



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการกลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุน
ในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)

An Adaptation Strategy towards Reservoir Re-Operation for Long-Term Water Supply
Management of Bhumibol Dam (Phase 1)

โดย รศ.ดร.อารีญา ฤทธิมา และคณะ

15 พฤศจิกายน 2563

สัญญาเลขที่ SIP6230022

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการกลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุน
ในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)

คณะผู้วิจัย-สังกัด

รศ.ดร.อารีญา ฤทธิมา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

อ.ดร.ยุทธนา พันธุ์กลมศิลป์

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและการจัดการภัยพิบัติ มหาวิทยาลัยมหิดล

วิทยาเขตกาญจนบุรี

อ.ดร.อรันย์ ศรีรัตนาทาบูกานอน

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

อ.ดร.วุฒิชชาติ แสงผล

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยมหิดล

อ.ดร.จิตภา ไกรสังข์

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยมหิดล

อ.ดร.ยุทธนา ตาละลักษมณ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกสว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

รายละเอียดโครงการ

สัญญาเลขที่ SIP6230022

ชื่อโครงการ (ไทย) โครงการกลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)

ชื่อโครงการ (อังกฤษ) An Adaptation Strategy towards Reservoir Re-Operation for Long-Term Water Supply Management of Bhumibol Dam (Phase 1)

หัวหน้าโครงการ รศ.ดร.อารีญา ฤทธิมา สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

ผู้ประกอบการผู้ร่วมทุน –

งบประมาณ 4,081,940 บาท ระยะเวลา 30 สิงหาคม 2562–29 สิงหาคม 2563

Abstract

This research aims at increasing the reservoir water storage of Bhumibol Dam projected by 15% at the beginning of dry season (in November). The reservoir re-operation strategy with 4 different schemes are accordingly proposed; (1) Adapted Rule Curve, (2) Hedging Policy, (3) Fuzzy Logic Model (FL) combined with Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model (ANFIS) with Reinforcement Learning (RL) and (4) Constraint Programming (CP) model with Machine Learning (ML). In addition, reducing cultivated area size corresponding to relevant water year in the Greater Chao Phraya Irrigation Project (GCPYIP) and considering the localized flow at key stations downstream for the determination of dam release in wet and dry seasons are also proposed in this study. The long-term simulation run during 2000–2018 illustrates that adjusting the upper and lower rule curves in 2012 of ± 0.5 meter by applying standard operating policy cannot increase reservoir water storage significantly. Meanwhile, using two-point, three-point and zone-based hedgings which specific parameters involved in the reduction of water release during refilled period are identified, can also increase the reservoir water storage in a long run except one-point hedging. For the reference case simulation by fuzzy logic and constraint programming models which are forms of Artificial Intelligence (AI), the results are found that reservoir water storage can be increased up to 1,167.33 and 955.33 MCM per year which are equivalent to +11.57% and +10.36%, respectively in comparison with the historical data. To compare the results with the reference case simulation, the reservoir water storages in dry season performed by fuzzy logic model are increased up to +4.56% and +7.80% when cultivated area size is reduced and sideflow data is considered, respectively. The simulation results are also exhibited that the water storage in reservoir can be increased up to +2.76% when constraint programming model is employed and sideflow data are taken into consideration. Moreover, ANFIS with RL model is further developed from conventional fuzzy model for day to day operation of Bhumibol Dam by aiming to enhance the model efficiency for reservoir re-operation.

Keyword : Reservoir Re-operation, Reservoir Rule Curve, Fuzzy Logic Model, Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model with Reinforce Learning, Constraint Programming and Machine Learning, Artificial Intelligence

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักที่จะเพิ่มปริมาณเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลให้สูงขึ้น 15% ในช่วงต้นฤดูแล้ง (เดือนพฤศจิกายน) โดยได้นำเสนอแนวทางการพัฒนากลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ ของเขื่อนภูมิพล 4 รูปแบบได้แก่ (1) การโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่ (Adapted Rule Curve) (2) เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging (Hedging Policy) (3) การพัฒนาแบบจำลองฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic Model) ร่วมกับแบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้และเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model with Reinforce Learning) และ (4) แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Constraint Programming Model with Machine Learning) นอกจากนี้ ยังได้นำเสนอแนวทางการควบคุมพื้นที่เพาะปลูกในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ให้มีความเหมาะสมตามประเภทปีน้ำ ตลอดจนการนำข้อมูลน้ำท่าของสถานีหลักท้ายเขื่อนมาร่วมพิจารณากำหนดการระบายน้ำตามสถานการณ์น้ำทั้งในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้ง ผลการจำลองระบบระยะยาวตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2561 แสดงให้เห็นว่า การปรับเพิ่ม/ปรับลดระดับ Upper Rule Curve และ Lower Rule Curve ที่พัฒนาขึ้นในปี พ.ศ. 2555 ที่ระดับ ± 0.5 เมตร และใช้เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Standard Operating Policy ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำมากนัก ในขณะที่เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Two-Point Hedging, Three-Point Hedging และ Zone-Based Hedging สามารถกำหนดพารามิเตอร์เพื่อลดการระบายน้ำลงในช่วงน้ำมาก ส่งผลทำให้ปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำเพิ่มสูงขึ้นยกเว้น One-Point Hedging สำหรับผลการจำลองระบบในกรณีอ้างอิงด้วยแบบจำลองฟัซซีและแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่อาศัยหลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) พบว่า สามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำได้ถึงประมาณ 1,167.33 และ 955.84 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ตามลำดับ และโดยสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งได้เพิ่มขึ้น +11.57% และ +10.36% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการระบายน้ำจริงที่ผ่านมา ผลการจำลองระยะยาวในกรณีที่ทำการปรับลดพื้นที่เพาะปลูกของโครงการเจ้าพระยาใหญ่ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555–2561 และกรณีพิจารณาปริมาณ Sideflow สถานี W.4A ในการกำหนดการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล และกำหนดปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย พบว่า สามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งได้เพิ่มขึ้นอีก +4.56% (ควบคุมพื้นที่เพาะปลูก) และ +7.80% (พิจารณา Sideflow) สำหรับแบบจำลองฟัซซีและ +2.76% (พิจารณา Sideflow) สำหรับแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอ้างอิง ยิ่งไปกว่านั้น แบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้และเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลังได้ถูกพัฒนาต่อยอดจากแบบจำลองฟัซซีเดิมในงานวิจัยนี้สำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะ Day to Day Operation ของเขื่อนภูมิพลที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองในการกำหนดการระบายน้ำจริงให้สูงขึ้น

คำสำคัญ : การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ แบบจำลองฟัซซีลอจิก แบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้และเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง หลักปัญญาประดิษฐ์

บทสรุปผู้บริหาร

บทนำ (Introduction)

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ตั้งเป้าหมายที่จะเพิ่มปริมาณเก็บกักหรือน้ำต้นทุนของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลให้สูงขึ้น 15% ในช่วงต้นฤดูแล้ง (เดือนพฤศจิกายน) จากค่าเฉลี่ยของข้อมูลปริมาณน้ำเก็บกักระยะยาวในช่วงฤดูแล้งในอดีต ซึ่งได้นำเสนอแนวทางการพัฒนากลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ (Reservoir Re-Operation) ของเขื่อนภูมิพลใน 4 แนวทาง สำหรับแนวทางที่ 1 และแนวทางที่ 2 เป็นการนำเสนอเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่ได้รับความนิยมแต่เดิมมาปรับรูปแบบใหม่ในการจำลองระบบ ส่วนแนวทางที่ 3 และแนวทางที่ 4 อาศัยหลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ในการพัฒนาแบบจำลอง โดยมีส่วนของการพัฒนาแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล (Reservoir Inflow Forecasting Model) ด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning) เพื่อนำผลการพยากรณ์ล่วงหน้ารายวันมาเป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองของแนวทางที่ 3 และแนวทางที่ 4 สำหรับกำหนดการระบายน้ำในปริมาณที่เหมาะสมในแต่ละช่วงเวลาโดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

–แนวทางที่ 1 นำเสนอโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่ (Adapted Rule Curve) จากโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาไว้โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในปี พ.ศ. 2555

–แนวทางที่ 2 อาศัยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging (Hedging Rule) เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging เป็นอีกหนึ่งแนวทางที่สามารถนำมาใช้ในการจัดการปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำโดยนำเสนอเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พยายามลดการส่งน้ำในบางช่วงเวลาเพื่อเก็บกักน้ำไว้ใช้ในช่วงเวลาถัดไป แม้ว่าปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่ในอ่างจะสามารถตอบสนองต่อปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายได้อย่างเต็มศักยภาพก็ตาม

–แนวทางที่ 3 เป็นการพัฒนาแบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้และเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model with Reinforce Learning) ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญคือ (3.1) แบบจำลองฟัซซี (Conventional Fuzzy Model) และ (3.2) แบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้และเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (ANFIS with RL) ซึ่งเป็นส่วนที่พัฒนาขึ้นมาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองฟัซซีสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในลักษณะของ Day to Day Operation ในช่วงของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ ณ เวลาปัจจุบัน

–แนวทางที่ 4 แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Constraint Programming with Machine Learning) ซึ่งเป็นลักษณะของการแก้โจทย์ปัญหาในการระบายน้ำที่ดีที่สุดของเขื่อนภูมิพลโดยอาศัยหลักการหาค่าที่ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบระยะยาวทั้งในสถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบันและอนาคตตามสถานการณ์สมมติต่าง ๆ ถูกนำมาวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้น/ลดลงเพื่อเปรียบเทียบกับผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำจริง โดยสรุปรายละเอียดได้ดังนี้

แนวทางที่ 1 โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่ (Adapted Rule Curve)

ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้น/ลดลงจากผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555–2561 ในสถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบัน และสถานการณ์ในอนาคตด้วยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่ (Adapted Rule Curve) แสดงในตารางที่ 1 จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าการจำลองผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำกรณีที่ 1 ที่อาศัยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาในปี พ.ศ. 2555 ให้ค่าปริมาณน้ำเก็บกักในเดือนพฤศจิกายน และในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งใกล้เคียงกับปริมาณน้ำเก็บกัก

จริงระหว่างปี พ.ศ. 2543–2561 นอกจากนี้ ผลการจำลองระบบยังแสดงให้เห็นว่าการปรับเพิ่ม/ปรับลดระดับ Upper Rule Curve และ Lower Rule Curve ที่ระดับ ± 0.5 เมตร และใช้เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Standard Operating Policy ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำมากนัก ดังจะเห็นได้จากเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้นยังคงอยู่ในช่วงตั้งแต่ +1.37% ถึง +1.44% เทียบกับกับปริมาณน้ำเก็บกักจริง ในขณะที่ผลการจำลองระบบของสถานการณ์น้ำในอนาคตโดยอาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำคาดการณ์ในอนาคต (Projected Inflow) ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2555–2561 โดยกำหนดปัจจัยความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. ในสภาพจริงพบว่า สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำให้สูงกว่าสถานการณ์น้ำในอดีตถึงปัจจุบัน

ตารางที่ 1 ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่

กรณี	ผลการจำลองระบบ	ช่วงการจำลองระบบ	เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้น/ลดลง ^{3/} (%Active Storage)			
			พฤศจิกายน	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	รายปี
สถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบัน ^{1/}						
1	อาศัยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาในปี พ.ศ. 2555	2555–2561	-0.20	+1.78	+1.05	+1.37
2	ปรับเพิ่มระดับ URC +0.50 เมตร ^{4/}	2555–2561	-0.20 (0.00) ^{5/}	+1.78 (0.00) ^{5/}	+1.05 (0.00) ^{5/}	+1.37 (0.00) ^{5/}
3	ปรับลดระดับ URC -0.50 เมตร ^{4/}	2555–2561	-0.35 (-0.14) ^{5/}	+1.58 (-0.20) ^{5/}	+0.18 (-0.18) ^{5/}	+1.19 (-0.19) ^{5/}
4	ปรับเพิ่มระดับ LRC +0.50 เมตร ^{4/}	2555–2561	-0.14 (+0.06) ^{5/}	+1.86 (+0.08) ^{5/}	+1.10 (+0.05) ^{5/}	+1.44 (+0.07) ^{5/}
5	ปรับลดระดับ LRC -0.50 เมตร ^{4/}	2555–2561	-0.17 (+0.03) ^{5/}	+1.82 (+0.04) ^{5/}	+1.09 (+0.04) ^{5/}	+1.41 (+0.04) ^{5/}
สถานการณ์ในอนาคต ^{2/}						
6	อาศัยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาในปี พ.ศ. 2555	2555–2561	+27.40	+33.96	+27.55	+30.45

หมายเหตุ : ^{1/} อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจริง (Observed Inflow) และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2555–2561

^{2/} อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำคาดการณ์ในอนาคต (Projected Inflow) ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2555–2561

^{3/} เปรียบเทียบกับปริมาณน้ำเก็บกักจริงระหว่างปี พ.ศ. 2555–2561

^{4/} ปรับเปลี่ยนจากโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาขึ้นโดย กฟผ. ในปี พ.ศ. 2555

^{5/} ผลต่างคำนวณจากการเปรียบเทียบกับกรณี 1

แนวทางที่ 2 เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging (Hedging Policy)

ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้น/ลดลงจากผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบทั้งในสถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบันและสถานการณ์ในอนาคตของสถานการณ์สมมติทั้ง 8 กรณีด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging (Hedging Policy) แสดงในตารางที่ 2 จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าการจำลองผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำด้วย Two-Point Hedging, Three-Point Hedging และ Zone-Based Hedging ให้ผลไปในทางเดียวกันที่สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักให้สูงขึ้นกว่าปริมาณน้ำเก็บกักจริงระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ในช่วงตั้งแต่ +19.80% ถึง +31.55% ในเดือนพฤศจิกายน ยกเว้น One-Point Hedging ทั้งนี้เนื่องจากพารามิเตอร์ของเกณฑ์ดังกล่าวนี้ไม่ครอบคลุมการบริหารจัดการน้ำในช่วงน้ำมากที่สามารถกำหนดเกณฑ์ปรับลดปริมาณการระบายน้ำสำหรับเก็บกักน้ำไปใช้ในระยะเวลา ในขณะที่เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Two-Point Hedging, Three-Point Hedging และ Zone-Based Hedging สามารถกำหนดพารามิเตอร์เพื่อลดการระบายน้ำลงในช่วงน้ำมาก ส่งผลทำให้ปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม สถานการณ์ในอนาคตพบว่า เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging ทุกแบบสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักให้สูงขึ้นและให้ค่าสูงกว่าการประยุกต์ใช้โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาในปี พ.ศ. 2555

ตารางที่ 2 ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging

กรณี	ผลการจำลองระบบ	ช่วงการจำลองระบบ	เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้น/ลดลง ^{3/} (%Active Storage)			
			พฤศจิกายน	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	รายปี
สถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบัน ^{1/}						
1	One-Point Hedging	2555-2561	-6.93 (-6.73) ^{4/}	-6.95 (-8.73) ^{4/}	-5.47 (-6.51) ^{4/}	-6.14 (-7.51) ^{4/}
2	Two-Point Hedging	2555-2561	+29.20 (+29.41) ^{4/}	+39.69 (+37.92) ^{4/}	+29.63 (+28.59) ^{4/}	+34.18 (+32.80) ^{4/}
3	Three-Point Hedging	2555-2561	+19.80 (+20.00) ^{4/}	+27.70 (+25.92) ^{4/}	+20.27 (+19.23) ^{4/}	+23.63 (+22.26) ^{4/}
4	Zone-Based Hedging	2555-2561	+31.55 (+31.75) ^{4/}	+44.36 (+42.58) ^{4/}	+32.82 (+31.77) ^{4/}	+38.03 (+36.65) ^{4/}
สถานการณ์ในอนาคต ^{2/}						
5	One-Point Hedging	2555-2561	+32.76 (+5.36) ^{5/}	+51.98 (+18.03) ^{5/}	+32.79 (+35.25) ^{5/}	+41.47 (+11.02) ^{5/}
6	Two-Point Hedging	2555-2561	+44.83 (+17.44) ^{5/}	+71.96 (+38.03) ^{5/}	+47.59 (+20.04) ^{5/}	+58.59 (+28.14) ^{5/}
7	Three-Point Hedging	2555-2561	+40.74 (+13.14) ^{5/}	+66.19 (+34.03) ^{5/}	+43.50 (+17.00) ^{5/}	+53.75 (+24.67) ^{5/}
8	Zone-Based Hedging	2555-2561	+37.36 (+9.97) ^{5/}	+59.75 (+25.80) ^{5/}	+39.40 (+11.85) ^{5/}	+48.59 (+18.13) ^{5/}

^{1/} กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเขื่อนภูมิพล ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

- หมายเหตุ : ^{1/} อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจริง (Observed Inflow) และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2555–2561
- ^{2/} อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำคาดการณ์ในอนาคต (Projected Inflow) ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2555–2561
- ^{3/} เปรียบเทียบกับปริมาณน้ำเก็บกักจริงระหว่างปี พ.ศ. 2555–2561
- ^{4/} ผลต่างคำนวณจากการเปรียบเทียบกับการใช้โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาในปี พ.ศ. 2555 กรณีที่ 1 จากตารางที่ 1
- ^{5/} ผลต่างคำนวณจากการเปรียบเทียบกับการใช้โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาในปี พ.ศ. 2555 กรณีที่ 6 จากตารางที่ 1

แนวทางที่ 3 แบบจำลองฟuzzyลอจิก (Conventional Fuzzy Model)

ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543–2561 ของสถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบันด้วยแบบจำลองฟuzzyลอจิกที่ 1 ซึ่งกำหนดปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. (สภาพจริง) พบว่า สามารถลดปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยได้ถึง 114.25 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งหมายถึงความสามารถในการเก็บกักน้ำในอ่างเก็บน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ แบบจำลองฟuzzyลอจิกยังสามารถลดปริมาณการระบายในช่วงฤดูแล้งได้สูงถึง 860 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือลดลงคิดเป็น 24.04% แบบจำลองฟuzzyลอจิกยังสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำได้ถึงประมาณ 1,167.33 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี โดยสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งได้เพิ่มขึ้น 11.57% เมื่อเปรียบเทียบกับผลการระบายน้ำจริงที่ผ่านมา ยิ่งไปกว่านั้น แบบจำลองฟuzzyลอจิกยังสามารถเพิ่มการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำได้สูงถึง 249.54 กิกะวัตต์-ชั่วโมงต่อปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำในช่วงฤดูฝนที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ ผลการจำลองในกรณีที่ 2 ที่ทำการปรับลดพื้นที่เพาะปลูกของโครงการเจ้าพระยาใหญ่ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555–2561 และกรณีที่ 3 กรณีพิจารณาปริมาณ Sideslow สถานี W.4A ในการกำหนดการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล และกำหนดปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. พบว่า สามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งได้เพิ่มขึ้นจากกรณีที่ 1 ถึง +4.56% และ +7.80% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองกรณีที่ 3 ยังเกิดการไหลล้นอ่างในปี พ.ศ. 2554 สำหรับผลการจำลองในกรณีที่ 4 โดยอาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำคาดการณ์ในอนาคต (Projected Inflow) ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2543–2563 พบว่า สามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งได้เพิ่มขึ้น +0.06% ดังแสดงผลในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองฟuzzyลอจิก

กรณี	ผลการจำลองระบบ	เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้น/ลดลง ^{3/} (%Active Storage)			
		พฤศจิกายน	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	รายปี
สถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบัน ^{1/}					
1	กรณีกำหนดปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. (สภาพจริง)	+6.09	+18.37	+11.57	+14.70
2	กรณีปรับลดพื้นที่เพาะปลูกของโครงการเจ้าพระยาใหญ่ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555–2561	+9.86 (3.77) ^{4/}	+24.50 (6.13) ^{4/}	+16.13 (4.56) ^{4/}	+19.98 (5.28) ^{4/}

กรณี	ผลการจำลองระบบ	เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้น/ลดลง ^{3/} (%Active Storage)			
		พฤศจิกายน	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	รายปี
3	กรณีพิจารณาปริมาณ Sidelow สถานี W.4A ในการกำหนดการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล และกำหนดปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. ^{5/}	+14.55 (8.46) ^{4/}	+25.69 (7.32) ^{4/}	+19.37 (7.80) ^{4/}	+22.28 (7.58) ^{4/}
สถานการณ์ในอนาคต ^{2/}					
4	กรณีพิจารณาปริมาณ Sidelow สถานี W.4A ในการกำหนดการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล และกำหนดปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ.	+1.46 (-4.63) ^{4/}	+1.63 (-16.77) ^{4/}	+0.06 (-11.51) ^{4/}	+8.73 (-5.97) ^{4/}

หมายเหตุ : ^{1/} อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจริง (Observed Inflow) และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2543–2561

^{2/} อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำคาดการณ์ในอนาคต (Projected Inflow) ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2543–2561

^{3/} เปรียบเทียบกับปริมาณน้ำเก็บกักจริงระหว่างปี พ.ศ. 2543–2561

^{4/} ผลต่างคำนวณจากการเปรียบเทียบกับกรณี 1

^{5/} ยังเกิดการไหลล้นอ่างในปี พ.ศ. 2554

นอกจากนี้ แบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยวิธีโปรแกรมเชิงข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลังได้ถูกพัฒนาต่อยอดจากแบบจำลองพีซีซีเดิมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะ Day to Day Operation ผลการวิจัยได้ออกแบบเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 การวางแผนปฏิบัติการ (Operation Planning) โดยเลือกช่วงข้อมูลของการทดสอบในปี พ.ศ. 2559–2561 สำหรับการทดสอบหารูปแบบการระบายน้ำรายเดือนที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Technique) และกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้มีปริมาณน้ำเก็บกักเพิ่มขึ้น 15% ในเดือนพฤศจิกายน และปริมาณการขาดน้ำและปริมาณน้ำไหลล้นอ่างเกิดขึ้นให้น้อยที่สุด และนำข้อมูลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำล่วงหน้าเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลนำเข้า และส่วนที่ 2 การกำหนดการระบายน้ำจริง (Operating) โดยในส่วนนี้จะมีส่วนของโมดูลย่อยจากแบบจำลองพีซีซีเดิมที่ได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถเก็บกักน้ำได้เพิ่มขึ้นแล้ว และพัฒนาโมดูลย่อย ANFIS และโมดูลย่อย RL เข้ามาเสริมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองในการกำหนดการระบายน้ำจริงให้สูงขึ้น

แนวทางที่ 4 แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Constraint Programming Model with Machine Learning)

ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543–2561 ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในกรณีที่ 1 ซึ่งได้กำหนดสมการข้อจำกัดเป็นลักษณะรายปีโดยอาศัยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. พบว่า สามารถลดปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยได้ถึง 49.81 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งหมายถึงความสามารถในการเก็บกักน้ำในอ่างเก็บน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในกรณีนี้ยังสามารถลดปริมาณการระบายในช่วงฤดูแล้งได้สูงถึง 333.69 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือลดลงคิดเป็น 9.33% แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดนี้ยังสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำได้ถึงประมาณ 955.84 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี โดย

สามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งได้เพิ่มขึ้น 10.36% เมื่อเปรียบเทียบกับผลการระบายน้ำจริงที่ผ่านมา ยิ่งไปกว่านั้น แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดยังสามารถเพิ่มการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำได้สูงขึ้นถึง 90.89 กิกะวัตต์-ชั่วโมงต่อปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำในช่วงฤดูฝนที่เพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การปรับเปลี่ยนรูปแบบสมการข้อจำกัดเป็นแบบรายฤดูกาลในกรณีที่ 2 ส่งผลให้ความสามารถในการเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งลดลงจากกรณีที่ 1 เล็กน้อยประมาณ -0.95% นอกจากนี้ การพิจารณาปริมาณ Sidelow สถานี W.4A มาช่วยในการกำหนดการระบายน้ำในแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดยังสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ 1 ประมาณ +2.76% สำหรับผลการจำลองในกรณีที่ 4 โดยอาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำคาดการณ์ในอนาคต (Projected Inflow) ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2543–2563 พบว่าปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งลดลง -14.00% ดังแสดงผลในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด

กรณี	ผลการจำลองระบบ	เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้น/ลดลง ^{3/} (%Active Storage)			
		พฤศจิกายน	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	รายปี
สถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบัน ^{1/}					
1	กรณีกำหนดสมการข้อจำกัดรายปีและปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. (สภาพจริง)	+7.94	+14.00	+10.36	+12.03
2	กรณีกำหนดสมการข้อจำกัดรายฤดูกาลและปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. (สภาพจริง)	+7.10 (-0.84) ^{4/}	+12.93 (-1.07) ^{4/}	+9.41 (-0.95) ^{4/}	+11.03 (-1.00) ^{4/}
3	กรณีกำหนดสมการข้อจำกัดรายฤดูกาลและปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. (สภาพจริง) และพิจารณาปริมาณ Sidelow สถานี W.4A ^{5/}	+10.49 (+2.55) ^{4/}	+17.67 (+3.67) ^{4/}	+13.12 (+2.76) ^{4/}	+15.21 (+3.18) ^{4/}
สถานการณ์ในอนาคต ^{2/}					
4	กรณีกำหนดสมการข้อจำกัดรายฤดูกาลและปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. (สภาพจริง) และพิจารณาปริมาณ Sidelow สถานี W.4A และสถานี CT.2A	-23.55 (-31.49) ^{4/}	-16.49 (-30.49) ^{4/}	-14.00 (-24.36) ^{4/}	-29.46 (-41.49) ^{4/}

หมายเหตุ : ^{1/} อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจริง (Observed Inflow) และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2543–2561

^{2/} อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำคาดการณ์ในอนาคต (Projected Inflow) ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2543–2561

^{3/} เปรียบเทียบกับปริมาณน้ำเก็บกักจริงระหว่างปี พ.ศ. 2543–2561

^{4/} ผลต่างคำนวณจากการเปรียบเทียบกับกรณี 1 และ ^{5/} ยังเกิดการไหลล้นอ่างในปี พ.ศ. 2554

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	vi
สารบัญ	xii
สารบัญรูป	xiii
สารบัญตาราง	
บทที่ 1 บทนำ	1-1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1-1
1.2 วัตถุประสงค์	1-7
1.3 แผนการดำเนินการ	1-7
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	1-14
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม	2-1
2.1 หลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ในงานบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ	2-1
2.2 เทคนิคการหาค่าที่ดีที่สุดกับการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ (Optimization Techniques for Reservoir Management)	2-2
2.3 เทคนิคการจำลองระบบกับการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ (Simulation Techniques for Reservoir Management)	2-4
2.4 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกต่อข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ	2-6
2.5 เครื่องมือใช้งาน	2-8
2.6 พื้นที่ศึกษา	2-6
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย	3-1
3.1 กรอบงานวิจัย	3-1
3.2 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE11	3-18
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	4-1
4.1 ผลการพัฒนาแบบจำลอง MIKE11	4-1
4.2 ผลการประมาณการความต้องการน้ำในกิจกรรมต่าง ๆ	4-15
4.3 ผลการวิเคราะห์การบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากอดีตถึงปัจจุบัน	4-78
4.4 แนวทางในการเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในอนาคต	4-94
4.5 ศักยภาพในการเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในอนาคต	4-101
4.6 ผลการพัฒนากลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรูปแบบใหม่	4-108
4.7 ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในสถานการณ์ปัจจุบันและอนาคต	4-175
4.8 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิผลของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในปัจจุบันและประสิทธิผลที่ได้จากกลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำใหม่	4-182

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.9 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิผลของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในปัจจุบันแยกตามประเภทปีน้ำจากกลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำใหม่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์	4-186
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	5-1
5.1 สรุปผลการวิจัย	5-1
5.2 ข้อเสนอแนะ	5-3
เอกสารอ้างอิง	R-1
ภาคผนวก A ผลการทดสอบ CO-RUN ในการบริหารจัดการน้ำเขื่อนภูมิพล 1/7/2020-30/9/2020	A-1
ภาคผนวก B ภาพการจัดการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการเพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้และเทคโนโลยีจากโครงการวิจัยเข้มมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562	B-1

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1-1	กลุ่มงานภายใต้แผนงานวิจัยที่ 3 จำนวน 4 กลุ่มงานหลัก	1-3
1-2	งานวิจัยหลักภายใต้แผนงานวิจัยที่ 3	1-4
1-3	การเชื่อมโยงงานวิจัยของแผนงานวิจัยที่ 3 การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการเขื่อน	1-5
1-4	การเชื่อมโยงข้อมูลนำเข้าและข้อมูลผลลัพธ์ระหว่างโครงการวิจัยในแผนงานวิจัยที่ 3	1-6
2-1	แผนที่แสดงการใช้น้ำของพืชตามฤดูกาล (Season Crop Water Use Map) ของพื้นที่ Gwydir ในประเทศออสเตรเลีย ระหว่างวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2560 ถึง 31 มีนาคม พ.ศ. 2561 ด้วยแอปพลิเคชัน IrrisAT ที่วัดแปลงเพาะปลูกในเขตชลประทาน และแสดงความแตกต่างในการใช้น้ำของพืชภายในแปลงชลประทานและระหว่างแปลงชลประทาน	2-9
2-2	แผนที่แสดงการใช้น้ำของพืชตามฤดูกาล (Season Crop Water Use Map) ของพื้นที่ Gwydir ในประเทศออสเตรเลีย ด้วยแอปพลิเคชัน IrrisAT ซึ่งแสดงการใช้น้ำของพืชในพื้นที่ชลประทานทั้งหมดในช่วงส่งน้ำชลประทานระหว่างวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2560 ถึง 31 มีนาคม พ.ศ. 2561	2-10
2-3	ข้อมูลปริมาณการใช้น้ำพืชรายวันที่แสดงใน IrrisAT ข้อมูลดาวเทียมและ ETo จะถูกส่งเข้าสู่ระบบโดยอัตโนมัติเมื่อมีภาพและข้อมูลดาวเทียมใหม่พร้อมใช้งาน	2-11
2-4	ข้อมูลกำหนดการชลประทานและการขาดน้ำชลประทานที่คาดการณ์ไว้สำหรับ 7 วันข้างหน้าแสดงใน IrrisAT	2-12
2-5	ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตพืชและปริมาณการใช้น้ำของพืชที่พัฒนาขึ้นด้วย IrrisAT ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของระบบชลประทาน รูปแบบการปลูก และตารางการให้น้ำต่อการใช้น้ำและผลผลิตฝ้ายในพื้นที่ชลประทาน Gwydir	2-13
2-6	เขื่อนภูมิพล จังหวัดตาก	2-15
2-7	แผนที่แสดงลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	2-18
2-8	แผนที่แสดงระบบเขื่อน-อ่างเก็บน้ำ-โครงการชลประทานในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	2-18
2-9	โค้งระดับ-พื้นที่-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล	2-21
2-10	แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่โครงการชลประทานในลุ่มน้ำปิงตอนล่าง	2-25
2-11	แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่โครงการชลประทานในลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน	2-26
2-12	แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่โครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง	2-27
2-13	แผนที่แสดงโซนการส่งน้ำของโครงการชลประทานในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	2-28
3-1	กรอบงานวิจัย	3-1
3-2	การกำหนดเกณฑ์การระบายน้ำด้วยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ	3-6
3-3	นโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging	3-7
3-4	การกำหนดเกณฑ์การระบายน้ำเป้าหมายด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging : One-Point Hedging	3-9
3-5	การกำหนดเกณฑ์การระบายน้ำเป้าหมายด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging : Two-Point Hedging	3-10

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3-6	การกำหนดเกณฑ์การระบายน้ำเป้าหมายด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging : Three-Point Hedging	3-11
3-7	การกำหนดเกณฑ์การระบายน้ำเป้าหมายด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging : Zone-Based Hedging	3-12
3-8	การกำหนดรูปแบบของแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในช่วงฤดูแล้ง	3-16
3-9	การกำหนดรูปแบบของแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในช่วงฤดูฝน	3-17
3-10	หลักการคำนวณแบบจำลอง MIKE11-RR NAM Model	3-21
3-11	สถานีน้ำฝนที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง MIKE11	3-22
3-12	สถานีตรวจวัดอัตราการระเหยจากผิวดินที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง MIKE11	3-22
3-13	สถานีตรวจวัดน้ำท่าและระดับน้ำของลำน้ำที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง MIKE11	3-23
3-14	ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง MIKE11 ของโครงการ	3-24
3-15	ฐานข้อมูลสภาพอากาศเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) จัดทำโดย Ramkhamhaeng University Center of Regional Climate Change and Renewable Energy (RU-CORE)	3-27
3-16	สมมติฐานปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO ₂ -equivalent) ของภาพฉาย RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 และ RCP 8.5	3-28
4-1	ลุ่มแม่น้ำย่อยในลุ่มแม่น้ำปิง	4-1
4-2	ขอบเขตพื้นที่ของสถานีฝนด้วยวิธี Thiessen Polygon ในลุ่มน้ำปิง	4-2
4-3	ผลการสอบเทียบแบบจำลองน้ำท่าด้วย MIKE11-RR NAM Model ในลุ่มน้ำย่อย PB.3	4-5
4-4	ผลการสอบเทียบแบบจำลองน้ำท่าด้วย MIKE11-RR NAM Model ในลุ่มน้ำย่อย PB.4	4-6
4-5	ผลการสอบเทียบแบบจำลองน้ำท่าด้วย MIKE11-RR NAM Model ในลุ่มน้ำย่อย PB.5	4-6
4-6	ผลการสอบเทียบแบบจำลองน้ำท่าด้วย MIKE11-RR NAM Model ในลุ่มน้ำย่อย PB.15	4-6
4-7	ผลการสอบเทียบแบบจำลองน้ำท่าด้วย MIKE11-RR NAM Model ในลุ่มน้ำย่อย PB.22	4-7
4-8	ผลการตรวจสอบแบบจำลองน้ำท่าด้วย MIKE11-RR NAM Model ในลุ่มน้ำย่อย PB.3	4-8
4-9	ผลการตรวจสอบแบบจำลองน้ำท่าด้วย MIKE11-RR NAM Model ในลุ่มน้ำย่อย PB.4	4-8
4-10	ผลการตรวจสอบแบบจำลองน้ำท่าด้วย MIKE11-RR NAM Model ในลุ่มน้ำย่อย PB.5	4-8
4-11	ผลการตรวจสอบแบบจำลองน้ำท่าด้วย MIKE11-RR NAM Model ในลุ่มน้ำย่อย PB.15	4-9
4-12	ผลการตรวจสอบแบบจำลองน้ำท่าด้วย MIKE11-RR NAM Model ในลุ่มน้ำย่อย PB.22	4-9
4-13	MIKE11-HD ที่กำลังถูกพัฒนาภายใต้โครงการ	4-10
4-14	ผลการจำลองปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันของเขื่อนภูมิพลด้วย MIKE11-HD	4-11
4-15	Q-Q plot ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) ด้วย MIKE11-HD	4-11
4-16	Q-Q plot ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลนอกฤดูฝน (พ.ย.-เม.ย.) ด้วย MIKE11-HD	4-12

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4-17	ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 ในช่วงปี พ.ศ. 2543-2563 (ปีฐาน), 2564-2583, 2584-2603, 2604-2623 และ 2624-2642	4-13
4-18	ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลภายใต้ภาพฉาย RCP 8.5 ในช่วงปี พ.ศ. 2543-2563 (ปีฐาน), 2564-2583, 2584-2603, 2604-2623 และ 2624-2642	4-14
4-19	พื้นที่โครงการชลประทานในกลุ่มน้ำปิงตอนล่างที่นำเข้าไปใน Cloud-Based IrrisAT Application	4-17
4-20	ตัวอย่างผลการประมาณการ Kc-IrrisAT ในกลุ่มน้ำปิงตอนล่างด้วย Cloud-Based IrrisAT Application	4-18
4-21	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrrisAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrrisAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาท่อทองแดง	4-20
4-22	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrrisAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrrisAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาวังบัว	4-20
4-23	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrrisAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrrisAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาวังยาง	4-21
4-24	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrrisAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrrisAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาหนองขวัญ	4-21
4-25	ค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrrisAT และ Avg. Kc-RID ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาท่อทองแดง	4-22
4-26	ค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrrisAT และ Avg. Kc-RID ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาวังบัว	4-22
4-27	ค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrrisAT และ Avg. Kc-RID ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาวังยาง	4-23
4-28	ค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrrisAT และ Avg. Kc-RID ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาหนองขวัญ	4-23
4-29	ผลการประมาณการปริมาณการคายระเหยน้ำของพืชอ้างอิงในบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนล่าง	4-24
4-30	พื้นที่โครงการชลประทานในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาที่นำเข้าไปใน Cloud-Based IrrisAT Application	4-27
4-31	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrrisAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrrisAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาวัดสิงห์	4-28
4-32	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrrisAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrrisAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาบางบาล	4-28
4-33	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrrisAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrrisAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพลเทพ	4-29

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4-34	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาท่าโบสถ์	4-29
4-35	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาสามชุก	4-30
4-36	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาดอนเจดีย์	4-30
4-37	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาโพธิ์พระยา	4-31
4-38	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาบรมธาตุ	4-31
4-39	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาชั้นสุตร	4-32
4-40	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาปางมณี	4-32
4-41	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาผักไห่	4-33
4-42	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษามหาราช	4-33
4-43	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษามโนรมย์	4-34
4-44	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาช่องแค	4-34
4-45	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาโคกกระเทียม	4-35
4-46	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาเรียงราง	4-35
4-47	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาป่าสักใต้	4-36
4-48	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษานครหลวง	4-36
4-49	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษารังสิตเหนือ	4-37
4-50	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษารังสิตใต้	4-37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4-51	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrrisAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrrisAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาเจ้าเจ็ดบางยี่หน	4-38
4-52	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrrisAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrrisAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพระยาบันลือ	4-38
4-53	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrrisAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrrisAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพระพิมล	4-39
4-54	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrrisAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrrisAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาภาษีเจริญ	4-39
4-55	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrrisAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrrisAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาคลองด่าน	4-40
4-56	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrrisAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrrisAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพระองค์ไชยานุชิต	4-40
4-57	ผลการประมาณการปริมาณการคายระเหยน้ำของพืชอ้างอิงในบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา	4-41
4-58	ผลการประมาณการปริมาณฝนใช้การของข้าวในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา	4-44
4-59	ผลการประมาณการปริมาณฝนใช้การของพืชไร่ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา	4-44
4-60	ดัชนีผลผลิต (มูลค่าผลผลิต) ระหว่างปี พ.ศ. 2559-2562	4-65
4-61	โค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลาของสถานี P.2A ท้ายเขื่อนภูมิพล	4-70
4-62	โค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลาของสถานี P.7A ท้ายเขื่อนภูมิพล	4-70
4-63	โค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลาของสถานี P.16 ท้ายเขื่อนภูมิพล	4-70
4-64	โค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลาของสถานี P.17 ท้ายเขื่อนภูมิพล	4-71
4-65	โค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลาของสถานี C.13 ท้ายเจ้าพระยา	4-71
4-66	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค็มที่สถานีสูบน้ำสำแลกับอัตราการระบายน้ำท้ายเขื่อนเจ้าพระยา	4-72
4-67	พื้นที่เพาะปลูกในโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ในช่วงฤดูฝน	4-73
4-68	พื้นที่เพาะปลูกในโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ในช่วงฤดูแล้ง	4-74
4-69	สัดส่วนพื้นที่เพาะปลูกข้าวและพืชไร่ในโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่	4-74
4-70	พื้นที่เพาะปลูกและปริมาณความต้องการน้ำในโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่	4-75
4-71	ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างรายปีของเขื่อนภูมิพลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2512-2562	4-79
4-72	ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2517-2562	4-80
4-73	สัดส่วนปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์รายปีตั้งแต่ปี พ.ศ. 2517-2561	4-80
4-74	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2512-2562	4-81
4-75	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2517-2562	4-81
4-76	ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยรายเดือนของเขื่อนภูมิพล	4-82
4-77	ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยรายเดือนของเขื่อนสิริกิติ์	4-82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4-78	ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยรายเดือนของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-83
4-79	ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพล	4-83
4-80	ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนสิริกิติ์	4-84
4-81	ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-84
4-82	ปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายและปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-85
4-83	แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายเดือนของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-85
4-84	ผลต่างแผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายเดือนของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-86
4-85	ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความต้องการน้ำรายเดือนตามแผนและปริมาณการระบายน้ำรายเดือน	4-86
4-86	แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายฤดูกาลของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระยะยาว	4-87
4-87	แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระยะยาว	4-87
4-88	ความแตกต่างแผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-88
4-89	โอกาสความน่าจะเป็นในการระบายน้ำเมื่อเทียบกับแผนการจัดสรรน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์	4-88
4-90	การจัดแบ่งประเภทปีน้ำในกลุ่มน้ำปีงและกลุ่มน้ำน่าน	4-89
4-91	แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำปกติ	4-90
4-92	แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายฤดูกาลของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำปกติ	4-90
4-93	แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำน้อย	4-91
4-94	แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายฤดูกาลของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำน้อย	4-91
4-95	แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำมาก	4-92
4-95	แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายฤดูกาลของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำมาก	4-92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4-97	โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลที่พัฒนาขึ้นในปี พ.ศ. 2555 และ 2562	4-93
4-98	โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนสิริกิติ์ที่พัฒนาขึ้นในปี พ.ศ. 2555 และ 2562	4-93
4-99	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายวันของเขื่อนภูมิพล	4-94
4-100	ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงและจากแบบจำลองรายวันของเขื่อนภูมิพล	4-95
4-101	ปริมาณความต้องการน้ำชลประทานจากการปรับลดพื้นที่เพาะปลูกลง	4-96
4-102	แนวทางการจัดสรรน้ำของเขื่อนเจ้าพระยาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2562	4-97
4-103	ปริมาณน้ำที่ระบายส่วนเกินรายวันของเขื่อนเจ้าพระยาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2562	4-97
4-104	การควบคุมระดับน้ำหน้าเขื่อนเจ้าพระยาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2562	4-97
4-105	การควบคุมระดับน้ำท้ายเขื่อนเจ้าพระยาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2562	4-98
4-106	ปริมาณการระบายน้ำส่วนเกินเฉลี่ยของเขื่อนเจ้าพระยาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2562	4-98
4-107	การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณ Sideflow ของสถานีวัดน้ำท่า W.4A รายเดือนเฉลี่ย	4-100
4-108	การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณ Sideflow ของสถานีวัดน้ำท่า Y.17 รายเดือนเฉลี่ย	4-100
4-109	การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณ Sideflow ของสถานีวัดน้ำท่า N.22A รายเดือนเฉลี่ย	4-100
4-110	การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณ Sideflow ของสถานีวัดน้ำท่า CT.2A รายเดือนเฉลี่ย	4-100
4-111	การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณ Sideflow ของสถานีวัดน้ำท่า S.9 รายเดือนเฉลี่ย	4-101
4-112	การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณ Sideflow ของสถานีวัดน้ำท่าทุกสถานีรายเดือนเฉลี่ย	4-101
4-113	การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณ Sideflow ของสถานีวัดน้ำท่าทุกสถานีรายปีเฉลี่ย	4-101
4-114	ระดับน้ำเก็บกักรายวันของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561	4-103
4-115	ระดับน้ำเก็บกักรายวันของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในปีน้ำมาก	4-103
4-116	ระดับน้ำเก็บกักรายวันของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในปีน้ำปกติ	4-104
4-117	ระดับน้ำเก็บกักรายวันของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในปีน้ำน้อย	4-104
4-118	ระดับน้ำเก็บกักรายวันของอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561	4-105
4-119	ระดับน้ำเก็บกักรายวันของอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำมาก	4-106
4-120	ระดับน้ำเก็บกักรายวันของอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำปกติ	4-106
4-121	ระดับน้ำเก็บกักรายวันของอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำน้อย	4-107
4-122	ปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561	4-108
4-123	ปริมาณน้ำเก็บกักรายเดือนเฉลี่ยของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561	4-108
4-124	ปริมาณน้ำเก็บกักรายวันเฉลี่ยของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561	4-109
4-125	แบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลด้วยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำและโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่ปรับค่าใหม่	4-110

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4-126	การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อน ภูมิพล	4-110
4-127	ดัชนีแสดงผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของ เขื่อนภูมิพล	4-111
4-128	แบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลนโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ แบบ Hedging	4-112
4-129	ไดอะแกรมระบบควบคุมแบบฟuzzyลอจิก	4-113
4-130	ไดอะแกรมระบบควบคุมแบบฟuzzyลอจิกโมดูลที่ 1-3	4-114
4-131	ตัวแปรอินพุตของระบบควบคุมแบบฟuzzyลอจิก	4-115
4-132	ฟังก์ชันสมาชิกสำหรับกฎการควบคุมแบบ Dry-Period	4-115
4-133	ฟังก์ชันสมาชิกสำหรับกฎการควบคุมแบบ Wet-Period	4-116
4-134	ฟังก์ชันสมาชิกสำหรับกฎการควบคุมแบบ Release Adjusted	4-116
4-135	ผลการพัฒนาแบบจำลองฟuzzyด้วยกล่องเครื่องมือ Simulink MATLAB	4-118
4-136	ผลการพัฒนาแบบจำลองฟuzzy 1	4-119
4-137	ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลแบบจำลองฟuzzy 1	4-120
4-138	ปริมาณน้ำเก็บกักที่ได้จากการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลแบบจำลอง ฟuzzy 1	4-121
4-139	ผลการพัฒนาแบบจำลองฟuzzy 2	4-122
4-140	ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลแบบจำลองฟuzzy 2	4-122
4-141	ปริมาณน้ำเก็บกักที่ได้จากการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลแบบจำลอง ฟuzzy 2	4-123
4-142	ผลการพัฒนาแบบจำลองฟuzzy 3	4-124
4-143	ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลแบบจำลองฟuzzy 3	4-125
4-144	ปริมาณน้ำเก็บกักที่ได้จากการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลแบบจำลอง ฟuzzy 3	4-126
4-145	ปริมาณการระบายน้ำรายวันของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองฟuzzy 3	4-129
4-146	ปริมาณการระบายน้ำรายฤดูกาลของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองฟuzzy 3	4-129
4-147	ผลต่างของปริมาณการระบายน้ำจริงรายฤดูกาลกับแบบจำลองฟuzzyของเขื่อนภูมิพล ด้วยแบบจำลองฟuzzy 3	4-130
4-148	ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองฟuzzy 3	4-130
4-149	ผลต่างของปริมาณการระบายน้ำจริงรายปีกับแบบจำลองฟuzzyของเขื่อนภูมิพลด้วย แบบจำลองฟuzzy 3	4-131
4-150	ปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองฟuzzy 3	4-133
4-151	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายฤดูกาลของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองฟuzzy 3	4-135

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4-152	ผลต่างของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงรายฤดูกาลกับแบบจำลองฟuzzy ของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองฟuzzy 3	4-135
4-153	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปีของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองฟuzzy 3	4-136
4-154	ผลต่างของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงรายปีกับแบบจำลองฟuzzy ของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองฟuzzy 3	4-136
4-155	ผลการพัฒนาแบบจำลอง ANFIS สำหรับการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพล	4-137
4-156	โครงสร้างแบบจำลอง ANFIS	4-138
4-157	ผลคำนวณการสอบเทียบแบบจำลอง ANFIS ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553	4-139
4-158	ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553 โดยเอา Fuzzy Rule Adjusted มาใช้	4-140
4-159	ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2562 โดยเอา Fuzzy Rule Adjusted มาใช้	4-141
4-160	กระบวนการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง	4-142
4-161	MATLAB/Simulink สำหรับจำลองระบบการระบายน้ำด้วยการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง	4-143
4-162	เปรียบเทียบผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเก็บกักน้ำของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2559-2560 (OTM : Optimization Techniques, OBS : ปริมาณการเก็บกักน้ำจริง)	4-145
4-163	เปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2559-2560 (OTM : Optimization Techniques, OBS : ค่าการระบายน้ำจริง)	4-146
4-164	เปรียบเทียบผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเก็บกักน้ำของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2560-2561 (OTM : Optimization Techniques, OBS : ปริมาณการเก็บกักน้ำจริง)	4-147
4-165	เปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2560-2561 (OTM : Optimization Techniques, OBS : ค่าการระบายน้ำจริง)	4-147
4-166	โมดูลย่อย Rule-Based Fuzzy Inference System สำหรับควบคุมการระบายน้ำรายวัน	4-148
4-167	ตัวอย่างผลลัพธ์การคำนวณปริมาณการเก็บกักน้ำด้วยโมดูล Rule-Based Fuzzy Inference System	4-150
4-168	โมดูลย่อย ANFIS สำหรับควบคุมการระบายน้ำรายวัน	4-151
4-169	ตัวอย่างผลลัพธ์การคำนวณปริมาณการเก็บกักน้ำด้วยโมดูล ANFIS ที่ปรับแก้โครงสร้างแล้ว	4-151
4-170	โมดูลย่อย Reinforcement Learning	4-152
4-171	การกำหนดโครงสร้าง Deep Learning ใน Reinforcement Learning	4-152
4-172	ตัวอย่างการ Learning ของ RL โดยการระบายน้ำในแต่ละ Episode	4-153
4-173	ค่า Reward สละสมที่ได้จากการระบายน้ำ	4-153

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4-174 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 1 วันล่วงหน้าโดยให้ค่า $R^2=0.88$	4-161
4-175 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 7 วันล่วงหน้าโดยให้ค่า $R^2=0.67$	4-161
4-176 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 30 วันล่วงหน้าโดยให้ค่า $R^2=0.58$	4-162
4-177 การพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดด้วยภาษา Minizinc ในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล	4-163
4-178 ปริมาณการระบายน้ำรายวันของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงสุ่มแบบข้อจำกัด	4-163
4-179 ปริมาณการระบายน้ำรายฤดูกาลของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงสุ่มแบบข้อจำกัด	4-164
4-180 ผลต่างของปริมาณการระบายน้ำจริงรายฤดูกาลกับแบบจำลองการโปรแกรมเชิงสุ่มแบบข้อจำกัดของเขื่อนภูมิพล	4-164
4-181 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด	4-165
4-182 ผลต่างของปริมาณการระบายน้ำจริงรายปีกับแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดของเขื่อนภูมิพล	4-165
4-183 ปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด	4-171
4-184 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายฤดูกาลของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด	4-173
4-185 ผลต่างของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงรายฤดูกาลกับแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดของเขื่อนภูมิพล	4-174
4-186 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปีของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด	4-174
4-187 ผลต่างของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงรายปีกับแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดของเขื่อนภูมิพล	4-175
4-188 ตัวอย่างผลลัพธ์การคำนวณปริมาณการเก็บกักน้ำด้วยโมดูล ANFIS ที่ปรับแก้โครงสร้างแล้ว	4-181
4-189 เปรียบเทียบรูปแบบการระบายน้ำด้วยแบบจำลองฟuzzyและแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในปีน้ำมาก	4-188
4-190 เปรียบเทียบรูปแบบการระบายน้ำด้วยแบบจำลองฟuzzyและแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในปีน้ำปกติ	4-188
4-191 เปรียบเทียบรูปแบบการระบายน้ำด้วยแบบจำลองฟuzzyและแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในปีน้ำน้อย	4-189
รูปผนวกที่	หน้า
A-1 ปริมาณการระบายน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2562-2563	A-4

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปผนวกที่		หน้า
A-2	แผนการจัดสรรน้ำและปริมาณการระบายน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ปี พ.ศ. 2562	A-4
A-3	แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ปี พ.ศ. 2563	A-4
A-4	สถานีโทรมาตรตรวจวัดฝนของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	A-5
A-5	ปริมาณฝนตรวจวัดจากสถานีโทรมาตร PU01 กฟผ. แม่น้ำปิง อ.ดอยหล่อ	A-6
A-6	ปริมาณฝนตรวจวัดจากสถานีโทรมาตร PU02 กฟผ. แม่น้ำปิง อ.ฮอด	A-6
A-7	ปริมาณฝนตรวจวัดจากสถานีโทรมาตร PU03 กฟผ. อ.อมก๋อย	A-7
A-8	ปริมาณฝนตรวจวัดจากสถานีโทรมาตร PU01 แม่น้ำปิง อ.ดอยหล่อ ระหว่างกรกฎาคม-กันยายน	A-7
A-9	ปริมาณฝนตรวจวัดจากสถานีโทรมาตร PU02 แม่น้ำปิง อ.ฮอด ระหว่างกรกฎาคม-กันยายน	A-7
A-10	ปริมาณฝนตรวจวัดจากสถานีโทรมาตร PU03 อ.อมก๋อย ระหว่างกรกฎาคม-กันยายน	A-8
A-11	ปริมาณฝนตรวจวัดและปริมาณฝนพยากรณ์รายวันล่วงหน้า 14 วันด้วยแบบจำลอง NHC ในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	A-8
A-12	ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนตรวจวัดและปริมาณฝนพยากรณ์รายวันล่วงหน้า 14 วัน ด้วยแบบจำลอง NHC ในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	A-9
A-13	รูปแบบข้อมูลฝนตรวจวัดและฝนพยากรณ์รายวันล่วงหน้าในช่วงเวลาต่าง ๆ ระหว่างเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2563 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2564 ในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน	A-9
A-14	ปริมาณ Sideflow รายวันจากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง DWCM-AgWU ของสถานี W.4A และ CT.2A ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563	A-11
A-15	ปริมาณ Sideflow รายเดือนจากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง DWCM-AgWU ของสถานี W.4A และ CT.2A ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563	A-11
A-16	ปริมาณ Sideflow รายวันจากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง DWCM-AgWU ของสถานี W.4A และ CT.2A ในปี พ.ศ. 2563	A-12
A-17	ปริมาณ Sideflow รายเดือนจากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง DWCM-AgWU ของสถานี W.4A และ CT.2A ในปี พ.ศ. 2563	A-12
A-18	ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรคาดการณ์ล่วงหน้าในช่วงเดือนกรกฎาคม-สิงหาคม	A-13
A-19	ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำระหว่างวันที่ 1/7/2563-18/8/2563 โดยอาศัยข้อมูลฝนพยากรณ์ล่วงหน้า 14 วันในลุ่มน้ำปิงตอนบน	A-14
A-20	ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่ลดลงระหว่างวันที่ 30/7/2563-18/8/2563 (รูปซ้ายมือ) และระหว่างวันที่ 30/7/2563-26/8/2563 (รูปขวามือ) โดยอาศัยข้อมูลฝนพยากรณ์ล่วงหน้าในลุ่มน้ำปิงตอนบน	A-15
A-21	ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่ลดลงระหว่างวันที่ 1/7/2563-18/8/2563 (รูปซ้ายมือ) และระหว่างวันที่ 30/7/2563-26/8/2563 (รูปขวามือ) โดยอาศัยข้อมูลฝนสถานีโทรมาตร PU02 ในลุ่มน้ำปิงตอนบน	A-15

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
A-22	ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำระหว่างวันที่ 1/7/2563–26/8/2563 โดยอาศัยข้อมูลฝนพยากรณ์ล่วงหน้ารูปแบบต่าง ๆ ในลุ่มน้ำปิงตอนบนหลังอัปเดตข้อมูลนำเข้าจริงที่ให้ค่าความแม่นยำสูงขึ้น	A-16
A-23	ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำระหว่างวันที่ 1/7/2563–9/10/2563 โดยอาศัยข้อมูลฝนพยากรณ์ล่วงหน้ารูปแบบต่าง ๆ ในลุ่มน้ำปิงตอนบนหลัง Retraining แบบจำลองที่ให้ค่าความแม่นยำสูงขึ้น	A-17
A-24	ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำระหว่างวันที่ 1/7/2563–3/9/2563 (รูปซ้ายมือ) และระหว่างวันที่ 1/7/2563–9/9/2563 (รูปขวามือ) โดยอาศัยข้อมูลฝนตรวจวัดในลุ่มน้ำที่ให้ค่าความแม่นยำสูงขึ้นหลัง Retraining แบบจำลอง	A-18
A-25	เปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันด้วยแบบจำลองพีซซีกับปริมาณการระบายน้ำจริงของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543–2563	A-21
A-26	เปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันด้วยแบบจำลองพีซซีกับปริมาณความต้องการน้ำระหว่างปี พ.ศ. 2543–2563	A-21
A-27	เปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันด้วยแบบจำลองพีซซีกับปริมาณการระบายน้ำจริงของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2562–2563	A-21
A-28	เปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันด้วยแบบจำลองพีซซีกับปริมาณความต้องการน้ำระหว่างปี พ.ศ. 2562–2563	A-22
A-29	ปริมาณการระบายน้ำล่วงหน้าด้วยแบบจำลอง CP ในเดือนสิงหาคม–กันยายน 2563	A-22
A-30	แผนการจัดสรรน้ำที่แนะนำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาแยกตามประเภทปีน้ำโดยพิจารณาจากแพคเตอร์การจัดสรรน้ำ	A-24
A-31	แผนการจัดสรรน้ำที่แนะนำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาแยกตามประเภทปีน้ำโดยพิจารณาจากแพคเตอร์การระบายน้ำ	A-24

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1-1	แผนการดำเนินงานวิจัยและผลการดำเนินงานจริง	1-8
2-1	รูปแบบการพัฒนาเศรษฐกิจ-สังคมในอนาคตตามสมมติฐาน SRES ที่ส่งผลต่อปริมาณปริมาณของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยของโลก	2-7
2-2	รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานเขื่อนภูมิพล	2-19
2-3	รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ เขื่อนภูมิพล	2-19
2-4	รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานเขื่อนภูมิพล	2-20
2-5	ข้อมูลความจุเก็บกักสูงสุดของแม่น้ำ	2-21
2-6	ข้อมูลสถานีวัดน้ำท่าหลัก	2-22
2-7	รายละเอียดสำคัญของโครงการชลประทานในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	2-23
2-8	แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2549-2555	2-30
2-9	แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2556-2563	2-31
3-1	รายละเอียดของสมมติฐานในจำลองระบบด้วยเค็งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่	3-6
3-2	รายละเอียดของสมมติฐานในจำลองระบบด้วยเค็งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging	3-8
3-3	พารามิเตอร์ปรับเทียบของ MIKE11 RR NAM Model	3-18
4-1	ค่าน้ำหนักของสถานีฝนในแต่ละลุ่มน้ำย่อยด้วย Thiessen Polygon	4-3
4-2	ผลการปรับค่าพารามิเตอร์จากการสอบเทียบค่าแบบจำลอง MIKE11-RR NAM Model	4-5
4-3	ผลการสอบเทียบของแบบจำลอง MIKE11-RR NAM Model	4-7
4-4	ผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง MIKE11-RR NAM Model	4-9
4-5	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5	4-12
4-6	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลภายใต้ภาพฉาย RCP 8.5	4-13
4-7	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนภูมิพลในช่วงปี 2543-2558 จากการใช้วิธีการคำนวณค่าอัตราการระเหยที่แตกต่างกันในแต่ละคู่เปรียบเทียบ	4-15
4-8	ผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานในปี พ.ศ. 2546	4-16
4-9	หลักเกณฑ์และผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการปศุสัตว์	4-16
4-10	พื้นที่ชลประทานที่เพาะปลูกในลุ่มน้ำปิงตอนล่างและช่วงค่าสูงสุดของ Kc-IrriSAT	4-17
4-11	ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของข้าว อ้อย ข้าวโพด และมันสัมปะหลัง	4-19
4-12	แฟคเตอร์ปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแยกรายโครงการ	4-19
4-13	ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรม	4-25

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4-14	โครงการชลประทานในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาและขนาดพื้นที่	4-25
4-15	ปริมาณฝนเชิงพื้นที่ในลุ่มน้ำเจ้าพระยา	4-42
4-16	หลักเกณฑ์การคำนวณปริมาณฝนใช้การของข้าว	4-43
4-17	หลักเกณฑ์การคำนวณปริมาณฝนใช้การของข้าว	4-43
4-18	หลักเกณฑ์และผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค	4-45
4-19	จำนวนประชากรจำแนกเป็นรายจังหวัดและเขตการปกครองในพื้นที่ศึกษา	4-47
4-20	การคาดประมาณประชากรจำแนกเป็นรายจังหวัดและเขตการปกครองในพื้นที่ศึกษา ใน 20 ปีข้างหน้า	4-48
4-21	ข้อมูลจำนวนสถานพักผ่อน จำนวน ห้องพัก อัตราการเข้าพัก จำนวนนักท่องเที่ยวที่ เข้าพักแรมรวมทั้งปี และระยะเวลาที่เข้าพักเฉลี่ยใน 1 ปี จำแนกรายจังหวัดใน ภาคเหนือและภาคกลาง	4-50
4-22	ปริมาณความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคและการท่องเที่ยวสรุปเป็นรายลุ่มน้ำ	4-51
4-23	สถิติข้อมูลปริมาณน้ำที่ผลิตและจำหน่ายของการประปานครหลวงในรอบ 10 ปีที่ผ่านมา	4-51
4-24	สถิติข้อมูลปริมาณน้ำที่ผลิตและจำหน่ายของการประปาส่วนภูมิภาคในรอบ 10 ปีที่ ผ่านมา	4-53
4-25	ประชากรปัจจุบันและการคาดประมาณประชากรในและนอกเขตบริการของการ ประปา	4-53
4-26	ความต้องการน้ำอุปโภคบริโภคในเขตลุ่มน้ำเจ้าพระยาปีปัจจุบันและในอนาคต	4-54
4-27	จำนวนนักท่องเที่ยว นักทัศนจร อัตราการเข้าพัก และระยะเวลาที่เข้าพักเฉลี่ย ใน พื้นที่ศึกษา	4-55
4-28	ความต้องการใช้น้ำเพื่อการท่องเที่ยวในแต่ละจังหวัดในปี พ.ศ. 2561	4-56
4-29	ความต้องการใช้น้ำเพื่อการท่องเที่ยวในแต่ละจังหวัดในปี พ.ศ. 2561	4-57
4-30	หลักเกณฑ์และผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค	4-57
4-31	รายชื่ออุตสาหกรรมที่ตั้งอยู่เป็นกลุ่มก้อนภายใต้การบริหารและจัดการดูแลของการ นิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย	4-59
4-32	รายชื่อของเขตชุมชนอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรมต่าง ๆ ใน ประเทศไทย	4-60
4-33	ผลการประเมินปริมาณความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุตสาหกรรม	4-60
4-34	อัตราการใช้น้ำของโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภทตามขนาดกำลังของเครื่องจักร	4-62
4-35	ความต้องการน้ำของโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบันของจังหวัดที่ใช้น้ำจากแม่น้ำ เจ้าพระยา	4-64
4-36	ความต้องการน้ำเพื่ออุตสาหกรรมในแต่ละช่วง 5 ปี	4-65
4-37	ความต้องการน้ำเพื่อการรักษาสมดุลระบบนิเวศด้านท้ายน้ำอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่	4-66
4-38	สถานีตรวจวัดน้ำท่าหลักที่นำมาทำการวิเคราะห์	4-67
4-39	อัตราการไหลที่แนะนำโดยวิธี FDC	4-68

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4-40	อัตราการไหลที่แนะนำโดยวิธี Tennant	4-69
4-41	ผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อควบคุมสภาพลำน้ำและรักษาสมดุลระบบนิเวศท้ายเขื่อนภูมิพลและเขื่อนเจ้าพระยา	4-69
4-42	พื้นที่เพาะปลูกในฤดูฝนและฤดูแล้งในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	4-72
4-43	ผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำทั้งหมดในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่	4-74
4-44	เปรียบเทียบปริมาณความต้องการน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา	4-77
4-45	ความต้องการน้ำเพื่อการรักษาสมดุลระบบนิเวศด้านท้ายน้ำอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่	4-88
4-46	พื้นที่เพาะปลูกที่แนะนำจากการพิจารณาปัจจัยน้ำต้นทุน	4-94
4-47	แผนการจัดสรรน้ำของลุ่มน้ำเจ้าพระยาในช่วงฤดูแล้งปี พ.ศ. 2562/2563	4-95
4-48	ระดับน้ำเก็บกักที่แนะนำสำหรับลดปริมาณน้ำที่ระบายส่วนเกิน	4-98
4-49	ระดับน้ำเก็บกักที่แนะนำสำหรับลดปริมาณน้ำที่ระบายส่วนเกิน	4-98
4-50	เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล	4-101
4-51	เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์	4-104
4-52	การกำหนดรูปแบบของแบบจำลองพีชชี	4-116
4-53	ผลการระบายน้ำรายฤดูกาลด้วยแบบจำลองพีชชีระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม	4-126
4-54	ผลการระบายน้ำรายปีด้วยแบบจำลองพีชชีระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม	4-127
4-55	ปริมาณน้ำเก็บกักรายฤดูกาลด้วยแบบจำลองพีชชีระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม	4-130
4-56	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีด้วยแบบจำลองพีชชีระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม	4-131
4-57	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายฤดูกาลด้วยแบบจำลองพีชชีระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม	4-132
4-58	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปีด้วยแบบจำลองพีชชีระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม	4-133
4-59	ประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 1 วันล่วงหน้า	4-153
4-60	ประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 1 วันล่วงหน้า	4-154
4-61	ประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 1 วันล่วงหน้า	4-154
4-62	ประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 1 วันล่วงหน้า	4-155

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4-63	ประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 1 วัน ล่วงหน้า	4-155
4-64	ประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 1 วัน ล่วงหน้า	4-156
4-65	ประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 1 วัน ล่วงหน้า	4-157
4-66	ประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 1 วัน ล่วงหน้า	4-157
4-67	ประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 7 วัน ล่วงหน้า	4-157
4-68	ประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 30 วัน ล่วงหน้า	4-158
4-69	ประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 30 วัน ล่วงหน้า	4-159
4-70	ประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 30 วัน ล่วงหน้า	4-159
4-71	ผลการระบายน้ำรายฤดูกาลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม	4-162
4-72	ผลการระบายน้ำรายปีด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม	4-163
4-73	ปริมาณน้ำเก็บกักรายฤดูกาลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม	4-166
4-74	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม	4-167
4-75	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายฤดูกาลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดระหว่าง ปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม	4-169
4-76	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปีด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม	4-169
4-77	ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยโคงเกณฑ์การ ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่	4-174
4-78	ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการ อ่างเก็บน้ำแบบ Hedging	4-175
4-79	ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองฟิชชี	4-177
4-80	ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการ โปรแกรมเชิงข้อจำกัด	4-179

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-81 ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลในสถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบันและในอนาคต	4-182
4-82 ปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยจากแบบจำลองพีซีซีและแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดแยกตามประเภทปีน้ำ	4-189
ตารางผนวกที่	หน้า
A-1 สถานการณ์น้ำในเขื่อนภูมิพลเมื่อวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2563	A-3
A-2 สถิติข้อมูลฝนจากสถานีโทรมาตรเหนือเขื่อนภูมิพลในปี พ.ศ. 2562-2563	A-5
A-3 ข้อมูลฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนซึ่งนำเข้าไปในแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล	A-10
A-4 สถิติข้อมูลปริมาณ Sideflow จากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง DWCM-AgWU ของสถานี W.4A และ CT.2A ในปี พ.ศ. 2562-2563	A-10
A-5 เปรียบเทียบประสิทธิผลของการพยากรณ์ที่ Lead Time 1-14 วัน หลัง Retraining แบบจำลอง	A-19

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

จากผลการพัฒนาประเทศ การเพิ่มขึ้นของประชากร การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน และการขยายตัวของภาคเกษตรกรรม อุตสาหกรรม และการท่องเที่ยว ส่งผลให้การใช้น้ำในแต่ละกิจกรรมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเป็นลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในลุ่มน้ำเจ้าพระยาและสาขาที่เป็นลุ่มน้ำหลักซึ่งเป็นแหล่งผลิตทางการเกษตรขนาดใหญ่ และเป็นแหล่งที่ตั้งของนิคมอุตสาหกรรม รวมทั้งมีแหล่งท่องเที่ยวที่ทำรายได้ให้กับประเทศจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม ลุ่มน้ำเจ้าพระยาและสาขามีแหล่งเก็บกักน้ำต้นทุนจากเขื่อนหลักซึ่งประกอบด้วยเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ที่สามารถเก็บกักน้ำในช่วงฤดูฝนเพื่อใช้ในช่วงฤดูแล้งได้เท่านั้น ซึ่งนับได้ว่ามีสัดส่วนที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณความต้องการใช้น้ำในพื้นที่ราบลุ่มการเกษตรและโครงการเจ้าพระยา ประกอบกับปัจจัยการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศโลกที่ส่งผลกระทบต่อความไม่แน่นอนและความแปรปรวนที่ค่อนข้างสูงของข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำของเขื่อนหลักเหล่านี้ ส่งผลทำให้เกิดปัญหาการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาทั้งปัญหาอุทกภัยและปัญหาภัยแล้งในปัจจุบัน และมีแนวโน้มที่จะรุนแรงขึ้นในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาอุทกภัยครั้งรุนแรงในปี พ.ศ. 2554 และปัญหาภัยแล้งที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2559 (กรมชลประทาน, 2562)

เขื่อนภูมิพล (Bhumibol Dam) เป็นเขื่อนอเนกประสงค์มีหน้าที่กักเก็บน้ำไว้เพื่อใช้ประโยชน์ด้านการเกษตรกรรม การอุปโภคบริโภค การอุตสาหกรรม และการบรรเทาอุทกภัยเป็นหลัก ส่วนการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นเพียงผลพลอยได้จากการปล่อยน้ำผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามความต้องการใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ ทางด้านทำนน้ำ การบริหารจัดการน้ำของเขื่อนภูมิพลในปัจจุบันอยู่ในความดูแลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) โดยอาศัยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำหรือที่เรียกว่า Rule Curve เป็นเครื่องมือในการกำหนดการจัดสรรน้ำไปใช้ตอบสนองความต้องการน้ำต่าง ๆ ทางตอนล่างของลุ่มน้ำปิง รวมทั้งวัตถุประสงค์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าตามพันธกิจของ กฟผ. เอง (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2559) การระบายน้ำจากเขื่อนจะพยายามควบคุมให้ระดับน้ำอยู่ระหว่างเส้นควบคุมระดับน้ำตอนล่าง (Lower Rule Curve) และเส้นควบคุมระดับน้ำตอนบน (Upper Rule Curve) โดยในช่วงฤดูแล้งจะพยายามระบายไม่ให้ต่ำกว่าระดับ Lower Rule Curve ส่วนในช่วงฤดูฝนจะพยายามระบายน้ำเพื่อไม่ให้สูงกว่าระดับ Upper Rule Curve ด้วยเหตุนี้ Rule Curve จึงเปรียบเสมือนเกณฑ์ที่คอยควบคุมระดับน้ำในเขื่อนให้มีปริมาณเก็บกักที่เหมาะสม เพื่อช่วยบรรเทาอุทกภัยและมีน้ำไว้ใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดตลอดทั้งปี อย่างไรก็ตาม การบริหารจัดการน้ำในเขื่อนให้อยู่ภายในกรอบของ Rule Curve ดังกล่าวนั้น ในทางปฏิบัติอาจมีเหตุที่ทำให้ไม่สามารถบริหารจัดการได้ตามแผนงานปกติ เช่น เหตุการณ์ในปี พ.ศ. 2554 จากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะอากาศ ปริมาณน้ำฝน/น้ำท่าในลุ่มน้ำ ปรากฏการณ์เอลนีโญ/ลานีญา และเกิดมรสุมที่ทำให้เกิดฝนตกหนักมากเป็นประวัติการณ์ ตลอดจนข้อจำกัดในส่วนของพื้นที่ทำนน้ำซึ่งอาจอยู่ระหว่างการเก็บเกี่ยวพืชผล หรือกำลังเกิดปัญหาอุทกภัยในพื้นที่ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้การบริหารจัดการน้ำในเขื่อนจำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนไปจากแนวปฏิบัติที่ใช้กันอยู่เดิม (กฟผ., มปป.) คณะอนุกรรมการติดตามและวิเคราะห์แนวโน้มสถานการณ์น้ำ ซึ่งประกอบด้วย กรมชลประทาน กรมอุตุนิยมวิทยา สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร กรมทรัพยากรน้ำ กรมอุทกศาสตร์ สำนักงานการระบายน้ำ (กรุงเทพมหานคร) กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจึงจำเป็นต้อง

1 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

ตัดสินใจลดการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์เป็นระยะ ๆ เกือบตลอดฤดูฝนตั้งแต่เดือนมิถุนายน-ตุลาคม พ.ศ. 2554 เพื่อบรรเทาผลกระทบให้แก่พื้นที่ซึ่งประสบอุทกภัย ทำให้เกิดเป็นข้อถกเถียงว่าการบริหารจัดการน้ำเขื่อนภูมิพลในช่วงวิกฤต พ.ศ. 2554 มีความเหมาะสมหรือไม่ บ้างก็ว่า ในช่วงต้นเดือนมิถุนายนถึงต้นเดือนสิงหาคมมีการระบายน้ำในเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์น้อยเกินไป เนื่องจากมีความกังวลในความเสี่ยงในการขาดแคลนน้ำ ทำให้เมื่อมีอิทธิพลจากพายุลูกถัดไป ทำให้ต้องทำการระบายน้ำจากเขื่อนทั้ง 2 แห่งเป็นปริมาณมากในช่วงเดือนกันยายนและตุลาคม (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2556)

