CT.2A (แม่น้ำสะแกกรัง) และสถานี S.5 (แม่น้ำป่าสัก) ซึ่งเป็นสถานีตรวจวัดในความรับผิดชอบของกรมชลประทาน และสถานี TD06 (แม่น้ำป่าด) และ TD08 (แม่น้ำคลองตรอน) ซึ่งเป็นสถานีตรวจวัดในความรับผิดชอบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ผลการวิเคราะห์สถิติข้อมูลน้ำท่ารายเดือนและรายปีเฉลี่ยของสถานีตรวจวัดหลักทั้ง 6 สถานี รวมทั้งข้อมูลตรวจวัดน้ำท่าที่สถานี C.2 ได้สรุปในตารางที่ 4–19 เพื่อศึกษาถึงศักยภาพในปรับลดปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อนหลักโดยพิจารณาจากข้อมูล Sideflow ด้านท้ายเขื่อน

จากสถิติข้อมูลในตารางข้างต้นพบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยระยะยาวของสถานี W.4A, Y.17, N.22A, CT.2A, S.5, TD06, และ TD08 เท่ากับ 40.69, 117.09, 53.33, 36.90, 294.52, 10.85 และ 17.19 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที หรือคิดเป็นปริมาตรน้ำเท่ากับ 1,283, 3,693, 1,682, 1,164, 9,288, 342 และ 542 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยระยะยาวผันแปรตามประเภทของปีน้ำ สำหรับข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยระยะยาวของสถานี C.2 ซึ่งเป็นสถานีตรวจวัดหลักของแม่น้ำเจ้าพระยาที่รับน้ำจากแม่น้ำปิง วัง ยม และน่านที่ไหลมาสมทบ รวมทั้งปริมาณน้ำที่ระบายจากเขื่อนหลักทั้ง 3 เขื่อนพบว่า ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยเท่ากับ 688.4 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที หรือคิดเป็นปริมาตรน้ำเท่ากับ 21,711 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และมีค่าผันแปรตามปีน้ำอยู่ระหว่าง 169.4–1,537.3 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4-19 สถิติข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัดหลักรายเดือนและรายปีเฉลี่ยในพื้นที่ศึกษา

ปี	ปีน้ำ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี	ม.ค.-มิ.ย.	ก.ค.-ธ.ค.
สถานีตรวจวัดน้ำท่า W.4A (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)																
2543	NY	6.09	4.22	2.80	7.74	55.85	91.73	28.29	54.04	118.54	101.47	52.86	10.19	44.49	28.07	60.90
2544	NY	5.06	4.26	8.68	6.00	56.20	10.35	18.49	141.96	104.84	110.16	117.00	19.76	50.23	15.09	85.37
2545	WY	12.74	8.81	5.76	2.40	13.87	27.13	11.80	38.97	337.50	108.39	122.07	56.60	62.17	11.79	112.55
2546	NY	24.10	13.27	10.42	6.47	10.05	11.27	15.38	27.36	122.95	34.62	9.29	1.87	23.92	12.60	35.25
2547	NY	2.29	1.60	1.14	0.97	6.63	22.97	17.92	50.46	108.10	38.89	14.73	8.70	22.87	5.93	39.80
2548	NY	4.22	5.81	7.50	5.19	4.16	7.60	13.60	36.16	245.67	158.15	62.32	18.40	47.40	5.75	89.05
2549	WY	9.58	7.57	11.94	9.15	87.28	83.48	50.47	124.85	449.65	240.65	28.04	10.72	92.78	34.83	150.73
2550	NY	5.69	3.59	2.43	7.43	66.90	23.70	27.85	29.68	87.32	76.15	23.99	7.38	30.18	18.29	42.06
2551	NY	4.46	4.38	2.99	2.13	8.63	7.61	3.18	11.25	61.35	98.78	98.43	9.53	26.06	5.03	47.09
2552	NY	8.75	6.16	6.80	12.53	20.64	41.42	33.94	28.11	84.96	149.95	25.09	8.66	35.58	16.05	55.12
2553	NY	9.12	4.78	4.78	1.93	0.85	1.49	4.78	156.97	188.77	156.09	38.24	12.52	48.36	3.82	92.90
2554	WY	4.30	2.72	5.80	16.35	180.08	69.02	96.27	407.68	387.74	316.93	61.09	20.91	130.74	46.38	215.10
2555	NY	9.18	15.47	9.88	6.68	41.39	61.59	21.12	25.36	219.83	84.66	29.72	11.96	44.74	24.03	65.44
2556	NY	7.07	7.47	4.14	9.13	11.81	5.37	9.31	39.79	76.57	160.90	31.51	12.13	31.27	7.50	55.04
2557	DY	8.53	5.88	4.80	10.39	19.54	16.14	21.68	31.77	119.45	50.38	47.54	5.92	28.50	10.88	46.12
2558	DY	10.64	4.54	2.78	3.64	2.47	0.21	0.25	9.70	25.45	10.68	5.35	4.67	6.70	4.05	9.35
2559	NY	0.30	0.50	0.00	0.00	0.00	2.95	4.40	14.96	134.76	139.18	72.17	12.38	31.80	0.62	62.97
2560	NY	12.45	4.79	5.23	11.19	17.14	31.12	64.32	85.10	155.51	298.71	39.93	7.49	61.08	13.65	108.51
2561	NY	8.46	7.08	5.95	23.80	37.83	36.14	63.54	80.48	43.67	82.12	36.31	14.16	36.63	19.88	53.38
2562	DY	20.28	5.60	2.60	1.25	3.19	7.26	7.26	16.50	93.20	17.91	10.90	6.52	16.04	6.70	25.38
2563	DY	6.52	6.52	6.52	6.52	6.52	6.52	6.52	44.61	42.32	27.32	20.08	7.11	15.59	6.52	24.66
2564	DY*	6.52	6.52	6.52	7.36	7.64	7.82	10.64	11.68	-	-	-	-	8.09	7.06	11.16
ต่ำสุด	-	0.30	0.50	0.00	0.00	0.00	0.21	0.25	9.70	25.45	10.68	5.35	1.87	6.70	0.62	9.35
เฉลี่ย	-	8.47	5.98	5.43	7.19	29.94	26.04	24.14	66.70	152.77	117.24	45.08	12.74	40.69	13.84	67.63
สูงสุด	-	24.10	15.47	11.94	23.80	180.08	91.73	96.27	407.68	449.65	316.93	122.07	56.60	130.74	46.38	215.10
สถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.17 (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)																
2543	NY	22.90	9.59	13.34	9.30	80.37	163.52	147.83	165.45	280.87	309.12	262.09	63.11	127.29	49.84	204.74
2544	NY	15.21	16.20	50.43	8.55	94.50	174.49	136.49	284.15	535.61	430.88	319.88	117.60	182.00	59.90	304.10
2545	WY	12.79	5.42	10.38	4.31	27.55	93.85	80.58	176.30	943.72	756.53	352.46	197.87	221.81	25.72	417.91
2546	NY	46.92	12.44	29.46	10.89	2.53	28.88	70.78	120.29	235.84	316.77	65.31	3.25	78.61	21.86	135.37
2547	NY	0.00	7.80	2.91	0.00	28.57	132.75	130.93	203.95	218.77	293.05	37.67	4.24	88.39	28.67	148.10
2548	NY	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	39.29	48.04	149.76	326.52	506.43	294.97	28.39	116.12	6.55	225.68
2549	WY	0.46	0.00	0.86	2.25	62.79	315.57	240.54	211.23	766.20	1336.18	284.55	17.68	269.86	63.66	476.06
2550	NY	2.30	0.00	0.00	0.00	168.63	106.80	124.47	123.22	245.46	325.29	169.38	14.18	106.64	46.29	167.00
2551	NY	8.53	24.92	23.51	15.58	63.40	99.64	96.14	170.65	231.95	292.50	253.58	83.46	113.65	39.26	188.05
2552	NY	49.85	34.97	51.97	12.94	34.89	120.37	173.48	124.01	177.84	275.72	149.00	6.62	100.97	50.83	151.11
2553	NY	6.89	2.31	1.42	12.00	3.60	0.00	0.00	172.91	314.89	317.81	268.65	52.50	96.08	4.37	187.79
2554	WY	4.22	3.99	74.05	45.87	176.63	211.50	239.90	745.19	1210.08	1178.06	312.69	54.24	354.70	86.04	623.36
2555	NY	67.37	85.59	79.06	1.85	78.26	168.00	113.83	147.58	250.68	250.26	81.19	34.99	113.22	80.02	146.42

ปี	ปีน้ำ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี	ม.ค.-มิ.ย.	ก.ค.-ธ.ค.
2556	NY	1.57	13.67	2.66	0.00	0.06	23.54	50.33	170.78	216.73	308.71	130.82	2.33	76.77	6.92	146.62
2557	DY	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27.97	65.15	178.09	265.77	176.77	86.91	16.30	68.08	4.66	131.50
2558	DY	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.58	50.07	67.28	55.90	2.96	0.00	15.90	0.00	31.80
2559	NY	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	78.72	140.55	232.92	314.88	185.47	6.60	79.93	0.00	159.86
2560	NY	3.14	0.00	0.00	0.00	90.77	147.75	170.45	255.83	318.40	506.70	302.20	36.73	152.66	40.28	265.05
2561	NY	17.56	8.02	2.43	19.60	42.50	53.29	104.71	165.80	202.32	217.56	48.79	0.91	73.62	23.90	123.35
2562	DY	6.61	11.96	2.94	1.70	6.20	34.91	45.24	100.55	237.43	58.97	42.45	42.45	49.28	10.72	87.85
2563	DY	42.45	42.45	42.45	42.45	42.45	42.45	42.45	77.11	179.95	191.48	64.42	31.06	70.10	42.45	97.75
2564	DY*	31.06	31.06	31.06	31.06	4.78	4.78	4.78	23.94	-	-	-	-	20.32	22.30	14.36
ต่ำสุด	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.94	67.28	55.90	2.96	0.00	15.90	0.00	14.36
เฉลี่ย	-	15.45	14.11	19.04	9.92	45.84	90.42	99.06	179.88	355.20	400.93	176.93	38.79	117.09	32.46	201.54
สูงสุด	-	67.37	85.59	79.06	45.87	176.63	315.57	240.54	745.19	1,210.1	1336.18	352.46	197.87	354.70	86.04	623.36
สถานีตรวจวัดน้ำท่า N.22A (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)																
2543	NY	12.09	8.83	6.60	27.40	86.00	105.01	117.82	137.89	286.89	159.00	46.54	22.44	84.71	40.99	128.43
2544	NY	15.55	11.15	13.53	5.30	28.14	71.45	103.38	253.65	145.25	100.20	32.52	14.86	66.25	24.19	108.31
2545	WY	8.45	5.32	3.53	3.25	19.46	42.88	61.55	279.50	450.85	141.63	60.44	24.89	91.81	13.82	169.81
2546	NY	13.01	9.19	9.08	9.49	8.19	43.81	64.02	126.93	206.17	67.02	15.89	8.07	48.40	15.46	81.35
2547	NY	5.30	5.92	2.42	5.99	20.53	127.83	79.13	111.89	217.99	50.05	13.13	6.38	53.88	28.00	79.76
2548	NY	4.14	2.09	2.37	9.17	7.03	55.53	45.01	78.41	254.15	109.85	25.64	7.44	50.07	13.39	86.75
2549	WY	3.50	2.20	1.36	6.08	24.44	57.00	102.36	169.97	469.16	319.29	33.53	21.55	100.87	15.76	185.98
2550	NY	16.62	14.12	12.88	31.72	71.93	41.74	48.07	130.87	245.48	246.47	34.03	13.88	75.65	31.50	119.80
2551	NY	13.25	13.90	24.28	28.64	19.89	23.97	42.03	96.57	134.58	69.84	9.19	2.96	39.92	20.65	59.19
2552	NY	1.81	82.14	31.04	24.08	25.79	40.13	55.98	41.57	22.43	14.17	20.03	34.18	32.78	34.16	31.39
2553	NY	49.54	38.01	43.65	44.58	17.86	13.42	8.76	19.42	73.42	82.01	46.30	46.86	40.32	34.51	46.13
2554	WY	51.31	90.23	48.75	48.54	39.64	64.38	72.26	224.99	399.33	221.26	36.85	65.14	113.56	57.14	169.97
2555	NY	96.31	81.28	24.71	19.88	28.07	40.95	48.18	30.72	40.83	30.47	43.01	44.57	44.08	48.53	39.63
2556	NY	31.47	32.16	48.78	70.70	70.10	36.89	37.09	33.59	57.99	56.84	57.82	77.81	50.94	48.35	53.52
2557	DY	47.59	36.77	32.71	19.00	18.01	14.29	14.09	18.23	14.02	27.87	31.45	36.02	25.84	28.06	23.61
2558	DY	33.17	30.93	26.90	25.05	25.19	17.21	14.13	9.51	11.59	15.67	18.61	18.45	20.53	26.41	14.66
2559	NY	19.74	18.95	18.87	11.51	9.75	20.18	59.30	81.03	31.55	22.37	25.95	48.50	30.64	16.50	44.79
2560	NY	32.92	45.00	45.21	28.40	36.82	20.31	36.34	147.99	220.06	221.48	56.42	41.28	77.69	34.78	120.60
2561	NY	41.70	39.17	34.55	54.02	48.92	73.40	22.44	19.77	19.72	17.93	19.18	14.16	33.75	48.63	18.87
2562	DY	23.28	23.40	22.50	46.18	41.61	27.34	13.75	18.43	21.39	38.83	31.19	27.67	27.96	30.72	25.21
2563	DY	13.83	12.43	7.26	33.93	36.25	35.00	38.38	71.33	101.19	82.29	32.11	35.32	41.61	23.12	60.11
2564	DY*	19.68	11.07	0.20	8.17	37.69	37.93	31.37	30.23	-	-	-	-	22.04	19.12	30.80
ต่ำสุด	-	1.81	2.09	0.20	3.25	7.03	13.42	8.76	9.51	11.59	14.17	9.19	2.96	20.53	13.39	14.66
เฉลี่ย	-	25.19	27.92	20.96	25.50	32.79	45.94	50.70	96.93	163.05	99.74	32.85	29.16	53.33	29.72	77.21
สูงสุด	-	96.31	90.23	48.78	70.70	86.00	127.83	117.82	279.50	469.16	319.29	60.44	77.81	113.56	57.14	185.98
สถานีตรวจวัดน้ำท่า CT.2A (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)																
2548	NY	-	-	-	7.54	0.00	8.41	4.42	18.26	44.96	45.03	50.96	2.48	20.23	5.32	27.68
2549	WY	0.41	0.00	0.00	0.95	14.24	15.95	16.76	16.22	48.96	408.64	123.09	6.29	54.29	5.26	103.33

4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)

โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ปี	ปีน้ำ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี	ม.ค.-มิ.ย.	ก.ค.-ธ.ค.
2550	NY	5.34	11.36	12.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.69	9.69	-
2551	NY	-	-	-	0.00	58.68	80.00	57.08	47.99	106.19	123.26	200.04	23.47	77.41	46.23	93.00
2552	NY	0.00	0.00	0.00	24.30	44.12	34.99	39.33	32.92	93.27	174.15	47.70	4.55	41.28	17.24	65.32
2553	NY	19.19	2.40	9.46	8.07	4.61	4.31	10.15	57.70	106.66	198.05	157.81	38.66	51.42	8.01	94.84
2554	WY	24.53	26.27	41.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30.91	30.91	-
2555	NY	-	-	-	29.35	44.39	45.40	51.97	54.35	127.86	92.83	35.46	24.15	56.19	39.71	64.44
2556	NY	1.19	3.87	2.99	0.00	0.00	45.22	21.47	49.55	229.35	221.08	69.46	2.10	53.86	8.88	98.84
2557	DY	0.00	0.00	0.00	0.01	5.03	3.79	3.20	34.97	24.95	40.84	45.91	1.02	13.31	1.47	25.15
2558	DY	0.00	0.00	0.00	0.31	0.77	0.00	0.00	18.74	29.73	74.53	4.06	0.84	10.75	0.18	21.32
2559	NY	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.41	17.04	141.69	203.54	93.76	1.58	39.00	0.00	78.00
2560	NY	1.91	0.01	0.00	0.82	29.54	67.94	92.22	66.77	72.42	262.85	118.13	10.37	60.25	16.70	103.79
2561	NY	23.22	17.41	36.66	26.81	22.81	19.69	22.82	22.74	27.80	26.05	17.12	11.63	22.90	24.43	21.36
2562	DY	10.95	17.01	7.86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.94	11.94	-
2563	DY	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2564	DY*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ต่ำสุด	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.22	24.95	26.05	4.06	0.84	9.69	0.00	21.32
เฉลี่ย	-	7.23	6.53	9.27	8.18	18.68	27.14	27.48	36.44	87.82	155.90	80.29	10.59	36.90	15.06	66.42
สูงสุด	-	24.53	26.27	41.94	29.35	58.68	80.00	92.22	66.77	229.35	408.64	200.04	38.66	77.41	46.23	103.79
สถานีตรวจวัดน้ำท่า S.5 (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)																
2551	NY	-	-	-	229	338	367	329	390	602	701	714	236	434	312	495
2552	NY	216	197	199	-	-	-	-	-	-	-	-	-	204	204	-
2553	NY	-	-	-	201	189	165	182	365	771	1,025	922	256	453	185	587
2554	WY	186	180	157	151	261	333	336	509	1,094	1,811	1,360	362	562	212	912
2555	NY	183	255	193	-	-	-	-	-	-	-	-	-	210	210	-
2556	NY	-	-	-	164	152	165	156	214	477	809	330	194	296	161	363
2557	DY	182	185	186	136	133	129	127	173	265	212	196	161	174	158	189
2558	DY	158	160	158	190	166	162	163	163	192	234	193	198	178	166	191
2559	NY	194	206	201	68	152	148	167	162	367	679	352	189	240	162	319
2560	NY	197	193	195	-	-	-	-	-	-	-	-	-	195	195	-
2561	NY	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2562	DY	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2563	DY	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2564	DY*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ต่ำสุด	-	158	160	157	68	133	129	127	162	192	212	193	161	174	158	189
เฉลี่ย	-	188	196	184	163	199	210	209	282	538	781	581	228	295	196	437
สูงสุด	-	216	255	201	229	338	367	336	509	1,094	1,811	1,360	362	562	312	912
สถานีตรวจวัดน้ำท่า C.2 (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)																
2543	NY	270.6	443.7	481.5	412.2	663.3	786.9	722.3	699.8	1,431.1	1,728.6	1,245.5	429.3	776.2	509.7	1042.7
2544	NY	365.6	467.3	537.2	454.1	694.6	702.0	555.2	1,231.8	1,519.2	1,810.8	1,337.5	536.6	851.0	536.8	1165.2
2545	WY	334.1	416.6	523.4	507.2	489.7	487.9	474.5	729.0	2,350.4	2,963.0	1,984.2	892.5	1012.7	459.8	1565.6
2546	NY	477.8	589.6	627.7	439.0	545.2	631.7	629.3	732.4	1,108.8	1,112.9	540.0	335.6	647.5	551.8	743.2

ปี	ปีน้ำ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี	ม.ค.-มิ.ย.	ก.ค.-ธ.ค.
2547	NY	271.6	360.5	339.0	329.9	364.9	707.8	717.7	960.6	1,024.7	1,062.9	420.1	317.5	573.1	395.6	750.6
2548	NY	307.7	323.3	322.9	370.6	356.0	443.8	427.6	547.5	1,214.0	1,457.1	828.3	375.0	581.1	354.0	808.3
2549	WY	392.4	400.1	374.5	298.7	582.4	1,092.8	1,073.2	1,001.4	2,284.9	4,835.9	2,178.8	563.6	1256.6	523.5	1989.6
2550	NY	506.1	532.5	492.8	474.4	916.1	703.2	825.6	745.8	1,252.0	1,751.4	889.1	434.4	793.6	604.2	983.1
2551	NY	440.5	460.0	416.7	486.8	590.9	552.5	564.0	737.9	1,223.7	1,739.9	1,857.3	474.4	795.4	491.2	1099.5
2552	NY	421.0	473.4	469.5	485.1	469.2	539.3	658.7	518.9	846.0	1,572.7	720.9	403.2	631.5	476.3	786.7
2553	NY	411.5	403.0	361.4	272.0	224.4	208.9	206.4	969.5	1,646.0	2,038.1	1,641.1	517.6	741.7	313.5	1169.8
2554	WY	504.7	564.7	605.3	373.4	787.9	1,068.6	1,165.9	2,072.1	3,764.1	4,375.6	2,355.9	809.8	1537.3	650.8	2423.9
2555	NY	1039.0	1239.4	941.8	550.2	671.5	766.1	582.8	590.9	1,477.9	1,086.0	497.0	467.7	825.9	868.0	783.7
2556	NY	444.9	387.7	237.5	184.6	336.7	410.2	308.6	627.8	1,073.6	1,609.2	638.6	227.0	540.5	333.6	747.5
2557	DY	216.3	236.8	188.8	219.1	361.0	418.1	386.3	696.0	1,016.5	574.2	447.3	154.2	409.6	273.3	545.8
2558	DY	171.7	165.3	169.9	196.4	355.4	281.0	195.4	322.2	315.4	404.0	152.6	139.5	239.1	223.3	254.8
2559	NY	137.7	143.9	130.8	147.6	156.9	162.3	420.7	513.5	1,212.0	1,975.4	903.8	272.6	514.8	146.6	883.0
2560	NY	269.9	282.6	270.4	231.9	669.9	834.4	1,150.1	1,714.1	1,808.0	2,639.6	1,860.0	472.7	1017.0	426.5	1607.4
2561	NY	464.9	457.5	423.8	478.4	545.8	594.3	694.8	925.9	974.8	635.4	477.8	427.0	591.7	494.1	689.3
2562	DY	429.6	423.6	339.5	255.7	357.7	384.2	300.8	350.2	1,114.5	411.1	245.9	176.2	399.1	365.0	433.1
2563	DY	194.3	149.4	135.6	135.3	137.6	125.3	130.0	253.9	427.7	732.2	312.0	159.3	241.0	146.2	335.8
2564	DY*	154.8	153.3	160.6	170.0	147.1	161.5	228.7	179.0	-	-	-	-	169.4	157.9	203.9
ต่ำสุด	-	137.7	143.9	130.8	135.3	137.6	125.3	130.0	179.0	315.4	404.0	152.6	139.5	169.4	146.2	203.9
เฉลี่ย	-	373.9	412.5	388.7	339.7	473.8	548.3	564.5	778.2	1,385.0	1,738.9	1,025.4	408.9	688.4	422.8	955.1
สูงสุด	-	1,039.0	1,239.4	941.8	550.2	916.1	1,092.8	1,165.9	2,072.1	3,764.1	4,835.9	2,355.9	892.5	1,537.3	868.0	2,423.9
สถานีตรวจวัดน้ำท่า TD06 (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)																
2555	NY	4.49	3.46	2.62	2.62	16.08	14.59	9.51	17.03	58.82	11.43	6.52	5.06	12.68	7.31	18.06
2556	NY	3.21	2.84	3.12	0.91	4.07	5.75	9.48	16.90	37.92	21.49	7.27	4.74	9.81	3.32	16.30
2557	DY	3.69	3.03	0.91	2.07	7.85	9.56	16.49	18.03	51.52	8.73	6.21	3.65	10.98	4.52	17.44
2558	DY	8.16	1.36	0.77	1.31	4.67	7.77	5.18	18.10	20.53	14.53	5.30	4.15	7.65	4.01	11.30
2559	NY	2.20	1.44	0.47	0.00	1.26	8.15	23.25	26.00	42.55	27.17	10.54	4.93	12.33	2.25	22.41
2560	NY	3.81	1.66	0.00	2.00	8.86	7.15	29.19	19.63	36.85	51.94	8.94	5.09	14.59	3.91	25.27
2561	NY	4.49	3.08	2.66	5.01	17.78	13.93	24.79	28.10	24.67	14.36	6.98	4.36	12.52	7.82	17.21
2562	DY	3.92	2.09	0.91	2.34	2.97	5.55	2.70	33.27	39.22	6.31	4.13	3.33	8.90	2.96	14.83
2563	DY	1.19	0.18	0.17	0.00	0.57	10.29	14.39	103.05	39.68	15.83	7.57	4.14	16.42	2.07	30.78
2564	DY*	2.77	2.07	2.46	1.41	4.16	-	-	-	-	-	-	-	2.58	2.58	-
ต่ำสุด	-	1.19	0.18	0.00	0.00	0.57	5.55	2.70	16.90	20.53	6.31	4.13	3.33	2.58	2.07	11.30
เฉลี่ย	-	3.79	2.12	1.41	1.77	6.83	9.19	15.00	31.13	39.08	19.09	7.05	4.38	10.85	4.07	19.29
สูงสุด	-	8.16	3.46	3.12	5.01	17.78	14.59	29.19	103.05	58.82	51.94	10.54	5.09	16.42	7.82	30.78
สถานีตรวจวัดน้ำท่า TD08 (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)																
2555	NY	2.42	2.06	1.76	1.72	14.13	11.28	9.57	12.28	18.60	10.31	8.61	6.49	8.27	5.56	10.98
2556	NY	6.59	6.93	6.03	6.77	5.73	6.00	7.87	7.14	16.76	11.84	7.92	3.92	7.79	6.34	9.24
2557	DY	1.16	1.65	33.73	53.48	53.48	52.60	44.99	36.28	29.53	28.72	28.71	28.70	32.75	32.68	32.82
2558	DY	28.68	28.71	28.69	28.67	28.65	28.67	28.64	28.61	28.61	20.37	12.06	11.23	25.13	28.68	21.59
2559	NY	16.16	22.15	18.12	16.81	16.81	14.21	8.95	5.92	6.05	6.03	6.11	6.81	12.01	17.38	6.64

ปี	ปีน้ำ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี	ม.ค.-มิ.ย.	ก.ค.-ธ.ค.
2560	NY	6.81	6.81	6.61	1.58	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	-	-	-	-	4.13	1.48
2561	NY	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2562	DY	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2563	DY	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2564	DY*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ต่ำสุด	-	1.16	1.65	1.76	1.58	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	6.03	6.11	3.92	7.79	4.13	1.48
เฉลี่ย	-	10.30	11.39	15.82	18.17	20.05	19.04	16.92	15.29	16.84	15.45	12.68	11.43	17.19	15.80	13.79
สูงสุด	-	28.68	28.71	33.73	53.48	53.48	52.60	44.99	36.28	29.53	28.72	28.71	28.70	32.75	32.68	32.82

4.2.1.3 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ โดยอาศัยข้อมูลรายวัน และแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณี (1) กรณีวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการระบายน้ำของ 2 เขื่อนหลักได้แก่ เขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์จากฐานข้อมูลระยะยาวตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2563 ระยะสั้นแยกตามปีน้ำและฤดูกาล ปีที่เกิดเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ พ.ศ. 2554 และปีที่เกิดวิกฤตภัยแล้ง พ.ศ. 2563 (2) กรณีวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักได้แก่ ภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์จากฐานข้อมูลระยะยาวระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 ระยะสั้นแยกตามปีน้ำและฤดูกาล ปีที่เกิดอุทกภัย พ.ศ. 2554 และปีที่เกิดวิกฤตภัยแล้ง พ.ศ. 2563 ผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

4.2.1.3.1 กรณีวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการระบายน้ำของ 2 เขื่อนหลักได้แก่ เขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์แสดงไว้ในรูปที่ 4-16 ถึงรูปที่ 4-19 โดยมีผลสรุปที่สำคัญมีดังนี้

- (1) อัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลต่อเขื่อนสิริกิติ์เฉลี่ยระยะยาวเท่ากับ 0.44:0.56
- (2) อัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลในช่วงฤดูแล้งสูงกว่าในช่วงฤดูฝน 5.59% โดยมีค่าเป็น 0.45 จากค่าเฉลี่ยเดิม 0.44 แต่อัตราส่วนการระบายน้ำยังคงน้อยกว่าเขื่อนสิริกิติ์
- (3) อัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลในปีน้ำน้อย (0.41) น้อยกว่าปีน้ำปกติ (0.44) และน้อยกว่าปีน้ำมาก (0.47) แต่อัตราส่วนการระบายน้ำยังคงน้อยกว่าเขื่อนสิริกิติ์
- (4) อัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลของปีน้ำน้อยในช่วงฤดูแล้งสูงกว่าในช่วงฤดูฝน 5.09% โดยมีค่าเป็น 0.42 จากเดิม 0.40 แต่อัตราส่วนการระบายน้ำยังคงน้อยกว่าเขื่อนสิริกิติ์
- (5) อัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลของปีน้ำปกติในช่วงฤดูแล้งสูงกว่าในช่วงฤดูฝน 5.59% โดยมีค่าเป็น 0.45 จากเดิม 0.43 แต่อัตราส่วนการระบายน้ำยังคงน้อยกว่าเขื่อนสิริกิติ์
- (6) อัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลของปีน้ำมากในช่วงฤดูแล้งสูงกว่าในช่วงฤดูฝน 9.94% โดยมีค่าเป็น 0.49 จากเดิม 0.45 แต่อัตราส่วนการระบายน้ำยังคงน้อยกว่าเขื่อนสิริกิติ์
- (7) อัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ในช่วงฝนสูงกว่าในช่วงฤดูแล้ง 4.39% โดยมีค่าเป็น 0.57 จากเดิม 0.55 และอัตราส่วนการระบายน้ำยังคงสูงกว่าเขื่อนภูมิพล

(8) อัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำน้อย (0.59) มากกว่าปีน้ำปกติ (0.56) และมากกว่าปีน้ำมาก (0.53) และอัตราส่วนการระบายน้ำยังคงสูงกว่าเขื่อนภูมิพล

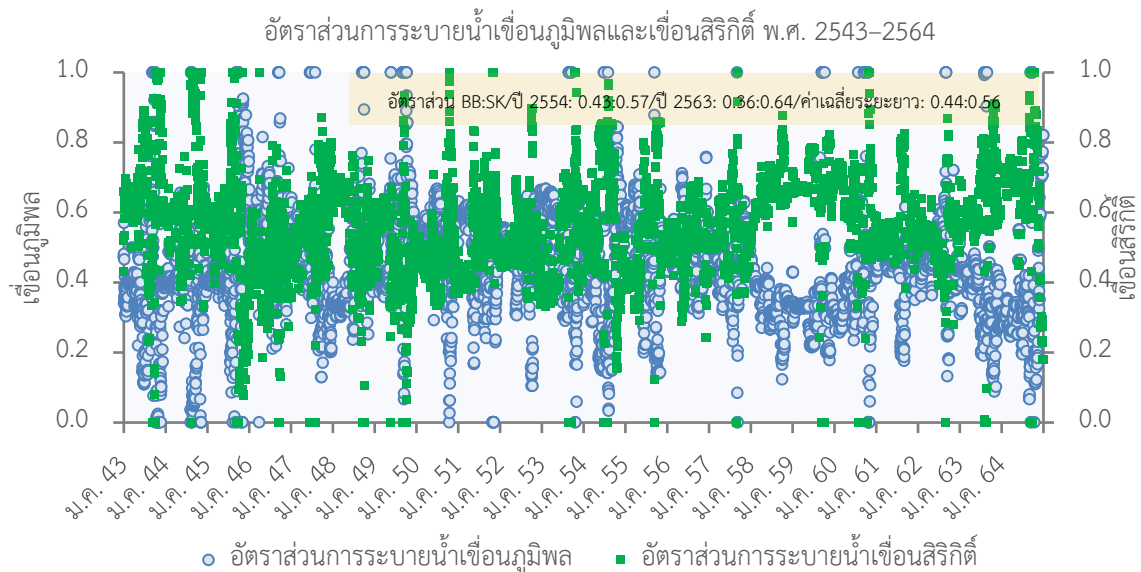
(9) อัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ของปีน้ำน้อยในช่วงฝนสูงกว่าในช่วงฤดูแล้ง 3.55% โดยมีค่าเป็น 0.60 จากเดิม 0.58 และอัตราส่วนการระบายน้ำยังคงสูงกว่าเขื่อนภูมิพล

(11) อัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ของปีน้ำปกติในช่วงฝนสูงกว่าในช่วงฤดูแล้ง 4.39% โดยมีค่าเป็น 0.57 จากเดิม 0.55 และอัตราส่วนการระบายน้ำยังคงสูงกว่าเขื่อนภูมิพล

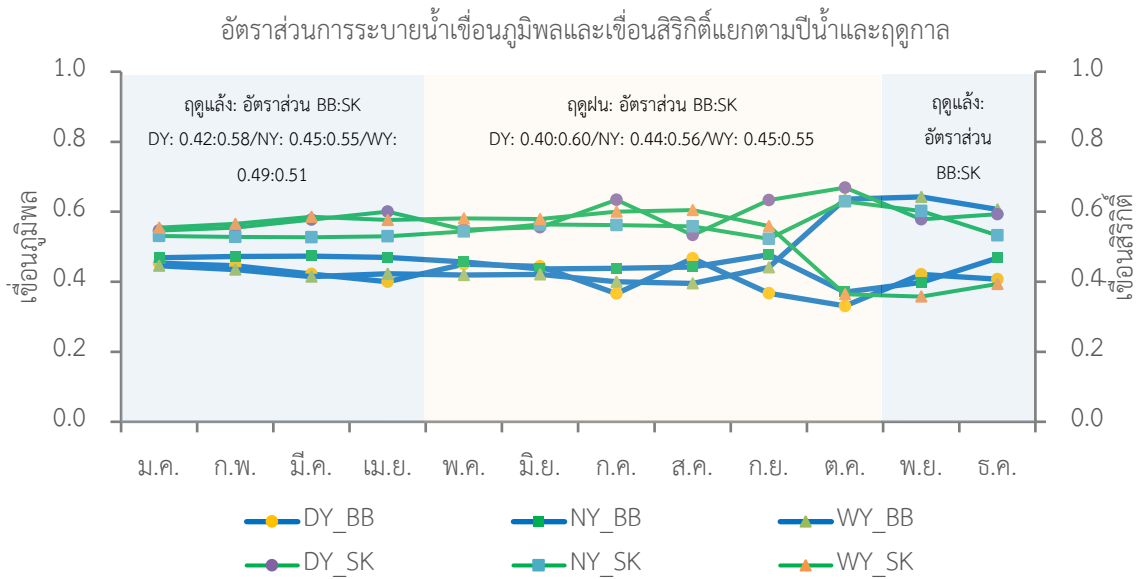
(12) อัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ของปีน้ำมากในช่วงฝนสูงกว่าในช่วงฤดูแล้ง 8.49% โดยมีค่าเป็น 0.57 จากเดิม 0.55 และอัตราส่วนการระบายน้ำยังคงสูงกว่าเขื่อนภูมิพล

(13) ในช่วงเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ปี พ.ศ. 2554 มีการปรับเปลี่ยนแนวทางการระบายน้ำจากเขื่อนหลักโดยเร่งระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลในช่วงเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคมในอัตราส่วนที่สูงกว่าเขื่อนสิริกิติ์จากแนวทางเดิมโดยผันแปรอยู่ระหว่าง 0.54–0.67

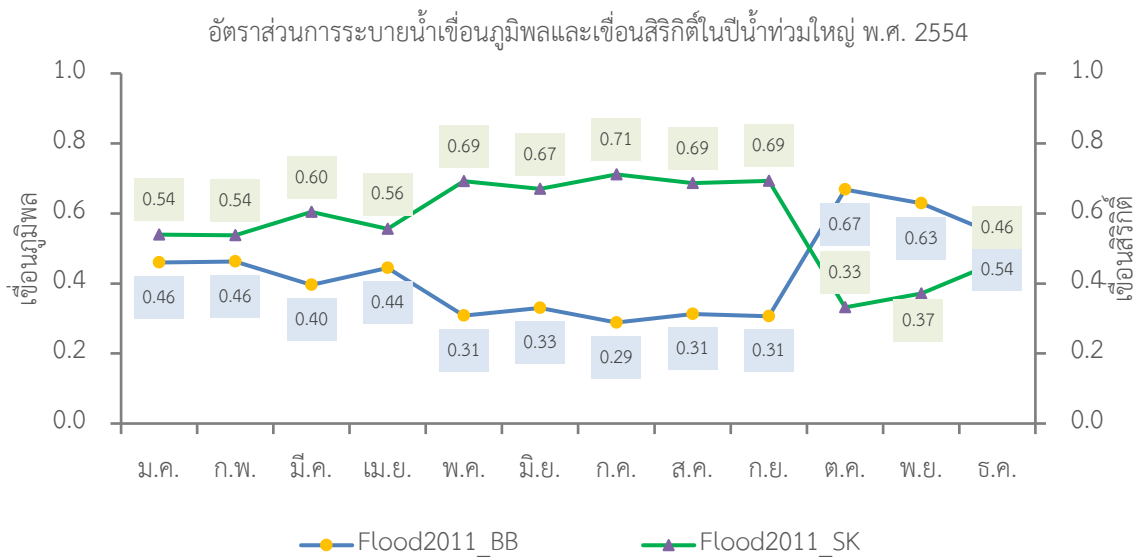
(14) ในช่วงเหตุการณ์ภัยแล้งปี พ.ศ. 2563 มีการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ในอัตราส่วนที่สูงกว่าเขื่อนภูมิพลตลอดทั้งปี โดยอัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนสิริกิติ์ผันแปรอยู่ระหว่าง 0.51–0.82



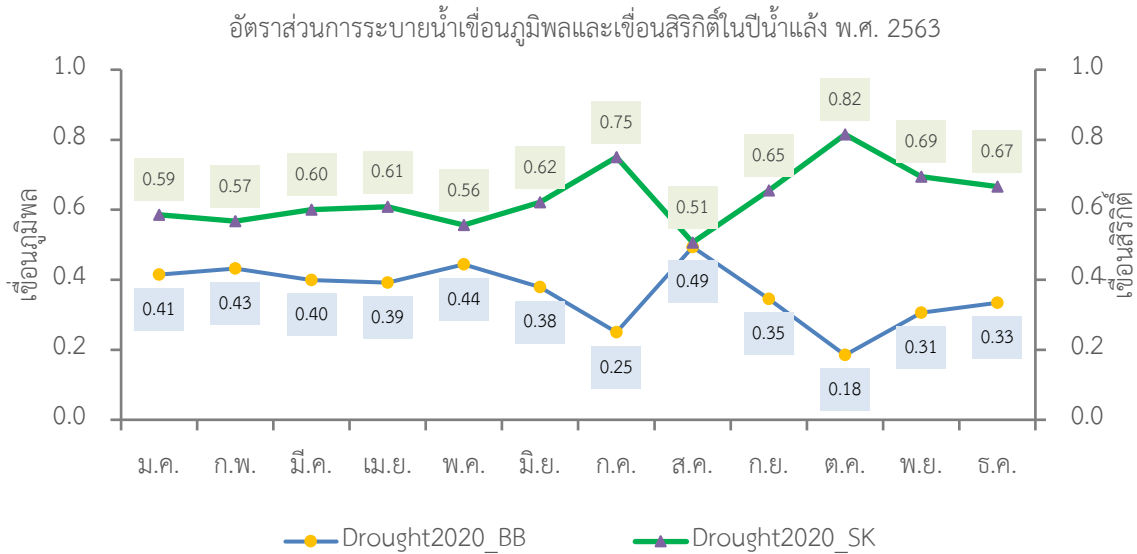
รูปที่ 4-16 อัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์รายวันจากผลการปฏิบัติงานจริง



รูปที่ 4-17 อัตราส่วนการระบายน้ำของเชื่อมภูมิพลและเชื่อมสิริกิติ์แยกตามปีน้ำและฤดูกาลจากผลการปฏิบัติงานจริง



รูปที่ 4-18 อัตราส่วนการระบายน้ำของเชื่อมภูมิพลและเชื่อมสิริกิติ์ในปีน้ำท่วมใหญ่ พ.ศ. 2554 จากผลการปฏิบัติงานจริง



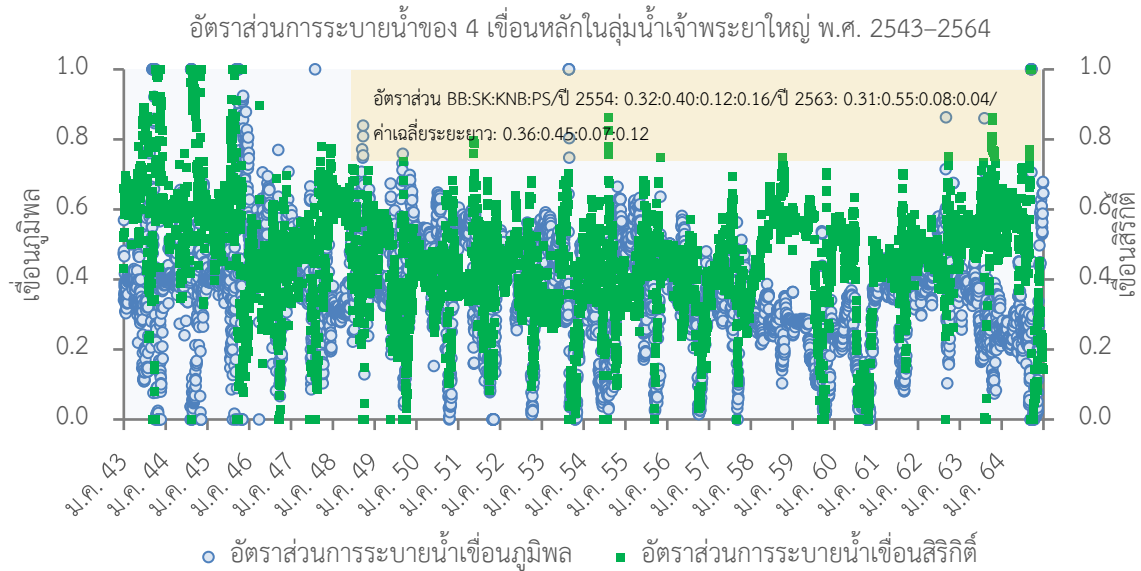
รูปที่ 4-19 อัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำแล้ง พ.ศ. 2563 จากผลการปฏิบัติงานจริง

4.2.1.3.2 กรณีวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

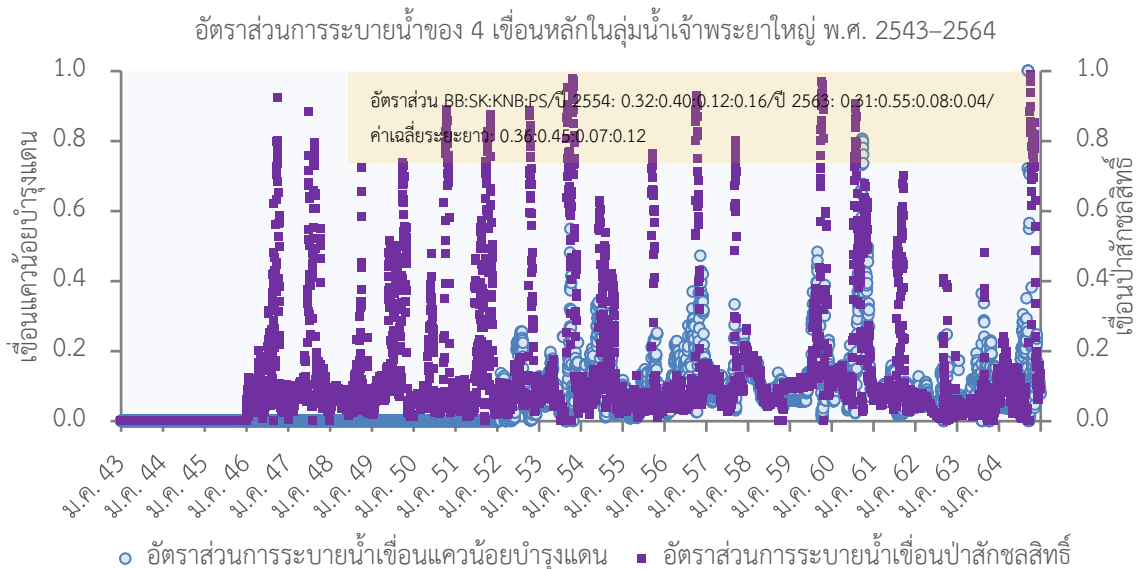
ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักได้แก่ เขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์แสดงไว้ในรูปที่ 4-20 ถึงรูปที่ 4-25 โดยมีผลสรุปที่สำคัญมีดังนี้

- (1) อัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล : เขื่อนสิริกิติ์ : เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน : เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เฉลี่ยระยะยาวเท่ากับ 0.36:0.45:0.07:0.12
- (2) อัตราส่วนการระบายน้ำจากทั้ง 4 เขื่อนในช่วงฤดูแล้งสูงกว่าในช่วงฤดูฝนทั้งในปีน้ำน้อยปีน้ำปกติ และปีน้ำมาก
- (3) อัตราส่วนการระบายน้ำจากทั้ง 4 เขื่อนในช่วงฤดูแล้งของปีน้ำน้อยน้อยกว่าปีน้ำปกติและน้อยกว่าปีน้ำมาก
- (4) จากข้อมูลเฉลี่ยรายปีแยกตามปีน้ำพบว่า อัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนสิริกิติ์สูงกว่าเขื่อนภูมิพลทุกปีน้ำ และมีแนวโน้มระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์สูงกว่าภูมิพลในปีน้ำน้อย
- (5) จากข้อมูลเฉลี่ยรายปีแยกตามปีน้ำพบว่า อัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์สูงกว่าเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนในปีน้ำปกติและปีน้ำมาก แต่อัตราส่วนการระบายน้ำมีแนวโน้มใกล้เคียงกันในปีน้ำน้อย
- (6) จากข้อมูลเฉลี่ยรายปีแยกตามปีน้ำพบว่า อัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนในช่วงฤดูแล้งและฤดูฝนผันแปรแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม แนวโน้มการระบายน้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์สูงกว่าในช่วงฤดูฝนของปีน้ำปกติและปีน้ำมากอย่างเห็นได้ชัด

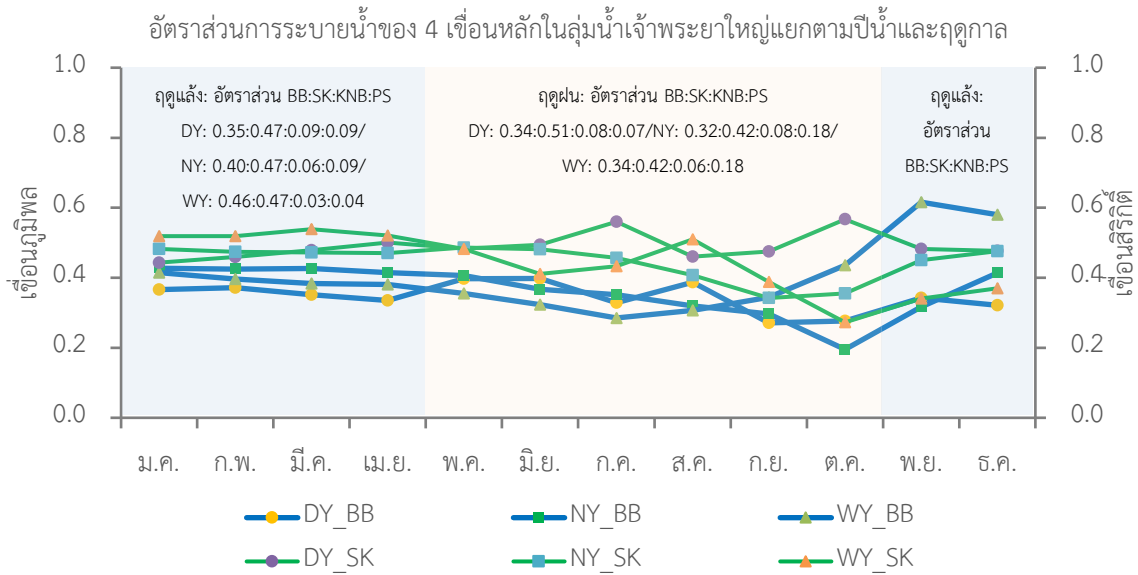
(7) ในช่วงเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ปี พ.ศ. 2554 และเหตุการณ์ภัยแล้งปี พ.ศ. 2563 มีการปรับเพิ่มและปรับลดอัตราส่วนการระบายน้ำจากค่าเฉลี่ยระยะยาวของทั้ง 4 เชื้อตามสถานการณ์น้ำและสถานะของปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำ



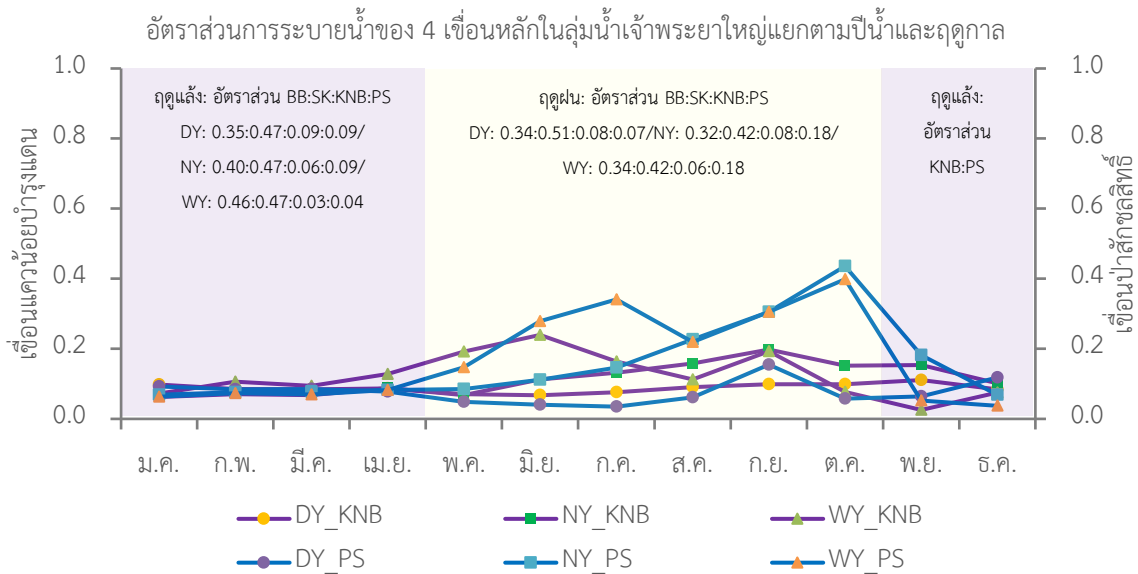
รูปที่ 4-20 อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เชื้อหลักในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่รายวันจากผลการปฏิบัติงานจริง



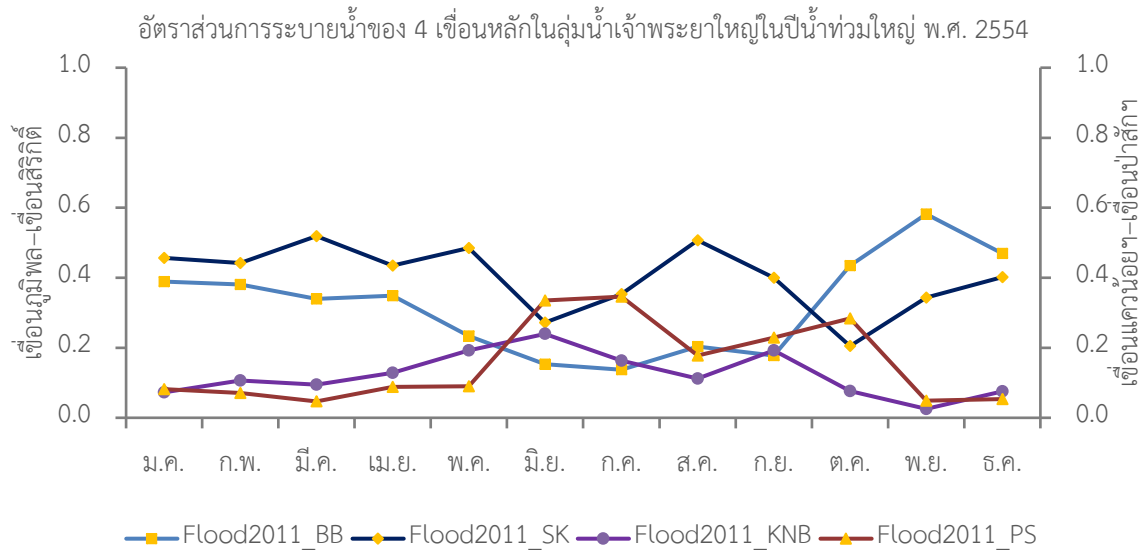
รูปที่ 4-21 อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เชื้อหลักในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่รายวันจากผลการปฏิบัติงานจริง



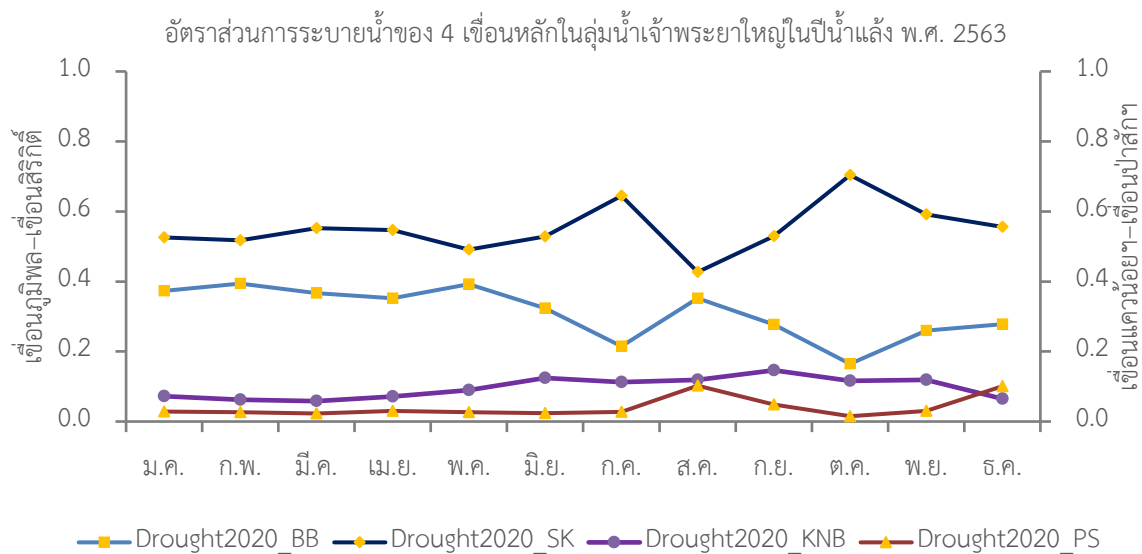
รูปที่ 4-22 อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เชื้อหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่แยกตามปีน้ำและฤดูกาลจากผลการปฏิบัติงานจริง



รูปที่ 4-23 อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เชื้อหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่แยกตามปีน้ำและฤดูกาลจากผลการปฏิบัติงานจริง



รูปที่ 4-24 อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ในปีน้ำท่วมใหญ่ พ.ศ. 2554 จากผลการปฏิบัติงานจริง



รูปที่ 4-25 อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ในปีน้ำแล้ง พ.ศ. 2563 จากผลการปฏิบัติงานจริง

4.2.1.4 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำกับ

ข้อมูลฝน

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์และข้อมูลฝนรายวันประกอบด้วย (1) ข้อมูลฝนตรวจวัด (Observed Rainfall) ทั้งจากฐานข้อมูลฝนของกรมอุตุนิยมวิทยา (Thai Meteorological Department, TMD) ข้อมูลฝนจากคลังข้อมูลสภาพภูมิอากาศโลก (Global Climate Data) ขององค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ

(National Aeronautics and Space Administration, NASA) และข้อมูลฝนปรับแก้จากระบบคลังข้อมูลน้ำแห่งชาติ (National Hydroinformatics Data Center, NHC) ของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) และข้อมูลฝนรายวันสองสัปดาห์ล่วงหน้าจากแบบจำลองการพยากรณ์ 2 ประเภทคือ (1) แบบจำลอง Climate Forecast System Version 2 with Bias Correction (CFSV2-BC) และ (2) แบบจำลองคู่ควบ WRF-ROMS-CFSV2 ที่มีลักษณะเป็น Grid-based Rainfall โดยทำการวิเคราะห์จากฐานข้อมูลระยะยาวและระยะสั้นแยกตามปีน้ำและในช่วงเหตุการณ์พายุเตียนหมู่ โดยช่วงข้อมูลที่รวบรวมได้และนำมาใช้วิเคราะห์ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4-20

ตารางที่ 4-20 ช่วงความยาวของฐานข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างและข้อมูลฝนที่นำมาวิเคราะห์สหสัมพันธ์

ประเภทของข้อมูล	ช่วงข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์
ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวัน	
-ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล	1/1/2543-17/4/2465
-ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์	1/1/2543-17/4/2465
ข้อมูลฝนของเขื่อนภูมิพลรายวัน	
-ข้อมูลฝนตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยาสถานี 376201	1/1/2543-17/4/2564
-ข้อมูลฝนตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยาสถานี 376202	1/1/2543-17/4/2564
-ข้อมูลฝนตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยาสถานี 376203	1/1/2543-17/4/2564
-ข้อมูลฝนตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยาสถานี 376301	1/1/2543-17/4/2564
-ข้อมูลฝนตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยาสถานี 376401	1/1/2543-17/4/2564
-ข้อมูลฝนจากคลังข้อมูลสภาพภูมิอากาศโลกของ NASA-06	1/1/2543-31/12/2563
-ข้อมูลฝนจากคลังข้อมูลน้ำแห่งชาติของ NHC	5/6/2564-29/11/2464
-ข้อมูลฝนพยากรณ์จากแบบจำลอง CFSV2-BC เหนือเขื่อนภูมิพล	5/6/2564-26/12/2464
-ข้อมูลฝนพยากรณ์จากแบบจำลอง WRF-ROMS-CFSV2 เหนือเขื่อนภูมิพล	5/6/2564-12/12/2464
ข้อมูลฝนของเขื่อนสิริกิติ์รายวัน	
-ข้อมูลฝนตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยาสถานี 351201	1/1/2543-17/4/2564
-ข้อมูลฝนจากคลังข้อมูลสภาพภูมิอากาศโลกของ NASA-18	1/1/2543-31/12/2563
-ข้อมูลฝนจากคลังข้อมูลน้ำแห่งชาติของ NHC	5/6/2564-29/11/2464
-ข้อมูลฝนพยากรณ์จากแบบจำลอง CFSV2-BC เหนือเขื่อนสิริกิติ์	5/6/2564-26/12/2464
-ข้อมูลฝนพยากรณ์จากแบบจำลอง WRF-ROMS-CFSV2 เหนือเขื่อนสิริกิติ์	5/6/2564-12/12/2464

ผลจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างและข้อมูลฝนของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์แสดงในตารางที่ 4-21 และตารางที่ 4-22

ตารางที่ 4-21 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเขื่อนภูมิพลและข้อมูลฝน

	Inflow_ BB	Prec_ NASA06	376201_ TMD	376202_ TMD	376203_ TMD	376301_ TMD	376401_ TMD	Obs_ NHC_ Ping	CFSV2_ BC_ Ping	WRFROMS_ CFSV2_ Ping
Inflow_ BB	1									
Prec_ NASA06_ BB	0.3693	1								
376201_ BB	0.2776	0.6499	1							
376202_ BB	0.1959	0.5218	0.3036	1						
376203_ BB	0.2369	0.7345	0.5414	0.2711	1					
376301_ BB	0.2815	0.5741	0.5304	0.5129	0.4197	1				
376401_ BB	0.2200	0.4275	0.3164	0.4252	0.2885	0.4597	1			
Obs_ NHC_ Ping	0.2584	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1		
CFSV2_ BC_ Ping	0.2360	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.2836	1	
WRFROMS_ CFSV2_ Ping	0.0342	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.2291	0.3797	1

ตารางที่ 4-22 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเขื่อนสิริกิติ์และข้อมูลฝน

	Inflow_ SK	Prec_ NASA18	351201_ TMD	Obs_ NHC_ Nan	CFSV2_ BC_ Nan	WRFROMS_ CFSV2_ Nan
Inflow_ SK	1					
Prec_ NASA18_ SK	0.4056	1				
351201_ SK	0.2478	0.7157	1			
Obs_ NHC_ Nan	0.0442	NA	NA	1		
CFSV2_ BC_ Nan	0.4760	NA	NA	0.2549	1	
WRFROMS_ CFSV2_ Nan	0.2482	NA	NA	0.0366	0.3104	1

ผลการวิเคราะห์พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเขื่อนภูมิพลและข้อมูลฝนจากคลังข้อมูลสภาพภูมิอากาศโลกขององค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุดเท่ากับ 0.3693 ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเขื่อนภูมิพลและข้อมูลฝนกับข้อมูลฝนตรวจวัดจากสถานีที่อยู่บริเวณตัวเขื่อนของกรมอุตุนิยมวิทยาจำนวน 5 สถานี ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ลดลงอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1959–0.2815 ยิ่งไปกว่านั้น ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเขื่อนภูมิพลและข้อมูลฝนตรวจวัดที่ได้มีการปรับแก้ค่าข้อมูลจากระบบคลังข้อมูลน้ำแห่งชาติของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงขึ้นเล็กน้อยเท่ากับ 0.2584 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากข้อมูลฝนจากองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติและระบบคลังข้อมูลน้ำแห่งชาติ ทั้งสองแหล่งได้มีการปรับแก้ข้อมูลตรวจวัดให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากขึ้น นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเขื่อนภูมิพลและข้อมูลฝนพยากรณ์ทั้งสองแบบจำลองยังให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ไม่สูงนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเป็นผลการพยากรณ์รายวันสองสัปดาห์ล่วงหน้า ทำให้ประสิทธิผลของการพยากรณ์ไม่สูงนัก อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ของข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลกับข้อมูลฝนพยากรณ์ด้วยแบบจำลอง CFSV2-BC สูงกว่า WRF-ROMS-

CFSV2 โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.2360 และ 0.0342 ตามลำดับ นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเขื่อนภูมิพลและข้อมูลฝนในช่วงเหตุการณ์พายุเตี้ยนหมู่ระหว่างเดือนตุลาคม-กันยายน พ.ศ. 2564 พบว่า ข้อมูลฝนตรวจวัดจากระบบคลังข้อมูลน้ำแห่งชาติ ข้อมูลฝนพยากรณ์ด้วยแบบจำลอง CFSV2-BC และแบบจำลอง WRF-ROMS-CFSV2 มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.2584, 0.2360 และ 0.0342 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยข้อมูลฝนในพื้นที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำที่ไหลเข้าเขื่อนภูมิพลไม่สูงนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปัจจัยกายภาพของพื้นที่ที่ส่งผลต่อชลศาสตร์การไหลของน้ำไหลเข้าเขื่อนและสัดส่วนของปริมาณฝนที่ตกท้ายเขื่อนสูงกว่าบริเวณเหนือเขื่อนในช่วงสถานการณ์ดังกล่าว

ในทำนองเดียวกัน ผลการวิเคราะห์พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเขื่อนสิริกิติ์และข้อมูลฝนจากคลังข้อมูลสภาพภูมิอากาศโลกขององค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุดเท่ากับ 0.4056 ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเขื่อนสิริกิติ์และข้อมูลฝนกับข้อมูลฝนตรวจวัดจากสถานีที่อยู่บริเวณตัวเขื่อนของกรมอุตุนิยมวิทยาจำนวน 1 สถานี ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ลดลงเท่ากับ 0.2478 ยิ่งไปกว่านั้น ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเขื่อนสิริกิติ์และข้อมูลฝนตรวจวัดที่ได้มีการปรับแก้ค่าข้อมูลจากระบบคลังข้อมูลน้ำแห่งชาติของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ค่อนข้างน้อยเพียงแค่ว่า 0.0442 นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเขื่อนสิริกิติ์และข้อมูลฝนพยากรณ์ทั้งสองแบบจำลองยังให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ไม่สูงนัก ในทำนองเดียวกันกับเขื่อนภูมิพล ความสัมพันธ์ของข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเขื่อนสิริกิติ์กับข้อมูลฝนพยากรณ์ด้วยแบบจำลอง CFSV2-BC สูงกว่า WRF-ROMS-CFSV2 โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.4760 และ 0.2482 ตามลำดับ นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเขื่อนภูมิพลและข้อมูลฝนในช่วงเหตุการณ์พายุเตี้ยนหมู่พบว่า ข้อมูลฝนตรวจวัดจากระบบคลังข้อมูลน้ำแห่งชาติ ข้อมูลฝนพยากรณ์ด้วยแบบจำลอง CFSV2-BC และแบบจำลอง WRF-ROMS-CFSV2 มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.0442, 0.4760 และ 0.2482 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยข้อมูลฝนในพื้นที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำที่ไหลเข้าเขื่อนสิริกิติ์ไม่สูงนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปัจจัยกายภาพของพื้นที่ที่ส่งผลต่อชลศาสตร์การไหลของน้ำไหลเข้าเขื่อน และสัดส่วนของปริมาณฝนที่ตกท้ายเขื่อนสูงกว่าบริเวณเหนือเขื่อนในช่วงสถานการณ์ดังกล่าว

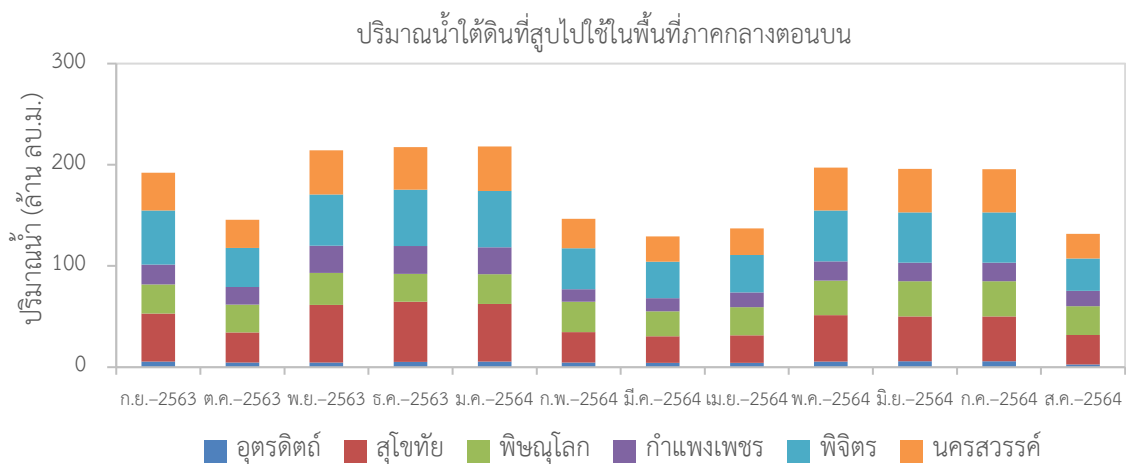
4.2.1.5 สถานะของน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษา

จากรายงานการศึกษาของ สกสว. (2563ก) ได้ทำการวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำใต้ดินที่สูบไปใช้ในเขตพื้นที่ภาคกลางตอนบน 6 จังหวัด ได้แก่ อุดรดิตถ์ สุโขทัย พิษณุโลก กำแพงเพชร พิจิตร และนครสวรรค์ ในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ. 2563 ถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2564 ให้ผลดังแสดงในตารางที่ 4-23 และรูปที่ 4-26 โดยมีปริมาณการใช้น้ำใต้ดินทั้งหมดรวม 2,121 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

ตารางที่ 4-23 ปริมาณน้ำใต้ดินที่สูบไปใช้ในเขตพื้นที่ภาคกลางตอนบนในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ. 2563 ถึง เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2564

เดือน-ปี	ปริมาณน้ำใต้ดินที่สูบไปใช้ (ล้าน ลบ.ม. ต่อเดือน)					
	อุดรดิตถ์	สุโขทัย	พิษณุโลก	กำแพงเพชร	พิจิตร	นครสวรรค์
ก.ย.-2563	5.48	47.38	28.83	19.59	53.43	37.36
ต.ค.-2563	4.48	29.79	27.60	17.28	38.68	27.80
พ.ย.-2563	4.61	56.87	31.81	26.90	50.54	43.59
ธ.ค.-2563	5.11	59.69	27.49	27.46	55.61	42.07
ม.ค.-2564	5.64	56.75	29.59	26.42	55.81	43.98
ก.พ.-2564	4.65	29.97	30.11	12.21	40.67	28.87
มี.ค.-2564	4.26	26.17	24.69	12.91	36.34	25.00
เม.ย.-2564	4.30	27.23	27.65	14.61	37.24	25.99
พ.ค.-2564	5.67	45.63	34.26	18.88	50.26	42.61
มิ.ย.-2564	5.74	44.34	34.88	18.36	49.69	42.86
ก.ค.-2564	5.73	44.32	34.86	18.35	49.64	42.84
ส.ค.-2564	2.80	28.91	28.67	15.14	31.79	24.50
รวม	58.47	497.05	360.44	228.11	549.70	427.47

ที่มา: สกสว. (2563ก)



รูปที่ 4-26 ปริมาณน้ำใต้ดินที่สูบไปใช้ในเขตพื้นที่ภาคกลางตอนบนระหว่างปี พ.ศ. 2563-2564

ที่มา: สกสว. (2563ก)

4.2.1.6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณความต้องการน้ำภาคการเกษตรกรรม

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวิจัยตามกรอบการการศึกษาวิจัยที่แสดงในบทที่ 3 ข้างต้น โดยมุ่งเน้นที่จะติดตามค่าปริมาณความต้องการน้ำสำหรับพืช (Crop Evapotranspiration, ETC) ที่มีลักษณะไดนามิกส์ (ผันแปรตามเวลา) เพื่อประเมินปริมาณความต้องการน้ำภาคเกษตรกรรมสำหรับใช้เป็นข้อมูลประกอบการ

จัดการทรัพยากรน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ และเพื่อทำการประเมินประสิทธิภาพการชลประทานระดับโครงการจำนวน 34 โครงการ และ/หรือระดับโซนส่งน้ำ

สำหรับการประมาณความต้องการน้ำของพืชได้อาศัยแอปพลิเคชัน Cloud-Based IrrisAT มาใช้ในการวิเคราะห์ ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อขยายผลและตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของข้อมูลผลลัพธ์และเครื่องมือที่นำมาประยุกต์ใช้จากโครงการวิจัย เรื่อง “กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)” (สกสว., 2563ข) ให้ครอบคลุมพื้นที่โครงการชลประทานจำนวน 34 โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา ประกอบด้วย 3 โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา (โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาเวียงยาง-หนองขวัญ แยกวิเคราะห์ออกเป็น 2 พื้นที่) ในลุ่มน้ำปิงตอนล่าง 5 โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาในลุ่มน้ำน่านตอนล่าง และ 26 โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาในลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน และใช้เครื่องมือ ETo Calculator ที่พัฒนาโดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) และข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมจากระบบบริการภูมิสารสนเทศเพื่อการเกษตร GISagro 4.0 Application ของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน)(Geo-Informatics and Space Technology Development Agency, GISTDA) ซึ่งฐานข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำของพืชในอดีตถึงปัจจุบันที่ได้รับการประมาณการด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่ซึ่งออกแบบโดยอาศัยข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมนับเป็นสารสนเทศที่เป็นประโยชน์ที่จะมาช่วยสนับสนุนงานด้านชลประทานจากผลพวงของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สำหรับการใช้ในการกำหนดแนวทางการจัดสรรน้ำและกำหนดปริมาณน้ำที่จะจัดส่งในระดับโครงการชลประทานหรือโซนส่งน้ำได้อย่างเหมาะสมและทั่วถึง ตลอดจนยังสามารถนำมาใช้กำหนดแนวทางการระบายน้ำจากเขื่อนหลักให้สอดคล้องตามปัจจัยความต้องการน้ำของพืชในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ อีกทั้งผลการประเมินประสิทธิภาพการชลประทานจะช่วยให้ทราบปัญหาและสถานการณ์ในการจัดสรรน้ำชลประทานทั้งในระดับโครงการและ/หรือโซนการส่งน้ำในปัจจุบัน ตลอดจนสามารถระบุพื้นที่เกษตรชลประทานที่ประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำหรือประสิทธิภาพการชลประทานยังอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ซึ่งเป็นข้อมูลเหล่านี้จะเป็นส่วนสำคัญที่จะนำมาใช้ในการตัดสินใจการจัดสรรน้ำเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพการชลประทานตลอดจนนำมาใช้ในการวางแผนการเพาะปลูกพืชและชนิดพืชที่ปลูกให้มีความเหมาะสมตามข้อจำกัดของน้ำต้นทุนในช่วงสถานการณ์น้ำวิกฤต

4.2.1.6.1 ผลการรวบรวมข้อมูลวิจัย

ข้อมูลหลักที่ใช้ในการวิจัยครอบคลุมข้อมูลทุติยภูมิที่รวบรวมจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ดังนี้ (1) ข้อมูล GIS Shape Files แสดงพื้นที่ศึกษาครอบคลุมทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำและโครงการชลประทานในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่รวบรวมจากกรมพัฒนาที่ดิน (2) ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc รวบรวมจากกรมชลประทาน (3) ข้อมูลปริมาณการส่งน้ำที่อาคารควบคุมน้ำในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ รวบรวมจากกรมชลประทาน (4) ข้อมูลพื้นที่การเพาะปลูกพืช 4 ชนิด ได้แก่ อ้อย ข้าว มันสำปะหลัง และข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่รวบรวมจากสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศ

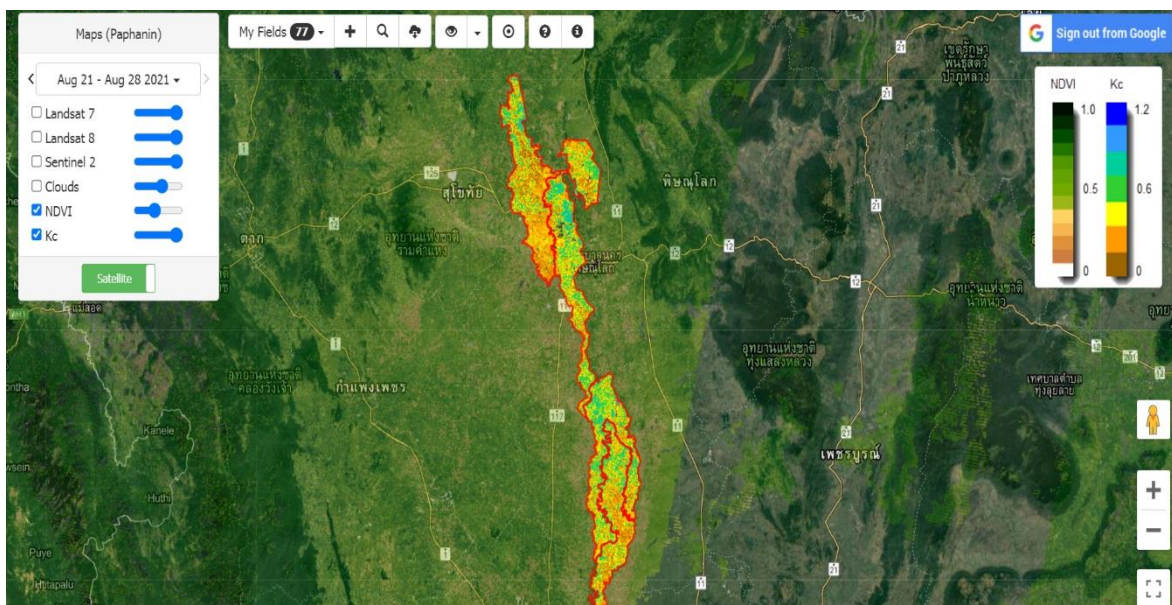
และภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) และ (5) ข้อมูลสภาพภูมิอากาศจากสถานีตรวจวัดต่าง ๆ ในพื้นที่ศึกษา รวบรวมจากกรมอุตุนิยมวิทยา

4.2.1.6.2 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ใช้น้ำของพืช (Kc) ที่สร้างจากแอปพลิเคชัน

IrriSAT

ค่าไดนามิกส์ของ Kc-IrriSAT ในโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่รายสัปดาห์ในช่วงปี พ.ศ. 2543-2563 ได้ถูกทำการประมาณค่าโดยใช้แอปพลิเคชัน IrriSAT ที่สามารถวิเคราะห์ผลบนระบบคลาวด์ โดยครอบคลุมพื้นที่โครงการชลประทานในลุ่มน้ำปิงตอนล่าง ลุ่มน้ำน่านตอนล่าง และลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน ถึงแม้ว่าศักยภาพของแอปพลิเคชัน Cloud-Based IrriSAT ได้รับการพัฒนาเพื่อประมาณค่า Kc, ETo และทำนายปริมาณการใช้น้ำของพืชรายวันและเจ็ดวันล่วงหน้า (ETc) และแสดงผลในมาตราส่วนเชิงพื้นที่และเวลา อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้เน้นไปที่การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Kc) เท่านั้น

การนำเข้าข้อมูลพื้นที่ชลประทานในแอปพลิเคชัน Cloud-Based IrriSAT สามารถทำได้โดยแปลง GIS Shape File ไปเป็นไฟล์ Keyhole Markup Language (KML) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4-27 จากนั้นแอปพลิเคชัน Cloud-Based IrriSAT จะประมวลผลและแสดงผลลัพธ์ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในหลากหลายรูปแบบ ได้แก่ Kc(average), Kc(observed), Kc(override), Kc(stddev), Kc(min), Kc(Q1), Kc(median), Kc(Q3), and Kc(max) รวมถึง Field Visibility (%) จะถูกสังเคราะห์ขึ้น รูปแบบของค่า Kc ต่าง ๆ เหล่านี้จะถูกทำการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ และเลือกใช้ค่า Kc (ค่าเฉลี่ย) หรือค่า Kc รูปแบบที่เหมาะสมมาใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Kc-RID) ที่ดำเนินการโดยใช้ข้อมูล Kc ตรวจวัดจากกรมชลประทานและข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมจากสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน)



รูปที่ 4-27 การนำเข้าพื้นที่โครงการชลประทานในแอปพลิเคชัน IrriSAT

4.2.1.6.3 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Kc-RID)

ในงานวิจัยนี้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแบบไดนามิกส์ (Kc-IrriSAT) ในช่วงปี พ.ศ. 2562 ถึงปี พ.ศ. 2563 ที่ได้จากขั้นตอนข้างต้นจะได้รับการตรวจพิสูจน์โดยการปรับเทียบกับค่าจากการตรวจวัดในรูปของ Average Kc-RID ที่ทำการวิเคราะห์โดยอาศัยฐานข้อมูล Kc ตรวจวัดของกรมชลประทาน และข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมจากระบบบริการภูมิสารสนเทศเพื่อการเกษตร GISagro 4.0 Application ของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ที่สามารถติดตามข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกพืช 4 ชนิด ตามที่ได้กล่าวรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 สำหรับผลการศึกษานำเสนอเฉพาะค่าสูงสุดของ Kc(avg.)-IrriSAT และใช้เปรียบเทียบผลลัพธ์กับค่าสูงสุดของ Kc(avg.)-RID เพื่อดูความต่างระหว่างทั้งสองค่าตามที่สรุปไว้ในตารางที่ 4-24

ตารางที่ 4-24 สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Kc) ที่ได้จากแอปพลิเคชัน IrriSAT ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563

ลำดับ	โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา	ค่าสูงสุดของ Kc(avg.)-IrriSAT	ค่าสูงสุดของ Kc(avg.)-RID
โครงการชลประทานลุ่มน้ำปิงตอนล่าง			
1	ท่อทองแดง	0.6698	1.3942
2	วังบัว	0.6760	1.3412
3	วังยาง	0.7126	1.4171
4	หนองขวัญ	0.6841	1.3415
โครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง			
1	ดงเศรษฐี	0.6410	1.3890
2	นเรศวร	0.5979	1.5971
3	พลายชุมพล	0.6970	1.6080
4	ท่าบัว	0.6282	1.4533
5	ยมน่าน	0.6454	1.6075
โครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน			
1	บางบาล	0.6362	1.5747
2	บรมธาตุ	0.6938	1.5555
3	ชั้นสูตร	0.6446	1.4952
4	เจ้าเจ็ดบางยี่หน	0.6758	1.6066
5	ดอนเจดีย์	0.7055	1.5748
6	ผักไห่	0.6967	1.6250
7	โพธิ์พระยา	0.6694	1.6143
8	พลเทพ	0.7345	1.6227
9	สามชุก	0.6931	1.5661
10	ท่าโบสถ์	0.7136	1.5346
11	ทุ่งวัดสิงห์	0.6143	0.7930

ลำดับ	โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา	ค่าสูงสุดของ Kc(avg.)-IrrisAT	ค่าสูงสุดของ Kc(avg.)-RID
12	ยางมณี	0.6035	1.5895
13	ภาษีเจริญ	0.5610	1.5050
14	พระยาบวรลือ	0.5607	1.5026
15	พระพิมล	0.5958	1.5684
16	ช่องแค	0.6071	1.4300
17	โคกกระเทียม	0.5784	1.5714
18	มหาราช	0.6313	1.5242
19	มโนรมย์	0.6685	1.4964
20	เริงราง	0.5614	1.6100
21	ชลหารพิจิตร (คลองด่าน)	0.4981	1.3978
22	นครหลวง	0.5329	1.4854
23	รังสิตเหนือ	0.6025	1.5064
24	พระองค์ไชยานุชิต	0.5712	1.3693
25	ป่าสักใต้	0.5677	1.5147
26	รังสิตใต้	0.5887	1.5050

4.2.1.6.4 การปรับเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Kc)

ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrrisAT และ Average Kc-RID ที่คำนวณจากข้อมูล 4 ชนิดพืชถูกนำมาใช้ในการปรับเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Kc) เพื่อวิเคราะห์หาค่าแฟคเตอร์ปรับแก้ (Adjusted Factor) ในช่วงฤดูการเพาะปลูกของพืชซึ่งแบ่งออกเป็น (1) พืชในฤดูเพาะปลูก (In-Season Crop) และ (2) พืชนอกฤดูเพาะปลูก (Off-Season Crop) ในพื้นที่ โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) ซึ่งนับเป็นวิธีทางสถิติที่ใช้หาเส้นถดถอยที่ทำให้ผลบวกกำลังสองของผลต่างระหว่างจุดต่างๆ กับเส้นถดถอยมีค่าน้อยที่สุด ผลการวิเคราะห์แฟคเตอร์ปรับแก้ของ Kc-IrrisAT แสดงในตารางที่ 4-25 โดยหลังจากปรับแก้แล้วค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrrisAT Adjusted และ Average Kc-RID ทั้ง 35 โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาอยู่ในเกณฑ์ที่ดีขึ้นในช่วงระหว่าง 0.6243-0.9487 ดังแสดงผลในภาคผนวก A นอกจากนี้ยังได้สรุปค่า Kc-IrrisAT Adjusted ในปี พ.ศ. 2563/2564 สำหรับใช้การคำนวณหาปริมาณความต้องการน้ำของพืช (Crop Water Requirement, CWR) ในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ดังแสดงในตารางที่ 4-26

ตารางที่ 4-25 แฟคเตอร์ปรับแก้ของ Kc-IrriSAT ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด

ชนิดพืช	แฟคเตอร์ปรับแก้ (Adjusted Factor)			
	พืชนอกฤดูเพาะปลูก		พืชในฤดูเพาะปลูก	
ช่วงเวลา	1 ม.ค. ถึง 15 เม.ย. (ช่วงตั้งต้น-ช่วงปลาย)	16 เม.ย. ถึง 15 มิ.ย. (ช่วงตั้งต้น)	16 มิ.ย. ถึง 31 ต.ค. (ช่วงกลาง)	1 ก.ย. ถึง 31 ธ.ค. (ช่วงปลาย)
โครงการชลประทานลุ่มน้ำปิงตอนล่าง				
ท่อทองแดง	2.0334	1.0716	2.0539	1.0922
วังบัว	1.5620	0.7985	1.9422	1.2692
วังยาง	1.7551	0.3526	1.8533	0.8417
หนองขวัญ	1.6371	0.7177	1.7929	1.3034
โครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง				
ดงเศรษฐี	2.0929	0.7752	1.9388	0.5470
นเรศวร	2.7652	1.0737	2.0584	0.6335
พลาญชุมพล	2.5714	1.4238	1.9569	0.6082
ท่าบัว	2.2008	0.9515	2.1236	0.6466
ยมน่าน	2.6441	1.5340	2.2254	0.9061
โครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน				
บางบาล	2.4883	1.6715	2.2582	0.5704
บรมธาตุ	1.8751	1.0222	2.0078	0.8684
ชั้นสูตร	1.7411	1.0516	2.2103	0.8804
เจ้าเจ็ดบางยี่หน	2.4220	1.9655	1.6633	0.7042
ดอนเจดีย์	1.8967	1.0711	2.2554	0.9888
ผักไห่	2.4693	1.9050	2.1879	0.1096
โพธิ์พระยา	2.2210	1.6078	2.0774	0.4704
พลเทพ	2.2103	1.5210	2.2538	0.7402
สามชุก	1.7258	1.1355	2.1876	0.8559
ท่าโบสถ์	1.9915	0.9965	2.0167	0.7937
ทุ่งวัดสิงห์	0.8434	0.5461	1.5686	0.7900
ยางมณี	2.3471	1.2769	2.5781	0.7271
ภาษีเจริญ	2.2771	1.0289	2.3159	0.7381
พระยาบรรลือ	2.5626	1.5194	2.1666	0.8013
พระพิมล	2.3458	1.2847	2.1870	0.7298
ช่องแค	2.3745	0.9883	2.0231	0.8398
โคกกระเทียม	2.3072	1.4350	2.3197	0.6358
มหาราช	2.2569	1.1678	2.3657	0.7429
มโนรมย์	2.3041	1.4270	2.4552	0.9118

โครงการชลประทาน	แฟกเตอร์ปรับแก้ (Adjusted Factor)			
	พืชนอกฤดูเพาะปลูก		พืชในฤดูเพาะปลูก	
ชนิดพืช				
ช่วงเวลา	1 ม.ค. ถึง 15 เม.ย. (ช่วงตั้งต้น-ช่วงปลาย)	16 เม.ย. ถึง 15 มิ.ย. (ช่วงตั้งต้น)	16 มิ.ย. ถึง 31 ต.ค. (ช่วงกลาง)	1 ก.ย. ถึง 31 ธ.ค. (ช่วงปลาย)
เรียงราง	2.3782	1.3524	2.3415	0.6517
ชลหารพิจิตร (คลองด่าน)	2.4300	0.9873	2.5151	0.8521
นครหลวง	3.2465	1.4101	2.5017	1.1793
รังสิตเหนือ	1.7213	1.3344	2.1928	0.8685
พระองค์ไชยานุชิต	1.2971	0.3111	2.0458	1.2346
ป่าสักใต้	2.7743	1.3500	2.0685	1.0396
รังสิตใต้	1.5446	1.1686	2.2316	0.9006

ตารางที่ 4-26 ค่า Kc-IrriSAT Adjusted ในปี พ.ศ. 2563/2564 ที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณความต้องการน้ำของพืชพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่

โครงการ ชลประทาน	ค่า Kc-IrriSAT Adjusted											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
โครงการชลประทานลุ่มน้ำปิงตอนล่าง												
ท่อทองแดง	0.59	0.81	0.74	0.48	0.39	0.80	1.32	1.24	0.53	0.64	0.61	0.46
วังบัว	0.61	0.58	0.53	0.37	0.35	0.79	1.22	1.17	0.73	0.83	0.71	0.54
วังยาง	0.66	0.75	0.73	0.30	0.10	0.48	1.25	1.26	0.47	0.48	0.52	0.40
หนองขวัญ	0.60	0.71	0.65	0.33	0.22	0.58	1.10	1.21	0.78	0.82	0.81	0.65
โครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง												
ดงเศรษฐี	0.90	1.10	0.99	0.56	0.30	0.72	1.18	1.18	0.29	0.32	0.29	0.23
นเรศวร	1.11	1.56	1.21	0.38	0.29	0.68	1.08	1.08	0.32	0.34	0.28	0.17
พลาญชุมพล	1.13	1.46	1.24	0.56	0.49	0.92	1.15	1.26	0.29	0.34	0.30	0.20
ท่าบัว	0.91	1.20	1.08	0.59	0.35	0.81	1.29	1.16	0.34	0.38	0.38	0.32
ยมน่าน	0.98	1.34	1.03	0.52	0.65	1.13	1.35	1.20	0.41	0.41	0.45	0.33
โครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน												
บางบาล	1.21	1.19	0.80	0.50	0.51	1.04	1.39	1.05	0.22	0.22	0.21	0.25
บรมธาตุ	0.98	0.97	0.72	0.42	0.33	0.74	1.34	1.34	0.44	0.53	0.49	0.42
ชั้นสูตร	0.82	0.81	0.65	0.37	0.42	0.94	1.39	1.18	0.49	0.55	0.48	0.41
เจ้าเจ็ดบางยี่หน	1.43	1.31	0.76	0.67	0.85	1.04	1.04	0.85	0.27	0.27	0.24	0.34
ดอนเจดีย์	0.87	0.88	0.71	0.46	0.45	0.91	1.29	1.33	0.50	0.66	0.64	0.49
ผักไห่	1.15	1.54	0.94	0.35	0.57	1.29	1.49	0.73	0.04	0.04	0.04	0.03
โพธิ์พระยา	1.14	1.24	0.87	0.62	0.65	1.19	1.31	0.97	0.19	0.23	0.21	0.22

4 | การปฏิบัติกระบวนอย่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

โครงการ ชลประทาน	ค่า Kc-IrriSAT Adjusted											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
พลเทพ	0.85	1.20	0.90	0.63	0.82	1.37	1.43	1.01	0.40	0.53	0.47	0.30
สามชุก	0.79	0.88	0.69	0.50	0.42	0.94	1.41	1.27	0.42	0.58	0.52	0.41
ท่าโบสถ์	1.24	1.11	0.62	0.36	0.37	0.78	1.35	1.31	0.39	0.44	0.39	0.40
ทุ่งวัดสิงห์	0.40	0.31	0.26	0.27	0.27	0.54	0.77	0.60	0.44	0.46	0.44	0.40
ยางมณี	1.25	1.07	0.91	0.53	0.53	1.02	1.52	1.10	0.37	0.38	0.36	0.36
ภาษีเจริญ	0.93	1.05	1.00	0.65	0.48	0.93	1.20	1.09	0.35	0.36	0.36	0.33
พระยาบรรลือ	1.32	0.98	0.90	0.73	0.74	0.99	1.19	1.05	0.39	0.37	0.36	0.42
พระพิมล	1.26	1.00	0.91	0.65	0.62	0.98	1.23	1.11	0.37	0.29	0.33	0.34
ช่องแค	1.14	1.11	0.97	0.37	0.27	0.56	0.93	1.16	0.49	0.39	0.35	0.37
โคกกระเทียม	1.22	1.15	0.94	0.55	0.51	0.92	1.34	1.20	0.29	0.31	0.31	0.32
มหาราช	1.01	1.00	0.97	0.55	0.44	0.91	1.45	1.15	0.36	0.42	0.40	0.35
มโนรมย์	1.42	1.41	1.37	0.92	0.95	1.28	1.55	1.23	0.62	0.72	0.70	0.61
เริงราง	1.10	0.91	1.02	0.61	0.48	0.85	1.26	1.05	0.30	0.23	0.32	0.30
ชลหารพิจิตร (คลองด่าน)	0.96	0.89	0.89	0.48	0.30	0.72	1.22	1.02	0.40	0.39	0.38	0.38
นครหลวง	1.23	1.15	1.22	0.67	0.53	0.88	1.14	0.98	0.49	0.59	0.63	0.53
รังสิตเหนือ	0.83	0.80	0.83	0.61	0.60	0.98	1.29	1.13	0.46	0.46	0.48	0.41
พระองค์ไชยานุชิต	0.54	0.50	0.45	0.19	0.07	0.49	1.12	0.91	0.61	0.49	0.50	0.46
ป่าสักใต้	1.20	1.18	1.17	0.62	0.57	0.86	0.99	0.85	0.48	0.55	0.57	0.54
รังสิตใต้	0.76	0.56	0.56	0.34	0.36	0.81	1.30	1.10	0.42	0.41	0.48	0.46

4.2.1.6.5 การประมาณการค่าปริมาณการคายระเหยน้ำของพืชอ้างอิง (ET_o)

ผลการคำนวณค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิง (Reference Crop Evapotranspiration, ET_o) โดยอาศัยซอฟต์แวร์ ET_o Calculator (Hargreaves & Samani, 1985) ที่ใช้สมการ Penman-Monteith ในการคำนวณ และอาศัยข้อมูลสภาพภูมิอากาศรายเดือนที่รวบรวมจากสถานีต่าง ๆ ของกรมอุตุนิยมวิทยาเป็นข้อมูลนำเข้าหลัก จากนั้นทำการวิเคราะห์แยกรายโครงการชลประทานจำนวน 34 โครงการตามสัดส่วนพื้นที่ด้วยเทคนิครูปหลายเหลี่ยมทิสเสน ซึ่งผลลัพธ์ของค่าการคายระเหยน้ำของพืชอ้างอิงสำหรับนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณความต้องการน้ำของพืชในปี พ.ศ. 2563/2564 ในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่สรุปไว้ในตารางที่ 4-27

ตารางที่ 4-27 ค่าการคายระเหยน้ำของพืชอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณความต้องการน้ำของพืชในปี พ.ศ. 2563/2564 ในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่

โครงการ ชลประทาน	ค่าการคายระเหยน้ำของพืชอ้างอิง (ETo) (มิลลิเมตรต่อวัน)											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
โครงการชลประทานลุ่มน้ำปึงตอนล่าง												
ท่อทองแดง	3.28	4.06	4.55	4.81	4.71	4.6	4.44	3.91	3.38	2.83	2.57	3.28
วังบัว	3.08	3.67	3.67	4.20	3.91	3.76	3.73	3.57	3.07	2.59	2.37	3.08
วังยาง	3.63	4.57	4.70	4.56	4.34	4.20	4.02	3.62	3.17	2.69	2.55	3.63
หนองขวัญ	4.18	5.47	5.73	4.92	4.77	4.63	4.30	3.67	3.26	2.78	2.73	4.18
โครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง												
ดงเศรษฐี	2.95	3.58	4.52	5.16	5.24	4.91	4.59	4.36	4.02	3.39	2.90	2.95
นเรศวร	2.88	3.44	3.92	4.33	4.40	4.29	4.23	4.17	3.97	3.61	3.05	2.88
พลาญชุมพล	2.92	3.51	4.22	4.74	4.82	5.69	4.41	4.27	4.00	3.50	2.97	2.92
ท่าบัว	2.95	3.88	5.00	5.45	5.08	4.84	4.61	4.33	3.85	3.32	2.84	2.95
ยมน่าน	2.87	3.37	3.88	4.28	4.37	4.26	4.19	4.14	3.94	3.54	3.03	2.87
โครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน												
บางบาล	4.69	4.47	5.35	5.39	5.23	5.29	5.23	4.98	4.31	4.30	4.79	5.29
บรมธาตุ	2.81	3.36	4.19	4.71	4.67	4.72	4.50	4.45	3.68	3.14	3.00	2.86
ชั้นสูตร	3.75	3.91	4.77	5.05	4.95	5.01	4.86	4.71	3.99	3.72	3.90	4.08
เจ้าเจ็ดบางยี่หน	4.69	4.47	5.35	5.39	5.23	5.29	5.23	4.98	4.31	4.30	4.79	5.29
ดอนเจดีย์	3.75	3.91	4.77	5.05	4.95	5.01	4.86	4.71	3.99	3.72	3.90	4.08
ผักไห่	4.69	4.47	5.35	5.39	5.23	5.29	5.23	4.98	4.31	4.30	4.79	5.29
โพธิ์พระยา	4.69	4.47	5.35	5.39	5.23	5.29	5.23	4.98	4.31	4.30	4.79	5.29
พลเทพ	2.81	3.36	4.19	4.71	4.67	4.72	4.50	4.45	3.68	3.14	3.00	2.86
สามชุก	3.75	3.91	4.77	5.05	4.95	5.01	4.86	4.71	3.99	3.72	3.90	4.08
ท่าโบสถ์	2.81	3.36	4.19	4.71	4.67	4.72	4.50	4.45	3.68	3.14	3.00	2.86
ทุ่งวัดสิงห์	2.81	3.36	4.19	4.71	4.67	4.72	4.50	4.45	3.68	3.14	3.00	2.86
ยางมณี	4.69	4.47	5.35	5.39	5.23	5.29	5.23	4.98	4.31	4.30	4.79	5.29
ภาษีเจริญ	3.58	4.57	5.41	5.57	5.18	5.14	5.02	5.03	4.53	3.92	3.63	3.65
พระยาบรรลือ	4.34	4.61	5.53	5.75	5.68	6.01	5.77	5.60	4.01	4.45	4.53	3.97
พระพิมล	3.58	4.57	5.41	5.57	5.18	5.14	5.02	5.03	4.53	3.92	3.63	3.65
ช่องแค	3.13	3.14	4.99	5.25	4.73	4.60	4.51	4.39	3.72	3.39	3.22	3.18
โคกกระเทียม	4.00	3.28	4.93	5.08	4.89	4.86	4.80	4.73	4.04	3.91	4.23	4.47
มหาราช	3.60	3.31	4.69	4.95	4.82	4.81	4.70	4.64	3.92	3.65	3.82	3.93
มโนรมย์	2.88	3.77	4.83	5.22	4.79	4.75	4.57	4.38	3.68	3.20	2.89	2.79
เริงราง	4.69	4.47	5.35	5.39	5.23	5.29	5.23	4.98	4.31	4.30	4.79	5.29

4 | การปฏิบัติกระบวนอย่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)

โครงการ ชลประทาน	ค่าการคายระเหยน้ำของพืชอ้างอิง (ET _o) (มิลลิเมตรต่อวัน)											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ชลหารพิจิตร (คลองด่าน)	3.58	4.57	5.41	5.57	5.18	5.14	5.02	5.03	4.53	3.92	3.63	3.65
นครหลวง	4.69	4.47	5.35	5.39	5.23	5.29	5.23	4.98	4.31	4.30	4.79	5.29
รังสิตเหนือ	4.34	4.61	5.53	5.75	5.68	6.01	5.77	5.60	4.01	4.45	4.53	3.97
พระองค์ไชยานุชิต	3.58	4.57	5.41	5.57	5.18	5.14	5.02	5.03	4.53	3.92	3.63	3.65
ป่าสักใต้	4.69	4.47	5.35	5.39	5.23	5.29	5.23	4.98	4.31	4.30	4.79	5.29
รังสิตใต้	3.79	4.66	5.56	5.84	5.66	5.94	5.67	5.63	4.12	4.26	3.95	3.15

4.2.1.6.6 การประมาณการค่าปริมาณความต้องการน้ำของพืช (ET_c)

หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการปรับเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช K_c-IrriSAT และค่า Average K_c-RID และการประมาณค่า ET_o โดยเฉลี่ยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการคำนวณหาค่าปริมาณความต้องการน้ำของพืช (ET_c) โดยใช้สมการที่ 4-1 ดังนี้ (Allen et al., 1998)

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad \text{-----(4-1)}$$

โดยที่

ET_c = ความต้องการน้ำของพืช (มิลลิเมตรต่อช่วงเวลา)

K_c = ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่วิเคราะห์ได้จากแอปพลิเคชัน IrriSAT (K_c-IrriSAT Adjusted)

ET_o = การคายระเหยของพืชอ้างอิง (มิลลิเมตรต่อช่วงเวลา)

ตารางที่ 4-28 แสดงค่าที่คำนวณได้ของความต้องการน้ำพืชผลรายเดือนและรายปี (ET_c) ที่อาศัยพื้นที่เพาะปลูกจริง (Cultivated Area) ในปี พ.ศ. 2563/2564 ที่เก็บรวบรวมโดยกรมชลประทาน ครอบคลุมพื้นที่โครงการชลประทานทั้ง 34 โครงการ และพื้นที่ชลประทานส่วนเพิ่มเติม (ประกอบด้วย โครงการชลประทานนครสวรรค์ โครงการชลประทานตาก โครงการชลประทานผาตุ๊ก โครงการชลประทานเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน โครงการชลประทานสมุทรสาคร โครงการชลประทานคลองเปี้ยว-เส้าไห้ โครงการชลประทานเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ โครงการชลประทานลพบุรี) โดยมีพื้นที่เพาะปลูกกว่า 8,285,658 ไร่ ในช่วงฤดูฝน และ 5,323,187 ไร่ ในช่วงฤดูแล้ง (ข้อมูลเพาะปลูกจริงระหว่างวันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2563 ถึงวันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ. 2564 และใช้ K_c-IrriSAT Adjusted ที่ปรับแก้แล้วและค่าอัตราการคายระเหยของพืชอ้างอิงมาทำการคำนวณ พบว่า ค่าปริมาณความต้องการน้ำของพืช (ET_c) ในโครงการชลประทานลุ่มน้ำปิงตอนล่าง (3 โครงการ) โครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง (5 โครงการ) และโครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน (26 โครงการ) คิดเป็น 1,697, 1,063 และ 9,121 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ตามลำดับ รวมทั้งสิ้น 34 โครงการเท่ากับ 11,881 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และปรับเพิ่มเป็น 12,951 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี เมื่อคิดรวมพื้นที่ชลประทานส่วนเพิ่มเติม

ตารางที่ 4-28 ค่าปริมาณความต้องการน้ำของพืชรายเดือนและรายปีในปี พ.ศ. 2563/2564 ในพื้นที่โครงการ
ชลประทานเจ้าพระยาใหญ่

โครงการ ชลประทาน	พื้นที่เพาะปลูก ปี 2563/ 2564 (ไร่)*	ค่าปริมาณความต้องการน้ำของพืช (ETc) (ล้านลูกบาศก์เมตร)												
		ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี
โครงการชลประทานลุ่มน้ำปิงตอนล่าง														
ท่อทองแดง	502,575	14.25	21.87	24.79	16.45	45.79	88.77	146.10	120.86	43.22	45.15	11.17	11.11	589.54
	148,462													
วังบัว	686,448	4.67	4.78	4.83	3.74	46.59	97.87	154.94	142.21	73.84	73.19	4.05	4.13	614.86
	50,109													
วังยาง- หนองขวัญ	502,412	23.36	30.19	33.45	12.91	10.82	48.62	125.22	113.66	35.93	32.18	12.51	14.16	493.00
	196,584													
ชลประทาน นครสวรรค์ ^{1/}	42,882	6.87	9.61	10.21	4.31	2.23	5.53	10.06	9.45	5.23	4.85	5.86	7.44	81.65
	55,243													
ชลประทาน ตาก ^{1/}	45,000	5.60	7.83	8.31	3.51	2.34	5.80	10.56	9.91	5.49	5.09	4.78	6.06	75.28
	45,000													
รวม 3 โครงการ	1,691,435	42.28	56.84	63.08	33.10	103.20	235.27	426.26	376.74	152.99	150.52	27.73	29.40	1,697.40
	395,155													
รวม 3 โครงการ+ พื้นที่เพิ่มเติม	1,779,317	54.75	74.28	81.60	40.91	107.77	246.59	446.87	396.09	163.71	160.45	38.37	42.91	1,854.33
	495,398													
โครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง														
ดงเศรษฐี	150,256	3.93	5.27	6.63	4.14	11.72	25.50	40.37	38.34	8.41	8.08	1.21	1.01	154.61
	29,881													
นเรศวร	90,919	3.29	4.99	4.88	1.64	5.75	12.73	20.60	20.31	5.54	5.54	0.85	0.50	86.63
	20,750													
พลาญชุมพล	201,063	9.87	13.84	15.65	7.68	23.55	50.52	50.58	53.66	11.20	11.87	2.58	1.75	252.74
	60,304													
ท่าบัว	184,025	10.29	16.12	20.70	11.93	16.23	34.63	54.28	45.85	11.56	11.52	4.00	3.62	240.74
	77,296													
ยมน่าน	204,586	20.82	30.19	29.58	15.94	28.82	47.27	57.40	50.41	15.86	14.73	9.77	7.01	327.81
	149,229													
ผาจุ ^{1/}	33,265	5.27	8.00	7.83	2.63	2.11	4.66	7.54	7.43	2.03	2.03	1.36	0.81	51.68
	33,265													
แควน้อยบำรุง แดน ^{1/}	155,166	20.66	32.37	41.56	23.95	13.68	29.20	45.77	38.66	9.75	9.71	8.04	7.27	280.61
	155,166													
รวม 5 โครงการ	830,849	48.20	70.42	77.45	41.34	86.08	170.65	223.22	208.57	52.57	51.73	18.41	13.89	1,062.52
	337,460													
รวม 5 โครงการ+ พื้นที่เพิ่มเติม	1,019,280	74.14	110.78	126.83	67.92	101.87	204.51	276.53	254.65	64.35	63.47	27.81	21.96	1,394.81
	525,891													
โครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน														

4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

โครงการ ชลประทาน	พื้นที่เพาะปลูก ปี 2563/ 2564 (ไร่)*	ค่าปริมาณความต้องการน้ำของพืช (ETc) (ล้านลูกบาศก์เมตร)												
		ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี
บางบาล	98,653	21.95	18.58	16.55	10.09	13.05	26.05	35.57	25.59	4.49	4.63	3.76	5.11	185.43
	77,974													
บรมธาตุ	328,230	44.83	47.93	49.11	31.17	25.09	55.03	98.17	97.08	25.51	27.09	23.16	19.56	543.73
	328,230													
ชั้นสุตร	437,144	25.20	23.45	25.41	14.82	45.08	98.82	146.47	120.51	41.02	44.36	14.85	13.71	613.71
	165,256													
เจ้าเจ็ดบางยี่ หน	323,402	105.92	83.53	64.22	55.20	71.31	85.40	87.25	67.90	18.06	18.62	17.57	28.41	703.40
	318,421													
ดอนเจดีย์	119,693	17.28	16.46	17.94	11.91	13.22	26.19	37.22	37.19	11.46	14.58	12.80	10.59	226.85
	106,803													
ผักไห่	151,804	36.43	41.99	33.97	12.33	22.45	49.72	58.67	27.37	1.26	1.30	1.25	1.07	287.81
	136,171													
โพธิ์พระยา	317,984	58.29	54.58	50.74	35.26	53.62	96.08	108.06	76.19	12.50	15.60	10.61	12.69	584.21
	219,799													
พลเทพ	97,479	11.36	17.31	17.93	13.65	18.51	30.26	31.11	21.73	6.89	8.05	6.49	4.08	187.37
	95,857													
สามชุก	214,241	29.28	30.71	32.52	24.15	22.09	48.43	72.82	63.56	17.23	22.93	19.39	16.53	399.65
	199,233													
ท่าโบสถ์	161,169	14.44	13.96	10.76	6.80	13.81	28.48	48.56	46.60	11.10	11.04	4.69	4.74	215.00
	83,537													
ทุ่งวัดสิงห์	54,387	2.22	1.86	2.15	2.43	3.40	6.65	9.35	7.20	4.23	3.90	2.52	2.26	48.16
	39,783													
ยางมณี	61,268	16.56	12.20	13.75	7.81	8.42	15.87	24.16	16.65	4.69	4.97	4.71	5.38	135.17
	56,953													
ภาษีเจริญ	38,745	5.70	7.42	9.26	6.00	4.78	8.89	11.58	10.54	2.95	2.71	2.16	2.06	74.04
	34,510													
พระยาบวรสถิต	298,075	71.82	51.16	62.39	50.92	62.14	85.13	101.51	86.93	22.38	24.34	19.78	20.90	659.42
	252,751													
พระพิมล	109,065	23.08	21.12	25.19	17.92	17.37	26.37	33.40	30.20	8.77	6.15	5.93	6.35	221.86
	103,145													
ช่องแค	232,177	38.65	34.10	52.42	20.36	14.71	28.71	48.30	58.64	20.31	15.23	11.81	12.74	355.98
	218,363													
โคกกระเทียม	205,852	18.47	12.90	17.54	10.23	25.46	44.18	65.67	57.95	11.58	12.38	4.80	5.41	286.58
	76,313													
มหาราช	241,709	48.07	39.52	60.14	34.83	25.43	50.78	81.70	63.97	16.37	18.38	19.55	18.18	476.94
	266,539													
มิโนรมย์	239,055	18.58	21.81	30.06	21.11	53.96	69.77	83.99	63.88	26.18	27.32	8.89	7.73	433.27
	91,585													
เริงราง	132,371	20.03	14.26	21.19	12.35	16.48	28.57	43.27	34.33	8.22	6.49	5.76	6.16	217.11

โครงการ ชลประทาน	พื้นที่เพาะปลูก ปี 2563/ 2564 (ไร่)*	ค่าปริมาณความต้องการน้ำของพืช (ETc) (ล้านลูกบาศก์เมตร)												
		ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี
	78,271													
ชลหารพิจิตร	182,838	28.86	30.85	40.43	21.73	14.09	32.48	55.54	46.53	15.90	13.86	11.21	11.65	323.12
	169,287													
นครหลวง	137,390	20.86	16.79	23.60	12.64	18.89	30.70	40.63	33.26	13.93	17.29	10.56	10.14	249.29
	72,913													
รังสิตเหนือ	159,871	22.74	21.03	28.97	21.42	27.02	45.20	59.02	50.18	14.16	16.23	13.28	10.27	329.52
	127,255													
พระองค์ไช ยานุชิต	357,497	29.49	31.48	37.14	15.62	6.43	43.22	99.70	81.16	47.42	34.06	26.79	25.61	478.12
	307,545													
ป่าสักใต้	127,394	23.47	19.87	26.10	13.49	18.84	27.82	32.72	26.75	12.65	14.94	11.02	11.91	239.56
	84,069													
รังสิตใต้	357,979	47.96	39.24	51.84	31.99	36.18	82.67	130.88	109.96	29.73	31.01	30.55	24.12	646.14
	335,670													
ชลประทาน สมุทรสาคร ^{1/}	37,197	8.32	7.62	9.08	6.46	5.93	8.99	11.39	10.30	2.99	2.10	2.14	2.29	77.62
	37,197													
คลองเพรียว- เส้าไห้ ^{1/}	135,300	16.29	13.33	17.61	10.87	13.67	31.25	49.47	41.56	11.24	11.72	10.37	8.19	235.56
	114,000													
ป่าสักชลสิทธิ์	85,440	23.17	19.62	25.77	13.32	12.63	18.66	21.94	17.94	8.48	10.02	10.88	11.76	194.20
	83,015													
ชลประทาน ลพบุรี ^{1/}	43,653	5.99	5.07	6.66	3.44	6.45	9.53	11.21	9.17	4.33	5.12	2.81	3.04	72.83
	21,453													
รวม 26 โครงการ	5,185,471	801.5	724.1	821.3	516.2	651.8	1171.5	1645.3	1361.9	409.0	417.5	303.9	297.4	9,121.4
รวม 26 โครงการ+ พื้นที่ เพิ่มเติม	5,487,061	855.3	769.7	880.5	550.3	690.5	1239.9	1739.3	1440.8	436.0	446.4	330.1	322.7	9,701.6
รวม 34 โครงการ	7,707,755	892	851	962	591	841	1,577	2,295	1,947	615	620	350	341	11,881
	4,778,848													
รวม 34 โครงการ+ พื้นที่เพิ่มเติม	8,285,658	984	955	1,089	659	900	1,691	2,463	2,092	664	670	396	388	12,951
	5,323,187													

หมายเหตุ: * ข้อมูลเพาะปลูกจริงระหว่างเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2563 ถึงวันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ. 2564 พื้นที่เพาะปลูกฤดูฝน

(บน) และพื้นที่เพาะปลูกฤดูแล้ง (ล่าง)

^{1/} พื้นที่โครงการชลประทานส่วนเพิ่มเติมในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่และอาศัย ETo และ Kc-IrrisAT Adjusted บริเวณใกล้เคียงมาใช้ในการคำนวณ

4.2.1.6.7 การประเมินค่าประสิทธิภาพการชลประทานระดับโซนส่งน้ำ

การประเมินประสิทธิภาพการชลประทานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการชลประทานระดับโซนส่งน้ำ (และระดับโครงการชลประทานในบางโครงการ) โดยครอบคลุมพื้นที่โครงการชลประทานในกลุ่มน้ำปิงตอนล่าง โครงการชลประทานในกลุ่มน้ำน่านตอนล่าง และโครงการชลประทานในกลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนและการจัดการทรัพยากรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพในโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ ขั้นตอนในการประเมินประสิทธิภาพการชลประทานนั้นจะต้องอาศัยข้อมูล 2 หลักคือ (1) ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิ (Net Water Requirement, NIR) และ (2) ปริมาณน้ำชลประทานที่จัดส่ง (Gross Irrigation Water Requirement, GIR) สำหรับค่าปริมาณน้ำชลประทานที่จัดส่งคำนวณจากข้อมูลปริมาณการส่งน้ำตรวจวัดที่อาคารควบคุมหลักของแต่ละโซนส่งน้ำซึ่งทำการรวบรวมจากกรมชลประทาน หลังจากทำการคำนวณและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องข้างต้นแล้ว ขั้นตอนสุดท้ายคือการคำนวณประสิทธิภาพการชลประทานระดับรายโครงการและ/หรือโซนส่งน้ำโดยใช้สมการที่ 4-2 ดังนี้

$$E_i (\%) = \frac{\text{Net Irrigation Water Requirement (NIR)}}{\text{Gross Irrigation Water Requirement (GIR)}} \times 100 \quad \text{-----}(4-2)$$

โดยที่ NIR = ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิที่พืชต้องการ (มิลลิเมตร)
 GIR = ปริมาณน้ำชลประทานที่จัดส่ง (มิลลิเมตร)

สำหรับค่าปริมาณความต้องการน้ำสุทธิ (Net Water Requirement, NIR) เป็นผลรวมของปริมาณความต้องการน้ำของพืชตามทฤษฎีหรือปริมาณการคายระเหยของพืช (Crop Evapotranspiration, ETC) ที่ได้จากขั้นตอนข้างต้นและปริมาณการรั่วซึมลึก (Deep Percolation, Dp) หักลบด้วยปริมาณฝนใช้การ (Effective Rainfall, Re) ดังแสดงในสมการที่ 4-3 และได้ผลลัพธ์ของค่าความต้องการน้ำสุทธิดังแสดงในตารางที่ 4-29

$$\text{NIR} = \text{ETC} + \text{Dp} - \text{Re} \quad \text{-----}(4-3)$$

โดยที่ NIR = ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิ (มิลลิเมตร)
 ETC = ปริมาณการคายระเหยของพืช หรือความต้องการน้ำพืช (มิลลิเมตร)
 Dp = ปริมาณการรั่วซึมลึก (มิลลิเมตร)
 Re = ปริมาณฝนใช้การ (มิลลิเมตร)

ผลการประมาณการค่าปริมาณความต้องการน้ำสุทธิที่ได้จากการคำนวณในปี พ.ศ. 2563/2564 ในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ทั้ง 34 โครงการได้สรุปผลการคำนวณไว้ในตารางที่

4-29 ซึ่งพบว่า ค่าปริมาณความต้องการน้ำสุทธิ (NIR) ในโครงการชลประทานลุ่มน้ำปิงตอนล่าง (3 โครงการ) โครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง (5 โครงการ) และโครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน (26 โครงการ) คิดเป็น 1,266, 1,091 และ 7,921 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ตามลำดับ รวมทั้งสิ้น 34 โครงการ เท่ากับ 10,278 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

ตารางที่ 4-29 ค่าปริมาณความต้องการน้ำสุทธิที่ได้จากการคำนวณในปี พ.ศ. 2563/2564 ในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่

โครงการชลประทาน	ปริมาณความต้องการน้ำของพืช (ล้าน ลบ.ม.ต่อปี)	ปริมาณการรั่วซึมลึก (ล้าน ลบ.ม.ต่อปี)	ปริมาณฝนใช้การ (ล้าน ลบ.ม.ต่อปี)	ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิ (ล้าน ลบ.ม.ต่อปี)
ตัวแปร	ETc	Dp	Re	NIR
โครงการชลประทานลุ่มน้ำปิงตอนล่าง				
ท่อทองแดง	589.54	286.43	469.71	406.25
วังบัว	614.86	324.90	534.74	405.02
วังยาง-หนองขวัญ	493.00	307.26	345.65	454.62
รวม 3 โครงการ	1,697.40	918.59	1,350.10	1,265.88
โครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง				
ดงเศรษฐี	154.61	79.33	70.81	163.14
นเรศวร	252.74	114.99	137.75	229.98
พलयชุมพล	86.63	49.16	58.99	76.80
ท่าบัว	240.74	114.84	111.74	243.84
ยมน่าน	327.81	189.67	140.21	377.27
รวม 5 โครงการ	1,062.52	548.00	519.50	1,091.02
โครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน				
บางบาล	185.43	51.62	54.77	182.29
บรมธาตุ	543.73	191.69	420.97	314.44
ชั้นสูตร	613.71	176.55	414.16	376.10
เจ้าเจ็ดบางยี่หน	703.40	187.42	191.30	699.52
ดอนเจดีย์	226.85	66.17	145.38	147.64
ผักไห่	287.81	84.13	85.93	286.01
โพธิ์พระยา	584.21	146.37	193.74	536.84
พลเทพ	187.37	56.46	79.12	164.71
สามชุก	399.65	120.77	169.09	351.33
ท่าโบสถ์	215.00	71.64	109.44	177.20
ทุ่งวัดสิงห์	48.16	27.53	29.95	45.74
ยางมณี	135.17	34.53	43.00	126.71

โครงการชลประทาน	ปริมาณความต้องการน้ำของพืช (ล้าน ลบ.ม.ต่อปี)	ปริมาณการรั่วซึมลึก (ล้าน ลบ.ม.ต่อปี)	ปริมาณฝนใช้การ (ล้าน ลบ.ม.ต่อปี)	ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิ (ล้าน ลบ.ม.ต่อปี)
ตัวแปร	ETc	Dp	Re	NIR
ภาษีเจริญ	74.04	21.40	25.77	69.67
พระยาบรมกลี้อ	659.42	160.95	203.61	616.75
พระพิมล	221.86	61.98	70.72	213.12
ช่องแค	355.98	131.59	282.59	204.98
โคกกระเทียม	286.58	82.70	143.11	226.18
มหาราช	476.94	148.35	325.68	299.61
มโนรมย์	433.27	103.45	218.66	318.06
เริงราง	217.11	61.64	82.54	196.20
ชลหารพิจิตร (คลองด่าน)	323.12	102.85	45.67	380.30
นครหลวง	249.29	61.56	124.76	186.10
รังสิตเหนือ	329.52	83.92	97.63	315.81
พระองค์ไชยานุชิต	478.12	194.31	132.83	539.61
ป่าสักใต้	239.56	61.85	83.66	217.75
รังสิตใต้	646.14	202.60	120.15	728.59
รวม 26 โครงการ	9,121.44	2,694.04	3,894.25	7,921.23
รวม 34 โครงการ	11,881.36	4,160.63	5,763.85	10,278.14

ผลการประมาณค่าปริมาณน้ำชลประทานที่จัดส่ง (GIR) และประสิทธิภาพการชลประทาน (Irr. Eff.) จากการคำนวณในปี พ.ศ. 2563/2564 ในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ได้สรุปผลไว้ในตารางที่ 4-30

ตารางที่ 4-30 ปริมาณน้ำชลประทานที่จัดส่งและประสิทธิภาพการชลประทานที่ได้จากการคำนวณในปี พ.ศ. 2563/2564 ในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่

โครงการชลประทาน	ชื่อประตูควบคุมน้ำหลักที่น้ำไหลเข้าของแต่ละโซนส่งน้ำ	โซนส่งน้ำ	ปริมาณน้ำชลประทานที่จัดส่งแต่ละประตูควบคุมน้ำย่อย (ล้าน ลบ.ม.ต่อปี)	ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิ (ล้าน ลบ.ม.ต่อปี)	ปริมาณน้ำชลประทานที่จัดส่งที่ประตูควบคุมน้ำหลัก (ล้าน ลบ.ม.ต่อปี)	ประสิทธิภาพการชลประทาน (เปอร์เซ็นต์)
ตัวแปร	-	-	Q	NIR	GIR	Irr. Eff.
โครงการชลประทานลุ่มน้ำปึงตอนล่าง						
ท่อทองแดง	ท่อทองแดง	ปึงตอนล่าง	563.00	406.25	563.00	72.16
วังบัว	วังบัว		425.00	405.02	425.00	95.30

โครงการชลประทาน	ชื่อประตูควบคุมน้ำหลักที่น้ำไหลเข้าของแต่ละโซนส่งน้ำ	โซนส่งน้ำ	ปริมาณน้ำชลประทานที่จัดส่งแต่ละประตูควบคุมน้ำย่อย (ล้าน ลบ.ม.ต่อปี)	ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิ (ล้าน ลบ.ม.ต่อปี)	ปริมาณน้ำชลประทานที่จัดส่งที่ประตูควบคุมน้ำหลัก (ล้าน ลบ.ม.ต่อปี)	ประสิทธิภาพการชลประทาน (เปอร์เซ็นต์)
ตัวแปร	-	-	Q	NIR	GIR	Irr. Eff.
วังยาง	วังยาง		477.00	454.62	489.00	92.97
หนองขวัญ	หนองขวัญ		12.00			
โครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง						
ดงเศรษฐี	ดงเศรษฐี	-	-	163.14	-	-
พลายชุมพล	-	-	-	229.98	-	-
ท่าบัว	-	-	-	243.84	-	-
นเรศวร	ยมน่าน	น่านตอนล่าง	5,044.00	76.80	-	-
ยมน่าน	ยมน่าน		844.00	377.27	844.00	53.80
โครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน						
บางบาล	-	-	-	182.29	-	-
ทุ่งวัดสิงห์	-	-	-	45.74	-	-
บรมธาตุ	บรมธาตุ	เจ้าพระยาฝั่งตะวันตก ตอนบน#1	2,557.00	314.44	2,443.00	60.92
ชั้นสูตร	บรมธาตุ		1,519.00	376.10	-	-
เจ้าเจ็ดบางยี่หน	บรมธาตุ		114.00	699.52	-	-
ผักไห่	บรมธาตุ		250.00	286.01	-	-
ยางมณี	บรมธาตุ		1,070.00	126.71	-	-
ดอนเจดีย์	พลเทพ	เจ้าพระยาฝั่งตะวันตก ตอนบน#2	-	147.64	-	-
โพธิ์พระยา	พลเทพ		877.89	536.84	-	-
พลเทพ	พลเทพ		1,676.56	164.71	798.67	คำนวณไม่ได้ ^{3/}
สามชุก	พลเทพ		1,050.10	351.33	-	-
ท่าโบสถ์	พลเทพ		1,340.16	177.20	-	-
ภาษีเจริญ	ภาษีเจริญ & พระยาบรรลือ	เจ้าพระยาฝั่งตะวันตก ตอนล่าง	-	69.67	-	-
พระยาบรรลือ	พระยา		161.00	616.75	-	-
พระพิมล	บรรลือ & สิงหนาท พระพิมล & นวลฉวี & คลองโยง & ปากเกร็ด		97.00	213.12	258.00	คำนวณไม่ได้ ^{3/}
ช่องแค	มโนรมย์		2,690.00	204.98	-	-
โคกกระเทียม	มโนรมย์		2,630.00	226.18	-	-

4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

โครงการชลประทาน	ชื่อประตูควบคุมน้ำหลักที่น้ำไหลเข้าของแต่ละโซนส่งน้ำ	โซนส่งน้ำ	ปริมาณน้ำชลประทานที่จัดส่งแต่ละประตูควบคุมน้ำย่อย (ล้าน ลบ.ม.ต่อปี)	ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิ (ล้าน ลบ.ม.ต่อปี)	ปริมาณน้ำชลประทานที่จัดส่งที่ประตูควบคุมน้ำหลัก (ล้าน ลบ.ม.ต่อปี)	ประสิทธิภาพการชลประทาน (เปอร์เซ็นต์)
ตัวแปร	-	-	Q	NIR	GIR	Irr. Eff.
มโนรมย์	มโนรมย์	เจ้าพระยาฝั่ง	3,484.00	318.06	1,562.00	40.16
เริงราง	มโนรมย์	ตะวันออกตอนบน	1,922.00	196.20		
มหาราช	มหาราช	รายโครงการ	690.00	299.61	690.00	43.42
ชลหารพิจิตร (คลองด่าน)	พระนารายณ์	เจ้าพระยาฝั่งตะวันออกตอนล่าง	-	380.30	-	-
นครหลวง	พระนารายณ์		2,242.72	186.10	2,242.72	คำนวณไม่ได้ ^{3/}
รังสิตเหนือ	พระนารายณ์		-	315.81	-	-
พระองค์ไชยานุชิต	พระนารายณ์		-	539.61	-	-
ป่าสักใต้	พระนารายณ์		-	217.75	-	-
รังสิตใต้	พระนารายณ์		-	728.59	-	-
ชลประทานนครสวรรค์ ^{1/}	-		-	-	85.79	-
ชลประทานตาก ^{1/}	-	-	-	75.61	-	-
ผาจุ ^{1/}	-	-	-	57.14	-	-
แควน้อยบำรุงแดน ^{1/}	-	-	-	314.87	-	-
ชลประทานสมุทรสาคร ^{1/}	-	-	-	75.06	-	-
คลองเปரியว-เส้าไห้ ^{1/}	-	-	-	263.33	-	-
ป่าสักชลสิทธิ์ ^{1/}	-	-	-	183.98	-	-
ชลประทานลพบุรี ^{1/}	-	-	-	64.14	-	-
รวม 34 โครงการ	-	-	-	10,278.14	-	-
รวม 34 โครงการ+พื้นที่เพิ่มเติม	-	-	-	11,398.06	13,229.28 ^{2/}	-

หมายเหตุ: ^{1/} พื้นที่โครงการชลประทานเพิ่มเติม

^{2/} คัด GIR ที่ประตูควบคุมน้ำหลัก

^{3/} ข้อมูลปริมาณน้ำชลประทานที่จัดส่งที่ประตูควบคุมน้ำหลักที่รวบรวมได้มีลักษณะ Inconsistency อาจเนื่องมาจากเป็นโครงการชลประทานรับน้ำนองที่รับน้ำหลากและ Return Flow จากพื้นที่ตอนบน

จากผลการคำนวณประสิทธิภาพการชลประทานจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการชลประทานระดับโครงการชลประทานซึ่งตั้งอยู่ในเขตโครงการชลประทานลุ่มน้ำปิงตอนล่างประกอบด้วยโครงการ

4 | การปฏิบัติกระบวนแบบเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ชลประทานท่อทองแดง ว่างบัว และว่างยาง-หนองขวัญ มีค่าประสิทธิภาพการชลประทานอยู่ในช่วงเกณฑ์สูง เท่ากับ 72.16%, 95.30% และ 92.97% ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความผันแปรของการขึ้นลงของระดับน้ำในแม่น้ำปิงที่ไม่สามารถผันน้ำให้ไหลเข้าคลองส่งน้ำได้สะดวกในช่วงฤดูเพาะปลูก ซึ่งเป็นพื้นที่โครงการชลประทานรับน้ำนอง อย่างไรก็ตาม พื้นที่ชลประทานในเขตนี้บางส่วนได้รับน้ำจากแหล่งน้ำใต้ดินส่งผลให้สามารถบรรเทาสถานการณ์การขาดน้ำบรรเทาได้บางส่วน ในขณะที่ประสิทธิภาพการชลประทานของโครงการชลประทานยม่นานซึ่งในเขตโครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่างลดลงมีค่าเท่ากับ 53.80% สำหรับผลการคำนวณประสิทธิภาพการชลประทานระดับโซนส่งน้ำของโครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน (ปตร. บรมธาตุ) เท่ากับ 60.92% และลดต่ำลงในเขตโครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันออกตอนบน (ปตร. มโนรมย์) และโครงการชลประทานมหาราช (ปตร. มหาราช) เท่ากับ 40.16% และ 43.42% นอกจากนี้ผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นอีกว่า หากมีการปรับลดปริมาณการสูญเสียน้ำในการจัดส่งน้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการชลประทานให้สูงขึ้นเป็น 60% ใน 3 เขตโครงการชลประทานได้แก่ โครงการชลประทานยม่นาน โครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันออกตอนบน (ปตร. มโนรมย์) และโครงการชลประทานมหาราช (ปตร. มหาราช) จะสามารถประหยัดน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ได้อีก 922 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

4.2.1.7 ผลการวิเคราะห์ศักยภาพของน้ำเหลือใช้ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

เขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเป็นหนึ่งในเขื่อนอเนกประสงค์หลักที่ถูกพัฒนาและออกแบบขึ้นในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่โดยกรมชลประทานและเริ่มปฏิบัติการในปี พ.ศ. 2552 เขื่อนแควน้อยบำรุงแดนสร้างปิดกั้นแม่น้ำแควน้อยซึ่งเป็นแม่น้ำสาขาของแม่น้ำน่าน ตัวเขื่อนและอ่างเก็บน้ำตั้งอยู่ในเขตอำเภอวัดโบสถ์ จังหวัดพิษณุโลก โดยมีความจุเก็บกัก 939 ล้านลูกบาศก์เมตร ทางด้านท้ายของเขื่อนได้มีการสร้างฝายทดน้ำเพื่อผันน้ำให้กับโครงการชลประทานทั้งทางฝั่งขวาและฝั่งซ้ายของแม่น้ำแควน้อยครอบคลุมพื้นที่ชลประทานกว่า 155,166 ไร่ (กรมชลประทาน, 2565) และส่วนน้ำที่เหลือจะถูกระบายผ่านฝายซึ่งจะไหลลงมาสมทบกับแม่น้ำน่านสำหรับนำไปใช้ในพื้นที่เพาะปลูกของโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ รวมทั้งตอบสนองความต้องการน้ำนอกภาคเกษตรกรรมในบริเวณที่ราบลุ่มเจ้าพระยา

อาจกล่าวได้ว่า เขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเป็นเขื่อนหลักที่มีบทบาทสำคัญที่มีส่วนช่วยสนับสนุนการบริหารจัดการน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ซึ่งเป็นเขื่อนเก็บกักหลักในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ จากผลการวิเคราะห์สถานะของน้ำต้นทุนโดยอาศัยฐานข้อมูลอุทกวิทยาในอดีตของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนพบว่า ปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยบริเวณลุ่มน้ำตอนบนอยู่ในเกณฑ์สูงถึง 1,353 มิลลิเมตร ประกอบกับปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำมีความแปรปรวนค่อนข้างสูงโดยมีค่ารายปีเฉลี่ยสูงถึง 1,653 ล้านลูกบาศก์เมตร (กรมชลประทาน, 2563) ส่งผลทำให้มีศักยภาพน้ำเหลือใช้ (Residual Water) ที่สามารถนำมาใช้ในพื้นทีลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ได้ นอกจากนี้ ยังเป็นการบรรเทาอุทกภัยในพื้นที่ชลประทานตอนล่างสองฝั่งแม่น้ำแควน้อยเองในช่วงสถานการณ์น้ำมากที่มีความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ค่อนข้างสูง

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะประมาณการปริมาณความต้องการน้ำในพื้นที่ (Local Demand) ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเอง และทำการประเมินถึงศักยภาพของน้ำเหลือใช้ในพื้นที่ซึ่งจะเป็น

ข้อมูลสนับสนุนที่สำคัญต่อผู้ปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องในการกำหนดนโยบายและแผนการจัดสรรน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนให้มีความเหมาะสมเพื่อช่วยตอบสนองความต้องการน้ำร่วมกัน (Joint Demand) ในพื้นที่น้ำเจ้าพระยาใหญ่อย่างเต็มศักยภาพ โดยสามารถลดปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ลงสำหรับเก็บกักน้ำต้นทุนไปใช้ในอนาคต สำหรับรายละเอียดของขั้นตอนการวิจัยได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

4.2.1.7.1 ผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานและการอุปโภคบริโภคในพื้นที่

งานวิจัยนี้ได้ทำการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานในพื้นที่ชลประทานสองฝั่งแม่น้ำแควน้อยประกอบด้วย พื้นที่นา 126,184 ไร่ พืชไร่ 3,176 ไร่ และไม้ผล-ไม้ยืนต้น 5,854 ไร่ รวมเป็นพื้นที่ทั้งสิ้น รวม 135,214 ไร่ โดยคิดปริมาณความต้องการน้ำของพืชในแต่ละพื้นที่จากพืชตัวแทนได้แก่ ข้าว (พื้นที่นา) ข้าวโพด (พืชไร่) และมะม่วง (ไม้ผล-ไม้ยืนต้น) ในเบื้องต้นได้ทำการคำนวณปริมาณการคายระเหยของพืชอ้างอิง (ET_o) โดยใช้ข้อมูลภูมิอากาศตรวจวัดของจังหวัดพิษณุโลก และคำนวณหาค่า ET_o ด้วยโปรแกรม ET_o Calculator และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่า ET_o จากโปรแกรม CROPWAT 8.0 ซึ่งแสดงผลลัพธ์ไว้ในตารางที่ 4-31 ผลการประมาณการพบว่า ค่า ET_o ที่ได้รายเดือนมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มของข้อมูลในลักษณะเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากคำนวณด้วยสมการ Penman-Monteith เดียวกันบนพื้นฐานของข้อมูลภูมิอากาศในพื้นที่เดียวกัน อย่างไรก็ตาม ค่าความแตกต่างดังกล่าวเกิดขึ้นจากโปรแกรม ET_o Calculator อาศัยข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศในการคำนวณมากกว่า ส่งผลทำให้ค่า ET_o ที่ได้มีความละเอียดสูงกว่าและถูกนำไปใช้ในการคำนวณปริมาณความต้องการน้ำของพืช (ET_c) ในขั้นตอนถัดไป ผลการคำนวณค่า ET_c ด้วยโปรแกรม CROPWAT 8.0 แบ่งตามชนิดพืชตัวแทน 3 ชนิดตามพื้นที่ชลประทาน โดยมีค่าปริมาณความต้องการน้ำของพืชรายปีเท่ากับ 260 ล้านลูกบาศก์เมตร และปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานที่ต้องจัดส่งในพื้นที่เท่ากับ 434 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยกำหนดประสิทธิภาพการชลประทาน 60%

ตารางที่ 4-31 ผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานที่ต้องจัดส่งในพื้นที่

รายละเอียดข้อมูล	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี
ปริมาณการคายระเหยของพืชอ้างอิง (ET _o) (มิลลิเมตรต่อวัน)													
ET _o Calculator	3.20	4.00	4.50	5.10	4.80	4.20	4.00	3.70	3.70	3.70	3.40	3.10	NA
CROPWAT 8.0	3.35	4.12	4.88	5.63	5.14	4.40	4.22	3.79	3.79	3.81	3.64	3.28	NA
ปริมาณความต้องการน้ำของพืช (ET _c) (ล้านลูกบาศก์เมตร)													
พื้นที่นา (ข้าว) 126,184 ไร่	15.59	23.32	28.97	15.59	36.10	38.06	14.86	26.71	24.91	9.13	1.96	8.90	244.09
พืชไร่ (ข้าวโพด) 3,176 ไร่	0	0	0	0.39	0.91	0.96	0.37	0	0.26	0.68	0.78	0.30	4.66
ไม้ผล-ไม้ยืนต้น (มะม่วง) 5,854 ไร่	0.90	0.95	1.19	1.24	1.20	0.95	0.98	0.90	0.79	0.86	0.73	0.87	11.55
รวม 135,214 ไร่	16.48	24.27	30.16	17.22	38.21	39.96	16.22	27.61	25.97	10.66	3.47	10.08	260.3

ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานที่ต้องจัดส่งสุทธิในพื้นที่ (Local Demand for Irrigation) (ล้านลูกบาศก์เมตร) ^{1/}													
ปริมาณน้ำ	27.47	40.45	50.27	28.69	63.68	66.61	27.03	46.01	43.28	17.77	5.78	16.79	433.84

หมายเหตุ: ^{1/} คิดประสิทธิภาพการชลประทาน 60%

สำหรับผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคในพื้นที่ซึ่งทำการคำนวณบนพื้นฐานของข้อมูลประชากรปัจจุบันใน 4 เขตอำเภอของจังหวัดพิษณุโลกพบว่า มีปริมาณ 40 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี อย่างไรก็ตาม ผลการคำนวณดังกล่าวค่อนข้างน้อยกว่าแผนการจัดสรรน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนที่กำหนดไว้ประมาณ 286 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งพยายามจะช่วยตอบสนองความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคทั้งในพื้นที่และในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่างร่วมด้วย

4.2.1.7.2 ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของสถานการณ์สมมติ

ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของสถานการณ์สมมติทั้ง 5 รูปแบบได้สรุปไว้ในตารางที่ 4-32 โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