ในปี พ.ศ. 2521 บริษัทที่ปรึกษาฯ ได้ทำศึกษาการใช้น้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยา-แม่กลองอย่างเป็นระบบด้วยแบบจำลองซึ่งประกอบด้วย แบบจำลองฝนใช้การ แบบจำลองคำนวณหาความต้องการน้ำชลประทานและแบบจำลองระบบลุ่มน้ำ โดยใช้ข้อมูลอุทกวิทยาในอดีตเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 25 ปี ผลการศึกษาปรากฏว่าปริมาณน้ำที่สามารถเก็บกักได้ในอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ มีไม่เพียงพอสำหรับการเพาะปลูกฤดูแล้งบนพื้นที่ชลประทานด้านท้ายอ่างฯ เต็มพื้นที่ทุกปี (ฉลอง, 2557) จากสถิติข้อมูลที่ผ่านมา ปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงเขื่อนภูมิพลมีแนวโน้มที่จะลดลงในอนาคต อันเนื่องมาจากการพัฒนาพื้นที่ในลุ่มน้ำปิงตอนบน ตลอดจนปัจจัยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำที่เก็บกักในเดือนพฤศจิกายนของเขื่อนภูมิพลในรอบ 50 ปี มีอยู่เพียง 45.35% ของปริมาณน้ำที่ใช้การได้ และมีแนวโน้มที่จะลดลงตามไปด้วย จากปัญหาด้านทรัพยากรน้ำที่เกิดขึ้น รัฐบาลจึงมีนโยบายในการแก้ไขปัญหา โดยได้จัดทำแผนการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในอนาคต 20 ปี การจัดทำ Agri-Map เกษตรแปลงใหญ่ และไทยแลนด์ 4.0 เป็นต้น โดยมีเป้าหมายเพื่อแก้ไขปัญหาด้านทรัพยากรน้ำ และการขาดแคลนน้ำของประชาชน โดยได้กำหนดมาตรการในการแก้ไขปัญหา เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการน้ำ การปรับปรุงแบบการปลูกพืชและปลูกพืชใช้น้ำน้อย การปรับปรุงและซ่อมแซมระบบชลประทาน และการฟื้นฟูแหล่งน้ำธรรมชาติ เป็นต้น (กรมชลประทาน, 2562) รวมถึงการเพิ่มปริมาณน้ำต้นทุนให้เขื่อนขนาดใหญ่ เช่น เขื่อนภูมิพล เพื่อการแก้ไขปัญหาในการขาดแคลนน้ำในพื้นที่ตอนล่าง ในอดีตที่ผ่านมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2538 ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มปริมาณน้ำต้นทุนให้เขื่อนภูมิพลหลายครั้งด้วยกัน ครั้งล่าสุด คือ การศึกษาความเหมาะสมและการศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อม การประชาสัมพันธ์และประชาสัมพันธ์โครงการเพิ่มปริมาณน้ำต้นทุนให้เขื่อนภูมิพลโดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ซึ่งแล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2549 (กรมชลประทาน, 2562) แต่ก็เป็นโครงการที่ใช้งบประมาณที่สูงมากและมีปัญหาในหลายด้าน

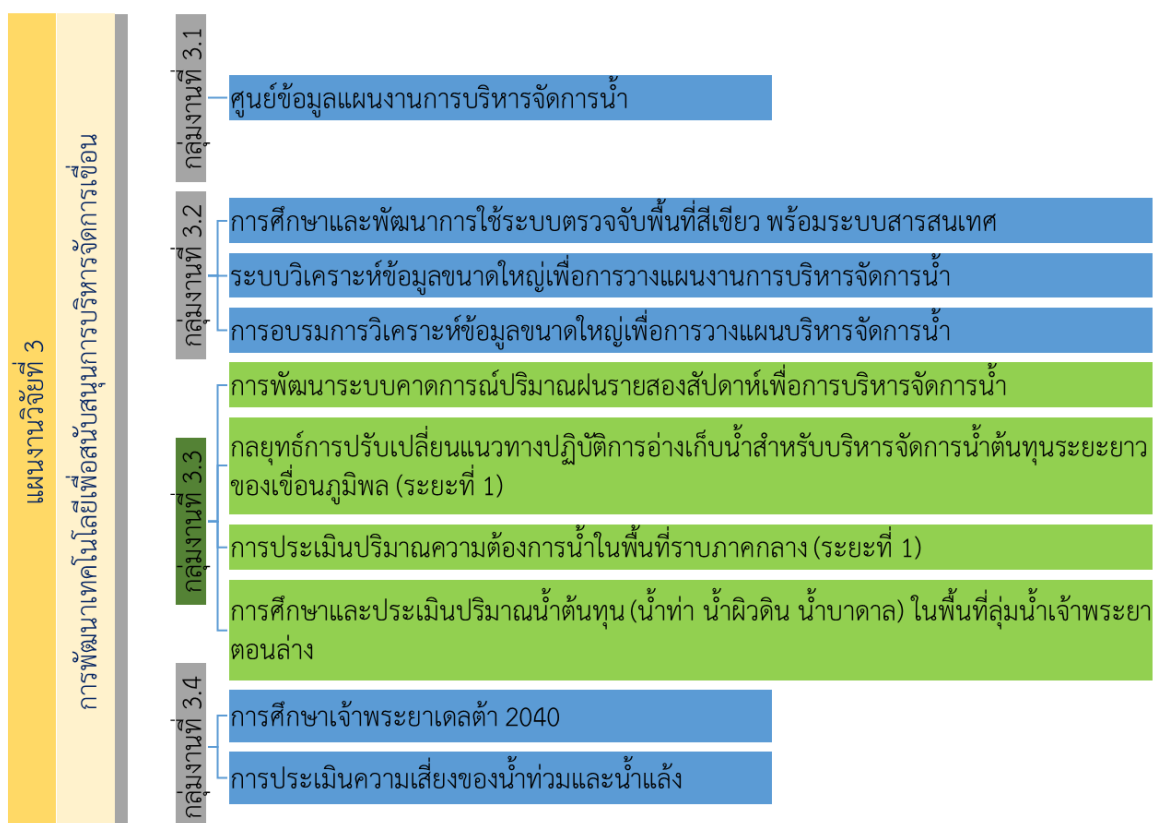
จะเห็นได้ว่า ได้มีความพยายามที่จะแก้ปัญหาการขาดแคลนน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาทั้งมาตรการไม่ใช้สิ่งก่อสร้างที่เน้นการจัดการความต้องการน้ำด้านท้ายน้ำและมาตรการใช้สิ่งก่อสร้างซึ่งเป็นการจัดหาแหล่งน้ำต้นทุนเพิ่ม แต่ยังไม่มีการศึกษาเพื่อจัดการแหล่งน้ำต้นทุน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเป็นการนำเสนอกลยุทธ์ในการปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่หรือที่เรียกว่า “Reservoir Re-Operation” เพื่อการบริหารจัดการแหล่งน้ำต้นทุนในระยะยาว (เขื่อนภูมิพล) เกิดการใช้ต้นทุนอย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่กระทบต่อความต้องการน้ำในกิจกรรมต่าง ๆ ทางด้านท้ายน้ำ และเกิดความยั่งยืนและมั่นคงในอนาคต

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) และ

1 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

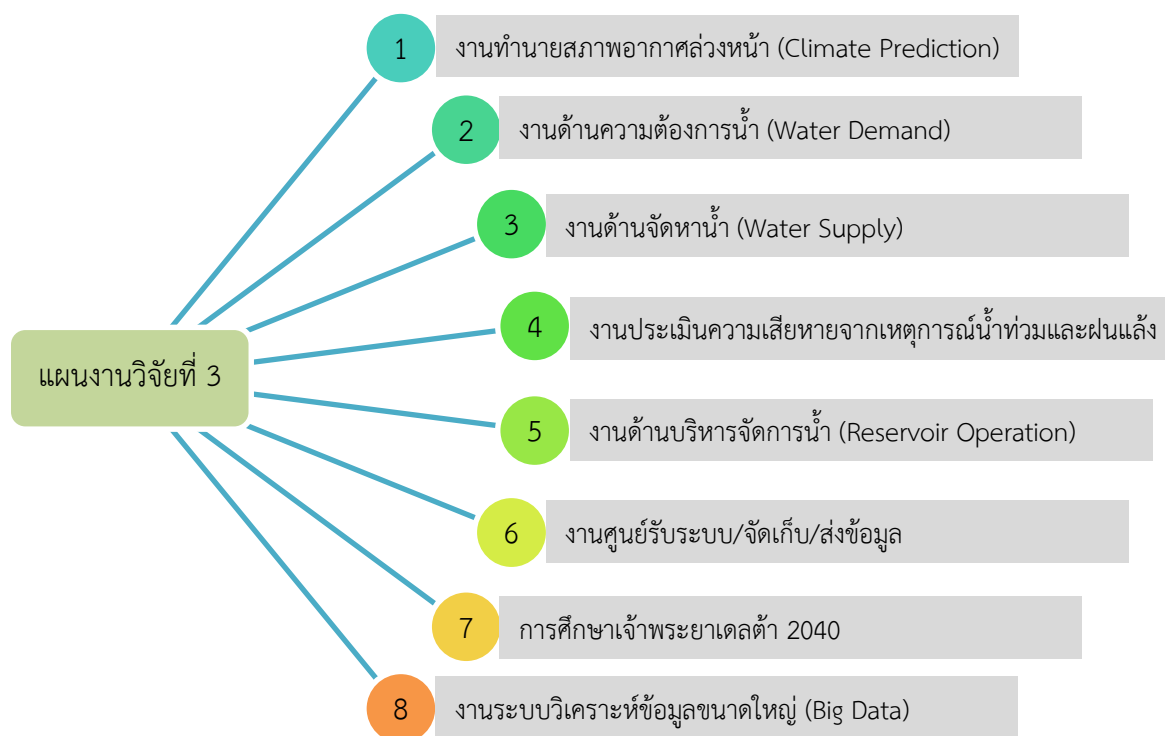
การกำหนดการปล่อยน้ำ (Releasing) ในช่วงเวลาและปริมาณที่เหมาะสมเพื่อสร้างสมดุลระหว่างวัตถุประสงค์ของการใช้น้ำจากอ่างเก็บน้ำ (Pablo Ortiz-Partida et al., 2016; Vonk, 2013) ยกตัวอย่างเช่น การพัฒนาและออกแบบ Operating Rule Curve รูปแบบใหม่ให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถสร้างสมดุลในการจัดสรรน้ำระหว่างวัตถุประสงค์ของการใช้น้ำที่มีความขัดแย้งกัน เช่น การควบคุมน้ำท่วม การอุปโภคบริโภค การเกษตรกรรม และการผลิตพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น

โครงการวิจัยเรื่อง “โครงการกลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)” นี้เป็นหนึ่งในชุดโครงการวิจัยในแผนงานวิจัยที่ 3 การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการเขื่อน ภายใต้แผนงานยุทธศาสตร์ของโครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม การบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562 สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ซึ่งประกอบไปด้วย 4 กลุ่มงานหลัก จำนวน 8 งานวิจัยหลัก ได้แก่ (1) งานทำนายสภาพอากาศล่วงหน้า (Climate Prediction) (2) งานความต้องการน้ำ (Water Demand) (3) งานด้านจัดหาหน้า (Water Supply) (4) งานประเมินความเสี่ยงจากเหตุการณ์น้ำท่วมและฝนแล้ง (5) งานด้านบริหารจัดการน้ำ (Reservoir Operation) (6) งานศูนย์รับระบบ/จัดเก็บ/ส่งข้อมูล (7) การศึกษาเจ้าพระยาเดลต้า 2040 และ (8) งานระบบวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) โดยรายละเอียดของกลุ่มงานในแผนงานวิจัยที่ 3 และการเชื่อมโยงงานวิจัยระหว่างโครงการในแผนงานได้แสดงในรูปที่ 1-1 ถึงรูปที่ 1-4



รูปที่ 1-1 กลุ่มงานภายใต้แผนงานวิจัยที่ 3 จำนวน 4 กลุ่มงานหลัก

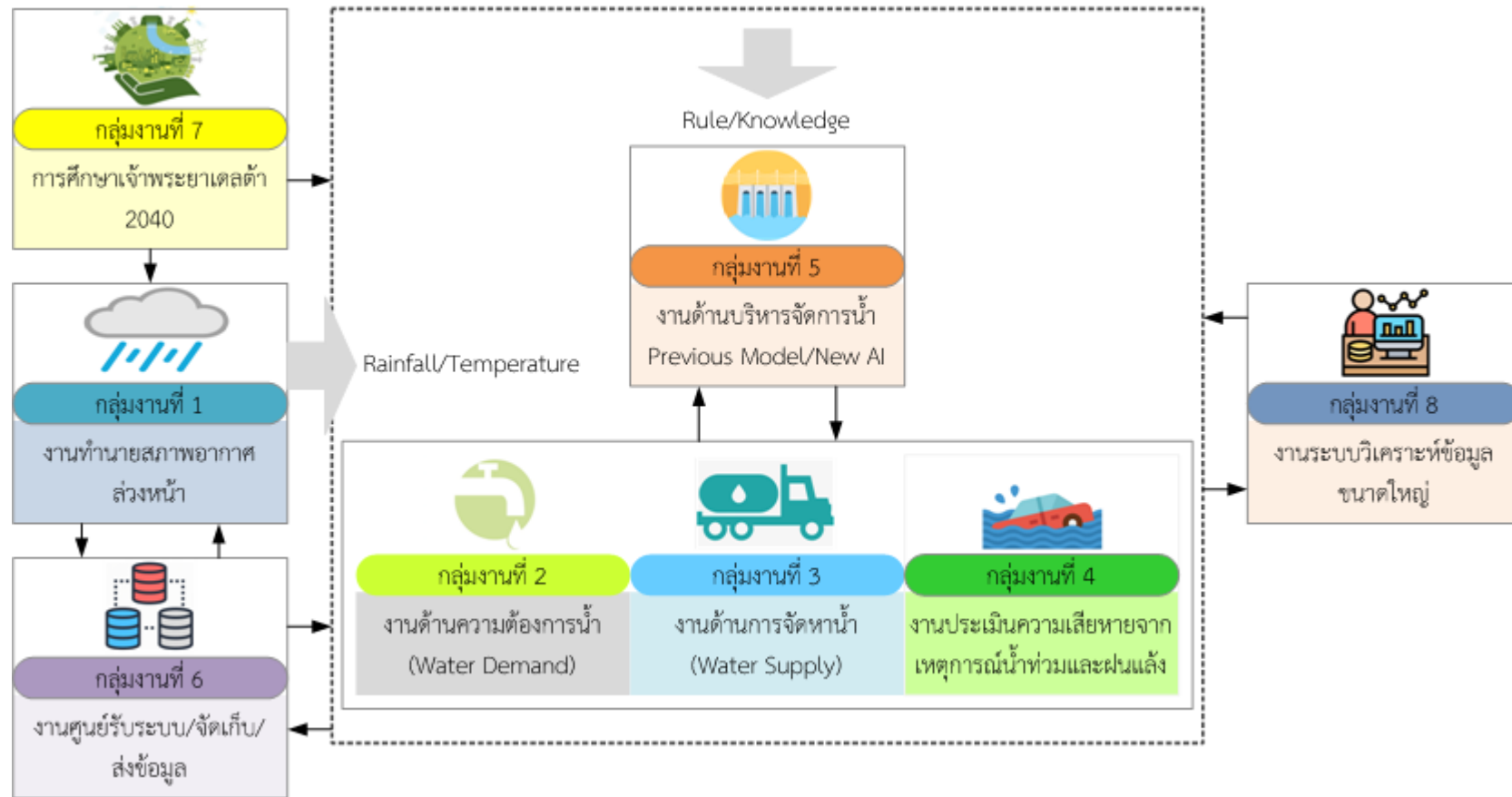
1 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562



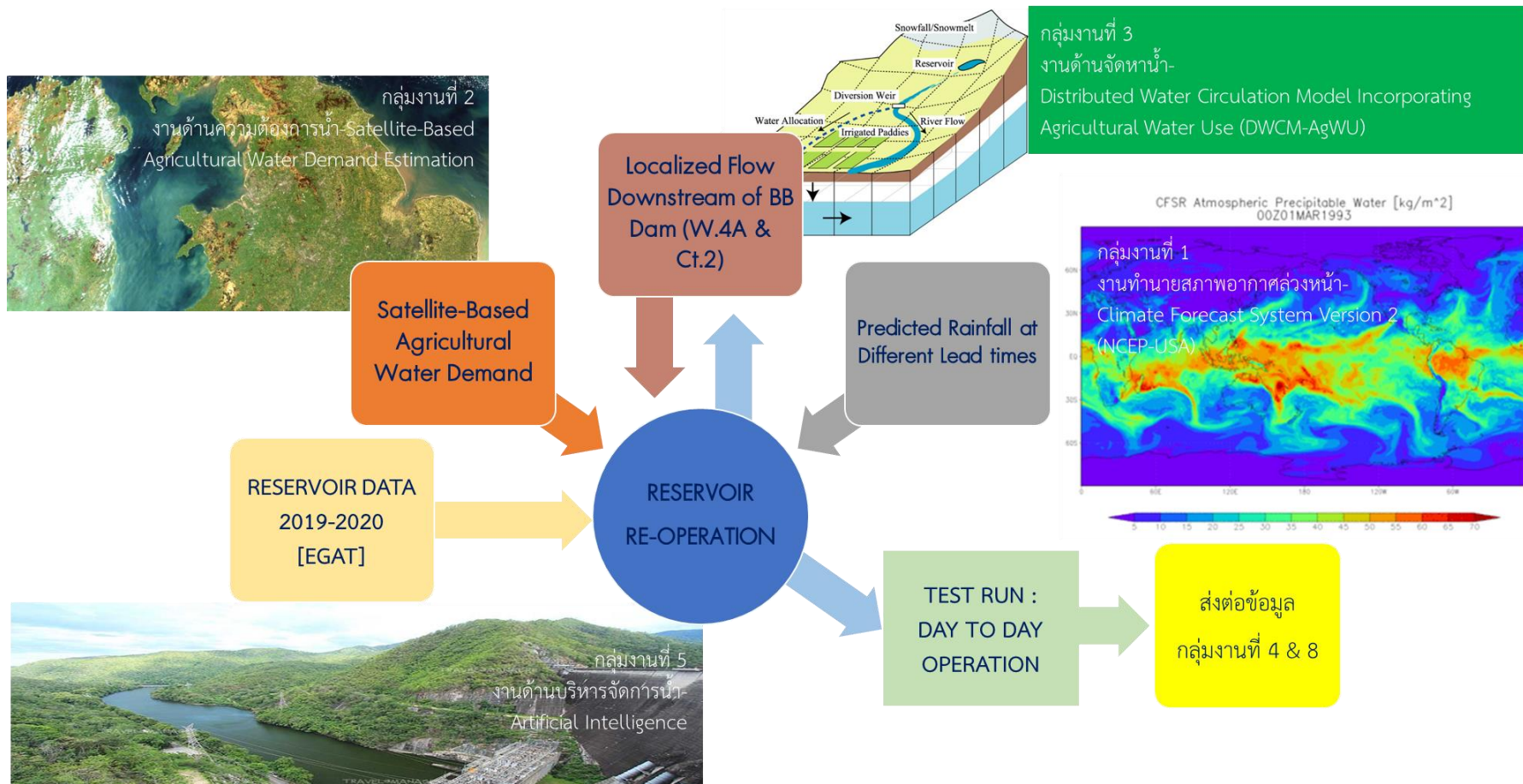
รูปที่ 1-2 งานวิจัยหลักภายใต้แผนงานวิจัยที่ 3

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เล่มนี้ได้บรรจุเนื้อหาของผลการศึกษาใน 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ 1 รายงานผลการศึกษาของโครงการวิจัยเรื่อง “โครงการกลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)” โดยแสดงรายละเอียดของผลการศึกษาไว้ในบทที่ 1-5 และส่วนที่ 2 รายงานผลการศึกษา CO-RUN ในภาพผนวก A ที่มีการเชื่อมโยงข้อมูลนำเข้าและข้อมูลผลลัพธ์ระหว่างโครงการวิจัยในกลุ่มงานวิจัยที่ 3.3 งานวิจัยที่ 1, 2, 3 และ 5 เพื่อนำไปสู่การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่อย่างเป็นระบบบนพื้นฐานของการบูรณาการงานวิจัยในแผนงานที่ 3 ร่วมกัน กล่าวคือ ข้อมูลฝนพยากรณ์ล่วงหน้า (Forecasted Rainfall) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของงานวิจัยที่ 1 ข้อมูลความต้องการน้ำคาดการณ์ล่วงหน้า (Forecasted Water Demand) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของงานวิจัยที่ 2 และข้อมูลปริมาณ Sideflow/Localized Flow ที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการไหลเวียนของน้ำแบบกระจายตัวที่ผสมผสานกับการใช้น้ำเพื่อการเกษตรกรรม (Distributed Water Circulation Model Incorporating Agricultural Water Use, DWCM-AgWU) ของงานวิจัยที่ 3 จะถูกใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่อาศัยหลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence-AI) เพื่อกำหนดรูปแบบการระบายน้ำที่เหมาะสมของเขื่อนภูมิพลในงานวิจัยที่ 5 หลังจากนั้นผลลัพธ์จากการระบายน้ำที่ได้จากแบบจำลองจะถูกใช้เป็นข้อมูลนำเข้าส่งต่อให้งานวิจัยที่ 3 อีกครั้งเพื่อจำลองและประมาณการปริมาณน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าหลักต่าง ๆ ในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ด้วยแบบจำลอง DWCM-AgWU นอกจากนี้ ข้อมูลปริมาณการระบายน้ำซึ่งเป็นผลลัพธ์ของงานวิจัยที่ 5 จะส่งต่อให้เพื่อเป็นข้อมูลนำเข้าของกลุ่มงานที่ 4 สำหรับนำไปประเมินความเสียหายจากเหตุการณ์น้ำท่วมและฝนแล้งจากผลกระทบของการระบายน้ำข้างต้น รวมทั้งยังส่งต่อข้อมูลผลลัพธ์ให้งานวิจัยที่ 8 เพื่อนำไปจัดเตรียมระบบวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) ในพื้นที่ศึกษาอย่างเป็นระบบต่อไป ดังแสดงการเชื่อมโยงในรูปที่ 1-3

1 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเข็มมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562



รูปที่ 1-3 การเชื่อมโยงงานวิจัยของแผนงานวิจัยที่ 3 การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการเขื่อน



รูปที่ 1-4 การเชื่อมโยงข้อมูลนำเข้าและข้อมูลผลลัพธ์ระหว่างโครงการวิจัยในแผนงานวิจัยที่ 3

1.2 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยเรื่อง “โครงการกลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)” มีดังนี้

1.2.1 ศึกษาและวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของข้อมูลน้ำต้นทุนและข้อมูลความต้องการน้ำ (Water Supply and Water Demand Dynamics) โดยครอบคลุม 2 ประเด็น คือ (1) ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกและการพัฒนาทางเศรษฐกิจ-สังคมที่มีต่อฐานข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ (Climate Change Impact on Hydrology) และ (2) ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลความต้องการน้ำ (Water Demand) สำหรับนำมาใช้กำหนดแนวทางการจัดสรรน้ำจากอ่างเก็บน้ำเพื่อเพิ่มปริมาณต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล

1.2.2 ศึกษาและวิเคราะห์แนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลในปัจจุบัน (Current Reservoir Operation) และพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำโดยอาศัยกล่องเครื่องมือ MATLAB Simulink Toolbox

1.2.3 พัฒนากลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ (Reservoir Re-Operation) เพื่อบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล 4 แนวทาง ด้วยเทคนิคการจำลองระบบ (Simulation Technique) และเทคนิคการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization Technique) โดยอาศัยหลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence-AI) ได้แก่ (1) โค้ดเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับเปลี่ยน (Adapted Rule Curve) (2) เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging (Hedging Rule) (3) แบบจำลองฟัซซี่ลอจิก (Conventional Fuzzy Model) และแบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟัซซี่แบบปรับตัวได้ และเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model with Reinforcement Learning) และ (4) แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Constraint Programming and Machine Learning)

1.2.4 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิผลของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในปัจจุบัน (Performance of Conventional Operation) และประสิทธิผลที่ได้จากกลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำใหม่ (Performance and Effectiveness of Reservoir Re-Operation)

1.3 แผนการดำเนินการ

แผนการดำเนินงานวิจัยครอบคลุมระยะเวลา 1 ปี ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2562-สิงหาคม พ.ศ. 2563 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1-1

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

เป้าหมายสูงสุดของโครงการวิจัยนี้เพื่อเสนอแนะกลยุทธ์ในการปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่อาศัยองค์ความรู้ที่ทันสมัยทางด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence-AI) ผนวกกับการพิจารณาผลกระทบจากปัจจัยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกที่ส่งผลต่อฐานข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำในอนาคตสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพลจากแนวทางปฏิบัติที่ใช้กันอยู่เดิมให้แก่หน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย กรมชลประทาน สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ และหน่วยงานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยองค์ความรู้ดังกล่าวนี้จะช่วยเพิ่มความเชื่อมั่นในกระบวนการตัดสินใจปล่อยน้ำโดยเฉพาะในสภาวะวิกฤตแก่ผู้ปฏิบัติงาน และการดำเนินงานภายใต้เป้าหมายที่จะเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในระยะยาวให้สูงขึ้น 15% จากฐานข้อมูลปัจจุบันเพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนน้ำแก่เกษตรกรและกลุ่มผู้ใช้น้ำในกลุ่มน้ำปิงตอนล่างและลุ่มเจ้าพระยาซึ่งครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่กว่า 10 ล้านไร่

1 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเขื่อนภูมิพล ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

นอกจากนี้ ในมุมมองด้านวิชาการแล้ว การนำเทคนิคการจำลองระบบ (Simulation Technique) ร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization Technique) โดยอาศัยหลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning) มาใช้ในการพัฒนากลยุทธ์ในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Re-Operation) นั้น นับได้ว่าเป็นองค์ความรู้ที่ทันสมัยและสามารถปรับปรุงกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพในการแก้โจทย์ปัญหาจริงที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางและเผยแพร่ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในระดับนานาชาติจากกรณีศึกษาต่าง ๆ ทั่วโลก

ตารางที่ 1-1 แผนการดำเนินงานวิจัยและผลการดำเนินงานจริง

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินงาน (เดือน)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12-14
วัตถุประสงค์ที่ 1 : ศึกษาและวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของข้อมูลน้ำต้นทุนและข้อมูลความต้องการน้ำ (Water Supply and Water Demand Dynamics) โดยครอบคลุม 2 ประเด็นคือ (1) ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกและการพัฒนาทางเศรษฐกิจ-สังคมที่มีต่อฐานข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ (Climate Change Impact on Hydrology) และ (2) ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลความต้องการน้ำ (Water Demand) สำหรับนำมาใช้กำหนดแนวทางการจัดสรรน้ำจากอ่างเก็บน้ำเพื่อเพิ่มปริมาณต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล												
ประเด็นที่ 1 : ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกและการพัฒนาทางเศรษฐกิจ-สังคมที่มีต่อฐานข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ (Climate Change Impact on Hydrology)												
1. รวบรวมข้อมูลอุตุ-อุทกวิทยารายวันจากสถานีตรวจวัด รวมทั้งข้อมูลภูมิศาสตร์ของพื้นที่ แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน ลักษณะของดิน โดยครอบคลุมสถานีตรวจวัดเหนือเขื่อนภูมิพลและท้ายเขื่อนภูมิพล												
2. รวบรวมข้อมูลผลการพยากรณ์อุตุวิทยารายวันในอนาคตจากฐานข้อมูล SEALCLID/CORDEX-SEA												
3. ประยุกต์ใช้สมการของ Hamon (Hamon, 1961), Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) และ Hargreaves (Hargreaves et al., 1985) และข้อมูลอัตราการระเหยจากภาควัดการระเหย (Evaporation Pan)												
4. ประยุกต์ใช้แบบจำลองฝน-น้ำท่า (MIKE11 NAM Model) เพื่อสังเคราะห์ชุดข้อมูลปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำภายใต้สถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไปในอนาคต												
5. พยากรณ์ความต้องการน้ำในอนาคต												
ประเด็นที่ 2 : ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลความต้องการน้ำ (Water Demand)												
1. รวบรวมข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ข้อมูลฝน ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูก ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ และข้อมูลหัตถุภูมิอื่น ๆ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลประกอบในการสอบเทียบผลการประมาณการความต้องการน้ำในพื้นที่ศึกษา												
2. ประยุกต์ใช้ Cloud Based IriSAT App ในการประมาณการความต้องการน้ำของพืชรายวัน (Daily Crop Water Use) ในพื้นที่โครงการชลประทานของกลุ่มน้ำปิงตอนล่างและกลุ่มเจ้าพระยาตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน												



กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินงาน (เดือน)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12-14
และคาดการณ์ความต้องการน้ำของพืชรายวันล่วงหน้า 7 วัน (Forecasted Crop Water Use) เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้าในแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ												
3. ทำการวิเคราะห์ความต้องการน้ำของพืชรายวัน (Daily Crop Water Use) สมดุลการขาดน้ำรายวัน (Daily Deficit Water Balance) และการเจริญเติบโตของพืช (Crop Growth) จากผลลัพธ์ที่ได้จาก Cloud Based IrriSAT App โดยนำเข้าข้อมูลน้ำเพื่อการชลประทาน (Irrigation Data) และข้อมูลฝน (Rainfall Data) ในพื้นที่ศึกษา และเปรียบเทียบกับรายงานผลการศึกษาต่าง ๆ ที่ผ่านมา												
4. รวบรวมข้อมูลประชากรในพื้นที่ศึกษาจากอดีตถึงปัจจุบัน และข้อมูลอัตราการใช้น้ำของประชากรจากการตรวจเอกสาร												
5. จัดแบ่งลักษณะชุมชนในพื้นที่ศึกษาออกเป็น 2 ลักษณะ คือ (1) ชุมชนในเขตเมือง และ (2) ชุมชนในชนบท												
6. คาดการณ์การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรในอนาคตในพื้นที่ศึกษาตามลักษณะชุมชนโดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ทางสถิติ												
7. ประมาณการความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคในปัจจุบันและอนาคตตามลักษณะชุมชน												
8. รวบรวมข้อมูลโรงงานอุตสาหกรรม สถิตินักท่องเที่ยว และข้อมูลที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ												
9. คาดการณ์การเพิ่มขึ้นของจำนวนสถิตินักท่องเที่ยวในอนาคตในพื้นที่ศึกษา												
10. ประมาณการความต้องการเพื่อการอุตสาหกรรม การกีฬาและท่องเที่ยวในปัจจุบันและอนาคต												
11. ศึกษาเปรียบเทียบปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค การอุตสาหกรรม การกีฬาและท่องเที่ยว กับรายงานผลการศึกษาที่ผ่านมาในพื้นที่ศึกษา												

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินงาน (เดือน)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12-14
วัตถุประสงค์ที่ 2 : ศึกษาและวิเคราะห์แนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลในปัจจุบัน (Current Reservoir Operation) และพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำโดยอาศัยกล่องเครื่องมือ MATLAB Simulink Toolbox												
1. รวบรวมข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลรายวัน ได้แก่ ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง ปริมาณการระเหยของน้ำ ปริมาณน้ำเก็บกัก ปริมาณการปล่อยน้ำ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ และข้อมูลอื่น ๆ และจัดประชุมแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับ กฟผ. และกรมชลประทาน												
2. ศึกษาและทบทวนข้อมูลปริมาณการปล่อยน้ำ ข้อมูลความต้องการน้ำ โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่ปรับปรุงล่าสุดของเขื่อนภูมิพลในปัจจุบัน รวมทั้งวิเคราะห์แนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลด้วยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำในอดีตถึงปัจจุบัน ตลอดจนประเมินประสิทธิผลของการปฏิบัติงานในการตอบสนองความต้องการน้ำทุกกิจกรรมการใช้น้ำทางตอนล่าง และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้												
3. วิเคราะห์แนวทางการจัดสรรน้ำร่วมกันระหว่างเขื่อนภูมิพลและ 3 เขื่อนหลัก ได้แก่ เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ที่บริหารจัดการน้ำร่วมกันเป็นระบบในลักษณะของอ่างพวงโดยมีโหนดความต้องการน้ำเดียวกัน												
4. พัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลโดยอาศัยชุดโปรแกรม MATLAB												
5. ทำการจำลองผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในระยะยาวด้วยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ระยะยาวในสถานการณ์ปัจจุบัน												
6. จัดประชุมแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับผู้เชี่ยวชาญชาวต่างประเทศครั้งที่ 1 และลงพื้นที่สำรวจข้อมูลภาคสนาม												
วัตถุประสงค์ที่ 3 : พัฒนากลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ (Reservoir Re-Operation) เพื่อบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล 4 แนวทาง ด้วยเทคนิคการจำลองระบบ (Simulation Technique) และเทคนิคการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization Technique) โดยอาศัยหลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence-AI)												
แนวทางที่ 1 โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่ (Adapted Rule Curve)												

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินงาน (เดือน)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12-14
1. นำเข้าข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ 2 ประเภท คือ (1) ข้อมูลอุทกวิทยาตรวจวัดในปัจจุบัน และ (2) ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำสังเคราะห์ในอนาคตจากปัจจัยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกและการพัฒนาทางเศรษฐกิจ-สังคมที่มีต่อฐานข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ												
2. พัฒนาโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Adapted Rule Curve) ใหม่และนำเข้าไปในแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลที่พัฒนามาข้างต้น และนำเสนอแนวคิดการบริหารจัดการความต้องการน้ำท้ายเขื่อนเพื่อใช้ร่วมกำหนดแนวทางการปล่อยน้ำจากอ่างเก็บน้ำเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำ												
3. ทำการจำลองผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำระยะยาวในสถานการณ์ปัจจุบันและสถานการณ์ในอนาคต												
แนวทางที่ 2 เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging (Hedging Rule)												
1. นำเข้าข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ 2 ประเภท คือ (1) ข้อมูลอุทกวิทยาตรวจวัดในปัจจุบัน และ (2) ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำสังเคราะห์ในอนาคตจากปัจจัยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกและการพัฒนาทางเศรษฐกิจ-สังคมที่มีต่อฐานข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ												
2. นำเสนอเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging ในรูปแบบต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการจัดการปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำซึ่งเป็นแนวคิดที่พยายามลดการส่งน้ำในบางช่วงเวลาเพื่อเก็บกักน้ำไว้ในช่วงเวลาถัดไป แม้ว่าปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่ในอ่างจะสามารถตอบสนองต่อปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายได้อย่างเต็มศักยภาพก็ตาม เช่น One-Point Hedging, Two-Point Hedging, Three-Point Hedging, Continuous Hedging และ Multiple/Zone-Based Hedging Hedging เป็นต้น												
3. ทำการจำลองผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำระยะยาวในสถานการณ์ปัจจุบันและสถานการณ์ในอนาคต												
แนวทางที่ 3 แบบจำลองฟัซซี่ (Conventional Fuzzy Model) และแบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิเวโรฟัซซี่แบบปรับตัวได้และเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Adaptive												

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินงาน (เดือน)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12-14
Neuro Fuzzy Optimization Model with Reinforcement Learning)												
1. นำเข้าข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ 2 ประเภท คือ (1) ข้อมูลอุทกวิทยาตรวจวัดในปัจจุบัน และ (2) ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำสังเคราะห์ในอนาคตจากปัจจัยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกและการพัฒนาทางเศรษฐกิจ-สังคมที่มีต่อฐานข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ												
2. ประยุกต์ใช้แบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลที่พัฒนามาข้างต้น และพัฒนาชุดคำสั่ง (Source Code) แบบ M-file ร่วมกับชุดคำสั่งแบบ Block Diagram ด้วย MATLAB/Simulink เพื่อเพิ่มกระบวนการตัดสินใจปล่อยน้ำ (Reservoir Decision Making Processes) ซึ่งแสดงกระบวนการตัดสินใจในการระบายน้ำในอ่างเก็บน้ำลงท้ายน้ำเพื่อตอบสนองต่อกิจกรรมการใช้น้ำต่าง ๆ												
3. ทำการจำลองผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำระยะยาวในสถานการณ์ปัจจุบันและสถานการณ์ในอนาคต												
แนวทางที่ 4 แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Constraint Programming and Machine Learning)												
1. นำเข้าข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ 2 ประเภท คือ (1) ข้อมูลอุทกวิทยาตรวจวัดในปัจจุบัน และ (2) ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำสังเคราะห์ในอนาคตจากปัจจัยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกและการพัฒนาทางเศรษฐกิจ-สังคมที่มีต่อฐานข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ												
2. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าปริมาณการปล่อยน้ำที่ดีที่สุดของเขื่อนภูมิพลด้วยเทคนิคการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง												
3. ทำการจำลองผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำระยะยาวในสถานการณ์ปัจจุบันและสถานการณ์ในอนาคต												
4. จัดประชุมแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับผู้เชี่ยวชาญชาวต่างประเทศครั้งที่ 2												
วัตถุประสงค์ที่ 4 : ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในปัจจุบัน (Performance of Conventional Operation) และประสิทธิภาพที่ได้จากกลยุทธ์การ												

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินงาน (เดือน)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12-14
ปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำใหม่ (Performance and Effectiveness of Reservoir Re-Operation)												
1. ศึกษาเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลโดยการนำเข้าสู่ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำในปัจจุบัน และจากการปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำใหม่ 4 แนวทาง ในรูปของประสิทธิผลในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ และดัชนีแสดงผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการปรับเปลี่ยนแนวทางการบริหารจัดการน้ำต้นทุนของเขื่อนภูมิพลในอนาคต												
2. ศึกษาเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลจากการปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำใหม่ 4 แนวทาง ร่วมกับนำเข้าสู่ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำในอนาคตจาก ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกและการพัฒนาทางเศรษฐกิจ-สังคม ที่มีต่อฐานข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ ในรูปของประสิทธิผลในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ และดัชนีแสดงผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ เพื่อวิเคราะห์สถานการณ์การบริหารจัดการน้ำต้นทุนของเขื่อนภูมิพลในอนาคต												
3. จัดทำรายงานความก้าวหน้าและรายงานฉบับสมบูรณ์												
4. แผนการจัดฝึกอบรมเพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้และเทคโนโลยีจำนวน 2 แผนงาน												

หมายเหตุ :  แผนการดำเนินงาน  ผลการดำเนินงานจริง

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

2.1 หลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ในงานบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ

หลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ได้รับความนิยมน้อยมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานด้านการพยากรณ์ข้อมูลทางด้านทรัพยากรน้ำในปัจจุบันแทนที่แบบจำลองทางกายภาพ (Physical Model) และแบบจำลองทางสถิติ (Statistical Model) ที่ใช้กันอยู่เดิม เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่สามารถดำเนินการและประเมินผลได้ง่ายและเร็วทั้งในส่วนของการปรับเทียบแบบจำลองและการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง และยังสามารถพัฒนาขึ้นมาโดยอาศัยข้อมูลนำเข้าน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าให้ค่าประสิทธิผลในการพยากรณ์สูงกว่าและมีความซับซ้อนน้อยกว่าแบบจำลองกายภาพทั่วไป ปัจจุบันได้มีการนำอัลกอริทึมในด้านการเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning) มาประยุกต์ใช้เพื่อการคำนวณตัวแปรต่าง ๆ ทางอุทกวิทยา (Hydrological Parameters) เช่น ระดับน้ำในเขื่อนและปริมาณน้ำไหลเข้าในอดีตเพื่อคำนวณระดับน้ำในเขื่อนในช่วงเวลาข้างหน้า ซึ่งถูกรายงานว่าให้ค่าประสิทธิผลที่ค่อนข้างสูงในการพยากรณ์ทั้งระยะสั้นและระยะยาว (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 & Noureldin, 2011; Valipour, Banihabib, & Behbahani, 2013) การพยากรณ์ปริมาณน้ำฝน เป็นต้น

(2) เทคนิคอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS) (Jang, 1993) เป็นการผสมผสานระหว่างโครงข่ายประสาทประดิษฐ์และระบบฟัซซีลอจิก (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 ตัวอย่างการนำไปใช้ในงานวิจัยเช่น 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) นับเป็นเทคนิคที่เริ่มได้รับความนิยมมากขึ้นเนื่องจากมีความแม่นยำมากเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ เทคนิคนี้เป็นการหา Hyperplane ที่แบ่งข้อมูลที่

ที่ดีที่สุด 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

ผลงานวิจัยส่วนใหญ่ไม่ได้อาศัยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่องเพียงเทคนิคเดียว 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 สูงสุดที่จำเป็นจะต้องลดหรือควบคุมให้เกิดการการสูญเสียจากอ่างเก็บน้ำน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ หรือในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับวัตถุประสงค์เพื่อการ

ชลประทาน ผู้ปฏิบัติการอาจปล่อยน้ำเพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดการขาดน้ำรุนแรงกับพืชบางชนิดและยอมให้เกิดความเสี่ยงที่จะเกิดการขาดน้ำกับพืชที่จะปลูกในอนาคต เป็นต้น อ่างเก็บน้ำจำนวนมากยังออกแบบขึ้นมาเพื่อเก็บกักน้ำไว้ในหลาย 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) และยังมีผลทำให้ในเชิงของผลลัพธ์การคำนวณที่ยังอยู่ภายใต้สภาวะที่มีความไม่แน่นอน 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) โดยเฉพาะการนำเอาหลักของฟัซซี่ลอจิก (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 ในกรณีนี้ Mahootchi et al. (2006) และ Wenwu et al. (2018) ได้ประยุกต์ RL ในการประมาณค่าที่ดีที่สุดในการบริหารจัดการน้ำโดยกำหนดปริมาตรน้ำในอ่างเก็บน้ำแทน 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 โปรแกรมเชิงข้อจำกัดสามารถรองรับและแก้ปัญหาค่าได้หลายรูปแบบ 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 การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (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 งานวิจัยเชิงนโยบายปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Chang, Chen, & Chang, 2005; Jamshid Mousavi, Anzab, Asl-Rousta, & Kim, 2017; Kangrang & Chaleerakratoon, 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) ได้รับความนิยมน้อยมากในการศึกษาและวิจัยในหลากหลายสาขาวิชา รวมถึงในงานด้านทรัพยากรน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่มีการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์และอาศัยเทคนิคการจำลองระบบเพื่อทดสอบการปฏิบัติการตามแผนกลยุทธ์ต่าง ๆ สำหรับนำมาปรับใช้และเพิ่มประสิทธิภาพของการปฏิบัติงานจริงให้ดียิ่งขึ้น โดยทั่วไปแบบจำลองระบบที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำนั้นจะอาศัยหลักการสมดุลของน้ำในอ่างซึ่งประกอบไปด้วยการคำนวณปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างสุทธิ ปริมาณน้ำที่ปล่อยออกจากอ่างสุทธิ และการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำเก็บกัก นอกจากนี้อาจเกี่ยวข้องกับการประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์อันเนื่องมาจากความเสียหายจากน้ำท่วม ผลประโยชน์ที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำ ผลประโยชน์จากการชลประทาน และอื่น ๆ เป็นต้น อาจกล่าวได้ว่าแนวคิดเรื่องการจำลองระบบค่อนข้างง่ายในการทำความเข้าใจมากกว่าแนวคิดของแบบจำลองอื่น ๆ แบบจำลองระบบสามารถเลียนแบบได้ค่อนข้างเหมือนจริงทั้งในแง่ลักษณะของระบบอ่างเก็บน้ำ ตลอดจนแนวทางในการปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังมีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนตัวแปรที่เกี่ยวข้องอีกด้วย ในขณะที่เดียวกันเวลาในการเตรียมข้อมูลป้อนเข้า ทดสอบแบบจำลอง และการคำนวณอื่น ๆ ยังน้อยกว่าของแบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุด ยิ่งไปกว่านั้นผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองยังสามารถ Trade-Off โดยเฉพาะอย่างยิ่งอ่างเก็บน้ำแบบอเนกวัตถุประสงค์ รวมถึงเทคนิคการจำลองระบบยังมีประโยชน์ในการวิเคราะห์หานโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่ดีที่สุดอีกด้วย นอกจากนี้ในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่เวลาจริงปัจจุบัน (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 นอกจากนี้ยังมีแบบจำลองอื่น 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 Ferriera ได้ทำการศึกษาระบบอ่างเก็บน้ำในแม่น้ำ Missouri และพบว่าแบบจำลองระบบใช้ได้ดีกว่าสมการการถดถอยในการกำหนดและปรับปรุงเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ นอกจากนี้ Jain และ Goel ในปี ค.ศ. 1996 ยังได้นำเสนอแบบจำลองเพื่อการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเพื่อการอนุรักษ์ทั้งระบบโดยอาศัยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ อย่างไรก็ตามถึงแม้จะมีแบบจำลองเพื่อจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำทั้งระบบจำนวนมาก ความต้องการที่จะพัฒนาแบบจำลองระบบอ่างเก็บน้ำของแต่ละอ่างยังเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อคงไว้ซึ่งลักษณะเฉพาะของอ่างเก็บน้ำนั้น ๆ

แบบจำลองระบบอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่าง (Multireservoir Simulation Models) ซึ่งพัฒนาขึ้นเพื่อประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นจากนโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบต่าง ๆ นั้นนับได้ว่ามีประโยชน์อย่างมากหากนำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลทั้งหมดมาศึกษาเพื่อเปรียบเทียบและประเมินผลที่ได้ซึ่งสามารถทำได้โดยการคำนวณหาค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าความแปรปรวน (Variance) ตลอดจนการกระจายตัวทางด้าน

เวลา (Time Distribution) ของดัชนีแสดงผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Performance Indicators) เช่น ปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Storage Volume) ปริมาณน้ำที่ปล่อย (Release) ผลประโยชน์ที่ได้รับ (Associated Benefit) หรือความเสียหายที่เกิดขึ้น (Losses) เป็นต้น ซึ่งดัชนีชี้วัดเหล่านี้สามารถนำมาใช้เพื่อประเมินผลและเปรียบเทียบนโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้การประเมินผลอาจปรากฏอยู่ในรูปของค่าดัชนีความน่าเชื่อถือได้ (Reliability Index) ดัชนีวัดความรุนแรง (Vulnerability Index) และดัชนีวัดความฟื้นตัวจากความล้มเหลว (Resiliency Index) เป็นต้น อาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองระบบของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำนั้นเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการประเมินผลกระทบที่จะเป็นไปได้ของนโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบต่าง ๆ ตลอดจนสามารถทำนายสถานภาพของระบบในอนาคต เมื่อกำหนดสถานการณ์สมมติ (Scenarios) ทั้งในรูปของนโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ และผลการคาดการณ์ข้อมูลทางอุทกวิทยาในอนาคต

2.4 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกต่อข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเริ่มมีการศึกษาและรวบรวมอย่างเป็นระบบโดย Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ตั้งแต่ พ.ศ. 2533 เป็นต้นมา โดยมีแบบจำลองภูมิอากาศโลก (General Circulation Model, GCM) เป็นเครื่องมือสำคัญในการศึกษาและนำไปสู่ข้อสรุปว่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมของมนุษย์เป็นสาเหตุสำคัญของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ไม่เป็นไปตามวงจรปกติของธรรมชาติในปัจจุบัน ซึ่งจะเห็นได้จากค่าเฉลี่ยอุณหภูมิบนพื้นดินและมหาสมุทรของโลกที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ พ.ศ. 2493 อย่างไรก็ตาม ในส่วนของการเปลี่ยนค่าเฉลี่ยรายปีของฝนที่ผ่านมา ยังไม่พบแนวโน้มที่ชัดเจนอันเนื่องมาจากความซับซ้อนของเหตุการณ์การเกิดเอลนีโญ (*El nino*) และลานีญา (*La nina*) (IPCC, 2013; IPCC, 2018) สำหรับประเทศไทยนั้นพบว่า อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดเฉลี่ยรายปีระหว่าง พ.ศ. 2494–2551 มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ตรงกันข้ามกับปริมาณฝนรายปีที่มีแนวโน้มลดลงในช่วงเวลาเดียวกัน Limsakul และ Singhruck (2016) ได้ศึกษาดัชนีสถานะสุดขีดของฝนในประเทศไทยในช่วง พ.ศ. 2498–2557 และพบว่า ดัชนีจำนวนฝนตกรายปี (Annual Rainy Days) และดัชนีระยะเวลาฝนตกต่อเนื่อง (Consecutive Wet Days) มีการเปลี่ยนแปลง -0.99 วันต่อทศวรรษ และ -0.27 วันต่อทศวรรษ ตามลำดับ ถึงแม้ว่าดัชนีความรุนแรงของฝนอย่างง่าย (Simple Daily Intensity Index) และดัชนีปริมาณฝนรวมจากเหตุการณ์ฝนตกหนัก (Contribution from Very Wet Days) มีการเปลี่ยนแปลง $+0.17$ มิลลิเมตรต่อทศวรรษ และ $+11.90$ มิลลิเมตรต่อทศวรรษ ตามลำดับ

การศึกษานี้แสดงถึงความเสี่ยงของภัยแล้งและภัยน้ำท่วมที่เพิ่มสูงขึ้นในประเทศไทย ทั้งนี้ การเปลี่ยนแปลงลักษณะภูมิอากาศของอุณหภูมิ ปริมาณ ความถี่และความรุนแรงของฝนส่งผลโดยตรงต่อการจัดการอ่างเก็บน้ำ เนื่องจากการออกแบบอ่างเก็บน้ำในอดีตได้อ้างอิงข้อมูลอุทกศาสตร์ในอดีต (Ehsani et al., 2017)

ในการพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงลักษณะภูมิอากาศภายใต้ภาพฉายปริมาณของก๊าซเรือนกระจกในอนาคต แบบจำลอง GCM นับเป็นเครื่องมือเพียงหนึ่งเดียวที่สามารถนำมาใช้ประเมินการเปลี่ยนแปลง Vonk (2013) ศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำเข้าในเขื่อน Xin'anjiang และ Fuchunjiang ในเมืองหางโจว (Hangzhou) สาธารณรัฐประชาชนจีนในอนาคตโดยใช้แบบจำลองภูมิอากาศระดับภูมิภาค (Regional Climate Model, RCM) HadRM3P ซึ่งใช้แบบจำลอง GCM ชื่อว่า HadCM3 ภายใต้ภาพฉาย A1B, A2 และ B2 เป็นข้อมูลนำเข้า พร้อมทั้งพัฒนาภาพฉายความรุนแรงของการใช้น้ำแบ่งออกเป็น L (ต่ำ) M1 (ปานกลางค่อนข้างต่ำ) A (ปานกลาง) M2 (ปานกลางค่อนข้างสูง) และ H (สูง) พิจารณาจากแนวโน้มการเปลี่ยน

ทางเศรษฐกิจและสังคม ประกอบกับความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต จากการวิเคราะห์พบว่าปริมาณน้ำที่ไหลเข้าเขื่อนไม่เพียงพอต่อความต้องการของน้ำบริเวณท้ายเขื่อนในอนาคตดังแสดงในรูปที่ 2-6 สำหรับการศึกษาในประเทศไทย Hunukumbura และ Tachikawa (2012) ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง GCM (MRI-AGCM3.1S) ด้วยความละเอียด 20 กิโลเมตร พยากรณ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่าในลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาในช่วงปี พ.ศ. 2558-2582 และ พ.ศ. 2618-2642 ภายใต้ภาพฉาย A1B ซึ่งพบปริมาณน้ำท่าของคาบ 10 ปี ที่เพิ่มมากขึ้นในอนาคตในพื้นที่ส่วนใหญ่ของลุ่มน้ำ ประมาณร้อยละ 18 เมื่อเทียบกับปีฐาน (พ.ศ. 2522-2546) ในขณะเดียวกัน การศึกษานี้ยังพบว่าปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยในฤดูแล้งลดลงบ่งบอกถึงความเสี่ยงของภัยแล้งในอนาคต สาเหตุส่วนหนึ่งมาจากอัตราการคายระเหย (Evapotranspiration) ที่เพิ่มสูงขึ้น ต่อมา Kitpaisalsakul (2016) ได้ศึกษาต่อยอดจากการศึกษาของ Hunukumbura และ Tachikawa (2012) โดยประเมินปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้าเขื่อนภูมิพลมากขึ้นในอนาคตซึ่งส่งผลให้จำนวนปีที่ขาดแคลนน้ำในภาพรวมลดน้อยลง อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาแยกตามฤดูกาลพบว่า การขาดแคลนน้ำพบมากกว่าในฤดูฝนเนื่องจากปริมาณความต้องการในทางเกษตรที่สูงกว่าในฤดูแล้ง

ภาพฉายปริมาณของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศในอนาคตที่กล่าวมาข้างต้นนับเป็นข้อมูลที่สำคัญที่ใช้เป็นข้อมูลนำเข้าให้กับแบบจำลอง GCM ในปี พ.ศ. 2544 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) กำหนดความเป็นไปได้ของทิศทางการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมที่ส่งผลต่อปริมาณของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศในอนาคตออกเป็น 4 รูปแบบดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 รูปแบบการพัฒนาเศรษฐกิจ-สังคมในอนาคตตามสมมติฐาน SRES ที่ส่งผลต่อปริมาณปริมาณของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยของโลก

สมมติฐาน SRES ปี พ.ศ. 2544	
A พัฒนาโดยให้ความสำคัญกับการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจเป็นหลัก	
B พัฒนาโดยคำนึงถึงสิ่งแวดล้อม	
1 พัฒนาโดยมีความร่วมมือระหว่างประเทศ	
2 พัฒนาโดยมีความร่วมมือระหว่างภูมิภาค	
A1	ในอนาคตการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจสูง ประชากรโลกสูงสุดในกึ่งศตวรรษและลดลงเล็กน้อย หลังจากนั้นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูง มีการพัฒนาบุคลากร มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัฒนธรรม และมีความแตกต่างของรายได้ (GDP) ระหว่างภูมิภาคลดลง
A2	อนาคตของโลกมีความหลากหลาย พึ่งตนเองมากขึ้นในภูมิภาค อนุรักษ์เอกลักษณ์ของท้องถิ่น ประชากรเพิ่มขึ้นตลอด การพัฒนาเศรษฐกิจขึ้นอยู่กับภูมิภาค การเติบโตทางเศรษฐกิจ และการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีช้ากว่าแบบอื่นและกระจายตามท้องถิ่นและภูมิภาค
B1	ในอนาคต ประชากรสูงขึ้นในกึ่งศตวรรษเช่นเดียวกับ A1 และลดลงหลังจากนั้น แต่โครงสร้างเศรษฐกิจเปลี่ยนอย่างรวดเร็วไปเป็นภาคบริการและสารสนเทศ ลดการใช้วัตถุ มีการใช้เทคโนโลยีสะอาด เน้นแก้ปัญหาเศรษฐกิจ สังคมและสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืนในระดับนานาชาติ มีความเสมอภาคแต่ไม่มีการนำประเด็นด้านภูมิอากาศเป็นแรงจูงใจ
B2	เน้นไปที่การแก้ปัญหาท้องถิ่นด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน ประชากรโลกเพิ่มต่อเนื่องแต่น้อยกว่า A2 เน้นที่การป้องกันสิ่งแวดล้อมระดับท้องถิ่น ภูมิภาค มีการพัฒนาเศรษฐกิจปานกลาง การเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีหลากหลายและช้าลงกว่า B1 และ A1 โดยมีการปกป้องสิ่งแวดล้อมและความเสมอภาคของสังคมโดยเน้นไปที่ท้องถิ่นและภูมิภาค

A1FI	เป็นการพัฒนาที่ใช้พลังงานฟอสซิลอย่างมาก เช่น น้ำมัน ถ่านหิน เป็นต้น
A1T	เป็นการพัฒนาที่ไม่ใช้พลังงานฟอสซิลเป็นหลัก แต่ใช้เทคโนโลยีอื่น ๆ
A1B	เป็นการพัฒนาโดยมีความสมดุลของแหล่งพลังงานที่ใช้ไม่เน้นการใช้พลังงานฟอสซิลหรือพลังงานหมุนเวียน แต่ให้มีการผสมผสานระหว่างพลังงานทั้งสองแบบ เป็นลักษณะของการพัฒนาแบบปัจจุบัน (Business As Usual, BAU)

ที่มา : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (2554)

2.5 เครื่องมือใช้งาน

2.5.1 กล่องเครื่องมือ MATLAB (MATLAB Toolbox)

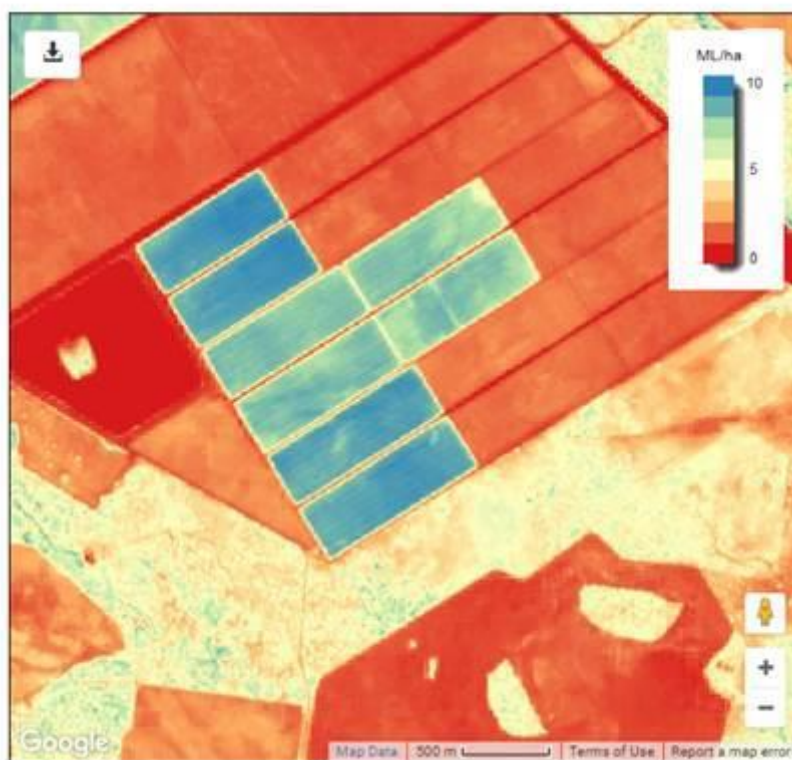
โปรแกรม MATLAB เขียนขึ้นโดย Dr. Cleve Moler ในช่วงปี ค.ศ. 1970 ซึ่งมีตำแหน่งเป็น Chief Scientist ของบริษัท Math Works, Inc. เริ่มแรกโปรแกรม MATLAB เป็นซอฟต์แวร์เมตริกซ์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในการเรียนการสอนทางด้านเมตริกซ์ พีชคณิต และการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยเฉพาะ หลังจากนั้นบริษัทได้พัฒนากล่องเครื่องมือต่าง 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 ก็จะมีลักษณะและการใช้งานแตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่าที่ระบุค่าให้กับ Block Parameter นั้น ๆ สำหรับขั้นตอนของการจำลองระบบนั้น สามารถกระทำได้โดยการออกแบบแบบจำลอง (Model Design) ตามที่ต้องการ ซึ่งจะต้องประกอบไปด้วย Input Blocks, Operation Blocks และ Output Blocks จากนั้นตั้งค่าพารามิเตอร์ของการจำลองระบบ (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

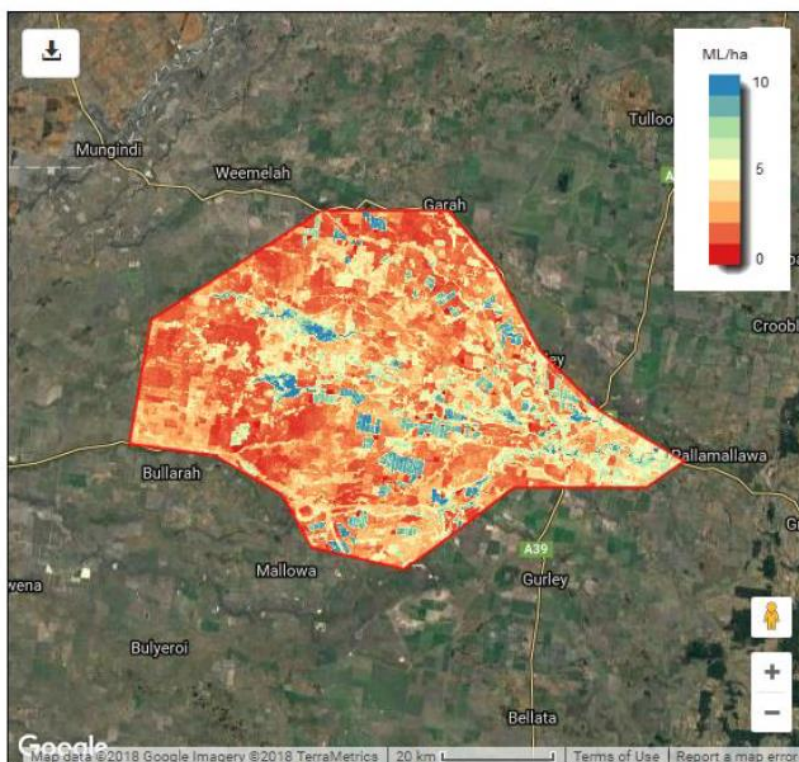
2.5.2 แอปพลิเคชัน IrriSAT (Cloud-Based IrriSAT Application)

IrriSAT เป็นระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้านการชลประทานที่ออกแบบมาเพื่อช่วยเกษตรกรในการตัดสินใจเรื่องการใช้น้ำด้วยการนำศาสตร์ด้านการชลประทานมาประยุกต์ใช้ ทำให้การจัดการชลประทานทำได้ง่ายขึ้น ทำซ้ำได้ และมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น แอปพลิเคชัน IrriSAT (<https://irrisat-cloud.appspot.com>) นับเป็นเทคโนโลยีด้านการจัดการชลประทานที่สามารถเปรียบเทียบผลตามสภาพอากาศโดยอาศัยหลักการสำรวจจากระยะไกล (Remote Sensing) เพื่อให้ข้อมูลการจัดการน้ำของพืชเฉพาะพื้นที่ในพื้นที่ขนาดใหญ่ที่มีความละเอียด IrriSAT จะคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Kc) จากความสัมพันธ์กับข้อมูลดัชนีพรรณพืชในลักษณะ Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ที่บ่งบอกถึงสัดส่วนของพืชพรรณที่ปกคลุมพื้นผิวจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ข้อมูลปริมาณการใช้น้ำพืชหรือปริมาณการคายระเหยของพืชรายวัน

(Crop Evapotranspiration, Etc) จะถูกคำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Crop Coefficient, Kc) คูณกับปริมาณการคายระเหยของพืชอ้างอิงรายวัน (Reference Crop Evapotranspiration, ETo) จากสถานีตรวจวัดอากาศในบริเวณใกล้เคียงหรือข้อมูล ETo แบบกริดที่จัดเตรียมไว้ในระดับประเทศ IrriSAT จะคาดการณ์ข้อมูลภูมิอากาศเพื่อกำหนดการให้น้ำตามสภาพภูมิอากาศในอนาคต IrriSAT เป็นแอปพลิเคชันที่ไม่มีค่าใช้จ่าย ซึ่งสามารถประมวลผลจากภาพถ่ายดาวเทียมโดยอัตโนมัติทั้งแพลตฟอร์มดาวเทียม Landsat ขององค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (National Aeronautics and Space Administration, NASA) และแพลตฟอร์มดาวเทียม Sentinel ขององค์การอวกาศยุโรป (European Space Agency, ESA) นอกจากนี้ IrriSAT ได้รับการพัฒนาโดยใช้ Google Earth Engine และส่งข้อมูลการใช้น้ำของพืชเพื่อกำหนดตารางการชลประทานและการเปรียบเทียบผลผลิตพืช IrriSAT จะแสดงปริมาณการใช้น้ำของพืชเพื่อการเพาะปลูกรายวันตลอดจนการพยากรณ์ปริมาณการใช้น้ำพืชใน 7 วันข้างหน้า สิ่งนี้ช่วยให้ผู้ให้น้ำชลประทานและผู้จัดการน้ำสามารถทราบปริมาณการใช้น้ำของพืชในแต่ละแปลงได้ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2-1 หรือทั่วทั้งเขตชลประทานเป็นรายวัน ฤดูกาล หรือรายปี ดังแสดงในรูปที่ 2-2 ข้อมูลนี้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงได้อย่างอิสระและง่ายดายเพียงลากขอบเขตพื้นที่ที่สนใจด้วยการคลิกเมาส์ภายในแอปพลิเคชัน IrriSAT ทำให้ประมวลผลข้อมูลระยะไกลผ่านดาวเทียมโดยอัตโนมัติ และให้ผู้ใช้งานเข้าถึงข้อมูลการใช้น้ำพืชเฉพาะพื้นที่ได้อย่างรวดเร็วและง่ายดาย ก่อนหน้านี้ กระบวนการนี้ต้องใช้เวลามากและค่าใช้จ่ายสูงในการประมวลผลดาวเทียม แต่ IrriSAT สามารถทำได้ด้วยการคลิกปุ่มเมาส์เพียงไม่กี่ครั้ง

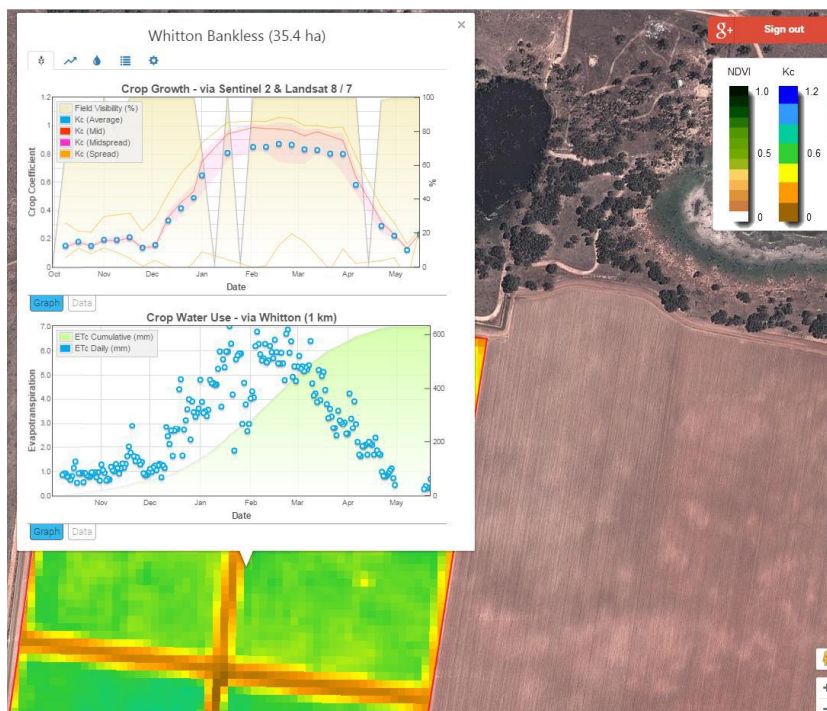


รูปที่ 2-1 แผนที่แสดงการใช้น้ำของพืชตามฤดูกาล (Season Crop Water Use Map) ของพื้นที่ Gwydir ในประเทศออสเตรเลีย ระหว่างวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2560 ถึง 31 มีนาคม พ.ศ. 2561 ด้วยแอปพลิเคชัน IrriSAT ที่วัดแปลงเพาะปลูกในเขตชลประทาน และแสดงความแตกต่างในการใช้น้ำของพืชภายในแปลงชลประทานและระหว่างแปลงชลประทาน



รูปที่ 2-2 แผนที่แสดงการใช้น้ำของพืชตามฤดูกาล (Season Crop Water Use Map) ของพื้นที่ Gwydir ในประเทศออสเตรเลีย ด้วยแอปพลิเคชัน IrriSAT ซึ่งแสดงการใช้น้ำของพืชในพื้นที่ชลประทานทั้งหมดในช่วงส่งน้ำชลประทานระหว่างวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2560 ถึง 31 มีนาคม พ.ศ. 2561

IrriSAT เปิดให้ใช้งานในเดือนตุลาคม ปี พ.ศ. 2557 และได้เห็นฐานผู้ใช้ในปัจจุบันเพิ่มขึ้นมากกว่า 1,500 คนในเดือนเมษายน ปี พ.ศ. 2561 เทคโนโลยีนี้ได้ถูกแนะนำให้กับผู้ให้น้ำชลประทานผ่านสื่อต่าง ๆ ซึ่งรวมถึงการประชุมและการนำเสนอโดยตรงไปยังผู้ให้น้ำชลประทานและที่ปรึกษาด้านการชลประทานที่แปลงของเกษตรกรทั่วพื้นที่ปลูกฝ้ายและเมล็ดพืชในประเทศออสเตรเลีย นอกจากนี้ ยังมีการจัดอบรมเชิงปฏิบัติการเกี่ยวกับการใช้ IrriSAT ทั่วทั้งลุ่มน้ำ Murray Darling เพื่อแนะนำเทคโนโลยีแก่ผู้ให้น้ำชลประทาน รวมถึงที่ปรึกษาด้านการชลประทาน ผู้ให้น้ำชลประทานมุ่งหวังที่จะเพิ่มผลตอบแทนสูงสุด และมีทางเลือกต้นทุนต่ำที่จะช่วยติดตามและคาดการณ์ความต้องการน้ำของพืชซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญในการเพิ่มผลผลิตการใช้น้ำ ซึ่ง IrriSAT ช่วยให้ผู้ให้น้ำชลประทานส่งน้ำในปริมาณที่ถูกต้อง ในเวลาที่เหมาะสม จัดทำเกณฑ์มาตรฐานและการตรวจสอบตัวขับเคลื่อนประสิทธิภาพเพื่อให้สามารถปรับปรุงผลผลิตจากการใช้น้ำได้อย่างต่อเนื่อง วิธีการจัดตารางการให้น้ำที่เหมาะสมโดยปรับให้เข้ากับความต้องการน้ำของพืชจริงเป็นสิ่งสำคัญในการใช้ทรัพยากรน้ำที่มีอยู่ให้ดีขึ้น IrriSAT จะจัดเตรียมประมาณการข้อมูลการใช้น้ำของพืชที่สามารถใช้เพื่อช่วยในการจัดตารางการชลประทาน การจัดสรรน้ำ และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพืชภายในและระหว่างแปลงและภูมิภาค ในแต่ละวัน IrriSAT จะแสดงปริมาณการใช้น้ำของพืชในอดีตและปัจจุบันสำหรับแปลงหรือเขตเพาะปลูกที่เลือก ดังแสดงในรูปที่ 2-3 รวมทั้งปริมาณการใช้น้ำของพืชสะสมตั้งแต่วันปลูก

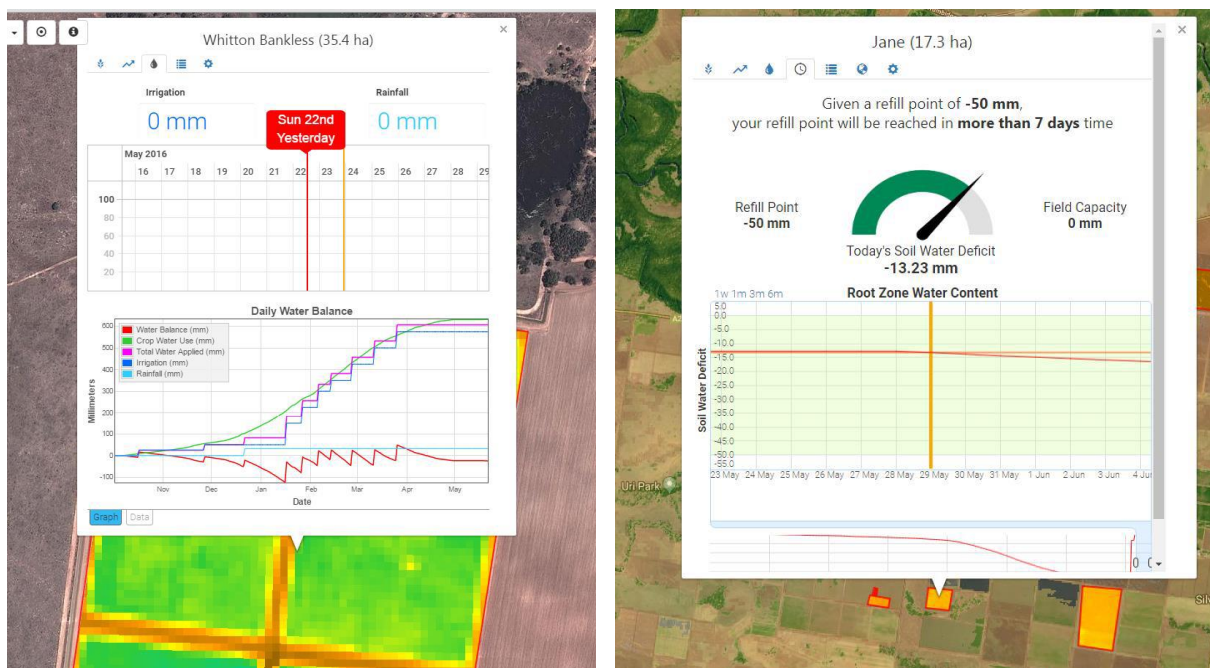


รูปที่ 2-3 ข้อมูลปริมาณการใช้น้ำพืชรายวันที่แสดงใน IrriSAT ข้อมูลดาวเทียมและ ETo จะถูกส่งเข้าสู่ระบบโดยอัตโนมัติเมื่อมีภาพและข้อมูลดาวเทียมใหม่พร้อมใช้งาน