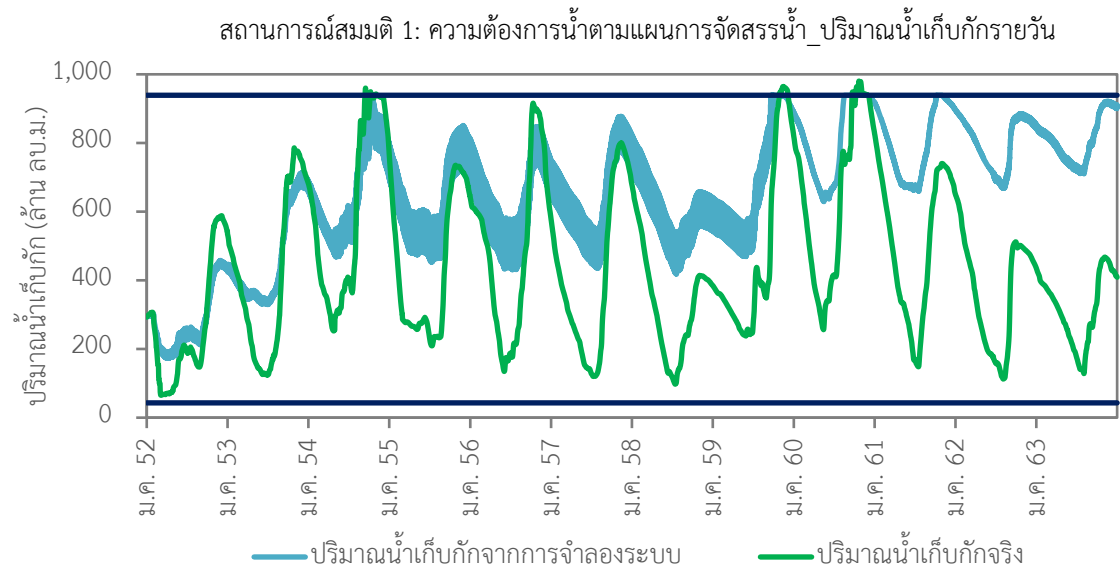
ตารางที่ 4-32 ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563

สถานการณ์สมมติ	ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน						
	ปริมาณความต้องการน้ำในพื้นที่รายปี	ปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันรายปี	ปริมาณความต้องการน้ำรวมรายปี	ปริมาณการขาดน้ำรายปีเฉลี่ย	ปริมาณน้ำล้นรายปีเฉลี่ย	ดัชนีความน่าเชื่อถือได้	สถานะปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสุดท้าย ^{1/}
หน่วย	ล้าน ลบ.ม.	ล้าน ลบ.ม.	ล้าน ลบ.ม.	ล้าน ลบ.ม.	ล้าน ลบ.ม.	เปอร์เซ็นต์	เปอร์เซ็นต์
สถานการณ์สมมติ 1	-	-	1,08.048	0.00	165.39	96.21%	96.97%
สถานการณ์สมมติ 2	-	-	586.29	0.00	71.628	77.94%	96.04%
สถานการณ์สมมติ 3	-	-	831.67	0.00	424.86	88.48%	69.59%
สถานการณ์สมมติ 4	831.67	207.91	1,039.59	0.00	254.08	94.11%	45.91%
สถานการณ์สมมติ 5	812.11	203.03	1,015.14	0.00	257.57	93.93%	59.27%

หมายเหตุ: ^{1/} ข้อมูล ณ วันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2563 ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณการใช้การ

(1) สถานการณ์สมมติ 1: ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิต่อรายปีเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1,048 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งสังเคราะห์จากแผนการจัดสรรน้ำ ผลการจำลองพบว่า ปริมาณการขาดน้ำและปริมาณน้ำไหลล้นอ่างรายปีเฉลี่ยเท่ากับ 0 และ 165 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยปริมาณน้ำไหลล้นอ่างส่วนใหญ่เกิดขึ้นในปีน้ำมากดังแสดงผลในรูปที่ 4-28 อย่างไรก็ตาม ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือได้อยู่ในเกณฑ์สูงถึง 96.21% และสถานะของปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสุดท้ายเท่ากับ 96.97% ซึ่งถือว่าอยู่เกณฑ์สูงกว่าผลการปฏิบัติการจริงค่อนข้างมาก เนื่องจากเงื่อนไขการกำหนดแผนการจัดสรรน้ำถูกพิจารณาจากสถานะน้ำต้นทุนของแต่ละปีน้ำซึ่งมีค่าผันแปรแตกต่างกันออกไปนั่นเอง

4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ



(a) ปริมาณน้ำเก็บกักรายวัน

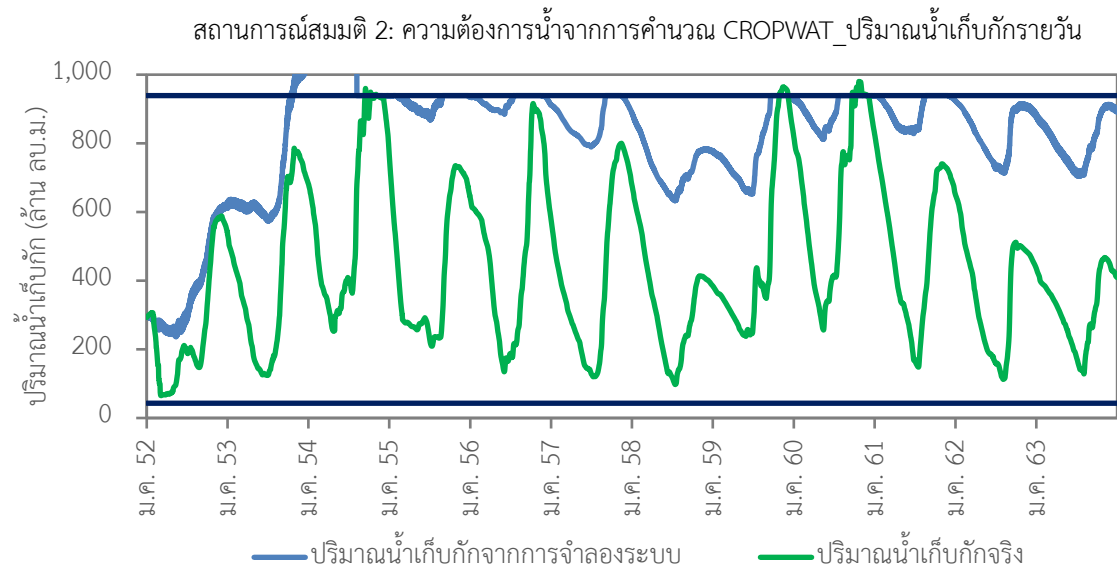


(b) ปริมาณน้ำล้น ปริมาณน้ำไหลเข้า และปริมาณน้ำไหลออกรายปี

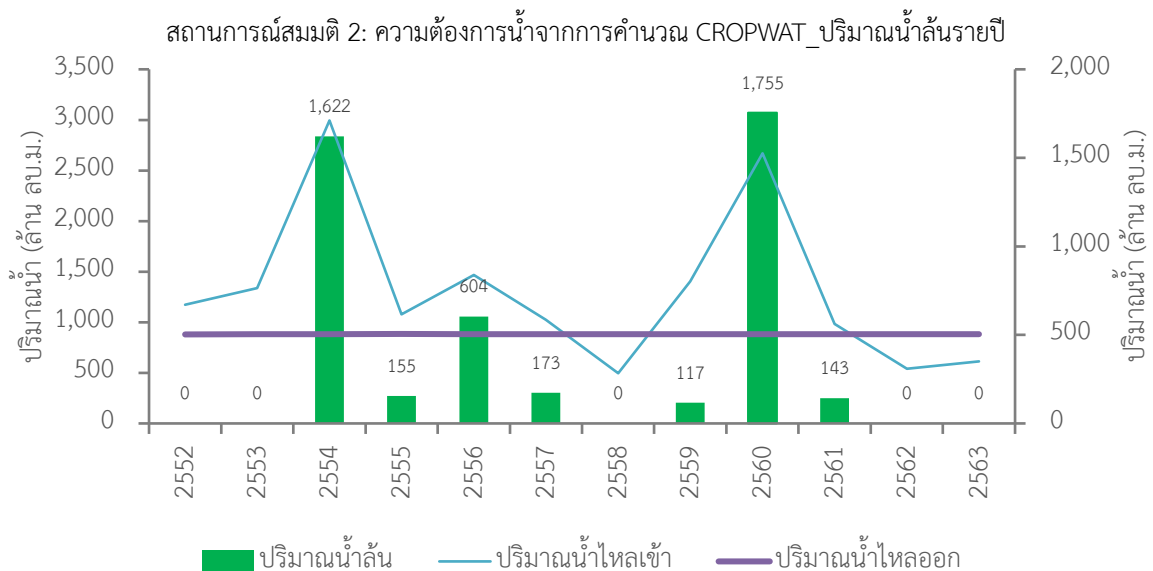
รูปที่ 4-28 ปริมาณน้ำเก็บกักและปริมาณน้ำล้นของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนจากสถานการณ์สมมติ 1

(2) สถานการณ์สมมติ 2: ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิรายปีมีค่าเท่ากับ 586 ล้านลูกบาศก์เมตร ปริมาณน้ำเก็บกักจากการคำนวณมีแนวโน้มคล้ายปริมาณน้ำเก็บกักจริง มีการจัดส่งน้ำในปริมาณสม่ำเสมอทุกเดือนอันเนื่องมาจากปัจจัยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ที่ประมาณการคงที่ ดังรูปที่ 4-29 และอ่างเก็บน้ำมีปริมาณน้ำเก็บกักและปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเพียงพอที่จะจัดส่งน้ำตรงตามปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมาย ส่งผลให้ไม่มีช่วงที่เกิดการขาดแคลนน้ำ ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือได้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้กล่าวคือ มีค่าเท่ากับ 77.94% และสถานะปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสุดท้ายเท่ากับ 96.04% ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าผลการปฏิบัติการจริง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสถานการณ์สมมติ 2 ไม่ได้กำหนดปริมาณความต้องการ

น้ำร่วมกันในกลุ่มน้ำเจ้าพระยา (Joint Demand = 0) ส่งผลให้ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิรายปีเฉลี่ยน้อยกว่าสถานการณ์สมมติ 1 ค่อนข้างมาก ด้วยเหตุนี้ ความถี่ของการไหลล้นอ่างที่เกิดขึ้นจึงสูงกว่าโดยมีค่าปริมาณน้ำไหลล้นอ่างรายปีเฉลี่ยสูงถึง 629 ล้านลูกบาศก์เมตร หรืออาจกล่าวได้ว่า การกำหนดปัจจัยความต้องการน้ำของสถานการณ์สมมติ 2 ยังไม่สอดคล้องกับสถานการณ์จริงของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน นอกจากนี้ ปัจจัยของข้อมูลประชากรแฝงในพื้นที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคในพื้นที่ ด้วยเหตุนี้ สถานการณ์สมมติ 2 จึงไม่เหมาะสมที่จะนำผลลัพธ์ไปใช้กำหนดแผนการจัดสรรน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน



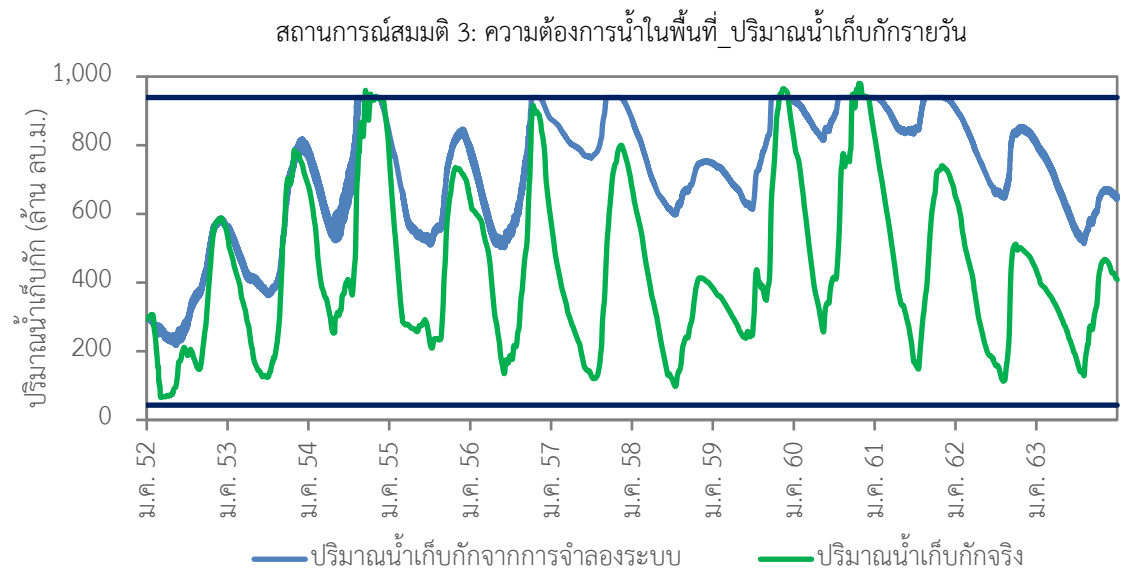
(a) ปริมาณน้ำเก็บกักรายวัน



(b) ปริมาณน้ำล้น ปริมาณน้ำไหลเข้า และปริมาณน้ำไหลออกรายปี

รูปที่ 4-29 ปริมาณน้ำเก็บกักและปริมาณน้ำล้นของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนจากสถานการณ์สมมติ 2

(3) สถานการณ์สมมติ 3: ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิตายปีมีค่าเท่ากับ 832 ล้านลูกบาศก์เมตร ผลการจำลองระบบให้ผลคล้ายคลึงกับสถานการณ์สมมติ 2 กล่าวคือ แนวโน้มปริมาณน้ำเก็บกักคำนวณเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณน้ำเก็บกักจริง มีสถานะปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสุดท้ายเท่ากับ 69.59% เป็นค่าที่สูงกว่าผลการปฏิบัติการจริง ดังรูปที่ 4-30 แต่สามารถจัดส่งน้ำได้ตรงตามความต้องการน้ำเป้าหมาย โดยไม่มีการขาดแคลนน้ำเกิดขึ้น นอกจากนี้ ผลการจำลองสถานการณ์สมมติ 3 ยังให้ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือได้น้อยที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 88.84% เนื่องจากความถี่ของการไหลล้นอ่างสูงสุด และมีค่าปริมาณน้ำล้นรายปีเฉลี่ยสูงสุดคิดเป็น 425 ล้านลูกบาศก์เมตร แสดงให้เห็นได้ว่าอ่างเก็บน้ำยังมีปริมาณน้ำเก็บกักมากพอที่สามารถส่งน้ำเพิ่มเติมให้แก่พื้นที่ชลประทานได้อีก



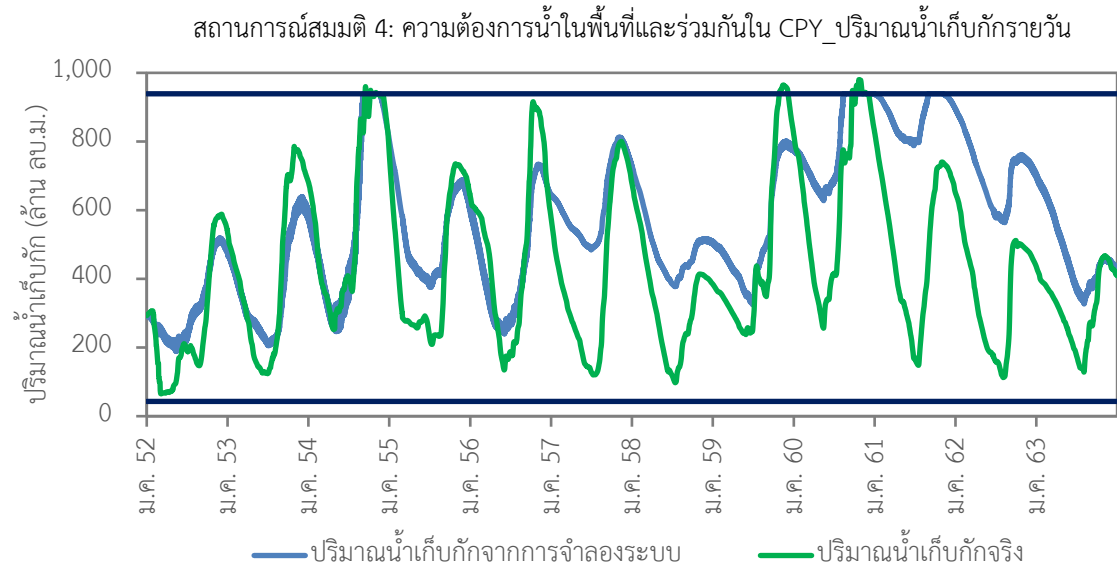
(a) ปริมาณน้ำเก็บกักรายวัน



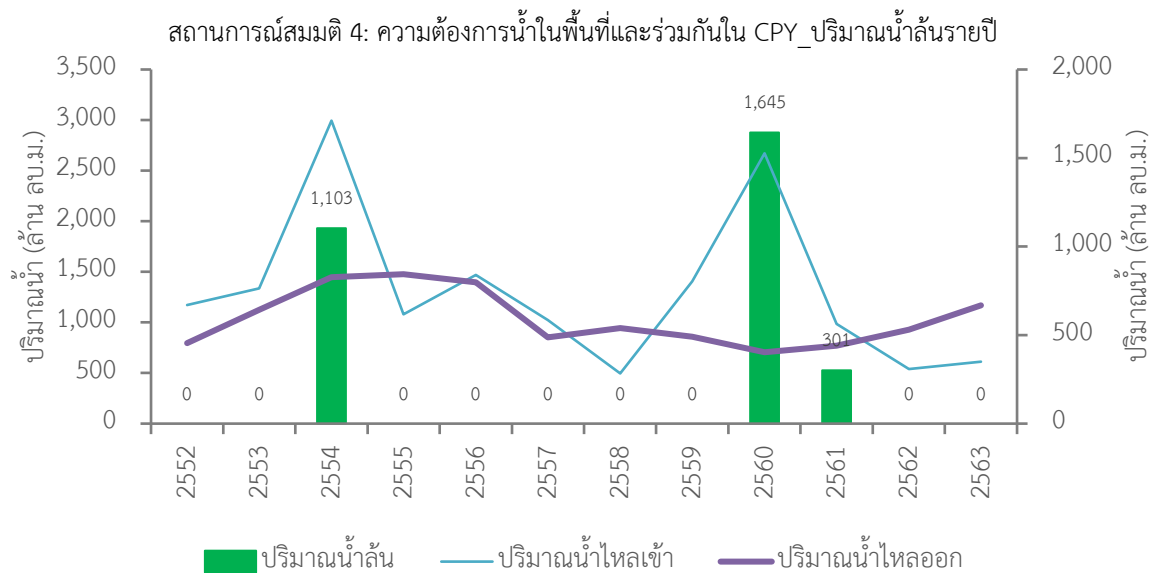
(b) ปริมาณน้ำล้น ปริมาณน้ำไหลเข้า และปริมาณน้ำไหลออกรายปี

รูปที่ 4-30 ปริมาณน้ำเก็บกักและปริมาณน้ำล้นของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนจากสถานการณ์สมมติ 3

(4) สถานการณ์สมมติ 4: ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิตายปีมีค่าเท่ากับ 1,040 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยแยกเป็นปริมาณความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ (Local Demand) และปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ (Joint Demand) เท่ากับ 832 และ 208 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ผลการจำลองระบบพบว่า ปริมาณน้ำเก็บกักจากการคำนวณมีรูปแบบใกล้เคียงกับปริมาณน้ำเก็บกักจริงดังแสดงในรูปที่ 4-31



(a) ปริมาณน้ำเก็บกักรายวัน



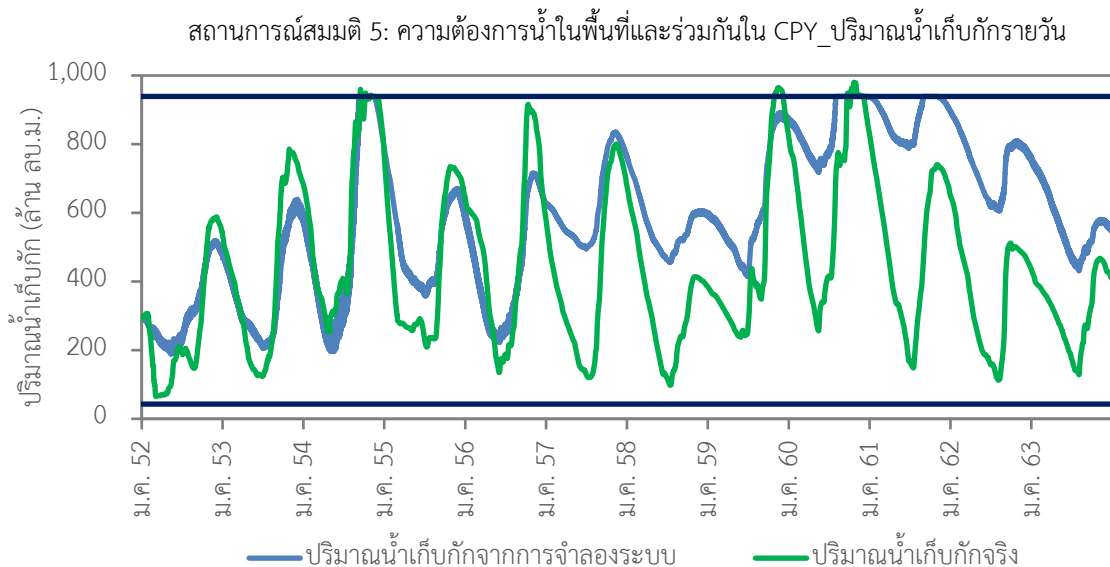
(b) ปริมาณน้ำล้น ปริมาณน้ำไหลเข้า และปริมาณน้ำไหลออกรายปี

รูปที่ 4-31 ปริมาณน้ำเก็บกักและปริมาณน้ำล้นของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนจากสถานการณ์สมมติ 4

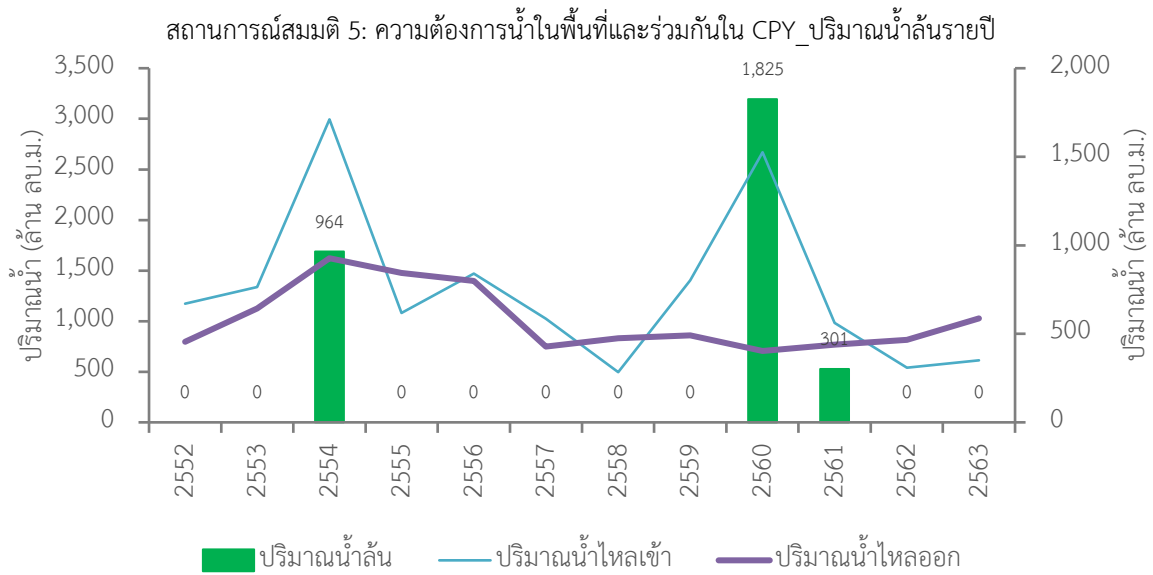
นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบสถานะปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสุดท้ายจากผลการปฏิบัติการจริง และที่ได้จากสถานการณ์สมมติ 4 พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าเท่ากับ 43.56% และ 45.91%

ตามลำดับ อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบความต้องการน้ำเป้าหมายและปริมาณน้ำไหลออกคำนวณพบว่า สามารถจัดส่งให้แก่พื้นที่ทั้งสองได้โดยไม่มีการขาดแคลนน้ำ โดยให้ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือได้สูงถึง 94.11% ในขณะที่ปริมาณน้ำล้นรายปีเฉลี่ยเท่ากับ 254 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกับสถานการณ์สมมติ 1 หรืออาจกล่าวได้ว่าการกำหนดปัจจัยปริมาณความต้องการน้ำตามสถานการณ์สมมติ 4 ให้ค่าประสิทธิผลของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำอยู่ในเกณฑ์ดี ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของน้ำเหลือใช้ที่สามารถตอบสนองความต้องการน้ำร่วมกันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่สูงสุด โดยที่สถานะของปริมาณน้ำเก็บกักหลังสิ้นสุดการจำลองให้ค่าไม่ต่ำกว่าผลการปฏิบัติการจริงที่ผ่านมา

(5) สถานการณ์สมมติที่ 5: ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิตายปีมีค่าเท่ากับ 1,015 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยแยกเป็นปริมาณความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ (Local Demand) และปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ (Joint Demand) เท่ากับ 812 และ 203 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ผลการจำลองระบบพบว่า ปริมาณน้ำเก็บกักจากการคำนวณมีรูปแบบใกล้เคียงกับปริมาณน้ำเก็บกักจริงดังแสดงในรูปที่ 4-32 โดยสถานะปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสุดท้ายเท่ากับ 59.27% เป็นค่าที่สูงกว่าสถานะปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสุดท้ายจริงอยู่ 15.71% บ่งบอกว่ายังสามารถเพิ่มสัดส่วนของปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ (Joint Demand) ในแต่ละปีนี้ได้เล็กน้อยจากข้อกำหนดเดิม ปริมาณการขาดน้ำและปริมาณน้ำล้นรายปีเฉลี่ยเท่ากับ 0 และ 254 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มใกล้เคียงกับสถานการณ์สมมติ 4 หรืออาจกล่าวได้ว่าการกำหนดปัจจัยปริมาณความต้องการน้ำตามสถานการณ์สมมติ 5 ให้ค่าประสิทธิผลของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำอยู่ในเกณฑ์ดี และยังสามารถตอบสนองความต้องการน้ำร่วมกันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่สูงสุดแยกตามปีน้ำ โดยที่สถานะของปริมาณน้ำเก็บกักหลังสิ้นสุดการจำลองให้ค่าไม่ต่ำกว่าผลการปฏิบัติการจริงที่ผ่านมา



(a) ปริมาณน้ำเก็บกักรายวัน



(บ) ปริมาณน้ำล้น ปริมาณน้ำไหลเข้า และปริมาณน้ำไหลออกรายปี

รูปที่ 4-32 ปริมาณน้ำเก็บกักและปริมาณน้ำล้นของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนจากสถานการณ์สมมติ 5

ผลการวิเคราะห์บ่งชี้ให้เห็นว่า การกำหนดรูปแบบความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ (Local Demand) และความต้องการน้ำร่วมกันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ (Joint Demand) เพื่อใช้ในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนแบบอ่างเดี่ยว (Single Reservoir Operation) ทั้ง 5 รูปแบบส่งผลต่อประสิทธิภาพในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่ต่างกัน ถึงแม้ความสามารถในการตอบสนองความต้องการน้ำที่สังเคราะห์ขึ้นทั้ง 5 รูปแบบจะไม่ปรากฏสภาวะขาดน้ำก็ตาม อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้จากสถานการณ์สมมติ 4 และสถานการณ์สมมติ 5 ซึ่งได้กำหนดให้ปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่เท่ากับ 25% ของความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ และกำหนดให้ปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่แยกตามปีน้ำเท่ากับ 10%, 25% และ 40% ของความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ในปีน้ำน้อย ปีน้ำปกติ และปีน้ำมาก ตามลำดับ ซึ่งเป็นส่วนที่สะท้อนถึงศักยภาพน้ำเหลือใช้ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเพิ่มเติมจากปริมาณความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ กล่าวคือ ค่าปริมาณน้ำเหลือใช้ของสถานการณ์สมมติ 4 และสถานการณ์สมมติ 5 เท่ากับ 462 และ 442 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ตามลำดับ โดยที่สถานะของปริมาณน้ำเก็บกักหลังสิ้นสุดการจำลองให้ค่าไม่ต่ำกว่าผลการปฏิบัติการจริงที่ผ่านมา และเมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลออกรายปีเฉลี่ยของสถานการณ์สมมติ 4 และสถานการณ์สมมติ 5 พบว่า มีค่าเท่ากับ 1,039 และ 1,015 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทาน ดังแสดงผลในตารางที่ 4-34 ยิ่งไปกว่านั้น การกำหนดปัจจัยความต้องการน้ำตามสถานการณ์สมมติ 4 และสถานการณ์สมมติ 5 ยังสามารถควบคุมปริมาณน้ำไหลออกต่ำสุดและสูงสุดจากอ่างเก็บน้ำได้ค่อนข้างดีเมื่อเปรียบเทียบกับผลการปฏิบัติการจริง ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวนี้นับเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจที่สำคัญในการกำหนดนโยบายการจัดสรรน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและช่วยสนับสนุนงานบริหารเขื่อนในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญในอนาคต

ตารางที่ 4-33 ปริมาณน้ำไหลออกจากอ่างคำนวณ (Calculated Outflow) ของ 5 สถานการณ์สมมติ

ดัชนีประสิทธิผล	ข้อมูลจริง	สถานการณ์สมมติ				
		1	2	3	4	5
ปริมาณน้ำไหลออกจากอ่างต่ำสุดรายปี (ล้าน ลบ.ม.)	640.80	500.37	564.45	564.45	705.56	705.56
ปริมาณน้ำไหลออกจากอ่างเฉลี่ยรายปี (ล้าน ลบ.ม.)	1,305.60	1,048.04	882.13	832.56	1,039.45	1,015.00
ปริมาณน้ำไหลออกจากอ่างสูงสุดรายปี (ล้าน ลบ.ม.)	2,899.93	2,845.48	884.55	1,181.48	1,476.85	1,622.09

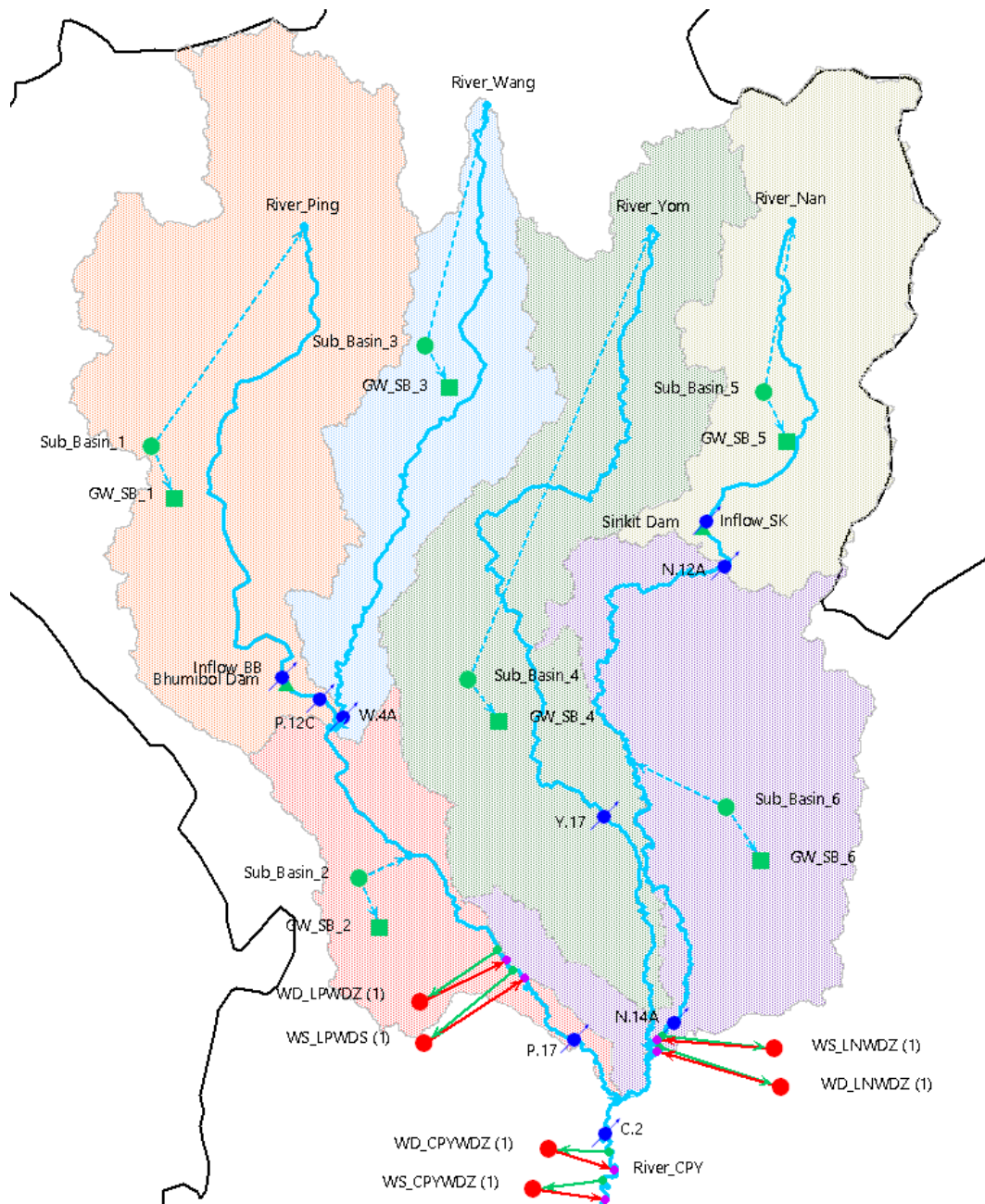
4.2.2 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองระบบการวางแผนและประเมินสถานการณ์น้ำ (Water Evaluation and Planning Model, WEAP) ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนบน

การประยุกต์ใช้แบบจำลองระบบการวางแผนและประเมินสถานการณ์น้ำ (Water Evaluation and Planning Model, WEAP) เพื่อจำลองสภาพฝน-น้ำท่า และการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนบนดำเนินการภายใต้กรอบการดำเนินงานวิจัยที่กล่าวไว้ในบทที่ 3

4.2.2.1 การกำหนดรูปแบบของแบบจำลอง WEAP ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ตอนบน

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าด้วยโปรแกรมระบบการวางแผนและประเมินสถานการณ์น้ำหรือ WEAP (Water Evaluation And Planning System, WEAP) โดยใช้วิธี Rainfall-Runoff Method (Simplified Coefficient Method) โดยได้ทำการแบ่งพื้นที่การศึกษาในลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาใหญ่ตอนบนออกเป็น 6 ลุ่มแม่น้ำย่อยประกอบด้วย (1) ลุ่มน้ำปิงตอนบน (เหนือเขื่อนภูมิพล) (2) ลุ่มน้ำปิงตอนล่าง (ท้ายเขื่อนภูมิพล) (3) ลุ่มน้ำวัง (4) ลุ่มน้ำยม (5) ลุ่มน้ำ่านตอนบน (เหนือเขื่อนสิริกิติ์) และ (6) ลุ่มน้ำ่านตอนล่าง (ท้ายเขื่อนสิริกิติ์) และจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ศึกษาออกเป็น 16 ประเภท ได้แก่ (1) A1-พื้นที่นา (2) A2-พืชไร่ (3) A3-ไม้ยืนต้น (4) A4-ไม้ผล (5) A5-พืชสวน (6) A6-ไร่อ้อย (7) A7-ทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์และโรงเรือนเลี้ยงสัตว์ (8) A8-พืชน้ำ (9) A9-สถานที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (10) F1-ป่าไม้ผลัดใบ (11) F2-ป่าผลัดใบ (12) M1-ทุ่งหญ้าและป่าละเมาะ (13) M2-พื้นที่ลุ่ม (14) U1-ตัวเมืองและย่านการค้า (15) U2-หมู่บ้าน และ (16) W-แหล่งน้ำ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4-35 โดยได้นำเข้าข้อมูลปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนของแต่ละลุ่มแม่น้ำย่อยและข้อมูลน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนของแต่ละลุ่มแม่น้ำย่อยของสถานีตรวจวัดน้ำท่าหลักได้แก่ สถานี P.12C, P.17, W.4A, Y.17, N.12A, N.14A และ C.2 ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 และกำหนดโหนดความต้องการน้ำจำนวน 6 โหนด ได้แก่ (1) โหนดความต้องการน้ำในภาคเกษตรกรรมในลุ่มน้ำปิงตอนล่าง (WD_LPWDZ) (2) โหนดความต้องการน้ำนอกภาคเกษตรกรรมในลุ่มน้ำปิงตอนล่าง (WS_LPWDZ) (3) โหนดความต้องการน้ำในภาคเกษตรกรรมในลุ่มน้ำ่านตอนล่าง (WD_LNWDZ) (4) โหนดความต้องการน้ำนอกภาคเกษตรกรรมในลุ่มน้ำ่านตอนล่าง (WS_LNWDZ) (5) โหนดความต้องการ

น้ำในภาคเกษตรกรรมในกลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน (WD_CPYWDZ) และ (6) โหนดความต้องการน้ำนอกภาคเกษตรกรรมในกลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน (WS_CPYWDZ) ดังแสดงผลการพัฒนาแบบจำลองในรูปที่ 4-33



รูปที่ 4-33 การแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยและกำหนดโหนดความต้องการน้ำในการพัฒนาแบบจำลอง WEAP ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนบน

ตารางที่ 4-34 ผลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ตอนบน

ประเภท	สัญลักษณ์	การใช้ประโยชน์ที่ดิน	พื้นที่ (ตร.กม.)	พื้นที่ (%)
1	A1	พื้นที่นา	15,192.35	14.60%
2	A2	พืชไร่	12,153.76	11.68%
3	A3	ไม้ยืนต้น	3,646.33	3.50%
4	A4	ไม้ผล	4,152.23	3.99%
5	A5	พืชสวน	226.37	0.22%
6	A6	ไร่มวนเวียน	3,324.78	3.19%
7	A7	ทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์และโรงเรือนเลี้ยงสัตว์	208.67	0.20%
8	A8	พืชน้ำ	2.35	0.00%
9	A9	สถานที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	43.01	0.04%
10	F1	ป่าไม่ผลัดใบ	10,064.73	9.67%
11	F2	ป่าผลัดใบ	46,858.54	45.03%
12	M1	ทุ่งหญ้าและไม้ละเมาะ	1,103.36	1.06%
13	M2	พื้นที่ลุ่ม	859.55	0.83%
14	U1	ตัวเมืองและย่านการค้า	1,282.01	1.23%
15	U2	หมู่บ้าน	2,992.66	2.88%
16	W	แหล่งน้ำ	1,953.25	1.88%
รวม			104,064	100%

4.2.2.2 ผลการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลอง WEAP ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ตอนบน

ในการพัฒนาแบบจำลอง WEAP ได้แบ่งช่วงข้อมูลอุทกวิทยารายเดือนออกเป็น 2 ช่วง กล่าวคือ ข้อมูลระหว่างปี พ.ศ. 2543–2558 ใช้สำหรับการปรับเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) และช่วงข้อมูลระหว่างปี พ.ศ. 2559–2563 เพื่อสำหรับการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Validation) โดยผลการปรับเทียบแบบจำลอง WEAP ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ตอนบนได้เลือกใช้วิธี Rainfall–Runoff Method (Simplified Coefficient Method) และทำการปรับเทียบค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมของน้ำ (Infiltration Coefficient) และสัมประสิทธิ์น้ำท่า (Runoff Coefficient) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์หลักของแบบจำลอง WEAP ในการปรับค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ค่านี้จะอาศัยผลการศึกษาวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อน (น้ำท่า) และข้อมูลฝนที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อข้างต้นมาประกอบการพิจารณาร่วมกับลักษณะการใช้ประโยชน์ของแต่ละพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยซึ่งมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ ยังได้กำหนดค่าปริมาณน้ำใต้ดินที่สูญไปใช้ได้ในแต่ละลุ่มน้ำโดยอ้างอิงผลการศึกษารายงานการศึกษาของ สกสว. (2563ก) ที่กล่าวไว้ในหัวข้อข้างต้น เนื่องจากมีการนำแหล่งน้ำใต้ดินมาใช้ในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูงในบางพื้นที่ นอกจากนี้ ในการพัฒนาแบบจำลอง WEAP ยังได้ปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเพื่อระบุอัตราส่วนของน้ำที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse Rate) และอัตราส่วนการสูญเสีย (Loss Rate) แยก

4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ตามโหนดความต้องการน้ำในภาคเกษตรกรรมและโหนดความต้องการน้ำนอกภาคเกษตรกรรมโดยกำหนดแยกตามโซนการส่งน้ำในกลุ่มน้ำปิงตอนล่าง กลุ่มน้ำน่านตอนล่าง และกลุ่มน้ำเจ้าพระยา ทั้งนี้ได้อาศัยผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ในส่วนของการคำนวณประสิทธิภาพการชลประทานในแต่ละโซนการส่งน้ำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการปรับค่า

หลักการสำคัญของการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง WEAP เพื่อจำลองสถานการณ์น้ำในพื้นที่กลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ตอนบนก็คือ การปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองให้สอดคล้องตามปัจจัยทางกายภาพของแต่ละพื้นที่กลุ่มน้ำย่อยเพื่อให้ได้ผลลัพธ์จากแบบจำลองทั้งในส่วนของปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ และปริมาณน้ำท่าของสถานีตรวจวัดหลักได้แก่ สถานี P.12C, P.17, W.4A, Y.17, N.12A, N.14A และ C.2 ใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดจริงมากที่สุด ซึ่งผลการปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง WEAP ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4-36

ตารางที่ 4-35 ผลการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง WEAP เพื่อจำลองสถานการณ์น้ำในพื้นที่กลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนบน

พารามิเตอร์ของแบบจำลอง	กลุ่มน้ำย่อย					
	กลุ่มน้ำย่อย 1	กลุ่มน้ำย่อย 2	กลุ่มน้ำย่อย 3	กลุ่มน้ำย่อย 4	กลุ่มน้ำย่อย 5	กลุ่มน้ำย่อย 6
สัมประสิทธิ์การดูดซึมของน้ำ	0.90	0.90	0.83	0.80	0.54	0.74
สัมประสิทธิ์น้ำท่า	0.10	0.10	0.17	0.20	0.46	0.26
ปริมาณน้ำใต้ดินที่สูบมาใช้ (ล้าน ลบ.ม. ต่อปี)	–	655.58	–	1,635.30	58.47	1,624.19
พารามิเตอร์ของแบบจำลอง	โหนดความต้องการน้ำในภาคเกษตรกรรม			โหนดความต้องการน้ำนอกภาคเกษตรกรรม		
	WD_LPWDZ	WD_LNWDZ	WD_LPWDZ	WD_LNWDZ	WD_LPWDZ	WD_LNWDZ
อัตราส่วนของน้ำที่นำกลับมาใช้ใหม่	0.65	0.50	0.60	0.70	0.68	0.67
อัตราส่วนการสูญเสีย	0.60	0.60	0.68	0.51	0.69	0.67

จะเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์การดูดซึมของน้ำและสัมประสิทธิ์น้ำท่า ซึ่งเป็นตัวแปรในวัฏจักรอุทกวิทยามีค่าผันแปรแตกต่างกันในแต่ละกลุ่มน้ำตามปัจจัยกายภาพของพื้นที่และลักษณะการใช้ประโยชน์จากที่ดิน อย่างไรก็ตาม ค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่าซึ่งเป็นส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การดูดซึมของน้ำในพื้นที่กลุ่มน้ำย่อย 1 และกลุ่มน้ำย่อย 2 ซึ่งตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำปิงมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.10 ด้วยเหตุนี้ จึงอาจเป็นเหตุผลสนับสนุนส่วนหนึ่งที่แนวโน้มปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนหลังเหตุการณ์น้ำท่วมปี พ.ศ. 2554 อันเนื่องมาจากปัจจัยดังกล่าว ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่าของกลุ่มน้ำย่อย 3-6 ผันแปรอยู่ระหว่าง 0.17-0.46 สำหรับปริมาณน้ำใต้ดินที่สูบมาใช้ได้ถูกกำหนดขึ้นใน 4 กลุ่มน้ำย่อยที่มีการดึง

น้ำใต้ดินไปใช้ประโยชน์ในพื้นที่เกษตรกรรมค่อนข้างสูงและครอบคลุมพื้นที่ 6 จังหวัดที่ได้มีการศึกษาศักยภาพของน้ำใต้ดินในพื้นที่ประกอบด้วย กลุ่มน้ำย่อยที่ 2, 4, 5 และ 6 ซึ่งตั้งอยู่ในเขตลุ่มน้ำปิงตอนล่าง (โครงการชลประทานปิงตอนล่าง) กลุ่มน้ำยม (โครงการน้ำใต้ดินสุโขทัย) กลุ่มน้ำน่านตอนบนและลุ่มน้ำตอนล่าง (โครงการชลประทานน่านตอนล่าง) โดยมีปริมาณเท่ากับ 656, 1,635, 58 และ 1,624 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปีตามลำดับ ในขณะที่ อัตราส่วนของน้ำที่นำกลับมาใช้ใหม่และอัตราส่วนการสูญเสียที่ดีที่สุดของทั้ง 6 กลุ่มน้ำย่อยผันแปรอยู่ระหว่าง 0.50–0.70 และ 0.51–0.69 ตามลำดับ

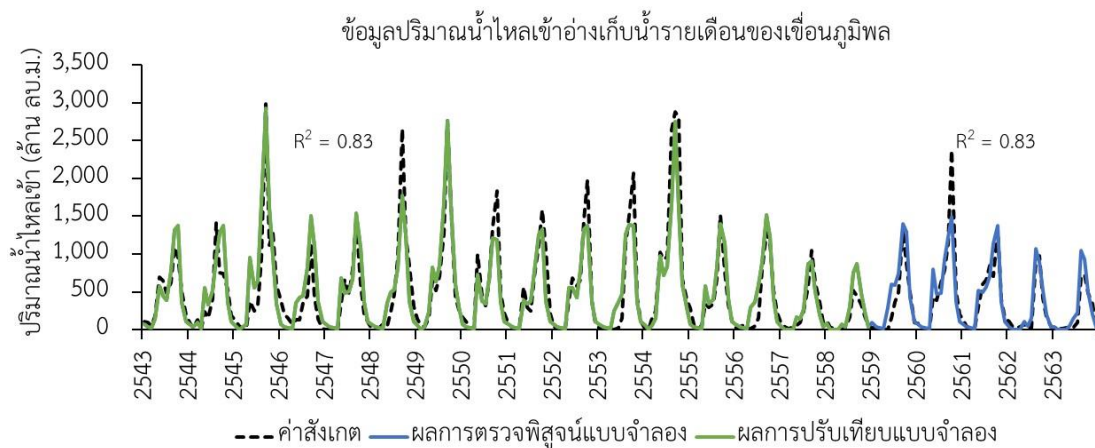
4.2.2.3 ประสิทธิภาพของการพัฒนาแบบจำลอง WEAP ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

ตอนบน

จากผลการปรับเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) และตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Validation) ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยตัวชี้วัดทางสถิติได้แก่ Percent Bias (PBIAS), Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE), Coefficient of Determination (R^2), Index of Agreement (d), RMSE–Observations Standard Deviation Ratio (RSR) และ Volumetric Efficiency (VE) โดยทำการวิเคราะห์จากฐานข้อมูลรายเดือนและรายปีดังแสดงในตารางที่ 4–37 และตารางที่ 4–38 โดยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจระหว่างข้อมูลตรวจวัดจริงกับข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ ข้อมูลน้ำท่าสถานี P.17, W.4A, Y.17, N.14A และ C.2 ที่ได้จากแบบจำลองทั้งในส่วนของการปรับเทียบแบบจำลอง การตรวจพิสูจน์แบบจำลอง และข้อมูลระยะยาวส่วนใหญ่ให้ค่า R^2 อยู่ในเกณฑ์ดี กล่าวคืออยู่ในช่วงระหว่าง 0.55–0.93 สำหรับการปรับเทียบแบบจำลอง และอยู่ระหว่าง 0.55–0.93 สำหรับการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง ยกเว้นข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัด W.4A, N.14A และข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์ที่ผลการปรับเทียบแบบจำลองยังให้ค่า R^2 อยู่ในเกณฑ์ไม่สูงนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอัตราการไหลของน้ำสูงสุด (Peak Flow) ที่ผลการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีตรวจวัดน้ำท่า W.4A ให้ค่าต่ำกว่าข้อมูลตรวจวัดจริง (Under-estimated) ในขณะที่ผลการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองของข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัด N.14A และข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์ให้ค่าสูงกว่าข้อมูลจริง (Over-estimated) อย่างไรก็ตาม ในภาพรวมพบว่า รูปแบบของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองมีลักษณะคล้ายคลึงกับข้อมูลตรวจวัดจริง ยิ่งไปกว่านั้น ผลการจำลองระยะยาวยังให้ค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองที่สถานีตรวจวัดน้ำท่า C.2 อยู่ในเกณฑ์ดี กล่าวคือ ให้ค่า PBIAS, NSE, R^2 , d, RSR และ VE เท่ากับ 24.77, 0.81, 0.89, 0.43, 0.81 และ 0.75 ตามลำดับ สำหรับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง WEAP ทั้งในส่วนของการปรับเทียบแบบจำลองและผลการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองได้แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ และข้อมูลปริมาณน้ำท่าของสถานีหลักรายเดือนเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองกับที่ได้จากการตรวจวัดจริงไว้ดังแสดงในรูปที่ 4–34 ถึงรูปที่ 4–40

ตารางที่ 4-36 ตัวชี้วัดทางสถิติแสดงประสิทธิผลของแบบจำลอง WEAP ในการจำลองฝน-น้ำท่าในพื้นที่
ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ตอนบนโดยวิเคราะห์จากฐานข้อมูลรายเดือน

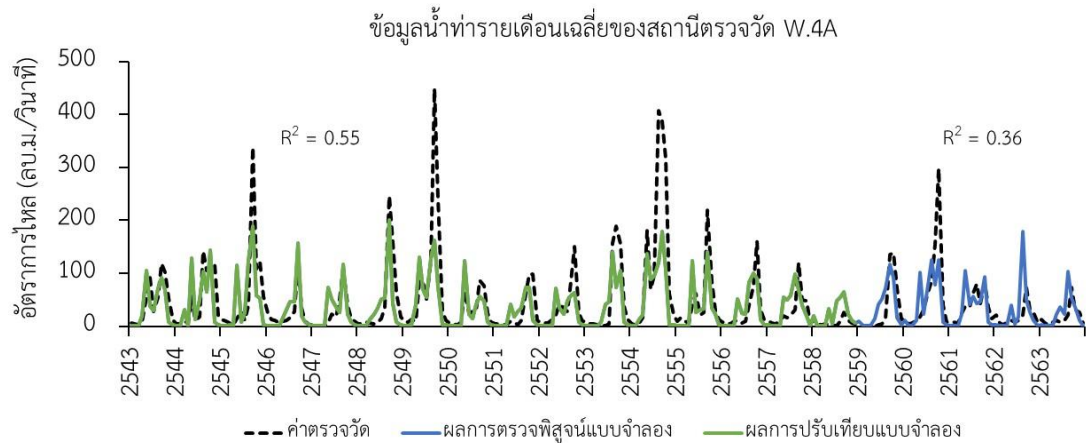
สถานีตรวจวัด น้ำท่า	ประสิทธิผลของแบบจำลอง																	
	ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง พ.ศ. 2543-2558						ผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง พ.ศ. 2559-2563						ข้อมูลระยะยาว พ.ศ. 2543-2558					
	PBIAS	NSE	R ²	RSR	d	VE	PBIAS	NSE	R ²	RSR	d	VE	PBIAS	NSE	R ²	RSR	d	VE
Inflow_BB	2.39	0.84	0.84	0.41	0.84	0.67	11.03	0.83	0.83	0.41	0.83	0.68	3.98	0.84	0.84	0.41	0.84	0.67
P.17	2.46	0.91	0.93	0.30	0.91	0.93	26.66	0.55	0.65	0.67	0.55	0.73	5.77	0.87	0.90	0.37	0.87	0.90
W.4A	-												-					
	20.70	0.51	0.55	0.70	0.52	0.37	1.54	0.32	0.36	0.82	0.33	0.29	16.56	0.49	0.50	0.72	0.49	0.36
Y.17	30.84	0.81	0.91	0.44	0.81	0.69	86.67	-0.37	0.86	1.17	-0.35	0.13	39.30	0.70	0.87	0.55	0.70	0.61
Inflow_SK	81.88	-0.10	0.55	1.05	-0.10	0.17	66.24	0.46	0.79	0.73	0.47	0.34	78.56	0.02	0.60	0.99	0.02	0.21
N.14A	34.38	0.50	0.75	0.71	0.50	0.66	44.60	0.04	0.56	0.98	0.05	0.55	36.35	0.42	0.71	0.76	0.42	0.64
C.2	23.54	0.84	0.92	0.40	0.84	0.77	30.03	0.65	0.76	0.60	0.65	0.70	24.77	0.81	0.89	0.43	0.81	0.75



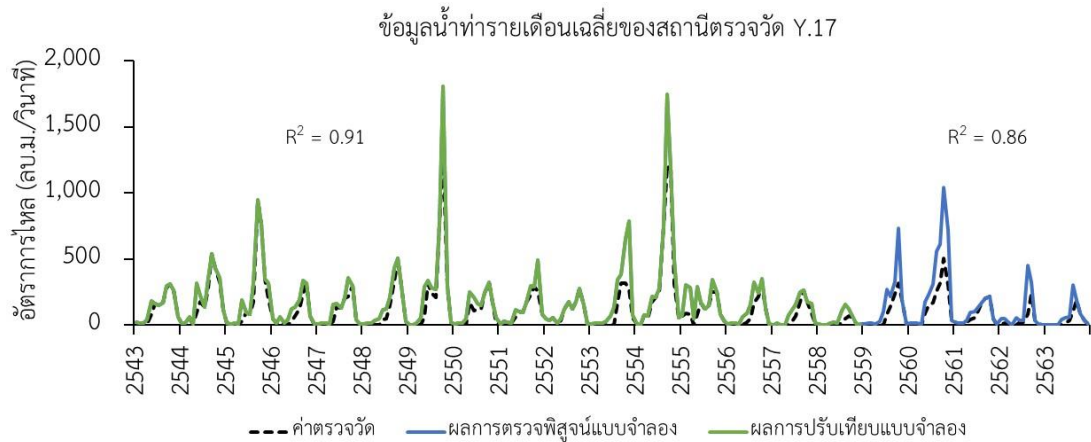
รูปที่ 4-34 เปรียบเทียบปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลที่ได้จากค่าสังเกตและจาก
แบบจำลองรายเดือนหลังการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง



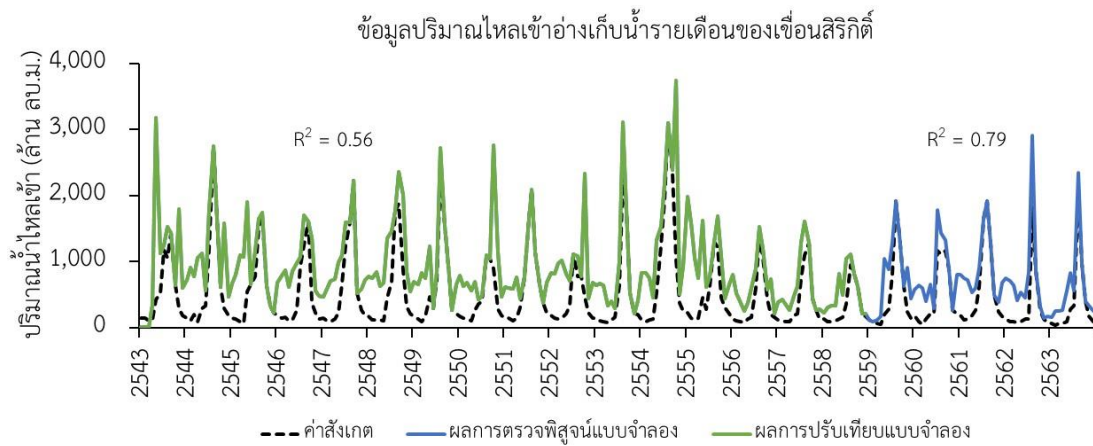
รูปที่ 4-35 เปรียบเทียบข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัด P.17 ที่ได้จากข้อมูลตรวจวัดและจากแบบจำลองรายเดือนเฉลี่ยหลังการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง



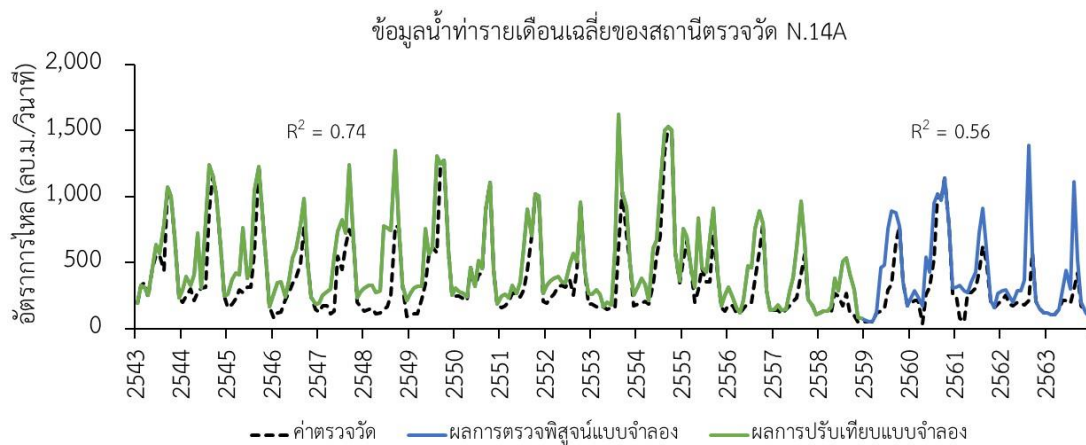
รูปที่ 4-36 เปรียบเทียบข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัด W.4A ที่ได้จากข้อมูลตรวจวัดและจากแบบจำลองรายเดือนเฉลี่ยหลังการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง



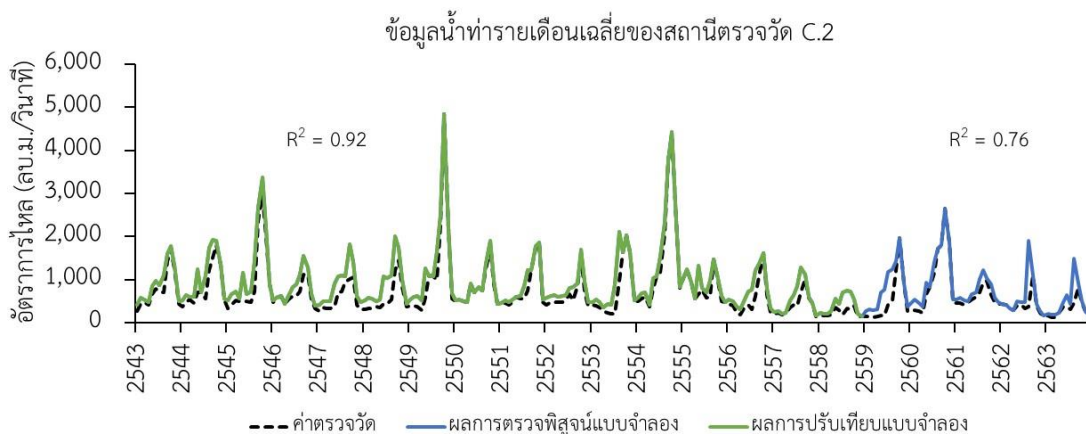
รูปที่ 4-37 เปรียบเทียบข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัด Y.17 ที่ได้จากข้อมูลตรวจวัดและจากแบบจำลองรายเดือนเฉลี่ยหลังการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง



รูปที่ 4-38 เปรียบเทียบปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนสิริกิติ์ที่ได้จากค่าสังเกตและจากแบบจำลองรายเดือนหลังการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง



รูปที่ 4-39 เปรียบเทียบข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัด N.14A ที่ได้จากข้อมูลตรวจวัดและจากแบบจำลองรายเดือนเฉลี่ยหลังการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง

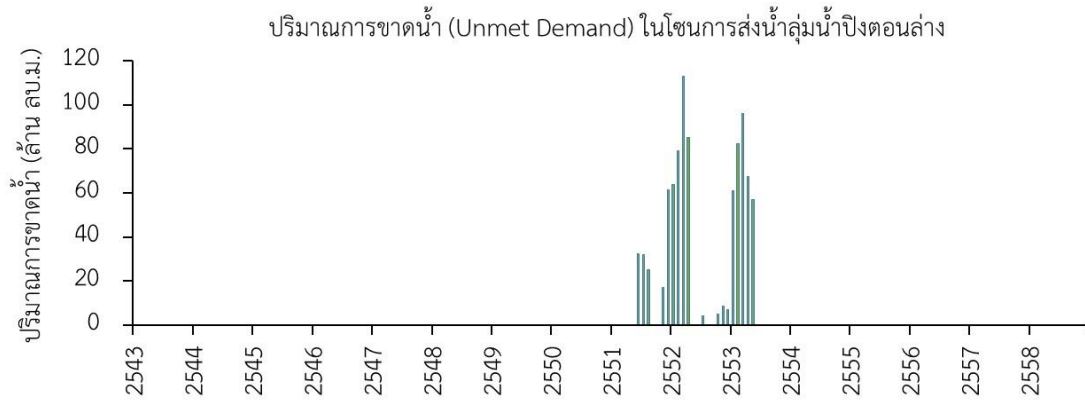


รูปที่ 4-40 เปรียบเทียบข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัด C.2 ที่ได้จากข้อมูลตรวจวัดและจากแบบจำลองรายเดือนเฉลี่ยหลังการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง

ตารางที่ 4-37 ตัวชี้วัดทางสถิติแสดงประสิทธิผลของแบบจำลอง WEAP ในการจำลองฝน-น้ำท่าในพื้นที่
ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ตอนบนโดยวิเคราะห์จากฐานข้อมูลรายปี

ลุ่มน้ำย่อย	สถานีตรวจวัด น้ำท่า	ช่วงข้อมูลและการดำเนินการใน แบบจำลอง		ประสิทธิผลของแบบจำลองในรูป R ²	
				ข้อมูลรายเดือน	ข้อมูลรายปี
ลุ่มน้ำย่อย 1 (SB1)	Inflow_BB	2543-2558	Model Calibration	0.83	0.75
		2559-2563	Model Validation	0.83	0.76
		2543-2558	Long-Term	0.83	0.77
ลุ่มน้ำย่อย 2 (SB2)	P.17	2543-2558	Model Calibration	0.93	0.94
		2559-2563	Model Validation	0.65	0.43
		2543-2558	Long-Term	0.89	0.91
ลุ่มน้ำย่อย 3 (SB3)	W.4A	2543-2558	Model Calibration	0.55	0.89
		2559-2563	Model Validation	0.36	0.97
		2543-2558	Long-Term	0.50	0.89
ลุ่มน้ำย่อย 4 (SB4)	Y.17	2543-2558	Model Calibration	0.91	0.93
		2559-2563	Model Validation	0.86	0.91
		2543-2558	Long-Term	0.87	0.87
ลุ่มน้ำย่อย 5 (SB5)	Inflow_SK	2543-2558	Model Calibration	0.56	0.65
		2559-2563	Model Validation	0.79	0.59
		2543-2558	Long-Term	0.60	0.64
ลุ่มน้ำย่อย 6 (SB6)	N.14A	2543-2558	Model Calibration	0.74	0.79
		2559-2563	Model Validation	0.56	0.96
		2543-2558	Long-Term	0.71	0.84
C.2	C.2	2543-2558	Model Calibration	0.92	0.93
		2559-2563	Model Validation	0.76	0.93
		2543-2558	Long-Term	0.89	0.94

จากผลการพัฒนาแบบจำลอง WEAP ข้างต้น งานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินประสิทธิผลในรูปของปริมาณการขาดน้ำ (Unmet Demand) จากผลการจำลองสถานการณ์น้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระยะยาวระหว่างปี พ.ศ. 2543-2558 ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดที่ได้จากการปรับเทียบโดยให้ผลดังสรุปไว้ในรูปที่ 4-41 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การขาดน้ำเกิดขึ้นในโซนการส่งน้ำลุ่มน้ำปิงตอนล่าง (LPWDZ) ในระหว่างปี พ.ศ. 2551-2553 ในช่วงตั้งแต่ 168-367 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งสอดคล้องตามสถานการณ์น้ำผิวดินที่มีอยู่จำกัดในพื้นที่ดังกล่าว ในขณะที่ ผลการจำลองไม่ปรากฏการขาดน้ำในโซนการส่งน้ำลุ่มน้ำน่านตอนล่าง (LPWDZ) และโซนการส่งน้ำลุ่มน้ำเจ้าพระยา (CPYWDZ)



รูปที่ 4-41 ปริมาณการขาดน้ำในโซนการส่งน้ำลุ่มน้ำปิงตอนล่างจากผลการจำลองด้วยแบบจำลอง WEAP

4.2.3 ผลการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ

การศึกษาครั้งนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่องโดยนำเสนอรูปแบบของแบบจำลองการพยากรณ์ 2 ประเภทได้แก่ (1) แบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าแบบอย่างเดี่ยว (Univariate Prediction Model) และ (2) แบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าแบบหลายอย่าง (Multivariate Prediction Model) และพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำล่วงหน้าทั้งในระยะสั้นรายวัน (Short-Term Prediction) และระยะยาวรายเดือน (Long-Term Prediction) ด้วยอัลกอริทึม XGBoost และ LSTM โดยมีรายละเอียดตามประเภทของแบบจำลองการพยากรณ์ดังนี้

4.2.3.1 ผลการรวบรวมข้อมูล

ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ต้องการใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำซึ่งประกอบด้วยข้อมูล 2 ประเภทคือ (1) ข้อมูลฝนและสภาพภูมิอากาศ (2) ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของทั้ง 4 เขื่อนหลัก โดยรายละเอียดและที่มาของข้อมูลแสดงในตารางที่ 4-38

ตารางที่ 4-38 ข้อมูลและแหล่งที่มาของข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ประเภทของข้อมูล	แหล่งที่มาของข้อมูล
ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาและสภาพภูมิอากาศ	
ข้อมูลฝนตรวจวัดรายวัน	กรมอุตุนิยมวิทยา
ข้อมูลฝนตรวจวัดรายวันจากระบบโทรมาตร	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ข้อมูลฝนพยากรณ์รายวันล่วงหน้า 14 วัน	สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน)
ข้อมูลฝนและข้อมูลสภาพภูมิอากาศรายวัน	ระบบคลังข้อมูลสภาพภูมิอากาศโลก NASA
ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ	
ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวัน	
เขื่อนภูมิพล	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
เขื่อนสิริกิติ์	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ประเภทของข้อมูล	แหล่งที่มาของข้อมูล
เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน	กรมชลประทาน
เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	กรมชลประทาน

สำหรับข้อมูลอ่างเก็บน้ำได้รวบรวมข้อมูลรายวันของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งข้อมูลที่รวบรวมมานั้นเป็นข้อมูลตั้งแต่ พ.ศ. 2553–2563 รวมทั้งสิ้น 21 ปี ในขณะที่ข้อมูลอ่างเก็บน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์รวบรวมจากกรมชลประทาน ซึ่งเป็นข้อมูลตั้งแต่ พ.ศ. 2552–2564 รวมทั้งสิ้น 22 ปี ข้อมูลสภาพภูมิอากาศได้รวบรวมจากแหล่งข้อมูล 2 แหล่งคือ (1) กรมอุตุนิยมวิทยา และ (2) ระบบคลังข้อมูลสภาพภูมิอากาศโลก (Global Climate Data) จากองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (National Aeronautics and Space Administration, NASA) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบในโครงการอวกาศและงานวิจัยห้วงอวกาศของสหรัฐอเมริกา โดยทำการระบุพิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถานีตรวจวัดอากาศบริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่ศึกษาเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ดังแสดงในตารางที่ 4–39 ซึ่งเป็นสถานีตรวจวัดสภาพภูมิอากาศเดียวกันกับสถานีที่รวบรวมข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา โดยข้อมูลที่สำคัญได้แก่ ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิต่ำสุด อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิเฉลี่ย ความเร็วลม ความชื้นในดิน ความกดอากาศ และอื่น ๆ

ตารางที่ 4–39 พิกัดทางภูมิศาสตร์และรหัสของสถานีตรวจวัดสภาพภูมิอากาศในบริเวณพื้นที่ศึกษา

รหัสสถานี	ชื่อสถานี	พิกัดทางภูมิศาสตร์	
		ละติจูด	ลองจิจูด
เขื่อนภูมิพล			
0002	สถานีตรวจวัดภูมิอากาศตาก	E 99°08'24.0"	N 16°52'48.0"
0006	สถานีตรวจวัดภูมิอากาศเขื่อนภูมิพล	E 99°00'08.0"	N 17°14'37.0"
0007	สถานีตรวจวัดภูมิอากาศแม่สอด	E 98°32'31.0"	N 16°41'60.0"
0015	สถานีอุตุนิยมวิทยาศรีสำโรง	E 99°31'36.0"	N 17°29'11.0"
0017	สถานีอุตุนิยมวิทยาตอแยมุเซอ	E 98°56'07.0"	N 16°41'60.0"
0019	สถานีตรวจวัดภูมิอากาศโทน	E 99°14'44.0"	N 17°38'12.0"
เขื่อนสิริกิติ์			
0003	สถานีตรวจวัดภูมิอากาศพิษณุโลก	E 100°16'32.9"	N 16°47'47.0"
0018	สถานีตรวจวัดภูมิอากาศอุตรดิตถ์	E 100°05'60.0"	N 17°37'00.0"
0095	สถานีตรวจวัดภูมิอากาศน่าน	E 100°45'47.2"	N 18°46'01.0"

4.2.3.2 รูปแบบการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบ อ่างเดี่ยว (Univariate Prediction Model)

ผลการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยว (Univariate Prediction Model) เพื่อพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำล่วงหน้าของ 4 เขื่อนหลักทั้งใน

ระยะสั้นรายวัน (Short-Term Prediction) ที่พัฒนาขึ้นด้วยอัลกอริทึม XGBoost และ LSTM และระยะยาวรายเดือน (Long-Term Prediction) ที่พัฒนาขึ้นด้วยอัลกอริทึม LSTM โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

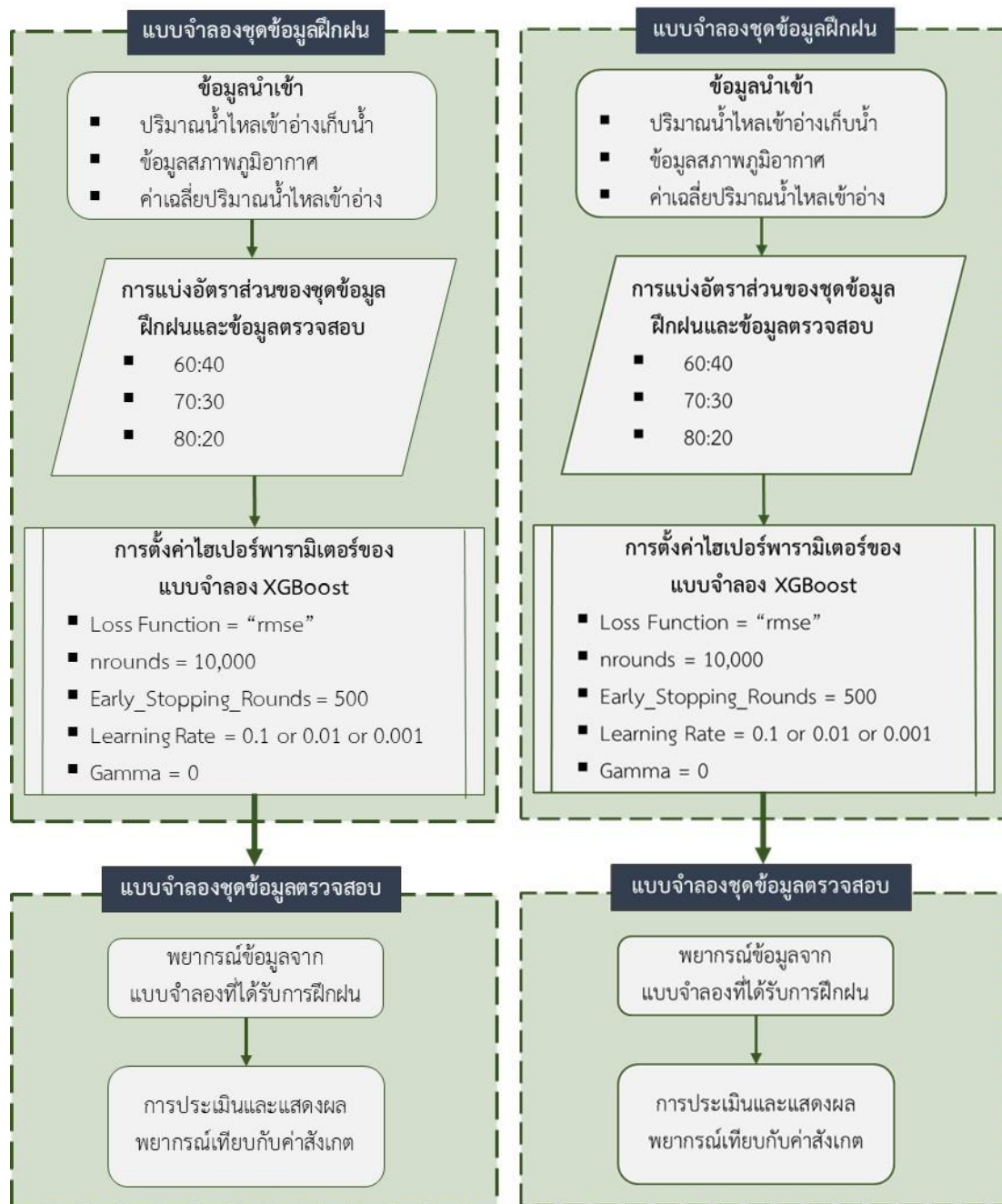
4.2.3.2.1 รูปแบบการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบ อ่างเดี่ยวด้วยอัลกอริทึม XGBoost ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

แบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าแบบอ่างเดี่ยวเป็นการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายอ่างแยกกันโดยใช้ข้อมูลทางอุทกวิทยาและอุตุนิยมวิทยาจากพื้นที่อ่างเก็บน้ำของแต่ละอ่างเป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลอง และใช้อัลกอริทึม XGBoost เป็นเทคนิคในการพยากรณ์เฉพาะเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์และพัฒนาโดยใช้โปรแกรม R สำหรับการเตรียมข้อมูลนำเข้าของแต่ละอ่างเก็บน้ำ รวมถึงการตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 4-42 และรูปที่ 4-43 ส่งผลให้สามารถพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์รายวันของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ด้วยอัลกอริทึม XGBoost จำนวน 54 กรณี และแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนด้วยอัลกอริทึม XGBoost 54 กรณี



รูปที่ 4-42 กระบวนการทำงานในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวด้วยอัลกอริทึม XGBoost ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

ในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวด้วยอัลกอริทึม XGBoost ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ได้กำหนดตัวแปรอิสระซึ่งประกอบด้วยข้อมูลนำเข้า ได้แก่ ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและข้อมูลสภาพภูมิอากาศ และข้อมูลค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลาซ้อนหลัง อีกทั้งได้กำหนดอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและข้อมูลตรวจสอบ 3 รูปแบบคือ 60:40, 70:30 และ 80:20 และกำหนดอัตราเรียนรู้ 3 ค่าคือ 0.1, 0.01 และ 0.001 ในขณะที่ตัวแปรควบคุมในที่นี้ครอบคลุมถึงการกำหนดไฮเปอร์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองพยากรณ์ทุกแบบจำลองเหมือนกันได้แก่ nrounds, Loss Function, Early Stopping Rounds และค่า Gamma ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4-42



รูปที่ 4-43 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่วงเดี่ยวด้วยอัลกอริทึม XGBoost ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

4.2.3.2.2 รูปแบบการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่วงเดี่ยวด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

งานวิจัยนี้ยังได้พัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่วงเดี่ยวด้วยอัลกอริทึม LSTM โดยได้พัฒนาโดยใช้ภาษา Python และกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการฝึกฝนแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของแต่ละเขื่อนรายวันและรายเดือนดังสรุปไว้ในตารางที่

4-40 และในตารางที่ 4-41 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง วิธีการปรับช่วงข้อมูล และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ LSTM ใน Keras ของแต่ละแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ตามลำดับ ทั้งนี้ ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของ LSTM ด้วยค่าเริ่มต้น และปรับเปลี่ยนปริมาณข้อมูลที่ต้องการดูย้อนหลัง และค่าตัวแปรนำเข้า เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีความแม่นยำ

แบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวด้วยอัลกอริทึม LSTM ประกอบด้วยแบบจำลองย่อยรายวันของแต่ละอ่างเก็บน้ำมีดังนี้ (1) แบบจำลองย่อยรายวันเขื่อนภูมิพล ประกอบด้วย dBB-01, dBB-02, dBB-03, dBB-04, dBB-05 และ dBB-06 (2) แบบจำลองย่อยรายวันเขื่อนสิริกิติ์ประกอบด้วย dSK-01, dSK-02, dSK-03, dSK-04, dSK-05 และ dSK-06 (3) แบบจำลองย่อยรายวันเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนประกอบด้วย dKNB-01, dKNB-02, dKNB-03, dKNB-04, dKNB-05 และ dKNB-06 และ (4) แบบจำลองย่อยรายวันเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ประกอบด้วย dPS-01, dPS-02, dPS-03, dPS-04, dPS-05 และ dPS-06 และแบบจำลองย่อยรายเดือนของแต่ละอ่างเก็บน้ำมีดังนี้ (1) แบบจำลองย่อยรายเดือนเขื่อนภูมิพลประกอบด้วย mBB-01, mBB-02, mBB-03, mBB-04, mBB-05 และ mBB-06 (2) แบบจำลองย่อยรายเดือนเขื่อนสิริกิติ์ประกอบด้วย mSK-01, mSK-02, mSK-03, mSK-04, mSK-05 และ mSK-06 (3) แบบจำลองย่อยรายเดือนเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนประกอบด้วย mKNB-01, mKNB-02, mKNB-03, mKNB-04, mKNB-05 และ mKNB-06 และ (4) แบบจำลองย่อยรายเดือนเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ประกอบด้วย mPS-01, mPS-02, mPS-03, mPS-04, mPS-05 และ mPS-06

สำหรับรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่กำหนดในแบบจำลองประกอบด้วย (1) Steps เป็นการระบุจำนวนข้อมูลที่ต้องการนำเข้าย้อนหลัง เช่น 1, 7 และ 30 วัน เป็นต้น ซึ่งจะเป็นชุดข้อมูลที่มีชุดข้อมูลตัวแปรเดียว ยกตัวอย่างเช่น ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ หรือประกอบด้วยหลาย ๆ ตัวแปรเพิ่มเติมก็ได้ โดย Step จะเป็นการระบุให้แบบจำลองเรียนรู้ข้อมูลย้อนหลังนั้น ๆ ในแต่ละครั้งของการฝึกฝน (2) Units เป็นการระบุจำนวน Hidden States หรือ Cells ในแบบจำลอง (3) Activation เป็นการระบุ Activation Function ของ Cell ในการเรียนรู้ เช่น Relu, Sigmoid, Tanh เป็นต้น (4) Loss เป็นการระบุ Loss Function ของ Cell ที่ใช้ในการเรียนรู้ เช่น MSE, RMSE, MAE เป็นต้น (5) Optimizer เป็นการระบุวิธีสำหรับการเพิ่มความแม่นยำให้การเรียนรู้ เช่น adam เป็นต้น (6) Epochs เป็นการระบุจำนวนรอบการฝึกฝนให้กับแบบจำลอง และ (6) Batch Size เป็นการระบุจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้ต่อหนึ่งครั้ง เช่น 16, 32 และ 64 เป็นต้น

ตารางที่ 4-40 การกำหนดรูปแบบของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอย่างเดี่ยว
รายวันด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเชื่อนภูมิพล เชื่อนสิริกิติ์ เชื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเชื่อนป่า
สักชลสิทธิ์

เลข แบบจำลอง	ตัวแปร นำเข้า	วิธีการปรับ ช่วงข้อมูล	ค่าพารามิเตอร์ของ LSTM ใน Keras							
			Steps	Number of Layers	Units per Layer	Activation	Loss	Optimizer	Epoch	Batch size
เชื่อนภูมิพล										
dBB-01	Inflow	Standard	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dBB-02	Inflow	Standard	7	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dBB-03	Inflow	Standard	14	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dBB-04	Inflow, Rainfall (NASA)	Standard	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dBB-05	Inflow, Rainfall (NASA)	Standard	7	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dBB-06	Inflow, Rainfall (NASA)	Standard	14	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
เชื่อนสิริกิติ์										
dSK-01	Inflow	Standard	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dSK-02	Inflow	Standard	7	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dSK-03	Inflow	Standard	14	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dSK-04	Inflow, Rainfall (NASA)	Standard	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dSK-05	Inflow, Rainfall (NASA)	Standard	7	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dSK-06	Inflow, Rainfall (NASA)	Standard	14	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
เชื่อนแควน้อยบำรุงแดน										
dKNB-01	Inflow	Standard	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dKNB-02	Inflow	Standard	7	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16

เลข แบบจำลอง	ตัวแปร นำเข้า	วิธีการปรับ ช่วงข้อมูล	ค่าพารามิเตอร์ของ LSTM ใน Keras							
			Steps	Number of Layers	Units per Layer	Activation	Loss	Optimizer	Epoch	Batch size
dKNB-03	Inflow	Standard	14	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dKNB-04	Inflow, Rainfall (NASA)	Standard	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dKNB-05	Inflow, Rainfall (NASA)	Standard	7	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dKNB-06	Inflow, Rainfall (NASA)	Standard	14	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์										
dPS-01	Inflow	Standard	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dPS-02	Inflow	Standard	7	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dPS-03	Inflow	Standard	14	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dPS-04	Inflow, Rainfall (NASA)	Standard	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dPS-05	Inflow, Rainfall (NASA)	Standard	7	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16
dPS-06	Inflow, Rainfall (NASA)	Standard	14	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	50	16

ตารางที่ 4-41 การกำหนดรูปแบบของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยว รายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

เลข แบบจำลอง	ตัวแปร นำเข้า	วิธีการปรับ ช่วงข้อมูล	ค่าพารามิเตอร์ของ LSTM ใน Keras							
			Steps	Number of Layers	Units per Layer	Activation	Loss	Optimizer	Epoch	Batch size
เขื่อนภูมิพล										

เลข แบบจำลอง	ตัวแปร นำเข้า	วิธีการปรับ ช่วงข้อมูล	ค่าพารามิเตอร์ของ LSTM ใน Keras							
			Steps	Number of Layers	Units per Layer	Activation	Loss	Optimizer	Epoch	Batch size
mBB-01	Inflow	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	16
mBB-02	Inflow	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	32
mBB-03	Inflow	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	64
mBB-04	Inflow, Rainfall (NASA)	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	16
mBB-05	Inflow, Rainfall (NASA)	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	32
mBB-06	Inflow, Rainfall (NASA)	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	64
เขื่อนสิริกิติ์										
mSK-01	Inflow	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	16
mSK-02	Inflow	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	32
mSK-03	Inflow	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	64
mSK-04	Inflow, Rainfall (NASA)	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	16
mSK-05	Inflow, Rainfall (NASA)	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	32
mSK-06	Inflow, Rainfall (NASA)	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	64
เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน										
mKNB-01	Inflow	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	16
mKNB-02	Inflow	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	32
mKNB-03	Inflow	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	64
mKNB-04	Inflow, Rainfall (NASA)	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	16

เลข แบบจำลอง	ตัวแปร นำเข้า	วิธีการปรับ ช่วงข้อมูล	ค่าพารามิเตอร์ของ LSTM ใน Keras							
			Steps	Number of Layers	Units per Layer	Activation	Loss	Optimizer	Epoch	Batch size
mKNB-05	Inflow, Rainfall (NASA)	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	32
mKNB-06	Inflow, Rainfall (NASA)	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	64
เชื่อมป่าสักชลสิทธิ์										
mPS-01	Inflow	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	16
mPS-02	Inflow	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	32
mPS-03	Inflow	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	64
mPS-04	Inflow, Rainfall (NASA)	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	16
mPS-05	Inflow, Rainfall (NASA)	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	32
mPS-06	Inflow, Rainfall (NASA)	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	64

ในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายวัน และรายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ได้พัฒนาด้วยภาษา Python 3.6 โดยใช้ Google Colab หรือ "Google Colaboratory" ที่เป็นแพลตฟอร์มสำหรับเขียนและเรียกใช้ Python ในเบราว์เซอร์ ทั้งนี้ จะมี Library ที่เกี่ยวข้องดังแสดงในตารางที่ 4-42 ในเบื้องต้นของการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์รายวันได้ทำการรวบรวมข้อมูลทุกชุด (ชุดที่ 1 ถึงชุดที่ 6) รายวันและทำการฝึกฝนแบบจำลองใหม่ทุก ๆ สัปดาห์ โดยข้อมูลจะสิ้นสุด ณ วันที่ 31 ธันวาคม 2564 ทั้งนี้ข้อมูลทุกชุดมีความครบถ้วน ยกเว้นชุดข้อมูลฝนรายวันจากระบบโทรมาตร TMD ของสถานี TU10 หลังการฝึกฝนและทดสอบแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในช่วงแรกพบว่า ประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเชื่อมภูมิพลและเชื่อมสิริกิติ์โดยใช้ข้อมูลฝนรายวันจากระบบโทรมาตรมีความใกล้เคียงกันกับประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเชื่อมภูมิพลและเชื่อมสิริกิติ์โดยใช้ข้อมูลฝนรายวันจาก NASA หากแต่ข้อมูลฝนรายวันจากระบบโทรมาตรมีบางส่วนขาดหาย ดังนั้น ในการพัฒนาแบบจำลองจึงมีการนำข้อมูลฝนรายวันจาก NASA มาทดแทน สำหรับการฝึกฝนแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำได้

กำหนดค่าพารามิเตอร์ตามที่แสดงในตารางข้างต้น โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบเท่ากับ 70:30

ตารางที่ 4-42 รายชื่อ Library ที่เกี่ยวข้อง

Library	รายละเอียดการใช้งาน
pandas	สำหรับการจัดการข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลให้ครบ
numpy	สำหรับการจัดการข้อมูลในรูปแบบ Array หลายมิติ
matplotlib.pyplot	สำหรับการแสดงผลในรูปแบบ Visualization
random	สำหรับการสุ่มค่าต่าง ๆ
statsmodels.tsa.stattools, adfuller	สำหรับการเตรียมข้อมูลต่าง ๆ ในเชิงสถิติ

ในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอย่างเดี่ยวรายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM นั้น ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการปรับหน่วยเวลาข้อมูลและรวมตัวแปรของแต่ละชุดข้อมูลจากรายวันเป็นรายเดือนโดยใช้วิธีการทางสถิติ เช่น ผลรวมของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายเดือน ค่าเฉลี่ยของความชื้นรายเดือน ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ เป็นต้น และกำหนดอัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบเท่ากับ 70:30 โดยช่วงข้อมูลที่นำมาใช้อยู่ในช่วงตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2552 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2564

4.2.3.3 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยว (Univariate Prediction Model)

4.2.3.3.1 ผลการพยากรณ์จากแบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวด้วยอัลกอริทึม XGBoost ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น แบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอย่างเดี่ยวของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่องซึ่งใช้อัลกอริทึม Extreme Gradient Boosting (XGBoost) จากข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองการพยากรณ์ที่แตกต่างกัน ประกอบด้วยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ (It) ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา $t-1$ ถึง $t-3$ (Avg. 3) ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา $t-1$ ถึง $t-7$ (Avg. 7) ข้อมูลปริมาณฝน (Prec. t) ข้อมูลค่าเฉลี่ยความชื้น (Hum. t) รวมถึงการตั้งค่าแบบจำลองด้วยอัตราส่วนของชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบสามแบบ ได้แก่ 60:40, 70:30 และ 80:20 และการกำหนดอัตราการเรียนรู้ (Learning Rate, Eta) ที่แตกต่างกันสามค่า คือ 0.1, 0.01 และ 0.001 ข้อมูลนำเข้าและการตั้งค่าแบบจำลองที่แตกต่างกันนี้ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอย่างเดี่ยวของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ที่แตกต่างกันโดยแบ่งเป็นแบบจำลองการพยากรณ์รายวันของเขื่อนภูมิพล แบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนของเขื่อนภูมิพล แบบจำลองการพยากรณ์รายวันของเขื่อนสิริกิติ์ และแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนของเขื่อนสิริกิติ์ได้อย่างละ 54 กรณี รวมทั้งหมด 216 กรณี ซึ่งได้สรุปผลพยากรณ์ของชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ

ในแต่ละกรณีด้วยค่าสถิติ ได้แก่ ค่าน้อยสุด ค่าเฉลี่ย และค่าสูงสุดของปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแสดงในตารางภาคผนวก B และแสดงค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันและรายเดือนจากแบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวและแบบหลายอย่างด้วยอัลกอริทึม XGBoost ของเซียนภูมิพล และเซียนสิริกิติ์ในตารางภาคผนวก C สำหรับแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอย่างเดี่ยวรายวันและรายเดือนของเซียนภูมิพลและเซียนสิริกิติ์ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดจากข้อกำหนดของอัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนต่อชุดข้อมูลตรวจสอบที่แตกต่างกันได้สรุปผลไว้ในตารางที่ 4-43 และตารางที่ 4-44 และแสดงการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายวันและรายเดือนด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดเซียนภูมิพล และเซียนสิริกิติ์ในรูปที่ 4-44 ถึงรูปที่ 4-47

โครงสร้างของรูปแบบของข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอย่างเดี่ยวรายวันด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดของเซียนภูมิพลและเซียนสิริกิติ์ มีลักษณะเหมือนกัน กล่าวคือ ข้อมูลนำเข้าประกอบด้วย ปริมาณน้ำไหลเข้าที่เวลา t และค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา $t-1, \dots, t-3$ (Avg. 3) ในขณะที่แบบจำลองแบบอย่างเดี่ยวรายเดือนของทั้ง 2 เซียนมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยข้อมูลนำเข้าหลักประกอบด้วย ปริมาณน้ำไหลเข้าที่เวลา t ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลาย้อนหลัง ข้อมูลฝนและข้อมูลสภาพภูมิอากาศ ดังสรุปผลไว้ในตารางที่ 4-45

ตารางที่ 4-43 ประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอย่างเดี่ยวรายวันของเซียนภูมิพลและเซียนสิริกิติ์

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์รายวัน (Daily Prediction Model)				
การตั้งค่าแบบจำลอง		แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยว (Univariate Prediction Model)		
อัลกอริทึม		XGBoost		
อัตราส่วน*		60:40	70:30	80:20
เซียนภูมิพล				
ชุดข้อมูลฝึกฝน	RMSE	7.9321	8.0515	7.3350
	MSE	62.9187	64.8271	53.8019
	R ²	0.9219	0.9198	0.9223
	R	0.9602	0.9591	0.9604
	NSE	0.9089	0.8980	0.9074
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	RMSE	5.6560	5.8255	6.5457
	MSE	31.9904	33.9367	42.8461
	R ²	0.8854	0.8775	0.8661
	R	0.9410	0.9367	0.9306
	NSE	0.8619	0.8429	0.8307
เซียนสิริกิติ์				
๗ ๕ ๓	RMSE	8.7749	8.6989	8.3666

4 | การปฏิบัติกระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์รายวัน (Daily Prediction Model)				
การตั้งค่าแบบจำลอง		แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยว (Univariate Prediction Model)		
อัลกอริทึม		XGBoost		
อัตราส่วน*		60:40	70:30	80:20
	MSE	76.9993	75.6713	69.9998
	R ²	0.8890	0.8843	0.8837
	R	0.9428	0.9404	0.9400
	NSE	0.8740	0.8675	0.8711
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	RMSE	8.4261	8.7146	9.0171
	MSE	70.9985	75.9451	81.3076
	R ²	0.8267	0.8310	0.8362
	R	0.9092	0.9116	0.9145
	NSE	0.8176	0.8124	0.8161

หมายเหตุ: *อัตราส่วน = อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนต่อชุดข้อมูลตรวจสอบ

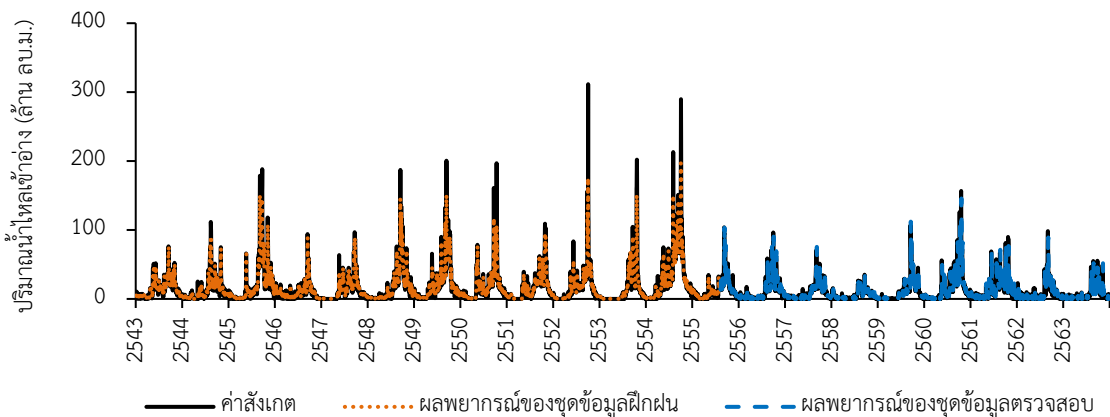
ตารางที่ 4-44 ประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอย่างเดี่ยวรายเดือนของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์รายเดือน (Monthly Prediction Model)				
การตั้งค่าแบบจำลอง		แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยว (Univariate Prediction Model)		
อัลกอริทึม		XGBoost		
อัตราส่วน*		60:40	70:30	80:20
เขื่อนภูมิพล				
ชุดข้อมูลฝึกฝน	RMSE	522	499	466
	MSE	272192	249306	217267
	R ²	0.4119	0.4254	0.4523
	R	0.6418	0.6522	0.6725
	NSE	0.3805	0.3814	0.4112
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	RMSE	299	263	257
	MSE	89559	69189	65836
	R ²	0.6366	0.6621	0.6788
	R	0.7979	0.8137	0.8239
	NSE	0.4612	0.5975	0.6746
เขื่อนสิริกิติ์				
ชุดข้อมูลฝึกฝน	RMSE	485	443	429
	MSE	235282	196562	183944
	R ²	0.4643	0.4928	0.4984

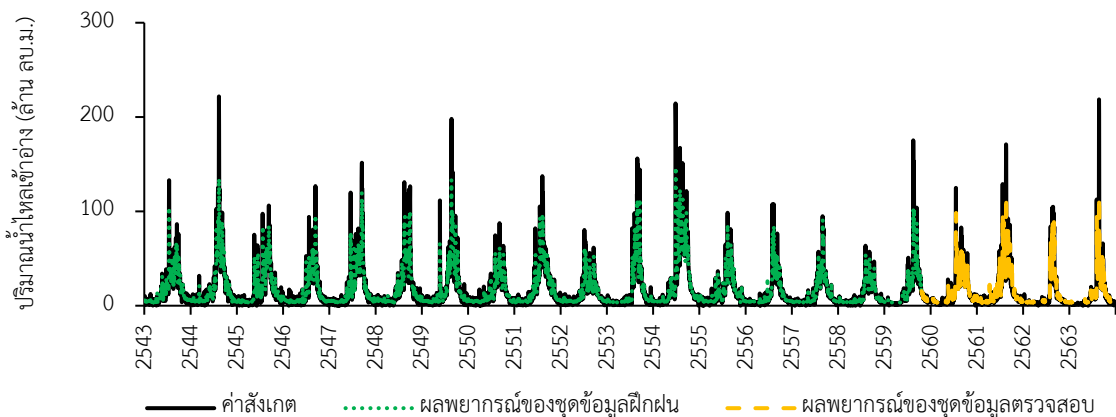
4 | การปฏิบัติกระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์รายเดือน (Monthly Prediction Model)				
การตั้งค่าแบบจำลอง		แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยว (Univariate Prediction Model)		
อัลกอริทึม		XGBoost		
อัตราส่วน*		60:40	70:30	80:20
	R	0.6814	0.702	0.7059
	NSE	0.4191	0.4727	0.4803
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	RMSE	363	358	376
	MSE	132060	128363	141588
	R ²	0.4847	0.5196	0.509
	R	0.6962	0.7208	0.7134
	NSE	0.4424	0.5128	0.5054

หมายเหตุ: * อัตราส่วน = อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนต่อชุดข้อมูลตรวจสอบ

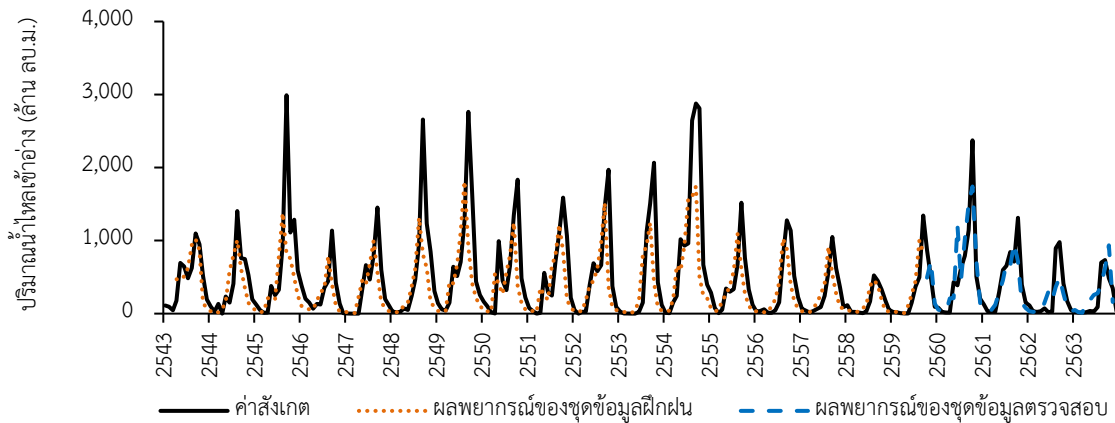


รูปที่ 4-44 การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายวันด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเชิงอนุกรมเวลา

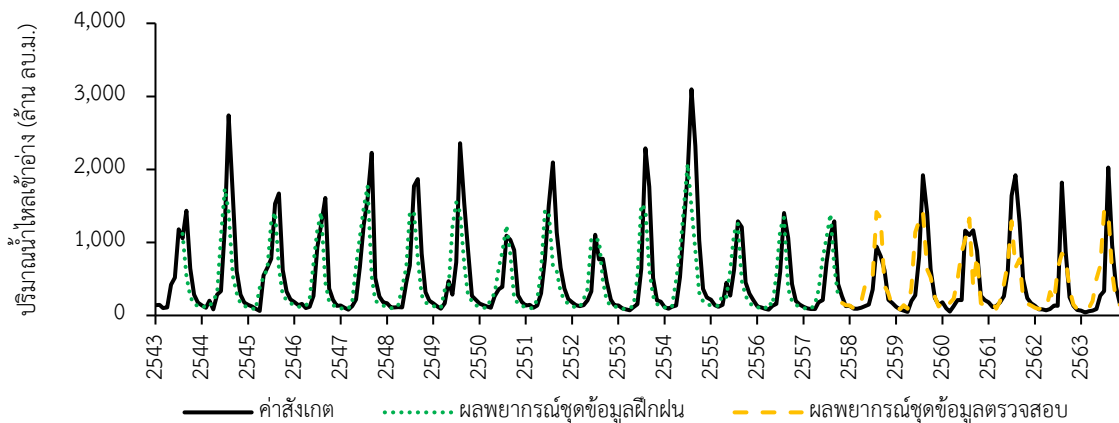


รูปที่ 4-45 การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายวันด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเชิงอนุกรมเวลา

4 | การปฏิบัติกระบวนอย่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ



รูปที่ 4-46 การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเชื่อมภูมิภาค



รูปที่ 4-47 การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเชื่อมสิริกิติ์

ตารางที่ 4-45 รูปแบบและประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายวันและรายเดือนด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของเชื่อมภูมิภาคและเชื่อมสิริกิติ์

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่างเดี่ยวรายวันและรายเดือน (Daily and Monthly Univariate Prediction Model)		
อัลกอริทึม: XGBoost		
เชื่อมภูมิภาค		
การตั้งค่าแบบจำลอง	แบบจำลองรายวัน	แบบจำลองรายเดือน
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝน:ชุดข้อมูลตรวจสอบ	60:40	80:20
ข้อมูลนำเข้า		
ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา t-1, ..., t-3 (Avg. 3)	✓	✓
ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา	-	-

4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวันและรายเดือน (Daily and Monthly Univariate Prediction Model)			
อัลกอริทึม: XGBoost			
t-1, ..., t-7 (Avg. 7)			
ปริมาณน้ำไหลเข้าที่เวลา t		✓	✓
ปริมาณฝนที่เวลา t		-	✓
ค่าเฉลี่ยความชื้นที่เวลา t		-	✓
อัตราการเรียนรู้ (Eta)		0.1	0.001
ชุดข้อมูลฝึกฝน	RMSE	7.9321	466.1194
	MSE	62.9187	217,267.3128
	R ²	0.9219	0.4523
	R	0.9602	0.6725
	NSE	0.9089	0.4112
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	RMSE	5.6560	256.5848
	MSE	31.9904	65,835.7496
	R ²	0.8854	0.6788
	R	0.9410	0.8239
	NSE	0.8619	0.6746
เงื่อนไขการเปรียบเทียบ			
การตั้งค่าแบบจำลอง		แบบจำลองรายวัน	แบบจำลองรายเดือน
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝน:ชุดข้อมูลตรวจสอบ		80:20	70:30
ข้อมูลนำเข้า			
ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา t-1, ..., t-3 (Avg. 3)		✓	-
ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา t-1, ..., t-7 (Avg. 7)		-	✓
ปริมาณน้ำไหลเข้าที่เวลา t		✓	✓
ปริมาณฝนที่เวลา t		-	✓
ค่าเฉลี่ยความชื้นที่เวลา t		-	-
อัตราการเรียนรู้ (Eta)		0.1	0.001
ชุดข้อมูลฝึกฝน	RMSE	8.3666	443.3527
	MSE	69.9998	196,561.6187
	R ²	0.8837	0.4928
	R	0.9400	0.7020
	NSE	0.8711	0.4727
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	RMSE	9.0171	358.2783

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวันและรายเดือน (Daily and Monthly Univariate Prediction Model)			
อัลกอริทึม: XGBoost			
	MSE	81.3076	128,363.3682
	R ²	0.8362	0.5196
	R	0.9145	0.7208
	NSE	0.8161	0.5128

จากผลลัพธ์ของที่ได้จากแบบจำลองการพยากรณ์ที่พัฒนาขึ้น งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการพยากรณ์จากแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอย่างเดี่ยวรายวันและรายเดือนด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์เทียบกับค่าสังเกต โดยนำเสนอใน 3 รูปแบบคือ (1) ผลต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (2) ผลต่างของค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง และ (3) ผลต่างของค่าต่ำสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง โดยแสดงผลทั้งในหน่วยปริมาตรน้ำและเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างซึ่งรายละเอียดการวิเคราะห์ได้สรุปผลไว้ในตารางที่ 4-46 ถึงตารางที่ 4-47

ตารางที่ 4-46 ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการพยากรณ์จากแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอย่างเดี่ยวรายวันด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)						
อัลกอริทึม: XGBoost						
เขื่อนภูมิพล						
การตั้งค่า	อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 60:40					
แบบจำลอง	ข้อมูลนำเข้า: ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลา t (It), ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลา t-1 ถึง t-3 (Avg. 3)					
	อัตราการเรียนรู้: 0.1					
ค่าสถิติจากผลพยากรณ์	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)			ค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)		
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)
ชุดข้อมูลฝึกฝน	17.52	16.71	-0.81 (-4.62)	311.46	197.05	-114.41 (-36.73)
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	10.99	11.02	+0.03 (+0.27)	156.57	145.71	-10.86 (-6.93)
ค่าสถิติจากผลพยากรณ์	ค่าต่ำสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)					
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์		Δ (%)		
ชุดข้อมูลฝึกฝน	0.000	0.168		+0.168		
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	0.000	0.168		+0.168		

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)						
อัลกอริทึม: XGBoost						
เงื่อนไขการฝึก						
การตั้งค่า	อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 80:20					
แบบจำลอง	ข้อมูลนำเข้า: ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลา t (I_t), ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลา $t-1$ ถึง $t-3$ (Avg. 3)					
	อัตราการเรียนรู้: 0.1					
ค่าสถิติจากผลพยากรณ์	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)			ค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)		
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)
ชุดข้อมูลฝึกฝน	17.32	16.70	-0.62 (-3.58)	221.87	146.95	-74.92 (-33.77)
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	14.26	13.92	-0.34 (-2.38)	218.70	116.39	-102.31 (-46.78)
ค่าสถิติจากผลพยากรณ์	ค่าต่ำสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)					
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)			
ชุดข้อมูลฝึกฝน	0.000	3.025	+3.025			
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	0.000	3.025	+3.025			

ตารางที่ 4-47 ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการพยากรณ์จากแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายเดือนด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของเงื่อนไขการฝึกและเงื่อนไขการทดสอบ

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)						
อัลกอริทึม: XGBoost						
เงื่อนไขการฝึก						
การตั้งค่า	อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 80:20					
แบบจำลอง	ข้อมูลนำเข้า: ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลา t (I_t), ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลา $t-1$ ถึง $t-3$ (Avg. 3), ปริมาณน้ำฝนที่เวลา t (Prec.t) และค่าเฉลี่ยความชื้นที่เวลา t (Hum.t)					
	อัตราการเรียนรู้: 0.001					
ค่าสถิติจากผลพยากรณ์	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./เดือน)			ค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./เดือน)		
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)
ชุดข้อมูลฝึกฝน	476.49	360.10	-116.39 (-24.43)	2,990.21	1,811.99	-1,178.22 (-39.40)
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	370.31	359.75	-10.56 (-2.85)	2,373.51	1,740.76	-632.75 (-26.66)
ค่าสถิติจากผลพยากรณ์	ค่าต่ำสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./เดือน)					
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)			

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่าเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)						
อัลกอริทึม: XGBoost						
ชุดข้อมูลฝึกฝน	0.000	8.047	+8.047			
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	12.990	10.870	-16.319 (-2.120)			
เงื่อนไขการฝึก						
การตั้งค่า	อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30					
แบบจำลอง	ข้อมูลนำเข้า: ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลา t (It), ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลา t-1 ถึง t-7 (Avg. 7) และปริมาณน้ำฝนที่เวลา t (Prec.t)					
	อัตราการเรียนรู้: 0.1					
ค่าสถิติจากผลพยากรณ์	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้า (ล้าน ลบ.ม./เดือน)			ค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./เดือน)		
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)
ชุดข้อมูลฝึกฝน	543.94	479.97	-63.97 (-11.76)	3,095.97	2,076.67	-1,019.30 (-32.92)
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	429.62	437.75	+8.123 (+1.89)	2,026.29	1,432.32	-593.97 (-29.31)
ค่าสถิติจากผลพยากรณ์	ค่าต่ำสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./เดือน)					
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)			
ชุดข้อมูลฝึกฝน	61.48	78.04	+16.56 (+26.94)			
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	40.30	83.60	+43.30 (+107.45)			

จากผลการวิเคราะห์ในตารางข้างต้นบ่งชี้ให้เห็นว่า แบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาขึ้นโดยใช้อัลกอริทึม XGBoost สามารถพยากรณ์น้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันล่วงหน้าได้อยู่ในเกณฑ์ดี ผลการพยากรณ์ด้วยแบบจำลองแบบอ่าเดี่ยวรายวันให้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลพยากรณ์ที่เวลาล่วงหน้า t+1 อยู่ในเกณฑ์สูงและให้ค่าประสิทธิผลสูงกว่าแบบจำลองแบบอ่าเดี่ยวรายเดือน อย่างไรก็ตาม ผลการพยากรณ์ยังให้ค่าสูงสุดของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างต่ำกว่าข้อมูลสังเกต (Underestimated) ในทางกลับกัน ผลการพยากรณ์ให้ค่าต่ำสุดของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างสูงกว่าข้อมูลสังเกต (Overestimated) ด้วยเหตุนี้ การปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองให้มีความเหมาะสมจึงยังเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อนำข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการพยากรณ์ในช่วงสถานการณ์น้ำวิกฤตมาใช้ประกอบการบริหารเขื่อนให้มีประสิทธิภาพต่อไป

4.2.3.3.2 ผลการพยากรณ์จากแบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่าเดี่ยวด้วยอัลกอริทึม

LSTM ของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

ประสิทธิผลของการพยากรณ์จากแบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่าเดี่ยวด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ทดลองใช้กับ 4 เขื่อนหลักได้แก่ เขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ทั้งแบบรายวันและรายเดือนได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-48 และตารางที่ 4-49 และแสดงการเปรียบเทียบ

เชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายวันและรายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของทั้ง 4 เชื่อนในรูปที่ 4-48 ถึงรูปที่ 4-55

ตารางที่ 4-48 ค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายวันของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: LSTM							
อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30							
เลขแบบจำลอง	ตัวแปรที่ใช้	Steps	ประสิทธิภาพทางสถิติของการพยากรณ์จากชุดข้อมูลตรวจสอบ				
			MSE	RMSE	R ²	Correlation	NSE
เขื่อนภูมิพล							
dBB-01	Inflow	3	73.85	8.59	0.807	0.898	0.779
dBB-02*	Inflow	7	60.77	7.80	0.827	0.909	0.818
dBB-03	Inflow	14	61.80	7.86	0.815	0.903	0.815
dBB-04	Inflow, Rainfall (NASA)	3	81.31	9.02	0.819	0.905	0.756
dBB-05	Inflow, Rainfall (NASA)	7	79.91	8.94	0.799	0.894	0.761
dBB-06	Inflow, Rainfall (NASA)	14	74.62	8.64	0.779	0.882	0.777
เขื่อนสิริกิติ์							
dSK-01	Inflow	3	74.16	8.61	0.835	0.913	0.835
dSK-02*	Inflow	7	67.05	8.19	0.850	0.922	0.850
dSK-03	Inflow	14	70.84	8.42	0.844	0.918	0.842
dSK-04	Inflow, Rainfall (NASA)	3	132.98	11.53	0.742	0.861	0.704
dSK-05	Inflow, Rainfall (NASA)	7	87.32	9.34	0.813	0.902	0.805
dSK-06	Inflow, Rainfall (NASA)	14	122.77	11.08	0.750	0.866	0.727
เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน							
dKNB-01	Inflow	3	2.38	1.51	0.895	0.946	0.891
dKNB-02*	Inflow	7	2.11	1.45	0.907	0.952	0.904
dKNB-03	Inflow	14	2.22	1.49	0.906	0.952	0.898
dKNB-04	Inflow,	3	6.94	2.63	0.77	0.878	0.683

4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอังกเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: LSTM							
อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30							
เลข แบบจำลอง	ตัวแปรที่ใช้	Steps	ประสิทธิผลทางสถิติของการพยากรณ์จากชุดข้อมูลตรวจสอบ				
			MSE	RMSE	R ²	Correlation	NSE
	Rainfall (NASA)						
dKNB-05	Inflow, Rainfall (NASA)	7	6.53	2.55	0.781	0.884	0.702
dKNB-06	Inflow, Rainfall (NASA)	14	13.61	3.69	0.578	0.760	0.381
เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์							
dPS-01*	Inflow	3	32.94	5.74	0.830	0.911	0.829
dPS-02	Inflow	7	33.47	5.79	0.835	0.914	0.827
dPS-03	Inflow	14	33.68	5.80	0.829	0.910	0.826
dPS-04	Inflow, Rainfall (NASA)	3	77.95	8.83	0.660	0.812	0.596
dPS-05	Inflow, Rainfall (NASA)	7	49.74	7.05	0.752	0.867	0.743
dPS-06	Inflow, Rainfall (NASA)	14	54.21	7.36	0.738	0.859	0.720

หมายเหตุ: * แบบจำลองการพยากรณ์ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุด

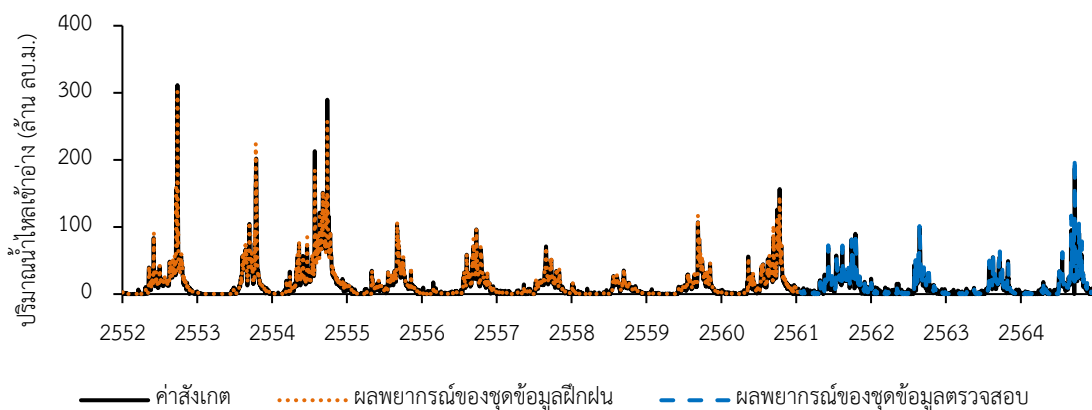
ตารางที่ 4-49 ค่าประสิทธิผลของแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอังกเดี่ยวรายเดือนของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอังกเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: LSTM							
อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30							
เลข แบบจำลอง	ตัวแปรที่ใช้	Steps	ประสิทธิผลทางสถิติของการพยากรณ์จากชุดข้อมูลตรวจสอบ				
			MSE	RMSE	R ²	Correlation	NSE
เขื่อนภูมิพล							
mBB-01*	Inflow	3	122,597.13	350.14	0.388	0.623	0.353
mBB-02	Inflow	7	129,650.38	360.07	0.354	0.595	0.316
mBB-03	Inflow	14	147,133.84	383.58	0.288	0.537	0.224
mBB-04	Inflow, Rainfall (NASA)	3	1,197,764.17	1,094.42	0.276	0.525	- 5.314

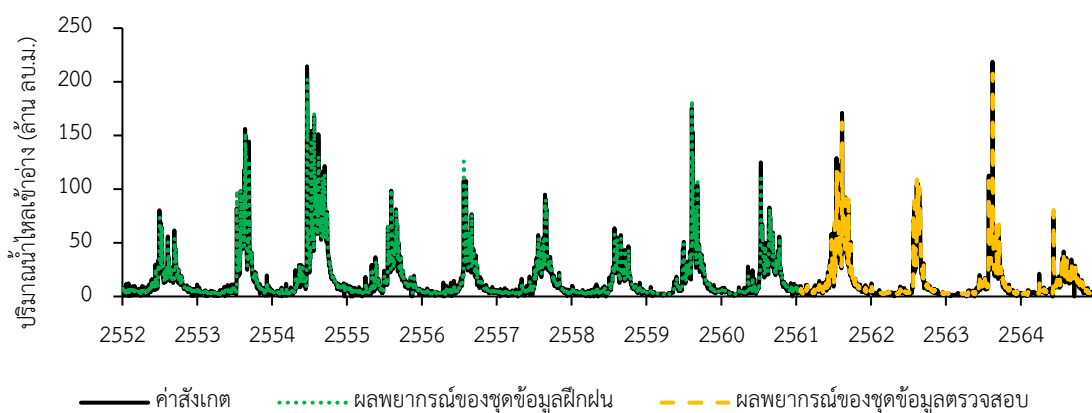
ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่าเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: LSTM							
อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30							
เลข แบบจำลอง	ตัวแปรที่ใช้	Steps	ประสิทธิผลทางสถิติของการพยากรณ์จากชุดข้อมูลตรวจสอบ				
			MSE	RMSE	R ²	Correlation	NSE
mBB-05	Inflow, Rainfall (NASA)	7	880,810.83	938.51	0.260	0.510	- 3.643
mBB-06	Inflow, Rainfall (NASA)	14	455,173.16	674.66	0.322	0.568	- 1.399
เขื่อนสิริกิติ์							
mSK-01*	Inflow	3	158,221.96	397.77	0.434	0.659	0.407
mSK-02	Inflow	7	158,690.98	398.36	0.420	0.648	0.406
mSK-03	Inflow	14	171,438.15	414.05	0.365	0.604	0.358
mSK-04	Inflow, Rainfall (NASA)	3	559,778.06	748.18	0.192	0.438	- 1.095
mSK-05	Inflow, Rainfall (NASA)	7	529,131.07	727.41	0.202	0.450	- 0.981
mSK-06	Inflow, Rainfall (NASA)	14	661,459.57	813.30	0.150	0.387	- 1.476
เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน							
mKNB-01*	Inflow	3	16,933.25	130.12	0.510	0.714	- 0.291
mKNB-02	Inflow	7	19,328.92	139.02	0.414	0.643	- 0.474
mKNB-03	Inflow	14	27496.78	165.82	0.379	0.616	- 1.097
mKNB-04	Inflow, Rainfall (NASA)	3	799,756.75	894.29	0.468	0.6847	- 60.00
mKNB-05	Inflow, Rainfall (NASA)	7	777,281.53	881.63	0.451	0.671	- 58.28
mKNB-06	Inflow, Rainfall (NASA)	14	887,646.42	942.15	0.415	0.644	- 66.70
เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์							
mPS-01	Inflow	3	67,021.83	258.88	0.375	0.612	0.353

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: LSTM							
อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30							
เลข แบบจำลอง	ตัวแปรที่ใช้	Steps	ประสิทธิผลทางสถิติของการพยากรณ์จากชุดข้อมูลตรวจสอบ				
			MSE	RMSE	R ²	Correlation	NSE
mPS-02	Inflow	7	69,493.97	263.61	0.334	0.578	0.329
mPS-03	Inflow	14	79,374.42	281.73	0.241	0.491	0.234
mPS-04	Inflow, Rainfall (NASA)	3	87,413.90	295.65	0.612	0.782	0.156
mPS-05*	Inflow, Rainfall (NASA)	7	61,922.22	248.84	0.647	0.804	0.402
mPS-06	Inflow, Rainfall (NASA)	14	82,070.78	286.48	0.525	0.724	0.208

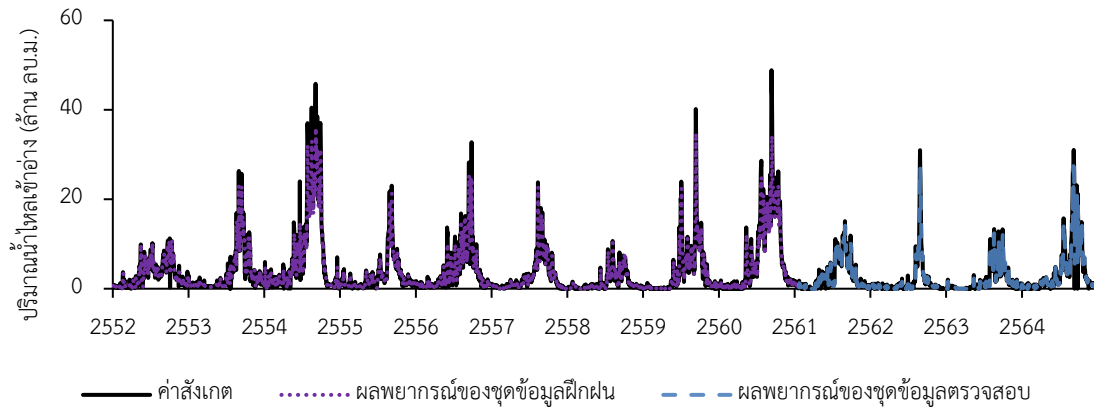
หมายเหตุ: * แบบจำลองการพยากรณ์ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุด



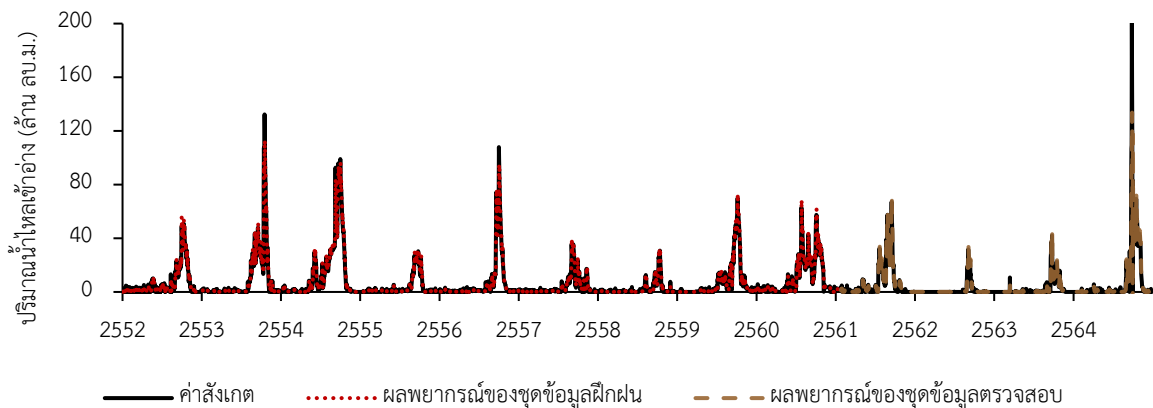
รูปที่ 4-48 การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายวันด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดเชิงอนุกรมพล



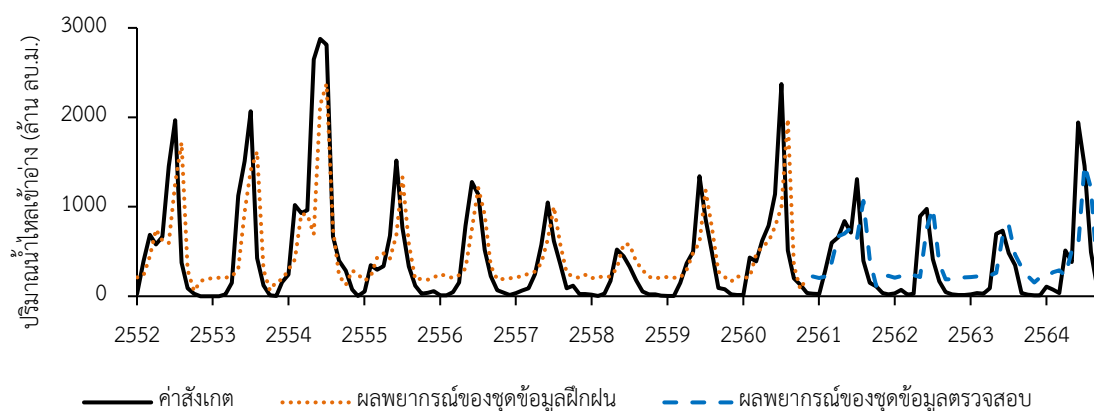
รูปที่ 4-49 การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายวันด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดเชิงอนุกรมพล



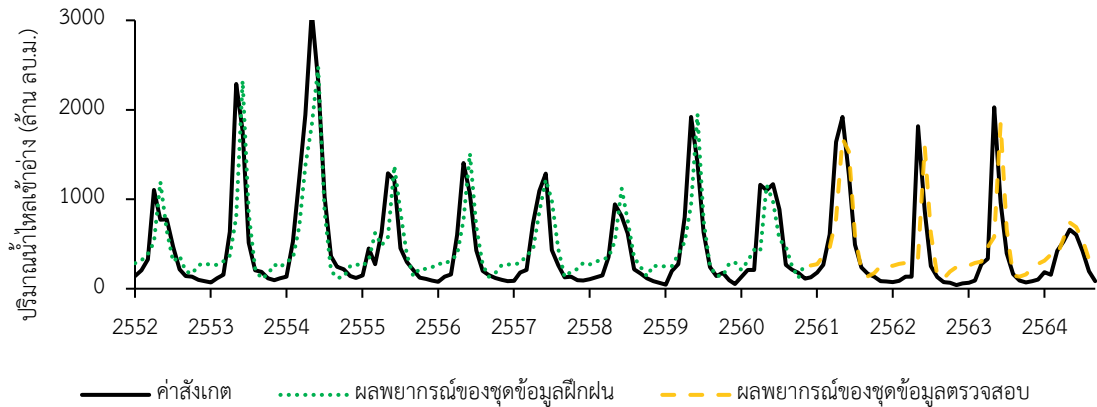
รูปที่ 4-50 การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายวันด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดเชื่อมแควน้อยบำรุงแดน



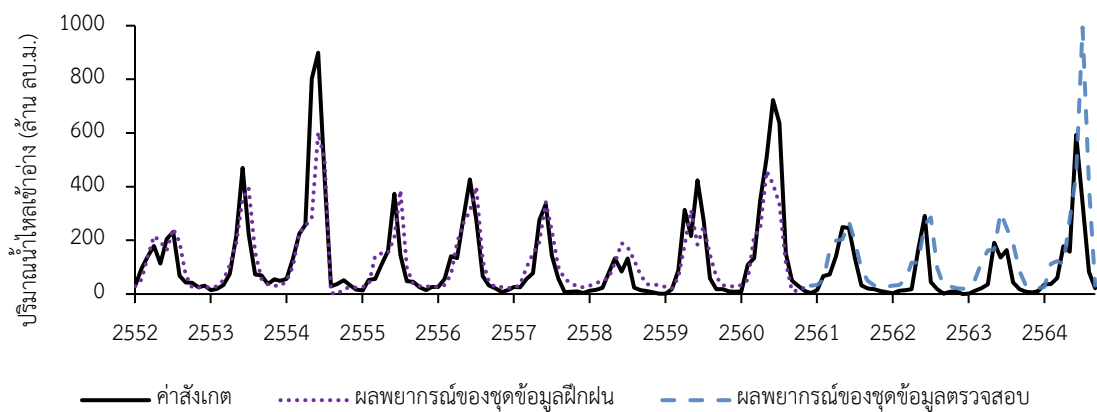
รูปที่ 4-51 การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายวันด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดเชื่อมป่าสักชลสิทธิ์



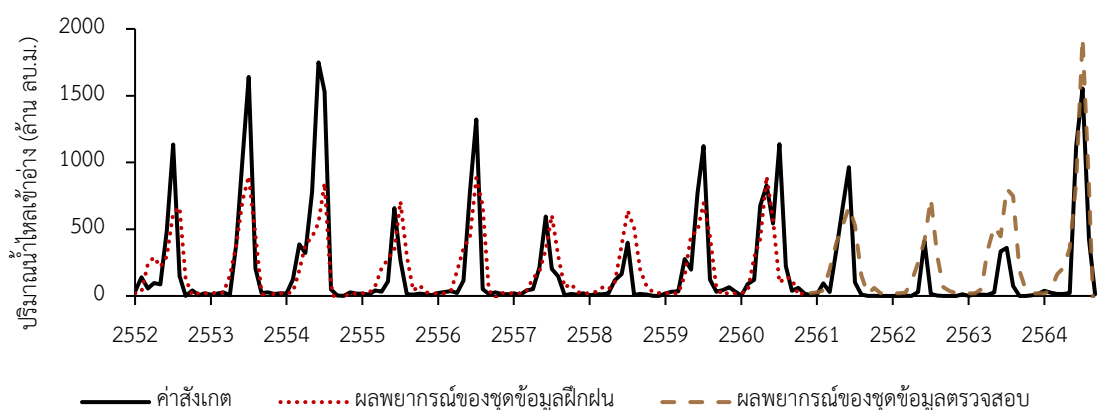
รูปที่ 4-52 การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดเขื่อนภูมิพล



รูปที่ 4-53 การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเชื่อมสิริกิติ์



รูปที่ 4-54 การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเชื่อมแควน้อยบำรุงแดน



รูปที่ 4-55 การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเชื่อมป่าสักชลสิทธิ์

จากผลการทดสอบด้วยชุดข้อมูลตรวจสอบในตารางข้างต้นพบว่า แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวันของเขื่อนภูมิพล dBB-01 และเขื่อนสิริกิติ์ dSK-01 ที่ใช้ข้อมูลนำเข้าเฉพาะปริมาณน้ำไหลเข้าสังเกตในอดีต 3 วันย้อนหลังมีค่าความแม่นยำสูงสุด โดยให้ค่า MSE, RMSE, R^2 , Correlation และ NSE เท่ากับ 60.77, 7.80, 0.83, 0.91 และ 0.82 ตามลำดับ สำหรับเขื่อนภูมิพล และให้ค่าเท่ากับ 67.05, 8.19, 0.85, 0.92 และ 0.85 ตามลำดับ สำหรับเขื่อนสิริกิติ์ และเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองย่อยที่มีการนำข้อมูลฝนจากคลังข้อมูลสภาพภูมิอากาศของ NASA มาเป็นข้อมูลนำเข้าร่วมกับปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอดีตพบว่า ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์ลดลงเล็กน้อยดังแสดงผลในตารางข้างต้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะของข้อมูลฝนรายวันไม่แสดงอิทธิพลของฤดูกาลอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ

ในทำนองเดียวกัน แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวันของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน dKNB-02 ที่นำเข้าข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าสังเกตในอดีต 7 วันย้อนหลัง และแบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวันของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ dPS-01 ที่นำเข้าข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าสังเกตในอดีต 3 วันย้อนหลังให้ค่าความแม่นยำสูงสุด โดยให้ค่า MSE, RMSE, R^2 , Correlation และ NSE เท่ากับ 2.11, 1.45, 0.91, 0.95 และ 0.90 ตามลำดับ สำหรับเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และให้ค่าเท่ากับ 32.94, 5.74, 0.83, 0.91 และ 0.83 ตามลำดับ สำหรับเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

นอกจากนี้ จากการพิจารณากราฟแสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของทุกเขื่อนจากข้อมูลจริงและผลพยากรณ์ของแบบจำลองรายวันพบว่า ผลการพยากรณ์รายวันมีความใกล้เคียงกับข้อมูลจริงมากดังแสดงในรูปที่ 4-48 ถึงรูปที่ 4-51 ทุกรูปก็ดี เมื่อทำการตรวจสอบแบบจำลองพบว่า ในบางแบบจำลองถึงแม้จะมีค่าประสิทธิผลในการเรียนรู้จากชุดข้อมูลฝึกฝนสูง แต่เมื่อนำแบบจำลองไปใช้กับชุดข้อมูลตรวจสอบพบว่า แบบจำลองให้ค่าประสิทธิผลลดลง กล่าวคือ แบบจำลองเกิดการ Overfitting กับชุดฝึกฝน หรือแบบจำลองมีความซับซ้อนมากเกินไป ยิ่งไปกว่านั้น การนำแบบจำลองการพยากรณ์ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดของแต่ละเขื่อนไปใช้ในการพยากรณ์ที่ Lead Time $t+1, \dots, t+7$ ที่ยาวขึ้น ส่งผลให้ค่าประสิทธิผลของแบบจำลองมีแนวโน้มลดลง ทุกรูปก็ดี การปรับพารามิเตอร์ของแบบจำลองการพยากรณ์ใหม่โดยนำเข้าข้อมูลนำเข้าที่เกิดขึ้นเพิ่มเติมจากแบบจำลองที่ได้พัฒนามาแล้วในลักษณะของ One Step Ahead Prediction จะทำให้ผลการพยากรณ์ที่ Lead Time ยาวขึ้นมีความแม่นยำมากขึ้น โดยผลการวิจัยสรุปได้ว่า ที่ Lead Time $t+7$ จำเป็นต้องปรับพารามิเตอร์แบบจำลองใหม่เพื่อให้แบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและเป็นเครื่องมือที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบริหารเขื่อน เวลาจริงปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงสถานการณ์น้ำวิกฤต

สำหรับผลการทดสอบแบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือนพบว่า แบบจำลองย่อย mBB-01, mSK-01 และ mKNB-01 ของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนตามลำดับ ซึ่งมีโครงสร้างของข้อมูลนำเข้าเหมือนกันโดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอดีต 3 วันย้อนหลัง ให้ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์สูงสุด ในขณะที่แบบจำลองย่อย mPS-05 ของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ที่มีการนำข้อมูลฝนจากคลังข้อมูลสภาพภูมิอากาศของ NASA มาเป็นข้อมูลนำเข้าร่วมกับปริมาณน้ำไหลเข้า

อ่างเก็บน้ำในอดีต 3 วันย้อนหลัง ให้ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์สูงสุด เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิผลในรูปของ R^2 หลังการทดสอบแบบจำลองพบว่า ให้ค่าเท่ากับ 0.39, 0.43, 0.51 และ 0.65 สำหรับแบบจำลองย่อยรายเดือนของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ตามลำดับ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ไม่สูงนักดังแสดงในรูปที่ 4-52 ถึงรูปที่ 4-55 อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงประสิทธิผลของแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนยังคงมีความสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานด้านการวางแผนการบริหารจัดการน้ำ ซึ่งยังต้องการฐานข้อมูลพยากรณ์อุทกวิทยาในอนาคตที่มีความแม่นยำมาใช้ประกอบการพิจารณา

ในการทำงานเดียวกัน งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการพยากรณ์จากแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายวันและรายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ เทียบกับค่าสังเกต โดยนำเสนอใน 3 รูปแบบคือ (1) ผลต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (2) ผลต่างของค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง และ (3) ผลต่างของค่าต่ำสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง โดยแสดงผลทั้งในหน่วยปริมาตรน้ำและเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างซึ่งรายละเอียดการวิเคราะห์ได้สรุปผลไว้ในในตารางที่ 4-50 ถึงตารางที่ 4-51

ตารางที่ 4-50 ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการพยากรณ์จากแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายวันด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)						
อัลกอริทึม: LSTM						
เขื่อนภูมิพล						
การตั้งค่า	อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30					
แบบจำลอง	ข้อมูลนำเข้า: ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลาที่เวลา $t, t-1, \dots, t-7$					
ค่าสถิติจากผลพยากรณ์	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)			ค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)		
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)
ชุดข้อมูลฝึกฝน	14.90	15.16	+0.25 (+1.69)	311.46	301.59	-9.87 (-3.17)
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	10.83	11.48	+0.65 (+5.99)	187.34	205.39	+18.05 (+9.63)
ค่าสถิติจากผลพยากรณ์	ค่าต่ำสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)					
		ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์			Δ (%)
ชุดข้อมูลฝึกฝน		0.00	0.27			+0.27
ชุดข้อมูลตรวจสอบ		0.00	0.27			+0.27
เขื่อนสิริกิติ์						
การตั้งค่า	อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30					
แบบจำลอง	ข้อมูลนำเข้า: ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลาที่เวลา $t, t-1, \dots, t-7$					

ค่าสถิติจากผล พยากรณ์	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)			ค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)		
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)
ชุดข้อมูลฝีกฝน	15.81	15.76	--0.06 (-0.36)	214.42	202.71	-11.71 (-5.46)
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	13.25	13.29	+0.04 (+0.29)	218.70	207.56	-11.14 (-5.09)
ค่าสถิติจากผล พยากรณ์	ค่าต่ำสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)					
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)			
ชุดข้อมูลฝีกฝน	0.00	1.62	+1.62			
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	0.00	1.14	+1.14			
เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน						
การตั้งค่า	อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝีกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30					
แบบจำลอง	ข้อมูลนำเข้า: ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลาที่เวลา t, t-1,, t-7					
ค่าสถิติจากผล พยากรณ์	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)			ค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)		
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)
ชุดข้อมูลฝีกฝน	4.18	3.86	-0.32 (-7.66)	48.85	35.98	-12.87 (-26.35)
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	2.63	2.45	-0.18 (-6.90)	31.03	27.43	-3.60 (-11.61)
ค่าสถิติจากผล พยากรณ์	ค่าต่ำสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)					
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)			
ชุดข้อมูลฝีกฝน	0.00	-0.04	-0.04			
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	0.00	-0.04	-0.04			
เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์						
การตั้งค่า	อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝีกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30					
แบบจำลอง	ข้อมูลนำเข้า: ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลาที่เวลา t, t-1,, t-3 ปริมาณฝน NASA ที่เวลา t, t-1,, t-3					
ค่าสถิติจากผล พยากรณ์	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)			ค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)		
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)
ชุดข้อมูลฝีกฝน	6.93	6.96	+0.03 (+0.44)	132.32	112.91	-19.41 (-14.67)
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	4.72	4.70	-0.02 (-0.38)	209.29	133.66	-75.63 (-36.14)
ค่าสถิติจากผล พยากรณ์	ค่าต่ำสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)					
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)			
ชุดข้อมูลฝีกฝน	0.00	0.08	+0.08			