ผู้ใช้งานยังสามารถป้อนปริมาณน้ำชลประทานที่ใช้ และเครื่องมือของ IrriSAT จะทำการปรับสมดุลน้ำสำหรับแปลงหรือขอบเขตที่เลือกโดยแสดงข้อมูลการขาดน้ำชลประทาน นอกจากนี้ IrriSAT ยังดำเนินการพยากรณ์การใช้น้ำของพืชผลเป็นเวลา 7 วัน และให้การประมาณระยะเวลาการให้น้ำครั้งต่อไปโดยพิจารณาจากการขาดน้ำชลประทานที่ผู้ใช้เลือก ข้อมูลนี้สามารถใช้ในการปรับปรุงตารางการให้น้ำชลประทานเพื่อให้ตรงกับเงื่อนไขที่ดีที่สุด และยังปรับปรุงการส่งน้ำ/การวางแผนการส่งน้ำเพื่อให้แน่ใจว่ามีการส่งน้ำชลประทานหรือมีน้ำชลประทานพร้อมใช้งานที่เหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 2-4

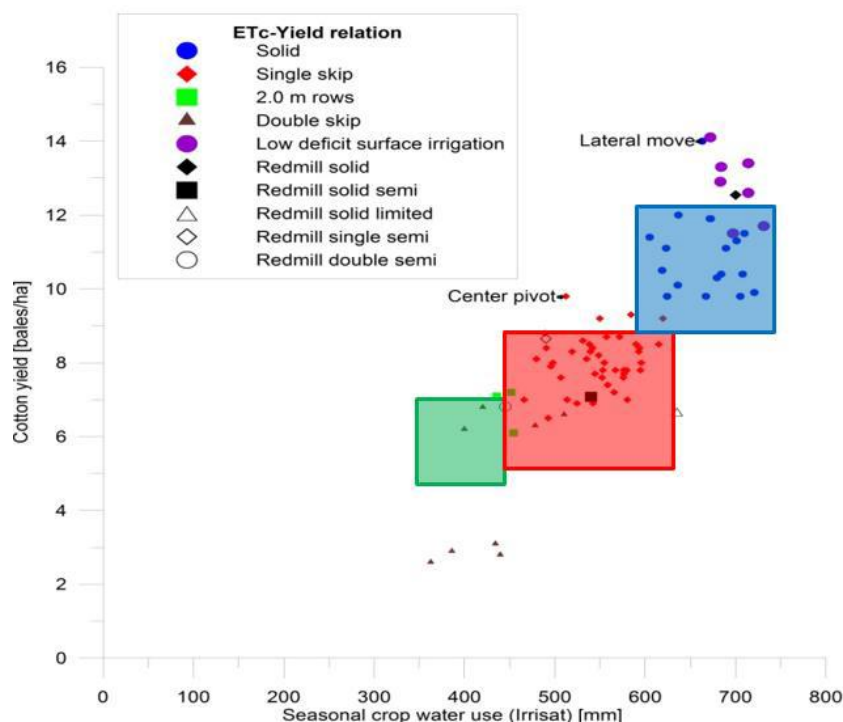
ผู้ใช้งาน IrriSAT ได้รายงานถึงแนวทางการประหยัดน้ำจากการใช้เครื่องมือในหลายวิธี ได้แก่

- การปรับเปลี่ยนเวลาการให้น้ำเพื่อให้ตรงกับความต้องการน้ำของพืชมากขึ้น
- คาดการณ์เหตุการณ์สภาพอากาศที่รุนแรงได้ดีขึ้น (เช่น วันที่มี ETc สูง เป็นต้น) และปรับเปลี่ยนตารางการให้น้ำชลประทาน/การขาดน้ำเพื่อลดผลกระทบต่อพืช
- การระบุพื้นที่ที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าภายในพืชชลประทาน และการเปลี่ยนแปลงการจัดการ
- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแปลงชลประทานในฟาร์มและภูมิภาค และการใช้ทรัพยากรน้ำที่มีจำกัดในแปลงที่มีประสิทธิภาพดีกว่า



รูปที่ 2-4 ข้อมูลกำหนดการชลประทานและการขาดน้ำชลประทานที่คาดการณ์ไว้สำหรับ 7 วันข้างหน้า
แสดงใน IrriSAT

เมื่อเทียบกับข้อมูลผลผลิตที่รวบรวมจากแปลงเพาะปลูก IrriSAT จะให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและการตรวจสอบผลกระทบของแนวทางการจัดการต่อการใช้น้ำ รูปที่ 2-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการใช้น้ำของพืชและผลผลิตที่พัฒนาโดยใช้ IrriSAT ในไร่นา ซึ่งแสดงให้เห็นผลกระทบของการกำหนดแถวฝ้าย ประเภทของระบบชลประทาน และการจัดตารางการให้น้ำต่อผลผลิต ข้อมูลนี้ถูกใช้สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ และยังจัดทำเกณฑ์มาตรฐานสำหรับผู้ให้น้ำชลประทาน



รูปที่ 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตพืชและปริมาณการใช้น้ำของพืชที่พัฒนาขึ้นด้วย IrrisAT ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของระบบชลประทาน รูปแบบการปลูก และตารางการให้น้ำต่อการใช้น้ำและผลผลิตฝ้ายในพื้นที่ชลประทาน Gwydir

ข่าวสารของเครื่องมือ IrrisAT ได้รับการเผยแพร่ในนิตยสารอุตสาหกรรม งานการค้า และการประชุมต่าง ๆ ในโอเชียเนียและต่าง ๆ ก็ถูกใช้เพื่อแสดงและขยายการใช้งาน IrrisAT รวมถึงวิดีโอ YouTube ทวิตเตอร์ และการสัมมนาผ่านเว็บ กิจกรรมเหล่านี้ได้รับการสนับสนุนจากองค์กรส่วนขยายและกลุ่มเกษตรกรหลายแห่ง รวมถึง Cotton Info, กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานของ New South Wales, คณะกรรมการวิจัยและส่งเสริมการชลประทาน และสมาคมผู้ใช้น้ำชลประทาน Gwydir Valley นับตั้งแต่เปิดตัวในปลายปี พ.ศ. 2557 ระบบ IrrisAT มีฐานผู้ใช้งานที่แข็งแกร่งและเติบโตขึ้นจากผู้ใช้งานที่ลงทะเบียนมากกว่า 1,000 คน โดยมีผู้ใช้ที่ไม่ซ้ำกันประมาณ 70 คนที่ใช้งานระบบในแต่ละสัปดาห์ IrrisAT ยังมีการขยายขอบเขตการใช้งาน โดยขณะนี้มีการเพิ่มการทำงานเต็มรูปแบบของแอปพลิเคชัน IrrisAT ทั่วทั้งทวีปออสเตรเลียและประเทศสหรัฐอเมริกา สิ่งนี้ช่วยให้ผู้ใช้งานในพื้นที่เหล่านี้ได้รับข้อมูลการใช้น้ำของพืชในอดีตและล่วงหน้าเจ็ดวัน ทั้งประเทศออสเตรเลียและสหรัฐอเมริกามีข้อมูล ETo แบบกริดซึ่งสามารถเข้าถึงได้ง่ายและอนุญาตให้ใช้งานฟังก์ชันนี้ได้

ในปัจจุบันแอปพลิเคชัน IrrisAT สามารถใช้เพื่อทำนายการใช้น้ำของพืชผลเจ็ดวันได้ทั่วโลก ข้อมูลการใช้น้ำในอดีต ปัจจุบัน และตามฤดูกาล สามารถจัดทำขึ้นสำหรับพื้นที่ใด ๆ ที่สามารถจัดเตรียมข้อมูล ETo แบบกริดสำหรับพื้นที่เหล่านี้ได้เช่นกัน ดังนั้น เทคโนโลยีนี้จึงปรับขนาดได้อย่างง่ายดาย IrrisAT ถูกนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมของผู้ใช้ที่หลากหลาย ตั้งแต่ผู้ให้น้ำที่ไม่เคยใช้เครื่องมือกำหนดตารางการให้น้ำชลประทานหรือการจัดการน้ำมาก่อน ไปจนถึงเจ้าหน้าที่ชลประทานที่มีประสบการณ์สูงซึ่งใช้เทคโนโลยีในการจัดตารางการให้น้ำชลประทาน ผู้ใช้เครื่องมือการจัดการชลประทานเป็นครั้งแรกขอความช่วยเหลือในการใช้งานระบบต้นทุนต่ำและผู้ใช้เครื่องมือที่มีประสบการณ์เห็นประโยชน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง จากข้อมูลการใช้น้ำของพืชเชิงพื้นที่ที่ให้ไว้ซึ่งเป็นประโยชน์กับเทคโนโลยีดั้งเดิมที่มีอยู่ เช่น การตรวจสอบดิน ความสามารถในการนำเสนอข้อมูลที่เป็น

ประโยชน์จากทักษะและความเชี่ยวชาญที่หลากหลายนี้ทำให้ขอบเขตการใช้แอปพลิเคชัน IrrisAT กว้างขึ้น และนำไปสู่สภาพแวดล้อมและระบบชลประทานที่หลากหลาย

2.5.3 ภาษา MiniZinc

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

2.5.4 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 ทำให้ผู้ใช้สามารถหามาใช้ได้ฟรี นอกจาก 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)

2.6 พื้นที่ศึกษา

เขื่อนภูมิพล (Bhumibol Dam) เป็นเขื่อนคอนกรีตโค้งอเนกประสงค์แห่งแรกของประเทศไทยดังแสดงในรูปที่ 2-6 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 น้ำจากทั้งสองลุ่มน้ำนับเป็นแหล่งน้ำที่สำคัญที่ช่วยหล่อเลี้ยงภาคเกษตรกรรมตลอดลุ่มน้ำปิงตอนล่างตั้งแต่จังหวัดตาก กำแพงเพชร ลงมาถึงนครสวรรค์ และลุ่มน้ำเจ้าพระยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อการเกษตรกรรมบริเวณพื้นที่ราบภาคกลางสองฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยาในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ รวมพื้นที่มากกว่า 10 ล้านไร่ รวมทั้งเพื่อการอุปโภคบริโภค การอุตสาหกรรม การท่องเที่ยว และการผลักดันน้ำเค็ม ทางตอนล่างของกลุ่มน้ำ หรืออาจกล่าวได้ว่า การบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำปิงนับเป็นส่วนหนึ่งของการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

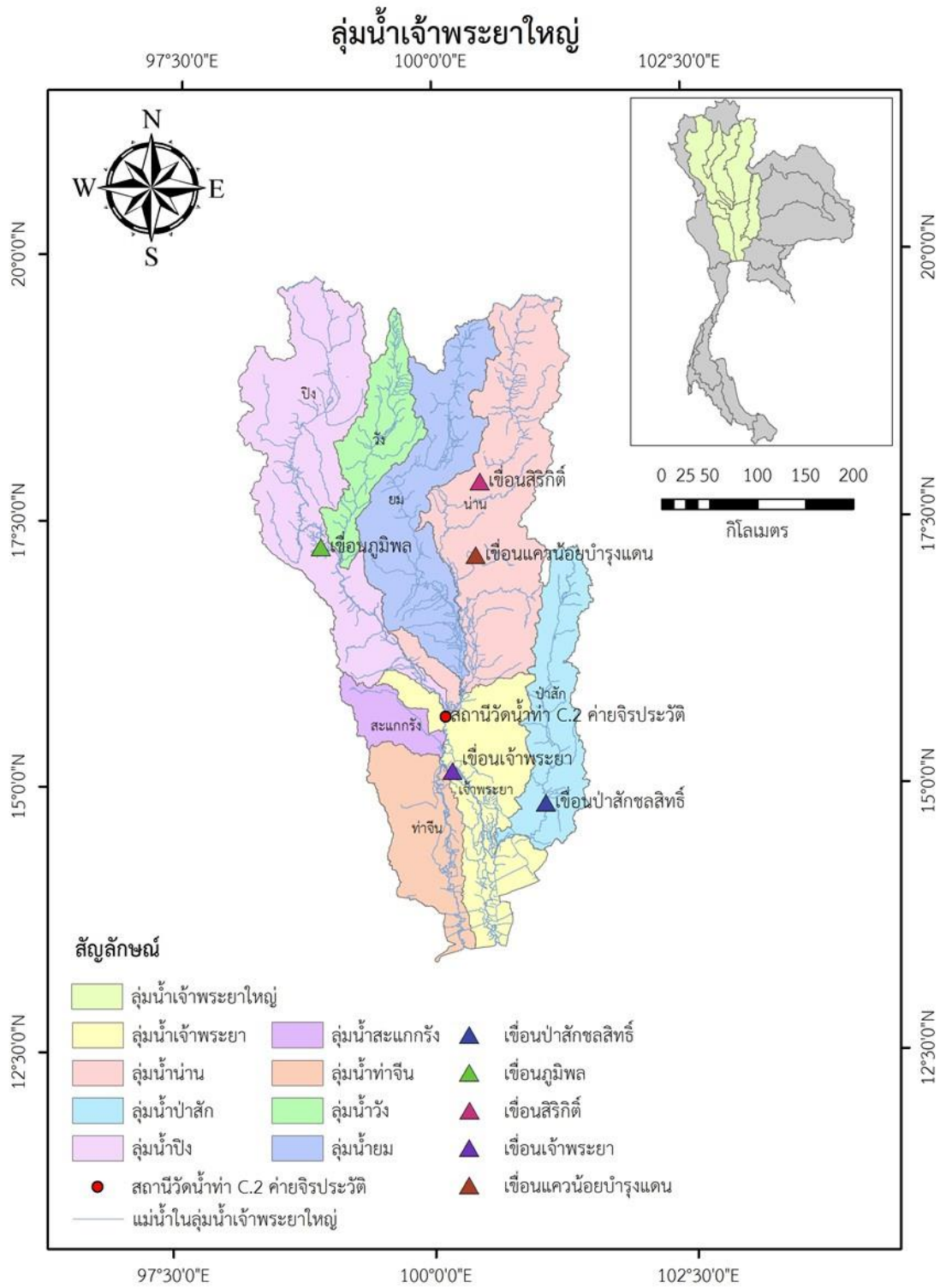


รูปที่ 2-6 เขื่อนภูมิพล จังหวัดตาก

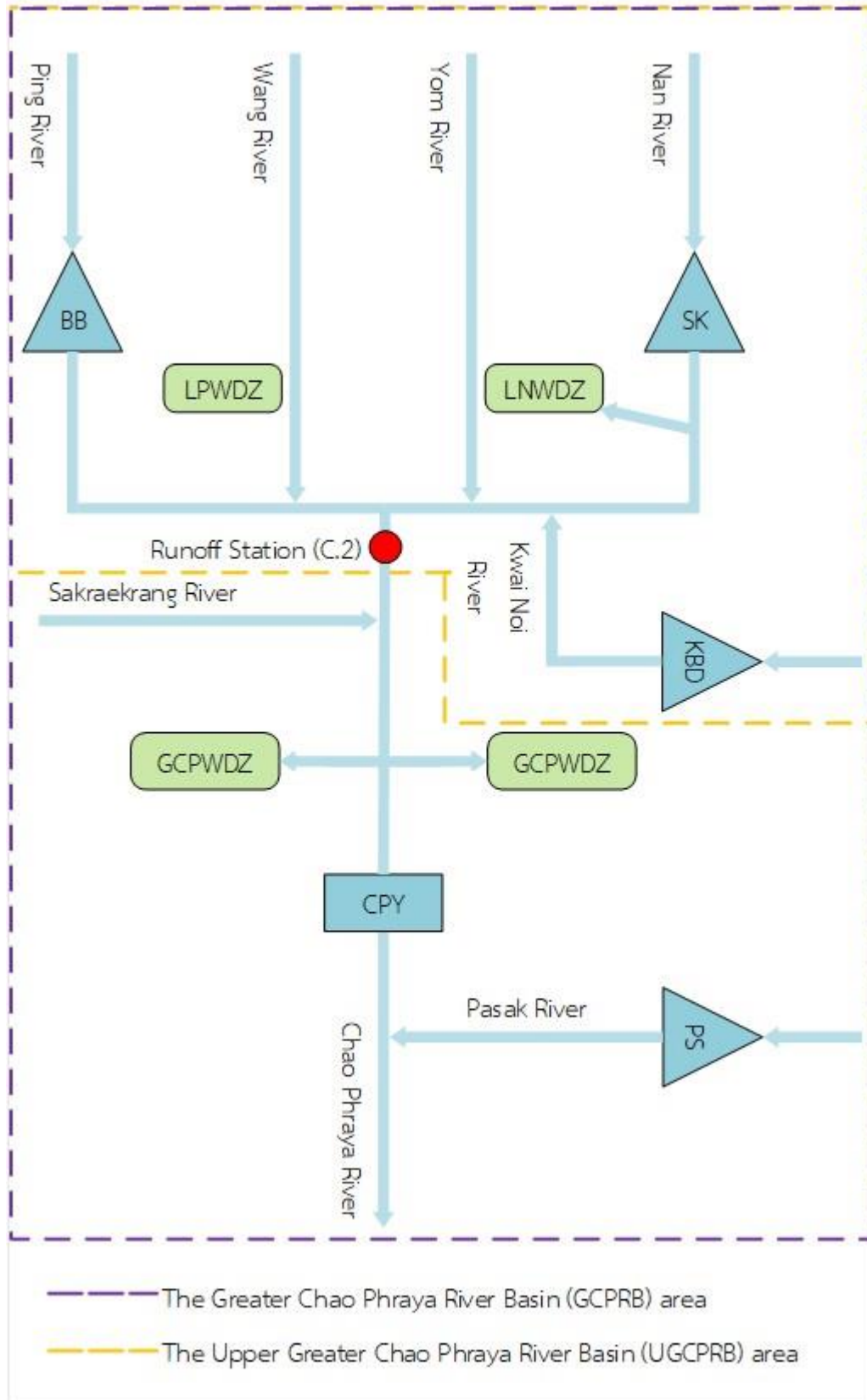
2.6.1 รายละเอียดทั่วไปของข้อมูลลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ (The Greater Chao Phraya River Basin) ครอบคลุมพื้นที่ในลุ่มน้ำปิง ลุ่มน้ำวัง ลุ่มน้ำยม ลุ่มน้ำน่าน ลุ่มน้ำป่าสัก ลุ่มน้ำสะแกกรัง ลุ่มน้ำท่าจีน และลุ่มน้ำเจ้าพระยา ดังแสดงในรูปที่ 2-7 โดยประกอบด้วยเขื่อนหลักที่สำคัญได้แก่ เขื่อนภูมิพล (Bhumibol Dam, BB) เขื่อนสิริกิติ์ (Sirikit Dam, SK) เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน (Qhaewnoi Bumrungdaen Dam, QBD) เขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ (Pasakcholasit Dam, PS) และเขื่อนทดน้ำเจ้าพระยา (Chao Phraya Dam, CPY) โดยน้ำต้นทุนจากเขื่อนเก็บกักหลักได้แก่

ได้แก่ เขื่อนภูมิพล และเขื่อนสิริกิติ์ ซึ่งอยู่ในความดูแลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะถูกจัดสรรไปใช้ร่วมกันร่วมกับเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนเพื่อตอบสนองกิจกรรมความต้องการน้ำทางด้านท้ายน้ำทางตอนล่าง ได้แก่ ความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภค การอุตสาหกรรม การรักษาระบบนิเวศและการผลักดันน้ำเค็ม การผลิตพลังงานไฟฟ้า และการชลประทานในเขตโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ (The Greater Chao Phraya Irrigation Project, GCPYIP) ซึ่งประกอบด้วย โครงการชลประทานในเขตลุ่มน้ำปิงตอนล่าง (Lower Ping Irrigation Projects, LPIP) จำนวน 4 โครงการ โครงการชลประทานในเขตลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีนฝั่งซ้ายและฝั่งขวาจำนวน 26 โครงการ และโครงการชลประทานในเขตลุ่มน้ำน่านตอนล่าง (Lower Nan Irrigation Projects, LNIP) จำนวน 5 โครงการ ภายใต้การดูแลของกรมชลประทาน โดยปริมาณน้ำที่ระบายจากเขื่อนภูมิพลและสิริกิติ์จะถูกจัดสรรไปใช้เพื่อการชลประทานผ่านระบบคลองส่งน้ำทางฝั่งขวาและฝั่งซ้ายของแม่น้ำเจ้าพระยา โดยมีเขื่อนทดน้ำเจ้าพระยาทำหน้าที่ผันน้ำเข้าระบบคลองส่งน้ำ รวมทั้งระบายน้ำท้ายเขื่อนส่วนหนึ่งเพื่อรักษาระบบนิเวศและช่วยผลักดันน้ำเค็มที่รุกล้ำเข้ามาบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา ดังแสดงแผนผังระบบอ่างเก็บน้ำในรูปที่ 2-8 ด้วยเหตุนี้ การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมโดยเฉพาะจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ซึ่งเป็นเขื่อนเก็บกักหลักขนาดใหญ่ในพื้นที่จึงมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพ ความยั่งยืน และความมั่นคงในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในพื้นที่ราบภาคกลางของประเทศไทย



รูปที่ 2-7 แผนที่แสดงลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่



รูปที่ 2-8 แผนที่แสดงระบบเขื่อน-อ่างเก็บน้ำ-โครงการชลประทานในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

2 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

2.6.2 รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานเขื่อนภูมิพล

ข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญของเขื่อนและอ่างเก็บน้ำได้สรุปรายละเอียดไว้ในตารางที่ 2-2 และข้อมูลโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำและอาคารประกอบของเขื่อนภูมิพลได้สรุปรายละเอียดไว้ในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-2 รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานเขื่อนภูมิพล

ข้อมูลพื้นฐาน	หน่วย	เขื่อน-อ่างเก็บน้ำ
ลักษณะตัวเขื่อน		
ชนิด	-	คอนกรีตโค้ง
ความสูง	เมตร	154
ความยาวที่สันเขื่อน	เมตร	486
ความกว้างที่สันเขื่อน	เมตร	6
ความกว้างที่ฐานเขื่อน	เมตร	56
ระดับที่สันเขื่อน	เมตร รทก.	261
ลักษณะของอ่างเก็บน้ำ		
ระดับน้ำเก็บกักสูงสุด	เมตร รทก.	260
ระดับน้ำต่ำสุดที่ผลิตไฟฟ้า	เมตร รทก.	213
ระดับเขื่อน	เมตร	47
ระดับน้ำท้ายเขื่อน	เมตร รทก.	138
ปริมาณน้ำเก็บกักสูงสุด	ล้านลูกบาศก์เมตร	13,460
ปริมาณน้ำเก็บกักต่ำสุด	ล้านลูกบาศก์เมตร	3,800
ปริมาณน้ำใช้งานที่ผลิตไฟฟ้า	ล้านลูกบาศก์เมตร	9,662
พื้นที่รับน้ำ	ตารางกิโลเมตร	26,386
พื้นที่ผิวน้ำที่ระดับเก็บกักสูงสุด	ตารางกิโลเมตร	318
ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเฉลี่ย 10 ปี	ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี	5,967
ปริมาณการสูญเสียน้ำจากการระเหยและรั่วซึม	ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี	432

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2555)

ตารางที่ 2-3 รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ เขื่อนภูมิพล

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			
Total Annual Energy	MW-Hr	1,062,000			
Turbine					
Type					

2 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเขื่อนภูมิพล ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

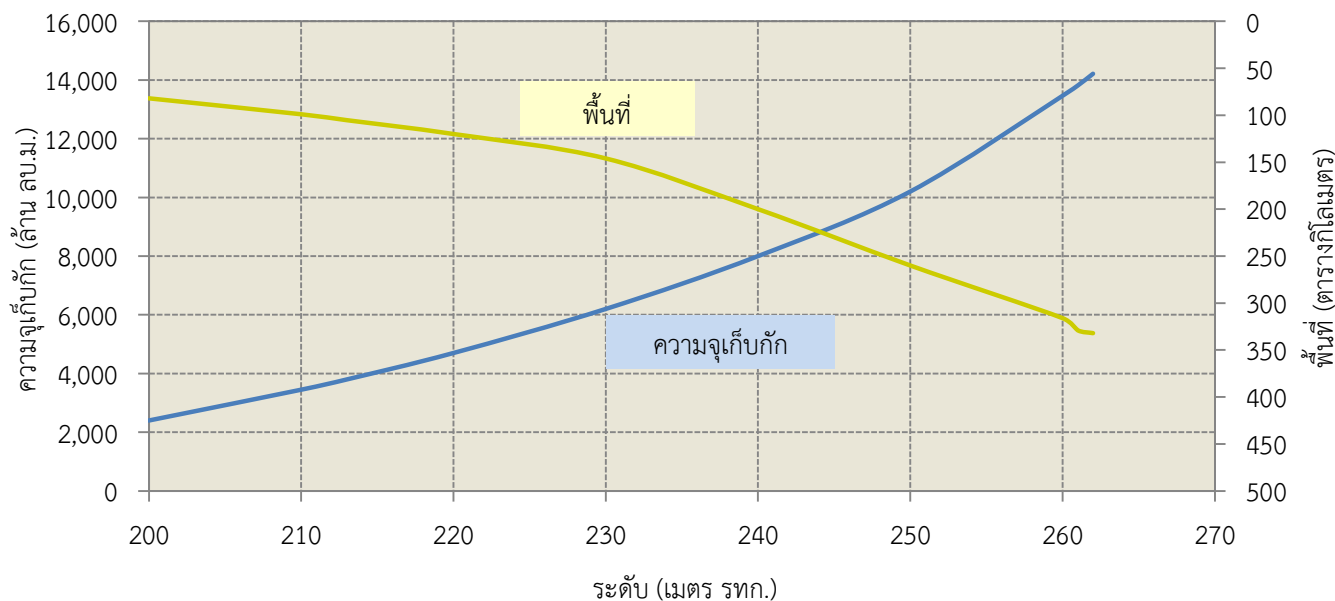
ข้อมูลพื้นฐาน	หน่วย	โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ			
Rated Head	M	100	96	105	96/118-96
Rated Discharge	CMS	85	79.5	139.4	169/120-157
Rated Output	MW	96	96	123	145/152-162
Spillway					
Type	-	Tunnel			
Crest Elevation	M. MSL.	242.90			
Control Gate	Radial	4			
Gate Size	M	11x17.4			
Capacity	CMS	6,000			
Water Rate					
At Maximum Effective Storage	CM/KW-Hr	3.35	3.40	3.49	3.37
At 50% Effective Storage	CM/KW-Hr	4.30	4.40	4.50	3.97
At Minimum Effective Storage	CM/KW-Hr	5.30	5.40	5.58	4.56

2.6.3 ข้อมูลลักษณะสำคัญทางกายภาพของอ่างเก็บน้ำ

ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำเก็บกัก-พื้นที่ผิวน้ำ-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล แสดงในตารางที่ 2-4 และรูปที่ 2-9

ตารางที่ 2-4 รายละเอียดของข้อมูลพื้นฐานเขื่อนภูมิพล

ระดับ (ม.รทก.)	พื้นที่ผิวน้ำ (ตร.กม.)	ความจุเก็บกัก (ล้าน ลบ.ม.)
200	82	2,400
210	99	3,450
213	105	3,800
220	120	4,700
230	146	6,200
240	200	8,000
250	260	10,200
260	316	13,462
261	329	13,812
262	332	14,212



รูปที่ 2-9 โค้งระดับ-พื้นที่-ความจุเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล

2.6.4 ข้อมูลพิจารณาในการกำหนดการระบายน้ำท้ายเขื่อนภูมิพล

ในการกำหนดการระบายน้ำท้ายเขื่อนภูมิพล ข้อมูลที่สำคัญที่ใช้ประกอบในการตัดสินใจระบายน้ำที่สถานการณ์น้ำต่าง ๆ ได้แก่ ข้อมูลความจุเก็บกักสูงสุดของแม่น้ำ (Maximum Channel Capacity) ที่จุดวิกฤตทางด้านท้าย และปริมาณ Sideflow จากสถานีตรวจวัดน้ำท่าทางตอนล่างดังสรุปไว้ในตารางที่ 2-5 และตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-5 ข้อมูลความจุเก็บกักสูงสุดของแม่น้ำ

แม่น้ำ	ที่ตั้ง	อัตราการไหลสูงสุด	
		ลบ.ม.	ลบ.ม./วัน
ปัง	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.อุดรดิตถ์	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

ตารางที่ 2-6 ข้อมูลสถานีวัดน้ำท่าหลัก

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 (ท้ายเขื่อนบรรจบกับแม่น้ำปาด)
	N.2B	อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์
	N.36	อ.นครไทย จ.พิษณุโลก
	N.55	อ.ชาติตระการ จ.พิษณุโลก
	N.60	อ.ตรอน จ.พิษณุโลก (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)

2.6.5 โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่

โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ (The Greater Chao Phraya Irrigation Project) เป็นโครงการพัฒนากลุ่มน้ำเจ้าพระยาเพื่อการเพาะปลูกสำหรับพื้นที่ราบภาคกลางสองฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยาโดยมีขอบเขตตั้งแต่จังหวัดชัยนาทถึงอ่าวไทย เดิมการเพาะปลูกในเขตพื้นที่ต้องอาศัยน้ำฝนเป็นหลัก อย่างไรก็ตาม ในปีฝนแล้งเกษตรกรมักได้รับความเดือดร้อนจากปัญหาการขาดแคลนน้ำอยู่เป็นประจำ ทำให้กรมชลประทานได้ทำการพัฒนาโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ขึ้นโดยได้เริ่มเตรียมงานเบื้องต้นในปี พ.ศ. 2494 และเริ่มงานก่อสร้างเขื่อนเจ้าพระยา พร้อมกับระบบคลองส่งน้ำในปี พ.ศ. 2495 จนแล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2500 ในปัจจุบัน

2 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

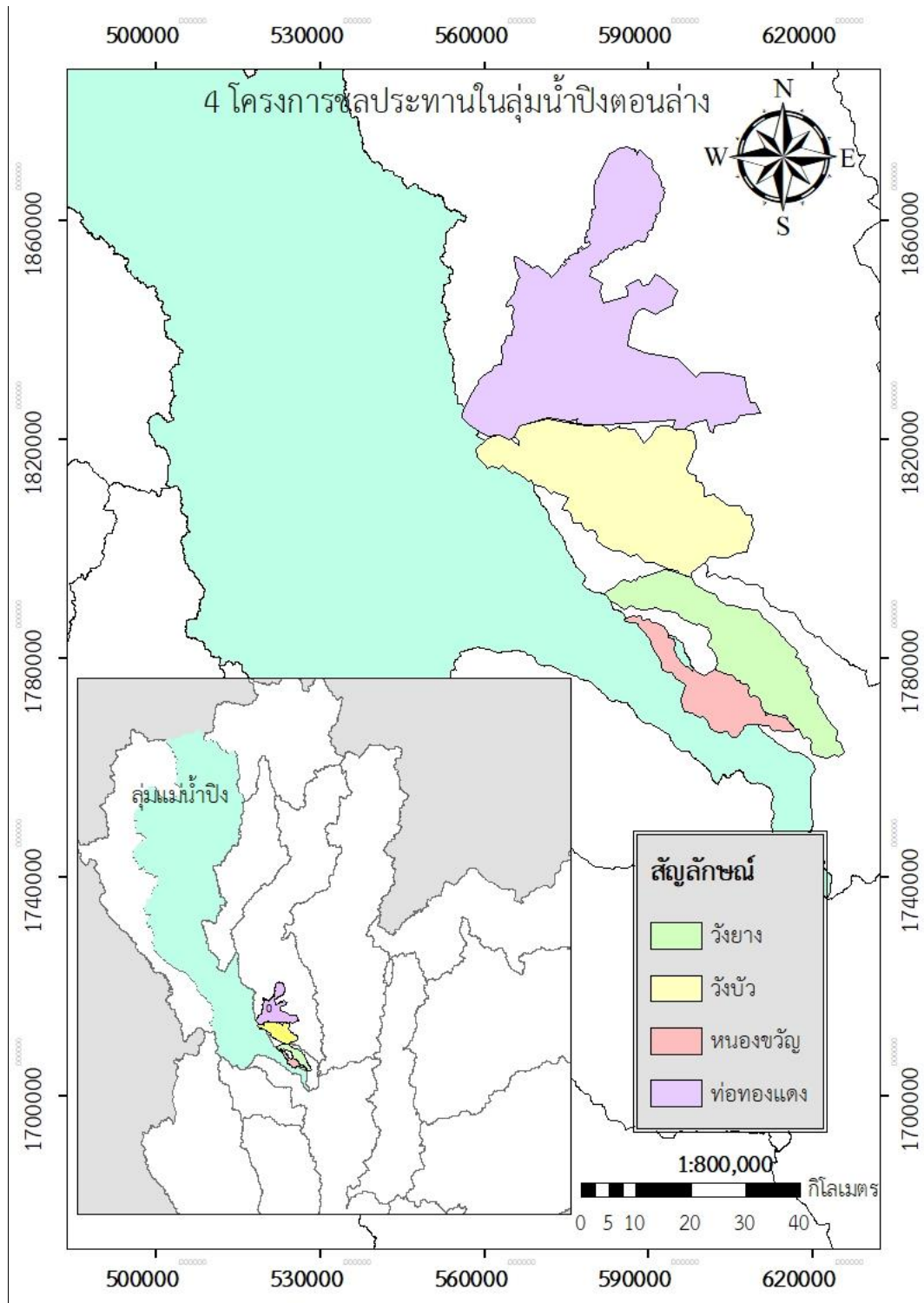
โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ได้รับการจัดสรรน้ำจากอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ เป็นหลัก โดยมีพื้นที่ชลประทานที่ได้รับการจัดสรรน้ำครอบคลุมโครงการชลประทานลุ่มน้ำปิงตอนล่าง โครงการชลประทานลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน และโครงการชลประทานลุ่มน้ำน่านตอนล่าง รวมเป็นพื้นที่ชลประทานกว่า 8,848,684 ไร่ ดังแสดงในตารางที่ 2-7 และรูปที่ 2-10 ถึงรูปที่ 2-13 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 เพื่อให้ทำการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลและสิริกิติ์ หรือกรมส่งเสริมการเกษตรเพื่อกำหนดเป้าหมายพื้นที่เพาะปลูกในแต่ละช่วงฤดู เป็นต้น (กรมทรัพยากรน้ำ, 2548)

ตารางที่ 2-7 รายละเอียดสำคัญของโครงการชลประทานในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

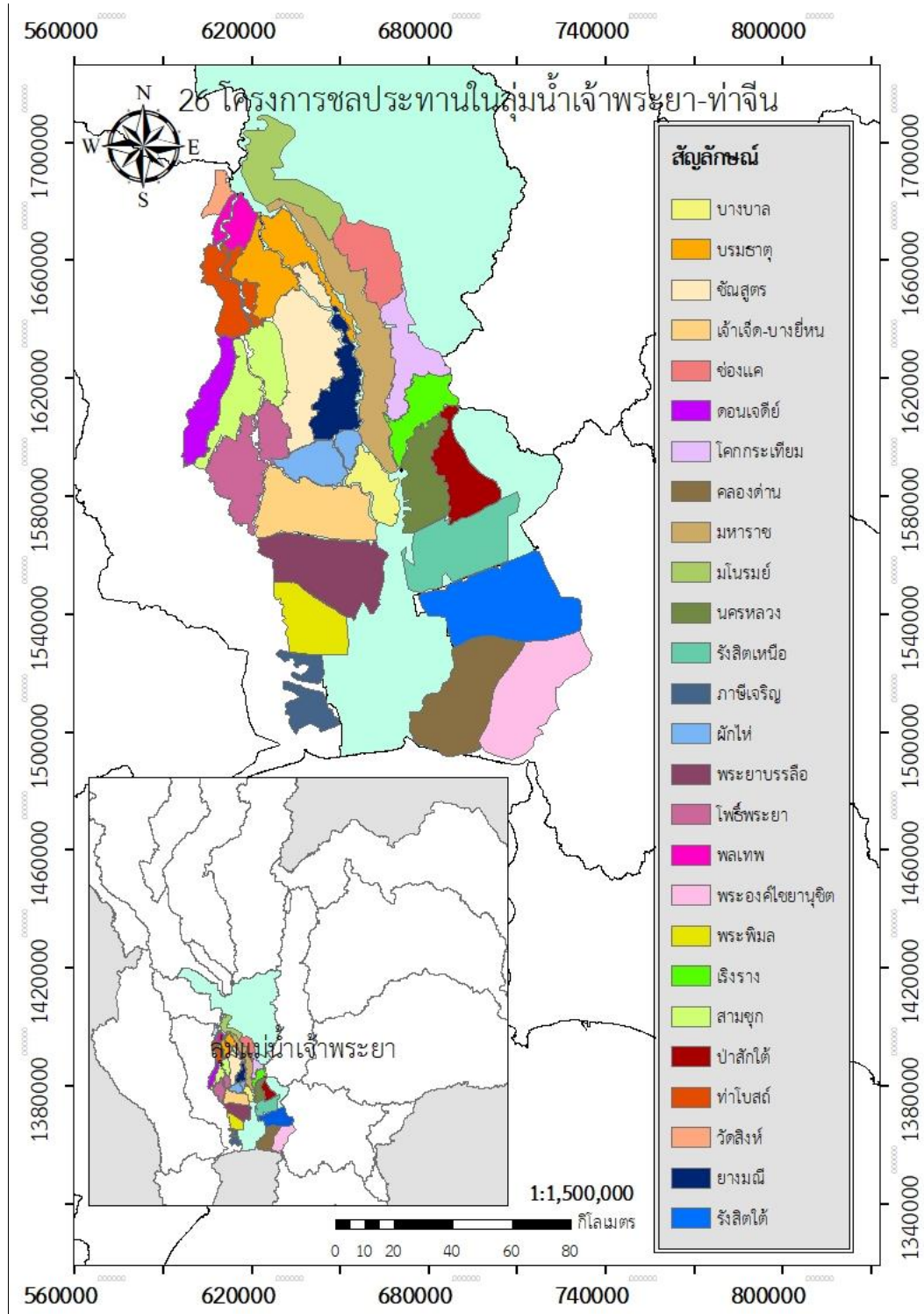
ลำดับ	โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา	พื้นที่ชลประทาน (ไร่)	สำนักชลประทานที่	ประเภทโครงการประทาน
โครงการชลประทานลุ่มน้ำปิงตอนล่าง				
1	ท่อทองแดง	643,125	4	ชลประทานแบบรับน้ำนอง
2	วังบัว	446,250	4	ชลประทานแบบรับน้ำนอง
3	วังยาง	101,875	4	ชลประทานแบบรับน้ำนอง
4	หนองขวัญ	457,500	4	ชลประทานแบบรับน้ำนอง
	รวม	1,648,750		
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	ชัยสุนทร	448,250	12	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
10	ยางมณี	210,321	12	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
11	ผักไห่	206,000	12	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
12	มหาราช	485,400	10	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
13	มโนรมย์	284,265	10	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
14	ช่องแค	238,739	10	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง

2 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

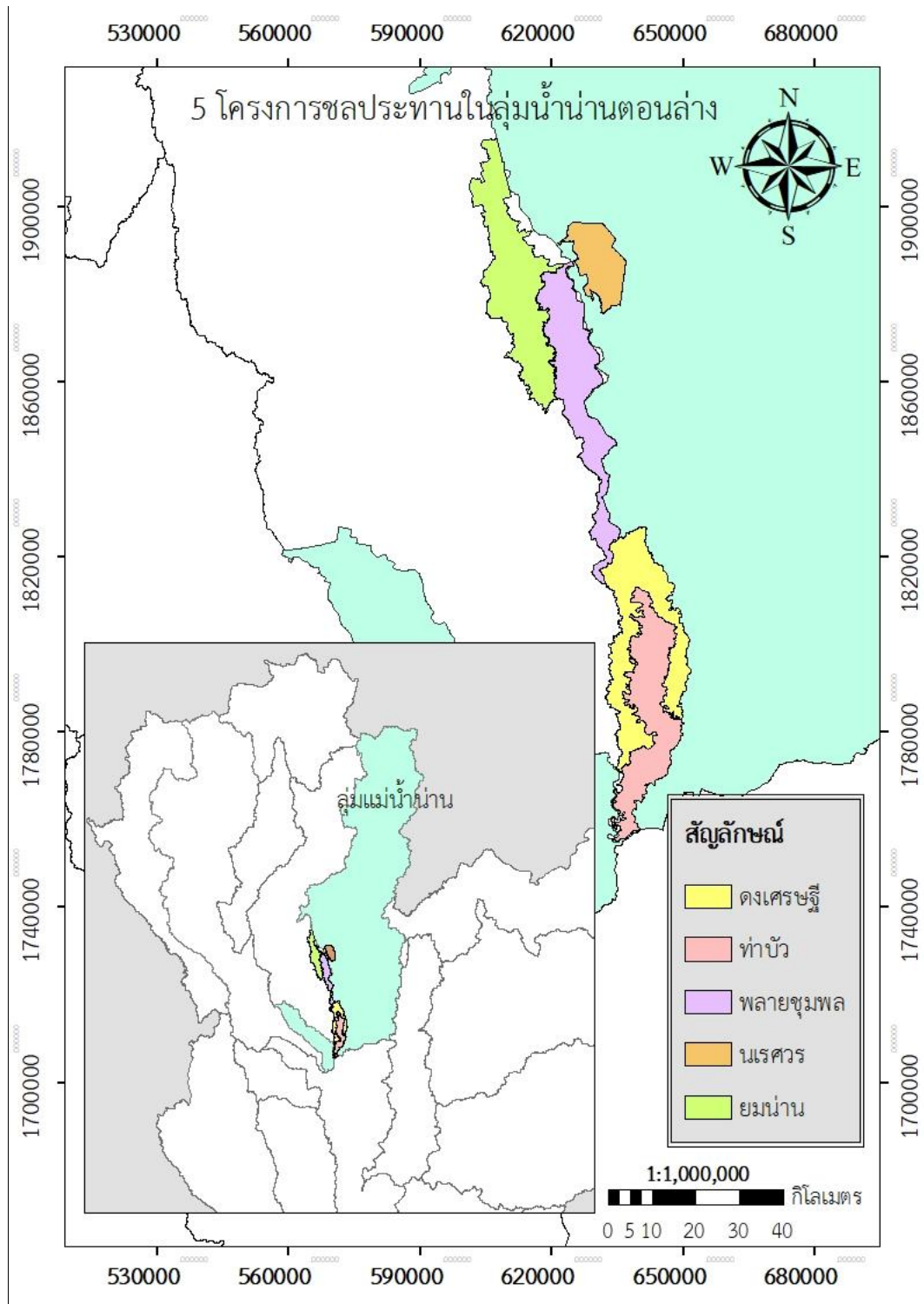
ลำดับ	โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา	พื้นที่ชลประทาน (ไร่)	สำนักชลประทานที่	ประเภทโครงการประทาน
15	โคกกระเทียม	205,470	10	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
16	เริงราง	179,000	10	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
17	ป่าสักใต้	240,600	10	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
18	นครหลวง	267,048	10	ชลประทานแบบแรงโน้มถ่วง
19	รังสิตเหนือ	455,500	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	พลาญชุมพล	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		



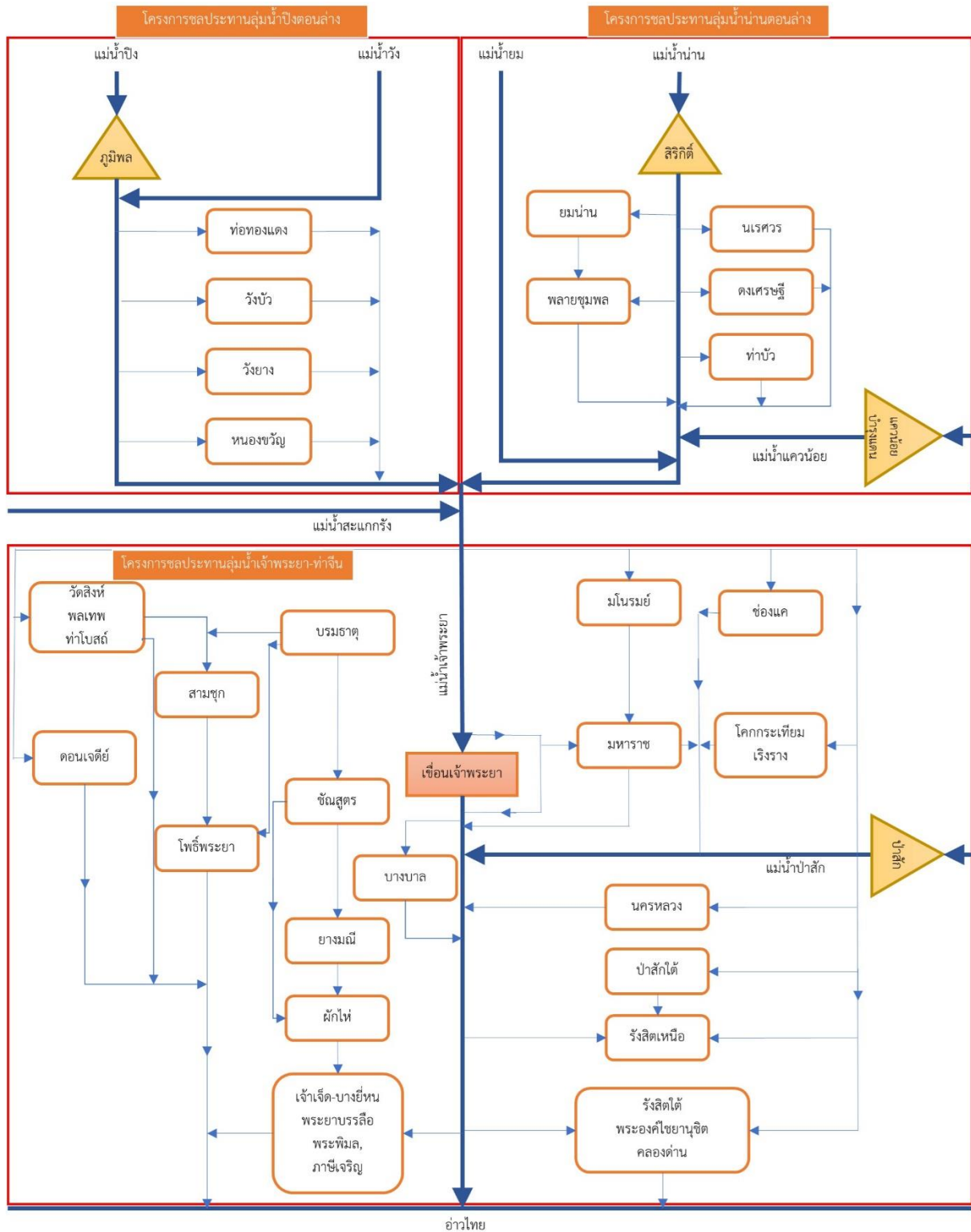
รูปที่ 2-10 แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่โครงการชลประทานในลุ่มน้ำปิงตอนล่าง



รูปที่ 2-11 แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่โครงการชลประทานในกลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน



รูปที่ 2-12 แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่โครงการชลประทานกลุ่มน้ำ่านตอนล่าง



รูปที่ 2-13 แผนที่แสดงโซนการส่งน้ำของโครงการชลประทานในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

2.6.6 แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

กรมชลประทานและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้กำหนดหลักเกณฑ์เพื่อใช้ในการกำหนดช่วงเวลาเพาะปลูกพืชฤดูฝนและฤดูแล้งในแต่ละปีของพื้นที่ในแต่ละภูมิภาค สำหรับช่วงเพาะปลูกพืชฤดูฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาให้กำหนดตั้งแต่วันที่ 1 เดือนพฤษภาคมถึงวันที่ 31 เดือนตุลาคม และช่วงเพาะปลูกพืชฤดูแล้ง

2 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 เดือนพฤศจิกายนถึงวันที่ 30 เมษายนของปีถัดไป ซึ่งผลการดำเนินงานที่ผ่านมาได้มีการกำหนดแผนการจัดสรรน้ำในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ตามกิจกรรมการใช้น้ำครอบคลุมถึง ความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรม ความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค ความต้องการน้ำเพื่อการอุตสาหกรรม ความต้องการน้ำเพื่อการรักษาระบบนิเวศ และความต้องการน้ำอื่น ๆ (กรมชลประทาน, 2562) สำหรับแผนการจัดสรรน้ำในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ที่จัดสรรน้ำจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์และผลการปฏิบัติการจริงระหว่างปี พ.ศ. 2549-2563 แสดงในตารางที่ 2-8 และตารางที่ 2-9 โดยพบว่าแผนการจัดสรรน้ำรายปีผันแปรอยู่ระหว่าง 5,390-18,205 ล้านลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ปริมาณการระบายน้ำจริงรายปีผันแปรอยู่ระหว่าง 4,554-17,338 ล้านลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 2-8 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 2-9 แผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2556-2563

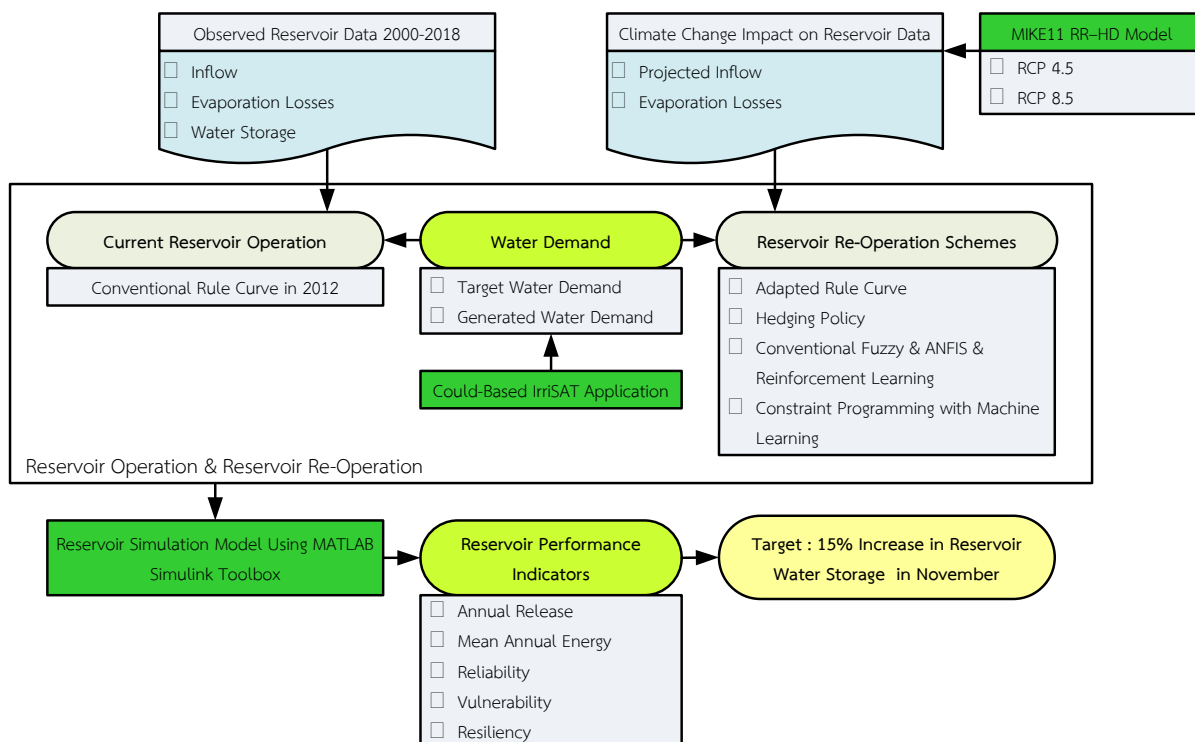
ปี พ.ศ./ เดือน	2556		2557		2558		2559		2560		2561		2562		2563	
	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง	แผน	ปฏิบัติการ จริง
ม.ค.	1,570	1,745	1,037	1,048	488	492	447	447	933	1,091	1,432	1,529	1,346	1,531	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	
ก.ย.	266	205	206	134	181	284	246	130	233	157	227	545	207	231	228	
ต.ค.	168	142	187	174	187	169	254	110	243	48	237	544	213	687	241	
พ.ย.	234	233	212	212	365	382	460	188	248	175	905	992	450	635	580	
ธ.ค.	824	828	400	398	393	402	834	839	1,327	1,357	1,352	1,502	495	584	1,164	
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	6,349	3,808

ที่มา : กรมชลประทาน (2562)

บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 กรอบงานวิจัย

รายละเอียดของกรอบงานวิจัยแสดงในรูปที่ 3-1 และระเบียบวิธีวิจัยแยกตามวัตถุประสงค์ดังนี้



รูปที่ 3-1 กรอบงานวิจัย

วัตถุประสงค์ที่ 1 : ศึกษาและวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของข้อมูลน้ำต้นทุนและข้อมูลความต้องการน้ำ (Water Supply and Water Demand Dynamics) โดยครอบคลุม 2 ประเด็นคือ (1) ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกและการพัฒนาทางเศรษฐกิจ-สังคมที่มีต่อฐานข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ (Climate Change Impact on Hydrology) และ (2) ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลความต้องการน้ำ (Water Demand) สำหรับนำมาใช้กำหนดแนวทางการจัดสรรน้ำจากอ่างเก็บน้ำเพื่อเพิ่มปริมาณต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล

ประเด็นที่ 1 : ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกและการพัฒนาทางเศรษฐกิจ-สังคมที่มีต่อฐานข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ (Climate Change Impact on Hydrology) มีรายละเอียดของขั้นตอนการวิจัยดังนี้

1. รวบรวมข้อมูลอุตุ-อุทกวิทยารายวันจากสถานีตรวจวัด ได้แก่ ข้อมูลฝน ข้อมูลน้ำท่า ข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ข้อมูลการระเหยของน้ำ รวมทั้งข้อมูลภูมิศาสตร์ของพื้นที่ แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน ลักษณะของดิน โดยครอบคลุมสถานีตรวจวัดเหนือเขื่อนภูมิพลและท้ายเขื่อนภูมิพล

3 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเขื่อนภูมิพล ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

2. รวบรวมข้อมูลผลการพยากรณ์อุทกวิทยารายวันในอนาคตจากฐานข้อมูล SEALCLID/CORDEX-SEA สนับสนุนโดย สกสว. และ Asia Pacific Network for Global Change Research (APN) ซึ่งข้อมูลการพยากรณ์สังเคราะห์ด้วย RegCM4 ใช้ผลของ GCMMPi-ESM-MR และ GCM-EC-Earth ในช่วง พ.ศ. 2513-2548 (ปีฐาน) และ พ.ศ. 2549-2642 (การพยากรณ์) ภายใต้ภาพฉาย RCP4.5 และ RCP8.5 เป็นข้อมูลนำเข้า โดยข้อมูลที่ได้มีความละเอียด 25 กิโลเมตร x 25 กิโลเมตร ทั้งนี้ นำข้อมูลการพยากรณ์ที่ได้มาตรวจสอบความถูกต้องและสอดคล้องกับข้อมูลตรวจวัดจริงในข้อ 1 และหากข้อมูลมีความไม่สอดคล้องกัน คณะผู้วิจัยจะประยุกต์ใช้เทคนิคการปรับแต่งผลผลิตทางอุทกนิยมนิเทศ (Bias Correction Technique) เช่น Simple Multiplicative Shift Method เป็นต้น เพื่อปรับข้อมูลการพยากรณ์ที่ได้ให้สอดคล้องกับข้อมูลตรวจวัดจริง สามารถนำไปใช้ศึกษาในขั้นต่อไป

3. ประยุกต์ใช้สมการของ Hamon (Hamon, 1961), Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) และ Hargreaves (Hargreaves et al., 1985) โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาณการระเหยของน้ำในอ่างเก็บน้ำจากสมการดังกล่าวกับข้อมูลอัตราการระเหยของน้ำจากภาตวัดการระเหย (Evaporation Pan) และข้อมูลการคำนวณจากสมการ Penman-Monteith ที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากล และคัดเลือกสมการที่มีค่า Standard Error น้อยที่สุด เพื่อแปลงค่าอุณหภูมิในปีฐานและในอนาคตไปเป็นปริมาณการระเหยของน้ำในอ่างเก็บน้ำ ซึ่งจะนำไปใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองฝน-น้ำท่าต่อไป ทั้งนี้ การเปรียบเทียบผลการคำนวณของแต่ละสมการกับปริมาณการระเหยของน้ำจากอ่างเก็บน้ำที่ได้จากข้อมูลอัตราการระเหยของน้ำจากภาตวัดการระเหย (Evaporation Pan) และจากสมการ Penman-Monteith อ้างอิงข้อเสนอแนะของ Alkaed et al. (2006)

4. ประยุกต์ใช้แบบจำลองฝน-น้ำท่า (MIKE11 NAM Model) เพื่อสังเคราะห์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันในปัจจุบัน (ปีฐาน) และในอนาคต (พยากรณ์)

5. นำข้อมูลปริมาณอ่างเก็บน้ำรายวันจากแบบจำลองเปรียบเทียบกับค่าตรวจวัดจริง และใช้เทคนิคการปรับแต่ง (Bias Correction Technique) ด้วยวิธี Empirical Quantile Mapping และ Empirical with Gamma Distribution Quantile Mapping อ้างอิงแนวทางของ Donpapob (2016) และประเมินการเปลี่ยนแปลงปริมาณที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำภายใต้ภาพฉายในอนาคต

6. พยากรณ์ความต้องการน้ำในอนาคต โดยศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของความต้องการน้ำในอดีต (ประเด็นที่ 2) (ตัวแปรตาม) กับข้อมูลเศรษฐกิจ-สังคม (ตัวแปรอิสระ) ได้แก่ จำนวนประชากร การเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมและการเกษตร และนำสมการความสัมพันธ์ที่ได้มาคำนวณหาความต้องการน้ำในอนาคต โดยปรับเปลี่ยนข้อมูลเศรษฐกิจ-สังคมที่สะท้อนถึงอนาคต

ประเด็นที่ 2 : ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลความต้องการน้ำ (Water Demand)

ข้อมูลความต้องการน้ำในพื้นที่ศึกษาครอบคลุมทุกกิจกรรมการใช้น้ำในลุ่มน้ำปิงตอนล่างและลุ่มเจ้าพระยา ได้แก่ (1) ความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรม (Agricultural Water Demand) (2) ความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคและการอุตสาหกรรม (Water Supply and Industrial Water Demand) และ (3) ความต้องการน้ำเพื่อควบคุมสภาพลำนน้ำและรักษาระบบนิเวศท้ายเขื่อน (Environmental Flow Requirement) มีรายละเอียดของขั้นตอนการวิจัยดังนี้

■ ความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรม (Agricultural Water Demand)

3 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเขื่อนภูมิพล ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

1. รวบรวมข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ข้อมูลฝน ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูก ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ และข้อมูลหตุยภูมิอื่นๆ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลประกอบในการสอบเทียบผลการประมาณการความต้องการน้ำในพื้นที่ศึกษา

2. ประยุกต์ใช้ Cloud-Based IrrisAT Application ในการติดตามค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Crop Coefficient) เพื่อนำมาใช้ในการประมาณการความต้องการน้ำของพืชรายวัน (Daily Crop Water Use) ในพื้นที่โครงการชลประทานของกลุ่มน้ำปิงตอนล่างและลุ่มเจ้าพระยาตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน และใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้าในแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ และอาศัยข้อมูลภูมิอากาศที่รวบรวมได้จากกรมอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่ศึกษามาคำนวณหาค่าปริมาณการคายระเหยของพืชอ้างอิง (Evapotranspiration, ET_o) โดยใช้สมการ FAO Penman-Monteith (Hornbuckle et al., 2016) อย่างไรก็ดี การคาดการณ์ความต้องการน้ำของพืชรายวันล่วงหน้า 7 วัน (Forecasted Crop Water Use) ด้วย Cloud-Based IrrisAT Application ในพื้นที่ประเทศไทยยังไม่สามารถดำเนินการได้เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องฐานข้อมูลภูมิอากาศของสถานีภาคพื้นดินที่ยังไม่สมบูรณ์เพียงพอ

3. ทำการวิเคราะห์ความต้องการน้ำของพืชรายวัน (Daily Crop Water Use) จากผลลัพธ์ที่ได้จาก Cloud-Based IrrisAT Application ในพื้นที่ศึกษา และเปรียบเทียบกับรายงานผลการศึกษาต่าง ๆ ที่ผ่านมา และแผนการจัดสรรน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

■ ความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค การอุตสาหกรรม และความต้องการน้ำอื่น ๆ (Water Supply and Industrial Water Demands and Other Water Uses)

1. รวบรวมข้อมูลประชากรในพื้นที่ศึกษาจากอดีตถึงปัจจุบัน และข้อมูลอัตราการใช้น้ำของประชากรจากการตรวจเอกสาร

2. จัดแบ่งลักษณะชุมชนในพื้นที่ศึกษาออกเป็น 2 ลักษณะ คือ (1) ชุมชนในเขตเมือง และ (2) ชุมชนในชนบท

3. คาดการณ์การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรในอนาคตในพื้นที่ศึกษาตามลักษณะชุมชนโดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ทางสถิติ

4. ประมาณการความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคในปัจจุบันและอนาคตตามลักษณะชุมชน

5. รวบรวมข้อมูลโรงงานอุตสาหกรรม สถิตินักท่องเที่ยว และข้อมูลที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ

6. คาดการณ์การเพิ่มขึ้นของจำนวนสถิตินักท่องเที่ยวในอนาคตในพื้นที่ศึกษา

7. ประมาณการความต้องการเพื่อการอุตสาหกรรม การกีฬาและท่องเที่ยวในปัจจุบันและอนาคต

8. ศึกษาเปรียบเทียบปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค การอุตสาหกรรม การกีฬาและท่องเที่ยว กับรายงานผลการศึกษาที่ผ่านมาในพื้นที่ศึกษา

■ ความต้องการน้ำเพื่อควบคุมสภาพลำน้ำและรักษาระบบนิเวศท้ายเขื่อน (Environmental Flow Requirement)

1. รวบรวมข้อมูลอัตราการระบายน้ำท้ายเขื่อนภูมิพล อัตราการระบายน้ำท้ายเขื่อนเจ้าพระยา ข้อมูลฝน ข้อมูลปริมาณน้ำท่า ข้อมูลระดับคุณภาพน้ำบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา และข้อมูลที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ

2. ประมาณการความต้องการน้ำเพื่อควบคุมสภาพลำน้ำและรักษาระบบนิเวศท้ายเขื่อนภูมิพล โดยคัดเลือกวิธีโค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลา (Flow Duration Curve Method) ที่อยู่ในกลุ่มวิธีทางอุทกวิทยาที่ได้รับความนิยม และทำการเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ผ่านมาจากการตรวจเอกสาร

3. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระบายน้ำรายวัน (Daily Discharge) ทำเยื่อนเจ้าพระยา (C.13) กับค่าความเค็ม (Salinity) ราย 10 นาทีที่สถานีสูบน้ำสำแล (S1) ของการประปานครหลวง ในรูปสมการการถดถอยทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย (Regression Equation) เพื่อกำหนดความต้องการน้ำเพื่อควบคุมสภาพลำน้ำและรักษาระบบนิเวศทำเยื่อน และแนะนำค่าอัตราการระบายน้ำจากเขื่อนเจ้าพระยาที่เหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์โดยอ้างอิงสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ซึ่งครอบคลุมปัจจัยปัญหาการรุกล้ำของน้ำเค็มบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา

วัตถุประสงค์ที่ 2 : ศึกษาและวิเคราะห์แนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลในปัจจุบัน (Current Reservoir Operation) และพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำโดยอาศัยกล่องเครื่องมือ MATLAB Simulink Toolbox มีรายละเอียดของขั้นตอนการวิจัยดังนี้

1. รวบรวมข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลรายวัน ได้แก่ ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง ปริมาณการระเหยของน้ำ ปริมาณน้ำเก็บกัก ปริมาณการปล่อยน้ำ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ และข้อมูลอื่น ๆ

2. ศึกษาและทบทวนข้อมูลปริมาณการปล่อยน้ำ ข้อมูลความต้องการน้ำ ใ้คงเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่ปรับปรุงล่าสุดของเขื่อนภูมิพลในปัจจุบัน รวมทั้งวิเคราะห์แนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลด้วยใ้คงเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำในอดีตถึงปัจจุบัน ตลอดจนประเมินประสิทธิผลของการปฏิบัติงานในการตอบสนองความต้องการน้ำทุกกิจกรรมการใช้น้ำทางตอนล่าง และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้

3. วิเคราะห์แนวทางการจัดสรรน้ำร่วมกันระหว่างเขื่อนภูมิพลและ 3 เขื่อนหลัก ได้แก่ เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน และเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ที่บริหารจัดการน้ำร่วมกันเป็นระบบในลักษณะของอ่างพวง โดยมีใ้หนดความต้องการน้ำเดียวกัน ทั้งนี้จะอาศัยฐานข้อมูลการจัดสรรน้ำรายวันของแต่ละเขื่อนตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันมาวิเคราะห์สำหรับนำมากำหนดสัดส่วนการจัดสรรน้ำ (Water Allocation Ratio) ที่สะท้อนการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำจริง รวมทั้งวิเคราะห์แผนการเก็บกักน้ำในอ่างเก็บน้ำล่วงหน้าก่อนถึงช่วงฤดูแล้งของเขื่อนภูมิพลโดยผ่านช่องทางการจัดการประชุมระดมสมองเพื่อหารือกับบุคลากรสายปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องในหน่วยงานหลัก ได้แก่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย กรมชลประทาน โดยตรง

4. พัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลโดยอาศัยชุดโปรแกรม MATLAB รุ่น 2019a ภายใต้ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยมหิดล ซึ่งแบบจำลองจะถูกพัฒนาในลักษณะชุดคำสั่งแบบ Block Diagram ด้วย MATLAB/Simulink การพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลมีวัตถุประสงค์หลักที่จะเลียนแบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำจริงรายวันของระบบใ้ใกล้เคียงมากที่สุด ทั้งนี้จะต้องกำหนดเงื่อนไขและเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ใ้สอดคล้องกับการจัดสรรน้ำในสถานการณ์จริงในอดีตถึงปัจจุบัน แบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาขึ้นจะมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน คือ

(4.1) ส่วนของข้อมูลนำเข้า (Input Data) เป็นส่วนที่แสดงผลของข้อมูลนำเข้าซึ่งประกอบด้วยข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ ได้แก่ ข้อมูลฝน ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง ข้อมูลปริมาณการระเหยของน้ำ ข้อมูลปริมาณการรั่วซึมของน้ำ ข้อมูลปริมาณการปล่อยน้ำจริง และข้อมูลที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ โดยนำเข้าในรูปของอนุกรมเวลาสำหรับใ้นำเข้าใ้วิเคราะห์ในส่วนถัดไป

(4.2) ส่วนของกระบวนการสมดุลอ่างเก็บน้ำและการกำหนดการปล่อยน้ำ (Reservoir Water Balance Processes and Operations) ทั้งนี้ หลักการจำลองระบบเชิงพลวัต (System Dynamic Approach) จะถูกนำมาประยุกต์ใ้ใช้โดยพิจารณาปริมาตรเก็บกักน้ำเป็น Stock และปัจจัยเข้า-ออกต่าง ๆ ในระบบเป็น Flow และกำหนดการปล่อยน้ำโดยอาศัยใ้คงเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่ปรับปรุงล่าสุดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

(4.3) ส่วนการประเมินสมรรถนะของระบบการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Performance Assessment) ที่แสดงผลทั้งในรูปของประสิทธิผลในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ ได้แก่ ดัชนีการระบายน้ำรายปีเฉลี่ย (Mean Annual Release) ดัชนีการผลิตพลังงานไฟฟ้ารายปีเฉลี่ย (Mean Annual Energy Production) เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักหลังสิ้นสุดฤดูฝน (% Water Storage at the End of Wet Season) เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักหลังสิ้นสุดการจำลองระบบ (%Ending Storage) และดัชนีแสดงผลการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ ได้แก่ ดัชนีความน่าเชื่อถือได้ (Reliability Index) ดัชนีวัดระดับความรุนแรง (Vulnerability Index) และดัชนีวัดโอกาสการฟื้นตัวของระบบ (Resiliency Index)

5. ทำการจำลองผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในระยะยาวด้วยโค้ดเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยระยะยาวในสถานการณ์ปัจจุบัน

วัตถุประสงค์ที่ 3 : พัฒนากลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ (Reservoir Re-Operation) เพื่อบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล 4 แนวทาง ด้วยเทคนิคการจำลองระบบ (Simulation Technique) และเทคนิคการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization Technique) โดยอาศัยหลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence-AI) ได้แก่ (1) โค้ดเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่ (Adapted Rule Curve) (2) เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging (Hedging Rule) (3) แบบจำลองฟัซซี่ลอจิกดั้งเดิม (Conventional Fuzzy Model) และแบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟัซซี่แบบปรับตัวได้และเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model with Reinforcement Learning) และ (4) แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Constraint Programming and Machine Learning)

■ แนวทางที่ 1 โค้ดเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่ (Adapted Rule Curve)

1. นำเข้าข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ 2 ประเภท คือ (1) ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการตรวจวัดในอดีตถึงปัจจุบัน และ (2) ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำสังเคราะห์ในอนาคตจากปัจจัยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกและการพัฒนาทางเศรษฐกิจ-สังคมที่มีต่อฐานข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ

2. ปรับเปลี่ยนโค้ดเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Adapted Rule Curve) ใหม่และนำเข้าในแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลที่พัฒนามาข้างต้นโดยทำการจำลองผลใน 2 แนวทางที่สำคัญคือ (1) ปรับเพิ่มหรือลด Upper Rule Curve (URC) ที่ปรับปรุงล่าสุดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในปี พ.ศ. 2555 (2) ปรับเพิ่มหรือลด Lower Rule Curve (LRC) ที่ปรับปรุงล่าสุดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2555 ทั้งนี้ได้กำหนดเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating Policy) ที่ผนวกแนวความคิดการบริหารจัดการความต้องการน้ำท้ายเขื่อนสำหรับใช้กำหนดแนวทางการปล่อยน้ำจากอ่างเก็บน้ำเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำและปรับลดปริมาณน้ำที่ระบายส่วนเกิน (Surplus Release) ในสถานการณ์ที่ปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำเกินระดับ Upper Rule Curve รวมทั้งยังได้ปรับลดปริมาณน้ำที่ระบายท้ายเขื่อน (Downstream Water Release) ตามเงื่อนไขการระบายน้ำต่ำสุดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยอีกด้วย สำหรับรายละเอียดของการกำหนดสมมติฐานในจำลองระบบ 5 กรณีแสดงในตารางที่ 3-1 และการกำหนดเกณฑ์การระบายน้ำด้วยโค้ดเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแสดงในรูปที่ 3-2 ดังนี้

ตารางที่ 3-1 รายละเอียดของสมมติฐานในจำลองระบบด้วยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่

กรณี	ลักษณะสำคัญ	ช่วงการจำลองระบบ
สถานการณ์ปัจจุบัน-อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอดีตถึงปัจจุบัน (Observed Inflow)		
กรณีอ้างอิง (Reference Scenario)	อาศัยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการ อ่างเก็บน้ำที่พัฒนาในปี พ.ศ. 2555	พ.ศ. 2555-2561
2	ปรับเพิ่มระดับ URC +0.50 เมตร ^{1/}	พ.ศ. 2555-2561
3	ปรับลดระดับ URC -0.50 เมตร ^{1/}	พ.ศ. 2555-2561
4	ปรับเพิ่มระดับ LRC +0.50 เมตร ^{1/}	พ.ศ. 2555-2561
5	ปรับลดระดับ LRC -0.50 เมตร ^{1/}	พ.ศ. 2555-2561
สถานการณ์อนาคต-อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอนาคตจากแบบจำลอง RCP 4.5 (Projected Inflow)		
6	อาศัยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการ อ่างเก็บน้ำที่พัฒนาในปี พ.ศ. 2555	พ.ศ. 2555-2561

หมายเหตุ : ^{1/}ปรับเปลี่ยนจากโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาขึ้นโดย กฟผ. ในปี พ.ศ. 2555

3. ทำการจำลองผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำระยะยาวในสถานการณ์ปัจจุบันและสถานการณ์ในอนาคต

การกำหนดเกณฑ์การระบายน้ำด้วยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ :
Standard Operating Policy (SOP)

Input Parameters :

- Initial Storage, St
- Reservoir Inflow, It
- Evaporation Losses, Et
- Water Demand, Dt
- Water Level, WLt
- Upper Rule Curve, URC
- Lower Rule Curve, LRC
- Normal Pool Level, NPL
- Minimum Pool Level, MPL
- Minimum Water Requirement, MWr
- Maximum Turbine Discharge, TQ

Outputs :

- Ending Storage, St+1
- Water Release, Rt

Standard Operating Policy :