ชุดข้อมูลตรวจสอบ	0.00	-7.58	-7.58
------------------	------	-------	-------

ตารางที่ 4-51 ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการพยากรณ์จากแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอย่างเดี่ยวรายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิภาพผลสูงสุดของเงื่อนไขภูมิพล เชื้อนสิริกิติ์ เชื้อนแควน้อยบำรุงแดน และเชื้อนป่าสักชลสิทธิ์

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)						
อัลกอริทึม: LSTM						
เชื้อนภูมิพล						
การตั้งค่า	อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30					
แบบจำลอง	ข้อมูลนำเข้า: ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลาที่เวลา $t, t-1, \dots, t-3$					
ค่าสถิติจากผลพยากรณ์	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)			ค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)		
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)
ชุดข้อมูลฝึกฝน	460.61	479.25	+18.64 (+4.05)	2,877.23	2,373.81	-503.42 (-17.50)
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	336.64	410.65	+74.01 (+21.98)	1,944.38	1,469.24	-475.14 (-24.44)
ค่าสถิติจากผลพยากรณ์	ค่าต่ำสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)					
	ค่าสังเกต		ผลพยากรณ์	Δ (%)		
ชุดข้อมูลฝึกฝน	0.00		56.53	+56.53		
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	9.03		116.48	+107.45 (+1,189.94)		
เชื้อนสิริกิติ์						
การตั้งค่า	อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30					
แบบจำลอง	ข้อมูลนำเข้า: ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลาที่เวลา $t, t-1, \dots, t-3$					
ค่าสถิติจากผลพยากรณ์	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)			ค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)		
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)
ชุดข้อมูลฝึกฝน	486.21	495.34	+9.14 (+1.88)	3,095.97	2,477.07	-618.90 (-19.99)
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	410.14	460.03	+49.89 (+12.17)	2,026.29	1,845.41	-180.88 (-8.93)
ค่าสถิติจากผลพยากรณ์	ค่าต่ำสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)					
	ค่าสังเกต		ผลพยากรณ์	Δ (%)		
ชุดข้อมูลฝึกฝน	46.50		110.20	+63.70 (+137.00)		
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	40.30		112.55	+72.25 (+179.28)		
เชื้อนแควน้อยบำรุงแดน						
การตั้งค่า	อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30					
แบบจำลอง	ข้อมูลนำเข้า: ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลาที่เวลา $t, t-1, \dots, t-3$					

ค่าสถิติจากผลพยากรณ์	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)			ค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)		
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)
ชุดข้อมูลฝึกฝน	128.89	124.88	-4.01 (-3.11)	899.08	602.25	-296.83 (-33.01)
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	81.57	139.56	+57.99 (+71.10)	592.68	993.44	+400.76 (+67.62)
ค่าสถิติจากผลพยากรณ์	ค่าต่ำสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)					
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์			Δ (%)	
ชุดข้อมูลฝึกฝน	1.50		-0.97		-2.47 (-164.74)	
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	0.04		19.51		+19.47 (+48,664.43)	
เงื่อนไขการจำลอง						
การตั้งค่า	อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30					
แบบจำลอง	ข้อมูลนำเข้า: ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลาที่เวลา t , $t-1$,, $t-3$ ปริมาณฝน NASA ที่เวลา t , $t-1$,, $t-3$					
ค่าสถิติจากผลพยากรณ์	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)			ค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)		
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)
ชุดข้อมูลฝึกฝน	213.85	201.26	-12.59 (-5.89)	1,749.23	896.62	-852.61 (-48.74)
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	146.68	257.15	+110.47 (+75.31)	1,553.05	1,932.80	+379.75 (+24.45)
ค่าสถิติจากผลพยากรณ์	ค่าต่ำสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)					
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์			Δ (%)	
ชุดข้อมูลฝึกฝน	0.23		-106.04		-106.27 (-46,205.44)	
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	0.00		-459.66		-459.66	

จากผลการวิเคราะห์ในตารางข้างต้นบ่งชี้ให้เห็นว่า แบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันของทุกเขื่อนที่พัฒนาขึ้นโดยใช้อัลกอริทึม LSTM สามารถพยากรณ์น้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันล่วงหน้าได้อยู่ในเกณฑ์ดี และยังให้ผลใกล้เคียงกับอัลกอริทึม XGBoost โดยผลการพยากรณ์ด้วยแบบจำลองแบบอย่างเดี่ยวรายวันให้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลพยากรณ์ที่เวลาล่วงหน้า $t+1$ อยู่ในเกณฑ์สูง ในขณะที่แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวันให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าแบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน สาเหตุอาจเนื่องมาจากเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่องอาศัยฐานข้อมูลระยะยาวในการเรียนรู้พฤติกรรมของข้อมูล ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ที่ได้จากแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนซึ่งมีฐานข้อมูลค่อนข้างสั้นมีค่าต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับแบบจำลองการพยากรณ์รายวัน นอกจากนี้จากการเปรียบเทียบผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM กับ

XGBoost เฉพาะเชื่อมภูมิภาคและเชื่อมสิริกิติ์พบว่า อัลกอริทึม XGBoost ให้ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์สูงกว่า LSTM

ยิ่งไปกว่านั้น ผลการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์บ่งชี้ให้เห็นว่า ผลการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวยังให้ค่าสูงสุดของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างทั้งรายวันและรายเดือนต่ำกว่าข้อมูลสังเกต (Underestimated) ในทางกลับกัน ผลการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวทั้งรายวันและรายเดือนให้ค่าต่ำสุดของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างสูงกว่าข้อมูลสังเกต (Overestimated) ด้วยเหตุนี้ การปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองให้มีความเหมาะสมจึงยังมีความสำคัญเพื่อนำข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการพยากรณ์ในช่วงสถานการณ์น้ำวิกฤตมาใช้ประกอบการกำหนดกลยุทธ์ในการบริหารเขื่อนของผู้ปฏิบัติการต่อไป

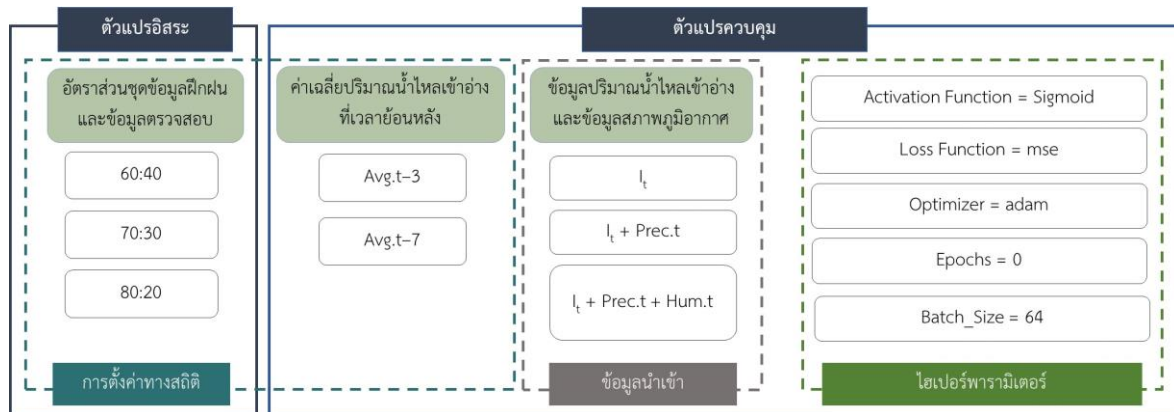
4.2.3.4 รูปแบบการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่าง (Multivariate Prediction Model)

การพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่าง (Multivariate Prediction Model) เป็นลักษณะของการนำข้อมูลของระบบของอ่างเก็บน้ำหลายอ่างมาเป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองเดียวกัน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีลักษณะเป็น Multi-Output ซึ่งข้อดีของการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอ่างก็คือ เป็นการศึกษถึงการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้นในระดับภูมิภาค (Regional Climate) ว่าส่งผลต่อปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำซึ่งตั้งอยู่ในเขตภูมิภาคเดียวกันหรือไม่ โดยในงานวิจัยนี้ได้อาศัยอัลกอริทึม LSTM มาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำร่วมกันทั้งแบบรายวันและรายเดือนใน 2 รูปแบบคือ (1) แบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่างด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเชื่อมภูมิภาคและเชื่อมสิริกิติ์ร่วมกัน ซึ่งพิจารณาว่าทั้ง 2 เขื่อนตั้งอยู่ในเขตลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ตอนบน และ (2) แบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่างด้วยอัลกอริทึม LSTM สำหรับเชื่อมสิริกิติ์และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนร่วมกัน ซึ่งพิจารณาว่าทั้ง 2 เขื่อนตั้งอยู่ในเขตลุ่มน้ำเดียวกัน

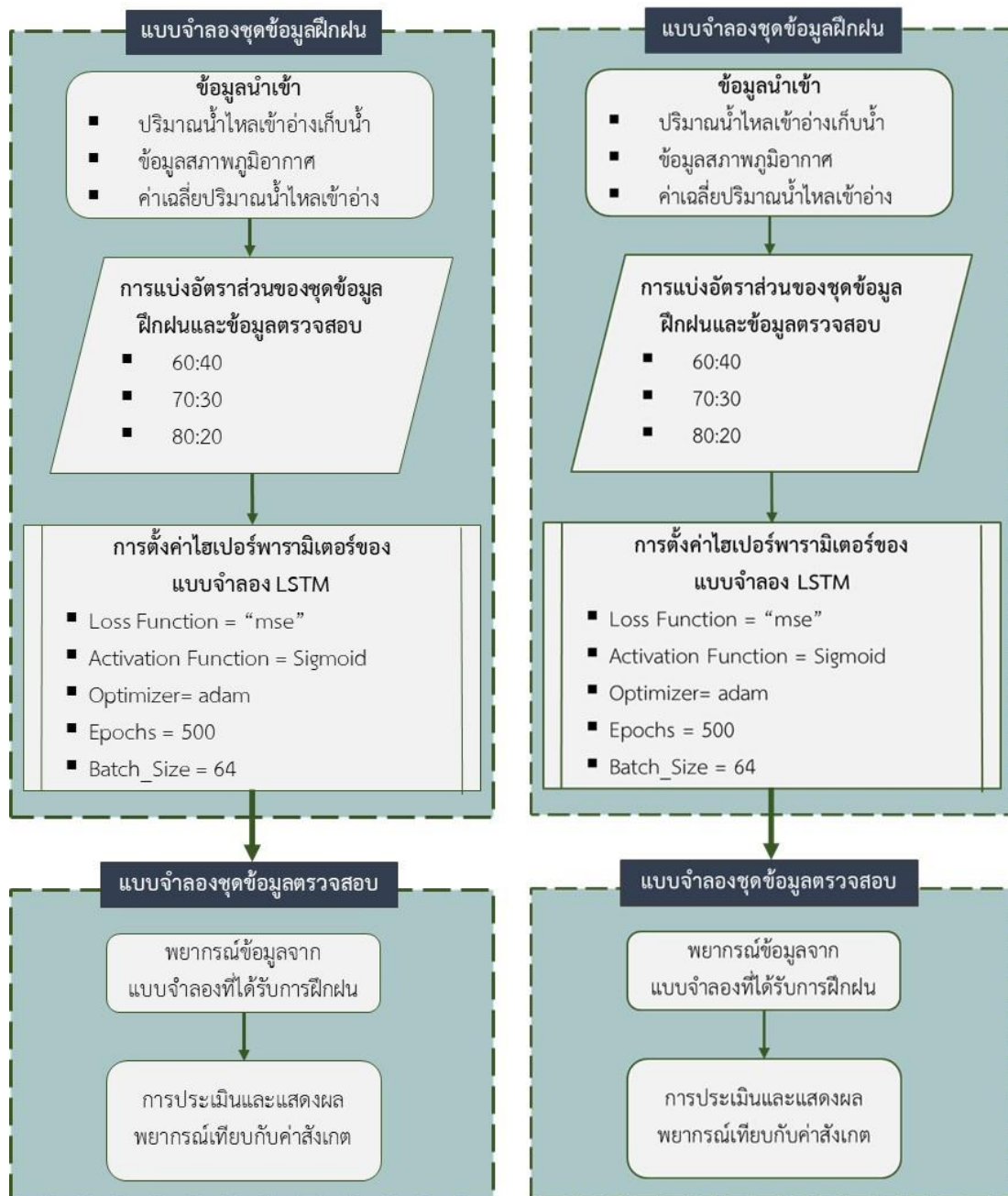
4.2.3.4.1 รูปแบบการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่างด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเชื่อมภูมิภาคและเชื่อมสิริกิติ์ร่วมกัน

สำหรับข้อมูลนำเข้าถูกจัดเตรียมและตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่างด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเชื่อมภูมิภาคและเชื่อมสิริกิติ์แสดงดังรูปที่ 4-56 และรูปที่ 4-57 โดยได้นำเข้าข้อมูลทั้ง 2 เขื่อนในแบบจำลองเดียวกัน ได้แก่ ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง ปริมาณฝน ค่าเฉลี่ยความชื้น ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา $t-1, \dots, t-3$ ของทั้งเชื่อมภูมิภาคและเชื่อมสิริกิติ์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ของแบบจำลองการพยากรณ์หลายตัวแปรจะได้ผลลัพธ์ออกมาแบบ Multi-Output คือได้ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของทั้ง 2 เขื่อน จากแบบจำลองเดียวกัน จากการเตรียมข้อมูลนำเข้าและการตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่างสามารถ

พัฒนาแบบจำลองที่แตกต่างกันได้ 3 กรณี ตามอัตราส่วนของชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบที่ต่างกัน 3 รูปแบบคือ 60:40, 70:30 และ 80:20 ในขณะที่ไฮเปอร์พารามิเตอร์ได้ตั้งค่าตามการตั้งค่าเบื้องต้นของแบบจำลอง



รูปที่ 4-56 กระบวนการทำงานในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอย่างด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ร่วมกัน



รูปที่ 4-57 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอย่างด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ร่วมกัน

4.2.3.4.2 รูปแบบการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอย่างด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเขื่อนสิริกิติ์และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนร่วมกัน

งานวิจัยนี้ยังได้พัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอย่างด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเขื่อนสิริกิติ์และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนร่วมกันทั้งแบบรายวันและรายเดือนจากการพิจารณาตำแหน่งที่ตั้งเขื่อนซึ่งตั้งอยู่ในลุ่มน้ำน่าน โดยการกำหนดรูปแบบของแบบจำลองได้สรุปไว้ใน

ตารางที่ 4-52 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง วิธีการปรับช่วงข้อมูล และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ LSTM ใน Keras ของแต่ละแบบจำลองการพยากรณ์ประกอบด้วย (1) แบบจำลองย่อยรายวันประกอบด้วย dSKKNB-01 และ dSKKNB-02 และ (2) แบบจำลองย่อยรายเดือนประกอบด้วย mSKKNB-01 และ mSKKNB-02

ตารางที่ 4-52 การกำหนดรูปแบบของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่างรายวันและรายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเขื่อนสิริกิติ์และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

เลข แบบจำลอง	ตัวแปร นำเข้า	วิธีการปรับ ช่วงข้อมูล	ค่าพารามิเตอร์ของ LSTM ใน Keras							
			Steps	Number of Layers	Units per Layer	Activation	Loss	Optimizer	Epoch	Batch size
เขื่อนสิริกิติ์และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนรายวัน										
dSKKNB-01	InflowSK InflowKNB	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	64
dSKKNB-02	InflowSK InflowKNB	MinMax	7	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	100	64
เขื่อนสิริกิติ์และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนรายเดือน										
mSKKNB-01	InflowSK InflowKNB	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	200	16
mSKKNB-02	InflowSK InflowKNB	MinMax	3	2	64/32	relu/relu	MSE	adam	200	64

4.2.3.5 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบจำลองการพยากรณ์หลายตัวแปร (Multivariate Prediction Model)

4.2.3.5.1 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่างด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ร่วมกัน

แบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่างถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่องซึ่งใช้อัลกอริทึม Long Short-Term Memory (LSTM) จากข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองการพยากรณ์ ประกอบด้วย ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ (It) ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา t-1 ถึง t-3 (Avg. 3) ข้อมูลปริมาณฝน (Prec. t) ข้อมูลค่าเฉลี่ยความชื้น (Hum. t) ของทั้งเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์จะถูกนำเข้าในแบบจำลองการพยากรณ์เดียวกัน ในขณะที่การตั้งค่าแบบจำลองของอัตราส่วนของชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบจะแตกต่างกันสามแบบ ได้แก่ 60:40, 70:30 และ 80:20 ดังนั้นทำให้สามารถสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดียวของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ที่แตกต่างกันโดยแบ่งเป็นแบบจำลองการพยากรณ์รายวันและรายเดือนของเขื่อน

ภูมิพล แบบจำลองการพยากรณ์รายวันและรายเดือนของเขื่อนสิริกิติ์ ซึ่งสรุปผลพยากรณ์ของชุดข้อมูลฝักฝน และชุดข้อมูลตรวจสอบในแต่ละกรณีด้วยค่าสถิติ ได้แก่ ค่าน้อยสุด ค่าเฉลี่ย และค่าสูงสุดของปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแสดงในตารางที่ 4-53 และตารางที่ 4-54

ตารางที่ 4-53 ประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอย่างรายวันของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์รายวัน (Daily Prediction Model)				
การตั้งค่าแบบจำลอง		แบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่าง (Multivariate Prediction Model)		
อัตราส่วน*		60:40	70:30	80:20
เขื่อนภูมิพล				
ชุดข้อมูลฝักฝน	RMSE	8.7004	8.4037	9.5922
	MSE	75.6977	70.6216	92.0102
	R ²	0.8937	0.8921	0.8481
	R	0.9454	0.9445	0.9209
	NSE	0.8904	0.8889	0.8416
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	RMSE	6.0033	7.4253	7.5214
	MSE	36.0394	55.1346	56.5716
	R ²	0.8729	0.8165	0.8230
	R	0.9343	0.9036	0.9072
	NSE	0.8573	0.7907	0.7763
เขื่อนสิริกิติ์				
ชุดข้อมูลฝักฝน	RMSE	9.8582	9.1650	10.2486
	MSE	97.1833	83.9971	105.0332
	R ²	0.8416	0.8561	0.8073
	R	0.9174	0.9253	0.8985
	NSE	0.8409	0.8530	0.8066
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	RMSE	9.6154	12.2656	10.4742
	MSE	92.4553	150.4458	109.7091
	R ²	0.7800	0.6784	0.7685
	R	0.8832	0.8236	0.8766
	NSE	0.7669	0.6359	0.7552

หมายเหตุ: * อัตราส่วน = อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝักฝนต่อชุดข้อมูลตรวจสอบ

ตารางที่ 4-54 ประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอย่างรายเดือนของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์รายเดือน (Monthly Prediction Model)				
การตั้งค่าแบบจำลอง		แบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่าง (Multivariate Prediction Model)		
อัตราส่วน*		60:40	70:30	80:20
เขื่อนภูมิพล				
ชุดข้อมูลฝึกฝน	RMSE	420	428	370
	MSE	176013	183353	136742
	R ²	0.5867	0.5417	0.6355
	R	0.7660	0.7360	0.7972
	NSE	0.5862	0.5381	0.6294
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	RMSE	348	321	354
	MSE	120900	103050	125174
	R ²	0.5003	0.5263	0.4637
	R	0.7073	0.7254	0.6810
	NSE	0.3240	0.3965	0.3814
เขื่อนสิริกิติ์				
ชุดข้อมูลฝึกฝน	RMSE	439	415	375
	MSE	192778	172150	140900
	R ²	0.5179	0.5392	0.6171
	R	0.7197	0.7343	0.7856
	NSE	0.5123	0.5317	0.5991
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	RMSE	361	372	401
	MSE	130290	138620	161044
	R ²	0.4872	0.4721	0.4336
	R	0.698	0.6871	0.6585
	NSE	0.4587	0.4667	0.4274

หมายเหตุ: *อัตราส่วน = อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนต่อชุดข้อมูลตรวจสอบ

ตารางที่ 4-55 รูปแบบและประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอย่างรายวันและรายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่างรายวันและรายเดือน (Daily and Monthly Multivariate Prediction Model)	
อัลกอริทึม: LSTM	
เขื่อนภูมิพล	

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่างรายวันและรายเดือน (Daily and Monthly Multivariate Prediction Model)			
อัลกอริทึม: LSTM			
การตั้งค่าแบบจำลอง		แบบจำลองรายวัน	แบบจำลองรายเดือน
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝน:ชุดข้อมูลตรวจสอบ		60:40	70:30
ข้อมูลนำเข้า			
ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา t-1, ..., t-3 (Avg. 3)		✓	✓
ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา t-1, ..., t-7 (Avg. 7)		-	-
ปริมาณน้ำไหลเข้าที่เวลา t		✓	✓
ปริมาณฝนที่เวลา t		✓	✓
ค่าเฉลี่ยความชื้นที่เวลา t		✓	✓
อัตราการเรียนรู้ (Eta)		0.001	0.001
ชุดข้อมูลฝึกฝน	RMSE	8.7004	428.1968
	MSE	75.6977	183,352.5150
	R ²	0.8937	0.5417
	R	0.9454	0.7360
	NSE	0.8904	0.5381
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	RMSE	6.0033	321.0134
	MSE	36.0394	103,049.6102
	R ²	0.8729	0.5263
	R	0.9343	0.7254
	NSE	0.8573	0.3965
เงื่อนไขการเปรียบเทียบ			
การตั้งค่าแบบจำลอง		แบบจำลองรายวัน	แบบจำลองรายเดือน
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝน:ชุดข้อมูลตรวจสอบ		60:40	60:40
ข้อมูลนำเข้า			
ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา t-1, ..., t-3 (Avg. 3)		✓	✓
ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา t-1, ..., t-7 (Avg. 7)		-	-
ปริมาณน้ำไหลเข้าที่เวลา t		✓	✓
ปริมาณฝนที่เวลา t		✓	✓
ค่าเฉลี่ยความชื้นที่เวลา t		✓	✓
อัตราการเรียนรู้ (Eta)		0.001	0.001

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่างรายวันและรายเดือน (Daily and Monthly Multivariate Prediction Model)			
อัลกอริทึม: LSTM			
ชุดข้อมูลฝึกฝน	RMSE	9.8582	439.0654
	MSE	97.1833	192,778.4677
	R ²	0.8416	0.5179
	R	0.9174	0.7197
	NSE	0.8409	0.5123
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	RMSE	9.6154	360.9567
	MSE	92.4553	130,289.7130
	R ²	0.7800	0.4872
	R	0.8832	0.6980
	NSE	0.7669	0.4587

ตารางที่ 4-56 ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการพยากรณ์จากแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอย่างรายวันด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่างรายวัน (Daily Multivariate Prediction Model)						
อัลกอริทึม: LSTM						
เขื่อนภูมิพล						
การตั้งค่า แบบจำลอง	อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 60:40					
	ข้อมูลนำเข้า: ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลา t (It), ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลา t-1 ถึง t-3 (Avg. 3), ปริมาณน้ำฝนที่เวลา t (Prec.t) และค่าเฉลี่ยความชื้นที่เวลา t (Hum.t)					
	อัตราการเรียนรู้: 0.001					
ค่าสถิติจากผล พยากรณ์	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้า (ล้าน ลบ.ม./วัน)			ค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)		
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)
ชุดข้อมูลฝึกฝน	17.52	17.04	-0.48 (-2.73)	311.46	161.51	-149.95 (-48.14)
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	10.99	11.47	+0.49 (+4.42)	156.57	151.09	-5.48 (-3.50)
ค่าสถิติจากผล พยากรณ์	ค่าต่ำสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)					
	ค่าสังเกต		ผลพยากรณ์	Δ (%)		
ชุดข้อมูลฝึกฝน	0.00		-0.20	-0.20		
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	0.00		-0.21	-0.21		
เขื่อนสิริกิติ์						
อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 60:40						

การตั้งค่า แบบจำลอง	ข้อมูลนำเข้า: ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลา t (It), ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลา t-1 ถึง t-3 (Avg. 3), ปริมาณน้ำฝนที่เวลา t (Prec.t) และค่าเฉลี่ยความชื้นที่เวลา t (Hum.t)					
	อัตราการเรียนรู้: 0.001					
ค่าสถิติจากผล พยากรณ์	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้า (ล้าน ลบ.ม./วัน)			ค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)		
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)
ชุดข้อมูลฝึกฝน	18.38	17.92	-0.46 (-2.516)	221.87	121.05	-100.82 (-45.44)
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	14.20	15.12	+0.92 (+6.46)	218.70	118.95	-99.75 (-45.61)
ค่าสถิติจากผล พยากรณ์	ค่าต่ำสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./วัน)					
	ค่าสังเกต		ผลพยากรณ์	Δ (%)		
ชุดข้อมูลฝึกฝน	0.000		2.65	+2.65		
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	0.000		2.65	+2.65		

ตารางที่ 4-57 ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการพยากรณ์จากแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอย่างรายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่างรายเดือน (Monthly Multivariate Prediction Model)						
อัลกอริทึม: LSTM						
เขื่อนภูมิพล						
การตั้งค่า แบบจำลอง	อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30					
	ข้อมูลนำเข้า: ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลา t (It), ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลา t-1 ถึง t-3 (Avg. 3), ปริมาณน้ำฝนที่เวลา t (Prec.t) และค่าเฉลี่ยความชื้นที่เวลา t (Hum.t)					
	อัตราการเรียนรู้: 0.001					
ค่าสถิติจากผล พยากรณ์	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้า (ล้าน ลบ.ม./เดือน)			ค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./เดือน)		
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)
ชุดข้อมูลฝึกฝน	510.59	551.76	+841.17 (+8.06)	2,990.21	1,984.74	-1,005.47 (-33.62)
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	323.19	455.97	+132.78 (+41.09)	2,373.51	1,481.92	-891.59 (-37.56)
ค่าสถิติจากผล พยากรณ์	ค่าต่ำสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./เดือน)					
	ค่าสังเกต		ผลพยากรณ์	Δ (%)		
ชุดข้อมูลฝึกฝน	0.00		17.92	+17.92		
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	1.57		16.09	+14.519 (+924.77)		
เขื่อนสิริกิติ์						
อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 60:40						

การตั้งค่า แบบจำลอง	ข้อมูลนำเข้า: ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลา t (It), ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เวลา t-1 ถึง t-3 (Avg. 3), ปริมาณน้ำฝนที่เวลา t (Prec.t) และค่าเฉลี่ยความชื้นที่เวลา t (Hum.t)					
	อัตราการเรียนรู้: 0.001					
ค่าสถิติจากผล พยากรณ์	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้า (ล้าน ลบ.ม./เดือน)			ค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./เดือน)		
	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)	ค่าสังเกต	ผลพยากรณ์	Δ (%)
ชุดข้อมูลฝึกฝน	563.630	551.533	-12.097 (-2.146)	3,095.970	2,258.060	-837.910 (-27.065)
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	428.259	485.165	+59.907 (+13.288)	2,026.290	1,688.659	-337.631 (-16.663)
ค่าสถิติจากผล พยากรณ์	ค่าต่ำสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (ล้าน ลบ.ม./เดือน)					
	ค่าสังเกต		ผลพยากรณ์	Δ (%)		
ชุดข้อมูลฝึกฝน	61.480		38.494	-22.986 (-37.388)		
ชุดข้อมูลตรวจสอบ	40.300		54.609	+14.309 (+35.507)		

ตารางที่ 4-53 และตารางที่ 4-54 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่างของเขื่อนภูมิพลให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดเมื่อแบ่งชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลทดสอบในอัตราส่วน 60:40 และ 70:30 สำหรับแบบจำลองการพยากรณ์รายวันและรายเดือน ตามลำดับ ทั้งนี้แบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอ่างรายวันสำหรับเขื่อนภูมิพลให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.8729 และ NSE ที่ 0.8573 ซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิผลของการพยากรณ์ที่ค่อนข้างสูง ในทางกลับกัน แบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอ่างสำหรับรายเดือนให้ค่า R^2 และ NSE ค่อนข้างต่ำที่ 0.5263 และ 0.3965 ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนถึงผลการพยากรณ์ที่ไม่ดีนัก

นอกจากนี้ เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์โดยแสดงผลของค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดของปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างระหว่างค่าสังเกตกับผลพยากรณ์ของเขื่อนภูมิพลในตารางที่ 4-56 และตารางที่ 4-57 พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างพยากรณ์รายวันมีค่าใกล้เคียงกับค่าสังเกตมาก โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างรายวันที่ +4.42% และค่าความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างรายเดือนสูงขึ้นไปอยู่ที่ +41.09% อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์บ่งชี้ให้เห็นว่าผลพยากรณ์ของค่าสูงสุดปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่ค่อนข้างต่ำไปเมื่อเทียบกับค่าสังเกตทั้งแบบจำลองการพยากรณ์แบบรายวันและรายเดือน ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างสูงสุดรายวันและรายเดือนที่เปรียบเทียบกันระหว่างผลพยากรณ์และค่าสังเกตคิดเป็น -3.50% และ -37.56% ตามลำดับ นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ยังพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างต่ำสุดจากแบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอ่างรายวันและรายเดือนยังคงให้ค่าสูงกว่าค่าสังเกต

ในทำนองเดียวกัน ผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนสิริกิติ์จากชุดข้อมูลตรวจสอบพบว่า มีค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างรายวันสูงกว่าค่าสังเกต 6.46% และมีความคลาดเคลื่อนที่สูงขึ้นสำหรับผลพยากรณ์รายเดือน โดยมีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างรายเดือนเมื่อเทียบ

กับค่าสังเกต +13.29 % ในขณะที่ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างสูงสุดที่พยากรณ์ได้จากแบบจำลองแบบหลายอย่างรายวันและรายเดือนค่อนข้างต่ำกว่าความเป็นจริง และเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของผลพยากรณ์พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์สูงเท่ากับ -45.61% และ -16.66% สำหรับแบบจำลองรายวันและรายเดือน ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าแม้แบบจำลองการพยากรณ์ให้ผลพยากรณ์ในเชิงค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างค่อนข้างแม่นยำ อย่างไรก็ตาม ผลพยากรณ์ค่าปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างสูงสุดยังต่ำกว่าค่าสังเกต นอกจากนี้ ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างต่ำสุดจากแบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่างรายวันและรายเดือนยังให้ค่าสูงกว่าค่าสังเกตคิดเป็น +2.65 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน และ +14.31 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อเดือน

4.2.3.5.2 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอย่างด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเขื่อนสิริกิติ์และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนร่วมกัน

ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอย่างรายวันและรายเดือนของเขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนร่วมกันได้สรุปค่าประสิทธิผลไว้ในตารางที่ 4-58 ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองย่อย dSKKNB-01 ให้ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์ในรูปของ R² สูงสุดเท่ากับ 0.849 อย่างไรก็ตาม ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์จากแบบจำลองแบบหลายอย่างรายเดือนลดลงต่ำกว่ารายวันค่อนข้างสูง

ตารางที่ 4-58 ค่าประสิทธิผลของแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบหลายอย่างรายวันและรายเดือนของเขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่างรายวันและรายเดือน (Daily and Monthly Multivariate Prediction Models)							
อัลกอริทึม: LSTM							
อัตราส่วนระหว่างชุดข้อมูลฝึกฝนกับชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30							
เลขแบบจำลอง	ตัวแปรที่ใช้	Steps	ประสิทธิผลทางสถิติของการพยากรณ์จากชุดข้อมูลตรวจสอบ				
			MSE	RMSE	R ²	Correlation	NSE
เขื่อนสิริกิติ์และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนรายวัน							
dSKKNB-01*	InflowSK InflowKNB	3	69.39	8.33	0.849	0.921	0.846
dSKKNB-02	InflowSK InflowKNB	7	18.27	4.27	0.302	0.550	0.167
เขื่อนสิริกิติ์และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนรายเดือน							
mSKKNB-01*	InflowSK InflowKNB	3	146,745.43	383.07	0.454	0.673	0.450
mSKKNB-02	InflowSK InflowKNB	3	9,744.58	98.71	0.421	0.648	0.256

ในภาพรวมสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยแบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่างเดี่ยว (Univariate Prediction Model) ให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าแบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอ่าง (Multivariate Prediction Model) ในขณะเดียวกัน ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำด้วยแบบจำลองการพยากรณ์รายวัน (Daily Prediction Model) สูงกว่าแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือน (Monthly Prediction Model) โดยทั้งอัลกอริทึม XGBoost และ LSTM ให้ค่าประสิทธิภาพของการพยากรณ์รายวันและรายเดือนสอดคล้องไปในทางเดียวกัน อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึม XGBoost ให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่า LSTM สำหรับแบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่างเดี่ยวรายเดือน

4.2.4 ผลการพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

4.2.4.1 ผลการพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Multi-reservoir System Operation by Reinforcement Learning)

งานวิจัยได้พัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Multi-reservoir System Operation by Reinforcement Learning, RL) ซึ่งนับเป็นหลักปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในงานบริหารเขื่อนสมัยใหม่ โดยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้ทำการออกแบบโครงสร้างของแบบจำลอง และพัฒนาชุดคำสั่งแบบ M-file ในโปรแกรม MATLAB ภายใต้กรอบการพัฒนาแบบจำลองเชิงแนวคิด (Conceptual Model) ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4-58 ตลอดจนทำการทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง ได้แก่ (1) การทดสอบและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับโครงสร้างการเรียนรู้ของ Agent (2) การปรับปรุงกระบวนการคำนวณโมดูลย่อยใน Environment (3) การออกแบบชุดคำสั่งให้สามารถลดระยะเวลาในการเรียนรู้ และ (4) การทวนสอบผลลัพธ์ของแบบจำลอง โดยได้ทำการออกแบบหน้าต่าง Interface ของแบบจำลองเพื่อจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4-59 และรูปที่ 4-60


```

create_agent_bb.m  x  +
function agent = create_agent_bb(obs_info,act_info,Ts)

    no_neurons = 36;
    state_path = [
        sequenceInputLayer(obs_info.Dimension(1),"Name","state","Normalization","none")
        fullyConnectedLayer(no_neurons,"Name","fc1")
        reluLayer("Name","relu1")
        lstmLayer(no_neurons,"Name","lstm1")
        fullyConnectedLayer(no_neurons,"Name","fc2")
        reluLayer("Name","relu2")
        fullyConnectedLayer(numel(act_info.Elements),"Name","fc3")];

    critic_opts = rlRepresentationOptions('learnRate',0.001,'GradientThreshold',1);

    critic = rlQValueRepresentation(layerGraph(state_path),obs_info,act_info,...
        'observation',{'state'},critic_opts);

    otp = rlDQNAgentOptions('SampleTime', Ts);

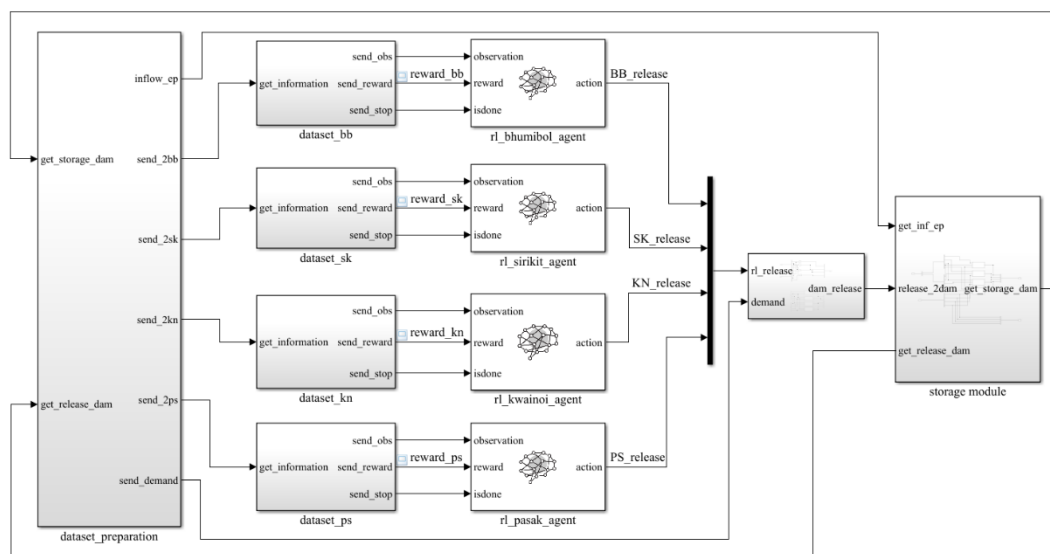
    otp.SequenceLength = 20;
    otp.DiscountFactor = 0.99;
    otp.ExperienceBufferLength = 1e6;
    otp.EpsilonGreedyExploration.EpsilonDecay = 1e-5;
    otp.EpsilonGreedyExploration.EpsilonMin = 0.02;

    agent = rlDQNAgent(critic,otp);

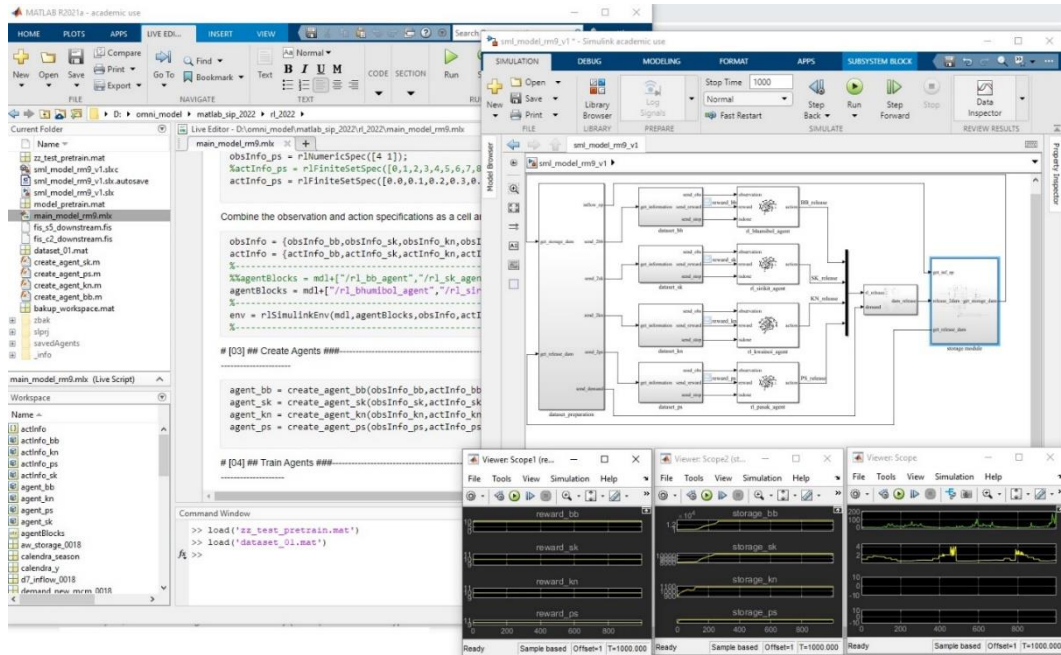
end

```

รูปที่ 4-58 ตัวอย่างการพัฒนาชุดคำสั่งของ Agent-BB แบบ M-file ในโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 4-59 แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่



รูปที่ 4-60 หน้าต่าง Interface ของแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

4.2.4.2 ผลการพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด (Multi-reservoir System Operation by Constraint Programming Model)

การพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด (Multi-reservoir System Operation by Constraint Programming Model) ถูกพัฒนาขึ้นตามกรอบแนวคิดและหลักการในการพัฒนาแบบจำลองที่กล่าวในรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 ซึ่งโครงสร้างของแบบจำลองประกอบด้วย 2 รูปแบบหลักคือ (1) แบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model) และ (2) แบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model) โดยกำหนดสมมติฐานให้ปริมาณการระบายน้ำทั้งหมดจากทั้ง 4 เขื่อนหลักต้องเพียงพอกับปริมาณความต้องการน้ำทุกโหนดความต้องการน้ำทุกพื้นที่ สำหรับการกำหนดรูปแบบของแบบจำลอง นอกจากนี้ ยังกำหนดรูปแบบของสมการข้อจำกัดแตกต่างกันตามปัจจัยฤดูกาลคือ (1) แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายฤดูกาล (Constraint Programming Model with Seasonal Constraints) และ (2) แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายปี (Constraint Programming Model with Yearly Constraints) อีกทั้งยังนำข้อมูล Side Flow ของสถานีน้ำท่าหลักท้ายเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ทั้งแบบข้อมูลตรวจวัดและข้อมูลที่ได้จากการประมาณการจากแบบจำลองทางอุทกวิทยา มาปัจจัยในการพิจารณาปรับลดปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อนโดยแบ่งย่อยออกเป็น 2 รูปแบบคือ (1) แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดที่ไม่พิจารณาข้อมูล Side Flow (Constraint Programming Model without Considering Side Flow) และ (2) แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดที่พิจารณาข้อมูล Side Flow (Constraint

Programming Model Considering Side Flow) รายละเอียดของผลการพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก E

4.2.5 ผลการจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำระยะยาวในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

4.2.5.1 ผลการจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำระยะยาวด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Multi-reservoir System Operation by Reinforcement Learning)

ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 ในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังของทั้ง 4 เขื่อนหลัก โดยทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับข้อมูลสังเกตในรูปของปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน และปริมาณการระบายน้ำรายปีได้ตั้งสรุปไว้ในตารางที่ 4-59 และแสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของทั้ง 4 เขื่อนจากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังกับปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายและข้อมูลสังเกตไว้ในรูปที่ 4-61 ถึงรูปที่ 4-64

ตารางที่ 4-59 ประสิทธิภาพของการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง

ปี	ปีน้ำ	ช่วงการจำลองระบบ	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}		ปริมาณการระบายน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
			ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง RL	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง RL	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง RL
เขื่อนภูมิพล								
2552 ^{2/}	NY	ช่วงการจำลอง#3	9,175.68 ²	10,600.79 ^{2/}	-	-	1,268.19 ^{2/}	527.49 ^{2/}
2553	NY		6,123.69	9,251.88	8,493.56	10,920.43	5,140.18	4,705.77
2554	WY		9,190.88	9,302.84	13,393.55	10,320.46	7,588.58	12,234.14
2555	NY		7,952.42	9,145.36	8,675.39	10,076.78	9,184.50	4,902.51
2556	NY		5,822.98	9,332.44	7,061.47	10,303.19	4,303.30	3,175.22
2557	DY		5,493.53	9,090.27	6,024.80	9,521.75	3,939.39	3,954.65
2558	DY		4,960.64	9,134.17	4,984.25	9,388.59	2,679.87	1,825.00
2559	NY		5,090.85	9,307.89	6,805.26	10,752.91	1,450.91	1,830.00
2560	NY		7,402.66	9,664.57	10,563.84	10,569.66	2,725.76	6,294.50
2561	NY		8,615.93	9,106.10	9,706.40	9,986.38	6,192.81	5,423.29
2562	DY		6,228.66	9,089.53	5,934.25	9,183.61	5,628.37	3,265.00
2563	DY		4,821.73	8,626.97	5,464.27	9,279.76	2,157.55	1,830.00
2564 ^{3/}	NY		5,008.31 ^{3/}	9,153.29 ^{3/}	8,028.53 ^{3/}	12,139.90 ^{3/}	1,740.00 ^{3/}	1,520.00 ^{3/}
ค่าเฉลี่ย		2552-2564	6,606.77	9,292.78	7,927.96	10,203.62	4,635.57	4,494.55
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		2552-2564	-	2,686.01	-	2,275.66	-	-141.01
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		2552-2564	-	40.66	-	28.70	-	-3.04
เขื่อนสิริกิติ์								
2552 ^{2/}	NY	ช่วงการจำลอง#3	5,798.36 ^{2/}	8,144.09 ^{2/}	-	-	950.71 ^{2/}	706.19 ^{2/}
2553	NY		5,177.57	6,984.56	7,783.72	10,920.43	3,931.85	5,957.47
2554	WY		7,160.96	7,065.84	9,494.50	10,320.46	9,396.29	11,088.97
2555	NY		5,809.13	6,856.75	6,586.82	10,076.78	8,153.12	4,927.05
2556	NY		4,582.17	6,870.52	5,931.86	10,303.19	4,284.84	4,454.05
2557	DY		4,705.95	7,027.57	5,841.37	9,521.75	4,299.97	4,182.12

ปี	ปีน้ำ	ช่วงการจำลองระบบ	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}		ปริมาณการระบายน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
			ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง RL	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง RL	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง RL
2558	DY		4,582.71	6,704.25	4,906.23	9,388.59	4,712.34	4,281.82
2559	NY		5,191.52	7,239.03	7,657.29	10,752.91	3,103.21	4,901.24
2560	NY		6,335.04	7,021.26	8,388.82	10,569.66	4,715.50	5,458.65
2561	NY		6,728.95	6,995.50	8,347.50	9,986.38	7,447.64	6,938.81
2562	DY		5,038.45	6,739.63	5,294.30	9,183.61	6,168.50	4,208.34
2563	DY		4,471.37	7,086.81	5,818.86	9,279.76	3,811.33	3,612.95
2564 ^{3/}	NY		3,983.29 ^{3/}	6,571.44 ^{3/}	4,467.01 ^{3/}	12,139.90 ^{3/}	3,906.38 ^{3/}	4,154.30 ^{3/}
ค่าเฉลี่ย			2543-2563	5,351.19	7,023.63	6,709.86	10,203.62	5,456.78
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		2543-2563	-	1,672.44	-	3,493.76	-	-1.19
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		2543-2563	-	31.25	-	52.07	-	-0.02
เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน								
2552 ^{2/}	NY	ช่วงการจำลอง#3	573.06 ^{2/}	851.88 ^{2/}	-	-	126.91 ^{2/}	207.60 ^{2/}
2553	NY		411.39	577.67	779.85	859.51	1,196.38	1,353.25
2554	WY		602.19	575.17	942.06	810.05	2,899.93	2,964.84
2555	NY		436.23	580.41	732.20	947.67	1,211.00	1,072.19
2556	NY		494.32	576.32	895.29	858.40	1,533.37	1,467.01
2557	DY		416.12	578.12	783.80	862.79	923.51	1,055.03
2558	DY		331.94	506.05	412.65	641.43	792.07	653.89
2559	NY		482.67	651.42	945.63	981.65	967.45	1,290.00
2560	NY		647.73	574.62	974.70	888.80	2,662.98	2,624.05
2561	NY		508.23	550.87	740.20	748.91	1,162.81	1,025.00
2562	DY		368.23	521.49	496.00	655.62	755.73	673.00
2563	DY		321.82	609.57	462.81	857.25	641.30	366.00
2564 ^{3/}	NY		385.70 ^{3/}	593.91 ^{3/}	942.57 ^{3/}	845.63 ^{3/}	911.42 ^{3/}	1,448.00 ^{3/}
ค่าเฉลี่ย			2552-2564	459.97	595.96	758.98	829.81	1,340.59

ปี	ปีน้ำ	ช่วงการจำลองระบบ	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}		ปริมาณการระบายน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
			ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง RL	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง RL	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง RL
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		2552-2564	-	135.99	-	70.83	-	-18.39
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		2552-2564	-	29.57	-	9.33	-	-1.37
เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์								
2552 ^{2/}	NY	ช่วงการจำลอง#3	882.80 ^{2/}	893.42 ^{2/}	-	-	323.28 ^{2/}	320.00 ^{2/}
2553	NY		477.30	555.67	976.41	960.00	3,260.88	3,265.20
2554	WY		600.01	562.67	1,020.71	895.95	4,469.45	4,436.19
2555	NY		411.74	564.52	778.10	960.00	1,145.74	1,017.00
2556	NY		433.73	568.00	963.28	960.00	2,109.78	1,989.50
2557	DY		448.32	546.25	816.50	831.67	1,151.13	1,294.50
2558	DY		348.37	522.51	640.10	863.88	846.39	700.77
2559	NY		480.65	608.12	984.61	960.00	2,096.13	2,407.00
2560	NY		539.18	567.04	958.25	960.00	3,706.43	3,449.00
2561	NY		470.92	496.09	740.84	689.82	2,296.85	2,450.21
2562	DY		254.55	570.12	351.38	761.17	546.96	182.50
2563	DY		271.29	585.57	709.10	893.04	276.91	461.00
2564 ^{3/}	NY		338.00 ^{3/}	514.40 ^{3/}	992.82 ^{3/}	960.00 ^{3/}	2,435.18 ^{3/}	708.00 ^{3/}
ค่าเฉลี่ย		2552-2564	458.22	581.11	827.68	891.29	1,991.51	1,968.44
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		2552-2564	-	122.89	-	63.62	-	-23.07
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		2552-2564	-	26.82	-	7.69	-	-1.16

หมายเหตุ: ^{1/} วิเคราะห์ ณ วันที่ 31 เดือนตุลาคมของทุกปี

^{2/} ข้อมูลเริ่มต้นในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2552

^{3/} ข้อมูลสิ้นสุดในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2564

จากข้อมูลในตารางที่ 4-60 ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยและปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (วิเคราะห์ ณ วันที่ 31 เดือนตุลาคมของทุกปี) จากผลลัพธ์ของแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังให้ค่าสูงกว่าปริมาณน้ำเก็บกักตรวจวัดจริงทั้ง 4 เขื่อน ในขณะที่ปริมาณการระบายน้ำรายปีในภาพรวมลดลงจากข้อมูลตรวจวัดจริงเล็กน้อย โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

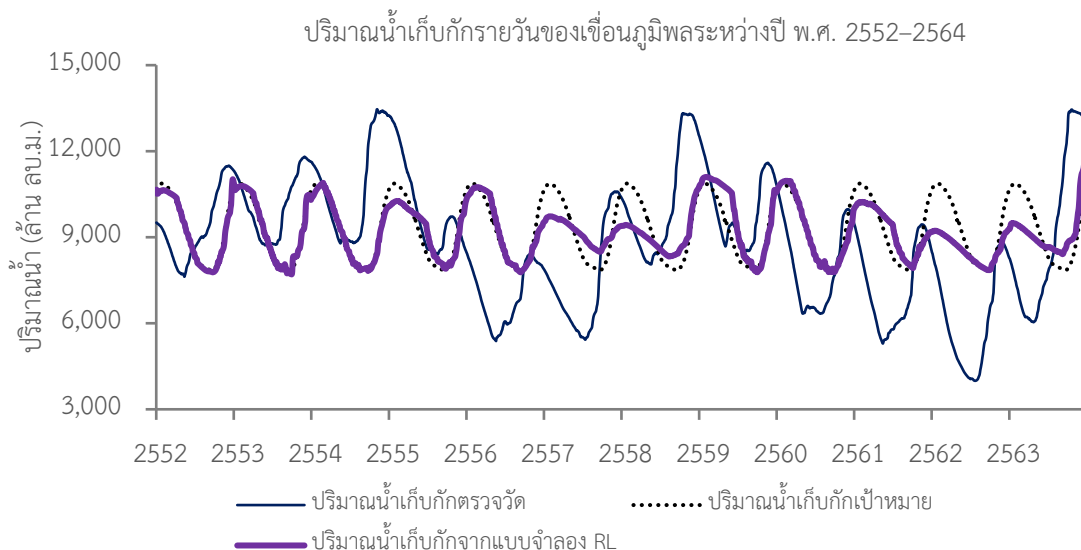
เขื่อนภูมิพลมีค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยและปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนเท่ากับ 2,686 และ 2,276 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 40.66% และ 28.70% ตามลำดับ และปริมาณการระบายน้ำรายปีลดลง -141.01 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็น -3.04%

เขื่อนสิริกิติ์มีค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยและปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนเท่ากับ 1,672 และ 3,494 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 31.25% และ 52.07% ตามลำดับ และปริมาณการระบายน้ำรายปีลดลงเพียงเล็กน้อยเท่ากับ -1.19 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็น -0.02%

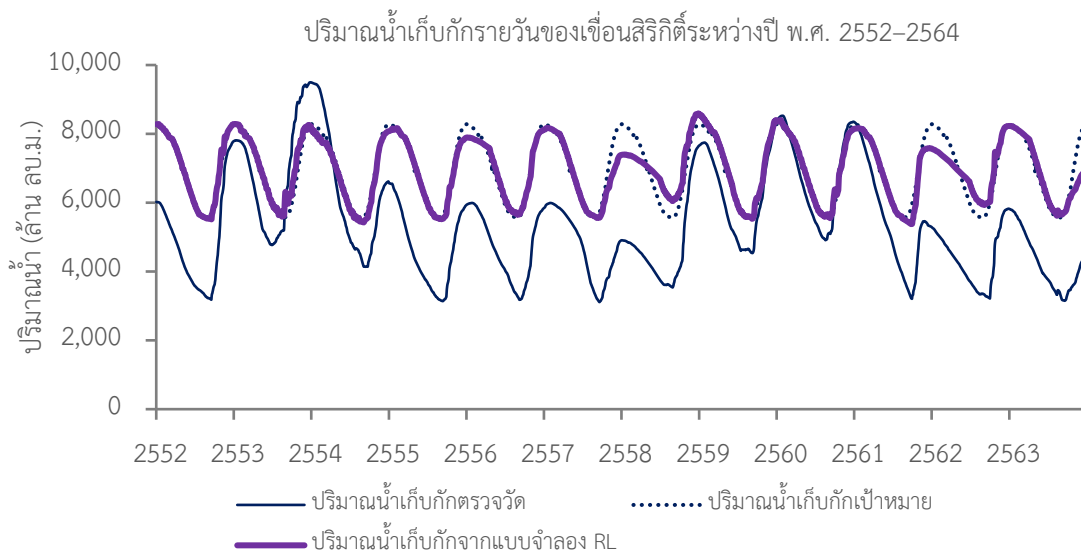
เขื่อนแควน้อยบำรุงแดนมีค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยและปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนเท่ากับ 136 และ 71 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 29.57% และ 9.33% ตามลำดับ และปริมาณการระบายน้ำรายปีลดลง -18.39 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็น -1.37%

เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์มีค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยและปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนเท่ากับ 123 และ 64 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 26.82% และ 7.69% ตามลำดับ และปริมาณการระบายน้ำรายปีลดลง -23.07 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็น -1.16%

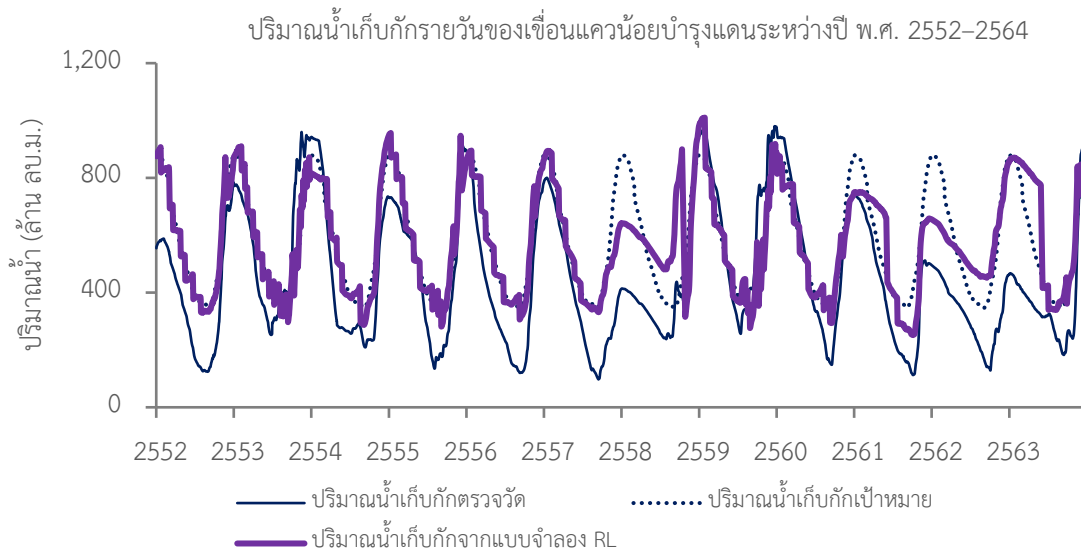
นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของทั้ง 4 เขื่อนจากการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 ด้วยแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังกับเส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมาย (Generated Target Storage) ที่สังเคราะห์ขึ้นมาใหม่สำหรับการพัฒนาแบบจำลอง โดยกำหนดให้ปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายสูงขึ้น 15% จากค่าเฉลี่ยรายวันระยะยาวสำหรับเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และสูงขึ้น 10% จากค่าเฉลี่ยรายวันระยะยาวสำหรับป่าสักชลสิทธิ์ตามเป้าหมายของงานวิจัยเพื่อให้แบบจำลองเรียนรู้สำหรับหาโครงสร้างที่เหมาะสมในการกำหนดการระบายน้ำจาก 4 เขื่อนหลัก จากรูปที่ 4-61 ถึงรูปที่ 4-64 จะเห็นได้ว่า ปริมาณน้ำเก็บกักรายวันจากผลลัพธ์ของแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังให้ค่าสอดคล้องไปกับเส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายทั้ง 4 เขื่อน และในภาพรวมยังให้รูปแบบของปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของทุกเขื่อนสูงกว่าปริมาณน้ำเก็บกักตรวจวัด ยิ่งไปกว่านั้น ยังช่วยลดความผันผวนของปริมาณน้ำเก็บกักที่สะท้อนถึงปัจจัยปริมาณน้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำได้ค่อนข้างดีในการบริหารจัดการน้ำภายใต้สถานการณ์น้ำแตกต่างกัน



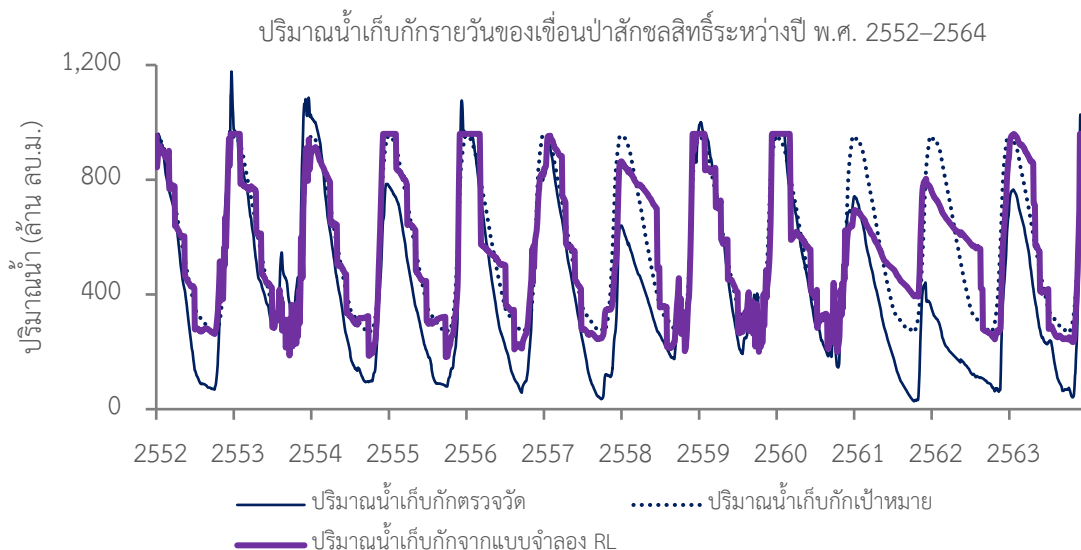
รูปที่ 4-61 ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังและปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมาย



รูปที่ 4-62 ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังและปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมาย



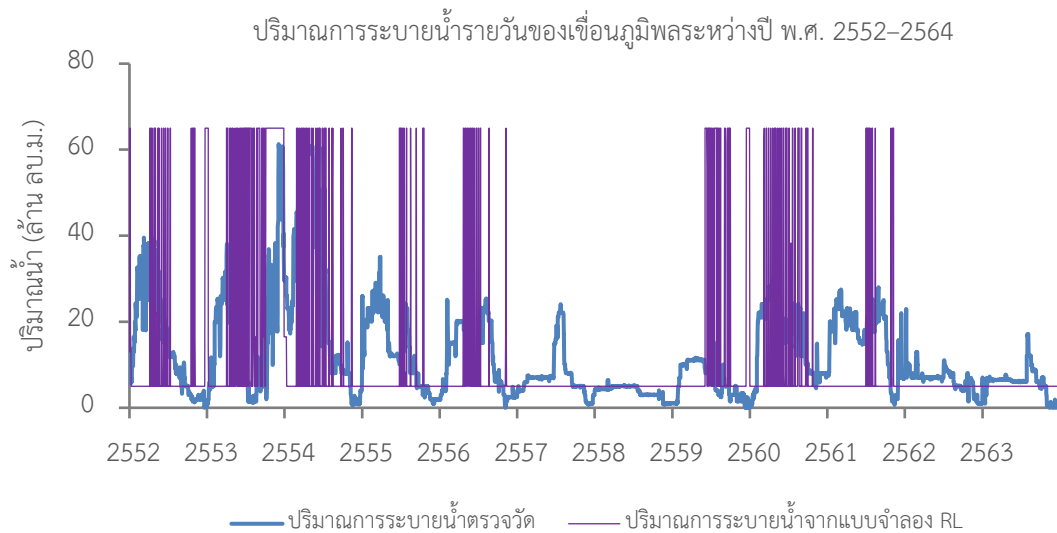
รูปที่ 4-63 ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังและปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมาย



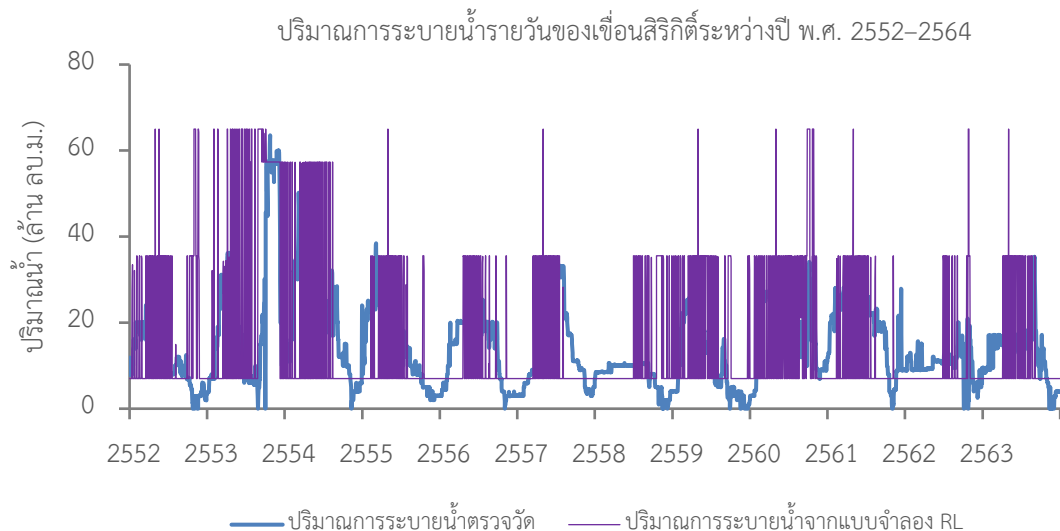
รูปที่ 4-64 ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังและปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมาย

อย่างไรก็ดี เมื่อทำการศึกษาลักษณะรูปแบบของการระบายน้ำรายวันจากผลลัพธ์ของแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังดังแสดงในรูปที่ 4-65 ถึงรูปที่ 4-68 จะเห็นได้ชัดเจนว่ามีรูปแบบแตกต่างไปจากรูปแบบการระบายน้ำจริง กล่าวคือ แบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังแนะนำรูปแบบการระบายน้ำรายวันที่ให้ค่ารางวัล (Reward) สูงที่สุดสุดท้ายที่มีลักษณะ Discrete โดยที่ลักษณะรูปแบบและค่าปริมาณการระบายน้ำรายปีของทั้ง 4 เขื่อนจากผลลัพธ์ของแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังไม่แตกต่างไปจากปริมาณการระบายน้ำตรวจวัดรายปีมากนักตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-69 ถึงรูปที่ 4-72 หรืออาจกล่าวได้ว่า

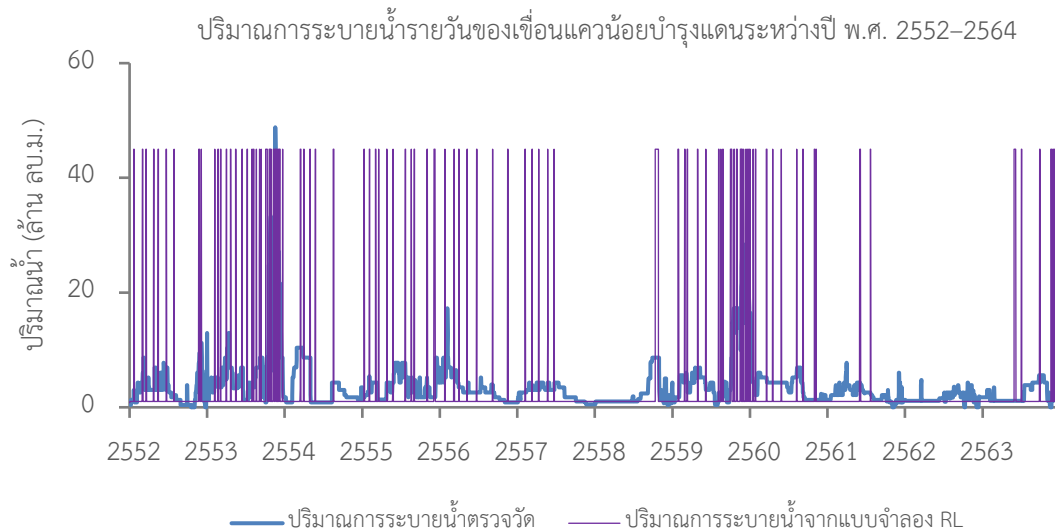
รูปแบบการระบายน้ำรายวันจากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังไม่ได้นำปัจจัยด้านเวลาในการระบายน้ำ (รายวัน) มาพิจารณา แต่อาศัยหลักการระบายน้ำในระยะเวลาที่สามารถให้ค่าปริมาณน้ำเก็บกักเข้าใกล้เส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายตามที่ได้สังเคราะห์ไว้ในขั้นตอนของการออกแบบและพัฒนาแบบจำลองข้างต้น ด้วยเหตุนี้ จะเห็นได้ว่า แบบจำลองแนะนำระบายน้ำในปริมาณสูงสุดและต่ำสุดที่ความถี่แตกต่างกันในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้ง ซึ่งรูปแบบการระบายน้ำดังกล่าวมีลักษณะแตกต่างไปจากแนวทางปฏิบัติเดิมอย่างสิ้นเชิง



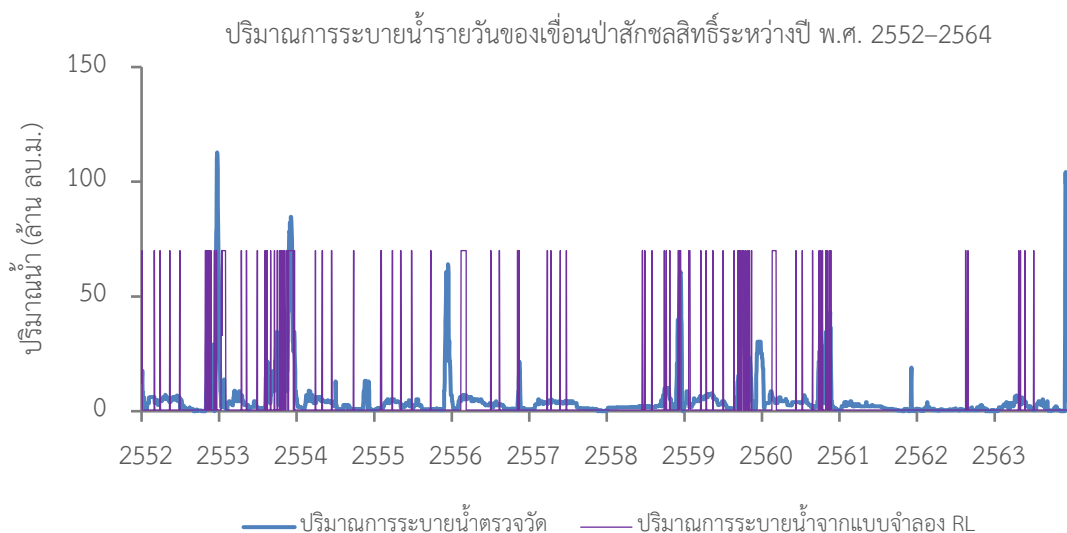
รูปที่ 4-65 ผลการเปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังและปริมาณการระบายน้ำตรวจวัด



รูปที่ 4-66 ผลการเปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังและปริมาณการระบายน้ำตรวจวัด

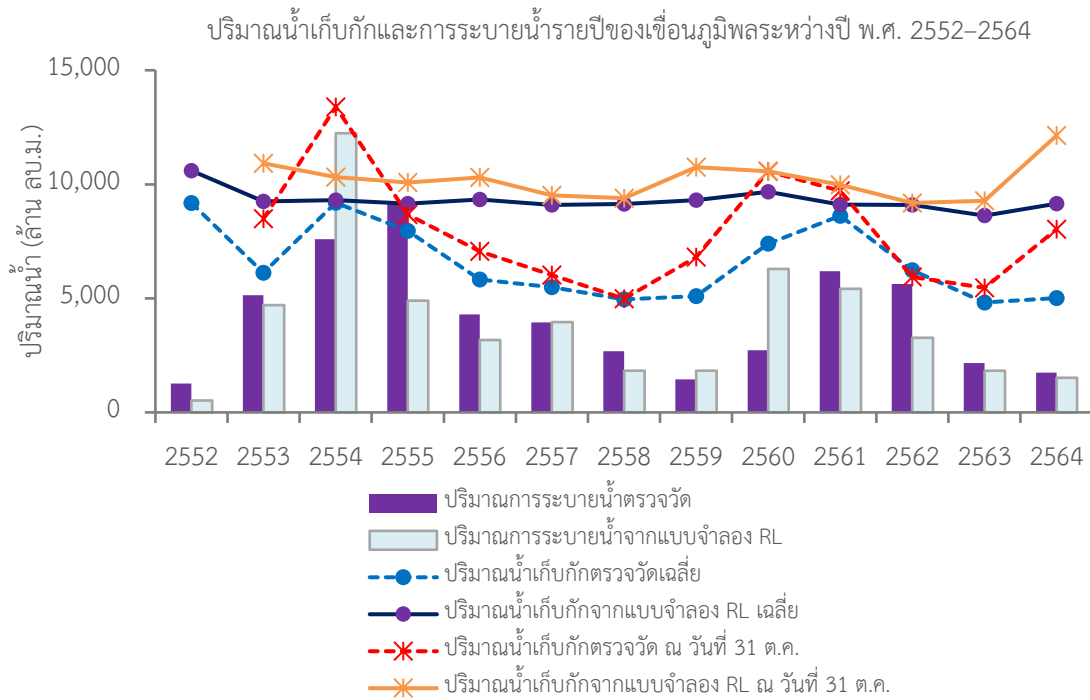


รูปที่ 4-67 ผลการเปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552–2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังและปริมาณการระบายน้ำตรวจวัด

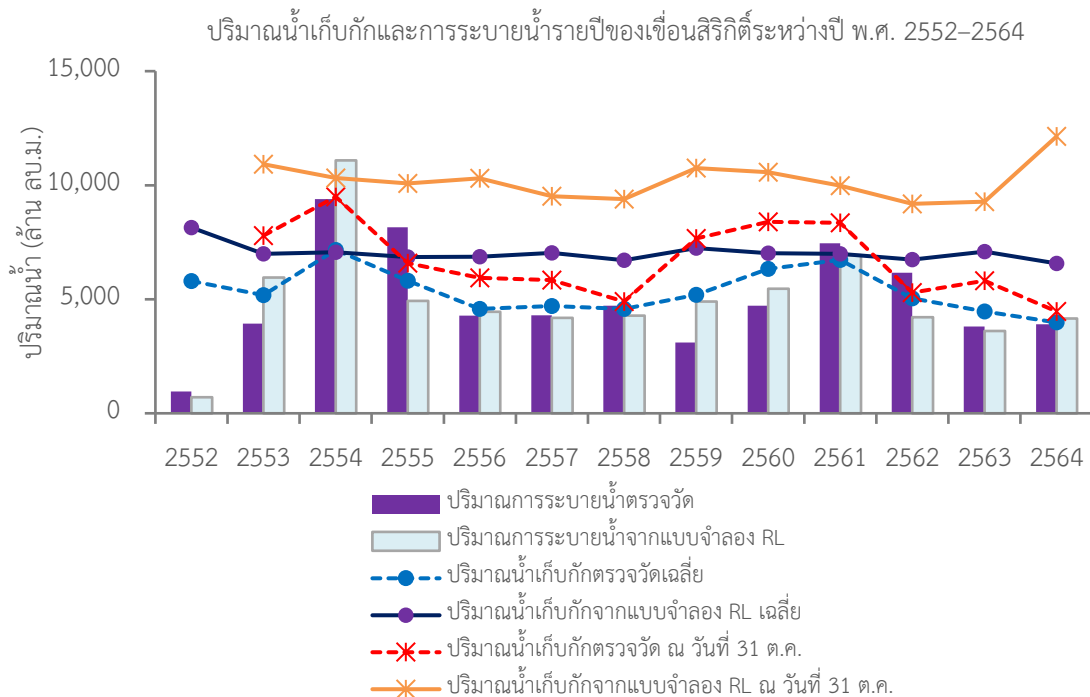


รูปที่ 4-68 ผลการเปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2552–2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังและปริมาณการระบายน้ำตรวจวัด

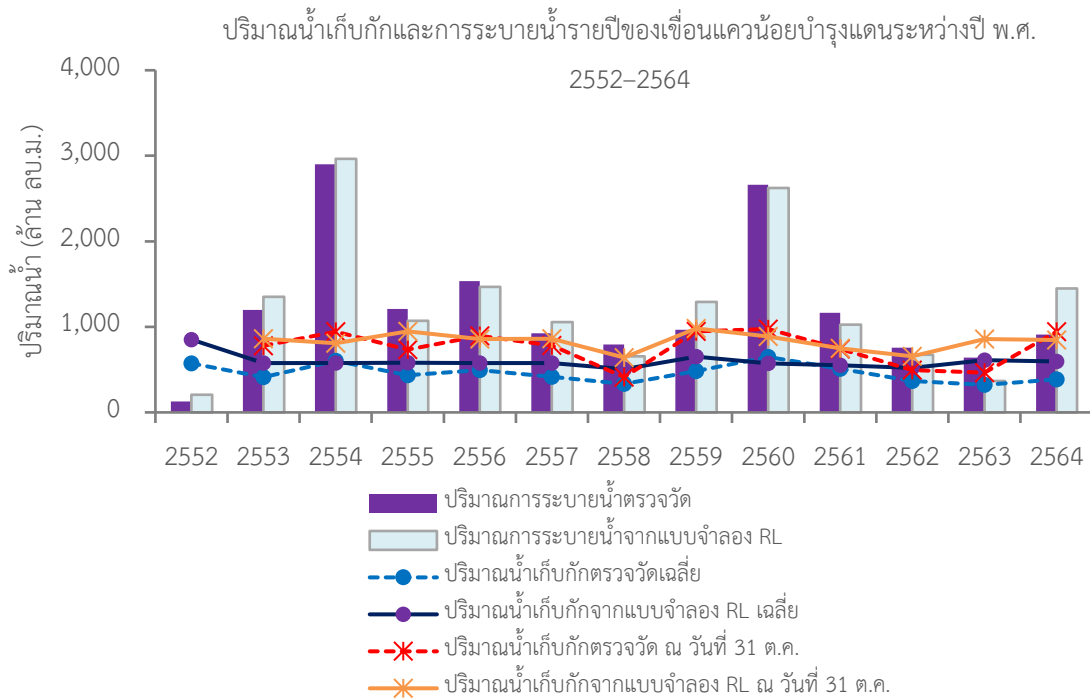
จากรูปที่ 4-69 ถึงรูปที่ 4-72 ซึ่งได้แสดงกราฟเปรียบเทียบปริมาณน้ำเก็บกักและการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2552–2564 จากผลลัพธ์ของแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง จะเห็นได้ว่ารูปแบบปริมาณการระบายน้ำด้วยแบบจำลองส่วนใหญ่ผันแปรระหว่างปี โดยให้ค่าปริมาณการระบายน้ำรายปีเฉลี่ยลดลงจากข้อมูลปริมาณการระบายน้ำตรวจวัดรายปีไม่มากนักเท่ากับ -141.01 , -1.19 , -18.39 และ -23.07 ลูกบาศก์เมตรต่อปี สำหรับเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ตามลำดับ



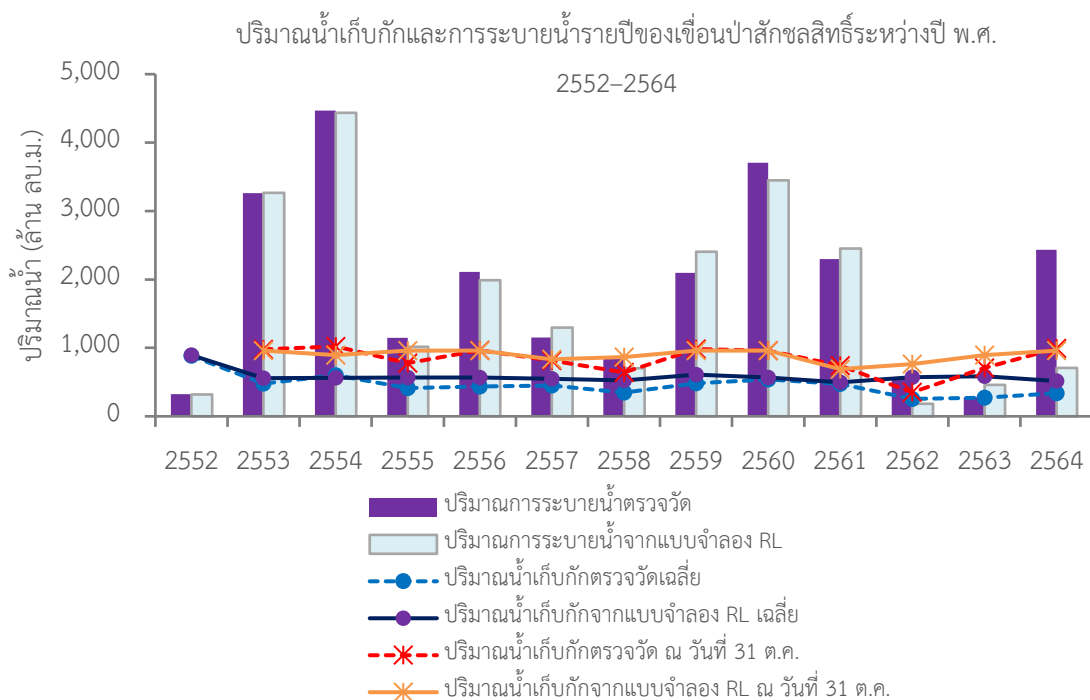
รูปที่ 4-69 ปริมาณน้ำเก็บกักและการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง



รูปที่ 4-70 ปริมาณน้ำเก็บกักและการระบายน้ำรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง



รูปที่ 4-71 ปริมาณน้ำเก็บกักและการระบายน้ำรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง



รูปที่ 4-72 ปริมาณน้ำเก็บกักและการระบายน้ำรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 จากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง

4.2.5.2 ผลการจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำระยะยาวด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด (Multi-reservoir System Operation by Constraint Programming Model)

4.2.5.2.1 การกำหนดรูปแบบของแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดเพื่อจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดเพื่อจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระยะยาวใน 2 รูปแบบคือ (1) แบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model) และ (2) แบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model) โดยทำการจำลองผลตามช่วงข้อมูลออกเป็น 3 กรณีย่อย ดังนี้

- (1) ระหว่างปี พ.ศ. 2543–2545 ซึ่งแบบจำลองจะประกอบด้วยเขื่อนภูมิพล และเขื่อนสิริกิติ์
- (2) ระหว่างปี พ.ศ. 2546–2551 ซึ่งแบบจำลองจะประกอบด้วยเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์
- (3) ระหว่างปี พ.ศ. 2552–2563 ซึ่งแบบจำลองจะประกอบด้วยเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

นอกจากนี้ ยังได้กำหนดรูปแบบของแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดเพื่อจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จำนวน 20 กรณี โดยมีข้อพิจารณาที่สำคัญ ดังนี้

(1) ข้อกำหนดของปัจจัยปริมาณความต้องการน้ำในพื้นที่ศึกษา โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีย่อย คือ (1.1) กรณีใช้ข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำสังเคราะห์จากแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทาน (1.2) กรณีใช้ปริมาณความต้องการน้ำชลประทานสุทธิที่ประมาณการจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม โดยกำหนด Requested Ratio = 0.60 ในปีที่มีปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนน้อยกว่าปริมาณความต้องการน้ำชลประทานสุทธิจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม (Satellite-Based NIR) ร่วมกับความต้องการน้ำนอกภาคการเกษตรตามแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทาน

(2) ข้อกำหนดของปัจจัยปริมาณ Side Flow ของสถานีตรวจวัดหลักท้ายเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีย่อยคือ (2.1) กรณีไม่พิจารณา Side Flow (2.2) กรณีพิจารณา 20% Side Flow ท้ายเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ (2.3) กรณีพิจารณา 20% Side Flow ท้ายเขื่อนภูมิพลและ 10% ท้ายเขื่อนสิริกิติ์

(3) ข้อกำหนดของปัจจัยปริมาณน้ำเก็บกักสูงสุด โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีย่อยคือ (3.1) กรณีปริมาณน้ำเก็บกักสูงสุดที่ระดับ NPL ของทุกเขื่อน (3.2) กรณีปริมาณน้ำเก็บกักสูงไม่เกินระดับ URC (1.3) กรณีปริมาณน้ำเก็บกักสูงไม่เกิน 90% ของปริมาณเก็บกักที่ระดับ NPL

สำหรับรายละเอียดคำอธิบายของแต่ละแบบจำลองได้สรุปไว้ในตารางที่ 4-60 และแสดงค่าประสิทธิผลของการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบต่าง ๆ ในรูปของ (1) การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกัก ณ วันที่ 31 เดือนตุลาคมของทุกปีซึ่งเป็นวันสิ้นสุดฤดูฝนเมื่อเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลจริงในอดีต และ (2) การลดลงของปริมาณน้ำระบายเมื่อเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลจริงในอดีต โดยแสดงผลทั้งในรูปของเปอร์เซ็นต์และปริมาตรน้ำที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ดังรายละเอียดที่สรุปไว้ในตารางที่ 4-61

ตารางที่ 4-60 การกำหนดรูปแบบของแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดสำหรับใช้จำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาว

แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด	คำอธิบาย
1. แบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model)	
กรณีใช้ข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำสังเคราะห์จากแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทาน	
1.1 Seasonal Model_NoSF_NoLagTime	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายฤดูกาลที่ไม่พิจารณา Side Flow
1.2 Seasonal Model_WithSF_NoLagTime	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายฤดูกาลที่พิจารณา Side Flow เท่ากับ 20%
1.3 Yearly Model_NoSF_NoLagTime	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายปีที่ไม่พิจารณา Side Flow
1.4 Yearly Model_WithSF_NoLagTime	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายปีที่พิจารณา Side Flow เท่ากับ 20%
2. แบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model)	
กรณีใช้ปริมาณความต้องการน้ำสังเคราะห์จากแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทาน	
2.1 Seasonal Model_NoSF_LagTime	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายฤดูกาลที่ไม่พิจารณา Side Flow
2.2 Seasonal Model_WithSF_LagTime	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายฤดูกาลที่พิจารณา Side Flow เท่ากับ 20%
2.3 Yearly Model_NoSF_LagTime	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายปีที่ไม่พิจารณา Side Flow
2.4 Yearly Model_WithSF_LagTime	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายปีที่พิจารณา Side Flow เท่ากับ 20%
2.5 Seasonal Model_URC_NoSF_LagTime	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายฤดูกาลที่ไม่พิจารณา Side Flow และกำหนดให้ปริมาณน้ำเก็บกักของทุกเขื่อนไม่เกินระดับ URC
2.6 Seasonal Model_URC_WithSF_LagTime	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายฤดูกาลที่พิจารณา Side Flow เท่ากับ 20% และกำหนดให้ปริมาณน้ำเก็บกักของทุกเขื่อนไม่เกินระดับ URC
2.7 Yearly Model_URC_NoSF_LagTime	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายปีที่ไม่พิจารณา Side Flow และกำหนดให้ปริมาณน้ำเก็บกักของทุกเขื่อนไม่เกินระดับ URC
2.8 Yearly Model_URC_WithSF_LagTime	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายปีที่พิจารณา Side Flow เท่ากับ 20% และกำหนดให้ปริมาณน้ำเก็บกักของทุกเขื่อนไม่เกินระดับ URC
2.9 Seasonal Model_90%ReducedKNBPS_NoSF_LagTime	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายฤดูกาลที่ไม่พิจารณา Side Flow และกำหนดให้ปริมาณน้ำเก็บกักของ KNB-PS เท่ากับ 90% ของปริมาณน้ำเก็บกักที่ระดับ NPL
2.10 Seasonal Model_URCBBSK_90%ReducedKNBPS_WithSF_LagTime	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายฤดูกาลที่พิจารณา Side Flow เท่ากับ 20% และกำหนดให้ปริมาณน้ำเก็บกักของ BB-PS ไม่เกินระดับ URC และปริมาณน้ำเก็บกักของ KNB-PS เท่ากับ 90% ของปริมาณน้ำเก็บกักที่ระดับ NPL
2.11 Yearly Model_90%ReducedKNBPS_NoSF_LagTime	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายปีที่ไม่พิจารณา Side Flow และกำหนดให้ปริมาณน้ำเก็บกักของ KNB-PS เท่ากับ 90% ของปริมาณน้ำเก็บกักที่ระดับ NPL
2.12 Yearly Model_URCBBSK_90%ReducedKNBPS_WithSF_LagTime	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายปีที่พิจารณา Side Flow เท่ากับ 20% และกำหนดให้ปริมาณน้ำเก็บกักของ BB-PS ไม่เกินระดับ URC และปริมาณน้ำเก็บกักของ KNB-PS เท่ากับ 90% ของปริมาณน้ำเก็บกักที่ระดับ NPL
2.13 Yearly Model_90%ReducedKNBPS_20%SFBB_10%SFBSK_LagTime	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายฤดูกาลที่พิจารณา Side Flow เท่ากับ 20% และ 10% ท้ายเขื่อน BB และ SK ตามลำดับ และกำหนดให้ปริมาณน้ำเก็บกักของ KNB-PS เท่ากับ 90% ของปริมาณน้ำเก็บกักที่ระดับ NPL
2.14 Yearly Model_URCBBSK_90%ReducedKNBPS_20%SFBB_10%SFBSK_LagTime	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายฤดูกาลที่พิจารณา Side Flow เท่ากับ 20% และ 10% ท้ายเขื่อน BB และ SK ตามลำดับ และกำหนดให้ปริมาณน้ำเก็บกักของ BB-PS ไม่เกินระดับ URC และปริมาณน้ำเก็บกักของ KNB-PS เท่ากับ 90% ของปริมาณน้ำเก็บกักที่ระดับ NPL
กรณีใช้ปริมาณความต้องการน้ำที่ประมาณการจากภาพถ่ายดาวเทียม โดยกำหนด Requested Ratio = 0.6 ในปีที่มีปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนน้อยกว่า Satellite-Based NIR	
2.15 Yearly Model_withSF_LagTime_SatDE	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายปีที่พิจารณา Side Flow เท่ากับ 20%
2.16 Yearly Model_URCSK_20%SFBB_10%SFBSK_LagTime_SatDE	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายปีที่พิจารณา Side Flow เท่ากับ 20% และ 10% ท้ายเขื่อน BB และ SK ตามลำดับ

แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด	คำอธิบาย
2.17 Yearly Constraint_10%SFBB_10%SF SK_LagTime_SatDE ^{4/}	แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายปีที่พิจารณา Side Flow เท่ากับ 10% และ 10% หักเชื่อม BB และ SK ตามลำดับ

ตารางที่ 4-61 ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบต่าง ๆ

แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด	การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกัก (เปอร์เซ็นต์) ^{1/}					การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกัก (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}					การลดลงของปริมาณน้ำระบาย (เปอร์เซ็นต์) ^{1/}					การลดลงของปริมาณน้ำระบาย (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}				
	BB	SK	KNB	PS	ALL ^{2/}	BB	SK	KNB	PS	ALL ^{2/}	BB	SK	KNB	PS	ALL ^{2/}	BB	SK	KNB	PS	ALL ^{2/}
1. แบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model)																				
กรณีใช้ปริมาณความต้องการน้ำสังเคราะห์จากแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทาน (Target Water Demand)																				
1.1 Seasonal Constraint_NoSF_NoLagTime	5.93	10.63	-17.30	9.62	2.22	547.91	816.96	-125.76	81.83	1,320.94	-2.25	-2.53	2.84	-0.68	-0.66	-116.91	-151.32	37.04	-13.75	-244.94
1.2 Seasonal Constraint_WithSF_NoLagTime ^{4/}	15.73	16.36	-12.20	-3.20	4.17	1,454.08	1,257.62	-88.65	-27.05	2,596.00	-3.23	-3.03	2.83	-0.31	-0.94	-167.82	-181.1	36.97	-6.32	-318.27
1.3 Yearly Constraint_NoSF_NoLagTime	5.93	10.63	-17.30	9.62	2.22	547.91	816.96	-125.72	81.33	1,320.48	-2.25	-2.53	2.84	-0.68	-0.66	-116.91	-116.91	37.04	-13.75	-210.53
1.4 Yearly Constraint_WithSF_NoLagTime	18.73	11.88	-12.34	-10.21	2.02	1,731.81	913.15	-89.69	-86.36	2,468.91	-3.91	-2.71	3.97	-0.25	-0.73	-203.59	-161.66	49.48	-5.03	-320.80
2. แบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงไหนความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model)																				
กรณีใช้ปริมาณความต้องการน้ำสังเคราะห์จากแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทาน (Target Water Demand)																				
2.1 Seasonal Constraint_NoSF_LagTime ^{3/}	17.87	21.18	28.74	11.94	19.93	1,651.76	1,628.27	208.90	101.01	3,589.94	-4.17	-3.04	-3.26	-0.69	-2.79	-216.57	-181.33	-42.51	-14.00	-454.40
2.2 Seasonal Constraint_WithSF_LagTime ^{3/}	21.97	23.52	29.14	12.28	21.73	2,031.66	1,807.67	211.80	103.90	4,155.03	-4.10	-3.04	-3.26	-0.70	-2.77	-213.36	-181.33	-42.51	-14.13	-451.33
2.3 Yearly Constraint_NoSF_LagTime ^{3/}	-1.35	15.28	26.99	11.28	13.05	-124.85	1,174.36	196.22	95.44	1,341.17	-1.73	-2.54	-3.25	-0.65	-2.04	-90.02	-151.26	-42.45	-13.27	-296.99
2.4 Yearly Constraint_WithSF_LagTime ^{3/}	5.15	21.62	29.07	11.73	16.89	476.46	1,661.79	211.28	99.20	2,448.74	-1.64	-2.97	-3.26	-0.67	-2.13	-85.18	-177.14	-42.51	-13.59	-318.41
2.5 Seasonal Constraint_URC_NoSF_LagTime ^{3/}	10.67	11.92	28.24	11.71	15.63	986.26	916.24	205.30	99.03	2,206.83	-3.81	-2.21	-3.26	-0.68	-2.49	-197.97	-131.87	-42.51	-13.79	-386.14
2.6 Seasonal Constraint_URC_WithSF_LagTime ^{3/}	13.23	13.63	28.86	12.01	16.94	1,223.61	1,048.05	209.81	101.58	2,583.05	-3.47	-2.21	-3.26	-0.69	-2.41	-180.38	-131.87	-42.51	-13.91	-368.68
2.7 Yearly Constraint_URC_NoSF_LagTime	-5.94	7.04	25.57	10.79	9.36	-549.13	540.87	185.83	91.27	268.85	-1.28	-2.03	-3.23	-0.64	-1.80	-66.74	-121.34	-42.21	-13.08	-243.37
2.8 Yearly Constraint_URC_WithSF_LagTime ^{4/}	-0.48	12.52	28.39	11.48	12.98	-44.36	962.14	206.38	97.06	1,221.23	-1.38	-2.15	-3.25	-0.66	-1.86	-71.96	-127.96	-42.49	-13.31	-255.73
2.9 Seasonal Constraint_85%ReducedKNBPS_NoSF_LagTime	17.29	20.88	16.06	0.85	13.77	1,598.52	1,605.05	116.71	7.17	3,327.45	-4.07	-3.04	-2.66	-0.43	-2.55	-211.49	-181.33	-34.67	-8.79	-436.29
2.10 Seasonal Constraint_URCBBSK_85%ReducedKNBPS_WithSF_LagTime	12.78	13.60	16.21	0.92	10.88	1,181.96	1,045.58	117.80	7.76	2,353.10	-3.39	-2.21	-2.66	-0.43	-2.17	-175.99	-131.87	-34.67	-8.72	-351.26
2.11 Yearly Constraint_85%ReducedKNBPS_NoSF_LagTime	-2.33	14.62	14.78	0.25	6.83	-215.37	1,123.57	107.44	2.09	1,017.74	-1.52	-2.43	-2.66	-0.40	-1.75	-78.93	-145.03	-34.67	-8.10	-266.74
2.12 Yearly Constraint_URCBBSK_85%ReducedKNBPS_	-1.09	12.26	15.81	0.43	6.85	-101.03	942.62	114.93	3.65	960.16	-1.30	-2.14	-2.66	-0.40	-1.62	-67.42	-127.45	-34.67	-8.16	-237.71

4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)

โครงการวิจัยเข็มนุ่ม ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด	การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกัก (เปอร์เซ็นต์) ^{1/}					การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกัก (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}					การลดลงของปริมาณน้ำระบาย (เปอร์เซ็นต์) ^{1/}					การลดลงของปริมาณน้ำระบาย (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}					
	BB	SK	KNB	PS	ALL ^{2/}	BB	SK	KNB	PS	ALL ^{2/}	BB	SK	KNB	PS	ALL ^{2/}	BB	SK	KNB	PS	ALL ^{2/}	
WithSF_LagTime																					
2.13 Yearly Constraint_85%ReducedKNBPS_20SFBB_10SFSK_LagTime	2.06	18.89	15.99	0.56	9.38	190.77	1,452.29	116.26	4.72	1,764.04	-1.30	-2.95	-2.66	-0.41	-1.83	-67.84	-176.20	-34.67	-8.38	-287.09	
2.14 Yearly Constraint_URCBBSK_85%ReducedKNBPS_20SFBB_10SFSK_LagTime ^{3/}	-2.12	11.30	15.81	0.39	6.34	-195.99	868.49	114.92	3.30	790.71	-1.07	-2.14	-2.66	-0.40	-1.57	-55.87	-127.51	-34.67	-8.17	-226.22	
กรณีใช้ปริมาณความต้องการน้ำที่ประมาณการจากภาพถ่ายดาวเทียม โดยกำหนด Requested Ratio = 0.6 ในปีที่มีปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนน้อยกว่า Satellite-Based NIR																					
2.15 Yearly Constraint_withSF_LagTime_SatDE	20.72	23.72	29.11	12.36	21.48	1,915.95	1,823.51	211.63	104.53	4,055.62	-4.93	-7.84	-3.20	-0.63	-4.15	-256.32	-467.74	-41.74	-12.73	-778.53	
2.16 Yearly Constraint_URCSK_20%SFBB_10%SFSK_LagTime_SatDE ^{4/}	13.64	13.20	29.08	12.04	16.99	1,261.45	1,014.64	211.40	101.81	2,589.31	0.73	-2.07	-3.14	-0.60	-1.27	37.73	-123.59	-40.96	-12.21	-139.03	
2.17 Yearly Constraint_10%SFBB_10%SFSK_LagTime_SatDE ^{4/}	14.48	23.41	29.11	12.31	19.83	1,338.66	1,799.14	211.59	104.12	3,453.51	-0.10	-2.95	-3.18	-0.62	-1.71	-5.17	-175.68	-41.58	-12.62	-235.05	

หมายเหตุ: ^{1/} วิเคราะห์ ณ วันที่ 31 เดือนตุลาคมของทุกปี

^{2/} ค่าเฉลี่ยของ BB, SK, KNB และ PS

^{3/} ปริมาณน้ำเก็บกักของบางเขื่อนยังอยู่ในเกณฑ์สูง

^{4/} แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดที่ให้ค่าประสิทธิภาพสอดคล้องตามเป้าหมายของงานวิจัย และนำมาอภิปรายผลในหัวข้อ 4.2.5.2.2

4.2.5.2.2 ประสิทธิภาพของแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด

จากข้อกำหนดและผลการจำลองระบบปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่แสดงผลข้างต้นจำนวน 20 สถานการณ์ งานวิจัยนี้ได้คัดเลือกแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด 3 รูปแบบที่ให้ค่าประสิทธิภาพสอดคล้องตามเป้าหมายของงานวิจัยเพื่อนำมาอภิปรายผลโดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

(1) แบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model)

ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระหว่างปี พ.ศ. 2543–2563 ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2 ตามที่ระบุคำอธิบายไว้ในตารางที่ 4–60 ซึ่งไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model) และกำหนดให้เป็นแบบจำลองรายฤดูกาลที่พิจารณา Side Flow เท่ากับ 20% พบว่า ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์เพิ่มสูงขึ้นคิดเป็น +15.73% และ +16.36% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องตามเป้าหมายของงานวิจัย อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ลดลง -12.20% และ -3.20% ตามลำดับ ดังรายละเอียดในตารางที่ 4–62 ในภาพรวมปริมาณน้ำเก็บกักทั้งระบบเพิ่มสูงขึ้น 2,469 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งประมาณ 49.12% เป็นส่วนของปริมาณน้ำท่าทางด้านท้ายเขื่อน หรือคิดเป็น 1,275 ล้านลูกบาศก์เมตร (หักลบกับผลการจำลองจากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.1) ที่นำมาพิจารณาปรับลดปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ลง ส่งผลให้ปริมาณน้ำต้นทุนของเขื่อนหลักเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณการระบายน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์จากแบบจำลองปรับลดลง แต่มีการปรับเพิ่มปริมาณน้ำระบายจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการระบายน้ำจริง ซึ่งเป็นน่าจะเป็นผลดีภายใต้แนวคิดในการดึงน้ำจากอ่างเก็บน้ำเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์มาใช้ก่อนในลำดับแรกหากมีน้ำเก็บกักเพียงพอ และประหยัดน้ำบางส่วนไว้ในเขื่อนเก็บกักขนาดใหญ่ทั้งเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในลำดับรองลงมา ยิ่งไปกว่านั้น ยังเป็นการลดความผันผวนของปริมาณน้ำเก็บกักของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ที่มีค่อนข้างสูงและมีโอกาสเสี่ยงที่น้ำจะเต็มความจุเขื่อนอยู่บ่อยครั้ง อย่างไรก็ตาม ปริมาณการระบายน้ำรายปีของทั้ง 4 เขื่อนหลักจากแบบจำลองลดลงเท่ากับ -318 ล้านลูกบาศก์เมตร และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายฤดูกาลพบว่า ให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายปีรูปแบบที่ 1.4 ดังแสดงในรูปที่ 4–73 ถึงรูปที่ 4–80

ตารางที่ 4-62 ประสิทธิภาพของการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบ
ข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2

ปี	ปีน้ำ	ช่วงการจำลองระบบ	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}		ปริมาณการระบายน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
			ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP
เขื่อนภูมิพล								
2543	NY	ช่วงการจำลอง#1	9,330.84	8,951.42	11,083.07	10,517.12	3,513.41	4,160.12
2544	NY		10,140.92	9,150.73	11,377.02	9,896.60	4,006.36	4,771.86
2545	WY		10,725.67	9,243.53	13,300.40	11,666.05	5,860.21	5,179.39
2546	NY	ช่วงการจำลอง#2	10,048.99	10,328.25	9,701.15	10,316.35	7,877.98	6,384.90
2547	NY		6,987.83	7,883.13	8,384.46	9,188.58	4,742.46	4,997.80
2548	NY		7,445.75	7,493.71	10,065.46	9,948.51	4,338.74	4,805.98
2549	WY		10,216.90	9,960.41	13,291.09	13,063.43	6,377.98	5,684.37
2550	NY		10,092.74	11,158.44	11,414.78	12,858.10	7,877.22	6,326.24
2551	NY	ช่วงการจำลอง#3	7,979.56	11,036.92	9,084.91	12,528.40	6,790.96	5,650.50
2552	NY		7,251.86	11,254.15	9,346.83	13,462.00	6,891.75	5,005.96
2553	NY		6,123.69	11,211.34	8,493.56	13,080.33	5,140.18	4,940.72
2554	WY		9,190.88	12,455.21	13,393.55	13,462.00	7,588.58	12,334.14
2555	NY		7,952.42	9,790.73	8,675.39	10,477.06	9,184.50	7,819.22
2556	NY		5,822.98	7,888.49	7,061.47	9,090.26	4,303.30	3,877.10
2557	DY		5,493.53	8,044.15	6,024.80	8,582.74	3,939.39	3,661.66
2558	DY		4,960.64	7,223.84	4,984.25	6,829.91	2,679.87	3,442.68
2559	NY		5,090.85	6,748.79	6,805.26	8,210.84	1,450.91	1,830.00
2560	NY		7,402.66	9,026.37	10,563.84	11,803.71	2,725.76	2,604.06
2561	NY		8,615.93	10,412.94	9,706.40	11,655.36	6,192.81	5,416.72
2562	DY	6,228.66	9,128.99	5,934.25	9,395.21	5,628.37	4,193.58	
2563	DY	4,821.73	8,260.55	5,464.27	8,659.30	2,157.55	2,657.12	
		ช่วงการจำลอง#1	10,065.81	9,115.23	11,920.16	10,693.26	4,459.99	4,703.79

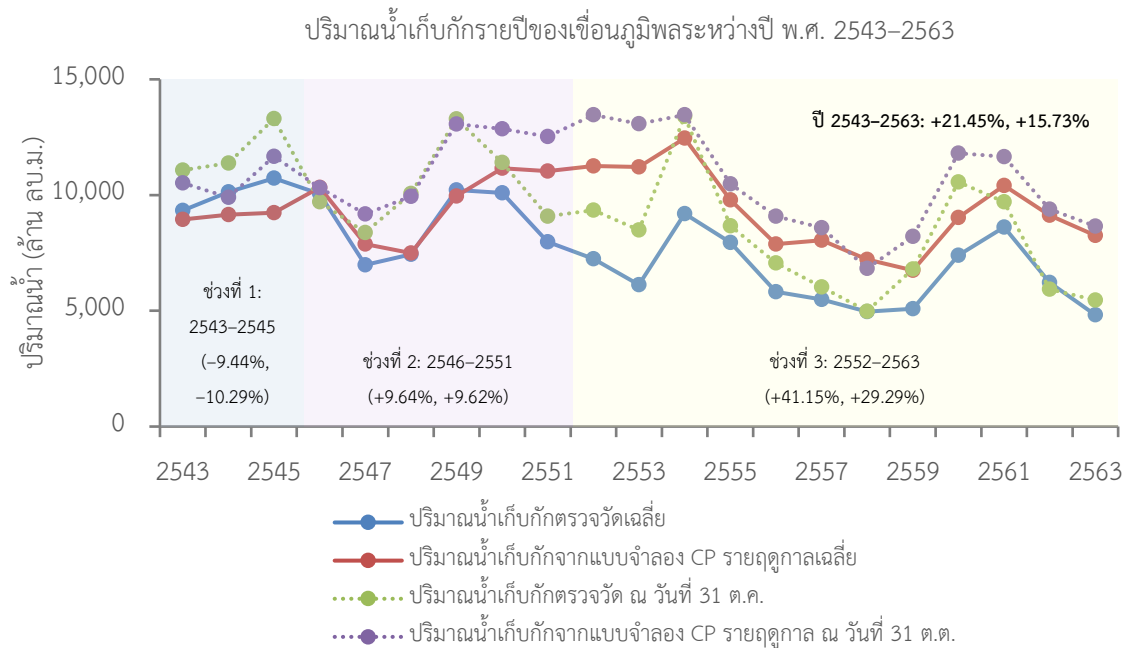
ปี	ปีน้ำ	ช่วงการจำลองระบบ	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}		ปริมาณการระบายน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
			ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP
ค่าเฉลี่ย		ช่วงการจำลอง#2	8,795.29	9,643.48	10,323.64	11,317.23	6,334.22	5,641.63
		ช่วงการจำลอง#3	6,579.65	9,287.13	8,037.82	10,392.39	4,823.58	4,815.25
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงการจำลอง#1	-	-950.58	-	-1,226.91	-	+243.80
		ช่วงการจำลอง#2	-	+848.18	-	+993.59	-	-692.59
		ช่วงการจำลอง#3	-	+2,707.48	-	+2,354.57	-	-8.33
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		ช่วงการจำลอง#1	-	-9.44	-	-10.29	-	+5.47
		ช่วงการจำลอง#2	-	+9.64	-	+9.62	-	-10.93
		ช่วงการจำลอง#3	-	+41.15	-	+29.29	-	-0.17
ค่าเฉลี่ย		2543-2563	7,710.72	9,364.39	9,245.53	10,699.61	5,203.25	5,035.44
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		2543-2563	-	+1,653.67	-	+1,454.08	-	-167.82
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		2543-2563	-	+21.45	-	+15.73	-	-3.23
เขื่อนสิริกิติ์								
2543	NY	ช่วงการจำลอง#1	7,774.09	8,477.20	9,388.91	9,510.00	5,997.58	5,642.35
2544	NY		7,701.71	8,568.37	9,360.68	9,510.00	7,299.84	7,434.03
2545	WY		7,506.07	8,419.56	9,121.15	9,510.00	6,447.38	6,689.79
2546	NY	ช่วงการจำลอง#2	7,226.50	7,426.03	8,320.82	8,448.52	6,791.38	6,487.19
2547	NY		6,863.16	7,454.74	9,335.06	9,510.00	6,247.96	5,711.89
2548	NY		6,536.59	8,227.31	8,609.16	9,510.00	6,568.46	6,322.43
2549	WY		7,068.91	8,233.08	9,458.38	9,510.00	6,324.50	7,077.61
2550	NY		6,661.95	7,252.26	7,446.41	8,484.03	6,737.34	5,730.01
2551	NY		6,134.98	7,737.54	8,301.44	9,510.00	6,252.54	6,460.30
2552	NY	ช่วงการจำลอง#3	5,582.18	8,333.26	6,023.04	9,450.77	6,715.62	3,911.93
2553	NY		5,177.57	8,337.34	7,783.72	9,508.85	3,931.85	5,872.04
2554	WY		7,160.96	8,863.84	9,494.50	9,510.00	9,396.29	11,028.47
2555	NY		5,809.13	6,397.66	6,586.82	6,742.27	8,153.12	8,224.21

ปี	ปีน้ำ	ช่วงการจำลองระบบ	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}		ปริมาณการระบายน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
			ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP
2556	NY	ช่วงการจำลอง#3	4,582.17	5,582.45	5,931.86	6,899.16	4,284.84	3,700.03
2557	DY		4,705.95	6,546.38	5,841.37	7,918.26	4,299.97	3,389.87
2558	DY		4,582.71	7,190.36	4,906.23	7,704.36	4,712.34	3,766.53
2559	NY		5,191.52	8,049.62	7,657.29	9,510.00	3,103.21	3,894.65
2560	NY		6,335.04	8,701.49	8,388.82	9,510.00	4,715.50	5,309.09
2561	NY		6,728.95	8,824.22	8,347.50	9,510.00	7,447.64	7,218.38
2562	DY		5,038.45	7,937.91	5,294.30	8,552.17	6,168.50	4,418.54
2563	DY		4,471.37	8,283.58	5,818.86	9,507.98	3,811.33	3,314.78
ค่าเฉลี่ย	ช่วงการจำลอง#1	7,660.62	8,488.38	9,290.25	9,510.00	6,581.60	6,588.72	
	ช่วงการจำลอง#2	6,748.68	7,721.83	8,578.55	9,162.09	6,487.03	6,298.24	
	ช่วงการจำลอง#3	5,447.17	7,754.01	6,839.53	8,693.65	5,561.68	5,337.38	
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)	ช่วงการจำลอง#1	-	+827.75	-	+219.75	-	+7.12	
	ช่วงการจำลอง#2	-	+973.15	-	+583.55	-	-188.79	
	ช่วงการจำลอง#3	-	+2,306.84	-	+1,854.13	-	-224.31	
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น	ช่วงการจำลอง#1	-	+10.81	-	+2.37	-	+0.11	
	ช่วงการจำลอง#2	-	+14.42	-	+6.80	-	-2.91	
	ช่วงการจำลอง#3	-	+42.35	-	+27.11	-	-4.03	
ค่าเฉลี่ย	2543-2563	6,135.24	7,849.72	7,686.49	8,944.11	5,971.77	5,790.67	
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)	2543-2563	-	+1,714.49	-	+1,257.62	-	-181.10	
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น	2543-2563	-	+27.94	-	+16.36	-	-3.03	
เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน								
2552	NY		261.89	171.60	557.70	416.57	920.74	1,731.16
2553	NY		411.39	233.98	779.85	724.06	1,196.38	1,340.92
2554	WY		602.19	429.99	942.06	780.18	2,899.93	2,986.08
2555	NY		436.23	110.11	732.20	112.55	1,211.39	1,103.40

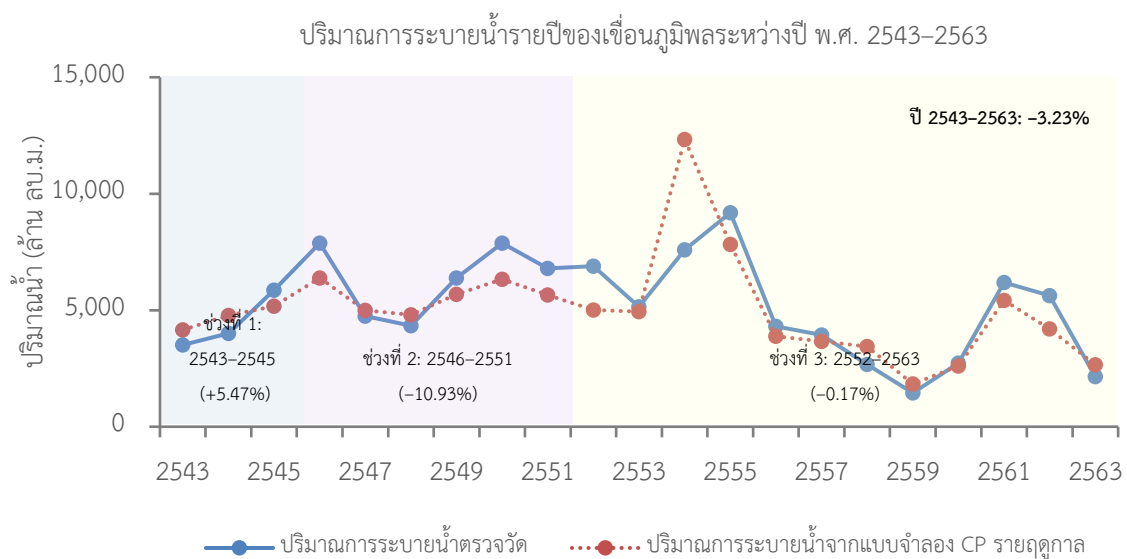
ปี	ปีน้ำ	ช่วงการจำลองระบบ	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}		ปริมาณการระบายน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
			ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP
2556	NY	ช่วงการจำลอง#3	494.32	338.11	895.29	939.00	1,533.37	1,110.10
2557	DY		416.12	321.44	783.80	767.83	923.51	767.13
2558	DY		331.94	253.51	412.65	364.55	792.07	857.30
2559	NY		482.67	465.22	945.63	939.00	967.43	1,147.28
2560	NY		647.73	395.37	974.70	939.00	2,662.98	3,171.18
2561	NY		508.23	207.97	740.20	655.53	1,162.79	978.32
2562	DY		368.23	200.39	496.00	506.70	755.77	489.34
2563	DY		321.82	219.26	462.81	514.12	641.36	429.15
ค่าเฉลี่ย		ช่วงการจำลอง#3	440.23	278.91	726.91	638.26	1,305.64	1,342.61
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงการจำลอง#3	-	-161.32	-	-88.65	-	+36.97
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		ช่วงการจำลอง#3	-	-36.64	-	-12.20	-	+2.83
ค่าเฉลี่ย		2543-2563	440.23	278.91	726.91	638.26	1,305.64	1,342.61
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		2543-2563	-	-161.32	-	-88.65	-	+36.97
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		2543-2563	-	-36.64	-	-12.20	-	+2.83
เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์								
2546	NY	ช่วงการจำลอง#2	518.79	359.48	816.50	542.62	1,711.81	2,074.26
2547	NY		482.77	225.13	820.00	619.85	1,784.26	1,801.04
2548	NY		467.00	208.50	853.25	596.61	719.93	684.51
2549	WY		585.66	330.03	916.25	813.17	3,086.85	2,897.28
2550	NY		540.86	409.57	979.69	711.93	2,461.72	2,471.30
2551	NY		517.74	340.04	953.00	848.99	2,727.03	2,615.13
2552	NY		566.73	614.96	946.00	960.00	2,143.81	1,932.71
2553	NY		477.30	773.13	976.41	960.00	3,260.88	3,277.69
2554	WY	600.01	791.62	1,020.71	959.41	4,469.45	4,667.28	
2555	NY	411.74	349.71	778.10	775.14	1,145.74	1,149.66	

ปี	ปีน้ำ	ช่วงการจำลองระบบ	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}		ปริมาณการระบายน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
			ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP
2556	NY	ช่วงการจำลอง#3	433.73	479.30	963.28	960.00	2,109.78	1,902.49
2557	DY		448.32	736.83	816.50	960.00	1,151.13	1,158.09
2558	DY		348.37	674.87	640.10	926.72	846.40	634.56
2559	NY		480.65	786.60	984.61	960.00	2,096.13	2,418.68
2560	NY		539.18	783.19	958.25	960.00	3,706.43	3,605.16
2561	NY		470.92	683.16	740.84	960.00	2,296.85	2,191.62
2562	DY		254.55	349.53	351.38	440.32	546.96	673.39
2563	DY		271.29	340.05	709.10	782.39	276.92	273.53
ค่าเฉลี่ย		ช่วงการจำลอง#2	518.80	312.12	889.78	688.86	2,081.93	2,090.59
		ช่วงการจำลอง#3	441.90	613.58	823.77	883.67	2,004.21	1,990.41
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงการจำลอง#2	-	-206.68	-	-200.92	-	+8.65
		ช่วงการจำลอง#3	-	+171.68	-	+59.89	-	-13.80
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		ช่วงการจำลอง#2	-	-39.84	-	-22.58	-	+0.42
		ช่วงการจำลอง#3	-	+38.85	-	+7.27	-	-0.69
ค่าเฉลี่ย		2543-2563	467.53	513.09	845.78	818.73	2,030.12	2,023.80
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		2543-2563	-	+45.56	-	-27.05	-	-6.32
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		2543-2563	-	+9.74	-	-3.20	-	-0.31

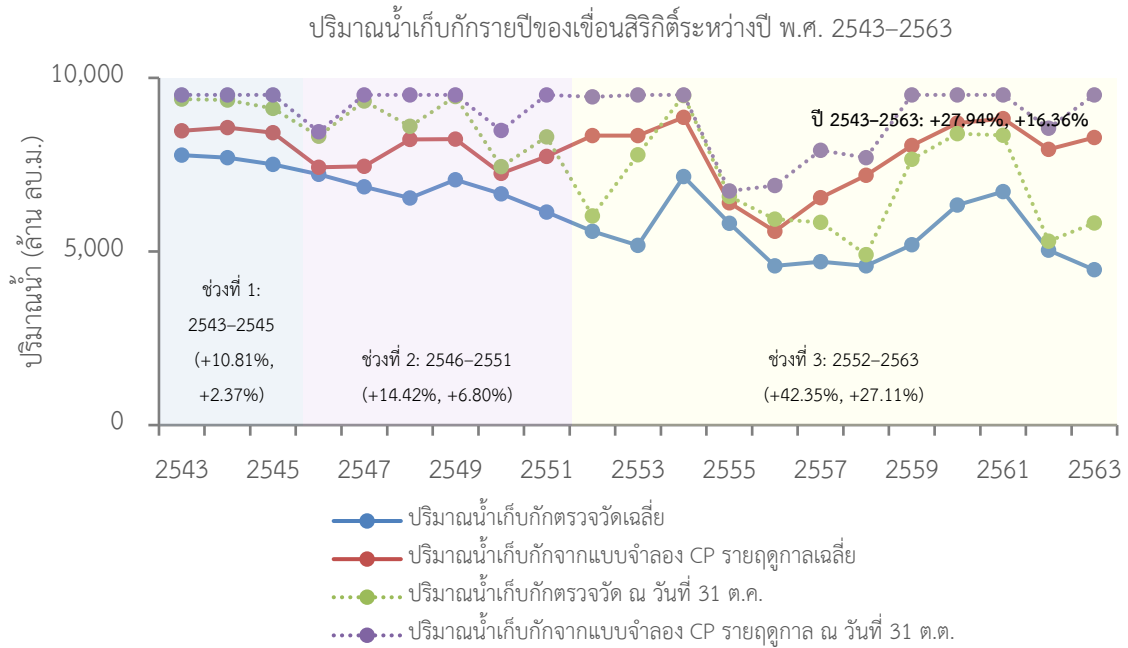
หมายเหตุ: ^{1/} วิเคราะห์ ณ วันที่ 31 เดือนตุลาคมของทุกปี



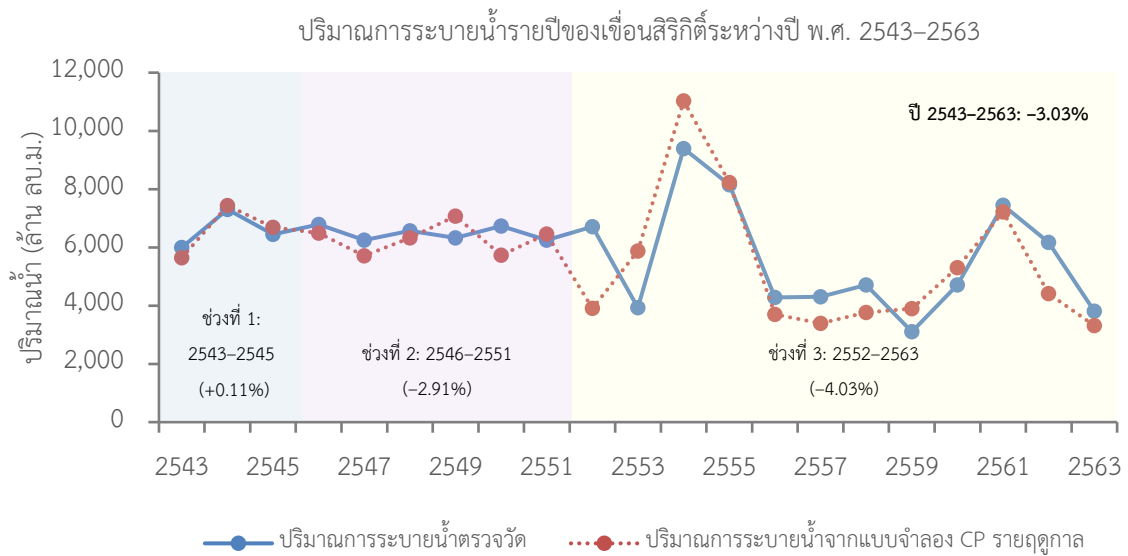
รูปที่ 4-73 ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2



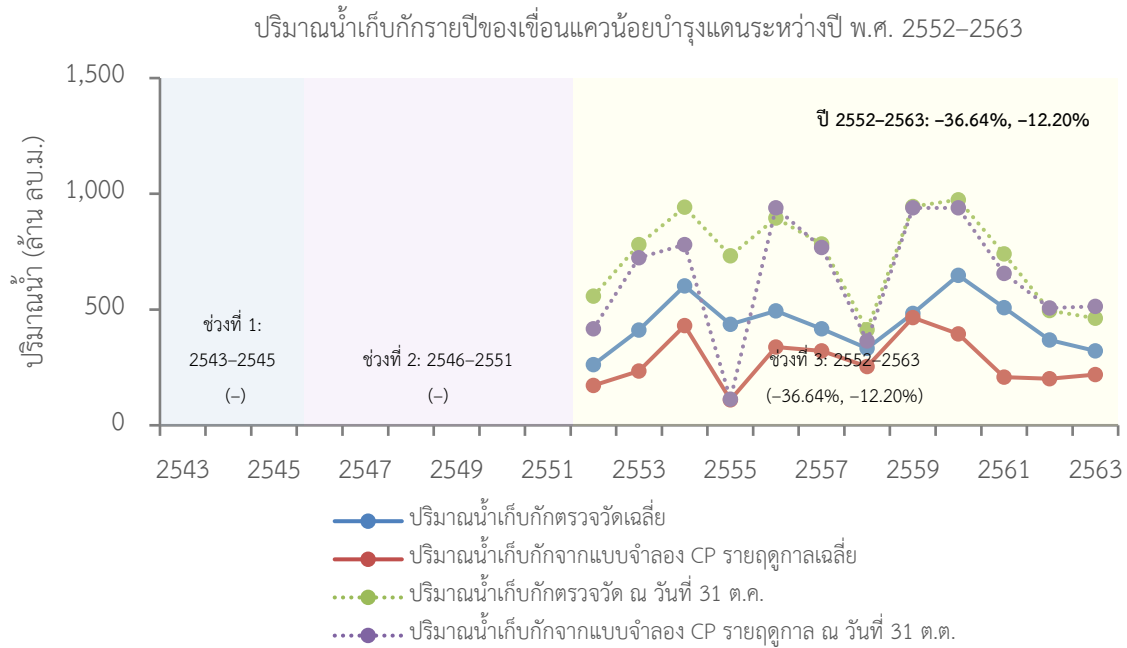
รูปที่ 4-74 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2



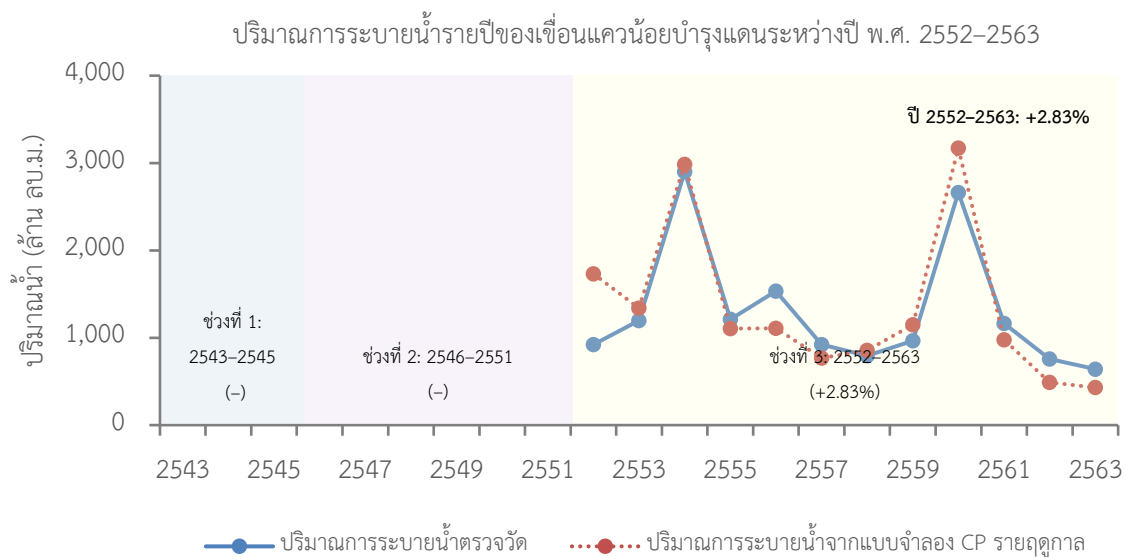
รูปที่ 4-75 ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2



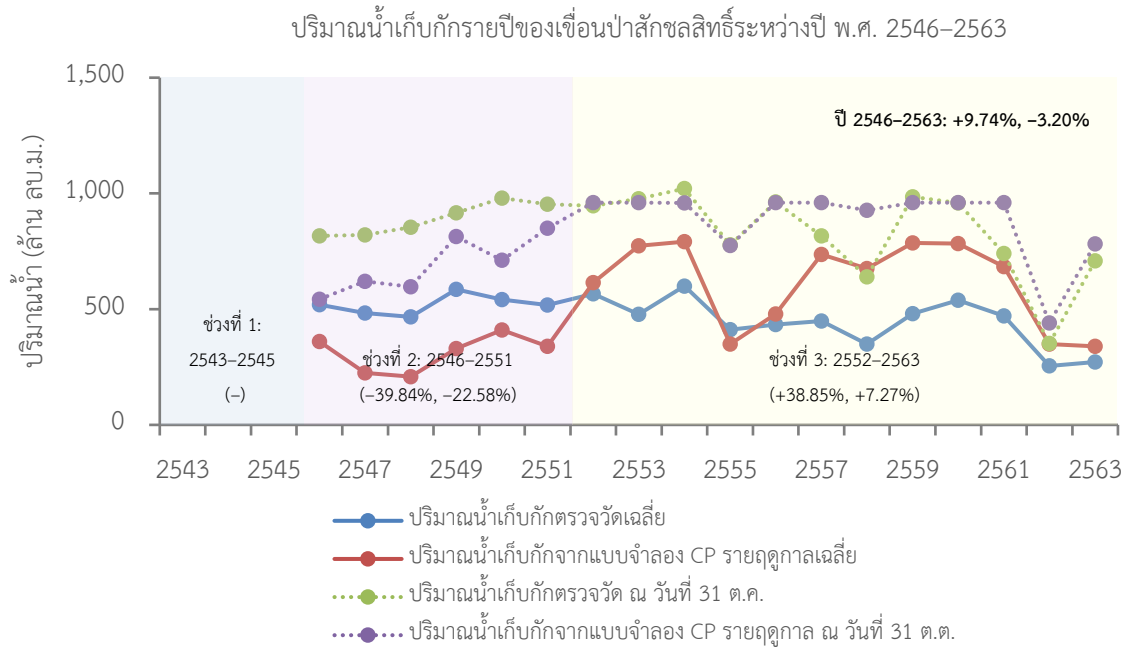
รูปที่ 4-76 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2



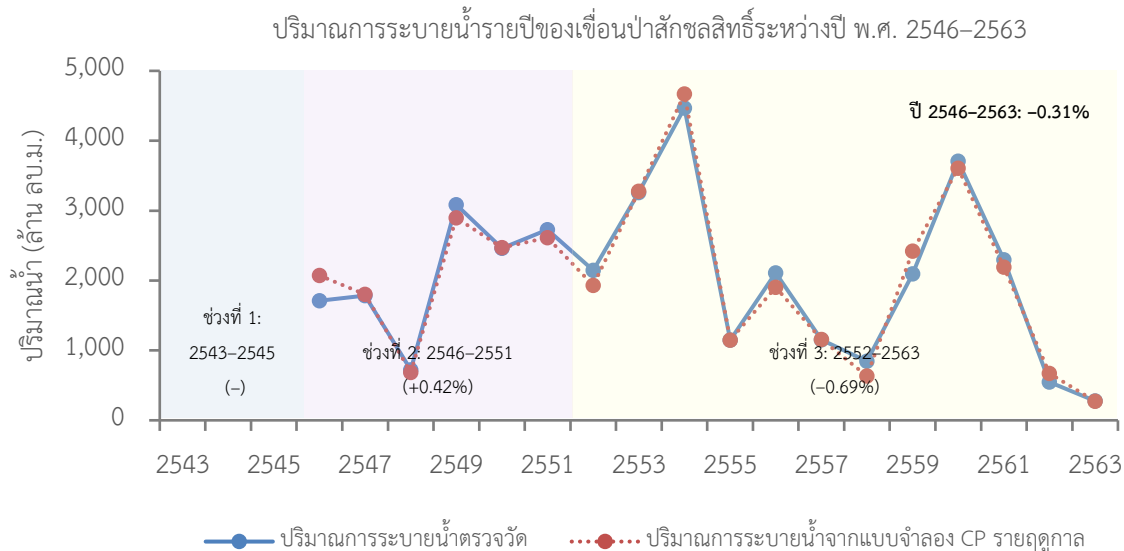
รูปที่ 4-77 ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2



รูปที่ 4-78 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2



รูปที่ 4-79 ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2



รูปที่ 4-80 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2

จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบอัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักที่ได้จากการจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรายฤดูกาลในรูปแบบที่ 1.2 กับผลการปฏิบัติงานจริงที่ได้กล่าวรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 4.2.1.3 เพื่อศึกษาแนวทางปฏิบัติในการบริหารเขื่อนพบว่า อัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนหลัก

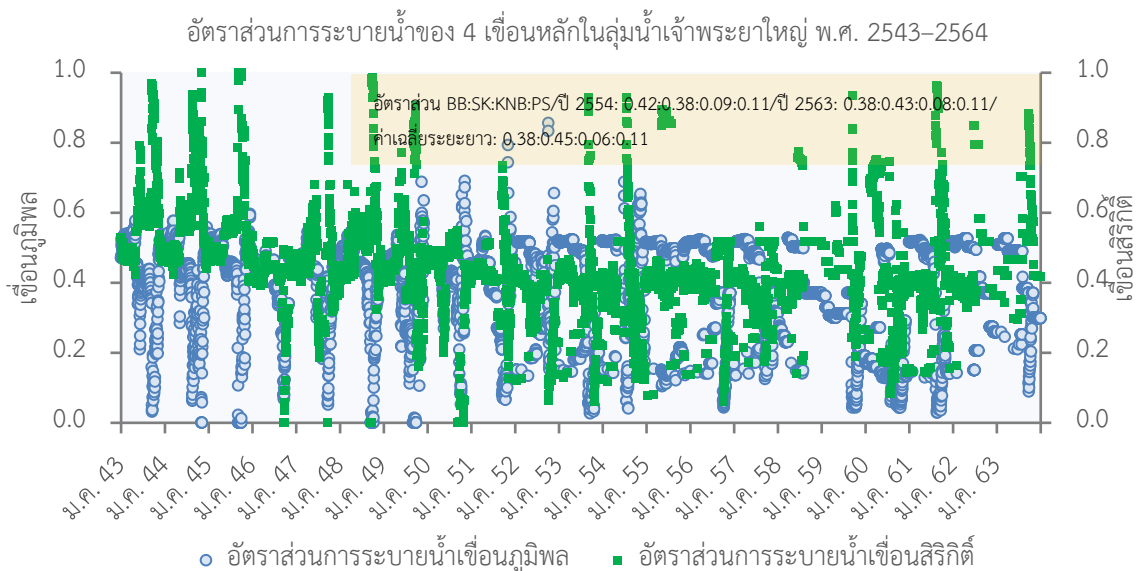
ในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ในกรณีวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการระบายน้ำของทุกเขื่อนได้แก่ ภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์จากฐานข้อมูลระยะยาวระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 ระยะสั้น แยกตามปีน้ำและฤดูกาล ปีที่เกิดอุทกภัย พ.ศ. 2554 และปีที่เกิดวิกฤตภัยแล้ง พ.ศ. 2563 มีลักษณะแตกต่างกันกับผลการปฏิบัติงานจริงอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ อัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล : เขื่อนสิริกิติ์ : เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน : เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เฉลี่ยระยะยาวจากแบบจำลองเท่ากับ 0.38:0.45:0.06:0.11 และในช่วงฤดูแล้งของปีน้ำน้อย ปีน้ำปกติ และปีน้ำมากเท่ากับ 0.41:0.41:0.12:0.06, 0.43:0.42:0.07:0.08 และ 0.49:0.42:0.03:0.06 ตามลำดับ และในช่วงฤดูฝนของปีน้ำน้อย ปีน้ำปกติ และปีน้ำมากเท่ากับ 0.39:0.49:0.05:0.08, 0.32:0.46:0.06:0.17 และ 0.32:0.53:0.03:0.12 ในขณะที่ในช่วงสถานการณ์วิกฤตน้ำท่วมใหญ่ ปี พ.ศ. 2554 และสถานการณ์วิกฤตน้ำแล้ง ปี พ.ศ. 2563 อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักเท่ากับ 0.42:0.38:0.09:0.11 และ 0.38:0.43:0.08:0.11 ตามลำดับ

จากกล่าวสรุปได้ว่า แบบจำลองการโปรแกรมข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2 กำหนดบทบาทของทั้ง 4 เขื่อนในการระบายน้ำเพื่อตอบสนองความต้องการน้ำแตกต่างไปจากเดิม กล่าวคือ อัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล : เขื่อนสิริกิติ์ : เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน : เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เฉลี่ยระยะยาวจากเดิมเท่ากับ 0.36:0.45:0.07:0.12 ไปเป็น 0.38:0.45:0.06:0.11 โดยในภาพรวมระยะยาวอัตราส่วนการระบายน้ำจากของเขื่อนสิริกิติ์ที่ได้จากแบบจำลองยังคงสูงกว่าเขื่อนภูมิพล และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ยังคงสูงกว่าเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนนี้ผันแปรแตกต่างกันปีน้ำและปัจจัยฤดูกาล อีกทั้งมีการเพิ่มอัตราการระบายน้ำจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์สูงขึ้นจากผลการปฏิบัติงานจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูแล้งของปีน้ำน้อยและปีน้ำปกติ ซึ่งแบบจำลองมีการเพิ่มการระบายน้ำจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนสูงขึ้นจากเดิมในอัตรา 0.09 ไปเป็น 0.12 ในปีน้ำน้อย และอัตรา 0.06 ไปเป็น 0.07 ในปีน้ำปกติ ในขณะที่อัตราส่วนการระบายน้ำในช่วงฤดูฝนของปีน้ำน้อยซึ่งแบบจำลองมีการปรับลดอัตราการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ลงเล็กน้อยแต่ยังคงสูงกว่าเขื่อนภูมิพล และปรับเพิ่มปริมาณการระบายน้ำในช่วงฤดูฝนของปีน้ำปกติและปีน้ำมากสูงขึ้น ในขณะที่ อัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลปรับลดลงมาอย่างชัดเจนในปีน้ำมากซึ่งแตกต่างจากแนวทางการปฏิบัติงานจริงเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4-81 ถึงรูปที่ 4-84

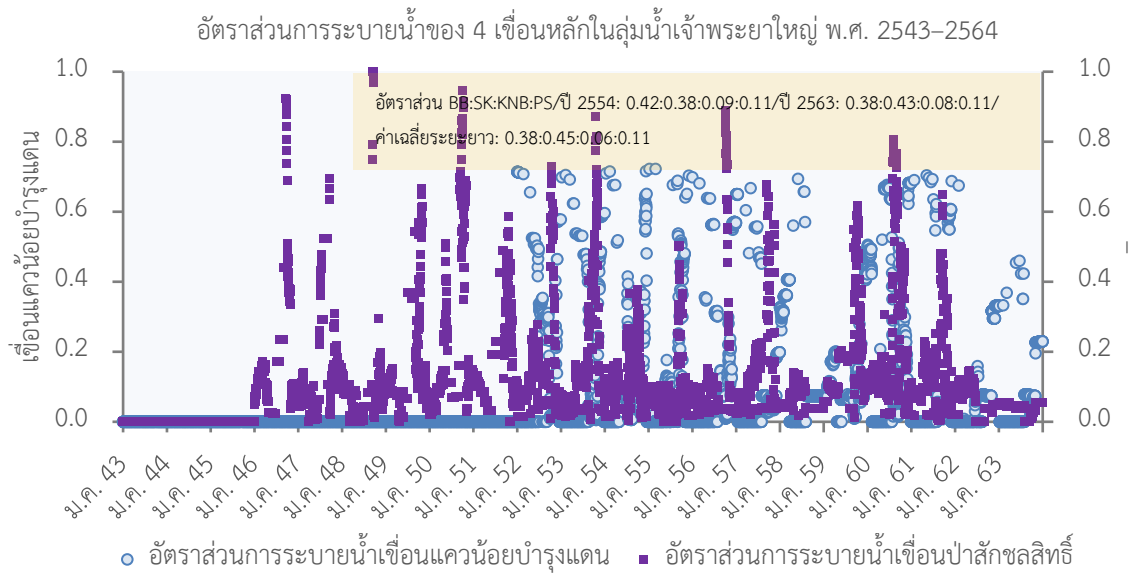
ในช่วงเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ปี พ.ศ. 2554 จะเห็นได้ชัดว่า แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดมีแนวทางการบริหารเขื่อนในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่แตกต่างไปจากผลการปฏิบัติงานเดิมอย่างชัดเจน กล่าวคือ มีการปรับเพิ่มอัตราส่วนการระบายน้ำจาก 3 เขื่อนหลัก ได้แก่ เขื่อนภูมิพล เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ และมีการปรับลดอัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนสิริกิติ์ล่วงหน้า โดยเริ่มปรับเพิ่มอัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลสูงขึ้นและปรับลดอัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนสิริกิติ์ตั้งแต่ต้นกลางฤดูฝนในเดือนกรกฎาคมและมีแนวโน้มสูงขึ้นถึงเดือนพฤศจิกายน ดังแสดงในรูปที่ 4-85 ในขณะที่บทบาทของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ถูกเพิ่มความสำคัญและการระบายน้ำเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่เดือนมิถุนายนและมีแนวโน้มสูงขึ้นถึงเดือนธันวาคม เพื่อเป็นการพร่องน้ำล่วงหน้าในการบรรเทาความเสียหายรุนแรงของอุทกภัยที่เกิดขึ้นนั่นเอง ในขณะที่ ผลการปฏิบัติงานจริงในช่วงเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ ปี

พ.ศ. 2554 พบว่า มีการเพิ่มระบายน้ำเฉพาะเขื่อนภูมิพลในเดือนสิงหาคมถึงเดือนพฤศจิกายนในช่วงที่เกิดเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ ซึ่งแนวทางดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงแนวทางการบริหารเขื่อนที่แตกต่างกัน

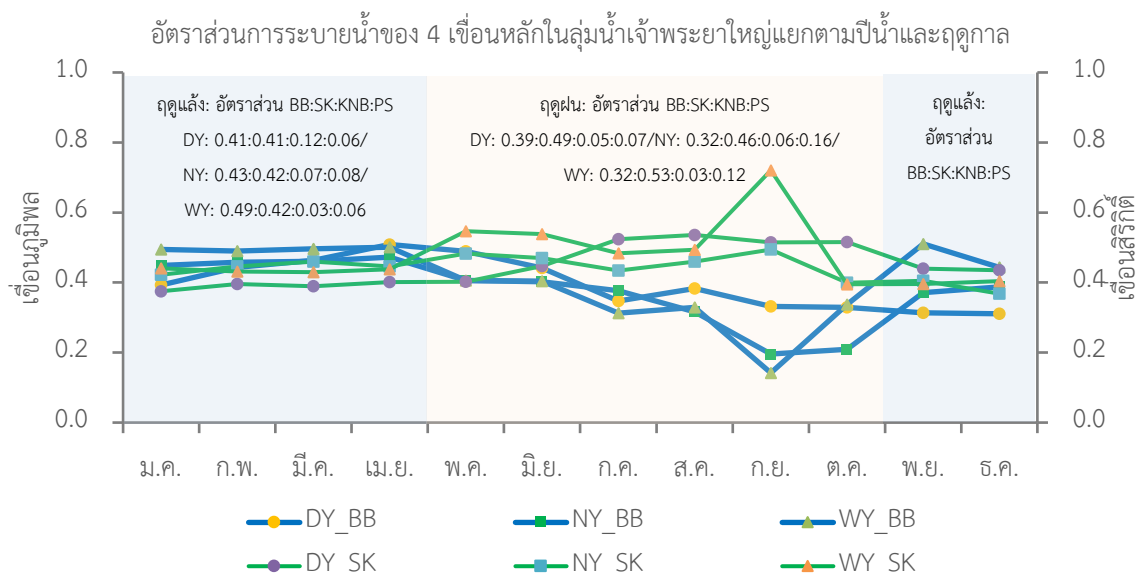
ในช่วงสถานการณ์วิกฤตน้ำแล้งในปี พ.ศ. 2563 ซึ่งแนวทางปฏิบัติงานเดิมมีการกำหนดอัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์สูงกว่าเขื่อนภูมิพล เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ตามลำดับ ตลอดทั้งปี อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดมีรูปแบบผันแปรตามปัจจัยฤดูกาลมากขึ้น กล่าวคือ บทบาทของเขื่อนสิริกิติ์ในการตอบสนองความต้องการน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงฤดูฝนของปีวิกฤตน้ำแล้ง และปรับลดอัตราการระบายน้ำลงเล็กน้อยโดยดึงน้ำจากเขื่อนภูมิพลมาช่วยเสริมความต้องการในช่วงกลางถึงปลายฤดูแล้งตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน นอกจากนี้ บทบาทของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนในช่วงฤดูฝนของปีวิกฤตน้ำแล้งยังมีแนวโน้มสูงขึ้นตั้งแต่เดือนกรกฎาคมถึงเดือนธันวาคม และยิ่งสูงกว่าเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4-86



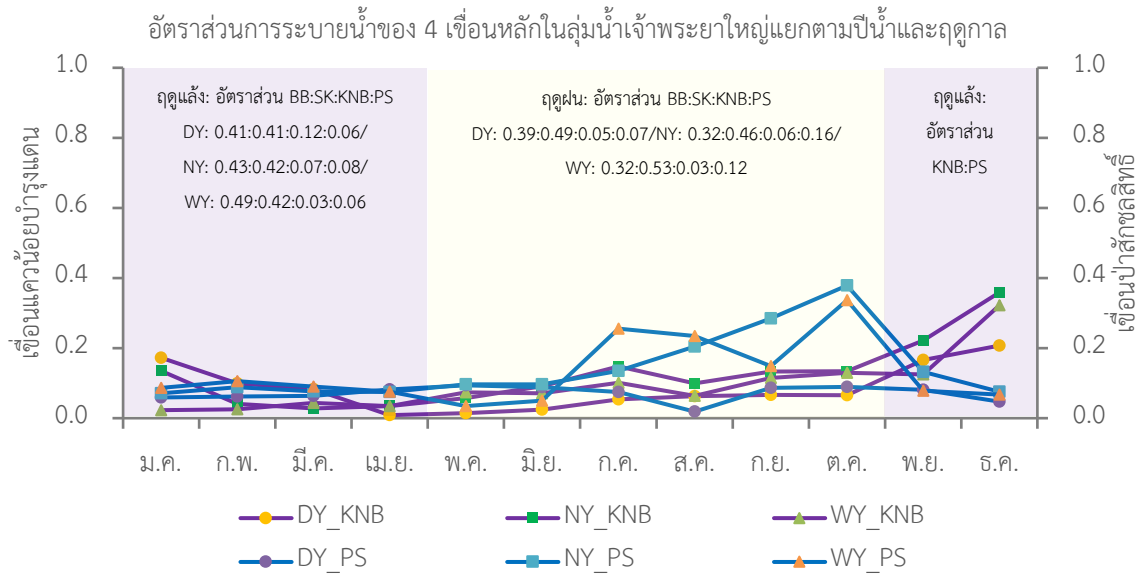
รูปที่ 4-81 อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่รายวันจากผลการจำลองด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2



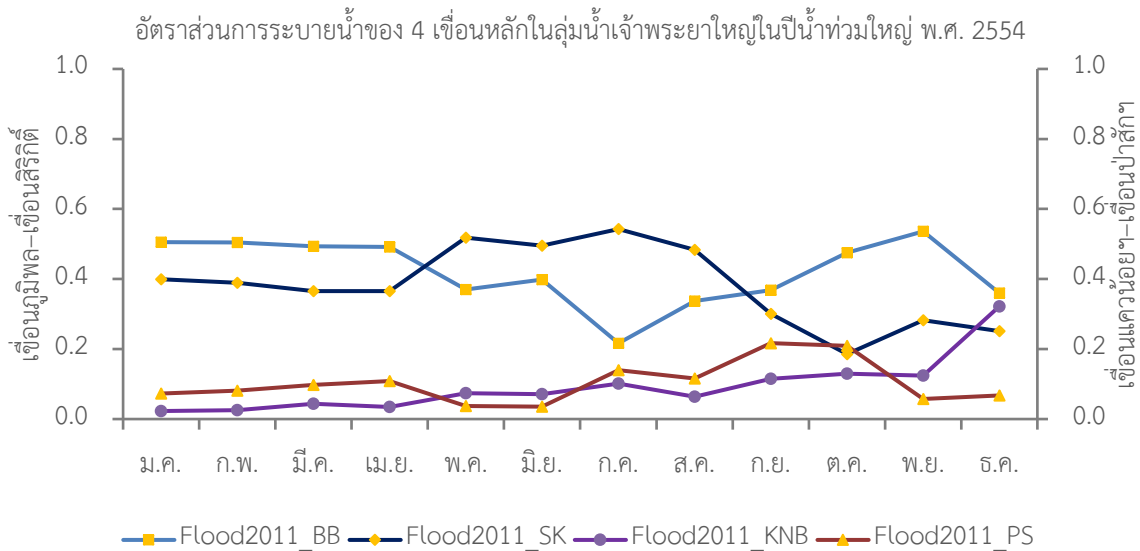
รูปที่ 4-82 อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เชื้อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่รายวันจากผลการจำลองด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2



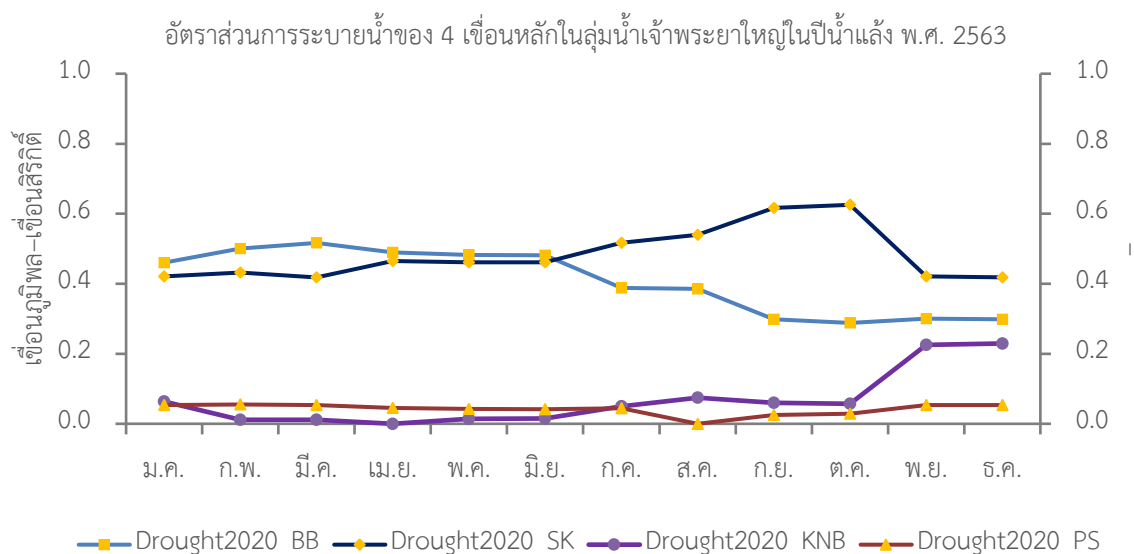
รูปที่ 4-83 อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เชื้อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่แยกตามปีน้ำและฤดูกาลจากผลการจำลองด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2



รูปที่ 4-84 อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่แยกตามปีน้ำและฤดูการจากผลการจำลองด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบรูปแบบที่ 1.2



รูปที่ 4-85 อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ในปีน้ำท่วมใหญ่ พ.ศ. 2554 จากผลการจำลองด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2



รูปที่ 4-86 อัตราส่วนการระบายน้ำของ 4 เชื้อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ในปีน้ำแล้ง พ.ศ. 2563 จากผลการจำลองด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2

(2.1) แบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model)

ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระหว่างปี พ.ศ. 2543–2563 ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8 ตามที่ระบุคำอธิบายไว้ในตารางที่ 4-60 ซึ่งได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model) และกำหนดให้เป็นแบบจำลองรายปีที่พิจารณา Side Flow เท่ากับ 20% อีกทั้งปรับลดปริมาณน้ำเก็บกักของทุกเขื่อนไม่ให้เกินปริมาณน้ำเก็บกักที่ระดับความสูงสูงสุด URC ด้วยเหตุผลที่จะป้องกันการไหลล้นอ่างที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้กับทุกเขื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ที่ปัจจัยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำมีความแปรปรวนสูง ผลการจำลองได้สรุปรายละเอียดไว้ในตารางที่ 4-63 ในภาพรวมพบว่าปริมาณน้ำเก็บกักทั้งระบบเพิ่มสูงขึ้น 1,221 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็น 12.98% อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนของเขื่อนภูมิพลลดลงจากผลการปฏิบัติงานจริง -0.48% และปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนของเขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เพิ่มสูงขึ้นคิดเป็น +12.52%, +28.39% และ +11.48% ตามลำดับ และปริมาณการระบายน้ำรายปีของทั้ง 4 เชื้อนหลักจากแบบจำลองลดลงเท่ากับ -256 ล้านลูกบาศก์เมตร อย่างไรก็ตาม แนวทางการบริหารเขื่อนจากผลการจำลองด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8 มีลักษณะแตกต่างจากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2 ที่ได้กล่าวมาข้างต้น กล่าวคือ ปริมาณน้ำเก็บกักของเขื่อนเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เพิ่มสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4-87 ถึงรูปที่ 4-94

ตารางที่ 4-63 ประสิทธิภาพของการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบ
ข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8

ปี	ปีน้ำ	ช่วงการจำลองระบบ	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}		ปริมาณการระบายน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
			ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP
เขื่อนภูมิพล								
2543	NY	ช่วงการจำลอง#1	9,326.55	8,780.56	11,083.07	10,229.52	3,412.55	4,484.38
2544	NY		10,140.92	8,429.06	11,377.02	9,045.88	4,006.36	5,322.35
2545	WY		10,725.67	8,093.90	13,300.40	10,361.83	5,860.21	5,698.71
2546	NY	ช่วงการจำลอง#2	10,048.99	8,441.72	9,701.15	8,287.70	7,877.98	6,880.46
2547	NY		6,987.83	6,219.49	8,384.46	7,673.41	4,742.46	4,467.48
2548	NY		7,445.75	6,394.73	10,065.46	8,952.29	4,338.74	4,446.19
2549	WY		10,216.90	8,855.10	13,291.09	12,296.05	6,377.98	5,398.84
2550	NY		10,092.74	9,990.48	11,414.78	11,876.80	7,877.22	6,630.86
2551	NY	ช่วงการจำลอง#3	7,979.56	9,690.33	9,084.91	11,126.16	6,790.96	5,812.86
2552	NY		7,251.86	9,542.45	9,346.83	11,871.91	6,891.75	5,569.48
2553	NY		6,123.69	9,134.85	8,493.56	11,129.75	5,140.18	5,524.30
2554	WY		9,190.88	10,085.80	13,393.55	12,214.00	7,588.58	11,496.75
2555	NY		7,952.42	7,762.31	8,675.39	8,063.46	9,184.50	8,563.10
2556	NY		5,822.98	5,989.68	7,061.47	7,328.72	4,303.30	3,533.07
2557	DY		5,493.53	6,316.07	6,024.80	7,022.02	3,939.39	3,255.18
2558	DY		4,960.64	5,757.36	4,984.25	5,510.02	2,679.87	3,187.18
2559	NY		5,090.85	5,407.83	6,805.26	6,874.70	1,450.91	2,014.83
2560	NY		7,402.66	7,049.50	10,563.84	9,812.80	2,725.76	3,544.01
2561	NY		8,615.93	8,193.53	9,706.40	9,557.41	6,192.81	5,304.28
2562	DY		6,228.66	6,976.64	5,934.25	7,250.68	5,628.37	4,109.14
2563	DY		4,821.73	6,232.28	5,464.27	6,739.59	2,157.55	2,412.75
		ช่วงการจำลอง#1	10,064.38	8,434.50	11,920.16	9,879.08	4,426.37	5,168.48

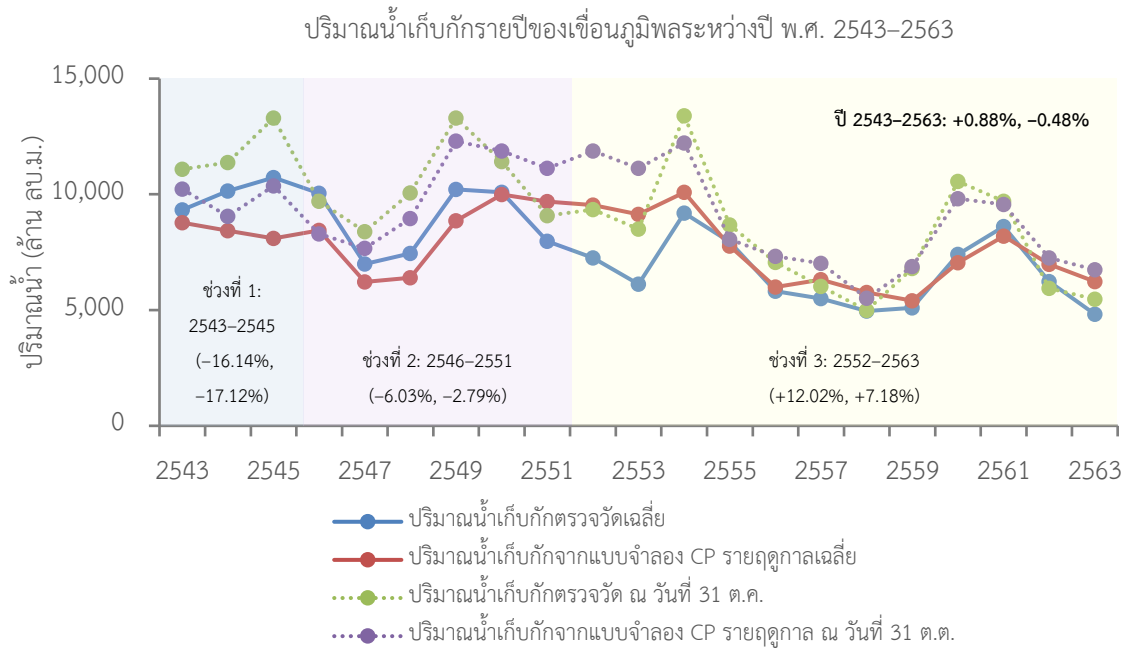
ปี	ปีน้ำ	ช่วงการจำลองระบบ	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}		ปริมาณการระบายน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
			ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP
ค่าเฉลี่ย		ช่วงการจำลอง#2	8,795.29	8,265.31	10,323.64	10,035.40	6,334.22	5,606.12
		ช่วงการจำลอง#3	6,579.65	7,370.69	8,037.82	8,614.59	4,823.58	4,876.17
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงการจำลอง#1	-	-1,629.88	-	-2,041.09	-	742.11
		ช่วงการจำลอง#2	-	-529.99	-	-288.24	-	-728.11
		ช่วงการจำลอง#3	-	+791.04	-	+576.77	-	+52.59
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		ช่วงการจำลอง#1	-	-16.19	-	-17.12	-	16.77
		ช่วงการจำลอง#2	-	-6.03	-	-2.79	-	-11.49
		ช่วงการจำลอง#3	-	+12.02	-	+7.18	-	+1.09
ค่าเฉลี่ย		2543-2563	7,710.51	7,778.27	9,245.53	9,201.18	5,198.45	5,126.49
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		2543-2563	-	+67.76	-	-44.36	-	-71.96
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		2543-2563	-	+0.88	-	-0.48	-	-1.38
เขื่อนสิริกิติ์								
2543	NY	ช่วงการจำลอง#1	7,739.04	7,880.71	9,388.91	9,000.00	5,850.75	5,973.35
2544	NY		7,701.71	7,877.41	9,360.68	8,897.56	7,299.84	7,510.73
2545	WY		7,506.07	7,801.22	9,121.15	8,977.72	6,447.38	6,474.30
2546	NY	ช่วงการจำลอง#2	7,226.50	7,719.23	8,320.82	8,662.60	6,791.38	5,843.49
2547	NY		6,863.16	7,425.93	9,335.06	8,935.46	6,247.96	6,572.43
2548	NY		6,536.59	7,684.41	8,609.16	8,986.76	6,568.46	6,209.21
2549	WY		7,068.91	7,814.48	9,458.38	8,994.97	6,324.50	7,051.90
2550	NY		6,661.95	7,630.70	7,446.41	8,910.89	6,737.34	4,732.24
2551	NY		6,134.98	7,810.06	8,301.44	8,933.45	6,252.54	7,398.51
2552	NY	ช่วงการจำลอง#3	5,582.18	7,444.31	6,023.04	7,993.92	6,715.62	5,016.29
2553	NY		5,177.57	7,383.74	7,783.72	8,915.11	3,931.85	5,087.38
2554	WY		7,160.96	7,840.65	9,494.50	8,916.82	9,396.29	11,172.24
2555	NY		5,809.13	6,845.07	6,586.82	7,738.17	8,153.12	6,401.66

ปี	ปีน้ำ	ช่วงการจำลองระบบ	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}		ปริมาณการระบายน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
			ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP
2556	NY	ช่วงการจำลอง#3	4,582.17	6,600.11	5,931.86	7,900.80	4,284.84	3,824.26
2557	DY		4,705.95	7,266.03	5,841.37	8,585.90	4,299.97	3,594.77
2558	DY		4,582.71	7,523.27	4,906.23	7,981.32	4,712.34	4,157.21
2559	NY		5,191.52	7,748.31	7,657.29	8,991.67	3,103.21	4,847.39
2560	NY		6,335.04	7,909.28	8,388.82	8,994.59	4,715.50	5,423.45
2561	NY		6,728.95	7,798.91	8,347.50	8,744.77	7,447.64	7,256.90
2562	DY		5,038.45	7,346.05	5,294.30	8,092.11	6,168.50	4,049.93
2563	DY		4,471.37	7,517.67	5,818.86	8,466.78	3,811.33	3,975.48
ค่าเฉลี่ย		ช่วงการจำลอง#1	7,648.94	7,853.11	9,290.25	8,958.43	6,532.66	6,652.79
		ช่วงการจำลอง#2	6,748.68	7,680.80	8,578.55	8,904.02	6,487.03	6,301.30
		ช่วงการจำลอง#3	5,447.17	7,435.28	6,839.53	8,443.50	5,561.68	5,400.58
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงการจำลอง#1	-	+204.17	-	-331.82	-	120.14
		ช่วงการจำลอง#2	-	+932.12	-	+325.48	-	-185.73
		ช่วงการจำลอง#3	-	+1,988.12	-	+1,603.97	-	-161.10
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		ช่วงการจำลอง#1	-	+2.67	-	-3.57	-	+1.84
		ช่วงการจำลอง#2	-	+13.81	-	+3.79	-	-2.86
		ช่วงการจำลอง#3	-	+36.50	-	+23.45	-	-2.90
ค่าเฉลี่ย		2543-2563	6,133.57	7,565.12	7,686.49	8,648.64	5,964.78	5,836.82
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		2543-2563	-	+1,431.55	-	+962.14	-	-127.96
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		2543-2563	-	+23.34	-	+12.52	-	-2.15
เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน								
2552	NY		261.89	533.73	557.70	939.00	920.74	524.44
2553	NY		411.39	884.43	779.85	939.00	1,196.38	1,339.85
2554	WY		602.19	915.01	942.06	939.00	2,899.93	3,069.89
2555	NY		436.23		732.20	939.00	1,211.39	1,065.16

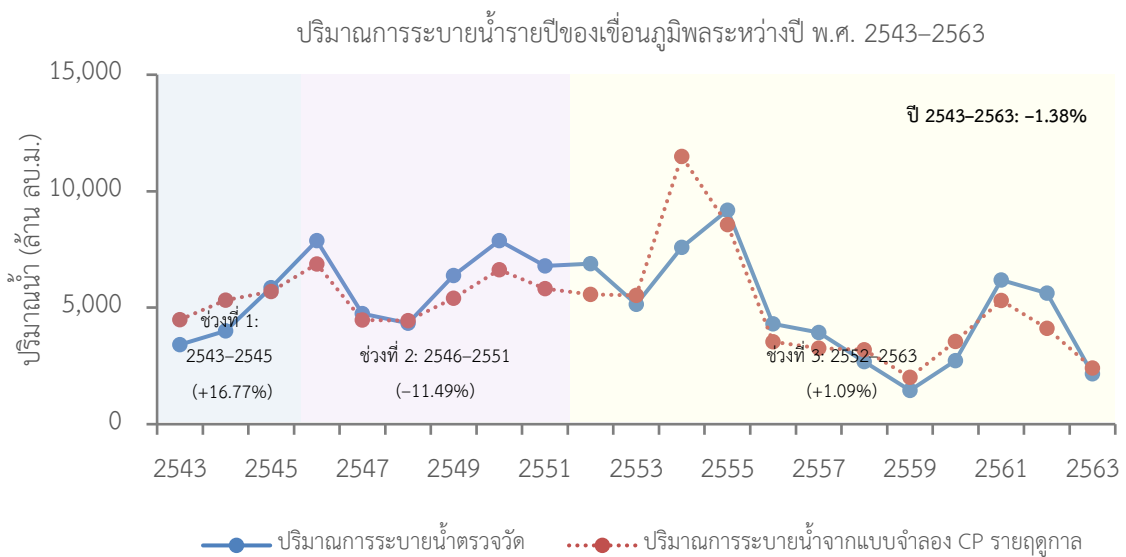
ปี	ปีน้ำ	ช่วงการจำลองระบบ	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}		ปริมาณการระบายน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
			ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP
2556	NY	ช่วงการจำลอง#3	494.32	815.81	895.29	939.00	1,533.37	1,428.77
2557	DY		416.12	836.23	783.80	939.00	923.51	1,032.94
2558	DY		331.94	776.94	412.65	875.18	792.07	553.08
2559	NY		482.67	844.15	945.63	939.00	967.43	1,351.72
2560	NY		647.73	858.48	974.70	939.00	2,662.98	2,650.34
2561	NY		508.23	834.74	740.20	939.00	1,162.79	1,029.55
2562	DY		368.23	755.30	496.00	934.25	755.77	534.75
2563	DY		321.82	825.74	462.81	939.00	641.36	577.33
ค่าเฉลี่ย		ช่วงการจำลอง#3	440.23	800.47	726.91	933.29	1,305.64	1,263.15
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงการจำลอง#3	-	+360.24	-	+206.38	-	-42.49
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		ช่วงการจำลอง#3	-	+81.83	-	+28.39	-	-3.25
ค่าเฉลี่ย		2543-2563	440.23	800.47	726.91	933.29	1,305.64	1,263.15
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		2543-2563	-	+360.24	-	+206.38	-	-42.49
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		2543-2563	-	+81.83	-	+28.39	-	-3.25
เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์								
2546	NY	ช่วงการจำลอง#2	518.79	773.30	816.50	950.24	1,711.81	1,607.89
2547	NY		482.77	754.19	820.00	926.79	1,784.26	1,763.06
2548	NY		467.00	647.05	853.25	952.87	719.93	864.44
2549	WY		585.66	797.78	916.25	960.00	3,086.85	3,059.91
2550	NY		540.86	813.58	979.69	960.00	2,461.72	2,315.55
2551	NY		517.74	829.99	953.00	960.00	2,727.03	2,851.97
2552	NY		566.73	795.69	946.00	960.00	2,143.81	2,015.15
2553	NY		477.30	792.74	976.41	960.00	3,260.88	3,278.21
2554	WY	600.01	864.98	1,020.71	958.68	4,469.45	4,606.66	
2555	NY	411.74	592.84	778.10	941.38	1, 145.74	1,019.40	

ปี	ปีน้ำ	ช่วงการจำลองระบบ	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}		ปริมาณการระบายน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
			ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP
2556	NY	ช่วงการจำลอง#3	433.73	655.55	963.28	960.00	2,109.78	2,118.00
2557	DY		448.32	775.40	816.50	960.00	1,151.13	1,133.17
2558	DY		348.37	741.57	640.10	958.89	846.40	631.14
2559	NY		480.65	828.37	984.61	960.00	2,096.13	2,387.32
2560	NY		539.18	879.84	958.25	960.00	3,706.43	3,659.97
2561	NY		470.92	813.54	740.84	960.00	2,296.85	2,138.80
2562	DY		254.55	589.88	351.38	722.27	546.96	421.43
2563	DY		271.29	601.12	709.10	960.00	276.92	430.47
ค่าเฉลี่ย		ช่วงการจำลอง#2	518.80	769.31	889.78	951.65	2,081.93	2,077.14
		ช่วงการจำลอง#3	441.90	744.29	823.77	938.44	2,004.21	1,986.64
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงการจำลอง#2	-	+250.51	-	+61.87	-	-4.80
		ช่วงการจำลอง#3	-	+302.39	-	+114.66	-	-17.56
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		ช่วงการจำลอง#2	-	+48.29	-	+6.95	-	-0.23
		ช่วงการจำลอง#3	-	+68.43	-	+13.92	-	-0.88
ค่าเฉลี่ย		2543-2563	467.53	752.63	845.78	942.84	2,030.12	2,016.81
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		2543-2563	-	+285.10	-	+97.06	-	-13.31
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		2543-2563	-	+60.98	-	+11.48	-	-0.66

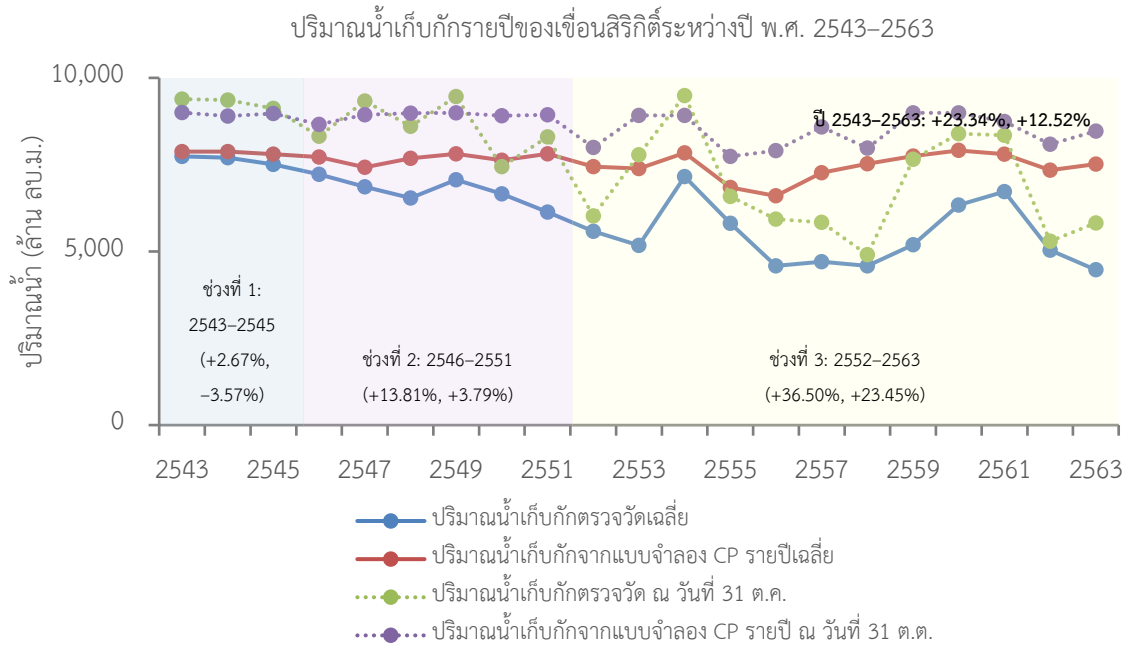
หมายเหตุ: ^{1/} วิเคราะห์ ณ วันที่ 31 เดือนตุลาคมของทุกปี



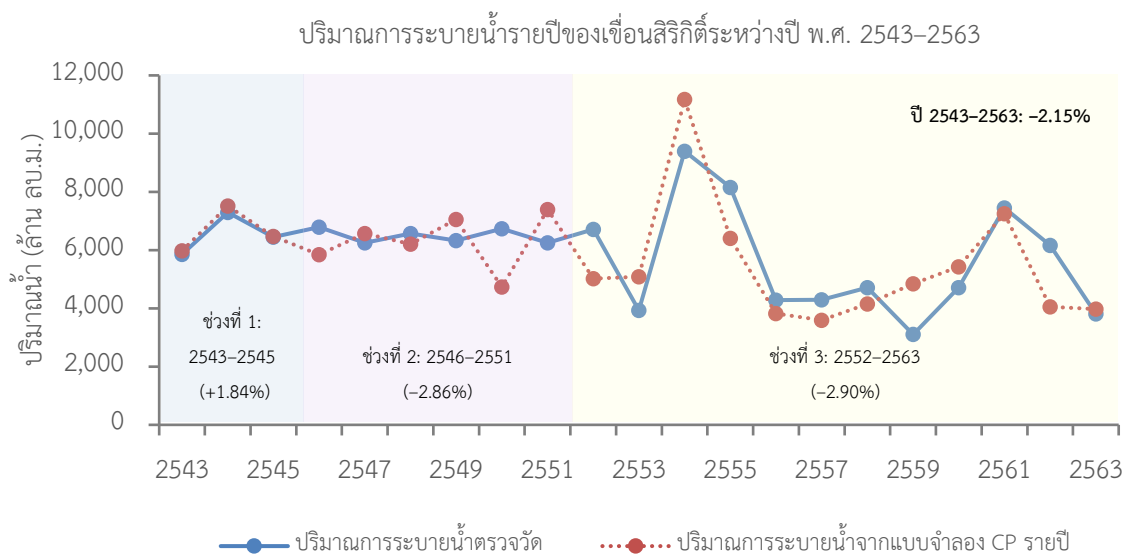
รูปที่ 4-87 ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8



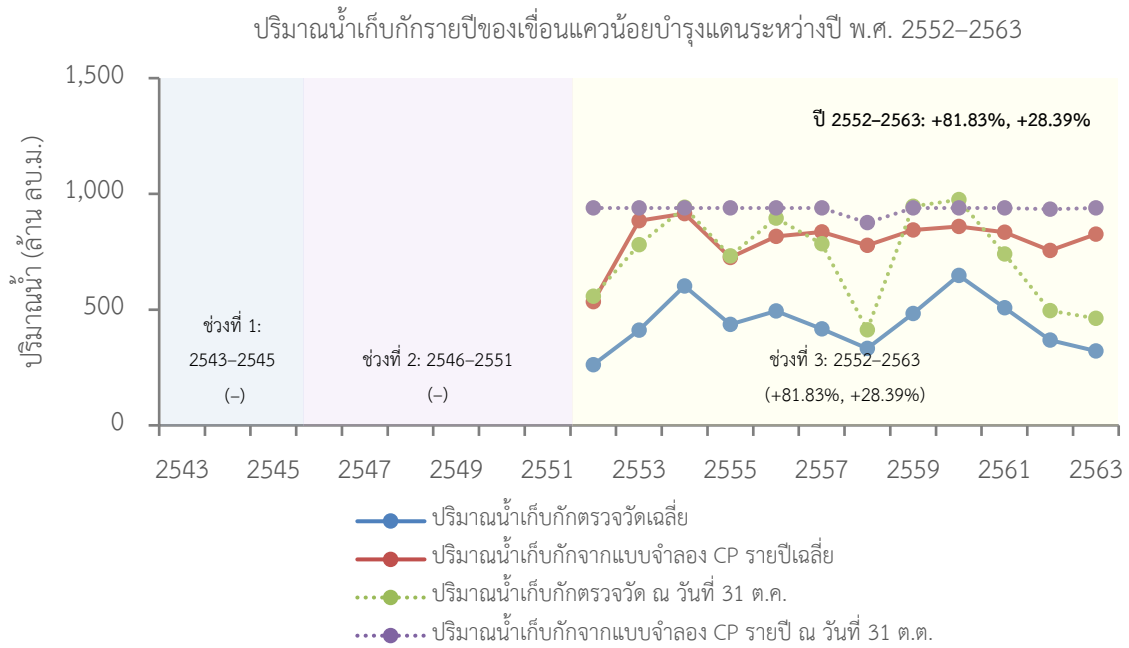
รูปที่ 4-88 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8



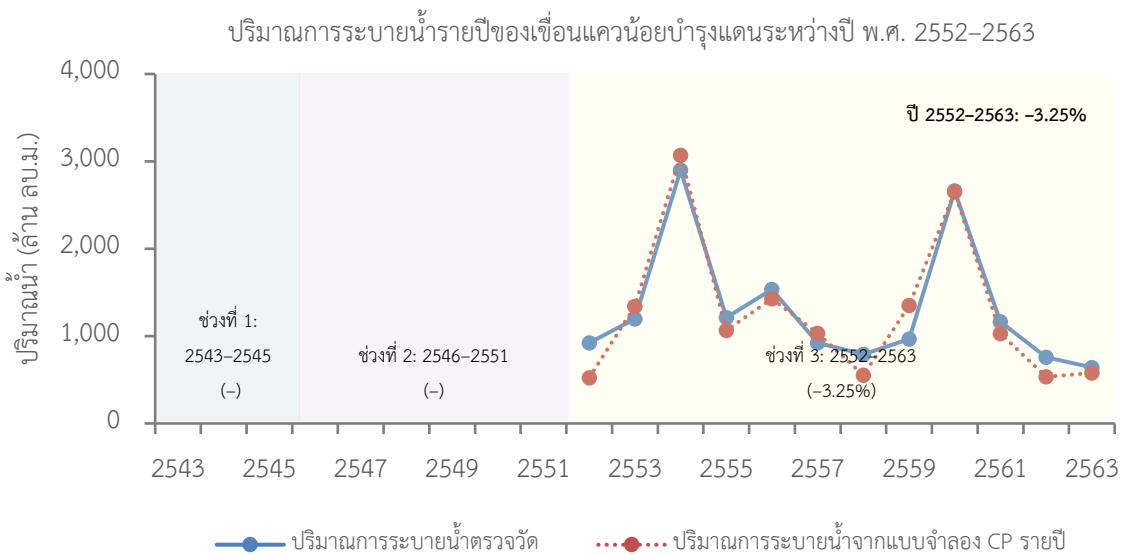
รูปที่ 4-89 ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8



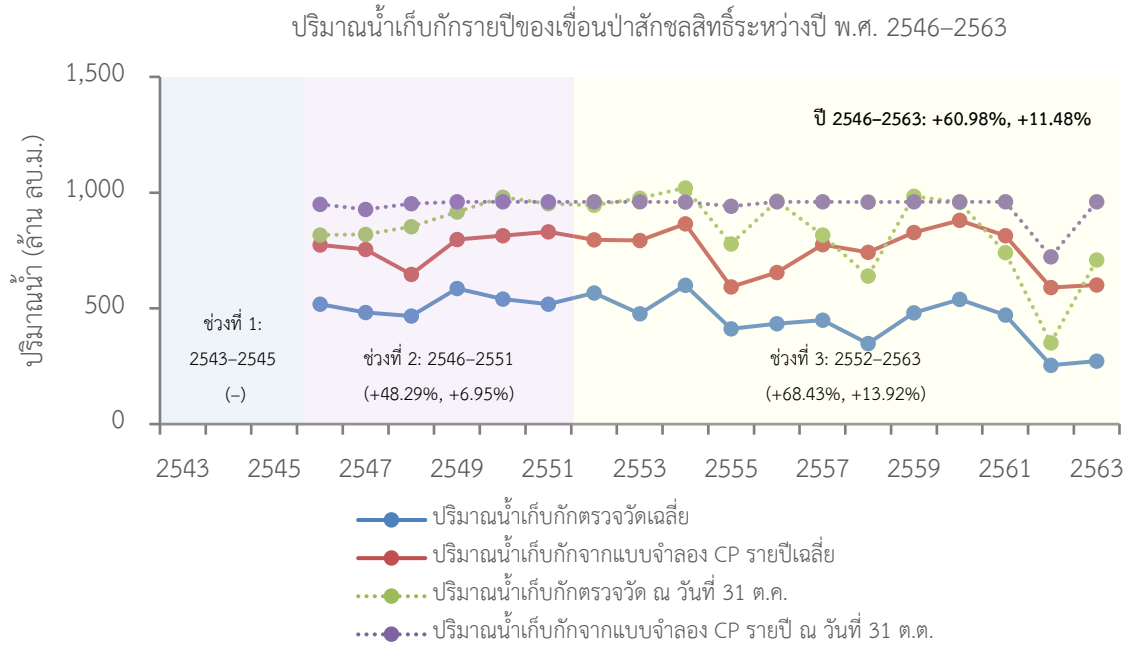
รูปที่ 4-90 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8



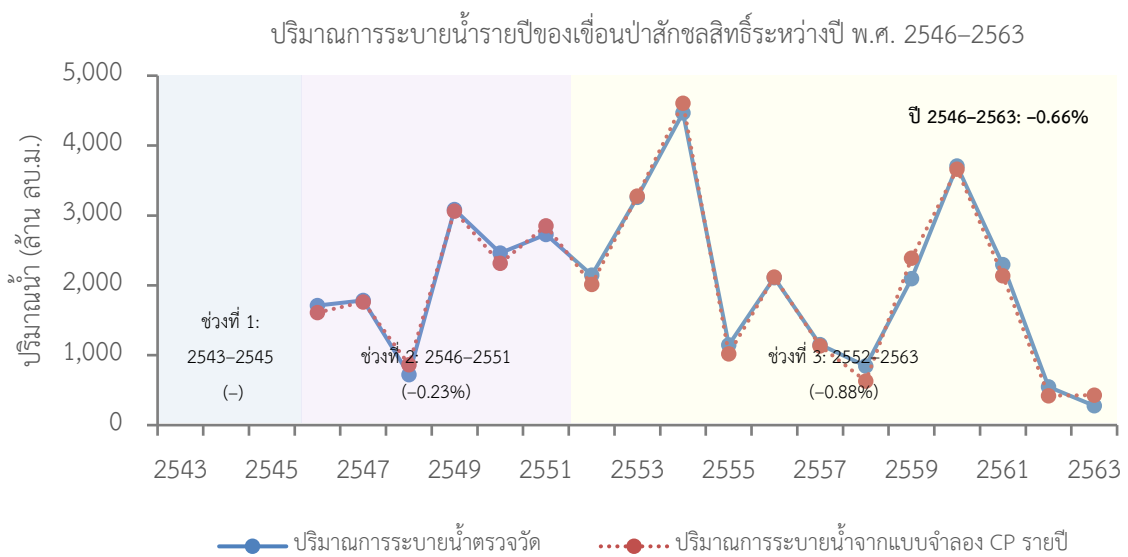
รูปที่ 4-91 ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8



รูปที่ 4-92 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8



รูปที่ 4-93 ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8



รูปที่ 4-94 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8

(2.2) แบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model)

ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16 ตามที่ระบุคำอธิบายไว้ในตารางที่ 4-60 ซึ่งได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model) และกำหนดให้เป็นแบบจำลองรายปีที่พิจารณา Side Flow ท้ายเขื่อนภูมิพลเท่ากับ 20% ท้ายเขื่อนสิริกิติ์เท่ากับ 10% อีกทั้งปรับลดปริมาณน้ำเก็บกักของเขื่อนสิริกิติ์ไม่ให้เกินปริมาณน้ำเก็บกักที่ระดับควบคุมสูงสุด URC ด้วยเหตุผลที่จะป้องกันการไหลล้นอ่างที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ ประกอบกับทำการปรับเปลี่ยนปัจจัยความต้องการน้ำโดยอาศัยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำที่ต้องจัดส่งเพื่อการเกษตรกรรมที่ได้จากการประมาณการจากภาพถ่ายดาวเทียม และกำหนด Requested Ratio = 0.6 ในปีที่มีปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนน้อยกว่า Satellite-Based NIR ผลการจำลองได้สรุปรายละเอียดไว้ในตารางที่ 4-64 ในภาพรวมพบว่า ปริมาณน้ำเก็บกักทั้งระบบเพิ่มขึ้นทุกเขื่อนรวมทั้งสิ้น 2,589 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็น 16.99% อย่างไรก็ตาม ปริมาณการระบายน้ำรายปีของทั้ง 4 เขื่อนหลักจากแบบจำลองลดลงเท่ากับ -667 ล้านลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4-95 ถึงรูปที่ 4-102 ในทำนองเดียวกันกับแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8 ผลการจำลองด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16 พบว่า ปริมาณน้ำเก็บกักของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์มีค่าเข้าใกล้ระดับเก็บกักปกติอยู่บ่อยครั้ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแบบจำลองทั้ง 2 รูปแบบได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ร่วมกับนำปัจจัยของปริมาณน้ำท่าท้ายเขื่อนมาปรับลดปริมาณการระบายน้ำลง ทำให้สามารถจัดส่งน้ำเพื่อตอบสนองโหนดความต้องการต่าง ๆ ได้อย่างเพียงพอและทั่วถึง

ตารางที่ 4-64 ประสิทธิภาพของการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบ
ข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16

ปี	ปีน้ำ	ช่วงการจำลองระบบ	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}		ปริมาณการระบายน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
			ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP
เขื่อนภูมิพล								
2543	NY	ช่วงการจำลอง#1	9,326.55	-	11,083.07	-	3,412.55	-
2544	NY		10,140.92	10,126.83	11,377.02	10,913.32	4,006.36	4,751.28
2545	WY		10,725.67	9,233.64	13,300.40	10,983.44	5,860.21	6,884.36
2546	NY	ช่วงการจำลอง#2	10,048.99	10,785.86	9,701.15	11,113.80	7,877.98	4,125.29
2547	NY		6,987.83	9,010.64	8,384.46	9,749.16	4,742.46	5,474.71
2548	NY		7,445.75	7,900.92	10,065.46	9,831.56	4,338.74	5,965.73
2549	WY		10,216.90	9,214.42	13,291.09	12,451.64	6,377.98	6,269.53
2550	NY		10,092.74	10,912.74	11,414.78	12,708.12	7,877.22	5,399.89
2551	NY	ช่วงการจำลอง#3	7,979.56	10,139.64	9,084.91	11,221.47	6,790.96	6,605.86
2552	NY		7,251.86	9,764.36	9,346.83	11,963.08	6,891.75	5,796.46
2553	NY		6,123.69	8,766.87	8,493.56	10,660.55	5,140.18	5,780.68
2554	WY		9,190.88	10,781.73	13,393.55	13,462.00	7,588.58	9,412.28
2555	NY		7,952.42	12,045.45	8,675.39	12,956.11	9,184.50	5,195.97
2556	NY		5,822.98	10,767.60	7,061.47	11,919.66	4,303.30	4,481.78
2557	DY		5,493.53	10,142.12	6,024.80	10,747.70	3,939.39	4,203.18
2558	DY		4,960.64	8,829.25	4,984.25	8,568.28	2,679.87	3,956.79
2559	NY		5,090.85	6,497.05	6,805.26	7,547.53	1,450.91	3,900.92
2560	NY		7,402.66	7,094.76	10,563.84	9,643.84	2,725.76	4,428.16
2561	NY		8,615.93	8,512.28	9,706.40	9,758.53	6,192.81	4,569.34
2562	DY		6,228.66	7,692.06	5,934.25	7,440.58	5,628.37	4,570.83
2563	DY		4,821.73	6,188.79	5,464.27	6,499.29	2,157.55	2,950.54
		ช่วงการจำลอง#1	10,064.38	9,680.24	11,920.16	10,948.38	4,426.37	3,878.55

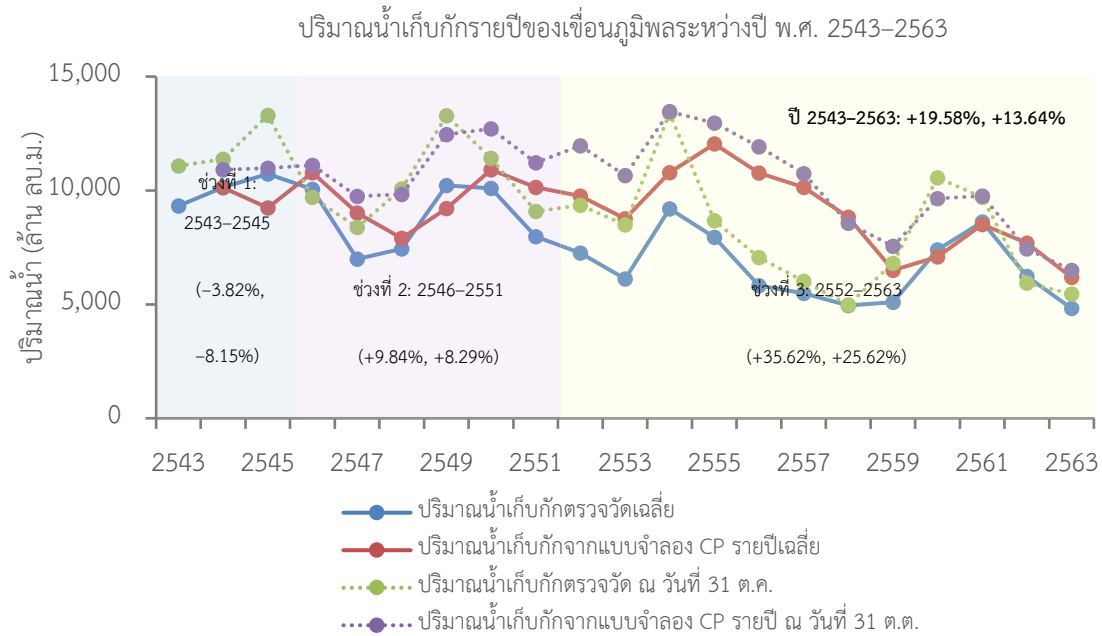
ปี	ปีน้ำ	ช่วงการจำลองระบบ	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}		ปริมาณการระบายน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
			ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP
ค่าเฉลี่ย		ช่วงการจำลอง#2	8,795.29	9,660.70	10,323.64	11,179.29	6,334.22	5,640.17
		ช่วงการจำลอง#3	6,579.65	8,923.53	8,037.82	10,097.26	4,823.58	4,937.24
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงการจำลอง#1	-	-384.14	-	-971.79	-	-547.83
		ช่วงการจำลอง#2	-	+865.41	-	+855.65	-	-694.05
		ช่วงการจำลอง#3	-	+2,343.87	-	+2,059.44	-	+113.66
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		ช่วงการจำลอง#1	-	-3.82	-	-8.15	-	-12.38
		ช่วงการจำลอง#2	-	+9.84	-	+8.29	-	-10.96
		ช่วงการจำลอง#3	-	+35.62	-	+25.62	-	+2.36
ค่าเฉลี่ย		2543-2563	7,710.51	9,220.35	9,245.53	10,506.98	5,198.45	4,986.84
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		2543-2563	-	+1,509.84	-	+1,261.45	-	-211.61
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		2543-2563	-	+19.58	-	+13.64	-	-4.07
เขื่อนสิริกิติ์								
2543	NY	ช่วงการจำลอง#1	7,739.04	-	9,388.91	-	5,850.75	-
2544	NY		7,701.71	7,910.49	9,360.68	8,974.06	7,299.84	7,520.33
2545	WY		7,506.07	7,677.80	9,121.15	8,918.43	6,447.38	6,528.33
2546	NY		7,226.50	7,842.90	8,320.82	8,607.91	6,791.38	5,336.66
2547	NY		6,863.16	7,746.28	9,335.06	8,790.41	6,247.96	6,937.07
2548	NY	ช่วงการจำลอง#2	6,536.59	7,596.07	8,609.16	8,989.19	6,568.46	6,339.11
2549	WY		7,068.91	7,698.88	9,458.38	8,972.98	6,324.50	7,091.89
2550	NY		6,661.95	7,810.57	7,446.41	8,893.75	6,737.34	4,463.28
2551	NY		6,134.98	7,782.12	8,301.44	8,900.01	6,252.54	7,388.31
2552	NY		5,582.18	7,496.36	6,023.04	7,961.79	6,715.62	5,182.12
2553	NY		5,177.57	7,227.44	7,783.72	8,902.48	3,931.85	4,950.17
2554	WY		7,160.96	7,918.49	9,494.50	8,994.97	9,396.29	10,829.96
2555	NY		5,809.13	7,890.65	6,586.82	8,673.22	8,153.12	5,343.11

ปี	ปีน้ำ	ช่วงการจำลองระบบ	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}		ปริมาณการระบายน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
			ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP
2556	NY	ช่วงการจำลอง#3	4,582.17	7,802.71	5,931.86	8,587.40	4,284.84	4,653.19
2557	DY		4,705.95	7,708.10	5,841.37	8,585.90	4,299.97	4,384.39
2558	DY		4,582.71	7,654.68	4,906.23	8,305.51	4,712.34	4,007.94
2559	NY		5,191.52	7,354.05	7,657.29	8,986.31	3,103.21	4,900.41
2560	NY		6,335.04	7,669.03	8,388.82	8,947.11	4,715.50	5,326.14
2561	NY		6,728.95	7,864.04	8,347.50	8,718.51	7,447.64	7,083.43
2562	DY		5,038.45	7,575.47	5,294.30	7,948.76	6,168.50	4,471.82
2563	DY		4,471.37	7,377.33	5,818.86	8,363.93	3,811.33	4,086.06
ค่าเฉลี่ย		ช่วงการจำลอง#1	7,648.94	7,794.14	9,290.25	8,946.25	6,532.66	4,682.89
		ช่วงการจำลอง#2	6,748.68	7,746.14	8,578.55	8,859.04	6,487.03	6,259.39
		ช่วงการจำลอง#3	5,447.17	7,628.20	6,839.53	8,581.32	5,561.68	5,434.90
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงการจำลอง#1	-	+145.20	-	-344.00	-	-1,849.77
		ช่วงการจำลอง#2	-	+997.46	-	+280.50	-	-227.64
		ช่วงการจำลอง#3	-	+2,181.03	-	+1,741.80	-	-126.79
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		ช่วงการจำลอง#1	-	+1.90	-	-3.70	-	-28.32
		ช่วงการจำลอง#2	-	+14.78	-	+3.27	-	-3.51
		ช่วงการจำลอง#3	-	+40.04	-	+25.47	-	-2.28
ค่าเฉลี่ย		2543-2563	6,133.57	7,680.17	7,686.49	8,701.13	5,964.78	5,563.04
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		2543-2563	-	+1,546.61	-	+1,014.64	-	-401.74
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		2543-2563	-	+25.22	-	+13.20	-	-6.74
เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน								
2552	NY		261.89	533.40	557.70	939.00	920.74	524.44
2553	NY		411.39	873.55	779.85	939.00	1,196.38	1,337.48
2554	WY		602.19	928.02	942.06	939.00	2,899.93	3,013.24
2555	NY		436.23	921.93	732.20	939.00	1,211.39	1,061.77

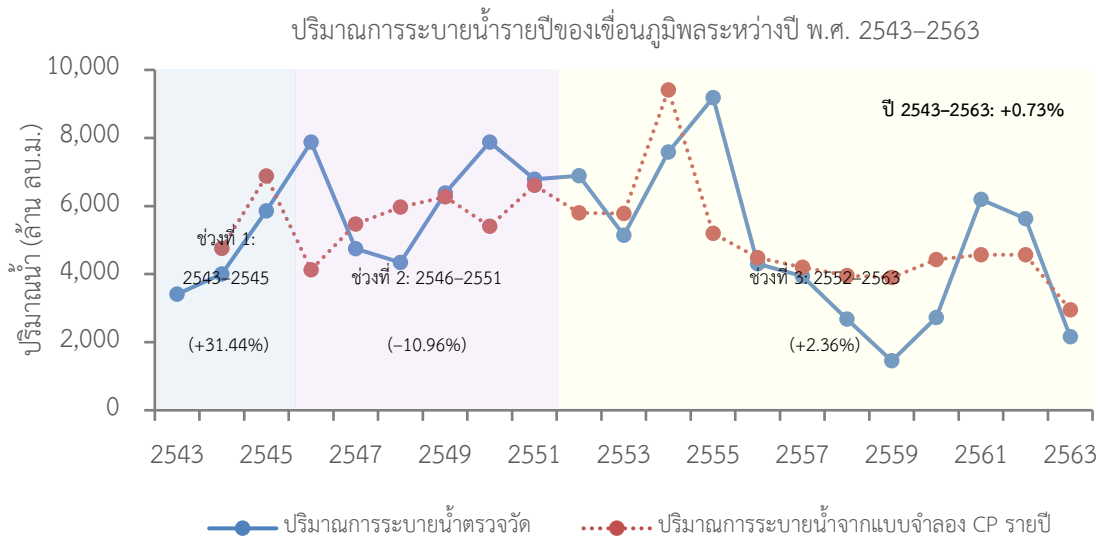
ปี	ปีน้ำ	ช่วงการจำลองระบบ	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}		ปริมาณการระบายน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
			ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP
2556	NY	ช่วงการจำลอง#3	494.32	917.13	895.29	939.00	1,533.37	1,484.34
2557	DY		416.12	890.03	783.80	939.00	923.51	1,050.49
2558	DY		331.94	843.00	412.65	939.00	792.07	513.26
2559	NY		482.67	806.89	945.63	939.00	967.43	1,383.51
2560	NY		647.73	835.94	974.70	939.00	2,662.98	2,635.34
2561	NY		508.23	893.63	740.20	939.00	1,162.79	1,004.81
2562	DY		368.23	835.55	496.00	930.75	755.77	585.58
2563	DY		321.82	823.84	462.81	939.00	641.36	581.99
ค่าเฉลี่ย		ช่วงการจำลอง#3	440.23	841.91	726.91	938.31	1,305.64	1,264.69
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงการจำลอง#3	-	+401.68	-	+211.40	-	-40.96
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		ช่วงการจำลอง#3	-	+91.24	-	+29.08	-	-3.14
ค่าเฉลี่ย		2543-2563	440.23	841.91	726.91	938.31	1,305.64	1,264.69
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		2543-2563	-	+401.68	-	+211.40	-	-40.96
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		2543-2563	-	+91.24	-	+29.08	-	-3.14
เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์								
2546	NY	ช่วงการจำลอง#2	518.79	864.07	816.50	951.77	1,711.81	1,547.24
2547	NY		482.77	823.26	820.00	913.25	1,784.26	1,813.78
2548	NY		467.00	658.05	853.25	954.62	719.93	886.48
2549	WY		585.66	787.69	916.25	960.00	3,086.85	3,066.41
2550	NY		540.86	883.17	979.69	960.00	2,461.72	2,277.89
2551	NY		517.74	838.15	953.00	960.00	2,727.03	2,856.63
2552	NY		566.73	819.22	946.00	960.00	2,143.81	2,033.97
2553	NY		477.30	785.01	976.41	960.00	3,260.88	3,264.54
2554	WY	600.01	884.64	1,020.71	959.80	4,469.45	4,549.20	
2555	NY	411.74	798.74	778.10	953.45	1,145.74	982.37	

ปี	ปีน้ำ	ช่วงการจำลองระบบ	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)		ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}		ปริมาณการระบายน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
			ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP	ข้อมูลสังเกต	แบบจำลอง CP
2556	NY	ช่วงการจำลอง#3	433.73	813.89	963.28	960.00	2,109.78	2,221.89
2557	DY		448.32	835.13	816.50	960.00	1,151.13	1,155.68
2558	DY		348.37	794.33	640.10	959.04	846.40	642.60
2559	NY		480.65	751.76	984.61	960.00	2,096.13	2,356.23
2560	NY		539.18	854.35	958.25	960.00	3,706.43	3,645.92
2561	NY		470.92	867.07	740.84	960.00	2,296.85	2,112.31
2562	DY		254.55	690.75	351.38	804.70	546.96	391.18
2563	DY		271.29	667.28	709.10	960.00	276.92	518.00
ค่าเฉลี่ย		ช่วงการจำลอง#2	518.80	809.07	889.78	949.94	2,081.93	2,074.74
		ช่วงการจำลอง#3	441.90	796.85	823.77	946.42	2,004.21	1,989.49
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงการจำลอง#2	-	+290.26	-	+60.16	-	-7.19
		ช่วงการจำลอง#3	-	+354.95	-	+122.64	-	-14.72
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		ช่วงการจำลอง#2	-	+55.95	-	+6.76	-	-0.35
		ช่วงการจำลอง#3	-	+80.32	-	+14.89	-	-0.73
ค่าเฉลี่ย		2543-2563	467.53	800.92	845.78	947.59	2,030.12	2,017.91
ผลต่าง (ล้าน ลบ.ม.)		2543-2563	-	+333.39	-	+101.81	-	-12.21
เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น		2543-2563	-	+71.31	-	+12.04	-	-0.60

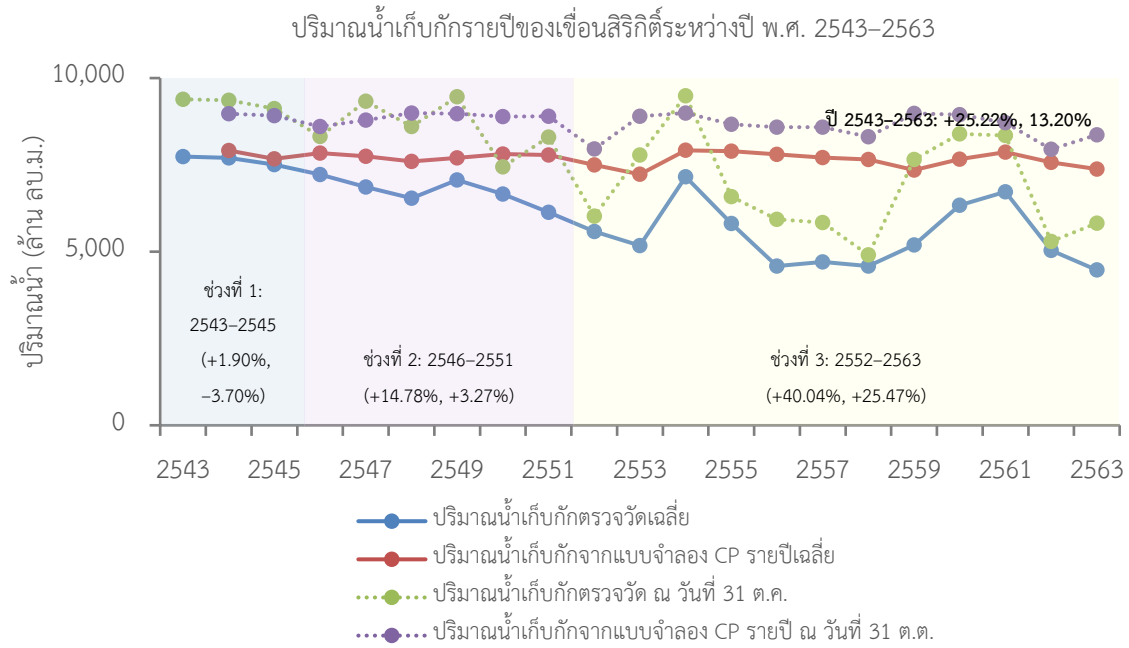
หมายเหตุ: ^{1/} วิเคราะห์ ณ วันที่ 31 เดือนตุลาคมของทุกปี



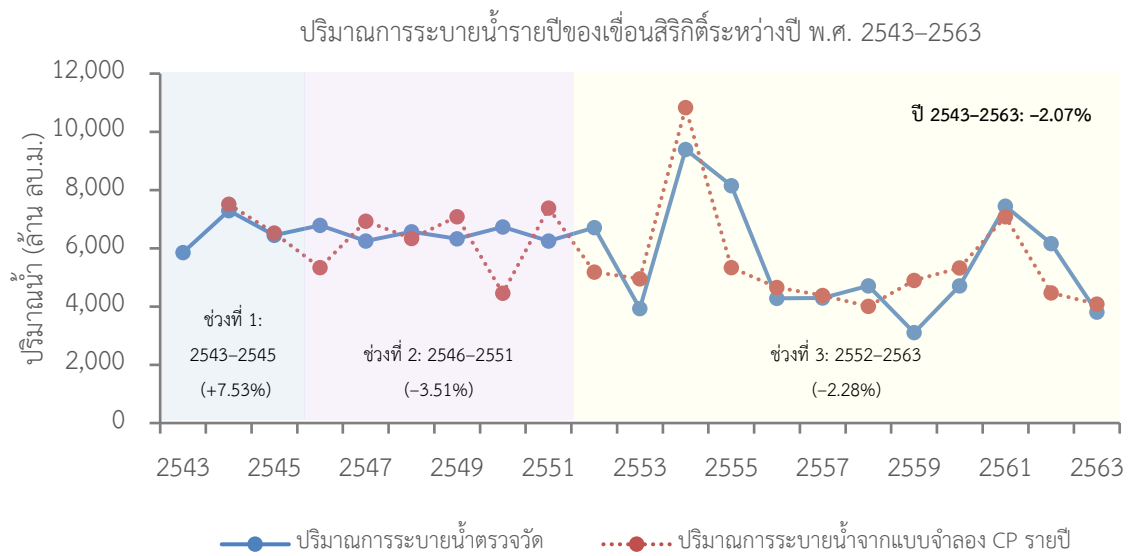
รูปที่ 4-95 ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16



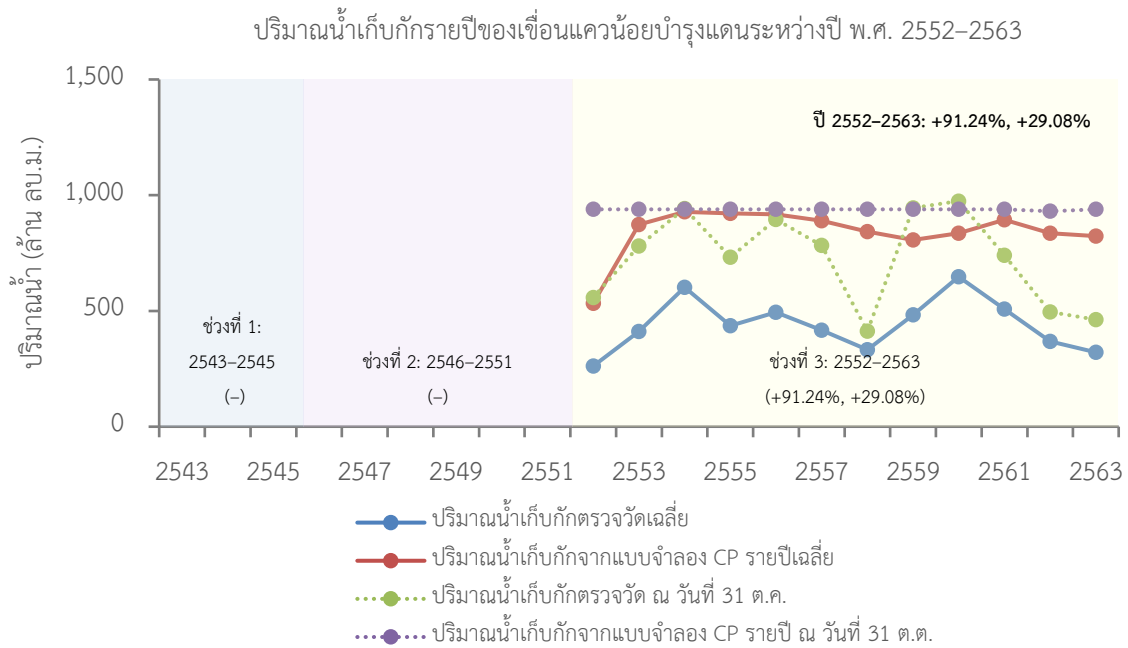
รูปที่ 4-96 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16



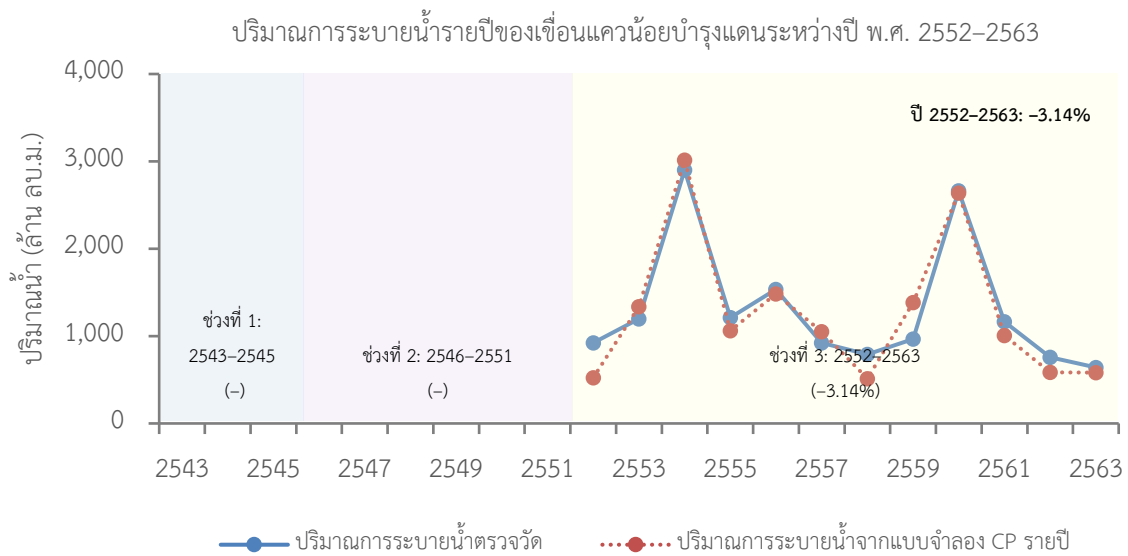
รูปที่ 4-97 ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16



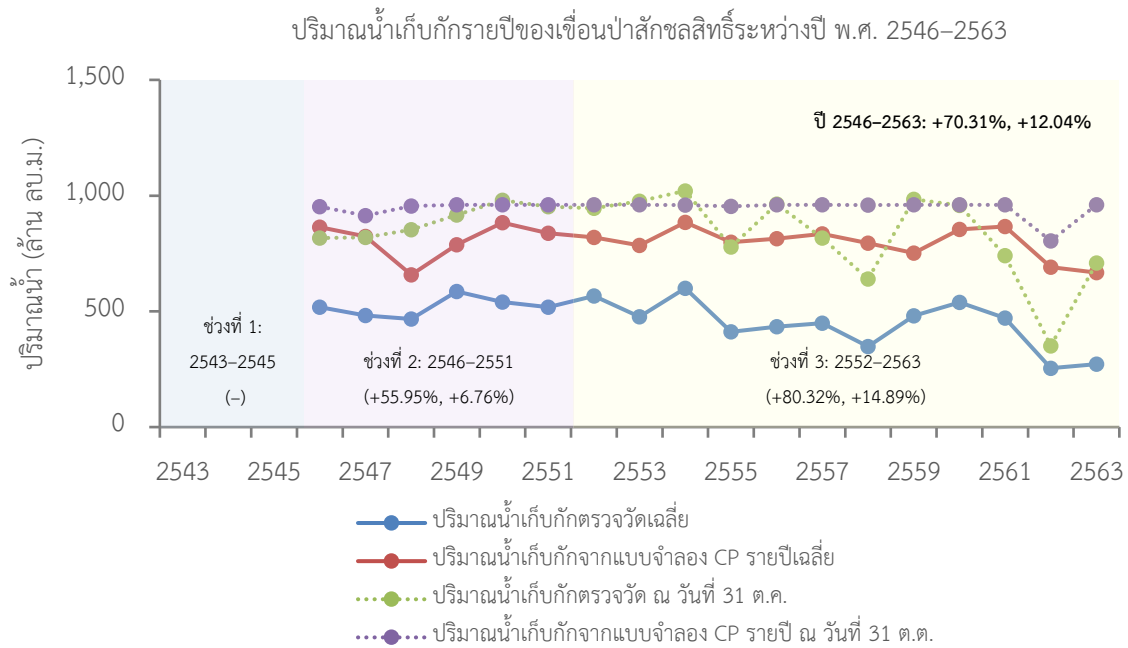
รูปที่ 4-98 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16



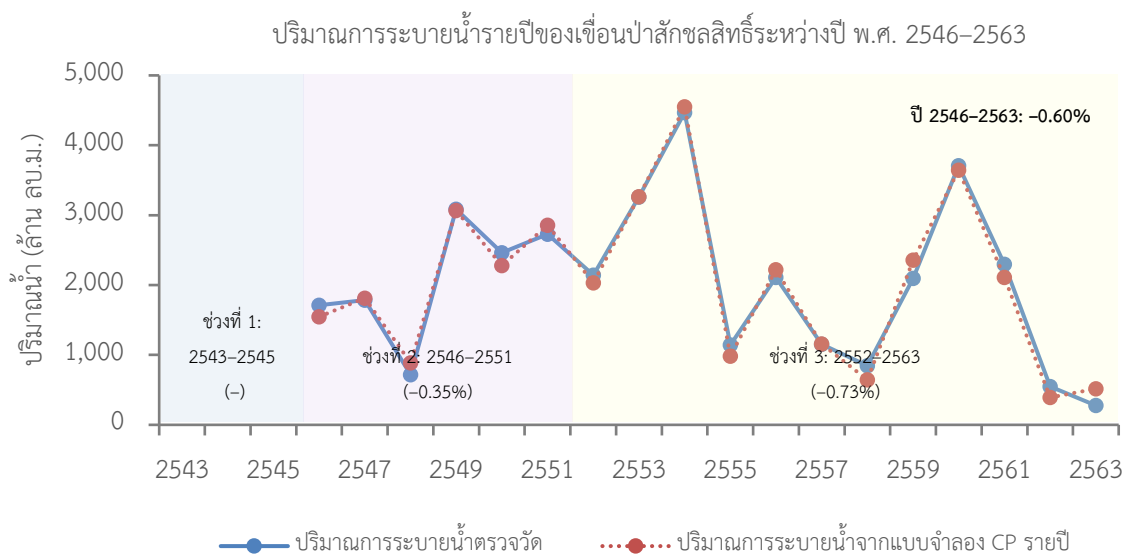
รูปที่ 4-99 ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16



รูปที่ 4-100 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16



รูปที่ 4-101 ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16



รูปที่ 4-102 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2563 จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16

4.2.5 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิผลของการจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำระยะยาวในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิผลของการจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำระยะยาวในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ในรูปของศักยภาพในการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักและการลดลงของปริมาณการระบายน้ำด้วยแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังและแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดโดยคัดเลือกมาเฉพาะรูปแบบที่ 1.2, 2.8 และ 2.16 ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4-65 ซึ่งพบว่า แบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังให้ค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสิ้นสุดฤดูฝนเฉลี่ยคิดเป็น +24.45% ทั้งระบบ หรือคิดเป็นปริมาณน้ำเก็บกักที่สะท้อนถึงปริมาณน้ำต้นทุนที่เพิ่มสูงขึ้นทั้ง 4 เขื่อนเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนสุทธิเท่ากับ +5,904 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งสูงกว่าแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2, 2.8 และ 2.16 ที่มีค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสิ้นสุดฤดูฝนอยู่ในช่วง +4.17% ถึง +16.99% ทั้งระบบ หรือคิดเป็นปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มสูงขึ้นทั้ง 4 เขื่อนเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนอยู่ในช่วงเท่ากับ +1,221 ถึง +2,596 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ในขณะที่การลดลงของปริมาณการระบายน้ำจากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังคิดเป็น -1.40% หรือคิดเป็นปริมาณการระบายน้ำสุทธิทั้ง 4 เขื่อนซึ่งลดลงจากผลการปฏิบัติจริงเท่ากับ -184 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี รูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อนที่ลดลงดังกล่าวยังให้ค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2, 2.8 และ 2.16 ซึ่งอยู่ในช่วง -0.94% ถึง -1.86% หรือคิดเป็นปริมาณการระบายน้ำสุทธิทั้ง 4 เขื่อนซึ่งลดลงจากผลการปฏิบัติจริงอยู่ในช่วงระหว่าง -139.03 ถึง -318.27 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

ตารางที่ 4-65 ผลการเปรียบเทียบศักยภาพในการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักและการลดลงของปริมาณการระบายน้ำจากแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำระยะยาว

เขื่อน	การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกัก ^{1/}		การลดลงของปริมาณการระบายน้ำ	
	เปอร์เซ็นต์	ล้าน ลบ.ม.ต่อปี	เปอร์เซ็นต์	ล้าน ลบ.ม.ต่อปี
แบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง ^{2/}				
เขื่อนภูมิพล	+28.70%	+2,275.66	-3.04%	-141.01
เขื่อนสิริกิติ์	+52.07%	+3,493.76	-0.02%	-1.19
เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน	+9.33%	+70.83	-1.37%	-18.39
เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	+7.69%	+63.62	-1.16%	-23.07
ทั้งระบบ	+24.45% ^{3/}	+5,903.87 ^{4/}	-1.40% ^{3/}	-183.66 ^{4/}
แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2 ^{2/}				
เขื่อนภูมิพล	+15.73%	+1454.08	-3.23%	-167.82
เขื่อนสิริกิติ์	+16.36%	+1257.62	-3.03%	-181.1
เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน	-12.20%	-88.65	+2.83%	+36.97
เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	-3.20%	-27.05	-0.31%	-6.32
ทั้งระบบ	+4.17% ^{3/}	+2,596.00 ^{4/}	-0.94% ^{3/}	-318.27 ^{4/}
แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8 ^{2/}				
เขื่อนภูมิพล	-0.48%	-44.36	-1.38%	-71.96
เขื่อนสิริกิติ์	+12.52%	+962.14	-2.15%	-127.96

4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน	+28.39%	+206.38	-3.25%	-42.49
เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	+11.48%	+97.06	-0.66%	-13.31
ทั้งระบบ	+12.98%	+1,221.23 ^{4/}	-1.86% ^{3/}	-255.73 ^{4/}
แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.16 ^{2/}				
เขื่อนภูมิพล	+13.64%	+1261.45	+0.73%	+37.73
เขื่อนสิริกิติ์	+13.20%	+1014.64	-2.07%	-123.59
เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน	+29.08%	+211.40	-3.14%	-40.96
เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์	+12.04%	+101.81	-0.60%	-12.21
ทั้งระบบ	+16.99% ^{3/}	+2,589.31 ^{4/}	-1.27% ^{3/}	-139.03 ^{4/}

หมายเหตุ: ^{1/} วิเคราะห์ ณ วันที่ 31 เดือนตุลาคมของทุกปี

^{2/} กรณีใช้ปริมาณความต้องการน้ำสังเคราะห์จากแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทาน (Target Water Demand)

^{3/} เปอร์เซนต์เฉลี่ยทั้งระบบ

^{4/} ผลรวมสุทธิของปริมาณเก็บกักที่เพิ่มขึ้น

สาเหตุที่แบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสิ้นสุดฤดูฝนสูงกว่าแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดโดยคัดเลือกนำเสนอเฉพาะรูปแบบที่ 1.2, 2.8 และ 2.16 เนื่องจากในขั้นตอนของการออกแบบและพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลังของงานวิจัยนี้⁴ ได้ทำการสังเคราะห์เส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายของแต่ละเขื่อนให้สูงขึ้นจากค่าปริมาณน้ำเก็บกักเฉลี่ยระยะยาว 15% สำหรับเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และสูงขึ้นจากค่าปริมาณน้ำเก็บกักเฉลี่ยระยะยาว 10% สำหรับเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ทั้งนี้เพื่อมุ่งเน้นที่จะหารูปแบบการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักรูปแบบใหม่เพื่อเพิ่มน้ำต้นทุนหลังสิ้นสุดฤดูฝนสำหรับนำไปใช้ในช่วงการเพาะปลูกฤดูแล้งให้เพียงพออย่างใดก็ได้ ในการนำไปประยุกต์ใช้งาน ผู้ปฏิบัติงานสามารถปรับเส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายให้สอดคล้องตามแผนการบริหารจัดการน้ำหรือตามสถานการณ์น้ำของแต่ละประเภทปีน้ำในระบบได้ นอกจากนี้การศึกษาต่อยอดเชิงลึกในการพัฒนาและประยุกต์ใช้แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลังในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ยังเป็นสิ่งจำเป็น ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงกระบวนการพัฒนาแบบจำลอง (Modelling Process) ทั้งในส่วนของการปรับโครงสร้าง การตั้งค่าพารามิเตอร์ และการประมวลผลของแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังให้มีความรวดเร็วและเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองให้สูงขึ้น อีกทั้งเป็นการนำข้อดีของเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลังสมัยใหม่มาใช้ในงานวางแผนและปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจของผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องเพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการวางแผนการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำที่มีความสำคัญในพื้นที่ราบภาคกลางของประเทศไทย

4 | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ข้อสรุปที่สำคัญที่ได้จากโครงการวิจัยเรื่อง “การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)” แยกตามวัตถุประสงค์มีดังนี้

5.1.1 ข้อสรุปของวัตถุประสงค์ที่ 1: ศึกษาและวิเคราะห์แนวทางการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำร่วมกันของเขื่อนหลักในปัจจุบัน (Current Multi-Reservoir Operation System) ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ประกอบด้วย เขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ และเขื่อนเจ้าพระยา โดยพิจารณาทั้งในส่วนของปัจจัยปริมาณน้ำต้นทุนทั้งในส่วนของน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน ปริมาณความต้องการน้ำ และแผนการจัดสรรน้ำร่วมกัน มีดังนี้

5.1.1.1 ผลการวิเคราะห์สถิติข้อมูลฝนรายปีต่ำสุด ฝนรายปีเฉลี่ย และฝนรายปีสูงสุดของสถานีตรวจวัดฝนกรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งคำนวณโดยวิธีการหาค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของจำนวน 43 สถานีระหว่างปี พ.ศ. 2543–2564 ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่เท่ากับ 856 มิลลิเมตร 1,309 มิลลิเมตร และ 1,833 มิลลิเมตร ตามลำดับ

5.1.1.2 ผลการวิเคราะห์สถิติข้อมูลฝนรายปีระหว่างปี พ.ศ. 2555–2564 จากสถานีโทรมาตรในลุ่มน้ำปิงและลุ่มน้ำน่านของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยแสดงพบว่า เขื่อนภูมิพลมีปริมาณฝนรายปีต่ำสุดทั้ง 15 สถานีเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 313–738 มิลลิเมตร ปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 648–1,056 มิลลิเมตร และปริมาณฝนรายปีสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 997–1,999 มิลลิเมตร ปริมาณฝนของสถานีเหนือเขื่อนภูมิพลมีแนวโน้มต่ำกว่าสถานีท้ายเขื่อนโดยมีค่าปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยเท่ากับ 778 มิลลิเมตร บริเวณเหนือเขื่อน และ 902 มิลลิเมตร บริเวณท้ายเขื่อน สำหรับเขื่อนสิริกิติ์มีปริมาณฝนรายปีต่ำสุดทั้ง 18 สถานีเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 112–1,043 มิลลิเมตร ปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 420–1,863 มิลลิเมตร และปริมาณฝนรายปีสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 727–3,653 มิลลิเมตร ปริมาณฝนของสถานีเหนือเขื่อนสิริกิติ์มีแนวโน้มสูงกว่าสถานีท้ายเขื่อนโดยมีค่าปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยเท่ากับ 1,180 มิลลิเมตร บริเวณเหนือเขื่อน และ 945 มิลลิเมตร บริเวณท้ายเขื่อน อย่างไรก็ตาม ข้อมูลฝนของสถานีที่คัดเลือกบริเวณด้านเหนือเขื่อนและท้ายเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์มีความผันผวนค่อนข้างสูง ส่วนหนึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนสูงของข้อมูลตรวจวัดซึ่งจำเป็นต้องผ่านการตรวจสอบความถูกต้องและทำการปรับแก้ก่อนนำไปใช้งาน

5.1.1.3 ผลการวิเคราะห์สถิติข้อมูลน้ำท่ารายปีระหว่างปี พ.ศ. 2555–2564 จากสถานีโทรมาตรในลุ่มน้ำปิงและลุ่มน้ำน่านของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ทำการตรวจวัดข้อมูลน้ำท่าของแม่น้ำสาขาที่ไหลเข้ามาสมทบกับแม่น้ำปิงและแม่น้ำน่านพบว่า เขื่อนภูมิพลมีปริมาณน้ำท่ารายปีต่ำสุดทั้ง 15 สถานีเฉลี่ยอยู่

ในช่วงระหว่าง 0-93.34 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 1.10-270.02 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และปริมาณน้ำท่ารายปีสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 3.31-494.60 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที สำหรับเขื่อนสิริกิติ์มีปริมาณน้ำท่ารายปีต่ำสุดทั้ง 18 สถานีเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 2.58-125.53 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 10.85-243.67 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และปริมาณน้ำท่ารายปีสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 16.42-573.29 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที อย่างไรก็ตาม ข้อมูลน้ำท่าของสถานีที่คัดเลือกบริเวณด้านเหนือเขื่อนและท้ายเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์มีความผันผวนค่อนข้างสูง ส่วนหนึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนสูงของข้อมูลตรวจวัดซึ่งจำเป็นต้องผ่านการตรวจสอบความถูกต้องและทำการปรับแก้ก่อนนำไปใช้งาน

5.1.1.4 ผลการวิเคราะห์แนวทางการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำร่วมกันของเขื่อนหลักปัจจุบันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่สรุปได้ดังนี้

(1) ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 เท่ากับ 5,444 และ 6,103 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี อย่างไรก็ตาม หลังเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ปี พ.ศ. 2554 พบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญกล่าวคือระหว่างปี พ.ศ. 2555-2563 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลรายปีเฉลี่ย 3,913 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือลดลงจากค่าเฉลี่ยระยะยาวถึง 1,531 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนสิริกิติ์รายปีเฉลี่ย 5,084 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือลดลงจากค่าเฉลี่ยระยะยาวถึง 1,019 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี นอกจากนี้ ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีมีความผันแปรค่อนข้างสูงในช่วงระหว่าง 1,916-12,726 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี สำหรับเขื่อนภูมิพล และระหว่าง 3,818-11,227 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี สำหรับเขื่อนสิริกิติ์ นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์พบว่า ปริมาณการระบายน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 เท่ากับ 5,229 และ 5,981 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ปริมาณการระบายน้ำรายปีมีความผันแปรค่อนข้างสูงในช่วงระหว่าง 1,451-9,185 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี สำหรับเขื่อนภูมิพล และระหว่าง 3,103-9,580 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี สำหรับเขื่อนสิริกิติ์ ยิ่งไปกว่านั้น ปริมาณการระบายน้ำของทั้งสองเขื่อนหลักผันแปรตามแผนการจัดสรรน้ำ และพบว่า การระบายน้ำจริงโดยส่วนใหญ่ยังสูงกว่าแผนการจัดสรรน้ำทั้งในช่วงเพาะปลูกฤดูแล้งและฤดูฝน ผลการวิเคราะห์แผนการจัดสรรน้ำจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์พบว่า ค่าเฉลี่ยระยะยาวของแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีมีค่าเท่ากับ 6,445, 4,415 และ 11,073 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของแผนการจัดสรรน้ำในปีน้ำปกติกล่าวคือในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีมีค่าเท่ากับ 7,000, 3,850 และ 10,803 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ สำหรับในปีน้ำมากพบว่า มีแนวโน้มปรับเพิ่มจากแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีจากปีน้ำปกติเท่ากับ -0.27%, +119.35% และ +55.69% ตามลำดับ และในปีน้ำน้อยพบว่า มีการปรับลดจากแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-

เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีจากปีน้ำปกติเท่ากับ -42.16% , -13.77% และ -34.73% ตามลำดับ

(2) ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563 เท่ากับ 1,339 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี อย่างไรก็ตาม หลังเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ปี พ.ศ. 2554 พบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนลดลงอย่างมีนัยสำคัญกล่าวคือ ระหว่างปี พ.ศ. 2555-2563 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนรายปีเฉลี่ย 1,178 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือลดลงจากค่าเฉลี่ยระยะยาวถึง 162 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี นอกจากนี้ ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีมีความผันแปรค่อนข้างสูงในช่วงระหว่าง 536-3,015 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนพบว่า ปริมาณการระบายน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563 เท่ากับ 1,306 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ปริมาณการระบายน้ำรายปีมีความผันแปรค่อนข้างสูงในช่วงระหว่าง 641-2,900 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ยิ่งไปกว่านั้น ปริมาณการระบายน้ำของทั้งสองเขื่อนหลักผันแปรตามแผนการจัดสรรน้ำ และพบว่าการระบายน้ำจริงโดยส่วนใหญ่ยังสูงกว่าแผนการจัดสรรน้ำทั้งในช่วงเพาะปลูกฤดูแล้งและฤดูฝน ผลการวิเคราะห์แผนการจัดสรรน้ำจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนพบว่า ค่าเฉลี่ยระยะยาวของแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีมีค่าเท่ากับ 489, 549 และ 1,063 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของแผนการจัดสรรน้ำในปีน้ำปกติกล่าวคือในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีมีค่าเท่ากับ 542, 428 และ 998 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ สำหรับในปีน้ำมากพบว่า มีแนวโน้มปรับเพิ่มจากแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีจากปีน้ำปกติเท่ากับ $+23.06\%$, $+385.28\%$ และ $+185.07\%$ ตามลำดับ และในปีน้ำน้อยพบว่า มีการปรับลดจากแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีจากปีน้ำปกติเท่ากับ -28.04% , -20.56% และ -32.57% ตามลำดับ

(3) ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2563 เท่ากับ 2,236 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี อย่างไรก็ตาม หลังเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ปี พ.ศ. 2554 พบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญกล่าวคือ ระหว่างปี พ.ศ. 2555-2563 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์รายปีเฉลี่ย 1,750 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือลดลงจากค่าเฉลี่ยระยะยาวถึง 486 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี นอกจากนี้ ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีมีความผันแปรค่อนข้างสูงในช่วงระหว่าง 457-5,024 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์พบว่า ปริมาณการระบายน้ำรายปีเฉลี่ยของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2546-2563 เท่ากับ 2,030 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ปริมาณการระบายน้ำรายปีมีความผันแปรค่อนข้างสูงในช่วงระหว่าง 277-4,469 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ยิ่งไปกว่านั้น ปริมาณการระบายน้ำของทั้งสองเขื่อนหลักผันแปรตามแผนการจัดสรรน้ำ และพบว่าการระบายน้ำจริงโดยส่วนใหญ่ยังสูงกว่าแผนการ

จัดสรรน้ำทั้งในช่วงเพาะปลูกฤดูแล้งและฤดูฝน ผลการวิเคราะห์แผนการจัดสรรน้ำจากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ พบว่า ค่าเฉลี่ยระยะยาวของแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีมีค่าเท่ากับ 524, 1,057 และ 1,605 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของแผนการจัดสรรน้ำในปีน้ำปกติกล่าวคือในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีมีค่าเท่ากับ 585, 896 และ 1,481 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ สำหรับในปีน้ำมากพบว่า มีแนวโน้มปรับเพิ่มจากแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีจากปีน้ำปกติเท่ากับ +14.02%, +326.12% และ +202.84% ตามลำดับ และในปีน้ำน้อยพบว่า มีการปรับลดจากแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) และช่วงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) และรายปีจากปีน้ำปกติเท่ากับ -28.03%, -41.29% และ -36.06% ตามลำดับ

5.1.1.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแนวโน้มปริมาณการระบายน้ำและปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ระหว่างปี พ.ศ. 2562-2564 พบว่า ปริมาณการระบายน้ำจากทั้ง 4 เขื่อนหลักมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยระยะยาว ทั้งนี้เกิดจากสถานการณ์น้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำมีจำกัดและเกิดขึ้นติดต่อกันตั้งแต่ปี พ.ศ. 2562 มาจนถึงปัจจุบัน พ.ศ. 2564 (สิงหาคม) ที่แนวโน้มปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ยังไม่สูงนัก หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการบริหารจัดการน้ำในปีน้ำน้อย อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ข้อมูลในช่วง 3 ปีที่ผ่านมาพบว่า ปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์มีแนวโน้มสูงกว่าเขื่อนภูมิพลจากปัจจัยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่มีสูงกว่า และปริมาณน้ำที่ระบายจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ยังช่วยตอบสนองความต้องการน้ำทั้งภาคเกษตรกรรมและนอกภาคเกษตรกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงการเพาะปลูกพืชฤดูแล้งในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ได้ค่อนข้างสูง

5.1.1.6 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัดหลักท้ายเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2543-2564 เพื่อพิจารณาเป็นปริมาณน้ำที่ไหลมาสมทบหรือในที่นี้กำหนดให้เป็น Sidelow เพื่อช่วยลดปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อนหลักลงประกอบด้วย สถานี W.4A (แม่น้ำวัง) สถานี Y.17 (แม่น้ำยม) สถานี N.22A (แม่น้ำแควน้อย) CT.2A (แม่น้ำสะแกกรัง) ซึ่งเป็นสถานีตรวจวัดในความรับผิดชอบของกรมชลประทาน และสถานี TD06 (แม่น้ำป่าด) และ TD08 (แม่น้ำคลองตรอน) ซึ่งเป็นสถานีตรวจวัดในความรับผิดชอบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จากสถิติข้อมูลพบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยระยะยาวของสถานี W.4A, Y.17, N.22A, CT.2A, TD06, และ TD08 เท่ากับ 40.69, 117.09, 53.33, 36.90, 10.85 และ 17.19 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที หรือคิดเป็นปริมาตรน้ำเท่ากับ 1,283, 3,693, 1,682, 1,164, 342 และ 542 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยระยะยาวผันแปรตามประเภทของปีน้ำ สำหรับข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยระยะยาวของสถานี C.2 ซึ่งเป็นสถานีตรวจวัดหลักของแม่น้ำเจ้าพระยาที่รับน้ำจากแม่น้ำปิง วัง ยม และน่านที่ไหลมาสมทบ รวมทั้งปริมาณน้ำที่ระบายจากเขื่อนหลักทั้ง 3 เขื่อนพบว่า ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยเท่ากับ 688.4 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

หรือคิดเป็นปริมาตรน้ำเท่ากับ 21,711 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และมีค่าผันแปรตามปีน้ำอยู่ระหว่าง 169.4–1,537.3 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

5.1.1.7 ผลวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่พบว่า อัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลต่อเขื่อนสิริกิติ์เฉลี่ยระยะยาวเท่ากับ 0.44:0.56 ในกรณีที่วิเคราะห์จากฐานข้อมูลระยะยาวตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2563 และในช่วงเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ปี พ.ศ. 2554 มีการปรับเปลี่ยนแนวทางการระบายน้ำจากเขื่อนหลักโดยเร่งระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลในช่วงเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคมในอัตราส่วนที่สูงกว่าเขื่อนสิริกิติ์จากแนวทางเดิมโดยผันแปรอยู่ระหว่าง 0.54–0.67 ในช่วงเหตุการณ์ภัยแล้งปี พ.ศ. 2563 มีการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ในอัตราส่วนที่สูงกว่าเขื่อนภูมิพลตลอดทั้งปี โดยอัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนสิริกิติ์ผันแปรอยู่ระหว่าง 0.51–0.82

5.1.1.8 ผลวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่พบว่า อัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล:เขื่อนสิริกิติ์:เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน:เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เฉลี่ยระยะยาวเท่ากับ 0.36:0.45:0.07:0.12 และจากข้อมูลเฉลี่ยรายปีแยกตามปีน้ำพบว่า อัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์สูงกว่าเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนในปีน้ำปกติและปีน้ำมาก แต่อัตราส่วนการระบายน้ำมีแนวโน้มใกล้เคียงกันในปีน้ำน้อย และในช่วงเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ปี พ.ศ. 2554 และเหตุการณ์ภัยแล้งปี พ.ศ. 2563 มีการปรับเพิ่มและปรับลดอัตราส่วนการระบายน้ำจากค่าเฉลี่ยระยะยาวของทั้ง 4 เขื่อนตามสถานการณ์น้ำและสถานะของปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำ

5.1.1.9 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างกับข้อมูลฝนทั้งจากฐานข้อมูลฝนของกรมอุตุนิยมวิทยา (Thai Meteorological Department, TMD) ข้อมูลฝนจากคลังข้อมูลสภาพภูมิอากาศโลก (Global Climate Data) ขององค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (National Aeronautics and Space Administration, NASA) และข้อมูลฝนปรับแก้จากระบบคลังข้อมูลน้ำแห่งชาติ (National Hydroinformatics Data Center, NHC) ของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) และข้อมูลฝนรายวันสองสัปดาห์ล่วงหน้าจากแบบจำลองการพยากรณ์ 2 ประเภทคือ (1) แบบจำลอง Climate Forecast System Version 2 with Bias Correction (CFSV2-BC) และ (2) แบบจำลองคู่ควบ WRF-ROMS-CFSV2 ที่มีลักษณะเป็น Grid-based Rainfall พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ไม่สูงนักในช่วงระหว่าง 0.0342–0.3693 สำหรับเขื่อนภูมิพลและระหว่าง 0.0442–0.4056 สำหรับเขื่อนสิริกิติ์ หรืออาจสรุปได้ว่า ปัจจัยข้อมูลฝนในพื้นที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำที่ไหลเข้าเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ไม่สูงนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปัจจัยกายภาพของพื้นที่ที่ส่งผลต่อศาสตร์การไหลของน้ำไหลเข้าเขื่อน และสัดส่วนของปริมาณฝนที่ตกท้ายเขื่อนสูงกว่าบริเวณเหนือเขื่อนในช่วงเหตุการณ์พายุเดือนพฤษภาคม

5.1.1.10 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำใต้ดินที่สูบไปใช้ในเขตพื้นที่ภาคกลางตอนบน 6 จังหวัด ได้แก่ อุตรดิตถ์ สุโขทัย พิษณุโลก กำแพงเพชร พิจิตร และนครสวรรค์ ในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ. 2563 ถึงเดือน สิงหาคม พ.ศ. 2564 ทั้งหมดรวม 2,121 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี (สกสว., 2563ก)

5.1.1.11 ผลการประมาณการค่าปริมาณความต้องการน้ำชลประทานสุทธิ (Net Irrigation Water Requirement, NIR) ที่ได้จากการคำนวณในปี พ.ศ. 2563/2564 ในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ ทั้ง 34 โครงการพบว่า ค่าปริมาณความต้องการน้ำสุทธิในโครงการชลประทานลุ่มน้ำปิงตอนล่าง (4 โครงการ) โครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง (5 โครงการ) และโครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน (26 โครงการ) คิดเป็น 1,697, 1,063 และ 9,121 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ตามลำดับ รวมทั้งสิ้น 34 โครงการ เท่ากับ 11,881 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และปรับเพิ่มเป็น 12,951 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี เมื่อคิดรวมพื้นที่ชลประทานส่วนเพิ่มเติม

5.1.1.12 ผลการคำนวณประสิทธิภาพการชลประทานระดับโครงการชลประทานของโครงการชลประทานท่อทองแดง วังบัว และวังยาง-หนองขวัญ พบว่าอยู่ในช่วงเกณฑ์สูงเท่ากับ 72.16%, 95.30% และ 92.97% ตามลำดับ ในขณะที่ประสิทธิภาพการชลประทานของโครงการชลประทานยมน่านลดลงเท่ากับ 53.80% สำหรับผลการคำนวณประสิทธิภาพการชลประทานระดับโซนส่งน้ำของโครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน (ปตร. บรมธาตุ) เท่ากับ 60.92% และลดต่ำลงในเขตโครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันออกตอนบน (ปตร. มโนรมย์) และโครงการชลประทานมหาราช (ปตร. มหาราช) เท่ากับ 40.16% และ 43.42% หรืออาจกล่าวสรุปได้ว่า หากมีการปรับลดปริมาณการสูญเสียน้ำในการจัดส่งน้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการชลประทานให้สูงขึ้นเป็น 60% ใน 3 เขตโครงการชลประทานได้แก่ โครงการชลประทานยมน่าน โครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันออกตอนบน (ปตร. มโนรมย์) และโครงการชลประทานมหาราช (ปตร. มหาราช) จะสามารถประหยัดน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ได้อีก 922 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

5.1.1.13 ผลการวิเคราะห์ศักยภาพของน้ำเหลือใช้ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนโดยการกำหนดรูปแบบความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ (Local Demand) และความต้องการน้ำร่วมกันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ (Joint Demand) ใน 5 รูปแบบที่แตกต่างกันเพื่อใช้ในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนแบบอ่างเดี่ยว (Single Reservoir Operation) พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากสถานการณ์สมมติ 4 และสถานการณ์สมมติ 5 ซึ่งได้กำหนดให้ปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่เท่ากับ 25% ของความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ และกำหนดให้ปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่แยกตามปีน้ำเท่ากับ 10%, 25% และ 40% ของความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ในปีน้ำน้อย ปีน้ำปกติ และปีน้ำมากตามลำดับ บ่งชี้ให้เห็นถึงศักยภาพน้ำเหลือใช้ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเพิ่มเติมจากปริมาณความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ที่สูงถึง 566 และ 542 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ตามลำดับ ซึ่งผลสรุปดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลประกอบการกำหนดนโยบายการจัดสรรน้ำเพื่อตอบสนองความต้องการน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ให้สอดคล้องตามสถานการณ์น้ำ

5.1.2 ข้อสรุปของวัตถุประสงค์ที่ 2: จำลองสภาพฝน-น้ำท่าของพื้นที่ลุ่มน้ำตอนบนเพื่อศึกษาถึงลักษณะทางอุทกวิทยา ปัจจัยน้ำต้นทุน ปัจจัยความต้องการน้ำ สำหรับใช้ในการวิเคราะห์สถานการณ์การขาดน้ำในพื้นที่ปัจจุบัน มีดังนี้

5.1.2.1 ผลการพัฒนาแบบจำลอง WEAP ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ตอนบนให้ค่าประสิทธิภาพหลังการปรับเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) และตรวจพิสูจน์ความถูกต้องแบบจำลอง (Model Validation) อยู่ในเกณฑ์ดีกล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ระหว่างข้อมูลตรวจวัดจริงกับข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ ข้อมูลน้ำท่าสถานี P.17, W.4A, Y.17, N.14A และ C.2 ที่ได้จากแบบจำลองอยู่ในช่วงระหว่าง 0.55–0.93 สำหรับการปรับเทียบแบบจำลอง และอยู่ระหว่าง 0.55–0.93 สำหรับการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง ยกเว้นข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัด W.4A, N.14A และข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์ที่ผลการปรับเทียบแบบจำลองและตรวจพิสูจน์แบบจำลองยังให้ค่าประสิทธิภาพไม่ตึงนัก อย่างไรก็ตาม ในภาพรวมพบว่า รูปแบบของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองมีลักษณะคล้ายคลึงกับข้อมูลตรวจวัดจริง ยิ่งไปกว่านั้น ผลการจำลองระยะยาวยังให้ค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองที่สถานีตรวจวัดน้ำท่า C.2 อยู่ในเกณฑ์ดีและรูปแบบของข้อมูลสอดคล้องกับข้อมูลตรวจวัด

5.1.2.2 ผลการจำลองสถานการณ์น้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระยะยาวระหว่างปี พ.ศ. 2543–2558 ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดที่ได้จากการปรับเทียบด้วยแบบจำลอง WEAP แสดงให้เห็นถึงภาวะการขาดน้ำที่เกิดขึ้นในโซนการส่งน้ำลุ่มน้ำปิงตอนล่าง (LPWDZ) ในระหว่างปี พ.ศ. 2551–2553 ในช่วงตั้งแต่ 168–367 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งสอดคล้องตามสถานการณ์น้ำผิวดินที่จัดส่งได้จำกัดในพื้นที่ดังกล่าว ในขณะที่ผลการจำลองไม่ปรากฏการขาดน้ำในโซนการส่งน้ำลุ่มน้ำน่านตอนล่าง (LPWDZ) และโซนการส่งน้ำลุ่มน้ำเจ้าพระยา (CPYWDZ)

5.1.3 ข้อสรุปของวัตถุประสงค์ที่ 3: พยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่าง (Reservoir Inflow) ล่วงหน้ารายวันและรายเดือนของเขื่อนเก็บกักหลักด้วยหลักปัญญาประดิษฐ์และเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง ทั้งในลักษณะแบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยว (Univariate Prediction Model) และแบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่าง (Multivariate Prediction Model) เพื่อตั้งฐานข้อมูลพยากรณ์มาเป็นส่วนหนึ่งในการกำหนดการระบายน้ำจากเขื่อนหลักร่วมกันอย่างเป็นระบบ มีดังนี้

5.1.3.1 ผลการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่องในภาพรวมสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของ 4 เขื่อนหลักในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยแบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยว (Univariate Prediction Model) ให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าแบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่าง (Multivariate Prediction Model) ในขณะเดียวกัน ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำด้วยแบบจำลองการพยากรณ์

รายวัน (Daily Prediction Model) สูงกว่าแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือน (Monthly Prediction Model) โดยทั้งอัลกอริทึม XGBoost และ LSTM ให้ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์รายวันและรายเดือน สอดคล้องไปในทางเดียวกัน อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึม XGBoost ให้ค่าประสิทธิผลสูงกว่า LSTM สำหรับแบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่างเดี่ยวรายเดือน แบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายวันของทุกเขื่อนที่พัฒนาขึ้นโดยใช้อัลกอริทึม LSTM สามารถพยากรณ์น้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันล่วงหน้าได้อยู่ในเกณฑ์ดี และยังให้ผลใกล้เคียงกับอัลกอริทึม XGBoost โดยผลการพยากรณ์ให้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลพยากรณ์ที่เวลาล่วงหน้า $t+1$ อยู่ในเกณฑ์สูง อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์บ่งชี้ให้เห็นว่า ผลการพยากรณ์แบบอ่างเดี่ยวและแบบหลายอ่างยังให้ค่าสูงสุดของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างทั้งรายวันและรายเดือนต่ำกว่าข้อมูลสังเกต (Underestimated) ในทางกลับกัน ผลการพยากรณ์แบบอ่างเดี่ยวและแบบหลายอ่างทั้งรายวันและรายเดือนให้ค่าต่ำสุดของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างสูงกว่าข้อมูลสังเกต (Overestimated) ด้วยเหตุนี้ การปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองให้มีความเหมาะสมจึงยังมีความสำคัญเพื่อนำข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการพยากรณ์ในช่วงสถานการณ์น้ำวิกฤตมาใช้ประกอบการกำหนดกลยุทธ์ในการบริหารเขื่อนของผู้ปฏิบัติการต่อไป

5.1.3.2 โครงสร้างของรูปแบบของข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายวันด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ปริมาณน้ำไหลเข้าที่เวลา t และค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา $t-1, \dots, t-3$ (Avg. 3)

5.1.3.3 โครงสร้างของรูปแบบของข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดี่ยวรายเดือนด้วยอัลกอริทึม XGBoost ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ปริมาณน้ำไหลเข้าที่เวลา t ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลาย้อนหลัง ข้อมูลฝนและข้อมูลสภาพภูมิอากาศ

5.1.3.4 โครงสร้างของรูปแบบของข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่างเดี่ยวรายวันด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์จากงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ปริมาณน้ำไหลเข้าสังเกตในอดีต 3 วันย้อนหลัง ซึ่งให้ผลการพยากรณ์ที่มีความแม่นยำสูงสุด

5.1.3.5 โครงสร้างของรูปแบบของข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่างเดี่ยวรายวันด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนที่นำเข้าข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าสังเกตในอดีต 7 วันย้อนหลัง และแบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่างเดี่ยวรายวันของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ที่นำเข้าข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าสังเกตในอดีต 3 วันย้อนหลังให้ค่าความแม่นยำสูงสุด

5.1.3.6 แบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่วงเดี่ยวรายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน มีโครงสร้างของข้อมูลนำเข้าเหมือนกันโดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอดีต 3 วันย้อนหลัง ให้ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์สูงสุด ในขณะที่แบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่วงเดี่ยวรายเดือนของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ที่มีการนำข้อมูลฝนจากคลังข้อมูลสภาพภูมิอากาศของ NASA มาเป็นข้อมูลนำเข้าร่วมกับปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอดีต 3 วันย้อนหลัง ให้ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์สูงสุด

5.1.4 ข้อสรุปของวัตถุประสงค์ที่ 4: พัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่วงเก็บน้ำโดยอาศัยหลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence–AI) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการกำหนดการระบายน้ำจากอ่วงเก็บน้ำในลักษณะของปฏิบัติการอ่วงเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่วง (Multiple Reservoir Re–operation System) รูปแบบใหม่อย่างเป็นระบบในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ ได้แก่ (1) แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่วงเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Multi–reservoir System Operation by Reinforcement Learning, RL) และ (2) แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Constraint Programming, CP and Machine Learning, ML)

5.1.4.1 ผลการพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่วงเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning, RL) จากงานวิจัยนี้ได้กำหนดองค์ประกอบในลักษณะ Multi–Agent Based System โดยอ่วงเก็บน้ำจะถูกแทนเป็น Agent ในแบบจำลองจำนวน 4 Agent ประกอบด้วย (1) Agent เขื่อนภูมิพล (Agent–BB) (2) Agent เขื่อนสิริกิติ์ (Agent–SK) (3) Agent เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน (Agent–KNB) และ (4) Agent เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ (Agent–PS) โดยทุก Agent จะทำหน้าที่ในการเรียนรู้แบบ Deep Q–learning Network (DQN) จากปัจจัยสภาพ Environment ทั้ง 4 ปัจจัยเพื่อนำมาใช้ในการตัดสินใจระบายน้ำ (Action/Release) แต่ละ Agent จะเรียนรู้จาก (1) ข้อมูลคาดการณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างล่องหน้าวันที่ 7 (7D Forecasted Inflow) (2) ข้อมูลสถานะของปริมาณน้ำเก็บกักในอ่วงเก็บน้ำ (Reservoir Storage) (3) ข้อมูลการระบายน้ำจากอ่วงเก็บน้ำ (Reservoir Water Release) ในส่วนนี้ได้ออกแบบให้ Agent–BB และ Agent–SK เรียนรู้การระบายน้ำซึ่งกันละกัน กล่าวคือ เขื่อนภูมิพลจะนำข้อมูลการระบายน้ำของเขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนสิริกิติ์ก็จะนำข้อมูลการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลมาเรียนรู้ ในขณะที่ Agent–KNB เรียนรู้การระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ ส่วนเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์จะไม่นำข้อมูลส่วนนี้มาเรียนรู้ (4) ข้อมูลน้ำท่าของสถานีตรวจวัดท้ายเขื่อน (Flows at Downstream Station) โดย Agent–BB, Agent–SK และ Agent–KNB จะนำสภาพของน้ำท่าที่สถานีตรวจวัด C.2 มาเรียนรู้ ส่วน Agent–PS จะพิจารณาสภาพน้ำท้ายเขื่อนเจ้าพระยาที่สถานีตรวจวัด C.13 ในส่วนของการกำหนด Reward เป็นค่าการให้คะแนนแก่ Agent ในการตัดสินใจ Action ในแต่ละช่วงเวลา (Time Step) โดยกำหนดจากค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างปริมาณน้ำเป้าหมายกับปริมาณน้ำที่ได้จากการคำนวณ รวมถึงค่าความต้องการน้ำกับปริมาณน้ำที่ระบาย

5.1.4.2 ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่าง ระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 ด้วยแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังพบว่า ปริมาณน้ำเก็บกักรายวันจากผลลัพธ์ของแบบจำลองให้ค่าสอดคล้องไปกับเส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมาย (Generated Target Storage) ทั้ง 4 เขื่อนที่สังเคราะห์ขึ้นมาใหม่สำหรับการพัฒนาแบบจำลอง โดยกำหนดให้ปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายสูงขึ้น 15% จากค่าเฉลี่ยรายวันระยะยาวสำหรับเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และสูงขึ้น 10% จากค่าเฉลี่ยรายวันระยะยาวสำหรับป่าสักชลสิทธิ์ตามเป้าหมายของงานวิจัย เพื่อให้แบบจำลองเรียนรู้สำหรับหาโครงสร้างที่เหมาะสมในการกำหนดการระบายน้ำจาก 4 เขื่อนหลัก โดยรูปแบบปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของทุกเขื่อนสูงกว่าปริมาณน้ำเก็บกักตรวจวัด ในขณะเดียวกัน ความผันผวนของปริมาณน้ำเก็บกักที่สะท้อนถึงปัจจัยปริมาณน้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำภายใต้สถานการณ์น้ำแตกต่างกันลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อปรับเปลี่ยนการบริหารเขื่อน-อ่างเก็บน้ำด้วยแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง

5.1.4.3 ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่าง ระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 ด้วยแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังพบว่า เขื่อนภูมิพลมีค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยและปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนเท่ากับ 2,686 และ 2,276 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 40.66% และ 28.70% ตามลำดับ และปริมาณการระบายน้ำรายปีลดลง -141.01 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็น -3.04%

5.1.4.4 ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่าง ระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 ด้วยแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังพบว่า เขื่อนสิริกิติ์มีค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยและปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนเท่ากับ 1,672 และ 3,494 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 31.25% และ 52.07% ตามลำดับ และปริมาณการระบายน้ำรายปีลดลงเพียงเล็กน้อยเท่ากับ -1.19 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็น -0.02%

5.1.4.5 ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่าง ระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 ด้วยแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังพบว่า เขื่อนแควน้อยบำรุงแดนมีค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยและปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนเท่ากับ 136 และ 71 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 29.57% และ 9.33% ตามลำดับ และปริมาณการระบายน้ำรายปีลดลง -18.39 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็น -1.37%

5.1.4.6 ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่าง ระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2564 ด้วยแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังพบว่า เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์มีค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยและปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนเท่ากับ 123 และ 64 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 26.82% และ 7.69% ตามลำดับ และปริมาณการระบายน้ำรายปีลดลง -23.07 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็น -1.16%

5.1.4.7 แบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังแนะนำรูปแบบและค่าปริมาณการระบายน้ำรายวันที่ให้ค่ารางวัล (Reward) สูงสุดที่ Episode สุดท้ายของการเรียนรู้มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง ซึ่งแตกต่างไปจากปริมาณการระบายน้ำตรวจวัดจริงรายวันที่มีลักษณะต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามก็ดี ลักษณะรูปแบบและค่าปริมาณการระบายน้ำรายปีของทั้ง 4 เชื้อนจากผลลัพธ์ของแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังไม่แตกต่างไปจากปริมาณการระบายน้ำตรวจวัดรายปีมากนัก หรืออาจกล่าวได้ว่า แบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังอาศัยหลักการระบายน้ำรายวันที่สามารถให้ค่าปริมาณน้ำเก็บกักเข้าใกล้เส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายตามที่ได้สังเคราะห์ไว้ในขั้นตอนของการออกแบบและพัฒนาแบบจำลอง ส่งผลให้ปริมาณการระบายน้ำรายวันมีความผันผวนสูงหรืออีกนัยหนึ่ง แบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังกำหนดแบบแผนการระบายน้ำ (Water Release Scheme) รายวันที่แตกต่างไปจากแนวทางปฏิบัติงานจริงโดยมุ่งเน้นที่จะเพิ่มน้ำต้นทุนตามเส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายที่ได้กำหนดไว้

5.1.4.7 ผลการพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการโปรแกรมแบบข้อจำกัด (Constraint Programming, CP) ซึ่งนับเป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพสูงในกลุ่มของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ที่ใช้คอมพิวเตอร์ในการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดจากชุดของคำตอบที่เป็นไปได้ (Combinatorial Search Problem) โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดรูปแบบของแบบจำลองใน 2 รูปแบบคือ (1) รูปแบบที่ 1 แบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model) และ (2) รูปแบบที่ 2 แบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model) โดยได้กำหนดรูปแบบของแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดเพื่อจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จำนวน 21 กรณี

5.1.4.8 ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2 ซึ่งไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model) และกำหนดให้เป็นแบบจำลองรายฤดูกาลที่พิจารณา Side Flow เท่ากับ 20% พบว่า ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์เพิ่มสูงขึ้นคิดเป็น +15.73% และ +16.36% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องตามเป้าหมายของงานวิจัย อย่างไรก็ตามก็ดี ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีเฉลี่ยของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ลดลง -12.20% และ -3.20% ตามลำดับ ในภาพรวมปริมาณน้ำเก็บกักทั้งระบบเพิ่มสูงขึ้น 2,469 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งประมาณ 49.12% เป็นส่วนของปริมาณน้ำท่าทางด้านท้ายเขื่อน หรือคิดเป็น 1,275 ล้านลูกบาศก์เมตร (หักลบกับผลการจำลองจากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.1) ที่นำมาพิจารณาปรับลดปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ลง อาจกล่าวสรุปได้ว่า แบบจำลองการโปรแกรมข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2 กำหนดบทบาทของทั้ง 4 เชื้อนในการระบายน้ำเพื่อตอบสนองความต้องการน้ำแตกต่างไปจากเดิม กล่าวคือ อัตราส่วนการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล:

เขื่อนสิริกิติ์: เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน: เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เฉลี่ยระยะยาวจากเดิมเท่ากับ 0.36:0.45:0.07:0.12 ไปเป็น 0.38:0.45:0.06:0.11 โดยในภาพรวมระยะยาวอัตราส่วนการระบายน้ำจากของเขื่อนสิริกิติ์ที่ได้จากแบบจำลองยังคงสูงกว่าเขื่อนภูมิพล และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ยังคงสูงกว่าเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนนี้ผันแปรแตกต่างกันปีน้ำและปัจจัยฤดูกาล อีกทั้งมีการเพิ่มอัตราการระบายน้ำจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์สูงขึ้นจากผลการปฏิบัติงานจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูแล้งของปีน้ำน้อยและปีน้ำปกติ ซึ่งแบบจำลองมีการเพิ่มการระบายน้ำจากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนสูงขึ้นจากเดิมในอัตรา 0.09 ไปเป็น 0.12 ในปีน้ำน้อย และอัตรา 0.06 ไปเป็น 0.07 ในปีน้ำปกติ ในขณะที่อัตราส่วนการระบายน้ำในช่วงฤดูฝนของปีน้ำน้อยซึ่งแบบจำลองมีการปรับลดอัตราการระบายน้ำจากเขื่อนสิริกิติ์ลงเล็กน้อยแต่ยังคงสูงกว่าเขื่อนภูมิพล และปรับเพิ่มปริมาณการระบายน้ำในช่วงฤดูฝนของปีน้ำปกติและปีน้ำมากสูงขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลปรับลดลงมาอย่างชัดเจนในปีน้ำมากซึ่งแตกต่างจากแนวทางการปฏิบัติงานจริงเดิม

5.1.4.9 ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่าง ระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระหว่างปี พ.ศ. 2543–2563 ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8 และ 2.16 รวมทั้งแบบจำลองรูปแบบอื่น ๆ ในกลุ่มของแบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model) จำนวน 16 รูปแบบแสดงค่าผลลัพธ์ในลักษณะคล้ายคลึงกันในการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ กล่าวคือ ปริมาณน้ำเก็บกักของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ปรับเพิ่มสูงขึ้นหรือลดลงตามข้อกำหนดของแบบจำลองในแต่ละรูปแบบไม่ว่าจะเป็นข้อกำหนดด้านข้อมูล Side Flow ท้ายเขื่อนที่นำมาพิจารณาปรับลดปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อน ข้อกำหนดของปริมาณน้ำเก็บกักที่ไม่เกินระดับ URC และข้อกำหนดของประเภทข้อมูลความต้องการน้ำที่ใช้ อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำเก็บกักของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ส่วนใหญ่ยังมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและมีแนวโน้มเข้าใกล้ระดับเก็บกักปกติในบางรูปแบบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแบบจำลองในกลุ่มนี้ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ร่วมกับนำปัจจัยของปริมาณน้ำท่าท้ายเขื่อนมาปรับลดปริมาณการระบายน้ำลง และหาค่าที่ดีที่สุดของอัตราส่วนการระบายน้ำของแต่ละเขื่อนตามสถานะน้ำต้นทุนและโหนดความต้องการน้ำที่กำหนดในแต่ละช่วงเวลา ทำให้สามารถจัดส่งน้ำเพื่อตอบสนองโหนดความต้องการในเวลาที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างระยะยาวในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2.8 ให้ค่าปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนทั้งระบบเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับ 1,221 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็น 12.98% โดยที่ปริมาณน้ำเก็บกักของทุกอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่สูงจนเกิดความเสี่ยงที่จะไหลล้นอ่างซึ่งสอดคล้องตามเป้าหมายของงานวิจัยและปริมาณการระบายน้ำทั้งระบบลดลงเฉลี่ย -256 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

5.1.4.10 แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดสามารถแก้ปัญหาโจทย์เพื่อหาค่า Sharing Ratio ที่เหมาะสมรายวันแยกตามโหนดความต้องการน้ำในแต่ละกิจกรรมการใช้น้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ อีกทั้งแบบจำลองยังดึงศักยภาพของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์มีบทบาทในการเพิ่มการระบายน้ำเพื่อตอบสนองความต้องการน้ำร่วมกัน (Joint Demand) ในภาคเกษตรกรรมและรักษาระบบนิเวศท้ายเขื่อนในลุ่มน้ำเจ้าพระยาได้มากขึ้น ส่งผลทำให้สามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ได้ตามเป้าหมายในการเพิ่มน้ำต้นทุนระยะยาวที่ตั้งไว้ ซึ่งการปรับเปลี่ยน Sharing Ratio ทั้งในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งของทั้ง 4 เขื่อนหลักส่งผลทำให้ปริมาณน้ำเก็บกักที่สะท้อนถึงปัจจัยน้ำต้นทุนที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากแบบจำลองกำหนดปริมาณการระบายน้ำตามศักยภาพน้ำต้นทุนและยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายน้ำจากเขื่อน

5.1.4.11 แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดแบบที่ 1 (ไม่พิจารณาระยะเวลาเดินทางของน้ำถึงโหนดความต้องการน้ำ) ทำให้เขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์สามารถรับมือกับสถานการณ์น้ำล้นอ่างได้ดีขึ้น โดยระบายน้ำส่วนหนึ่งมาช่วยเสริมความต้องการน้ำในโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงที่น้ำจะเต็มความจุอ่างเก็บน้ำและระบายน้ำส่วนเกินซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการศึกษาทุกภัยในพื้นที่ลุ่มต่ำทางด้านท้ายเขื่อนได้

5.1.4.12 การใช้แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดทั้ง 2 รูปแบบทำให้ปริมาณน้ำต้นทุนสูงขึ้น 1,320–1,340 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง ซึ่งสะท้อนผลลัพธ์จากการใช้เทคโนโลยีบริหารเขื่อนสมัยใหม่

5.1.4.13 การพิจารณา 20% ของข้อมูล Sideflow (สถานีตรวจวัดน้ำท่า W.4A) ท้ายเขื่อนภูมิพล และ 10% ของข้อมูล Sideflow (สถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.14&N.22A) ท้ายเขื่อนสิริกิติ์ในแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดทั้ง 2 รูปแบบทำให้ปริมาณน้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำสูงขึ้น 1,107–1,275 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี เมื่อเทียบกับข้อมูลจริง หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการนำแหล่งน้ำต้นทุนที่มีศักยภาพทางด้านท้ายเขื่อนมาใช้ให้เกิดประโยชน์เพื่อปรับลดปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อนหลัก อย่างไรก็ตาม การปรับลดปัจจัย Side Flow โดยการพิจารณาเพียง 10% ของข้อมูล Sideflow (สถานีตรวจวัดน้ำท่า W.4A) ท้ายเขื่อนภูมิพล และ 10% ของข้อมูล Sideflow (สถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.14&N.22A) ท้ายเขื่อนสิริกิติ์ในแบบจำลองทำให้ปริมาณน้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำลดลงจากกรณีดังกล่าวประมาณ 378 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

5.1.4.14 การพิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำที่ระบายจากเขื่อนในแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 2 ทำให้รูปแบบการระบายน้ำของ 4 เขื่อนหลักแตกต่างจากแบบจำลองรูปแบบที่ 1 (ไม่พิจารณาระยะเวลาเดินทางของน้ำถึงโหนดความต้องการ

น้ำ) อย่างไรก็ตามก็ดี ปริมาณน้ำต้นทุนที่เพิ่มขึ้นของทั้งระบบของแบบจำลองทั้ง 2 รูปแบบมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

5.1.4.15 รูปแบบการระบายน้ำจากแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดแบบที่ 1 (ไม่พิจารณาระยะเวลาเดินทางของน้ำถึงโหนดความต้องการน้ำ) ร่วมกับพิจารณาข้อมูล Side Flow ทางด้านท้ายพบว่า ปริมาณน้ำต้นทุนจะไปเพิ่มใน 2 เชื่อนหลักได้แก่ เชื่อนภูมิพลและเชื่อนสิริกิติ์ ในขณะที่รูปแบบการระบายน้ำจากแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดแบบที่ 2 (พิจารณาระยะเวลาเดินทางของน้ำถึงโหนดความต้องการน้ำ) พบว่า ปริมาณน้ำต้นทุนจะไปเพิ่มทั้ง 4 เชื่อนหลัก เนื่องจากระบายน้ำสอดคล้องกับความต้องการน้ำในกิจกรรมต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

5.1.4.16 การควบคุมระดับน้ำตอนบนของทุกเชื่อนแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดแบบที่ 2 (พิจารณาระยะเวลาเดินทางของน้ำถึงโหนดความต้องการน้ำ) ทำให้ปริมาณน้ำต้นทุนปรับลดลง 1,072 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี นอกจากนี้ การควบคุมระดับน้ำตอนบนของเชื่อนเฉพาะเชื่อนภูมิพลและเชื่อนสิริกิติ์ทำให้ปริมาณน้ำต้นทุนปรับลดลง 973 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

5.1.4.17 การปรับใช้ข้อมูลความต้องการน้ำในภาคเกษตรกรรมโดยอาศัยข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมร่วมกับกำหนดอัตราร้องขอ (Request Ratio) = 0.60 ในปีที่มีปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำน้อยในแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดแบบที่ 2 (พิจารณาระยะเวลาเดินทางของน้ำถึงโหนดความต้องการน้ำ) ทำให้ปริมาณน้ำต้นทุนสูงขึ้น 1,440 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี เนื่องจากเป็นมาตรการในการปรับลดปริมาณความต้องการน้ำในภาคเกษตรกรรม (Demand Side Management) เมื่อปริมาณน้ำต้นทุนในเชื่อนมีจำกัด

5.1.4.18 แบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังให้ค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสิ้นสุดฤดูฝนคิดเป็น +24.45% ทั้งระบบ หรือคิดเป็นปริมาณน้ำเก็บกักที่สะท้อนถึงปริมาณน้ำต้นทุนที่เพิ่มสูงขึ้นทั้ง 4 เชื่อนเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนเท่ากับ +5,904 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งสูงกว่าแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2, 2.8 และ 2.16 ที่มีค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสิ้นสุดฤดูฝนอยู่ในช่วง +4.17% ถึง +16.99% ทั้งระบบ หรือคิดเป็นปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มสูงขึ้นทั้ง 4 เชื่อนเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนอยู่ในช่วงเท่ากับ +1,221 ถึง +2,596 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ในขณะที่การลดลงของปริมาณการระบายน้ำจากแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังคิดเป็น -1.40% หรือคิดเป็นปริมาณการระบายน้ำสุทธิทั้ง 4 เชื่อนซึ่งลดลงจากผลการปฏิบัติจริงเท่ากับ -184 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี รูปแบบการระบายน้ำจากเชื่อนที่ลดลงดังกล่าวยังให้ค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดรูปแบบที่ 1.2, 2.8 และ 2.16 ซึ่งอยู่ในช่วง -0.94% ถึง -1.86% หรือคิดเป็นปริมาณการระบายน้ำสุทธิทั้ง 4 เชื่อนซึ่งลดลงจากผลการปฏิบัติจริงอยู่ในช่วงระหว่าง -139.03 ถึง -318.27 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

5.1.5 ข้อสรุปจากกิจกรรม CO-RUN

ผลลัพธ์ที่ได้จากกิจกรรม CO-RUN ซึ่งได้นำแบบจำลองที่พัฒนาจากงานวิจัยมาใช้ในงานบริหารเขื่อน เพื่อกำหนดแนวทางการระบายน้ำล่วงหน้าทุกสัปดาห์ในช่วงระหว่างวันที่ 1 สิงหาคม พ.ศ. 2564 ถึงวันที่ 2 ธันวาคม พ.ศ. 2564 พบว่า ผลลัพธ์จากการพยากรณ์ฝนรายวันล่วงหน้า 2 สัปดาห์ด้วยแบบจำลอง BC_CFSV2 ให้ค่าประสิทธิผลอยู่ในเกณฑ์ดีในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนบริเวณเหนือเขื่อนภูมิพล อย่างไรก็ตาม ผลการพยากรณ์ให้ค่าต่ำกว่าข้อมูลฝนตรวจวัดจริง (Underestimated) ในพื้นที่ลุ่มน้ำวัง ลุ่มน้ำยม และลุ่มน้ำน่านตอนบนบริเวณเหนือเขื่อนสิริกิติ์ ในขณะที่ผลการพยากรณ์ส่วนใหญ่ให้ค่าสูงกว่าข้อมูลฝนตรวจวัดจริง (Overestimated) เมื่อประยุกต์ใช้แบบจำลอง WRFROMS_CFSV2 ยกเว้นลุ่มน้ำน่านตอนบนบริเวณเหนือเขื่อนสิริกิติ์ที่ให้ค่าต่ำกว่าข้อมูลฝนตรวจวัดจริง ด้วยเหตุนี้ การนำเทคนิคการปรับแก้ข้อมูลฝนพยากรณ์มาใช้สามารถเพิ่มความแม่นยำของข้อมูลฝนพยากรณ์รายวัน 2 สัปดาห์ได้ค่อนข้างดี ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวถูกนำมาเป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning) ซึ่งผลการวิจัยบ่งชี้ให้เห็นว่า การพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันในลักษณะ One-Step Prediction t+1 แทน t+14 ทำให้ประสิทธิผลของการพยากรณ์แม่นยำขึ้น กล่าวคือ การกำหนดให้แบบจำลองมีการเรียนรู้จากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นแล้วทุกช่วงเวลาเพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ในลักษณะ One-Step Ahead ในการลดความคลาดเคลื่อนทั้งรูปแบบแนวโน้มและค่าข้อมูลพยากรณ์ นอกจากนี้ ยังพบอีกว่า ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในรูปของค่าเฉลี่ยพยากรณ์ที่ 7, 14, 21, 29 วันล่วงหน้าจากผลลัพธ์ของแบบจำลองการพยากรณ์ที่พิจารณาข้อมูลฝนพยากรณ์เป็นข้อมูลนำเข้าร่วมกับข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เกิดขึ้นในอดีตเพื่อใช้พยากรณ์ตั้งแต่ 1 พฤศจิกายน-2 ธันวาคม 2564 ให้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลพยากรณ์ล่วงหน้าราย 7, 14, 21, 29 วันใกล้เคียงข้อมูลจริงมากขึ้นของทุกเขื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าเฉลี่ยราย 7 วัน ยิ่งไปกว่านั้น แนวโน้มของข้อมูลพยากรณ์ยังสอดคล้องกับข้อมูลจริงทุกอ่างเก็บน้ำ หรืออาจกล่าวได้ว่า ผลลัพธ์จากแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาขึ้นด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่องและมีการปรับพารามิเตอร์ของแบบจำลองอย่างต่อเนื่องเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการวางแผนและปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ อีกทั้ง ผลการกำหนดปริมาณการระบายน้ำล่วงหน้าด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด (Constraint Programming Model, CP) โดยอาศัยข้อมูลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนและข้อมูลปริมาณ Sideflow ล่วงหน้ายังช่วยแนะนำแนวทางการระบายน้ำซึ่งนับเป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงสถานการณ์น้ำวิกฤต สำหรับรายละเอียดของผลการดำเนินงานวิจัยผ่านกิจกรรม CO-RUN ในแผนงานวิจัยที่ 3 ได้สรุปไว้ในภาคผนวก E

5.1.6 รายงานสรุปข้อเสนอแนะเชิงวิชาการและแนวทางการประยุกต์ใช้งานแบบจำลอง

รายงานสรุปข้อเสนอแนะเชิงวิชาการและแนวทางการประยุกต์ใช้งานแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้ได้สรุปไว้ในภาคผนวก F

5.1.7 สรุปผลการจัดฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการเพื่อถ่ายทอดผลงานวิจัยสู่หน่วยงานปฏิบัติ

งานวิจัยนี้ได้ทำการจัดฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการเพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้และเทคโนโลยี ตลอดจนผลลัพธ์จากงานวิจัยสู่หน่วยงานปฏิบัติจำนวน 3 แผนงาน ได้แก่ แผนงานที่ 1 การพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning, ML) แผนงานที่ 2 การพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดในการบริหารเขื่อน (Constraint Programming, CP) และแผนงานที่ 3 การพัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังในการบริหารเขื่อน (Reinforcement Learning, RL) ซึ่งจัดขึ้นระหว่างวันที่ 10-11 สิงหาคม พ.ศ. 2565 ณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อีกทั้ง คณะนักวิจัยยังได้ลงพื้นที่ภาคสนามระหว่างวันที่ 2-5 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 เพื่อศึกษาดูงานและนำเสนอผลการดำเนินงานวิจัยได้แก่ เขื่อนภูมิพลและโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ เขื่อนสิริกิติ์และโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ เขื่อนเจ้าพระยา เขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ เขื่อนนเรศวรและโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ และเขื่อนผาจุก ดังแสดงผลการปฏิบัติงานในภาคผนวก G

5.1.8 สรุปผลการเผยแพร่ผลงานวิจัยในรูปแบบบทความวิชาการในที่ประชุมทางวิชาการ

งานวิจัยนี้ได้ทำการเผยแพร่ผลงานวิจัยในรูปแบบบทความวิชาการในที่ประชุมทางวิชาการทั้งระดับชาติและระดับนานาชาติในช่วงเวลาที่ผ่านมาจำนวน 10 บทความ ดังนี้

5.1.8.1 บทความเรื่อง “Evaluating Hydroelectricity Production Re-Operating With Adapted Rule Curve Under Climate Change Scenarios: Case Study Of Bhumibol Dam In Thailand” เข้าร่วมการประชุมวิชาการ 5th International Conference on Water Resources Engineering ระหว่างวันที่ 25-26 พฤศจิกายน พ.ศ. 2564 (ได้รับการคัดเลือกให้ตีพิมพ์ในวารสาร Naresuan University Engineering Journal โดยอยู่ในระหว่างขั้นตอนดำเนินการ)

5.1.8.2 บทความเรื่อง “Tracing Crop Water Requirement in the Pumping, Gravitational and Inundation Irrigation Schemes of the Greater Chao Phraya River Basin Using Cloud-Based IriSAT Application” เข้าร่วมการประชุมวิชาการ 5th International Conference on Water Resources Engineering ระหว่างวันที่ 25-26 พฤศจิกายน พ.ศ. 2564 (ได้รับการคัดเลือกให้ตีพิมพ์ในวารสาร Naresuan University Engineering Journal โดยอยู่ในระหว่างขั้นตอนดำเนินการ)

5.1.8.3 บทความเรื่อง “The Predictability of Reservoir Inflow Prediction Model for Sirikit Dam Using XGBoost Machine Learning Algorithm” เข้าร่วมการประชุมวิชาการ 5th International Conference on Water Resources Engineering ระหว่างวันที่ 25-26 พฤศจิกายน พ.ศ. 2564

5.1.8.4 บทความเรื่อง “Assessment of WEAP Model in Simulating Rainfall–Runoff Relation in the Ping And Wang River Basins, Thailand” เข้าร่วมการประชุมวิชาการ 5th International Conference on Water Resources Engineering ระหว่างวันที่ 25–26 พฤศจิกายน พ.ศ. 2564

5.1.8.5 บทความเรื่อง “Tackling the 2021 Tropical Storm Dianmu Flood in the Greater Chao Phraya River Basin, Thailand: The Perspective Views through Co–Run Exercise under the Spearhead Research Program” เข้าร่วมการประชุมวิชาการ THA Internatioal Conference, 2022 ระหว่างวันที่ 26–28 มกราคม พ.ศ. 2565

5.1.8.6 บทความเรื่อง “Hybrid Neuro Fuzzy-Based Reservoir Re-Operation Model: Case Study of Bhumibol Dam in Thailand” เข้าร่วมการประชุมวิชาการ THA Internatioal Conference, 2022 ระหว่างวันที่ 26–28 มกราคม พ.ศ. 2565

5.1.8.7 บทความเรื่อง “Estimation of Crop Water Requirement and Irrigation Efficiency Using Cloud–Based IrriSAT Application in the Lower Ping River Basin, Thailand” เข้าร่วมการประชุมวิชาการ THA Internatioal Conference, 2022 ระหว่างวันที่ 26–28 มกราคม พ.ศ. 2565

5.1.8.8 บทความเรื่อง “Predicting the Reservoir Inflow of Bhumibol Dam Using XGBoost Machine Learning Algorithm” เข้าร่วมการประชุมวิชาการ THA Internatioal Conference, 2022 ระหว่างวันที่ 26–28 มกราคม พ.ศ. 2565

5.1.8.9 บทความเรื่อง “Application of Machine Learning in Daily Reservoir Inflow Prediction of the Bhumibol Dam, Thailand” เข้าร่วมการประชุมวิชาการ 19th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI–CON), 2022 ระหว่างวันที่ 24–27 พฤษภาคม พ.ศ. 2565

5.1.8.10 บทความเรื่อง “การศึกษาแนวทางการบริหารเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเพื่อประเมินศักยภาพของน้ำเหลือใช้สำหรับลุ่มน้ำเจ้าพระยา” เข้าร่วมการประชุมวิชาการ 15th THAICID National e-Symposium 2022 ในวันที่ 1 กรกฎาคม พ.ศ. 2565

รายละเอียดของบทความทางวิชาการเข้าร่วมประชุมทางวิชาการได้แสดงไว้ในภาคผนวก G อีกทั้งคณะนักวิจัยยังได้เขียนบทความทางวิชาการเพื่อขอรับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติเรื่อง “Optimization–based Solution for Reducing Water Scarcity in the Greater Chao Phraya River Basin, Thailand: Through Re–operating the Bhumibol and Sirikit Reservoirs Using Non–linear Programming Solver” โดยอยู่ในระหว่างขั้นตอนการนำส่งผลการปรับแก้บทความตามข้อเสนอแนะจาก

ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ เพื่อขอรับการตอบรับตีพิมพ์บทความวิชาการในวารสาร Engineering Journal ต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning, RL) ซึ่งนับเป็นเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์สมัยใหม่ที่น่ามาประยุกต์ใช้ในงานบริหารเขื่อนในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่นั้น คณะผู้วิจัยได้กำหนดแบบจำลองเชิงแนวคิดในการแก้ปัญหาโจทย์ที่มุ่งเน้นเพิ่มปริมาณน้ำต้นทุนของเขื่อนในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความซับซ้อนในการบริหารจัดการน้ำของพื้นที่ศึกษาและปัจจัยความต้องการน้ำ ประกอบกับเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลังที่อาศัยการเรียนรู้แบบลองผิดลองถูกและเงื่อนไขของการกำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่มีจำนวนมาก ส่งผลให้การเรียนรู้แนวทางการระบายน้ำเพื่อปรับปรุงกระบวนการของการปรับโครงสร้างของแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังนั้นใช้เวลาในการประมวลผลนานในแต่ละรอบของการจำลอง หรืออาจกล่าวได้ว่า การเพิ่มจำนวนรอบของการเรียนรู้ที่ยาวขึ้นคาดว่าจะส่งผลต่อผลลัพธ์ในการกำหนดการระบายน้ำและประสิทธิผลของแบบจำลองที่ดีขึ้นนั่นเอง

5.2.2 แบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด (Constraint Programming Model, CP) ที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้นับได้ว่าเป็นการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์สมัยใหม่ที่มีการดึงข้อมูลสารสนเทศน้ำล่วงหน้าจากแบบจำลองการพยากรณ์น้ำที่อาศัยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning) และการนำข้อมูลน้ำท่า (Localized Flow) ท้ายเขื่อนพิจารณาในการกำหนดการระบายน้ำ ซึ่งนำเสนอรูปแบบการระบายน้ำ/แนวทางจัดสรรน้ำร่วมกันอย่างเป็นระบบในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่โดยมุ่งเน้นที่จะเพิ่มปริมาณน้ำต้นทุนของเขื่อนหลัก (เขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์) ในระยะยาว และยังเป็น การบรรเทาความเสียหายรุนแรงจากภัยแล้งและอุทกภัยในพื้นที่ ซึ่งแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมานี้ยังสามารถพัฒนาต่อยอดในการพัฒนางานบริหารเขื่อน-อ่างเก็บน้ำให้เป็นลักษณะของการบริหารเขื่อน-อ่างเก็บน้ำแบบอัจฉริยะ (SMART Operation) ในรูปแบบของการสร้างแอปพลิเคชันสำหรับใช้เป็นระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำหลักอย่างเป็นระบบล่วงหน้าด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เพื่อรายงานผลแก่ผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการบริหารจัดการน้ำ

5.2.3 ควรมีการบูรณาการการจัดการน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินมา ร่วมกับการบริหารเขื่อน-อ่างเก็บน้ำทั้งในช่วงสถานการณ์น้ำปกติ และช่วงสถานการณ์น้ำวิกฤตทั้งอุทกภัยและภัยแล้ง นอกจากนี้ ควรมีการติดตาม CO-RUN เพื่อปรับปรุงประสิทธิผลของแบบจำลองและระบบที่พัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง

เอกสารอ้างอิง

- กรมชลประทาน. (2560). โครงการศึกษาทบทวนการเพิ่มปริมาณน้ำต้นทุนให้เขื่อนภูมิพล. จัดทำโดย บริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด บริษัท เอส เอ็น ที คอนซัลแตนท์ จำกัด และมหาวิทยาลัยนเรศวร.
- กรมชลประทาน. (2562). โครงการศึกษาทบทวนการเพิ่มปริมาณน้ำต้นทุนให้เขื่อนภูมิพล. กรุงเทพฯ: บริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด บริษัท เอส เอ็น ที คอนซัลแตนท์ จำกัด และมหาวิทยาลัยนเรศวร.
- กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2559). โครงการศึกษาความมั่นคงของกลุ่มน้ำ อย่างยั่งยืนทั้ง 25 กลุ่มน้ำ. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2555). คู่มือการระบายน้ำลุ่มน้ำเจ้าพระยา. กรุงเทพฯ: แผนกวางแผน ปฏิบัติการพลังน้ำ ฝ่ายควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2559). การพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ในการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมของกลุ่มน้ำแม่กลอง. กรุงเทพฯ: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2561ก). เขื่อนภูมิพล. สืบค้นจากอินเทอร์เน็ต, <https://www.egat.co.th/>, เมื่อวันที่ 1 กันยายน 2564.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2561ข). เขื่อนสิริกิติ์. สืบค้นจากอินเทอร์เน็ต, <https://www.egat.co.th/>, เมื่อวันที่ 1 กันยายน 2564.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2561ค). เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน. สืบค้นจากอินเทอร์เน็ต, <https://www.egat.co.th/>, เมื่อวันที่ 1 กันยายน 2564.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2561ง). เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์. สืบค้นจากอินเทอร์เน็ต, <https://www.egat.co.th/>, เมื่อวันที่ 1 กันยายน 2564.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2563). สรุปสถานการณ์น้ำและการบริหารจัดการน้ำในอ่างเก็บน้ำ กพผ. ประจำปี 2562. กรุงเทพฯ : แผนกบริหารจัดการน้ำ กองจัดการทรัพยากรน้ำ.
- การอุญ ใจปัญญา. (2528). การศึกษาการใช้น้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยา-แม่กลอง (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ฉลอง เกิดพิทักษ์. (2538). การจัดการน้ำในลุ่มน้ำของประเทศไทย. กรุงเทพฯ: บริษัท โอเชียน บลูพรินท์ จำกัด.
- วนิดา พงษ์ศักดิ์ชาติ. (2559). การใช้โปรแกรม R เพื่อการวิจัย. ชลบุรี: ภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- Abraham, B., & Ledolter, J. (2005). Statistical methods for forecasting. John Wiley & Sons, Inc., Publication. 8–78.
- Ahmad, S.K., & Hossain, F. (2019). A web-based decision support system for smart dam operations using weather forecasts. Journal of Hydroinformatics, 21(5), 687–707.