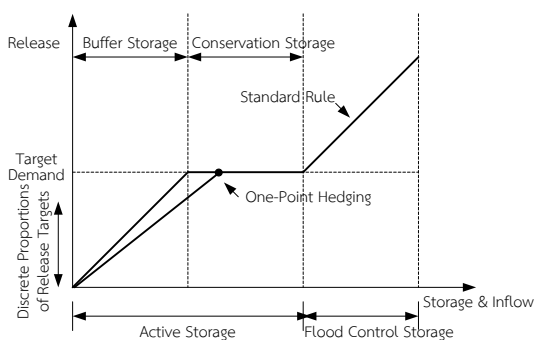
- | | |
|---------------------------------------|---|
| <input type="checkbox"/> Rt = 0 | WLt < MPL; |
| <input type="checkbox"/> Rt = MWr | LRC <= WLt < URC and Buffer Storage < Dt; |
| <input type="checkbox"/> Rt = Dt | LRC <= WLt < URC and Buffer Storage > Dt; |
| <input type="checkbox"/> Rt = TQ | WLt >= URC and Surplus Water < TQ; |
| <input type="checkbox"/> Rt = St-Surc | WLt >= URC and Surplus Water > TQ; |
| <input type="checkbox"/> Rt = Dt | WLt >= NPL and Surplus Water < Dt; |
| <input type="checkbox"/> Rt = St-Surc | WLt >= NPL and Surplus Water > Dt |

รูปที่ 3-2 การกำหนดเกณฑ์การระบายน้ำด้วยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ

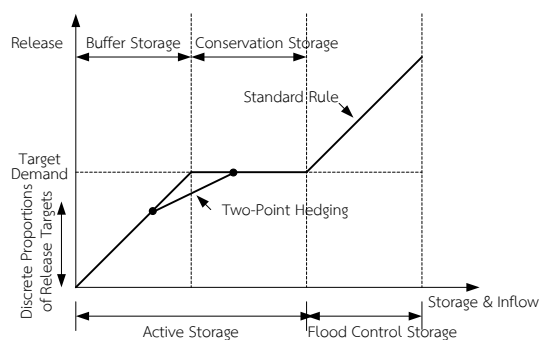
■ แนวทางที่ 2 เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging (Hedging Rule)

1. นำเข้าข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ 2 ประเภท คือ (1) ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการตรวจวัดในอดีตถึงปัจจุบัน และ (2) ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำสังเคราะห์ในอนาคตจากปัจจัยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกและการพัฒนาทางเศรษฐกิจ-สังคมที่มีต่อฐานข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ

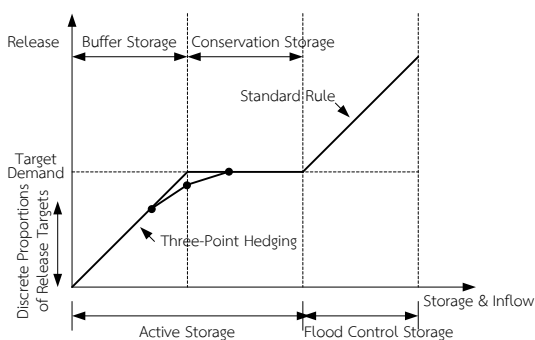
2. นำเสนอเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging ใน 4 รูปแบบคือ One-Point Hedging, Two-Point Hedging, Three-Point Hedging และ Zone-Based Hedging ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3-3



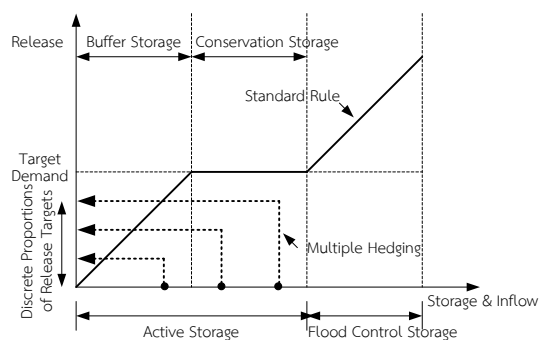
(a) One-Point Hedging



(b) Two-Point Hedging



(c) Three-Point Hedging



(d) Zone-Based Hedging

รูปที่ 3-3 นโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging

One-Point Hedging : การระบายน้ำจะเริ่มต้นจากจุดกำเนิดและจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเส้นตรงที่มีความชันน้อยกว่า 1 จนกระทั่งไปตัดเส้นระดับเป้าหมายของการระบายน้ำ

Two-Point Hedging : เป็นเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงตัดผ่านจุดตัด 2 จุด คือ จุดแรกจะอยู่สูงกว่าจุดกำเนิดขึ้นไปและอยู่บนเส้นนโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบมาตรฐานในช่วงที่เกิดการขาดน้ำ และจุดที่สองจะเป็นจุดตัดที่อยู่บนเส้นระดับเป้าหมายของการระบายน้ำ โดยเส้นตรงที่ตัดผ่านนี้จะมีความชันน้อยกว่า 1

Three-Point Hedging : เป็นเกณฑ์ที่เพิ่มจุดตรงกลางขึ้นอีกหนึ่งจุดจากเกณฑ์การปฏิบัติการแบบ Two-Point Hedging

Zone-Based Hedging : กำหนดสัดส่วนการระบายน้ำในแต่ละโซนเก็บกักเทียบกับปริมาณความต้องการน้ำตามเป้าหมายของระบบในลักษณะของสัดส่วนการระบายน้ำแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Proportion)

อาจกล่าวได้ว่า นโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging เป็นแนวคิดที่พยายามลดการส่งน้ำในบางช่วงเวลาเพื่อเก็บกักน้ำไว้ใช้ในเวลาลัดไป แม้ว่าปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่ในอ่างจะสามารถตอบสนองต่อปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายได้อย่างเต็มศักยภาพก็ตาม สำหรับรายละเอียดของการกำหนดสมมติฐานในจำลองระบบ 5 กรณีแสดงในตารางที่ 3-2 และการกำหนดเกณฑ์การระบายน้ำเป้าหมายด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging รูปแบบต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 3-4 ถึงรูปที่ 3-7 ดังนี้

ตารางที่ 3-2 รายละเอียดของสมมติฐานในจำลองระบบด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging

กรณี	ลักษณะสำคัญ	ช่วงการจำลองระบบ
สถานการณ์ปัจจุบัน-อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอดีตถึงปัจจุบัน (Observed Inflow)		
1	One-Point Hedging	พ.ศ. 2555-2561
2	Two-Point Hedging	พ.ศ. 2555-2561
3	Three-Point Hedging	พ.ศ. 2555-2561
4	Zone-Based Hedging	พ.ศ. 2555-2561
สถานการณ์อนาคต-อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอนาคตจากแบบจำลอง RCP 4.5 (Projected Inflow)		
5	One-Point Hedging	พ.ศ. 2555-2561
6	Two-Point Hedging	พ.ศ. 2555-2561
7	Three-Point Hedging	พ.ศ. 2555-2561
8	Zone-Based Hedging	พ.ศ. 2555-2561

การกำหนดเกณฑ์การระบายน้ำเป้าหมายด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging :
One-Point Hedging Policy

Input Parameters :

- Initial Storage, St
- Reservoir Inflow, It
- Evaporation Losses, Et
- Water Demand, Dt
- Water Level, WLt
- Upper Rule Curve, URC
- Lower Rule Curve, LRC
- Normal Pool Level, NPL
- Minimum Pool Level, MPL
- Available Storage, AS
- Maximum Turbine Discharge, TQ
- WL at One-Point, 1P = (0.4*AS) above MPL
- Near NPL = (0.95*AS) above MPL

Outputs :

- Ending Storage, St+1
- Water Release, Rt

One-Point Hedging Policy :

- | | |
|--|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Rt = Dt | WLt >= 1P; |
| <input type="checkbox"/> Rt = [(WL-MPL)/(1P-MPL)]*Dt | MPL <= WLt <= 1P; |
| <input type="checkbox"/> Rt = 0 | WLt < MPL; |
| <input type="checkbox"/> Rt = Dt | 1P <= WLt < 0.95*AS; |
| <input type="checkbox"/> Rt = St-Snearnpl | WLt >= Near NPL and Surc > TQ; |
| <input type="checkbox"/> Rt = TQ | WLt >= Near NPL and Surc < TQ; |
| <input type="checkbox"/> Rt = St-Snearnpl | WLt >= NPL and Surc > Dt; |
| <input type="checkbox"/> Rt = Dt | WLt >= NPL and Surc < Dt |

รูปที่ 3-4 การกำหนดเกณฑ์การระบายน้ำเป้าหมายด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging :
One-Point Hedging

การกำหนดเกณฑ์การระบายน้ำเป้าหมายด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging :
Two-Point Hedging Policy

Input Parameters :

- Initial Storage, St
- Reservoir Inflow, It
- Evaporation Losses, Et
- Water Demand, Dt
- Water Level, WLt
- Upper Rule Curve, URC
- Lower Rule Curve, LRC
- Normal Pool Level, NPL
- Minimum Pool Level, MPL
- Available Storage, AS
- Maximum Turbine Discharge, TQ
- WL at Two-Point, 2P1st = (0.4*AS) above MPL
- WL at Two-Point, 2P2nd = (0.2*AS) above MPL
- Near NPL = (0.95*AS) above MPL

Outputs :

- Ending Storage, St+1
- Water Release, Rt

Two-Point Hedging Policy :

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> $R_t = [(WL - 2P2nd) / (2P1st - 2P2nd)] * Dt$ | $2P2nd \leq WL_t < 2P1st;$ |
| <input type="checkbox"/> $R_t = [(WL - MPL) / (2P2nd - MPL)] * Dt$ | $MPL \leq WL_t < 2P2nd;$ |
| <input type="checkbox"/> $R_t = 0$ | $WL_t < MPL;$ |
| <input type="checkbox"/> $R_t = Dt$ | $2P1st \leq WL_t < \text{Near NPL};$ |
| <input type="checkbox"/> $R_t = St - S_{nearmpl}$ | $WL_t \geq \text{Near NPL and } Surc > TQ;$ |
| <input type="checkbox"/> $R_t = TQ$ | $WL_t \geq \text{Near NPL and } Surc < TQ;$ |
| <input type="checkbox"/> $R_t = St - S_{nearmpl}$ | $WL_t \geq NPL \text{ and } Surc > Dt;$ |
| <input type="checkbox"/> $R_t = Dt$ | $WL_t \geq NPL \text{ and } Surc < Dt$ |

รูปที่ 3-5 การกำหนดเกณฑ์การระบายน้ำเป้าหมายด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging :
Two-Point Hedging

**การกำหนดเกณฑ์การระบายน้ำเป้าหมายด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging :
Three-Point Hedging Policy**

Input Parameters :

- Initial Storage, St
- Reservoir Inflow, It
- Evaporation Losses, Et
- Water Demand, Dt
- Water Level, WLt
- Upper Rule Curve, URC
- Lower Rule Curve, LRC
- Normal Pool Level, NPL
- Minimum Pool Level, MPL
- Available Storage, AS
- Maximum Turbine Discharge, TQ
- WL at Three-Point, 3P1st = (0.4*AS) above MPL
- WL at Three-Point, 3P2nd = (0.3*AS) above MPL
- WL at Three-Point, 3P3rd = (0.2*AS) above MPL
- Near NPL = (0.95*AS) above MPL

Outputs :

- Ending Storage, St+1
- Water Release, Rt

Three-Point Hedging Policy :

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> $R_t = [(WL-3P3rd)/(3P2nd-3P3rd)]*Dt$ | $3P3rd \leq WLt < 3P2nd;$ |
| <input type="checkbox"/> $R_t = [(WL-MPL)/(3P3rd-MPL)]*Dt$ | $MPL \leq WLt < 3P3rd;$ |
| <input type="checkbox"/> $R_t = 0$ | $WLt < MPL;$ |
| <input type="checkbox"/> $R_t = [(WL-3P2nd)/(3P1st-3P2nd)]*Dt$ | $3P2nd \leq WLt < 3P1st;$ |
| <input type="checkbox"/> $R_t = Dt$ | $3P1st \leq WLt < \text{Near NPL}$ |
| <input type="checkbox"/> $R_t = St - S_{nearmpl}$ | $WLt \geq \text{Near NPL and } Surc > TQ;$ |
| <input type="checkbox"/> $R_t = TQ$ | $WLt \geq \text{Near NPL and } Surc < TQ;$ |
| <input type="checkbox"/> $R_t = St - S_{nearmpl}$ | $WLt \geq NPL \text{ and } Surc > Dt;$ |
| <input type="checkbox"/> $R_t = Dt$ | $WLt \geq NPL \text{ and } Surc < Dt$ |

รูปที่ 3-6 การกำหนดเกณฑ์การระบายน้ำเป้าหมายด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging :
Three-Point Hedging

**การกำหนดเกณฑ์การระบายน้ำเป้าหมายด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging :
Zone-Based Hedging Policy**

Input Parameters :

- Initial Storage, St
- Reservoir Inflow, It
- Evaporation Losses, Et
- Water Demand, Dt
- Water Level, WLt
- Upper Rule Curve, URC
- Lower Rule Curve, LRC
- Normal Pool Level, NPL
- Minimum Pool Level, MPL
- Available Storage, AS
- Maximum Turbine Discharge, TQ
- WL at First Zone, $Z1 = (0.7*AS)$ above MPL
- WL at Second Zone, $Z2 = (0.5*AS)$ above MPL
- WL at Third Zone, $Z3 = (0.25*AS)$ above MPL
- Near NPL = $(0.95*AS)$ above MPL

Outputs :

- Ending Storage, $St+1$
- Water Release, Rt

Zone-Based Hedging Policy :

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> $Rt = 0$ | $WLt < MPL;$ |
| <input type="checkbox"/> $Rt = 0.7*Dt$ | $MPL \leq WLt < Z3;$ |
| <input type="checkbox"/> $Rt = 0.8*Dt$ | $Z3 \leq WLt < Z2;$ |
| <input type="checkbox"/> $Rt = 0.9*Dt$ | $Z2 \leq WLt < Z1;$ |
| <input type="checkbox"/> $Rt = Dt$ | $Z1 \leq WLt \leq NPL;$ |
| <input type="checkbox"/> $Rt = St - S_{nearMPL}$ | $WLt \geq \text{Near NPL and } Surc > TQ;$ |
| <input type="checkbox"/> $Rt = TQ$ | $WLt \geq \text{Near NPL and } Surc < TQ;$ |
| <input type="checkbox"/> $Rt = St - S_{nearMPL}$ | $WLt \geq NPL \text{ and } Surc > Dt;$ |
| <input type="checkbox"/> $Rt = Dt$ | $WLt \geq NPL \text{ and } Surc < Dt$ |

รูปที่ 3-7 การกำหนดเกณฑ์การระบายน้ำเป้าหมายด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging :
Zone-Based Hedging

3. ทำการจำลองผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำระยะยาวในสถานการณ์ปัจจุบันและสถานการณ์ในอนาคต

- **แนวทางที่ 3** การกำหนดการปล่อยน้ำด้วยแบบจำลองฟัซซี่ลอจิกดั้งเดิม (Conventional Fuzzy Model) และแบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟัซซี่แบบปรับตัวได้และเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model with Reinforcement Learning)

1. นำเข้าข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ 2 ประเภท คือ (1) ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการตรวจวัดในอดีตถึงปัจจุบัน และ (2) ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำสังเคราะห์ในอนาคตจากปัจจัยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกและการพัฒนาทางเศรษฐกิจ-สังคมที่มีต่อฐานข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ

2. ประยุกต์ใช้แบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลที่พัฒนามาข้างต้น และพัฒนาชุดคำสั่ง (Source Code) แบบ M-file ร่วมกับชุดคำสั่งแบบ Block Diagram ด้วย MATLAB/Simulink เพื่อเพิ่มกระบวนการตัดสินใจปล่อยน้ำ (Reservoir Decision Making Processes) ซึ่งแสดงกระบวนการตัดสินใจในการระบายน้ำในอ่างเก็บน้ำลงท้ายน้ำเพื่อตอบสนองต่อกิจกรรมการใช้น้ำต่าง ๆ ในกระบวนการนี้จะพัฒนาแบบจำลองบนฐานของ AI-Based Approach โดยนำเทคนิค Artificial Intelligences (AIs) ประกอบด้วย Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System ซึ่งเป็นการนำเอาเทคนิค Artificial Neural Networks มาใช้ในการสร้าง/ปรับปรุง ข้อมูลและกฎการควบคุมแบบ Fuzzy Logic System ซึ่งใช้ในการควบคุมการปล่อยน้ำ ถัดมาเป็นส่วนของ Optimization เป็นการประเมินแนวทางที่เหมาะสมที่สุดในการปล่อยน้ำ ในขั้นตอนนี้ เทคนิค Reinforcement Learning Approach จะถูกนำมาประยุกต์ใช้โดยจะพิจารณาปริมาณน้ำเก็บกัก (Storage) แทน State การปล่อยน้ำ (Release) เป็น Action ส่วนระบบจำลองจะแทนเป็น Environment โดยพิจารณาช่วงการปล่อยน้ำที่เหมาะสมเป็น Reward ให้กับระบบ สำหรับแนวคิดในการกำหนดการปล่อยน้ำมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนหลัก คือ (1) ส่วนที่ 1 การประยุกต์เทคนิคปัญญาประดิษฐ์โดยอาศัยการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ในการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างและนำมาเป็นข้อมูลป้อนเข้าในการกำหนดการปล่อยน้ำจากอ่างเก็บน้ำ (Release Determination) และ (2) ส่วนที่ 2 การประยุกต์เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ในการกำหนดการปล่อยน้ำที่เหมาะสมที่สุดโดยการผสมผสานระหว่างเทคนิคโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ (Artificial Neuron Networks) ร่วมกับหลักการฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) หรือที่เรียกว่า Adaptive Neuro Fuzzy Optimization และอาศัยการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning) มาช่วยวิเคราะห์รูปแบบการปล่อยน้ำจากเขื่อนที่เหมาะสมตามเป้าหมายหรือรูปแบบการปล่อยน้ำที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ซึ่งในที่นี้จะกำหนดเส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายสูงสุด (Upper Storage Line) โดยพิจารณาจากกราฟน้ำท่วมออกแบบ (Flood Hydrograph) ที่รอบปีการเกิดซ้ำที่กำหนดสำหรับนำมาใช้ในการกำหนดการปล่อยน้ำในช่วงน้ำมาก (Refilled Periods) และจะกำหนดเส้นปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายต่ำสุด (Lower Storage Line) โดยพิจารณาจากเงื่อนไขของปริมาณความต้องการน้ำเพื่อควบคุมสภาพลำน้ำและรักษาระบบนิเวศท้ายเขื่อน และความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรม การอุปโภคบริโภค การอุตสาหกรรม และความต้องการน้ำอื่น ๆ ทั้งในช่วงฤดูแล้งและฤดูฝน รวมทั้งแนวทางปฏิบัติในการสำรองน้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำก่อนช่วงฤดูแล้งที่ดำเนินการโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในปัจจุบัน

3. ทำการจำลองผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำระยะยาวในสถานการณ์ปัจจุบันและสถานการณ์ในอนาคต

■ แนวทางที่ 4 การกำหนดการปล่อยน้ำที่ดีที่สุดด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด

ร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Constraint Programming and Machine Learning)

1. นำเข้าข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ 2 ประเภท คือ (1) ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการตรวจวัดในอดีตถึงปัจจุบัน และ (2) ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำสังเคราะห์ในอนาคตจากปัจจัยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกและการพัฒนาทางเศรษฐกิจ-สังคมที่มีต่อฐานข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ

2. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าปริมาณการปล่อยน้ำที่ดีที่สุดของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Constraint Programming and Machine Learning) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) การเรียนรู้แบบเครื่องนั้นสามารถนำมาใช้คาดการณ์ข้อมูลต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในอนาคต ซึ่งจะมีส่วนช่วยให้แบบจำลองคณิตศาสตร์ในรูปของการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดมีประสิทธิภาพมากขึ้นและช่วยในการประเมินแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์อีกด้วย โดยงานวิจัยนี้จะพัฒนาโปรแกรมเชิงข้อจำกัดด้วยภาษา MiniZinc ในการแก้โจทย์ปัญหาสำหรับการกำหนดรูปแบบปัญหาและการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดในการหาค่าที่ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) สำหรับรายละเอียดเบื้องต้นมีดังนี้

■ ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

ค่าการปล่อยน้ำที่เหมาะสมรายวัน (Optimum Daily Release) ของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล

■ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาตามกลุ่มความต้องการน้ำและวัตถุประสงค์ของโครงการดังนี้คือ

(1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการตอบสนองความต้องการน้ำเพื่อกิจกรรมต่าง ๆ ทางด้านท้ายเขื่อนโดยลดปัญหาการขาดแคลนน้ำให้เหลือน้อยที่สุด (Minimization of Water Demand Deficit)

(2) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำด้วยแนวคิดการลดการปล่อยน้ำส่วนเกินในช่วงน้ำหลาก (Minimization of Surplus Release during Refilled Period)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $F_1(X)$: เป็นฟังก์ชันผลรวมของผลต่างระหว่างความต้องการน้ำและค่าการปล่อยน้ำยกกำลังสอง (Sum of Squared Deviation of Releases from Downstream Water Demands) ดังแสดงในสมการ

$$\text{Min}F_1(X) = \sum_{t=1}^N (D_t - R_t)^2 \quad \text{-----}(3-1)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $F_2(X)$: เป็นฟังก์ชันผลรวมของผลต่างสัมบูรณ์ระหว่างปริมาณน้ำเก็บกักที่เวลาใด ๆ กับปริมาณน้ำเก็บกักที่เส้นโค้งระดับควบคุมน้ำตอนบน (Upper Rule Curve) ดังแสดงในสมการ

$$\text{Min}F_2(X) = \sum_{t=1}^N \text{abs}(S_t - \text{SURC}) \quad \text{-----}(3-2)$$

■ สมการข้อจำกัด (Constraint)

งานวิจัยนี้ได้กำหนดรูปแบบของสมการข้อจำกัดของแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดใน 2 ลักษณะเพื่อใช้กำหนดปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลตามสถานการณ์ในแต่ละฤดูได้แก่ (1) สมการข้อจำกัดรายฤดูกาล (Seasonal Constraint) โดยแบ่งเป็นฤดูฝน (ระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม) และฤดูแล้ง (ระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายน) และ (2) สมการข้อจำกัดรายปี (Yearly Constraint) โดยกำหนดรูปแบบสมการข้อจำกัดเดียวกันทั้งปีในลักษณะเดียวกันกับสมการข้อจำกัดที่ใช้ในช่วงฤดูฝน (รูปที่ 3-8 และรูปที่ 3-9) โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

สมการข้อจำกัดของสมดุลอ่างเก็บน้ำ

$$S_{t+1} = S_t + I_t - E_t - R_t \quad \text{-----}(3-3)$$

สมการข้อจำกัดของปริมาณน้ำเก็บกัก

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad \text{-----}(3-4)$$

สมการข้อจำกัดของการระบายน้ำ

การกำหนดสมการข้อจำกัดเพื่อใช้กำหนดปริมาณการระบายน้ำในแต่ละช่วงเวลาของเขื่อนภูมิพลนั้น จะพิจารณาจากปัจจัยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำ (Water Demand) และปริมาณ Sideflow/Localized Flow ของสถานีท้ายเขื่อนภูมิพลได้แก่ สถานี W.4A และสถานี CT.2A เป็นหลัก สำหรับข้อมูล Sideflow จะพิจารณาเฉพาะในส่วนของ Direct Flow เท่านั้น และกำหนดเพียง 50% ของปริมาณ Sideflow ตรวจจับทั้งหมดทั้งในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้ง นอกจากนี้ ในช่วงฤดูแล้งจะกำหนดปริมาณการระบายน้ำเพียงแค่ 80%

ของปริมาณความต้องการน้ำเท่านั้นตามหลักการเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำสำหรับใช้ในระยะเวลา โดยมีรูปแบบของสมการข้อจำกัดของการระบายน้ำ

ฤดูฝน :

$$R_t > D_t - (0.5 * SF_t) \quad \text{-----}(3-5)$$

$$R_t = I_t \quad ; S_{t+1} \geq 13,298.9 \text{ ล้านลูกบาศก์เมตร} \\ \text{(ที่ระดับเก็บกัก 259.50 เมตร รทก.)} \quad \text{-----}(3-6)$$

$$R_t = 0.7 * I_t \quad ; S_{t+1} \geq 12,809.6 \text{ ล้านลูกบาศก์เมตร} \\ \text{(ที่ระดับเก็บกัก 258.00 เมตร รทก.)} \quad \text{-----}(3-7)$$

$$R_t = 0.5 * I_t \quad ; S_{t+1} \geq 12,483.4 \text{ ล้านลูกบาศก์เมตร} \\ \text{(ที่ระดับเก็บกัก 257.00 เมตร รทก.)} \quad \text{-----}(3-8)$$

$$R_t = 0.3 * I_t \quad ; S_{t+1} \geq 12,157.2 \text{ ล้านลูกบาศก์เมตร} \\ \text{(ที่ระดับเก็บกัก 256.00 เมตร รทก.)} \quad \text{-----}(3-9)$$

ฤดูแล้ง :

$$R_t \geq (0.8 * D_t) - (0.5 * SF_t) \quad \text{-----}(3-10)$$

และ

$$R_{\min} \leq R_t \leq R_{\max} \quad \text{-----}(3-11)$$

สมการข้อจำกัดอื่น ๆ

$$S_{t+1}, S_t, I_t, E_t, R_t, SF_t \geq 0 \quad \text{-----}(3-12)$$

เมื่อ

- S_{t+1} = ปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำที่เวลา t+1
- S_t = ปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำที่เวลา t
- I_t = ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา t
- SF_t = ปริมาณ Side Flow ที่เวลา t
- E_t = ปริมาณน้ำที่สูญเสียจากอ่างเก็บน้ำในรูปของการระเหยที่เวลา t
- R_t = ปริมาณน้ำทั้งหมดที่ปล่อยออกจากอ่างเก็บน้ำที่เวลา t
- R_{\min} = ปริมาณน้ำต่ำสุดที่จะปล่อยได้จากอ่างเก็บน้ำที่เวลา t ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 5 ล้านลูกบาศก์เมตร
- R_{\max} = ปริมาณน้ำสูงสุดที่จะปล่อยได้จากอ่างเก็บน้ำที่เวลา t ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ ความจุเก็บกักท้ายลำน้ำ
- S_{URC} = ปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำระดับน้ำควบคุมตอนบน
- G_t = พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ที่เวลา t
- H_t = ระดับความสูงของเฮดน้ำที่เวลา t
- η = ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- γ = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ
- N = จำนวนช่วงเวลาที่จะพิจารณาทั้งหมดที่ทำการจำลองระบบ

3. ทำการจำลองผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำระยะยาวในสถานการณ์ปัจจุบันและสถานการณ์ในอนาคต

**การกำหนดรูปแบบของแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในช่วงฤดูแล้ง
(Constraint Programming Model in Dry Season)**

Variables :

- St+1
- St (Smin=3,800 MCM, Smax=13,462 MCM)
- It
- SFt
- Et
- Rt (Rmin=5 MCM, Rmax=103.68 MCM)
- Surc
- Gt (Gmin=0, Gmax=18,331.69 MWhr)
- Ht
- Htf
- Htt
- Dt

Input Parameters :

- Initial Storage, St
- Reservoir Inflow, It
- Sideflow, SFt
- Evaporation Loss, Et
- Storage at Upper Rule Curve, Surc
- Front Water Head, Htf
- Tail Water Head, Htt
- Water Demand, Dt
- Efficiency of Hydropower Plant, e
- Working Hour, Deltat

Constraints :

- St+1 = St + It - Et - Rt
- Smax >= St >= Smin
- Smax >= St+1 >= Smin
- Ht = Htf - Htt
- Rt >= (0.8*Dt) - (0.5*SFt)
- St+1 >= 0
- St >= 0
- It >= 0
- Et >= 0
- Rt >= Rmin
- SFt >= 0
- $Gt = ((e/100)*y*((Rt*(10^6))/(24*60*60))*Ht*Deltat)/10^3$
Where, e = 91.27, y = 9.81
- Demands = total ((Dt-Rt)^2)
- Storage = total absolute value ((St+1)-Surc)

Objective Function :

- Minimize $F_1(X) = \sum (D_t - R_t)^2$
- Minimize $F_2(X) = \sum \text{abs}(S_t - S_{URC})$

Outputs :

- Ending Storage, St+1
- Water Release, Rt

รูปที่ 3-8 การกำหนดรูปแบบของแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในช่วงฤดูแล้ง

การกำหนดรูปแบบของแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในช่วงฤดูฝน
(Constraint Programming Model in Wet Season)

Variables :

- St+1
- St (Smin=3,800 MCM, Smax=13,462 MCM)
- It
- SFt
- Et
- Rt (Rmin=5 MCM, Rmax=103.68 MCM)
- Surc
- Gt (Gmin=0, Gmax=18,331.69 MWhr)
- Ht
- Htf
- Htt
- Dt

Input Parameters :

- Initial Storage, St
- Reservoir Inflow, It
- Sideflow, SFt
- Evaporation Loss, Et
- Storage at Upper Rule Curve, Surc
- Front Water Head, Htf
- Tail Water Head, Htt
- Water Demand, Dt
- Efficiency of Hydropower Plant, e
- Working Hour, Deltat

Constraints :

- St+1 = St + It - Et - Rt
- Smax >= St >= Smin
- Smax >= St+1 >= Smin
- Ht = Htf - Htt
- Rt >= Dt - (0.5*SFt)
- If St+1 >= 13,298.9 then Rt >= It
- Elseif St+1 >= 12,809.6 then Rt >= 0.7*It
- Elseif St+1 >= 12,483.4 then Rt >= 0.5*It
- Elseif St+1 >= 12,157.2 then Rt >= 0.3*It
- St+1 >= 0
- St >= 0
- It >= 0
- Et >= 0
- Rt >= Rmin
- SFt >= 0
- $Gt = ((e/100)*y*((Rt*(10^6))/(24*60*60))*Ht*Deltat)/10^3$
Where, e = 91.27, y = 9.81
- Demands = total ((Dt-Rt)^2)
- Storage = total absolute value ((St+1)-Surc)

Objective Function :

- Minimize $F_1(X) = \sum (D_t - R_t)^2$
- Minimize $F_2(X) = \sum \text{abs}(S_t - S_{URC})$

Outputs :

- Ending Storage, St+1
- Water Release, Rt

รูปที่ 3-9 การกำหนดรูปแบบของแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในช่วงฤดูฝน

วัตถุประสงค์ที่ 4 : ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิผลของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในปัจจุบัน (Performance of Conventional Operation) และประสิทธิผลที่ได้จากกลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำใหม่ (Performance and Effectiveness of Reservoir Re-Operation) มีรายละเอียดของขั้นตอนการวิจัยดังนี้

1. ศึกษาเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในรูปของประสิทธิผลในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ และดัชนีแสดงผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ ได้แก่ ดัชนีการระบายน้ำรายปีเฉลี่ย (Mean Annual Release) ดัชนีการผลิตพลังงานไฟฟ้ารายปีเฉลี่ย (Mean Annual Energy Production) ดัชนีความน่าเชื่อถือได้ (Reliability Index) ดัชนีวัดระดับความรุนแรง (Vulnerability Index) และดัชนีวัดโอกาสการฟื้นตัวของระบบ (Resiliency Index) จากการนำเข้าสู่ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำในปัจจุบันและจากการปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ 4 แนวทาง และวิเคราะห์ความเป็นไปได้และให้ข้อเสนอแนะในการปรับเปลี่ยนแนวทางการบริหารจัดการน้ำต้นทุนของเขื่อนภูมิพลในปัจจุบันสำหรับปรับใช้ในอนาคต

2. นำเข้าสู่ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำในอนาคตที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกและการพัฒนาทางเศรษฐกิจ-สังคมที่มีต่อฐานข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ และทำการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและประเมินประสิทธิผลในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ และดัชนีแสดงผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ เพื่อวิเคราะห์สถานการณ์การบริหารจัดการน้ำต้นทุนของเขื่อนภูมิพลในอนาคต

3.2 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE11

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MIKE11 ที่ถูกพัฒนาโดย Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering ประเทศเดนมาร์ก เพื่อคำนวณปริมาณน้ำที่เข้าสู่เขื่อนภูมิพล ทั้งนี้ ชุดโมดูลของ MIKE11 ที่นำมาใช้ภายในโครงการ ประกอบด้วยแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า MIKE11-RR NAM Model (Rainfall-Runoff Model) และแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ MIKE11-HD (Hydrodynamic Model)

3.2.1 หลักการคำนวณของ MIKE11

3.2.1.1 MIKE11-RR NAM Model

แบบจำลอง MIKE11-RR NAM มีลักษณะเป็น Lumped Model คำนวณปริมาณน้ำท่าที่เกิดจากเหตุการณ์ฝนของแต่ละพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์เฉพาะที่เป็นตัวแทนของพื้นที่น้ำย่อยนั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3-10 โดยหลักการปรับพารามิเตอร์ดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับข้อมูลทางอุทกวิทยาที่มีการบันทึกในอดีต เช่น ปริมาณฝน ปริมาณน้ำท่า อัตราการระเหย เป็นต้น ดังสรุปพารามิเตอร์เปรียบเทียบในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 พารามิเตอร์เปรียบเทียบของ MIKE11 RR NAM Model

ลำดับที่	พารามิเตอร์	ช่วงค่า	รายละเอียด
1	U_{max}	10-20 มม.	ปริมาณน้ำที่ตกค้างอยู่ตามใบไม้/ผิวดิน และแหล่งน้ำผิวดิน
2	L_{max}	50-300 มม.	ความสามารถในการเก็บกักน้ำในแหล่งน้ำชั้นล่าง
3	CQOF	0.00-1.00	ค่าสัมประสิทธิ์การเกิดน้ำท่า
4	CKIF	500-1,000 ซม.	กำหนดเวลาในการเกิดน้ำซึมผิวดิน (Interflow)

ลำดับที่	พารามิเตอร์	ช่วงค่า	รายละเอียด
5	CK1,2	3-48 ซม.	การเคลื่อนตัวของน้ำผิวดินและน้ำซึมผิวดินตามความลาดชันของกลุ่มน้ำและตามแม่น้ำมายังท้ายน้ำของกลุ่มน้ำ
6	TOF	0.00-0.99	ค่าสัมประสิทธิ์เริ่มต้นของการไหลผิวดิน
7	TIF	0.00-0.99	ค่าสัมประสิทธิ์เริ่มต้นของการไหลซึมผิวดิน
8	TG	0.00-0.99	ค่าสัมประสิทธิ์เริ่มต้นของการไหลซึมผิวดิน
9	CKBF	ซม.	ความยาวนานในการเกิดการไหลของน้ำใต้ผิวดิน (Baseflow)

3.2.1.1 MIKE11 RR-HD Model

แบบจำลอง MIKE11-HD นำผลการจำลองน้ำฝน-น้ำท่าของ MIKE11-RR มาคำนวณการไหลและระดับน้ำของลำน้ำในลักษณะ Unsteady Non-Uniform Flow ด้วยสมการ Saint Venant Equation แบบหนึ่งมิติ (1-Dimension Flow) ประกอบด้วย สมการต่อเนื่อง (Continuity Equation) หรือสมการสมมูลมวล (Mass Conservation)

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad \text{-----}(3-13)$$

และสมการโมเมนตัม (Momentum equation) :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{gn^2 Q |Q|}{AR^{\frac{4}{3}}} = 0 \quad \text{-----}(3-14)$$

เมื่อ

- Q = อัตราการไหล (Discharge)
- x = ระยะทางของการไหล (Distance)
- A = พื้นที่หน้าตัดของการไหล (Cross-Section Area)
- t = เวลาการไหล (Time)
- q = อัตราการไหลเข้าด้านข้าง (Lateral Flow)
- H = ระดับน้ำ (Water Level) = h + z
- h = ความลึกการไหล (Water Depth)
- z = ระดับท้องน้ำ (Bed Elevation)
- R = รัศมีชลศาสตร์ (Hydraulic Radius)
- g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Gravitational Acceleration)
- n = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแมนนิง (Manning Roughness Coefficient)

ซึ่งใช้ Implicit Finite Difference Scheme มาใช้ในการแก้สมการต่อเนื่องและสมการโมเมนตัม อีกทั้ง การติดตั้งเขื่อนเพื่อคำนวณปริมาณน้ำเข้าเขื่อนภูมิพลสามารถทำได้ด้วย MIKE11-HD โดยใช้ข้อมูลโค้งความจุ-พื้นที่-ระดับน้ำของอ่างเก็บน้ำและข้อมูลโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) ทั้งนี้ พารามิเตอร์ปรับเทียบคือค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ Manning's Coefficient

3.2.2 การรวบรวมข้อมูล

ในการพัฒนาแบบจำลอง MIKE11 ในพื้นที่การศึกษา คณะผู้วิจัยรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้ในการปรับเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง สรุปได้ดังนี้

-พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยในลุ่มแม่น้ำปิงจากกรมชลประทาน

-ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวันในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 จำนวน 22 สถานี จากกรมชลประทาน ได้แก่ สถานี 070731 และ 170181 และกรมอุตุวิทยามีวิทยา ได้แก่ 300201, 300202, 303201, 303301, 310201, 327301, 327501, 328201, 328202, 328301, 329201, 373201, 373301, 376201, 376202, 376203, 376301, 376401, 380201 และ 400201 ดังรูปที่ 3-11

-ข้อมูลอัตราการระเหยจากผิวดินในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 จำนวน 1 สถานี จากกรมอุตุวิทยามีวิทยา คือ สถานี 48376 ดังรูปที่ 3-12

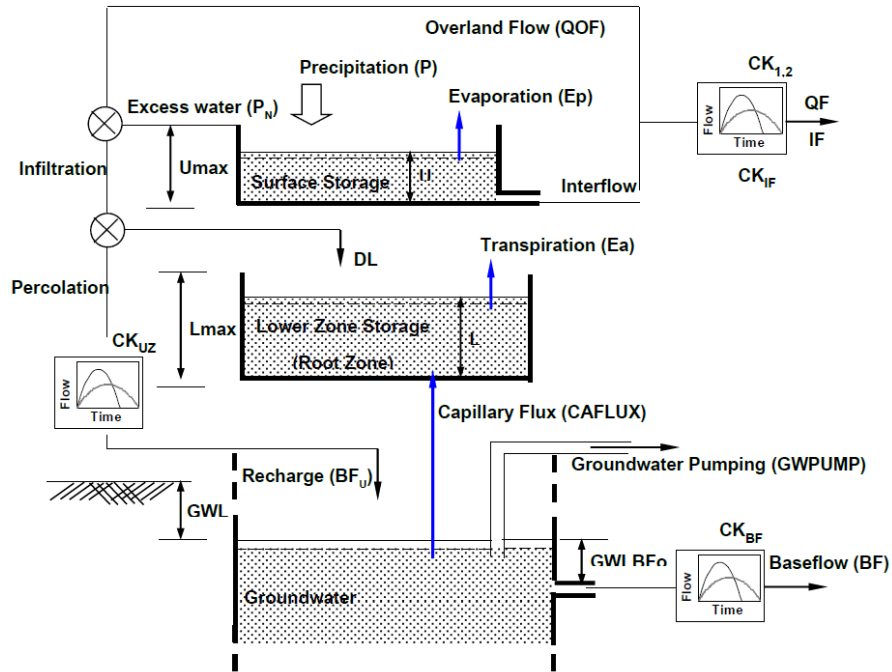
-ข้อมูลระดับน้ำและปริมาณน้ำท่าในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 จำนวน 5 สถานี ได้แก่ สถานี P.4A, P.20, P.21, P.24A และ P.26A ดังรูปที่ 3-13

-ข้อมูลรูปหน้าตัดลำน้ำ จำนวน 128 จุด จากกรมชลประทานและสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ

-เส้นความโค้งความสัมพันธ์ระหว่างระดับ-พื้นที่-ปริมาตรของน้ำในเขื่อนภูมิพลและโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพล (Rule Curve) จากกรมชลประทาน

3.2.3 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง MIKE11

ภาพรวมการพัฒนาแบบจำลอง MIKE11-RR NAM Model และ MIKE11-HD เพื่อประเมินปริมาณน้ำเข้าสู่เขื่อนภูมิพล โดยผลการจำลองน้ำฝน-น้ำท่าของแต่ละลุ่มน้ำย่อยด้วย MIKE11-RR NAM Model จะนำมาเป็นข้อมูลปริมาณน้ำท่าไหลเข้าสู่แม่น้ำปิง ดังแสดงในรูปที่ 3-14



$$P_N = U - U_{max}$$

$$QOF = P_N \cdot CQ_{OF} \cdot \frac{L/L_{max} - TOF}{1 - TOF}$$

$$QIF = U \cdot \frac{1}{CK_{IF}} \cdot \frac{L/L_{max} - TIF}{1 - TIF}$$

$$Inf = P_N - QOF$$

$$G = (P_N - QOF) \cdot \frac{L/L_{max} - TG}{1 - TG}$$

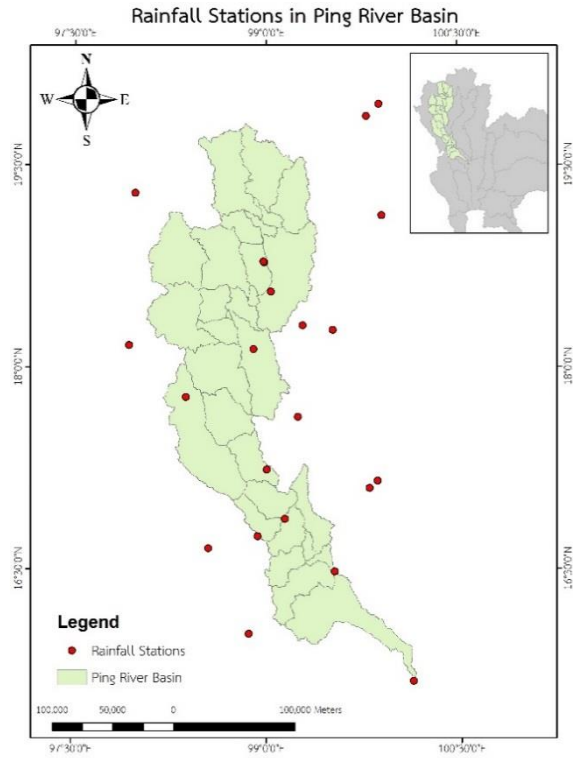
$$DL = (P_N - QOF) - G$$

$$BF = (GWLBF_0 - GWL) \cdot \frac{S_y}{CK_{BF}}$$

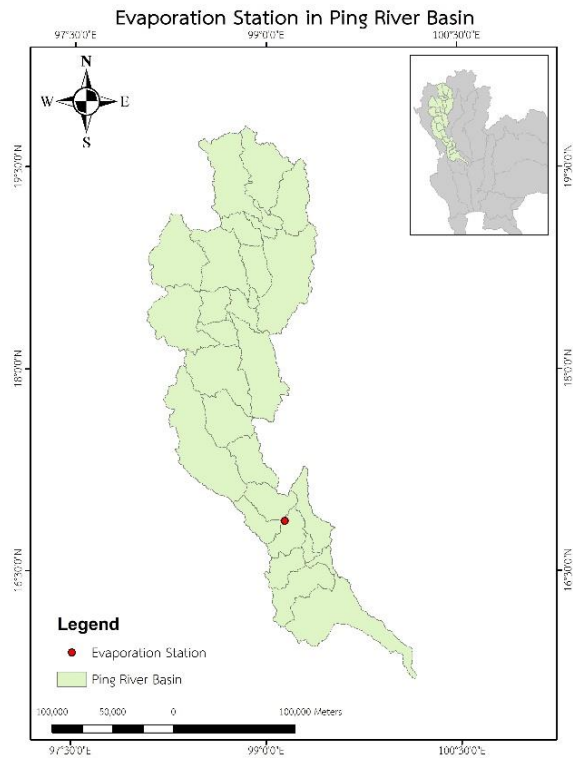
$$Q_i = OF_i + IF_i + BF_i$$

P_N = Excess Water (mm)
 U = Water content in surface storage (mm)
 U_{max} = Max water content in surface storage (mm)
 QOF = Overland Flow (m^3/s)
 CQ_{OF} = Overland flow runoff coefficient (0-1)
 L = Water content in root zone storage (mm)
 L_{max} = Max water content in root zone storage (mm)
 TOF = Root zone threshold value for overland flow (0-0.99)
 QIF = Interflow (m^3/s)
 CK_{IF} = Time constant for routing interflow (hr)
 TIF = Root zone threshold value for interflow (0-0.99)
 Inf = Infiltration
 G = Percolation (mm)
 TG = Root zone threshold value for groundwater recharge
 DL = Portion of infiltration increased in root zone
 BF = Baseflow (m^3/s)
 CK_{BF} = Time constant for routing baseflow (hr)
 S_y = Specific yield of groundwater reservoir
 $GWLBF_0$ = Threshold groundwater depth for baseflow
 GWL = Groundwater table below the ground surface

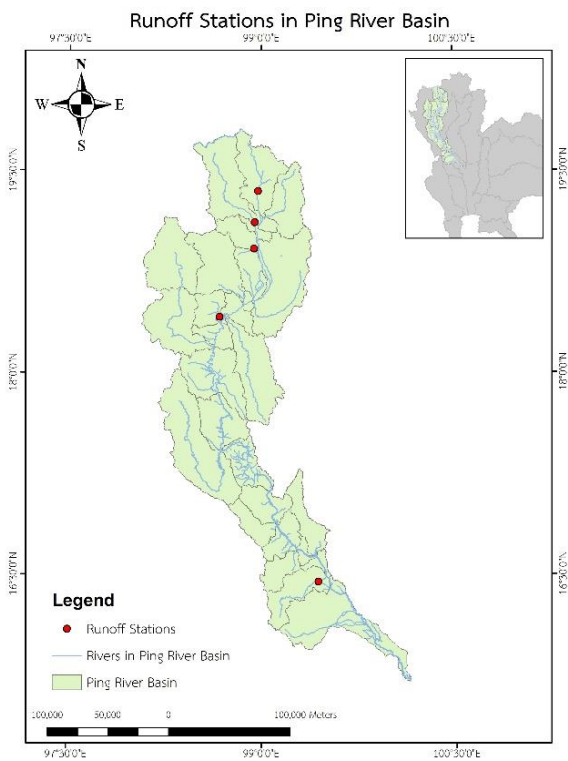
รูปที่ 3-10 หลักการคำนวณแบบจำลอง MIKE11-RR NAM Model
 ที่มา : ศูนย์วิศวกรรมน้ำและโครงสร้างพื้นฐาน (2561)



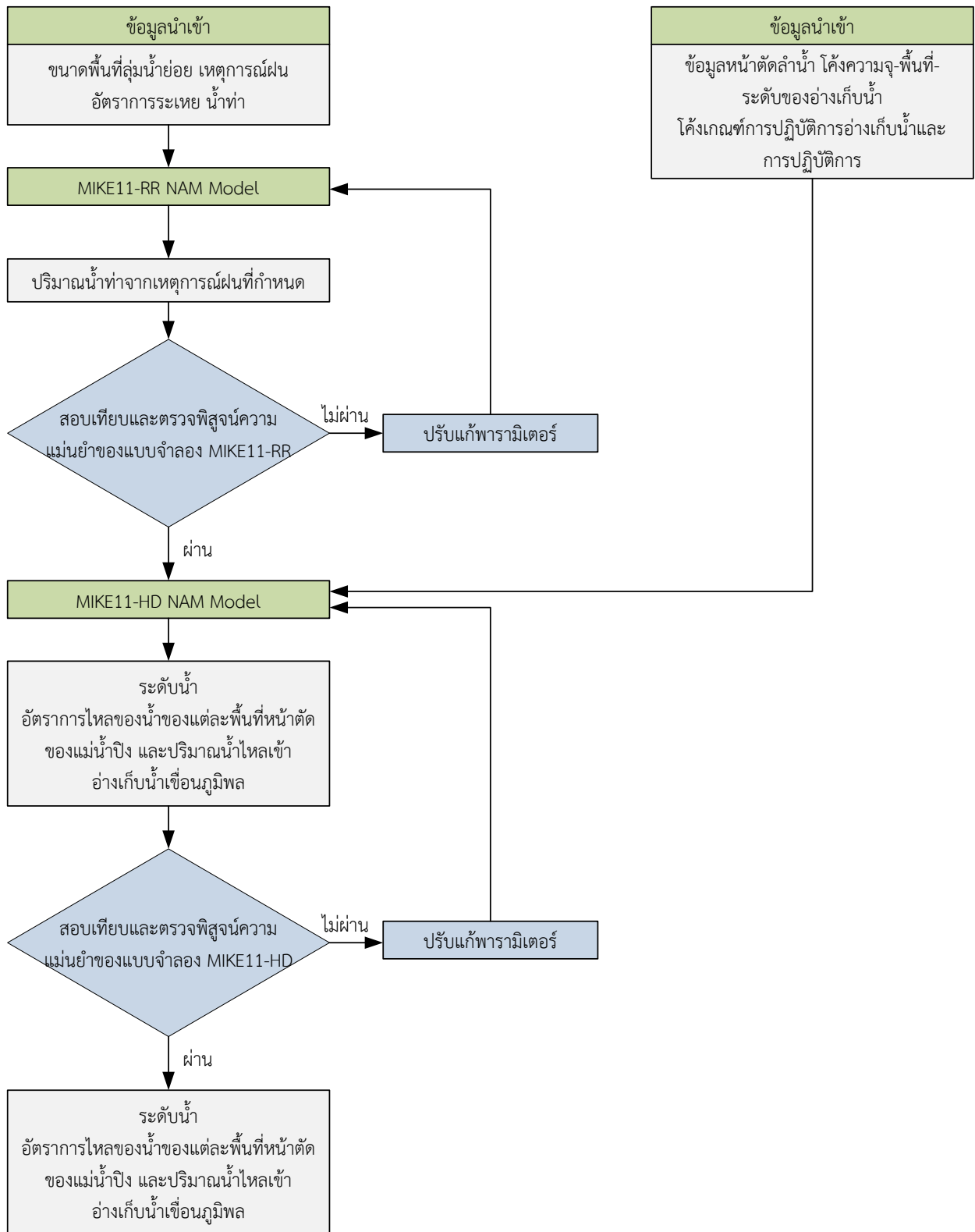
รูปที่ 3-11 สถานีน้ำฝนที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง MIKE11



รูปที่ 3-12 สถานีตรวจวัดอัตราการระเหยจากผิวน้ำที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง MIKE11



รูปที่ 3-13 สถานีตรวจวัดน้ำท่าและระดับน้ำของลำน้ำที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง MIKE11



รูปที่ 3-14 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง MIKE11 ของโครงการวิจัย

3.2.4 การสอบเทียบความแม่นยำของแบบจำลอง

งานวิจัยนี้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2) ในการประเมินความสามารถของแบบจำลองในการคำนวณน้ำท่าภายใต้เหตุการณ์ฝนที่กำหนด ทั้งนี้ได้ใช้ข้อมูลดังที่กล่าวถึงในหัวข้อ 3.2 ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2543–2553 ในการสอบเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) และปี พ.ศ. 2554–2561 ในการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model Validation)

R^2 คือ ตัวชี้วัดเชิงสถิติแสดงความสามารถของตัวแปรอิสระ (X) อธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระ (Y) โดย R^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และถ้าค่า R^2 เข้าใกล้ 1 แสดงว่า X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ Y ได้มาก ในทางกลับกัน ถ้า R^2 เข้าใกล้ 0 แสดงว่า X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ Y ได้น้อย ทั้งนี้ R^2 สามารถคำนวณตามสมการดังนี้

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{ci} - \bar{Q}_c) * (Q_{oi} - \bar{Q}_o)}{[\sum_{i=1}^N (Q_{ci} - \bar{Q}_c)^2 * \sum_{i=1}^N (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2]^{0.5}} \quad \text{-----}(3-15)$$

เมื่อ	Q_{ci}	=	ค่าตรวจวัดจริงที่เมื่อ i เมื่อ i มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง n
	Q_{oi}	=	ค่าจากแบบจำลองของค่า Q_{ci}
	\bar{Q}_c	=	ค่าเฉลี่ยของค่าตรวจวัดจริง
	\bar{Q}_o	=	ค่าเฉลี่ยของค่าจากแบบจำลอง

ในส่วนของการประเมินความแม่นยำของปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ Q-Q Plot เปรียบเทียบค่าตรวจวัดจริงและผลจากแบบจำลอง โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วงฤดู ได้แก่ ช่วงฤดูฝน (ระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม) และช่วงฤดูแล้ง (ระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายน) เพื่อประเมินความสามารถในการจำลองปริมาณน้ำในช่วงน้ำมากและน้ำน้อย ตามลำดับ

3.2.5 การศึกษาผลกระทบจากการใช้สมการอัตราการคายระเหยน้ำของพืช

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้สมการของ Hamon (Hamon, 1961), Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) และ Hargreaves (Hargreaves et al., 1985) เพื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราการระเหยจากภาควิทยาการระเหยของกรมอุตุนิยมวิทยา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นให้ทราบถึงการใช้สมการอัตราการคายระเหยน้ำของพืช (Evapotranspiration) ต่อปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างภูมิพล โดยจัดทำข้อเสนอแนะแนวทางการประเมินความต้องการของน้ำต่อไป ทั้งนี้ รายละเอียดของสมการที่ใช้สรุปได้ดังนี้

(1) สมการ Hamon

$$ET_0 = \frac{2.1H_t^2 e_s}{(T_{mean} + 273.2)} \quad \text{-----}(3-16)$$

เมื่อ	ET_0	=	อัตราการคายระเหยน้ำของพืช (มิลลิเมตร)
	H_t	=	ค่าเฉลี่ยรายวันของจำนวนชั่วโมงที่พื้นที่ได้รับแสงสว่างจากดวงอาทิตย์ (ชั่วโมงต่อวัน)
	e_s	=	ความดันไออิ่มตัวของน้ำ (กิโลปาสกาล)
	T_{mean}	=	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิรายเดือน (องศาเซลเซียส)

(2) สมการ Thornthwaite

$$ET_0 = 16 \left(\frac{10T_i}{l} \right)^a \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{1}{30} \right) \quad \text{-----}(3-17)$$

เมื่อ	ET_0	=	อัตราการคายระเหยน้ำของพืช (มิลลิเมตร)
	T_i	=	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิรายเดือน (องศาเซลเซียส)
	N	=	ค่าเฉลี่ยรายเดือนของจำนวนชั่วโมงที่มีแสงสว่างจากดวงอาทิตย์ (ชั่วโมงต่อเดือน)
	l	=	$\sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514}$
	a	=	$(492390 + 17920l + 771l^2 + 0.675l^3) \times 10^{-6}$

(3) สมการ Hargreaves

$$ET_0 = 0.0023 (T_m + 17.8) (\sqrt{T_{\max} - T_{\min}}) R_a \quad \text{-----}(3-18)$$

เมื่อ	ET_0	=	อัตราการคายระเหยน้ำของพืช (มม.)
	T_m	=	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิรายวัน (องศาเซลเซียส)
	T_{\max}	=	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิสูงสุดรายวัน (องศาเซลเซียส)
	T_{\min}	=	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิต่ำสุดรายวัน (องศาเซลเซียส)
	R_a	=	ค่ารังสีที่นอกโลก (เมกกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน)

ทั้งนี้ งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยสมการอัตราการคายระเหยน้ำของพืชดังที่กล่าวข้างต้น โดยวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ค่าความแตกต่างของผลการประเมินกับผลการประเมินด้วยอัตราการระเหยจากถาดวัดการระเหยของกรมอุตุนิยมหาวิทยาลัย

3.2.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนภูมิพลภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

ในการศึกษานี้ ข้อมูลปริมาณฝนรายวันและอัตราการระเหยจากถาดวัดในอนาคตได้อ้างอิงภาพฉายการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change) ของ RCP 4.5 และ RCP 8.5 ด้วยโมเดล EC-EARTH ของ European Community Earth-System Model ที่ถูก Downscale ด้วย RegCM4 จัดทำโดย Ramkhamhaeng University Center of Regional Climate Change and Renewable Energy (RU-CORE) ดังแสดงในรูปที่ 3-15

The screenshot shows the website interface for SEACLID/CORDEX Southeast Asia output for DSSAT Models. At the top, there are navigation links: RU-CORE, Home, Past Research, SARCCIS, SEACLID/CORDEX Phase 2, Publications, Members, and Contact us. Below the navigation is the title 'Southeast Asia Regional Climate Change Information System' and logos for SARCCIS, Ramkhamhaeng University, and ESGF. A sub-menu includes SARCCIS, SEACLID/CORDEX Southeast Asia, ESGF-Node, DSSAT, In-House Archived, and Data Visualization. The main content area is titled 'SEACLID/CORDEX Southeast Asia output for DSSAT Models.' It features a map of Southeast Asia with a red grid overlay, labeled 'Step 1. Click two corner's grids to select the subdomain.' To the right of the map is a 'Data Filter Beta 1.1' section with 'Step 2. Select GCM and Scenario.' This section includes a 'Driving Model' dropdown menu set to 'MPI-ESM-MR', a 'Scenario' section with radio buttons for 'Historical', 'RCP4.5' (selected), and 'RCP8.5', and 'Form Year' and 'To' dropdown menus set to '2006' and '2099' respectively. Below this is a 'Contact information' section with 'Step 3. Please provide your contact information.' and a 'Fullname' label. It contains three input fields: 'Firstname Lastname', 'Institution/Organization', and 'E-mail' (with 'example@mail.com' as a placeholder). A blue button at the bottom right says 'Proceed to download page.'

รูปที่ 3-15 ฐานข้อมูลภาพถ่ายการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) จัดทำโดย Ramkhamhaeng University Center of Regional Climate Change and Renewable Energy (RU-CORE) ที่มา : <http://www.rucore.ru.ac.th/SARCCIS#>

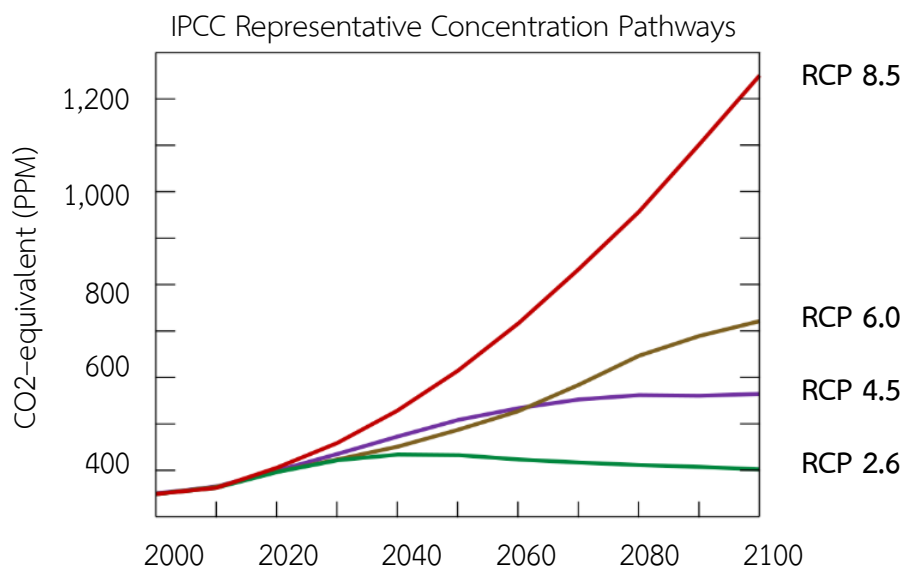
Representative Concentration Pathways หรือ RCP พัฒนาโดยในรายงาน AR5 ของ IPCC คือ ภาพถ่ายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอนาคต ภายใต้สมมติฐานการเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ การเมือง สัดส่วนการใช้พลังงานฟอสซิล และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 และ RCP 8.5 ดังแสดงในรูปที่ 3-16 โดย RCP 4.5 แสดงถึงค่าความแตกต่างของการแผ่รังสี (Radiative Forcing) เท่ากับ 4.5 วัตต์ต่อตารางเมตร ในปี ค.ศ. 2100 และคงที่หลังจากนั้น สำหรับ RCP 8.5 แสดงถึงค่าการแผ่รังสี เท่ากับ 8.5 วัตต์ต่อตารางเมตร ในปี ค.ศ. 2100 ซึ่งจะกล่าวได้ว่า RCP 4.5 แสดงถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับปานกลาง แต่ในระดับสูงสุดสำหรับ RCP 8.5 ทั้งนี้ ข้อมูลของ RU-CORE เป็นในรูปแบบกริด (25 ตารางกิโลเมตร x 25 ตารางกิโลเมตร)

คณะผู้วิจัยนำค่าเฉลี่ยของฝนและอัตราการระเหยของกริดรอบกริดที่ตั้งของสถานีอุตุนิยมวิทยาที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง MIKE11-RR และ MIKE11-HD จำนวน 4 กริด เพื่อเป็นตัวแทนของค่าอุตุนิยมวิทยาของสถานีดังกล่าว โดยงานวิจัยของ Murphy (1999) แสดงให้เห็นว่าการใช้ค่าเฉลี่ยของกริดรอบสถานีอุตุนิยมวิทยาให้ค่าฝนที่ถูกต้องกว่าการใช้กริดที่ตั้งของสถานี อีกทั้ง ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่ได้จาก RU-CORE ถูกพัฒนาโดยประยุกต์ใช้ผลจากแบบจำลอง EC-EARTH ซึ่งมีขนาดกริดขนาดใหญ่ เท่ากับ 125 ตารางกิโลเมตร x 125 ตารางกิโลเมตร แล้วนำมา Downscale ด้วย RegCM 4 ได้ขนาดกริดเท่ากับ 25 ตารางกิโลเมตร x 25 ตารางกิโลเมตร ซึ่งค่าที่ได้ยังไม่ความแตกต่างจากค่าตรวจวัดจริงในพื้นที่ ดังนั้น คณะผู้วิจัยประยุกต์ใช้วิธี Bilinear Interpolation ดังแสดงในสมการด้านล่าง เพื่อปรับค่าจากแบบจำลองของ RU-CORE ให้สอดคล้องกับค่าตรวจวัดจริงของกรมอุตุนิยมวิทยา

$$P_{\text{corrected}} = P_{\text{RU-CORE}} \times \frac{\mu_{\text{Pobserved}}}{\mu_{\text{P}_{\text{RU-CORE}}}} \quad \text{-----}(3-19)$$

โดย	$P_{\text{corrected}}$	=	ค่าจากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่ปรับแก้ให้สอดคล้องกับค่าตรวจวัดจริงในพื้นที่
	$P_{\text{RU-CORE}}$	=	ค่าอุตุนิยมวิทยาของแบบจำลองของ RU-CORE
	$\mu_{\text{Pobserved}}$	=	ค่าเฉลี่ยรายเดือนของข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยา
	$\mu_{\text{P}_{\text{RU-CORE}}}$	=	ค่าเฉลี่ยรายเดือนของแบบจำลองของ RU-CORE

ในการศึกษาี้ คณะผู้วิจัยได้แบ่งกรอบเวลาในอนาคต ได้แก่ ค.ศ. 2000–2020 (ปีฐาน), 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 และ 2081–2099 เพื่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนภูมิพล โดยเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงเป็นในรูปแบบเปอร์เซ็นต์จากปีฐาน



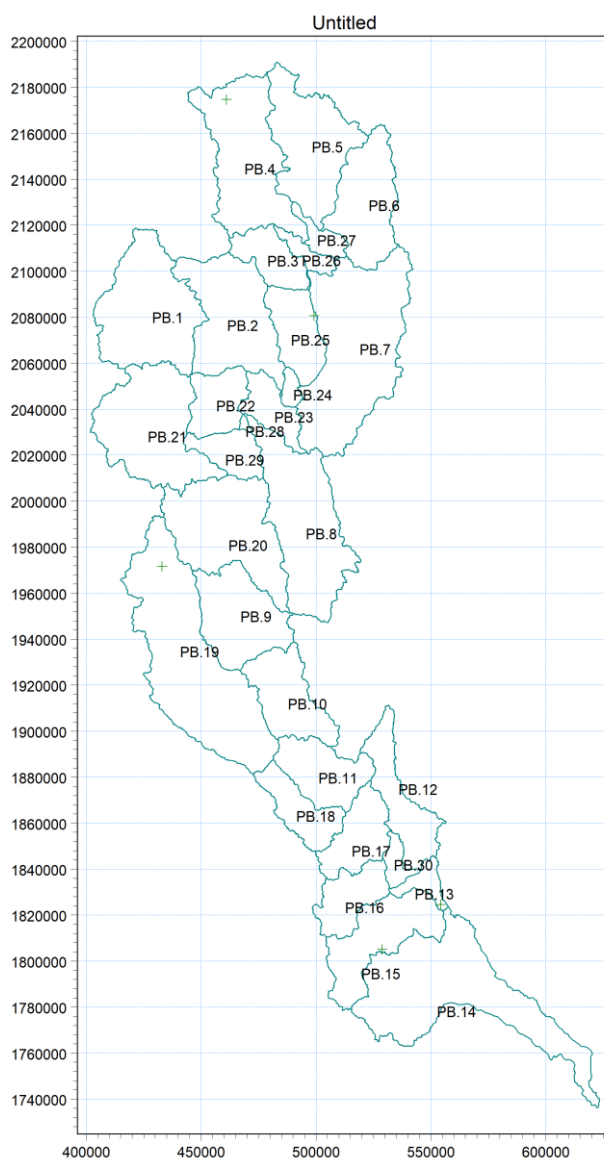
รูปที่ 3-16 สมมติฐานปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂-equivalent) ของภาพฉาย RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 และ RCP 8.5 ที่มา : IPCC (2013)

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

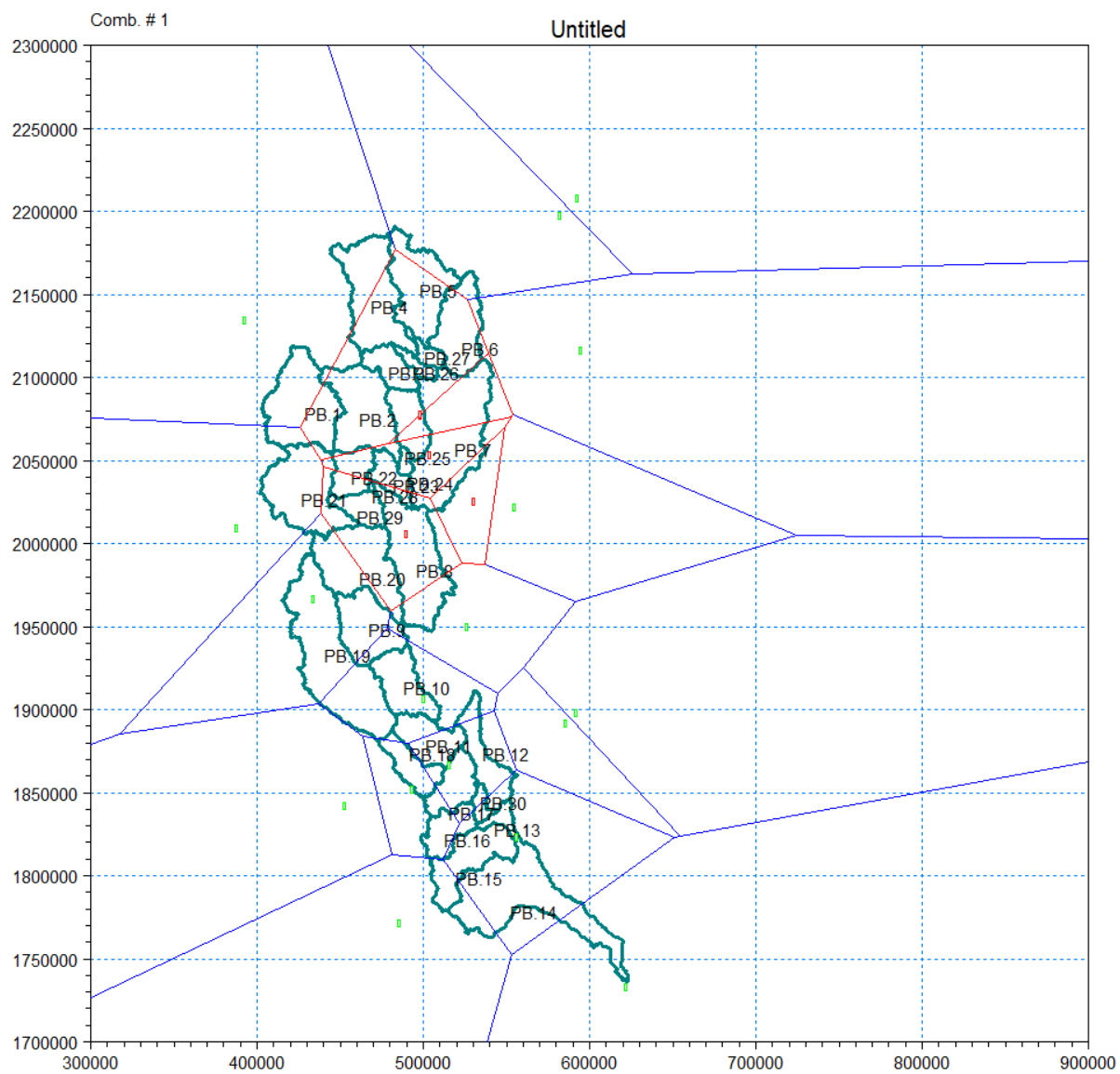
4.1 ผลการพัฒนาแบบจำลอง MIKE11

4.1.1 ผลการพัฒนาแบบจำลอง MIKE11-RR NAM Model

ผลการพัฒนาแบบจำลอง MIKE11-RR NAM Model ในเขตพื้นที่ลุ่มแม่น้ำปิง ซึ่งประกอบด้วย 30 ลุ่มน้ำย่อยดังแสดงในรูปที่ 4-1 และสรุปค่าถ่วงน้ำหนักของสถานีฝนด้วยวิธี Thiessen Polygon เพื่อคำนวณหาปริมาณน้ำฝนในแต่ละลุ่มน้ำย่อยดังแสดงในรูปที่ 4-2 และตารางที่ 4-1



รูปที่ 4-1 ลุ่มแม่น้ำย่อยในลุ่มแม่น้ำปิง



รูปที่ 4-2 ขอบเขตพื้นที่ของสถานีฝนด้วยวิธี Thiessen Polygon ในลุ่มน้ำปิง

ตารางที่ 4-1 คำนวณน้ำหนักของสถานีฝนในแต่ละลุ่มน้ำย่อยด้วย Thiessen Polygon

รหัสลุ่มน้ำย่อย	สถานีฝน (คำนวณน้ำหนักด้วย Thiessen Polygon)																					
	70731	170181	300201	300202	303201	303301	310201	327301	327501	328201	328202	328301	329201	373201	37330	376201	376202	376203	376301	376401	380201	400201
PB.1	0.00	0.00	0.55	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.2	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.4	0.00	0.00	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.5	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.26	0.00	0.00	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.07	0.01	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.7	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	0.11	0.00	0.00	0.09	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.8	0.00	0.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.9	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.59	0.00	0.39	0.02	0.00	0.00	0.00
PB.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64	0.00	0.15	0.00	0.00	0.20	0.00
PB.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
PB.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.68	0.19
PB.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	0.69	0.00
PB.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.65	0.00	0.20	0.00
PB.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.79	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00	0.00
PB.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.06	0.78	0.00	0.00	0.00
PB.19	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.20	0.44	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.21	0.06	0.16	0.00	0.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.22	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.23	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

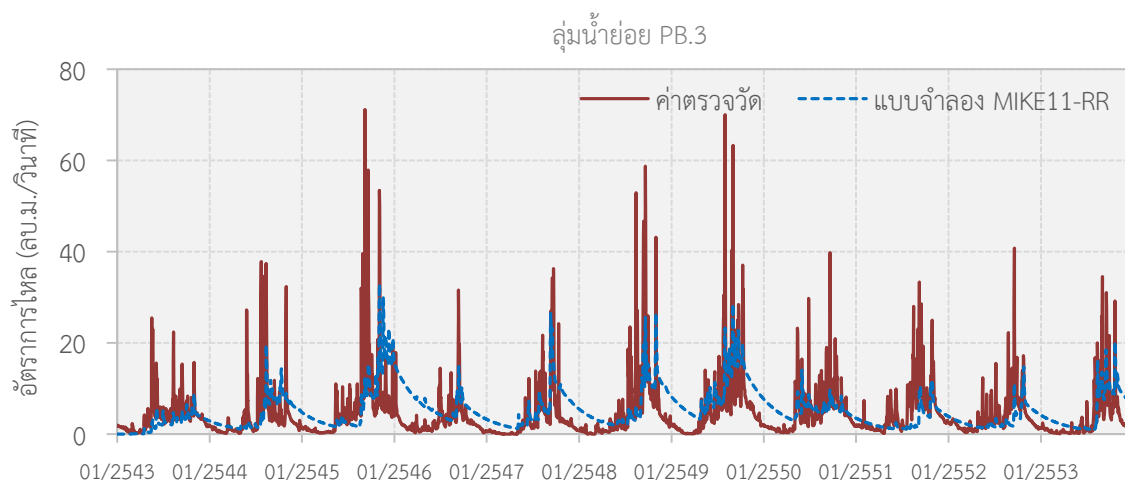
รหัสลุ่มน้ำย่อย	สถานีฝน (คำนวณน้ำหนักด้วย Thiessen Polygon)																					
	70731	170181	300201	300202	303201	303301	310201	327301	327501	328201	328202	328301	329201	373201	37330	376201	376202	376203	376301	376401	380201	400201
PB.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.54	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.28	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.29	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.54	0.00