- Alibabaei, K., Gaspar, P.D., Assunção, E., Alirezazadeh, S., & Lima, T.M. (2022). Irrigation optimization with a deep reinforcement learning model: Case study on a site in Portugal. *Agricultural Water Management*, 263, 107480.
- Allawi, M.F., Jaafar, O., Mohamad Hamzah, F., Mohd, N.S., Deo, R.C., & El-Shafie, A. (2018). Reservoir inflow forecasting with a modified coactive neuro-fuzzy inference system: a case study for a semi-arid region. *Theoretical and Applied Climatology*, 134(1), 545–563.
- Babaei, M., Moeini, R., & Ehsanzadeh, E. (2019). Artificial neural network and support vector machine models for inflow prediction of dam reservoir (Case Study: Zayandehroud Dam Reservoir). *Water Resources Management*, 33(6), 2203–2218.
- Bai, Y., Chen, Z., Xie, J., & Li, C. (2016). Daily reservoir inflow forecasting using multiscale deep feature learning with hybrid models. *Journal of Hydrology*, 532, 193–206.
- Bai, Y., Xie, J., Wang, X., & Li, C. (2016). Model fusion approach for monthly reservoir inflow forecasting. *Journal of Hydroinformatics*, 18(4), 634–650.
- Bennett, C., Stewart, R.A., & Beal, C.D. (2013). ANN-based residential water end-use demand forecasting model. *Expert Systems with Applications*. 40(4), 1014–1023.
- Bouchart, F., & Chkam, H. (1998). A reinforcement learning model for the operation of conjunctive use schemes. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 26.
- Bravo, M., & Gonzalez, I. (2009). Applying stochastic goal programming: a case study on water use planning. *European Journal of Operational Research*, 196(3), 1123–1129.
- Campolo, M., Andreussi, P., & Soldati, A. (1999). River flood forecasting with a neural network model. *Water Resources Research*. 35(4), 1191–1197.
- Cerqueira, V., Torgo, L., & Soares, C. (2019). Machine learning vs statistical methods for time-series forecasting: Size matters. arXiv preprint arXiv:1909.13316.
- Chang, F.J., & Change, Y.T. (2006). Adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction of water level in reservoir. *Advances in Water Resource*, 29(1), 1–10.
- Chang, F.J., Chen, L., & Chang, L.C. (2005). Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms. *Hydrological processes*, 19(11), 2277–2289.
- Chang, F.J., Hui, S.C., & Chen, Y.C. (2002). Reservoir operation using grey fuzzy stochastic dynamic programming. *Hydrological processes*, 16(12), 2395–2408.
- Cheng, C., & Chau, K.W. (2001). Fuzzy iteration methodology for reservoir flood control operation. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1381–1388.

- Chen, T. & Guestrin, C. (2016). Xgboost: A scalable tree boosting system. In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 785–794.
- Chmielowski, W.Z. (2016). Fuzzy control in environmental engineering. Switzerland: Springer International Publishing.
- Choong, S.M., & El-Shafie, A. (2015). State-of-the-art for modelling reservoir inflows and management optimization. *Water Resources Management*, 29(4), 1267–1282.
- CNBC. (2022). Europe is experiencing its worst drought in at least 500 years. Retrieved from <https://www.cnbc.com/2022/08/23/europe-drought-worst-in-at-least-500-years-eu-report.html>.
- CNN. (2022). Hundreds of children among 1,000 people killed by Pakistan monsoon rains and floods. Retrieved from <https://edition.cnn.com/2022/08/28/asia/pakistan-flooding-intl/index.html>.
- Dornpunya, P., Rittima, A., Phankamolsil, Y., Tabucanon, A.S., Sawangphol, W., Kraisangka, J. et al. (2021). The predictability of reservoir inflow prediction model for Sirikit Dam using XGBoost machine learning algorithm. In Proceedings of the 5th International Conference on Water Resource Engineering (ICWRE5). 31–39.
- El-Shafie, A., & Noureldin, A. (2011). Generalized versus non-generalized neural network model for multi-lead inflow forecasting at Aswan High Dam. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(5), 841–858.
- Fang, H.B., Hu, T.S., Zeng, X., & Wu, F.Y. (2014). Simulation-optimization model of reservoir operation based on target storage curves. *Water Science and Engineering*, 7(4), 433–445.
- Fayaed, S.S., El-Shafie, A., & Jaafar, O. (2013). Integrated Artificial Neural Network (ANN) and Stochastic Dynamic Programming (SDP) model for optimal release policy. *Water Resources Management*, 27(10), 3679–3696.
- Ferber, J., & Weiss, G. (1999). Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence (Vol. 1): Addison-Wesley Reading.
- Hipni, A., El-shafie, A., Najah, A., Karim, O. A., Hussain, A., & Mukhlisin, M. (2013). Daily forecasting of dam water levels: comparing a Support Vector Machine (SVM) Model with Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS). *Water Resource Management*, 27, 3803–3823.

- Hornbuckle, J., Vleeshouwer, J., Ballester, C., Montgomery, J., Hoogers, R., & Bridgart, R. (2016). IrriSAT technical reference.
- Hornbuckle, J., Montgomery, J., & Vleeshouwer, J. (2016). A quick guide to the use of the cloud based IrriSAT app. Available at https://irrisat-cloud.appspot.com/doc/IrriSAT_QuickGuide_20052016.pdf on 27 July 2019.
- Housh, M., Ostfeld, A., & Shamir, U. (2013). Limited multi-stage stochastic programming for managing water supply systems. *Environmental modelling & software*, 41, 53–64.
- Hsu, N.S., Huang, C.L., & Wei, C.C. (2015). Multi-phase intelligent decision model for reservoir real-time flood control during typhoons. *Journal of Hydrology*, 522, 11–34.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). *Global warming of 1.5°C*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Jain, S.K., & Singh, V.P. (2003). *Water resources systems planning and management*. New York: Elsevier Science.
- Jozefowicz, R., Zaremba, W., & Sutskever, I. (2015, June). An empirical exploration of recurrent network architectures. *International conference on machine learning, PMLR* (37), 2342–2350.
- González-Briones, A., Mezquita, Y., Castellanos-Garzón, J.A., Prieto, J., & Corchado, J.M. 2019. Intelligent multi-agent system for water reduction in automotive irrigation processes. *Procedia Computer Science*, 151, 971–976.
- Kalballi, E., Sabouni, M. S., & Ziaee, S. (2015). Application of mathematical programming model for optimal allocation of Voshmgir Dam water for various consumptions (Case Study: Golestan Province). *International Journal of Applied*, 5(2), 19–33.
- Kale, M., Nagdeve, M., & Wadtkar, S. (2012). Reservoir inflow forecasting using artificial neural network. *Hydrol. J*, 35(1–2), 52–61.
- Kangrang, A., & Chaleeraktragoon, C. (2007). Genetic algorithms connected simulation with smoothing function for searching rule curves. *American Journal of Applied Sciences*, 4(2), 73–79.
- Linder, R., Mohamed, E. I., De Lorenzo, A., & Pöpl, S. J. (2003). The capabilities of artificial neural networks in body composition research. *Acta Diabetologica*, 40(1): s9–s14.

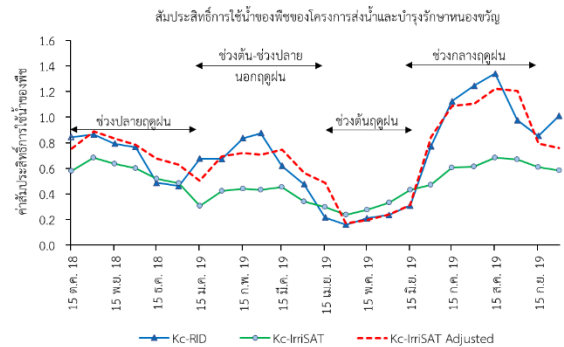
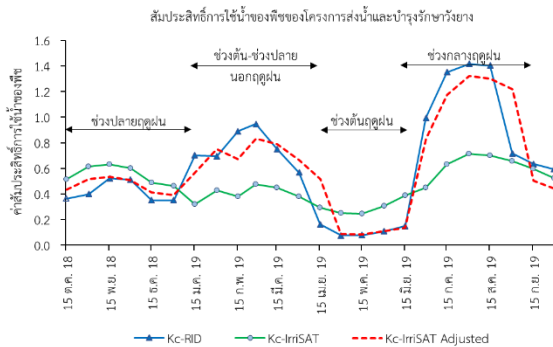
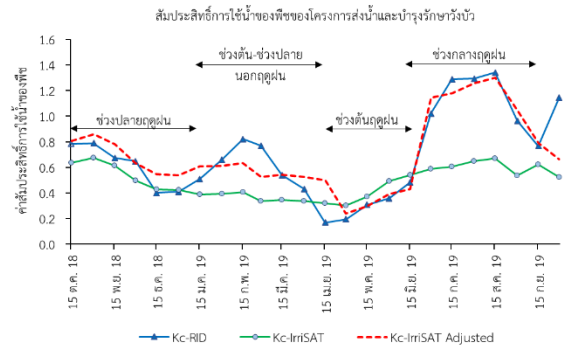
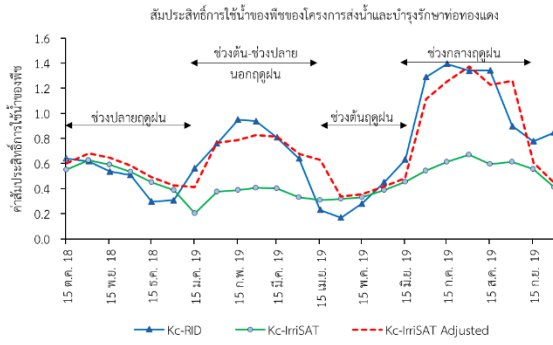
- Liou, Y.T., & Lo, S.L. (2005). A fuzzy index model for trophic status evaluation of reservoir waters. *Water Research*, 39(7), 1415–1423.
- Liu, J., Savenije, H.H.G., & Xu, J. (2003). Forecast of water demand in Weinan City in China using WDF-ANN model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(4), 219–224.
- Mahootchi, M., Tizhoosh, H., & Ponnambalam, K. (2006). Reservoir operation optimization by reinforcement learning. *The proceedings of the International Conference on Storm water and Urban Water Systems, Monograph*.
- Mehta, R., & Jain, S.K. (2009). Optimal operation of a multi-purpose reservoir using neuro-fuzzy technique. *Water Resources Management*, 23(3), 509–529.
- Moeini, R., Afshar, A., & Afshar, M.H. (2011). Fuzzy rule-based model for hydropower reservoirs operation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33(2), 171–178.
- Mokhtar, S.A., Ishak, W.H.W., & Norwawi, N.M. (2016). Modeling reservoir water release decision using adaptive neuro fuzzy inference system. *Journal of Information and Communication Technology*, 15(2), 141–152.
- Mosavi, A., Ozturk, P., & Chau, K. W. (2018). Flood prediction using machine learning models: Literature review. *Journal of Water*, 10(11), 1536: 1–40.
- Osman, A. I. A., Ahmed, A. N., Chow, M. F., Huang, Y. F., & El-Shafie, A. (2021). Extreme gradient boosting (Xgboost) model to predict the groundwater levels in Selangor Malaysia. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2): 1545–1556.
- Pablo Ortiz-Partida, J., Lane, B.A., & Sandoval-Solis, S. (2016). Economic effects of a reservoir re-operation policy in the Rio Grande/Bravo for integrated human and environmental water management. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 8(2016), 130–144.
- Paradis, E. (2015). *R for beginners*. Institut des Sciences de l' _ Evolution, Universit_e Montpellier, France.
- Pinthong, P., Das Gupta, A., Babel, M. S., & Weesakul, S. (2008). Improved Reservoir Operation Using Hybrid Genetic Algorithm and Neurofuzzy Computing. *Water Resources Management*, 23(4), 697.
- Piriyakul, M. (2003). *Advanced forecasting techniques*, 1st edition, Ramkhamhaeng University Publication. 1–324.
- Prékopa, A. (2013). *Stochastic programming*. Springer Science & Business Media, 324.

- Qin, C., Zhang, Y., Bao, F., Zhang, C., Liu, P., & Liu, P. (2021). XGBoost optimized by adaptive particle swarm optimization for credit scoring. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021(6655510): 1–18.
- Rani, D., & Moreira, M.M. (2010). Simulation–optimization modeling: a survey and potential application in reservoir systems operation. *Water Resources Management*, 24(6), 1107–1138.
- Rath, A., Samantaray, S., Bhoi, K.S., & Swain, P.C. (2017). Flow forecasting of Hirakud Reservoir with ARIMA model. In *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)* (pp. 2952–2960). IEEE.
- Ravinder, H.V. (2013). Determining the optimal values of exponential smoothing constants—does solver really work?. *American Journal of Business Education*, 6(3): 347–360.
- Rieker, J.D., & Labadie, J.W. (2012). An intelligent agent for optimal river–reservoir system management. *Water Resources Research*, 48(9).
- Rossi, F., Van Beek, P., & Walsh, T. (2006). *Handbook of constraint programming*. New York: Elsevier Science.
- Stuckey, P.J., Kim, M., Tack, G. (2018). *MiniZinc Handbook* (Release 2.2.1).
- Taghi Sattari, M., Yurekli, K., & Pal, M. (2012). Performance evaluation of artificial neural network approaches in forecasting reservoir inflow. *Applied Mathematical Modelling*, 36(6), 2649–2657.
- Valipour, M., Banihabib, M.E., & Behbahani, S.M.R. (2013). Comparison of the ARMA, ARIMA, and the autoregressive artificial neural network models in forecasting the monthly inflow of Dez dam reservoir. *Journal of hydrology*, 476, 433–441.
- Valizadeh, N., & El-Shafie, A. (2013). Forecasting the level of reservoirs using multiple input fuzzification in ANFIS. *Water Resource Management*, 27(33), 3319–3331.
- Villarrubia, G., Paz, J.F.D., Iglesia, D.H.D.L., & Bajo, J. (2017). Combining multi-agent systems and wireless sensor networks for monitoring crop irrigation. *Sensors*, 17(8), 1775.
- Vonk, E. (2013). *Dam reoperation as an adaptation strategy for shifting patterns of water supply and demand* (Master Thesis). University of Twente, Enschede.
- Vuolo, F., De Michele, C., & Lazzaro, U. (2006). Success stories: analysis and evaluation of the Italian case–study of Demeter in the Destra Sele plain earth observation for vegetation monitoring and water management, International conference, Napoli, Italy.

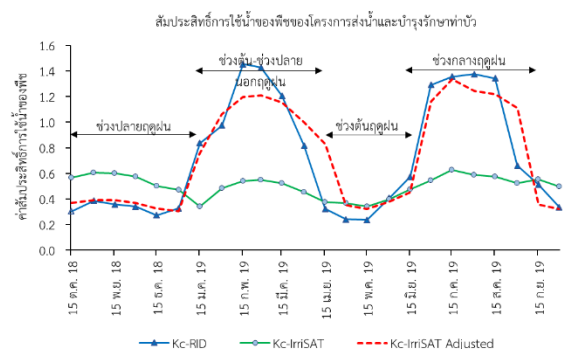
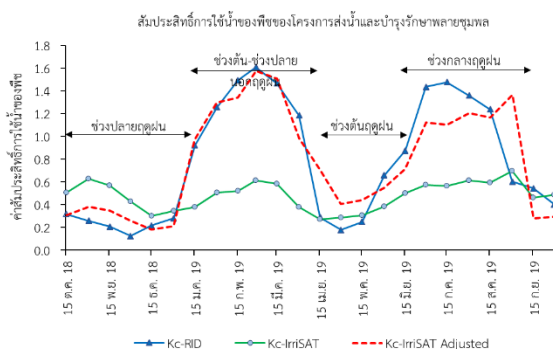
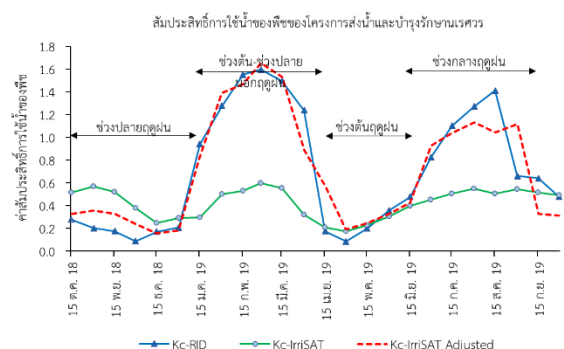
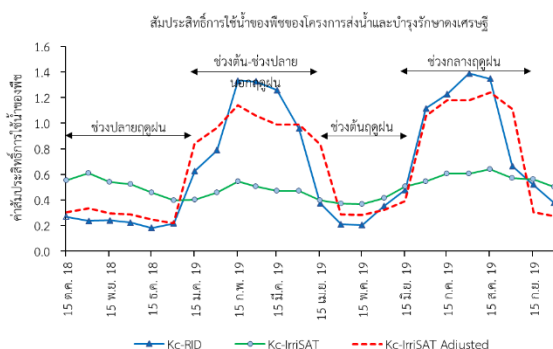
- Wang, L., Wang, X., Chen, A., Jin, X., & Che, H. (2020). Prediction of type 2 diabetes risk and its effect evaluation based on the XGBoost model. *Healthcare*, 8(3): 247.
- Wang, Z., Yang, J., Deng, X., & Lan, X. (2015). Optimal water resources allocation under the constraint of land use in the Heihe River Basin of China. *Sustainability*, 7(2), 1558–1575.
- Wei, C.C., & Hsu, N.S. (2008). Derived operating rules for a reservoir operation system: comparison of decision trees, neural decision trees and fuzzy decision trees. *Water Resources Research*, 44(2).
- Wenwu, L., Mbanze, D., & Xueying, Z. (2018). Model dependent reinforcement learning algorithm for reservoir operation stochastic optimization. *Int J Hydro*, 2(5), 579–585.
- Wurbs Ralph, A. (1993). Reservoir–system simulation and optimization models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(4), 455–472.
- Yan, Z., & Li, M. (2018). A stochastic optimization model for agricultural irrigation water allocation based on the field water cycle. *Water*, 10(8), 1031.
- Yang, T., Asanjan, A.A., Welles, E., Gao, X., Sorooshian, S., & Liu, X. (2017). Developing reservoir monthly inflow forecasts using artificial intelligence and climate phenomenon information. *Water Resources Research*, 53(4), 2786–2812.
- Zhang, C., Engel, B.A., Guo, P., Liu, X., Guo, S., Zhang, F., & Wang, Y. (2018). Double–sided stochastic chance–constrained linear fractional programming model for managing irrigation water under uncertainty. *Journal of hydrology*, 564, 467–475.

ภาคผนวก A

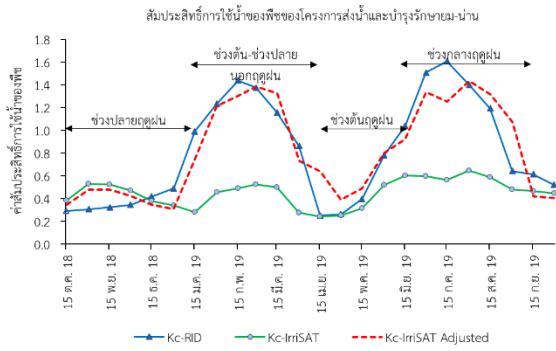
ผลการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชของโครงการชลประทานและ
ค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrriSAT Adjusted และ Kc-RID ของโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่



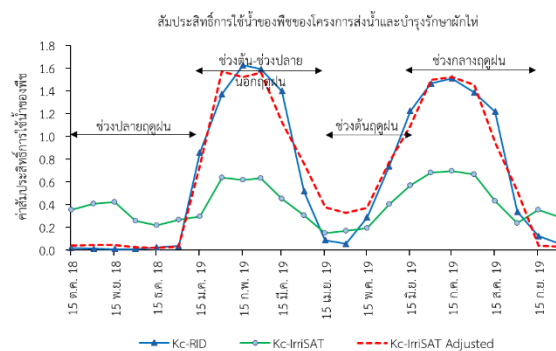
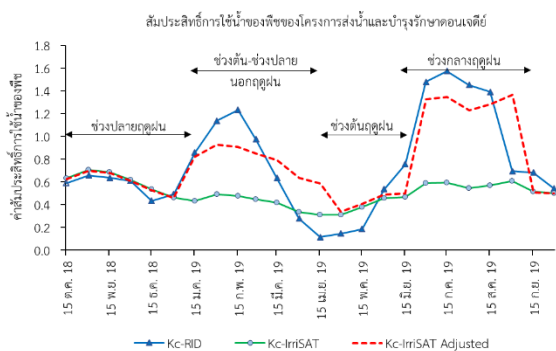
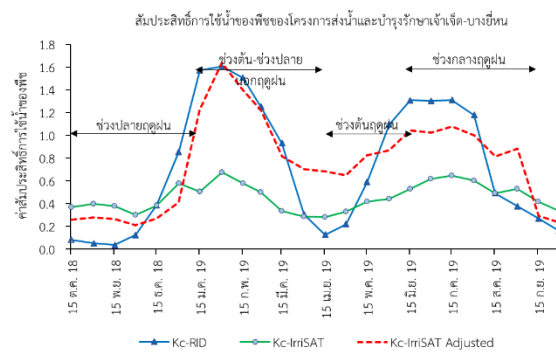
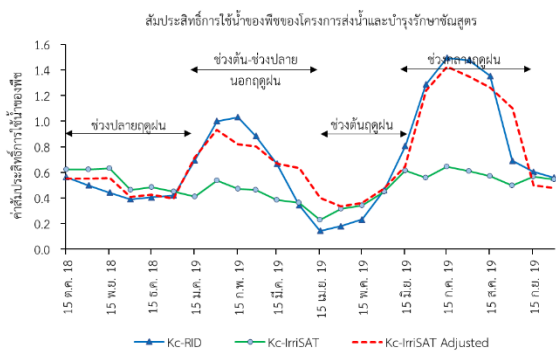
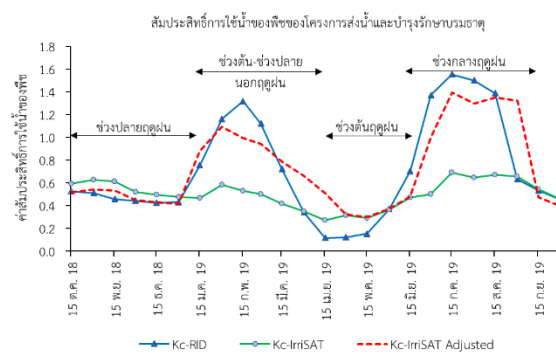
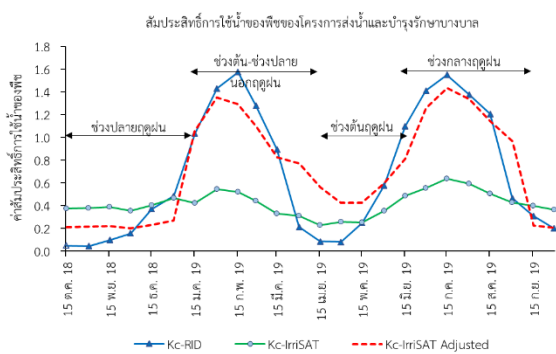
รูปผนวกที่ A-1 ผลการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชของโครงการชลประทานลุ่มน้ำปิงตอนล่าง



รูปผนวกที่ A-2 ผลการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชของโครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง



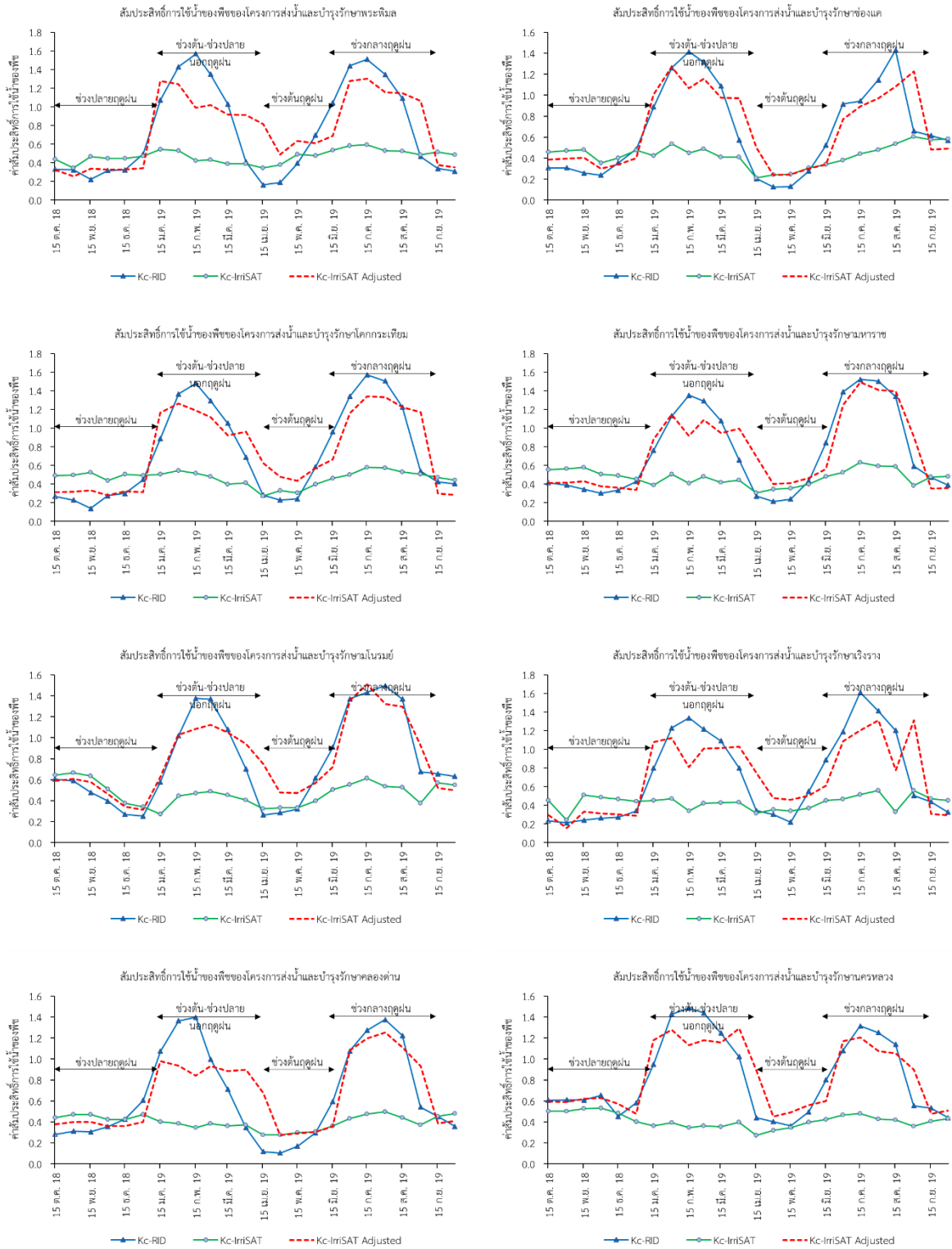
รูปผนวกที่ A-2 ผลการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชของโครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง (ต่อ)



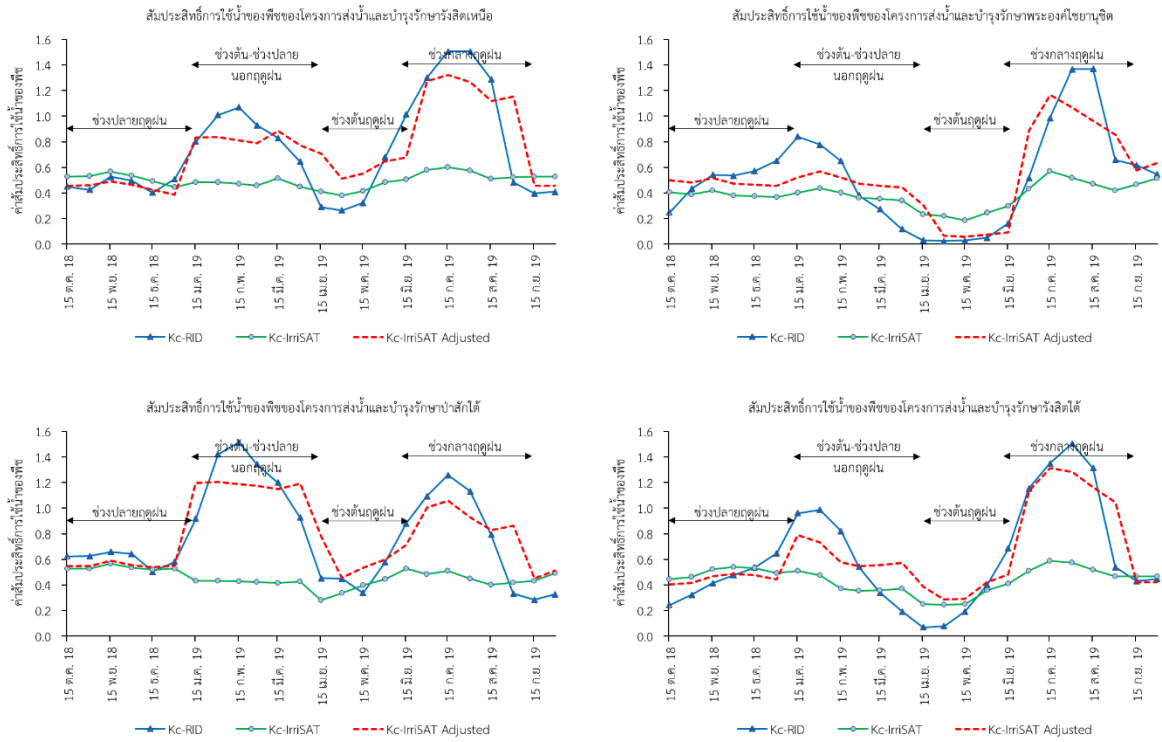
รูปผนวกที่ A-3 ผลการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชของโครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน



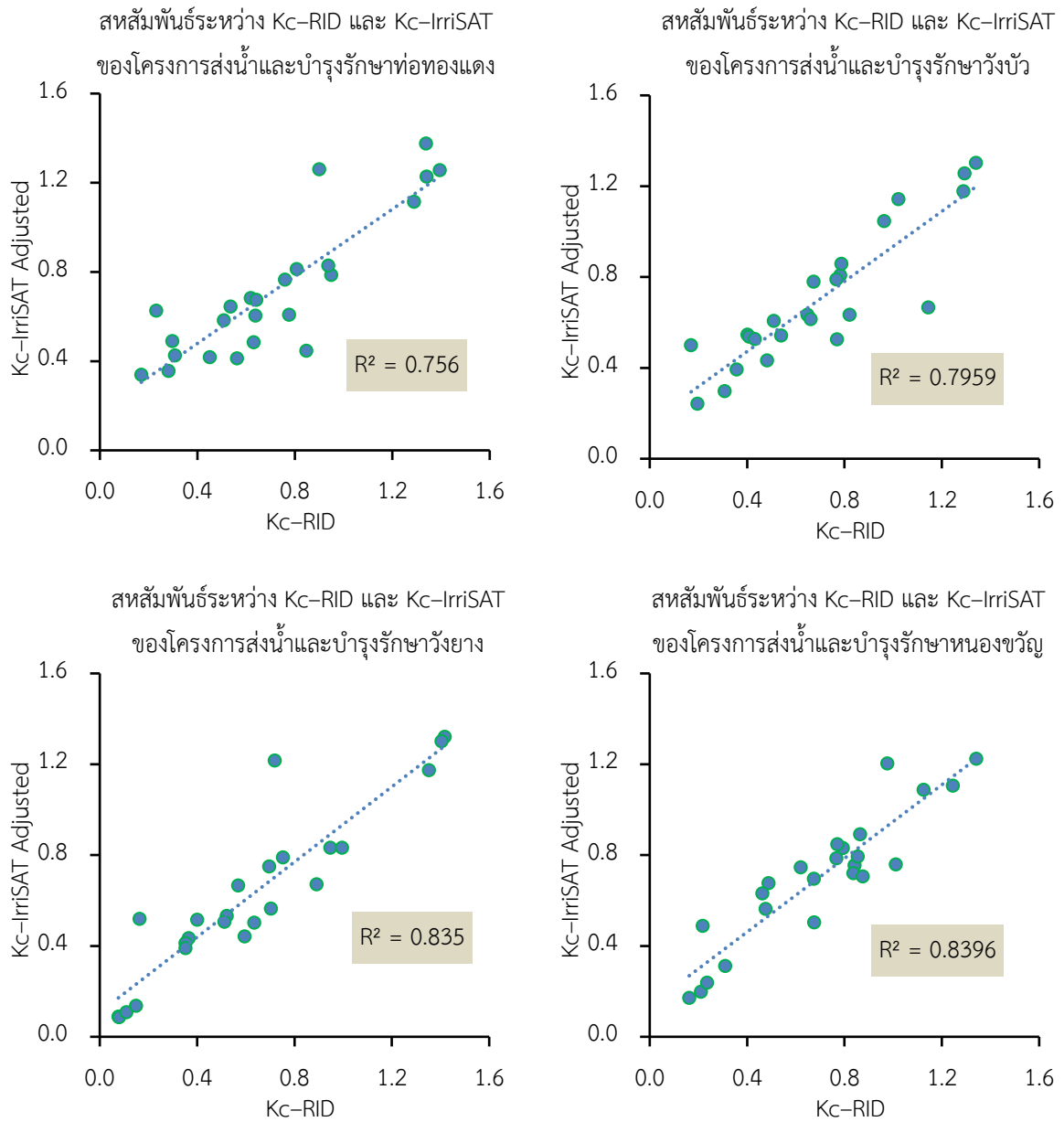
รูปผนวกที่ A-3 ผลการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชของโครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน (ต่อ)



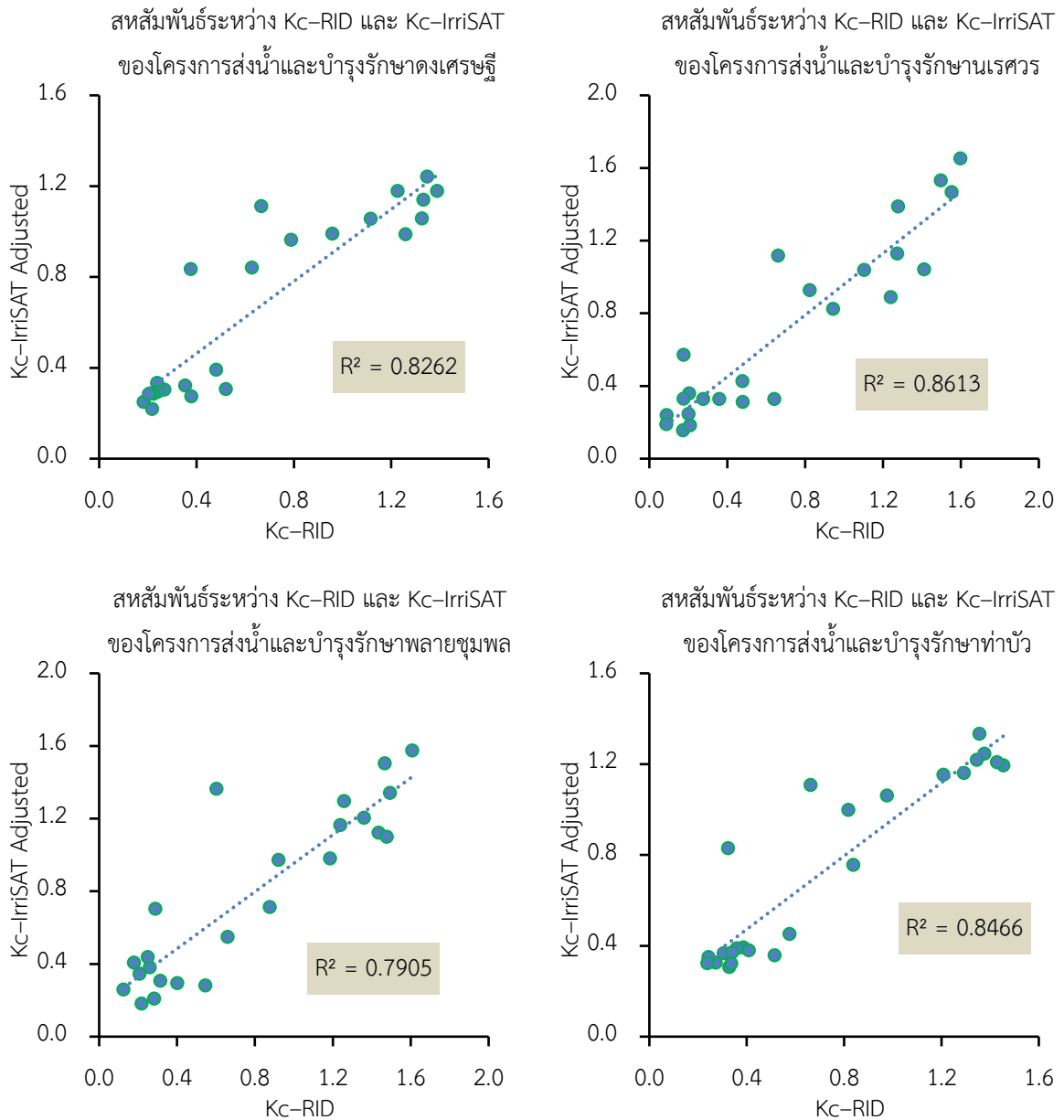
รูปผนวกที่ A-3 ผลการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพีชของโครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน (ต่อ)



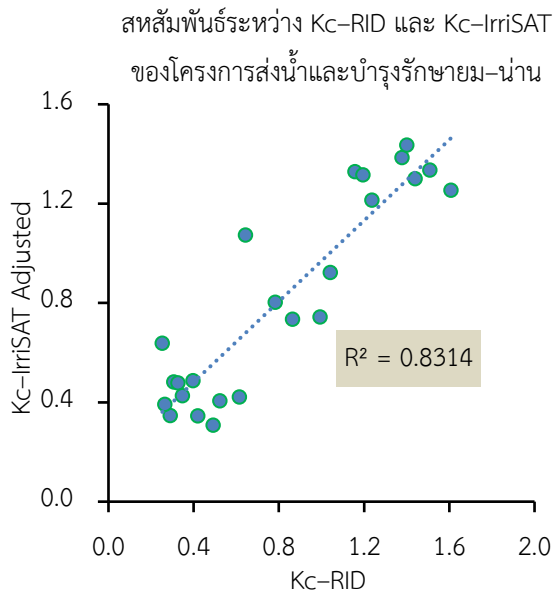
รูปผนวกที่ A-3 ผลการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชของโครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน (ต่อ)



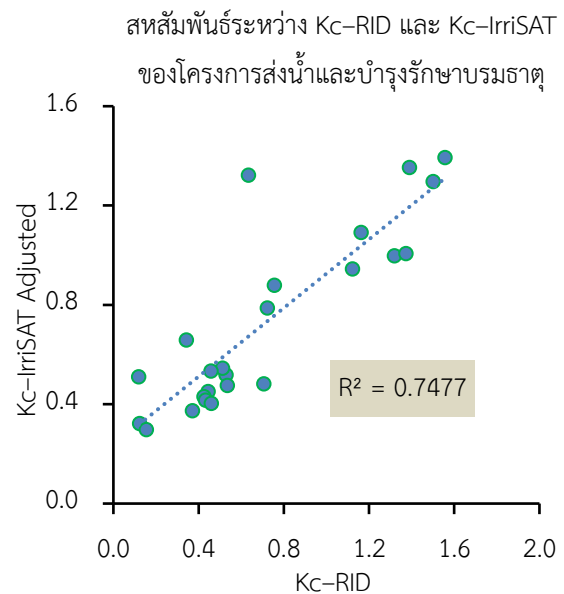
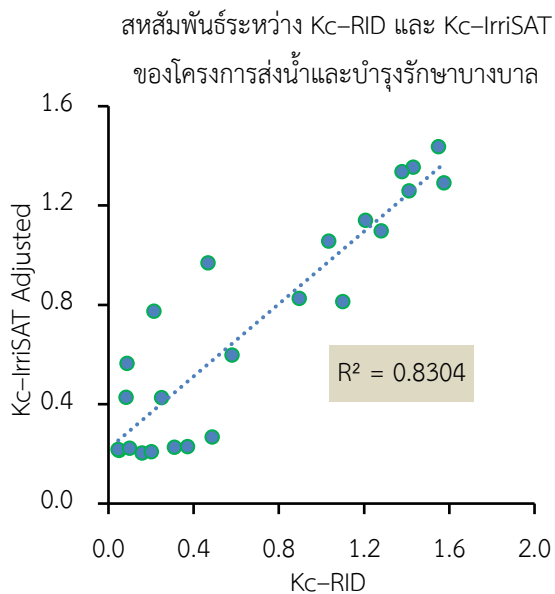
รูปผนวกที่ A-4 สหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrrisAT Adjusted และ Kc-RID ของโครงการชลประทานลุ่มน้ำ
ปิงตอนล่าง



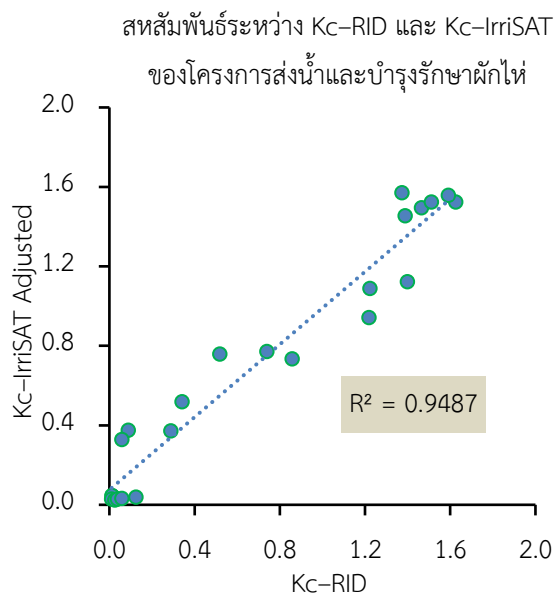
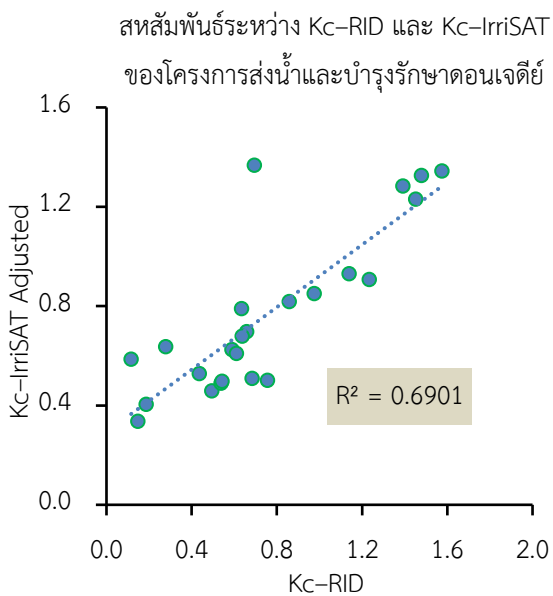
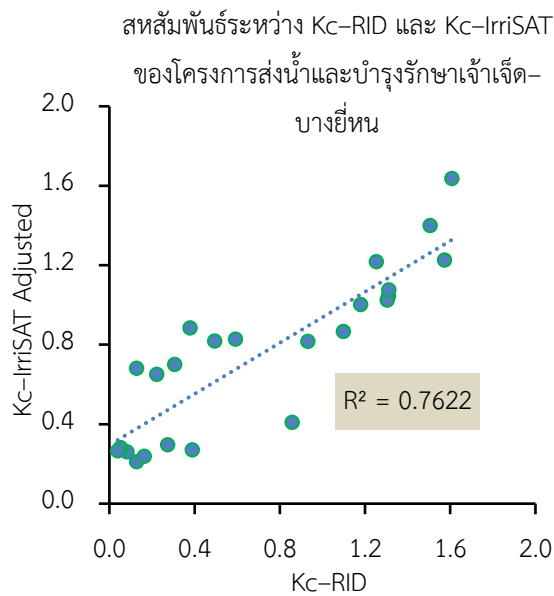
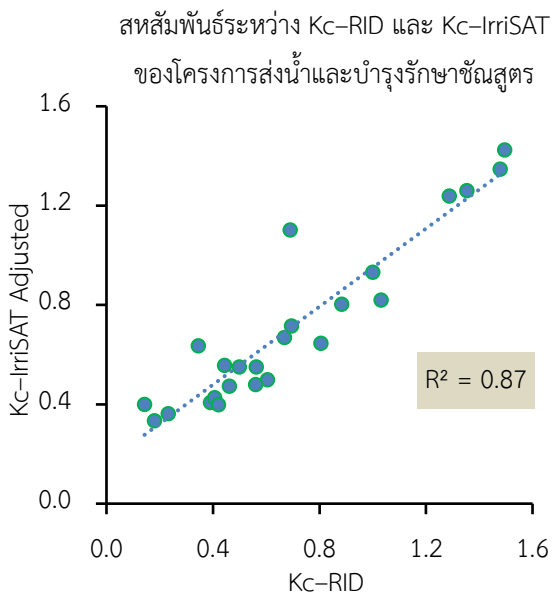
รูปผนวกที่ A-5 สหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrriSAT Adjusted และ Kc-RID ของโครงการชลประทานลุ่มน้ำ
น่านตอนล่าง



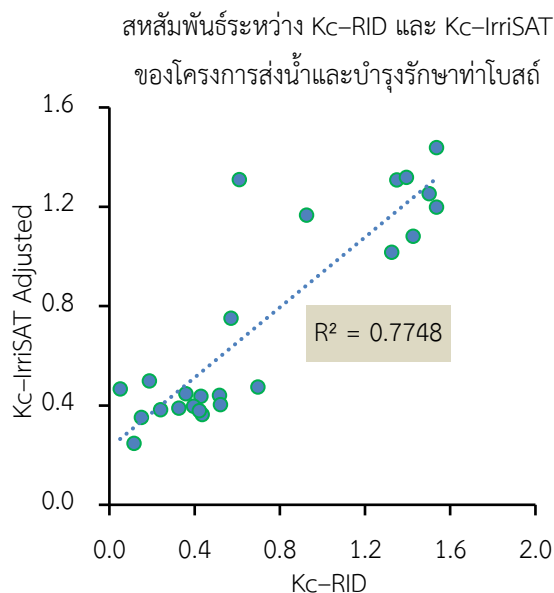
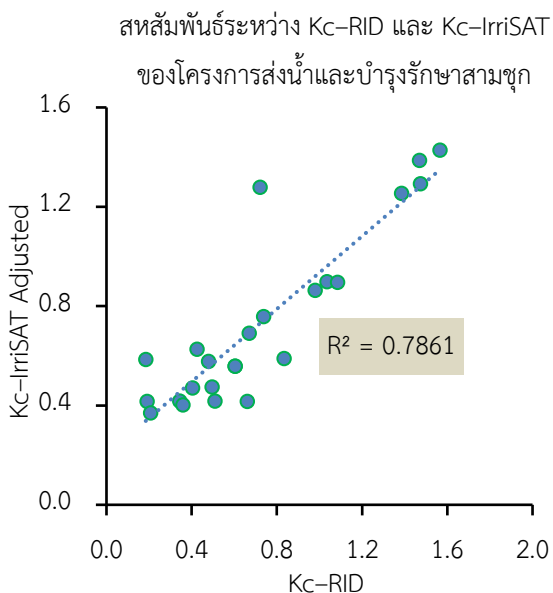
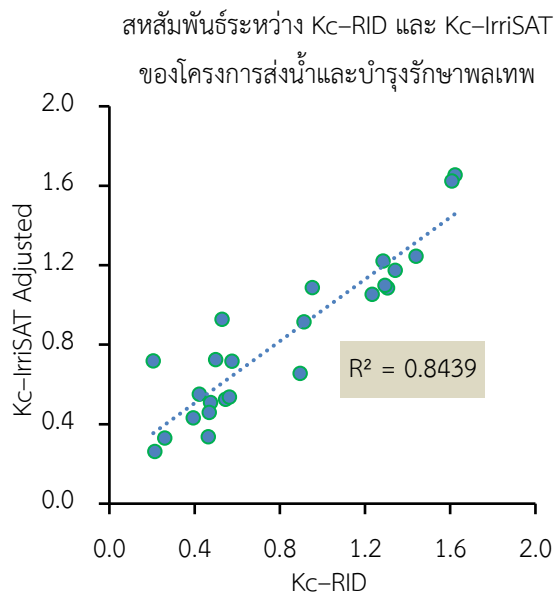
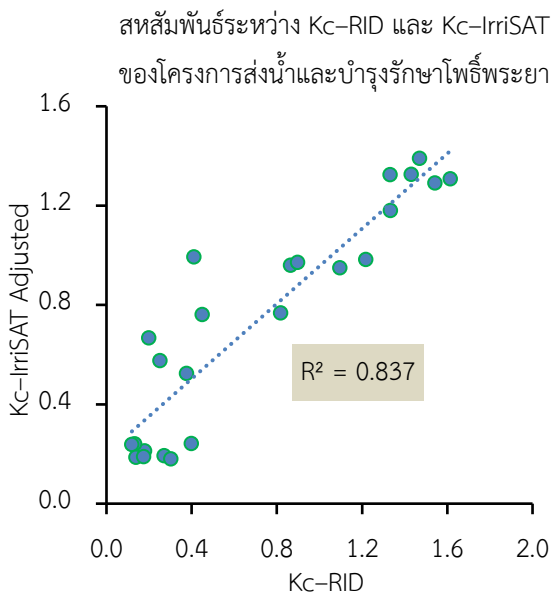
รูปผนวกที่ A-5 สหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrriSAT Adjusted และ Kc-RID ของโครงการชลประทานลุ่มน้ำ
น่านตอนล่าง (ต่อ)



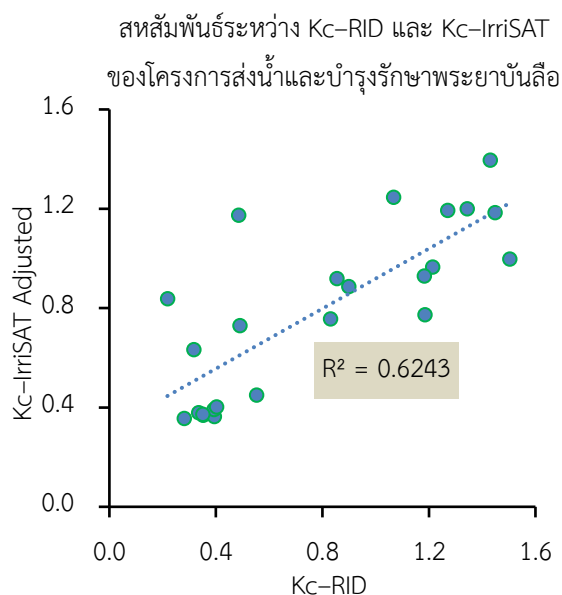
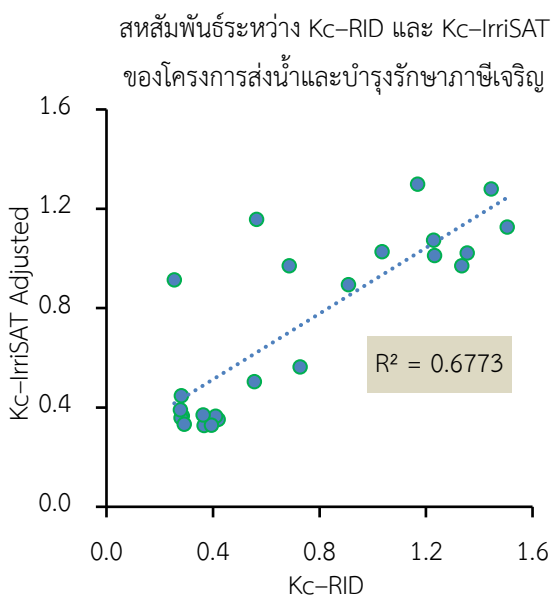
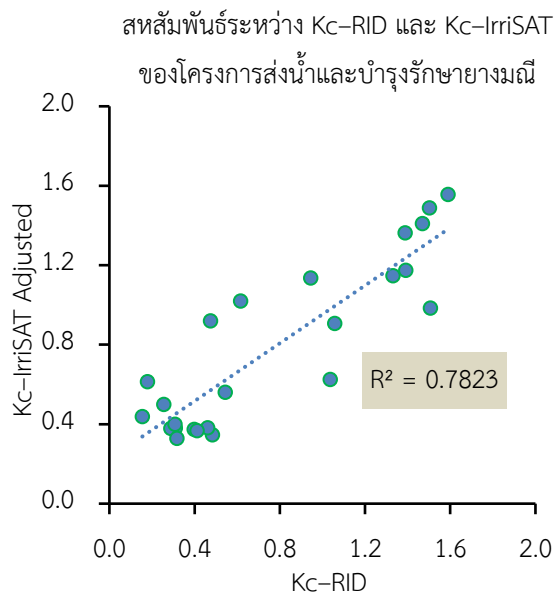
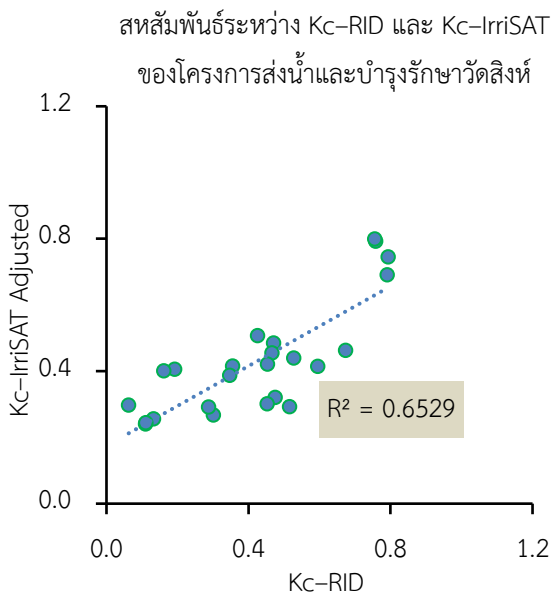
รูปผนวกที่ A-6 สหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrriSAT Adjusted และ Kc-RID ของโครงการชลประทานลุ่มน้ำ
เจ้าพระยา-ท่าจีน



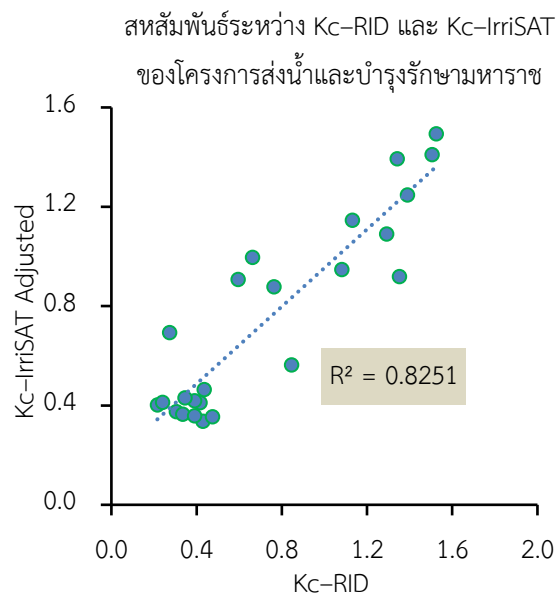
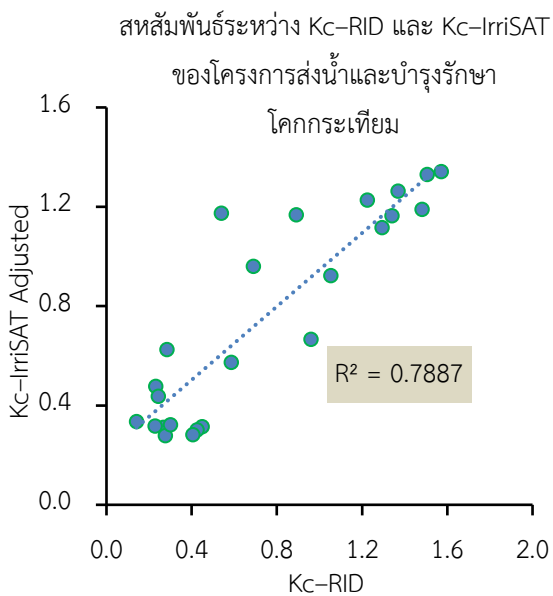
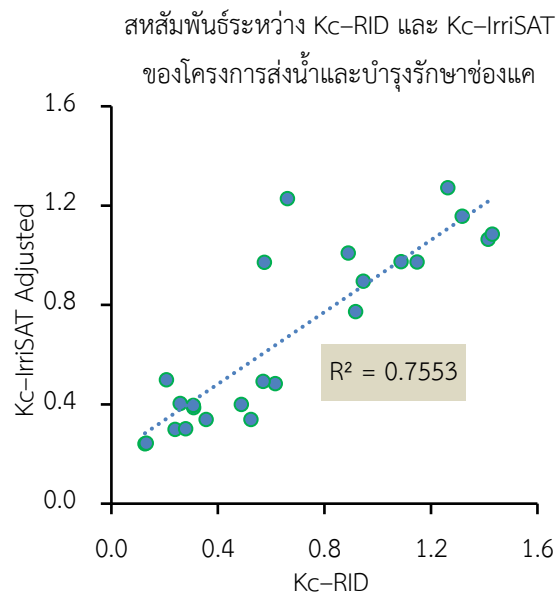
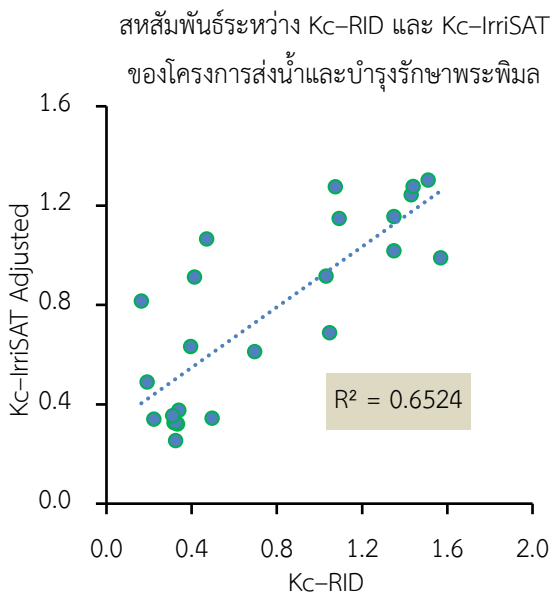
รูปผนวกที่ A-6 สหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrriSAT Adjusted และ Kc-RID ของโครงการชลประทานลุ่มน้ำ
เจ้าพระยา-ท่าจีน (ต่อ)



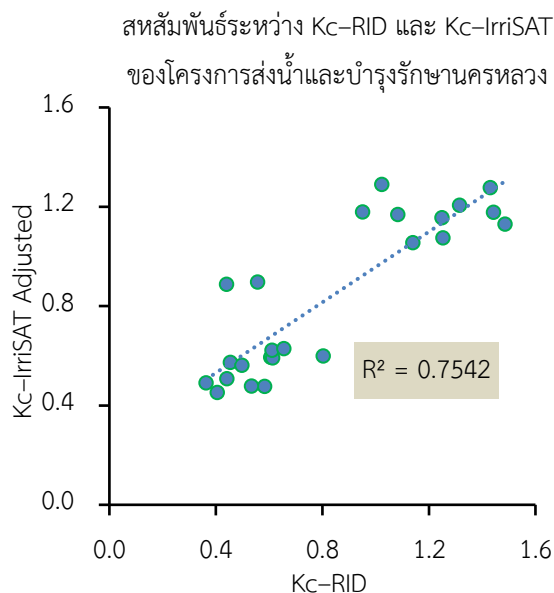
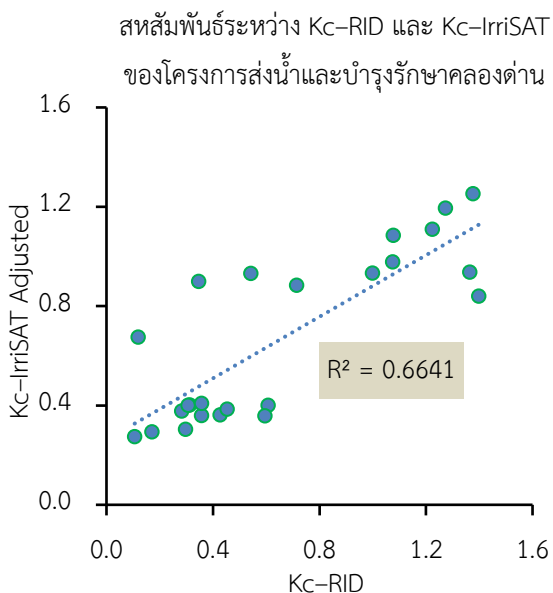
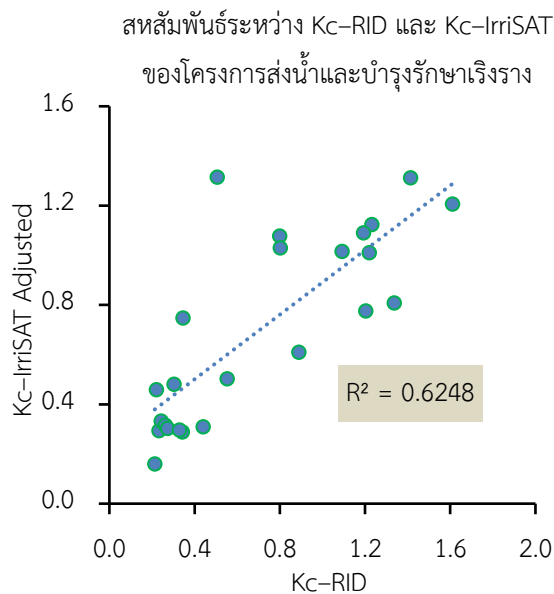
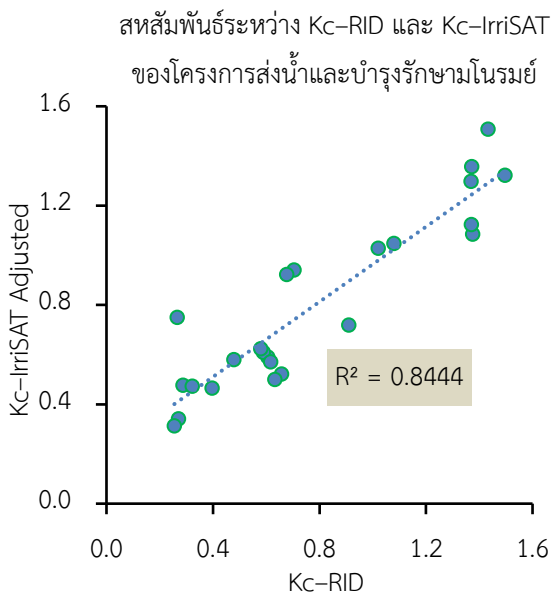
รูปผนวกที่ A-6 สหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrriSAT Adjusted และ Kc-RID ของโครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน (ต่อ)



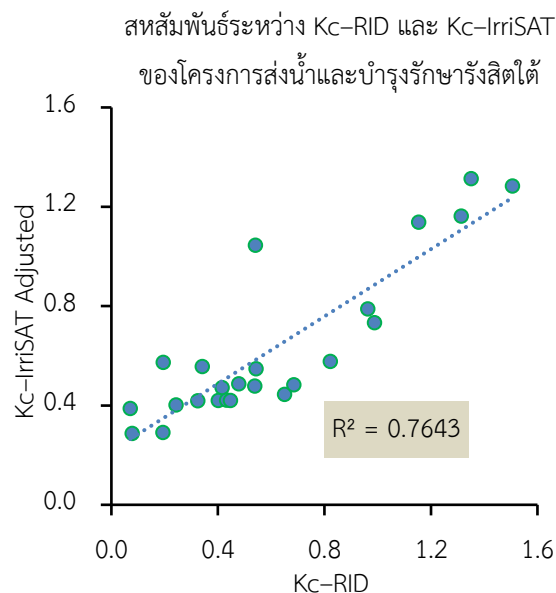
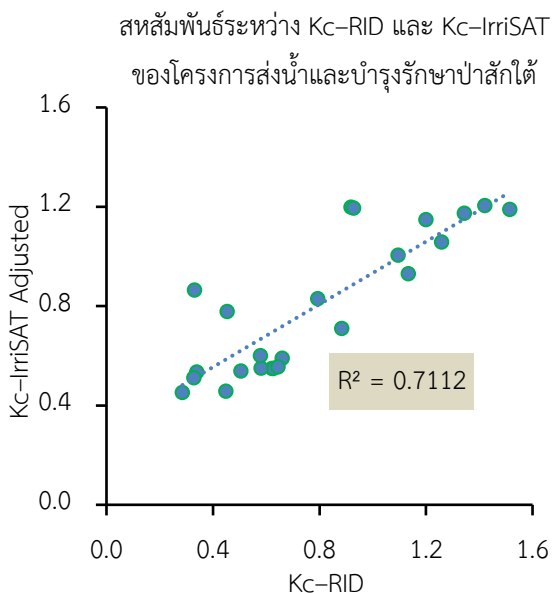
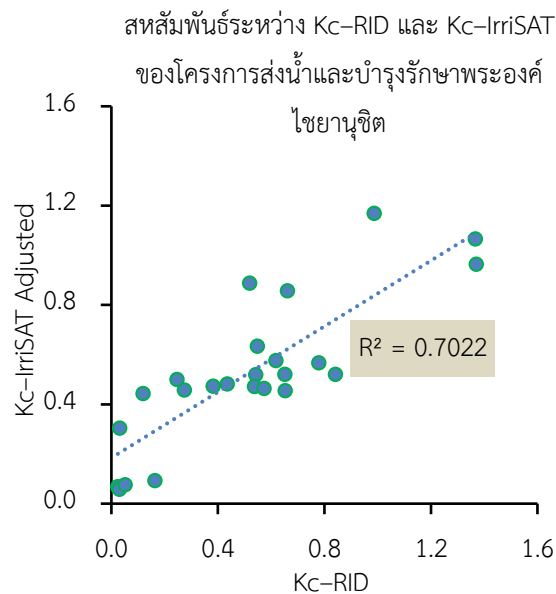
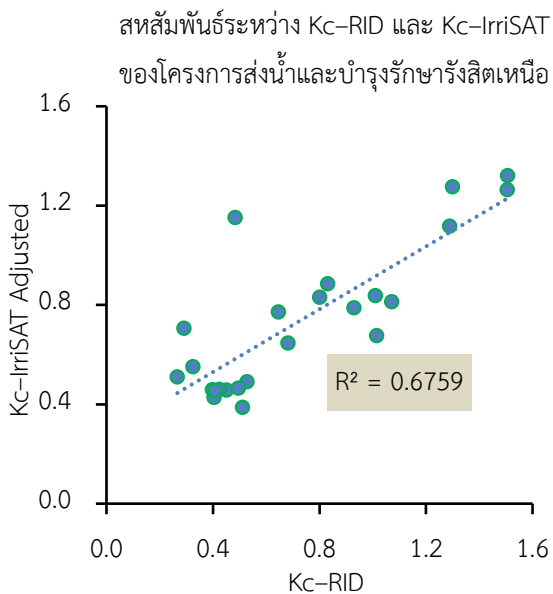
รูปผนวกที่ A-6 สหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrriSAT Adjusted และ Kc-RID ของโครงการชลประทานลุ่มน้ำ
เจ้าพระยา-ท่าจีน (ต่อ)



รูปผนวกที่ A-6 สหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrriSAT Adjusted และ Kc-RID ของโครงการชลประทานลุ่มน้ำ
เจ้าพระยา-ท่าจีน (ต่อ)



รูปผนวกที่ A-6 สหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrriSAT Adjusted และ Kc-RID ของโครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน (ต่อ)



รูปผนวกที่ A-6 สหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrriSAT Adjusted และ Kc-RID ของโครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน (ต่อ)

ภาคผนวก B

ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันและรายเดือนจากแบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวและแบบหลายอย่างด้วยอัลกอริทึม XGBoost และ LSTM ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

ตารางผนวกที่ B-1 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรายวันของ
การแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 60:40

แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 60:40							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	0.17	16.71	197.05	0.17	11.02	145.71
It + Avg. 3	0.01	0.17	16.66	206.88	0.17	11.00	144.75
It + Avg. 3	0.001	0.16	16.65	206.11	0.16	10.99	145.34
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	0.23	17.41	286.34	0.09	11.51	253.34
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	0.18	17.21	271.72	0.18	11.38	251.49
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	0.22	17.30	275.71	0.22	11.45	252.87
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	0.19	17.29	280.45	0.19	11.71	182.25
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	0.20	17.45	292.61	0.20	11.80	202.46
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	0.17	17.48	294.93	0.14	11.81	204.46
It + Avg. 7	0.1	0.17	16.54	178.34	0.17	10.98	146.35
It + Avg. 7	0.01	0.18	16.53	186.20	0.18	10.99	121.80
It + Avg. 7	0.001	0.19	16.39	184.92	0.19	10.90	122.13
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	0.15	16.79	250.89	0.15	11.06	157.74
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	0.16	16.67	245.78	0.16	10.96	160.97
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	0.17	16.67	245.88	0.17	10.96	159.65
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	0.13	17.04	270.41	0.13	11.53	158.00
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	0.16	17.01	268.02	0.16	11.52	164.64
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	0.16	16.84	260.16	0.16	11.40	162.67

ตารางผนวกที่ B-2 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรายวันของ
การแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 70:30

แบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้าประเภท	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	0.26	15.48	185.44	0.26	10.27	135.90
It + Avg. 3	0.01	0.25	15.42	186.73	0.25	10.22	135.11
It + Avg. 3	0.001	0.25	15.38	186.68	0.25	10.19	134.93
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	0.27	15.47	226.64	0.27	10.29	207.07
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	0.23	15.63	236.78	0.23	10.37	205.15
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	0.24	15.62	237.86	0.24	10.37	199.50
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	0.22	16.23	260.45	0.22	11.01	191.68
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	0.21	16.07	254.16	0.20	10.88	172.25
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	0.20	16.01	250.99	0.20	10.84	162.21
It + Avg. 7	0.1	0.23	16.06	185.27	0.23	10.78	128.63
It + Avg. 7	0.01	0.23	16.00	185.55	0.23	10.75	142.38
It + Avg. 7	0.001	0.22	15.83	179.37	0.22	10.64	139.70
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	0.23	16.18	264.62	0.23	10.74	164.92
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	0.24	15.94	249.53	0.24	10.56	159.09
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	0.24	16.00	252.47	0.24	16.00	252.47
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	0.22	16.06	256.73	0.22	16.06	256.73
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	0.13	16.33	271.11	0.21	11.09	163.29
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	0.15	16.34	272.10	0.21	11.10	164.19

ตารางผนวกที่ B-3 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรายวันของ
การแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 80:20

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 80:20							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	0.28	14.93	194.61	0.28	11.49	141.93
It + Avg. 3	0.01	0.27	14.88	191.70	0.27	11.47	139.80
It + Avg. 3	0.001	0.27	14.88	192.31	0.27	11.47	139.37
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	0.26	15.19	258.12	0.26	11.67	231.08
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	0.26	14.97	246.00	0.26	11.50	215.43
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	0.28	15.07	252.46	0.28	11.58	222.04
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	0.26	15.00	246.48	0.26	11.80	174.02
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	0.24	15.13	255.23	0.24	11.91	177.67
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	0.23	15.03	250.17	0.23	11.84	174.39
It + Avg. 7	0.1	0.22	14.55	169.66	0.22	11.40	126.38
It + Avg. 7	0.01	0.25	14.62	174.24	0.25	11.43	140.21
It + Avg. 7	0.001	0.25	14.61	173.85	0.25	11.42	136.72
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	0.27	14.75	240.03	0.27	11.29	153.37
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	0.28	14.85	244.88	0.28	11.35	154.81
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	0.26	14.93	249.01	0.26	11.42	156.17
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	-0.40	15.60	286.37	0.21	12.26	169.68
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	0.13	15.25	267.06	0.23	11.97	160.86
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	0.17	15.35	273.20	0.22	12.06	160.45

ตารางผนวกที่ B-4 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรายเดือน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 60:40

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 60:40							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	-1.06	437.44	1,617.14	5.08	414.25	1,617.14
It + Avg. 3	0.01	1.03	427.61	1,483.95	2.49	405.58	1,483.95
It + Avg. 3	0.001	1.37	440.23	1,558.44	2.72	414.62	1,519.02
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	4.43	437.72	1,916.38	9.51	356.45	1,496.93
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	4.41	459.70	2,048.36	7.61	371.35	1,612.08
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	6.19	425.05	1,857.83	10.18	344.96	1,450.73
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	4.41	379.36	1,627.57	6.62	328.95	1,329.44
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	6.18	393.32	1,695.37	8.39	342.34	1,334.96
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	3.85	479.55	2,285.28	9.01	417.64	1,823.73
It + Avg. 7	0.1	17.70	479.55	1,968.65	53.20	564.05	1,821.06
It + Avg. 7	0.01	0.24	337.26	1,174.95	17.83	388.21	1,174.95
It + Avg. 7	0.001	16.50	444.68	1,769.70	46.76	521.72	1,714.52
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	14.56	518.81	2,423.31	32.99	515.24	2,189.12
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	1.83	449.48	1,748.34	12.68	421.39	1,670.58
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	3.47	476.17	1,982.19	18.26	453.98	1,810.84
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	3.71	479.57	2,310.09	12.57	447.42	2,041.12
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	4.16	485.19	2,394.18	15.32	455.26	2,023.18
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	5.88	456.19	2,187.41	13.47	418.43	1,790.66

ตารางผนวกที่ B-5 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรายเดือน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 70:30

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	6.26	429.77	1,798.46	6.26	412.71	1,631.14
It + Avg. 3	0.01	4.63	406.68	1,579.83	6.14	393.40	1,567.89
It + Avg. 3	0.001	4.31	470.41	2,009.68	5.45	451.72	1,817.97
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	6.37	449.88	2,156.27	4.11	344.06	1,790.82
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	3.91	423.64	1,982.15	7.57	329.54	1,619.17
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	5.32	458.53	2,252.50	2.28	354.63	1,751.94
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	7.02	459.15	2,231.01	2.40	392.82	1,999.68
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	7.08	435.17	2,089.30	5.49	373.51	1,763.13
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	7.08	435.17	2,089.30	5.49	373.51	1,763.13
It + Avg. 7	0.1	9.33	391.61	1,497.96	27.91	451.63	1,439.40
It + Avg. 7	0.01	48.29	468.76	2,141.69	52.75	562.06	1,812.41
It + Avg. 7	0.001	34.73	430.95	1,776.87	41.91	502.96	1,659.61
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	3.05	438.41	1,796.11	6.04	426.83	1,641.14
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	2.66	385.86	1,598.87	6.17	382.45	1,584.58
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	7.74	466.75	2,141.83	9.16	459.54	1,903.54
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	-0.34	477.70	2,513.83	-16.16	460.32	2,258.54
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	1.44	386.03	1,840.40	-0.05	366.99	1,790.42
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	1.86	414.74	2,030.34	-3.10	398.67	1,977.60

ตารางผนวกที่ B-6 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรายเดือน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 80:20

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 80:20							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	4.06	388.09	1,484.02	4.06	336.22	1,380.76
It + Avg. 3	0.01	3.63	356.97	1,519.76	4.78	309.88	1,419.33
It + Avg. 3	0.001	4.01	350.10	1,498.83	4.14	304.95	1,397.46
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	4.10	379.12	1,840.44	14.50	308.01	1,525.43
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	3.27	435.23	2,283.33	11.65	348.44	1,845.49
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	3.22	371.23	1,827.80	11.26	299.20	1,475.50
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	6.79	412.78	2,202.44	9.49	404.64	2,119.85
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	9.98	414.83	2,206.19	15.08	400.88	2,119.98
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	8.05	360.10	1,811.99	10.87	359.75	1,740.76
It + Avg. 7	0.1	9.64	345.42	1,432.37	40.30	426.46	1,411.29
It + Avg. 7	0.01	-14.54	365.62	1,562.30	44.67	449.94	1,560.55
It + Avg. 7	0.001	-2.94	420.94	1,885.91	49.38	515.92	1,769.60
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	0.68	378.02	1,569.27	5.77	367.22	1,506.97
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	0.19	453.87	2,353.47	14.32	443.38	2,157.52
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	2.21	388.12	1,667.96	6.93	372.02	1,571.21
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	4.23	421.66	2,275.19	7.65	470.38	2,228.30
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	2.91	339.24	1,711.79	7.11	376.17	1,633.10
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	8.82	434.06	2,391.13	10.73	479.96	2,303.94

ตารางผนวกที่ B-7 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์รายวันของ
การแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 60:40

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 60:40							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	2.01	17.46	151.39	2.01	14.03	127.14
It + Avg. 3	0.01	2.32	17.71	161.41	2.32	14.23	132.60
It + Avg. 3	0.001	2.28	17.64	157.44	2.28	14.20	129.24
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	2.40	17.76	179.97	2.33	14.69	161.45
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	2.57	17.88	187.46	2.57	14.81	157.44
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	2.55	17.79	184.94	2.53	14.73	157.40
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	2.88	17.92	184.55	2.91	15.35	157.28
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	2.47	18.05	198.40	2.55	15.43	162.07
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	2.56	17.98	188.04	2.46	15.38	159.09
It + Avg. 7	0.1	2.13	17.49	149.25	2.05	14.09	142.76
It + Avg. 7	0.01	2.31	17.41	146.61	2.28	14.02	139.70
It + Avg. 7	0.001	2.23	17.38	145.80	2.20	14.00	140.03
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	2.44	18.13	199.25	2.04	14.89	146.69
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	2.51	17.89	189.93	2.50	14.69	147.17
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	2.51	17.89	189.93	2.39	14.83	151.87
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	2.93	18.00	185.30	3.06	15.35	140.34
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	2.68	17.95	184.02	2.51	15.30	148.49
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	2.67	17.90	183.06	2.59	15.26	148.90

ตารางผนวกที่ B-8 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์รายวันของ
การแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 70:30

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	2.31	16.86	149.93	3.00	13.66	1123.83
It + Avg. 3	0.01	2.79	16.97	152.84	2.99	13.75	129.67
It + Avg. 3	0.001	2.93	17.14	159.37	2.97	13.90	133.33
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	3.27	16.74	167.25	3.16	13.97	138.73
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	3.23	16.96	173.61	3.17	14.22	144.94
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	3.23	16.80	169.83	3.19	14.07	141.80
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	2.96	17.03	176.14	2.96	14.63	130.10
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	2.96	16.98	175.71	2.97	14.60	142.13
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	2.96	16.98	175.71	3.02	14.63	143.21
It + Avg. 7	0.1	2.98	16.77	142.96	2.84	13.63	139.50
It + Avg. 7	0.01	2.90	16.81	147.97	2.97	13.70	136.26
It + Avg. 7	0.001	2.92	16.84	149.45	2.99	13.72	137.32
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	3.06	17.31	188.25	3.03	14.36	136.49
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	3.13	17.38	188.74	3.15	14.41	145.17
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	3.08	17.35	186.93	3.12	14.39	145.97
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	2.98	17.31	177.73	2.98	14.83	141.93
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	3.06	17.37	183.95	3.06	14.89	142.31
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	3.04	17.33	183.27	3.04	14.85	143.77

ตารางผนวกที่ B-9 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์รายวันของ
การแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 80:20

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 80:20							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	3.03	16.70	146.95	3.03	13.92	116.39
It + Avg. 3	0.01	2.91	16.61	149.36	2.97	13.82	117.73
It + Avg. 3	0.001	3.00	16.62	149.57	3.00	13.82	117.53
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	3.07	16.85	180.47	3.12	14.57	147.45
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	3.23	16.88	184.02	3.23	14.62	143.17
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	3.22	16.85	183.19	3.22	14.58	143.02
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	2.71	16.89	184.40	2.71	15.40	134.18
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	2.84	17.06	190.69	2.84	15.56	144.75
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	2.84	17.01	189.54	2.84	15.51	139.55
It + Avg. 7	0.1	2.54	16.47	141.49	2.22	13.76	138.81
It + Avg. 7	0.01	2.51	16.36	143.18	2.51	13.67	135.56
It + Avg. 7	0.001	2.55	16.48	145.10	2.55	13.78	137.06
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	2.95	16.81	186.19	2.89	14.37	145.56
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	2.85	16.52	180.67	2.82	14.13	146.54
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	2.81	16.38	176.90	2.75	14.01	142.26
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	2.83	16.75	180.70	3.06	15.01	132.72
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	2.76	16.71	181.90	2.76	15.13	139.80
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	2.75	16.73	182.19	2.75	15.13	137.08

ตารางผนวกที่ B-10 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์รายเดือน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 60:40

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 60:40							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	93.69	530.49	2,383.28	110.96	508.69	2,069.50
It + Avg. 3	0.01	100.18	565.79	2,827.88	110.12	547.75	2,369.23
It + Avg. 3	0.001	90.29	517.98	2,294.08	109.75	489.21	2,034.46
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	66.32	481.52	1,877.62	73.43	449.17	1,702.18
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	76.34	524.03	2,210.49	87.30	502.30	1,959.05
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	63.27	447.75	1,745.67	76.48	420.93	1,637.03
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	70.29	507.08	2,164.97	71.02	462.37	1,880.95
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	77.59	562.08	2,756.31	76.92	508.91	2,094.81
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	75.71	564.15	2,784.58	77.91	512.22	2,110.44
It + Avg. 7	0.1	59.90	473.12	1,917.90	59.90	491.72	1,917.90
It + Avg. 7	0.01	75.16	467.51	1,906.02	75.16	488.07	1,906.02
It + Avg. 7	0.001	75.61	471.06	1,930.12	75.61	498.75	1,921.88
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	74.37	468.20	1,844.24	74.37	472.77	1,785.23
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	65.28	441.59	1,740.87	65.28	438.83	1,740.87
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	65.19	440.44	1,738.11	65.19	437.79	1,738.11
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	68.71	497.15	2,118.12	77.62	485.44	2,086.17
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	69.55	493.37	2,114.67	76.73	480.39	2,066.64
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	70.44	493.89	2,117.04	78.02	482.46	2,067.12

ตารางผนวกที่ B-11 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์รายเดือน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 70:30

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	96.77	514.98	2,453.12	104.94	459.84	2,060.97
It + Avg. 3	0.01	85.32	499.41	2,329.64	105.42	437.36	2,026.17
It + Avg. 3	0.001	84.94	498.73	2,327.48	104.89	436.86	2,018.92
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	66.05	468.98	1,949.53	83.96	393.50	1,537.98
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	65.32	453.78	1,866.36	85.33	384.86	1,535.30
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	67.82	461.09	1,916.71	86.63	390.69	1,557.70
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	69.23	473.83	2,052.54	77.41	416.58	1,561.54
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	75.88	511.48	2,442.87	90.41	446.57	1,697.31
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	75.88	511.48	2,442.87	91.88	446.15	1,601.66
It + Avg. 7	0.1	99.97	513.28	2,519.05	103.14	521.28	1,880.12
It + Avg. 7	0.01	89.58	504.42	2,431.39	93.53	521.78	1,794.80
It + Avg. 7	0.001	84.65	502.83	2,411.64	90.70	507.38	1,806.99
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	73.24	470.64	1,975.24	77.88	425.96	1,414.51
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	79.76	480.07	2,075.05	79.33	442.74	1,475.96
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	78.04	478.67	2,076.67	83.60	440.20	1,432.32
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	75.92	492.61	2,268.80	84.62	455.12	1,505.37
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	75.17	496.52	2,345.25	85.29	460.82	1,587.11
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	73.59	495.43	2,342.08	83.73	458.13	1,595.03

ตารางผนวกที่ B-12 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์รายเดือน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 80:20

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 80:20							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	89.16	495.91	2,432.28	90.07	396.46	1,859.85
It + Avg. 3	0.01	89.62	495.54	2,459.99	89.91	401.11	1,901.32
It + Avg. 3	0.001	89.04	491.76	2,420.55	89.22	397.91	1,886.50
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	60.92	468.09	1,958.83	65.28	378.94	1,511.91
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	58.63	461.31	1,822.99	65.07	378.57	1,483.44
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	59.33	466.91	1,871.84	65.15	382.40	1,497.54
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	57.74	501.62	2,494.24	64.87	463.45	1,868.99
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	62.43	498.94	2,478.01	73.05	458.27	1,781.14
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	63.78	499.53	2,484.33	74.43	456.98	1,709.76
It + Avg. 7	0.1	61.90	464.93	2,101.20	59.90	526.75	1,917.90
It + Avg. 7	0.01	70.33	456.44	2,086.18	96.92	412.92	1,628.27
It + Avg. 7	0.001	72.31	460.62	2,124.53	98.30	420.86	1,669.52
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	83.00	520.83	2,735.94	94.21	489.23	1,945.84
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	63.33	466.52	1,938.18	85.50	414.96	1,547.67
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	88.77	522.44	2,798.52	92.64	495.95	2,069.17
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	76.01	524.51	2,958.41	92.58	520.65	1,934.37
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	73.40	520.97	2,879.27	90.40	522.53	1,937.97
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	72.30	523.60	2,941.22	97.15	505.90	1,871.24

ตารางผนวกที่ B-13 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรายวัน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 60:40

แบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 60:40							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	0.17	16.71	197.05	0.17	11.02	145.71
It + Avg. 3	0.01	0.17	16.66	206.88	0.17	11.00	144.75
It + Avg. 3	0.001	0.16	16.65	206.11	0.16	10.99	145.34
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	0.23	17.41	286.34	0.09	11.51	253.34
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	0.18	17.21	271.72	0.18	11.38	251.49
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	0.22	17.30	275.71	0.22	11.45	252.87
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	0.19	17.29	280.45	0.19	11.71	182.25
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	0.20	17.45	292.61	0.20	11.80	202.46
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	0.17	17.48	294.93	0.14	11.81	204.46
It + Avg. 7	0.1	0.17	16.54	178.34	0.17	10.98	146.35
It + Avg. 7	0.01	0.18	16.53	186.20	0.18	10.99	121.80
It + Avg. 7	0.001	0.19	16.39	184.92	0.19	10.90	122.13
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	0.15	16.79	250.89	0.15	11.06	157.74
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	0.16	16.67	245.78	0.16	10.96	160.97
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	0.17	16.67	245.88	0.17	10.96	159.65
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	0.13	17.04	270.41	0.13	11.53	158.00
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	0.16	17.01	268.02	0.16	11.52	164.64
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	0.16	16.84	260.16	0.16	11.40	162.67

ตารางผนวกที่ B-14 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรายวัน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 70:30

แบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้าประเภท	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	0.26	15.48	185.44	0.26	10.27	135.90
It + Avg. 3	0.01	0.25	15.42	186.73	0.25	10.22	135.11
It + Avg. 3	0.001	0.25	15.38	186.68	0.25	10.19	134.93
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	0.27	15.47	226.64	0.27	10.29	207.07
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	0.23	15.63	236.78	0.23	10.37	205.15
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	0.24	15.62	237.86	0.24	10.37	199.50
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	0.22	16.23	260.45	0.22	11.01	191.68
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	0.21	16.07	254.16	0.20	10.88	172.25
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	0.20	16.01	250.99	0.20	10.84	162.21
It + Avg. 7	0.1	0.23	16.06	185.27	0.23	10.78	128.63
It + Avg. 7	0.01	0.23	16.00	185.55	0.23	10.75	142.38
It + Avg. 7	0.001	0.22	15.83	179.37	0.22	10.64	139.70
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	0.23	16.18	264.62	0.23	10.74	164.92
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	0.24	15.94	249.53	0.24	10.56	159.09
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	0.24	16.00	252.47	0.24	16.00	252.47
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	0.22	16.06	256.73	0.22	16.06	256.73
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	0.13	16.33	271.11	0.21	11.09	163.29
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	0.15	16.34	272.10	0.21	11.10	164.19

ตารางผนวกที่ B-15 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรายวัน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 80:20

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 80:20							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	0.28	14.93	194.61	0.28	11.49	141.93
It + Avg. 3	0.01	0.27	14.88	191.70	0.27	11.47	139.80
It + Avg. 3	0.001	0.27	14.88	192.31	0.27	11.47	139.37
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	0.26	15.19	258.12	0.26	11.67	231.08
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	0.26	14.97	246.00	0.26	11.50	215.43
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	0.28	15.07	252.46	0.28	11.58	222.04
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	0.26	15.00	246.48	0.26	11.80	174.02
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	0.24	15.13	255.23	0.24	11.91	177.67
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	0.23	15.03	250.17	0.23	11.84	174.39
It + Avg. 7	0.1	0.22	14.55	169.66	0.22	11.40	126.38
It + Avg. 7	0.01	0.25	14.62	174.24	0.25	11.43	140.21
It + Avg. 7	0.001	0.25	14.61	173.85	0.25	11.42	136.72
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	0.27	14.75	240.03	0.27	11.29	153.37
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	0.28	14.85	244.88	0.28	11.35	154.81
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	0.26	14.93	249.01	0.26	11.42	156.17
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	-0.40	15.60	286.37	0.21	12.26	169.68
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	0.13	15.25	267.06	0.23	11.97	160.86
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	0.17	15.35	273.20	0.22	12.06	160.45

ตารางผนวกที่ B-16 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรายเดือน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 60:40

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 60:40							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	-1.06	437.44	1,617.14	5.08	414.25	1,617.14
It + Avg. 3	0.01	1.03	427.61	1,483.95	2.49	405.58	1,483.95
It + Avg. 3	0.001	1.37	440.23	1,558.44	2.72	414.62	1,519.02
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	4.43	437.72	1,916.38	9.51	356.45	1,496.93
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	4.41	459.70	2,048.36	7.61	371.35	1,612.08
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	6.19	425.05	1,857.83	10.18	344.96	1,450.73
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	4.41	379.36	1,627.57	6.62	328.95	1,329.44
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	6.18	393.32	1,695.37	8.39	342.34	1,334.96
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	3.85	479.55	2,285.28	9.01	417.64	1,823.73
It + Avg. 7	0.1	17.70	479.55	1,968.65	53.20	564.05	1,821.06
It + Avg. 7	0.01	0.24	337.26	1,174.95	17.83	388.21	1,174.95
It + Avg. 7	0.001	16.50	444.68	1,769.70	46.76	521.72	1,714.52
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	14.56	518.81	2,423.31	32.99	515.24	2,189.12
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	1.83	449.48	1,748.34	12.68	421.39	1,670.58
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	3.47	476.17	1,982.19	18.26	453.98	1,810.84
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	3.71	479.57	2,310.09	12.57	447.42	2,041.12
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	4.16	485.19	2,394.18	15.32	455.26	2,023.18
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	5.88	456.19	2,187.41	13.47	418.43	1,790.66

ตารางผนวกที่ B-17 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรายเดือน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 70:30

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	6.26	429.77	1,798.46	6.26	412.71	1,631.14
It + Avg. 3	0.01	4.63	406.68	1,579.83	6.14	393.40	1,567.89
It + Avg. 3	0.001	4.31	470.41	2009.68	5.45	451.72	1,817.97
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	6.37	449.88	2,156.27	4.11	344.06	1,790.82
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	3.91	423.64	1,982.15	7.57	329.54	1,619.17
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	5.32	458.53	2,252.50	2.28	354.63	1,751.94
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	7.02	459.15	2,231.01	2.40	392.82	1,999.68
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	7.08	435.17	2,089.30	5.49	373.51	1,763.13
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	7.08	435.17	2,089.30	5.49	373.51	1,763.13
It + Avg. 7	0.1	9.33	391.61	1,497.96	27.91	451.63	1,439.40
It + Avg. 7	0.01	48.29	468.76	2,141.69	52.75	562.06	1,812.41
It + Avg. 7	0.001	34.73	430.95	1,776.87	41.91	502.96	1,659.61
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	3.05	438.41	1,796.11	6.04	426.83	1,641.14
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	2.66	385.86	1,598.87	6.17	382.45	1,584.58
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	7.74	466.75	2,141.83	9.16	459.54	1,903.54
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	-0.34	477.70	2,513.83	-16.16	460.32	2,258.54
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	1.44	386.03	1,840.40	-0.05	366.99	1,790.42
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	1.86	414.74	2,030.34	-3.10	398.67	1,977.60

ตารางผนวกที่ B-18 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรายเดือน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 80:20

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 80:20							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	4.06	388.09	1,484.02	4.06	336.22	1,380.76
It + Avg. 3	0.01	3.63	356.97	1,519.76	4.78	309.88	1,419.33
It + Avg. 3	0.001	4.01	350.10	1,498.83	4.14	304.95	1,397.46
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	4.10	379.12	1,840.44	14.50	308.01	1,525.43
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	3.27	435.23	2,283.33	11.65	348.44	1,845.49
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	3.22	371.23	1,827.80	11.26	299.20	1,475.50
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	6.79	412.78	2,202.44	9.49	404.64	2,119.85
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	9.98	414.83	2,206.19	15.08	400.88	2,119.98
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	8.05	360.10	1,811.99	10.87	359.75	1,740.76
It + Avg. 7	0.1	9.64	345.42	1,432.37	40.30	426.46	1,411.29
It + Avg. 7	0.01	-14.54	365.62	1,562.30	44.67	449.94	1,560.55
It + Avg. 7	0.001	-2.94	420.94	1,885.91	49.38	515.92	1,769.60
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	0.68	378.02	1,569.27	5.77	367.22	1,506.97
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	0.19	453.87	2,353.47	14.32	443.38	2,157.52
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	2.21	388.12	1,667.96	6.93	372.02	1,571.21
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	4.23	421.66	2,275.19	7.65	470.38	2,228.30
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	2.91	339.24	1,711.79	7.11	376.17	1,633.10
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	8.82	434.06	2,391.13	10.73	479.96	2,303.94

ตารางผนวกที่ B-19 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์รายวัน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 60:40

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 60:40							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	2.01	17.46	151.39	2.01	14.03	127.14
It + Avg. 3	0.01	2.32	17.71	161.41	2.32	14.23	132.60
It + Avg. 3	0.001	2.28	17.64	157.44	2.28	14.20	129.24
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	2.40	17.76	179.97	2.33	14.69	161.45
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	2.57	17.88	187.46	2.57	14.81	157.44
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	2.55	17.79	184.94	2.53	14.73	157.40
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	2.88	17.92	184.55	2.91	15.35	157.28
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	2.47	18.05	198.40	2.55	15.43	162.07
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	2.56	17.98	188.04	2.46	15.38	159.09
It + Avg. 7	0.1	2.13	17.49	149.25	2.05	14.09	142.76
It + Avg. 7	0.01	2.31	17.41	146.61	2.28	14.02	139.70
It + Avg. 7	0.001	2.23	17.38	145.80	2.20	14.00	140.03
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	2.44	18.13	199.25	2.04	14.89	146.69
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	2.51	17.89	189.93	2.50	14.69	147.17
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	2.51	17.89	189.93	2.39	14.83	151.87
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	2.93	18.00	185.30	3.06	15.35	140.34
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	2.68	17.95	184.02	2.51	15.30	148.49
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	2.67	17.90	183.06	2.59	15.26	148.90

ตารางผนวกที่ B-20 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์รายวัน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 70:30

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	2.31	16.86	149.93	3.00	13.66	1123.83
It + Avg. 3	0.01	2.79	16.97	152.84	2.99	13.75	129.67
It + Avg. 3	0.001	2.93	17.14	159.37	2.97	13.90	133.33
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	3.27	16.74	167.25	3.16	13.97	138.73
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	3.23	16.96	173.61	3.17	14.22	144.94
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	3.23	16.80	169.83	3.19	14.07	141.80
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	2.96	17.03	176.14	2.96	14.63	130.10
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	2.96	16.98	175.71	2.97	14.60	142.13
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	2.96	16.98	175.71	3.02	14.63	143.21
It + Avg. 7	0.1	2.98	16.77	142.96	2.84	13.63	139.50
It + Avg. 7	0.01	2.90	16.81	147.97	2.97	13.70	136.26
It + Avg. 7	0.001	2.92	16.84	149.45	2.99	13.72	137.32
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	3.06	17.31	188.25	3.03	14.36	136.49
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	3.13	17.38	188.74	3.15	14.41	145.17
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	3.08	17.35	186.93	3.12	14.39	145.97
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	2.98	17.31	177.73	2.98	14.83	141.93
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	3.06	17.37	183.95	3.06	14.89	142.31
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	3.04	17.33	183.27	3.04	14.85	143.77

ตารางผนวกที่ B-21 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์รายวัน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 80:20

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 80:20							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	3.03	16.70	146.95	3.03	13.92	116.39
It + Avg. 3	0.01	2.91	16.61	149.36	2.97	13.82	117.73
It + Avg. 3	0.001	3.00	16.62	149.57	3.00	13.82	117.53
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	3.07	16.85	180.47	3.12	14.57	147.45
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	3.23	16.88	184.02	3.23	14.62	143.17
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	3.22	16.85	183.19	3.22	14.58	143.02
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	2.71	16.89	184.40	2.71	15.40	134.18
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	2.84	17.06	190.69	2.84	15.56	144.75
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	2.84	17.01	189.54	2.84	15.51	139.55
It + Avg. 7	0.1	2.54	16.47	141.49	2.22	13.76	138.81
It + Avg. 7	0.01	2.51	16.36	143.18	2.51	13.67	135.56
It + Avg. 7	0.001	2.55	16.48	145.10	2.55	13.78	137.06
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	2.95	16.81	186.19	2.89	14.37	145.56
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	2.85	16.52	180.67	2.82	14.13	146.54
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	2.81	16.38	176.90	2.75	14.01	142.26
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	2.83	16.75	180.70	3.06	15.01	132.72
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	2.76	16.71	181.90	2.76	15.13	139.80
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	2.75	16.73	182.19	2.75	15.13	137.08

ตารางผนวกที่ B-22 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์รายเดือน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 60:40

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 60:40							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	93.69	530.49	2,383.28	110.96	508.69	2,069.50
It + Avg. 3	0.01	100.18	565.79	2,827.88	110.12	547.75	2,369.23
It + Avg. 3	0.001	90.29	517.98	2,294.08	109.75	489.21	2,034.46
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	66.32	481.52	1,877.62	73.43	449.17	1,702.18
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	76.34	524.03	2,210.49	87.30	502.30	1,959.05
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	63.27	447.75	1,745.67	76.48	420.93	1,637.03
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	70.29	507.08	2,164.97	71.02	462.37	1,880.95
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	77.59	562.08	2,756.31	76.92	508.91	2,094.81
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	75.71	564.15	2,784.58	77.91	512.22	2,110.44
It + Avg. 7	0.1	59.90	473.12	1,917.90	59.90	491.72	1,917.90
It + Avg. 7	0.01	75.16	467.51	1,906.02	75.16	488.07	1,906.02
It + Avg. 7	0.001	75.61	471.06	1,930.12	75.61	498.75	1,921.88
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	74.37	468.20	1,844.24	74.37	472.77	1,785.23
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	65.28	441.59	1,740.87	65.28	438.83	1,740.87
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	65.19	440.44	1,738.11	65.19	437.79	1,738.11
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	68.71	497.15	2,118.12	77.62	485.44	2,086.17
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	69.55	493.37	2,114.67	76.73	480.39	2,066.64
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	70.44	493.89	2,117.04	78.02	482.46	2,067.12

ตารางผนวกที่ B-23 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์รายเดือน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 70:30

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	96.77	514.98	2,453.12	104.94	459.84	2,060.97
It + Avg. 3	0.01	85.32	499.41	2,329.64	105.42	437.36	2,026.17
It + Avg. 3	0.001	84.94	498.73	2,327.48	104.89	436.86	2,018.92
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	66.05	468.98	1,949.53	83.96	393.50	1,537.98
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	65.32	453.78	1,866.36	85.33	384.86	1,535.30
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	67.82	461.09	1,916.71	86.63	390.69	1,557.70
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	69.23	473.83	2,052.54	77.41	416.58	1,561.54
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	75.88	511.48	2,442.87	90.41	446.57	1,697.31
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	75.88	511.48	2,442.87	91.88	446.15	1,601.66
It + Avg. 7	0.1	99.97	513.28	2,519.05	103.14	521.28	1,880.12
It + Avg. 7	0.01	89.58	504.42	2,431.39	93.53	521.78	1,794.80
It + Avg. 7	0.001	84.65	502.83	2,411.64	90.70	507.38	1,806.99
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	73.24	470.64	1,975.24	77.88	425.96	1,414.51
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	79.76	480.07	2,075.05	79.33	442.74	1,475.96
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	78.04	478.67	2,076.67	83.60	440.20	1,432.32
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	75.92	492.61	2,268.80	84.62	455.12	1,505.37
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	75.17	496.52	2,345.25	85.29	460.82	1,587.11
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	73.59	495.43	2,342.08	83.73	458.13	1,595.03

ตารางผนวกที่ B-24 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์รายเดือน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 80:20

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)							
อัลกอริทึม: XGBoost							
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 80:20							
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
ข้อมูลนำเข้า	Eta	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
It + Avg. 3	0.1	89.16	495.91	2,432.28	90.07	396.46	1,859.85
It + Avg. 3	0.01	89.62	495.54	2,459.99	89.91	401.11	1,901.32
It + Avg. 3	0.001	89.04	491.76	2,420.55	89.22	397.91	1,886.50
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	60.92	468.09	1,958.83	65.28	378.94	1,511.91
It + Avg. 3 + Prec. t	0.01	58.63	461.31	1,822.99	65.07	378.57	1,483.44
It + Avg. 3 + Prec. t	0.001	59.33	466.91	1,871.84	65.15	382.40	1,497.54
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	57.74	501.62	2,494.24	64.87	463.45	1,868.99
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.01	62.43	498.94	2,478.01	73.05	458.27	1,781.14
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.001	63.78	499.53	2,484.33	74.43	456.98	1,709.76
It + Avg. 7	0.1	61.90	464.93	2,101.20	59.90	526.75	1,917.90
It + Avg. 7	0.01	70.33	456.44	2,086.18	96.92	412.92	1,628.27
It + Avg. 7	0.001	72.31	460.62	2,124.53	98.30	420.86	1,669.52
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	83.00	520.83	2,735.94	94.21	489.23	1,945.84
It + Avg. 7 + Prec. t	0.01	63.33	466.52	1,938.18	85.50	414.96	1,547.67
It + Avg. 7 + Prec. t	0.001	88.77	522.44	2,798.52	92.64	495.95	2,069.17
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	76.01	524.51	2,958.41	92.58	520.65	1,934.37
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.01	73.40	520.97	2,879.27	90.40	522.53	1,937.97
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.001	72.30	523.60	2,941.22	97.15	505.90	1,871.24

ตารางผนวกที่ B-25 ค่าสถิติเบื้องต้นของผลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์รายวันและรายเดือนของแบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่าง

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่างรายวัน (Daily Multivariate Prediction Model)						
อัลกอริทึม: LSTM						
การตั้งค่าแบบจำลอง	ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝน: ชุดข้อมูลตรวจสอบ	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
เขื่อนภูมิพล						
60:40	-0.20	17.04	161.51	-0.21	11.47	151.09
70:30	-1.76	17.41	311.49	-12.43	11.77	158.40
80:20	-1.04	15.17	162.89	-1.11	11.96	132.39
เขื่อนสิริกิติ์						
60:40	2.65	17.92	121.05	2.65	15.12	118.95
70:30	-0.51	17.89	219.52	-8.62	14.86	150.07
80:20	1.51	16.94	152.53	1.25	14.89	139.50
ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่างรายเดือน (Monthly Multivariate Prediction Model)						
อัลกอริทึม: LSTM						
การตั้งค่าแบบจำลอง	ชุดข้อมูลฝึกฝน			ชุดข้อมูลตรวจสอบ		
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝน: ชุดข้อมูลตรวจสอบ	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
เขื่อนภูมิพล						
60:40	7.37	556.90	2,607.01	34.58	477.76	1,518.12
70:30	17.92	551.76	1,984.74	16.09	455.97	1,481.92.
80:20	-191.94	482.16	1,960.56	-109.12	453.87	1,371.78
เขื่อนสิริกิติ์						
60:40	38.49	551.53	2258.06	54.61	485.17	1,688.66
70:30	-237.38	504.99	1,723.59	-46.06	443.68	1,437.11
80:20	-81.99	471.89	1,857.27	-33.99	455.57	1,423.48

ภาคผนวก C

ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันและรายเดือนจากแบบจำลองการ
พยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวและแบบหลายอย่างด้วยอัลกอริทึม XGBoost และ LSTM ของ
เขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

ตารางผนวกที่ C-1 ค่าประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรายวันของ
การแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 60:40

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)											
อัลกอริทึม: XGBoost											
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 60:40											
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน					ชุดข้อมูลตรวจสอบ				
ข้อมูลนำเข้า	Eta	RMSE	MSE	R ²	R	NSE	RMSE	MSE	R ²	R	NSE
It + Avg. 3	0.1	7.9321	62.9187	0.9219	0.9602	0.9089	5.6560	31.9904	0.8854	0.9410	0.8619
	0.01	7.9844	63.7509	0.9216	0.9600	0.9077	5.6924	32.4037	0.8839	0.9402	0.8608
	0.001	7.9695	63.5127	0.9220	0.9602	0.9080	5.7173	32.6872	0.8829	0.9396	0.8595
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	7.9469	63.1533	0.9089	0.9533	0.9086	6.4841	42.0434	0.8562	0.9253	0.8400
	0.01	8.0123	64.1965	0.9083	0.9530	0.9071	6.3937	40.8789	0.8581	0.9264	0.8414
	0.001	8.0167	64.2683	0.9077	0.9527	0.9069	6.4336	41.3908	0.8573	0.9259	0.8399
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	8.0962	65.5484	0.9056	0.9516	0.9051	6.1821	38.2190	0.8679	0.9316	0.8507
	0.01	8.0007	64.0108	0.9074	0.9526	0.9073	6.2842	39.4916	0.8644	0.9298	0.8471
	0.001	8.0329	64.5276	0.9066	0.9522	0.9066	6.3335	40.1128	0.8631	0.9290	0.8453
It + Avg. 7	0.1	8.3395	69.5469	0.9150	0.9565	0.8993	6.1459	37.7723	0.8647	0.9299	0.8398
	0.01	8.2885	68.6991	0.9167	0.9574	0.9006	6.0700	36.8446	0.8680	0.9317	0.8422
	0.001	8.3964	70.4989	0.9162	0.9572	0.8980	6.0720	36.8695	0.8679	0.9316	0.8407
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	8.1083	65.7448	0.9095	0.9537	0.9048	6.2690	39.3004	0.8598	0.9273	0.8502
	0.01	8.1843	66.9824	0.9089	0.9533	0.9030	6.2634	39.2306	0.8596	0.9271	0.8498
	0.001	8.1684	66.7222	0.9094	0.9536	0.9034	6.2381	38.9142	0.8607	0.9277	0.8511
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	8.2173	67.5248	0.9041	0.9508	0.9023	6.6030	43.5990	0.8479	0.9208	0.8305
	0.01	8.1466	66.3668	0.9060	0.9518	0.9039	6.5439	42.8221	0.8502	0.9221	0.8327
	0.001	8.1962	67.1770	0.9062	0.9520	0.9028	6.4758	41.9364	0.8519	0.9230	0.8346

ตารางผนวกที่ C-2 ค่าประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรายวันของ
การแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 70:30

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)											
อัลกอริทึม: XGBoost											
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30											
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน					ชุดข้อมูลตรวจสอบ				
ข้อมูลนำเข้า	Eta	RMSE	MSE	R ²	R	NSE	RMSE	MSE	R ²	R	NSE
It + Avg. 3	0.1	8.0515	64.8271	0.9198	0.9591	0.8980	5.8255	33.9367	0.8775	0.9367	0.8429
	0.01	8.0787	65.2649	0.9203	0.9593	0.8973	5.8565	34.2986	0.8770	0.9365	0.8421
	0.001	8.1077	65.7344	0.9201	0.9592	0.8966	5.8516	34.2412	0.8775	0.9368	0.8420
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	8.0402	64.6442	0.9117	0.9549	0.8983	6.2648	39.2474	0.8557	0.9251	0.8354
	0.01	7.9260	62.8216	0.9118	0.9549	0.9012	6.2327	38.8461	0.8570	0.9257	0.8388
	0.001	7.9431	63.0924	0.9114	0.9546	0.9007	6.2201	38.6896	0.8576	0.9261	0.8395
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	7.7535	60.1166	0.9081	0.9529	0.9054	6.0708	36.8551	0.8653	0.9302	0.8476
	0.01	7.7562	60.1579	0.9097	0.9538	0.9054	6.0088	36.1054	0.8672	0.9312	0.8472
	0.001	7.7822	60.5622	0.9097	0.9538	0.9047	6.0095	36.1136	0.8670	0.9311	0.8468
It + Avg. 7	0.1	7.7173	59.5572	0.9185	0.9584	0.9068	6.1961	38.3911	0.8588	0.9267	0.8277
	0.01	7.7633	60.2687	0.9184	0.9584	0.9056	6.2205	38.6950	0.8578	0.9262	0.8237
	0.001	7.9110	62.5835	0.9174	0.9578	0.9020	6.2012	38.4543	0.8583	0.9265	0.8233
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	7.6827	59.0236	0.9111	0.9545	0.9076	6.2331	38.8518	0.8572	0.9258	0.8475
	0.01	7.7742	60.4389	0.9115	0.9547	0.9054	6.2449	38.9985	0.8562	0.9253	0.8458
	0.001	7.7515	60.0864	0.9113	0.9546	0.9059	6.2534	39.1052	0.8559	0.9251	0.8454
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	7.8496	61.6162	0.9076	0.9527	0.9035	6.4730	41.8993	0.8465	0.9200	0.8243
	0.01	7.7430	59.9548	0.9078	0.9528	0.9061	6.5413	42.7881	0.8455	0.9195	0.8258
	0.001	7.7319	59.7821	0.9081	0.9529	0.9064	6.5566	42.9884	0.8450	0.9193	0.8251

ตารางผนวกที่ C-3 ค่าประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรายวันของ
การแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 80:20

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)											
อัลกอริทึม: XGBoost											
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 80:20											
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน					ชุดข้อมูลตรวจสอบ				
ข้อมูลนำเข้า	Eta	RMSE	MSE	R ²	R	NSE	RMSE	MSE	R ²	R	NSE
It + Avg. 3	0.1	7.3787	54.4454	0.9202	0.9593	0.9062	6.6011	43.5752	0.8635	0.9293	0.8296
	0.01	7.3410	53.8907	0.9222	0.9603	0.9072	6.5521	42.9294	0.8658	0.9305	0.8309
	0.001	7.3350	53.8019	0.9223	0.9604	0.9074	6.5457	42.8461	0.8661	0.9306	0.8307
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	7.3107	53.4458	0.9118	0.9549	0.9080	7.0628	49.8829	0.8445	0.9190	0.8237
	0.01	7.3739	54.3749	0.9128	0.9554	0.9064	6.9157	47.8270	0.8498	0.9218	0.8293
	0.001	7.3322	53.7615	0.9125	0.9553	0.9074	6.9544	48.3643	0.8484	0.9211	0.8287
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	7.4239	55.1143	0.9105	0.9542	0.9051	6.5921	43.4558	0.8632	0.9291	0.8405
	0.01	7.3499	54.0206	0.9109	0.9544	0.9070	6.6018	43.5843	0.8630	0.9290	0.8397
	0.001	7.3837	54.5191	0.9111	0.9545	0.9061	6.5927	43.4637	0.8632	0.9291	0.8396
It + Avg. 7	0.1	7.9204	62.7327	0.9141	0.9561	0.8933	6.8421	46.8139	0.8530	0.9236	0.8094
	0.01	7.8201	61.1541	0.9152	0.9567	0.8960	6.8754	47.2708	0.8513	0.9227	0.8076
	0.001	7.8350	61.3873	0.9151	0.9566	0.8956	6.8508	46.9331	0.8524	0.9233	0.8086
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	7.5140	56.4596	0.9131	0.9556	0.9040	6.7513	45.5799	0.8577	0.9261	0.8435
	0.01	7.4343	55.2681	0.9138	0.9559	0.9060	6.6974	44.8555	0.8596	0.9271	0.8445
	0.001	7.4016	54.7836	0.9135	0.9558	0.9068	6.7282	45.2692	0.8579	0.9262	0.8442
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	7.2538	52.6171	0.9108	0.9544	0.9105	6.7635	45.7454	0.8582	0.9264	0.8349
	0.01	7.3552	54.0996	0.9105	0.9542	0.9080	6.6716	44.5100	0.8601	0.9274	0.8355
	0.001	7.3222	53.6152	0.9105	0.9542	0.9088	6.6708	44.4993	0.8605	0.9276	0.8366

ตารางผนวกที่ C-4 ค่าประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรายเดือน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 60:40

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)											
อัลกอริทึม: XGBoost											
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 60:40											
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน					ชุดข้อมูลตรวจสอบ				
ข้อมูลนำเข้า	Eta	RMSE	MSE	R ²	R	NSE	RMSE	MSE	R ²	R	NSE
It + Avg. 3	0.1	505	254851	0.43	0.66	0.40	362	131110	0.35	0.59	0.27
	0.01	514	263965	0.41	0.64	0.38	360	129807	0.33	0.58	0.27
	0.001	508	258506	0.42	0.65	0.39	364	132674	0.33	0.58	0.26
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	491	240886	0.46	0.68	0.43	312	97477	0.48	0.69	0.46
	0.01	489	239536	0.46	0.68	0.44	320	102392	0.47	0.68	0.43
	0.001	493	243398	0.46	0.68	0.43	305	92824	0.49	0.70	0.48
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	520	270086	0.43	0.66	0.37	278	77304	0.57	0.75	0.57
	0.01	513	263244	0.44	0.66	0.38	283	79880	0.56	0.75	0.55
	0.001	504	253743	0.43	0.66	0.40	321	103151	0.55	0.74	0.42
It + Avg. 7	0.1	500	250201	0.45	0.67	0.43	447	199971	0.38	0.62	-0.20
	0.01	559	312144	0.42	0.65	0.29	307	94408	0.46	0.68	0.43
	0.001	503	252619	0.45	0.67	0.43	410	167949	0.38	0.62	-0.01
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	520	270238	0.42	0.65	0.39	445	198403	0.48	0.69	-0.19
	0.01	505	254754	0.44	0.67	0.42	354	125300	0.48	0.69	0.25
	0.001	506	255679	0.44	0.66	0.42	382	145835	0.48	0.69	0.12
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	520	270368	0.42	0.65	0.38	335	112507	0.62	0.79	0.32
	0.01	524	274660	0.41	0.64	0.37	328	107262	0.66	0.81	0.35
	0.001	522	272192	0.41	0.64	0.38	299	89559	0.64	0.80	0.46

ตารางผนวกที่ C-5 ค่าประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรายเดือน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 70:30

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)											
อัลกอริทึม: XGBoost											
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30											
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน					ชุดข้อมูลตรวจสอบ				
ข้อมูลนำเข้า	Eta	RMSE	MSE	R ²	R	NSE	RMSE	MSE	R ²	R	NSE
It + Avg. 3	0.1	482	232468	0.43	0.66	0.41	423	178901	0.20	0.45	-0.05
	0.01	486	236353	0.44	0.66	0.40	411	168815	0.21	0.45	0.01
	0.001	472	223098	0.45	0.67	0.44	443	196672	0.21	0.46	-0.15
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	477	227167	0.45	0.67	0.43	354	125002	0.39	0.62	0.27
	0.01	475	225492	0.46	0.67	0.43	332	110360	0.42	0.65	0.35
	0.001	476	226779	0.45	0.67	0.43	348	120973	0.41	0.64	0.29
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	481	230886	0.44	0.67	0.42	273	74373	0.65	0.81	0.56
	0.01	482	232483	0.44	0.66	0.41	275	75414	0.62	0.79	0.56
	0.001	482	232483	0.44	0.66	0.41	275	75414	0.62	0.79	0.56
It + Avg. 7	0.1	491	240658	0.45	0.67	0.40	412	169471	0.27	0.52	0.01
	0.01	474	224728	0.46	0.67	0.44	533	284206	0.20	0.45	-0.65
	0.001	472	222894	0.47	0.68	0.45	458	209763	0.25	0.50	-0.22
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	479	229853	0.45	0.67	0.43	356	126981	0.52	0.72	0.26
	0.01	487	237015	0.46	0.68	0.41	326	105974	0.51	0.72	0.38
	0.001	482	232064	0.45	0.67	0.42	384	147621	0.52	0.72	0.14
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	499	249191	0.43	0.65	0.38	352	124016	0.64	0.80	0.28
	0.01	499	249306	0.43	0.65	0.38	263	691,89	0.66	0.81	0.60
	0.001	492	242525	0.43	0.66	0.40	286	81644	0.66	0.81	0.53

ตารางผนวกที่ C-6 ค่าประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรายเดือน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 80:20

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)											
อัลกอริทึม: XGBoost											
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 80:20											
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน					ชุดข้อมูลตรวจสอบ				
ข้อมูลนำเข้า	Eta	RMSE	MSE	R ²	R	NSE	RMSE	MSE	R ²	R	NSE
It + Avg. 3	0.1	461	212644	0.45	0.67	0.42	406	165208	0.27	0.52	0.18
	0.01	470	221076	0.46	0.68	0.40	416	172660	0.24	0.49	0.15
	0.001	474	224453	0.46	0.98	0.39	416	172852	0.24	0.49	0.15
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	453	204962	0.47	0.69	0.44	345	119075	0.44	0.66	0.41
	0.01	446	199125	0.48	0.69	0.46	383	146908	0.36	0.60	0.27
	0.001	451	203457	0.48	0.70	0.45	351	123171	0.43	0.65	0.39
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	457	208597	0.46	0.67	0.43	272	74126	0.68	0.82	0.63
	0.01	459	210989	0.45	0.67	0.43	261	67986	0.69	0.83	0.66
	0.001	466	217267	0.45	0.67	0.41	257	65836	0.68	0.82	0.67
It + Avg. 7	0.1	478	228326	0.46	0.68	0.39	430	184870	0.22	0.47	0.08
	0.01	467	217673	0.47	0.68	0.42	448	200355	0.22	0.46	0.00
	0.001	448	200815	0.47	0.69	0.46	494	243920	0.21	0.46	-0.21
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	452	204216	0.49	0.70	0.45	317	100625	0.54	0.74	0.50
	0.01	466	217122	0.45	0.67	0.42	378	143010	0.50	0.71	0.29
	0.001	451	203050	0.48	0.70	0.46	309	95639	0.56	0.75	0.53
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	466	216793	0.45	0.67	0.42	337	113802	0.65	0.81	0.43
	0.01	481	231263	0.44	0.66	0.38	271	73299	0.66	0.81	0.64
	0.001	464	215701	0.45	0.67	0.42	347	120585	0.65	0.81	0.40

ตารางผนวกที่ C-7 ค่าประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์รายวันของ
การแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 60:40

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)											
อัลกอริทึม: XGBoost											
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 60:40											
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน					ชุดข้อมูลตรวจสอบ				
ข้อมูลนำเข้า	Eta	RMSE	MSE	R ²	R	NSE	RMSE	MSE	R ²	R	NSE
It + Avg. 3	0.1	8.7749	76.9993	0.8890	0.9428	0.8740	8.4261	70.9985	0.8267	0.9092	0.8176
	0.01	8.5538	73.1668	0.8919	0.9444	0.8802	8.5125	72.4632	0.8218	0.9065	0.8135
	0.001	8.6163	74.2405	0.8907	0.9438	0.8785	8.5114	72.4444	0.8219	0.9066	0.8135
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	8.6162	74.2394	0.8831	0.9397	0.8785	9.0630	82.1383	0.7992	0.8940	0.7911
	0.01	8.5684	73.4170	0.8833	0.9398	0.8798	9.1367	83.4796	0.7972	0.8928	0.7876
	0.001	8.6103	74.1379	0.8828	0.9396	0.8786	9.0810	82.4650	0.7988	0.8938	0.7902
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	8.6459	74.7511	0.8800	0.9381	0.8776	9.4274	88.8763	0.7881	0.8877	0.7762
	0.01	8.5376	72.8911	0.8824	0.9393	0.8807	9.4732	89.7408	0.7876	0.8874	0.7739
	0.001	8.5853	73.7080	0.8815	0.9389	0.8793	9.4387	89.0887	0.7884	0.8879	0.7753
It + Avg. 7	0.1	8.7800	77.0887	0.8888	0.9428	0.8738	8.9360	79.8512	0.8044	0.8969	0.7962
	0.01	8.8455	78.2428	0.8881	0.9424	0.8720	8.9150	79.4770	0.8059	0.8977	0.7972
	0.001	8.8592	78.4860	0.8881	0.9424	0.8716	8.9312	79.7661	0.8051	0.8973	0.7967
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	8.5172	72.5428	0.8831	0.9397	0.8813	9.1309	83.3728	0.7972	0.8928	0.7865
	0.01	8.6052	74.0493	0.8824	0.9394	0.8788	8.9440	79.9943	0.8035	0.8964	0.7943
	0.001	8.6052	74.0493	0.8824	0.9394	0.8788	9.0327	81.5901	0.8008	0.8949	0.7905
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	8.7022	75.7275	0.8780	0.9370	0.8761	9.5263	90.7499	0.7832	0.8850	0.7699
	0.01	8.6286	74.4526	0.8804	0.9383	0.8782	9.4835	89.9372	0.7843	0.8856	0.7714
	0.001	8.6171	74.2543	0.8812	0.9387	0.8785	9.4338	88.9968	0.7860	0.8866	0.7736

ตารางผนวกที่ C-8 ค่าประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์รายวันของ
การแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 70:30

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)											
อัลกอริทึม: XGBoost											
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30											
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน					ชุดข้อมูลตรวจสอบ				
ข้อมูลนำเข้า	Eta	RMSE	MSE	R ²	R	NSE	RMSE	MSE	R ²	R	NSE
It + Avg. 3	0.1	8.6989	75.6713	0.8843	0.9404	0.8675	8.7146	75.9451	0.8310	0.9116	0.8124
	0.01	8.6026	74.0054	0.8856	0.9411	0.8705	8.6951	75.6042	0.8305	0.9113	0.8133
	0.001	8.4949	72.1634	0.8863	0.9414	0.8737	8.6688	75.1477	0.8299	0.9110	0.8145
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	8.6582	74.9643	0.8796	0.9379	0.8688	9.3899	88.1703	0.7941	0.8911	0.7856
	0.01	8.5051	72.3372	0.8812	0.9387	0.8734	9.3338	87.1204	0.7966	0.8925	0.7889
	0.001	8.5903	73.7927	0.8809	0.9386	0.8708	9.2808	86.1334	0.7987	0.8937	0.7911
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	8.5534	73.1614	0.8780	0.9370	0.8719	9.2666	85.8694	0.8001	0.8945	0.7932
	0.01	8.5477	73.0630	0.8788	0.9374	0.8721	9.2089	84.8039	0.8025	0.8958	0.7957
	0.001	8.5477	73.0630	0.8788	0.9374	0.8721	9.2120	84.8608	0.8024	0.8958	0.7957
It + Avg. 7	0.1	8.7905	77.2731	0.8834	0.9399	0.8651	9.0371	81.6695	0.8181	0.9045	0.8008
	0.01	8.7123	75.9037	0.8854	0.9409	0.8675	9.1491	83.7069	0.8118	0.9010	0.7967
	0.001	8.6899	75.5149	0.8855	0.9410	0.8682	9.1291	83.3411	0.8125	0.9014	0.7974
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	8.4359	71.1641	0.8797	0.9379	0.8758	9.3369	87.1784	0.7968	0.8926	0.7870
	0.01	8.3820	70.2583	0.8808	0.9385	0.8774	9.2618	85.7805	0.8000	0.8944	0.7897
	0.001	8.3902	70.3961	0.8808	0.9385	0.8771	9.2565	85.6822	0.8002	0.8945	0.7899
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	8.4303	71.0706	0.8793	0.9377	0.8760	9.4907	90.0733	0.7915	0.8896	0.7815
	0.01	8.4181	70.8644	0.8791	0.9376	0.8763	9.5457	91.1197	0.7896	0.8886	0.7788
	0.001	8.4182	70.8655	0.8795	0.9378	0.8763	9.5093	90.4273	0.7909	0.8893	0.7802

ตารางผนวกที่ C-9 ค่าประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์รายวันของ
การแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 80:20

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวัน (Daily Univariate Prediction Model)											
อัลกอริทึม: XGBoost											
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 80:20											
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน					ชุดข้อมูลตรวจสอบ				
ข้อมูลนำเข้า	Eta	RMSE	MSE	R ²	R	NSE	RMSE	MSE	R ²	R	NSE
It + Avg. 3	0.1	8.3666	69.9998	0.8837	0.9400	0.8711	9.0171	81.3076	0.8362	0.9145	0.8161
	0.01	8.4289	71.0456	0.8831	0.9398	0.8692	9.0675	82.2193	0.8359	0.9143	0.8145
	0.001	8.4241	70.9662	0.8832	0.9398	0.8693	9.0756	82.3668	0.8355	0.9140	0.8143
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	8.2681	68.3607	0.8784	0.9372	0.8741	9.4734	89.7456	0.8100	0.9000	0.8064
	0.01	8.2457	67.9915	0.8788	0.9375	0.8748	9.6283	92.7045	0.8040	0.8967	0.7985
	0.001	8.2563	68.1670	0.8788	0.9375	0.8745	9.6054	92.2643	0.8047	0.8971	0.7988
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	8.3368	69.5028	0.8744	0.9351	0.8720	9.4984	90.2201	0.8117	0.9009	0.8015
	0.01	8.2383	67.8695	0.8761	0.9360	0.8750	9.6961	94.0139	0.8051	0.8973	0.7943
	0.001	8.2394	67.8884	0.8765	0.9362	0.8750	9.6504	93.1300	0.8065	0.8980	0.7960
It + Avg. 7	0.1	8.5501	73.1047	0.8818	0.9390	0.8661	9.3839	88.0581	0.8226	0.9070	0.8018
	0.01	8.6415	74.6762	0.8805	0.9384	0.8632	9.3960	88.2856	0.8238	0.9076	0.8017
	0.001	8.5593	73.2610	0.8812	0.9387	0.8658	9.3795	87.9745	0.8229	0.9071	0.8026
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	8.3793	70.2127	0.8757	0.9358	0.8714	8.9755	80.5601	0.8301	0.9111	0.8231
	0.01	8.4705	71.7502	0.8760	0.9360	0.8686	8.8917	79.0631	0.8345	0.9135	0.8255
	0.001	8.5335	72.8199	0.8758	0.9359	0.8666	8.9089	79.3683	0.8350	0.9138	0.8247
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	8.3983	70.5317	0.8747	0.9353	0.8708	9.4374	89.0643	0.8129	0.9016	0.8041
	0.01	8.3875	70.3508	0.8754	0.9356	0.8711	9.4302	88.9295	0.8131	0.9017	0.8044
	0.001	8.3746	70.1347	0.8756	0.9357	0.8715	9.4281	88.8899	0.8132	0.9018	0.8049

ตารางผนวกที่ C-10 ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์รายเดือน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 60:40

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)											
อัลกอริทึม: XGBoost											
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 60:40											
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน					ชุดข้อมูลตรวจสอบ				
ข้อมูลนำเข้า	Eta	RMSE	MSE	R ²	R	NSE	RMSE	MSE	R ²	R	NSE
It + Avg. 3	0.1	471	221686	0.47	0.69	0.44	419	175441	0.41	0.64	0.27
	0.01	484	234089	0.47	0.69	0.41	431	185587	0.45	0.67	0.23
	0.001	471	222165	0.47	0.68	0.44	407	165353	0.42	0.65	0.31
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	464	215145	0.48	0.69	0.46	379	143508	0.44	0.67	0.40
	0.01	459	210624	0.49	0.70	0.47	396	156966	0.45	0.67	0.35
	0.001	475	225176	0.47	0.69	0.43	380	144671	0.42	0.65	0.40
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	461	212574	0.49	0.70	0.46	369	136353	0.47	0.68	0.43
	0.01	483	233485	0.48	0.69	0.41	385	147911	0.48	0.69	0.39
	0.001	484	234584	0.47	0.69	0.41	386	148930	0.48	0.69	0.38
It + Avg. 7	0.1	488	237893	0.44	0.66	0.41	398	158205	0.44	0.66	0.33
	0.01	488	238338	0.45	0.67	0.41	390	152392	0.45	0.67	0.36
	0.001	487	237300	0.45	0.67	0.41	388	150454	0.47	0.68	0.36
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	477	227701	0.46	0.68	0.44	371	137876	0.49	0.70	0.42
	0.01	485	235282	0.46	0.68	0.42	363	132060	0.48	0.70	0.44
	0.001	485	235651	0.46	0.68	0.42	364	132257	0.48	0.70	0.44
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	467	218535	0.48	0.70	0.46	385	148244	0.45	0.67	0.37
	0.01	468	219182	0.49	0.70	0.46	378	142853	0.47	0.68	0.40
	0.001	468	219034	0.49	0.70	0.46	379	143926	0.47	0.68	0.39

ตารางผนวกที่ C-11 ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์รายเดือน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 70:30

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)											
อัลกอริทึม: XGBoost											
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 70:30											
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน					ชุดข้อมูลตรวจสอบ				
ข้อมูลนำเข้า	Eta	RMSE	MSE	R ²	R	NSE	RMSE	MSE	R ²	R	NSE
It + Avg. 3	0.1	453	204964	0.47	0.69	0.44	399	159289	0.44	0.66	0.39
	0.01	452	204520	0.47	0.69	0.44	405	163968	0.41	0.64	0.37
	0.001	452	204426	0.47	0.69	0.44	406	164899	0.41	0.64	0.37
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	442	195748	0.49	0.70	0.47	372	138726	0.48	0.69	0.47
	0.01	446	198599	0.49	0.70	0.46	372	138409	0.48	0.69	0.47
	0.001	444	197129	0.49	0.70	0.46	371	137757	0.48	0.69	0.47
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	442	195560	0.49	0.70	0.47	373	138989	0.48	0.69	0.47
	0.01	448	200617	0.49	0.70	0.45	391	152494	0.44	0.67	0.41
	0.001	448	200617	0.49	0.70	0.45	391	153042	0.44	0.66	0.41
It + Avg. 7	0.1	458	209780	0.47	0.68	0.44	426	181254	0.42	0.65	0.31
	0.01	457	208953	0.47	0.68	0.44	407	165257	0.47	0.68	0.37
	0.001	457	208820	0.47	0.68	0.44	406	164573	0.45	0.67	0.38
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	447	199807	0.49	0.70	0.46	372	138047	0.48	0.70	0.48
	0.01	443	196125	0.49	0.70	0.47	359	129125	0.52	0.72	0.51
	0.001	443	196562	0.49	0.70	0.47	358	128363	0.52	0.72	0.51
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	446	198553	0.50	0.70	0.47	389	151307	0.45	0.67	0.43
	0.01	448	200561	0.49	0.70	0.46	382	145642	0.47	0.69	0.45
	0.001	448	200876	0.49	0.70	0.46	379	143973	0.48	0.69	0.45