พารามิเตอร์ปรับเทียบของ MIKE11-RR NAM Model ประกอบด้วย 9 พารามิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 3-3 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้คัดเลือกกลุ่มน้ำย่อย PB.3, PB.4, PB.5, PB.15 และ PB.22 เพื่อใช้ในการปรับเทียบ เนื่องจากมีสถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า ณ บริเวณจุดไหลออกจากกลุ่มน้ำดังกล่าว ได้แก่ P.21, P.4A, P.20, P.26A และ P.24A ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบผลการจำลองน้ำท่าของแบบจำลองกับค่าตรวจวัดจริงในพื้นที่ ผลการปรับเทียบพารามิเตอร์ของแต่ละกลุ่มน้ำย่อยสรุปในตารางที่ 4-2 ทั้งนี้ สำหรับค่าพารามิเตอร์ปรับเทียบของกลุ่มน้ำย่อยอื่นให้อ้างอิงค่าปรับเทียบจากกลุ่มน้ำย่อยใกล้เคียง

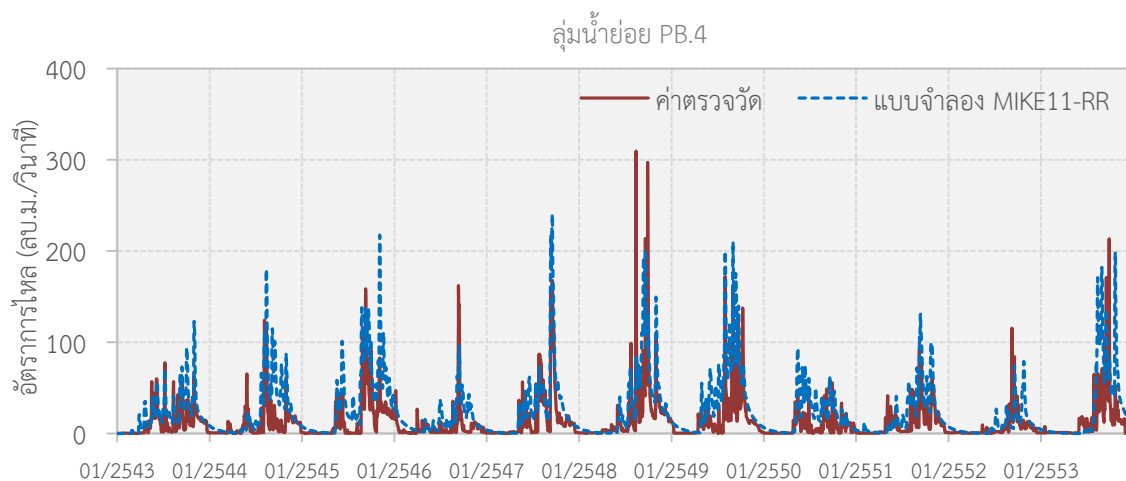
ตารางที่ 4-2 ผลการปรับค่าพารามิเตอร์จากการสอบเทียบค่าแบบจำลอง MIKE11-RR NAM Model

กลุ่มน้ำย่อย	U_{max}	L_{max}	CQQF	CKIF	CK1,2	TOF	TIF	TG	CKBF
(หน่วย)	(มม.)	(มม.)		(ซม.)	(ซม.)				(ซม.)
PB.3	11.6	300	0.104	992	34.1	0.08440	0.33100	0.03470	2,990
PB.4	10.0	100	0.413	200.1	49.9	0.00198	0.00347	0.00019	1,003
PB.5	10.0	100	0.450	201.6	49.5	0.00857	0.00073	0.00005	1,002
PB.15	10.0	100	1.000	200.5	50.0	0.00120	0.00209	0.00121	1,008
PB.22	10.0	100	1.000	200.3	38.8	0.00048	0.00238	0.00050	1,007

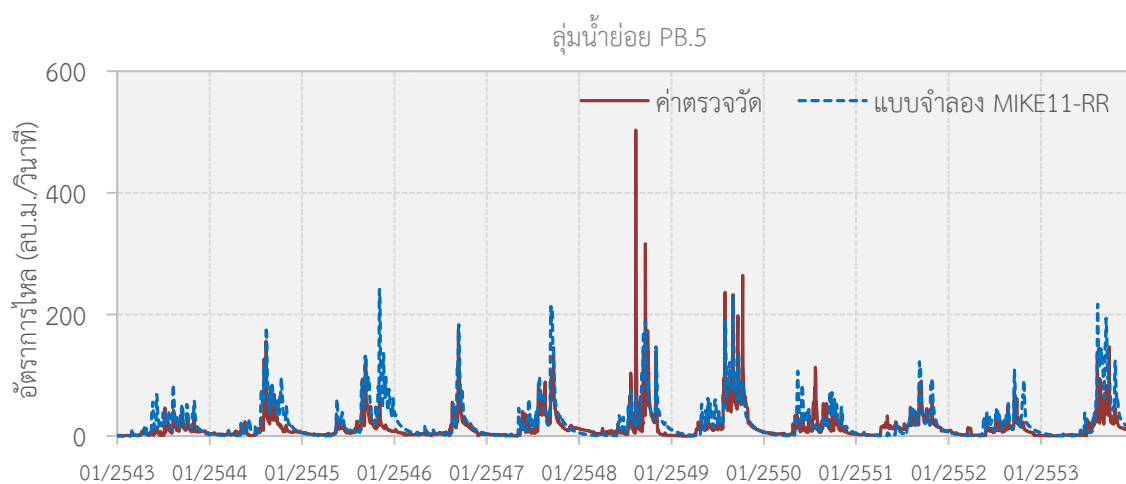
ผลการจำลองน้ำฝน-น้ำท่าของ MIKE11-RR NAM Model ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553 ด้วยค่าพารามิเตอร์ปรับเทียบดังที่กล่าวก่อนหน้านี้นี้แสดงในรูปที่ 4-3 ถึงรูปที่ 4-7 คณะผู้วิจัยพบว่าค่า R^2 อยู่ในช่วงระหว่าง 0.29-0.55 ดังสรุปในตารางที่ 4-3 อย่างไรก็ตาม โดยผลการจำลองอยู่ในระดับความแม่นยำปานกลาง ทั้งนี้ ผลการจำลองน้ำท่าของกลุ่มน้ำย่อย PB.3 นั้น มีข้อจำกัดในส่วนของน้ำท่าที่ค่าช่วงที่สูง แต่กระนั้นในกลุ่มน้ำย่อยอื่น MIKE11-RR สามารถจำลองการเกิดน้ำท่าโดยมีรูปแบบของข้อมูลสอดคล้องกับผลการตรวจวัดจริงในพื้นที่



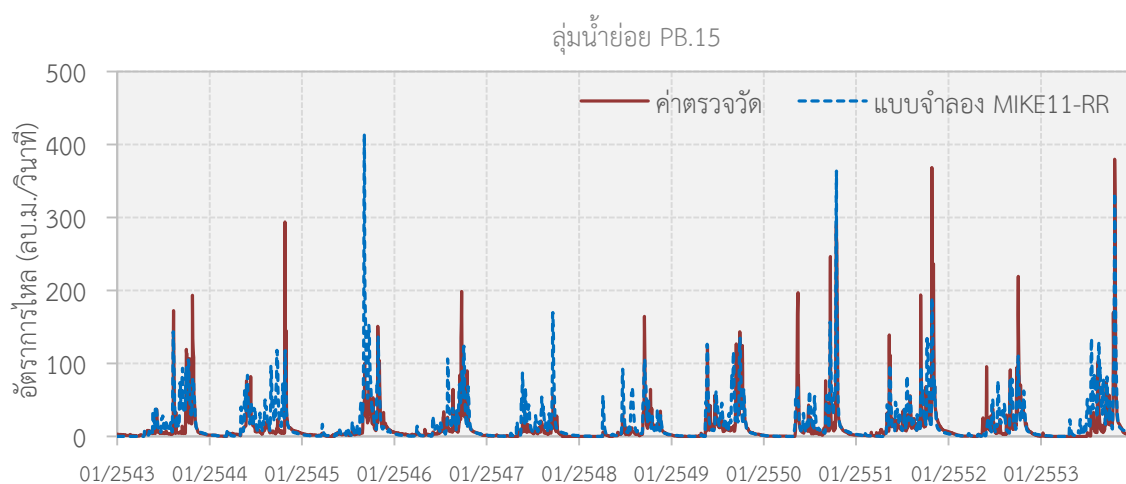
รูปที่ 4-3 ผลการสอบเทียบแบบจำลองน้ำท่าด้วย MIKE11-RR NAM Model ในกลุ่มน้ำย่อย PB.3



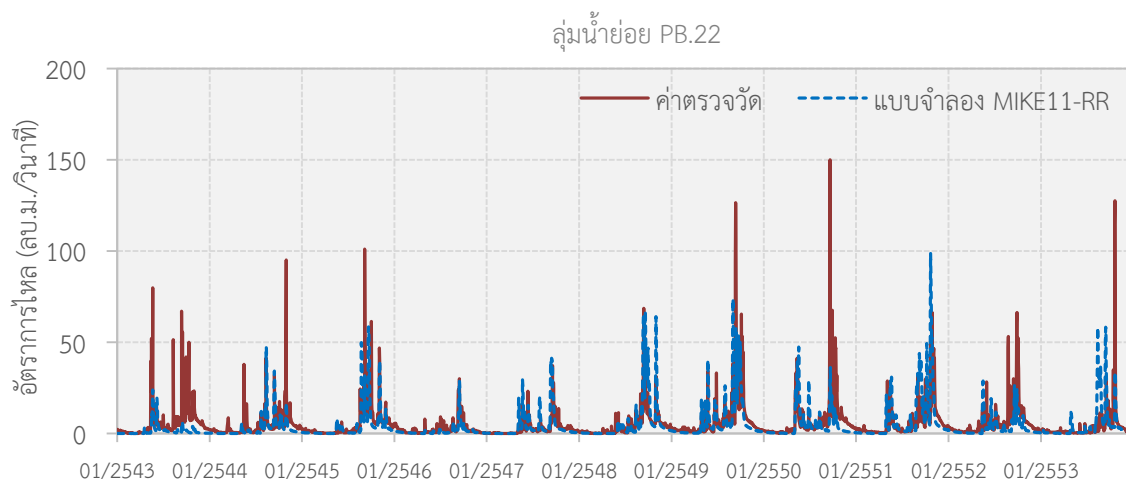
รูปที่ 4-4 ผลการสอบเทียบแบบจำลองน้ำท่าด้วย MIKE11-RR NAM Model ในลุ่มน้ำย่อย PB.4



รูปที่ 4-5 ผลการสอบเทียบแบบจำลองน้ำท่าด้วย MIKE11-RR NAM Model ในลุ่มน้ำย่อย PB.5



รูปที่ 4-6 ผลการสอบเทียบแบบจำลองน้ำท่าด้วย MIKE11-RR NAM Model ในลุ่มน้ำย่อย PB.15

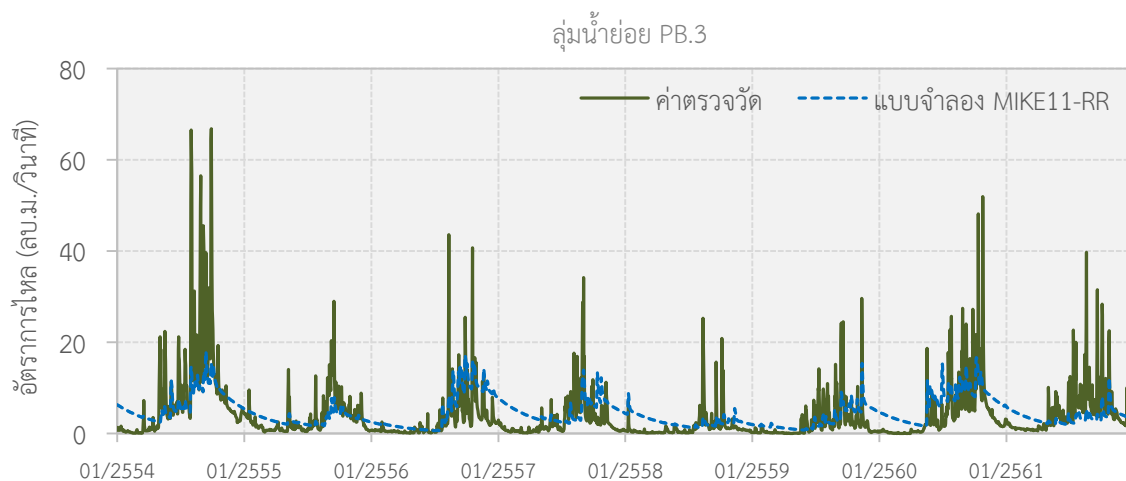


รูปที่ 4-7 ผลการสอบเทียบแบบจำลองน้ำท่าด้วย MIKE11-RR NAM Model ในกลุ่มน้ำย่อย PB.22

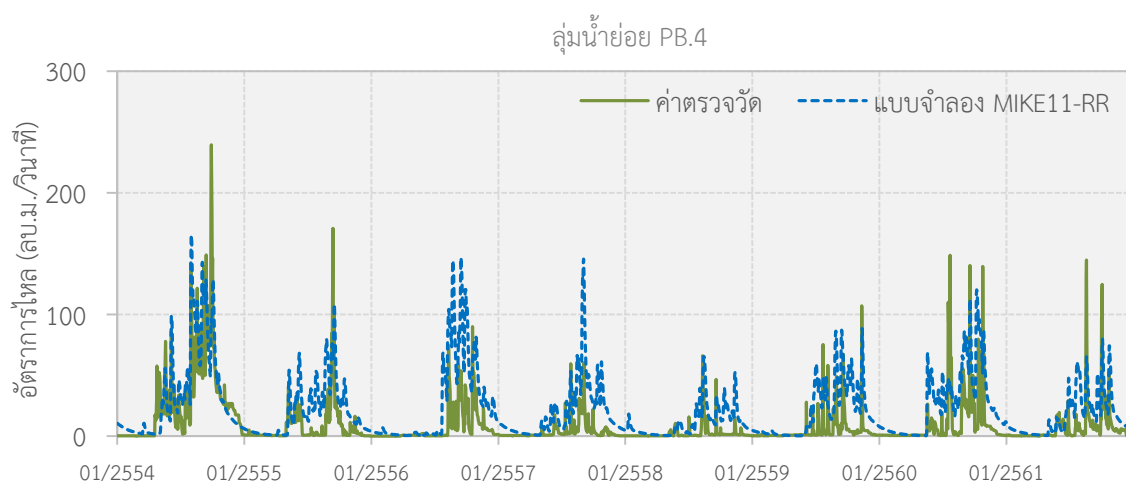
ตารางที่ 4-3 ผลการสอบเทียบของแบบจำลอง MIKE11-RR NAM Model

กลุ่มน้ำย่อย	สถานีน้ำท่า	ปี พ.ศ.	R ²
PB.3	P.21	2543-2553	0.29
PB.4	P.4A	2543-2553	0.55
PB.5	P.20	2543-2553	0.50
PB.15	P.26A	2543-2553	0.49
PB.22	P.24A	2543-2553	0.32

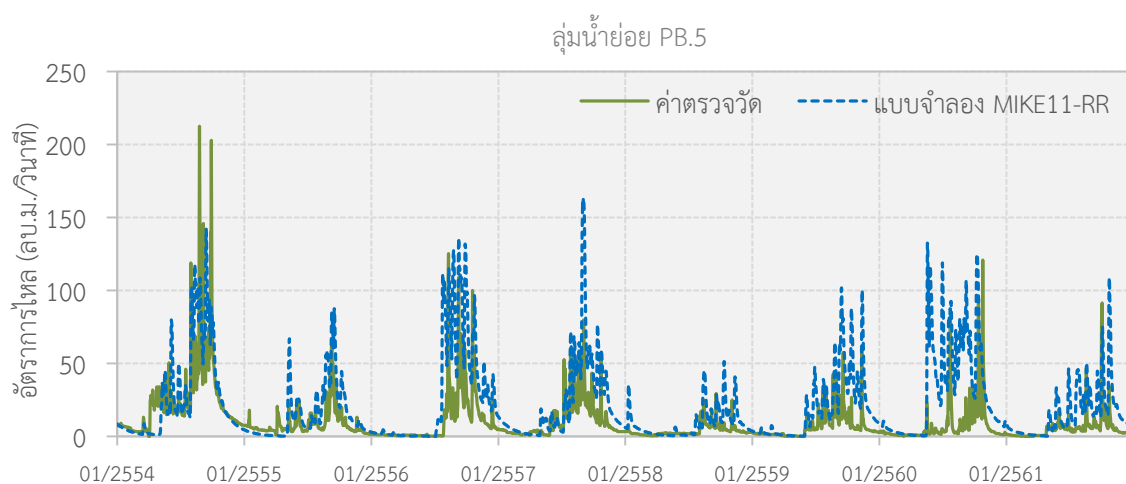
ในส่วนของการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง MIKE11-RR NAM Model เพื่อพิสูจน์ค่าพารามิเตอร์ปรับเทียบสามารถนำมาใช้คำนวณน้ำท่าที่เกิดจากเหตุการณ์ฝนอื่นนอกเหนือจากเหตุการณ์ในช่วงปี พ.ศ. 2543-2553 โดยผลการตรวจสอบแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 4-8 ถึงรูปที่ 4-12 คณะผู้วิจัยพบว่าค่า R² อยู่ในช่วงระหว่าง 0.39 ถึง 0.53 ดังสรุปในตารางที่ 4-4 จากผลการประเมินอาจกล่าวได้ว่าความแม่นยำของแบบจำลองในปัจจุบันอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ยกเว้นกลุ่มน้ำย่อย PB.3 โดยแบบจำลองสามารถลอกเลียนพฤติกรรมน้ำท่า ในส่วนของรูปแบบ (Pattern) ได้ในระดับดี และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจำลองการเกิดน้ำท่าในลำน้ำด้วย MIKE11-HD



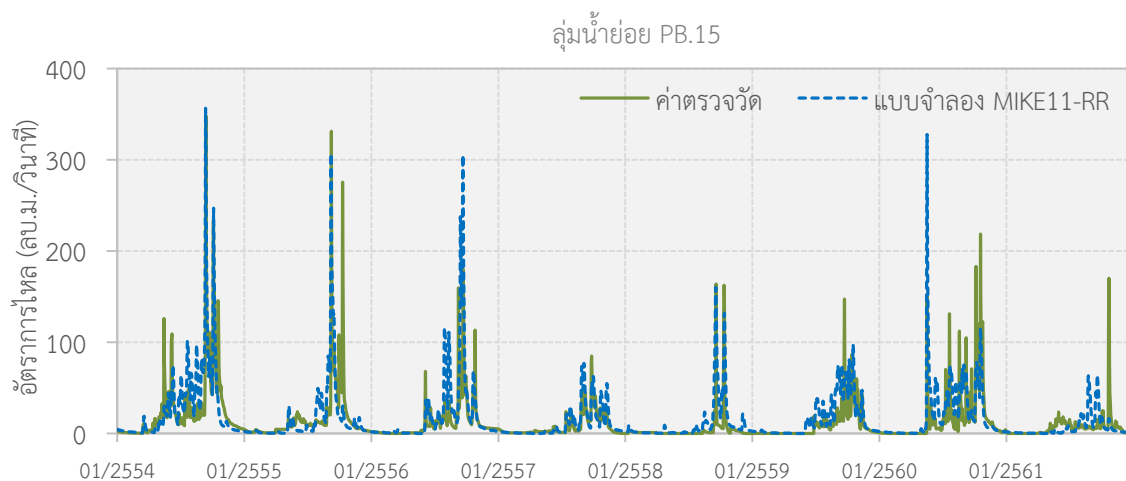
รูปที่ 4-8 ผลการตรวจสอบแบบจำลองน้ำทำด้วย MIKE11-RR NAM Model ในลุ่มน้ำย่อย PB.3



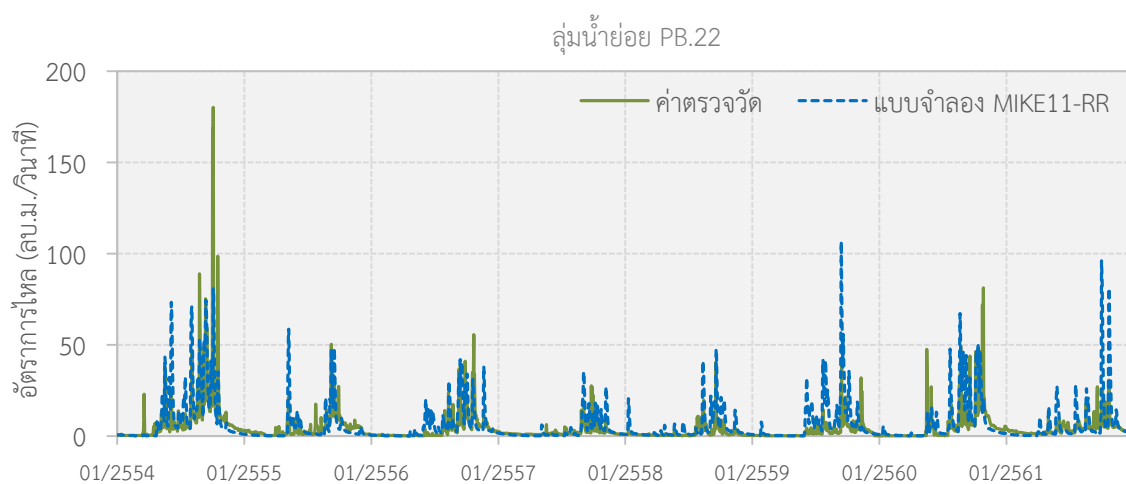
รูปที่ 4-9 ผลการตรวจสอบแบบจำลองน้ำทำด้วย MIKE11-RR NAM Model ในลุ่มน้ำย่อย PB.4



รูปที่ 4-10 ผลการตรวจสอบแบบจำลองน้ำทำด้วย MIKE11-RR NAM Model ในลุ่มน้ำย่อย PB.5



รูปที่ 4-11 ผลการตรวจสอบแบบจำลองน้ำท่าด้วย MIKE11-RR NAM Model ในลุ่มน้ำย่อย PB.15



รูปที่ 4-12 ผลการตรวจสอบแบบจำลองน้ำท่าด้วย MIKE11-RR NAM Model ในลุ่มน้ำย่อย PB.22

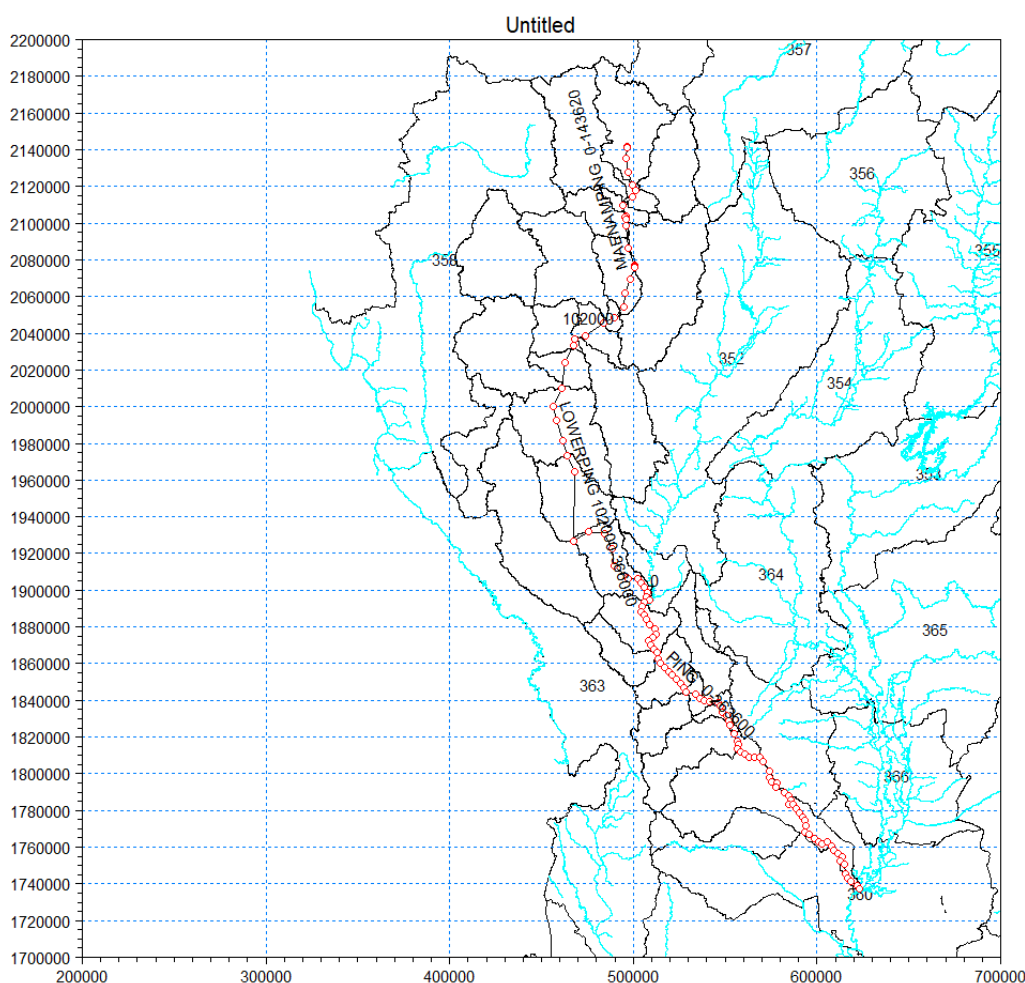
ตารางที่ 4-4 ผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง MIKE11-RR NAM Model

ลุ่มน้ำย่อย	สถานีน้ำท่า	ปี พ.ศ.	R ²
PB.3	P.21	2554-2561	0.33
PB.4	P.4A	2554-2561	0.43
PB.5	P.20	2554-2561	0.40
PB.15	P.26A	2554-2561	0.53
PB.22	P.24A	2554-2561	0.39

4.1.2 ผลการจำลองปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วย MIKE11-HD

ปริมาณน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลอง MIKE11-RR NAM Model นั้น เป็นข้อมูลนำเข้ร่วมกับหน้าตัดของแม่น้ำปิงและโครงข่ายลำน้ำ สำหรับแบบจำลอง MIKE11-HD เพื่อคำนวณระดับน้ำและอัตราการไหลของน้ำในแม่น้ำปิง ซึ่งนำไปสู่การประมาณการปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพล

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการพัฒนา MIKE11-HD โดยได้นำเข้าข้อมูลหน้าตัดของแม่น้ำปิงและข้อมูลโครงข่ายลำน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4-13 หลังจากนั้นได้ทำการปรับเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ Manning's Coefficient ของหน้าตัดลำน้ำเพื่อให้อัตราการไหล ณ จุดที่ตั้งสถานีน้ำท่าในปี พ.ศ. 2543-2553 ของแบบจำลองโดยอ้างอิงค่า Manning's Coefficient จากผลงานวิจัยเรื่อง “การศึกษาสภาวะน้ำท่วมของกลุ่มน้ำปิงตอนบนโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE11 (ตอนที่ 1)” (นุชนารถ, 2541) ต่อจากนั้น ได้ดำเนินการตรวจสอบความแม่นยำของ MIKE11-HD โดยใช้ข้อมูลระหว่างปี พ.ศ. 2553-2561



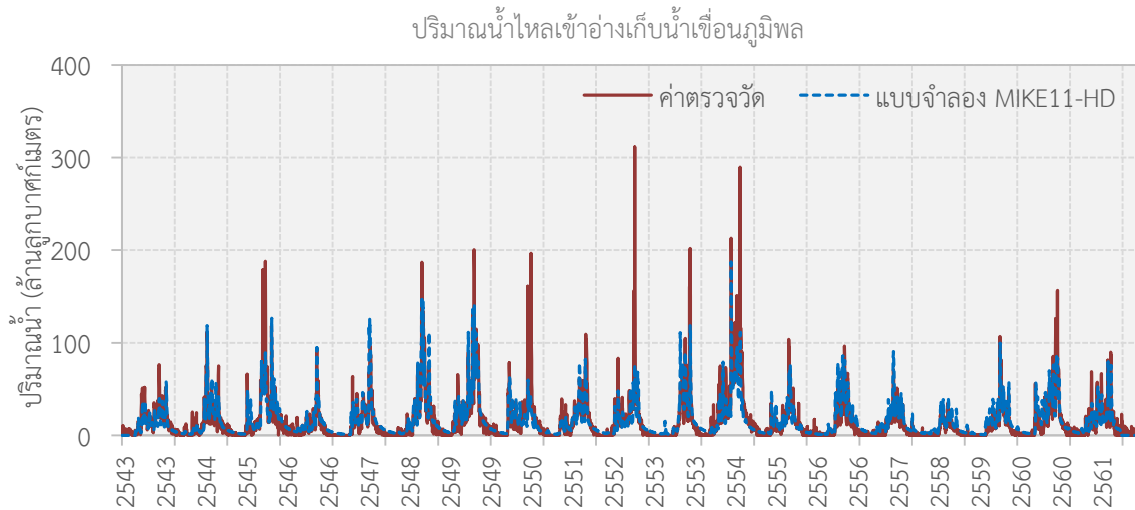
หมายเหตุ: จุดวงกลมสีแดง O แสดงถึงที่ตั้งหน้าตัดลำน้ำปิงที่นำมาใช้ในแบบจำลอง MIKE11-HD

รูปที่ 4-13 MIKE11-HD ที่ถูกพัฒนาภายใต้โครงการวิจัย

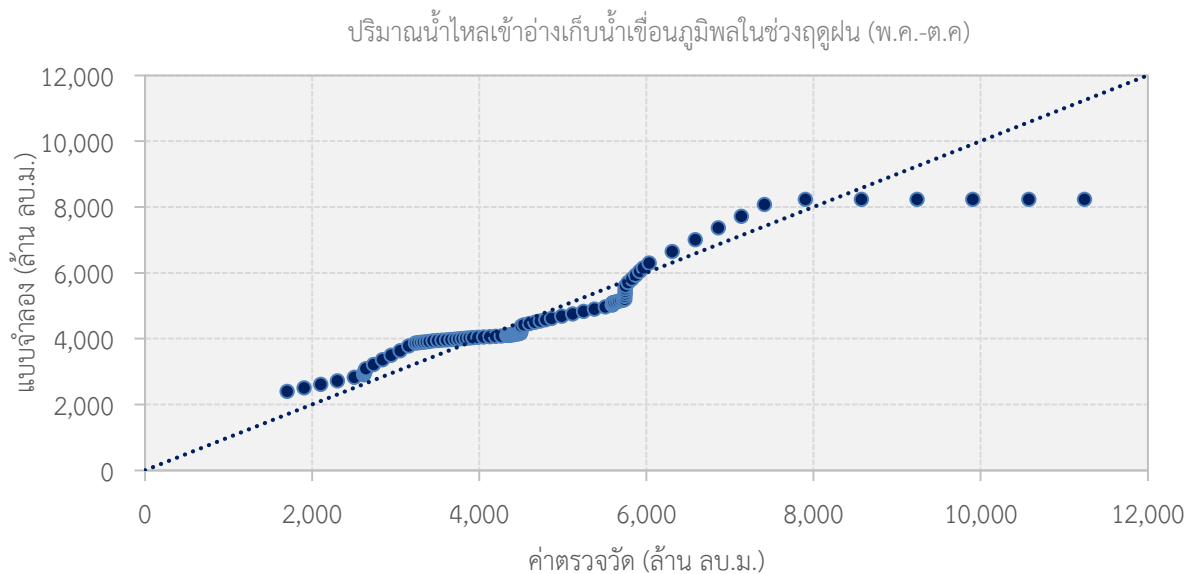
ผลการจำลองปริมาณน้ำท่าไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล ดังแสดงในรูปที่ 4-14 พบว่า แบบจำลอง MIKE11-HD สามารถจำลองรูปแบบปริมาณการไหลของน้ำเข้าเขื่อนโดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.70 อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง MIKE11-HD ของโครงการยังมีข้อจำกัดในการจำลองปริมาณน้ำไหลในช่วงค่าที่สูงซึ่งอาจเกิดจากความละเอียดของฝนรายวัน เนื่องจากเหตุการณ์พายุฝนในบางครั้งเกิดขึ้นเป็นรายชั่วโมง สำหรับความแม่นยำของแบบจำลองในการจำลองปริมาณน้ำในฤดูฝนและนอกฤดูฝนดังแสดงกราฟ Q-Q plot ในรูปที่ 4-15 และรูปที่ 4-16 พบว่า ในช่วงฤดูฝน แบบจำลอง MIKE11-HD สามารถประเมินปริมาณการไหลเข้าอ่างเก็บน้ำได้ดีในช่วงปริมาณน้ำน้อยถึงปานกลาง แต่การจำลองปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในช่วงค่าสูงนั้นให้น้ำน้อย

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเขื่อนภูมิพล ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

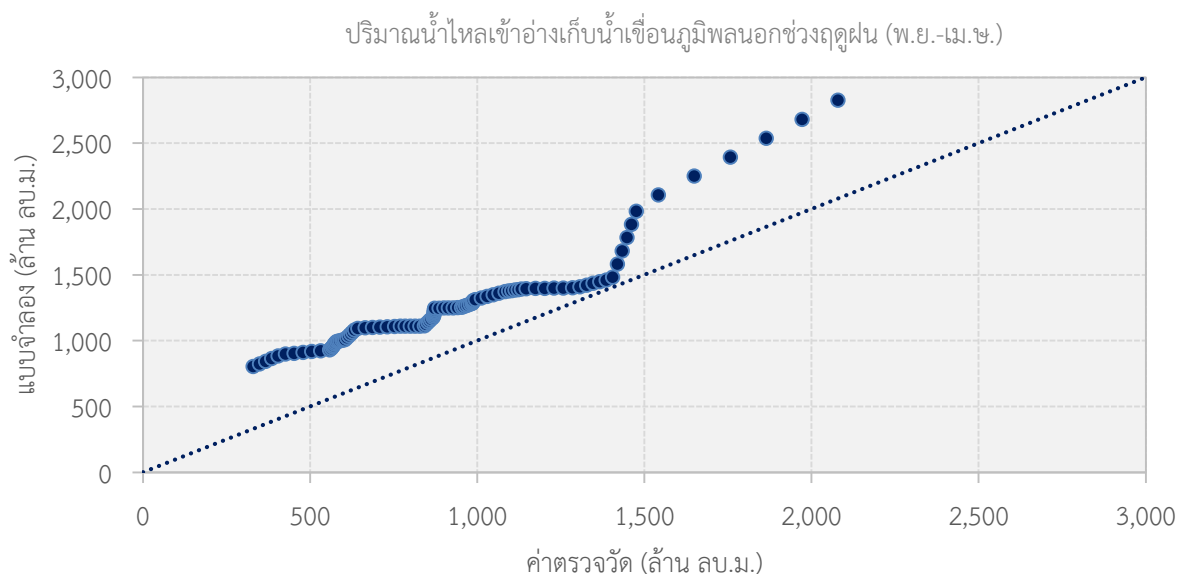
กว่าค่าตรวจวัดจริง ซึ่งเป็นผลต่อเนื่องจากผลที่ได้จากแบบจำลอง MIKE11-RR และ MIKE11-HD ที่มีข้อจำกัด ในด้านการจำลองค่าน้ำท่าในระดับสูง ในส่วนของการจำลองนอกฤดูฝน (ฤดูแล้ง) แบบจำลองสามารถประเมิน ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำสูงเกินกว่าค่าตรวจวัดจริง ซึ่งอาจเกิดจากอาคารควบคุมทางชลศาสตร์หรือฝายต่าง ๆ ในพื้นที่ที่กักเก็บน้ำในช่วงที่มีอัตราการไหลของน้ำท่าน้อย



รูปที่ 4-14 ผลการจำลองปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันของเขื่อนภูมิพลด้วย MIKE11-HD



รูปที่ 4-15 Q-Q plot ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) ด้วย MIKE11-HD



รูปที่ 4-16 Q-Q plot ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลนอกฤดูฝน (พ.ย.-เม.ย.) ด้วย MIKE11-HD

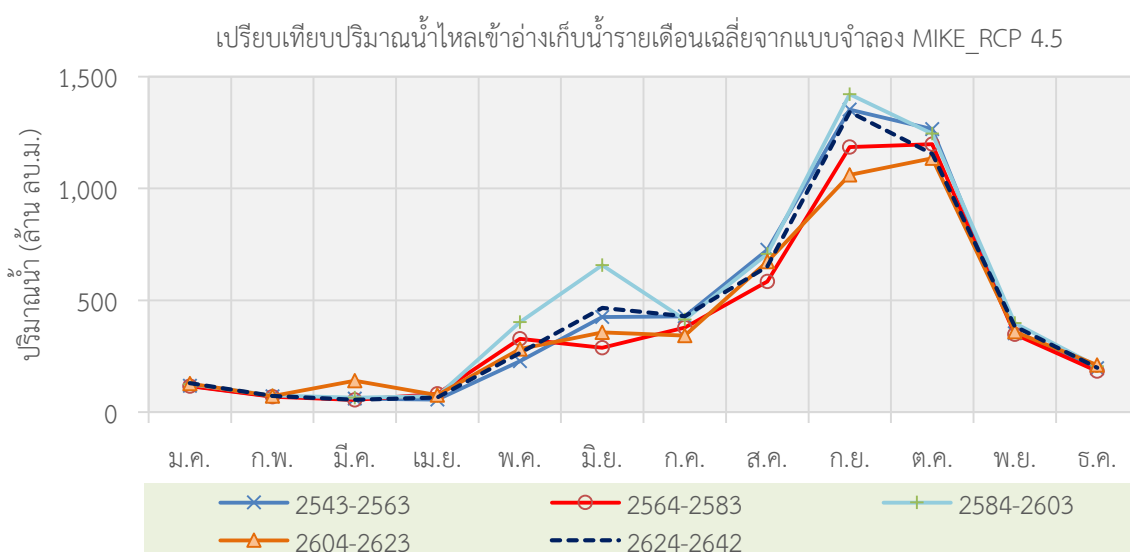
4.1.3 ผลการจำลองปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในอนาคต

ผลการจำลองผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 พบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอนาคต (Projected Inflow) ของเขื่อนภูมิพลรายปีมีแนวโน้มลดลง สำหรับในช่วงฤดูฝน ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำส่วนใหญ่มีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในช่วงฤดูแล้ง โดยในฤดูแล้งเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำเปรียบเทียบกับปีฐานในปี พ.ศ. 2564–2583, 2584–2603, 2604–2623 และ 2624–2642 คือ +0.07%, +10.00%, +15.42% และ +6.25% ตามลำดับ สำหรับในฤดูแล้ง มีค่าความแตกต่างเท่ากับ -10.44%, 9.60%, -13.01% และ -2.69% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-5 และรูปที่ 4-17

ตารางที่ 4-5 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5

ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอนาคต (Projected Inflow) (ล้านลูกบาศก์เมตร)					
เดือน	2543–2563	2564–2583	2584–2603	2604–2623	2624–2642
พ.ย.	352.97	348.38	398.26	359.56	385.30
ธ.ค.	197.31	184.27	204.51	210.40	198.50
ม.ค.	117.25	116.49	125.56	127.85	130.11
ก.พ.	71.31	69.96	75.19	72.42	73.30
มี.ค.	60.30	55.07	65.30	140.95	55.70
เม.ย.	56.24	81.80	72.12	76.07	65.92
ฤดูแล้ง	855.37	855.99	940.93	987.26	908.83
%เปลี่ยนแปลง	NA	0.07	10.00	15.42	6.25
พ.ค.	227.58	328.21	403.26	281.83	264.96
มิ.ย.	425.75	288.30	657.90	356.29	465.86
ก.ค.	428.09	378.96	414.31	342.98	428.75

ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอนาคต (Projected Inflow) (ล้านลูกบาศก์เมตร)					
เดือน	2543-2563	2564-2583	2584-2603	2604-2623	2624-2642
ส.ค.	726.06	584.56	707.69	672.31	651.17
ก.ย.	1351.93	1185.17	1420.61	1061.18	1342.31
ต.ค.	1264.98	1197.26	1245.40	1134.31	1154.85
ฤดูฝน	4,424.40	3,962.44	4,849.17	3,848.89	4,307.89
%เปลี่ยนแปลง	NA	-10.44	9.60	-13.01	-2.63
รายปี	5,279.77	4,818.43	5,790.10	4,836.15	5,216.72



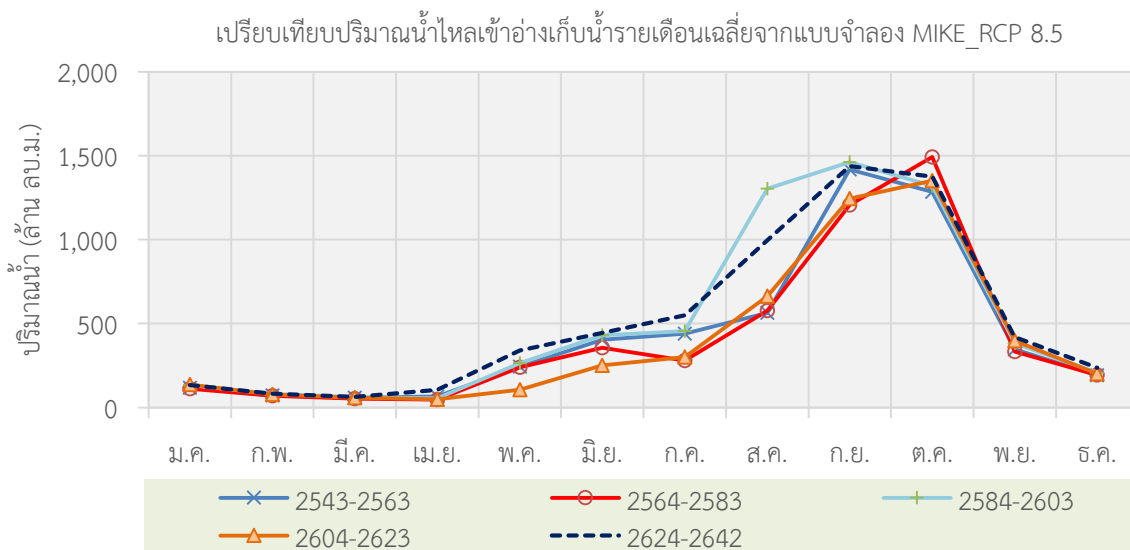
รูปที่ 4-17 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 ในช่วงปี พ.ศ. 2543-2563 (ปีฐาน), 2564-2583, 2584-2603, 2604-2623 และ 2624-2642

สำหรับภาพฉาย RCP 8.5 พบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปี ในอนาคตมีแนวโน้มลดลงในช่วงปี พ.ศ. 2564-2583 และ 2604-2626 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2584-2603 และ 2624-2642 นอกจากนี้ ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำมีแนวโน้มสูงขึ้นในฤดูแล้งเช่นกัน โดยมีค่าความแตกต่างในฤดูแล้งเท่ากับ -5.03%, +8.14%, +8.15% และ +22.71% ตามลำดับ สำหรับในฤดูฝนมีค่าความแตกต่างผกผันในแต่ละช่วงเวลาเท่ากับ -4.68%, +20.17%, -10.13% และ +18.04% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-6 และรูปที่ 4-18

ตารางที่ 4-6 เปรี่อเซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลภายใต้ภาพฉาย RCP 8.5

ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอนาคต (Projected Inflow) (ล้านลูกบาศก์เมตร)					
เดือน	2543-2563	2564-2583	2584-2603	2604-2623	2624-2642
พ.ย.	345.57	332.92	382.38	397.67	420.61
ธ.ค.	191.29	192.82	206.67	200.65	236.97
ม.ค.	118.11	112.31	132.20	136.68	133.59
ก.พ.	71.08	69.09	80.57	77.40	82.20

ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอนาคต (Projected Inflow) (ล้านลูกบาศก์เมตร)					
เดือน	2543-2563	2564-2583	2584-2603	2604-2623	2624-2642
มี.ค.	57.73	52.50	61.79	58.17	62.97
เม.ย.	65.53	46.95	54.80	47.89	105.81
ฤดูแล้ง	849.30	806.59	918.40	918.47	1,042.14
%เปลี่ยนแปลง	NA	-5.03	8.14	8.15	22.71
พ.ค.	243.73	240.15	264.25	106.10	339.54
มิ.ย.	403.38	355.65	429.98	251.00	444.47
ก.ค.	440.60	278.99	455.13	299.64	548.93
ส.ค.	563.78	576.64	1,302.83	662.55	994.77
ก.ย.	1,418.73	1,207.00	1,461.26	1,243.92	1,438.88
ต.ค.	1,285.25	1,493.23	1,320.32	1,351.16	1,374.54
ฤดูฝน	4,355.47	4,151.66	5,233.77	3,914.36	5,141.13
%เปลี่ยนแปลง	NA	-4.68	20.17	-10.13	18.04
รายปี	5,204.77	4,958.25	6,152.17	4,832.84	6,183.27



รูปที่ 4-18 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลภายใต้ภาพฉาย RCP 8.5 ในช่วงปี พ.ศ. 2543-2563 (ปีฐาน), 2564-2583, 2584-2603, 2604-2623 และ 2624-2642

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงของฝนในอนาคตภายใต้ภาพฉายการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หรือ Global Circulation Model (GCM) ที่เป็นที่ยอมรับในปัจจุบันมีจำนวนทั้งสิ้น 39 โมเดล (อ้างอิงฐานข้อมูล Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5)) ซึ่งแต่ละ GCMs จำลองค่าฝนที่ต่างกันอย่างมีสาเหตุมาจากความแตกต่างของขนาดกริดที่ใช้ และสมมติฐานการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ (Parameterization) รวมทั้งการใช้เทคนิค Downscaling เพื่อเพิ่มความละเอียดของกริดให้เหมาะสมต่อการศึกษาผลกระทบในระดับท้องถิ่น จากกริดของ GCM ขนาดมิติความกว้างและความยาวของกริดหลายร้อยกิโลเมตรเป็นขนาดกริดในระดับ 25 กิโลเมตร อีกทั้ง ความหลากหลายของภาพ

ฉายปริมาณก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ ประกอบด้วย RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 และ RCP 8.5 ด้วยเหตุดังกล่าว การศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศนั้นจึงมีความไม่แน่นอนสูง (High Uncertainties) จึงควรพิจารณาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำจากแบบจำลอง GCMs และเทคนิค Downscaling อื่น ๆ ร่วมด้วย ทั้งนี้ ในโครงการวิจัยนี้มีข้อจำกัดทางด้านการเข้าถึงข้อมูล GCMs และ Downscaling จึงมีเพียงผลการประเมินผลกระทบจากแบบจำลอง GCMs ของ EC-EARTH ด้วยวิธี RegCM4 ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และ RCP8.5 โดยในการศึกษาในอนาคตควรมีการนำผลจากแบบจำลอง GCMs และเทคนิค Downscaling อื่น ๆ ให้มากกว่านี้ เพื่อลดความไม่แน่นอนของการประเมินผลกระทบ

4.1.4 ผลการศึกษาผลกระทบจากการใช้สมการอัตราการคายระเหยน้ำของพีช

ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนภูมิพลในช่วงปี พ.ศ. 2543–2558 มีความแตกต่างกันมากในแต่ละวิธีการคำนวณอัตราการคายระเหยน้ำของพีชดังสรุปไว้ในตารางที่ 4–7 โดย Thornthwite ให้ผลสูงกว่าค่าอัตราการระเหยของกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วง 84.90% ในเดือนธันวาคมถึง 210.5% ในเดือนมิถุนายน สอดคล้องกับ Alkaeed et al. (2006) ได้ประเมินค่าอัตราการระเหยจากวิธี Thornthwite ที่สูงกว่าค่าตรวจวัดจริงในพื้นที่ Itoshima Peninsula ในจังหวัด Fukuoka ประเทศญี่ปุ่น สำหรับ Hargreaves และ Hamon มีผลแปรปรวนขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่ใช้พิจารณา ซึ่งในภาพรวมนั้น ในช่วงระหว่างเดือนมกราคมถึงเดือนมีนาคม และเดือนสิงหาคมถึงเดือนธันวาคม ผลจากการคำนวณมีค่าต่ำกว่าค่าตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยา ในขณะที่ เดือนเมษายน ถึงเดือนสิงหาคมมีค่าสูงกว่า ทั้งนี้ ในการศึกษาของโครงการวิจัยนี้มีข้อจำกัดเนื่องจากยังไม่สามารถคำนวณอัตราการคายระเหยน้ำของพีชด้วยวิธี Penman–Monteith Equation (Monteith, 1965) ซึ่งเป็นวิธีการประเมินที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุด แต่สมการดังกล่าวมีความซับซ้อน และต้องใช้พารามิเตอร์เฉพาะที่ต้องตรวจวัดจริงในพื้นที่ จึงยังไม่สามารถดำเนินการคำนวณได้ จึงยังไม่สามารถสรุปได้ว่าวิธีการใดสามารถนำมาใช้เป็นตัวแทนอัตราการคายระเหยน้ำของพีชของพื้นที่ได้

ตารางที่ 4–7 เปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนภูมิพลในช่วงปี 2543–2558 จากการใช้วิธีการคำนวณค่าอัตราการระเหยที่แตกต่างกันในแต่ละคู่เปรียบเทียบ

คู่เปรียบเทียบ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
Thornthwite VS TMD	92.5	90.6	110.1	141.4	167.5	210.5	242.0	159.1	104.4	99.2	86.2	84.9
Hargreaves VS TMD	-15.3	-13.8	-7.9	1.7	28.9	18.7	3.3	-3.1	-9.3	-21.1	-21.8	-16.7
Hamon VS TMD	-11.5	-10.5	-5.8	0.1	20.5	13.5	1.0	-4.4	-7.9	-17.3	-17.2	-12.8
Hargreaves VS Thornthwite	-122.0	-117.0	-126.7	-137.4	-107.5	-161.6	-231.2	-167.1	-123.3	-141.2	-126.7	-115.7
Hamon VS Thornthwite	-114.6	-110.5	-122.2	-141.2	-121.9	-173.6	-238.5	-170.5	-120.6	-133.7	-118.3	-108.5
Hamon VS Hargreaves	3.5	3.1	2.0	-1.6	-7.0	-4.6	-2.2	-1.3	1.2	3.2	3.9	3.5

4.2 ผลการประมาณการความต้องการน้ำในกิจกรรมต่าง ๆ

งานวิจัยนี้ได้ทำการทบทวนวรรณกรรมจากเอกสารรายงานที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ และทำการประมาณการความต้องการน้ำในกิจกรรมหลักในกลุ่มน้ำปึงตอนล่างและลุ่มน้ำเจ้าพระยาโดยครอบคลุม 4 กิจกรรมหลัก ดังนี้ (1) ความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรม (Agricultural Water Demand) ซึ่งเป็นผลรวมของความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานและปศุสัตว์ (2) ความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคและการท่องเที่ยว (Water Supply and Tourism Water Demand) (3) ความต้องการน้ำเพื่อการอุตสาหกรรม (Industrial Water Demand) และ (4) ความต้องการน้ำเพื่อควบคุมสภาพลำน้ำและรักษาสมดุลระบบนิเวศท้ายเขื่อน (Environmental Flow Requirement) โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเขื่อนภูมิพล ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

4.2.1 ความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรม (Agricultural Water Demand)

4.2.1.1 ผลการทบทวนวรรณกรรม

จากรายงานเรื่อง “การดำเนินการด้านการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลโครงการพัฒนาระบบคลังข้อมูล 25 กลุ่มน้ำ และแบบจำลองน้ำท่วมและน้ำแล้ง กลุ่มน้ำเจ้าพระยา” (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน), 2555) ได้ประเมินปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรมด้วยแบบจำลอง WUSMO (พื้นที่ชลประทาน) และแบบจำลอง SWAT (พื้นที่เกษตรน้ำฝน) จากปฏิทินการเพาะปลูกและฝนใช้การจากสถานีตรวจวัดเป็นรายลุ่มน้ำย่อย และประยุกต์ใช้วิธี “Modified Penman” รวมทั้งอาศัยค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Crop Coefficient, Kc) ของกรมชลประทาน ซึ่งผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานในพื้นที่บึงบอระเพ็ดและพื้นที่ราบแม่น้ำเจ้าพระยาในปี พ.ศ. 2546 ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4-8 โดยมีปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานรวมเท่ากับ 7,787.60 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

ตารางที่ 4-8 ผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานในปี พ.ศ. 2546

พื้นที่	ความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานในปี พ.ศ. 2546			
	พื้นที่ชลประทาน (ไร่)	ปริมาณความต้องการน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	อัตราการใช้น้ำ (ลบ.ม./ไร่)	
			ฤดูฝน	ฤดูแล้ง
บึงบอระเพ็ด	248,800	328.37	878	1,333
ที่ราบแม่น้ำเจ้าพระยา	5,593,020	7,459.23	946	1,494
รวม	5,593,020	7,787.60	943	1,486

ที่มา : สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) (2555)

นอกจากนี้ สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) ยังได้ประเมินปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการปศุสัตว์ โดยใช้ฐานข้อมูล กชช. 2ค. ปี พ.ศ. 2552 จากกรมพัฒนาชุมชน กระทรวงมหาดไทย ซึ่งได้รวบรวมประเภทและจำนวนปศุสัตว์ไว้ในระดับตำบล โดยอาศัยหลักเกณฑ์ตามที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4-9 โดยพบว่า ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการปศุสัตว์รวมเท่ากับ 34.96 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

ตารางที่ 4-9 หลักเกณฑ์และผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการปศุสัตว์

ประเภทสัตว์	อัตราการใช้น้ำ (ลิตร/ตัว/วัน)	ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อ การปศุสัตว์ (ล้าน ลบ.ม./ปี)
โคและกระบือ	80	6.18
หมู	20	2.40
แพะและแกะ	15	-
ไก่และเป็ด	3	13.41
อื่น ๆ	15	12.97
รวม	-	34.96

ที่มา : สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) (2555)

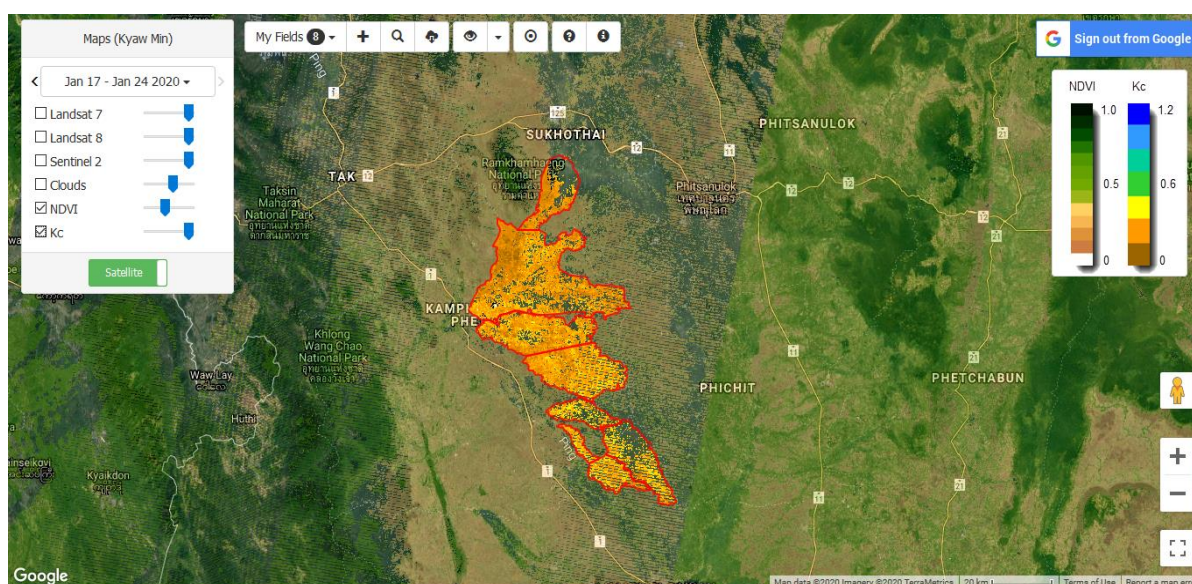
4.2.1.2 ผลการประมาณการความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรม

4.2.1.2.1 ความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรมในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนล่าง

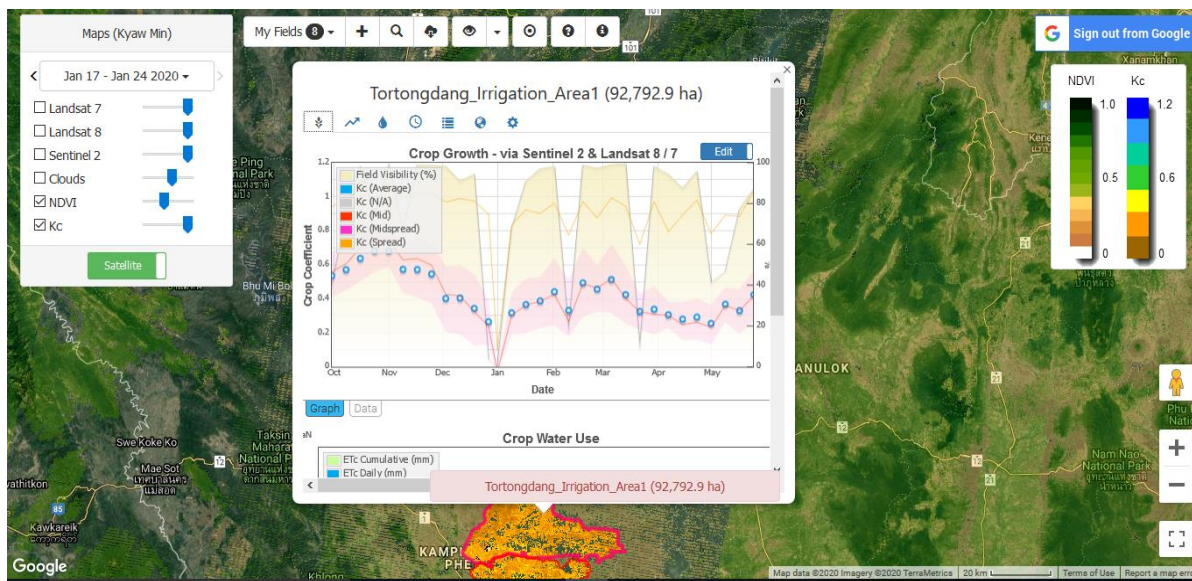
ผลการประมาณการความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรมในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนล่างในงานวิจัยนี้ครอบคลุม 4 โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา ได้แก่ (1) โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาท่อทองแดง (TTD) (2) โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาวังบัว (WB) (3) โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาวังยาง (WY) และ (4) โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาหนองขวัญ (NK) โดยอาศัย Cloud-Based IrrisAT Application ซึ่งมีพื้นที่รวมทั้งสิ้น 1,648,750 ไร่ ดังแสดงในตารางที่ 4-10 ทั้งนี้ได้ดำเนินการนำข้อมูลแผนที่เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่า Kc-IrrisAT ตั้งแต่ในช่วงปี พ.ศ. 2543-2561 ดังแสดงในรูปที่ 4-19 และรูปที่ 4-20

ตารางที่ 4-10 พื้นที่ชลประทานที่เพาะปลูกในลุ่มน้ำปิงตอนล่างและช่วงค่าสูงสุดของ Kc-IrrisAT

โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา	พื้นที่ชลประทาน (ตารางกิโลเมตร)	MAX. K _c (average)-IrrisAT	MAX. K _c (max)-IrrisAT
ท่อทองแดง	643,125	0.77	1.14
วังบัว	446,250	0.82	1.11
วังยาง	101,875	0.78	1.10
หนองขวัญ	457,500	0.81	1.11
รวม	1,648,750		



รูปที่ 4-19 พื้นที่โครงการชลประทานในลุ่มน้ำปิงตอนล่างที่นำเข้าไปใน Cloud-Based IrrisAT Application



รูปที่ 4-20 ตัวอย่างผลการประมาณการ Kc-IrriSAT ในลุ่มน้ำปึงตอนล่างด้วย Cloud-Based IrriSAT Application

จากนั้นทำการหาค่าพื้นที่เพาะปลูกสะสมจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) หรือ GISTDA ในช่วงระหว่างเดือนตุลาคม พ.ศ. 2561 ถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2562 เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชเฉลี่ยจากข้อมูลของกรมชลประทาน หรือในที่นี้กำหนดให้เป็น Avg. Kc-RID โดยสามารถติดตามข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกสะสมของ 4 ชนิดพืชที่ปลูกในพื้นที่โครงการชลประทานในลุ่มน้ำปึงตอนล่างในช่วงเวลาดังกล่าวได้ ซึ่งครอบคลุม (1) ข้าว (2) อ้อย (3) ข้าวโพด และ (4) มันสำปะหลัง จากนั้นอาศัยข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่ได้จากการทดลองในภาคสนามของกรมชลประทานมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแบบถ่วงน้ำหนักตามสัดส่วนพื้นที่เพาะปลูกดังแสดงในสมการที่ 4-1 และแสดงค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในตารางที่ 4-11

$$\text{Average Kc-RID} = \frac{(Kc_{ri} \times \text{Area}_{ri}) + (Kc_{su} \times \text{Area}_{su}) + (Kc_{co} \times \text{Area}_{co}) + (Kc_{ca} \times \text{Area}_{ca})}{\text{Total Area}} \quad \text{-----(4-1)}$$

- เมื่อ Kc_{ri} = ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของข้าว
- Kc_{su} = ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อย
- Kc_{co} = ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของข้าวโพด
- Kc_{ca} = ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของมันสำปะหลัง
- Area_{ri} = พื้นที่เพาะปลูกข้าว
- Area_{su} = พื้นที่เพาะปลูกอ้อย
- Area_{co} = พื้นที่เพาะปลูกข้าวโพด
- Area_{ca} = พื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลัง

ตารางที่ 4-11 ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของข้าว อ้อย ข้าวโพด และมันสำปะหลัง

สัปดาห์ที่	Kc-จากสูตร Penman-Monteith			Kc-มันสำปะหลัง
	Kc-ข้าว	Kc-อ้อย	Kc-ข้าวโพด	
1	0.66	0.65	0.63	0.3
2	0.79	0.86	0.72	0.3
3	0.97	1.13	0.86	0.3
4	1.18	1.35	1.13	0.5
5	1.35	1.56	1.35	0.5
6	1.51	1.29	1.52	0.5
7	1.61	1.2	1.61	0.5
8	1.64	0.93	1.63	0.5
9	1.62	0.63	1.58	0.3
10	1.6	0.52	1.5	0.3
11	1.55		1.38	0.3
12	1.46		1.15	
13	1.78		0.9	
14	1.08		0.67	

ที่มา : กรมชลประทาน (2563); FAO (2020)

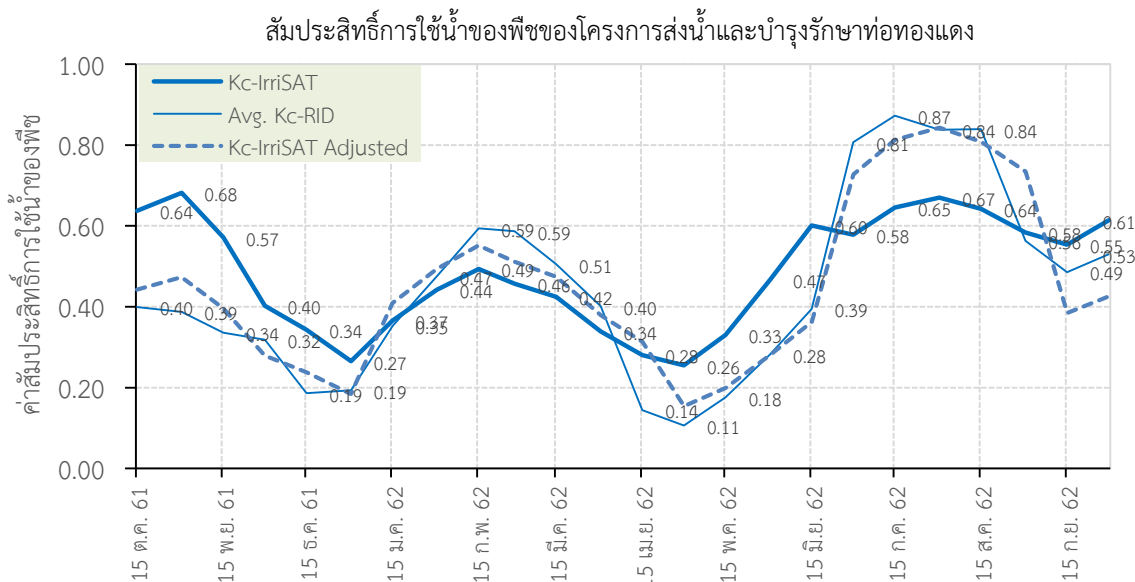
4.2.1.2.1.1 ผลการวิเคราะห์ค่าแฟคเตอร์ปรับแก้สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

ผลการวิเคราะห์ค่าแฟคเตอร์ปรับแก้ (Adjusted Factor) ของค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชเพื่อให้ค่า Kc-IrrisAT และค่า Avg. Kc-RID มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดโดยอาศัยช่วงข้อมูลที่มีอยู่ในในช่วงระหว่างเดือนตุลาคม พ.ศ. 2561 ถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2562 สำหรับนำค่า Kc-IrrisAT Adjusted ไปใช้ในการประมาณการความต้องการน้ำระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ในขั้นตอนถัดไป ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากหลักการหาค่าที่ดีที่สุดแสดงในตารางที่ 4-12 โดยกำหนดแฟคเตอร์ปรับแก้ออกเป็น 4 ช่วงของการเจริญเติบโต ได้แก่ (1) ช่วงเริ่มต้นของการเจริญเติบโตของพืชฤดูฝน (2) ช่วงกลางของการเจริญเติบโตของพืชฤดูฝน (3) ช่วงปลายของการเจริญเติบโตของพืชฤดูฝน และ (4) ช่วงเริ่มต้น-กลาง-ปลายของการเจริญเติบโตของพืชฤดูแล้ง

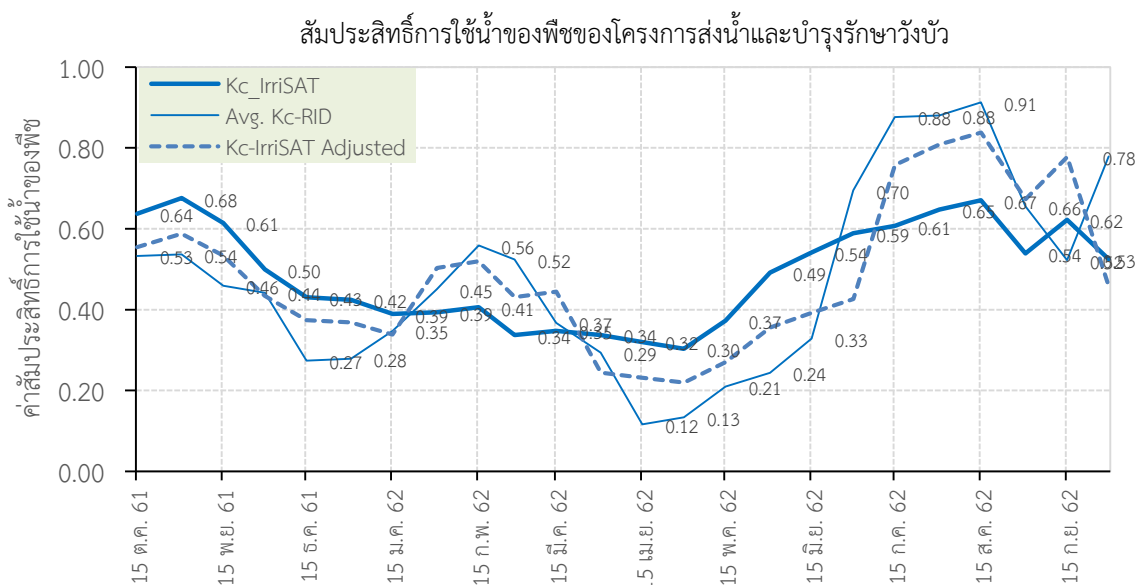
ตารางที่ 4-12 แฟคเตอร์ปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแยกรายโครงการ

โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา	แฟคเตอร์ปรับแก้			
	พืชฤดูแล้ง	พืชฤดูฝน		
ช่วงการเจริญเติบโต	Initial-Mid-End	Initial	Mid	End
ระยะเวลา	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
ท่อทองแดง	1.1	0.6	1.3	0.7
วังบัว	1.3	0.7	1.2	0.9
วังยาง	1.3	0.3	1.4	0.6
หนองขวัญ	1.1	0.6	1.1	0.8

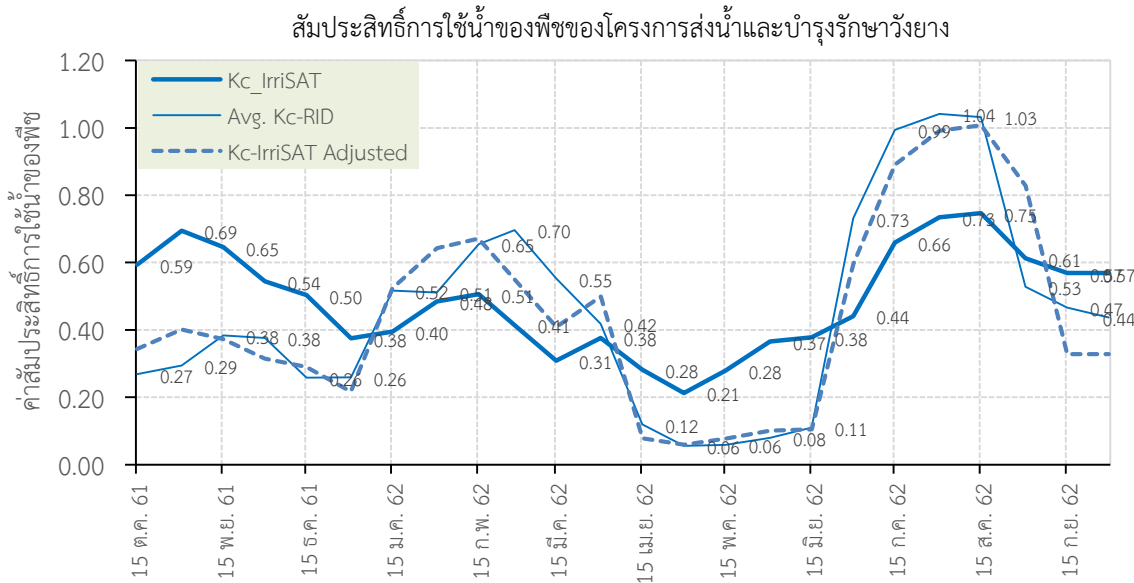
ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted และค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrriSAT และ Avg. Kc-RID ก่อนการปรับแก้ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาท่อทองแดง ว่างยาง ว่างบัว และหนองขวัญ แสดงในรูปที่ 4-21 ถึงรูปที่ 4-28



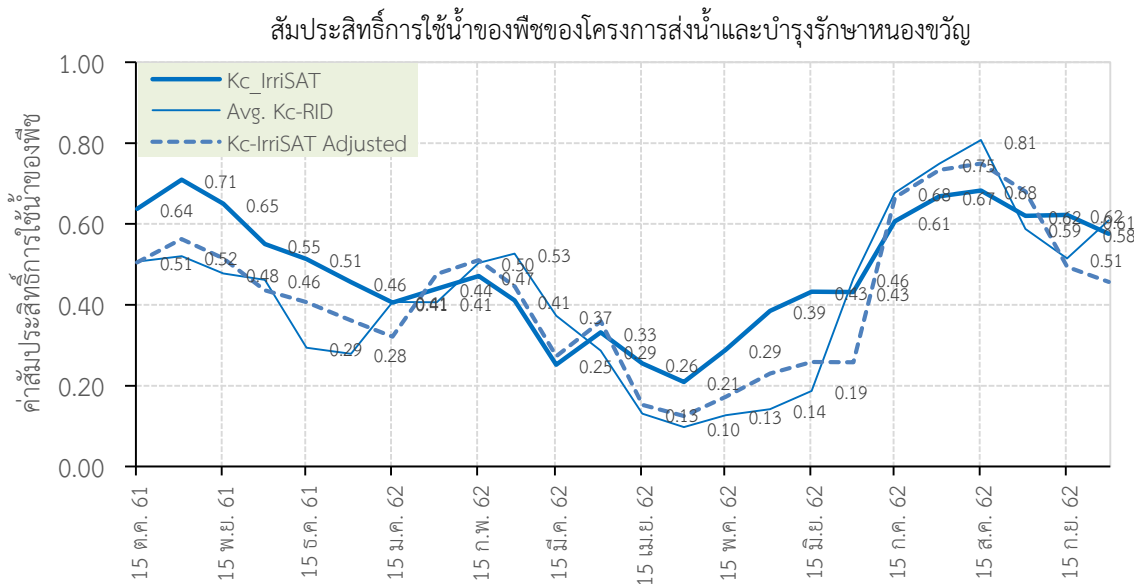
รูปที่ 4-21 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาท่อทองแดง



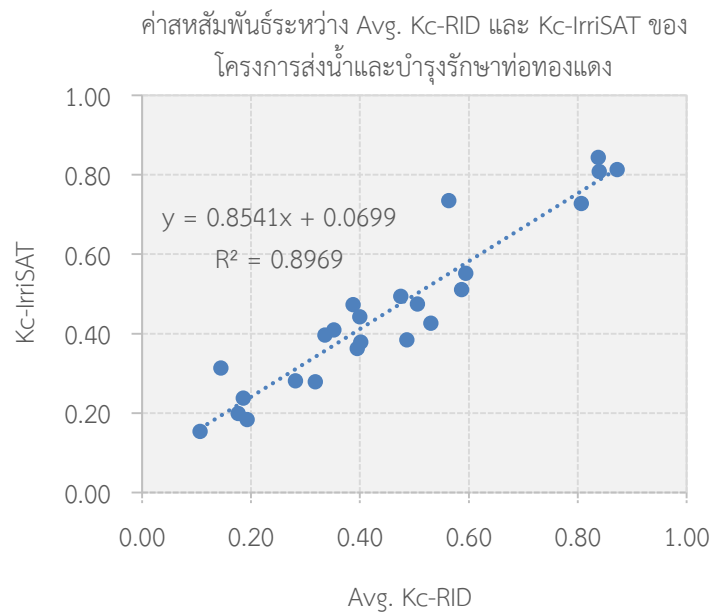
รูปที่ 4-22 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาว่างบัว