ตารางผนวกที่ C-12 ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์รายเดือน
ของการแบ่งอัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ 80:20

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน (Monthly Univariate Prediction Model)											
อัลกอริทึม: XGBoost											
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลตรวจสอบ: 80:20											
การตั้งค่าแบบจำลอง		ชุดข้อมูลฝึกฝน					ชุดข้อมูลตรวจสอบ				
ข้อมูลนำเข้า	Eta	RMSE	MSE	R ²	R	NSE	RMSE	MSE	R ²	R	NSE
It + Avg. 3	0.1	436	190509	0.48	0.70	0.46	438	191604	0.36	0.60	0.32
	0.01	438	191569	0.48	0.69	0.45	442	195236	0.35	0.59	0.31
	0.001	437	190957	0.48	0.69	0.46	442	195639	0.35	0.59	0.30
It + Avg. 3 + Prec. t	0.1	428	183351	0.50	0.70	0.48	410	168003	0.42	0.65	0.40
	0.01	425	180824	0.50	0.71	0.49	400	159638	0.45	0.67	0.43
	0.001	425	180298	0.50	0.71	0.49	398	158537	0.45	0.67	0.44
It + Avg. 3 + Prec. t + Hum. t	0.1	437	191206	0.49	0.70	0.46	394	155602	0.47	0.68	0.45
	0.01	436	190460	0.49	0.70	0.46	396	156640	0.46	0.68	0.44
	0.001	437	191035	0.49	0.70	0.46	390	152175	0.48	0.69	0.46
It + Avg. 7	0.1	445	197647	0.46	0.68	0.44	445	198351	0.41	0.64	0.31
	0.01	444	197309	0.47	0.68	0.44	422	177838	0.39	0.63	0.38
	0.001	444	196809	0.47	0.68	0.44	423	179224	0.39	0.62	0.37
It + Avg. 7 + Prec. t	0.1	447	200012	0.49	0.70	0.43	435	189593	0.42	0.65	0.34
	0.01	429	183944	0.50	0.71	0.48	376	141588	0.51	0.71	0.51
	0.001	450	202431	0.48	0.70	0.43	448	200591	0.41	0.64	0.30
It + Avg. 7 + Prec. t + Hum. t	0.1	460	211181	0.48	0.69	0.40	455	206803	0.38	0.61	0.28
	0.01	455	206582	0.48	0.69	0.42	488	238330	0.31	0.56	0.17
	0.001	458	209930	0.48	0.69	0.41	455	206806	0.37	0.61	0.28

ตารางผนวกที่ C-13 ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์รายวันและรายเดือนของแบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่าง

ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่างรายวัน (Daily Multivariate Prediction Model)										
การตั้งค่าแบบจำลอง	ชุดข้อมูลฝึกฝน					ชุดข้อมูลตรวจสอบ				
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝน: ชุดข้อมูลตรวจสอบ	RMSE	MSE	R ²	R	NSE	RMSE	MSE	R ²	R	NSE
เขื่อนภูมิพล										
60:40*	8.7004	75.6977	0.8937	0.9454	0.8904	6.0033	36.0394	0.8729	0.9343	0.8573
70:30	8.4037	70.6216	0.8921	0.9445	0.8889	7.4253	55.1346	0.8165	0.9036	0.7907
80:20	9.5922	92.0102	0.8481	0.9209	0.8416	7.5214	56.5716	0.8230	0.9072	0.7763
เขื่อนสิริกิติ์										
60:40*	9.8582	97.1833	0.8416	0.9174	0.8409	9.6154	92.4553	0.7800	0.8832	0.7669
70:30	9.1650	83.9971	0.8561	0.9253	0.8530	12.2656	150.4458	0.6784	0.8236	0.6359
80:20	10.2486	105.0332	0.8073	0.8985	0.8066	10.4742	109.7091	0.7685	0.8766	0.7552
ประเภทแบบจำลอง: แบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่างรายเดือน (Monthly Multivariate Prediction Model)										
การตั้งค่าแบบจำลอง	ชุดข้อมูลฝึกฝน					ชุดข้อมูลตรวจสอบ				
อัตราส่วนชุดข้อมูลฝึกฝน: ชุดข้อมูลตรวจสอบ	RMSE	MSE	R ²	R	NSE	RMSE	MSE	R ²	R	NSE
เขื่อนภูมิพล										
60:40	420	176013	0.59	0.77	0.59	348	120900	0.50	0.71	0.32
70:30*	428	183353	0.54	0.74	0.54	321	103050	0.53	0.73	0.40
80:20	370	136742	0.64	0.80	0.63	354	125174	0.46	0.68	0.38
เขื่อนสิริกิติ์										
60:40*	439	192778	0.52	0.72	0.51	361	130290	0.49	0.70	0.46
70:30	415	172150	0.54	0.73	0.53	372	138620	0.47	0.69	0.47
80:20	375	140900	0.62	0.79	0.60	401	161044	0.43	0.66	0.43

หมายเหตุ : * แบบจำลองการพยากรณ์ที่ให้ค่าประสิทธิผลการพยากรณ์สูงสุด

ภาคผนวก D

ผลการพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

1. แบบจำลองที่พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำไปถึงโหนดความต้องการน้ำในแต่ละพื้นที่ในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Demand-Based Model)

1.1 ตัวอย่างการพัฒนาสมการแบบข้อจำกัดของแบบจำลอง

(1) สมการข้อจำกัดของค่าปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ของ BB เพื่อตอบสนองโหนดความต้องการน้ำดังนี้

i. โหนดความต้องการน้ำ LP

```
#Demand of BB
model.Equation(R_bb >= D_bb -(0.2*SF_bb))
```

ii. โหนดความต้องการน้ำ CPY

```
#Demand of BB-CPY
model.Equation(RC_bb >= W_aws_bb * D_cpy)
```

iii. โหนดความต้องการน้ำเพื่อการรักษาระบบนิเวศ ECON

```
#Demand of BB-ECON
model.Equation(RE_bb >= W_eco_bb * D_eco)
```

(2) สมการข้อจำกัดของค่าปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ของ SK เพื่อตอบสนองโหนดความต้องการน้ำดังนี้

i. โหนดความต้องการน้ำ LN

```
#Demand of SK
model.Equation(R_sk >= D_sk -(0.2*SF_sk))
```

ii. โหนดความต้องการน้ำ CPY

```
#Demand of SK-CPY
model.Equation(RC_sk >= W_aws_sk * D_cpy)
```

iii. โหนดความต้องการน้ำเพื่อการรักษาระบบนิเวศ ECON

```
#Demand of SK-ECON
model.Equation(RE_sk >= W_eco_sk * D_eco)
```

(3) สมการข้อจำกัดของค่าปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ของ KNB เพื่อตอบสนองโหนดความต้องการน้ำดังนี้

i. โหนดความต้องการน้ำในพื้นที่ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

```
#Demand of KNB
model.Equation(R_knb >= D_knb)
```

ii. โหนดความต้องการน้ำ CPY

```
#Demand of KNB-CPY
model.Equation(RC_knb >= W_aws_knb * D_cpy)
```

iii. โหนดความต้องการน้ำเพื่อการรักษาระบบนิเวศ ECON

```
#Demand of KNB -ECON
model.Equation(RE_knb >= W_eco_knb * D_eco)
```


- (4) สมการข้อจำกัดของค่าปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์ของ PS เพื่อตอบสนองโหนดความต้องการน้ำดังนี้

i. โหนดความต้องการน้ำในพื้นที่ของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

```
#Demand of PS
model.Equation(R_ps >= D_ps)
```

ii. โหนดความต้องการน้ำเพื่อการรักษาระบบนิเวศ ECON

```
#Demand of PS -ECON
model.Equation(RE_ps >= W_eco_ps * D_eco)
```

- (5) สมการข้อจำกัดของค่าน้ำหนักในการจัดสรรน้ำให้เพียงพอความต้องการน้ำของแต่ละอ่างเก็บน้ำ

```
#Sum of Weight = 1
model.Equation(W_aws_bb + W_aws_sk + W_aws_knb == 1)
model.Equation(W_eco_bb + W_eco_sk + W_eco_knb + W_eco_ps == 1)
```

- (6) สมการข้อจำกัดของค่าน้ำหนักในการจัดสรรน้ำให้เพียงพอตามโหนดความต้องการน้ำของแต่ละอ่างเก็บน้ำ

i. โหนดความต้องการน้ำ CPY

```
#Demand CPY
if Sum_knb_cpy < Smin_knb+30.58+48.82 and Sum_ps_cpy <
Smin_ps+27.29+112.80:
    Sum_cpy =(Sum_bb_cpy -Smin_bb)+(Sum_sk_cpy -Smin_sk)
    model.Equation(W_aws_bb =(Sum_bb_cpy -
    Smin_bb)/Sum_cpy)
    model.Equation(W_aws_sk =(Sum_sk_cpy -
    Smin_sk)/Sum_cpy)
    model.Equation(W_aws_knb =0.0)
    model.Equation(W_aws_ps =0.0)
elif Sum_knb_cpy < Smin_knb+30.58+48.82:
    Sum_cpy =(Sum_bb_cpy -Smin_bb)+(Sum_sk_cpy -Smin_sk)
    +(Sum_ps_cpy -Smin_ps)
    model.Equation(W_aws_bb >=(Sum_bb_cpy -
    Smin_bb)/Sum_cpy)
    model.Equation(W_aws_sk >=(Sum_sk_cpy -
    Smin_sk)/Sum_cpy)
    model.Equation(W_aws_knb =0.0)
    model.Equation(W_aws_ps >=(Sum_ps_cpy -
    Smin_ps)/Sum_cpy)
elif Sum_ps_cpy < Smin_ps+27.29+112.80:
    Sum_cpy =(Sum_bb_cpy -Smin_bb)+(Sum_sk_cpy -Smin_sk)
    +(Sum_knb_cpy -Smin_knb)
    model.Equation(W_aws_bb >=(Sum_bb_cpy -
    Smin_bb)/Sum_cpy)
    model.Equation(W_aws_sk >=(Sum_sk_cpy -
    Smin_sk)/Sum_cpy)
    model.Equation(W_aws_knb >=(Sum_knb_cpy -
    Smin_knb)/Sum_cpy)
```

```

    model.Equation(W_aws_ps = 0.0)
else:
    Sum_cpy =(Sum_bb_cpy -Smin_bb)+(Sum_sk_cpy -
    Smin_sk)+(Sum_knb_cpy -Smin_knb)+(Sum_ps_cpy -
    Smin_ps)
    if (Sum_ps_cpy)/Sum_cpy > cpy_le:
        model.Equation(W_aws_bb >=(Sum_bb_cpy -
        Smin_bb)/Sum_cpy)
        model.Equation(W_aws_sk >=(Sum_sk_cpy -
        Smin_sk)/Sum_cpy)
        model.Equation(W_aws_knb =(Sum_knb_cpy -
        Smin_knb)/Sum_cpy)
        model.Equation(W_aws_ps =cpy_le)
    else:
        model.Equation(W_aws_bb >=(Sum_bb_cpy -
        Smin_bb)/Sum_cpy)
        model.Equation(W_aws_sk >=(Sum_sk_cpy -
        Smin_sk)/Sum_cpy)
        model.Equation(W_aws_knb >=(Sum_knb_cpy -
        Smin_knb)/Sum_cpy)
        model.Equation(W_aws_ps >=(Sum_ps_cpy-
        Smin_ps)/Sum_cpy)

```

ii. โหนดความต้องการน้ำเพื่อการรักษาระบบนิเวศ ECON

```

#Demand ECON
if Sum_knb_eco < Smin_knb+30.58+48.82 and Sum_ps_eco <
Smin_ps+27.29+112.80:
    Sum_eco=(Sum_bb_eco-Smin_bb)+(Sum_sk_eco-
    Smin_sk)
    model.Equation(W_eco_bb =(Sum_bb_eco-
    Smin_bb)/Sum_eco)
    model.Equation(W_eco_sk =(Sum_sk_eco-
    Smin_sk)/Sum_eco)
    model.Equation(W_eco_knb =0.0)
    model.Equation(W_eco_ps =0.0)
elif Sum_knb_eco < Smin_knb+30.58+48.82:
    Sum_eco=(Sum_bb_eco-Smin_bb)+(Sum_sk_eco-
    Smin_sk)+(Sum_ps_eco-Smin_ps)
    model.Equation(W_eco_bb >=(Sum_bb_eco-
    Smin_bb)/Sum_eco)
    model.Equation(W_eco_sk >=(Sum_sk_eco-
    Smin_sk)/Sum_eco)
    model.Equation(W_eco_knb =0.0)
    model.Equation(W_eco_ps >=(Sum_ps_eco-
    Smin_ps)/Sum_eco)
elif Sum_ps_eco < Smin_ps+27.29+112.80:
    Sum_eco=(Sum_bb_eco-Smin_bb)+(Sum_sk_eco-Smin_sk)
    +(Sum_knb_eco-Smin_knb)
    model.Equation(W_eco_bb >=(Sum_bb_eco-
    Smin_bb)/Sum_eco)
    model.Equation(W_eco_sk >=(Sum_sk_eco-

```

```

Smin_sk)/Sum_eco)
model.Equation(W_eco_knb >=(Sum_knb_eco-
Smin_knb)/Sum_eco)
model.Equation(W_eco_ps ==0.0)
else:
    Sum_eco=(Sum_bb_eco-Smin_bb)+(Sum_sk_eco-
    Smin_sk)+(Sum_knb_eco-Smin_knb)+(Sum_ps_eco-
    Smin_ps)
    if (Sum_ps_eco)/Sum_eco > eco_le:
        model.Equation(W_eco_bb >=(Sum_bb_eco-
        Smin_bb)/Sum_eco)
        model.Equation(W_eco_sk >=(Sum_sk_eco-
        Smin_sk)/Sum_eco)
        model.Equation(W_eco_knb ==(Sum_knb_eco-
        Smin_knb)/Sum_eco)
        model.Equation(W_eco_ps ==eco_le)
    else:
        model.Equation(W_eco_bb >=(Sum_bb_eco-
        Smin_bb)/Sum_eco)
        model.Equation(W_eco_sk >=(Sum_sk_eco-
        Smin_sk)/Sum_eco)
        model.Equation(W_eco_knb >=(Sum_knb_eco-
        Smin_knb)/Sum_eco)
        model.Equation(W_eco_ps >=(Sum_ps_eco-
        Smin_ps)/Sum_eco)

```

1.2 ตัวอย่างการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ในแบบจำลอง

(7) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการลดปริมาณการระบายน้ำคาดการณ์จากอ่างเก็บน้ำ

```

#Minimizing water release to match demand
model.Minimize(R_bb)
model.Minimize(RC_bb)
model.Minimize(RE_bb)
model.Minimize(R_sk)
model.Minimize(RC_sk)
model.Minimize(RE_sk)
model.Minimize(R_knb)
model.Minimize(RC_knb)
model.Minimize(RE_knb)
model.Minimize(R_ps)
model.Minimize(RE_ps)

```

2. แบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในการเดินทางของน้ำในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากเขื่อน (Release-Based Model)

2.1 ตัวอย่างของการพัฒนาสมการแบบข้อจำกัดของแบบจำลอง

(1) สมการข้อจำกัดของสมดุลอ่างเก็บน้ำ $S_{t+1} = S_t + I_t - E_t - R_t$

```

#Constraints
#Water balanced equation of each dam

```

```

model.Equation(NS_bb == S_bb + In_bb - Eva_bb - FR_bb)
model.Equation(NS_sk == S_sk + In_sk - Eva_sk - FR_sk)
model.Equation(NS_knb == S_knb + In_knb - Eva_knb - FR_knb)
model.Equation(NS_ps == S_ps + In_ps - Eva_ps - FR_ps)

```

(2) สมการข้อจำกัดของปริมาณน้ำเก็บกัก $S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max}$

#Capacity of each dam

```

model.Equation(NS_bb <= Smax_bb)
model.Equation(NS_bb >= Smin_bb)
model.Equation(NS_sk <= Smax_sk)
model.Equation(NS_sk >= Smin_sk)
model.Equation(NS_knb <= Smax_knb)
model.Equation(NS_knb >= Smin_knb)
model.Equation(NS_ps <= Smax_ps)
model.Equation(NS_ps >= Smin_ps)

```

(3) สมการข้อจำกัดของการผลิตพลังงานไฟฟ้า

#Energy of BB and SK dams

```

if S_bb >= 2400 and S_bb < 3450:
    Hu_bb = 200 + ((S_bb - 2400)/105)
elif S_bb >= 3450 and S_bb < 3800:
    Hu_bb = 210 + ((S_bb - 3450)/116.67)
elif S_bb >= 3800 and S_bb < 4700:
    Hu_bb = 213 + ((S_bb - 3800)/128.57)
elif S_bb >= 4700 and S_bb < 6200:
    Hu_bb = 220 + ((S_bb - 4700)/150)
elif S_bb >= 6200 and S_bb < 8000:
    Hu_bb = 230 + ((S_bb - 6200)/180)
elif S_bb >= 8000 and S_bb < 10200:
    Hu_bb = 240 + ((S_bb - 8000)/220)
elif S_bb >= 10200 and S_bb < 13462:
    Hu_bb = 250 + ((S_bb - 10200)/326.2)
elif S_bb >= 13462 and S_bb < 13812:
    Hu_bb = 260 + ((S_bb - 13462)/350)
elif S_bb >= 13812 and S_bb < 14212:
    Hu_bb = 261 + ((S_bb - 13812)/400)

if S_sk >= 310 and S_sk < 1060:
    Hu_sk = 100 + ((S_sk - 310)/75)
elif S_sk >= 1060 and S_sk < 2000:
    Hu_sk = 110 + ((S_sk - 1060)/94)
elif S_sk >= 2000 and S_sk < 3100:
    Hu_sk = 120 + ((S_sk - 2000)/110)
elif S_sk >= 3100 and S_sk < 4650:
    Hu_sk = 130 + ((S_sk - 3100)/155)
elif S_sk >= 4650 and S_bb < 6650:
    Hu_sk = 140 + ((S_sk - 4650)/200)
elif S_sk >= 6650 and S_sk < 9000:
    Hu_sk = 150 + ((S_sk - 6650)/235)
elif S_sk >= 9000 and S_sk < 9510:

```

```

    Hu_sk =160 +((S_sk -9000)/255)
elif S_sk >=9510 and S_sk < 11525:
    Hu_sk =162 +((S_sk -9510)/287.857)

model.Equation(HE_bb ==((91.27/100)*9.81 *((R_bb*(10**6))/(24*60*60))*(Hu_bb -
Hl_bb)*24)/1000))
model.Equation(HE_sk ==((91.27/100)*9.81 *((R_sk*(10**6))/(24*60*60))*(Hu_sk -
Hl_sk)*24)/1000))

```

(4) สมการข้อจำกัดของการระบายน้ำ

```

#Equation of modelled release of each dam
R_bb =R_bba[x]
RC_bb =RC_bba[x+4]
RE_bb =RE_bba[x+8]

if S_bb >=Smin_bb+64.46+37.70:
    model.Equation(FR_bb >=5)
    model.Equation(FR_bb >=R_bb +RC_bb +RE_bb)
elif S_bb < Smin_bb+64.46+37.70:
    model.Equation(FR_bb >=0)
    model.Equation(FR_bb >=R_bb +RC_bb +RE_bb)

R_sk =R_ska[x]
RC_sk =RC_ska[x+6]
RE_sk =RE_ska[x+10]

if S_sk >=Smin_sk+63.55+34.56:
    model.Equation(FR_sk >=7)
    model.Equation(FR_sk >=R_sk +RC_sk +RE_sk)
elif S_sk < Smin_sk+63.55+34.56:
    model.Equation(FR_sk >=0)
    model.Equation(FR_sk >=R_sk +RE_sk)

R_knb =R_knba[x]
RC_knb =RC_knba[x+3]
RE_knb =RE_knba[x+7]

if S_knb >=Smin_knb+30.58+48.82:
    model.Equation(FR_knb >=1)
    model.Equation(FR_knb >=R_knb +RC_knb +RE_knb)
elif S_knb < Smin_knb+30.58+48.82:
    model.Equation(FR_knb >=0)
    model.Equation(FR_knb >=R_knb +RC_knb +RE_knb)

R_ps =R_psa[x]
RE_ps =RE_psa[x+6]

if S_ps >=Smin_ps+27.29+112.80:
    model.Equation(FR_ps >=0.5)
    model.Equation(FR_ps >=R_ps +RE_ps)
elif S_ps < Smin_ps+27.29+112.80:

```

```

model.Equation(FR_ps >= 0)
model.Equation(FR_ps >= R_ps + RE_ps)

```

(5) สมการข้อจำกัดของการระบายน้ำในช่วงสถานการณ์น้ำมากตามนโยบายของ กฟผ.

```

#Equation of EGAT release condition
if S_bb >=12157.2:
    model.Equation(FR_bb >=0.3*In_bb)
elif S_bb >=12483.4:
    model.Equation(FR_bb >=0.5*In_bb)
elif S_bb >=12809.6:
    model.Equation(FR_bb >=0.7*In_bb)
elif S_bb >=13298.9:
    model.Equation(FR_bb >=In_bb)

```

2.2 ตัวอย่างแบบจำลองของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

(6) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการตอบสนองความต้องการน้ำเพื่อกิจกรรมต่าง ๆ ทางด้านท้ายเขื่อน โดยลดปัญหาการขาดแคลนน้ำให้เหลือน้อยที่สุด

```

#Minimizing the sum of the squared water deficit
FD_bb =D_bb +(w_cpy_bb *D_cpy_bb)+(w_eco_bb *D_eco_bb)-(0.2 *SF_bb)
FD_sk =D_sk +(w_cpy_sk *D_cpy_sk)+(w_eco_sk *D_eco_sk)-(0.2 *SF_sk)
FD_knb =(w_cpy_knb *D_cpy_knb)+(w_eco_knb *D_eco_knb)+D_knb
FD_ps =D_ps +(w_eco_ps *D_eco_ps)

model.Minimize(pow(FD_bb -FR_bb, 2))
model.Minimize(pow(FD_sk -FR_sk, 2))
model.Minimize(pow(FD_knb -FR_knb, 2))
model.Minimize(pow(FD_ps -FR_ps, 2))

```

(7) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้ได้สูงสุด

```

#Maximizing hydropower energy
model.Maximize(HE_bb)
model.Maximize(HE_sk)

```

(8) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำในขนาดของทุกเขื่อน

```

#Maximizing available water storage
model.Maximize(NS_bb)
model.Maximize(NS_sk)
model.Maximize(NS_knb)
model.Maximize(NS_ps)

```

(9) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการลดปริมาณการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำของทุกเขื่อน

```

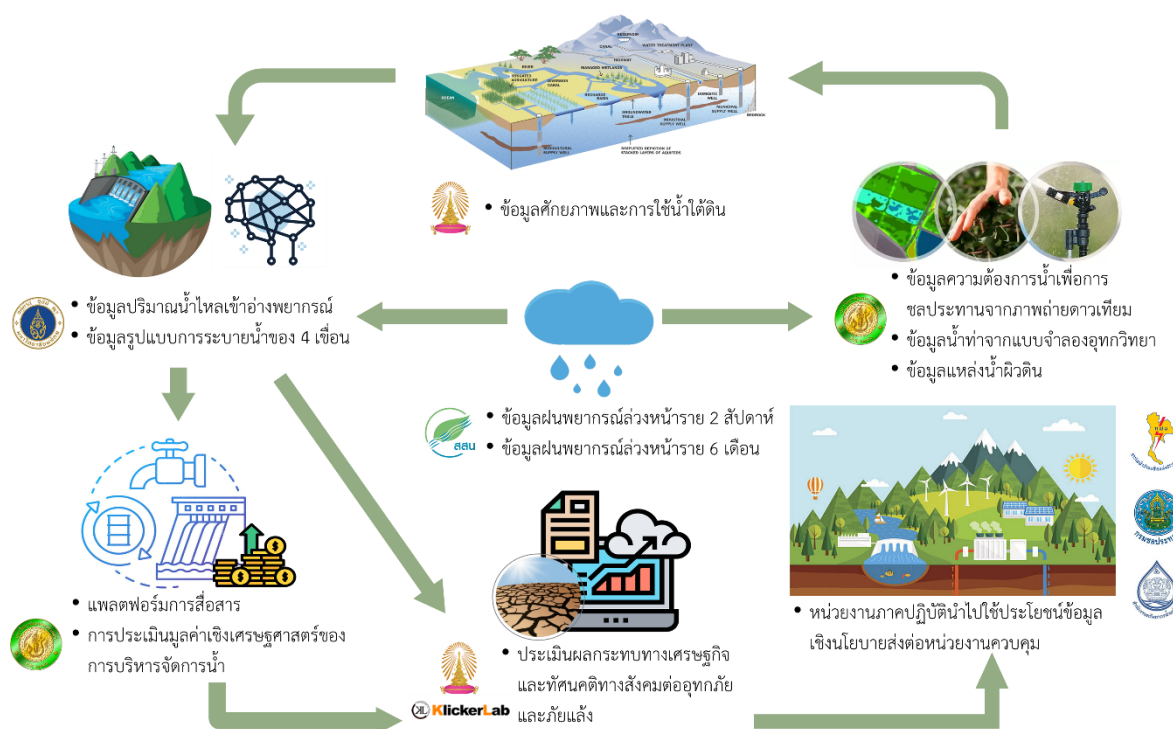
#Minimizing water release
model.Minimize(FR_bb)
model.Minimize(FR_sk)
model.Minimize(FR_knb)
model.Minimize(FR_ps)

```

ภาคผนวก E

ผลการดำเนินงานวิจัยผ่านกิจกรรม CO-RUN ในแผนงานวิจัยที่ 3

โครงการวิจัยเรื่อง “การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)” นี้เป็นหนึ่งในโครงการวิจัยหลักของแผนงานที่ 3 เรื่อง “การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเสริมการเพิ่มน้ำต้นทุนของเขื่อนหลักเพื่อการพัฒนาลุ่มน้ำเจ้าพระยา” ภายใต้แผนงานยุทธศาสตร์ของโครงการวิจัยเข็มมุ่ง ด้านสังคม การบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) โดยบทบาทสำคัญของคณะวิจัยภายใต้โครงการวิจัยเข็มมุ่งด้านการบริหารจัดการน้ำนั้นได้มีการขับเคลื่อนผลการดำเนินงานวิจัยและผลลัพธ์จากงานวิจัยบางส่วนเพื่อให้เกิดการใช้ประโยชน์ผ่านกิจกรรม CO-RUN ในช่วงสถานการณ์น้ำวิกฤตจากเหตุการณ์พายุเตี้ยนหมู่ที่เกิดขึ้นในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ในช่วงปลายปี พ.ศ. 2564 โดยในการทดสอบ CO-RUN ได้มีการเชื่อมโยงและส่งต่อข้อมูลผลลัพธ์ในแต่ละโครงการวิจัยย่อยของแผนงานวิจัยที่ 3 มาใช้ในงานบริหารเขื่อนเพื่อกำหนดแนวทางการระบายน้ำล่วงหน้าทุกสัปดาห์ในช่วงระหว่างวันที่ 1 สิงหาคม พ.ศ. 2564 ถึงวันที่ 2 ธันวาคม พ.ศ. 2564 ดังแสดงในรูปผนวกที่ E-1 และมีการนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากกิจกรรม CO-RUN ให้หน่วยงานภาคปฏิบัติรับทราบ และเผยแพร่ผลการดำเนินงานวิจัยในงานประชุมวิชาการเพื่อให้สาธารณชนรับทราบ



รูปผนวกที่ E-1 การเชื่อมโยงข้อมูลผลลัพธ์จากโครงการวิจัยในแผนงานที่ 3

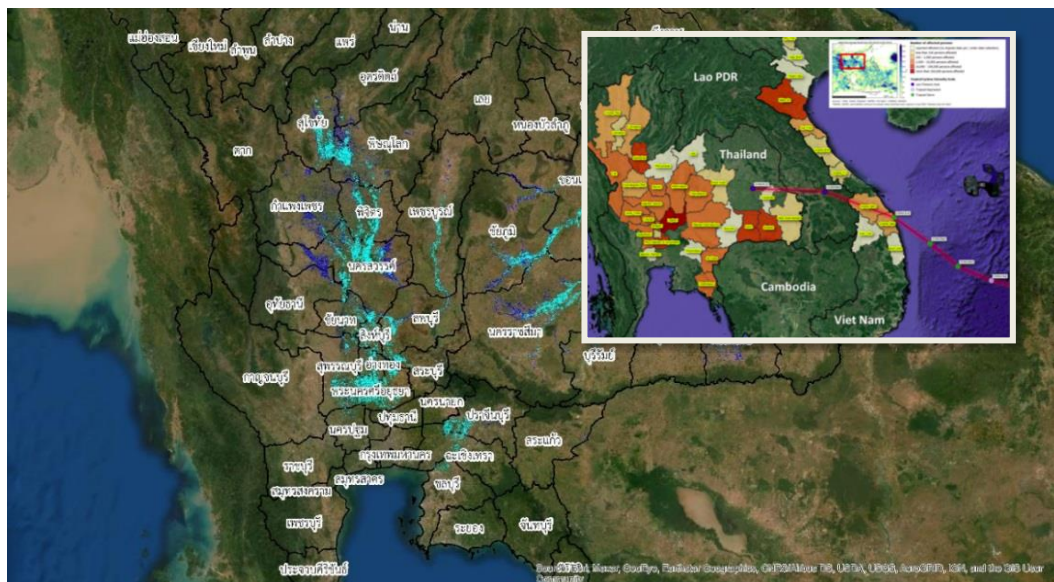
ในการทดสอบการบริหารเขื่อนผ่านกิจกรรม CO-RUN ข้อมูลฝนพยากรณ์รายวันล่วงหน้า 2 สัปดาห์ในลักษณะ Grid-Based Rainfall ที่ได้จากแบบจำลองซึ่งพัฒนาโดยสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) (สสน.) ได้ถูกนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันล่วงหน้าที่พัฒนาขึ้นโดยอาศัยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Reservoir Forecasting Model

Using Machine Learning) ของ 4 เชื่อนหลัก ได้แก่ (1) เชื่อนภูมิพล (2) เชื่อนสิริกิติ์ (3) เชื่อนแควน้อยบำรุงแดน และ (4) เชื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ซึ่งผลลัพธ์จากการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจะถูกใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ที่พัฒนาด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด (Constraint Programming Model, CP) เพื่อกำหนดแนวทางการระบายน้ำล้นหน้าทุกสัปดาห์ในช่วงระหว่างที่ทำการทดสอบ CO-RUN นอกจากนี้ ยังได้พิจารณาข้อมูล Side Flow ของสถานีตรวจวัดหลักท้ายเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ของสถานี W.4A, N.22A และ Y.17 ทั้งจากข้อมูลการตรวจวัดและผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางอุทกวิทยาที่พัฒนาโดยทีมวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จะถูกนำมาเป็นพิจารณาในการกำหนดการระบายน้ำล้นหน้าจาก 4 เชื่อนหลักในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ร่วมด้วย สำหรับรายละเอียดของผลการวิจัย ข้อมูลสถานการณ์น้ำ ตลอดจนแนวทางการบริหารจัดการน้ำในช่วงเหตุการณ์พายุเตี้ยนหมู่โดยหน่วยงานภาครัฐในช่วงของการทดสอบ CO-RUN มีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

E.1 พายุเตี้ยนหมู่ (Dianmu) และพื้นที่ประสบภัยน้ำท่วมในเดือนกันยายน พ.ศ. 2564

พายุเตี้ยนหมู่ (Dianmu) เป็นพายุหมุนเขตร้อนจากมหาสมุทรแปซิฟิกตะวันตกซึ่งพัดเคลื่อนตัวขึ้นฝั่งในแถบประเทศอินโดจีนได้แก่ เวียดนาม กัมพูชา ลาว และประเทศไทย และก่อให้เกิดน้ำท่วมตามมาในแถบภูมิภาคนี้ตั้งแต่วันที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2564 จากการติดตามข้อมูลขององค์การอุตุนิยมวิทยาของหลายประเทศได้รายงานถึงการเปลี่ยนแปลงที่ผิดปกติของข้อมูลสภาพภูมิอากาศและข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่เกิดขึ้นทางตอนกลางของประเทศเวียดนาม ทางตอนใต้ของประเทศลาว ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศกัมพูชา รวมทั้งบริเวณประเทศไทยตอนบนที่มีปริมาณฝนเพิ่มสูงขึ้นและเกิดฝนตกหนักถึงหนักมากบางแห่งในแถบภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออก รวมทั้งกรุงเทพมหานครและเขตปริมณฑลหลายพื้นที่ที่มีปริมาณน้ำเพิ่มสูงขึ้น และประสบปัญหาน้ำท่วมแบบเฉียบพลัน (Flash Flood) จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมแสดงพื้นที่ประสบภัยน้ำท่วมเมื่อวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2564 โดยสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) พบว่า พื้นที่ประสบภัยน้ำท่วมครอบคลุมจังหวัดทางภาคเหนือ 6 จังหวัด ได้แก่ สุโขทัย พิษณุโลก กำแพงเพชร พิจิตร ตาก และเพชรบูรณ์ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 8 จังหวัด ได้แก่ เลย ขอนแก่น ร้อยเอ็ด กาฬสินธุ์ ชัยภูมิ นครราชสีมา บุรีรัมย์ และสุรินทร์ ภาคตะวันออก 8 จังหวัด ได้แก่ นครนายก ปราจีนบุรี สระแก้ว ฉะเชิงเทรา ชลบุรี ระยอง ชลบุรี และตราด และภาคกลางตอนบน 9 จังหวัด ได้แก่ นครสวรรค์ ลพบุรี อุทัยธานี ชัยนาท สระบุรี สิงห์บุรี อ่างทอง พระนครศรีอยุธยา และสุพรรณบุรี อีกทั้งยังเกิดน้ำท่วมไหลหลากในบริเวณพื้นที่ภาคกลางตอนล่างในเขตจังหวัดปทุมธานี นนทบุรี รวมทั้งกรุงเทพมหานครและเขตปริมณฑล โดยคิดเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากน้ำท่วมกว่า 2 ล้านไร่ ดังแสดงในรูปผนวกที่ E-2 นอกจากนี้ ผลการวิจัยได้ทำการวิเคราะห์ถึงพื้นที่ประสบภัยน้ำท่วมเฉพาะในเขตพื้นที่ชลประทานของโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่โดยอาศัยข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม COSMO-SkyMed-4 พบว่า ข้อมูลพื้นที่ในเขตชลประทานที่ประสบภัยน้ำท่วม ณ วันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ. 2564 สูงถึง 942,694 ไร่ ดังแสดงในรูปผนวกที่ E-3 หรือคิดเป็น 9.94% ของพื้นที่เพาะปลูกจริงสะสมในปี พ.ศ.

2563/2564 ตามที่ได้สรุปไว้ในตารางผนวกที่ E-1 และตารางผนวกที่ E-2 ยิ่งไปกว่านั้น อิทธิพลของน้ำไหลหลากจากบริเวณทางภาคเหนือและภาคกลางตอนบนของประเทศทำให้พื้นที่สองฝั่งของแม่น้ำเจ้าพระยา กลายเป็นพื้นที่รับน้ำนอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตพื้นที่ลุ่มต่ำบริเวณภาคกลางตอนล่าง และบริเวณภาค ตะวันออกของประเทศ ส่งผลทำให้เกิดน้ำท่วมขังติดต่อกันเป็นเวลานาน สร้างความเดือดร้อนต่อการอยู่อาศัย ที่ยากลำบากของประชาชน และสร้างความเสียหายต่อผลิตผลทางการเกษตรซึ่งอยู่ในช่วงปลายฤดูเก็บเกี่ยว



รูปผนวกที่ E-2 แสดงพื้นที่ประสบภัยน้ำท่วมในประเทศไทยจากอิทธิพลของพายุเตี้ยนหมู่ในปี พ.ศ. 2564 (หมายเหตุ: สีน้ำเงิน-พื้นที่ประสบภัยน้ำท่วมระหว่างวันที่ 24-30 กันยายน 2564 สีฟ้า-พื้นที่ประสบภัยน้ำท่วมระหว่างวันที่ 1-9 ตุลาคม 2564)

ตารางผนวกที่ E-1 พื้นที่ในเขตลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ที่ประสบภัยน้ำท่วมจากอิทธิพลของพายุเตี้ยนหมู่

ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	จังหวัด	พื้นที่ประสบภัยน้ำท่วม (ตร.กม.) ^{1/}
ลุ่มน้ำปิง-ยม-น่าน-สะแกกรัง-เจ้าพระยา-ท่าจีน-ป่าสัก	เพชรบูรณ์	133.19
	กาญจนบุรี	3.35
	กำแพงเพชร	351.05
	ชัยนาท	144.18
	ตาก	3.53
	นครปฐม	17.88
	นครสวรรค์	1,092.99
	พระนครศรีอยุธยา	200.35
	พิจิตร	460.50
	พิษณุโลก	446.99
	ลพบุรี	154.62
	สระบุรี	16.88

E | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	จังหวัด	พื้นที่ประมงน้ำจืด (ตร.กม.) ^{1/}
	สิงห์บุรี	41.11
	สุโขทัย	601.43
	สุพรรณบุรี	304.10
	อ่างทอง	45.43
	อุตรดิตถ์	60.32
	อุทัยธานี	90.11
รวม		4,168.02

หมายเหตุ: ^{1/} ระหว่างวันที่ 27 กันยายน-2 ตุลาคม พ.ศ. 2564

**ตารางผนวกที่ E-2 พื้นที่เกษตรกรรมในเขตโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ที่ประมงน้ำจืดจาก
อิทธิพลของพายุเตียนหมู่**

โครงการชลประทาน	ประเภทโครงการ	พื้นที่เพาะปลูก ปี 2563/2564 (ไร่) ^{1/}	พื้นที่เกษตรกรรมที่ประมงน้ำจืด	
			(ไร่)	(เปอร์เซ็นต์) ^{2/}
โครงการชลประทานลุ่มน้ำปิงตอนล่าง				
ท่อทองแดง	รับน้ำนอง	651,037	52,183	8.02
วังบัว	รับน้ำนอง	694,566	49,322	7.10
วังยาง-หนองขวัญ	รับน้ำนอง	439,511	72,380	16.47
โครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง				
ดงเศรษฐี	แรงโน้มถ่วง	151,982	19,596	12.89
พลาญชุมพล	แรงโน้มถ่วง	255,377	41,325	16.18
นเรศวร	แรงโน้มถ่วง	95,215	309	0.32
ท่าบัว	แรงโน้มถ่วง	157,489	25,564	16.23
ยมน่าน	รับน้ำนอง	368,180	131,497	35.72
โครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน				
บางบาล	สูบน้ำ	176,627	10,100	5.72
บรมธาตุ	แรงโน้มถ่วง	212,101	21,614	10.19
ชั้นสูตร	แรงโน้มถ่วง	307,503	39,640	12.89
เจ้าเจ็ดบางยี่หน	รับน้ำนอง	629,072	31,948	5.08
ดอนเจดีย์	แรงโน้มถ่วง	91,961	13,497	14.68
ผักไห่	แรงโน้มถ่วง	278,899	96,187	34.49
โพธิ์พระยา	แรงโน้มถ่วง	537,783	71,779	13.35
พลเทพ	แรงโน้มถ่วง	170,204	15,821	9.30
สามชุก	แรงโน้มถ่วง	243,499	12,658	5.20
ท่าโบสถ์	แรงโน้มถ่วง	114,138	31,563	27.65
ทุ่งวัดสิงห์	สูบน้ำ	6,616	-	-
ยางมณี	แรงโน้มถ่วง	142,808	18,332	12.84
ภาษีเจริญ	รับน้ำนอง	44,668	-	-
พระยาบรรลือ	รับน้ำนอง	382,642	528	0.14
พระพิมล	รับน้ำนอง	205,285	-	-

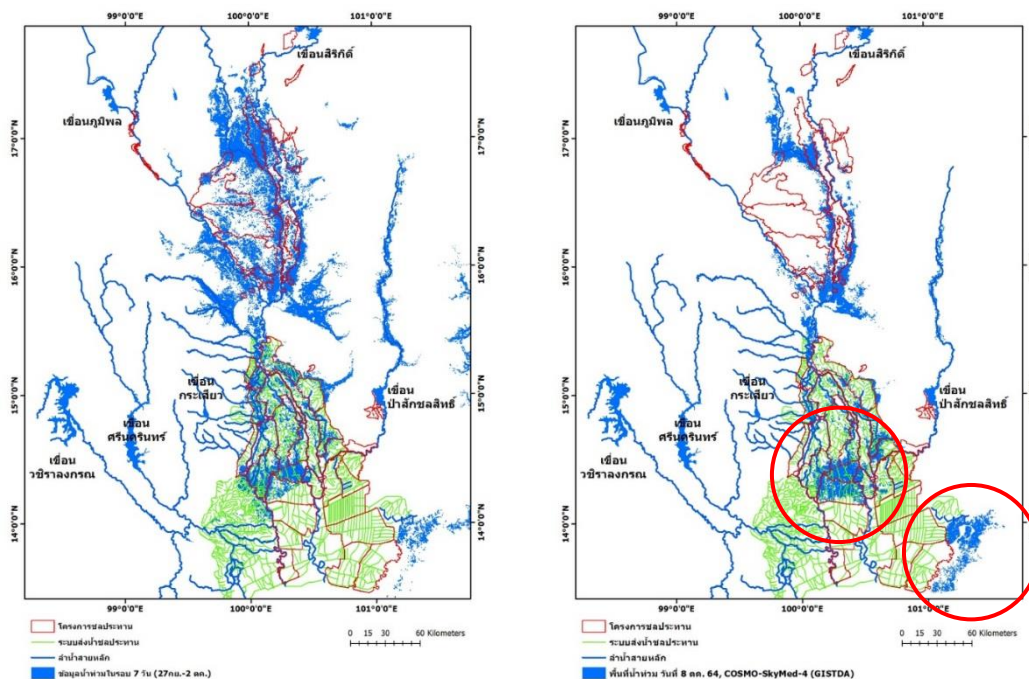
E | การปฏิบัติกระบวนอย่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)

โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

โครงการชลประทาน	ประเภทโครงการ	พื้นที่เพาะปลูก ปี 2563/2564 (ไร่) ^{1/}	พื้นที่เกษตรกรรมที่ประสบภัยน้ำท่วม	
			(ไร่)	(เปอร์เซ็นต์) ^{2/}
ช่องแค	แรงโน้มถ่วง	116,219	14,100	12.13
โคกกระเทียม	แรงโน้มถ่วง	208,183	16,752	8.05
มหาราช	แรงโน้มถ่วง	210,765	31,687	15.03
มโนรมย์	แรงโน้มถ่วง	202,231	41,146	20.35
เริงราง	แรงโน้มถ่วง	143,533	7,386	5.15
ชลหารพิจิตร (คลองด่าน)	รับน้ำนอง	221,970	-	-
นครหลวง	แรงโน้มถ่วง	94,640	-	-
รังสิตเหนือ	แรงโน้มถ่วง	181,898	-	-
พระองค์ไชยานุชิต	รับน้ำนอง	495,845	-	-
ป่าสักใต้	แรงโน้มถ่วง	140,407	-	-
รังสิตใต้	แรงโน้มถ่วง	682,143	-	-
พื้นที่เพาะปลูกจริงส่วนเพิ่มเติมในปี 2563/2564				
ชลประทานนครสวรรค์	-	161,775	45,981	28.42
ชลประทานตาก	-	19,900	-	-
ผาจุก	-	0	-	-
แควน้อยบำรุงแดน	-	21,469	21,745	101.29
ชลประทานสมุทรสาคร	-	37,638	-	-
คลองเปரியว-เสาไห้	-	36,250	-	-
ป่าสักชลสิทธิ์	-	79,234	-	-
ชลประทานลพบุรี	-	70,690	-	-
ชลประทานชัยนาท	-	-	3,338	-
ชลประทานอุตรดิตถ์	-	-	4,716	-
รวม	-	9,481,953	942,694	9.94

หมายเหตุ: ^{1/} ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกจริงฤดูแล้งและฤดูฝนตั้งแต่วันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2563 ถึงวันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2564

^{2/} เปอร์เซ็นต์พื้นที่เกษตรกรรมที่ประสบภัยน้ำท่วมเทียบกับพื้นที่เพาะปลูกจริงในปี 2563/2564



รูปผนวกที่ E-3 เปรียบเทียบพื้นที่ที่ประสบภัยน้ำท่วมในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ในช่วงต้นสัปดาห์ของเดือนตุลาคม พ.ศ. 2564 (หมายเหตุ: ซ้าย-2 ตุลาคม 2564/ขวา-8 ตุลาคม 2564)

E.2 สถานการณ์น้ำของลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ในช่วงเหตุการณ์พายุเตี้ยนหมู่

จากการวิเคราะห์สถานการณ์น้ำของลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ก่อนเกิดพายุเตี้ยนหมู่โดยอาศัยข้อมูลเมื่อวันที่ 5 กันยายน พ.ศ. 2564 พบว่า ปริมาณน้ำต้นทุนจากเขื่อนหลักได้แก่ เขื่อนภูมิพล (BB) เขื่อนสิริกิติ์ (SK) เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน (KNB) เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ (PS) ยังอยู่ในเกณฑ์ต่ำโดยมีปริมาณน้ำใช้การเท่ากับ 9.09%, 12.14%, 30.16% และ 12.77% ของปริมาณเก็บกักใช้การของอ่างเก็บน้ำ ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำสะสมตั้งแต่ต้นปีถึงวันที่ 5 กันยายน เท่ากับ 1,249, 2,281, 555 และ 201 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และมีแนวโน้มที่จะบริหารเขื่อนในสถานการณ์น้ำน้อย เนื่องจากปริมาณน้ำต้นทุนมีจำกัดแต่ปัจจัยความต้องการน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ยังคงสูง โดยปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อนสะสมตั้งแต่ต้นปีถึงวันที่ 5 กันยายนคิดเป็น 1,703, 3,772, 634 และ 612 ล้านลูกบาศก์เมตร สำหรับเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปผนวกที่ E-4 ถึงดังแสดงในรูปผนวกที่ E-6

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเมื่อวันที่ 30 กันยายนพบว่า อิทธิพลของพายุเตี้ยนหมู่ส่งผลให้ปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนสะสมของทั้ง 4 เขื่อนหลักเพิ่มสูงขึ้นกล่าวคือ ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำสะสมตั้งแต่ต้นปีถึงวันที่ 30 กันยายน เท่ากับ 3,203, 2,833, 1,106 และ 1,194 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำใช้การของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์เพิ่มสูงขึ้นไม่มากนักเพียง 29.08% และ 19.77% ของปริมาณเก็บกักใช้การ และบริหารเขื่อนด้วยการลดปริมาณน้ำระบายน้ำลงต่ำสุดในช่วงสถานการณ์ดังกล่าว ในขณะที่อิทธิพลของพายุเตี้ยนหมู่ส่งผลต่อความแปรปรวนของข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อน

ป่าสักชลสิทธิ์ค่อนข้างสูงและชัดเจนยิ่งขึ้นหลังวันที่ 26 กันยายน โดยพบว่า ปริมาณน้ำใช้การของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนสูงถึง 90.70% และเกินความจุเก็บกักสูงสุดของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์โดยมีค่าเท่ากับ 107% เมื่อวันที่ 30 กันยายน ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณการระบายน้ำจากทั้งสองเขื่อนสูงขึ้น จากการวิเคราะห์พบว่า อัตราส่วนปริมาณน้ำไหลเข้ารายปีสะสมในปี พ.ศ. 2564 ต่อความจุอ่างเก็บน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์สูงถึง 1.44 และ 1.52 หลังเกิดพายุเตี้ยนหมู่ ดังแสดงผลการวิเคราะห์โดยอาศัยข้อมูลระยะสั้นและระยะยาวในตารางผนวกที่ E-3

ตารางผนวกที่ E-3 อัตราส่วนปริมาณน้ำไหลเข้ารายปีเฉลี่ยต่อความจุอ่างเก็บน้ำของเขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

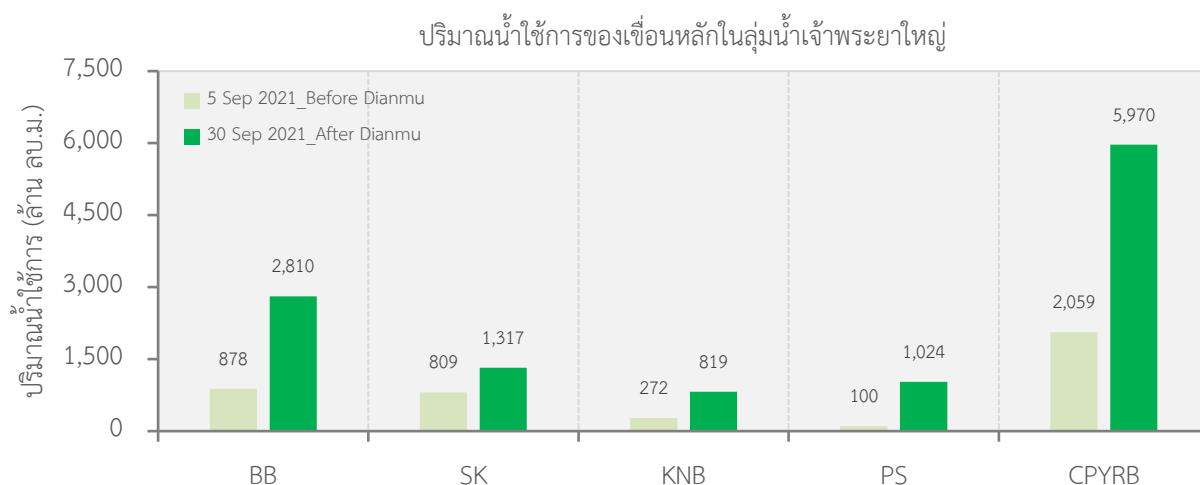
อัตราส่วนปริมาณน้ำไหลเข้ารายปีเฉลี่ย : ความจุอ่างเก็บน้ำ	ข้อมูลระยะยาว	ข้อมูลระยะสั้น			
		ปีน้ำมาก	ปีน้ำปกติ	ปีน้ำน้อย	ปี 2564 ^{4/}
เขื่อนภูมิพล ^{1/}	0.40	0.73	0.39	0.20	0.24
เขื่อนสิริกิติ์ ^{1/}	0.64	0.89	0.64	0.45	0.30
เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน ^{2/}	1.72	3.92	1.90	0.92	1.44*
เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ^{3/}	2.83	5.33	3.02	1.09	1.52*

หมายเหตุ: ^{1/}ข้อมูลระยะยาวระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563

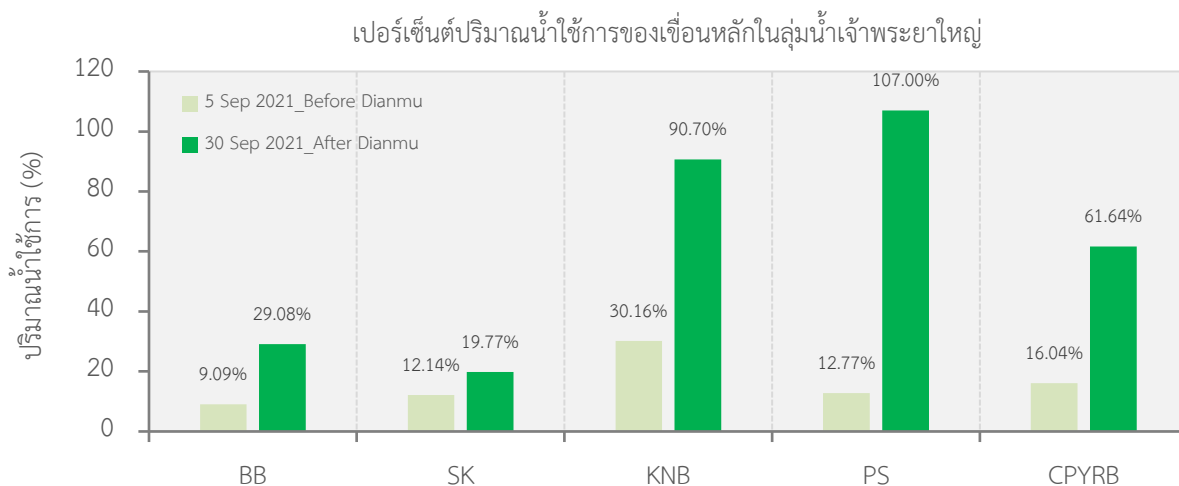
^{2/}ข้อมูลระยะยาวระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563

^{3/}ข้อมูลระยะยาวระหว่างปี พ.ศ. 2546-2563

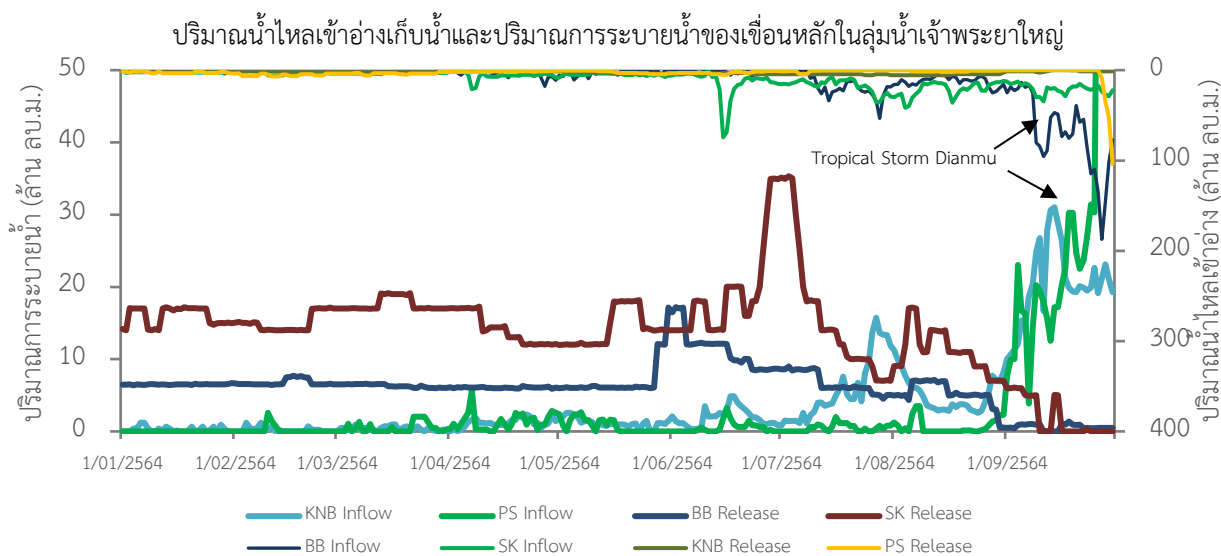
^{4/}ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าสะสมถึงวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2564 หลังเกิดพายุเตี้ยนหมู่



รูปผนวกที่ E-4 ปริมาณน้ำใช้การของเขื่อนหลักก่อนและหลังพายุเตี้ยนหมู่



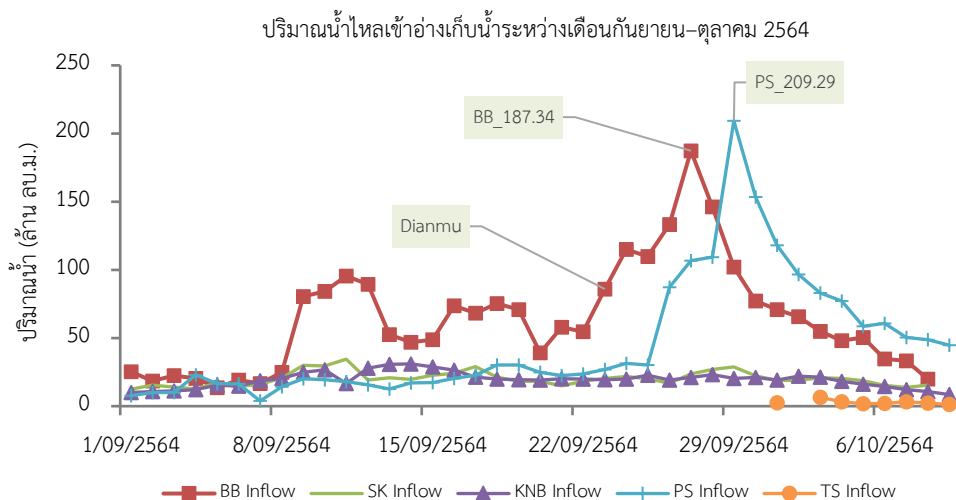
รูปผนวกที่ E-5 เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำใช้การของเขื่อนหลักก่อนและหลังพายุไต้ฝุ่นหมู



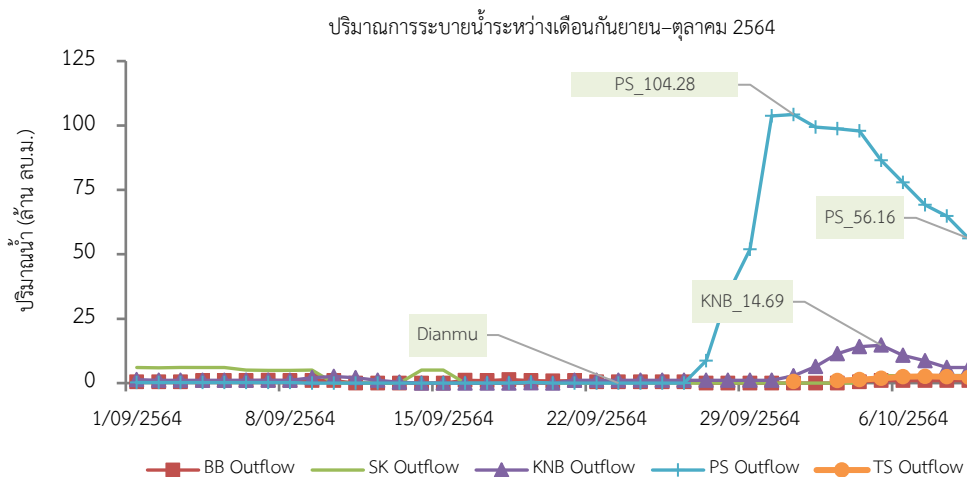
รูปผนวกที่ E-6 แนวโน้มปริมาณน้ำไหลเข้าและปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนหลักในช่วงก่อนและหลังพายุไต้ฝุ่นหมู

อาจกล่าวได้ว่า อิทธิพลของพายุไต้ฝุ่นหมูได้ส่งผลต่อปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนภูมิพลสูงสุดถึง 187.34 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์สูงสุดถึง 209.29 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน ดังแสดงในรูปผนวกที่ E-7 ถึงแสดงรูปผนวกที่ E-9 อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำไหลเข้าของทุกเขื่อนมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องนับตั้งแต่วันที่ 30 กันยายน ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำล่วงหน้าโดยอาศัยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning) และผลการพยากรณ์ฝนรายวันสองสัปดาห์ล่วงหน้าด้วยแบบจำลอง WRF-ROMS (CFSV2) บริเวณพื้นที่เหนือเขื่อนในเดือนตุลาคมของคณะนักวิจัย นอกจากนี้ เมื่อทำการวิเคราะห์แนวทางการบริหารเขื่อนในช่วงต้นเดือนตุลาคมจากข้อมูลปริมาณการระบายน้ำรายวัน (Reservoir Outflow) พบว่า ทุกเขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ยังคง

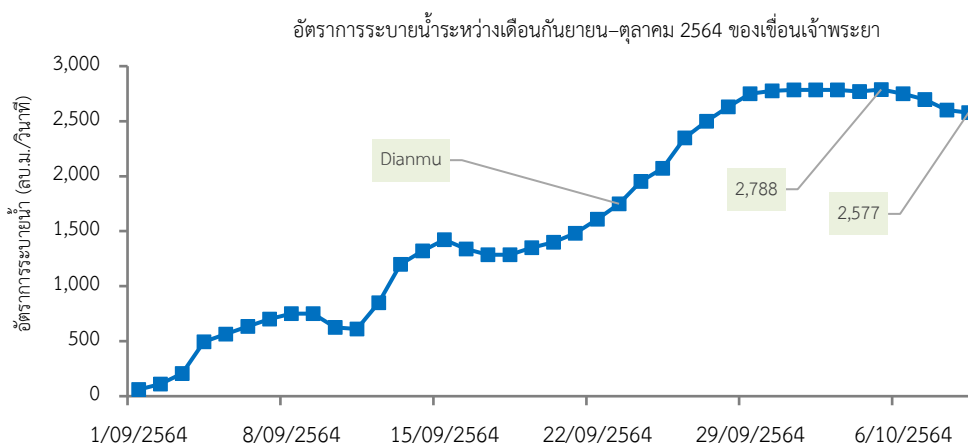
กำหนดการระบายน้ำขั้นต่ำเพื่อลดผลกระทบทางด้านท้ายน้ำ ยกเว้นเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์และเขื่อนทับเสลา (TS) ที่มีการปรับเพิ่มปริมาณการระบายน้ำจากสถานะของปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำที่เต็มความจุหลังเกิดพายุเตี้ยนหมู่ โดยปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์สูงสุดถึง 104.28 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน เมื่อวันที่ 1 ตุลาคม และได้มีการปรับลดปริมาณการระบายน้ำลงอย่างต่อเนื่องหลังจากนั้น ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับแนวโน้มการระบายน้ำของเขื่อนทดน้ำเจ้าพระยาที่มีการปรับลดปริมาณการระบายน้ำลงเหลือ 2,577 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เมื่อวันที่ 8 ตุลาคม



รูปผนวกที่ E-7 แนวโน้มปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันของเขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ ระหว่างเดือนกันยายน-ตุลาคม พ.ศ. 2564



รูปผนวกที่ E-8 แนวโน้มปริมาณการระบายรายวันของเขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระหว่างเดือนกันยายน-ตุลาคม พ.ศ. 2564



รูปผนวกที่ E-9 อัตราการระบายน้ำของเขื่อนเจ้าพระยาระหว่างเดือนกันยายน-ตุลาคม พ.ศ. 2564

E.3 ผลลัพธ์จากกิจกรรม CO-RUN ในการบริหารเขื่อนในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

E.3.1 ผลการพยากรณ์ปริมาณฝนรายวันล่วงหน้า 2 สัปดาห์

ผลการพยากรณ์ปริมาณฝนรายวันล่วงหน้า 2 สัปดาห์จากแบบจำลอง BC_CFSV2 และแบบจำลอง WRFROMS_CFSV2 ระหว่างเดือนมิถุนายนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2564 ได้สรุปไว้ในตารางผนวกที่ E-4 ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ผลการพยากรณ์ให้ค่าประสิทธิผลอยู่ในเกณฑ์ดีในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนบริเวณเหนือเขื่อนภูมิพล เมื่อประยุกต์ใช้แบบจำลอง BC_CFSV2 อย่างไรก็ตาม ผลการพยากรณ์ให้ค่าต่ำกว่าข้อมูลฝนตรวจวัดจริง (Underestimated) ในพื้นที่ลุ่มน้ำวัง ลุ่มน้ำยม และลุ่มน้ำน่านตอนบนบริเวณเหนือเขื่อนสิริกิติ์ และผลการพยากรณ์ส่วนใหญ่ให้ค่าสูงกว่าข้อมูลฝนตรวจวัดจริง (Overestimated) เมื่อประยุกต์ใช้แบบจำลอง WRFROMS_CFSV2 ยกเว้นลุ่มน้ำน่านตอนบนบริเวณเหนือเขื่อนสิริกิติ์ที่ให้ค่าต่ำกว่าข้อมูลฝนตรวจวัดจริง ดังแสดงในรูปผนวกที่ E-10 ถึงแสดงรูปผนวกที่ E-13 ด้วยเหตุนี้ ในช่วงของการทดสอบ CO-RUN ได้ทำการหาค่าแฟคเตอร์ในการปรับแก้ฝนพยากรณ์แยกรายลุ่มน้ำโดยมีรูปแบบสมการดังนี้คือ

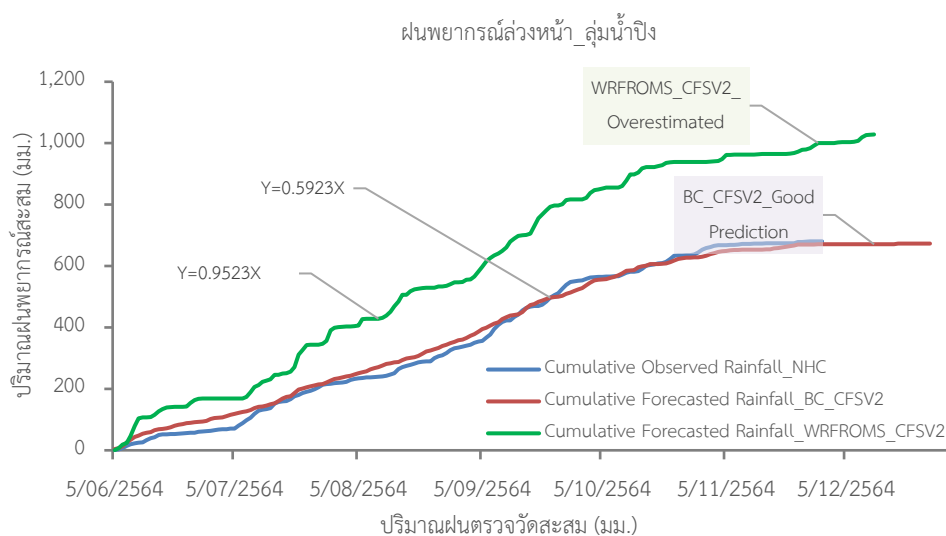
$$\text{Cum. Predicted Rain}_{t+1} = \text{Cum. Predicted Rain}_t + a * \text{Cum. Predicted Rain}_t \quad \text{---(E-1)}$$

เมื่อ $\text{Cum. Predicted Rain}_{t+1}$ เป็นค่าปริมาณฝนพยากรณ์สะสมที่เวลา $t+1$ และ $\text{Cum. Predicted Rain}_t$ เป็นค่าปริมาณฝนพยากรณ์สะสมที่เวลา t และ a เป็นแฟคเตอร์ปรับแก้ (Correction Factor) ซึ่งหาได้โดยวิธี Least Square Criterion หลังการปรับแก้ส่งผลให้ข้อมูลฝนพยากรณ์มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลฝนตรวจวัดจริงมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปผนวกที่ E-14 ถึงแสดงรูปผนวกที่ E-17

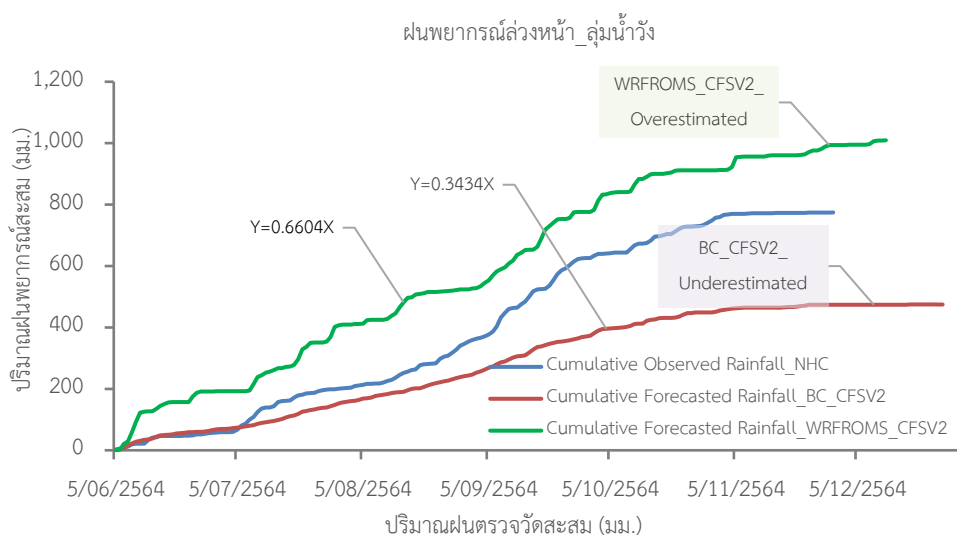
ตารางผนวกที่ E-4 สรุปผลการพยากรณ์ปริมาณฝนรายวัน 2 สัปดาห์ล่วงหน้าแยกรายพื้นที่ลุ่มน้ำ

พื้นที่	ผลการพยากรณ์ฝน		แฟคเตอร์ปรับแก้ (%)	
	BC_CFSV2	WRFROMS_CFSV2	BC_CFSV2	WRFROMS_CFSV2
ลุ่มน้ำปิงตอนบนเหนือเขื่อนภูมิพล	Good	Overestimated	0.02	-34.45
ลุ่มน้ำวัง	Underestimated	Overestimated	60.41	-24.89
ลุ่มน้ำยม	Underestimated	Overestimated	61.29	-17.57
ลุ่มน้ำน่านตอนบนเหนือเขื่อนสิริกิติ์	Underestimated	Underestimated	48.61	16.94

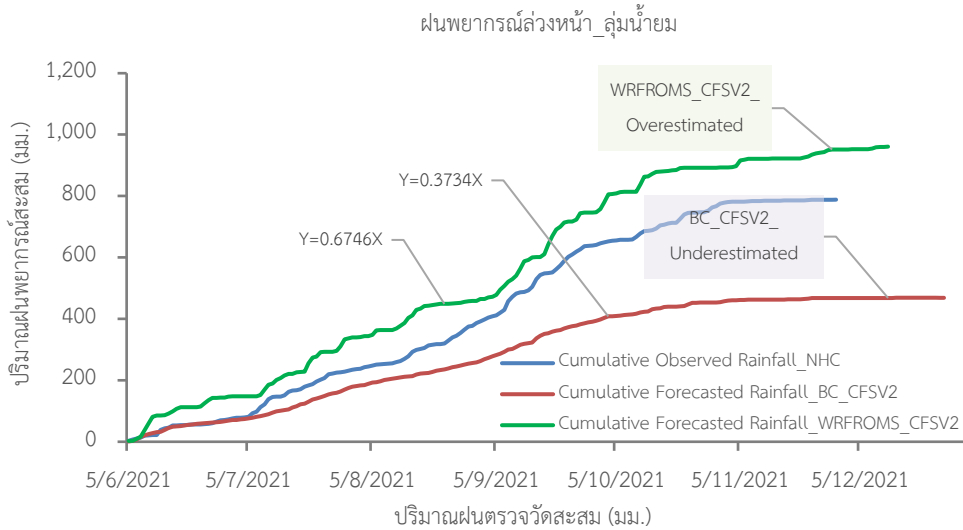
หมายเหตุ: รูปแบบสมการที่ใช้ในการปรับแก้ $Cum. Predicted Rain_{t+1} = Cum. Predicted Rain_t + a * Cum. Predicted Rain_t$; เมื่อ a = แฟคเตอร์ปรับแก้ (Correction Factor)



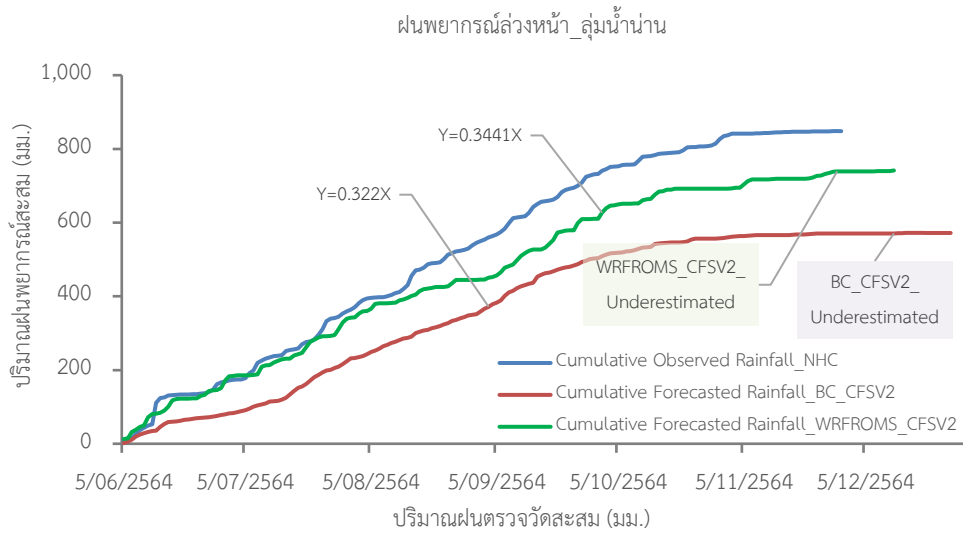
รูปผนวกที่ E-10 ผลการพยากรณ์ฝนรายวันล่วงหน้า 2 สัปดาห์ในลุ่มน้ำปิงเหนือเขื่อนภูมิพล



รูปผนวกที่ E-11 ผลการพยากรณ์ฝนรายวันล่วงหน้า 2 สัปดาห์ในลุ่มน้ำวัง

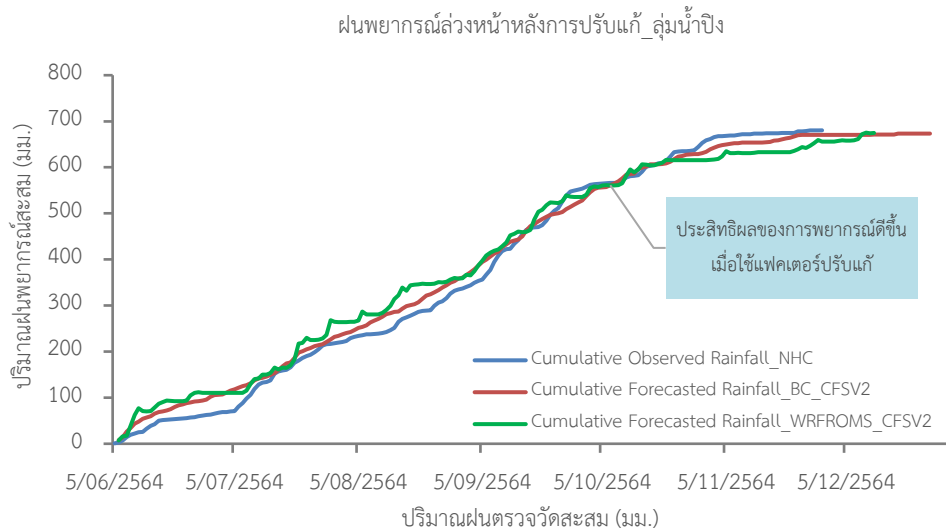


รูปผนวกที่ E-12 ผลการพยากรณ์ฝนรายวันล่วงหน้า 2 สัปดาห์ในกลุ่มน้ำยม

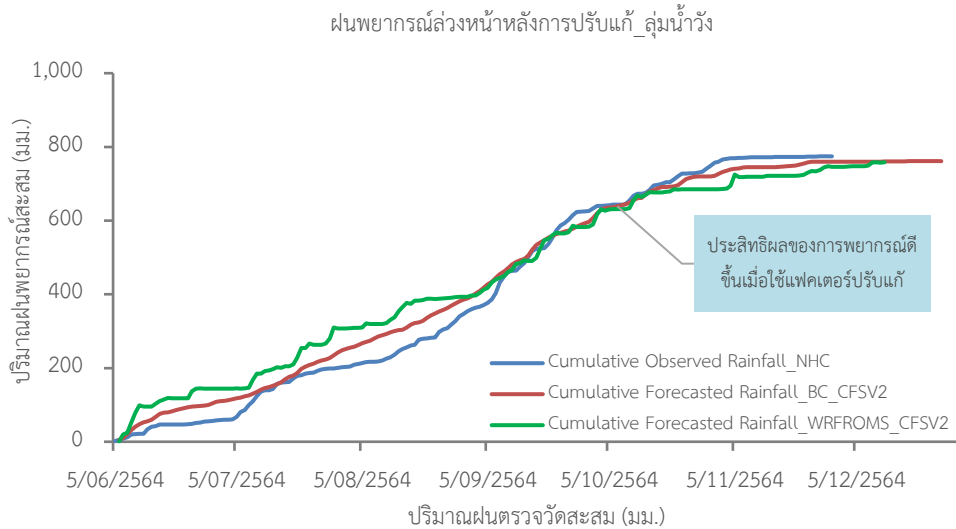


รูปผนวกที่ E-13 ผลการพยากรณ์ฝนรายวันล่วงหน้า 2 สัปดาห์ในกลุ่มน้ำน่านเหนือเขื่อนสิริกิติ์

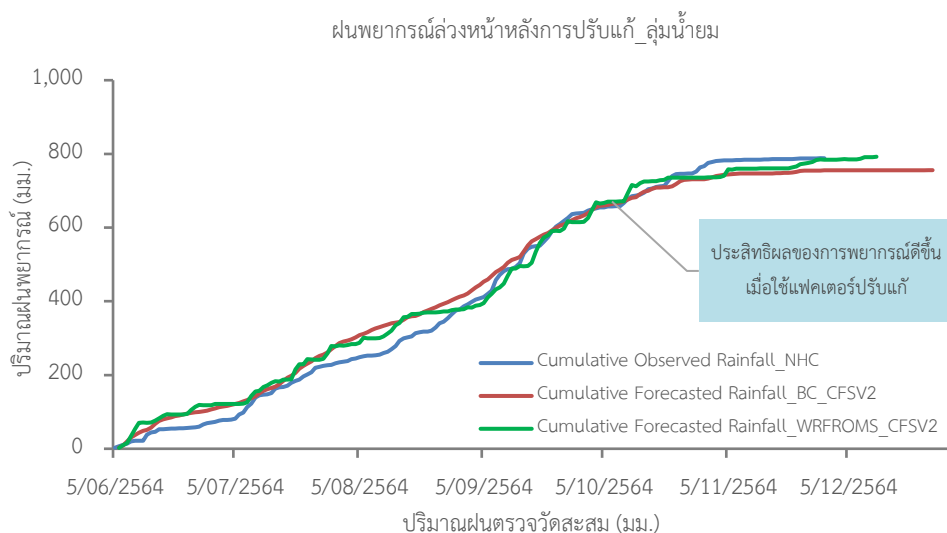
สำหรับข้อมูลฝนพยากรณ์ทั้งก่อนและหลังปรับแก้ได้นำไปเป็นส่วนหนึ่งข้อมูลนำเข้าในการพัฒนาแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน ซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงและลุ่มน้ำน่านในชั้นตอนถัดไป



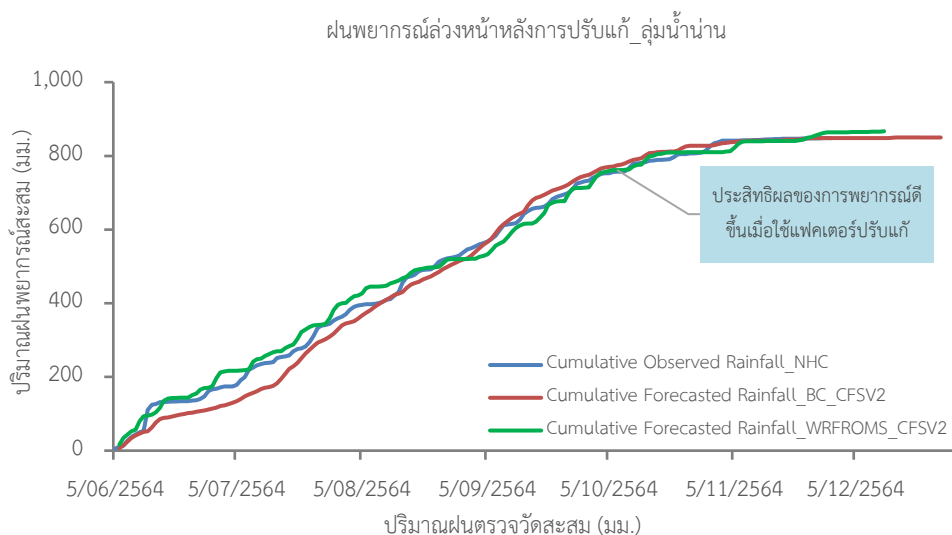
รูปผนวกที่ E-14 ผลการพยากรณ์ฝนรายวันล่วงหน้า 2 สัปดาห์ในกลุ่มน้ำปิงเหนือเขื่อนภูมิพลหลังปรับแก้



รูปผนวกที่ E-15 ผลการพยากรณ์ฝนรายวันล่วงหน้า 2 สัปดาห์ในกลุ่มน้ำวังหลังปรับแก้



รูปผนวกที่ E-16 ผลการพยากรณ์ฝนรายวันล่วงหน้า 2 สัปดาห์ในกลุ่มน้ำยมหลังปรับแก้



รูปผนวกที่ E-17 ผลการพยากรณ์ฝนรายวันล่วงหน้า 2 สัปดาห์ในกลุ่มน้ำ่านเหนือเขื่อนสิริกิติ์หลังปรับแก้

E.3.2 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันล่วงหน้า

ในช่วงการดำเนินกิจกรรม CO-RUN ซึ่งเป็นช่วงก่อนเกิดเหตุการณ์พายุไต้ฝุ่นหมูในพื้นที่ศึกษา ในช่วงแรกของการพยากรณ์ระหว่างวันที่ 1-14 กันยายน ทางคณะผู้วิจัยได้ปรับแก้พารามิเตอร์แบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันที่พัฒนาโดยอาศัยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ด้วยอัลกอริทึม (Long Short-Term Memory, LSTM) เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มของข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างสูงขึ้น (Upward Trend) ส่งผลให้แบบจำลองยังมีความคลาดเคลื่อนสูงทั้งแนวโน้มและผลการพยากรณ์ที่ได้ ผลการพยากรณ์ในช่วงที่ 2 ระหว่างวันที่ 15 กันยายน-7 ตุลาคม ได้ทำการปรับแก้พารามิเตอร์ของแบบจำลองใหม่ด้วยการเพิ่มข้อมูลในการฝึกอบรม และทำการพยากรณ์ในลักษณะ One-Step Prediction $t+1$ แทน $t+14$ ทำให้ประสิทธิภาพของการพยากรณ์แม่นยำขึ้น แนวโน้มผลการพยากรณ์สอดคล้องข้อมูลจริงมากขึ้น และในช่วง

ที่ 3 ระหว่างวันที่ 3-17 ตุลาคม พบว่า ค่าแนวโน้มของข้อมูลพยากรณ์และประสิทธิผลการพยากรณ์สูงขึ้น ในสัปดาห์ที่ 4 ระหว่างวันที่ 1-14 พฤศจิกายน พบว่า ประสิทธิภาพการพยากรณ์มีความแม่นยำไม่สูงนัก และในสัปดาห์ที่ 5 ระหว่างวันที่ 11 พฤศจิกายน-2 ธันวาคม พบว่า ประสิทธิภาพการพยากรณ์มีความแม่นยำขึ้น หลังจากมีการฝึกอบรมแบบจำลองใหม่โดยสามารถทำนายให้ค่าแนวโน้มที่สอดคล้องตามข้อมูลจริง

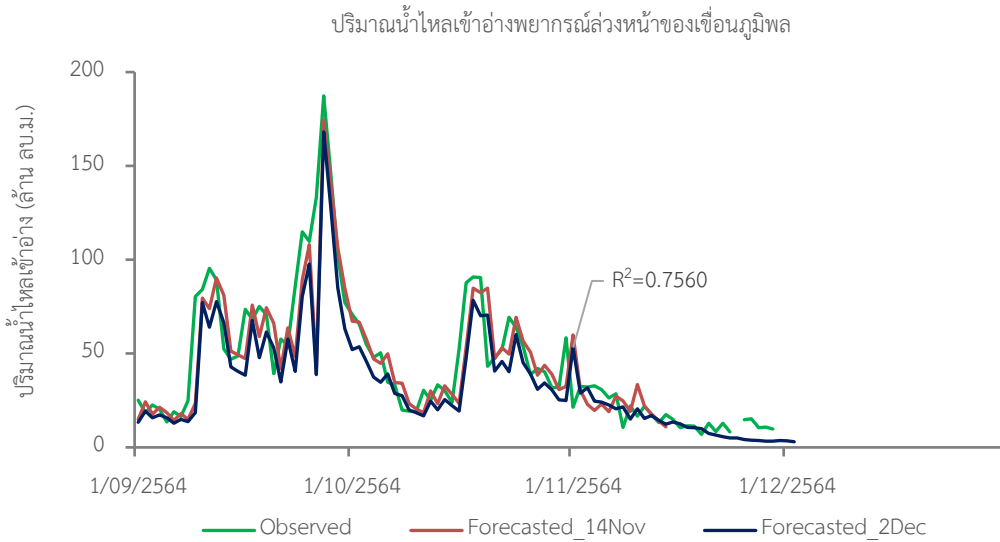
ในช่วงเหตุการณ์พายุเตี้ยนหมู่ ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันล่วงหน้า 2 สัปดาห์ถึงวันที่ 14 ตุลาคมของ 4 เขื่อนหลักในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่พบว่า ต้นสัปดาห์แรกของเดือนตุลาคม ปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนภูมิพลและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ยังมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ ผลการพยากรณ์แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำไหลเข้าของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์มีแนวโน้มลดลงในปลายสัปดาห์ที่ 2 ดังแสดงในรูปผนวกที่ E-18 ถึงรูปผนวกที่ E-21 อย่างไรก็ตาม ผลการพยากรณ์จะมีความแม่นยำมากขึ้น หากกำหนดให้แบบจำลองมีการเรียนรู้จากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นแล้วทุกช่วงเวลาเพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ในลักษณะ One-Step Ahead Prediction ในการลดความคลาดเคลื่อนทั้งรูปแบบแนวโน้มและค่าข้อมูลพยากรณ์

จากการวิเคราะห์ประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในรูปของค่าเฉลี่ยพยากรณ์ที่ 7, 14, 21, 29 วันล่วงหน้าจากผลลัพธ์ของแบบจำลอง 2 กรณีคือ (1) แบบจำลองการพยากรณ์ที่ไม่ได้พิจารณาข้อมูลฝนพยากรณ์เป็นข้อมูลนำเข้าและพยากรณ์ตั้งแต่ 1-14 พฤศจิกายน 2564 และ (2) แบบจำลองการพยากรณ์ที่พิจารณาข้อมูลฝนพยากรณ์เป็นข้อมูลนำเข้าและพยากรณ์ตั้งแต่ 1 พฤศจิกายน-2 ธันวาคม 2564 ดังที่สรุปไว้ในตารางผนวกที่ E-4 โดยพบว่า ค่าเฉลี่ยของข้อมูลพยากรณ์ล่วงหน้าราย 7, 14, 21, 29 วันของกรณีที่ 2 ซึ่งพิจารณาข้อมูลฝนพยากรณ์เป็นข้อมูลนำเข้าร่วมกับข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างที่เกิดขึ้นในอดีตมีค่าใกล้เคียงข้อมูลจริงมากขึ้นของทุกเขื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าเฉลี่ยราย 7 วัน ยิ่งไปกว่านั้นแนวโน้มของข้อมูลพยากรณ์ยังสอดคล้องกับข้อมูลจริงทุกอ่างเก็บน้ำ

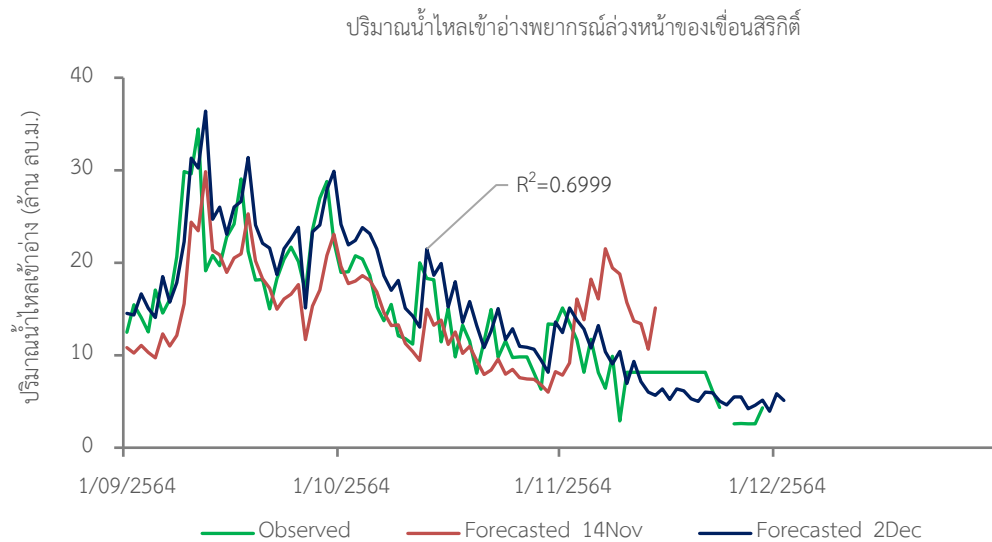
ตารางผนวกที่ E-4 ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนหลักในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

ค่าสถิติของข้อมูล	ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างรายวัน (ล้าน ลบ.ม.)							
	BB		SK		KNB		PS	
	ค่าตรวจวัด	ค่าพยากรณ์	ค่าตรวจวัด	ค่าพยากรณ์	ค่าตรวจวัด	ค่าพยากรณ์	ค่าตรวจวัด	ค่าพยากรณ์
แบบจำลองการพยากรณ์ที่ไม่ได้พิจารณาข้อมูลฝนพยากรณ์เป็นข้อมูลนำเข้าและพยากรณ์ตั้งแต่ 1 พ.ย.-14 พ.ย. 2564								
ค่าเฉลี่ย 7 วัน	29.21	28.92	10.67	14.68	5.64	7.39	39.27	21.63
ค่าเฉลี่ย 14 วัน	23.12	24.64	9.16	14.97	4.15	7.68	28.44	16.68
แนวโน้มข้อมูล	คงที่	ลดลง	ลดลง	สูงขึ้น	ลดลง	ลดลง	ลดลงเล็กน้อย	ลดลงมาก
แบบจำลองการพยากรณ์ที่พิจารณาข้อมูลฝนพยากรณ์เป็นข้อมูลนำเข้าและพยากรณ์ตั้งแต่ 1 พ.ย.-2 ธ.ค. 2564								
ค่าเฉลี่ย 7 วัน	29.21	29.41	10.67	12.65	5.64	5.02	39.27	36.87
ค่าเฉลี่ย 14 วัน	23.12	23.02	9.16	10.22	4.15	3.71	28.44	28.55

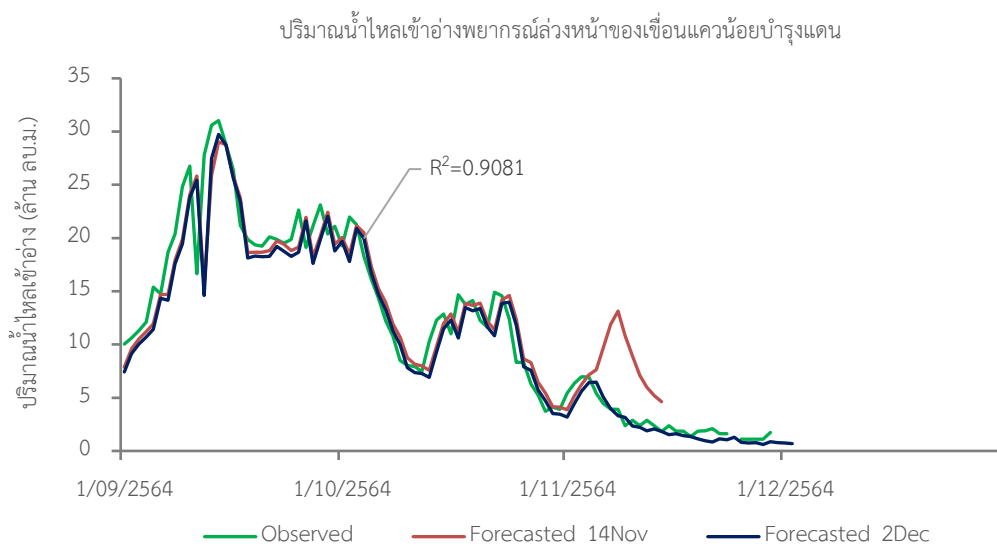
ค่าสถิติของ ข้อมูล	ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างรายวัน (ล้าน ลบ.ม.)							
	BB		SK		KNB		PS	
	ค่าตรวจวัด	ค่าพยากรณ์	ค่าตรวจวัด	ค่าพยากรณ์	ค่าตรวจวัด	ค่าพยากรณ์	ค่าตรวจวัด	ค่าพยากรณ์
ค่าเฉลี่ย 21 วัน	19.06	18.74	8.82	8.74	3.40	2.90	19.92	20.23
ค่าเฉลี่ย 29 วัน	17.24	14.74	7.51	7.72	2.89	2.35	15.10	14.91
แนวโน้มข้อมูล	ลดลง	ลดลง	ลดลง	ลดลง	ลดลง	ลดลง	ลดลง	ลดลง



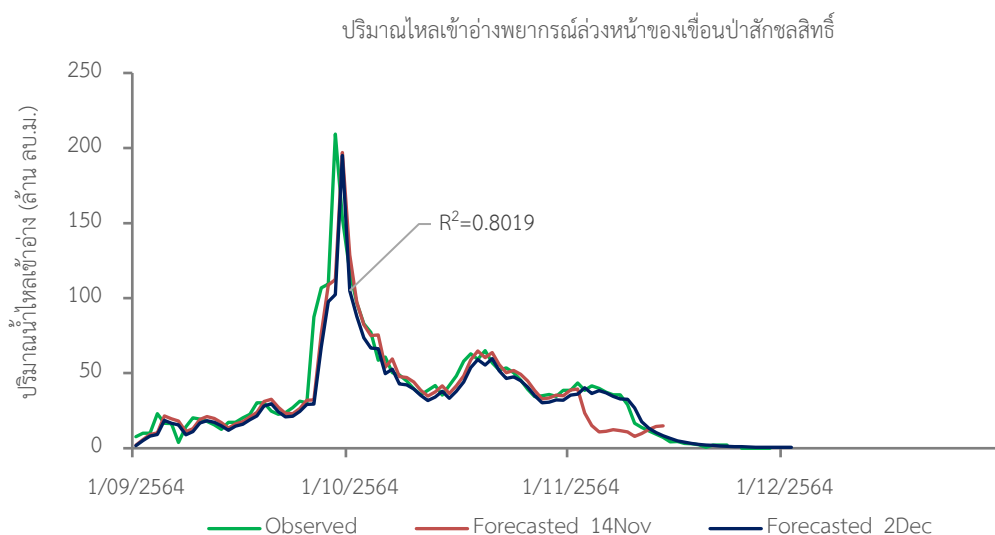
รูปผนวกที่ E-18 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันล่วงหน้าของเขื่อนภูมิพล



รูปผนวกที่ E-19 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันล่วงหน้าของเขื่อนสิริกิติ์



รูปผนวกที่ E-20 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันล่วงหน้าของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน



รูปผนวกที่ E-21 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันล่วงหน้าของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์

E.3.3 ผลการกำหนดการระบายน้ำจากเขื่อนหลักล่วงหน้า

ในช่วงเหตุการณ์พายุไต้ฝุ่นหมู่ ผลการกำหนดปริมาณการระบายน้ำล่วงหน้าด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด (Constraint Programming Model, CP) โดยอาศัยข้อมูลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนและข้อมูลปริมาณ Sideflow ล่วงหน้าถึงวันที่ 3 ตุลาคม พ.ศ. 2564 แนะนำให้ระบายน้ำขั้นต่ำจากทุกเขื่อน ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกับผลการระบายน้ำจริง ยกเว้นการเพิ่มปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ตั้งแต่วันที่ 26 กันยายน อันเนื่องมาจากปัจจัยปริมาณน้ำไหลหลากจากทางตอนบนของพื้นที่ลุ่มน้ำ การปรับเปลี่ยนแนวโน้มและรูปแบบของข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างจากอิทธิพลของพายุไต้ฝุ่นหมู่อย่างฉับพลันส่งผลให้ปริมาณน้ำเก็บกักของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เกินความจุอย่างรวดเร็ว กรมชลประทานซึ่งเป็นหน่วยงาน

รับผิดชอบหลักจำเป็นต้องเพิ่มการระบายน้ำสูงถึง 103.73 ล้านลูกบาศก์เมตร ตั้งวันที่ 29 กันยายน ส่งผลให้หลายพื้นที่ทางด้านท้ายเขื่อนต้องเผชิญกับวิกฤตน้ำท่วม ซึ่งแนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด



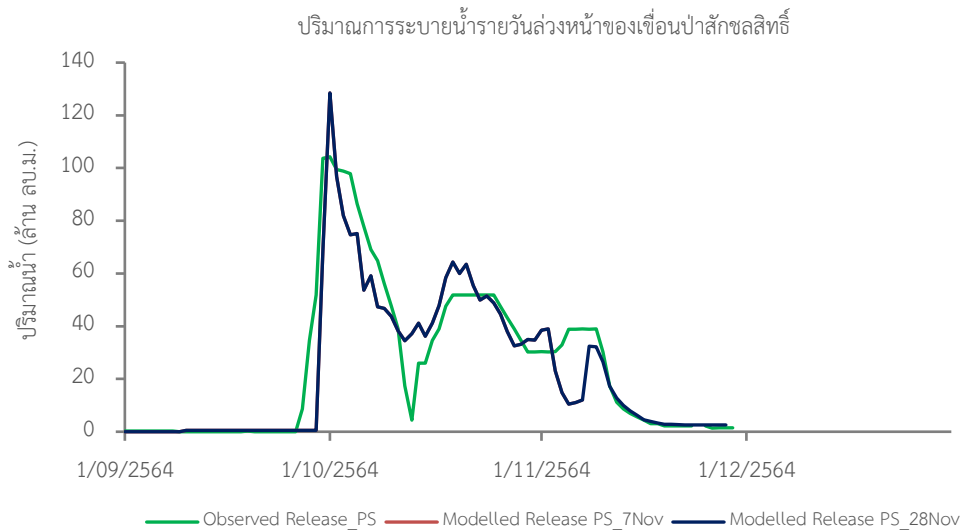
รูปผนวกที่ E-22 ผลการกำหนดปริมาณการระบายน้ำล่วงหน้าของเขื่อนภูมิพลในช่วงพายุเตี้ยนหมู่ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด



รูปผนวกที่ E-23 ผลการกำหนดปริมาณการระบายน้ำล่วงหน้าของเขื่อนสิริกิติ์ในช่วงพายุเตี้ยนหมู่ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด



รูปผนวกที่ E-24 ผลการกำหนดปริมาณการระบายน้ำล่วงหน้าของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนในช่วงพายุ
 เต็มหมูด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด



รูปผนวกที่ E-24 ผลการกำหนดปริมาณการระบายน้ำล่วงหน้าของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ในช่วงพายุเต็มหมู
 ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด

ภาคผนวก F

รายงานสรุปข้อเสนอแนะเชิงวิชาการและแนวทางการประยุกต์ใช้งาน

F.1 ความสำคัญของงานบริหารเขื่อน-อ่างเก็บน้ำ

ผลกระทบจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกที่ปรากฏให้เห็นบ่อยครั้งและทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้นในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา และในปี พ.ศ. 2565 นี้ได้เกิดเหตุการณ์มหาอุทกภัยในประเทศปากีสถานอันเนื่องมาจากความผิดปกติของฝนมรสุมในจังหวัดทางภาคเหนือและภาคใต้ของประเทศที่สร้างความหายนะทางเศรษฐกิจและเสียหายอย่างใหญ่หลวงให้กับประเทศ โครงสร้างพื้นฐาน อาคารบ้านพัก และที่อยู่อาศัยจำนวนมากได้รับความเสียหายและพังทลาย ประชาชนกว่าหลายสิบล้านคนได้รับผลกระทบและไร้ที่อยู่อาศัย ยิ่งไปกว่านั้นกว่าหลายพันคนของประชาชนต้องเสียชีวิตและสูญหายไประหว่างเหตุการณ์มหาอุทกภัยในครั้งนี้ ส่งผลให้องค์การสหประชาชาติ (United Nations) ได้ร้องขอความช่วยเหลือจากนานาชาติเพื่อระดมทุนช่วยเหลือในการรับมือกับภัยพิบัติในครั้งนี้ (CNN, 2022) ในช่วงขณะเดียวกัน กว่า 47% ของประเทศในแถบยุโรปอยู่ในสถานะการเฝ้าระวัง (Warning Condition) จากการลดลงของความชื้นในดิน และอีก 17% ของทวีปอยู่ในสถานะการแจ้งเตือนภัย (State of Alert) ที่ผลผลิตทางการเกษตรจะได้รับผลกระทบจากวิกฤตภัยแล้ง รวมทั้งประเทศจีนได้รับผลกระทบจากวิกฤตภัยแล้งรุนแรงในรอบ 500 ปี จากอิทธิพลของคลื่นความร้อนแผ่กระจายและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ระดับน้ำของแม่น้ำสำคัญหลายสายเช่น แม่น้ำไรน์ แม่น้ำดานูบ แม่น้ำแยงซีเกียง เป็นต้น ลดลงอย่างผิดปกติ ส่งผลให้เกิดภาวะการขาดแคลนน้ำ ผลผลิตทางการเกษตรลดลง และประชาชนกว่าหลายพันชีวิตขาดที่อยู่อาศัยและสูญเสียชีวิต (CNBC, 2022) สำหรับในประเทศไทย อิทธิพลของลมมรสุมที่เกิดขึ้นในช่วงกลางฤดูฝน (เดือนสิงหาคม) ทำให้หลายอ่างเก็บน้ำมีปริมาณน้ำเก็บกักเพิ่มสูงขึ้นจากปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนสูงอย่างต่อเนื่องเช่น เขื่อนกัวลม เขื่อนกัวกอหมา เขื่อนปาสักชลสิทธิ์ เป็นต้น ส่งผลทำให้มีการเร่งการระบายน้ำเพื่อพร่องน้ำให้ทันสำหรับรองรับมวลน้ำจากพายุลูกใหม่ที่อาจจะเกิดขึ้นในช่วงปลายฤดูฝน ด้วยเหตุนี้ หลายพื้นที่ซึ่งมีลักษณะเป็นพื้นที่ลุ่มต่ำในเขตจังหวัดลำปางและพื้นที่ลุ่มต่ำที่ตั้งอยู่ทางด้านท้ายเขื่อนเจ้าพระยา เขื่อนปาสักชลสิทธิ์และเขื่อนพระรามหกต้องประสบปัญหาน้ำท่วมจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำในแม่น้ำและเอ่อท้นไปยังพื้นที่สองฝั่งแม่น้ำอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

งานบริหารเขื่อน-อ่างเก็บน้ำ (Dam-Reservoir Operation) ที่อาศัยเทคโนโลยีและการจัดการฐานข้อมูลสารสนเทศที่ทันสมัยจึงมีบทบาทสำคัญที่มีส่วนช่วยในการขับเคลื่อนให้การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำให้เกิดเสถียรภาพและยั่งยืนทั้งในระยะสั้นและในระยะยาว อันเนื่องมาจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีสารสนเทศที่สามารถดึงข้อมูลปัจจุบันและข้อมูลในอนาคตมาเป็นข้อพิจารณาประกอบการตัดสินใจภายใต้ปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ที่มีความซับซ้อนสูง เพื่อมุ่งเน้นที่จะให้การบริหารเขื่อน-อ่างเก็บน้ำสามารถบรรเทาความเสียหายทั้งจากอุทกภัยและภัยแล้งที่อาจจะเกิดขึ้นจากความไม่แน่นอนของปัจจัยสภาพภูมิอากาศได้ ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาจะพบว่า งานวิจัยจำนวนมากมุ่งเน้นที่จะพัฒนาเครื่องมือใหม่ที่อาศัยเทคโนโลยีด้านปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในงานบริหารเขื่อน-อ่างเก็บน้ำเพื่อให้เกิดเสถียรภาพของน้ำต้นทุน และจัดการความเสี่ยงด้านภัยพิบัติทั้งอุทกภัยและภัยแล้ง ด้วยเหตุนี้ รายงานฉบับนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อสรุปข้อเสนอแนะเชิงวิชาการและแนวทางการประยุกต์ใช้งานจากผลลัพธ์ของโครงการวิจัยเรื่อง “การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)” ซึ่งได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2564 โดยมุ่งเน้นที่จะ

พัฒนาแบบจำลองด้วยเทคโนโลยีด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) เพื่อใช้งานบริหารเขื่อน-อ่างเก็บน้ำในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ที่มีประสิทธิภาพ

F.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

จัดทำรายงานข้อเสนอเชิงวิชาการในงานบริหารเขื่อน-อ่างเก็บน้ำในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่เพื่อส่งต่อข้อสรุปผลลัพธ์จากงานวิจัยให้กับหน่วยงานภาคปฏิบัติที่เกี่ยวข้อง

F.3 ขอบเขตของการศึกษา

(1) กลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ (Greater Chao Phraya River Basin) ถูกนิยามขึ้นสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้เพื่ออธิบายถึงการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำร่วมกันในพื้นที่คลัสเตอร์ลุ่มน้ำซึ่งประกอบด้วย (1) ลุ่มน้ำปิง (2) ลุ่มน้ำวัง (3) ลุ่มน้ำยม (4) ลุ่มน้ำน่าน (5) ลุ่มน้ำเจ้าพระยา (6) ลุ่มน้ำท่าจีน (7) ลุ่มน้ำป่าสัก และ (8) ลุ่มน้ำสะแกกรัง

(2) แบบจำลองการบริหารเขื่อน-อ่างเก็บน้ำในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้ครอบคลุมเฉพาะเขื่อนเก็บกัก (Storage Dam) ได้แก่ (1) เขื่อนภูมิพล (2) เขื่อนสิริกิติ์ (3) เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และ (4) เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์เท่านั้น

F.4 สรุปข้อเสนอแนะเชิงวิชาการและแนวทางการประยุกต์ใช้งาน

F.4.1 แบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง

(1) ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของ 4 เขื่อนหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยแบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยว (Univariate Prediction Model) ให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าแบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่าง (Multivariate Prediction Model) ดังนั้น การใช้งานแบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวจึงมีความแม่นยำในการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างของแต่ละอ่างสูงกว่าแบบจำลองการพยากรณ์หลายอย่าง อย่างไรก็ตาม แบบจำลองการพยากรณ์แบบหลายอย่างสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกรณีที่ผู้ใช้งานต้องการจะศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยสภาพภูมิอากาศในระดับภูมิภาค (Regional Climate Data) ว่าส่งผลต่อปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างของเขื่อนหลักในระบบหรือไม่ และดูแนวโน้มสถานการณ์น้ำที่ไหลเข้าอ่าง

(2) ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำด้วยแบบจำลองการพยากรณ์รายวัน (Daily Prediction Model) สูงกว่าแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือน (Monthly Prediction Model) โดยทั้งอัลกอริทึม XGBoost และ LSTM ให้ค่าประสิทธิภาพของการพยากรณ์รายวันและรายเดือนสอดคล้องไปในทางเดียวกัน อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึม XGBoost ให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่า LSTM สำหรับแบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายเดือน แบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอย่างเดี่ยวรายวันของทุกเขื่อนที่พัฒนาขึ้นโดยใช้อัลกอริทึม LSTM สามารถพยากรณ์น้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันล่วงหน้าได้อยู่ในเกณฑ์ดี และยังให้ผลใกล้เคียงกับอัลกอริทึม XGBoost โดยผลการพยากรณ์ให้ค่าเฉลี่ย

ของข้อมูลพยากรณ์ที่เวลาล่วงหน้า $t+1$ อยู่ในเกณฑ์สูง หรืออาจกล่าวได้ว่า แบบจำลองการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายเดือนมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในงานด้านการวางแผนงานบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (Water Resources Planning) ของผู้ปฏิบัติงาน กล่าวคือ เมื่อทราบสถานะของปริมาณน้ำต้นทุนจากผลการพยากรณ์ล่วงหนักรายเดือน ผู้ปฏิบัติงานก็สามารถวางแผนการเพาะปลูกพืชให้มีความเหมาะสม หรือกำหนดนโยบายพร่องน้ำในอ่างล้งหน้าเพื่อลดความเสี่ยงน้ำท่วมที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตจากผลลัพธ์ที่ได้จากการพยากรณ์ ในขณะที่ผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องสามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันในงานด้านปฏิบัติการ (Water Resources Operation) เพื่อกำหนดปริมาณการระบายน้ำให้มีความเหมาะสม

(3) ผลการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวและแบบหลายอย่างยังให้ค่าสูงสุดของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างทั้งรายวันและรายเดือนต่ำกว่าข้อมูลสังเกต (Underestimated) ในทางกลับกัน ผลการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวและแบบหลายอย่างทั้งรายวันและรายเดือนให้ค่าต่ำสุดของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างสูงกว่าข้อมูลสังเกต (Overestimated) ด้วยเหตุนี้ การปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองให้มีความเหมาะสมจึงยังมีความสำคัญเพื่อนำข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการพยากรณ์ในช่วงสถานการณ์น้ำวิกฤตมาใช้ประกอบการกำหนดกลยุทธ์ในการบริหารเขื่อนของผู้ปฏิบัติการต่อไป

(4) โครงสร้างของรูปแบบของข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอย่างเดี่ยวรายวันด้วยอัลกอริทึม XGBoost ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ปริมาณน้ำไหลเข้าที่เวลา t และค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา $t-1, \dots, t-3$ (Avg. 3) อย่างไรก็ตาม ในการนำแบบจำลองการพยากรณ์รายวันไปประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติการ (Operation) ผู้ใช้งานสามารถนำเข้าข้อมูลฝนและข้อมูลสภาพภูมิอากาศทั้งที่ทำการตรวจวัด (Observed Data) และทำการพยากรณ์ล่วงหน้า (Predicted Data) มาปรับใช้ แต่ข้อมูลดังกล่าวจำเป็นต้องได้รับการตรวจพิสูจน์ถึงความถูกต้องและความแม่นยำที่อยู่ในเกณฑ์สูงก่อนนำมาเป็นข้อมูลนำเข้า อีกทั้ง Lead Time ของข้อมูลนำเข้าพยากรณ์ที่แนะนำไว้ไม่ควรเกิน $t+7$

(5) โครงสร้างของรูปแบบของข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแบบอย่างเดี่ยวรายเดือนด้วยอัลกอริทึม XGBoost ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ปริมาณน้ำไหลเข้าที่เวลา t ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลาย้อนหลัง ข้อมูลฝนและข้อมูลสภาพภูมิอากาศ โดยผู้ปฏิบัติงานสามารถนำแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนไปปรับใช้ในการวางแผนการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (Water Resource Planning) ทั้งนี้ Lead Time ของข้อมูลพยากรณ์ควรอยู่ในช่วง $t+1$ ถึง $t+3$

(6) โครงสร้างของรูปแบบของข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองการพยากรณ์แบบอย่างเดี่ยวรายวันด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์จากงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ปริมาณน้ำไหลเข้าสังเกตในอดีต 3 วันย้อนหลัง ซึ่งให้ผลการพยากรณ์ที่มีความแม่นยำสูงสุด อย่างไรก็ตาม การนำข้อมูลฝนจากคลังข้อมูลสภาพภูมิอากาศของ NASA มาเป็นข้อมูลนำเข้าร่วมกับปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอดีตนั้นให้ค่า

ประสิทธิผลของการพยากรณ์ลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะของข้อมูลฝนรายวันไม่แสดงอิทธิพลของฤดูกาลอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ

(7) โครงสร้างของรูปแบบของข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่วงเดี่ยวรายวันด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนที่นำเข้าข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าสังเกตในอดีต 7 วันย้อนหลัง และแบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่วงเดี่ยวรายวันของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ที่นำเข้าข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าสังเกตในอดีต 3 วันย้อนหลังให้ค่าความแม่นยำสูงสุด หรืออาจกล่าวได้ว่า ข้อพิจารณาที่สำคัญของผู้ปฏิบัติงานในการบริหารจัดการน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์คือ ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอดีต 7 และ 3 วันย้อนหลัง ตามลำดับ ซึ่งมีนัยสำคัญต่อการปรับเปลี่ยนรูปแบบการระบายน้ำของทั้งสองเขื่อนให้สอดคล้องตามความผันผวนของข้อมูลข้างต้น

(8) แบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่วงเดี่ยวรายเดือนด้วยอัลกอริทึม LSTM ของเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน มีโครงสร้างของข้อมูลนำเข้าเหมือนกันโดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอดีต 3 วันย้อนหลัง ให้ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์สูงสุด ในขณะที่แบบจำลองการพยากรณ์แบบอ่วงเดี่ยวรายเดือนของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ที่มีการนำข้อมูลฝนจากคลังข้อมูลสภาพภูมิอากาศของ NASA มาเป็นข้อมูลนำเข้าร่วมกับปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอดีต 3 วันย้อนหลัง ให้ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์สูงสุด อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงประสิทธิผลของแบบจำลองการพยากรณ์รายเดือนยังคงมีความสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานด้านการวางแผนการบริหารจัดการน้ำ ซึ่งยังต้องการฐานข้อมูลพยากรณ์อุทกวิทยาในอนาคตที่มีความแม่นยำมาใช้ประกอบการพิจารณา

(9) มีโอกาสที่แบบจำลองการพยากรณ์จะให้ค่าประสิทธิผลในการเรียนรู้จากชุดข้อมูลฝึกฝนสูง แต่เมื่อนำแบบจำลองไปใช้กับชุดข้อมูลตรวจสอบและประสิทธิผลของการพยากรณ์ของแบบจำลองลดลง กล่าวคือแบบจำลองเกิดการ Overfitting กับชุดฝึกฝน หรือแบบจำลองมีความซับซ้อนมากเกินไป ยิ่งไปกว่านั้น การนำแบบจำลองการพยากรณ์ที่ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุดของแต่ละเขื่อนไปใช้ในการพยากรณ์ที่ Lead Time $t+1, \dots, t+7$ ที่ยาวขึ้น ส่งผลให้ค่าประสิทธิผลของแบบจำลองมีแนวโน้มลดลง ด้วยเหตุนี้ ในการนำแบบจำลองการพยากรณ์ไปใช้งาน ควรทำการปรับพารามิเตอร์ของแบบจำลองการพยากรณ์ใหม่โดยนำเข้าข้อมูลนำเข้าที่เกิดขึ้นเพิ่มเติมจากแบบจำลองที่ได้พัฒนามาแล้วในลักษณะของ One Step Ahead Prediction จะทำให้ผลการพยากรณ์ที่ Lead Time ยาวขึ้นมีความแม่นยำมากขึ้น โดยผลการวิจัยสรุปได้ว่า ที่ Lead Time $t+7$ จำเป็นต้องปรับพารามิเตอร์แบบจำลองใหม่เพื่อให้แบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและเป็นเครื่องมือที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบริหารเขื่อน ณ เวลาจริงปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงสถานการณ์น้ำวิกฤต

F.4.2 แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่วงเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning, RL)

(1) จุดแข็งของแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่วงเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลังที่สำคัญคือ สามารถกำหนดตัวแปรใน Environment ในลักษณะสถานะของข้อมูล (State Variables) หรือใน

รูปของค่าโอกาสความน่าจะเป็นของข้อมูล (Probability of Data) หรือสามารถประยุกต์หลักการฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic Approach) เพื่อกำหนดสถานะของข้อมูลที่มีความคลุมเคลือ ซึ่งอาจไม่จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจริงระยะยาว (Long-term Past Data) มาเป็นข้อมูลนำเข้า ดังนั้น ผู้ใช้งานสามารถคัดเลือกตัวแปรที่เกี่ยวข้องมาประกอบการพิจารณาในการระบายน้ำของแต่ละเขื่อน และกำหนดเป็นตัวแปรหลักใน Environment ตามหลักปฏิบัติที่ใช้กันอยู่ นโยบายและแบบแผนการบริหารเขื่อน-อ่างเก็บน้ำ นอกจากนี้ ผู้ใช้งานยังสามารถกำหนดเงื่อนไขของ Reward เพื่อหารูปแบบการระบายน้ำที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการของเขื่อน และสามารถกำหนด Agent ทั้งในลักษณะของ Single-Agent Based System หรือ Multi-Agent Based System เพื่อให้ Agent ทำหน้าที่ในการเรียนรู้จากปัจจัยสภาพ Environment ที่เกี่ยวข้อง อีกทั้งเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลังยังเป็นเทคนิคด้านปัญญาประดิษฐ์ที่สามารถหาค่ารูปแบบการระบายน้ำที่เหมาะสมได้จากการเรียนรู้เชิงลึกในลักษณะ Trained Structures ประกอบกับยังสามารถออกแบบและพัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB ในการประมวลผล รวมทั้งแสดงผลลัพธ์ใน MATLAB Simulink ที่เข้าใจได้ง่ายต่อผู้ใช้งาน

(2) ในการพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลังซึ่งนับเป็นเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์สมัยใหม่ที่น่าสนใจมาประยุกต์ใช้ในงานบริหารเขื่อนในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่นั้น คณะผู้วิจัยได้กำหนดแบบจำลองเชิงแนวคิดในการแก้ปัญหาโจทย์ที่มุ่งเน้นเพิ่มปริมาณน้ำต้นทุนของเขื่อนในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยการสังเคราะห์เส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายของเขื่อน (Generated Target Storage) ให้สูงขึ้น 15% จากค่าเฉลี่ยรายวันระยะยาวสำหรับเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และสูงขึ้น 10% จากค่าเฉลี่ยรายวันระยะยาวสำหรับป่าสักชลสิทธิ์ตามเป้าหมายของงานวิจัยเพื่อให้แบบจำลองเรียนรู้สำหรับหาโครงสร้างที่เหมาะสมในการกำหนดการระบายน้ำจาก 4 เขื่อนหลักในการตอบโจทย์งานวิจัยดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ผู้ใช้งานสามารถปรับเปลี่ยนเส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายให้สอดคล้องตามพันธกิจของหน่วยงาน หรือการปรับเปลี่ยนแผนการจัดสรรน้ำตามสถานการณ์ปีน้ำและปัจจัยการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศได้

(3) เนื่องจากความซับซ้อนของการบริหารจัดการน้ำและปัจจัยความต้องการน้ำในกิจกรรมการใช้น้ำต่าง ๆ ในพื้นที่ศึกษา ประกอบกับเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลังที่อาศัยการเรียนรู้แบบลองผิดลองถูก การกำหนด Environment ให้มีความเหมาะสมกับ Agent ตลอดจนเงื่อนไขของการกำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่มีจำนวนมาก ดังนั้น การศึกษาต่อยอดเชิงลึกในการพัฒนาและประยุกต์ใช้แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลังในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ยังเป็นสิ่งจำเป็นทั้งนี้เพื่อปรับปรุงกระบวนการพัฒนาแบบจำลอง (Modelling Process) ทั้งในส่วนของการปรับโครงสร้าง การตั้งค่าพารามิเตอร์ และการประมวลผลของแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังให้มีความรวดเร็วและเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองให้สูงขึ้น อีกทั้งเป็นการนำข้อดีของเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลังสมัยใหม่มาใช้ในงานวางแผนและปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจของผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องเพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการวางแผนการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำที่มีความสำคัญในพื้นที่ราบภาคกลางของประเทศไทย

F.4.3 แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัด (Constraint Programming Model)

(1) จุดเด่นที่สำคัญของแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้คือ สามารถแก้ปัญหาโจทย์เพื่อหาค่า Sharing Ratio ที่เหมาะสมรายวันแยกตามโหนดความต้องการน้ำในแต่ละกิจกรรมการใช้น้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ อีกทั้งทำให้เขื่อนแควน้อยบำรุงแดนและเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์มีบทบาทในการเพิ่มการระบายน้ำเพื่อตอบสนองความต้องการน้ำในภาคเกษตรกรรมและรักษาระบบนิเวศท้ายเขื่อนได้มากขึ้น ส่งผลทำให้สามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ได้ตามเป้าหมายในการเพิ่มน้ำต้นทุนระยะยาวที่ตั้งไว้ ซึ่งการปรับเปลี่ยน Sharing Ratio ทั้งในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งของทั้ง 4 เขื่อนหลักจากผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดส่งผลทำให้ปริมาณน้ำเก็บกักสูงขึ้น เนื่องจากแบบจำลองกำหนดปริมาณการระบายน้ำตามศักยภาพน้ำต้นทุนและยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายน้ำจากเขื่อน

(2) ผู้ใช้งานสามารถนำข้อมูล Side Flow ที่มีศักยภาพทางด้านท้ายเขื่อนมาเป็นข้อพิจารณาในการกำหนดการระบายน้ำของแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัด ซึ่งผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การพิจารณาข้อมูล Sideflow ของสถานีตรวจวัดน้ำท่า W.4A ท้ายเขื่อนภูมิพล และสถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.14&N.22A ท้ายเขื่อนสิริกิติ์สามารถปรับลดปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์เพื่อเพิ่มต้นทุนในเขื่อนสำหรับใช้ในระยะเวลาถัดไปได้

(3) ผู้ใช้งานสามารถกำหนดเงื่อนไขข้อจำกัดด้านกายภาพของระบบ ข้อจำกัดด้านปัจจัยน้ำต้นทุนและข้อจำกัดด้านปัจจัยความต้องการน้ำในแบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัด เพื่อให้สอดคล้องกับหลักปฏิบัติและข้อพิจารณาอื่น ๆ ของหน่วยงานเช่น การควบคุมระดับน้ำเก็บกักตอนบนของแต่ละเขื่อนเพื่อลดความเสี่ยงที่จะเกิดการไหลล้นอ่างและอุทกภัยตามมา การคำนึงถึงศักยภาพของแหล่งน้ำต้นทุนสำรองอื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็นแหล่งน้ำผิวดินขนาดเล็กและแหล่งน้ำใต้ดินในพื้นที่เพื่อปรับลดปริมาณความต้องการน้ำและนำเข้าไปในแบบจำลอง เป็นต้น

(4) จุดแข็งของการพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดเพื่อหาค่าปริมาณการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำที่ดีที่สุดในแต่ละช่วงเวลาของ 4 เขื่อนหลักในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่คือ แบบจำลองถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ภาษาไพทอน (Python) ซึ่งเป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่มีผู้พัฒนาและใช้งานเป็นจำนวนมาก ทำให้ผู้พัฒนาสามารถพัฒนาแบบจำลองแบบข้อจำกัดได้ง่ายขึ้น อีกทั้งภาษาไพทอนยังมีชุดคำสั่งที่สามารถใช้ในการพัฒนาแบบจำลองโปรแกรมแบบข้อจำกัดได้และยังสามารถใช้งานกับ Constraint Solver ได้หลายรูปแบบ จากจุดแข็งนี้ผู้ใช้งานสามารถเลือก Constraint Solver ที่เหมาะกับแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดที่ถูกพัฒนาขึ้น ด้วยเหตุนี้ การแก้ปัญหาของแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดจึงมีความเร็วในการแก้ปัญหาโจทย์สูง นอกจากนี้ การจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในลักษณะของปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันแบบหลายอ่างในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ที่พัฒนาขึ้นด้วยแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดนี้ทำให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าปริมาณการระบายน้ำของแต่ละเขื่อนในแต่ละช่วงเวลาเป็นค่าที่ดีที่สุด

(Optimal Water Release) ในขณะเดียวกันผู้ใช้งานสามารถกำหนดปริมาณการระบายน้ำล่วงหน้ารายวัน รายสัปดาห์ และรายเดือนจากผลลัพธ์ของแบบจำลองเพื่อใช้ในการวางแผนการระบายน้ำทั้งระบบให้มีความเหมาะสม หรือหากมีการปรับเปลี่ยนแผนการจัดสรรน้ำระหว่างสัปดาห์ก็สามารถผลลัพธ์จากแบบจำลองเพื่อนำมาแนะนำการระบายน้ำในปริมาณที่แตกต่างกันจากทั้ง 4 เขื่อน ยิ่งไปกว่านั้น ยังสามารถพัฒนาร่วมกับโปรแกรมภาษาอื่น ๆ เช่น Java, JavaScript และ C# เป็นต้น ในรูปแบบของ Application Programming Interface (API) ได้อีกด้วย อีกทั้งยังสามารถพัฒนาในลักษณะของแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดที่มีหลายสมการวัตถุประสงค์ อย่างไรก็ตาม จุดอ่อนของการพัฒนาแบบจำลองโปรแกรมแบบข้อจำกัดคือ การไม่สนับสนุนการเปลี่ยนแปลงแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดแบบไดนามิกส์ (หรือไม่เป็นที่นิยม) กล่าวคือเมื่อแบบจำลองถูกสร้างแล้วจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงระหว่างการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด ดังนั้น ผู้พัฒนาต้องทำการวิเคราะห์และกำหนดข้อจำกัดของปัญหาให้แล้วเสร็จก่อนที่จะพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัด ซึ่งในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้ออกแบบวิธีการวิจัยดังนี้ (1) วิเคราะห์หาข้อจำกัดที่เหมาะสมกับสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อระบบเขื่อนและการระบายน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ (2) เมื่อได้ข้อจำกัดที่เหมาะสมแล้วจึงนำมาสร้างแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดที่พัฒนาขึ้นด้วยภาษาไพทอน (3) นำเข้าข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดเพื่อหาค่าการระบายน้ำที่ดีที่สุดของ 4 เขื่อนหลัก (4) เปรียบเทียบค่าปริมาณการระบายน้ำที่ดีที่สุดจากแบบจำลองกับปริมาณการระบายน้ำจริง (5) หากผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่สอดคล้องกับเป้าหมายของงานวิจัยในการเพิ่มน้ำต้นทุนเมื่อสิ้นสุดฤดูฝนของเขื่อนจำเป็นต้องวิเคราะห์ข้อจำกัดเพิ่มเติมของระบบและกลับไปข้อ (2) จนกระทั่งได้คำตอบของการระบายน้ำที่ดีที่สุด

(5) แบบจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำด้วยการโปรแกรมแบบข้อจำกัดที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้นับได้ว่าเป็นการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์สมัยใหม่ที่มีการดึงข้อมูลสารสนเทศน้ำล่วงหน้าจากแบบจำลองการพยากรณ์น้ำที่อาศัยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning) และการนำข้อมูลน้ำท่า (Localized Flow) ท้ายเขื่อนพิจารณาในการกำหนดการระบายน้ำ ซึ่งนำเสนอรูปแบบการระบายน้ำ/แนวทางจัดสรรน้ำร่วมกันอย่างเป็นระบบในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่โดยมุ่งเน้นที่จะเพิ่มปริมาณน้ำต้นทุนของเขื่อนหลัก (เขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์) ในระยะยาว และยังเป็นการบรรเทาความเสียหายรุนแรงจากภัยแล้งและอุทกภัยในพื้นที่ ซึ่งแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมานี้ยังสามารถพัฒนาต่อยอดในการพัฒนางานบริหารเขื่อน-อ่างเก็บน้ำให้เป็นลักษณะของการบริหารเขื่อน-อ่างเก็บน้ำแบบอัจฉริยะ (SMART Operation) ในรูปแบบของการสร้างแอปพลิเคชันสำหรับใช้เป็นระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการกำหนดรูปแบบการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำหลักอย่างเป็นระบบล่วงหน้าด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เพื่อรายงานผลแก่ผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการบริหารจัดการน้ำ

ภาคผนวก G

ภาพการจัดฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการเพื่อถ่ายทอดผลงานวิจัยสู่หน่วยงานปฏิบัติ:

แผนงานที่ 1 การพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง
(Machine Learning, ML)

แผนงานที่ 2 การพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมแบบข้อจำกัดในการบริหารเขื่อน (Constraint Programming, CP)

แผนงานที่ 3 การพัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้แบบเสริมกำลังในการบริหารเขื่อน (Reinforcement Learning, RL)

& ภาพแสดงการศึกษาดูงานเขื่อนในพื้นที่ศึกษาและนำเสนอผลงานวิจัยโดยคณະนักรวิจัยแก่หน่วยงานปฏิบัติ



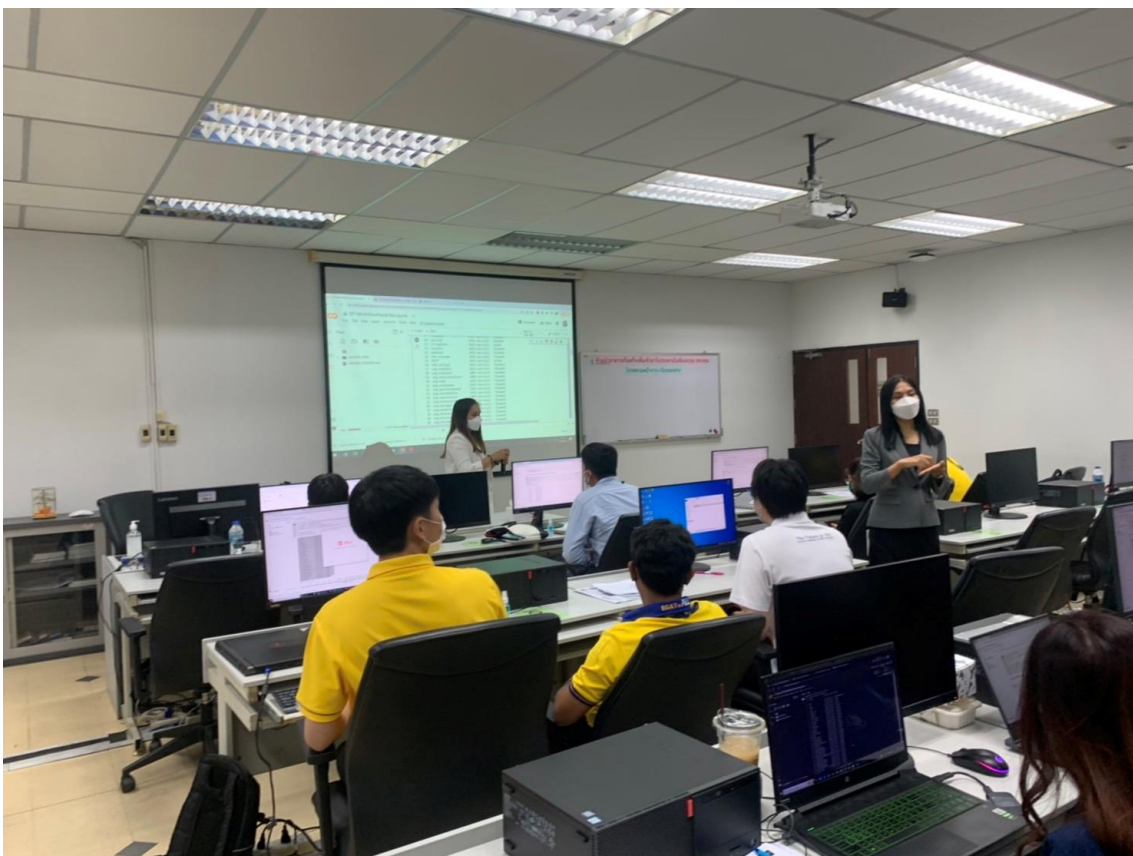
G | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ



G | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ



G | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุ่นระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ



G | การปฏิบัติการระบบอย่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ



G | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ



G | การปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่สำหรับการบริหารจัดการน้ำต้นทุนระยะยาวในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (ระยะที่ 2)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2564 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ



ภาคผนวก H

บทความทางวิชาการจากผลลัพธ์จากงานวิจัย



EVALUATING HYDROELECTRICITY PRODUCTION RE-OPERATING WITH ADAPTED RULE CURVE UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS: CASE STUDY OF BHUMIBOL DAM IN THAILAND

Khin Muyar Kyaw¹, Areeya Rittima^{2*}, Yutthana Phankamolsil³, Allan Sriratana Tabucanon⁴, Wudhichart Sawangphol⁵, Jidapa Krairangka⁶, Yutthana Talaluxmana⁷, and Varawoot Vudhivanich⁸
^{1, 2*} Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, Thailand
³ Environmental Engineering and Disaster Management Program, Mahidol University, Kanchanaburi Campus, Thailand
⁴ Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Thailand
^{5, 6} Faculty of Information and Communication Technology, Mahidol University, Thailand
⁷ Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand
⁸ Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Thailand
*Corresponding author's e-mail: areeya.rit@mahidol.ac.th

ABSTRACT

Hydroelectricity production is being impacted by climate change due to the considerable changes in water availability of reservoir system and dam release. This study aims at evaluating the response of energy production of the Bhimibol dam through the reservoir re-operation system with non-engineering adaptation measures due to climate change. Reoperating the Bhumibol (BB) dam with adapted rule curve and modelling exercise with MIKE11 to predict series of reservoir inflow were conducted under RCP4.5 and RCP8.5 climate change scenarios. The adapted rule curves of BB dam were established by either increasing or lowering the upper and lower rule levels of 0.5 meters from the rule curves which were developed by EGAT in 2012. In addition, the standard operation policy were applied to specify the amount of water release corresponding to the adapted rule curves established. The water balance-based reservoir re-operation model were developed using MATLAB Simulink Toolbox for short-term simulation during 2012–2018. Influence of climate change on the seasonal and yearly reservoir inflows were considerably investigated. In addition, the relation of current and projected inflows, and the response of dam release and hydroelectric production of BB dam were then evaluated. The results of the short-term simulation during 2012–2018 show that dam release is likely to be increased corresponding to the high variability of projected inflows. Therefore, the seasonal and yearly hydroelectricity production are accordingly increased when re-operating dam under RCP4.5 and RCP8.5 inflows. It is found that the yearly hydroelectricity production with RCP4.5 and RCP8 inflows are about 52% and 30% respectively higher than the current inflow. It is also revealed that re-operating dam with the different types of adapted rule curves does not alter the volume of released water and energy production generated from the reservoir radically because the standard operating rules were adopted for all adapted rule curves. Importantly, the study on the adaptation measures to climate change would help increase understanding of necessity of new operational rules for dam and reservoir re-operation to cope well with instability of reservoir water supply for sustainable hydropower production in future.

Keywords: Adapted rule curve, Climate change, Hydroelectricity, Hypothesis testing, Water balance-based simulation model

1. INTRODUCTION

Great attention has been paid to climate change for few decades as it has caused serious impact on water resources management and responses to the natural disasters. The climate change has drastically altered the frequency and intensity of extreme rainfall creating large uncertainty of water availability in hydrologic cycle and occurrences of unprecedented huge floods and prolonged droughts. Moreover, the changes in rainfall patterns and streamflow discharges may adversely impact the efficiency of hydropower generation [1, 2]. Therefore, the dam and reservoir operation practices has to be re-examined and efficiently improved through adaptation measures based upon the rational and up-to-date information. For hydroelectric dam,

the non-engineering adaptation measures such as re-operating reservoir with the new operating rules, improving the predictability of hydrological data, and developing the localized regional climate model to suggest the operational changes in reservoir management, can be very useful and need to be more explored for applications.

Most of the reservoirs in Thailand have been designed to serve multiple water uses such as irrigation, municipality, ecology, and hydropower generation. As the demand for electricity has become more competitive due to a massive increase in population and human being, a large number of small to large hydropower plant development projects has been established by aiming to effectively support the electricity requirement and to manage the renewable energy sources [3, 4].

Therefore, the attempt to re-operate the dam and reservoir system under climate change and to evaluate the response to energy production was made in this study by selecting Bhumibol dam as the study area.

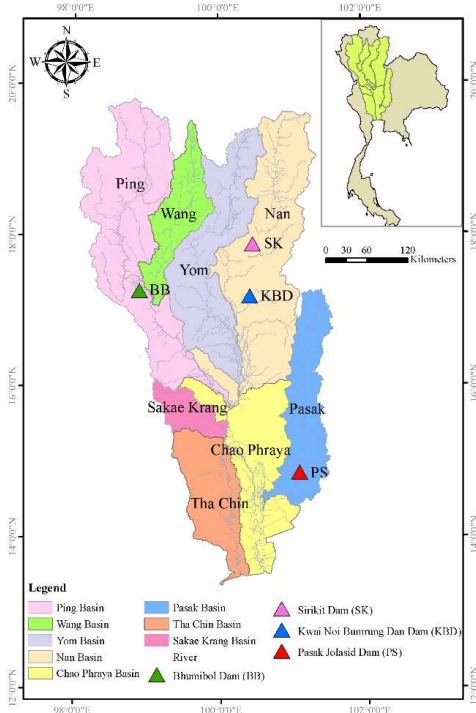


Figure 1 Bhumibol dam in the Greater Chao Phraya River Basin (GCPYRB)

Bhumibol (BB) dam is a multipurpose dam built across the Ping River in the northern elevated plain of Thailand as shown in Fig.1. Bhumibol dam is the principal source of water supply in the Greater Chao Phraya River Basin (GCPYRB). It has been jointly operated with Sirikit (SK) and Khwae Noi Bumrung Dan (KBD) dams not only to supply water for national domestic, agricultural, industrial uses, as well as the ecological needs downstream, but also for hydropower production to supply electric power in the nearby region. The hydropower plant of Bhumibol dam has been built since 1961 and enlarged to the total installed capacity of 779.2 MW in 1991 with the average energy of 1,037 GWhr/yr [5]. The Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) is a key institutional operator responsible for dam and reservoir operation and hydroelectricity production.

In this study, the relation of reservoir inflow, dam release and hydroelectric production of BB dam which is altered by the climate change impact and the consequences of reservoir operation policy undertaken, are considerably investigated through the development of reservoir re-operation model

using the adapted rule curves. The long-term response of energy production among the current and future climate change scenarios were examined and tested using statistical procedure to exhibit the statistical differences of obtained energy as the results of reservoir re-operations and climate change.

2. METHODOLOGY

In this study, the projection of reservoir inflow of BB dam was carried out through the platform of MIKE11 Zero. MIKE11 RR NAM Model and MIKE11 HD, the physically-lumped model, were adopted for rainfall-runoff simulation into Ping River Basin. Prediction of rainfall and evaporation under climate change scenarios was implemented based on the simulation of EC-EARTH under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios regionally downscaled by RegCM4 with 25 km x 25 km grid size over the study area [6]. The projected inflow of BB dam was then generated for five periods namely, 2000–2020 (baseline), 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 and 2081–2099. However, the baseline period was only used for this study due to time duration of the available historical record. The water balance-based reservoir re-operation model was then developed using MATLAB Simulink Toolbox, as typically shown in Fig.2.

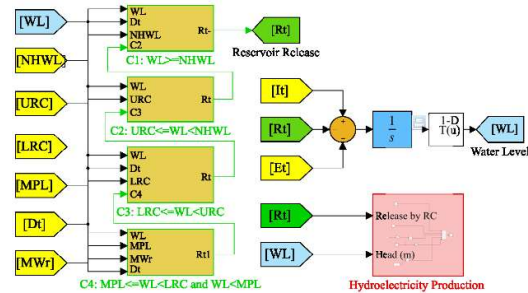


Figure 2 Water balance-based reservoir re-operation model using adapted rule curve

To emphasize the response of energy production when altering the reservoir operating policy under impact of climate changes, the adapted rule curves of BB dam which were modified from the rule curve established by EGAT in 2012, were used. The daily short-term simulation based upon the associated reservoir data were then performed during 2012–2018 under current and projected inflows. Identifying the water demand for BB dam was referred to yearly water allocation plan to reach all the water use sectors in GCPYRB. Water supplied to the target demand nodes was shared by BB and SK dams in the proportion of 0.44:0.56 [6].

In the final step, the potential hydropower energy under current and future RCP 4.5 and RCP8.5 inflows were investigated to see the

statistical difference of obtained energy by using ANOVA statistical procedure.

2.1 Adapted Rule Curve–Based Reservoir Re–operation Model

The reservoir rule curve is regarded as the common tool to provide useful guidance in the decision–making process of dam release. In this study, the adapted rule curve–based reservoir re–operation model for BB dam was established based on the existing rule curve developed in 2012 by EGAT. To accomplish the modelling practice for reservoir re–operation, four main scenarios of adapted rule curve were generated by increasing and lowering the water storage levels of upper rule curves (URC) and lower rule curves (LRC) of ± 0.5 meter from the existing rule curve. The reservoir operating policies were set up in accordance with the standard operating policy (SOP) [8–9] aiming to reduce the risk of unmanageability of reservoir operation system to handle with water deficit and flood while maximizing potential hydroelectricity production over the specific time periods. The water release from the reservoir is specified as the same amount of target demand when the reservoir storage is between LRC and URC. However, the water can only be released with the minimum water requirement of 5 MCM/day when the reservoir storage is lower than LRC. In case of reservoir storage is higher than URC, the reservoir water release is accordingly based on the conditions of excessive water and maximum turbine discharge of the hydropower system. The total amount of the water storage above normal high–water level (NHWL) is specified as a spilled water when the water level is above NHWL. Moreover, the reservoir water could not be released in case of the reservoir storage is lower than minimum pool level (MPL) as shown in Fig.3.

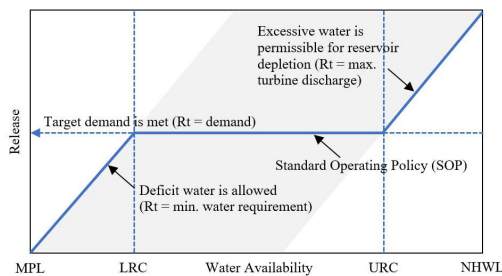


Figure 3 Application of standard reservoir operating policy with rule curves

2.2 Estimation of Hydroelectricity Production

To simulate hydroelectricity production as a result of water release when re–operating with adapted rule curve, the water balance–based approach [7] was applied in accordance with the current and projected inflows as shown in Eq. (1).

$$S_{t+1} = S_t + I_t - E_t - R_t \quad (1)$$

where, S_{t+1} represents the water storage of the reservoir at time step $t+1$; S_t is the initial storage of the reservoir at time step t ; I_t is the reservoir inflow volume at time step t ; E_t is the evaporation loss from the reservoir at time step t ; and R_t is the water release volume or the reservoir outflow discharging into the hydropower turbines. S_t is constrained by the maximum water storage (S_{max}) and minimum water storage (S_{min}), which dynamically changes due to the associated reservoir data and amount of water release specified by adapted rule curves. The relationship between water storage and water level can be found using reservoir water level–area–capacity curve. R_t is determined by the water balance–based reservoir operation model developed using MATLAB Simulink Toolbox. Finally, daily hydropower electricity output of Bhumibol dam can be computed using Eq. (2).

$$E = \eta \rho g Q H t \quad (2)$$

where, E is the daily electricity output in KWhr. η is the overall efficiency of the hydropower plant in percentage, ρ is the water density ($1,000 \text{ kg/m}^3$), g is the acceleration of gravity which is 9.81 m/s^2 . Q represents the reservoir outflow discharging through the hydropower turbines (m^3/s). H is the hydraulic head (m) which can be calculated by the difference in height between the headwater level in the reservoir and tail water level downstream of the dam. t is the number of working hours for power generation over the specified time periods.

2.3 Statistical Analysis of Hydroelectricity Production Using ANOVA–Test

The energy production performed by the existing and adapted rule curves under the current and projected inflows were tested using one–way analysis of variance (ANOVA) test [10–12] to determine whether there is a significant difference between the means of two energy dataset. In the other words, ANOVA–test which is a parametric test of difference, was used to describe whether impact of climate change has an effect on the potential energy production at level of significance (α) of 0.05.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Influence of Climate Change on the Seasonal and Yearly Reservoir Inflows

To emphasize on the influence of climate change on the seasonal and yearly inflows of Bhumibol dam, the long-term recorded inflow and projected inflow performed by MIKE11 were investigated and compared. It is found from recorded inflow that the average yearly inflow of the BB reservoir during 1969–2018 is approximately 5,694 MCM/yr. More than 80% of the total inflow is contributed to BB dam in wet season (May–Oct, WS) and the remaining is occurred in dry season (Nov–Apr, DS). Table 1 and Fig.4 also indicate that the long-term projected yearly inflow into BB dam under RCP4.5 and RCP8.5 tends to be decreased predominantly for all the specific time periods except in 2041–2060. In comparison with the baseline period (2000–2020), RCP4.5 scenario exhibits the increase in inflow in dry season (Nov–Apr) by +0.07%, +10.00%, +15.42% and +6.25% in 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 and 2081–2099, respectively. However, the opposite results are obviously found in wet season (May–Oct) as the change are expected to be -10.44%, +9.60%, -13.01% and -2.63%. For RCP8.5 case, the potential increase in inflow in dry season (Nov–Apr) is +8.14%, +8.15% and +22.71% in 2041–2060, 2061–2080 and 2081–2099, respectively except in 2021–2040 period showing the decrease in inflow by -5.03% deviated from the baseline period. Similarly, the percentage change in projected inflow in wet season (May–Oct) is fluctuated around the baseline by -4.68%, +20.17%, -10.13% and +18.04% in 2041–2060, 2061–2080 and 2081–2099, respectively. The results indicate considerable variations in the seasonal and yearly patterns of reservoir inflow which are key factor influencing the complexity and effectiveness of reservoir management in both the current and future operations.

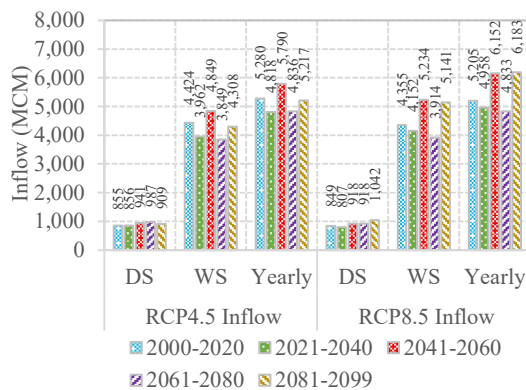


Figure 4 The projected changes in average seasonal and yearly reservoir inflows of Bhumibol dam

3.2 Response of Reservoir Water Release When Re-operating with Adapted Rule Curves under Climate Change Scenarios

As aforementioned, the average long-term yearly inflow of the Bhumibol dam is projected to significantly decrease under climate change scenarios (RCP4.5 and RCP8.5). However, in this study the simulation run of reservoir re-operation model was implemented using the short-term dataset during 2012–2018 since the rule curves has been established in 2012 by EGAT. It is noticeable that the average values of projected inflows during 2012–2018 are 6,358 and 5,168 MCM/yr for RCP4.5 and RCP8.5, respectively which are much higher than the current inflow of 4,269 MCM/yr as shown in Fig.5. These average values of projected inflows during 2012–2018 appear largely inconsistent with the average values of 5,280 and 5,205 MCM for RCP4.5 and RCP8.5 during 2000–2020, and 5,694 MCM from historical record during 1969–2018 due to the occurrences of extreme flow events in two consecutive years in this region creating severe flood in 2011 and handling flood risk in 2012. This reflects that climate change has significantly created the serious impact on the large variation of reservoir inflow for both short- and long-term data. The increase in projected inflows during 2012–2018 could lead to the increase in the seasonal and yearly release volumes from reservoir as can be seen in Table 2. The Fig.5 and Fig. 6 show strong correlation between the reservoir inflow and water releases when existing rule curve and 4 scenarios of adapted rule curves were employed. It exhibits that releasing water from BB dam is not only based on the conditions of available water storage and target water demand but also significantly subject to the extent of incoming inflows. Therefore, for the RCP4.5 and RCP8.5 inflow cases, the seasonal and yearly releases are relatively higher than water release for the current inflow case. It is also found that the released water in dry season is higher than in wet season for all scenarios. However, altering the operating rule curves by increasing and lowering the levels of ± 0.5 meter while the same standard rules were applied, shows the slight differences in terms of seasonal and yearly release volumes from the reservoir system. Moreover, monthly water shortage is not existed for the current and projected inflows scenarios when re-operating with adapted rule curves during 2012–2018. Importantly, even the huge amount of water release in wet season obtained from RCP4.5 and RCP8.5 inflow scenarios is profoundly noticed, however, the maximum values of dam releases in wet season are 3,018 and 2,234 MCM for RCP4.5 and RCP8.5 inflow scenarios, respectively which are definitely associated with the water allocation plan specified in normal operation periods.



Table 1 The recorded and projected reservoir inflows of Bhumibol dam for the specified time periods

Month	Recorded Inflow (MCM)	Projected Inflow under RCP4.5 (MCM)					Projected Inflow under RCP8.5 (MCM)				
		1969–2018	2000–2020 ^{1/}	2021–2040	2041–2060	2061–2080	2081–2099	2000–2020 ^{1/}	2021–2040	2041–2060	2061–2080
Jan	132.20	117.25	116.49	125.56	127.85	130.11	118.11	112.31	132.20	136.68	133.59
Feb	59.08	71.31	69.96	75.19	72.42	73.30	71.08	69.09	80.57	77.40	82.20
Mar	38.02	60.30	55.07	65.30	140.95	55.70	57.73	52.50	61.79	58.17	62.97
Apr	48.12	56.24	81.80	72.12	76.07	65.92	65.53	46.95	54.80	47.89	105.81
May	247.46	227.58	328.21	403.26	281.83	264.96	243.73	240.15	264.25	106.10	339.54
Jun	317.08	425.75	288.30	657.90	356.29	465.86	403.38	355.65	429.98	251.00	444.47
Jul	379.35	428.09	378.96	414.31	342.98	428.75	440.60	278.99	455.13	299.64	548.93
Aug	923.49	726.06	584.56	707.69	672.31	651.17	563.78	576.64	1,302.83	662.55	994.77
Sep	1,504.04	1,351.93	1,185.17	1,420.61	1,061.18	1,342.31	1,418.73	1,207.00	1,461.26	1,243.92	1,438.88
Oct	1,209.42	1,264.98	1,197.26	1,245.40	1,134.31	1,154.85	1,285.25	1,493.23	1,320.32	1,351.16	1,374.54
Nov	590.14	352.97	348.38	398.26	359.56	385.30	345.57	332.92	382.38	397.67	420.61
Dec	245.24	197.31	184.27	204.51	210.40	198.50	191.29	192.82	206.67	200.65	236.97
Yearly	5,693.64	5,279.77	4,818.43	5,790.10	4,836.15	5,216.72	5,204.77	4,958.25	6,152.17	4,832.84	6,183.27
Δ%			(-8.74)	(+9.67)	(-8.40)	(-1.19)		(-4.74)	(+18.20)	(-7.15)	(+18.80)
DS	1,112.80	855.37	855.99	940.93	987.26	908.83	849.30	806.59	918.40	918.47	1,042.14
Δ%			(+0.07)	(+10.00)	(+15.42)	(+6.25)		(-5.03)	(+8.14)	(+8.15)	(+22.71)
WS	4,580.84	4,424.40	3,962.44	4,849.17	3,848.89	4,307.89	4,355.47	4,151.66	5,233.77	3,914.36	5,141.13
Δ%			(-10.44)	(+9.60)	(-13.01)	(-2.63)		(-4.68)	(+20.17)	(-10.13)	(+18.04)

Remark: ^{1/} the baseline period

Table 2 Seasonal and yearly water release when re-operating with adapted rule curves during 2012–2018

Types of Inflow	Reservoir Water Release (MCM)														
	Existing Rule Curve			(+0.5 m) URC			(-0.5 m) URC			(+0.5 m) LRC			(+0.5 m) LRC		
	DS	WS	Yearly	DS	WS	Yearly	DS	WS	Yearly	DS	WS	Yearly	DS	WS	Yearly
Current	2,632	1,702	4,334	2,632	1,702	4,334	2,632	1,700	4,332	2,632	1,700	4,332	2,632	1,703	4,335
RCP 4.5	3,008	3,019	6,027	3,018	2,985	6,003	3,000	3,049	6,048	3,009	3,018	6,027	3,021	3,006	6,027
Δ%	(+14)	(+77)	(+39)	(+15)	(+75)	(+39)	(+14)	(+79)	(+40)	(+14)	(+77)	(+39)	(+15)	(+77)	(+39)
RCP 8.5	2,869	2,224	5,093	2,859	2,222	5,082	2,851	2,261	5,111	2,861	2,234	5,094	2,861	2,234	5,094
Δ%	(+9)	(+31)	(+18)	(+9)	(+31)	(+17)	(+8)	(+33)	(+18)	(+9)	(+31)	(+18)	(+9)	(+31)	(+18)

Remark: ^{1/} The different values compared with the current inflow case

Table 3 Seasonal and yearly hydroelectricity production when re-operating with adapted rule curves during 2012–2018

Types of Inflow	Hydroelectricity Production (GWhr)														
	Existing Rule Curve			(+0.5 m) URC			(-0.5 m) URC			(+0.5 m) LRC			(+0.5 m) LRC		
	DS	WS	Yearly	DS	WS	Yearly	DS	WS	Yearly	DS	WS	Yearly	DS	WS	Yearly
Current	660	377	1,037	660	377	1,037	659	376	1,035	660	377	1,036	660	377	1,037
RCP 4.5	788	789	1,577	793	782	1,575	784	794	1,578	788	789	1,577	791	786	1,577
Δ%	(+19)	(+109)	(+52)	(+20)	(+108)	(+52)	(+19)	(+111)	(+52)	(+19)	(+109)	(+52)	(+20)	(+109)	(+52)
RCP 8.5	781	568	1,349	780	569	1,349	775	576	1,351	779	571	1,349	778	570	1,348
Δ%	(+18)	(+51)	(+30)	(+18)	(+51)	(+30)	(+17)	(+53)	(+30)	(+18)	(+52)	(+30)	(+18)	(+51)	(+30)

Remark: ^{1/} The different values compared with the current inflow case

Table 4 Results of ANOVA test for the daily energy performed various reservoir re-operation models

Re-operation	Diff.	Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Squared	F	p-value	F critical
Existing Rule Curve	ΔE ^{1/}	Between Groups	2798714108	1	2.799E+09	151.8326	2.11E-34	3.8433
		Within Groups	94228936748	5112	18432891			
		Total	97027650856	5113				
	ΔE ^{2/}	Between Groups	936810177.7	1	936810178	79.3998	6.94E-19	3.8433
		Within Groups	60314713786	5112	11798653			
		Total	61251523963	5113				
(+0.5 m) URC	ΔE ^{1/}	Between Groups	2776119189	1	2.776E+09	150.2820	4.51E-34	3.8433
		Within Groups	94432634805	5112	18472738			
		Total	97208753994	5113				
	ΔE ^{2/}	Between Groups	935875162.3	1	935875162	79.3168	7.23E-19	3.8433
		Within Groups	60317542813	5112	11799206			
		Total	61253417975	5113				

Re-operation	Diff.	Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Squared	F	p-value	F critical
(-0.5 m) URC	$\Delta E^{1/}$	Between Groups	2824975555	1	2.825E+09	153.5799	9E-35	3.8433
		Within Groups	94031007217	5112	18394172			
		Total	96855982772	5113				
	$\Delta E^{2/}$	Between Groups	954884620.2	1	954884620	80.6869	3.65E-19	3.8433
		Within Groups	60497651904	5112	11834439			
		Total	61452536524	5113				
(+0.5 m) LRC	$\Delta E^{1/}$	Between Groups	2800368148	1	2.8E+09	151.9171	2.03E-34	3.8433
		Within Groups	94232199964	5112	18433529			
		Total	97032568113	5113				
	$\Delta E^{2/}$	Between Groups	938147770.1	1	938147770	79.5401	6.47E-19	3.8433
		Within Groups	60294268970	5112	11794654			
		Total	61232416740	5113				
(-0.5 m) LRC	$\Delta E^{1/}$	Between Groups	2799519087	1	2.8E+09	151.9133	2.03E-34	3.8433
		Within Groups	94205960025	5112	18428396			
		Total	97005479113	5113				
	$\Delta E^{2/}$	Between Groups	927441951.2	1	927441951	78.9799	8.55E-19	3.8433
		Within Groups	60029006055	5112	11742763			
		Total	60956448006	5113				

Remark: $\Delta E^{1/}$ = the difference between current inflow and projected RCP4.5 case
 $\Delta E^{2/}$ = the difference between current inflow and projected RCP8.5 case

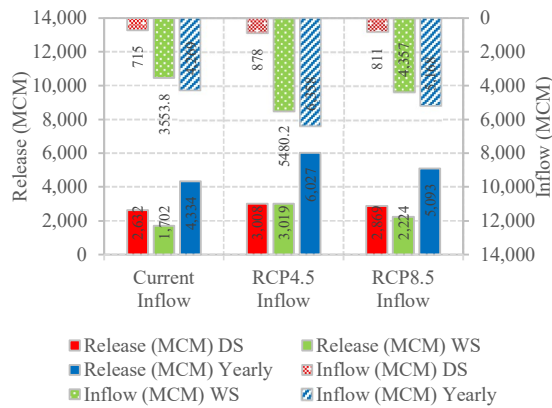


Figure 5 Relation of average reservoir water release with the current and projected inflows during 2012–2018 when existing rule curve was Employed

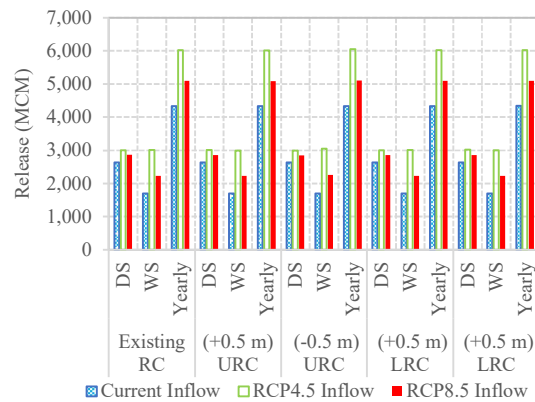


Figure 6 The average seasonal and yearly water releases when re-operating with adapted rule curve under RCP4.5 and RCP8.5 inflows during 2012–2018

3.3 Response of Hydroelectricity Production When Re-operating with Adapted Rule Curves under Climate Change Scenarios

In principle, the potential hydroelectricity production is relatively subject to the volumetric released water, hydraulic heads and overall efficiency of hydropower plant. As the dam release during 2012–2018 is likely to be increased due to the high variability of projected inflow, therefore, the seasonal and yearly hydroelectricity production are obviously increased when re-operating dam under RCP4.5 and RCP8.5 inflows. By comparing with the current inflow case, the yearly energy is expected to increase of 52% and 30% under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios when the existing rule curve is employed. However, there is no significant differences when changing the operating policy by the adapted rule curve as can be seen in Table 3 and Fig. 7.

The response of hydraulic head for hydropower generation was also investigated in this study as shown the results in Fig.8. It is revealed that the average values of monthly hydraulic head under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios are higher than the current inflow case, leading to the increasing in energy production over the simulation time periods.

3.4 ANOVA Test for Hydroelectricity Production under Climate Change Scenario

The impact of climate change on the potential energy production of BB dam was re-diagnosed through the analysis of ANOVA-test to compare the means of energy when re-operating reservoir under the current and projected inflows. The results in Table 4 obviously show a significant difference between the means of two energy dataset at level of significance (α) of 0.05 when existing and adapted rule curves were employed. This implies that the changes in the extent of reservoir inflow and volume of released water would influence to the potential energy production in future.

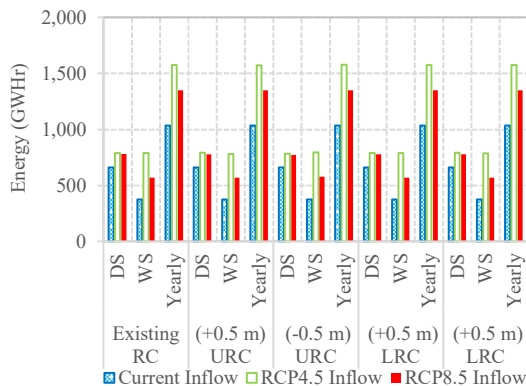


Figure 7 The average seasonal and yearly hydropower generation when re-operating with adapted rule curve under climate change scenarios

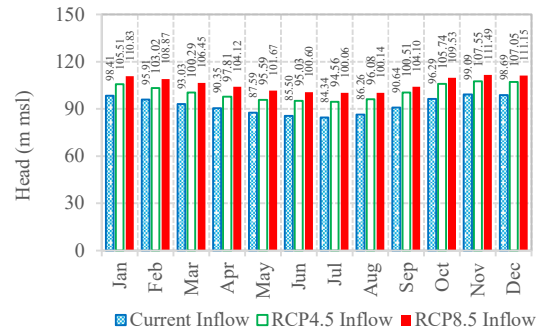


Figure 8 Response of average hydraulic head for hydropower generation under climate change scenarios

4. CONCLUSIONS

Hydroelectric generation is sensitively affected by the changes in water availability of the reservoir system and dam release. Based on the short-term simulation of BB dam during 2012–2018, dam release is likely to be increased corresponding to the high variability of projected inflow. Therefore, the seasonal and yearly hydroelectricity production are significantly increased when re-operating dam under RCP4.5 and RCP8.5 inflows. It is also revealed that re-operating dam with the different types of adapted rule curves does not alter the volume of released water and energy production generated from the reservoir radically because the standard operating rules were adopted for all adapted rule curves. However, the study on the adaptation measures to climate change would help increase understanding of necessity of new operational rules for dam and reservoir re-operation to cope well with instability of reservoir water supply in future.

5. ACKNOWLEDGMENTS

Authors would like to acknowledge the Thailand Science Research and Innovation (TSRI) for providing financial support. We are thankful to the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), Thailand Meteorological Department (TMD), and the Royal Irrigation Department (RID) for providing research data.

REFERENCES

- [1] ASEAN Development Bank. (2012). Climate risk and adaptation in the electric power sector. Manila, Philippines, 1–82.
- [2] Goyal, M.K., Surampalli, R.Y. (2018). Impact of climate change on water resources in India. Journal of Environmental Engineering, 144(7), 04018054.
- [3] Aroonrat, K., Wongwises, S. (2015). Current status and potential of hydro energy in



- Thailand: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 46, 70–78.
- [4] Punarai, N., Khumkaew, S., Kluabwang, J. (2015). Application of differential evolution to parameter identification of Bhumibol Hydro Power Plant in Thailand. (2015). Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists.
- [5] Thongthamchart, C., Raphitphan, N. (2016). Performance of Bhumibol concrete arch dam after 50 years of operation. EGAT, Thailand, In: Proceedings for ASIA.
- [6] Tabucanon, A.S., Rittima, A., Raveephinit, D., Phankamolsil, Y., Sawangphol, W., Kraisangka, J., Talaluxmana, Y., Vudhivanich, V., Xue, W. (2021). Impact of climate change on reservoir reliability: a case of Bhumibol Dam in Ping River Basin, Thailand. *Environment and Natural Resources Journal*, 19(4), 266–281.
- [7] Carvajal, P.E., Anandarajah, G., Mulugetta, Y., Dessens, O. (2017). Assessing uncertainty of climate change impacts on long-term hydropower generation using the CMIP5 ensemble—the case of Ecuador. *Clim. Change*, 144(4), 611–624.
- [8] Neelakantan, T.R., Sasireka, K. (2013). Hydropower reservoir operation using standard operating and standard hedging policies. *International Journal of Engineering and Technology*, 5(2), 1191–1196.
- [9] Kangrang, A., Prasanchum, H., Hormwichian, R. (2018). Development of future rule curves for multipurpose reservoir operation using conditional genetic and tabu search algorithms. *Hindawi, Advances in Civil Engineering*, Article ID 6474870, 1–10.
- [10] Davis, R.B., Mukamal, K.J. (2006). Hypothesis testing: means. *Circulation*, 114(10), 1078–1082.
- [11] Raftery, A.E., Gilks, W.R., Richardson, S., Spiegelhalter, D. (1995). Hypothesis testing and model. *Markov chain Monte Carlo in practice*, 165–187.
- [12] Labovitz, S. (1970). The nonutility of significance tests: The significance of tests of significance reconsidered. *Pacific Sociological Review*, 13(3), 141–148.



THE PREDICTABILITY OF RESERVOIR INFLOW PREDICTION MODEL FOR SIRIKIT DAM USING XGBOOST MACHINE LEARNING ALGORITHM

Pheeranat Dornpunya¹, Areeya Rittima^{2*}, Yutthana Phankamolsil³, Allan Sriratana Tabucanon⁴,
Wudhichart Sawangphol⁵, Jidapa Kraisaangka⁶, Yutthana Talaluxmana⁷, and Varawoot Vudhivanich⁸

^{1,2*} Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, Thailand

³ Environmental Engineering and Disaster Management Program, Mahidol University,
Kanchanaburi Campus, Thailand

⁴ Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Thailand

^{5,6} Faculty of Information and Communication Technology, Mahidol University, Thailand

⁷ Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand

⁸ Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen,
Kasetsart University, Thailand

*Corresponding author's e-mail: areeya.rit@mahidol.ac.th

ABSTRACT

XGBoost which is a tree-based ensemble machine learning algorithm, was used to predict the daily and monthly reservoir inflows of the Sirikit Dam, Thailand. Training and testing the prediction models were accordingly implemented using observed inflow and climate data during 2000–2020 as the key prediction inputs. The correlation analysis was conducted to seek the strong relations between the observed inflow of the Sirikit Dam and climate data collected from TMD and NASA data sources. Setting up the prediction model structures were performed using observed inflow, precipitation and humidity data at time step t , and the average inflow at the delayed time steps. Consequently, 54 scenarios of XGBoost daily and monthly models were trained and evaluated by altering the model parameters such as ratio of training–training datasets, learning rates, maximum number of iterations, and early stopping rounds. It is found from the validation results that the XGBoost model could present more reliable and robust prediction results especially for the daily prediction model with the highest R^2 , R , NSE of 0.8362, 0.9145, and 0.8161, respectively. In addition, small values of RMSE and MSE were considerably found. The predictability of the XGBoost model to predict the daily reservoir inflow with good precision is strongly higher than the monthly inflow. Predicting the average values of the daily and monthly inflows gives the prediction results definitely closer to the observed inflows. However, the capability to characterize and predict the dynamics of extreme values of these two developed models is still weak. Therefore, to improve the quality of machine learning algorithm for hydrological prediction, the model parameters need to be optimized. Moreover, conducting the further study using the technological advancement of machine learning is highly encouraged for the achievement of hydrological forecast on water resources management.

Keywords: Artificial Intelligence (AI), Extreme Gradient Boosting (XGBoost), Machine Learning (ML), Reservoir Inflow Prediction, Sirikit Dam

1. INTRODUCTION

The natural disaster occurrences like floods and droughts have been frequently occurred in Thailand. These have become a serious and significant problems in water resources planning and management of the country. Due to the occurrences of major flood in 2011 and the severe drought in 2020, these flood and drought events created a huge agricultural and economic losses of the country particularly in the central and northern regions in the Greater Chao Phraya River Basin. The Greater Chao Phraya River Basin is considered as the largest basin having the irrigation service area of more than 8 million rai along the Chao Phraya, Lower Ping, and Lower Nan Rivers. The main storage dam; Sirikit Dam, was constructed across Nan Rivers in the Nan River Basins, where the headwater of the Chao Phraya River begins and flows into the Gulf of Thailand. The water supply sources in this basin primarily come from the Sirikit reservoirs with the

total capacity of 9,510 million cubic meters. It is reported that the reservoir inflow of Sirikit Dam has become significantly decreased since flooding event occurred in 2011. The average inflows during 2012–2019 of the Sirikit Dam have been declined by approximately 10% of the average long-term record. Moreover, high spatial variability of hydrological changes in the basin such as rainfall and climate data has considerably influenced the volume of reservoir inflows of the dam.

Hydrological prediction remains the difficult and challenging tasks. However, the prediction of hydrological data plays significant role in multi-reservoir operation. It would be emphasized that the precision of rainfall and reservoir inflow forecasts are necessary in decision making process to determine the dam release. In general, the quality of hydrologic prediction is identified by the degree of prediction accuracy and prediction techniques applied. The Artificial Intelligence (AI) have acted



as the main driver of emerging technologies for hydrologic forecast nowadays [1]. Cerqueira et al. [2] compared machine learning and statistical methods for time series forecasting. It shows that statistical methods are only valid under an extremely low sample size. The results also suggest that machine learning using a learning curve method can improve the predictive performances as the sample size gradually grows. The machine learning which is a branch of artificial intelligence has been widely applied in the field of water resources engineering with the great success for hydrological predictions. Mosavi et al. [3] presented the overview of machine learning techniques for flood prediction instead of using the physically-based and statistical models which were long used to predict hydrological events. In general, the prediction models can be divided into two categories according to prediction lead-time, and they can be categorized into hybrid and single methods. The ability to produce the accurate forecasts of hydrological data with long, medium, and short lead times using Artificial Intelligence with Machine Learning (ML) has been highly proven and exhibited through many research studies. Extreme Gradient Boosting (XGBoost) which is a novel machine learning algorithm, was initiated in 2014. It was developed from Gradient Boosting [4] as an ensemble learning method for classification and regression problems. Due to its excellent learning performance and effective training speed, considerable attention on XGBoost algorithm has been paid for hydrological prediction. It is revealed that XGBoost algorithm can be a powerful predictive tool creating more remarkable prediction accuracy and generalization ability than existing algorithms such as Support Vector Machines (SVM), Random Forest (RF) and K-Nearest Neighbor (K-NN) algorithm [5]. In addition, Ni et al. [6] developed a hybrid model using extreme gradient boosting algorithm coupled with Gaussian mixture model (GMM-XGBoost), for monthly streamflow forecasting and compared the results with SVM and standalone XGBoost. Although all three prediction models yielded quite good performance on one-month ahead forecasting, however, GMM-XGBoost provided the best accuracy with significant improvement of forecasting accuracy. Machine learning was also applied for the prediction of variations in groundwater levels in Malaysia [7]. The modelling exercises were conducted using XGBoost, Artificial Neural Network, and Support Vector Machines for ground water level prediction. It can be comparable among these selected algorithms that applying the XGBoost algorithm performed very well for all the input combinations. Moreover, it can be served as a great benchmark for future hydrological prediction.

Therefore, this study focuses on an evaluation of predictability of prediction models by machine

learning for reservoir inflow prediction. The extreme gradient boosting algorithm (XGBoost) and R programming language were employed to develop the daily and monthly inflow prediction models of the Sirikit Dam, Thailand.

2. METHODOLOGY

2.1 Study Area and Data Selection

The Sirikit Dam is a largest earth-filled dam in Thailand built across Nan River in the Nan River Basin in the northern region of Thailand. Nan River Basin is considered as one of the eight sub-basins of the Greater Chao Phraya River Basin (GCPYRB) which originates water supply source for multiple water uses in the Lower Nan and Chao Phraya River Basins. The Sirikit Dam has the reservoir capacity of 9,510 MCM covering drainage area of 13,130 km². Due to the physical features of natural land area above the Sirikit Dam, high spatiotemporal variability on the precipitation has been found in this region. This has affected on the extent of reservoir inflow of the Sirikit Dam especially in rainy season between May to October. The basic statistics of climate data and reservoir inflow of the Sirikit Dam collected from 2000–2020 (21 years) are summarized in Table 1.

Table 1 Descriptive statistics of climate and reservoir inflow data in the study area

Required data	Values	Time of Occurrence
Max. daily prec.	145.60	04/09/2011
Max. monthly prec.	457.80	09/2011
Max. daily evap.	3.54	24/01/2014
Max. monthly evap.	37.72	04/2003
Peak daily inflow	221.87	12/08/2001
Peak monthly inflow	3,095.97	08/2011

Remark: Precipitation (Prec.) and evaporation (Evap.) data are presented in millimeter (mm) and reservoir inflow is displayed in million cubic meters (MCM)

The influence of climate data on the predictive performance of reservoir inflow prediction models was also illustrated in this study. Consequently, the type and amount of data inputs, and the correlation coefficient measuring the strength of relationship of two data were considered for data selection. It would say that the preparation and selection of data is definitely critical to the success of a machine learning solution. Therefore, selecting the data inputs to identify the model structures was based on the climate station sites nearby the Sirikit Dam and strong correlation between selected climate data and the reservoir inflow. Accordingly, the daily observed climate data such as precipitation,

humidity, minimum and maximum temperature were collected during 2000–2020 from three climate stations of the Thai Meteorological Department (TMD) namely Station 0003, 0018, 0095 which are located in Phitsanulok, Uttaradit and Nan Provinces, respectively (in Fig.1). In addition, a large number of climate data at the same geographic coordinates of TMD climate stations placed in the vicinity of the reservoir site was also gathered from the Climate Data Services (CDS) publicly provided by the National Aeronautics and Space Administration (NASA). Moreover, the observed inflow considering as major data for the development of daily and monthly prediction models was provided by the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT).

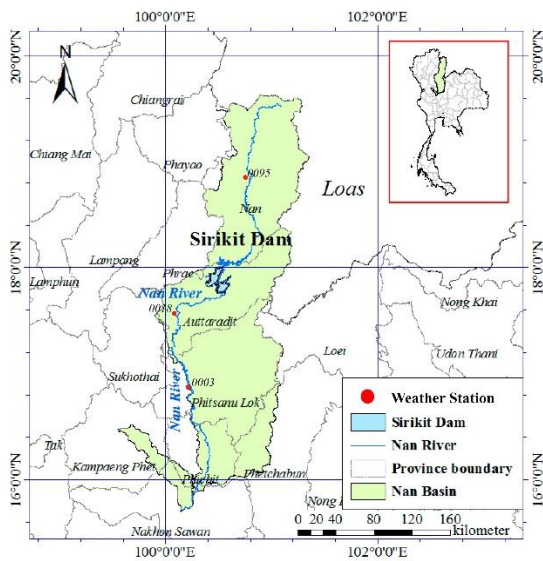


Figure 1 Study area and climate stations used in this study

The correlation analysis gave the strong relations between the observed inflow of the Sirikit Dam and precipitation and humidity data collected from TMD and NASA sources as summarized in Table 2. These data were selected to identify the prediction structures of daily and monthly models by machine learning in this study.

Table 2 The correlation coefficients between the observed reservoir inflow and climate data

Station	Data	Corr.	Data Sources
SK Dam	Obs.	1.0000	EGAT
	Inflow		
0003 Phitsanulok N 16°47'47.0'' E 100°16'32.9''	Prec.	0.0382	TMD
	Prec.	0.3761	NASA
	Hum.	0.4282	TMD
	Hum.	0.5356	NASA
0018 Uttaradit	Prec.	0.1673	TMD
	Prec.	0.4056	NASA

N 17°37'00.0''	Hum.	0.4991	TMD
E 100°05'60.0''	Hum.	0.5034	NASA
0095 Nan	Prec.	0.0024	TMD
	Prec.	0.3923	NASA
N 18°46'01.0''	Hum.	0.5348	TMD
E 100°45'47.2''	Hum.	0.4689	NASA

2.2 Extreme Gradient Boosting (XGBoost) Algorithm for Reservoir Inflow Prediction

To develop the daily and monthly prediction models of reservoir inflow of the Sirikit Dam, the Extreme Gradient Boosting (XGBoost) which is a decision–tree–based ensemble machine learning algorithm, was used in this study.

XGBoost is broadly utilized for supervised learning problems, where the training data y_i is used to predict a target variable p_i . The following shows the basic elements of supervised XGBoost learning that relies on minimizing the objective function. The group of functions that are minimized are called “loss functions”. p_i is expressed as a variety of tasks such as regression, classification, and ranking. The task of training the model is to find the best parameters θ that best fit the training data y_i and label p_i . To train the model, the objective function measuring how well the model is suited with the training data, should be defined. In general, a characteristic of objective functions contains two main terms; (1) training loss function and (2) regularization term as expressed in Eq. (1)

$$Obj(\theta) = L(\theta) + \Omega(\theta) \quad (1)$$

where, θ represents the best parameter that fits the training inflow data (y_i) and predicted output (p_i). $L(\theta)$ is the training loss function which can be categorized into two types; classification and regression losses. A common type of regression loss is mean squared error as given in Eq. (2).

$$L(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - p_i)^2 \quad (2)$$

The regularization term $\Omega(\theta)$ in Eq. (3) is one of the significant term that helps control the complexity of the model and avoid overfitting.

$$\Omega(\theta) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \sum_{i=1}^T O_{value}^2 \quad (3)$$

where, γ is hyperparameter that is used to define the minimum loss reduction required to make a further partition on a leaf node of the tree. T is the number of terminal nodes or leaves of a tree. λ is a parameter used to handle the regularization part of

XGBoost. O_{value} is an output value for the leaves to minimize the whole equation.

The prediction for one given data is made by following the tree until the final node for prediction is accomplished. The tree is built from single leaf or root node. After that, the root node is split the leaf on the left and the leaf on the right. It keeps building trees until the errors are super small. Fig.2 illustrates the decision tree components of XGBoost.

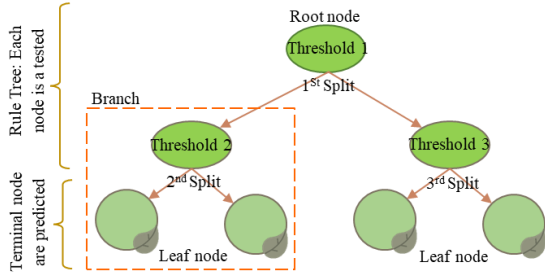


Figure 2 The decision tree components of the XGboost

The loss function $L(\theta)$ indicates the scores of the tree and leaf. It is noticeable that learning the tree structure is much more difficult than traditional optimization problems. It is intractable to learn all the trees at once. Instead, we use an additive strategy: fix what we have learned and add one new tree at a time. Similarity score is computed (Sim) to indicate a score of each node by using Eq. (4).

$$Sim = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - p_i)^2}{n + \lambda} \quad (4)$$

After that, the Gain value is calculated to measure how good a tree structure is. The Gain value indicates whether a tree can split the leaves or not. When the gain values are negative, the branch is removed as shown in Fig.3. This is actually called as the pruning techniques in tree-based models.

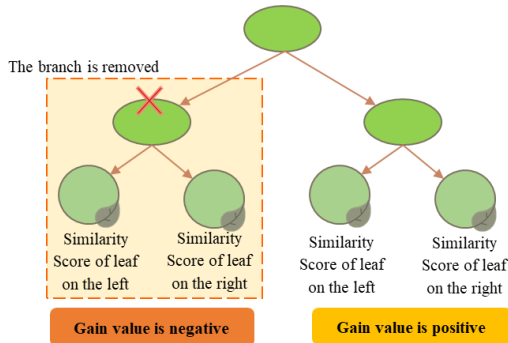


Figure 3 Steps to split the decision tree using Gain value

Ideally, we would enumerate all possible trees and pick the best one. The Gains values are illustrated in Eq. (5).

$$Gain\ value = Sim_{left} + Sim_{right} + Sim_{root} \quad (5)$$

where, Sim_{left} , Sim_{right} , and Sim_{root} represent the similarity score of the leaf on the left side, the right side, and the root node of the branch, respectively.

The tree structures are iterated for T iterations until the required number of models are built. Building the iterative tree are finally stopped. The output values (O_{value}) are calculated by Eq. (6) for all leaves to get the final tree at the end of first model since some leaf has more than one residual.

$$O_{value} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - p_i)}{n + \lambda} \quad (6)$$

In addition, the precision of prediction model is controlled by learning rate (eta: ϵ). The learning rate must be set appropriately to obtain accurate prediction results and avoid overfitting.

In this study, the prediction of reservoir inflow at time t (p_i^t) by XGBoost is the additive sum of all previous predictions made by the model. In other words, the final prediction is the additive sum of the initial predicted value (p_i^0) and objective function combining with loss function and a regularization term, as shown in Eq. (7).

$$p_i^t = p_i^0 + \epsilon [\sum_{i=1}^n L(y_i, p_i^0 + O_{value}) + \frac{1}{2} \lambda O_{value}^2] \quad (7)$$

2.3 Evaluation of Prediction Model Performance

To evaluate the prediction model performance, the statistical methods; Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Squared Error (MSE), Coefficient of Determination (R^2), Coefficient of Correlation (R), and Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) were used to indicate the perfect match between the predicted values and observation values. The RMSE and MSE are frequently used to evaluate how closely the prediction result match the observation data based on standard deviations [8]. The R and R^2 are statistical measures describing the degree of linear correlation between two independent variables [9]. The NSE is the normalized statistic that determines the relative magnitude of the residual variance compared to observed data variance [10].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - p_i)^2}{n}} \quad (8)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - p_i)^2}{n} \quad (9)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (p_i - \bar{p}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2} \quad (10)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (p_i - \bar{p})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}} \quad (11)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

In the Eq. (8) – (12), O_i and p_i are observed inflow and predicted inflow at time t , respectively; \bar{O} and \bar{p} are the average values of observed inflow and predicted inflow, respectively, and n is the number of observations.

The R and R^2 values range from -1 to 1 and $0-1$, respectively. It implies a perfect fit when RMSE and MSE values are approach to 0 . The NSE value ranges between $-\infty$ to 1 . The XGBoost model produces reliable and robust prediction results when the R and R^2 are relatively approach to 1 , RMSE and MSE values are small, and NSE value should be approximately 1 .

2.4 Development of Reservoir Inflow Prediction Models

RStudio; an open–source software library for R programming, was used in this study to develop the reservoir inflow prediction model of the Sirikit Dam through machine learning. As aforementioned in 2.1, selecting the input variables for the development of prediction models was carried out through the analysis of correlation to ensure that the prediction model can capture the strong relationship between the inputs and target variable (reservoir inflow). Therefore, setting the model structures were performed corresponding to the model input variables selected, the ratio of training–testing dataset (60:40/70:30/80:20), number of average inflow at the delayed time steps (3 and 7), climate and observed inflow data at time step t , and learning rates (0.1/0.01/0.001). The prediction model inputs were observed inflow at time step t , average inflow at the delayed time steps $t-1, \dots, t-3$, average inflow at the delayed time steps $t-1, \dots, t-7$, precipitation at time step t , and humidity at time step t . Consequently, 54 scenarios of XGBoost daily and monthly models ($@3 \times 2 \times 3 \times 3$) were trained and evaluated to produce good prediction results as shown in Fig.4.

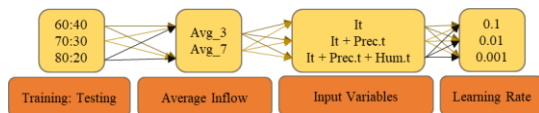


Figure 4 Input variables and model parameters for developing the reservoir inflow prediction models

A number of training options and several model parameters were tested to find the best predictive performance of the reservoir inflow. The adaptive parameters of the XGBoost were also updated depending on given loss function of an iteration step. The workflow of model development for reservoir inflow prediction by XGBoost algorithm is illustrated in Fig.5

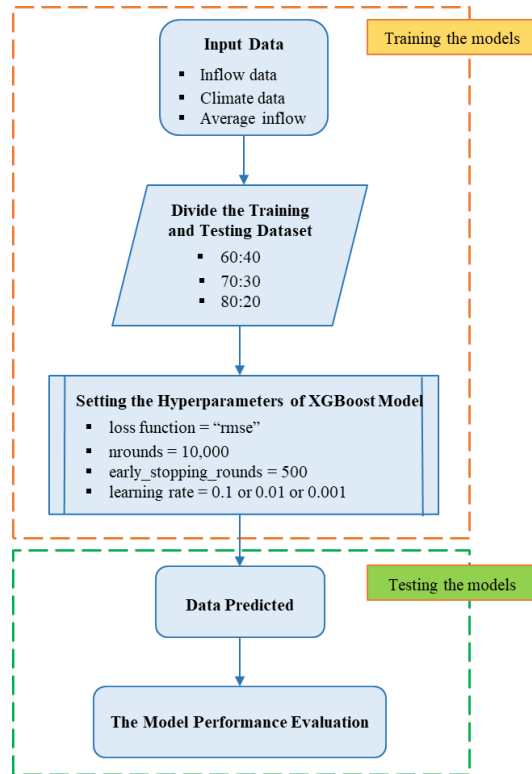


Figure 5 The workflow of model development for reservoir inflow prediction

Firstly, input data was imported into the model. Secondly, the time series of selected inputs were divided into training and testing datasets according to the designated ratio. Thirdly, implementation of XGBoost training model was controlled by the hyperparameter setting [11, 12] such as number of iterations ($nrounds$), learning rate (Eta), and early stopping rounds ($early_stopping_rounds$) parameters. Accordingly, the maximum number of iterations was 10,000. The learning rate allows model to achieve faster convergence of training dataset. So, the learning rates of 0.1, 0.01, and 0.001 were determined in this study. The early stopping rounds are generally used to stop training procedures when the loss on training dataset starts increasing. In this study, the early stopping round was set every

500 iterations if the performance on RMSE was not improved.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 The Predictive Performances of the Reservoir Inflow Prediction Models of Sirikit Dam

The predictive performances of two prediction models of Sirikit Dam; daily and monthly models; were considerably evaluated in terms of quantitative and qualitative manners as summarized in Table 3. Moreover, the qualitative comparison between observed and predicted inflows of the best daily and monthly prediction models were also investigated in Table 4 to reassure that the prediction model could yield good predictive results representing the occurrences of climate-related extreme events.

The result of correlation analysis in Table 2 shows that the precipitation data collected from observed station of TMD and NASA data services at Station 0018-Uttaradit gave higher correlation with the reservoir inflow with 0.1673 and 0.4056, respectively by comparing with other neighboring climate stations nearby the Sirikit Dam. Therefore, two important variables of climate data; precipitation and humidity of Station 0018 were then considered to identify the model structures for prediction. In addition, the moving average of reservoir inflow at the delayed time steps and observed inflow at time step t were also used as key inputs in the prediction models.

It was appeared when 54 scenarios of daily prediction models were validated that the input structure of the best daily prediction model was the observed inflow at time step t , and average inflow at the delayed time steps $t-1, \dots, t-3$. For 54 scenarios of the monthly models, the best input structure for prediction was the observed inflow at time step t , average inflow at the delayed time steps $t-1, \dots, t-7$, and precipitation at time step t at Station 0018. The predictive performance for the daily model after the validation process reached high up to 0.8362 of R^2 and 0.8161 of NSE. However, it is found that the predictive performance became lower for the monthly model with 0.5196 of R^2 and 0.5128 of NSE.

Moreover, separating the training and testing datasets using 80:20 and 70:30 ratio gave the robust performance for the daily model and monthly model, respectively. The effect of moving average of reservoir inflow identified as the prediction inputs (avg_3, avg_7) did not alter much on the predictive performances of daily and monthly models.

The important role of learning rates on the predictive performance is also exhibited in Fig.6. It is illustrated that when the learning rates of 0.1, 0.01, and 0.001 were identified, the root mean square of prediction errors were profoundly decreased within the number of iterations of 10,000 for both the training dataset (green line) and testing dataset (red

line). However, suitable learning rates were 0.1 for the daily prediction model and 0.001 for the monthly prediction model.

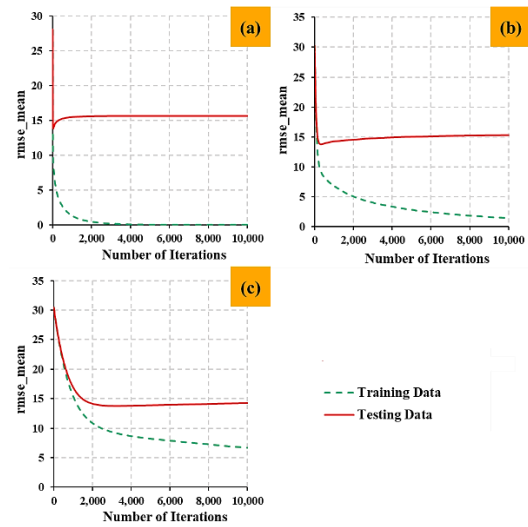


Figure 6 The relationship between number of iterations and root mean square of prediction errors (rmse_mean) for the learning rate of (a) 0.1, (b) 0.01, and (c) 0.001

3.2 Comparison of Predicted Inflows Obtained from the Best Daily and Monthly Prediction Models and Observed Inflows of Sirikit Dam

The quantitative and qualitative comparison between observed and predicted inflows of the best daily and monthly models are presented in Table 4 and Fig.7-8. It can be seen in Fig.7 that the daily predicted inflows were definitely closed to the daily observed inflows for both the training and testing datasets when daily prediction model was performed. In addition, the average daily inflow performed by the daily prediction model was really closed to the observed values with small percentage difference of -3.58% and -2.38% for the training and testing datasets, respectively as shown in Table 4. The volume error of average daily inflow were -0.62 and -0.34 MCM for the training and testing datasets, respectively which were slightly underestimated. However, it showed higher percentage of underestimation of -33.77% (-74.92 MCM) and -46.78% (-102.31 MCM) for the training and testing datasets when comparing the daily peak flows made by the daily prediction model with the observed values. This reflected that daily prediction model could not implement well to predict the extreme events.

Fig.8 depicts the qualitative performance of the best monthly prediction model for reservoir inflow of Sirikit Dam. It was likely similar in term of the inflow pattern between the observed and predicted inflows during 2000-2020. However, higher



percentage difference was found for the monthly prediction models when the average and peak inflows were considerably investigated as shown in Table 4. The volume error of average monthly inflow were -46.96 and +1.74 MCM for the training and testing datasets, respectively. The percentage difference of the average monthly inflow was -8.91% for the training dataset and +0.39% for the testing dataset. It showed higher percentage of

underestimation of -32.98% (-1,021 MCM) and -27.16% (550 MCM) for training and testing datasets when comparing the monthly peak flows with the observed values.

This signifies that predictive performance of daily prediction model is more reliable and robust than the monthly prediction model. Moreover, the capability to characterize and predict the dynamics of extreme values is still weak.

Table 3 The predictive performance of the reservoir inflow prediction models of Sirikit Dam during 2000–2020

Model setting	Model Inputs	Daily prediction model			Monthly prediction model		
Training: Testing Ratio	–	60:40	70:30	80:20	60:40	70:30	80:20
Inputs	Avg. Inflow t-1 to t-3 (Avg_3)	✓	✓	✓	–	–	–
	Avg. Inflow t-1 to t-7 (Avg_7)	–	–	–	✓	✓	✓
	Inflow t (It)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Prec.t	–	–	–	✓	✓	✓
Learning rate	–	0.1	0.1	0.1	0.01	0.001	0.01
Training dataset	RMSE	8.7749	8.6989	8.3666	485.0587	443.3527	428.8864
	MSE	76.9993	75.6713	69.9998	235,281.95	196,561.61	183,943.56
	R ²	0.8890	0.8843	0.8837	0.4643	0.4928	0.4984
	R	0.9428	0.9404	0.9400	0.6814	0.7020	0.7059
	NSE	0.8740	0.8675	0.8711	0.4191	0.4727	0.4803
Testing dataset	RMSE	8.4261	8.7146	9.0171	363.4004	358.2783	376.2822
	MSE	70.9985	75.9451	81.3076	132,059.86	128,363.36	141,588.32
	R ²	0.8267	0.8310	0.8362	0.4847	0.5196	0.5090
	R	0.9092	0.9116	0.9145	0.6962	0.7208	0.7134
	NSE	0.8176	0.8124	0.8161	0.4424	0.5128	0.5054

Table 4 Comparison of predicted inflows obtained from the best daily and monthly prediction models and observed inflows of Sirikit Dam

Model type	Daily					
Model parameters	Training–Testing Ratio: 80:20					
	Inputs: Avg. Inflow t-1 to t-3					
	Learning Rate: 0.1					
Predictive performance	Average inflow (MCM/day)			Peak inflow (MCM/day)		
	Observed	Predicted	Δ (%)	Observed	Predicted	Δ (%)
Training data set	17.32	16.70	-0.62 (-3.58)	221.87	146.95	-74.92 (-33.77)
Testing data set	14.26	13.92	-0.34 (-2.38)	218.70	116.39	-102.31 (-46.78)
Model type	Monthly					
Model parameters	Training–Testing Ratio: 70:30					
	Inputs: Inflow t, Avg. Inflow t-1 to t-7, Precipitation t					
	Learning Rate: 0.001					
Predictive performance	Average inflow (MCM/month)			Peak inflow (MCM/month)		
	Observed	Predicted	Δ (%)	Observed	Predicted	Δ (%)
Training data set	527.03	480.07	-46.96 (-8.91)	3,095.97	2,075.05	-1,020.9 (-32.98)
Testing data set	441.00	442.74	+1.74 (+0.39)	2,026.29	1,475.96	-550.33 (-27.16)

The best predictive performance of daily inflow prediction model of Sirikit Dam during 2000–2020

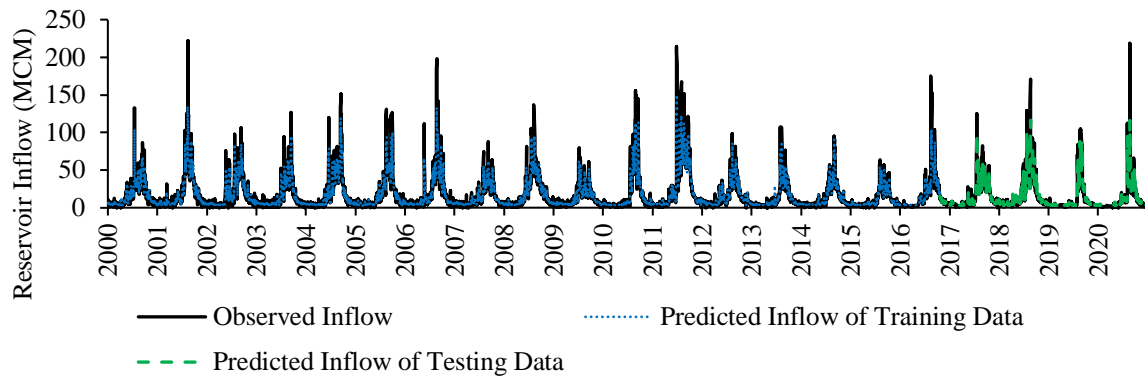


Figure 7 The qualitative comparison between observed and predicted inflows of the best daily model with model parameters: Training–Testing Ratio: 80:20, Inputs: Avg. Inflow $t-1$ to $t-3$, Learning Rate: 0.1

The best predictive performance of monthly inflow prediction model of Sirikit Dam during 2000–2020

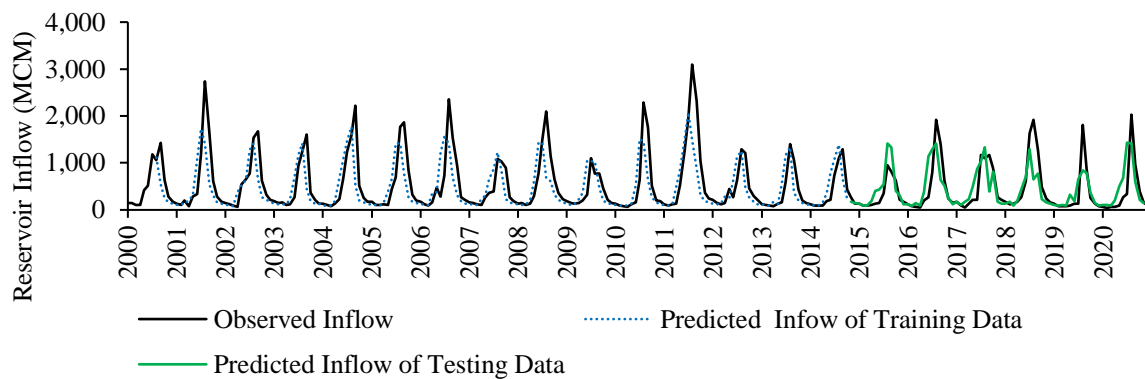


Figure 8 The qualitative comparison between observed and predicted inflows of the best monthly prediction model with model parameters: Training–Testing Ratio: 70:30, Inputs: Inflow t , Avg. Inflow $t-1$ to $t-7$, Precipitation t , Learning Rate: 0.001

4. CONCLUSIONS

XGBoost which is a tree-based ensemble machine learning algorithm, was used to predict the daily and monthly reservoir inflows of the Sirikit Dam, Thailand. Training and testing the prediction models were implemented using observed inflow and climate data during 2000–2020 as the key prediction inputs. The XGBoost model presented more reliable and robust prediction results especially for the daily prediction model with the highest R^2 , R , NSE and small values of $RMSE$ and MSE . It is found that the predictability of the XGBoost model to predict the daily reservoir inflow with good precision is strongly higher than the monthly inflow. Predicting the average values of the daily and monthly inflows gives the prediction results definitely closer to the observed inflows. However, the capability to characterize and predict the dynamics of extreme values of these two developed models is still weak. Therefore, to improve the

quality of machine learning algorithm for hydrological prediction, the model parameters need to be optimized. In addition, conducting the further study using the technological advancement of machine learning is highly encouraged for the achievement of hydrological forecast on water resources management.

5. ACKNOWLEDGMENTS

Authors would like to acknowledge the Thailand Science Research and Innovation (TSRI) for providing financial support. We are cordially thankful to the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), Thailand Meteorological Department (TMD), and the Royal Irrigation Department (RID) for providing research data.



REFERENCES

- [1] Chai, S., (2004). Artificial intelligence and social theory: a one-way street. *Perspectives*, 27(4):11–12.
- [2] Cerqueira, V., Torgo L., Soares, C. (2019). Machine learning vs statistical methods for time series forecasting: size matters. arXiv:1909.13316.
- [3] Mosavi, A., Ozturk, P., Chau, K. (2018). Flood prediction using machine learning models: literature review. *Journal of Water*, 10(11),1536:1–40.
- [4] Chen, T.Q., Guestrin, C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. arXiv:1603.02754v3.
- [5] Wang, L., Wang, X., Chen A., Jin, X., Che, H. (2020). Prediction of type 2 diabetes risk its effect evaluation based on the XGBoost model. *Healthcare*, 8(247):1–12.
- [6] Ni, L., Wang, D., Wu, J., Wang, Y., Tao, Y., Zhang, J., Lie, J. (2020). Streamflow forecasting using extreme gradient boosting model coupled with Gaussian mixture mode. *Journal of Hydrology*, 586:124901.
- [7] Osman, A.I.A., Ahmed, A.N., Chow, M.F., Huang, Y.F., El-Shafie, A. (2020). Extreme gradient boosting (Xgboost) model to predict the groundwater levels in Selangor Malasia. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2):1545–1556.
- [8] Karin K. (2018). *Statistical Forecasting*. Se-education Public Company Limited, Bangkok, Thailand, 17–86.
- [9] Al-Aqeeli, Y.H., Almohseen, K.A., Lee, T.S., Aziz, S.A. (2015). Modelling monthly operation policy for the Mosul Dam, northern Iraq. *Journal of Hydrology*, 5(2):179–193.
- [10] Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual model. Part I–A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290.
- [11] Brownlee, J. (2018). *XGBoost with Python Gradient Boosted Trees with XGBoost and Scikit-Learn: Machine Learning Mastery*. Australia, 1–115.
- [12] Qin C., Zhang, Y., Bao, F., Zhang, C., Liu, P., Peipei, L. (2021). XGBoost Optimized by Adaptive Particle Swarm Optimization for Credit Scoring. *Computer Science*, ID 233649717.



TRACING CROP WATER REQUIREMENT IN THE PUMPING, GRAVITATIONAL AND INUNDATION IRRIGATION SCHEMES OF THE GREATER CHAO PHRAYA RIVER BASIN USING CLOUD-BASED IRRISAT APPLICATION

Paphanin Phutonglom¹, Areeya Rittima^{2*}, Yutthana Phankamolsil³, Allan Sriratana Tabucanon⁴, Wudhichart Sawangphol⁵, Jidapa Kraissangka⁶, Yutthana Talaluxmana⁷, and Varawoot Vudhivanich⁸
1,2* Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, Thailand
3 Environmental Engineering and Disaster Management Program, Mahidol University, Kanchanaburi Campus, Thailand
4 Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Thailand
5,6 Faculty of Information and Communication Technology, Mahidol University, Thailand
7 Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand
8 Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Thailand
*Corresponding author's e-mail: areeya.rit@mahidol.ac.th

ABSTRACT

Tracing crop coefficient (K_c) at all the stages of crop growth is commonly essential for an accurate estimation of crop water use. This study applied the cloud-based IrriSAT application to trace the dynamic values of crop coefficient in three different sorts of irrigation schemes; pumping, gravitational and inundation irrigation for estimating crop water requirement in the Greater Chao Phraya River Basin. Three selected irrigation schemes; Bang Bal (BB), Thabua (TB), and Yom-Nan (YN) representing pumping, gravitational, and inundation irrigation schemes were selected to trace crop coefficient values of in-season and off-season crops and to estimate long-term crop water requirement (ET_c) from 2015–2020. The results of dynamic values of K_c -IrriSAT were verified and adjusted with average K_c -RID which were calculated as a function of K_c from field observation for the different types of crops and accumulated area size monitored by GISTDA. The results revealed the similar patterns of average K_c generated by IrriSAT corresponding to the average K_c -RID. After the calibration procedure was successfully done, the correlations between K_c -IrriSAT adjusted and average K_c -RID for BB, TB, and YN irrigation schemes are relatively higher with R^2 of 0.8304, 0.8466, and 0.8314, respectively. In addition, it shows the explicit variability on monthly and yearly crop water demands of these three sorts of irrigation schemes when the adjusted K_c -IrriSAT were employed. It would be concluded that cloud-based IrriSAT application can be a very supportive tool in estimating the actual crop water requirement particularly for irrigators to evaluate the current status of irrigation water use and to improve the irrigation efficiency at the field scale.

Keywords: Crop Coefficient, Crop Water Requirement, Reference Crop Evapotranspiration, Cloud-Based IrriSAT Application, Normalized Difference Vegetation Index

1. INTRODUCTION

Thailand has been considered as the regional leader for agricultural production in the Southeast Asia. It is stated that the economic development of Thailand has been predominantly driven by the agricultural sector. Therefore, enhancing agricultural productivity in the large-scale irrigation schemes plays an important role to raise livelihood of the local people and to drive the economic growth of the country [1]. Importantly, water supply facilities and sufficient irrigation water should be provided to farmers according to the agricultural water demand to increase crop yields.

Increasing water demand for multiple uses in the Greater Chao Phraya River Basin (GCPYRB) which is located in the central region of Thailand, has embraced the risk in water resource management especially to satisfy agricultural water demand in the Greater Chao Phraya Irrigation Schemes (GCPYIS). Due to uncertainty of water supply from the

headwater of the Chao Phraya River, the extreme events of flood and drought have been frequently occurred in the past few decades [2]. Therefore, tracing crop water requirement (ET_c) at all the stages of crop growth in the various sorts of irrigation schemes is necessarily essential to estimate the right amount of crop water demand in GCPYIS.

Crop Water Requirement (CWR) is principally the precise amount of water consumed through evapotranspiration and to meet crop water needs during the specified time periods. In other words, CWR, also known as crop evapotranspiration (ET_c), is described as the depth of water (millimeters) needed to compensate for the water losses through crop evapotranspiration. The main factors affecting crop water requirement are climate factors, crop types, and growth stage of crops. Crop water requirement can be derived based upon the reference crop evapotranspiration (ET_o) and crop coefficient (K_c). The reference evapotranspiration (ET_o) is the

rate of evapotranspiration from a hypothetical reference crop which is relatively subject to climate conditions [3]. The crop coefficient (K_c) varies accordingly with crop types and development stages of the crops. The values of crop coefficient for a given crop have represented the dynamics of crop evapotranspiration [4].

Since most of the irrigated land area in Thailand are continually cultivated throughout the year, it is rarely possible to clearly determine the beginning of cultivation and to find the dynamic changes of K_c and crop evapotranspiration (ET_{km^2}) values over a year. Accordingly, this study aims at tracking the dynamic values of crop water requirement (ET_c) in the different sorts of irrigation schemes to provide useful information and tools for the analysis of agricultural water requirement in the Greater Chao Phraya River Basin. The cloud-based IrriSAT application which is satellite-based irrigation scheduling service is proposed in this study. IrriSAT was developed in 2005 and designed to help farmers with irrigation management at a wide range of irrigation scales [5]. The reference crop evapotranspiration (ET_o) is estimated by FAO Penmen Monteith equation using observations from weather stations. IrriSAT can also anticipate crop water requirement by referring to the strong relations between the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) [6] from the cultivated land and crop coefficient (K_c). Moreover, water balance deficit in the root zone of crops based upon the water balance approach can be traced to indicate the levels of irrigation water requirements.

2. METHODOLOGY

2.1 Study Area

The study area is in the Greater Chao Phraya Irrigation Scheme (GCPYIS) occupying an irrigation service area of more than 19,654 km² (12 million rai). GCPYIS lies in the Lower Ping, Lower Nan and Chao Phraya–Thachin River Basins along the Ping, Nan and Chao Phraya–Thachin Rivers, respectively as can be seen in Fig.1–Fig.3. The general characteristics of 35 irrigation schemes in GCPYRB are summarized in Table 1. However, only three different sorts of irrigation schemes in GCPYIS representing pumping, gravitational, and inundation irrigation were selected to trace the dynamic values of crop water requirement in this study; Bang Bal (BB), Thabua (TB), and Yom–Nan (YN). Pumping irrigation is powered by pumping system installed at the site to supply the irrigation water to the fields. For gravitational irrigation, the flow irrigation water is directly supplied to the fields through the canals off taking from the headworks. Inundation irrigation, also known as river–canal irrigation, is a type of direct irrigation without construction of hydraulic structures to control the water level in the river.

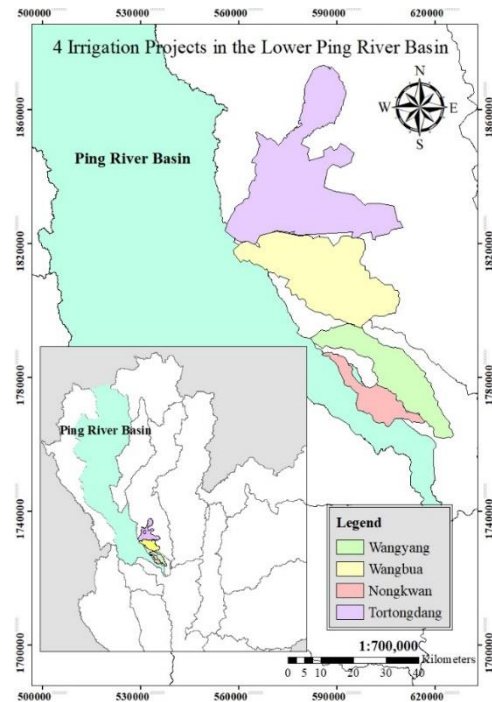


Figure 1 Four irrigation schemes in the Lower Ping River Basin

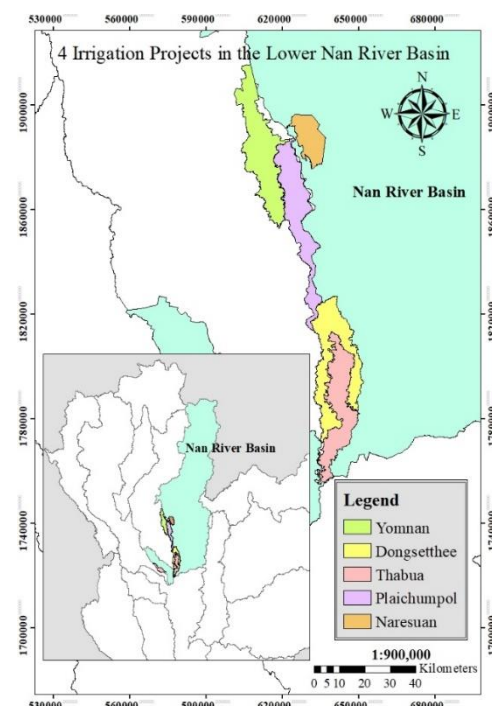


Figure 2 Five irrigation schemes in the Lower Nan River Basin

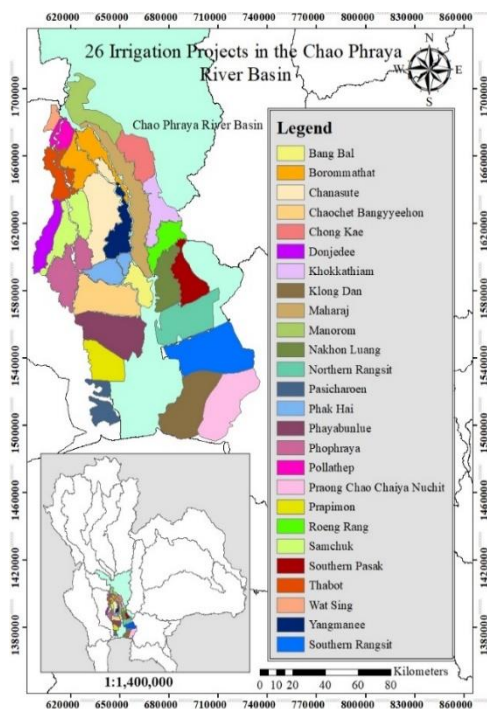


Figure 3 Twenty-six irrigation schemes in the Chao Phraya–Thachin River Basin

Table 1 General characteristics of irrigation schemes in GCPYRB

No.	Name of Irrigation Scheme	Type of Irrigation Scheme	Irrigation Area (km ²)
Lower Ping River Basin			
1	Tortongdang	Inundation	992
2	Wangyang	Inundation	1,336
3	Wangbua	Inundation	1,129
4	Nongkwan	Inundation	
Lower Nan River Basin			
1	Dongsethee	Gravitation	449
2	Thabua*	Gravitation	398
3	Plaichumpol	Gravitation	433
4	Naresuan	Gravitation	172
5	Yom–Nan*	Inundation	515
Chao Phraya–Thachin River Basin			
1	Wat Sing	Pumping	123
2	Bang Bai*	Pumping	268
3	Pollathep	Gravitation	200
4	Thabot	Gravitation	338
5	Samchuk	Gravitation	609
6	Donjedee	Gravitation	270
7	Phophraya	Gravitation	659
8	Borommathat	Gravitation	677
9	Chanasute	Gravitation	880
10	Yangmanee	Gravitation	403
11	Phak Hai	Gravitation	338
12	Maharaj	Gravitation	853
13	Manorom	Gravitation	529
14	Chong Kae	Gravitation	449

No.	Name of Irrigation Scheme	Type of Irrigation Scheme	Irrigation Area (km ²)
15	Khokkathiam	Gravitation	421
16	Roeng Rang	Gravitation	320
17	Southern Pasak	Gravitation	404
18	Nakhon Luang	Gravitation	476
19	Northern Rangsit	Gravitation	773
20	Southern Rangsit	Gravitation	1,112
21	Chaochet Bangyeehon	Gravitation	754
22	Phayabunlue	Gravitation	814
23	Prapimon	Gravitation	426
24	Pasicharoen	Gravitation	337
25	Klong Dan	Gravitation	819
26	Praong Chao Chaiya Nuchit	Gravitation	978
	Total		19,654

2.2 Data Collection

Data required for this study includes (1) GIS shapefiles of the study area collected from the Land Development Department (LDD) of Thailand, (2) crop coefficient values provided by the Royal Irrigation Department (RID) of Thailand, (3) planting area of four main types of crops including rice, maize, sugarcane, and cassava monitored by the GISTDA during 2018–2019, and (4) climate data collected from the Thai Meteorological Department (TMD) during 2000–2020 from the nearest climate stations. The simplified overview of data collection process is presented in Fig.4.

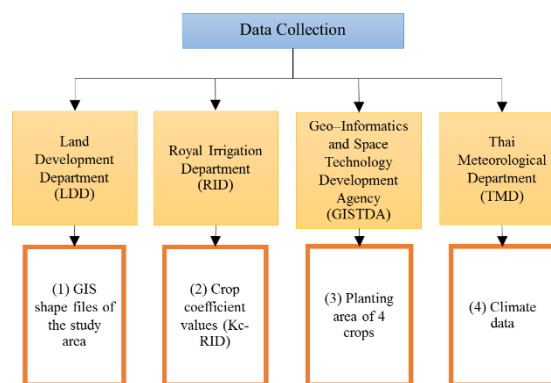


Figure 4 Simplified overview of data collection process

The GIS shapefiles were used to delineate the location of the irrigation area by IrriSAT application. Crop coefficient values (K_c) corresponding to Penman–Monteith equation of major crops, which are publicly provided by Royal Irrigation Department (RID) from field measurement, was used to validate the results of K_c estimation from IrriSAT. The planting area of four main types of crops monitored by GISTDA using remote sensing technique was used to verify the area

size of each crop. In addition, the long-term monthly climate data including atmospheric pressure, temperature, relative humidity, wind speed as well as sunshine duration during 2000–2020 from the nearest climate stations in the study area was used to calculate the reference crop evapotranspiration (ET_o).

2.3 Estimating Crop Coefficient Using Cloud-Based IrriSAT Application

Estimating the dynamic values of crop coefficient over the growth stages can be commonly implemented by cloud-based IrriSAT application which is the satellite-based decision support tool for irrigators. In fact, cloud-based IrriSAT application has been developed to estimate K_c , ET_o and to predict daily and seven-day crop water use (ET_c) [6]. These are presented as aggregated values at various spatial and temporal scales. Due to the limits of global climate data at ground stations in Thailand available on the cloud platform, consequently, ET_o and ET_c cannot be generated and presented. However, the aggregated values of crop coefficient can be only evaluated by IrriSAT. To identify the crop growing area as input data of cloud-based IrriSAT application, the GIS shape files of three irrigation schemes must be converted into Keyhole Markup Language (KML) files as typically illustrated in Fig.5.

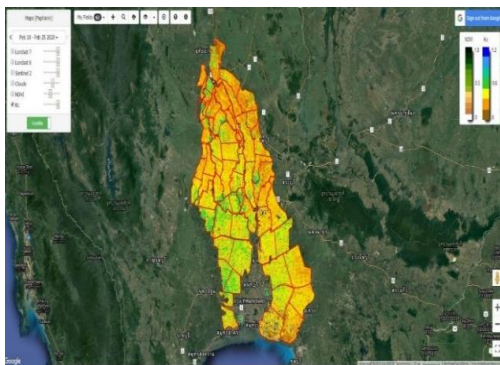


Figure 5 Display of the study area imported in cloud-based IrriSAT application

The maximum, average and minimum crop coefficient (K_c) values were then achieved. The results were automatically displayed in the form of the time series of the crop coefficient according to the specified duration of planting and harvesting dates of crops. However, crop water demand was not directly calculated by IrriSAT in this study. Therefore, the crop water demand (ET_c) for each irrigation area was computed by referring to the calculated reference crop evapotranspiration (ET_o) and crop coefficient performed by IrriSAT (K_c -IrriSAT). ET_o calculator was used as the analytical tool to calculate reference crop evapotranspiration.

The chart of crop coefficient generated from IrriSAT is illustrated in Fig.6.

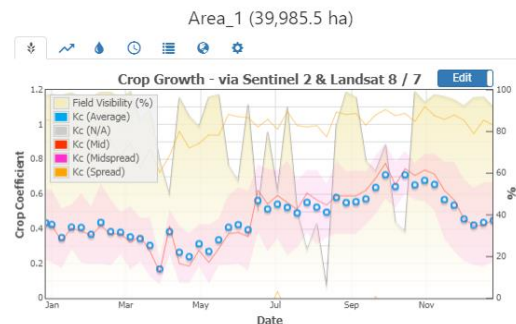


Figure 6 Typical chart of crop coefficient generated by cloud-based IrriSAT application

Cloud-based IrriSAT application was brought to estimate crop coefficient for three main irrigation schemes; BB, TB, and YN during 2015–2020. The results were generated in almost one week timeframe. Many forms of crop efficient namely; K_c (average), K_c (observed), K_c (override), K_c (stddev), K_c (min), K_c (Q1), K_c (median), K_c (Q3), and K_c (max) as well as field visibility (%) were accordingly generated. However, only K_c (average) was used to compare with those values of crop coefficient (K_c -RID) performed by using observation data from RID and GISTDA.

2.4 Estimating Average Crop Coefficient (Average K_c -RID) Using Observation Data

The results of dynamic values of K_c -IrriSAT from 2015 to 2020 were verified and adjusted with average K_c -RID which were calculated as a function of K_c from field observation for the different types of crop and accumulated area size of crops monitored using the remote sensing technique (GISagro 4.0) by GISTDA. Due to the limit of GISagro 4.0, the average K_c -RID on the weekly scale can be computed based upon four main types of crop namely; (1) rice, (2) sugarcane, (3) maize, and (4) cassava by using the Eq.(1).

$$\text{Average-}K_c\text{-RID} = \frac{(K_{cri} \times \text{Areari}) + (K_{csu} \times \text{Areasu}) + (K_{cmi} \times \text{Areami}) + (K_{cca} \times \text{Areaca})}{\text{Total Area}} \quad (1)$$

where, K_{cri} , K_{csu} , K_{cmi} , K_{cca} are crop coefficients of rice, sugarcane, maize, and cassava, respectively. Areari , Areasu , Areami , Areaca are the accumulated planting areas of rice, sugarcane, maize, and cassava, respectively.

Therefore, the calculation of average K_c -RID of BB, TB, and YN irrigation schemes was accordingly estimated based upon these four major crops planted during 2018–2019 which occupied only 58%, 66%, and 64% of the total cultivated areas, respectively.

2.5 Calibrating Crop Coefficient Values Done by IrriSAT

Calibrating K_c values performed by IrriSAT was conducted using least square criterion to envisage the good correlation between K_c -IrriSAT and average K_c -RID and to find the adjusted factors for the specified time periods [7]. The method of least squares is a standard approach in regression analysis to approximate the solution of overdetermined systems by minimizing the sum of the squares of the residuals made in the results [8]. In this study, two different periods of planting in-season and off-season crops in the area were identified to compute the adjusted factors of K_c -IrriSAT. These adjusted factors were solved using optimization solver based upon the long-term data sets of K_c -IrriSAT and average K_c -RID.

2.6 Estimating Reference Crop Evapotranspiration (ET_o)

The monthly calculations of reference crop evapotranspiration (ET_o) was implemented based upon the FAO Penman-Monteith equation using ET_o calculator [9]. The Penman-Monteith equation requires air temperature, humidity, solar radiation, and wind speed data as key inputs as expressed in Eq.(2).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

where, ET_o is reference evapotranspiration ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$), R_n is net radiation at the crop surface ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$), G is soil heat flux density ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$), T is the mean air temperature at 2 m height ($^{\circ}C$), u_2 is the wind speed at 2 m height ($m\ s^{-1}$), e_s is saturation vapor pressure (kPa), e_a is actual vapor pressure (kPa), $e_s - e_a$ is the saturation vapor pressure deficit (kPa), Δ is the slope of the vapor pressure curve ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$), and γ is the psychrometric constant ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$).

2.7 Calculating Long-Term Crop Water Requirement (ET_c)

The final step is to calculate long-term crop water requirement (ET_c) from 2015–2020 using Eq. (3) [10] after the calibration procedure for K_c adjustment and ET_o calculations were successfully done.

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (3)$$

where, ET_c is crop water requirement (mm/period), K_c is crop coefficient done by cloud-based irrisat application (K_c -irrisat adjusted) and average K_c -RID, and ET_o is reference crop evapotranspiration (mm/period).

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Crop Coefficient (K_c) Generated from Cloud-Based IrriSAT Application

The dynamic values of K_c -IrriSAT of three irrigation schemes were generated in many forms during 2015–2020 and were displayed in almost one week timeframe. However, only maximum K_c (average) was presented and used to compare the results with average K_c -RID as summarized in Table 2. It is found that the maximum values of K_c (average)-IrriSAT are 0.7019, 0.7997, and 0.7763 for BB, TB, and YN irrigation schemes, respectively which are relatively lower than those received from K_c (average)-RID with 1.4638, 1.4402, and 1.5042, respectively. In addition, the average values of K_c -IrriSAT among these different types of irrigation schemes are in the same range.

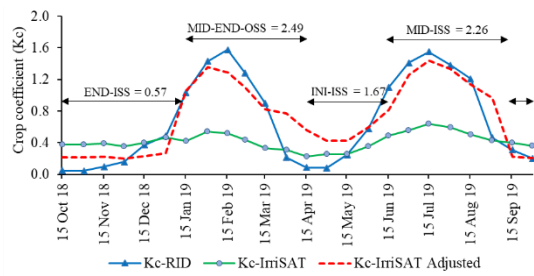
Table 2 Characteristics of crop coefficient values obtained from cloud-based IrriSAT application

Name of Irrigation Scheme	Type of Irrigation Scheme	Max. K_c (avg.)-IrriSAT	Max. K_c (avg.)-RID
BB	Pumping	0.7019	1.4638
TB	Gravitation	0.7997	1.4402
YN	Inundation	0.7763	1.5042

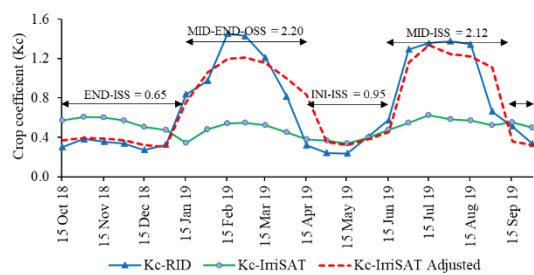
3.2 Relationship between K_c -IrriSAT and average K_c -RID

The relationships between K_c -IrriSAT and average K_c -RID before and after the calibration procedure corresponding to specific growing periods of three main irrigation schemes are presented in Fig.7 and Fig.8. Before calibrating, the patterns of K_c -IrriSAT and average K_c -RID over the growth stages of crops are likely similar. However, the K_c values calculated by IrriSAT for three irrigation schemes are highly deviated from average K_c -RID values in some growing periods in both in-season and off-season crops. It is found that the values of K_c -IrriSAT are higher than average K_c -RID from filed observation in initial and late stages of crop growth in dry and wet seasons for these three irrigation schemes. Meanwhile, the lower values of K_c -IrriSAT are found in the mid-stages of dry and wet seasons. The reason might be that evaluating K_c by IrriSAT on cloud-based platform entails the entire planting area. However, calculating average K_c -RID is manipulated based upon some specific types of crop in a given area. Therefore, calibrating K_c values performed by IrriSAT was then conducted using least square criterion to envisage the good correlation to the average K_c -RID. After calibrating, the adjusted factors corresponding to time periods identified can be made as presented in Table 3. The comparison of K_c -IrriSAT before and after adjustments with the average K_c -RID are shown in Fig.8. Correlations

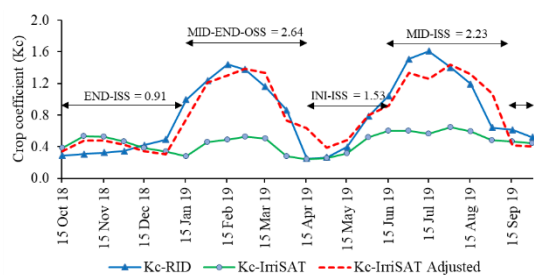
between K_c -IrrisAT after adjusted and average K_c -RID for BB, TB, and YN irrigation schemes are relatively higher with R^2 of 0.8304, 0.8466, and 0.8314, respectively as can be seen in Fig.4.



(a) Bang Bal



(b) Thabua

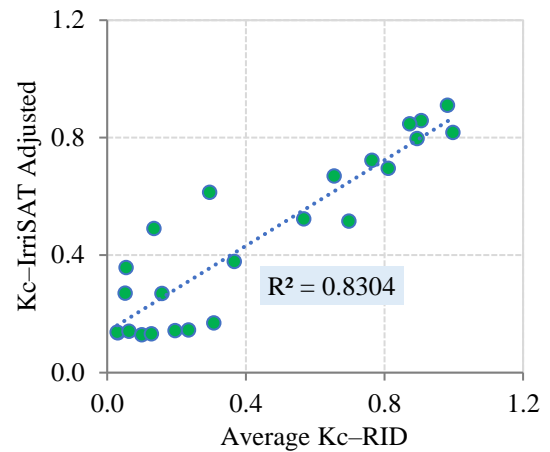


(c) Yom-Nan

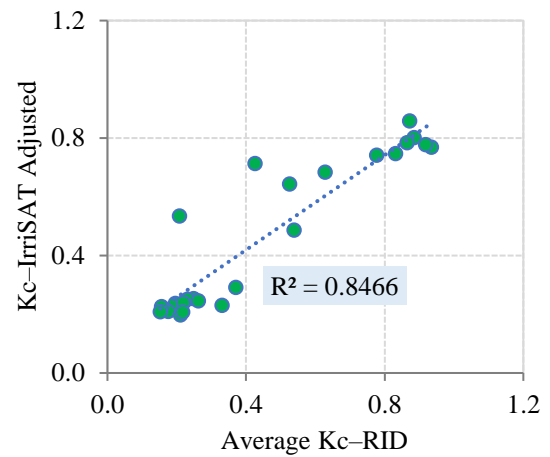
Figure 7 The pattern of K_c value over the growth stages of crops

Table 3 The adjusted factors of K_c -IrrisAT obtained using least square criterion

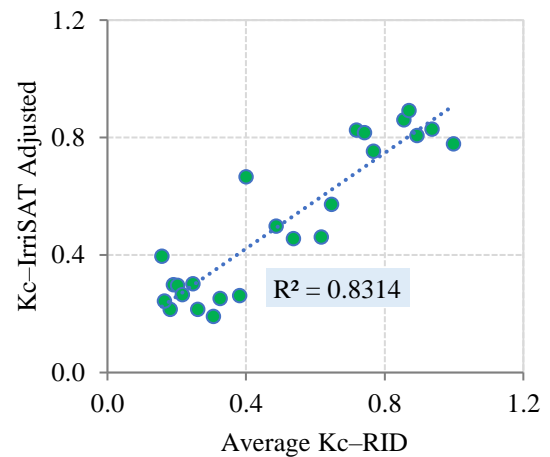
Season	Adjusted Factors			
	Off Season (OSS)	In Season (ISS)		
Stage	Mid-End	Initial	Mid	End
Period	1 st Jan to 15 th Apr	15 th Apr to 15 th Jun	15 th Jun to 1 st Sep	1 st Sep to 1 st Jan
BB	2.49	1.67	2.26	0.57
TB	2.20	0.95	2.12	0.65
YN	2.64	1.53	2.23	0.91



(a) Bang Bal



(b) Thabua



(c) Yom-Nan

Figure 8 The correlation between K_c -IrrisAT Adjusted and K_c -RID

3.3 The Results of Reference Crop Evapotranspiration (ET_o)

The calculation of the reference crop evapotranspiration (ET_o) for BB, TB, and YN irrigation schemes were accomplished using observed climate data at the nearest weather stations located in Ayutthaya, Phichit & Nakhon Sawan, and Phitsanulok & Sukothai Provinces, respectively.

The results of ET_o calculation are illustrated in Table 4. It is found that the average values of ET_o in the Pichit and Nakhon Sawan Provinces are relatively closer to the Phitsanulok and Sukhothai Provinces due to the similar physical circumstances in the Lower Nan Basin. On the other hand, the values of ET_o calculated using climate data in the Ayutthaya Province in the Chao Phraya–Thachin River Basin seem to be bigger over the year. However, the ranges of ET_o in this region vary between 4.30–6.10, 2.61–5.45, and 2.78–4.37 mm/day for BB, TB, and YN, respectively.

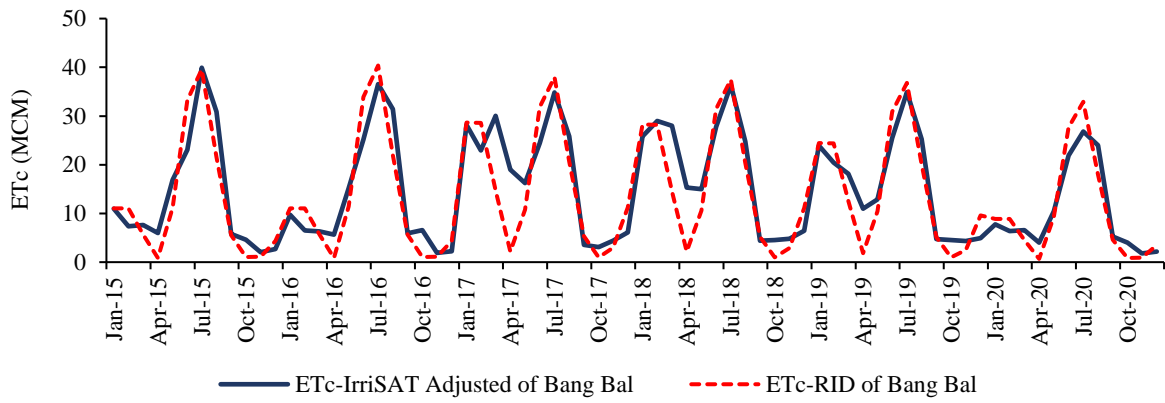
Table 4 Reference crop evapotranspiration values estimated by the FAO–Penman Monteith formula

Month	ET_o (mm/day)		
	FAO–Penman Monteith Formula		
	BB	TB	YN
Jan	4.69	2.95	2.87
Feb	4.47	3.88	3.37
Mar	5.35	5.00	3.88
Apr	5.39	5.45	4.28
May	5.23	5.08	4.37
Jun	5.29	4.84	4.26
Jul	5.23	4.61	4.19
Aug	4.98	4.33	4.14
Sep	4.31	3.85	3.94
Oct	4.30	3.32	3.54
Nov	4.79	2.84	3.03
Dec	5.29	2.61	2.78

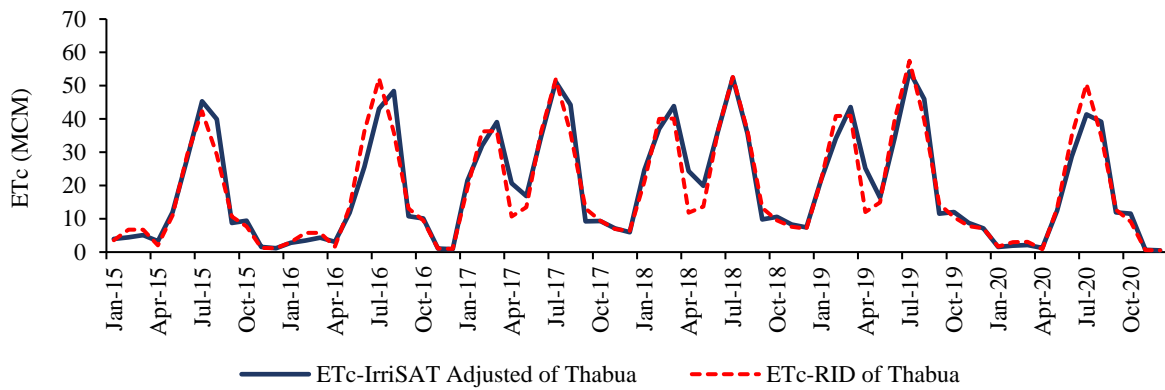
3.4 Comparison of Crop Water Requirement between ET_c –IrrisAT and ET_c –RID

Fig.9 and Table 5 show the calculated values of monthly and yearly crop water demands (ET_c) for three different sorts of irrigation schemes using two kinds of K_c namely, (1) K_c –IrrisAT adjusted and (2) average K_c –RID. It is illustrated that applying the average K_c –RID and adjusted K_c –IrrisAT values provide the similar patterns of the monthly crop water demands from 2015 to 2020 for BB, TB, and YN irrigation schemes. In addition, it shows the equality of mean of the yearly crop water demands of two datasets for these three irrigation schemes. However, when the adjusted K_c –IrrisAT was adopted under the same circumstances of cultivated area size used, the explicit variability on yearly crop water demands of BB, TB, and YN irrigation schemes was found. This is because the cloud–based IrrisAT application can provide the dynamic values

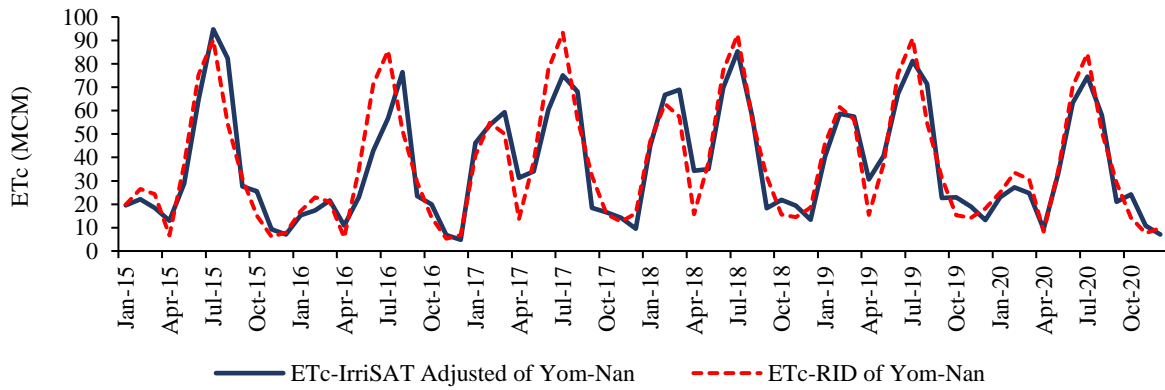
of K_c in accordance with the changes in planting area size and NDVI values. Among the different sorts of irrigation schemes selected in GCPYIS, the mean values of monthly and yearly crop water demand performed by adjusted K_c –IrrisAT are likely close to those obtained by K_c –RID for all sorts of irrigation. Moreover, the greater variability in the values of monthly and yearly crop water demands made by adjusted K_c –IrrisAT are predominantly found. However, the further study on the performances of IrrisAT in estimating K_c and ET_c values in the different sorts of irrigation is highly encouraged for the achievement of satellite–based crop water requirement estimation.



(a) Bang Bal



(b) Thabua



(c) Yom-Nan

Figure 9 The patterns of monthly ET_c values during 2015–2020 in each irrigation project



Table 5 Yearly crop water requirement values during 2015–2020

Year	Crop Water Requirement, ETc (MCM)					
	Bang Bal (BB)–Pumping		Thabua (TB)–Gravitation		Yom–Nan (YN)–Inundation	
	Kc–IrrisAT Adjusted	Average K _c –RID	Kc–IrrisAT Adjusted	Average K _c –RID	Kc–IrrisAT Adjusted	Average K _c –RID
2015	157.83	146.23	163.34	151.90	413.24	394.47
2016	153.20	148.46	165.41	178.92	319.60	366.20
2017	218.61	195.91	291.79	275.60	487.18	501.78
2018	222.21	193.22	310.28	289.91	535.16	526.37
2019	190.35	179.70	315.26	307.44	525.43	516.58
2020	121.00	120.62	153.39	165.03	376.51	398.45
Avg.	177.20	164.02	233.25	228.13	422.85	450.64
SD.	40.06	30.19	79.94	70.11	86.92	71.70
Var.	1,604.65	911.53	6,390.70	4,914.90	7,554.81	5,141.48

4. CONCLUSIONS

The cloud-based IrrisAT application can be a very supportive tool for tracking the dynamics of crop coefficient which is a key parameter for accurate estimation of crop water use. This study revealed the application of IrrisAT in estimating actual crop water demand promptly on cloud-based platform in various types of irrigation schemes in Thailand. In addition, the calibration procedures to find the adjusted factors of dynamic crop coefficients estimated by IrrisAT were also envisaged. The results show that the cloud-based IrrisAT application can deliver the explicit variability on monthly and yearly crop water demands in these three sorts of irrigation schemes which represent the pumping, gravitational and inundated irrigation in GCPYIS. In addition, it can be used for crop water demand estimation particularly in small to large scale irrigation areas. Importantly, it is very helpful for the water resources planners to identify affordable water delivery and to improve the irrigation efficiency at the field scale corresponding to the dynamic values of estimated crop water demand and water supply status.

5. ACKNOWLEDGMENTS

Authors would like to acknowledge the Thailand Science Research and Innovation (TSRI) for providing financial support. We are cordially grateful to the Royal Irrigation Department (RID) of Thailand and the Thai Meteorological Department (TMD) for providing research data.

REFERENCES

- [1] Ministry of Agriculture and Cooperatives of the Kingdom of Thailand (MOAC). (2016). Economic characteristics of Thailand. Agricultural Development Plan No. 12, Thailand, 12–81.
- [2] Thanadachophol, T., Teamsuwan, V., Udomsap, L., Wongsamut, W., Chamnankaew, U. (2020). An Analysis of Water Management in 2020 Drought Conditions, Thailand, 287–288.
- [3] Pereira, L.S., Alves, I. (2005). Crop Water Requirement. Encyclopedia of Soils in the Environment, 322–334. DOI: 10.1007/s12205–013–1638–5.
- [4] Pandey, V. (2021). Estimation of Crop Water Requirement. Fertigation Technologies for Micro Irrigated Crops, Apple Academic Press, 109–136. DOI: 10.1201/9781003084136–10.
- [5] Hornbuckle, J., Vleeshouwer, J., Ballester, C., Montgomery, J., Hoogers, R., Bridgart, R. (2016). Executive Summary. IrrisAT Technical Reference, 1.
- [6] Hornbuckle, J., Vleeshouwer, J., Ballester, C., Montgomery, J., Hoogers, R., Bridgart, R. (2016). Estimating the crop coefficient. IrrisAT Technical Reference, 5–7.
- [7] Kyaw, K.M., Rittima, A., Phankamolsil, Y., Tabucanon, A.R., Sawangphol, W., Kraisangka, J., Talaluxmana, Y., Vudhivanich, V. (2020). Tracing Crop Water Demand in the Lower Ping River Basin, Thailand using Cloud-Based IrrisAT Application. Proceedings of the 22nd IAHR–APD Congress 2020, September 14–17, Sapporo, Japan.
- [8] Demaison, J., Vogt, N. (2020). Least–Squares Method. Accurate Structure Determination of Free Molecules, 233–263. DOI: 10.1007/978–3–030–60492–9_9.
- [9] Saha, A. (2020). How to use FAO developed ET_o Calculator to estimate evapotranspiration from weather data. Determination of Hydro–geological Properties for Upper Soil Layer Regarding Irrigation design and Groundwater Recharge in Sylhet region, DOI: 10.13140/RG.2.2.27723.34080.
- [10] Allen, R., Wright, J.L., Pruitt, W.O., Pereira, L., Jensen, M. (1998). Water Requirements. Design and Operation of Farm Irrigation Systems 1998, 29, DOI: 10.1007/978–94–011–5131–3_2.



ASSESSMENT OF WEAP MODEL IN SIMULATING RAINFALL-RUNOFF RELATION IN THE PING AND WANG RIVER BASINS, THAILAND

Detchasit Raveephinit¹, Areeya Rittima^{2*}, Yutthana Phankamolsil³, Allan Sriratana Tabucanon⁴,
Wudhichart Sawangphol⁵, Jidapa Kraisingka⁶, Yutthana Talaluxmana⁷, and Varawoot Vudhivanich⁸

^{1, 2*} Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, Thailand

³ Environmental Engineering and Disaster Management Program, Mahidol University,
Kanchanaburi Campus, Thailand

⁴ Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Thailand

^{5, 6} Faculty of Information and Communication Technology, Mahidol University, Thailand

⁷ Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand

⁸ Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen,
Kasetsart University, Thailand

*Corresponding author's e-mail: areeya.rit@mahidol.ac.th

ABSTRACT

This study aimed at developing the physically-based rainfall-runoff model using the Water Evaluation and Planning system (WEAP) with the simplified coefficient method. The Ping and Wang River Basins in the northern region of Thailand were selected as study area to explain the hydrologic dynamics and responses of the implemented watershed system through rainfall-runoff relation. The monthly hydro-meteorological data during 2000–2020 was used as dataset for hydrological modelling by WEAP. To reflect the lumped hydrologic response, the study area in Ping and Wang River Basins were subdivided into 3 sub-basins; (1) Sub-Basin 1 (Upper Ping Basin), (2) Sub-Basin 2 (Lower Ping Basin), and (3) Sub-Basin 3 (Wang Basin). In addition, the land area was fractionally classified into 16 land use classes to identify the relevant inputs such as crop coefficient, areal rainfall, and reference evapotranspiration. Key model parameters; runoff coefficient, infiltration coefficient, and percent of effective rainfall, were estimated and adjusted manually to improve the model performance statistics. The model calibration and validation were implemented through comparison between monthly observed and simulated streamflow measured at 3 gauging stations; P.12C, P.17, W.4A on the Ping and Wang Rivers as well as the monthly inflow of Bhumibol Dam. The long-term simulation results showed that WEAP model could provide the reasonably good agreement of R^2 of 0.75–0.81 at all gauging stations except P.12C station where the hydrologic response has been strongly affected by the influence of regulated dam release. Based on the overall model performance statistics, predominant capability of WEAP model to simulate behavior of hydrologic responses was found particularly at the outlet of sub-basin (P.17 and W.4A gauging stations) and outflow point (reservoir inflow of BB Dam) where the impact of regulated flow on the model performance has been diminished.

Keywords: Ping River Basin, Wang River Basin, WEAP model, Rainfall-Runoff simulation

1. INTRODUCTION

The changing global climate driven by human-induced activities has drastically impacted on the world's water systems through the frequent occurrences of natural disasters. In Thailand, the impact of climate change has become the serious problems. It has led to the complexity of water resources management issues especially for the dam operation since the 2011 major flood occurred in the Northern and Central regions of Thailand. The significant changes of the regional scale shifts in the rainfall patterns have resulted in the incapability to potentially store water in the major reservoirs such as Bhumibol and Sirikit Dams in the northern region of Thailand. In the recent years, it is observable that the tendency of tropical storms occurring all year round regularly in this region is likely short in duration and sudden delay in the commencement or termination of rain particularly in wet season. Therefore, the considerable attention to imbalancing of the spatio-temporal distribution of water

availability and water demands have been paid by the key operational offices to reduce the economic losses caused by flooding and droughts.

Understanding the hydrologic behaviors and watershed responses altered by the influence of climate changes and anthropologic factors has played important role in coping with the hydrologic uncertainty and water supply-demand imbalance. Model-based assessment has been widely used to simulate both natural hydrological processes, land development activities, human-induced effects, and management strategies on water resources [1]. The relation of rainfall and runoff processes, low flow and flood peaks behaviors or the hydrologic properties can be well characterized by the physically-based hydrologic models [2]. The various types of the physically-based hydrologic models have been adopted to enhance understanding of the hydrologic processes and watershed responses [3]. The hydrological modelling practices through lumped and distributed parameter models such as

SWAT, WEAP, HEC-HMS, MIKE HYDRO Basin and others have been made in many parts of the world to explore the potential interactions among involved factors [4].

WEAP (water evaluation and planning) model was developed by the Stockholm Environment Institute (SEI) in 1988 [5]. It is a sort of lumped-parameter hydrologic representation creating the simulations of the natural rainfall-runoff processes and the management of implemented water system [1]. It is well known that WEAP model can be successfully used for climate change adaptation studies and a wide range of operational manageability of water resources [6].

In this study, the WEAP hydrologic model was developed for the Ping and Wang River Basins by aiming to assess the model efficiency in simulating the rainfall-runoff relation and to explain the hydrologic dynamics and responses of the implemented watershed system over long term periods in this region.

2. METHODOLOGY

2.1 Study Area

Ping and Wang River Basins are located in the northern region of Thailand with the total drainage area of 45,499 km² as shown in Fig.1. Ping and Wang River Basins have been considered as major sources of water to help support in supplying irrigation water for the Lower Ping and Chao Phraya Irrigation Schemes as well as for non-irrigation water uses downstream of the Bhumibol Dam. Ping River Basin covers 6 provinces in Thailand; Chiang Mai, Lamphun, Tak, Kamphaeng Phet, Nakhon Sawan, and Mae Hong Son. Approximately 67.32% of the land cover in the Ping River Basin is forest and agricultural land area is 25.17%. The urban and built-up land and miscellaneous land are 3.71% and 2.08%, respectively. The remaining portion of 1.71% is surface water body. The average monthly rainfall over the entire basin are approximately 163.99 mm/month in wet season (May-Oct) and 22.23 mm/month in dry season (Nov-Apr) showing high temporal variability of the rainfall amount [7].

Wang River Basin is situated close to Ping River Basin covering 4 provinces; Chiang Rai, Lampang, Tak, and Phrae in the North. Wang River is one of the principal tributaries of the Chao Phraya River flowing southwards to join the Ping River in Tak Province before discharging into the Chao Phraya River and the Gulf of Thailand. Most of the land area in the Wang River Basin is forest accounting for 73.09% of the entire basin. The percentage share of agricultural and urban and built-up land areas over the entire basin are 18.29% and 3.98%, respectively. The remaining 2.08% and 1.17% are miscellaneous land and water body. It is recorded that average monthly rainfall in wet and

dry seasons in Wang River Basin are 160.21 mm/month and 22.85 mm/month, respectively which are not much deviated from rainfall amount in Ping River Basin [7]. In other words, approximately 88% of the yearly rainfall falls during wet season and 12% exists during dry season in the Ping and Wang River Basins.

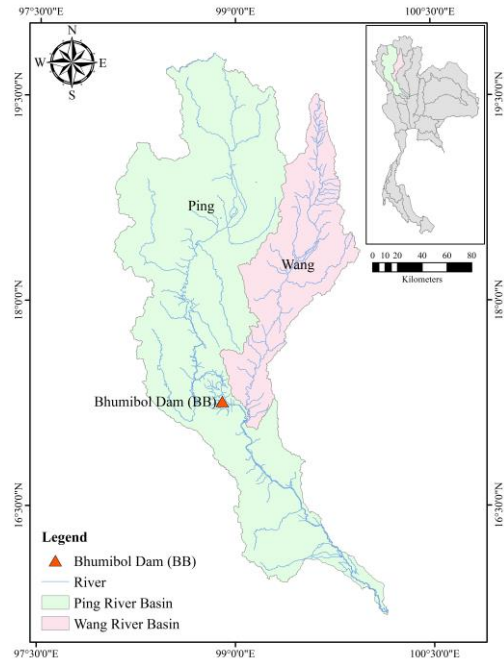


Figure 1 Location of the Ping and Wang River Basins in the northern region in Thailand

2.2 Hydrological Model Development

2.2.1 Data Collection

Data collection procedures was firstly conducted in this study to gather the input data required for the formulation of WEAP model in the Ping and Wang River Basins. The long-term hydro-meteorological data during 2000-2020 was preliminarily investigated and used. In addition, WEAP requires catchment and land use data, climate data, water demand site data, as well as reservoir data to accomplish the modelling processes of rainfall-runoff simulation in the implemented watershed system. This primary data was collected mainly from the Royal Irrigation Department (RID), Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), Thai Meteorological Department (TMD), Land Development Department (LDD), and other secondary sources as summarized in Table 1.

Table 1 Data required for this study

No.	Data Type	Data Source
1	Reservoir Data	EGAT
2	Hydro-Meteorological Data	
	• Rainfall	RID and TMD

	• Runoff	RID
	• Climate Data	TMD
3	Land use Data	LDD
4	Water Demand Data	
	• Agricultural Water Demand	Secondary Source [8]
	• Non-Agricultural Water Demand	Secondary Source [8]

2.2.2 Development of Rainfall-Runoff Model by WEAP Model

(1) Hydrological Method Selected

The WEAP hydrologic model was developed to simulate the watershed processes in term of rainfall-runoff relation in the Ping and Wang River Basins using the simplified coefficient method. The modelling processes were carried out according to process flow diagram as shown in Fig.2. The rainfall-runoff simulation by the simplified coefficient method in WEAP principally determines evapotranspiration for irrigated and rainfed crops using crop coefficients (Kc). The remainder of rainfall amount which is not consumed by crop evapotranspiration, is simulated as runoff to a river. In other words, it can be proportioned among runoff to a river and flow to groundwater via runoff/infiltration links [5].

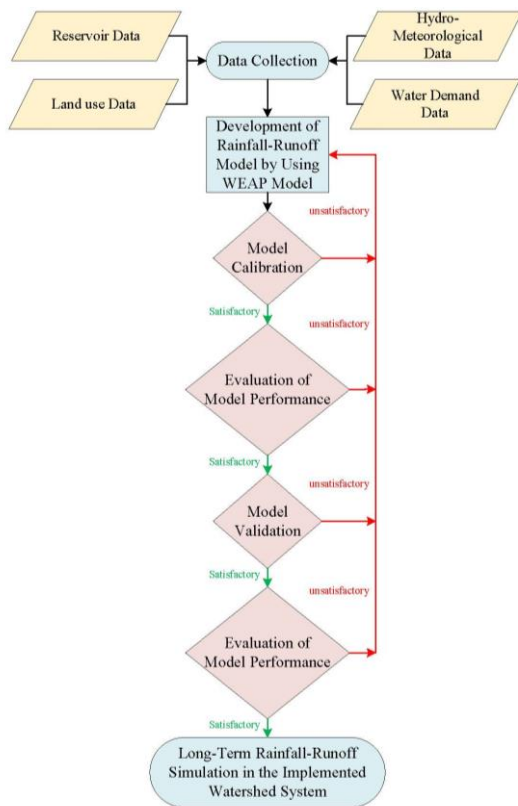


Figure 2 Process flow diagram of WEAP model development in the study area

(2) Basin Division

To reflect the lumped hydrologic response in WEAP model, the study area in Ping and Wang River Basins were subdivided into 3 sub-basins; (1) Sub-Basin 1 (Upper Ping Basin, SB1), (2) Sub-Basin 2 (Lower Ping Basin, SB2), and (3) Sub-Basin 3 (Wang Basin, SB3) as shown in Fig.3. In addition, the land area was fractionally classified into 16 land use classes: paddy field (A1), field crop (A2), perennial crop (A3), orchard (A4), horticulture (A5), shifting cultivation (A6), pasture and farmhouse (A7), aquatic plant (A8), aqua-cultural land (A9), evergreen forest (F1), deciduous forest (F2), rangeland (M1), marsh and swamp (M2), city town (U1), village (U2), and water body (W). The percentage share of land use classes was presented as a percentage of total area as summarized in Table 2

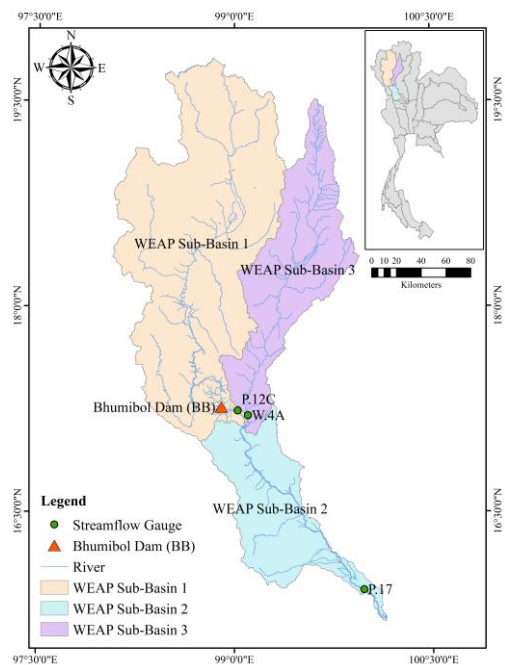


Figure 3 Basin division and key streamflow gauges used for model calibration and validation

Table 2 Land use data classified in each sub-basin

Class	Sub-Basin 1		Sub-Basin 2		Sub-Basin 3	
	Area (km ²)	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)	%
A1	1,082.28	4.13	1,162.75	14.14	935.36	8.67
A2	1,149.46	4.38	2,174.56	26.44	924.67	8.57
A3	117.12	0.45	222.00	2.70	534.93	4.96
A4	1,909.64	7.28	152.95	1.86	144.22	1.34
A5	137.16	0.52	17.35	0.21	4.64	0.04
A6	1,084.90	4.14	74.41	0.90	39.69	0.37
A7	32.30	0.12	92.63	1.13	16.38	0.15
A8	0.19	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00
A9	4.72	0.02	4.24	0.05	2.08	0.02
F1	3,985.08	15.19	364.16	4.43	862.32	7.99
F2	14,808.52	56.45	3,243.09	39.43	6,427.24	59.58

M1	376.66	1.44	70.59	0.86	112.00	1.04
M2	96.65	0.37	66.90	0.81	130.81	1.21
U1	315.58	1.20	135.79	1.65	162.17	1.50
U2	703.00	2.68	268.47	3.26	320.48	2.97
W	431.73	1.65	175.59	2.13	170.58	1.58
Total	26,235	100	8,225	100	10,788	100

Remark: A1= paddy field, A2 = field crop, A3 = perennial crop, A4 = orchard, A5 = horticulture, A6 = shifting cultivation, A7 = pasture and farmhouse, A8 = aquatic plant, A9 = aqua-cultural land, F1 = evergreen forest, F2 = deciduous forest, M1 = rangeland, M2 = marsh and swamp, U1 = city town, U2 = village, and W = water body

(3) Data Entry

The specific point rainfall gathered from 25 rainfall stations in the Ping and Wang River Basins and adjacent area as can be seen in Fig.4, was used and transformed into areal rainfall by Thiessen polygon technique in order to identify the representation of monthly rainfall input of each sub-basin. The monthly reference evapotranspiration (ET_o) was estimated using evaporation pan method which requires the evaporation loss data from field observation as shown the list of climate stations in Table 3 and Fig.5. Accordingly, the average monthly evaporation losses for each sub-basin were estimated for the estimation of reference evapotranspiration by multiplying with the pan coefficient (K_p).

Table 3 Rainfall & climate stations considered in this study

Sub-Basin	Rainfall Station	Climate Station
SB1	70391	48326: Mae Jo Agromet.
	70731	
	300201	
	300202	
	303301	
	310201	
	327501	
	328301	
	329201	
	376203	
SB2	120081	48376: Tak
	120121	
	120161	
	160221	
	260271	
	260311	
	376201	
	376203	
	376301	
	376401	
SB3	70391	48328: Lampang
	160151	48324: Thoen
	160221	

303301	48334: Lampang Agromet.
310201	
328201	
328301	
329201	
376201	
376203	
400111	
400151	

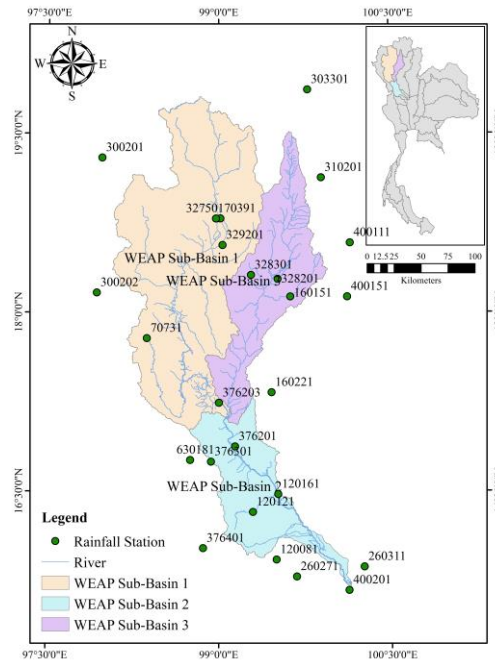


Figure 4 Location of rainfall stations

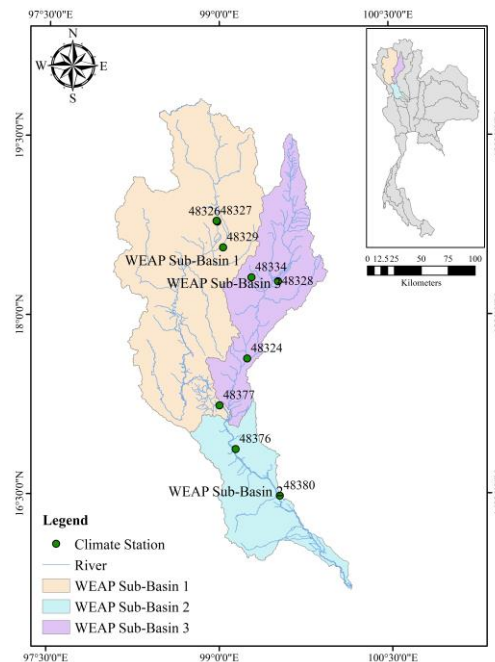


Figure 5 Location of climate stations

Table 4 Summary of average monthly rainfall and ETo identified in each sub-basin

Month	SB1		SB2		SB3	
	Rain*	ETo	Rain*	ETo	Rain*	ETo
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Jan	280.4	100.9	225.8	106.1	337.1	102.5
Feb	98.1	122.2	206.3	128.5	131.4	126.4
Mar	433.7	162.7	705.0	171.5	608.5	170.5
Apr	1,176.9	179.8	1,223.3	187.4	1,372.8	181.5
May	3,599.3	158.6	3,524.7	164.3	3,973.4	157.2
Jun	2,801.0	138.4	2,978.1	129.4	2,376.4	131.8
Jul	2,932.4	125.2	2,865.8	121.9	2,681.3	119.6
Aug	3,912.7	121.5	3,381.7	118.5	3,924.0	115.2
Sep	4,153.9	107.6	5,232.7	110.5	4,249.0	112.1
Oct	2,658.8	111.5	3,904.3	98.9	2,674.4	102.7
Nov	759.9	97.4	652.7	92.2	570.4	93.4
Dec	216.2	95.7	144.6	94.9	207.0	91.5

Remark: * Areal rainfall

The values of crop coefficient (Kc) for each land use class were determined to estimate the crop evapotranspiration (ETc) as summarized in Table 5.

Table 5 Crop coefficient values identified for each land use class

Land Use Class	Kc Value
A1	1.30
A2	1.01
A3	1.10
A4	1.20
A5	1.13
A6	0.88
A7	0.49
A8	1.00
A9	0.90
F1	0.35
F2	0.38
M1	0.90
M2	0.90
U1	0.77
U2	0.80
W	1.00

Source: [11]

Interactions between surface water (Sub_Basin_1, Sub_Basin_2, Sub_Basin_3) and groundwater (GW_SB_1, GW_SB2, GW_SB3) in each sub-basin were specified and hydraulically connected in WEAP model. For the demand data, two branches of demand site for agricultural water use (WD_LPWDZ) and non-agricultural water use (WS_LPWDS) were identified downstream of Bhumibol Dam to supply irrigation water to the Lower Nan Irrigation Scheme and non-irrigation water use to the downstream region as shown in Fig.6. The demand priority was then set up on the transmission link equally for both irrigation water and non-irrigation water uses to avoid water scarcity for all demand sectors.

The model calibration was conducted by adjusting key parameters of rainfall-runoff processes namely runoff coefficient, infiltration coefficient, and effective rainfall to match the real behavior of hydrologic system. The model accuracy was verified by the validation procedure using the past data. In this study, the model calibration and validation were implemented through comparison between monthly observed and simulated streamflow measured at 3 gauging stations; P.12C, P.17, W.4A on the Ping and Wang Rivers as well as the monthly inflow of Bhumibol Dam during 2000–2020.

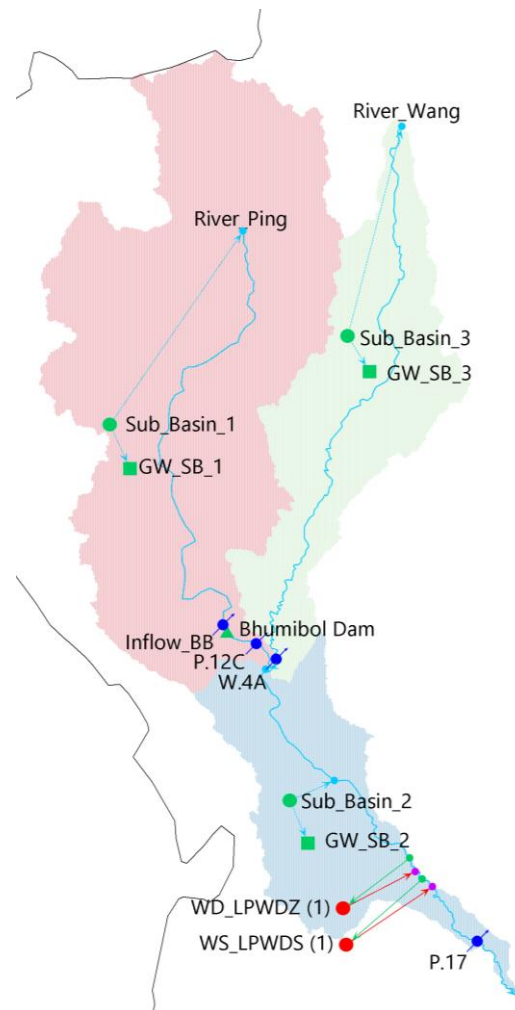


Figure 6 Development of WEAP model for rainfall-runoff simulation in the Ping and Wang River Basin

2.3 Assessment of WEAP Model Performance

To assess the WEAP model performance for rainfall-runoff simulation, statistical indices namely; Percent Bias (PBIAS), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Index of Agreement (d), RMSE-Observations Standard Deviation Ratio (RSR), and Volumetric Efficiency (VE) were evaluated as described below;

2.3.1 Percent Bias (PBIAS)

Percent bias (PBIAS) measures the average tendency of the simulated values to be larger or smaller than their observed ones. The optimal value of PBIAS is 0. The small values of PBIAS indicate high accuracy of the model simulation. However, the positive values of PBIAS reflect overestimation bias, whereas negative values express underestimation bias of the model simulation. The model performance is in general satisfactory if PBAIS is ± 25% [6].

$$PBIAS=100 \left(\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \right) \quad (1)$$

2.3.2 Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE)

The Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) is a normalized statistic to measure the relative magnitude of the residual variance compared to the measured data variance. It is absolutely similar to the coefficient of determination (R²).

$$NSE=1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right) \quad (2)$$

For monthly hydrographical data, NSE values range between -∞ and 1.0. NSE = 1.0 is the perfect fit, NSE > 0.75 is a very good fit, NSE = 0.65 to 0.75 is a good fit, NSE = 0.5 to 0.65 is a satisfactory fit and NSE < 0.5 is an unsatisfactory fit [9].

2.3.3 Index of Agreement (d)

Index of Agreement (d) is a standard measure to explain the degree of model error. Values of agreement index varies between 0–1. Higher values indicate better agreement between the model outputs and observations.

$$d=1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right) \quad (3)$$

2.3.4 Ratio of RMSE to the Standard Deviation of the Observations (RSR)

RMSE–Observations Standard Deviation Ratio (RSR) is the standardized form of RMSE. Ratio of RMSE to the standard deviation of the observations is expressed in the following equation. The model performance is satisfactory when RSR ≤ 0.70. RSR > 0.70 is rated as unsatisfactory for monthly data [9].

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (4)$$

3.4.5 Volumetric Efficiency (VE)

Volumetric Efficiency (VE) is the statistical measure to describe the model efficiency in term of volumetric residual between the model outputs and observations. The values of VE vary between 0–1.

The perfect agreement between observed and simulated values is found when VE is equal to 1.

$$VE=1 - \frac{\sum_{i=1}^N |S_i - O_i|}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (5)$$

where O_i is observed values at time i , S_i is modeled/simulated values at time i , N is the number of observed values, \bar{O} is the average value of the observed values, and \bar{S} is the average value of the modeled values.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Model Calibration and Validation

In this study, model calibration was conducted using the dataset from 2000–2015 by aiming at receiving the suitable model parameters reasonably to represent the hydrologic behavior of the Ping and Wang River Basins. Table 3 shows the estimated values of model parameters in each sub-basin including runoff coefficient, infiltration coefficient, and percent of effective rainfall. Estimating model parameters in WEAP was made by manual adjustment to minimize the difference between the observed and simulated flows at key gauging stations; P.12C, P.17, W.4A and reservoir inflow of Bhumibol Dam. Validation procedure was also conducted using dataset during 2016–2020 to assess the model validity for the simulation of hydrologic response.

It is found that the estimated values of runoff coefficient for 3 sub-basins varies from 0.10–0.25 describing surface runoff potential in the Ping and Wang Basins where the large portion of total land area is vastly forestland and agricultural areas. The infiltration coefficient in WEAP model is inversely correlated with the runoff coefficient to describe capability of water penetrating into soils. It is exhibited that the infiltration coefficient ranges from 0.75–0.90 for these 3 sub-basins. In addition, the effective rainfall explaining the net amount of rainfall potentially consumed by crops, varies greatly subject to the specific land use classes and hydro-geological conditions for each sub-basins as can be seen in Table 3.

Table 3 Estimation of model parameters by the simplified rainfall–runoff method in WEAP

WEAP Parameters	Sub-Basin			
	1	2	3	
Runoff Coefficient	0.25	0.10	0.18	
Infiltration Coefficient	0.75	0.90	0.82	
Effective Rainfall (%)	A1	85	99	64
	A2	42	16	67
	A3	92	24	88
	A4	22	84	34
	A5	43	46	3
	A6	92	91	88

	A7	29	91	12
	A8	42	100	88
	A9	41	68	96
	F1	63	79	97
	F2	69	17	61
	M1	46	55	28
	M2	4	65	90
	U1	80	63	97
	U2	36	69	92
	W	100	100	100

3.2 Assessment of Model Performance

The efficiency of model performance was considerably investigated using the statistics assessed from the simulated outputs performed by WEAP model and observed flow data at key gauging stations; P.12C, P.17, W.4A and reservoir inflow of Bhumibol Dam. The model performance statistics for rainfall–runoff simulation during calibration and validation periods and long–term simulation periods are presented in form of PBIAS, NSE, R^2 , RSR, d, and VE as summarized in Table 4.

It exhibits the similar pattern of the simulated and observed monthly flows at P.12C, P.17, W.4A stations and reservoir inflow of Bhumibol Dam when long–term simulation during 2000–2020 is implemented as qualitatively displayed in Fig.7–Fig.10.

For the calibration period during 2000–2015, the model performance shows good agreement of R^2 index of 0.80 and 0.76 at P.17 and W.4A gauging stations. Moreover, the model performance could be achieved in simulating the monthly reservoir inflow of BB Dam with R^2 of 0.82. Moreover, a normalized statistic measured in form of NSE value shows good fit of 0.72–0.80 at P.17 and W.4A gauging stations, and BB inflow.

However, the model performances are slightly decreased when the model validation during 2016–2020 is performed for P.17 and W.4A stations and BB inflow with R^2 of 0.63–0.75 and NSE of 0.44–0.65. For the long–term simulation during 2000–2020, it provides the reasonably good agreement of R^2 of 0.72–0.81 and NSE of 0.71–0.78 at all gauging stations except P.12C station. It is investigated that the streamflow data at P.12C station located downstream of BB Dam, is strongly associated with the regulated dam release. Therefore, further study in setting up related parameters for reservoir operation of BB Dam corresponding to the current operational practices should be reconsidered to improve the model performance particularly at P.12C station.

Table 4 Summary of model performance statistics for rainfall–runoff simulation in the Ping and Wang River Basins

Statistics	Streamflow Gauging Stations			
	BB Inflow	P.12C	P.17	W.4A
Calibration Periods (2000–2015)				
PBIAS	16.67	18.44	12.70	28.47
NSE	0.80	-0.27	0.77	0.72
R^2	0.82	0.29	0.80	0.76
RSR	0.45	1.13	0.48	0.53
d	0.80	-0.26	0.77	0.73
VE	0.62	0.63	0.77	0.47
Validation Periods (2016–2020)				
PBIAS	35.10	34.39	57.77	28.27
NSE	0.65	-0.53	0.44	0.59
R^2	0.74	0.14	0.75	0.63
RSR	0.59	1.24	0.75	0.64
d	0.65	-0.53	0.44	0.60
VE	0.51	0.66	0.42	0.43
Long–Term Simulation (2000–2020)				
PBIAS	20.05	20.70	18.24	28.44
NSE	0.78	-0.30	0.73	0.71
R^2	0.81	0.29	0.79	0.75
RSR	0.47	1.14	0.52	0.54
d	0.78	-0.29	0.73	0.71
VE	0.60	0.64	0.73	0.46

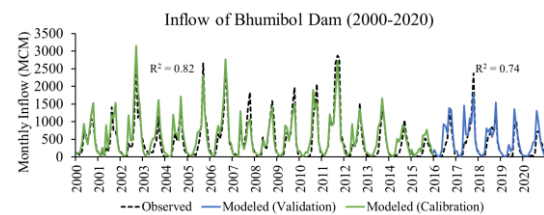


Figure 7 Comparison of simulated and observed monthly inflows of BB Dam

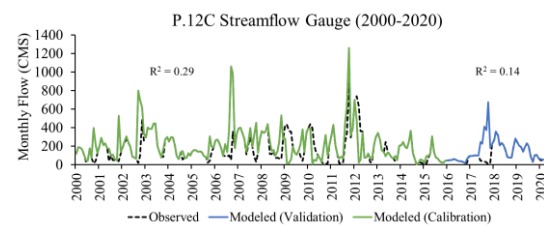


Figure 8 Comparison of simulated and observed monthly flows at P.12C station

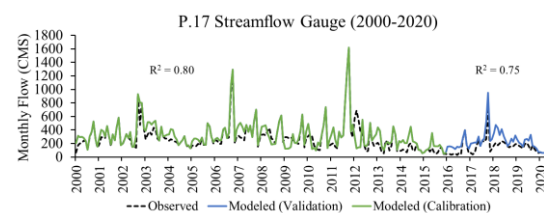


Figure 9 Comparison of simulated and observed monthly flows at P.17 station

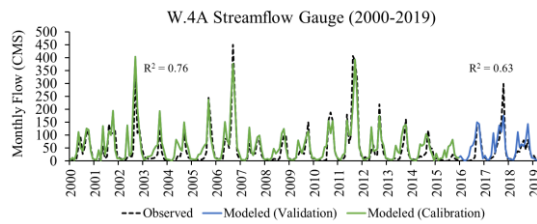


Figure 10 Comparison of simulated and observed monthly flows at W.4A station

4. CONCLUSIONS

WEAP hydrologic model was developed for the Ping and Wang River Basins in the northern region of Thailand by aiming to assess the model efficiency in simulating the rainfall–runoff relation to explain the hydrologic dynamics and responses of the implemented watershed system over long–term periods. The long–term simulation results showed that WEAP model could provide the reasonably good agreement of R^2 of 0.75–0.81 at key gauging stations; P.17, W.4A and reservoir inflow of Bhumibol Dam except P.12C station where the hydrologic response has been strongly affected by the influence of regulated dam release. Based on the overall model performance statistics, predominant capability of WEAP model to simulate behavior of hydrologic responses was found particularly at the outlet of sub–basin (P.17 and W.4A gauging stations) and outflow point (reservoir inflow of BB Dam) where the impact of regulated flow on the model performance has been diminished.

5. ACKNOWLEDGMENTS

Authors would like to acknowledge the Thailand Science Research and Innovation (TSRI) for providing financial support. We are cordially thankful to the Royal Irrigation Department (RID), Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), Thai Meteorological Department (TMD) for providing research data.

REFERENCES

[1] Dougherty, M., Dymond, R.L., Grizzard, T.J., Godrej, A.N., Zipper, C.E., Randolph, J. (2007) Quantifying long–term hydrologic response in an urbanizing basin. *J. Hydrol. Eng.* 12(1), 33–41.

[2] Abera Abdi D., Ayene, T. (2021). Evaluation of the WEAP model in simulating subbasin hydrology in the Central Rift Valley Basin, Ethiopia. *Ecological Processes*, 10(41), 1–14.

[3] Santos, R.M.B., Sanches Fernandes, L.F., Moura, J.P., Pereira, M.G., Pacheco, F.A.L. (2014). The impact of climate change, human interference, scale and modeling uncertainties on the estimation of aquifer properties and river flow components. *J. Hydrol.*, 519, 1297–1314.

[4] Wang, S., Huang, G., Baetz, B., Huang, W. (2016). Probabilistic inference coupled with possibilistic reasoning for robust estimation of hydrologic parameters and piecewise characterization of interactive uncertainties. *J Hydrometeorol*, 17(4), 1243–1260.

[5] Stockholm Environment Institute (SEI). (2007) Water evaluation and planning system, WEAP, Stockholm Environmental Institute: Boston.

[6] Khalil, A., Rittima, A., Phankamolsil, Y. (2018). The projected changes in water status of the Mae Klong Basin, Thailand, using WEAP model. *Paddy and Water Environment*, 16(3), 439–455.

[7] TEAM Consulting Engineering and Management Public Company Limited. (2018). 25 River Basin in Thailand, BKK, Thailand.

[8] Rittima, A., Phankamolsil, Y., Tabucanon, A. S., Sawangphol, W., Kraisangka, J., Talaluxmana, Y. (2020). An adaptation strategy towards reservoir re–operation for long–term water supply management of Bhumibol Dam (Phase 1) (Research Report). Thailand Science Research and Innovation (TSRI).

[9] Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans ASABE*. 50(3), 885–900.

TACKLING THE 2021 TROPICAL STORM DIANMU FLOOD IN THE GREATER CHAO PHRAYA RIVER BASIN, THAILAND: THE PERSPECTIVE VIEWS THROUGH CO-RUN EXERCISE UNDER THE SPEARHEAD RESEARCH PROGRAM

Areeya Rittima*

Faculty of Engineering, Mahidol University, Thailand

Phone: 66-02-889-2138 ext. 6384, Fax: 66-02-889-2138 ext. 6388 E-mail: areeya.rit@mahidol.ac.th

Yutthana Phankamolsil

Environmental Engineering and Disaster Management Program, Mahidol University, Kanchanaburi
Campus, Thailand

Kanoksri Sarinnapakorn

Hydro-Informatics Institute (Public Organization), Thailand

Sucharit Koontanakulvong

Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand

Allan Sriratana Tabucanon

Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Thailand

Wudhichart Sawangphol and Jidapa Kraisingka

Faculty of Information and Communication Technology, Mahidol University, Thailand

Yutthana Talaluxmana

Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand

Varawoot Vudhivanich

Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Thailand

Assada Kijpayung

Royal Irrigation Department, Thailand

Wanpen Kaewkamthong

Electricity Generating Authority of Thailand

ABSTRACT

The descriptive study on flooding triggered by the tropical storm Dianmu in late rainy season in the Greater Chao Phraya River Basin (GCPYRB) was conducted. The status of water storage of major dams; Bhumibol (BB), Sirikit (SK), Khwaenoi Bumrung Dan (KNB), Pasak Jolasid (PS) before and after Dianmu storm periods were considerably analyzed and compared. The inundated areas of flooding were also investigated and visualized to unveil the extent of flood damage in the Greater Chao Phraya Irrigation Scheme (GCPYIS) during late-September 2021. The dam and reservoir operation, water flows at key gauging stations, and discharges at Chao Phraya Diversion Dam were also explored to brighten up the operational practice of water resources in GCPYRB during the critical Dianmu flood periods. In addition, the results of co-run exercise under the Spearhead Research Program (SIP) including reservoir inflow forecast using Machine Learning (ML) technique and predetermined dam release by the Constraint Programming (CP) model were also presented. The tropical storm Dianmu in 2021 has become a lesson learned particularly for the operational actors to reconsider the water resource management plan due to the abnormality of regional climate data. Importantly, tackling the critical floods through the well-prepared plan and rapid framework for decision making based upon recent information with supportive tools can help assist flood moderation to a considerable extent.

Key words: Tropical Storm Dianmu, Greater Chao Phraya River Basin, Spearhead Research Program

1 INTRODUCTION

The influence of the tropical storm Dianmu hitting parts of Thailand during late-September 2021 caused considerable flood damages particularly in the north, northeast and central regions. The tropical storm

Dianmu brought the heavy rainfall and resulted in flash floods in the upper regions of Thailand on September 23–24. The Department of Disaster Prevention and Mitigation (PWA) has reported that thousands of household area in at least 30 provinces have been affected and some agricultural land areas specifically in the Greater Chao Phraya Irrigation Scheme have been devastated due to flooding [1]. Floodwater caused by the tropical storm Dianmu combined with the seasonal monsoon rains and concurrent storms has still persisted at the end of October and widespread on the left and right banks of the Chao Phraya River.

It was reported that the tropical storm Dianmu was originated from the South China Sea on September 21 and tracked west–northwestwards across Indochina affecting several parts of Vietnam, Lao, Cambodia, and Thailand [2]. A distinct change in rainfall amount and extreme weather was reported and monitored in various parts of the central Vietnam, southern Laos, northeastern Cambodia, and northeastern Thailand. In Vietnam, the tropical storm Dianmu made the landfall, mudslide, and flooding in the mountainous areas of the northern region. The arrival of the tropical storm Dianmu also led to flooding in some parts of southern Lao. Several low–lying areas near streams and rivers, and urban areas with poor drainage system have been sparsely inundated over this region. In addition, fatality and injury, and property damages were also reported.

In Thailand, according to the past 7–day satellite–based flood map published by the Geo–Informatics and Space Technology Development Agency (GISTDA) of Thailand on September 30 [3], it was exhibited that the inundated areas covered 6 provinces in the north; Sukhothai, Phitsanulok, Kamphaeng Phet, Phichit, Tak, and Phetchabun, 8 provinces in the northeast; Loei, Khon Kaen, Roi Et, Kalasin, Chaiyaphum, Nakhon Ratchasima, Buriram and Surin, 7 provinces in the east; Nakhon Nayok, Prachin Buri, Sa Kaeo, Chachoengsao, Chonburi, Rayong, and Trat and 9 provinces in the upper part of central region; Nakhon Sawan, Lop Buri, Uthai Thani, Chai Nat, Saraburi, Sing Buri, Ang thong, Ayutthaya, and Suphan buri. In addition, flooding is expected to be prolonged and receded in the Pathum Thani, Nonthaburi, Bangkok and metropolitan areas in the Lower Chao Phraya River Basin.

The role of the researchers under the Spearhead Research Program, the National Research Council of Thailand (NRCT) on water resources management has been undertaken through the co–run exercise in the Greater Chao Phraya River Basin (GCPYRB) to deliver clear and straightforward information and possible guideline for dam operation. Therefore, the objective of this study aims at reporting the current situation in views of water storage status in reservoirs, the associated inundated areas, and operational practice during the 2021 Dianmu storm.

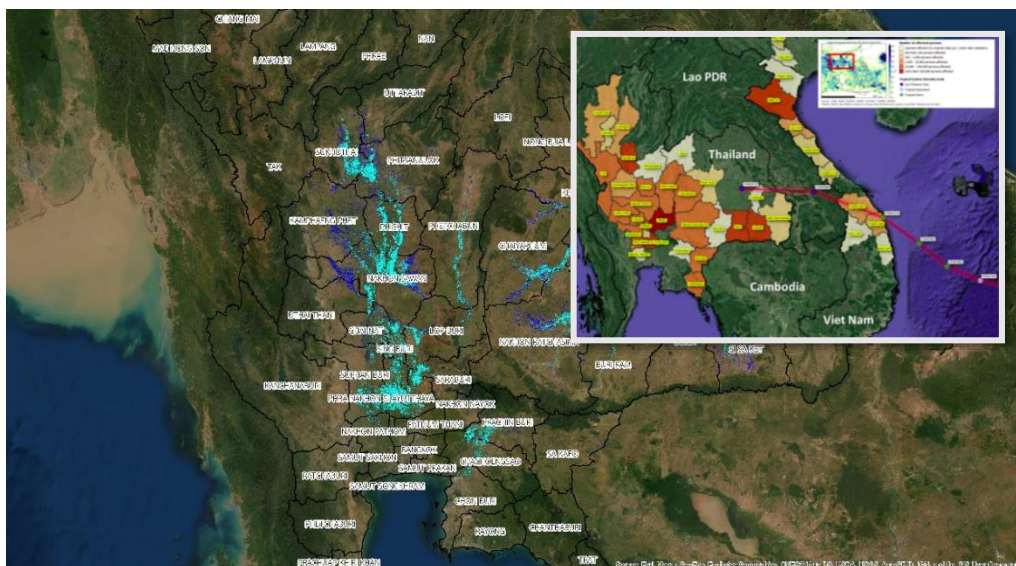


Fig. 1. The map of inundated areas in the Greater Chao Phraya River Basin due to the 2021 Dianmu flood; Dark blue–dated on Sep 30, Light blue–dated on Oct 8.

2 METHODOLOGY

The descriptive study on flooding in GCPYRB was conducted due to the occurrence of the tropical storm Dianmu in September 2021. The status of water storage of major dams; BB, SK, KNB, PS before and after Dianmu storm was considerably analyzed and compared. The inundated areas of flooding were also investigated and visualized to unveil the extent of flood damage particularly in GCPYIS during late–September 2021. The dam and reservoir operation, water flows at key gauging stations, and discharges at Chao Phraya Diversion Dam were also explored to brighten up the operational practice of water resources in GCPYRB during the critical Dianmu flood periods. In addition, the results of co–run exercise under the Spearhead Research Program including reservoir inflow forecast using machine learning technique [4] and predetermined water release by the constraint programming model [5] were also presented.

3 RESULT AND DISCUSSION

3.1 Water storage status of major dams before and after Dianmu

The current status of reservoir water storages of four storage dams; BB, SK, KNB, and PS before the Dianmu hit some areas in Thailand, were considerably investigated. It is found that the available water storage on September 5, were at 9.09%, 12.14%, 30.16% and 12.77% of active storage for BB, SK, KNB, and PS Dams, respectively signifying high holding capacity of all reservoirs to collect incoming floodwater as can be seen in Fig. 2 and Fig. 3. The cumulative observed inflows till the 5th of September 2021 were 1,249, 2,281, 555, and 201 mcm, for BB, SK, KNB, and PS Reservoirs, respectively which were relatively low by comparing with the long–term average values for all the dams. In other words, the water availability in reservoirs were likely declined due to unbalancing between inflows and outflows before the Dianmu hit. The cumulative volume of released water till the 5th of September 2021 were merely 1,703, 3,772, 634, and 612 mcm for BB, SK, KNB, and PS Dams, respectively which were determined corresponding to the target water allocation plan for dry year operation.

However, it is investigated that the influence of the tropical storm Dianmu led to the minor increase of active water storage of BB and SK Dams accounting for 29.08% and 19.77% of active storages on September 30. During the storm period, zero or minimum discharges were determined for the dam release. However, this tropical storm had significant impact on high likelihood of reservoir inflows of KNB and PS Dams particularly since September 26. It was reported that the water storage of KNB and PS Dams reached up to 90.70% and 107% of active capacity on September 30. Accordingly, the extra water were released from KNB and PS Dams creating floodwater on the downstream side of PS Dam. Trends of reservoir inflows and water released from all dams in 2021 are presented in Fig. 4. It is investigated that the ratio of average reservoir inflows to reservoir capacity of KNB and PS Dams were at 1.44 and 1.55 in 2021 after the tropical storm Dianmu as shown in Table 1. This implies the sudden changes of reservoir inflows of these two dams which were definitely critical and tough in terms of dam operation and flood prevention.

Table 1 Ratio of average reservoir inflows to reservoir capacity of major dams in GCPYRB

Avg. Reservoir Inflow: Capacity Ratio	Long–Term Data	Short–Term Data				
		Wet Year	Normal Year	Dry Year	Before Dianmu	After Dianmu
BB	0.40 ^{1/}	0.73	0.39	0.20	0.09 ^{4/}	0.24 ^{5/}
SK	0.64 ^{1/}	0.89	0.64	0.45	0.24 ^{4/}	0.30 ^{5/}
KNB	1.72 ^{2/}	3.92	1.90	0.92	0.72 ^{4/}	1.44 ^{5/}
PS	2.83 ^{3/}	5.33	3.02	1.09	0.26 ^{4/}	1.52 ^{5/}

Remark: ^{1/}Long–term data during 2000–2020

^{2/}Long–term data during 2009–2020

^{3/}Long–term data during 2003–2020

^{4/}Data on September 5, 2021

^{5/}Data on September 30, 2021

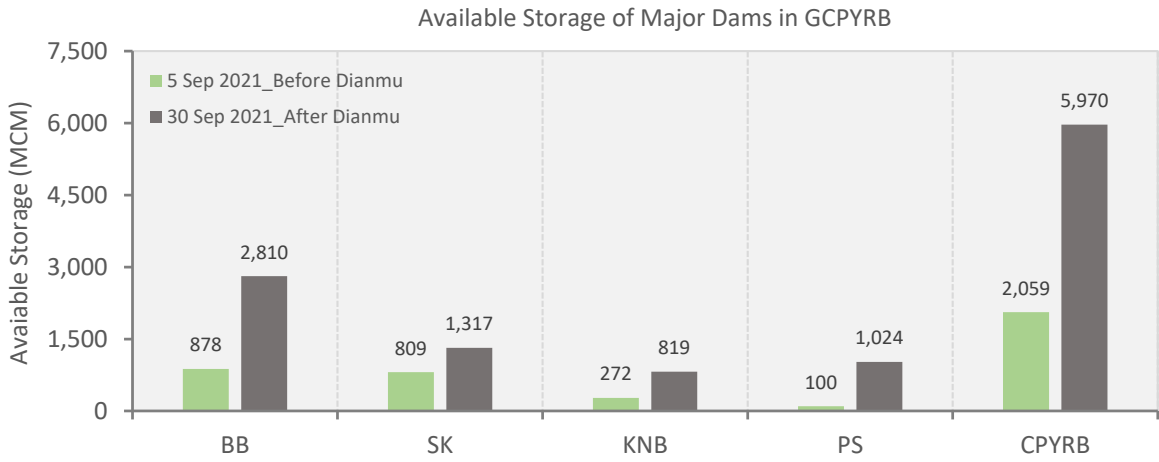


Fig. 2. Available water storage of major dams in GCPYRB in September 2021

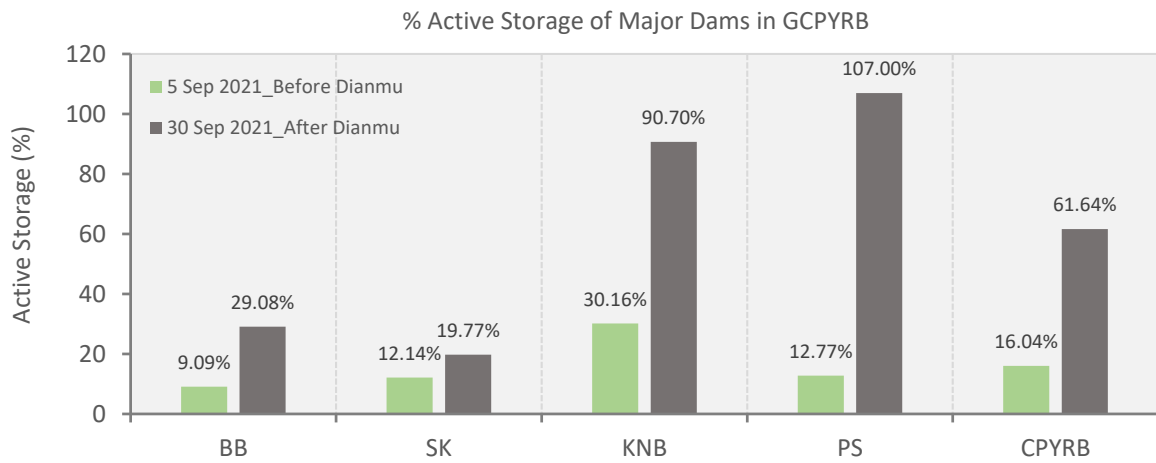


Fig. 3. Percent of active storage of major dams in GCPYRB in September 2021

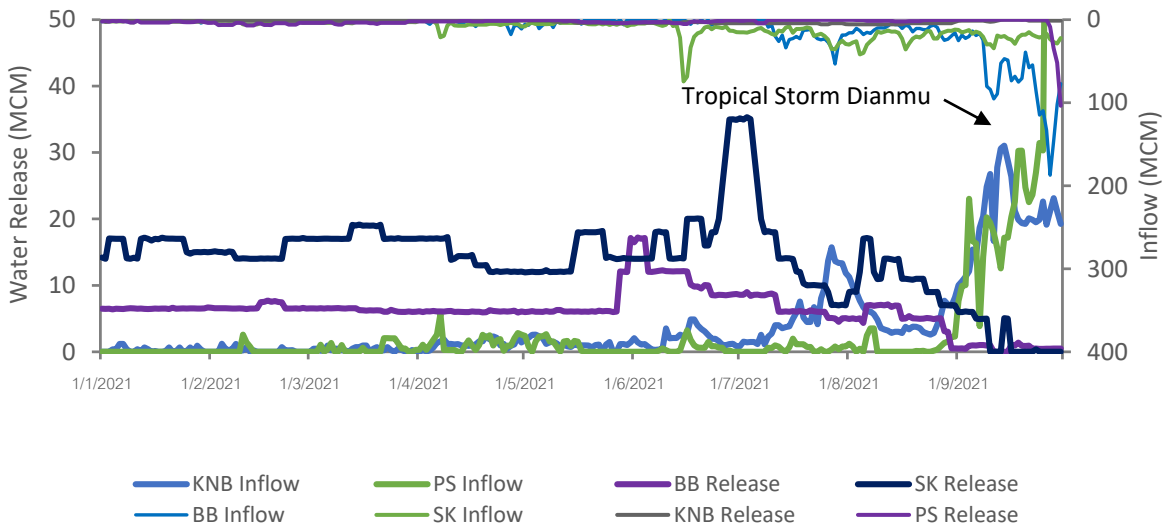


Fig. 4. Trends of reservoir inflows and water released from BB–SK–KNB–PS Dams in 2021

3.2 Evaluation of inundated areas caused by the 2021 Dianmu Flood

The undated areas caused by the 2021 Dianmu flood were evaluated using the past 7-day satellite-based flood map and compared the results in late September–early October. It is apparently found that the total inundated area in GCPYRB on September 27–October 2 was 4,168 sq.km. which was equivalent to 2,605,000 rai. Approximately 942,694 rai of the inundated areas was existed in the agricultural land areas in GCPYIS as shown in Table 2. The flood inundation in agricultural land areas on October 8 was decreased by 33.26%. Although the decline of flood inundation areas was found in the north and upper central regions on October 8, however, the water levels in the main rivers and streamflow rates were still high. Moreover, effect of flooding triggered by the tropical storm Dianmu was transported over a wide area in the lower central and eastern regions of Thailand. More than 50% of the inundated areas in GCPYRB was definitely persisted in the Yom–Nan, Chaochet Bangyeehon, Phak Hai, and Khokkathiam Irrigation Schemes as can be seen in Fig. 4.

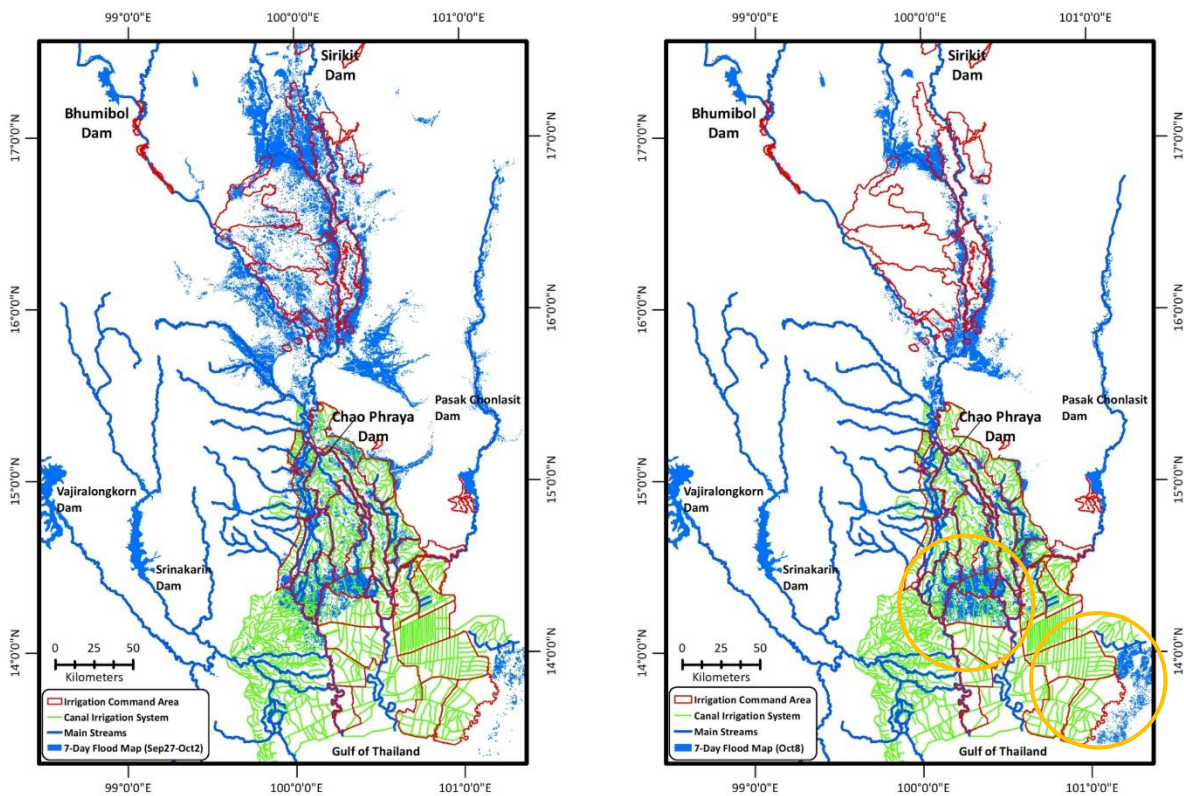


Fig. 4. Comparison of inundated areas on September 27–October 2 and October 8 due to the 2021 Dianmu flood.

Table 2 The inundated areas in the Greater Chao Phraya Irrigation Scheme

Name of Irrigation Scheme	Type of Irrigation Scheme	Cultivated Area in 2020/2021 (rai) ^{1/}	Inundated Area	
			(rai)	(percentage) ^{2/}
Lower Ping Irrigation Zone				
Tortongdang	Inundation	651,037	52,183	8.02
Wangbua	Inundation	694,566	49,322	7.10
Wangyang– Nongkwan	Inundation	439,511	72,380	16.47
Lower Nan Irrigation Zone				
Dongsetthee	Gravity	151,982	19,596	12.89
Plaichumpol	Gravity	255,377	41,325	16.18
Naresuan	Gravity	95,215	309	0.32
Thabua	Gravity	157,489	25,564	16.23

Name of Irrigation Scheme	Type of Irrigation Scheme	Cultivated Area in 2020/2021 (rai) ^{1/}	Inundated Area	
			(rai)	(percentage) ^{2/}
Yom–Nan	Inundation	368,180	131,497	35.72
Chao Phraya–Thachin Irrigation Zone				
Bang Bal	Pumping	176,627	10,100	5.72
Borommathat	Gravity	212,101	21,614	10.19
Chanasute	Gravity	307,503	39,640	12.89
Chaochet Bangyeehon	Inundation	629,072	31,948	5.08
Donjedee	Gravity	91,961	13,497	14.68
Phak Hai	Gravity	278,899	96,187	34.49
Phophraya	Gravity	537,783	71,779	13.35
Pollathep	Gravity	170,204	15,821	9.30
Samchuk	Gravity	243,499	12,658	5.20
Thabot	Gravity	114,138	31,563	27.65
Wat Sing	Pumping	6,616	–	–
Yangmanee	Gravity	142,808	18,332	12.84
Pasicharoen	Inundation	44,668	–	–
Phayabunlue	Inundation	382,642	528	0.14
Prapimon	Inundation	205,285	–	–
Chong Kae	Gravity	116,219	14,100	12.13
Khokkathiam	Gravity	208,183	16,752	8.05
Maharaj	Gravity	210,765	31,687	15.03
Manorom	Gravity	202,231	41,146	20.35
Roeng Rang	Gravity	143,533	7,386	5.15
Klong Dan	Inundation	221,970	–	–
Nakhon Luang	Gravity	94,640	–	–
Northern Rangsit	Gravity	181,898	–	–
Praong Chao Chaiya Nuchit	Inundation	495,845	–	–
Southern Pasak	Gravity	140,407	–	–
Southern Rangsit	Gravity	682,143	–	–
Additional Cultivated Area in 2020/2021				
Tak	–	19,900	–	–
Khwae Noi Bamrung Dan	–	21,469	21,745	101.29
Samut Sakhon	–	37,638	–	–
Khlong Priew–Sao Hai	–	36,250	–	–
Pasak Jolasid	–	79,234	–	–
Lop Buri	–	70,690	–	–
Chainat	–	–	3,338	–
Uttaradit	–	–	4,716	–
Total	–	9,481,953	942,694	9.94

Remark: ^{1/} The cumulative area size cultivated from November 1, 2020 to July 12, 2021.

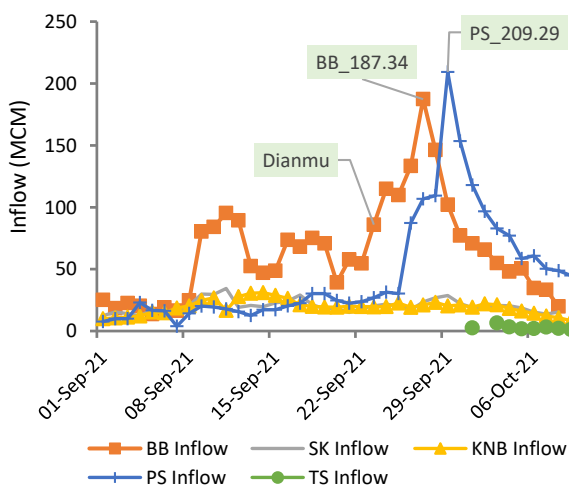
^{2/} The percentage values were calculated as the ratio of flooded area to cultivated area in 2020/2021.

3.3 Evaluation of reservoir operational data triggered by the tropical storm Dianmu

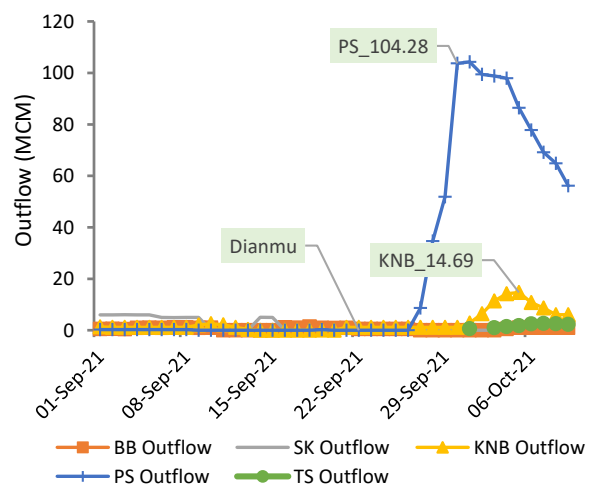
The tropical storm Dianmu and seasonal monsoon rains producing substantial amounts of rainwater in the northern and central Thailand significantly led to the increase of the reservoir inflows of all major dams in GCPYRB in late September. It is investigated that the reservoir inflows of BB and PS were considerably increased during the storm periods. The reservoir inflows reached up to 187.34 MCM per day for BB Dam and 209.29 MCM per day for PS Dam as explicitly shown in Fig. 5(a). However, after September 30, the tendency of observed inflows of all major dams were likely decreased which was associated with those predicted results of reservoir inflow performed by using machine learning technique and 2–week rainfall forecast by using WRF–ROMS (CFSV2) model in the upstream areas of these four major dams.

It is found that releasing water from all major dams in early October 2021 were kept as zero or minimum requirement to reduce flood damage downstream except PS Dam. The surplus water was released from PS Dam to increase holding capacity of reservoir and dam safety. It is reported that the reservoir outflow of PS Dam climbed up to 104.28 MCM per day on October 1 when it reached full capacity as shown in Fig. 5(b). This led to widespread flooding on the Lower Eastern Chao Phraya Irrigation Scheme which is located downstream of PS Dam. In addition, it caused rapid change of increased water level in the Pasak River downstream of Rama 6 Dam which flows eastward into the Chao Phraya River. Since October 1, the amount of water release from PS Dam tended to be continuously decreased corresponding to the decline of reservoir inflow.

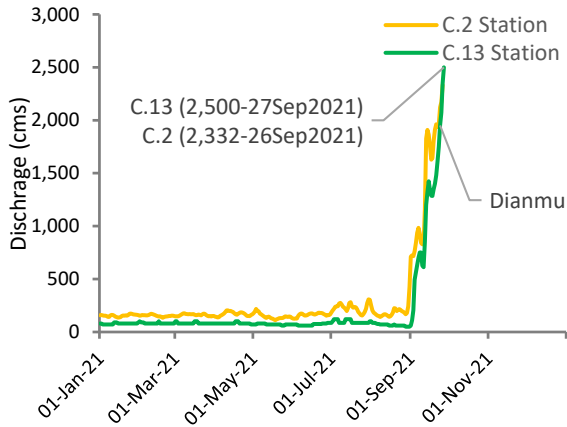
The floodwater travelled from the upper north in the Ping, Wang, Yom, and Nan River Basins combined with the seasonal monsoon rainfall downstream led to the rising water levels in the Chao Phraya River inevitably. Therefore, the operational practice during the critical flood periods was undertaken by cutting off the peak flows in the Chao Phraya River into the canal irrigation system on the left and right banks of the Chao Phraya River and the potential flood retention areas. It is observable that the river discharge at C.2 gauged station monitored at Nakhon Sawan Province started increasing at the beginning of September before the occurrence of the Dianmu storm and ascending to the peak flow of more than 2,500 cms during late September. The decision to increase the discharge rates at Chao Phraya Dam (C.13 gauged station) to accommodate the huge flow and transported floodwater in the main river was implemented by the Royal Irrigation Department (RID) of Thailand as can be seen in Fig. 5(c). Consequently, flood warning for the results of the increased discharge rates through the Chao Phraya Dam were made especially in the low lying areas and communities along the river banks with poor flood levee structures in Chainat, Sing Buri, Ang Thong, and Ayutthaya. It would be seen in Fig. 5(d) that the increasing discharge rates at Chao Phraya Dam was allowed since the beginning of September and it reached the highest peak in late September–early October. In recent days (October 23), it was reported that flood situation in the CPYRB has progressively improved. The discharge rates passing through the Chao Phraya Dam downstream was reduced by fluctuating around 2,000 cms at the end of October. In addition, the official authorities said that flood situation in GCPYRB is expected to return to normal by the end of November [7].



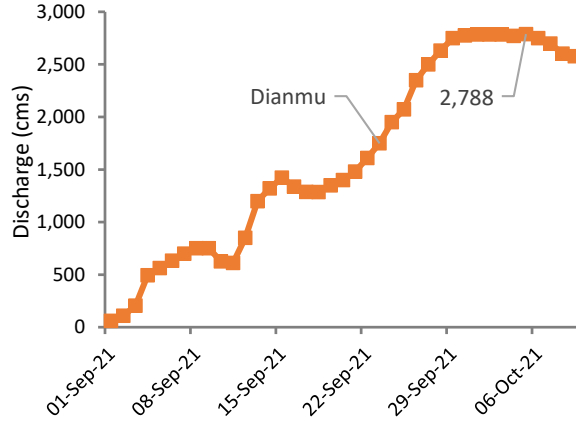
(a) Reservoir inflow



(b) Reservoir outflow



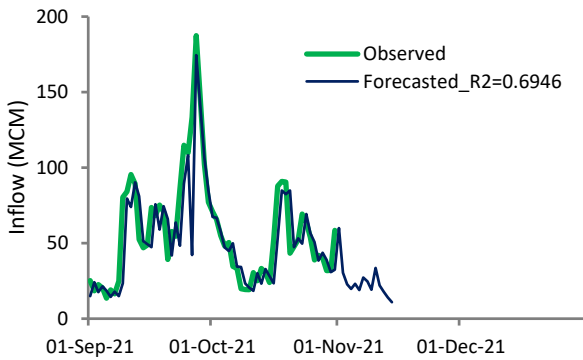
(c) Discharge at key runoff stations



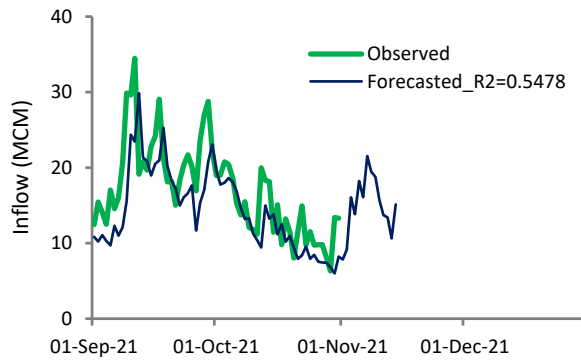
(d) Discharge at CPY Dam

Fig. 5. Reservoir operational data before and after Dianmu

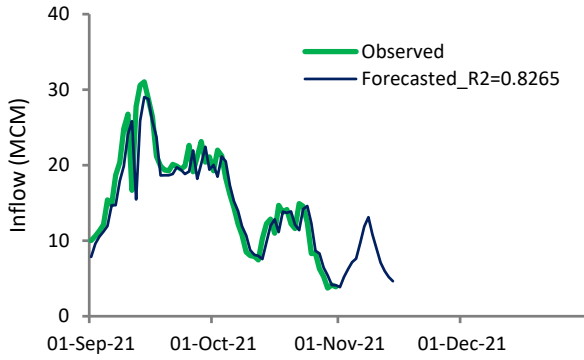
The results of modelling works through the co-run exercise were presented for real time multi-reservoir operation in GCPYRB during the storm periods. The machine learning which is branch of artificial intelligence, has been widely applied in the field of water resources engineering with the great success for hydrological predictions [6]. Therefore, machine learning with Long Short-Term Memory (LSTM) algorithm was used to develop the daily reservoir inflow prediction models of BB, SK, KNB and PS Dams. Multi-objective optimization by constraint programming model was applied by aiming to minimize the water deficit and spilled water as well as to reduce the excessive water in GCPYRB. The CP model with yearly and seasonal constraints were developed based upon the dam-reservoir system and physical conditions in GCPYRB. In addition, the observed sideflow data and the predicted outputs of reservoir inflow were also used to identify the constraints of multi-objective optimization model to predetermine the amount of water release of four major dams. The results of reservoir inflow forecast by machine learning technique and predetermined water release by the constraint programming model during September 1–November 11 were presented in Fig. 6 and Fig. 7.



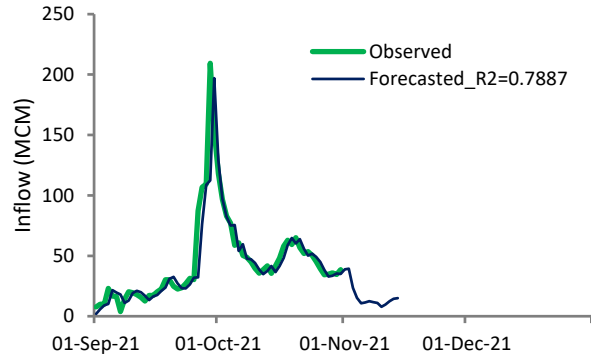
(a) BB Dam



(b) SK Dam

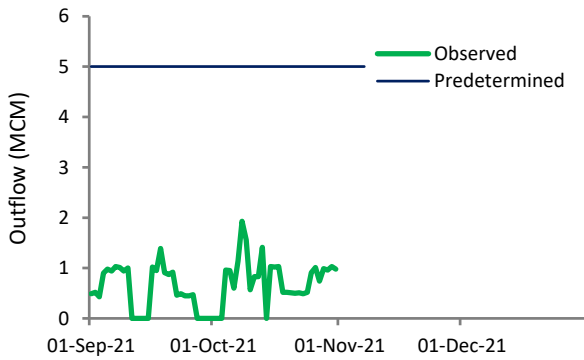


(c) KNB Dam

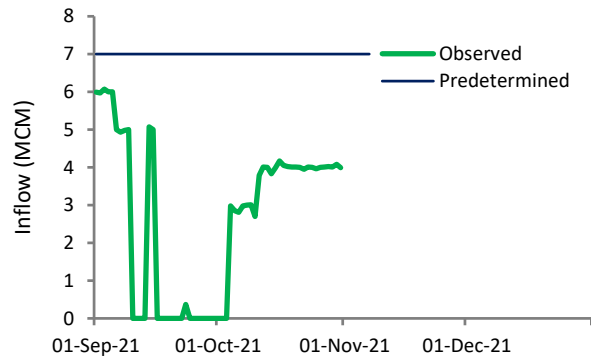


(d) PS Dam

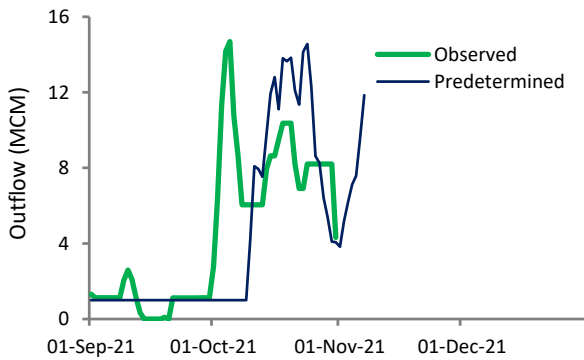
Fig. 6. The predicted reservoir inflows of major dams in GCPYRB during the Dianmu storm period.



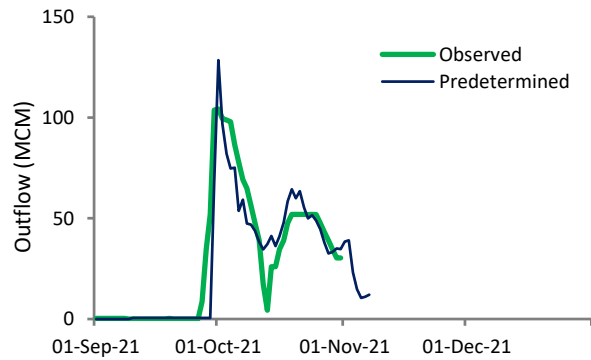
(a) BB Dam



(b) SK Dam



(c) KNB Dam



(d) PS Dam

Fig. 7. The predetermined water release of major dams in GCPYRB during the Dianmu storm period.

It is found that the one-step ahead daily inflow prediction with 14-day lead time could provide good predictive results of R^2 of 0.6946, 0.5478, 0.8265, and 0.7887 for BB, SK, KNB, and PS Reservoirs during September 1–November 11. The best structure of predictive model developed requires the past and current reservoir inflows as major inputs to capture and forecast the future trends and predicted values of reservoir inflows. The rising trends of predicted inflows were found for these four reservoirs from late-September to the first week of October. However, it tended to be decreased in the second week of October which was relative to the behaviors of observed inflows. The predicted reservoir inflows with 14-day lead

time were then used as inputs to predetermine the released water by constraint programming model. Releasing water from BB and SK reservoirs with minimum water requirement was accordingly recommended by the CP model for the next 14 days in November. However, it recommended to increase the amount of released water from KNB and PS reservoirs since September 26 due to the rapid increase of the reservoir inflows.

Even the flooding situation caused by the tropical storm Dianmu in GCPYRB is expected to recede in November 2021 [7]. However, flooding continues to affect some areas in the Western Chao Phraya Irrigation Scheme along the Thachin River and low-lying areas near the stream channels in GCPYRB. The massive amounts of water transporting from the north to the Lower Chao Phraya River Basin have still overwhelmed the small to medium size reservoirs to reach full capacity such as Krasiew, Thap Salao, and Pasak Jolasid Dams inevitably at the end of October. Moreover, the intense rainfall is still forecasted in some regions. Therefore, keeping close attention to current situation of water and the new developing storms is important to reduce impact of flood events in this region.

4 CONCLUSION

Flooding triggered by the tropical storm Dianmu in late rainy season in Thailand has become a lesson learned particularly for the operational actors to reconsider the water resource management plan due to the abnormality of regional climate data. Coping with rapid change of water availability and compound flood from the concurrent storms in a short period of time is not a simple task. However, tackling the critical floods through the well-prepared plan and rapid framework for decision making based upon recent information with supportive tools can help assist flood moderation to a considerable extent. Importantly, weighting the operational strategy applicable for GCPYRB by storing floodwater in the potential flood retention areas for later use in the system or by directing surplus water to the sea immediately to reduce impact of flood inundation, plays significant role in the prospective views of sustainable development of water resources and risk-based management.

5 ACKNOWLEDGEMENT

Authors would like to acknowledge the Thailand Science Research and Innovation (TSRI) for providing financial support. We are cordially thankful to the Royal Irrigation Department (RID), Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), and Thai Meteorological Department (TMD) for providing research data.

REFERENCES

- [1] United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA). (2021, October 31). Thailand–Floods. Retrieved from <https://reliefweb.int/report/thailand/thailand-floods-pwa-tmd-floodlist-media-echo-daily-flash-28-september-2021>.
- [2] Wikipedia. (2021, October 31). Tropical Storm Dianmu (2021). Retrieved from [https://en.wikipedia.org/wiki/Tropical_Storm_Dianmu_\(2021\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Tropical_Storm_Dianmu_(2021)).
- [3] Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (GISTDA). (2021, September 30). Flood map. Retrieved from <https://flood.gistda.or.th/>.
- [4] Cerqueira, V., Torgo L., Soares, C. (2019). Machine learning vs statistical methods for time series forecasting: size matters. arXiv:1909.13316.
- [5] Rossi, F., Van Beek, P., Walsh, T. (2006). Handbook of constraint programming. New York: Elsevier Science.
- [6] Dornpunya, P., Rittima, A., Phankamolsil, Y., Tabucanon, A.S., Sawangphol, W., Kraisangka, J., Yutthana Talaluxmana, Y., Vudhivanich, V. (2021). The predictability of reservoir inflow prediction model for Sirikit Dam using Xgboost machine learning algorithm. Proc. Of the 5th International Conference on Water Resources Engineering, 25–26 November 2021.
- [7] The Nation Thailand. (2021, November, 2). Flooding eases in 17 of 33 provinces hit by Dianmu tropical storm. Retrieved from <https://www.nationthailand.com/in-focus/40007347>.

HYBRID NEURO FUZZY-BASED RESERVOIR RE-OPERATION MODEL: CASE STUDY OF BHUMIBOL DAM IN THAILAND

Khin Muiyay Kyaw¹, Areeya Rittima^{2*}, Yutthana Phankamolsil³, Allan Sriratana Tabucanon⁴, Wudhichart Sawangphol⁵, Jidapa Krairangka⁶, Yutthana Talaluxmana⁷, Varawoot Vudhivanich⁸, and Assada Kijpayung⁹

^{1,2*}Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, Thailand

³Environmental Engineering and Disaster Management Program, Mahidol University, Kanchanaburi Campus, Thailand

⁴Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Thailand

^{5,6}Faculty of Information and Communication Technology, Mahidol University, Thailand

⁷Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand

⁸Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Thailand

⁹Royal Irrigation Department, Thailand

*Corresponding author's e-mail: areeya.rit@mahidol.ac.th

Keywords— ANFIS, Reservoir reoperation model, Reservoir performance index, Water balance model

INTRODUCTION

Dam and reservoir systems have long been introduced to support the water resources planning and management through a variety of the single and multi-purpose water resources development projects. Because of the high variability of temporal and spatial climate data creating impacts on dam and reservoir's function, escalation of reservoir operating policy and adaptation measures have been highly recommended. The reservoir re-operation is considered as one of the best ways to achieve the water resource management activities particularly in views of the water allocation sustainability and the natural disaster risk management. Accordingly, this study aims to investigate the adaptation strategy through re-operating the reservoir using artificial intelligence tool. The hybrid neuro fuzzy-based reservoir re-operation model was proposed by aiming to increase long-term reservoir water storage of Bhumibol Dam (BB) located in the Ping River Basin, Thailand. To accomplish this research goals, the reservoir re-operation model was developed by applying Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) in MATLAB. ANFIS is a novel hybrid approach of artificial neural network (ANN) and fuzzy logic system (FLS), which was developed based on Takagi-Sugeno fuzzy inference system. It is revealed that ANFIS model can help ensure more efficient operation of reservoir system than the classical model based on rule curve if the informative data was sufficiently provided [1]. ANFIS can generate a set of fuzzy IF-THEN rules with appropriate membership functions by identifying the input and output training dataset through a hybrid learning rule which combines the back-propagation gradient descent and a least squares method [1].

METHODOLOGY

The daily long-term reservoir data and hydrological data from 2000 to 2020 were used to develop the hybrid neuro fuzzy-based reservoir re-operation model of BB Dam. The seasonal water allocation plan in the Greater Chao Phraya Irrigation Scheme established by the Royal Irrigation Department (RID) and Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) was used to determine the daily target water demand of BB Dam. To develop ANFIS model, three main variables namely, initial water storage, reservoir inflow, and target water demand were determined as inputs and the current dam release was specified as output. The 80% of dataset was used for model training to generate the rule base relationship between the input and output variables and 20% of dataset was used for model testing to verify the model performance. The optimal reservoir release rules of BB Dam were then obtained from ANFIS model. The statistical performance metrics namely, Root Mean Square Error (RMSE) and R-squared (R^2) were evaluated to assess the ANFIS-based reservoir re-operation performances for both training and testing datasets. The ANFIS rule-based model were then applied in the water balance-based reservoir operation model developed by MATLAB Simulink Toolbox to re-operate the long-term reservoir operation of BB dam. In addition, the maximum and minimum water releases constrained by

the dam and reservoir systems in the Lower Ping River Basin were also assigned in the model. The last step was to evaluate the reservoir reliability performed by the ANFIS-based reservoir operation rules and compared the result with the current operation.

RESULTS AND DISCUSSIONS

The ANFIS-based reservoir operation rules were derived after the number of training epochs of 1,000 was reached and zero error tolerance was set in the model. The results show that the RMSE and R^2 between current release and simulated release accomplished by ANFIS are 6.52 and 0.70, respectively for the training dataset and 5.43 and 0.57, respectively for the testing dataset. When the water balance-based reservoir re-operation model was established and the ANFIS operation rules was embedded in the model, the long-term simulation run of BB Dam from 2000-2020 was accordingly conducted. The comparison of daily reservoir releases between current operation and simulated release by ANFIS-based reservoir operation rules is shown in Fig. 1. In addition, the reservoir re-operation performances quantified as the potential in increasing reservoir water storage during 2000-2020 and reservoir reliability are evaluated in Table 1. It can be evidently seen that ANFIS operation rule-based reservoir re-operation model can increase the reservoir storage throughout the year which is approximately 0.82% higher than current operation. The percent increase in reservoir water storage performed by ANFIS rule-based model is 0.45% in dry season (DS) and 1.26% in wet season (WS) which are higher than current operation. Moreover, the reliability index climbs up to 77% when ANFIS rule-based model was adopted which is much higher than those obtained from the current operation.

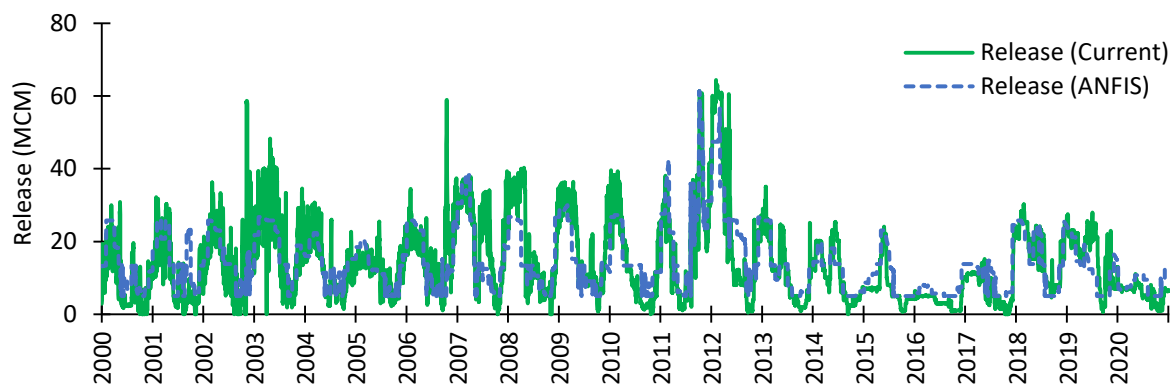


Fig. 1. Comparison of daily reservoir release simulated by ANFIS-based reservoir operation rules and current operation of BB Dam

Table 1. Average seasonal and yearly reservoir storages re-operated with ANFIS-based reservoir operation rules during 2000-2020 and reservoir reliability

Reservoir Operation	Reservoir Storage (MCM)			Reliability Index (%)
	DS	WS	Yearly	
Current operation	8,353	7,073	7,713	52
Re-operating with ANFIS rule	8,390	7,162	7,776	77
$\Delta\%$ Increase	+0.45	+1.26	+0.82	+25

CONCLUSION

Hybrid neuro fuzzy-based reservoir re-operation model is a state-of-the-art technology and self-learning approach between the input and output linguistic variables that resembles the current operation in controlling complex reservoir operating systems. Research findings revealed that it can be effectively implemented in increasing reservoir storage and achieving better reservoir performance compared to the current operation.

REFERENCES

- [1] Erol Keskin, M., Taylan, D., and Özlem, T., (2010). Adaptive neural-based fuzzy inference system (ANFIS) approach for modelling hydrological time series. *Hydrological Sciences Journal*, 51:4, 588-598.

ESTIMATION OF CROP WATER REQUIREMENT AND IRRIGATION EFFICIENCY USING CLOUD-BASED IRRISAT APPLICATION IN THE LOWER PING RIVER BASIN, THAILAND

Paphanin Phutonglom¹, Areeya Rittima^{2*}, Yutthana Phankamolsil³, Allan Sriratana Tabucanon⁴, Wudhichart Sawangphol⁵, Jidapa Kraisangka⁶, Yutthana Talaluxmana⁷, Varawoot Vudhivanich⁸, and Assada Kijpayung⁹

^{1, 2*}Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, Thailand

³Environmental Engineering and Disaster Management Program, Mahidol University, Kanchanaburi Campus, Thailand

⁴Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Thailand

^{5, 6}Faculty of Information and Communication Technology, Mahidol University, Thailand

⁷Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand

⁸Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Thailand

⁹Royal Irrigation Department, Thailand

*Corresponding author's e-mail: areeya.rit@mahidol.ac.th

Keywords— Crop Water Requirement, Reference Crop Evapotranspiration, Irrigation Efficiency, Cloud-Based IrriSAT Application, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

ABSTRACT

Estimation of crop water requirement (ET_c) is certainly essential for canal operators to evaluate the current status of irrigation water use and roles of irrigation in supplying water to meet crop requirements and improving the irrigation efficiency (IE) at the field scale. ET_c can be obtained based upon the reference crop evapotranspiration (ET_o) and crop coefficient (K_c). This study presented the K_c values generated from Cloud-Based IrriSAT application which is a satellite-based supportive tool for irrigation scheduling. The dynamic values of K_c of three irrigation schemes located in the Lower Ping River Basin namely; Tortongdang (TD), Wangbua (WB) and Wangyang-Nongkwan (WY-NK) during 2000–2020, were obtained and monitored using updated satellite imagery data of planting areas over growing seasons during an entire year for ET_c and IE estimation. K_c -IrriSAT were accordingly verified and adjusted with average K_c -RID which were calculated as a function of K_c from field observation for the different types of crops and accumulated area size monitored by GISTDA. The results after the calibration procedure revealed the similar patterns of average K_c generated by IrriSAT corresponding to the average K_c -RID and the high correlations between K_c -IrriSAT adjusted and average K_c -RID for TD, WB, and WY-NK irrigation projects were found. The irrigation efficiency can be principally obtained based upon the Net Irrigation Water Requirement (NIR) and Gross Irrigation Water Requirement (GIR). The results of ET_c were applied and seepage losses and effective rainfall were calculated to find NIR for estimating irrigation efficiency. It could be drawn from the results that the irrigation efficiency of TD, WB, WY-NK irrigation projects are 72.16%, 80.33%, and 56.49%, respectively which are relatively high particularly in TD and WB, indicating that the water supplying to the irrigated area was limited and consistent with estimated values of ET_c .

INTRODUCTION

Thailand's economic development has been mostly driven by the agricultural sector. Enhancing agricultural productivity in large-scale irrigation schemes plays an important role to raise the economic growth of the country. Therefore, water supply facilities and irrigation technologies should be potentially provided to farmers for raising agricultural productivity and modernizing the irrigation systems. Evaluating crop water requirement (ET_c) and irrigation efficiency (IE) in irrigation areas requires the crop coefficient (K_c) as an important parameter. The values of K_c are mainly subject to the crop types and dynamic growth periods of crops. This leads to the difficulty in estimating the certain amount of water to be delivered in irrigated areas. Cloud-IrriSAT application can also predict ET_c by referring to the strong relations between the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the cultivated area and K_c [1]. Accordingly, this study aims at tracing the dynamic values of ET_c by using cloud-based IrriSAT application to find crop water requirement and irrigation efficiency of three irrigation schemes in the Lower Ping River Basin including TD, WB, and WY-NK with the service areas of 992, 1,336, and 1,129 km², respectively.

METHODOLOGY

Cloud-based IrriSAT application was taken to estimate K_c for three main irrigation schemes; TD, WB, and WY–NK during 2000–2020 by identifying the crop growing area as input data. To evaluate the dynamic values of K_c , the GIS shape files of these three irrigation schemes must be converted into Keyhole Markup Language (KML) files. Various forms of K_c were generated through the cloud-based IrriSAT application. However, $K_c(\text{average})$ was only used to validate with those average values of crop coefficient (average K_c –RID) performed by using observation data from the Royal Irrigation Department (RID) and Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (GISTDA) during 2018–2019. Validating process of K_c –IrriSAT values was conducted using least square criterion to visualize the good correlation between K_c –IrriSAT and average K_c –RID and to find the adjusted factors corresponding to the specific growing periods. The reference crop evapotranspiration (ET_o) was computed based upon the FAO Penman–Monteith equation and the yearly crop water requirement (ET_c) was quantified using K_c –IrriSAT. The Net Irrigation Water Requirement (NIR) and Gross Irrigation Water Requirement (GIR) were then provided to estimate the irrigation efficiency of each scheme in the last step. Irrigation efficiency (IE) can be computed as the ratio of the amount of water consumed by crops or “Net Irrigation Water Requirement (NIR)” to the amount of water supplied through irrigation or “Gross Irrigation Water Requirement (GIR)”.

RESULTS AND DISCUSSIONS

The results show that the maximum $K_c(\text{average})$ –IrriSAT values are 0.6698, 0.6760, and 0.6841 for TD, WB, and WY–NK irrigation schemes, respectively which are much lower than those received from $K_c(\text{average})$ –RID with 1.3942, 1.3412, and 1.3415, respectively. However, it shows the similar patterns of average K_c generated by IrriSAT corresponding to the average K_c –RID over the growing seasons in a year. In addition, correlations between K_c –IrriSAT and average K_c –RID for TD, WB, and WY–NK irrigation schemes are relatively higher with R^2 of 0.8304, 0.8466, and 0.8314, respectively after the validation process was successfully done. The yearly estimated values of NIR are 406.25, 382.83, 247.00 MCM for TD, WB, and WY–NK irrigation schemes, respectively and the yearly measured values of GIR are 562.54, 476.56, and 437.06 MCM for TD, WB, and WY–NK irrigation schemes as illustrated in Fig 1. This indicates that the amount of irrigation water supplied to these three irrigation schemes are still sufficient to crop water requirements. However, high irrigation efficiency were definitely found in the TD and WB irrigation schemes with IE of 72.16% and 80.33%, respectively reflecting the possibility of experiencing the physical water scarcity in this region. Irrigation efficiency of WY–NK irrigation scheme was 56.49% considering as good in term of irrigation performance.

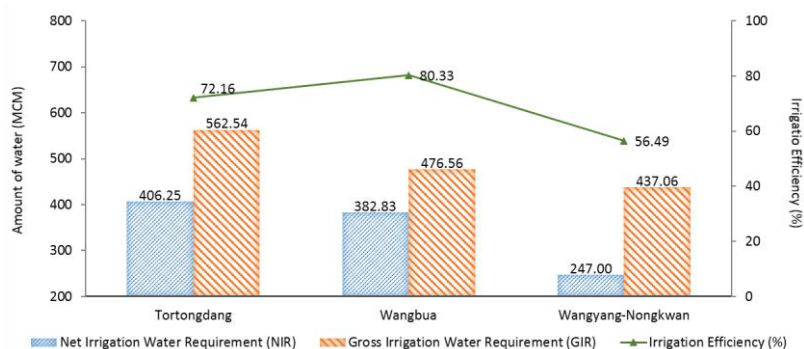


Fig.1 Comparison of yearly NIR and GIR and irrigation efficiency of three irrigation schemes

SUMMARY AND ACKNOWLEDGMENTS

This research revealed the estimation of crop water requirement and irrigation efficiency of three irrigation schemes in the Lower Ping River Basin using the cloud-based IrriSAT application. It could be drawn that IrriSAT application can be a useful tool to trace the dynamic values of crop water demand particularly in the small to large irrigation areas. In addition, it is very helpful for the canal operators to specify affordable amount of water delivery and to improve the irrigation efficiency at the field scale.

Authors would like to acknowledge the Agricultural Research Development Agency (Public Organization) for providing financial support.

REFERENCES

- [1] Hornbuckle, J., Vleeshouwer, J., Ballester, C., Montgomery, J., Hoogers, R., Bridgart, R. (2016). Estimating the crop coefficient. IrriSAT Technical Reference, 5–7.

PREDICTING THE RESERVOIR INFLOW OF BHUMIBOL DAM USING XGBOOST MACHINE LEARNING ALGORITHM

Pheeranat Dornpunya¹, Areeya Rittima^{2*}, Yutthana Phankamolsil³, Allan Sriratana Tabucanon⁴, Wudhichart Sawangphol⁵, Jidapa Kraisaangka⁶, Yutthana Talaluxmana⁷, Varawoot Vudhivanich⁸, and Assada Kijpayung⁹

^{1,2*}Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, Thailand

³Environmental Engineering and Disaster Management Program, Mahidol University, Kanchanaburi Campus, Thailand

⁴Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Thailand

^{5,6}Faculty of Information and Communication Technology, Mahidol University, Thailand

⁷Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand

⁸Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Thailand

⁹Royal Irrigation Department, Thailand

*Corresponding author's e-mail: areeya.rit@mahidol.ac.th

Keywords— Bhumibol Dam, Extreme Gradient Boosting (XGBoost), Reservoir Inflow Prediction

ABSTRACT

XGBoost, a tree-based ensemble machine learning algorithm, was used to predict the daily and monthly reservoir inflows of Bhumibol Dam in Thailand. The prediction models were developed using the observed inflow and climate data from 2000 to 2020 as major features. The structures of prediction model were determined by defining the future reservoir inflow at the predictive lead time steps as a function of the past inflow, precipitation, and humidity at time step t , as well as average inflow at the delayed time steps. Consequently, 54 XGBoost scenarios of the daily and monthly inflow prediction models were trained and validated by altering the model parameters namely; training–testing dataset ratio, learning rates, maximum number of iterations, and early stopping rounds. The statistical performance metrics namely; RMSE, MSE, R^2 , R , and NSE were employed to evaluate the model performance. It can be drawn from the validation results that the XGBoost model can deliver reliable and robust prediction outcomes. In addition, the XGBoost model is capable of predicting the complete performance of the daily reservoir inflow with higher accuracy than the monthly inflow.

INTRODUCTION

A more frequent occurrence of flood and drought in Thailand particularly in the past decade reflects the uncertainty of hydrological data due to changes in the regional climate and economic growth of the country. This has significant implications for the operational actors to revise the strategic plan based upon the data-driven decision-support tools to reduce disaster risks and losses. The accurate and reliable hydrological prediction plays vital role in the decision-making process specifically for real time operation of dam-reservoir system. Machine Learning (ML) which is the advanced area of Artificial Intelligence (AI), has been extensively used to improve predictive accuracy and understand hydrological uncertainty and provide the multiple lead times. It has proved a great success in predicting hydrological data such as rainfall, reservoir inflow, and river flow. [1]. Therefore, this study aims at evaluating the predictability of machine learning-based prediction models for reservoir inflow prediction. The extreme gradient boosting (XGBoost) algorithm with R programming language was employed to develop the daily and monthly prediction models of Bhumibol Dam where high variability of reservoir inflow has apparently found and probabilistic forecast has become increasingly important.

METHODOLOGY

Setting up the prediction model structures were performed by specifying the highly-correlated predictor variables as the model features including number of average inflow at the delayed time steps, climate data at time step t , and observed inflow data at time step t . Three datasets of training–testing ratio namely; 60:40, 70:30, and 80:20 and learning rates of 0.1, 0.01, and 0.001 were specified. Accordingly, 54 XGBoost scenarios of daily and monthly models were trained and validated to produce

good predictive results. In the predictive modelling process, predictor variables were firstly imported into the prediction models. Secondly, the time series of selected variables were divided into training and testing datasets according to the designated ratio. Thirdly, development of XGBoost model was controlled by the hyperparameter setting such as number of iterations (nrounds), learning rate (Eta), and early stopping rounds parameters. Accordingly, the maximum number of iterations was 10,000. The learning rate allows model to achieve faster convergence of training dataset. So, the learning rates of 0.1, 0.01, and 0.001 were determined in this study. The early stopping rounds are generally used to stop training procedures when the loss on training dataset starts increasing. Lastly, the level of agreement between the predicted values and observed values were evaluated by the statistical methods namely; RMSE, MSE, R^2 , R, and NSE.

RESULTS AND DISCUSSIONS

It is appeared that the best daily reservoir inflow prediction model can be made by specifying the reservoir inflow at lead time $t+1$ as a function of the observed inflow at time step t , average inflow at the delayed time steps $t-1$ to $t-3$ with learning rate of 0.1. The best input structures for monthly prediction model are the observed inflow at time step t , average inflow at the delayed time steps $t-1$ to $t-7$, precipitation and humidity at time step t with learning rate of 0.001. Moreover, splitting the training and testing datasets using 60:40 and 80:20 ratio gave the robust performance for the daily model and monthly model, respectively. The predictive performance for the daily model reached high with R^2 of 0.8854 and NSE of 0.8619 after the validation process was completely done. However, it is found that the predictive performance was lower for the monthly model with R^2 of 0.6788 and NSE of 0.6746. Fig.1 depicts the qualitative performance of the best daily and monthly prediction models for reservoir inflow of Bhumibol Dam. It was likely similar in terms of the inflow pattern between the observed and predicted inflows during 2000–2020. The average daily predicted inflow performed by the testing dataset of prediction model was really closed to the observed average values with small percentage difference of +0.27% and -2.85% for the daily and monthly predicted inflows, respectively. However, under-estimated predictive results were found for the daily and monthly prediction models when the peak inflows were considerably investigated.

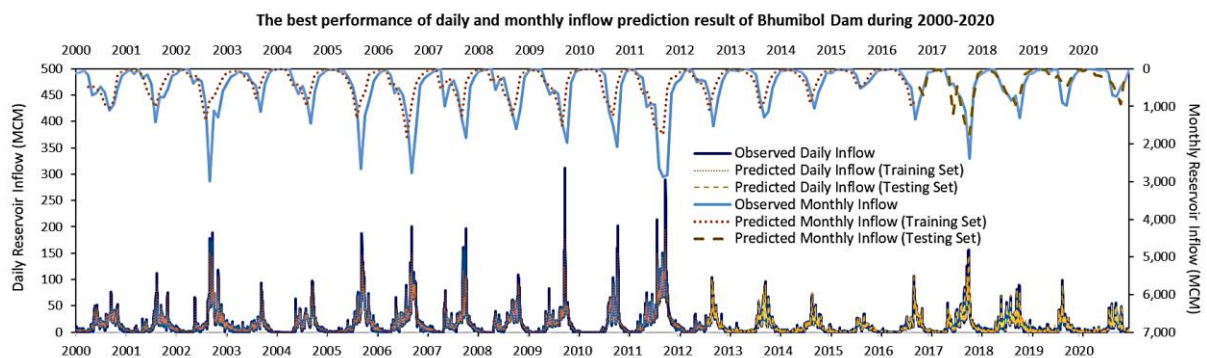


Fig.1 The qualitative comparison between observed and predicted inflows of the best daily and monthly prediction model of the Bhumibol Dam

SUMMARY AND ACKNOWLEDGMENTS

The daily and monthly reservoir inflows of the Bhumibol Dam were predicted using XGBoost algorithm. It is exhibited that the XGBoost model provided consistent and robust prediction results particularly for the daily prediction model with the greatest values of R^2 , R, NSE, and the lowest values of RMSE and MSE. The XGBoost model is capable of predicting the complete performance of the daily reservoir inflow with higher accuracy than the monthly inflow.

This work was financially supported by the Agricultural Research Development Agency (Public Organization).

REFERENCES

- [1] Chai, S., (2004). Artificial intelligence and social theory: a one-way street. *Perspectives*, 27(4):11–12.

Application of Machine Learning in Daily Reservoir Inflow Prediction of the Bhumibol Dam, Thailand

Jidapa Krairangka*^{‡‡}, Areeya Rittima^{†x}, Wudhichart Sawangphol*^{††}, Yutthana Phankamolsil[‡],
Allan Sriratana Tabucanon[§], Yutthana Talaluxmana[¶] and Varawoot Vudhivanich^{||}

*Faculty of ICT, Mahidol University, Nakhon Pathom, Thailand

Email: ^{‡‡}jidapa.kra@mahidol.ac.th, ^{††}wudhichart.saw@mahidol.ac.th

[†]Faculty of Engineering, Mahidol University, Nakhon Pathom, Thailand

Email: areeya.rit@mahidol.ac.th

[‡]Environmental Engineering and Disaster Management Program, Mahidol University,
Kanchanaburi Campus, Kanchanaburi, Thailand

Email: yutthana.pha@mahidol.ac.th

[§]Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Nakhon Pathom, Thailand

Email: allansriratana.tab@mahidol.ac.th

[¶]Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand

Email: fengynt@ku.ac.th

^{||}Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom, Thailand

Email: fengvww@ku.ac.th

Abstract—To mitigate floods and droughts in Thailand, the reservoir operations need accurate and reliable hydro-parameter information, e.g., inflow, to support decision making. In this paper, we explore and develop the predictive models for predicting the next-day inflow of the Bhumibol Dam, one of the major reservoirs of Thailand. We applied the machine learning techniques including decision tree, support vector regression, random forest, and extreme gradient boosting (XGBoost). Daily reservoir and climate Data from 2000 to 2021 were used in the analysis. After the series of experiments of model development, we finalize the model with the random forest algorithm having the best performance of $MAE=4.232$, $MSE=83.823$, and $R^2=0.867$. However, we believe that the models and the feature sets can be further explored and developed to achieve the better accuracy. As a result, we could practically incorporate the inflow prediction model to aid decision making in the reservoir operation.

Index Terms—Daily inflow prediction, Machine learning, Bhumibol Dam, Reservoir

I. INTRODUCTION

Floods and droughts have frequently caused devastation and destruction over Thailand. With the increases of agriculture and urban water demands and the consequences of climate change, water resource planning and reservoir management become more challenges in Thailand [1]. In general, improving reservoir operations relies on the construction of water facilities and infrastructures together with applications of innovative and integrated water resources management [2].

The Bhumibol Dam is one of the most important multi-purpose reservoirs in Thailand. The dam supplies water demand in the Greater Chao Phraya River Basin (GCPYRB). Although the current reservoir operating rules for the dam

is still capable of managing water resources in both wet and dry seasons, the rules were not designed to response to the future changes [3], [4]. To support the adaptive decision making for reservoir operation plans, the accurate and reliable hydrological information, such as, inflow, is definitely essential to support decision making.

In this paper, we develop the inflow predictive models for the Bhumibol Dam from the daily reservoir and climate data set using several machine learning techniques. The predictive models were built in different combination of features targeting the next-day inflow. Then, the models were evaluated by the performance indices: *Mean Absolute Error (MAE)*, *Mean Square Error (MSE)*, and *Coefficient of Determination (R^2)* [5]. Finally, we discuss the best model for predicting next-day inflow for the Bhumibol Dam.

The remainder of this paper is structured as follows. Section II discusses the necessary background and related works. Section III describes our data set. Section IV provides details of our proposed approach and experiments. Then, we discuss the results and summarize our paper in Section V and Section VI respectively.

II. BACKGROUND AND RELATED WORK

The Bhumibol Dam (Fig. 1) is located in the Ping River Basin, Sam Nyao District, Tak Province in the northern region of Thailand. It is the largest multi-purpose concrete arch reservoir with the capacity of 13,462 million cubic meters (MCM). The dam supplies water for irrigation, hydroelectric power production, flood control, fisheries and saltwater intrusion purpose. From the previous study [2], the average annual inflow of the Bhumibol Dam during 1969–2019 is approximately 5,694 MCM per year. With the effect of the

^x corresponding author

climate change, the average inflow after Thailand major flood in 2011 have been significantly declined [4].

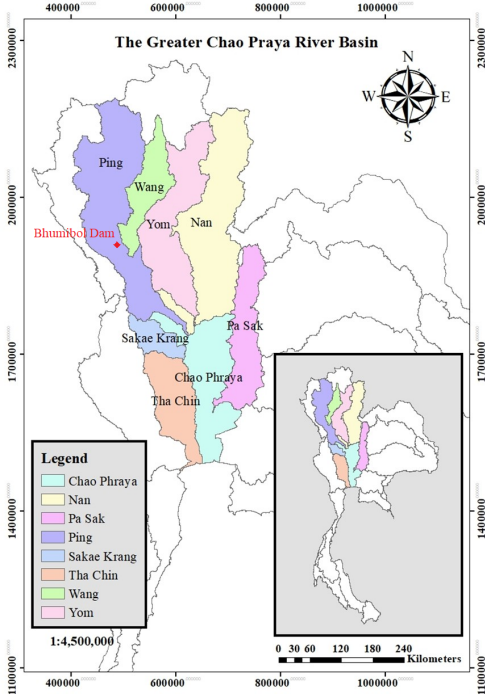


Fig. 1. The Bhumibol Dam in the Greater Chao Phraya River Basin

With the advancement of machine learning techniques, researchers have adopt more data-driven approach to inflow prediction. While the traditional inflow prediction adopt the mathematical formulation to estimate the underlying physical processes, machine learning mainly relies on historical hydro-meteorological data [6].

Several machine learning techniques have been widely adopted to develop accurate predictive models for inflow prediction, such as, artificial neural networks (ANNs) [7], [8], decision and regression tree, random forest [9], support vector machine (SVM) [10], [11], or gradient boosting (GB) [12]. In general, these techniques produced satisfied predictive models for inflow prediction. As a result, the models can be extended to aid decision makers for reservoir operation.

III. THE DATA SET

The data sets consist of the daily reservoir inflow data and climate data of the Bhumibol dam. The daily reservoir data was obtained from the Electricity Generating Authority of Thailand from January 2000 to May 2021. The reservoir data consists of the daily observed inflow (MCM), water level (m MSL), water storage (MCM), released water (MCM), and evaporation loss (MCM). On the other hands, the daily climate data were obtained from the POWER Data Access Viewer¹ publicly provided by the National Aeronautics and Space Administration (NASA) for the same period of time. The climate data set were collected upstream of the dam at the

coordinate 17.2425°N 98.9722°W. The climate data consists of surface temperature (*surftemp*-C), relative humidity (%), daily precipitation (mm), surface pressure (*surfpress*-kPa), and wind speed (m/s).

IV. PROPOSED APPROACH

In this section, we first give an overview of our proposed approach to develop predictive models for inflow prediction. The details of each process are presented in the following section.

A. Data preprocessing and Feature Selection

In this step, we prepare a set of features to be used on the predictive models. We preprocess the data sets described in Section III consisting of 9 features. We use the daily observed inflow to generate the set of features: the past reservoir inflow from 1 day to 7 days (e.g., *lag_1d*, *lag_2d* etc.), the average inflow in the past n days (i.e., the average inflow from 3, 5, 7, and 15 days, denoted by *avg_nd*), and the cumulative inflow in the past n days (i.e., the cumulative inflow of 3, 5, 7, and 15 days, denoted by *cumulative_nd*). As a result, we have 24 features for feature selection. We, then, use the feature importance technique to extract how much those features effect the model given the target variable. Table I shows the list of important features. The feature sets: *S1*, *S2*, and *S3*, are the combination of features with the similar level of importance, while *ALL* includes all 24 features.

TABLE I
A LIST OF FEATURE SETS

Feature Set	A List of Features
<i>ALL</i>	(all 24 features)
<i>S1</i>	<i>lag_1d</i> , <i>avg_3d</i> , <i>avg_7d</i>
<i>S2</i>	<i>lag_1d</i> , <i>avg_3d</i> , <i>avg_7d</i> , <i>humidity</i> , <i>surftemp</i> , <i>surfpressure</i>
<i>S3</i>	<i>lag_1d</i> , <i>avg_3d</i> , <i>avg_7d</i> , <i>released water</i> , <i>humidity</i> , <i>surftemp</i> , <i>surfpressure</i>

B. Model Development

This section describes components used to develop predictive models for next-day inflow prediction using the data sets mentioned in Section III. We start from preparing the preprocessed data set for the training and testing process. Next, we present algorithms and regressors with hyper-parameter tuning process for model development.

The 7,777 records and 24 features of the daily inflow and climate data were used in the model development. The data set is divided into two groups, a training data set and a testing data set, with a ratio of 80:20. As a result, the training data set contains 6,222 data points and the testing data set contains 1,555 data points.

The predictive models are automatically constructed based on a variety of machine learning regression algorithms using the training data. The regression algorithms learn relationships between inputs and continuous outputs of the training data [13]. We define features as inputs of the predictive models to determine the target output, i.e, the next-day inflow. Then the predictive models are evaluated using testing data. Finally, the predictive model that has the best performance is selected.

¹Available at <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

We select the four well-known regression algorithms for model development: 1) Decision Tree (DT), 2) Random Forest (RF), 3) Support Vector Machine (SVM) and 4) XGBoost [14].

In our experiments, we use the Python packages, called `Scikit-learn` [15] and `XGBoost` [14] for the model development. The packages contain the selected regressors modules, including, *DecisionTreeRegressor* for the DT algorithm, *RandomForestRegressor* for the RF algorithm, *SVR* for the SVM algorithm, and *XGBRegressor* for the XGBoost algorithm.

To obtain the most optimal models, we apply *grid search* approach [16] to determine the best setting of hyperparameters. The hyperparameters are the variables controlling the capability of models to learn and use of resources. The results from the grid search are shown as follows:

- 1) **DecisionTreeRegressor**: Maximum depth of the tree=6; Splitting criterion=absolute_error; Minimum sample leaf=4; Minimum sample split=6; Maximum features=none
- 2) **RandomForestRegressor**: Maximum depth of the tree=10; Splitting criterion=absolute_error; Number of ensemble trees=1000; Minimum sample leaf=1; Minimum sample split=5; Maximum features=none
- 3) **SVR**: Regularization=10; Kernel=linear
- 4) **XGBRegressor**: Booster=gbtree; Learning rate=0.3; Learning objective=reg:squarederror; Validation evaluation metric=root mean square error; L2 regularization=0.5; L1 regularization=0.1

Once we acquire the best set of hyperparameters, we train the models with the set of features described in Table I with the given configuration on the training data set using 10-fold cross-validation. Lastly, we evaluate the performance of the models on the testing data set.

C. Evaluation

In this section, we present the details of model training and evaluation, including the evaluation metrics and the results of the cross-validation.

Evaluation Metrics: We use the following performance metrics [5] to evaluate the regression models including: 1) *Mean Absolute Error (MAE)*, measures the absolute difference between actual and predicted values

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|; \quad (1)$$

where n is the number of data points, y_i is a actual value, and \hat{y}_i is a predicted value. 2) *Mean Squared Error (MSE)* calculates the squared difference between actual and predicted values, as defined by:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2; \quad (2)$$

where n is the number of data points, y_i is a actual value, and \hat{y}_i is a predicted value. Finally, 3) *Coefficient of Determination: R-squared (R^2)* measures the goodness of fit of a model, as calculated by:

$$R^2 = 1 - \frac{\text{sum squared regression (SSR)}}{\text{total sum of squares (SST)}}; \quad (3)$$

where the sum squared regression is the sum of the residuals squared and the total sum of squares is the sum of distance that a data point is away from the mean all squared.

Cross-validation Results: This section presents the results of model training and validation through the 10-fold cross-validation. The experiments are conducted by using those four different sets of features listed in Table I.

Table II shows the results of 10-fold cross-validation. For the models with all features (i.e., *ALL*), the XGBoost regressor outperforms the other regressors with the lowest value of *MAE* and *MSE*, and the highest value of R^2 . The second best model is the RF regressor, followed by SVM.

We also apply the four regressors with the remaining feature sets (*S1*, *S2*, and *S3*) in order to find the smallest sets for the models. Table II shows that the performance of the model trained with the feature set, *S2*, is better than the ones with the feature set *S1* and *S3* in overall. However, it under-performs the model trained with all features for all regressors. Hence, we further explore the models with all features and the feature set, *S2* in testing.

TABLE II
THE CROSS-VALIDATION RESULTS OF EACH FEATURE SET

Feature Set	Regressors	MAE	MSE	R^2
ALL	Decision Tree	3.785	64.726	0.874
	SVM	3.679	57.032	0.889
	Random Forest	3.492	53.333	0.897
	XGBoost	3.594	51.050	0.901
S1	Decision Tree	4.716	105.487	0.793
	SVM	4.483	101.592	0.800
	Random Forest	4.480	102.066	0.800
S2	XGBoost	4.580	103.640	0.798
	Decision Tree	4.531	110.767	0.785
	SVM	4.921	99.681	0.804
S3	Random Forest	4.334	92.656	0.819
	XGBoost	4.488	92.306	0.820
	Decision Tree	4.532	110.773	0.785
S3	SVM	4.911	99.829	0.804
	Random Forest	4.372	94.106	0.817
	XGBoost	4.478	91.433	0.819

V. DISCUSSION

In this section, the models trained with XGBoost, RF, and SVM regressors with the *ALL* features and the feature set *S2* are exploited and tested with the testing data set. As shown in Table III, the model trained with all features outperforms the one trained with the feature set *S2*. The performance of the SVM, RF, and XGBoost regressors are similar in term of all evaluation metrics. However, the model trained with the RF regressor has the best performance for both *ALL* and *S2* feature sets

TABLE III
THE TESTING RESULTS OF *ALL* AND *S2* FEATURE SETS

Feature Set	Regressors	MAE	MSE	R^2
ALL	SVM	3.602	55.527	0.912
	Random Forest	3.366	44.296	0.929
	XGBoost	3.698	62.581	0.900
S2	SVM	4.749	93.433	0.851
	Random Forest	4.232	83.823	0.867
	XGBoost	4.457	89.792	0.857

We further investigate the results by comparing the predicted values against the observed values. If the data points are close to the projected (red dashed) line, we can conclude that the regressor make a prediction reasonably well. Fig 2 shows the comparison results of the three regressors with *ALL* and *S2* feature sets respectively. The solid blue line indicates the estimated regression line of the data points, while the blue shade indicates its 95% confidence interval. The results show that the RF regressor with *ALL* and *S2* feature set have the best prediction among other regressors. However, the performance of those two models are indifferent.

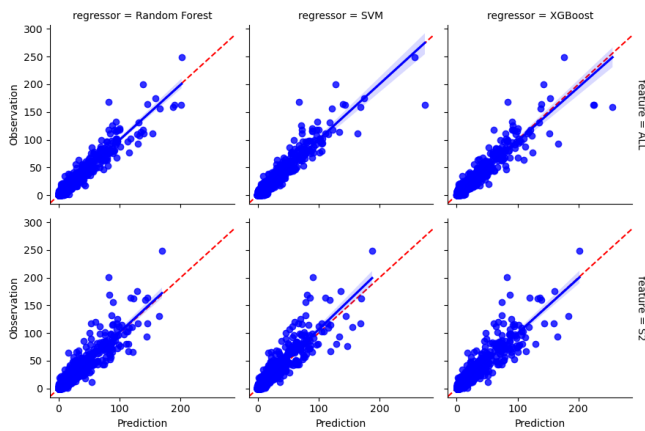


Fig. 2. Prediction results of RF, SVM, and XGBoost with *ALL* and *S2*

VI. CONCLUSION

In summary, we built the predictive models for the next-day inflow prediction for the Bhumibol Dam using several machine learning algorithms. The daily reservoir data and climate data were used to develop the models. After the series of experiments, we found that the model trained with the RF algorithm on *ALL* feature set gives the best performance. However, the models still have room for improvement, for example, applying some advanced machine techniques, such as LSTM [17], or reinforcement learning. In additions, the feature sets could be further investigated in order to create a robust model. Finally, the intensive validation and application on reservoir operation in practice should be exploited.

ACKNOWLEDGMENT

We acknowledge the support from the Thailand Science Research and Innovation and National Research Council of Thailand, under grant number SIP6230022 and the Faculty of ICT, Mahidol University, Thailand. We would like to thank the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) for the kind support on reservoir data for analysis. The climate data used in this study were acquired as part of the POWER Data Access Viewer distributed by the National Aeronautics and Space Administration (NASA).

While we are taking full responsibility for any remaining errors and shortcomings of the paper, we also thank the anonymous reviewers from the ECTI conference for their valuable input that has greatly improved the quality of this paper.

REFERENCES

- [1] P. Thinpanga, "The challenge of water management in Thailand," Sep 2021. [Online]. Available: <https://www.policyforum.net/the-challenge-of-water-management-in-thailand/>
- [2] K. M. Kyaw, A. Rittima, Y. Phankamolsil, A. S. Tabucanon, W. Sawangphol, J. Kraisingka, Y. Talaluxmana, and V. Vudhivanich, "Assessing reservoir reoperation performances through adapted rule curve and hedging policies under climate change scenarios: In-depth investigation of case study of Bhumibol Dam in Thailand," in *Proceedings of the 10th International Conference on Environmental Engineering, Science and Management*, May 2021, pp. 225–232.
- [3] S. Koontanakulvong, V. Vudhivanich, A. Rittima, Y. Phankamolsil, A. S. Tabucanon, W. Sawangphol, J. Kraisingka, and Y. Talaluxmana, "Lesson learnt from past to present and water storage potential in future for Bhumibol and Sirikit Dams," in *Proceedings of the 13th THAICID National E-Symposium*, Studio of Irrigation Development Institute, Bangkok, Thailand, July 2020, pp. 119–134.
- [4] A. S. Tabucanon, A. Rittima, D. Raveephinit, Y. Phankamolsil, W. Sawangphol, J. Kraisingka, Y. Talaluxmana, V. Vudhivanich, and W. Xue, "Impact of climate change on reservoir reliability: A case of Bhumibol dam in Ping River Basin, Thailand," *Environment and Natural Resources Journal*, vol. 19, no. 4, pp. 266–281, 2021.
- [5] A. Botchkarev, "Performance metrics (error measures) in machine learning regression, forecasting and prognostics: Properties and typology," *arXiv preprint arXiv:1809.03006*, 2018.
- [6] T. D. Tran, V. N. Tran, and J. Kim, "Improving the accuracy of dam inflow predictions using a long short-term memory network coupled with wavelet transform and predictor selection," *Mathematics*, vol. 9, no. 5, p. 551, 2021.
- [7] M. Valipour, M. E. Banihabib, and S. M. R. Behbahani, "Comparison of the ARMA, ARIMA, and the autoregressive artificial neural network models in forecasting the monthly inflow of Dez Dam Reservoir," *Journal of Hydrology*, vol. 476, pp. 433–441, 2013.
- [8] S. Amnatsan, S. Yoshikawa, and S. Kanae, "Improved forecasting of extreme monthly reservoir inflow using an analogue-based forecasting method: a case study of the Sirikit Dam in thailand," *Water*, vol. 10, no. 11, p. 1614, 2018.
- [9] T. Kim, J.-Y. Shin, H. Kim, S. Kim, and J.-H. Heo, "The use of large-scale climate indices in monthly reservoir inflow forecasting and its application on time series and artificial intelligence models," *Water*, vol. 11, no. 2, p. 374, 2019.
- [10] X. Yu, X. Zhang, and H. Qin, "A data-driven model based on Fourier transform and support vector regression for monthly reservoir inflow forecasting," *Journal of Hydro-environment Research*, vol. 18, pp. 12–24, 2018.
- [11] M. Babaei, R. Moeni, and E. Ehsanzadeh, "Artificial neural network and support vector machine models for inflow prediction of dam reservoir (case study: Zayandehroud Dam Reservoir)," *Water Resources Management*, vol. 33, no. 6, pp. 2203–2218, 2019.
- [12] P. Dornpunya, A. Rittima, Y. Phankamolsil, A. S. Tabucanon, W. Sawangphol, J. Kraisingka, Y. Talaluxmana, and V. Vudhivanich, "The predictability of reservoir inflow prediction model for Sirikit dam using XGBoost machine learning algorithm," in *The 8th National Conference on Water Resources Engineering & The 5th International Conference on Water Resources Engineering*, 2021, pp. 31–39.
- [13] F. Stulp and O. Sigaud, "Many regression algorithms, one unified model: A review," *Neural Networks*, vol. 69, pp. 60–79, 2015. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0893608015001185>
- [14] T. Chen and C. Guestrin, "XGBoost: A scalable tree boosting system," in *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2016, pp. 785–794.
- [15] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg *et al.*, "Scikit-learn: Machine learning in Python," *the Journal of Machine Learning Research*, vol. 12, pp. 2825–2830, 2011.
- [16] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, 2017.
- [17] A. Sherstinsky, "Fundamentals of recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM) network," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 404, p. 132306, 2020.

การศึกษาแนวทางการบริหารเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเพื่อประเมินศักยภาพของน้ำเหลือใช้ สำหรับลุ่มน้ำเจ้าพระยา

ปวีณกร พ่วงศรี¹, ณธชา สารเมืองโฮม¹, กฤติ ยารังษี¹, ขวัญชนก ราชประโคน¹,

อารียา ฤทธิมา^{1*}, กฤษณัส สุรกีตย์¹ และธรมณีย์ ทองดารา¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล, นครปฐม

Email: areeya.rit@mahidol.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) วิเคราะห์แนวทางการบริหารเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนในอดีตถึงปัจจุบัน (2) วิเคราะห์ปัจจัยน้ำต้นทุนและความต้องการน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และ (3) ประเมินศักยภาพของน้ำเหลือใช้ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน เพื่อช่วยลดการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์สำหรับใช้ในลุ่มน้ำเจ้าพระยา โดยได้รวบรวมข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้า-ไหลออกจากอ่างเก็บน้ำรายวัน ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูก และข้อมูลแผนการจัดสรรน้ำตั้งแต่ปี พ.ศ. 2552-2563 ของกรมชลประทาน และทำการคำนวณหาปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานสุทธิในพื้นที่ (Local Demand) ด้วยโปรแกรม ET_o Calculator และ CROPWAT 8.0 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำมาใช้ในการกำหนดสถานการณ์สมมติในด้านปัจจัยความต้องการน้ำร่วมกับข้อกำหนดของปัจจัยความต้องการน้ำร่วมกันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา (Joint Demand) จำนวน 5 รูปแบบ เพื่อจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำระยะยาว และประเมินศักยภาพของน้ำเหลือใช้ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานสุทธิในพื้นที่จากการคำนวณเท่ากับ 260 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานที่ต้องจัดส่งในพื้นที่เท่ากับ 434 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี โดยคิดที่ประสิทธิภาพการชลประทาน 60% นอกจากนี้ ผลการจำลองทั้ง 5 สถานการณ์สมมติให้ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือได้อยู่ระหว่าง 88.48%-96.21% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตาม สถานะปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสุดท้ายของสถานการณ์สมมติ 4 (กำหนดค่าความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่จากผลการคำนวณ และกำหนดความต้องการน้ำร่วมกันในลุ่มน้ำเจ้าพระยาเท่ากับ 25% ของความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่) และสถานการณ์สมมติ 5 (กำหนดค่าความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่จากผลการคำนวณ และกำหนดความต้องการน้ำร่วมกันในลุ่มน้ำเจ้าพระยาแยกตามปีน้ำเท่ากับ 10%, 25% และ 40% ของความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ในปีน้ำน้อย ปีน้ำปกติ และปีน้ำมาก ตามลำดับ) มีค่าใกล้เคียงกับผลการปฏิบัติงานจริงมากที่สุด ซึ่งบ่งชี้ถึงศักยภาพของน้ำเหลือใช้จากสถานการณ์สมมติ 4 และสถานการณ์สมมติ 5 ที่มีค่าเท่ากับ 566 และ 542 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ผลที่ได้จากการศึกษานี้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจที่สำคัญในการกำหนดนโยบายและแผนการจัดสรรน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเพื่อช่วยสนับสนุนการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาในอนาคต

คำสำคัญ: การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ, ปริมาณน้ำเหลือใช้, เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน, ลุ่มน้ำเจ้าพระยา

Abstract

This study aims at (1) analyzing the current operation of Khwae Noi Bumrung Dan (KNB) Dam, (2) analyzing the water supply and water demand of KNB Dam, and (3) assessing the potential of residual water from KNB Dam to help reduce the volume of water releases from the Bhumibol and Sirikit Dams in the Chao Phraya River Basin (CPYRB). The study data includes the daily reservoir inflow and outflow, cultivated area size, and water allocation plan established by the Royal Irrigation

Department (RID) which was collected during 2009–2020. The local demand for irrigation of KNB Dam was accordingly estimated using ET_o Calculator and CROPWAT 8.0. This estimated result was then used to set up five scenarios considering based on the local demand and joint demand for long-term reservoir simulation and assessment of potential of residual water of KNB Dam. The result shows that the estimated value of local crop water demand was amounted to 260 MCM per year and gross irrigation requirement was approximately 434 MCM per year when the irrigation efficiency of 60% was specified. In addition, the simulated results of five scenarios show acceptable levels of reliability index varying from 88.48% to 96.21%. However, the ending water storage in reservoir at the final time steps of Scenario 4 (the total amount of local demand was identified and joint demand for CPYRB is specified as 25% of local demand during 2009–2020) and Scenario 5 (the total amount of local demand was determined and joint demand for CPYRB is specified as 10%, 25%, and 40% of local demand for dry year, normal year, and wet year, respectively) seem to be very close to the current operation. Moreover, the potential residual water for Scenario 4 and Scenario 5 were amounted to 566 and 542 MCM per year, respectively. It could be drawn from this study that the resulting residual water is very useful information for decision making process in establishing water allocation regime and supporting for reservoir operation in CPYRB in future.

Keywords: Reservoir Operation, Residual Water Potential, Khwae Noi Bumrung Dan Dam, Chao Phraya River Basin

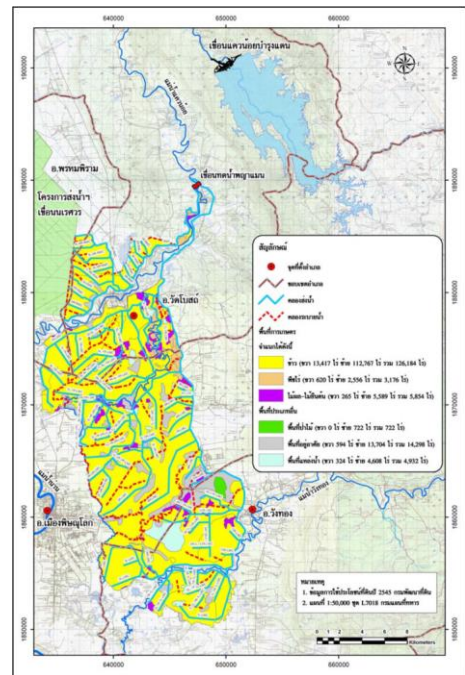
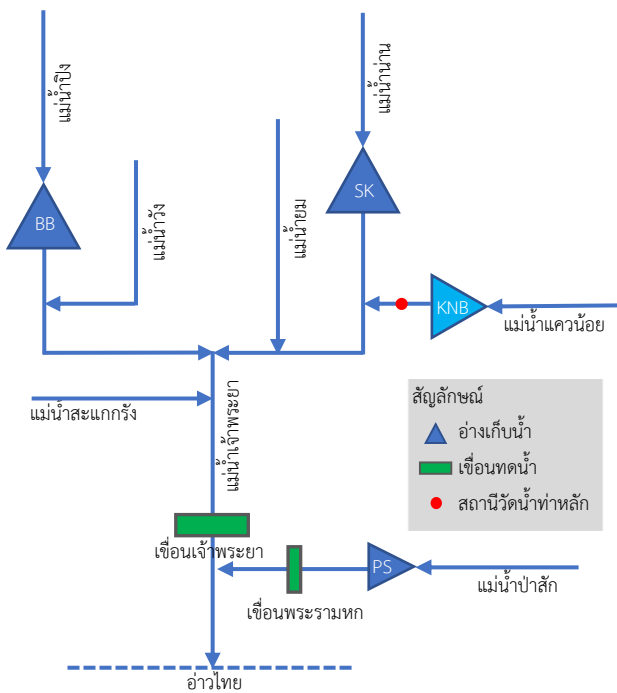
1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

สถานการณ์วิกฤติภัยแล้งที่เกิดขึ้นติดต่อกันในช่วงปี พ.ศ. 2560–2563 ที่ผ่านมาในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา อีกทั้งเหตุการณ์ภัยแล้งรุนแรงที่เคยเกิดขึ้นในอดีตได้ส่งผลกระทบต่อและสร้างความเสียหายทางเศรษฐกิจของประเทศอย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคเกษตรกรรมซึ่งถือเป็นหัวใจหลักในการขับเคลื่อนการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศหลายภาคส่วนได้ตระหนักไปถึงความสำคัญของการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำอย่างเป็นระบบในลุ่มน้ำเจ้าพระยาเพื่อเพิ่มศักยภาพในการจัดส่งน้ำให้เพียงพอตามความต้องการซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปัจจัยการเจริญเติบโตของเมืองและแผนการพัฒนาเศรษฐกิจประเทศ รวมทั้งบรรเทาผลกระทบจากภัยแล้งในช่วงสถานการณ์น้ำต้นทุนจากเขื่อนเก็บกักหลักมีจำกัดอันเนื่องมาจากปัจจัยความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศ

เขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเป็นหนึ่งในเขื่อนอเนกประสงค์หลักที่ถูกพัฒนาและออกแบบขึ้นในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาโดยกรมชลประทานและเริ่มปฏิบัติการในปี พ.ศ. 2552 เขื่อนแควน้อยบำรุงแดนสร้างปิดกั้นแม่น้ำแควน้อยซึ่งเป็นแม่น้ำสาขาของแม่น้ำน่าน ตัวเขื่อนและอ่างเก็บน้ำตั้งอยู่ในเขตอำเภอวัดโบสถ์ จังหวัดพิษณุโลก โดยมีความจุเก็บกัก 939 ล้านลูกบาศก์เมตร ทางด้านท้ายของเขื่อนได้มีการสร้างเขื่อนทดน้ำพญาแมนเพื่อผันน้ำให้กับโครงการชลประทานทั้งทางฝั่งขวาและฝั่งซ้ายของแม่น้ำแควน้อย (กรมชลประทาน, 2565) และในบางพื้นที่ของจังหวัดพิษณุโลกเพื่อใช้ในการอุปโภคและบริโภค ส่วนน้ำที่เหลือ (ซึ่งในการศึกษานี้กำหนดให้เป็น “ปริมาณน้ำเหลือใช้ (Residual Water)”) จะถูกระบายผ่านเขื่อนทดน้ำซึ่งจะไหลลงมาสมทบกับแม่น้ำน่านสำหรับนำไปใช้ในพื้นที่เพาะปลูกของโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ รวมทั้งตอบสนองความต้องการน้ำนอกภาคเกษตรกรรมในบริเวณที่ราบลุ่มเจ้าพระยาดังแสดงแผนผังระบบแม่น้ำในรูปที่ 1

อาจกล่าวได้ว่า เชื้อนแควน้อยบำรุงแดนเป็นเชื้อนหลักที่มีบทบาทสำคัญที่มีส่วนช่วยสนับสนุนการบริหารจัดการน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ซึ่งเป็นเขื่อนเก็บกักหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยา จากผลการวิเคราะห์สถานะของน้ำต้นทุนโดยอาศัยฐานข้อมูลอุทกวิทยาในอดีตของเชื้อนแควน้อยบำรุงแดนพบว่า ปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยบริเวณลุ่มน้ำตอนบนอยู่ในเกณฑ์สูงถึง 1,353 มิลลิเมตร ประกอบกับปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำมีความแปรปรวนค่อนข้างสูงโดยมีค่ารายปีเฉลี่ยสูงถึง 1,653 ล้านลูกบาศก์เมตร (กรมชลประทาน, 2563) ส่งผลทำให้มีศักยภาพน้ำเหลือใช้ (Residual Water) ที่สามารถนำมาใช้ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาได้ นอกจากนี้ ยังเป็นการบรรเทาอุทกภัยในพื้นที่ชลประทานตอนล่างสองฝั่งแม่น้ำแควน้อยเองในช่วงสถานการณ์น้ำมากที่มีความถี่ของการเกิดเหตุการณ์สูง

ด้วยเหตุนี้ การศึกษานี้มุ่งเน้นที่จะประมาณการปริมาณความต้องการน้ำในพื้นที่ของเชื้อนแควน้อยบำรุงแดนเอง และทำการประเมินถึงศักยภาพของน้ำเหลือใช้ในพื้นที่ซึ่งจะเป็นข้อมูลสนับสนุนที่สำคัญต่อผู้ปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องในการกำหนดนโยบายและแผนการจัดสรรน้ำของเชื้อนแควน้อยบำรุงแดนให้มีความเหมาะสมเพื่อช่วยตอบสนองความต้องการน้ำร่วมกันในพื้นที่น้ำเจ้าพระยาอย่างเต็มศักยภาพ โดยสามารถลดปริมาณการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ลงสำหรับเก็บกักน้ำต้นทุนไปใช้ในอนาคต จากการนำน้ำเหลือใช้ของเชื้อนแควน้อยบำรุงแดนไปใช้ในลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่างก่อน



รูปที่ 1 เชื้อนแควน้อยบำรุงแดนและโครงการชลประทานในพื้นที่
ที่มา: กรมชลประทาน (2563)

จากการศึกษาแนวทางการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาในอดีตพบว่า ในปี พ.ศ. 2522 บริษัทเอเคอร์แห่งแคนาดาได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองระบบสำหรับศึกษาถึงการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยา-แม่กลองโดยอาศัยข้อมูลอุทกวิทยาระหว่างปี พ.ศ. 2495-2519 ก่อนที่จะมีการสร้างเชื้อนแควน้อยบำรุงแดน การศึกษาได้จัดแบ่งพื้นที่ชลประทานออกเป็นบล็อก และกำหนดโหนดความต้องการน้ำ (Demand Node) ซึ่งใช้น้ำจากเขื่อนเก็บกักหลักคือเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในรูปแบบของความต้องการน้ำร่วม (Joint Demand) ซึ่งเป็น

ความต้องการน้ำที่จะต้องระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ร่วมกัน และความต้องการน้ำทำเขื่อนแยกจากกัน (Local Demand) ซึ่งเป็นปริมาณความต้องการน้ำในพื้นที่อย่างน้อยที่สุดที่จะต้องระบายจากเขื่อนให้เพียงพอ การศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ระยะคือ การใช้น้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาในปี พ.ศ. 2521, 2528 และ 2533 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำที่สามารถเก็บกักไว้ได้ในอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์มีไม่เพียงพอในช่วงการเพาะปลูกฤดูแล้ง ด้วยเหตุนี้ บริษัทเอเคอร์จึงได้เสนอแนะให้ผันน้ำจากแม่น้ำสายสาขาต่าง ๆ มาใช้ในลุ่มน้ำเจ้าพระยา (ฉลอง, 2538; การุณ, 2528) อย่างไรก็ตาม หลังมีการสร้างเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนกั้นแม่น้ำแควน้อยแล้วเสร็จ ปริมาณน้ำระบายจากเขื่อนส่วนหนึ่งถูกจัดส่งมาใช้ตอบสนองความต้องการน้ำในเขตลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่างเพื่อบรรเทาปัญหาการขาดน้ำ (สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ, 2563) ในขณะเดียวกัน ปริมาณน้ำส่วนหนึ่งถูกจัดส่งไปใช้ในพื้นที่โครงการชลประทาน (Command Area) ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนครอบคลุมพื้นที่ 155,166 ไร่ ในเขต 4 เขตอำเภอ ได้แก่ อ.เมือง อ.วัดโบสถ์ อ.วังทอง และ อ.พหลโยธิน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1 โดยแยกเป็น (1) พื้นที่การเกษตร จำนวน 135,214 ไร่ (2) พื้นที่ป่าไม้ จำนวน 722 ไร่ (3) พื้นที่อยู่อาศัย จำนวน 14,298 ไร่ และ (4) พื้นที่แหล่งน้ำ จำนวน 4,932 ไร่ (กรมชลประทาน, 2563)

ตารางที่ 1 พื้นที่โครงการชลประทานของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

ลำดับ	อำเภอ	ตำบล	พื้นที่โครงการชลประทาน (ไร่)	ฝั่งขวา (ไร่)	ฝั่งซ้าย (ไร่)
1	เมือง	สมอแข	21,300	-	21,300
		อรัญญิก	4,377	-	4,377
		หัวรอ	6,731	-	6,731
		ดอนทอง	17,977	-	17,977
		บ้านป่า	16,536	-	16,536
		มะขามสูง	5,981	-	5,981
		ปากโทก	1,978	-	1,978
2	วัดโบสถ์	ท้อแท้	13,576	5,731.34	7,844.66
		วัดโบสถ์	14,498	6,240.18	8,257.82
		ท่างาม	3,612	2,657.48	954.52
3	วังทอง	วังพิศกุล	26,755	-	26,755
		วังทอง	14,739	-	14,739
		แม่ระกา	2,646	-	2,646
4	พหลโยธิน	หอกลอง	3,863	-	3,863
		ทับยายเชียง	597	597	-
พื้นที่ทั้งหมด			155,166	15,226	139,940

ที่มา : กรมชลประทาน (2563)

2. วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้มุ่งเน้นที่จะ (1) วิเคราะห์แนวทางการบริหารเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนในอดีตถึงปัจจุบัน (2) ศึกษาถึงปัจจัยน้ำต้นทุนและความต้องการน้ำในพื้นที่ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนในปัจจุบัน และ (3) ประเมินศักยภาพของน้ำเหลือใช้จากเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเพื่อช่วยลดการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในลุ่มน้ำเจ้าพระยา

3. วิธีการวิจัย

วิธีการวิจัยประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลักดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการรวบรวมข้อมูลและตรวจสอบความถูกต้องเบื้องต้นได้แก่ ข้อมูลภูมิอากาศ (Climate Data) ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง (Reservoir Inflow) ปริมาณน้ำไหลออกจากอ่าง (Reservoir Outflow) ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูก (Cultivated Area) และแผนการจัดสรรน้ำ (Water Allocation Plan, WAP) ในช่วงฤดูแล้งและฤดูฝนของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน โดยข้อมูลทั้งหมดรวบรวมได้ระหว่างปี พ.ศ. 2552–2563 จากกรมชลประทานครอบคลุมถึงความต้องการน้ำจากอ่างเพื่อภาคการเกษตร การอุปโภคบริโภค การอุตสาหกรรม การรักษาระบบนิเวศน์ และอื่น ๆ

ขั้นตอนที่ 2 ทำการวิเคราะห์ในรูปของสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) ถึงแนวทางการบริหารเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนในอดีตถึงปัจจุบันจากข้อมูลปริมาณน้ำไหลออกและสถานะของปริมาณน้ำเก็บกักในเขื่อน ทำการศึกษาปัจจัยนำต้นทุนจากข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง และทำการศึกษาปัจจัยความต้องการน้ำในพื้นที่จากข้อมูลแผนการจัดสรรน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

ขั้นตอนที่ 3 ทำการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำสำหรับการชลประทานในพื้นที่ (Local Demand for Irrigation) โดยอาศัยหลักการคำนวณหาปริมาณความต้องการน้ำของพืชโดยใช้โปรแกรม ET_o Calculator (Ajoy, 2020) และโปรแกรม CROPWAT 8.0 (Clarke et al., 1998) ซึ่งพัฒนาโดยองค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) ร่วมกัน จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้มาคำนวณปริมาณน้ำเพื่อการชลประทานที่ต้องจัดส่งสุทธิในพื้นที่ (Local Demand for Irrigation) โดยคิดประสิทธิภาพการชลประทานเท่ากับ 60% และทำการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค (Municipal Water Demand) จากสถิติข้อมูลจำนวนประชากรใน 4 เขตอำเภอของจังหวัดพิษณุโลกได้แก่ อ.เมือง อ.วัดโบสถ์ อ.วังทอง และ อ.พรหมพิราม รวมประชากรทั้งสิ้น 525,686 คน โดยกำหนดอัตราการใช้น้ำ 200 ลิตรต่อคนต่อวัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรที่ 2, 2562)

ขั้นตอนที่ 4 ทำการศึกษาแนวทางการบริหารเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนด้วยการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำระยะยาวแบบอ่างเดี่ยวรายวัน (Daily Single Reservoir Operation) โดยอาศัยหลักสมดุลน้ำและใช้เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating Policy) ทั้งนี้ได้กำหนดสถานการณ์สมมติ 5 รูปแบบตามปัจจัยความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ (Local Demand) และปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา (Joint Demand) ดังนี้ (1) สถานการณ์สมมติ 1: กำหนดค่าความต้องการน้ำทุกกิจกรรมการใช้น้ำตามแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทาน (2) สถานการณ์สมมติ 2: กำหนดค่าความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม CROPWAT 8.0 ความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคจากการคำนวณ และความต้องการน้ำเพื่อการรักษาระบบนิเวศตามแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทาน (3) สถานการณ์สมมติ 3: กำหนดค่าความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม CROPWAT 8.0 และความต้องการน้ำในกิจกรรมอื่นกำหนดตามแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทาน (4) สถานการณ์สมมติ 4: กำหนดค่าความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ตามสถานการณ์สมมติที่ 3 และกำหนดความต้องการน้ำร่วมกันในลุ่มน้ำเจ้าพระยาเท่ากับ 25% ของความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ และ (5) สถานการณ์สมมติ 5: กำหนดค่าความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ตามสถานการณ์สมมติที่ 3 และกำหนดความต้องการน้ำร่วมกันในลุ่มน้ำเจ้าพระยาแยกตามปีน้ำเท่ากับ 10%, 25% และ 40% ของความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ ในปีน้ำน้อย ปีน้ำปกติ และปีน้ำมาก ตามลำดับ ซึ่งข้อกำหนดปัจจัยความต้องการน้ำในแต่ละรูปแบบนั้นได้สรุปไว้ในตารางที่ 2 รวมทั้งกำหนดให้ปริมาณน้ำที่ระบายจากเขื่อนเท่ากับปริมาณความต้องการน้ำที่สังเคราะห์ขึ้นในแต่ละรูปแบบ หรืออีกนัยหนึ่งคือปริมาณการขาดน้ำทั้ง 5 สถานการณ์สมมติเท่ากับ 0 นั่นเอง จากนั้นทำการประเมิน

ประสิทธิภาพของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในรูปของดัชนีความน่าเชื่อถือได้ (Reliability Index) สถานะปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสุดท้ายของการจำลองระบบ (Ending Storage) และปริมาณน้ำไหลล้นเขื่อน ทั้งนี้เพื่อประเมินรูปแบบของสถานการณ์สมมติที่มีความเหมาะสมสำหรับประเมินศักยภาพน้ำเหลือใช้ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนในการตอบสนองความต้องการน้ำร่วมกันในกลุ่มน้ำเจ้าพระยา

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดปัจจัยความต้องการน้ำของสถานการณ์สมมติที่ใช้ในการศึกษานี้

สถานการณ์สมมติ	ข้อกำหนดปัจจัยความต้องการน้ำ				
	แผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทาน ^{1/}	ปริมาณความต้องการน้ำในพื้นที่ (Local Demand)			ปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันในกลุ่มน้ำเจ้าพระยา (Joint Demand)
		การชลประทาน (CROPWAT 8.0)	การอุปโภคบริโภค	รักษาระบบนิเวศ	
สถานการณ์สมมติ 1	X (WAP)	-	-	-	-
สถานการณ์สมมติ 2	-	X (Estimated)	X (Estimated)	X (WAP)	-
สถานการณ์สมมติ 3	-	X (Estimated)	X (WAP)	X (WAP)	-
สถานการณ์สมมติ 4	-	X (Estimated)	X (WAP)	X (WAP)	25% Local Demand
สถานการณ์สมมติ 5	-	X (Estimated)	X (WAP)	X (WAP)	10%, 25%, 40% Local Demand

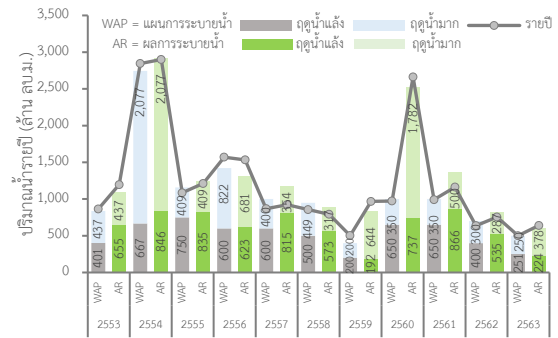
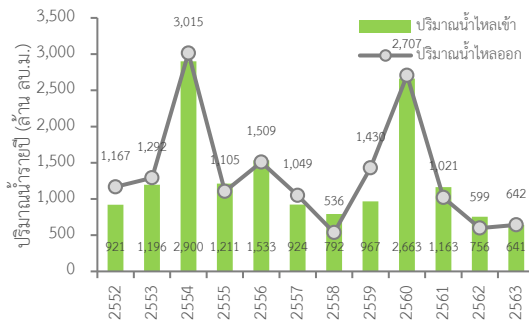
หมายเหตุ: ^{1/} แผนการจัดสรรน้ำครอบคลุมถึงความต้องการน้ำจากอ่างเพื่อภาคการเกษตร การอุปโภคบริโภค การอุตสาหกรรม การรักษาระบบนิเวศน์ และอื่น ๆ ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนทั้งในพื้นที่และรวมกันในกลุ่มน้ำเจ้าพระยา

4. ผลการศึกษา

4.1 สถานะน้ำต้นทุน ปริมาณการระบายน้ำ และแผนการจัดสรรน้ำ

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลระหว่างปี พ.ศ. 2552–2563 พบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำซึ่งเป็นข้อมูลที่สะท้อนถึงปัจจัยน้ำต้นทุนของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนผันแปรตามประเภทปีน้ำ โดยปริมาณน้ำไหลเข้ารายปีเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1,339 ล้านลูกบาศก์เมตร ปริมาณน้ำไหลเข้ารายปีสูงสุดเท่ากับ 2,900 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งสูงกว่าความจุเก็บกักของเขื่อนกว่า 3 เท่า และเกิดขึ้นในปีมหายุทธภัย พ.ศ. 2554 ปริมาณน้ำไหลเข้ารายปีต่ำสุดเท่ากับ 641 ล้านลูกบาศก์เมตร เกิดขึ้นในปีวิกฤติภัยแล้ง พ.ศ. 2563 ในขณะที่ภาพรวมปริมาณการระบายน้ำ (ปริมาณน้ำไหลออก) มีแนวโน้มสูงกว่าปริมาณน้ำไหลเข้า ยกเว้นในช่วงปี พ.ศ. 2555, 2559 และ 2561–2563 โดยค่าปริมาณน้ำไหลออกรายปีเฉลี่ยเท่ากับ 1,306 ล้านลูกบาศก์เมตร และสถานะปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสุดท้าย ณ วันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2563 เท่ากับ 43.56% ของปริมาณการใช้การ ดังแสดงในรูปที่ 2

จากข้อมูลแผนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูการเพาะปลูกพืชฤดูแล้ง (พ.ย.–เม.ษ.) และฤดูฝน (พ.ค.–ต.ค.) ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนในปี พ.ศ. 2553–2563 พบว่า แผนการจัดสรรน้ำรายปีของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนผันแปรอยู่ในช่วง 501–2,845 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลปริมาณการระบายน้ำจริงดังแสดงในรูปที่ 3 โดยแบ่งเป็นปริมาณน้ำตามแผนการระบายน้ำ (Water Allocation Plan, WAP) และปริมาณการระบายน้ำ (Actual Release, AR) สรุปได้ว่า ในภาพรวมปริมาณการจัดสรรน้ำมีแนวโน้มสูงกว่าแผนที่วางไว้ประมาณ 31.79% หรือคิดเป็นรายปีเฉลี่ย 255 ล้านลูกบาศก์เมตร ทั้งในช่วงฤดูแล้งและฤดูฝน อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์พบว่า มีการจัดส่งน้ำน้อยกว่าแผนที่วางไว้ในบางช่วงเวลาที่ปัจจัยปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนอยู่ในเกณฑ์น้อย ยกตัวอย่างเช่น ในช่วงของการเพาะปลูกพืชฤดูแล้งปี พ.ศ. 2559 และ 2563 ได้มีการจัดส่งน้ำน้อยกว่าแผนที่วางไว้ ในขณะที่ในช่วงของการเพาะปลูกพืชฤดูฝนของปี พ.ศ. 2556–2558 และปี พ.ศ. 2562 มีการส่งน้ำน้อยกว่าแผนที่วางไว้



รูปที่ 2 ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้า-ออกของอ่างเก็บน้ำ
เขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563

รูปที่ 3 แผนการจัดสรรน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน
ระหว่างปี พ.ศ. 2553-2563

4.2 ผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานและการอุปโภคบริโภคในพื้นที่

การศึกษานี้ได้ทำการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานเฉพาะในพื้นที่ชลประทานสองฝั่งแม่น้ำแควน้อยประกอบด้วย พื้นที่นา 126,184 ไร่ พืชไร่ 3,176 ไร่ และไม้ผล-ไม้ยืนต้น 5,854 ไร่ รวมเป็นพื้นที่ทั้งสิ้น รวม 135,214 ไร่ โดยคิดปริมาณความต้องการน้ำของพืชในแต่ละพื้นที่จากพืชตัวแทนได้แก่ ข้าว (พื้นที่นา) ข้าวโพด (พืชไร่) และมะม่วง (ไม้ผล-ไม้ยืนต้น) ในเบื้องต้นได้ทำการคำนวณปริมาณการคายระเหยของพืชอ้างอิง (ET_c) โดยใช้ข้อมูลภูมิอากาศตรวจวัดของจังหวัดพิษณุโลก และคำนวณหาค่า ET_c ด้วยโปรแกรม ET_c Calculator และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับ ET_c จากโปรแกรม CROPWAT 8.0 ซึ่งแสดงผลไว้ในตารางที่ 3 ผลการประมาณการพบว่าค่า ET_c ที่ได้รายเดือนมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มของข้อมูลในลักษณะเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากคำนวณด้วยสมการ Penman-Monteith เดียวกันบนพื้นฐานของข้อมูลภูมิอากาศในพื้นที่เดียวกัน อย่างไรก็ตาม ค่าความแตกต่างดังกล่าวเกิดขึ้นจากโปรแกรม ET_c Calculator อาศัยข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศในการคำนวณมากกว่า ส่งผลทำให้ค่า ET_c ที่ได้มีความละเอียดสูงกว่าและถูกนำไปใช้ในการคำนวณปริมาณความต้องการน้ำของพืช (ET_c) ในขั้นตอนถัดไป ผลการคำนวณค่า ET_c ด้วยโปรแกรม CROPWAT 8.0 แบ่งตามชนิดพืชตัวแทน 3 ชนิดตามพื้นที่ชลประทาน ดังแสดงผลไว้ในตารางที่ 3 โดยมีค่าปริมาณความต้องการน้ำของพืชรายปีเท่ากับ 260 ล้านลูกบาศก์เมตร และปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานที่ต้องจัดส่งในพื้นที่เท่ากับ 434 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยกำหนดค่าประสิทธิภาพการชลประทาน 60%

ตารางที่ 3 ผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานที่ต้องจัดส่งในพื้นที่

รายละเอียดข้อมูล	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี
ปริมาณการคายระเหยของพืชอ้างอิง (ET _c) (มิลลิเมตรต่อวัน)													
ET _c Calculator	3.20	4.00	4.50	5.10	4.80	4.20	4.00	3.70	3.70	3.70	3.40	3.10	NA
CROPWAT 8.0	3.35	4.12	4.88	5.63	5.14	4.40	4.22	3.79	3.79	3.81	3.64	3.28	NA
ปริมาณความต้องการน้ำของพืช (ET _c) (ล้านลูกบาศก์เมตร)													
พื้นที่นา (ข้าว) 126,184 ไร่	15.59	23.32	28.97	15.59	36.10	38.06	14.86	26.71	24.91	9.13	1.96	8.90	244.09
พืชไร่ (ข้าวโพด) 3,176 ไร่	0	0	0	0.39	0.91	0.96	0.37	0	0.26	0.68	0.78	0.30	4.66
ไม้ผล-ไม้ยืนต้น (มะม่วง) 5,854 ไร่	0.90	0.95	1.19	1.24	1.20	0.95	0.98	0.90	0.79	0.86	0.73	0.87	11.55

รวม 135,214 ไร่	16.48	24.27	30.16	17.22	38.21	39.96	16.22	27.61	25.97	10.66	3.47	10.08	260.3
ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานที่ต้องจัดส่งสุทธิในพื้นที่ (Local Demand for Irrigation) (ล้านลูกบาศก์เมตร) ^{1/}													
ปริมาณน้ำ	27.47	40.45	50.27	28.69	63.68	66.61	27.03	46.01	43.28	17.77	5.78	16.79	433.84

หมายเหตุ: ^{1/} คิดที่ประสิทธิภาพการชลประทาน 60%

สำหรับผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคในพื้นที่ซึ่งทำการคำนวณบนพื้นฐานของข้อมูลประชากรปัจจุบันใน 4 เขตอำเภอของจังหวัดพิษณุโลกพบว่า มีปริมาณ 40 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี อย่างไรก็ตาม ผลการคำนวณดังกล่าวค่อนข้างน้อยกว่าแผนการจัดสรรน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนที่กำหนดไว้ประมาณ 286 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งพยายามจะช่วยตอบสนองความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคทั้งในพื้นที่และในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่างร่วมด้วย

4.3 ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของสถานการณ์สมมติ

ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของสถานการณ์สมมติทั้ง 5 รูปแบบได้สรุปไว้ในตารางที่ 4 โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

(1) สถานการณ์สมมติ 1: ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิรายปีเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1,048 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งสังเคราะห์จากแผนการจัดสรรน้ำ ผลการจำลองพบว่า ปริมาณการขาดน้ำและปริมาณน้ำไหลล้นอ่างรายปีเฉลี่ยเท่ากับ 0 และ 165 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยปริมาณน้ำไหลล้นอ่างส่วนใหญ่เกิดขึ้นในปีน้ำมากดังแสดงผลในรูปที่ 4 อย่างไรก็ตาม ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือได้อยู่ในเกณฑ์สูงถึง 96.21% และสถานะของปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสุดท้ายเท่ากับ 96.97% ซึ่งถือว่าอยู่เกณฑ์สูงกว่าผลการปฏิบัติการจริงค่อนข้างมาก เนื่องจากเงื่อนไขการกำหนดแผนการจัดสรรน้ำถูกพิจารณาจากสถานะน้ำต้นทุนของแต่ละปีน้ำซึ่งมีค่าผันแปรแตกต่างกันออกไปนั่นเอง

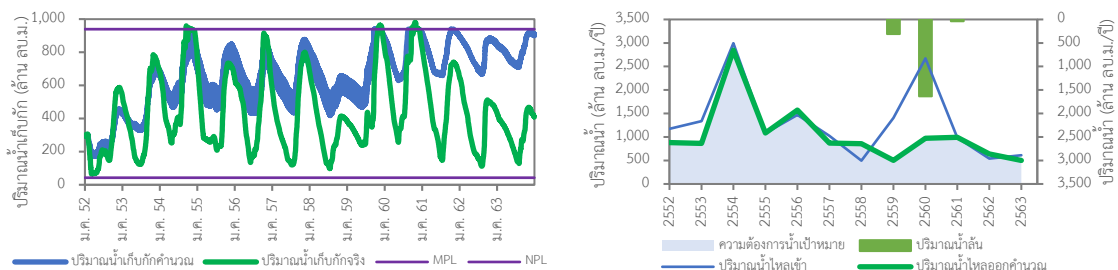
(2) สถานการณ์สมมติ 2: ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิรายปีมีค่าเท่ากับ 586 ล้านลูกบาศก์เมตร ปริมาณน้ำเก็บกักจากการคำนวณมีแนวโน้มคล้ายปริมาณน้ำเก็บกักจริง มีการจัดส่งน้ำในปริมาณสม่ำเสมอทุกเดือน อันเนื่องมาจากปัจจัยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ที่ประมาณการคงที่ ดังรูปที่ 5 และอ่างเก็บน้ำมีปริมาณน้ำเก็บกักและปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเพียงพอที่จะจัดส่งน้ำตรงตามปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมาย ส่งผลให้ไม่มีช่วงที่เกิดการขาดแคลนน้ำ ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือได้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้กล่าวคือ มีค่าเท่ากับ 77.94% และสถานะปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสุดท้ายเท่ากับ 96.04% ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าผลการปฏิบัติการจริง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสถานการณ์สมมติ 2 ไม่ได้กำหนดปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันในลุ่มน้ำเจ้าพระยา (Joint Demand = 0) ส่งผลให้ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิรายปีเฉลี่ยน้อยกว่าสถานการณ์สมมติ 1 ค่อนข้างมาก ด้วยเหตุนี้ ความถี่ของการไหลล้นอ่างที่เกิดขึ้นจึงสูงกว่าโดยมีค่าปริมาณน้ำไหลล้นอ่างรายปีเฉลี่ยสูงถึง 629 ล้านลูกบาศก์เมตร หรืออาจกล่าวได้ว่า การกำหนดปัจจัยความต้องการน้ำของสถานการณ์สมมติ 2 ยังไม่สอดคล้องกับสถานการณ์จริงของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน นอกจากนี้ ปัจจัยของข้อมูลประชากรแฝงในพื้นที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคในพื้นที่ ด้วยเหตุนี้ สถานการณ์สมมติ 2 จึงไม่เหมาะสมที่จะนำผลลัพธ์ไปใช้กำหนดแผนการจัดสรรน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

(3) สถานการณ์สมมติ 3: ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิรายปีมีค่าเท่ากับ 832 ล้านลูกบาศก์เมตร ผลการจำลองระบบให้ผลคล้ายคลึงกับสถานการณ์สมมติ 2 กล่าวคือ แนวโน้มปริมาณน้ำเก็บกักคำนวณเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณน้ำเก็บกักจริง มีสถานะปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสุดท้ายเท่ากับ 69.59% เป็นค่าที่สูงกว่าผลการปฏิบัติการจริง ดังรูปที่ 6 แต่สามารถจัดส่งน้ำได้ตรงตามความต้องการน้ำเป้าหมาย โดยไม่มีการขาดแคลนน้ำเกิดขึ้น นอกจากนี้ ผลการจำลองสถานการณ์สมมติ 3 ยังให้ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือได้น้อยที่สุดใน 5 สถานการณ์สมมติโดยมีค่า

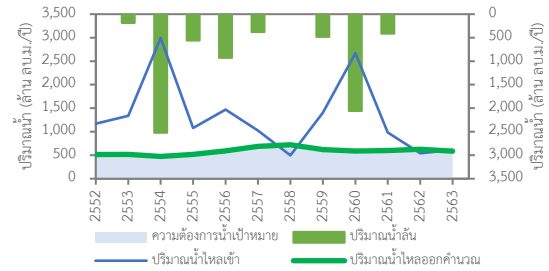
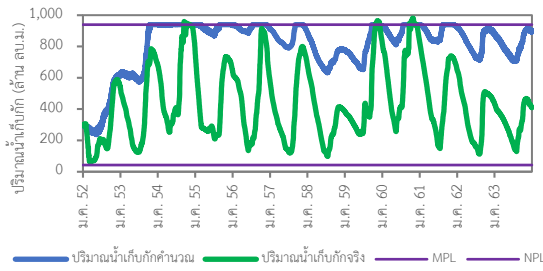
เท่ากับ 88.84% เนื่องจากความถี่ของการไหลล้นอ่างสูงสุด และมีค่าปริมาณน้ำล้นรายปีเฉลี่ยสูงสุดคิดเป็น 425 ล้านลูกบาศก์เมตร แสดงให้เห็นได้ว่าอ่างเก็บน้ำยังมีปริมาณน้ำเก็บกักมากพอที่สามารถส่งน้ำเพิ่มเติมให้แก่พื้นที่ชลประทานได้ จากการวิเคราะห์ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นทำให้สถานการณ์สมมติ 3 จึงไม่เหมาะสมที่จะนำผลลัพธ์ไปใช้กำหนดแผนการจัดสรรน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

(4) สถานการณ์สมมติ 4: ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิตายปีมีค่าเท่ากับ 1,040 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยแยกเป็นปริมาณความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ (Local Demand) และปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา (Joint Demand) เท่ากับ 832 และ 208 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ผลการจำลองระบบพบว่า ปริมาณน้ำเก็บกักจากการคำนวณมีรูปแบบใกล้เคียงกับปริมาณน้ำเก็บกักจริงดังแสดงในรูปที่ 7 นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบสถานะปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสุดท้ายจากผลการปฏิบัติการจริงและที่ได้จากสถานการณ์สมมติ 4 พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าเท่ากับ 43.56% และ 45.91% ตามลำดับ อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบความต้องการน้ำเป้าหมายและปริมาณน้ำไหลออกคำนวณพบว่า สามารถจัดส่งให้แก่พื้นที่ทั้งสองได้โดยไม่ต้องมีการขาดแคลนน้ำ โดยให้ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือได้สูงถึง 94.11% ในขณะที่ปริมาณน้ำล้นรายปีเฉลี่ยเท่ากับ 254 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกับสถานการณ์สมมติ 1 หรืออาจกล่าวได้ว่าการกำหนดปัจจัยปริมาณความต้องการน้ำตามสถานการณ์สมมติ 4 ให้ค่าประสิทธิผลของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำอยู่ในเกณฑ์ดี ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของน้ำเหลือใช้ที่สามารถตอบสนองความต้องการน้ำร่วมกันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาสูงสุด โดยที่สถานะของปริมาณน้ำเก็บกักหลังสิ้นสุดการจำลองให้ค่าไม่ต่ำกว่าผลการปฏิบัติการจริงที่ผ่านมา

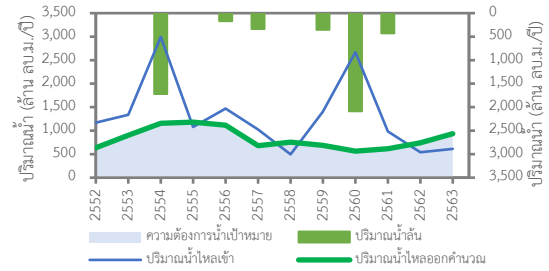
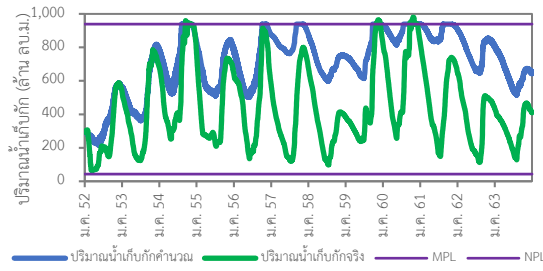
(5) สถานการณ์สมมติที่ 5: ปริมาณความต้องการน้ำสุทธิตายปีมีค่าเท่ากับ 1,015 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยแยกเป็นปริมาณความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ (Local Demand) และปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา (Joint Demand) เท่ากับ 812 และ 203 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ผลการจำลองระบบพบว่า ปริมาณน้ำเก็บกักจากการคำนวณมีรูปแบบใกล้เคียงกับปริมาณน้ำเก็บกักจริงดังแสดงในรูปที่ 8 โดยสถานะปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสุดท้ายเท่ากับ 59.27% เป็นค่าที่สูงกว่าสถานะปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสุดท้ายจริงอยู่ 15.71% บ่งบอกว่ายังสามารถเพิ่มสัดส่วนของปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา (Joint Demand) ในแต่ละปีได้อีกเล็กน้อยจากข้อกำหนดเดิม ปริมาณการขาดน้ำและปริมาณน้ำล้นรายปีเฉลี่ยเท่ากับ 0 และ 254 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มใกล้เคียงกับสถานการณ์สมมติ 4 หรืออาจกล่าวได้ว่าการกำหนดปัจจัยปริมาณความต้องการน้ำตามสถานการณ์สมมติ 5 ให้ค่าประสิทธิผลของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำอยู่ในเกณฑ์ดี และยังสามารถสะท้อนถึงศักยภาพของน้ำเหลือใช้ที่สามารถตอบสนองความต้องการน้ำร่วมกันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาสูงสุดแยกตามปีน้ำ โดยที่สถานะของปริมาณน้ำเก็บกักหลังสิ้นสุดการจำลองให้ค่าไม่ต่ำกว่าผลการปฏิบัติการจริงที่ผ่านมา



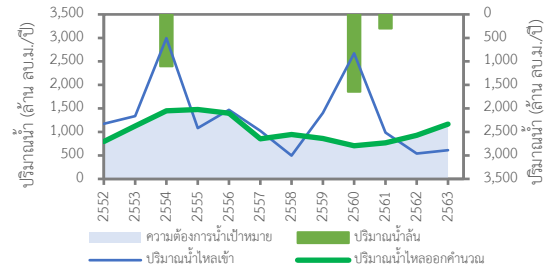
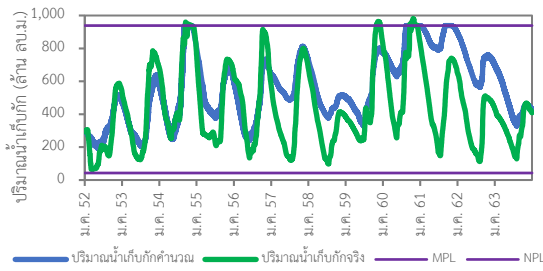
รูปที่ 4 ปริมาณน้ำเก็บกักและปริมาณน้ำล้นของสถานการณ์สมมติ 1



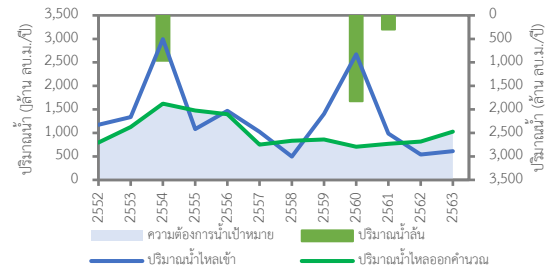
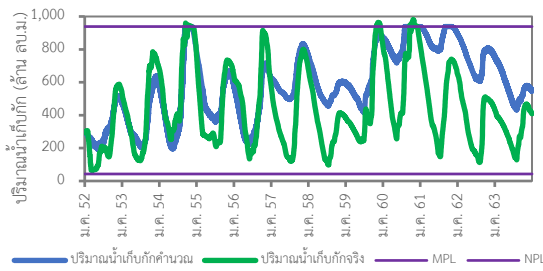
รูปที่ 5 ปริมาณน้ำเก็บกักและปริมาณน้ำล้นของสถานีการณัสมมติ 2



รูปที่ 6 ปริมาณน้ำเก็บกักและปริมาณน้ำล้นของสถานีการณัสมมติ 3



รูปที่ 7 ปริมาณน้ำเก็บกักและปริมาณน้ำล้นของสถานีการณัสมมติ 4



รูปที่ 8 ปริมาณน้ำเก็บกักและปริมาณน้ำล้นของสถานีการณัสมมติ 5

ตารางที่ 4 ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนระหว่างปี พ.ศ. 2552-2563

สถานีการณัสมมติ	ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน						
	ปริมาณความต้องการน้ำในพื้นที่รายปี	ปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันรายปี	ปริมาณความต้องการน้ำรวมรายปี	ปริมาณการขาดน้ำรายปีเฉลี่ย	ปริมาณน้ำล้นรายปีเฉลี่ย	ดัชนีความน่าเชื่อถือได้	สถานะปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาสุดท้าย ^{1/}
หน่วย	ล้าน ลบ.ม.	ล้าน ลบ.ม.	ล้าน ลบ.ม.	ล้าน ลบ.ม.	ล้าน ลบ.ม.	เปอร์เซ็นต์	เปอร์เซ็นต์
สถานีการณัสมมติ 1	-	-	1,048.04	0.00	165.39	96.21%	96.97%
สถานีการณัสมมติ 2	-	-	586.29	0.00	628.71	77.94%	96.04%

สถานการณ์สมมติ 3	-	-	831.67	0.00	424.86	88.48%	69.59%
สถานการณ์สมมติ 4	831.67	207.91	1,039.59 ^{2/}	0.00	254.08	94.11%	45.91%
สถานการณ์สมมติ 5	812.11	203.03	1,015.14 ^{2/}	0.00	257.57	93.93%	59.27%

หมายเหตุ: ^{1/} ข้อมูล ณ วันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2563 ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณใช้การ

^{2/} ปริมาณน้ำเหลือใช้สุทธิ = ปริมาณความต้องการน้ำรวมรายปี - [ปริมาณความต้องการน้ำสำหรับการชลประทานในพื้นที่ (Local Demand for Irrigation) จากการคำนวณ + ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคในพื้นที่จากการคำนวณ] ซึ่งมีค่าเท่ากับ 566 และ 542 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี สำหรับสถานการณ์สมมติ 4 และสถานการณ์สมมติ 5 ตามลำดับ

5. การอภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ห้บ่งชี้ให้เห็นว่า การกำหนดรูปแบบความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ (Local Demand) และความต้องการน้ำร่วมกันในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา (Joint Demand) เพื่อใช้ในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนแบบอ่างเดี่ยว (Single Reservoir Operation) ทั้ง 5 รูปแบบส่งผลต่อประสิทธิภาพในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่แตกต่างกัน ถึงแม้ความสามารถในการตอบสนองความต้องการน้ำที่สังเคราะห์ขึ้นทั้ง 5 รูปแบบจะไม่ปรากฏสถานะขาดน้ำก็ตาม อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้จากสถานการณ์สมมติ 4 และสถานการณ์สมมติ 5 ซึ่งได้กำหนดให้ปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันในลุ่มน้ำเจ้าพระยาเท่ากับ 25% ของความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ตามข้อกำหนดของสถานการณ์สมมติ 3 และกำหนดให้ปริมาณความต้องการน้ำร่วมกันในลุ่มน้ำเจ้าพระยาแยกตามปีน้ำเท่ากับ 10%, 25% และ 40% ของความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่ตามข้อกำหนดของสถานการณ์สมมติ 3 ในปีน้ำน้อย ปีน้ำปกติ และปีน้ำมากตามลำดับ ซึ่งเป็นส่วนที่สะท้อนถึงศักยภาพน้ำเหลือใช้ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเพิ่มเติมจากปริมาณความต้องการน้ำสุทธิในพื้นที่เอง กล่าวคือ ค่าปริมาณน้ำเหลือใช้สุทธิซึ่งคำนวณจากปริมาณความต้องการน้ำรวมรายปีหักลบด้วยผลรวมของปริมาณความต้องการน้ำสำหรับการชลประทานในพื้นที่ (Local Demand for Irrigation) จากการคำนวณ และปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคในพื้นที่จากการคำนวณของสถานการณ์สมมติ 4 และสถานการณ์สมมติ 5 เท่ากับ 566 และ 542 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ตามลำดับ โดยที่สถานะของปริมาณน้ำเก็บกักหลังสิ้นสุดการจำลองให้ค่าไม่ต่ำกว่าผลการปฏิบัติการจริงที่ผ่านมา และเมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลออกรายปีเฉลี่ยของสถานการณ์สมมติ 4 และสถานการณ์สมมติ 5 พบว่า มีค่าเท่ากับ 1,039 และ 1,015 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทาน ดังแสดงผลในตารางที่ 5 ยิ่งไปกว่านั้น การกำหนดปัจจัยความต้องการน้ำตามสถานการณ์สมมติ 4 และสถานการณ์สมมติ 5 ยังสามารถควบคุมปริมาณน้ำไหลออกต่ำสุดและสูงสุดจากอ่างเก็บน้ำได้ค่อนข้างดีเมื่อเปรียบเทียบกับผลการปฏิบัติการจริง ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวนี้นับเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจที่สำคัญในการกำหนดนโยบายและการจัดสรรน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเพื่อช่วยสนับสนุนงานบริหารเขื่อนในลุ่มน้ำเจ้าพระยาในอนาคต

ตารางที่ 5 ปริมาณน้ำไหลออกจากอ่างคำนวณ (Calculated Outflow) ของ 5 สถานการณ์สมมติ

ดัชนีประสิทธิผล	ข้อมูลจริง	สถานการณ์สมมติ 1	สถานการณ์สมมติ 2	สถานการณ์สมมติ 3	สถานการณ์สมมติ 4	สถานการณ์สมมติ 5
ปริมาณน้ำไหลออกจากอ่างต่ำสุดรายปี (ล้าน ลบ.ม.)	640.80	500.37	564.45	564.45	705.56	705.56
ปริมาณน้ำไหลออกจากอ่างเฉลี่ยรายปี (ล้าน ลบ.ม.)	1,305.60	1,048.04	882.13	832.56	1,039.45	1,015.00
ปริมาณน้ำไหลออกจากอ่างสูงสุดรายปี (ล้าน ลบ.ม.)	2,899.93	2,845.48	884.55	1,181.48	1,476.85	1,622.09

6. ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยระเบียบวิธีวิจัยขั้นพื้นฐานบนกรอบแนวคิดที่จะประเมินศักยภาพของน้ำเหลือใช้ของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน ซึ่งนับเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญในการกำหนดแบบแผนการจัดสรรน้ำ (Water

Allocation Regime) ให้สอดคล้องตามปัจจัยน้ำต้นทุนและความต้องการน้ำในพื้นที่เอง อีกทั้งยังสามารถสนับสนุนการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำอย่างเป็นระบบในลุ่มน้ำเจ้าพระยาได้อย่างเต็มศักยภาพ โดยระเบียบวิธีวิจัยดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่ศึกษาอื่นได้ในลักษณะเดียวกัน นอกจากนี้ อาจนำโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) มาใช้ในการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ หรืออาจพัฒนาต่อยอดโดยอาศัยเทคนิคการวิจัยขั้นสูงมาใช้ในการแก้ปัญหาโจทย์เพื่อส่งต่อข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้ให้ผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องไปใช้ในการกำหนดนโยบายการบริหารจัดการน้ำและเกิดประสิทธิผลสูงสุดต่อไป ยิ่งไปกว่านั้น อาจจำเป็นต้องทวนสอบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณหาค่าปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานที่ต้องจัดส่งในพื้นที่กับข้อมูลปริมาณน้ำที่ผันเข้าในพื้นที่โครงการชลประทานจริงซึ่งเป็นข้อจำกัดของการศึกษานี้

7. บรรณานุกรม

- กรมชลประทาน. (2563). โครงการเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน. แหล่งที่มา : <http://lproject.rid.go.th/site/index.php/th/projectinformation/126-2015-06-22-01-59-56/175-201506-22-03-46-40>. สืบค้นเมื่อ 1 เมษายน 2565.
- กรมชลประทาน. (2565). โครงการเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จ.พิษณุโลก. แหล่งที่มา : <https://docs.google.com/file/d/0B1HRgqkyxWg5b2NaMUTdjFXTzQ/edit?resourcekey=0-XgaLZN2cajRiSiKm6csTpg>. สืบค้นเมื่อ 1 เมษายน 2565.
- การุญ ใจปัญญา. (2528). การศึกษาการใช้น้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยา-แม่กลอง (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต). ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ฉลอง เกิดพิทักษ์. (2538). การจัดการน้ำในลุ่มน้ำของประเทศไทย. กรุงเทพฯ: บริษัท โอเชียน บลูพรินทร์ จำกัด.
- สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ. (2563). โครงการกลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ สำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยมหิดล.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรที่ 2. (2562). รายงานภาวะเศรษฐกิจการเกษตร จังหวัดพิษณุโลก. แหล่งที่มา : https://www.opsmoac.go.th/phitsanu_lok-dwl-files-421891791067. สืบค้นเมื่อ 1 เมษายน 2565.
- Ajoy, K.S. (2020). How to use FAO developed ET_o Calculator to estimate evapotranspiration from weather data. Sylhet Agricultural University, Sylhet, Bangladesh.
- Clarke, D., Smith, M., Al-Askari, K. (1998). CropWat for windows: user guide. University of Southampton, United Kingdom.