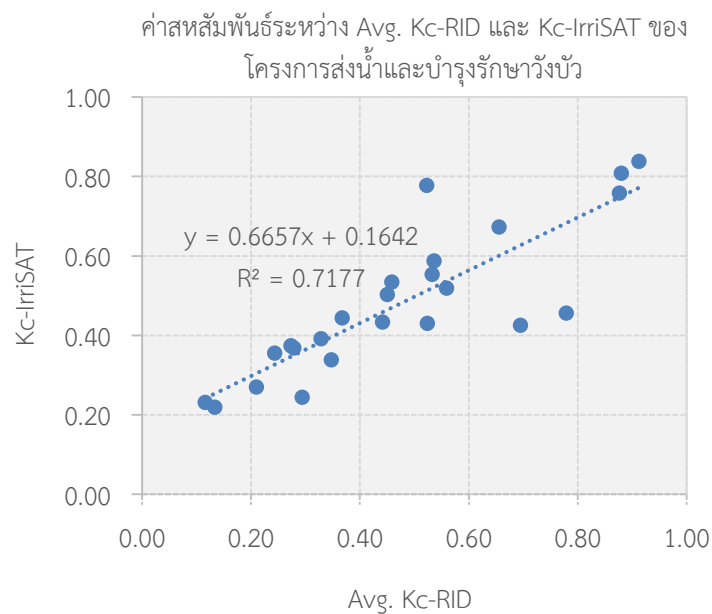
รูปที่ 4-23 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาวังยาง



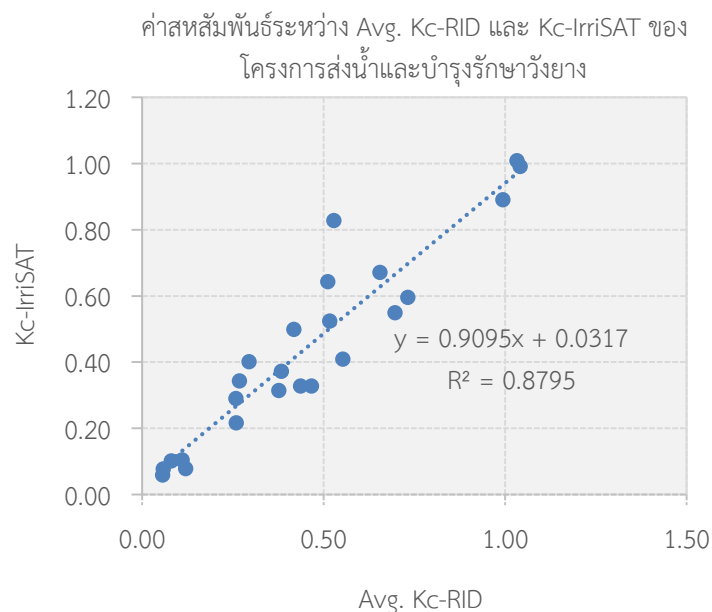
รูปที่ 4-24 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาหนองขัว



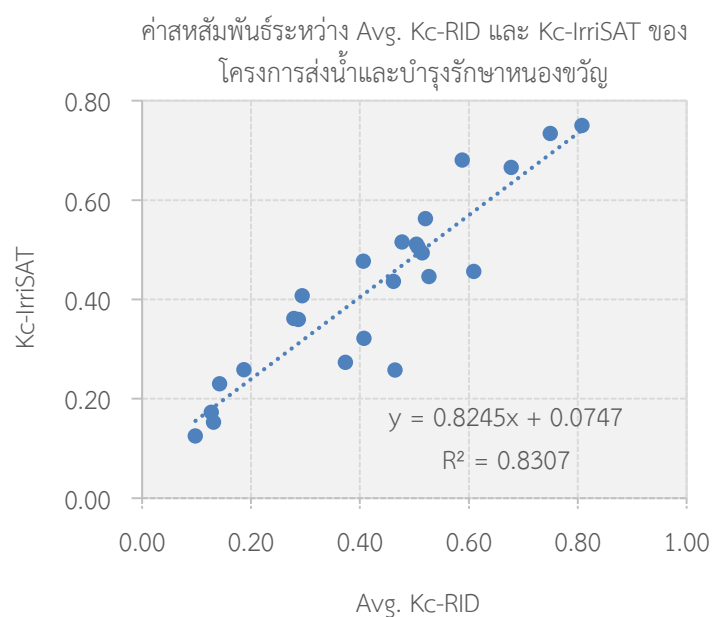
รูปที่ 4-25 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrriSAT และ Avg. Kc-RID ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาท่อทองแดง



รูปที่ 4-26 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrriSAT และ Avg. Kc-RID ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาวังบัว



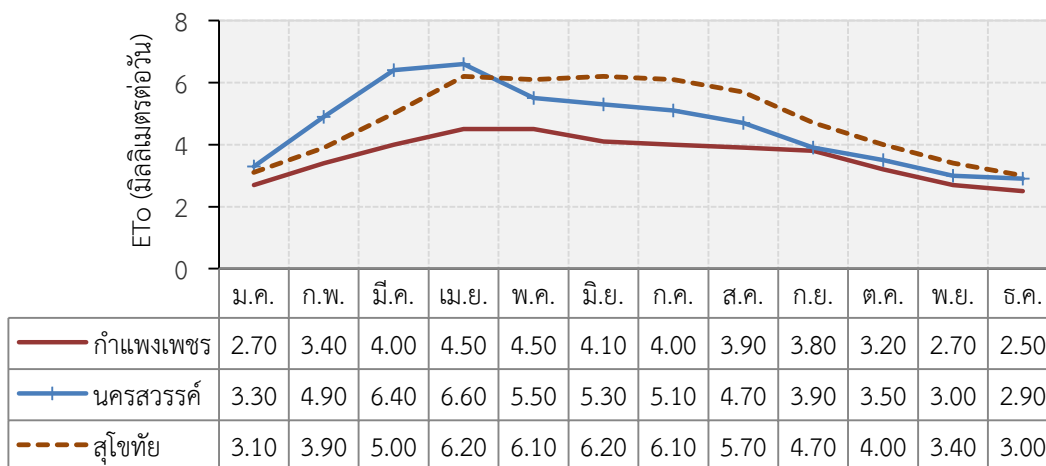
รูปที่ 4-27 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrrisAT และ Avg. Kc-RID ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาวังยาง



รูปที่ 4-28 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrrisAT และ Avg. Kc-RID ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาหนองขี้ฉี่

4.2.1.2.1.2 ผลการคำนวณค่าปริมาณการคายระเหยน้ำของพืชอ้างอิง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณค่าปริมาณการคายระเหยน้ำของพืชอ้างอิง (Reference Crop Evapotranspiration, ETo) โดยอาศัยสูตรการคำนวณ FAO Penman-Monteith และข้อมูลสภาพภูมิอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่โครงการชลประทานทั้ง 4 โครงการ ซึ่งส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในพื้นที่จังหวัดกำแพงเพชร จังหวัดนครสวรรค์ และจังหวัดสุโขทัย และอาศัยโปรแกรม ETo Calculator มาช่วยในการคำนวณให้ผลดังแสดงในรูปที่ 4-29



รูปที่ 4-29 ผลการประมาณการปริมาณการคายระเหยน้ำของพืชอ้างอิงในบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำปึงตอนล่าง

4.2.1.2.1.3 ผลการคำนวณค่าปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรม

ผลการคำนวณค่าปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรมในพื้นที่ลุ่มน้ำปึงตอนล่างในปี พ.ศ. 2561 ทั้ง 4 โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาได้แสดงในตารางที่ 4-13 ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรมรายปีที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชทั้ง Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง (-0.09%)–1.97%, 4.29%–7.31%, 3.56%–6.44% และ (-4.15%)–0.29% สำหรับโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาท่อทองแดง วังบัว วังยาง และหนองขวัญ ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มน้อยลงเมื่อประยุกต์ใช้ Kc-IrriSAT Adjusted เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก Avg. Kc-RID อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้ Kc-IrriSAT และ Kc-IrriSAT Adjusted ในการคำนวณหาปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรมแสดงให้เห็นถึงลักษณะความผันแปรของปริมาณความต้องการน้ำในแต่ละเดือน ซึ่งคาดว่าจะส่งผลต่อการจัดสรรน้ำให้สอดคล้องตามความต้องการน้ำที่แท้จริงในแต่ละช่วงของการเจริญเติบโตของพืช

ตารางที่ 4-13 ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรม

เดือน	ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรม (ล้าน ลบ.ม.) ^{1/}											
	TTD ^{2/}			WB ^{2/}			WY ^{2/}			NK ^{2/}		
	Avg. K _c -RID	K _c - IrrisAT	K _c -IrrisAT Adjusted	Avg. K _c -RID	K _c - IrrisAT	K _c -IrrisAT Adjusted	Avg. K _c -RID	K _c - IrrisAT	K _c -IrrisAT Adjusted	Avg. K _c -RID	K _c - IrrisAT	K _c -IrrisAT Adjusted
ม.ค.	14.43	14.08	15.74	15.35	15.01	16.22	12.25	10.34	13.71	4.42	4.58	4.28
ก.พ.	25.94	20.89	23.36	24.12	16.64	21.27	15.63	10.61	14.07	5.44	4.66	5.05
มี.ค.	19.70	16.57	18.52	7.66	7.90	8.05	8.18	5.62	7.45	2.03	1.75	1.90
เม.ษ.	3.47	7.30	6.65	1.92	4.78	3.46	0.62	1.63	0.45	0.42	0.85	0.51
พ.ค.	8.95	15.44	9.31	4.72	9.02	6.53	0.24	1.13	0.31	0.41	1.03	0.61
มิ.ย.	40.71	36.25	36.87	17.04	17.22	12.46	7.03	4.77	5.75	1.65	1.90	1.13
ก.ค.	69.35	53.35	67.16	34.83	24.88	31.09	23.79	16.31	22.02	5.36	4.79	5.25
ส.ค.	57.07	50.22	63.23	26.90	20.74	25.92	16.93	14.79	19.97	5.23	4.91	5.39
ก.ย.	34.54	39.70	27.53	20.46	17.42	18.32	7.64	8.45	4.88	4.08	4.35	3.44
ต.ค.	17.82	29.83	20.69	14.40	17.69	15.38	3.06	7.03	4.06	3.49	4.58	3.63
พ.ย.	11.63	17.42	12.08	15.56	19.29	16.77	8.30	13.01	7.52	4.79	6.13	4.86
ธ.ค.	4.37	7.02	4.87	9.24	14.31	12.44	5.02	8.57	4.95	2.81	4.77	3.78
รายปี	307.98	308.07	306.02	192.21	184.89	187.92	108.70	102.26	105.14	40.15	44.30	39.85
%ERROR	-	-0.09	1.97	-	7.31	4.29	-	6.44	3.56	-	-4.15	0.29

Remark : ^{1/}Calculations of crop water demand are based on the accumulated area size of four main types of crop monitored by GISTDA during 2018–2019. ^{2/}Average values of $ET_{O_{KPP, SKT}}$, $ET_{O_{KPP}}$, $ET_{O_{KPP, NSW}}$, $ET_{O_{KPP, NSW}}$ are used for the calculations of crop water demands of TDD, WB, WY, and NK irrigation area, respectively.

4.2.1.2.2 ความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรมในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการประมาณการความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรมในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีนครอบคลุม 26 โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา ดังแสดงรายละเอียดโครงการและขนาดพื้นที่ชลประทานในตารางที่ 4-14 โดยอาศัย Cloud-Based IrrisAT Application ซึ่งมีพื้นที่รวมทั้งสิ้น 7,620,443 ไร่ โดยได้ทำการวิเคราะห์หาค่า K_c-IrrisAT ตั้งแต่ในช่วงปี พ.ศ. 2543–2561 ดังแสดงในรูปที่ 4-30

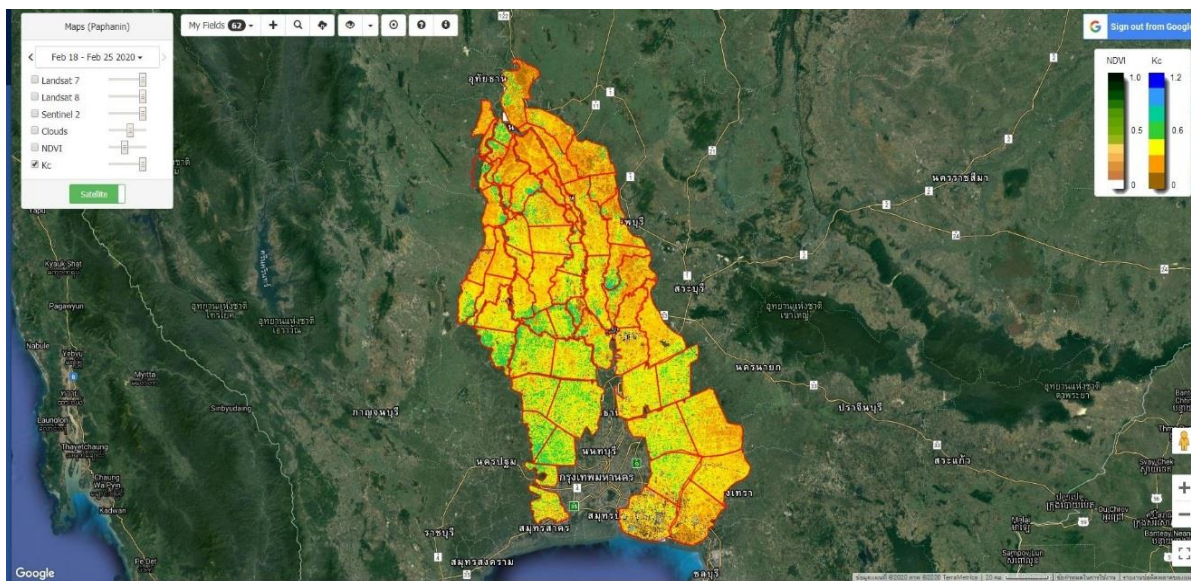
ตารางที่ 4-14 โครงการชลประทานในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาและขนาดพื้นที่

โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา	พื้นที่ชลประทาน (ไร่)	รวมพื้นที่ชลประทาน (ไร่)
โครงการชลประทานประเภทสูบน้ำ		
วัดสิงห์	67,744	204,744
บางบาล	137,000	
กลุ่มใช้น้ำชลประทานจากแม่น้ำสุพรรณ		
พลเทพ	96,300	1,113,656
ท่าโบสถ์	196,356	
สามชุก	305,000	
ดอนเจดีย์	146,000	
โพธิ์พระยา	370,000	
กลุ่มใช้น้ำชลประทานจากแม่น้ำน้อย		

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเขื่อนภูมิพล ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

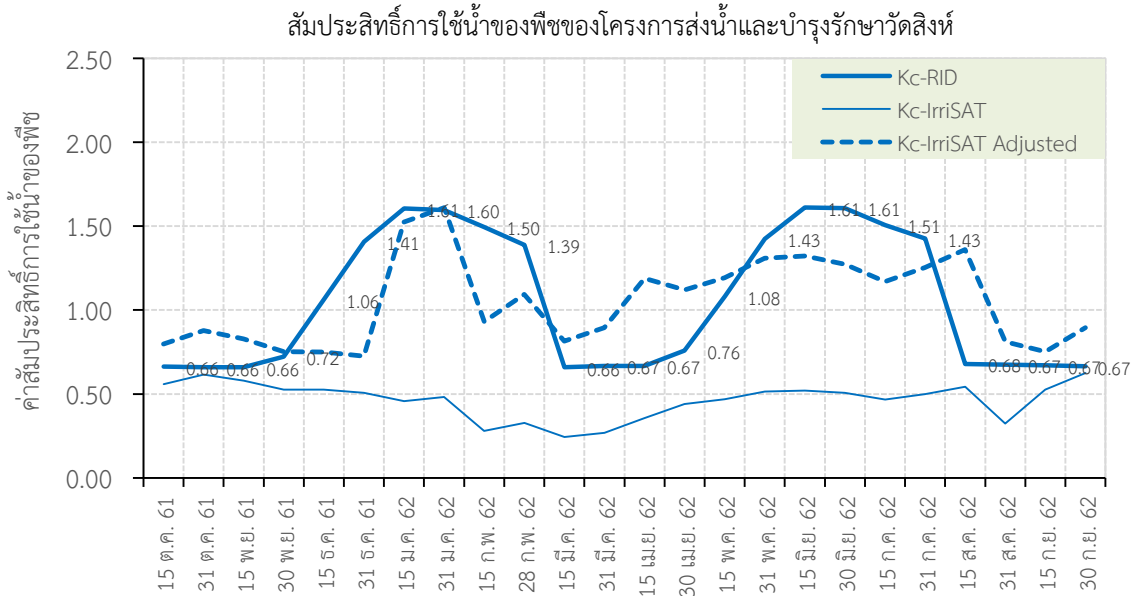
โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา	พื้นที่ชลประทาน (ไร่)	รวมพื้นที่ชลประทาน (ไร่)
บรมธาตุ	365,000	1,229,571
ชั้นสูตร	448,250	
ยางมณี	210,321	
ผักไห่	206,000	
โครงการชลประทานฝั่งตะวันออกตอนบนที่รับน้ำจากคลองชัยนาท-อยุธยา และคลองชัยนาท-ป่าสัก		
มหาราช	485,400	1,392,874
มโนรมย์	284,265	
ช่องแค	238,739	
โคกกระเทียม	205,470	
เริงราง	179,000	
โครงการชลประทานฝั่งตะวันออกตอนล่างที่รับน้ำจากคลองชัยนาท-ป่าสัก และเขื่อนทดน้ำพระรามหก		
ป่าสักใต้	240,600	1,489,148
นครหลวง	267,048	
รังสิตเหนือ	455,500	
รังสิตใต้	526,000	
โครงการชลประทานในพื้นที่ราบน้ำท่วมถึง_โครงการชลประทานฝั่งตะวันตกตอนล่าง		
เจ้าเจ็ดบางยี่หน	406,000	1,155,450
พระยาบันลือ	358,650	
พระพิมล	266,000	
ภาษีเจริญ	124,800	
โครงการชลประทานในพื้นที่ราบน้ำท่วมถึง_โครงการชลประทานฝั่งตะวันออกตอนล่าง		
คลองด่าน	525,000	1,035,000
พระองค์ไชยานุชิต	510,000	
รวม	7,620,443	

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

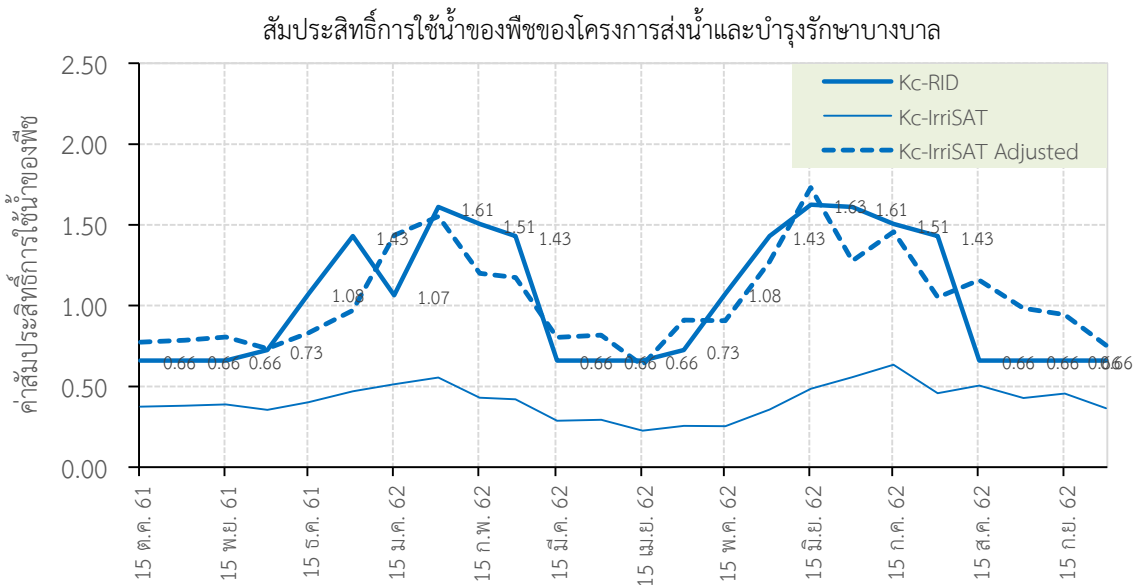


รูปที่ 4-30 พื้นที่โครงการชลประทานในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาที่นำเข้าไปใน Cloud-Based IrrisAT Application

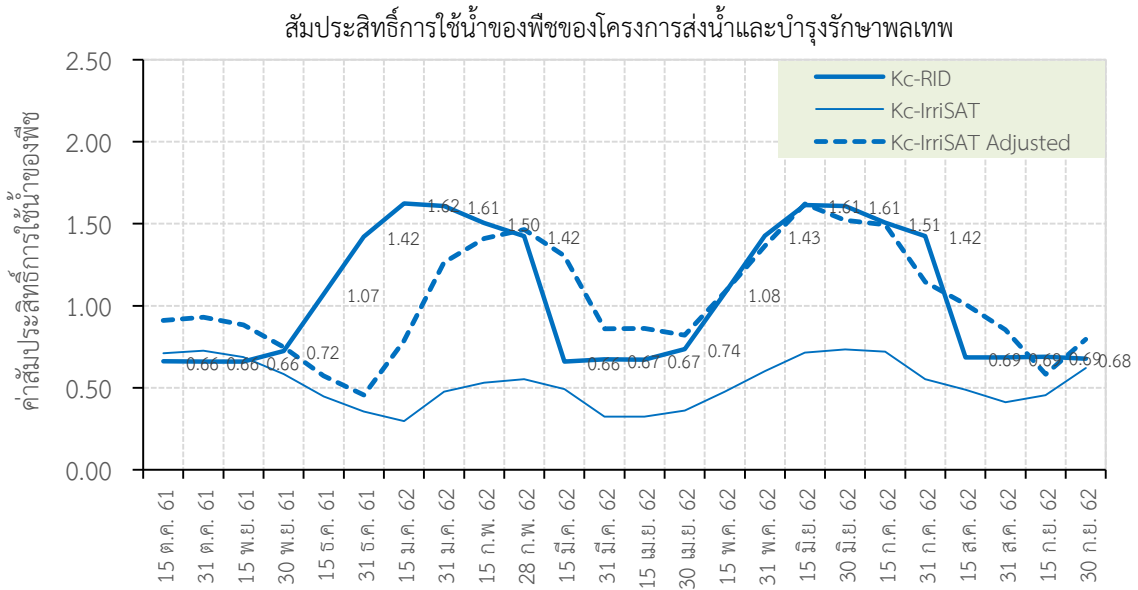
ในทำนองเดียวกัน งานวิจัยนี้ได้ทำการหาค่าพื้นที่เพาะปลูกสะสมจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) หรือ GISTDA ในช่วงระหว่างเดือนตุลาคม พ.ศ. 2561 ถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2562 เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชเฉลี่ยจากข้อมูลของกรมชลประทาน หรือในที่นี้กำหนดให้เป็น Avg. Kc-RID โดยสามารถติดตามข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกสะสมของ 4 ชนิดพืชที่ปลูกในพื้นที่โครงการชลประทานในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาในช่วงเวลาดังกล่าวได้ ซึ่งครอบคลุม (1) ข้าว (2) อ้อย (3) ข้าวโพด และ (4) มันสำปะหลัง จากนั้นอาศัยข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่ได้จากการทดลองในภาคสนามของกรมชลประทานมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแบบถ่วงน้ำหนักตามสัดส่วนพื้นที่เพาะปลูกดังแสดงในสมการที่ 4-1 และแสดงค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในตารางที่ 4-5 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrrisAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrrisAT Adjusted และค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrrisAT และ Avg. Kc-RID ก่อนการปรับแก้ของทั้ง 26 โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา แสดงในรูปที่ 4-31 ถึงรูปที่ 4-56



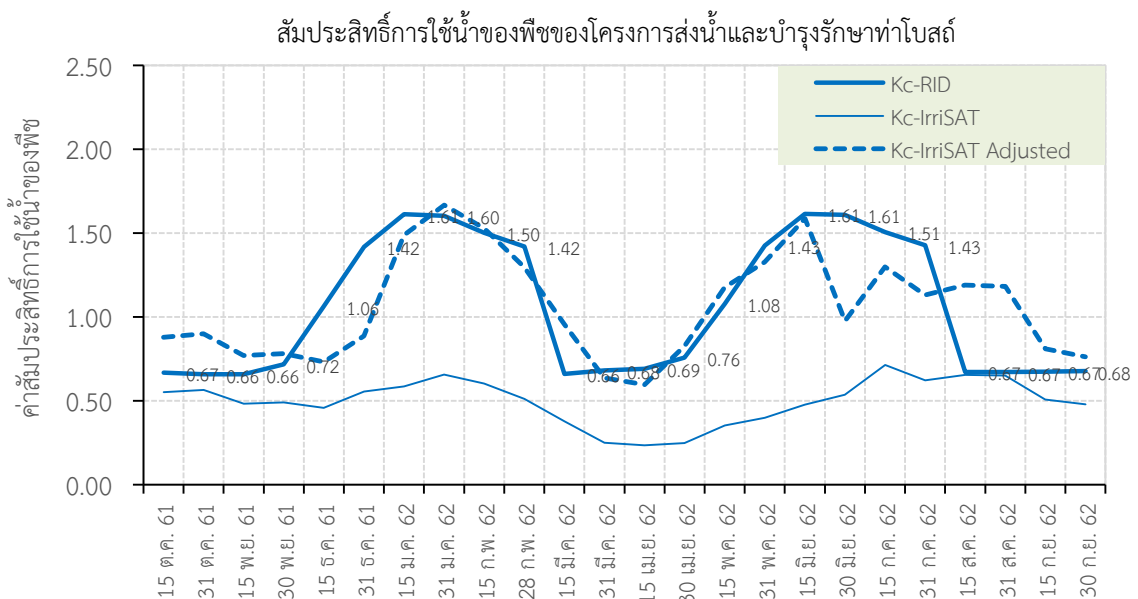
รูปที่ 4-31 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาวัดสิงห์



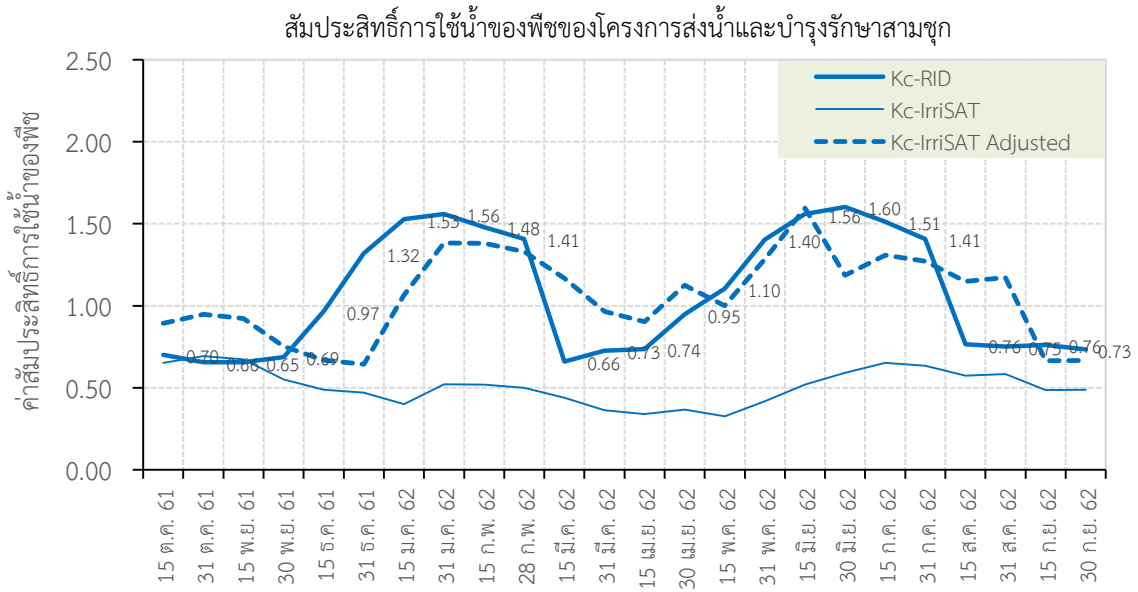
รูปที่ 4-32 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาบางบาล



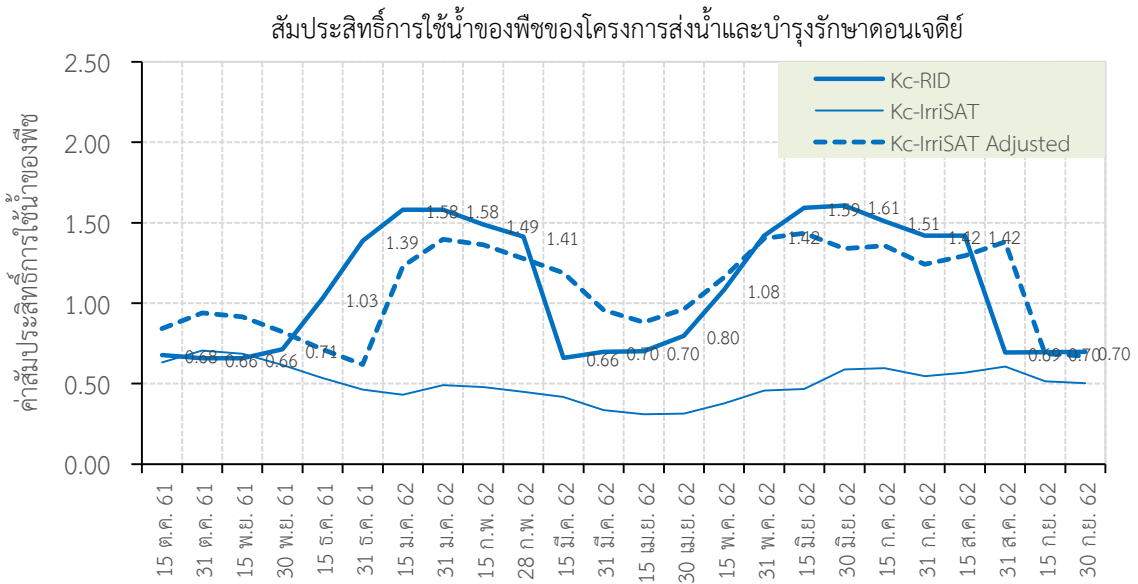
รูปที่ 4-33 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพลเทพ



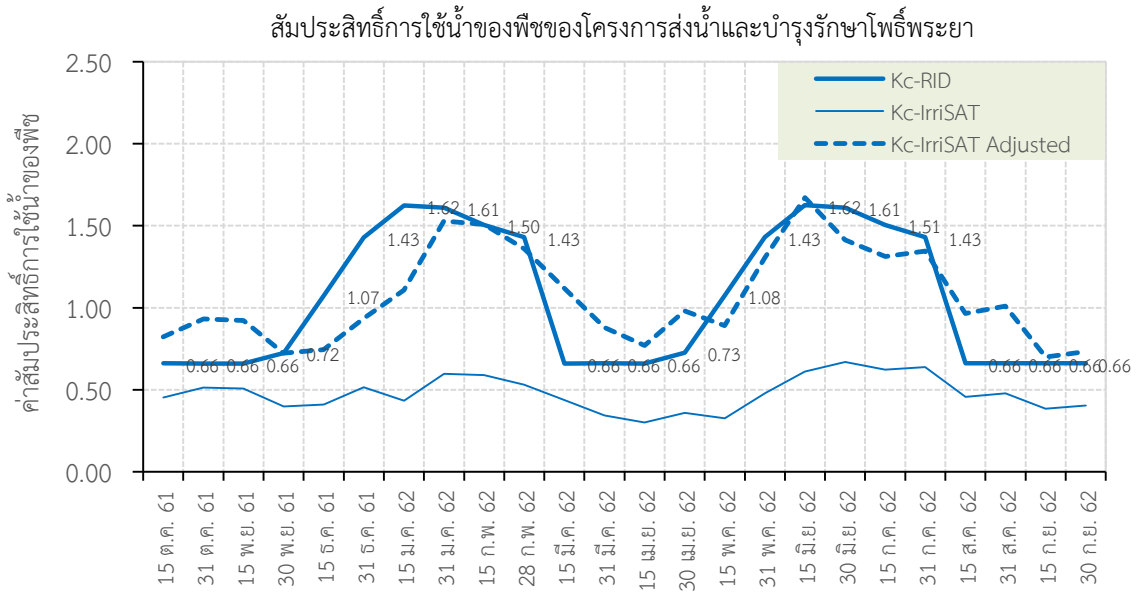
รูปที่ 4-34 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาท่าโบสถ์



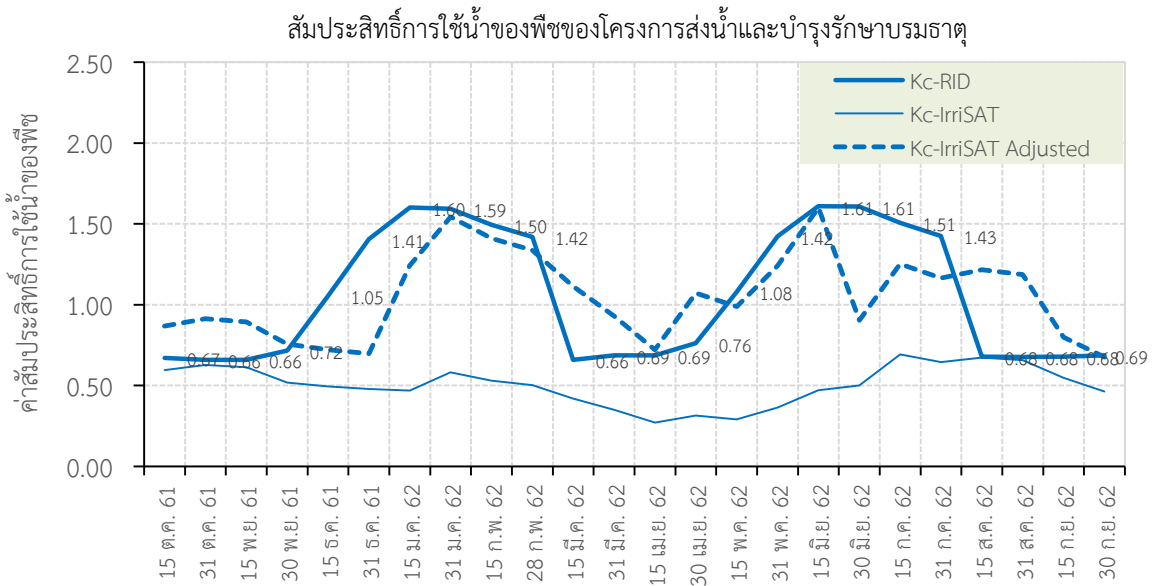
รูปที่ 4-35 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาสามชุก



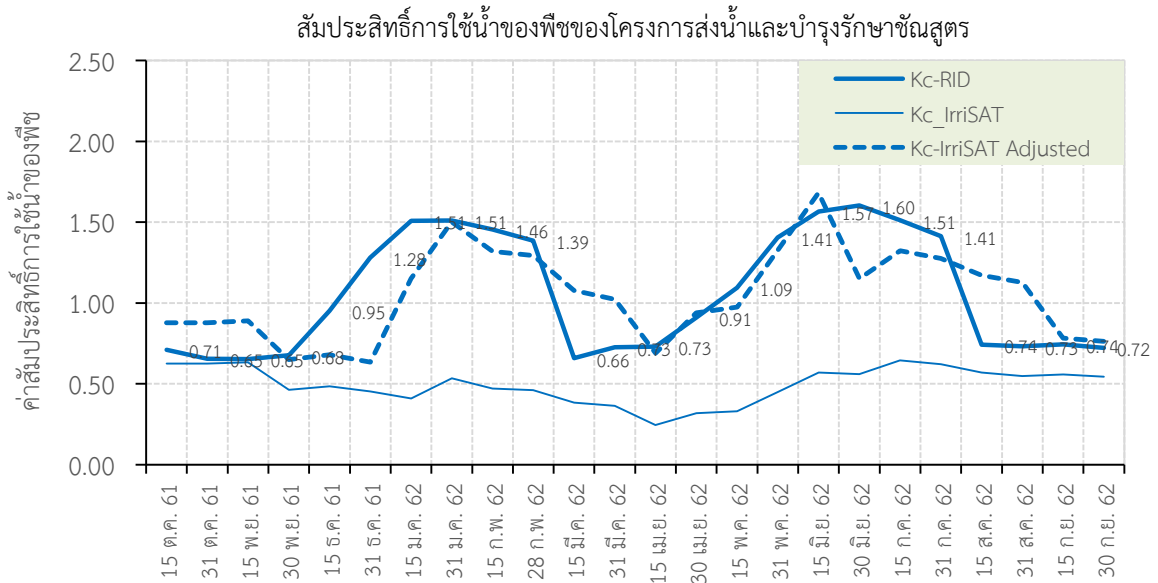
รูปที่ 4-36 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาอนเจดีย์



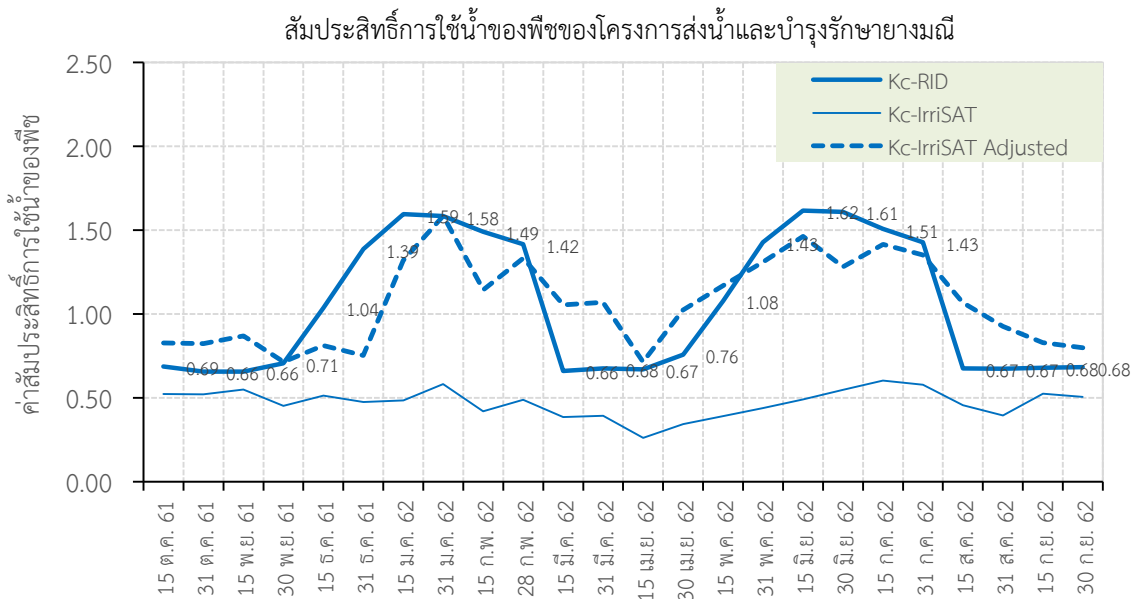
รูปที่ 4-37 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาโพธิ์พระยา



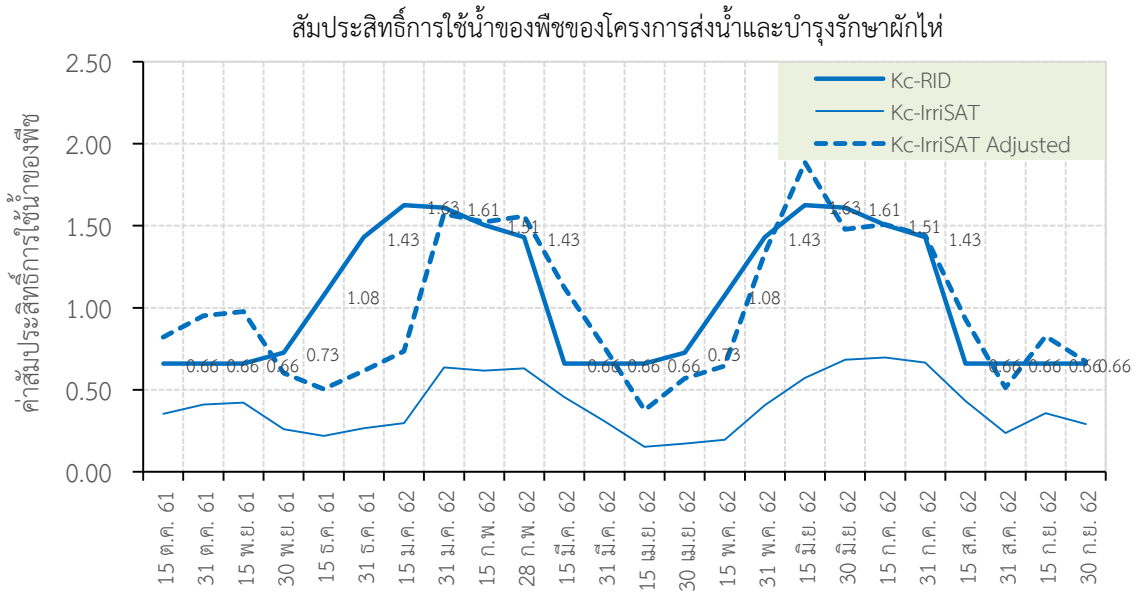
รูปที่ 4-38 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาบรมธาตุ



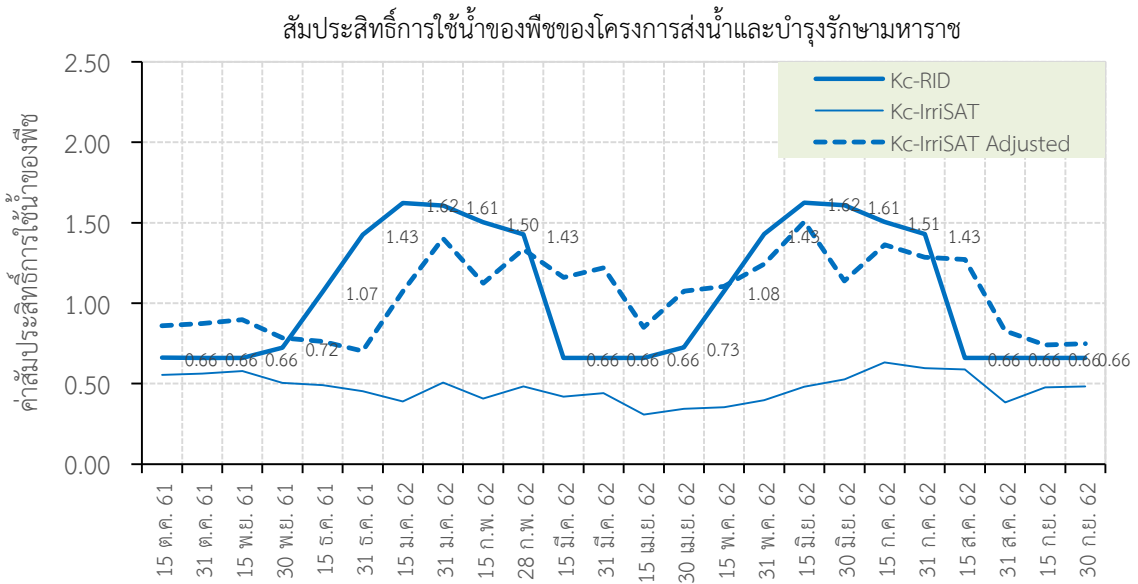
รูปที่ 4-39 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrrisAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrrisAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาชั้นสูตร



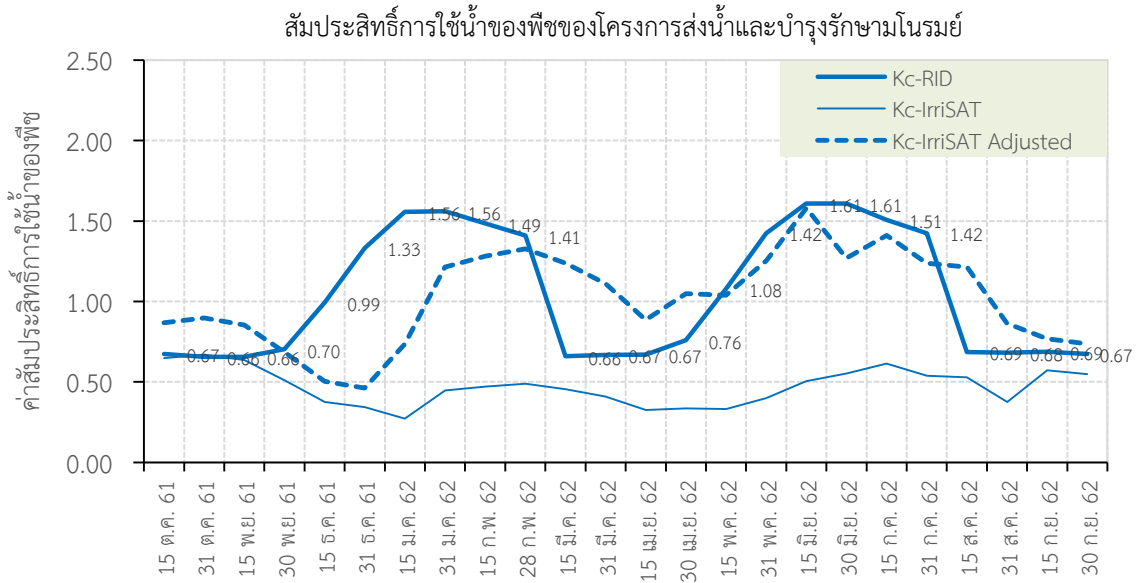
รูปที่ 4-40 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrrisAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrrisAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาทางมณี



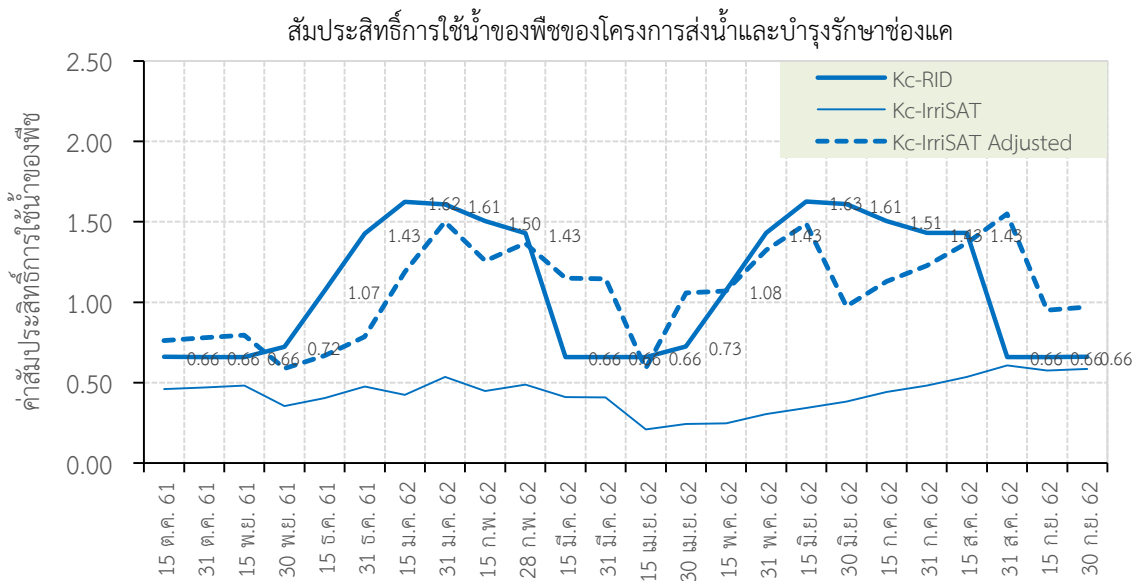
รูปที่ 4-41 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาฝักไถ่



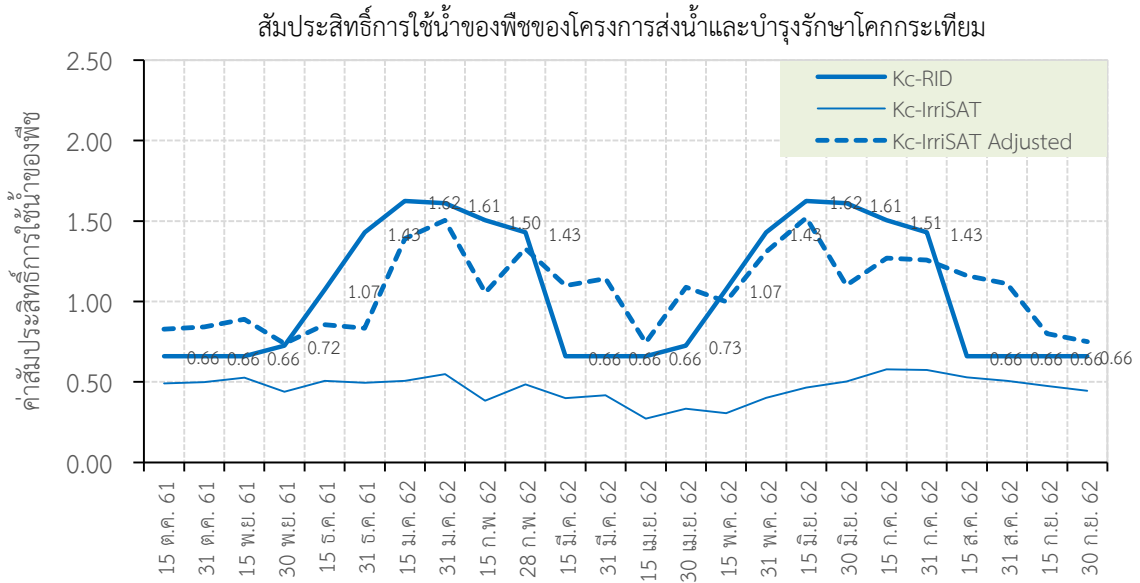
รูปที่ 4-42 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษามหาราช



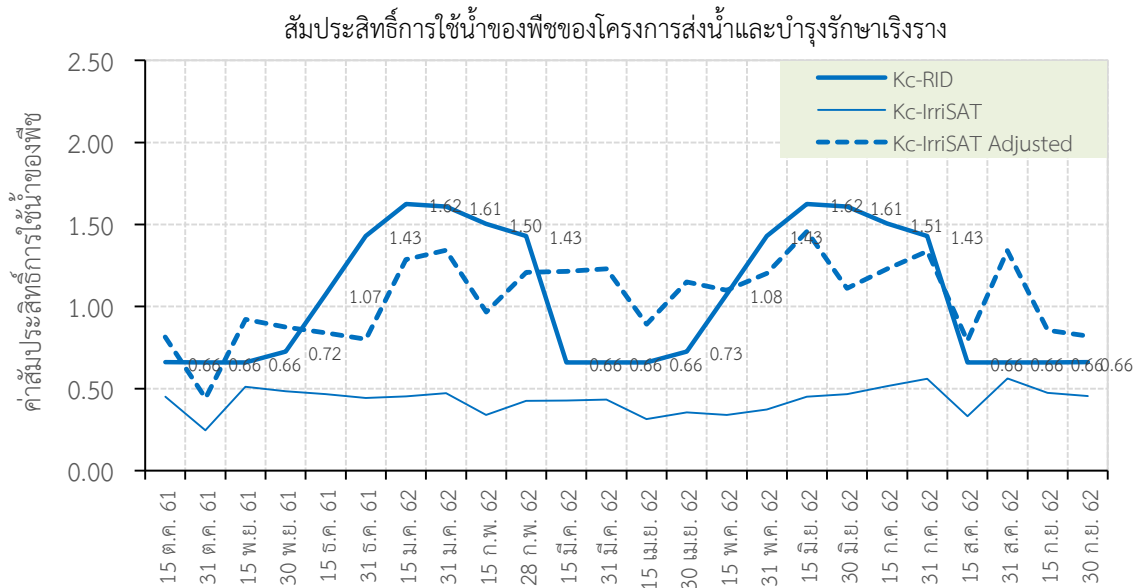
รูปที่ 4-43 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษามโนรมย์



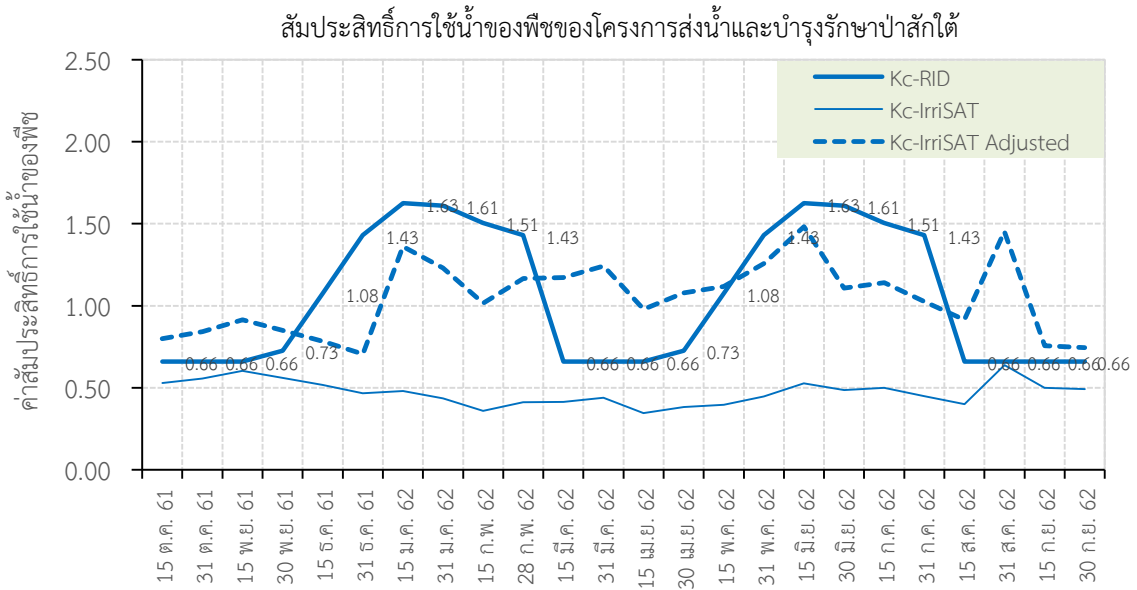
รูปที่ 4-44 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาช่องแค



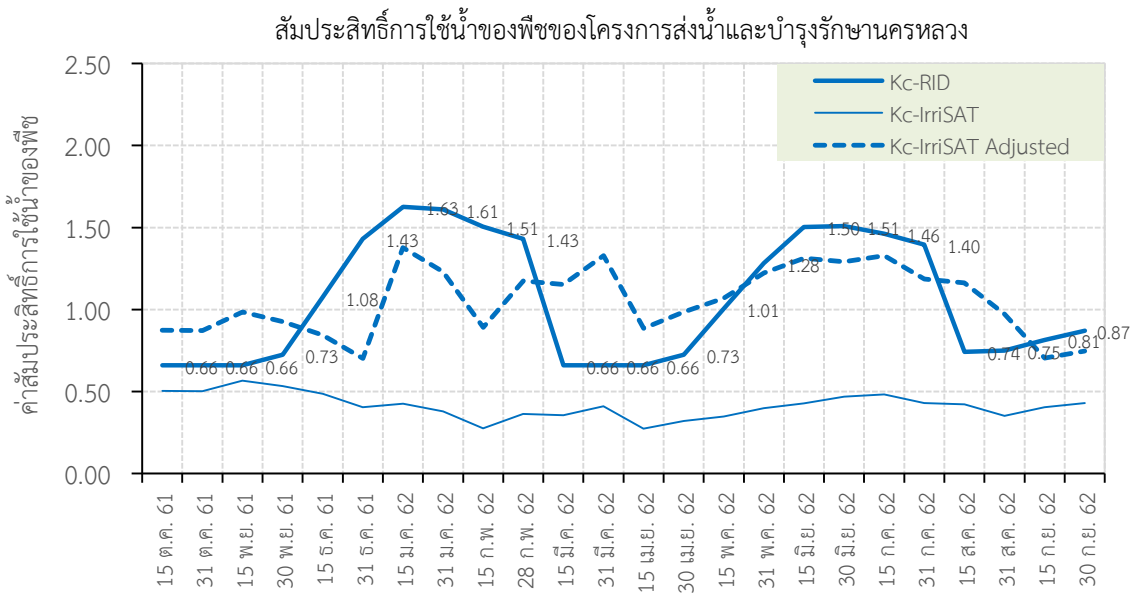
รูปที่ 4-45 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาโคกกระเทียม



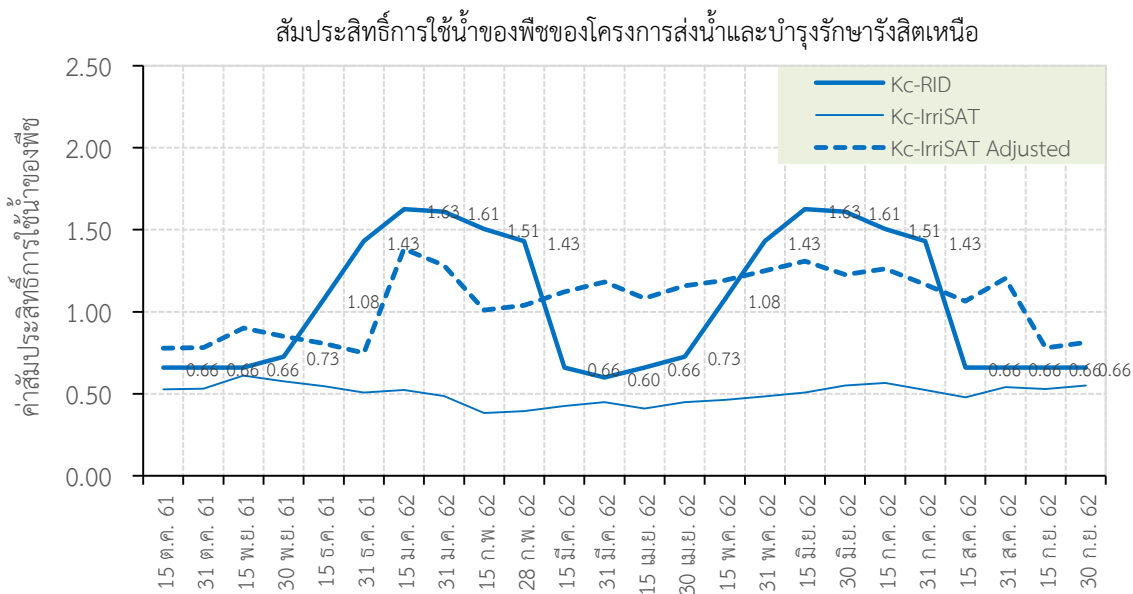
รูปที่ 4-46 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาเริงราง



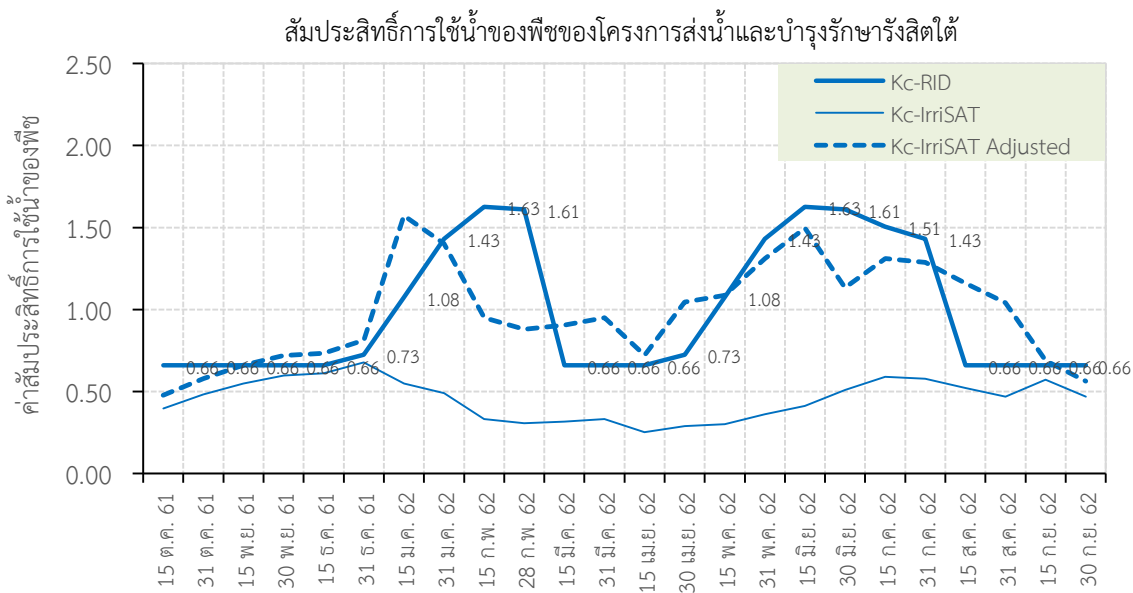
รูปที่ 4-47 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาป่าสักใต้



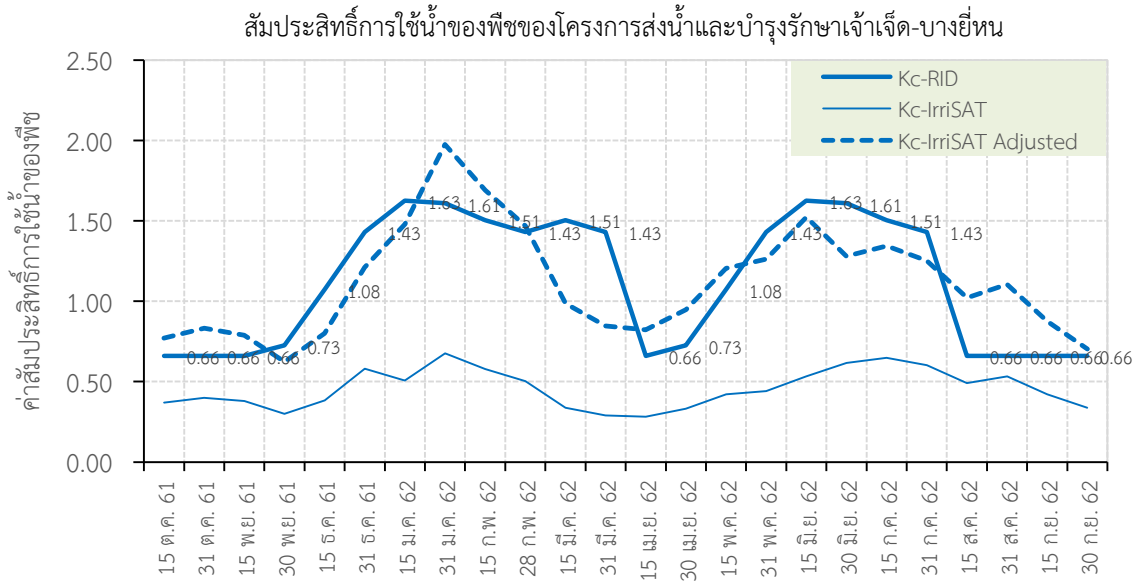
รูปที่ 4-48 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษานครหลวง



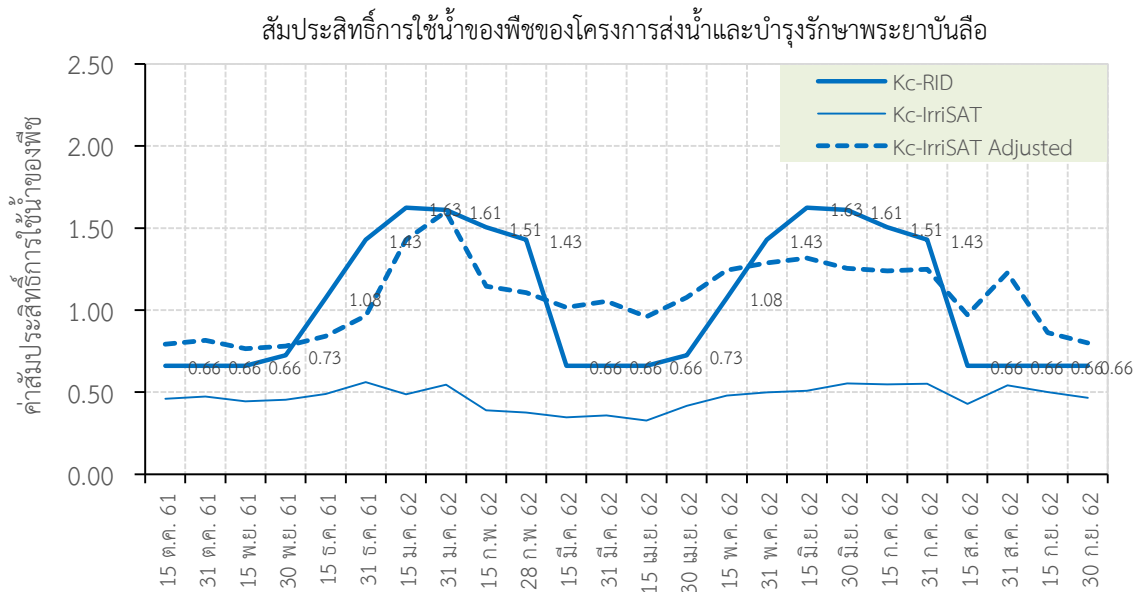
รูปที่ 4-49 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษารังสิตเหนือ



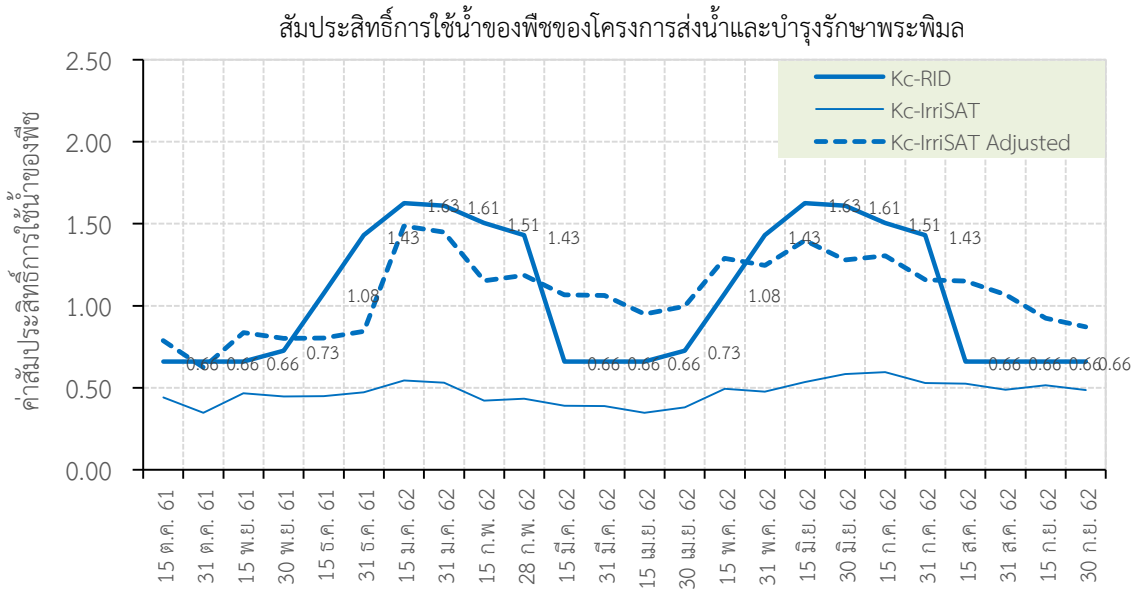
รูปที่ 4-50 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษารังสิตใต้



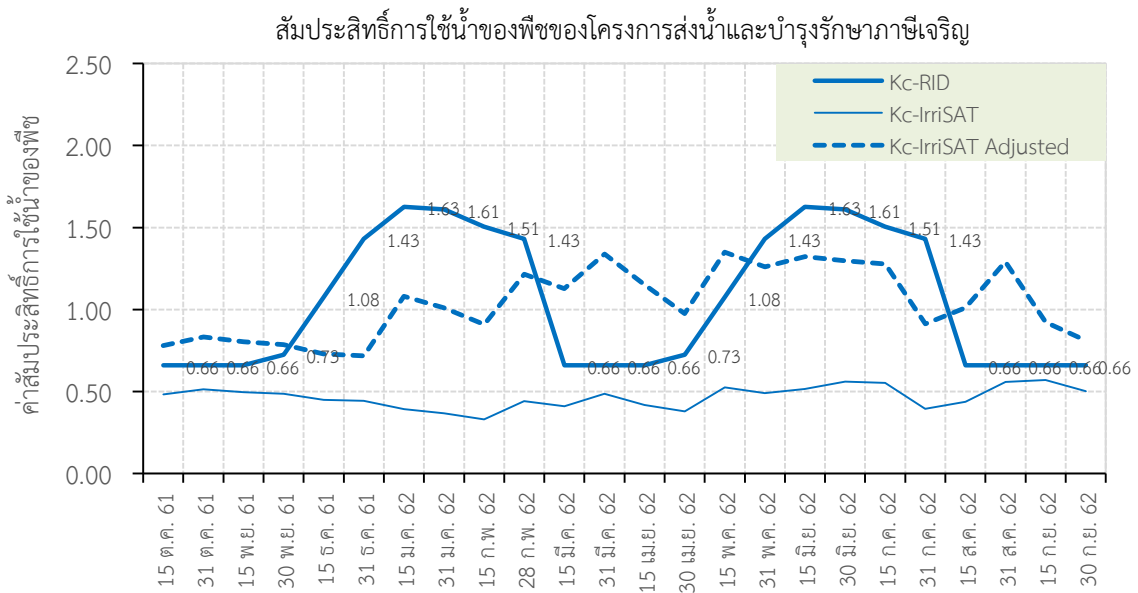
รูปที่ 4-51 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrrisAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrrisAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาเจ้าเจ็ดบางยี่หน



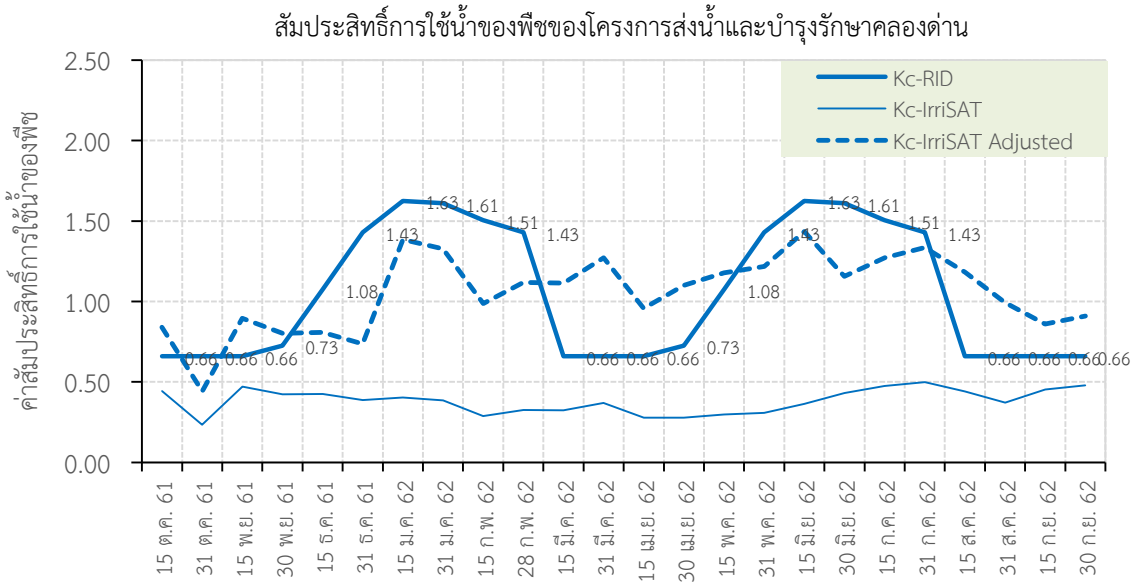
รูปที่ 4-52 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrrisAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrrisAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพระยาบันลือ



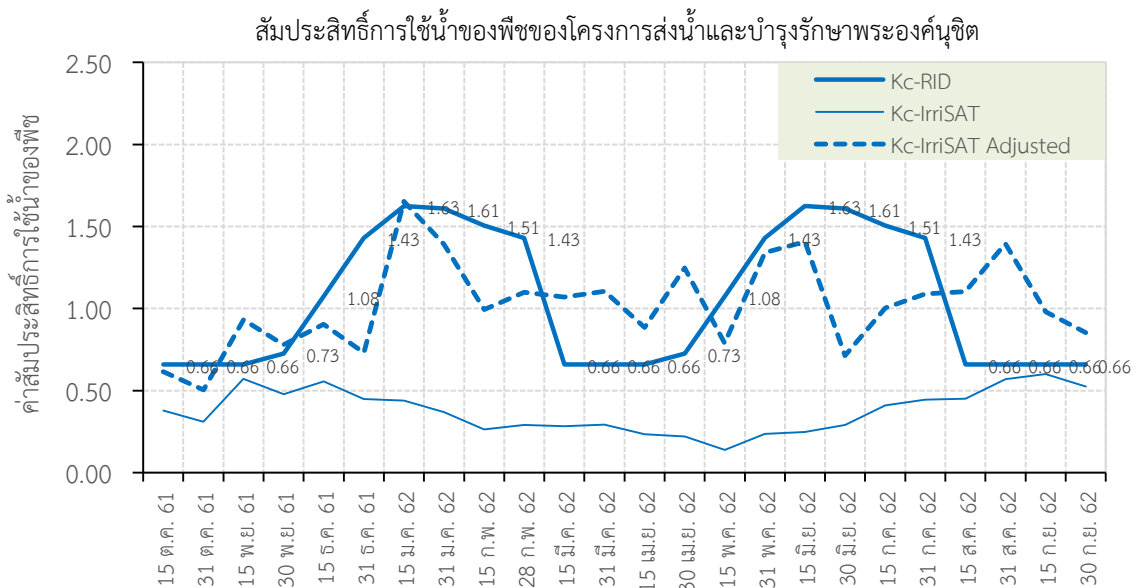
รูปที่ 4-53 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพระพิมล



รูปที่ 4-54 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาภาษีเจริญ



รูปที่ 4-55 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาคลองด่าน



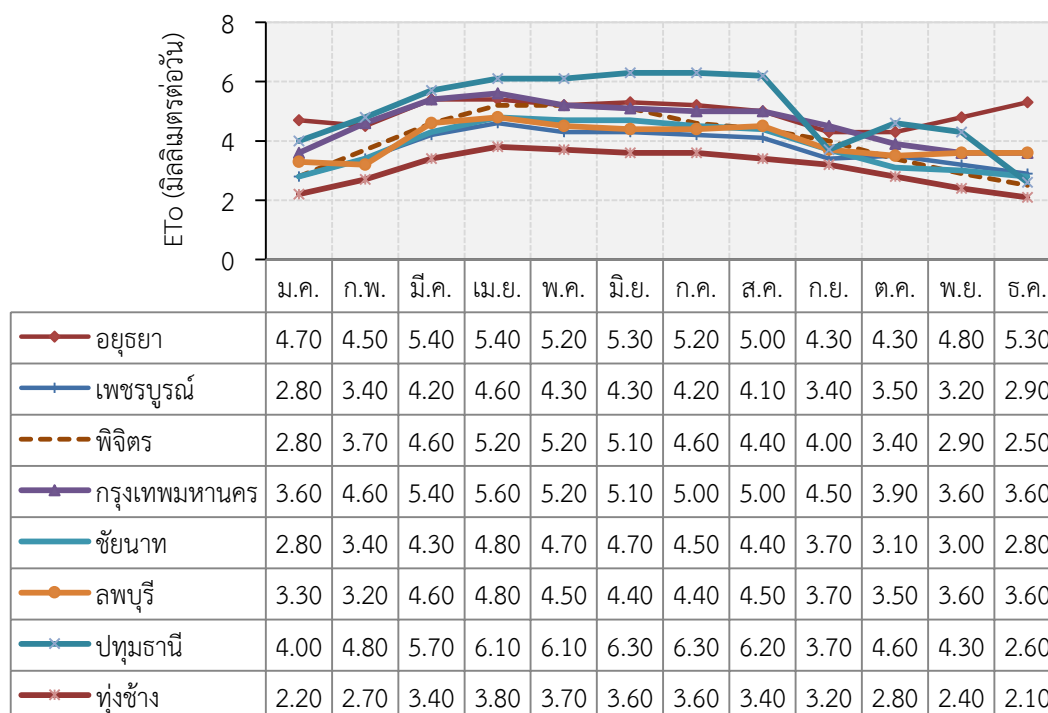
รูปที่ 4-56 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT, Avg. Kc-RID และ Kc-IrriSAT Adjusted ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพระองค์ไชยานุชิต

อย่างไรก็ดี การประยุกต์ใช้ Cloud-Based IrriSAT App ในการติดตามค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช Kc-IrriSAT ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาในปี พ.ศ. 2561 ทั้ง 26 โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพบว่ามีความแตกต่างกับค่าที่ได้จากค่า Avg. Kc-RID อย่างเห็นได้ชัดทั้งปริมาณและรูปแบบ และจากการวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง Kc-IrriSAT และ Avg. Kc-RID ยังอยู่ในเกณฑ์ไม่ตึง ด้วยเหตุนี้ ในงานวิเคราะห์นี้จึงได้นำค่า Avg. Kc-RID มาใช้ในการคำนวณหาปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรมในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาโดยแสดงผลการประมาณการไว้ในหัวข้อ 4.2.5

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

4.2.1.2.1.2 ผลการคำนวณค่าปริมาณการคายระเหยน้ำของพืชอ้างอิง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณค่าปริมาณการคายระเหยน้ำของพืชอ้างอิง (Reference Crop Evapotranspiration, ETo) โดยอาศัยสูตรการคำนวณ FAO Penman-Monteith และข้อมูลสภาพภูมิอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่โครงการชลประทานทั้ง 26 โครงการ ซึ่งส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในพื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา จังหวัดเพชรบูรณ์ จังหวัดพิจิตร จังหวัดกรุงเทพมหานคร จังหวัดชัยนาท จังหวัดลพบุรี จังหวัดปทุมธานี และสถานีทุ่งช้าง และอาศัยโปรแกรม ETo Calculator มาช่วยในการคำนวณให้ผลดังแสดงในรูปที่ 4-57



รูปที่ 4-57 ผลการประมาณการปริมาณการคายระเหยน้ำของพืชอ้างอิงในบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา

4.2.1.2.1.3 ผลการคำนวณปริมาณฝนเชิงพื้นที่และปริมาณฝนใช้การ

ผลการคำนวณปริมาณฝนเชิงพื้นที่ในลุ่มน้ำเจ้าพระยาที่ได้จากวิธี Thiessen Polygon ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 แสดงผลในตารางที่ 4-15

ตารางที่ 4-15 ปริมาณฝนเชิงพื้นที่ในกลุ่มน้ำเจ้าพระยา

ปี พ.ศ.	ปริมาณฝนเชิงพื้นที่ (มิลลิเมตร)												
	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
2543	10.02	25.87	8.51	138.11	109.98	88.33	126.85	133.65	125.39	130.04	2.27	0.00	899.01
2544	2.83	17.91	48.72	10.45	130.15	66.71	102.32	84.74	153.22	104.40	7.08	4.01	732.53
2545	1.29	0.98	23.16	43.11	100.84	72.92	126.85	164.32	160.21	87.44	40.55	22.99	844.66
2546	4.44	4.51	61.46	17.01	69.66	99.96	82.18	124.86	171.66	64.50	15.79	0.02	716.04
2547	1.64	26.73	36.95	32.52	109.98	88.33	126.85	133.65	160.21	87.44	15.79	0.00	820.07
2548	2.99	17.36	13.60	48.44	109.98	88.33	126.85	133.65	181.93	91.01	15.79	2.99	832.94
2549	0.50	2.90	37.95	47.46	109.98	88.33	126.85	133.65	160.21	87.44	15.79	0.11	811.17
2550	0.00	0.69	6.44	19.43	109.98	88.33	126.85	133.65	57.40	69.79	0.50	0.00	613.06
2551	1.11	6.22	4.62	50.48	109.98	121.27	126.85	102.24	274.71	98.02	35.56	0.45	931.50
2552	0.00	11.16	24.55	42.34	109.98	88.33	126.85	133.65	88.62	64.21	4.12	0.00	693.80
2553	9.82	0.44	9.34	47.46	109.98	88.33	126.85	133.65	160.21	87.44	15.79	4.16	793.46
2554	3.55	10.19	26.02	47.46	109.98	88.33	107.86	133.65	160.21	87.44	15.79	4.16	794.63
2555	3.55	10.19	26.02	47.46	109.98	88.33	126.85	133.65	160.21	87.44	15.79	4.16	813.62
2556	3.55	10.19	26.02	47.46	109.98	88.33	126.85	133.65	160.21	87.44	15.79	4.16	813.62
2557	3.55	10.19	26.02	47.46	109.98	88.33	126.85	133.65	160.21	87.44	15.79	4.16	813.62
2558	3.55	10.19	26.02	47.46	109.98	88.33	126.85	133.65	160.21	87.44	15.79	4.16	813.62
2559	7.93	7.47	36.99	27.18	56.02	96.78	285.42	133.65	160.21	87.44	15.79	4.16	919.03
2560	3.18	10.19	26.02	47.46	109.98	88.33	126.85	133.65	160.21	87.44	15.79	4.16	813.25
2561	3.18	10.19	26.02	93.00	193.22	72.31	56.46	192.12	228.74	77.54	20.43	19.33	992.54
เฉลี่ย	3.51	10.19	26.02	47.46	109.98	88.33	126.85	133.65	160.21	87.44	15.79	4.38	813.80

การคำนวณปริมาณฝนใช้การของข้าวในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาอาศัยหลักเกณฑ์ที่กำหนดไว้โดยกรมชลประทาน ซึ่งกำหนดให้ปริมาณฝนใช้การของข้าวเป็นสัดส่วนกับปริมาณฝนรายเดือนตามค่าถ่วงน้ำหนักดังแสดงในตารางที่ 4-16 ในขณะที่ปริมาณฝนใช้การของพืชไร่ขึ้นอยู่กับปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ย อัตราการใช้น้ำของพืชไร่รายเดือน และความสามารถอุ้มน้ำของดินในเขตรากดังแสดงในตารางที่ 4-17 และผลการวิเคราะห์ฝนใช้การของข้าวและพืชไร่แสดงในรูปที่ 4-58 และรูปที่ 4-59

ตารางที่ 4-16 หลักเกณฑ์การคำนวณปริมาณฝนใช้การของข้าว

Weighted Rainfall (WRFL) (mm)	Fixed Percentage of Average Monthly Rainfall (%)	Effective Rainfall (mm)
0-10	0	0
11-100	80	WRRLx0.80
101-200	70	WRRLx0.70
201-250	60	WRRLx0.60
251-300	55	WRRLx0.55
>301	50	WRRLx0.50

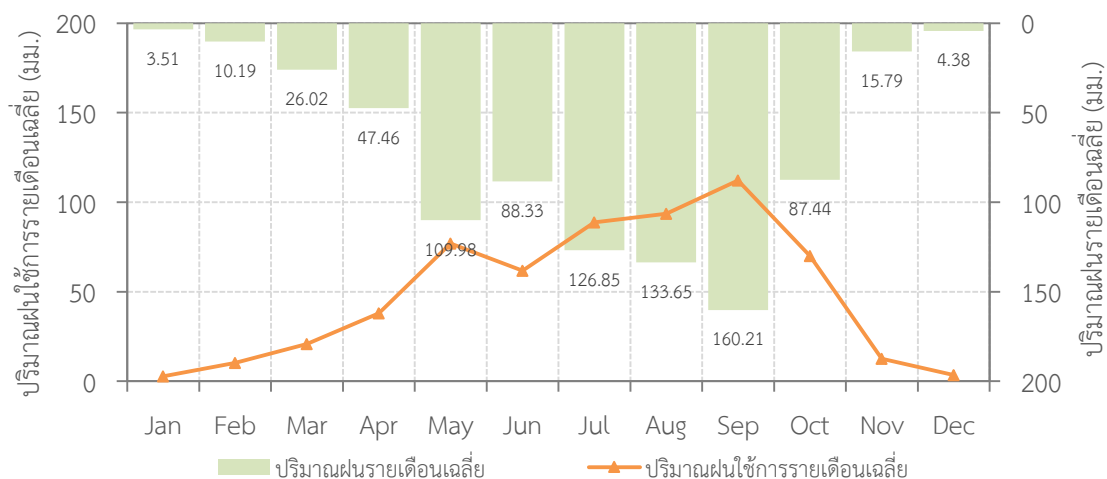
ที่มา : กรมชลประทาน (2554)

ตารางที่ 4-17 หลักเกณฑ์การคำนวณปริมาณฝนใช้การของข้าว

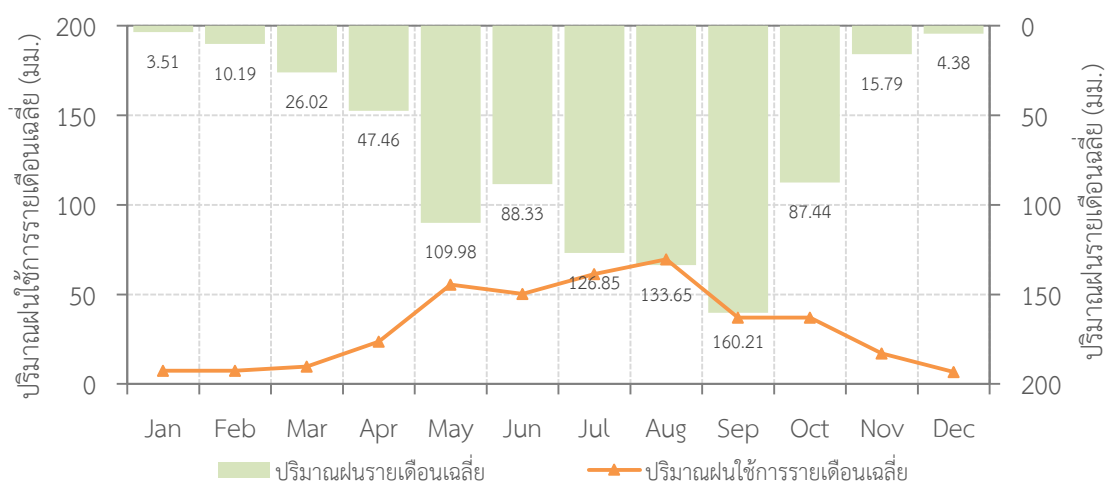
ปริมาณฝนราย เดือนเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	อัตราการใช้น้ำของพืชไร่รายเดือน (มิลลิเมตร)											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	25	50
ปริมาณฝนใช้การรายเดือน (มิลลิเมตร)												
15	9	10	10	11	11	12	12	13	14	15	15	9
20	12	13	14	14	15	16	17	18	19	20	20	12
30	18	19	21	22	22	23	24	26	28	30	30	18
40	23	25	27	29	30	31	32	36	38	40	40	23
50	25	32	34	35	36	38	40	43	46	49	50	25
60		38	40	42	43	45	47	51	55	59	60	
70		43	46	49	51	53	55	59	63	68	70	
80		48	52	55	58	60	63	67	71	77	80	
90		50	57	61	64	67	70	75	79	85	90	
100			63	67	71	74	78	82	87	94	100	
110			68	73	78	80	84	89	95	102	110	
120			73	78	84	86	91	97	102	110	120	
130			75	83	89	92	98	104	110	118	130	
140				89	95	99	105	112	118	126	140	
150				94	101	105	110	120	125	134	150	
160				99	106	110	117	125	132	142	160	
170				100	111	116	123	131	138	149	170	
180					116	121	129	136	144	155	180	
190					121	126	134	142	150	161	190	

200					125	132	140	148	157	168	200	
ความสามารถ อุ้มน้ำของดินใน เขตราก (มิลลิเมตร)	20	30	40	50	60	75	100	125	150	175	20	30
	0.74	0.82	0.88	0.93	0.96	1.00	1.02	1.04	1.06	1.07	0.74	0.82

ที่มา : กรมชลประทาน (2554)



รูปที่ 4-58 ผลการประมาณการปริมาณฝนใช้การของข้าวในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา



รูปที่ 4-59 ผลการประมาณการปริมาณฝนใช้การของพืชไร่ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา

4.2.2 ความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคและการท่องเที่ยว (Water Supply and Tourism Water Demand)

4.2.2.1 ผลการทบทวนวรรณกรรม

จากรายงานเรื่อง “การดำเนินการด้านการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลโครงการพัฒนาระบบคลังข้อมูล 25 ลุ่มน้ำ และแบบจำลองน้ำท่วมและน้ำแล้ง ลุ่มน้ำเจ้าพระยา” (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน), 2555) ได้ประเมินปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคและการท่องเที่ยวด้วยเก็บรวบรวมข้อมูลจำนวนประชากร ความต้องการใช้น้ำ และแผนงานขยายกำลังผลิต

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

ประปา สำหรับการประเมินปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคได้ประเมินจากจำนวนประชากรทั้งหมดทั้งที่อาศัยในเขตเมืองและนอกเขตเมือง โดยได้จำแนกอัตราการใช้น้ำของประชากรตามลักษณะชุมชน ได้แก่ เทศบาลนคร เทศบาลเมือง เทศบาลตำบล นอกเขตเทศบาล และการปกครองท้องถิ่นรูปแบบพิเศษ (กรุงเทพมหานครและเมืองพัทยา) ดังแสดงในตารางที่ 4-18 สำหรับปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคคิดเป็น 236.42 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

ตารางที่ 4-18 หลักเกณฑ์และผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค

ลักษณะชุมชน	อัตราการใช้น้ำ (ลิตร/คน/วัน)
เทศบาลนคร	250
เทศบาลเมือง	200
เทศบาลตำบล	120
นอกเขตเทศบาล	50
การปกครองท้องถิ่นรูปแบบพิเศษ (กรุงเทพมหานครและเมืองพัทยา)	400
ปริมาณความต้องการใช้น้ำของประชากรทั้งหมด (ล้าน ลบ.ม./ปี)	39.55
สำนักงานประปา (แห่ง)	16
จำนวนหน่วยบริการ (หน่วย)	36
จำนวนผู้ใช้น้ำรวม (ราย)	394,465
ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการประปาส่วนภูมิภาค (ล้าน ลบ.ม./ปี)	196.87
ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค (ล้าน ลบ.ม./ปี)	236.42

ที่มา : สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) (2555)

กรมทรัพยากรน้ำ (2559) ได้ปริมาณความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคและการท่องเที่ยวรายลุ่มน้ำ โดยอาศัยฐานข้อมูลประชากรในปัจจุบันและคาดการณ์ในอนาคต และข้อมูลการท่องเที่ยว โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

4.2.2.2.1 ข้อมูลประชากร

ในการศึกษาด้านประชากรได้ทำการรวบรวมสถิติข้อมูลประชากรจากปีปัจจุบัน (พ.ศ. 2561) ย้อนหลัง 10 ปี (พ.ศ. 2552-2561) จากสำนักบริหารการทะเบียน กรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทยในระดับตำบล อำเภอ และจังหวัด รวมถึงแยกตามเขตการปกครองเป็นในและนอกเขตเทศบาลในพื้นที่ศึกษาซึ่งอยู่ในลุ่มน้ำเจ้าพระยา โดยเน้นพื้นที่ที่ใช้น้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยา ได้แก่ นครสวรรค์ ชัยนาท สิงห์บุรี อ่างทอง พระนครศรีอยุธยา ปทุมธานี นนทบุรี กรุงเทพมหานคร และสมุทรปราการ รวมถึงคาดประมาณจำนวนประชากรในระดับตำบล อำเภอ และจังหวัด ที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์การใช้น้ำในช่วงเวลา 20 ปีข้างหน้า

(1) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงประชากร

จากข้อมูลประชากรของสำนักบริหารการทะเบียน กรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย พบว่า จำนวนประชากรในพื้นที่ศึกษา (ไม่รวมกรุงเทพมหานคร) มีจำนวนทั้งสิ้นประมาณ 5,354,916 คน (พ.ศ. 2561) โดยเป็นประชากรที่อยู่ในเขตเทศบาล 2,517,745 คน และนอกเขตเทศบาล 2,837,171 คน ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2552-2561) ประชากร (ไม่รวมกรุงเทพมหานคร) เพิ่มขึ้นจาก

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเข็มมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

4,889,227 คน ในปี พ.ศ. 2552 เป็น 5,354,916 คน ในปี พ.ศ. 2561 โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 1.20% ต่อปี มากกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยทั้งประเทศซึ่งเท่ากับ 0.50% ต่อปี ดังแสดงในตารางที่ 4-19

พื้นที่ศึกษาครอบคลุมกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (จังหวัดนนทบุรี และจังหวัดสมุทรปราการ) ซึ่งถ้าไม่พิจารณากรุงเทพมหานคร จังหวัดนนทบุรีและจังหวัดสมุทรปราการมีการขยายตัวด้านธุรกิจ อุตสาหกรรม และที่อยู่อาศัยเป็นอย่างมาก โดยมีสัดส่วนประชากรอยู่ในเขตเทศบาลมากกว่านอกเขตเทศบาลอยู่ที่ 55% : 45% ในขณะที่จังหวัดอื่น ๆ มีประชากรอยู่ในเขตเทศบาลน้อยกว่านอกเขตเทศบาล มีสัดส่วนอยู่ที่ 34% : 66% การประกอบอาชีพส่วนใหญ่เป็นการทำการเกษตรกรรม

(2) การคาดประมาณประชากร

ในการคาดประมาณประชากรสำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ (สศช.) ได้ทำหน้าที่ประสานงานจัดทำการคาดประมาณประชากรของประเทศไทยในระยะ 25-30 ปี มาอย่างต่อเนื่อง นับตั้งแต่แผนพัฒนาฯ ฉบับที่ 4 เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวางแผนพัฒนาประเทศ (สศช., 2562 ก) การคาดประมาณประชากร สศช. ได้ทำการปรับปรุงการคาดประมาณประชากรที่ดำเนินการในปีพ.ศ.2556 โดยยึดเอาข้อมูลใหม่ของสำนักบริหารการทะเบียน กรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย ในประกาศจำนวนราษฎรทั่วราชอาณาจักรตามหลักฐานการทะเบียน ณ วันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2558 ซึ่งเท่ากับ 65,729,098 คน เป็นหลักโดยได้ทำการปรับจำนวนประชากรปลายปี พ.ศ. 2558 นี้ เป็นประชากรกลางปี (1 กรกฎาคม) ได้เท่ากับ 65,599,000 คน (สศช., 2562ข) จากนั้นได้ทำการปรับจำนวนประชากรฐาน ในช่วงปี พ.ศ. 2553-2558 ด้วยวิธีการประมาณค่าระหว่างช่วงเชิงเส้นตรง (Linear interpolation) โดยเริ่มจากจำนวนผู้ที่มีสัญชาติไทย และผู้ที่ไม่ใช่สัญชาติไทยแต่มีชื่ออยู่ในทะเบียนราษฎรจำนวน 63,790,000 คน ตามผลของสำมะโนประชากรฯ พ.ศ. 2553 จนถึงประชากรที่ปรับแล้วปี พ.ศ. 2558 (65,599,000 คน)

ตารางที่ 4-19 จำนวนประชากรจำแนกเป็นรายจังหวัดและเขตการปกครองในพื้นที่ศึกษา

จังหวัด	จำนวนประชากรจำแนกเป็นรายจังหวัดและเขตการปกครอง (คน)										
	เขตปกครอง	2552	2553	2554	2555	2556	2557	2558	2559	2560	2561
ทั่วราชอาณาจักร	ทั่วราชอาณาจักร	63,525,062	63,878,267	64,076,033	64,456,695	64,785,909	65,124,716	65,729,098	65,931,550	66,188,503	66,413,979
	ในเขตเทศบาล	21,359,691	21,626,189	21,726,755	21,860,248	22,136,665	22,297,154	22,544,216	22,618,661	22,696,545	22,873,538
	นอกเขตเทศบาล	42,165,371	42,252,078	42,349,278	42,596,447	42,649,244	42,827,562	43,184,882	43,312,889	43,491,958	43,540,441
กรุงเทพมหานคร	กรุงเทพมหานคร	5,702,595	5,701,394	5,674,843	5,673,560	5,686,252	5,692,284	5,696,409	5,686,646	5,682,415	5,676,648
	ในเขตเทศบาล	5,702,595	5,701,394	5,674,843	5,673,560	5,686,252	5,692,284	5,696,409	5,686,646	5,682,415	5,676,648
สมุทรปราการ	จังหวัด	1,164,105	1,185,180	1,203,223	1,223,302	1,241,610	1,261,530	1,279,310	1,293,553	1,310,766	1,326,608
	ในเขตเทศบาล	647,304	649,673	652,098	656,553	658,947	661,464	663,195	662,299	663,858	663,658
	นอกเขตเทศบาล	516,801	535,507	551,125	566,749	582,663	600,066	616,115	631,254	646,908	662,950
นนทบุรี	จังหวัด	1,078,071	1,101,743	1,122,627	1,141,673	1,156,271	1,173,870	1,193,711	1,211,924	1,229,735	1,246,295
	ในเขตเทศบาล	622,344	637,108	640,955	645,109	649,525	654,916	662,062	667,077	671,976	724,512
	นอกเขตเทศบาล	455,727	464,635	481,672	496,564	506,746	518,954	531,649	544,847	557,759	521,783
จังหวัดปทุมธานี	จังหวัด	956,376	985,643	1,010,898	1,033,837	1,053,158	1,074,058	1,094,249	1,111,376	1,129,115	1,146,092
	ในเขตเทศบาล	439,158	452,976	463,570	472,597	522,880	531,459	539,772	545,754	552,312	584,427
	นอกเขตเทศบาล	517,218	532,667	547,328	561,240	530,278	542,599	554,477	565,622	576,803	561,665
นครสวรรค์	จังหวัด	1,072,868	1,073,495	1,071,686	1,073,347	1,073,142	1,072,756	1,071,942	1,066,455	1,065,334	1,063,964
	ในเขตเทศบาล	211,495	209,766	206,736	205,406	203,798	202,700	201,511	198,448	197,297	195,923
	นอกเขตเทศบาล	861,373	863,729	864,950	867,941	869,344	870,056	870,431	868,007	868,037	868,041
พระนครศรีอยุธยา	จังหวัด	775,157	782,096	787,653	793,509	797,970	803,599	808,360	810,320	813,852	817,441
	ในเขตเทศบาล	306,850	309,288	310,538	312,179	313,467	315,466	316,876	316,588	317,340	318,424
	นอกเขตเทศบาล	468,307	472,808	477,115	481,330	484,503	488,133	491,484	493,732	496,512	499,017
อ่างทอง	จังหวัด	284,807	284,970	284,061	283,882	283,732	283,568	283,173	282,404	281,187	280,840
	ในเขตเทศบาล	78,353	78,111	77,849	77,201	76,651	76,227	75,738	75,195	74,716	74,483
	นอกเขตเทศบาล	206,454	206,859	206,212	206,681	207,081	207,341	207,435	207,209	206,471	206,357
สิงห์บุรี	จังหวัด	215,299	214,661	213,587	213,216	212,690	212,158	211,426	210,588	210,088	209,377
	ในเขตเทศบาล	57,850	57,398	56,797	56,517	56,023	55,627	55,094	54,635	54,432	54,043
	นอกเขตเทศบาล	157,449	157,263	156,790	156,699	156,667	156,531	156,332	155,953	155,656	155,334
ชัยนาท	จังหวัด	335,420	334,934	333,256	333,172	332,769	332,283	331,655	330,431	329,722	328,263
	ในเขตเทศบาล	102,065	101,931	101,070	100,691	100,353	99,959	99,627	99,073	98,794	98,198
	นอกเขตเทศบาล	233,355	233,003	232,186	232,481	232,416	232,324	232,028	231,358	230,928	230,065

ที่มา : สำนักบริหารการทะเบียน กรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย (2563)

การคาดประมาณประชากรของ สศช. ระดับประเทศและภาค ได้ใช้เทคนิควิธีทางประชากรศาสตร์ที่เรียกว่า “วิธีองค์ประกอบ-รุ่นอายุ” (Cohort-Compound Method) โดยพิจารณาองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงประชากร ได้แก่ การเกิด การตาย และการย้ายถิ่น ค่าประมาณประชากรที่ได้จะเป็นประชากรสัญชาติไทยและผู้ที่ไม่ใช่สัญชาติไทยแต่มีชื่ออยู่ในทะเบียนบ้าน ซึ่งเป็นความหมายที่ตรงกับประชากรตามทะเบียนราษฎรของสำนักบริหารการทะเบียน กรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย และการคาดประมาณประชากรระดับจังหวัด ในและนอกเขตเทศบาลระดับประเทศและภาคใช้ “วิธีอัตราส่วน” (Ratio Method) ซึ่งเป็นการกระจายประชากรที่ได้จากการคาดประมาณระดับภาคออกไปตามสัดส่วนประชากรแต่ละจังหวัดที่จำแนกตามอายุ เพศ ในและนอกเขตเทศบาล (สศช., 2562)

ดังนั้น ในการศึกษานี้จะใช้ข้อมูลการคาดประมาณประชากรระดับประเทศของ สศช. ในการคาดประมาณประชากรในอนาคต 10 ปีข้างหน้า เพื่อให้ข้อมูลสามารถอ้างอิงได้ โดยนำมาปรับอัตราส่วนกับข้อมูลประชากรตามหลักฐานทะเบียนราษฎรของสำนักบริหารการทะเบียนในช่วงปี พ.ศ. 2552-

2561 และคาดประมาณประชากรระดับจังหวัด ในและนอกเขตเทศบาลระดับจังหวัด ใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้น ระหว่างประชากรระดับประเทศและระดับจังหวัด ผลการคาดประมาณประชากรในช่วงเวลา 20 ปีข้างหน้า (พ.ศ. 2562-2581) ดังแสดงในตารางที่ 4-20

ตารางที่ 4-20 การคาดประมาณประชากรจำแนกเป็นรายจังหวัดและเขตการปกครองในพื้นที่ศึกษาใน 20 ปีข้างหน้า

จังหวัด	จำนวนประชากรจำแนกเป็นรายจังหวัดและเขตการปกครองใน 20 ปีข้างหน้า (คน)										
	เขตปกครอง	2562	2563	2564	2565	2566	2567	2568	2569	2570	2571
ทั่วราชอาณาจักร	ทั่วราชอาณาจักร	66,452,897	66,613,381	66,758,738	66,887,970	67,000,017	67,093,790	67,168,349	67,222,712	67,255,934	67,267,110
	ในเขตเทศบาล	37,164,806	38,126,743	39,059,745	39,960,510	40,825,932	41,653,309	42,440,239	43,184,518	43,884,445	44,538,418
	นอกเขตเทศบาล	29,288,092	28,486,638	27,698,993	26,927,460	26,174,086	25,440,481	24,728,110	24,038,194	23,371,489	22,728,692
กรุงเทพมหานคร	กรุงเทพมหานคร	5,814,801	5,828,843	5,841,563	5,852,871	5,862,675	5,870,881	5,877,405	5,882,161	5,885,069	5,886,046
	ในเขตเทศบาล	5,814,801	5,828,843	5,841,563	5,852,871	5,862,675	5,870,881	5,877,405	5,882,161	5,885,069	5,886,046
สมุทรปราการ	จังหวัด	1,325,630	1,334,168	1,341,901	1,348,776	1,354,737	1,359,726	1,363,692	1,366,585	1,368,352	1,368,947
	ในเขตเทศบาล	666,353	667,239	668,038	668,745	669,355	669,865	670,269	670,563	670,742	670,803
	นอกเขตเทศบาล	659,277	666,929	673,863	680,031	685,382	689,861	693,423	696,022	697,610	698,144
นนทบุรี	จังหวัด	1,243,443	1,252,108	1,259,956	1,266,934	1,272,983	1,278,046	1,282,072	1,285,007	1,286,801	1,287,404
	ในเขตเทศบาล	692,044	695,882	699,359	702,450	705,130	707,372	709,155	710,456	711,250	711,517
	นอกเขตเทศบาล	551,399	556,226	560,597	564,484	567,854	570,674	572,916	574,551	575,550	575,887
ปทุมธานี	จังหวัด	1,147,302	1,157,077	1,166,852	1,173,801	1,180,625	1,186,337	1,190,878	1,194,189	1,196,212	1,196,893
	ในเขตเทศบาล	577,726	585,205	592,684	598,002	603,224	607,595	611,070	613,603	615,152	615,672
	นอกเขตเทศบาล	569,577	571,872	574,168	575,798	577,401	578,742	579,808	580,585	581,061	581,220
นครสวรรค์	จังหวัด	1,066,247	1,065,774	1,065,301	1,064,964	1,064,634	1,064,357	1,064,137	1,063,977	1,063,879	1,063,846
	ในเขตเทศบาล	198,334	197,780	197,226	196,833	196,446	196,123	195,866	195,678	195,563	195,525
	นอกเขตเทศบาล	867,913	867,994	868,075	868,131	868,187	868,234	868,272	868,299	868,316	868,321
พระนครศรีอยุธยา	จังหวัด	818,745	820,943	823,141	824,704	826,238	827,523	828,544	829,289	829,744	829,897
	ในเขตเทศบาล	319,088	319,687	320,286	320,713	321,131	321,481	321,760	321,963	322,087	322,129
	นอกเขตเทศบาล	499,657	501,256	502,855	503,991	505,107	506,041	506,784	507,326	507,657	507,768
อ่างทอง	จังหวัด	281,419	281,214	281,009	280,863	280,719	280,599	280,504	280,435	280,392	280,378
	ในเขตเทศบาล	74,679	74,482	74,285	74,144	74,006	73,891	73,799	73,732	73,691	73,678
	นอกเขตเทศบาล	206,740	206,732	206,724	206,719	206,713	206,709	206,705	206,702	206,701	206,700
สิงห์บุรี	จังหวัด	209,586	209,283	208,980	208,764	208,553	208,375	208,235	208,132	208,069	208,048
	ในเขตเทศบาล	54,040	53,839	53,638	53,496	53,356	53,239	53,145	53,077	53,036	53,022
	นอกเขตเทศบาล	155,546	155,444	155,342	155,268	155,197	155,137	155,089	155,054	155,033	155,026
ชัยนาท	จังหวัด	329,142	328,803	328,464	328,222	327,985	327,787	327,629	327,515	327,444	327,421
	ในเขตเทศบาล	98,435	98,241	98,047	97,910	97,775	97,661	97,571	97,506	97,466	97,452
	นอกเขตเทศบาล	230,707	230,561	230,417	230,312	230,211	230,126	230,058	230,009	229,979	229,969

จังหวัด	จำนวนประชากรจำแนกเป็นรายจังหวัดและเขตการปกครองใน 20 ปีข้างหน้า (คน)										
	เขตปกครอง	2572	2573	2574	2575	2576	2577	2578	2579	2580	2581
ทั่วราชอาณาจักร	ทั่วราชอาณาจักร	67,255,378	67,219,952	67,160,129	67,075,279	66,964,853	66,828,395	66,665,545	66,476,032	66,259,683	66,016,445
	ในเขตเทศบาล	45,145,234	45,704,094	46,214,298	46,675,443	47,087,530	47,450,658	47,765,130	48,031,545	48,250,502	48,423,006
	นอกเขตเทศบาล	22,110,144	21,515,858	20,945,831	20,399,836	19,877,324	19,377,737	18,900,415	18,444,487	18,009,181	17,593,439
กรุงเทพมหานคร	กรุงเทพมหานคร	5,885,020	5,881,920	5,876,685	5,869,261	5,859,598	5,847,658	5,833,408	5,816,825	5,797,894	5,776,610
	ในเขตเทศบาล	5,885,020	5,881,920	5,876,685	5,869,261	5,859,598	5,847,658	5,833,408	5,816,825	5,797,894	5,776,610
สมุทรปราการ	จังหวัด	1,368,322	1,366,438	1,363,255	1,358,741	1,352,866	1,345,607	1,336,943	1,326,861	1,315,351	1,302,410
	ในเขตเทศบาล	670,739	670,548	670,224	669,764	669,164	668,419	667,526	666,481	665,280	663,920
	นอกเขตเทศบาล	697,583	695,890	693,031	688,977	683,702	677,188	669,417	660,380	650,071	638,490
นนทบุรี	จังหวัด	1,286,771	1,284,858	1,281,628	1,277,047	1,271,085	1,263,717	1,254,925	1,244,692	1,233,011	1,219,879
	ในเขตเทศบาล	711,237	710,390	708,959	706,930	704,289	701,025	697,130	692,598	687,423	681,606
	นอกเขตเทศบาล	575,534	574,468	572,669	570,117	566,796	562,692	557,795	552,095	545,588	538,273
ปทุมธานี	จังหวัด	1,196,178	1,194,021	1,190,377	1,185,209	1,178,483	1,170,172	1,160,254	1,148,711	1,135,534	1,120,719
	ในเขตเทศบาล	615,126	613,475	610,686	606,732	601,586	595,226	587,636	578,804	568,721	557,384
	นอกเขตเทศบาล	581,053	580,546	579,691	578,477	576,898	574,946	572,618	569,907	566,813	563,335
นครสวรรค์	จังหวัด	1,063,881	1,063,985	1,064,162	1,064,412	1,064,737	1,065,140	1,065,620	1,066,179	1,066,817	1,067,534
	ในเขตเทศบาล	195,565	195,688	195,894	196,187	196,568	197,038	197,600	198,254	199,000	199,839
	นอกเขตเทศบาล	868,315	868,298	868,268	868,225	868,170	868,102	868,020	867,925	867,817	867,695
พระนครศรีอยุธยา	จังหวัด	829,736	829,251	828,431	827,269	825,757	823,888	821,657	819,062	816,099	812,767
	ในเขตเทศบาล	322,085	321,953	321,729	321,412	321,000	320,490	319,882	319,174	318,366	317,457
	นอกเขตเทศบาล	507,651	507,298	506,702	505,857	504,757	503,398	501,776	499,888	497,733	495,310
อ่างทอง	จังหวัด	280,393	280,438	280,515	280,623	280,764	280,939	281,147	281,389	281,666	281,977
	ในเขตเทศบาล	73,692	73,736	73,809	73,914	74,049	74,217	74,418	74,651	74,917	75,216
	นอกเขตเทศบาล	206,701	206,702	206,705	206,710	206,715	206,722	206,729	206,739	206,749	206,761
สิงห์บุรี	จังหวัด	208,070	208,137	208,250	208,410	208,619	208,877	209,184	209,542	209,951	210,410
	ในเขตเทศบาล	53,037	53,081	53,156	53,262	53,400	53,570	53,774	54,011	54,281	54,585
	นอกเขตเทศบาล	155,034	155,056	155,094	155,149	155,219	155,306	155,410	155,531	155,670	155,825
ชัยนาท	จังหวัด	327,445	327,520	327,647	327,826	328,060	328,348	328,692	329,093	329,551	330,065
	ในเขตเทศบาล	97,466	97,509	97,581	97,684	97,817	97,982	98,178	98,407	98,668	98,962
	นอกเขตเทศบาล	229,979	230,011	230,066	230,143	230,243	230,366	230,514	230,686	230,882	231,103

4.2.2.2 ข้อมูลการท่องเที่ยว

กรมทรัพยากรน้ำ (2559) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลที่อยู่โรงแรมที่พักจำแนกรายตำบล รวมถึงจำนวนห้องพัก เบอร์เซ็นต์การเข้าพัก และระยะเวลาเข้าพักเฉลี่ยต่อปี ดังแสดงในตารางที่ 4-21 เพื่อมาทำการคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำที่เกิดจากการท่องเที่ยว ในการประเมินปริมาณความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคและการท่องเที่ยว ในหลักการแล้ว ในด้านความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคจะเป็นการประเมินจากจำนวนประชากรคูณด้วยอัตราความต้องการใช้น้ำของประชากร ส่วนปริมาณความต้องการใช้น้ำเพื่อการท่องเที่ยวก็จะประเมินจากจำนวนนักท่องเที่ยวคูณด้วยอัตราความต้องการใช้น้ำเพื่อการท่องเที่ยว แต่เนื่องจากอัตราความต้องการใช้น้ำในแต่ละพื้นที่จะมีความแตกต่างกันด้วยปัจจัยหลาย ๆ อย่าง รวมถึงแหล่งน้ำที่นำมาใช้เพื่อตอบสนองความต้องการนั้น ๆ กรมทรัพยากรน้ำได้ประเมินความต้องการใช้น้ำโดยมุ่งเน้นไปที่ระบบที่ส่งน้ำไปให้กับกิจกรรมการใช้น้ำนั้น ๆ ในรายงานโครงการศึกษาความมั่นคงของกลุ่มน้ำอย่างยั่งยืนทั้ง 25 กลุ่มน้ำ ได้แก่ ระบบประปาขนาดใหญ่ ระบบประปาขนาดเล็ก บ่อบาดาล และการใช้น้ำฝน ดังแสดงในตารางที่ 4-22

ตารางที่ 4-21 ข้อมูลจำนวนสถานพักแรม จำนวน ห้องพัก อัตราการเข้าพัก จำนวนนักท่องเที่ยวที่เข้าพัก แรมรวมทั้งปี และระยะเวลาที่เข้าพักเฉลี่ยใน 1 ปี จำแนกรายจังหวัดในภาคเหนือและภาคกลาง

จังหวัด	จำนวนสถานีที่ พักแรมทั้งหมด (แห่ง)	จำนวนห้องพัก (ห้อง)	อัตราการเข้าพัก Occupancy Rate (%)	จำนวน นักท่องเที่ยว ทั้งหมดที่เข้าพัก แรมรวมทั้งปี (คน)	ระยะเวลาเข้าพัก เฉลี่ยใน 1 ปี (วัน)
กรุงเทพมหานคร	1,426	136,043	76.33	30,655,540	3.88
สมุทรปราการ	39	3,893	58.40	821,887	1.96
นนทบุรี	26	2,722	58.78	712,889	1.86
ปทุมธานี	31	2,625	49.18	479,357	2.22
พระนครศรีอยุธยา	144	4,966	55.40	957,743	2.68
อ่างทอง	12	403	63.55	179,829	1.60
ลพบุรี	44	2,207	49.45	503,147	2.34
สิงห์บุรี	17	582	57.03	147,038	2.22
ชัยนาท	32	892	72.84	252,216	1.91
สระบุรี	80	3,230	50.81	826,880	2.00
ปราจีนบุรี	60	2,489	56.35	760,507	2.02
นครนายก	166	5,209	57.57	1,448,682	1.91
สระแก้ว	95	2,814	52.55	627,247	2.05
เชียงใหม่	730	33,593	66.34	7,109,038	3.06
ลำพูน	35	1,135	46.97	214,079	2.09
ลำปาง	59	2,363	49.63	449,323	2.36
พะเยา	61	1,456	39.72	239,922	2.41
เชียงราย	567	16,014	43.04	2,432,470	2.71
นครสวรรค์	148	4,229	46.47	852,497	2.17
อุทัยธานี	59	1,707	44.29	289,915	2.01
กำแพงเพชร	90	2,186	44.64	366,047	2.11
ตาก	209	6,345	53.40	1,466,212	2.13
สุโขทัย	123	2,790	57.93	746,666	2.17
พิษณุโลก	135	6,485	50.22	1,693,889	2.08
พิจิตร	68	1,794	46.84	386,419	2.24
เพชรบูรณ์	305	5,171	51.76	1,576,994	2.49
สุพรรณบุรี	84	3,756	78.58	855,414	2.32
นครปฐม	71	3,883	64.18	944,858	1.76
สมุทรสาคร	46	2,026	56.61	641,208	1.66
สมุทรสงคราม	217	2,068	59.18	561,759	1.82

ตารางที่ 4-22 ปริมาณความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคและการท่องเที่ยวสรุปเป็นรายลุ่มน้ำ

ลุ่มน้ำ	จำนวนประชากร (คน) ^{1/}	การอุปโภคบริโภคและการท่องเที่ยว (ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี พ.ศ.)								
		2558			2568			2578		
		น้ำผิวดิน	น้ำบาดาล	รวม	น้ำผิวดิน	น้ำบาดาล	รวม	น้ำผิวดิน	น้ำบาดาล	รวม
ปิง	2,569,405	77.95	157.09	235.04	88.48	174.63	263.11	100.69	195.97	296.66
วัง	709,543	15.13	17.89	33.03	17.13	18.06	35.18	19.52	18.18	37.70
ยม	1,819,069	24.78	58.99	83.78	27.41	60.98	88.39	30.42	30.42	93.70
น่าน	2,286,004	50.30	63.34	113.64	53.58	65.52	119.10	57.36	68.12	125.48
เจ้าพระยา	12,092,526	1,277.90	150.89	1,428.79	1,449.28	177.28	1,626.57	1,647.79	214.90	1,862.68
สะแกกรัง	379,967	8.08	10.84	18.92	8.49	10.96	19.46	8.98	11.13	20.11
ป่าสัก	1,583,650	42.79	56.07	98.85	46.55	58.64	105.19	50.80	61.42	112.22

หมายเหตุ : ^{1/}จำนวนประชากรในปี พ.ศ. 2558 (ที่มา : กรมทรัพยากรน้ำ (2559))

4.2.2.2 ผลการประมาณการความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคและการท่องเที่ยว

4.2.2.2.1 ผลการประมาณการความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค

การประเมินความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคของกลุ่มน้ำเจ้าพระยาเป็นการประเมินจากจำนวนประชากรในและนอกพื้นที่บริการของการประปานครหลวงและการประปาส่วนภูมิภาคในปัจจุบัน (ปี พ.ศ. 2561) และการคาดการณ์จำนวนประชากรในอนาคต 20 ปี และนำมาคำนวณปริมาณความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคของประชากร โดยใช้อัตราการใช้น้ำที่พิจารณาจากลักษณะของชุมชนที่อยู่ในพื้นที่ให้บริการประปาของการประปานครหลวง (กปน.) การประปาส่วนภูมิภาค (กปภ.) และชุมชนที่อยู่นอกพื้นที่การให้บริการประปา ดังนี้

– ข้อมูลการผลิตและจำหน่ายน้ำประปาของการประปานครหลวงซึ่งให้บริการในพื้นที่กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2552–2561) แสดงดังตารางที่ 4-23 เมื่อพิจารณาเฉพาะปริมาณน้ำที่จำหน่ายให้กับผู้ใช้น้ำประเภทที่อยู่อาศัยต่อจำนวนประชากรในพื้นที่ให้บริการทั้งหมดพบว่า อัตราการใช้น้ำในแต่ละสำนักประปาสาขาแตกต่างกัน โดยอัตราการใช้น้ำจาก กปน. เฉลี่ยเท่ากับ 215 ลิตรต่อคนต่อวัน

ตารางที่ 4-23 สถิติข้อมูลปริมาณน้ำที่ผลิตและจำหน่ายของการประปานครหลวงในรอบ 10 ปีที่ผ่านมา

ปี พ.ศ.	ปริมาณน้ำที่ผลิตและจำหน่ายของการประปานครหลวง (ล้านลูกบาศก์เมตร)									
	2562	2553	2554	2555	2556	2557	2558	2559	2560	2561
โรงงานผลิตน้ำบางเขน	1,206	1,173	1,126	1,179	1,121	1,163	1,153	1,291	1,405	1,334
โรงงานผลิตน้ำสามเสน	180	174	166	149	135	125	138	130	121	116
โรงงานผลิตน้ำธนบุรี	49	35	24	32	23	30	34	31	41	37
โรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์	302	358	400	405	526	480	511	514	498	509
ปริมาณน้ำผลิตจ่ายทั้งหมด	1,737	1,736	1,715	1,764	1,805	1,798	1,835	1,966	2,064	1,997
ที่อยู่อาศัย	595	612	605	619	637	647	658	654	657	652
ธุรกิจ รัฐวิสาหกิจ ราชการ และอื่น ๆ	635	652	657	673	701	704	725	724	723	720
น้ำสาธารณะ และอื่น ๆ	20	18	20	26	24	27	24	29	28	30
ปริมาณน้ำจำหน่ายทั้งหมด	1,250	1,282	1,282	1,317	1,361	1,377	1,406	1,406	1,409	1,401
เปอร์เซ็นต์น้ำจำหน่าย (%)	72	74	75	75	75	77	77	72	68	70

ที่มา : การประปานครหลวง (2563)

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเข็มมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

-ข้อมูลการผลิต ส่ง และจำหน่ายน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคซึ่งใช้น้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาหรือแหล่งน้ำในพื้นที่ศึกษาในรอบ 10 ปีที่ผ่านมา และจำนวนประชากรที่อยู่ในพื้นที่ให้บริการ โดยพิจารณาเป็นรายจังหวัด แสดงดังตารางที่ 4-24 เมื่อคิดปริมาณน้ำที่จำหน่ายต่อจำนวนประชากรในพื้นที่บริการ มีอัตราการใช้น้ำเฉลี่ยประมาณ 150 ลิตรต่อคนต่อวัน

-จำนวนประชากรในและนอกเขตบริการของการประปานครหลวงและการประปาส่วนภูมิภาคในปัจจุบัน และคาดการณ์ในอนาคต 20 ปีข้างหน้าด้วยวิธีอัตราส่วน ดังตารางที่ 4-25 แสดงจำนวนประชากรปัจจุบัน และคาดการณ์ทุก ๆ 5 ปี ข้างหน้า โดยประชากรในเขตพื้นที่บริการของการประปานครหลวงพิจารณาเฉพาะที่ใช้น้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยา

-การประเมินความต้องการน้ำอุปโภคบริโภค สำหรับพื้นที่ที่อยู่ในเขตบริการของการประปานครหลวงและการประปาส่วนภูมิภาคใช้ค่าอัตราการใช้น้ำเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณจากสถิติข้อมูลการจำหน่ายน้ำประปาย้อนหลัง 10 ปี ส่วนพื้นที่ที่อยู่นอกเขตบริการของการประปา กำหนดอัตราการใช้น้ำของประชากรในชุมชนลักษณะต่าง ๆ โดยประชากรที่อยู่ในเขตเทศบาลใช้ข้อมูลวิเคราะห์จากข้อมูลปริมาณน้ำจำหน่ายของการประปาส่วนภูมิภาค ส่วนอัตราการใช้น้ำของประชากรนอกเขตเทศบาลกำหนดให้ใช้ตามมาตรฐานของการสำรวจความจำเป็นพื้นฐาน (จปฐ.) ดังนี้ ในเขตเทศบาลเมือง กำหนดอัตราการใช้น้ำเท่ากับ 150 ลิตรต่อคนต่อวัน นอกเขตเทศบาล กำหนดอัตราการใช้น้ำเท่ากับ 50 ลิตรต่อคนต่อวัน ดังนั้น ความต้องการน้ำอุปโภคบริโภคในพื้นที่ศึกษาแสดงดังตารางที่ 4-26

ตารางที่ 4-24 สถิติข้อมูลปริมาณน้ำที่ผลิตและจำหน่ายของการประปาส่วนภูมิภาคในรอบ 10 ปีที่ผ่านมา

จังหวัด	ปริมาณน้ำ	2552	2553	2554	2555	2556	2557	2558	2559	2560	2561
นครสวรรค์	ปริมาณน้ำที่ผลิต (ล้าน ลบ.ม.)	10.88	10.89	11.58	11.94	11.98	13.66	13.33	14.17	13.85	15.23
	ปริมาณน้ำที่ส่ง (ล้าน ลบ.ม.)	10.35	10.54	11.16	11.43	11.61	13.22	12.99	13.25	13.23	14.40
	ปริมาณน้ำที่จำหน่าย (ล้าน ลบ.ม.)	8.42	8.38	9.15	9.44	9.38	9.92	10.13	10.78	10.97	11.39
	ประชากรในพื้นที่บริการ (คน)	329,359	333,629	348,105	347,116	334,533	329,542	335,717	350,692	335,246	336,174
ชัยนาท	ปริมาณน้ำที่ผลิต (ล้าน ลบ.ม.)	2.67	2.83	2.85	3.09	3.11	3.27	3.18	4.99	5.15	4.99
	ปริมาณน้ำที่ส่ง (ล้าน ลบ.ม.)	2.57	2.69	2.81	2.98	2.99	3.14	3.18	5.34	4.87	4.71
	ปริมาณน้ำที่จำหน่าย (ล้าน ลบ.ม.)	2.20	2.30	2.30	2.51	2.56	2.52	2.52	2.72	2.61	2.65
	ประชากรในพื้นที่บริการ (คน)	73,477	73,559	73,073	73,387	73,884	73,887	73,854	73,559	73,553	73,273
สิงห์บุรี	ปริมาณน้ำที่ผลิต (ล้าน ลบ.ม.)	2.98	2.82	2.63	3.00	2.75	2.81	2.77	3.29	3.18	3.56
	ปริมาณน้ำที่ส่ง (ล้าน ลบ.ม.)	2.87	2.68	2.50	2.86	2.69	2.76	2.71	3.14	3.10	3.43
	ปริมาณน้ำที่จำหน่าย (ล้าน ลบ.ม.)	2.16	2.06	2.08	2.12	2.16	2.14	2.04	2.20	2.28	2.26
	ประชากรในพื้นที่บริการ (คน)	44,984	44,799	44,494	44,328	44,197	43,962	43,769	43,480	43,310	43,185
พระนครศรีอยุธยา	ปริมาณน้ำที่ผลิต (ล้าน ลบ.ม.)	29.95	34.63	36.63	40.22	42.68	43.43	43.32	48.00	46.27	50.21
	ปริมาณน้ำที่ส่ง (ล้าน ลบ.ม.)	29.83	34.33	36.43	40.05	41.51	41.78	40.77	42.09	41.71	46.65
	ปริมาณน้ำที่จำหน่าย (ล้าน ลบ.ม.)	22.95	25.57	28.54	28.00	29.35	29.10	30.49	31.21	32.27	32.60
	ประชากรในพื้นที่บริการ (คน)	323,897	329,410	334,643	339,624	343,409	348,432	352,819	352,498	359,549	363,198
อ่างทอง	ปริมาณน้ำที่ผลิต (ล้าน ลบ.ม.)	4.31	4.47	4.78	4.84	4.88	4.97	4.75	5.00	5.44	5.79
	ปริมาณน้ำที่ส่ง (ล้าน ลบ.ม.)	4.20	4.33	4.63	4.66	4.68	4.74	4.34	4.64	5.02	5.40
	ปริมาณน้ำที่จำหน่าย (ล้าน ลบ.ม.)	3.32	3.29	3.52	3.47	3.63	3.57	3.59	3.78	3.79	3.76
	ประชากรในพื้นที่บริการ (คน)	103,178	102,861	102,679	102,741	102,779	102,839	102,885	102,786	102,601	102,466
ปทุมธานี	ปริมาณน้ำที่ผลิต (ล้าน ลบ.ม.)	126.74	140.08	146.57	165.80	167.49	166.67	180.01	171.85	183.20	196.87
	ปริมาณน้ำที่ส่ง (ล้าน ลบ.ม.)	126.74	140.08	146.57	165.80	167.49	163.89	177.45	167.32	178.73	193.83
	ปริมาณน้ำที่จำหน่าย (ล้าน ลบ.ม.)	91.34	98.35	106.09	102.20	102.97	105.14	111.03	111.80	112.99	114.13
	ประชากรในพื้นที่บริการ (คน)	927,138	956,250	981,304	1,004,087	1,023,428	1,044,180	1,063,321	1,080,976	1,098,756	1,115,587

ตารางที่ 4-25 ประชากรปัจจุบันและการคาดประมาณประชากรในและนอกเขตบริการของการประปา

เขตพื้นที่	จำนวนประชากร (คน)				
	2561	2566	2571	2576	2581
ในเขตพื้นที่บริการของ กปน.	3,922,740	4,037,670	4,053,766	4,035,551	3,978,396
ในเขตพื้นที่บริการของ กปภ.	2,033,883	2,057,452	2,074,234	2,055,243	1,995,653
นอกเขตพื้นที่บริการของ กปภ. ในเขตเทศบาล	476,297	474,573	473,299	474,741	479,264
นอกเขตพื้นที่บริการของ กปภ. นอกเขตเทศบาล	1,335,797	1,356,729	1,358,949	1,356,437	1,348,555

หมายเหตุ : ปีปัจจุบันหมายถึงปี พ.ศ. 2561

ตารางที่ 4-26 ความต้องการน้ำอุปโภคบริโภคในเขตลุ่มน้ำเจ้าพระยาปีปัจจุบันและในอนาคต

เขตพื้นที่	ความต้องการน้ำอุปโภคบริโภค (ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี)				
	2561	2566	2571	2576	2581
ในเขตพื้นที่บริการของ กปน.	307.84	316.86	318.12	316.69	312.20
ในเขตพื้นที่บริการของ กปภ.	111.36	112.65	113.56	112.52	109.26
นอกเขตพื้นที่บริการของ กปภ. ในเขตเทศบาล	26.08	25.98	25.91	25.99	26.24
นอกเขตพื้นที่บริการของ กปภ. นอกเขตเทศบาล	24.38	24.76	24.80	24.75	24.61

หมายเหตุ : ปีปัจจุบันหมายถึงปี พ.ศ. 2561

4.2.2.2 ผลการประมาณการความต้องการน้ำเพื่อการท่องเที่ยว

ในการประเมินความต้องการใช้น้ำเพื่อการท่องเที่ยวสามารถประเมินได้จากจำนวนนักท่องเที่ยวคูณด้วยอัตราการใช้น้ำของนักท่องเที่ยว โดยอัตราการใช้น้ำของนักท่องเที่ยวจากการศึกษาแผนหลักพัฒนาการท่องเที่ยว (2537) ได้กำหนดปริมาณใช้น้ำของนักท่องเที่ยวเท่ากับ 300 ลิตรต่อคนต่อวัน สำหรับนักท่องเที่ยวที่ไม่พักค้างคืนกำหนดให้มีอัตราการใช้น้ำเฉลี่ย 30 ลิตรต่อคนต่อวัน จากนั้นนำมาคำนวณร่วมกับข้อมูลระยะเวลาที่เข้าพักเฉลี่ยรายปี จากข้อมูลจำนวนนักท่องเที่ยวของการท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย (ททท.) ในพื้นที่ศึกษา ได้แก่ จังหวัดนครสวรรค์ ชัยนาท สิงห์บุรี พระนครศรีอยุธยา อ่างทอง ปทุมธานี และกรุงเทพมหานคร ระหว่างปี พ.ศ. 2553-2561 โดยแยกเป็นจำนวนนักท่องเที่ยว นักทัศนาจร อัตราการเข้าพัก และระยะเวลาที่เข้าพักเฉลี่ย ดังแสดงในตารางที่ 4-27

จากข้อมูลของการท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย ความต้องการน้ำเพื่อการท่องเที่ยวเฉลี่ยระหว่างปี พ.ศ. 2552-2561 กรุงเทพมหานครมีความต้องการใช้น้ำมากที่สุดประมาณ 46 ล้านลูกบาศก์เมตร เพราะเป็นเมืองหลัก รองลงมาคือจังหวัดพระนครศรีอยุธยาและนครสวรรค์เท่ากับ 1.32 และ 0.54 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4-27 จำนวนนักท่องเที่ยว นักทัศนจร อัตราการเข้าพัก และระยะเวลาที่เข้าพักเฉลี่ย ในพื้นที่ศึกษา

ปี พ.ศ.	จังหวัด	ผู้มาเยือน (Visitors) (คน)		จำนวนห้องพัก (ห้อง)	อัตราการเข้าพัก (Occupancy Rate)	ระยะเวลาพำนัก เฉลี่ย (Period of
		นักทัศนจร	นักท่องเที่ยว			
2553	กรุงเทพมหานคร	11,672,203	26,550,700	-	-	4.07
	นครสวรรค์	360,015	686,756	-	-	1.98
	ชัยนาท	81,308	138,925	-	-	2.05
	สิงห์บุรี	175,140	132,181	-	-	2.06
	อ่างทอง	180,539	134,313	-	-	2.06
	พระนครศรีอยุธยา	5,224,651	1,309,987	-	-	2.33
	ปทุมธานี	809,679	258,850	-	-	2.02
2554	กรุงเทพมหานคร	13,113,230	30,649,772	-	-	4.10
	นครสวรรค์	319,492	581,908	-	-	1.98
	ชัยนาท	55,310	108,061	-	-	2.04
	สิงห์บุรี	165,957	113,949	-	-	2.19
	อ่างทอง	167,012	137,323	-	-	2.26
	พระนครศรีอยุธยา	3,862,652	1,028,297	-	-	2.80
	ปทุมธานี	803,978	282,455	-	-	2.15
2555	กรุงเทพมหานคร	12,777,281	34,407,750	-	-	4.09
	นครสวรรค์	497,901	661,475	-	-	2.11
	ชัยนาท	208,083	184,091	-	-	1.94
	สิงห์บุรี	241,118	165,476	-	-	2.21
	อ่างทอง	314,626	203,667	-	-	1.62
	พระนครศรีอยุธยา	4,678,573	1,387,972	-	-	2.65
	ปทุมธานี	935,439	538,853	-	-	2.32
2556	กรุงเทพมหานคร	13,423,665	37,145,237	96,992	68.34	4.06
	นครสวรรค์	492,743	738,271	3,309	37.88	2.20
	ชัยนาท	217,449	185,445	645	44.26	1.94
	สิงห์บุรี	260,526	163,855	502	49.30	2.34
	อ่างทอง	337,982	219,256	503	45.58	1.68
	พระนครศรีอยุธยา	4,833,167	1,393,257	4,997	43.22	2.72
	ปทุมธานี	1,007,457	545,713	2,468	40.22	2.36
2557	กรุงเทพมหานคร	13,875,446	37,097,326	97,547	67.50	4.01
	นครสวรรค์	506,976	734,274	2,914	41.24	2.15
	ชัยนาท	281,656	241,397	620	62.36	1.90
	สิงห์บุรี	274,540	173,014	582	51.42	2.34
	อ่างทอง	375,880	239,724	451	56.84	1.64
	พระนครศรีอยุธยา	5,213,103	1,485,458	5,032	50.18	2.74
	ปทุมธานี	1,046,181	566,892	2,468	44.75	2.26

ปี พ.ศ.	จังหวัด	ผู้มาเยือน (Visitors) (คน)		จำนวนห้องพัก (ห้อง)	อัตราการเข้าพัก (Occupancy Rate)	ระยะเวลาพำนัก เฉลี่ย (Period of
		นักท่องเที่ยว	นักท่องเที่ยว			
2558	กรุงเทพมหานคร	15,232,086	41,283,511	138,286	76.33	3.88
	นครสวรรค์	687,387	974,004	4,203	46.47	2.17
	ชัยนาท	397,991	341,630	892	72.84	1.91
	สิงห์บุรี	295,200	185,011	583	57.03	2.22
	อ่างทอง	451,573	282,485	577	63.55	1.60
	พระนครศรีอยุธยา	5,445,930	1,548,608	5,015	55.40	2.68
	ปทุมธานี	1,191,951	623,438	2,625	49.18	2.22
2559	กรุงเทพมหานคร	16,743,439	42,452,892	140,688	77.73	3.96
	นครสวรรค์	704,629	1,002,335	4,229	48.23	2.09
	ชัยนาท	415,454	352,253	892	76.26	1.92
	สิงห์บุรี	313,396	189,863	582	59.35	2.20
	อ่างทอง	463,223	267,279	403	65.96	1.64
	พระนครศรีอยุธยา	5,633,609	1,582,905	4,966	58.59	2.68
	ปทุมธานี	1,256,364	640,185	2,625	51.68	2.19
2560	กรุงเทพมหานคร	17,973,315	45,602,422	152,744	79.42	3.92
	นครสวรรค์	744,291	1,100,769	4,705	50.38	2.00
	ชัยนาท	451,170	374,426	964	76.49	1.94
	สิงห์บุรี	334,896	198,089	613	61.04	2.14
	อ่างทอง	497,837	277,530	444	66.37	1.62
	พระนครศรีอยุธยา	5,994,376	1,637,181	5,024	60.48	2.67
	ปทุมธานี	1,348,537	665,744	2,772	52.63	2.19
2561	กรุงเทพมหานคร	17,515,086	48,019,195	152,616	82.43	3.87
	นครสวรรค์	769,267	1,126,693	4,618	52.14	1.98
	ชัยนาท	472,713	378,126	927	76.62	1.96
	สิงห์บุรี	351,532	201,464	617	61.59	2.09
	อ่างทอง	530,835	285,797	498	66.56	1.59
	พระนครศรีอยุธยา	6,625,903	1,723,710	5,372	63.65	2.62
	ปทุมธานี	1,419,329	679,015	2,702	54.09	2.17

ที่มา : การท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย (2563)

ดังนั้น ความต้องการใช้น้ำเพื่อการท่องเที่ยวในแต่ละจังหวัดในปีปัจจุบัน (พ.ศ. 2561) สรุปลงได้โดยประมาณได้ดังตารางที่ 4-28 ดังนี้

ตารางที่ 4-28 ความต้องการใช้น้ำเพื่อการท่องเที่ยวในแต่ละจังหวัดในปี พ.ศ. 2561

จังหวัด	ความต้องการน้ำเพื่อการท่องเที่ยว (ล้านลูกบาศก์เมตร)
กรุงเทพมหานคร	46.00
นครสวรรค์	0.54
ชัยนาท	0.16
สิงห์บุรี	0.12
อ่างทอง	0.13

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

จังหวัด	ความต้องการน้ำเพื่อการท่องเที่ยว (ล้านลูกบาศก์เมตร)
พระนครศรีอยุธยา	1.32
ปทุมธานี	0.39
รวมพื้นที่ศึกษา	48.66

แต่ในขณะศึกษา ด้วยสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัส COVID-19 ศูนย์วิจัยด้านการตลาดการท่องเที่ยว (2563) ได้คาดการณ์แนวโน้มการท่องเที่ยวในประเทศไตรมาสที่ 1 (ม.ค.-มี.ค. 2563) ว่าจำนวนนักท่องเที่ยวต่างชาติที่จะมาท่องเที่ยวในประเทศไทยลดลงประมาณ 23% จำนวนผู้เยี่ยมชมเยือนชาวไทยลดลงประมาณ 5% โดยในกรุงเทพมหานคร จำนวนนักท่องเที่ยวลดลง 3% ในภาคกลางไม่รวมกรุงเทพมหานคร ลดลงมากถึง 6% และจะมีผลกระทบต่อเนื่องถึงในไตรมาสที่ 2 (เม.ย.-มิ.ย. 2563) ซึ่งคาดว่านักท่องเที่ยวต่างชาติจะลดลงถึง 30% ส่วนนักท่องเที่ยวชาวไทยจะลดลงประมาณ 4% เนื่องจากสภาพเศรษฐกิจที่ฟื้นตัวช้า โดยพื้นที่เมืองหลักมีแนวโน้มผู้เยี่ยมชมเยือนลดลงในอัตราเฉลี่ย 5% ขณะที่พื้นที่เมืองรองมีแนวโน้มจะฟื้นตัวได้ดีกว่า โดยมีจำนวนผู้เยี่ยมชมเยือนเพิ่มขึ้น 2% ด้วยสถานการณ์ดังกล่าว ในการศึกษาที่กำหนดให้ความต้องการใช้น้ำเพื่อการท่องเที่ยวมีค่าคงที่ เนื่องจากในอนาคตเมื่อสถานการณ์กลับเข้าสู่สภาวะปกติ แนวโน้มการท่องเที่ยวอาจกลับสู่สภาพเดิม ดังนั้น ความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคและการท่องเที่ยวในปัจจุบัน (พ.ศ. 2561) และคาดประมาณในอนาคตแสดงดังตารางที่ 4-29

ตารางที่ 4-29 ความต้องการใช้น้ำเพื่อการท่องเที่ยวในแต่ละจังหวัดในปี พ.ศ. 2561

ปี พ.ศ.	2561	2566	2571	2576	2581
ความต้องการน้ำเพื่ออุปโภคบริโภคและการท่องเที่ยว (ล้านลูกบาศก์เมตร)	518.31	528.90	531.06	528.62	520.98

4.2.3 ความต้องการน้ำเพื่อการอุตสาหกรรม (Industrial Water Demand)

4.2.3.1 ผลกระทบทวนวรรณกรรม

จากรายงานเรื่อง “การดำเนินการด้านการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลโครงการพัฒนาระบบคลังข้อมูล 25 กลุ่มน้ำ และแบบจำลองน้ำท่วมและน้ำแล้ง กลุ่มน้ำเจ้าพระยา” (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน), 2555) ได้ประเมินปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุตสาหกรรมโดยได้ทำการรวบรวมข้อมูลโรงงานอุตสาหกรรม การใช้น้ำ/อัตรากาใช้น้ำ และประเมินความต้องการน้ำตามประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม 10 ประเภทหลักในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาดังแสดงในตารางที่ 4-30 โดยปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุตสาหกรรมคิดเป็น 931.35 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

ตารางที่ 4-30 หลักเกณฑ์และผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุตสาหกรรม

ประเภทอุตสาหกรรมหลัก	ปริมาณความต้องการน้ำ (ลบ.ม./ไร่/วัน)
อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่าง ๆ	6.00
อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์	8.00
อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม	12.00
อุตสาหกรรมถลุงและหล่อโลหะ	5.00
อุตสาหกรรมทั่วไป	7.00

ประเภทอุตสาหกรรมหลัก	ปริมาณความต้องการน้ำ (ลบ.ม./ไร่/วัน)
อุตสาหกรรมกลางแจ้ง เช่น โม้/บดหิน ดูดทราย เผาถ่าน หีบฝ้าย อบเมล็ดพืช เป็นต้น	4.00
อุตสาหกรรมกระดาษ เช่น ผลิตเยื่อกระดาษ ภาชนะจากกระดาษ เป็นต้น	4.00
อุตสาหกรรมสิ่งทอ ฟอกหนัง ย้อมสี	5.00
อุตสาหกรรมโลหะ เช่น แก้ว กระเบื้องเคลือบ ปูน เป็นต้น	8.00
อุตสาหกรรมไม้และเครื่องเรือน	3.00
ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการอุตสาหกรรม (ล้าน ลบ.ม./ปี)	931.35

ที่มา : สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) (2555)

กรมทรัพยากรน้ำ (2559) ได้ทำการประเมินปริมาณความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุตสาหกรรม โดยรวบรวมข้อมูลโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบันได้และข้อมูลโรงงานอุตสาหกรรมในรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้

(1) นิคมอุตสาหกรรม จะเป็นกลุ่มอุตสาหกรรมที่อยู่ภายใต้การดูแลของ “การนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย” ซึ่งมีทั้งนิคมอุตสาหกรรมที่การนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยเป็นผู้ลงทุนพัฒนาและดำเนินการเอง และนิคมอุตสาหกรรมที่เอกชนเป็นผู้ลงทุนและอยู่ในการกำกับของการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย ดังแสดงรายชื่อนิคมอุตสาหกรรมและตำแหน่งที่ตั้งของนิคมอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในภาคเหนือและภาคกลางในตารางที่ 4-31

(2) เขตประกอบการอุตสาหกรรมและเขตชุมชนอุตสาหกรรมในภาคเหนือและภาคกลาง ดังแสดงรายชื่อและตำแหน่งที่ตั้งของเขตชุมชนอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในตารางที่ 4-32

เขตประกอบการอุตสาหกรรม : เป็นการพัฒนาพื้นที่เพื่อรองรับอุตสาหกรรม ตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 การพัฒนาพื้นที่ดังกล่าว ต้องได้รับการพิจารณาและประกาศกำหนดเขตประกอบการอุตสาหกรรมจากกระทรวงอุตสาหกรรมสิทธิประโยชน์ที่ได้รับคือได้รับการยกเว้นไม่ต้องขออนุญาตตามกฎหมายโรงงาน

เขตชุมชนอุตสาหกรรม : เป็นการพัฒนาพื้นที่เพื่อรองรับอุตสาหกรรม ดำเนินงานภายใต้การดูแลของกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม เนื่องจากนโยบายของกระทรวงอุตสาหกรรมที่จะส่งเสริมให้โรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้มาอยู่รวมในแหล่งเดียวกันเพื่อให้เป็นผลดีต่อการรักษาสิ่งแวดล้อม สิทธิประโยชน์ที่ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมจะได้รับจากการเข้ามาลงทุนในชุมชนอุตสาหกรรมนั้นน้อยกว่าการเข้าไปลงทุนในนิคมอุตสาหกรรมและเขต/สวนอุตสาหกรรม แต่ก็เป็นรูปแบบที่ผู้ประกอบการพึงพอใจ เช่น การได้รับการสนับสนุนจากกรมโรงงาน การขอรับใบอนุญาตจัดตั้งโรงงานที่สะดวกรวดเร็วกว่า รวมถึงไม่มีการคิดค่าธรรมเนียมในการจัดตั้ง

(3) โรงงานอุตสาหกรรม ได้ทำการรวบรวมสถิติโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้รับอนุญาตให้ประกอบกิจการ ตาม พ.ร.บ. โรงงาน พ.ศ. 2535 ประกอบไปด้วย รายชื่อ ที่ตั้ง ประเภท จำนวนคนงาน และจำนวนแรงแม่จากกรมโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2558 (โรงงานดังกล่าวนี้จะเป็นโรงงานที่อยู่ในกลุ่มอุตสาหกรรมในข้อ (1) และ (2) ด้วยเช่นกัน) จากข้อมูลที่รวบรวมได้นี้ ได้จำแนกข้อมูลโรงงานตามขนาดของโรงงานแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเขื่อนภูมิพล ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

โรงงานจำพวกที่ 1 คือโรงงานที่มีแรงแม้รวมของเครื่องจักร 5-20 แรงแม้ และ/หรือมีจำนวนคนงาน 7-20 คน

โรงงานจำพวกที่ 2 คือโรงงานที่มีแรงแม้รวมของเครื่องจักรมากกว่า 20 แรงแม้ แต่ไม่เกิน 50 แรงแม้และ/หรือมีจำนวนคนงาน 21-50 คน

โรงงานจำพวกที่ 3 คือโรงงานที่มีแรงแม้รวมของเครื่องจักรมากกว่า 50 แรงแม้ และ/หรือมีจำนวนคนงานมากกว่า 50 คน

ตารางที่ 4-31 รายชื่ออุตสาหกรรมที่ตั้งอยู่เป็นกลุ่มก้อนภายใต้การบริหารและจัดการดูแลของการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย

รายชื่อนิคมอุตสาหกรรม	บริเวณตำแหน่งที่ตั้งนิคมอุตสาหกรรม			พื้นที่ทั้งหมด (ไร่-งาน-ตร.ว.)	เขตอุตสาหกรรม ทั่วไป (ไร่-งาน-ตร.ว.)
	ตำบล	อำเภอ	จังหวัด		
ภาคเหนือ					
1. นิคมอุตสาหกรรมภาคเหนือ	บ้านกลาง	เมือง	ลำพูน	1,788-0-0	363-0-0
2. นิคมอุตสาหกรรมลำพูน 2	มะเขือแจ้	เมืองลำพูน	ลำพูน	370-0-0	-
ภาคกลาง					
1. นิคมอุตสาหกรรมบางชัน	แขวงมีนบุรี	เขตมีนบุรี	กรุงเทพฯ	677-68-10	515-0-0
2. นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง	แขวงลำปลาตี	เขตลาดกระบัง	กรุงเทพฯ	2,559-0-0	1,228-0-0
3. นิคมอุตสาหกรรมอัญธานี	แขวงดอกไม้	เขตประเวศ	กรุงเทพฯ	330-0-0	-
4. นิคมอุตสาหกรรมบางปะอิน	คลองจิก	บางปะอิน	พระนครศรีอยุธยา	1,962-0-0	1,172-0-0
5. นิคมอุตสาหกรรมสหรัตนนคร	บางพระครู	นครหลวง	พระนครศรีอยุธยา	2,050-0-0	867-0-0
6. นิคมอุตสาหกรรมพิจิตร	หนองหลุม	วชิรบุรี	พิจิตร	1,235-0-0	-
7. นิคมอุตสาหกรรมบางปู	แพรกษา	เมืองสมุทรปราการ	สมุทรปราการ	5,472-2-68	3,659-0-96
8. นิคมอุตสาหกรรมบางปูเหนือ	แพรกษา	เมืองสมุทรปราการ	สมุทรปราการ	-	-
9. นิคมอุตสาหกรรมบางพลี	บางเสาธง	บางเสาธง	สมุทรปราการ	1,004-0-0	793-0-0
10. นิคมอุตสาหกรรมเอเชีย (สุวรรณภูมิ)	คลองสวน	บางปะ	สมุทรปราการ	3,700-0-0	2,886-3-80
11. นิคมอุตสาหกรรมหนองแค	ห้วยขมิ้น	หนองแค	สระบุรี	2,042-0-0	1,464-0-0
12. นิคมอุตสาหกรรมแก่งคอย	บ้านธาตุ	แก่งคอย	สระบุรี	579.29-0-0	-
13. นิคมอุตสาหกรรมบ้านหว้า (ไฮเทค)	บ้านหว้า	บางปะอิน	พระนครศรีอยุธยา	2379-0-0	1,034-0-0

ที่มา : กรมทรัพยากรน้ำ (2559)

ตารางที่ 4-32 รายชื่อของเขตชุมชนอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในประเทศไทย

รายชื่อเขตชุมชนอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม	ที่ตั้งโครงการ	พื้นที่โครงการ (ไร่)
รายชื่อเขตชุมชนอุตสาหกรรมที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมสนับสนุน		
ชุมชนอุตสาหกรรม อินทรา	สิงห์บุรี	992
ชุมชนอุตสาหกรรม โครงการสุธาวิ มินิแพค บริษัท คอมฟอร์ด ลิฟวิ่ง จำกัด	สมุทรปราการ	55
ชุมชนอุตสาหกรรม บริษัท เมโทรแมชีนเนอรี	สมุทรปราการ	131
รายชื่อเขตประกอบการอุตสาหกรรมที่ได้รับการประกาศตาม ม.30 แห่ง พรบ.โรงงาน พ.ศ. 2535		
เขตประกอบการอุตสาหกรรม กลุ่มโรงงานพอกหนัง	สมุทรปราการ	910
เขตประกอบการอุตสาหกรรม บิงโคล์อินเตอร์ซิติ์ร่วมทุน	กรุงเทพฯ	141
เขตประกอบการอุตสาหกรรม ไทยซัมมิท	สมุทรปราการ	171
เขตประกอบการอุตสาหกรรม เครือซีเมนต์ไทย สระบุรี	สระบุรี	3491
เขตประกอบการอุตสาหกรรม แอล พี เอ็น	สมุทรปราการ	186
เขตประกอบการอุตสาหกรรม วงแหวนซีวาลแพคตอรี และวงแหวนแสงประทีป	กรุงเทพฯ	327
เขตประกอบการอุตสาหกรรม แก่งคอย(ทีพีไอ)	สระบุรี	1589
เขตประกอบการอุตสาหกรรม แพคตอรีแลนด์วิ้งน้อย	พระนครศรีอยุธยา	130
เขตประกอบการอุตสาหกรรม ไทยชูซูกิ	ปทุมธานี	199
เขตประกอบการอุตสาหกรรม ชัยนันท์ บางพลี พาร์คแลนด์	สมุทรปราการ	993
เขตประกอบการอุตสาหกรรม บริษัท สวนอุตสาหกรรมโรจนะ จำกัด (มหาชน)	พระนครศรีอยุธยา	3,675

ที่มา : กรมทรัพยากรน้ำ (2559)

การประเมินปริมาณความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุตสาหกรรม ทั้งในส่วนของอุตสาหกรรมที่เป็นกลุ่มก้อน และอุตสาหกรรมที่ตั้งอยู่กระจัดกระจายได้ประเมินจากพื้นที่ประกอบการอุตสาหกรรม/ขนาดกำลังการผลิต (แรงแม่) คูณด้วยอัตราการใช้น้ำ และกำหนดจำนวนวันทำงานของแต่ละอุตสาหกรรมเท่ากับ 350 วันต่อปี โดยเป็นวันหยุดเพื่อซ่อมแซมและบำรุงรักษาอุปกรณ์ 15 วันต่อปี ผลการประเมินและคาดการณ์ปริมาณความต้องการน้ำเพื่ออุตสาหกรรมในภาคเหนือและภาคกลางเป็นรายลุ่มน้ำแสดงดังตารางที่ 4-33

ตารางที่ 4-33 ผลการประเมินปริมาณความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุตสาหกรรม

ภาค/ลุ่มน้ำ	รวมการใช้น้ำเพื่อการอุตสาหกรรม (ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี พ.ศ.)								
	2558			2568			2578		
	น้ำผิวดิน	น้ำบาดาล	รวม	น้ำผิวดิน	น้ำบาดาล	รวม	น้ำผิวดิน	น้ำบาดาล	รวม
ภาคเหนือ									
ปิง	16.90	92.14	109.05	21.07	114.08	135.15	26.32	141.34	167.65
วัง	12.44	37.17	49.61	13.71	41.02	54.73	15.12	47.20	62.99
ยม	2.52	19.24	21.76	4.38	27.89	32.27	7.74	42.16	49.90
น่าน	8.47	26.47	34.94	11.46	35.07	46.53	15.79	47.20	62.99
รวม	40.33	175.02	215.35	50.62	218.06	268.68	64.97	277.90	342.87
ภาคกลาง									
เจ้าพระยา	186.09	256.88	442.97	232.13	325.42	557.55	291.12	414.82	705.94
สะแกกรัง	0.65	1.50	2.15	0.79	1.84	2.63	0.97	2.25	3.22

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเข็มน้ำ ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

ภาค/ลุ่มน้ำ	รวมการใช้น้ำเพื่อการอุตสาหกรรม (ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี พ.ศ.)								
	2558			2568			2578		
	น้ำผิวดิน	น้ำบาดาล	รวม	น้ำผิวดิน	น้ำบาดาล	รวม	น้ำผิวดิน	น้ำบาดาล	รวม
ป่าสัก	14.38	98.71	113.09	17.62	117.72	135.34	21.76	141.99	163.75
ท่าจีน	73.51	170.63	244.14	105.58	246.06	351.64	151.83	355.44	507.27
รวม	274.62	527.72	802.35	356.11	691.04	1,047.16	465.69	914.50	1,380.19

ที่มา : กรมทรัพยากรน้ำ (2559)

4.2.3.2 ผลการประมาณการความต้องการน้ำเพื่อการอุตสาหกรรม

งานวิจัยนี้ได้ทำการประมาณการความต้องการน้ำเพื่อการอุตสาหกรรมด้วยการรวบรวมข้อมูลนิคมอุตสาหกรรม เขตประกอบการอุตสาหกรรม และโรงงานอุตสาหกรรม ที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ศึกษาจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ จังหวัดนครสวรรค์ ชัยนาท สิงห์บุรี อ่างทอง พระนครศรีอยุธยา ปทุมธานี และกรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นโรงงานจำพวกที่ 2 และ 3 ตามพระราชบัญญัติโรงงาน (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2562 ดังแสดงในตารางที่ 4-34 พบว่า มีจำนวนโรงงานทั้งสิ้น 8,763 โรงงาน เป็นโรงงานประเภทต่าง ๆ ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดประเภทโรงงานหลัก 107 ประเภท และประเมินการใช้น้ำจากขนาดพื้นที่ประกอบการกับอัตราการใช้น้ำของอุตสาหกรรมแต่ละประเภท ซึ่งมีอัตราการใช้น้ำของโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภทตามขนาดกำลังของเครื่องจักรโดยการประเมินของกรมโรงงานอุตสาหกรรมดังแสดงในตารางที่ 4-35 ในการประเมินความต้องการน้ำด้านอุตสาหกรรมได้ทำการประเมินโดยคำนวณจากขนาดกำลังของเครื่องจักรของโรงงานอุตสาหกรรมคูณกับอัตราการใช้น้ำของประเภทโรงงานหลักดังแสดงในตารางที่ 4-36 คิดเป็นความต้องการน้ำเพื่อการอุตสาหกรรมประมาณ 1,187.71 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

ตารางที่ 4-34 อัตราการใช้ น้ำของโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภทตามขนาดกำลังของเครื่องจักร

ลำดับ	ประเภทของโรงงาน	ปริมาณการใช้น้ำ (ลบ.ม./วัน-แรงม้า)
1	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการบ่มใบชาหรือใบยาสูบ	NA
2	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับผลิตผลเกษตรกรรม	0.0817
3	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับหิน กรวด ทราย หรือดินสำหรับใช้ในการก่อสร้าง	0.0909
4	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับสัตว์ ซึ่งมีใช้สัตว์น้ำ	0.1378
5	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับน้ำมัน	0.0627
6	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับสัตว์น้ำ	0.0265
7	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับน้ำมันจากพืช หรือสัตว์ หรือไขมันจากสัตว์	0.0339
8	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับผัก พืช หรือผลไม้	0.0381
9	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเมล็ดพืช หรือหัวพืช	0.0557
10	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับอาหารจากแป้ง	0.0620
11	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับน้ำตาล ซึ่งทำจากอ้อย บีช หญ้าหวาน หรือพืชอื่นที่ให้ความหวาน	0.0100
12	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับชา กาแฟ โกโก้ ช็อกโกแลต หรือขนมหวาน	0.0117
13	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเครื่องปรุง หรือเครื่องประกอบอาหาร	0.3188
14	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการทำน้ำแข็ง หรือตัด ซอย บด หรือย่อน้ำแข็ง	0.0387
15	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับอาหารสัตว์	0.0121
16	โรงงานต้ม กลั่น หรือผสมสุรา	0.0037
17	โรงงานผลิตเอทิลแอลกอฮอล์ ซึ่งมีใช้เอทิลแอลกอฮอล์ที่ผลิตจากกากซัลไฟต์ในการทำเอือกระดาษ	NA
18	โรงงานทำหรือผสมสุราจากผลไม้ หรือสุราชนิดอื่น ๆ	NA
19	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับมอลต์ หรือเบียร์	0.0714
20	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับน้ำดื่ม เครื่องดื่มที่ไม่มีแอลกอฮอล์ น้ำอัดลม หรือน้ำแร่	0.0966
21	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับยาสูบ ยาอัด ยาเส้น ยาเคี้ยว หรือยานัตถ์	0.2126
22	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับสิ่งทอ ด้าย หรือเส้นใยซึ่งมีใยหิน (Asbestos)	0.0957
23	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์จากสิ่งทอ ซึ่งมีใช้เครื่องนึ่ง	0.0421
24	โรงงานถักผ้า ผ้าลูกไม้ หรือเครื่องนึ่งด้วยด้ายหรือเส้นใย หรือฟอกย้อมสี หรือแต่งสำเร็จผ้า ผ้าลูกไม้ หรือเครื่องนึ่งที่ถักด้วยด้ายหรือเส้นใย	0.1752hp+0.4714
25	โรงงานผลิตเส้น หรือพรมด้วยวิธีทอ สาน ถัก หรือผูกให้เป็นปุย ซึ่งมีใช้เส้นหรือพรมที่ทำด้วยยาง หรือพลาสติกหรือพรมน้ำมัน	0.0898
26	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเชือก ตาข่าย แห หรืออวน	0.0004
27	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีใช้ทำด้วยวิธีถัก หรือทอ	0.0743
28	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเครื่องแต่งกาย ซึ่งมีใช้รองเท้า	0.2136
29	โรงงานหมักแต่ง ข่าแหละ อบ ปนหรือบด ฟอก ขัดและแต่ง อัดให้เป็นลายนูน หรือเคลือบสีหนังสัตว์	0.1443
30	โรงงานสาบ ฟอก ฟอกสี ย้อมสี ขัดหรือแต่งขนสัตว์	
31	โรงงานทำพรม หรือเครื่องใช้จากหนังสัตว์หรือขนสัตว์	0.3207
32	โรงงานผลิตผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีใช้เครื่องแต่งกาย หรือรองเท้าจาก	0.2553
33	โรงงานผลิตรองเท้า หรือชิ้นส่วนของรองเท้า ซึ่งมีได้ทำจากไม้ ยางอบแข็ง ยางอัดเข้ารูป	0.2203
34	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับไม้	0.0264
35	โรงงานผลิตภาชนะบรรจุ หรือเครื่องใช้จากไม้ไผ่ หวาย ฟาง อ้อ กก หรือผักตบชวา	0.0771
36	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์จากไม้หรือไม้ก๊อก	0.0474
37	โรงงานทำเครื่องเรือนหรือเครื่องตกแต่งภายในอาคารจากไม้ แก้ว ยาง หรือโลหะอื่น	0.2004
38	โรงงานผลิตเยื่อ หรือกระดาษ	0.1760
39	โรงงานผลิตภาชนะบรรจุจากกระดาษทุกชนิดหรือแผ่นกระดาษไฟเบอร์ (Fibreboard)	0.0377
40	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเยื่อกระดาษ หรือกระดาษแข็ง	0.3271

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

ลำดับ	ประเภทของโรงงาน	ปริมาณการใช้น้ำ (ลบ.ม./วัน-แรงงาน)
41	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการพิมพ์ การทำแท้มือเก็บเอกสาร การเย็บเล่ม ทำปก	0.1040
42	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเคมีภัณฑ์ สารเคมี หรือวัสดุเคมี ซึ่งมีโซลูชัน	0.1722
43	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับปุ๋ย หรือสารป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticides)	0.2744
44	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการผลิตยางรถยนต์ ยางล้อรถจักรยานยนต์ พลาสติก หรือเส้นใย	0.3217
45	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับสี (Paints) น้ำมันชักเงา เซลแล็ก แล็กเกอร์ หรือผลิตภัณฑ์	0.0635
46	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับยา	0.1148
47	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับสบู่ เครื่องสำอาง หรือสิ่งปรุงแต่งร่างกาย	0.4790
48	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์เคมี	0.0229
49	โรงงานกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม	NA
50	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม ถ่านหิน หรือลิกไนต์	0.0934
51	โรงงานผลิต ซ่อม หล่อ หรือหล่อตอกภายนอกหรือภายในสำหรับยานพาหนะ	0.0027
52	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับยาง	0.0688
53	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์พลาสติก	0.6304
54	โรงงานผลิตแก้ว เส้นใยแก้ว หรือผลิตภัณฑ์แก้ว	0.0383
55	โรงงานผลิตภัณฑ์เครื่องกระเบื้องเคลือบ เครื่องปั้นดินเผา หรือเครื่องดินเผา	0.0404
56	โรงงานผลิตอิฐ กระเบื้อง หรือท่อสำหรับใช้ในการก่อสร้างเข้าหลอมโลหะ กระเบื้องประดับ	0.0471
57	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับซีเมนต์ ปูนขาว หรือปูนปลาสเตอร์	0.2936
58	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์โลหะ	0.0356
59	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการถลุง หลอม หล่อ รีด ดึง หรือผลิตเหล็ก หรือเหล็กกล้าในขั้นต้น	0.0113
60	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับถลุง ผสม ทำให้บริสุทธิ์ หลอม หล่อ รีด ดึง หรือผลิตโลหะในขั้นต้น	0.1354
61	โรงงานผลิต ตบแต่ง ตัดแปลง หรือซ่อมแซมเครื่องมือ หรือเครื่องใช้ที่ทำด้วยเหล็กหรือเหล็กกล้า	0.0219
62	โรงงานผลิต ตบแต่ง ตัดแปลง หรือซ่อมแซม เครื่องเรือนหรือเครื่องตกแต่งภายในอาคาร	0.0529
63	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์โลหะสำหรับการก่อสร้าง หรือติดตั้ง	0.0338
64	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์โลหะ	0.0409
65	โรงงานผลิต ประกอบ หรือตัดแปลง หรือซ่อมแซมเครื่องยนต์ เครื่องกังหัน	0.1428
66	โรงงานผลิต ประกอบ ตัดแปลง หรือซ่อมแซมเครื่องจักรสำหรับใช้ในการกลั่นหรือการเลี้ยงสัตว์	0.2935
67	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเครื่องจักร ส่วนประกอบสำหรับประดิษฐ์โลหะ หรือไม้	0.0234
68	โรงงานผลิต ประกอบ ตัดแปลง หรือซ่อมแซมเครื่องจักรสำหรับอุตสาหกรรมกระดาษ เคมี อาหาร	0.0346
69	โรงงานผลิต ประกอบ ตัดแปลง หรือซ่อมแซมเครื่องคำนวณ เครื่องทำบัญชี	0.1005
70	โรงงานผลิต ประกอบ ตัดแปลง หรือซ่อมแซมเครื่องสูบน้ำ เครื่องอัดอากาศหรือก๊าซ เครื่องเป่าลม	0.0485
71	โรงงานผลิต ประกอบ ตัดแปลง หรือซ่อมแซมเครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ เฉพาะที่ใช้ไฟฟ้า	0.1621
72	โรงงานผลิต ประกอบ ตัดแปลง หรือซ่อมแซมเครื่องรับวิทยุ เครื่องรับโทรทัศน์ เครื่องกระจายเสียง	0.1143
73	โรงงานผลิต ประกอบหรือตัดแปลงเครื่องมือหรือเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ไม่ได้ระบุไว้ในลำดับใด	0.0245
74	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับอุปกรณ์ไฟฟ้า	0.0252
75	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเรือ	0.0035
76	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับ รถไฟ รถรางไฟฟ้า หรือกระเช้าไฟฟ้า	
77	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับรถยนต์ หรือรถพ่วง	0.0618
78	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับจักรยานยนต์ จักรยานสามล้อ หรือจักรยานสองล้อ	0.0485
79	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับอากาศยาน หรือเรือไฮโดรคราฟท์	0.2309
80	โรงงานผลิต ประกอบ ตัดแปลง หรือซ่อมแซมล้อเลื่อนที่ขับเคลื่อนด้วยแรงคน หรือสัตว์	NA
81	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเครื่องมือ เครื่องใช้ หรืออุปกรณ์วิทยาศาสตร์ หรือการแพทย์	0.0642
82	โรงงานผลิตเครื่องมือ หรือเครื่องใช้เกี่ยวกับนันทนาการ หรือการวัดสายตา เลนส์ เครื่องมือ	0.1769
83	โรงงานผลิตหรือประกอบนาฬิกา เครื่องวัดเวลา หรือชิ้นส่วนของนาฬิกา หรือเครื่องวัดเวลา	0.0626
84	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับ เพชร พลอย ทอง เงิน นาก หรืออัญมณี	0.1601
85	โรงงานผลิตหรือประกอบเครื่องดนตรี และรวมถึงชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ของเครื่องดนตรี ดังกล่าว	NA

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเชิงบูรณาการ ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

ลำดับ	ประเภทของโรงงาน	ปริมาณการใช้น้ำ (ลบ.ม./วัน-แรงม้า)
86	โรงงานผลิตหรือประกอบเครื่องมือ หรือเครื่องใช้ในการกีฬา การบริหารร่างกาย	0.0720
87	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเครื่องเล่น เครื่องมือหรือเครื่องใช้ที่มีได้ระบุไว้ในลำดับอื่น	0.1454
88	โรงงานผลิตพลังงานไฟฟ้า	0.0000
89	โรงงานผลิตก๊าซ ซึ่งมีใช้ก๊าซธรรมชาติ ส่งหรือจำหน่ายก๊าซ	0.0071
90	โรงงานจัดหาน้ำ ทำน้ำให้บริสุทธิ์ หรือจำหน่ายน้ำไปยังอาคารหรือโรงงานอุตสาหกรรม	NA
91	โรงงานบรรจุสินค้าในภาชนะโดยไม่มีการผลิต	2.6641
92	โรงงานห้องเย็น	0.1069
93	โรงงานซ่อมรองเท้า หรือเครื่องหนัง	
94	โรงงานซ่อมเครื่องมือไฟฟ้า หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าสำหรับใช้ในบ้านหรือใช้ประจำตัว	NA
95	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับยานที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ รถพ่วง จักรยาน	0.1169
96	โรงงานซ่อมนาฬิกา เครื่องวัดเวลา หรือเครื่องประดับที่ทำด้วยเพชร พลอย ทองคำ ทองขาว เงิน	NA
97	โรงงานซ่อมผลิตภัณฑ์ที่มีได้ระบุการซ่อมไว้ในลำดับใด	0.3717
98	โรงงานซักรีด ซักแห้ง ซักฟอก รีด อัด หรือย้อมผ้าเครื่องนุ่งห่ม พรม หรือขนสัตว์	2.1048
99	โรงงานผลิต ซ่อมแซม ดัดแปลง หรือเปลี่ยนลักษณะอาวุธปืน เครื่องกระสุนปืน วัตถุระเบิด	NA
100	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการตกแต่งหรือเปลี่ยนแปลงลักษณะของผลิตภัณฑ์	0.0213
101	โรงงานปรับปรุงคุณภาพของเสียรวม (Central Waste Treatment Plant)	0.0081
102	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการผลิต และหรือจำหน่ายไอน้ำ (Steam Generating)	NA
103	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเกลือ	NA
104	โรงงานผลิต ประกอบ ดัดแปลง หรือซ่อมแซม หม้อไอน้ำ (Boiler) หรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลว	0.0455
105	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการคัดแยก หรือฝังกลบสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว	NA
106	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการนำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ไม่ใช้แล้ว หรือของเสีย	NA
107	โรงงานผลิตแผ่นซีดี ผลิตภัณฑ์ที่ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลเสียง หรือภาพในรูปอิเล็กทรอนิกส์	NA

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2563)

ตารางที่ 4-35 ความต้องการน้ำของโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบันของจังหวัดที่ใช้น้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยา

จังหวัด	จำนวนโรงงาน (แห่ง)	กำลังรวมของเครื่องจักร (แรงม้า)	ความต้องการน้ำ (ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี)
กรุงเทพมหานคร	2,552	2,713,643	93.44
นครสวรรค์	720	1,960,908	140.88
ชัยนาท	264	352,552	5.41
พระนครศรีอยุธยา	1,857	9,096,237	320.03
สิงห์บุรี	161	655,281	14.68
อ่างทอง	297	813,858	84.77
ปทุมธานี	2,912	5,035,646	528.49

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม (ข้อมูลเมื่อเดือนเมษายน พ.ศ. 2563)

ในการประมาณการความต้องการน้ำในอนาคตของภาคอุตสาหกรรมได้ประเมินจากอัตราการเติบโตของดัชนีผลผลิต (มูลค่าผลผลิต) ของสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม ซึ่งมูลค่าผลผลิตรายเดือนระหว่างปี พ.ศ. 2559-2562 แสดงดังรูปที่ 4-60 โดยมีอัตราการเติบโตของมูลค่าผลผลิตภาคอุตสาหกรรมเฉลี่ยอยู่ที่ 3.87% ดังนั้น ความต้องการน้ำเพื่ออุตสาหกรรมแต่ละช่วง 5 ปี ในอนาคตแสดงดังตารางที่ 4-36

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

ระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำที่โอกาสความน่าจะเป็น 90% พบว่า ได้ปริมาณน้ำรักษาสมดุลระบบนิเวศในลำน้ำบริเวณท้ายอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและสิริกิติ์เท่ากับ 39.23 และ 51.90 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยความต้องการน้ำเพื่อรักษาสมดุลระบบนิเวศในลำน้ำบริเวณท้ายอ่างเก็บน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 4-37

ตารางที่ 4-37 ความต้องการน้ำเพื่อการรักษาสมดุลระบบนิเวศด้านท้ายน้ำอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่

เขื่อน	น้ำไหลเข้าที่โอกาสความน่าจะเป็น 90% (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)	น้ำระบายออกที่โอกาสความน่าจะเป็น 90% (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)	ความต้องการน้ำรักษาสมดุลระบบนิเวศท้ายอ่างเก็บน้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
เขื่อนภูมิพล	7.10	39.23	39.23
เขื่อนสิริกิติ์	30.30	51.90	51.90
เขื่อนแควน้อย	4.20	–	4.20
เขื่อนป่าสัก	5.36	–	5.36
เขื่อนคลองโพธิ์	0.08	–	–
เขื่อนทับเสลา	0.00	–	0.00

ที่มา : กรมชลประทาน (2560)

(2) ความต้องการน้ำเพื่อการผลักดันน้ำเค็มพบว่า ในปัจจุบันกรมชลประทานได้วางแผนระบายน้ำเพื่อการผลักดันน้ำเค็มในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.–เม.ย.) เท่ากับ 1,600 ล้านลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วย

- เพื่อการผลักดันน้ำเค็มปากแม่น้ำเจ้าพระยา 600 ล้านลูกบาศก์เมตร หรือ 38.37 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
- เพื่อการผลักดันน้ำเค็มปากแม่น้ำท่าจีน 500 ล้านลูกบาศก์เมตร หรือ 31.97 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
- เพื่อการผลักดันน้ำเค็มในระบบคลองส่งน้ำ 500 ล้านลูกบาศก์เมตร หรือ 38.37 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) (2555) ได้อ้างอิงรายงานการศึกษาโครงการศึกษาเพื่อทำแผนหลักรองรับการพัฒนาแหล่งน้ำและปรับปรุงโครงการชลประทานสำหรับแผนฯ 9 ของกรมชลประทานในปี พ.ศ. 2546 พบว่า ได้พิจารณาปริมาณน้ำต่ำสุดจากโค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลา (Flow-Duration Curve) ของปริมาณน้ำท่ารายเดือนโดยพิจารณาที่ค่าปริมาณน้ำท่า 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการคำนวณตามเกณฑ์ดังกล่าว พบว่า ลุ่มน้ำเจ้าพระยามีค่าปริมาณน้ำต่ำสุดเพื่อรักษาระบบนิเวศบริเวณจุดออกของกลุ่มน้ำประมาณ 198.87 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อเดือน หรือคิดเป็น 2,386.41 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็น 75.67 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

4.2.4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อควบคุมสภาพลำน้ำและรักษาสมดุลระบบนิเวศท้ายเขื่อน

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเพื่อควบคุมสภาพลำน้ำและรักษาสมดุลระบบนิเวศท้ายเขื่อนภูมิพลและเขื่อนเจ้าพระยาโดยอาศัยกลุ่มวิธีทางอุทกวิทยา (Hydrological Method) ได้แก่ วิธีโค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลา (Flow-Duration Curve) และวิธี Tennant (Tennant Method) มาทำการวิเคราะห์ โดยหลักการแล้ว การคำนวณด้วยวิธีทางอุทกวิทยาต้องอาศัยข้อมูลอัตราการไหลของน้ำในลำน้ำ/แม่น้ำตามธรรมชาติที่ไม่ถูกควบคุมในอดีตรายวันระยะยาว (Long Term Data Set of

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

Unregulated Daily Flow) มาทำการวิเคราะห์ โดยมีความยาวไม่น้อยกว่า 20 ปี (Pastor et al., 2014) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์บนพื้นฐานข้อจำกัดของข้อมูลน้ำท่าของสถานีท้ายเขื่อนที่ถูกควบคุม โดยการระบายน้ำจำนวน 4 สถานีท้ายเขื่อนภูมิพลและจำนวน 1 สถานีท้ายเขื่อนเจ้าพระยา ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4-38

ตารางที่ 4-38 สถานีตรวจวัดน้ำท่าหลักที่นำมาทำการวิเคราะห์

รหัสสถานี	รายชื่อสถานีวัดน้ำท่า
ท้ายเขื่อนภูมิพล	
P.2A	บ้านเชียงเงิน อ.เมือง จ.ตาก
P.7A	บ้านห้วยยั้ง อ.เมือง จ.กำแพงเพชร
P.16	บ้านชาวนรูลักษณ์ อ.ชาวนรูลักษณ์ จ.กำแพงเพชร
P.17	บ้านท่าจิว อ.บรรพตพิสัย จ.นครสวรรค์
ท้ายเขื่อนเจ้าพระยา	
C.13	บ้านบางหลวง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

สำหรับรายละเอียดและหลักเกณฑ์ในการกำหนดค่าอัตราการไหลของน้ำที่แนะนำของทั้งสองวิธีมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

4.2.4.2.1 วิธีโค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลา (Flow-Duration Curve Method)

วิธีโค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลา (Flow-Duration Curve Method, FDC) เป็นหนึ่งในวิธีที่อาศัยข้อมูลอัตราการไหลในแม่น้ำที่แสดงขอบเขตของข้อมูลตั้งแต่ช่วงการไหลต่ำไปจนถึงช่วงการเกิดน้ำท่วมอย่างสมบูรณ์ที่สุด ในหลักการแล้ว วิธีโค้งอัตราการไหล-เวลานี้เป็นการวิเคราะห์การแจกแจงความถี่สะสมของข้อมูลอัตราการไหลเฉลี่ยรายวัน (Average Daily Discharge) ซึ่งแสดงเปอร์เซ็นต์ของเวลาที่อัตราการไหลในแม่น้ำใด ๆ มีค่าสูงกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด (รายวัน รายเดือน รายปี หรือตลอดช่วงเวลาที่บันทึก) โค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลาสามารถคำนวณได้โดยอาศัยข้อมูลระยะยาวซึ่งมีการบันทึกไว้นานกว่า 20 ปี

Q_{90} และ Q_{95} มักถูกนำไปใช้เป็นตัวชี้การไหลในช่วงปริมาณการไหลน้อย (Low Flow Indices) อีกทั้ง Q_{90} และ Q_{95} มีความคล้ายคลึงกับอัตราการไหลแบบ 7Q10 ด้วย นอกจากนี้ ยังพบอัตราการไหลที่แนะนำอยู่ที่ Q_{50} , Q_{75} , Q_{84} , Q_{96} , Q_{97} , Q_{98} และ Q_{99} ด้วยเช่นกัน

องค์การบริหารปลาและสัตว์ป่าแห่งสหรัฐอเมริกา (US Fish and Wildlife Service) ได้พัฒนาวิธีอัตราการไหลรายเดือนเฉลี่ย (Mean Monthly Flow Method, Q_{50}) ภายใต้สมมติฐานที่ว่าสภาพลำน้ำที่อัตราการไหลรายเดือนเฉลี่ยมีความเหมาะสมต่อความเป็นอยู่ของสิ่งมีชีวิตทางน้ำ ดังนั้น จึงได้ใช้ Q_{50} ในการกำหนดนโยบายการวางแผนและจัดการทรัพยากรน้ำเพื่อกำหนดปริมาณน้ำขั้นต่ำเพื่ออนุรักษ์ความหลากหลายทางชีวภาพทั้งพืชและสัตว์น้ำ ในขณะที่ Q_{50} ยังถูกแนะนำเพื่อกำหนดอัตราการไหลขั้นต่ำรายฤดูกาลโดยเฉพาะลำน้ำที่มีศักยภาพเชิงพลังงาน (Waterpower River)

มีการกำหนด Q_{90} เป็นตัวชี้การไหลในช่วงปริมาณการไหลน้อย และค่า Q_{90} รายเดือนยังมีคุณลักษณะค่อนข้างคงที่ดังนั้นจึงถูกนำมาใช้ในการกำหนดค่าอัตราการไหลขั้นต่ำสำหรับอนุรักษ์ความหลากหลายทางชีวภาพของพืชและสัตว์น้ำ นอกจากนี้ Q_{90} ยังนำมาใช้ตรวจสอบรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและช่วงเวลาในลำธารขนาดเล็กอีกด้วย และใช้เป็นเกณฑ์การเตือนภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงานเพื่อให้ทราบถึงระดับน้ำที่เข้าขั้นวิกฤต

โดยทั่วไปแล้ว Q_{95} เป็นดัชนีการไหลในช่วงปริมาณการไหลน้อยวิกฤตซึ่งนิยมใช้กับลำน้ำที่มีลักษณะการไหลต่ำมาก และค่า Q_{95} ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลอัตราการไหลรายเดือนเฉลี่ยยังถือเป็นดัชนีทางชีวภาพ (Biological Index) ที่นิยมใช้เพื่อควบคุมความผันแปรตามฤดูกาลทางธรรมชาติของการไหลในลำน้ำอีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้นวิธีนี้ยังนำมาใช้หาค่าตอบที่ดีที่สุดของการกำหนดเกณฑ์ปริมาณการไหลเพื่อสิ่งแวดล้อม (Pyrce, 2004)

อย่างไรก็ดี Smakhtin ในปี ค.ศ. 2004 และ Pastor และคณะในปี ค.ศ. 2014 ได้กำหนดให้ Q_{90} เป็นดัชนีการไหลในช่วงน้ำน้อย (Low Flow) และกำหนดให้ Q_{50} เป็นดัชนีการไหลในช่วงน้ำมาก (High Flow) ตามเงื่อนไขลักษณะการไหลทางอุทกวิทยาที่สรุปไว้ในตารางที่ 4-39 (Pastor et al., 2014)

ตารางที่ 4-39 อัตราการไหลที่แนะนำโดยวิธี FDC

เงื่อนไขลักษณะการไหลทางอุทกวิทยา (Hydrologic Flow Regime)		อัตราการไหลของน้ำที่แนะนำ (Flow Requirements)
อัตราการไหลน้อย (Low Flow)	$MMF \leq MAF$	Q_{90}
อัตราการไหลมาก (High Flow)	$MMF > MAF$	Q_{50}
อัตราการไหลปานกลาง (Intermediate Flow)	-	-

ที่มา : Pastor et al. (2014)

4.2.4.2.2 วิธี Tennant (Tennant Method)

วิธีทางอุทกวิทยาที่ใช้กันกว้างขวางที่สุดทั่วโลกคือวิธี Tennant ซึ่งเดิมเรียกว่า “วิธี Montana” เนื่องจากวิธีนี้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลจากรัฐมอนทาน่า (Mann, 2006) วิธีนี้ถูกนำไปใช้ในประเทศต่าง ๆ มากกว่า 25 ประเทศ ทั้งในรูปแบบดั้งเดิมและรูปแบบที่ได้รับการปรับปรุงแก้ไข (Bhattacharjee & Jha, 2014) โดยเป็นวิธีที่ใช้ทักษะเรื่องการวิเคราะห์อัตราการไหลที่ต้องการโดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลรายปีเฉลี่ย (Mean Annual Flow, MAF) ซึ่งไม่จำเป็นต้องเก็บข้อมูลมากนัก วิธีนี้ตั้งสมมติฐานว่าถ้าอัตราการไหลรายปีเฉลี่ยใกล้เคียงกัน สภาพที่อยู่อาศัยของสัตว์น้ำจะคล้ายคลึงกันด้วย

วิธีของ Tennant ได้กำหนดหลักเกณฑ์หรือเงื่อนไขลักษณะการไหลทางอุทกวิทยาที่ใช้หาค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมในรูปของค่าเปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลรายปีเฉลี่ยและยังเป็นวิธีที่สามารถปรับใช้ได้ง่าย (Mann, 2006) โดยแบ่งอัตราการไหลรายปีเฉลี่ยเป็น 2 ช่วงเวลาที่แตกต่างกันช่วงละ 6 เดือนตามช่วงเวลาที่อัตราการไหลสูงและต่ำซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแม่น้ำที่แตกต่างกัน (Pyrce, 2004) ข้อดีของการใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลรายปีเฉลี่ยคือ สามารถแสดงอัตราการไหลขั้นต่ำที่เหมาะสมในช่วงเวลาที่มีลักษณะการไหลต่ำ (ช่วงเดือนตุลาคม-เดือนมีนาคม) และในช่วงเวลาที่มีลักษณะการไหลสูง (ช่วงเดือนเมษายน-เดือนกันยายน) (Caissie & El-Jabi, 1995) นอกจากนี้ Pastor et al. (2014) ยังได้สรุปเงื่อนไขลักษณะการไหลทางอุทกวิทยาในช่วงน้ำน้อย (Low Flow) และช่วงน้ำมาก (High Flow) เพื่อกำหนดความต้องการน้ำเพื่อควบคุมสภาพลำน้ำ (Flow Requirements) ดังแสดงในตารางที่ 4-40

อย่างไรก็ดี วิธี Tennant ประเมินการปริมาณน้ำทำเพื่อควบคุมสภาพลำน้ำตามอัตราการไหลเฉลี่ยรายปีโดยไม่คำนึงถึงความแปรปรวนของอัตราการไหลที่แตกต่างกันรายเดือนในรอบปี วิธีนี้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับพื้นที่กระแสน้ำเขตอบอุ่น ดังนั้น จึงจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนให้เหมาะกับสภาพพื้นที่อื่น ๆ หากนำวิธี Tennant ไปประยุกต์ใช้ (Bhattacharjee & Jha, 2014)

ตารางที่ 4-40 อัตราการไหลที่แนะนำโดยวิธี Tennant

ลักษณะการไหล	เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลที่แนะนำ (% MAF)	
	ตุลาคม-มีนาคม	เมษายน-กันยายน
ไหลทะเล็ก หรือมากที่สุด	200	200
ช่วงที่เหมาะสม	60-100	60-100
โดดเด่น	40	60
ยอดเยี่ยม	30	50
ดี	20	40
ปานกลาง	10	30
แย่น้อยที่สุด	10	10
ลดต่ำลงอย่างรุนแรง	<10	<10
เงื่อนไขลักษณะการไหลทางอุทกวิทยา (Hydrologic Flow Regime)		อัตราการไหลที่แนะนำ (Flow Requirements)
อัตราการไหลน้อย (Low Flow)	MMF \leq MAF	20% MAF
อัตราการไหลมาก (High Flow)	MMF $>$ MAF	40% MAF
อัตราการไหลปานกลาง (Intermediate Flow)	-	-

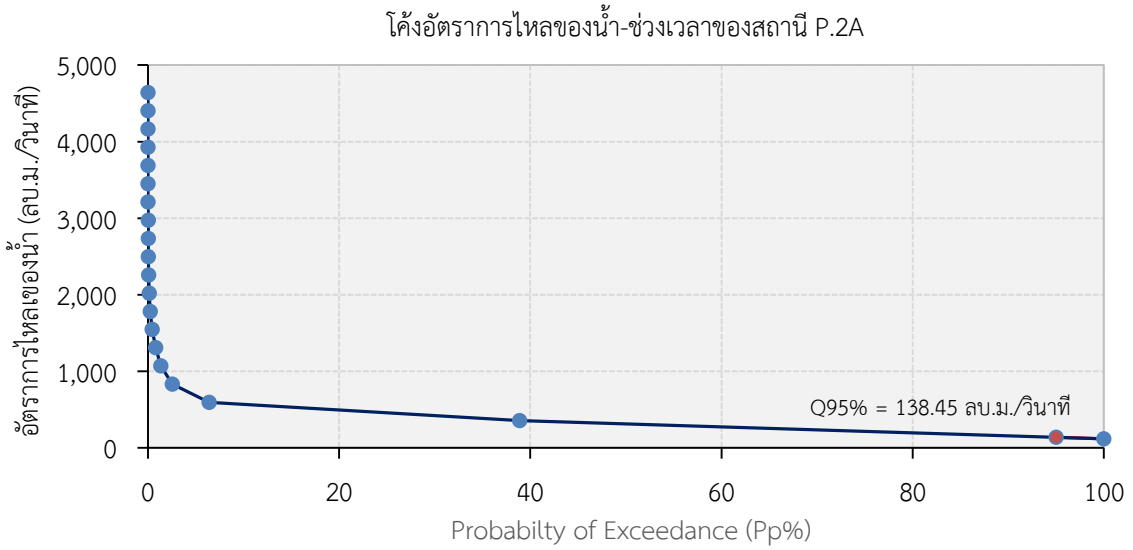
หมายเหตุ : MMF, Mean Monthly Flow = อัตราการไหลของน้ำรายเดือนเฉลี่ย, และ MAF, Mean Annual Flow = อัตราการไหลของน้ำรายปีเฉลี่ย (Pastor et al., 2014)

สำหรับผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อควบคุมสภาพลำน้ำและรักษาสมดุลระบบนิเวศได้พิจารณาอัตราการไหลของน้ำที่แนะนำที่ค่าโอกาสความน่าจะเป็น 95% ด้วยวิธีโค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลา และวิธี Tennant คิดที่ 40% ของอัตราการไหลของน้ำรายปีเฉลี่ยในช่วงฤดูแล้ง (พฤศจิกายน-เมษายน) และ 20% ของอัตราการไหลของน้ำรายปีเฉลี่ยในช่วงฤดูฝน (พฤษภาคม-ตุลาคม) ผลการประมาณการได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-41 และรูปที่ 4-61 ถึงรูปที่ 4-65

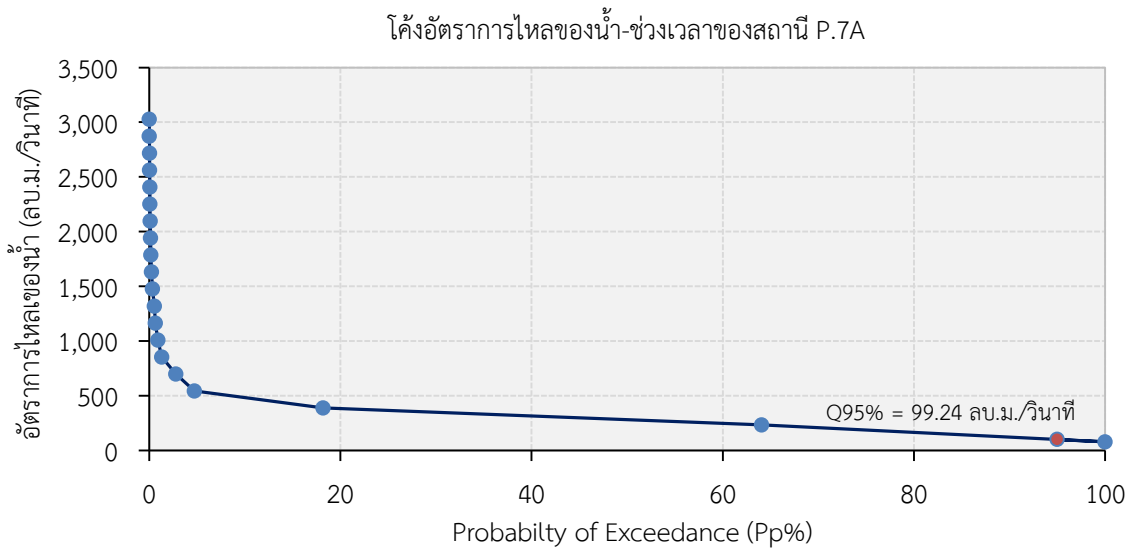
ตารางที่ 4-41 ผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อควบคุมสภาพลำน้ำและรักษาสมดุลระบบนิเวศท้ายเขื่อนภูมิพลและเขื่อนเจ้าพระยา

รหัสสถานี	อัตราการไหลของน้ำที่แนะนำ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)		
	โค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลา, Q _{95%}	วิธี Tennant	
		ฤดูแล้ง, 40%MAF	ฤดูฝน, 20%MAF
ท้ายเขื่อนภูมิพล			
P.2A	138.45	93.96	46.98
P.7A	99.24	93.59	46.80
P.16	91.01	96.53	48.26
P.17	82.22	104.64	52.32
ท้ายเขื่อนเจ้าพระยา			
C.13	130.92	189.76	94.88

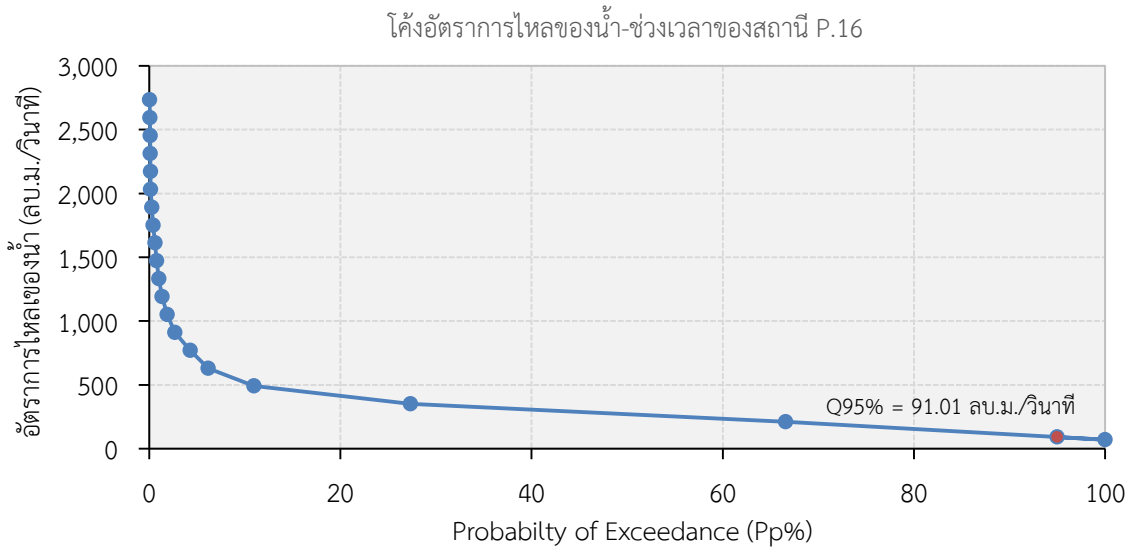
4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562



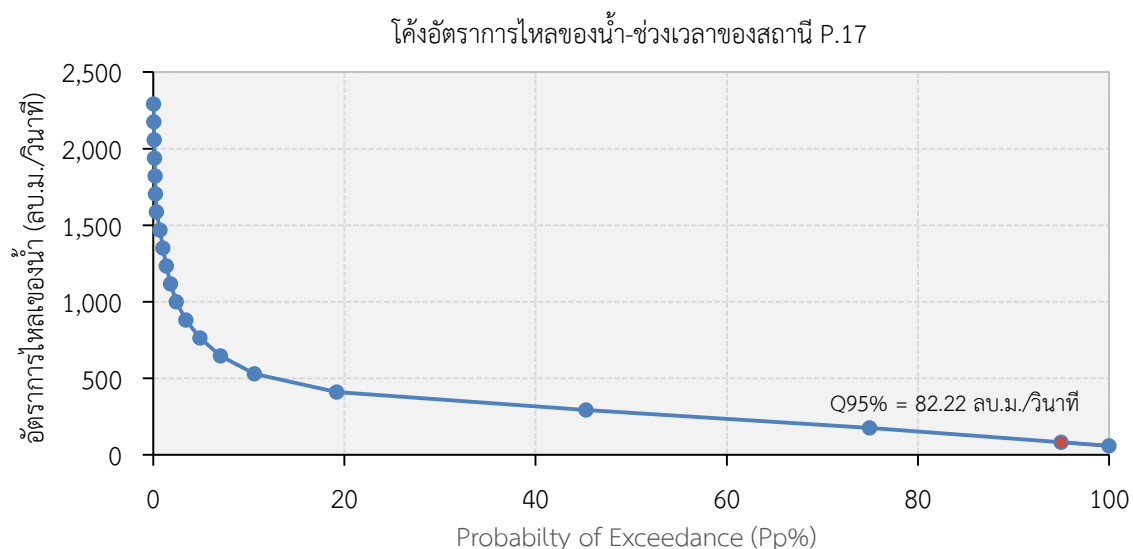
รูปที่ 4-61 โค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลาของสถานี P.2A ท้ายเขื่อนภูมิพล



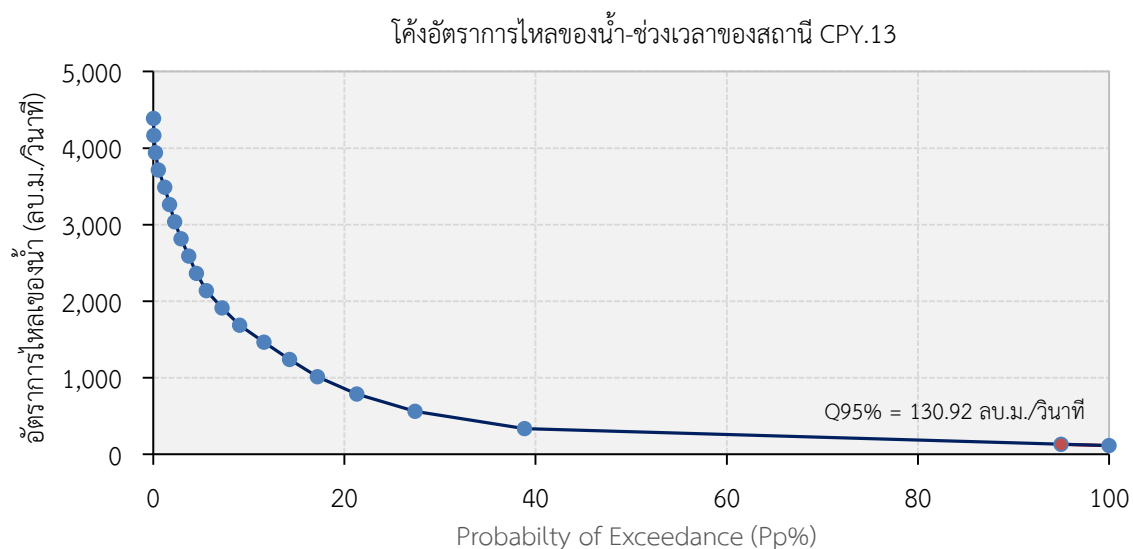
รูปที่ 4-62 โค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลาของสถานี P.7A ท้ายเขื่อนภูมิพล



รูปที่ 4-63 โค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลาของสถานี P.16 ท้ายเขื่อนภูมิพล



รูปที่ 4-64 โค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลาของสถานี P.17 ท้ายเขื่อนภูมิพล



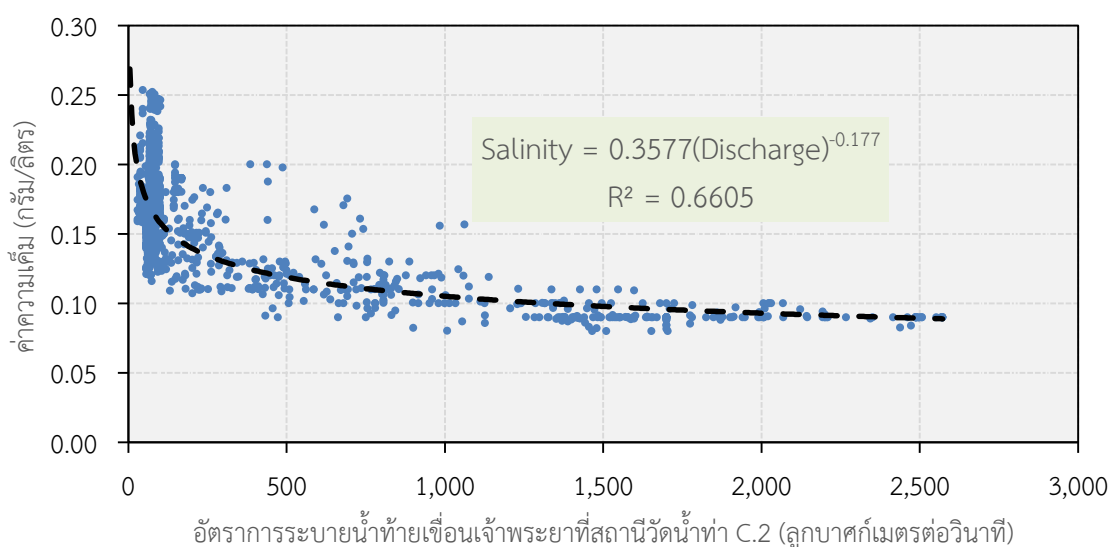
รูปที่ 4-65 โค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลาของสถานี C.13 ท้ายเจ้าพระยา

จากการผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อควบคุมสภาพลำนํ้าและรักษาสมดุลระบบนิเวศท้ายเขื่อนภูมิพลและเขื่อนเจ้าพระยาพบว่า มีความแตกต่างจากผลการทบทวนวรรณกรรมเนื่องจากปัจจัยของข้อมูลนำเข้าและช่วงข้อมูลที่น่ามาใช้วิเคราะห์ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลอัตราการไหลของน้ำที่มีการควบคุมจากตัวเขื่อน (Regulated Flow) โดยตรงหรือไม่ได้มีลักษณะเป็นอัตราการไหลของน้ำตามธรรมชาติ (Natural Flow) เดิมที่สามารถอธิบายคุณลักษณะความสมดุลของระบบนิเวศได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม อัตราการไหลของน้ำที่แนะนำเพื่อควบคุมสภาพลำนํ้าและรักษาสมดุลระบบนิเวศท้ายเขื่อนภูมิพลอยู่ในช่วงตั้งแต่ 82.22–138.45 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และท้ายเขื่อนเจ้าพระยาอยู่ในช่วงตั้งแต่ 130.92–189.76 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

นอกจากนี้ การศึกษาความต้องการน้ำเพื่อควบคุมสภาพลำนํ้าและรักษาระบบนิเวศท้ายเขื่อนเพื่อกำหนดค่าอัตราการระบายน้ำจากเขื่อนที่เหมาะสมให้ครอบคลุมปัจจัยปัญหาการรुक้าของน้ำเค็มนั้น ในงานวิจัยนี้ยังได้พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระบายน้ำรายวันท้ายเขื่อนเจ้าพระยา (C.13) กับค่าความเค็ม (Salinity) ราย

10 นาทีที่สถานีสูบน้ำสำแล (S1) ของการประปานครหลวง ซึ่งเป็นสถานีสูบน้ำดิบเพื่อใช้ผลิตน้ำประปาสำหรับกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยมีเกณฑ์เฝ้าระวังอยู่ที่ 0.25 กรัมต่อลิตร (มาตรฐานเพื่อการผลิตน้ำประปาไม่เกิน 0.50 กรัมต่อลิตร) โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระบายน้ำท้ายเขื่อนเจ้าพระยากับความเค็มของสถานีสูบน้ำสำแลได้อาศัยข้อมูลระหว่างวันที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2557 ถึงวันที่ 2 เมษายน พ.ศ. 2561 และทำการคัดเลือกข้อมูลในช่วงที่มีค่าความเค็มไม่เกิน 0.25 กรัมต่อลิตร และตัดข้อมูลส่วนที่มีค่าความเค็มเท่ากับ 0 ออก เพื่อนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในรูปสมการการถดถอยทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย (Regression Equation) และได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค็มที่สถานีสูบน้ำสำแลกับอัตราการระบายน้ำท้ายเขื่อนเจ้าพระยาในรูปเลขยกกำลังดังแสดงในรูปที่ 4-66 และสมการที่ 4-2 โดยให้ค่า $R^2 = 0.6605$ โดยผลการวิเคราะห์พบว่า ที่ค่าความเค็ม 0.25 กรัมต่อลิตร อัตราการระบายน้ำเฉลี่ยท้ายเขื่อนเจ้าพระยาที่สถานีตรวจวัดน้ำท่า C.13 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 78 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าปริมาณน้ำต่ำสุดเพื่อรักษาระบบนิเวศบริเวณจุดออกของกลุ่มน้ำเจ้าพระยาที่สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำได้ศึกษาไว้ที่มีค่าเท่ากับ 75.67 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน), 2555)

$$\text{ค่าความเค็ม} = 0.3574 (\text{อัตราการระบายน้ำท้ายเขื่อนเจ้าพระยา})^{-1.77} \text{-----(4-2)}$$



รูปที่ 4-66 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค็มที่สถานีสูบน้ำสำแลกับอัตราการระบายน้ำท้ายเขื่อนเจ้าพระยา

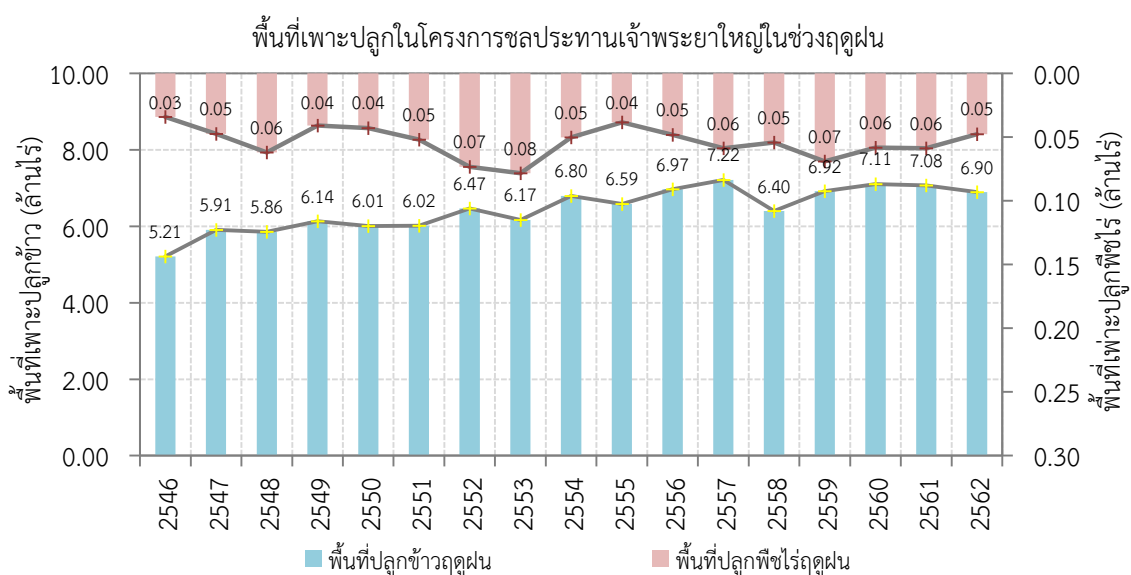
4.2.5 ผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำทั้งหมดในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

งานวิจัยนี้ยังได้ทำการคำนวณปริมาณความต้องการน้ำทั้งหมดในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ซึ่งประกอบด้วยความต้องการน้ำใน 4 กิจกรรมหลักตามที่กล่าวมาข้างต้นในลุ่มน้ำปิงตอนล่าง ลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน และลุ่มน้ำน่านตอนล่าง ซึ่งประกอบไปด้วย 5 โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาได้แก่ (1) โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพลาญชุมพล (2) โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาตงเศรษฐี (3) โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาท่าบัว (4) โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษานเรศวร และ (5) โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษายมน่านโดยพื้นที่เพาะปลูกในฤดูฝนและฤดูแล้งในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2562 แสดงในตารางที่ 4-42 รูปที่ 4-67 ถึงรูปที่ 4-69 และผลการคำนวณปริมาณความต้องการน้ำทั้งหมดในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่แสดงในตารางที่ 4-43 และรูปที่ 4-70

ตารางที่ 4-42 พื้นที่เพาะปลูกในฤดูฝนและฤดูแล้งในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

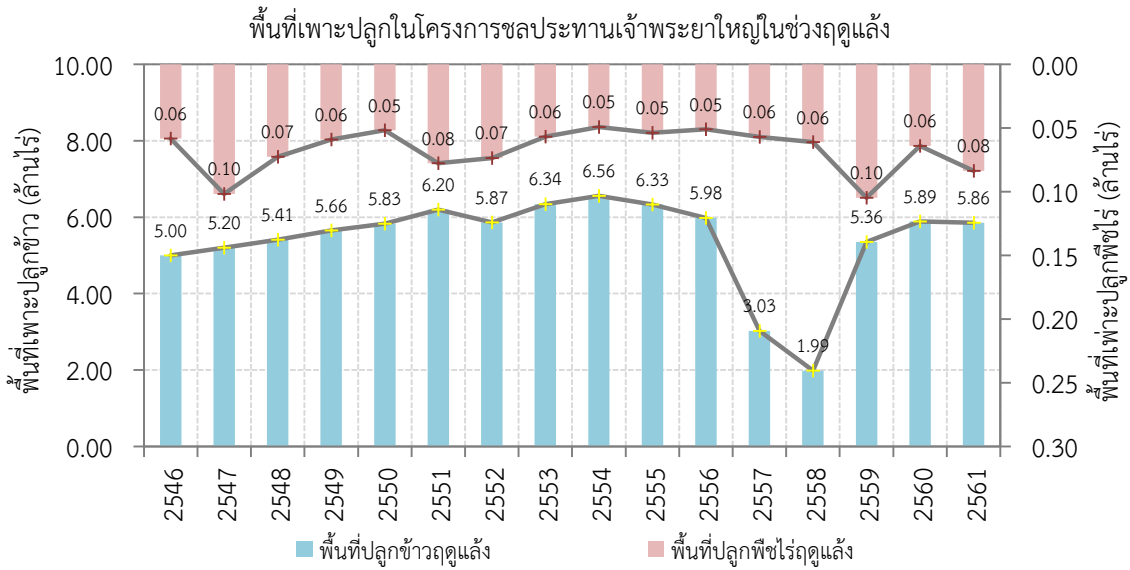
ปี พ.ศ.	พื้นที่เพาะปลูกฤดูฝน (ไร่)		พื้นที่เพาะปลูกฤดูแล้ง (ไร่)	
	ข้าว	พืชไร่	ข้าว	พืชไร่
2543	5,209,469 ^{1/}	34,100 ^{1/}	5,003,704 ^{1/}	58,172 ^{1/}
2544	5,209,469 ^{1/}	34,100 ^{1/}	5,003,704 ^{1/}	58,172 ^{1/}
2545	5,209,469 ^{1/}	34,100 ^{1/}	5,003,704 ^{1/}	58,172 ^{1/}
2546	5,209,469	34,100	5,003,704	58,172
2547	5,910,607	47,375	5,197,947	101,744
2548	5,857,604	61,859	5,407,916	72,667
2549	6,136,701	40,803	5,655,131	59,050
2550	6,010,332	42,751	5,829,481	51,809
2551	6,017,442	52,014	6,197,740	77,640
2552	6,469,918	73,364	5,866,062	73,543
2553	6,165,885	78,360	6,343,838	56,802
2554	6,797,632	50,081	6,559,112	49,108
2555	6,586,505	38,226	6,333,594	53,704
2556	6,968,800	48,229	5,980,154	50,945
2557	7,216,508	58,700	3,026,273	56,964
2558	6,398,561	54,150	1,986,637	61,160
2559	6,923,591	68,884	5,356,276	104,737
2560	7,107,729	58,176	5,890,594	64,167
2561	7,076,037	58,709	5,859,107	83,591
2562	6,896,705	47,506		

หมายเหตุ : ^{1/} ทำการต่อเติมข้อมูลใหม่โดยอ้างอิงข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกในปี พ.ศ. 2546



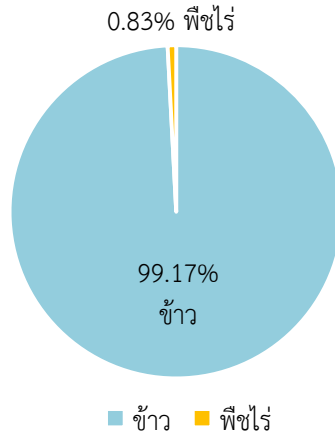
รูปที่ 4-67 พื้นที่เพาะปลูกในโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ในช่วงฤดูฝน

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเขื่อนภูมิพล ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

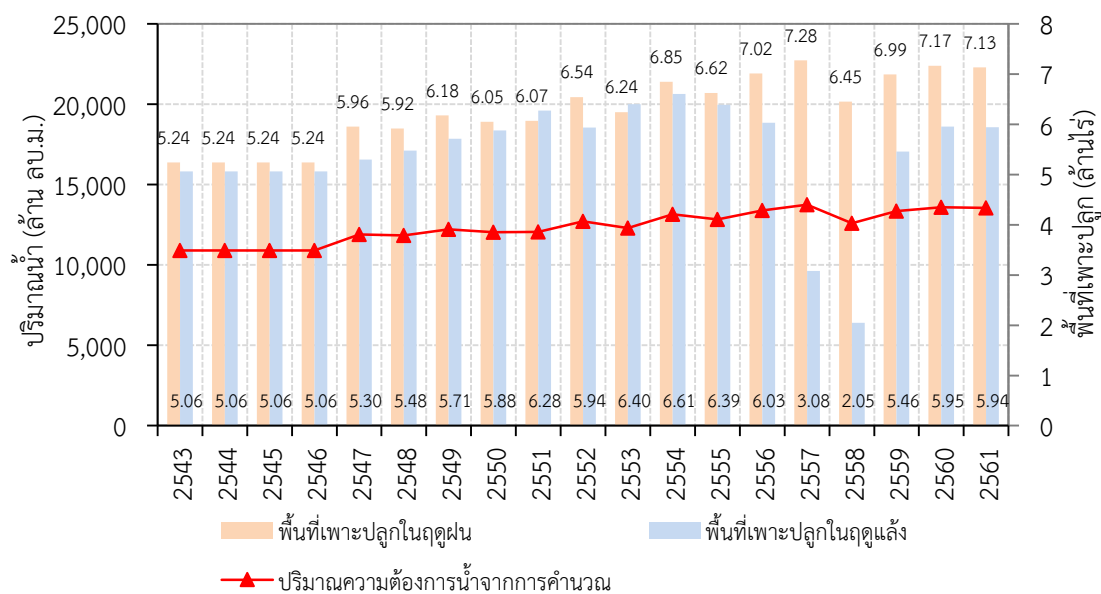


รูปที่ 4-68 พื้นที่เพาะปลูกในโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ในช่วงฤดูแล้ง

เปอร์เซ็นต์สัดส่วนพื้นที่เพาะปลูกข้าวและพืชไร่ของโครงการเจ้าพระยาใหญ่



รูปที่ 4-69 สัดส่วนพื้นที่เพาะปลูกข้าวและพืชไร่ในโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่



รูปที่ 4-70 พื้นที่เพาะปลูกและปริมาณความต้องการน้ำในโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่

ตารางที่ 4-43 ผลการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำทั้งหมดในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

ปี พ.ศ.	ปริมาณความต้องการน้ำ (ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี)				
	การเกษตรกรรม ^{1/}	การอุปโภคบริโภคและการท่องเที่ยว ^{2/}	การอุตสาหกรรม ^{2/}	การควบคุมสภาพลำน้ำและรักษาสมดุลระบบนิเวศท้ายเขื่อน ^{2/}	รวม
2543	7,347.57	236.42	931.95	2,386.41	10,902.35
2544	7,347.57	237.42	931.95	2,386.41	10,903.35
2545	7,347.57	238.42	931.95	2,386.41	10,904.35
2546	7,347.57	239.42	931.95	2,386.41	10,905.35
2547	8,343.88	240.42	931.95	2,386.41	11,902.66
2548	8,290.16	241.42	931.95	2,386.41	11,849.94
2549	8,650.02	242.42	931.95	2,386.41	12,210.80
2550	8,476.51	243.42	931.95	2,386.41	12,038.29
2551	8,499.34	244.42	931.95	2,386.41	12,062.12
2552	9,160.13	245.42	931.95	2,386.41	12,723.91
2553	8,743.10	246.42	931.95	2,386.41	12,307.88
2554	9,584.69	247.42	931.95	2,386.41	13,150.47
2555	9,273.72	248.42	931.95	2,386.41	12,840.50
2556	9,820.81	249.42	931.95	2,386.41	13,388.59
2557	10,180.87	250.42	931.95	2,386.41	13,749.65
2558	9,033.82	251.42	931.95	2,386.41	12,603.60
2559	9,786.57	252.42	931.95	2,386.41	13,357.35

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

ปี พ.ศ.	ปริมาณความต้องการน้ำ (ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี)				
	การเกษตรกรรม ^{1/}	การอุปโภคบริโภคและการท่องเที่ยว ^{2/}	การอุตสาหกรรม ^{2/}	การควบคุมสภาพลำน้ำและรักษาสมดุลระบบนิเวศท้ายเขื่อน ^{2/}	รวม
2560	10,028.43	253.42	931.95	2,386.41	13,600.21
2561	9,984.98	254.42	931.95	2,386.41	13,557.76
2562	9,719.26	255.42	931.95	2,386.41	13,293.04

หมายเหตุ : ^{1/}ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรม = ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานและปศุสัตว์

^{2/}จากรายงานที่ศึกษาไว้โดยสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) (2555)

4.2.6 ผลการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณความต้องการน้ำกับรายงานผลการศึกษาที่ผ่านมา

ในช่วงเวลาที่ผ่านมา ได้มีงานศึกษาด้านทรัพยากรน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาเป็นจำนวนมาก แต่ในระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2552–2561) มีงานศึกษาด้านทรัพยากรน้ำที่ครอบคลุมพื้นที่ของงานวิจัยนี้อยู่ 2 โครงการ คือ (1) การดำเนินการด้านการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล โครงการพัฒนาระบบคลังข้อมูล 25 ลุ่มน้ำและแบบจำลองน้ำท่วมน้ำแล้ง (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน), 2555) และ (2) โครงการศึกษาความมั่นคงของลุ่มน้ำอย่างยั่งยืนทั้ง 25 ลุ่มน้ำ (กรมทรัพยากรน้ำ, 2559) ซึ่งในการศึกษาของทั้ง 2 โครงการได้มีการประเมินความต้องการน้ำของภาคการใช้น้ำต่าง ๆ ในลุ่มน้ำเจ้าพระยาสรุปได้ดังนี้

(1) โครงการพัฒนาระบบคลังข้อมูล 25 ลุ่มน้ำและแบบจำลองน้ำท่วมน้ำแล้ง ลุ่มน้ำเจ้าพระยา ได้ทำการประเมินความต้องการใช้น้ำของกิจกรรมการใช้น้ำต่าง ๆ ดังนี้

–น้ำใช้เพื่อการอุปโภคบริโภคและการท่องเที่ยว ทำการรวบรวมและทบทวนข้อมูลประจำปี พ.ศ. 2551 จากเว็บไซต์ของการประปาส่วนภูมิภาค โดยประเมินจากความต้องการน้ำดิบรวมของสำนักงานประปา 16 แห่งในลุ่มน้ำเจ้าพระยามีค่าเท่ากับ 236.42 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

–น้ำใช้เพื่อการเกษตรกรรม ทำการศึกษาและจำลองความต้องการน้ำโดยแยกเป็น (1) พื้นที่ในเขตชลประทาน วิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง WUSMO ด้วยค่าประสิทธิภาพการชลประทานเท่ากับ 55% และ (2) พื้นที่นอกเขตชลประทาน ใช้แบบจำลอง SWAT พบว่า ในปี พ.ศ. 2546 มีความต้องการน้ำชลประทาน 7,787.60 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

–น้ำใช้เพื่อการอุตสาหกรรม พิจารณาความต้องการน้ำที่แตกต่างกันของอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ 10 ประเภท ตามขนาดพื้นที่ของอุตสาหกรรมแต่ละประเภท โดยข้อมูลโรงงานอุตสาหกรรมใช้ฐานข้อมูลจากทะเบียนโรงงานอุตสาหกรรมของกรมโรงงานอุตสาหกรรมพบว่า ในปี พ.ศ. 2547 มีความต้องการน้ำเพื่ออุตสาหกรรม 931.95 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

–น้ำเพื่อการปศุสัตว์ ใช้ข้อมูลประเภทและจำนวนปศุสัตว์จากข้อมูล กชช2ค ปี พ.ศ. 2552 นำมาวิเคราะห์กับอัตราการใช้น้ำต่อตัวต่อวันของสัตว์แต่ละประเภท ได้ความต้องการน้ำเพื่อการปศุสัตว์เท่ากับ 34.96 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

–น้ำใช้เพื่อการรักษาระบบนิเวศท้ายน้ำ ได้จากการคำนวณตามเกณฑ์ในรายงานการศึกษาโครงการศึกษาเพื่อทำแผนหลักรองรับการพัฒนาแหล่งน้ำและปรับปรุงโครงการชลประทานสำหรับแผนฯ 9 (กรมชลประทาน, 2546) ซึ่งพิจารณาปริมาณน้ำต่ำสุดจากโค้งอัตราการไหลของน้ำ–ช่วงเวลา (Flow–Duration

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

Curve) ของปริมาณน้ำท่ารายเดือนโดยพิจารณาที่ค่าปริมาณน้ำท่า 90% ได้ค่าปริมาณน้ำต่ำสุดเพื่อรักษา ระบบนิเวศบริเวณจุดออกของกลุ่มน้ำเจ้าพระยาประมาณ 2,386.41 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

(2) โครงการศึกษาความมั่นคงของกลุ่มน้ำอย่างยั่งยืนทั้ง 25 กลุ่มน้ำ ได้ทำการประเมินความต้องการน้ำ ของภาคการใช้ต่าง ๆ โดยมีหลักการในการวิเคราะห์ดังนี้

-ความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคและการท่องเที่ยว ในการศึกษาพิจารณาว่าอัตราความต้องการใช้น้ำในแต่ละพื้นที่มีความแตกต่างกันเป็นอย่างมากจากรูปแบบของกิจกรรมการใช้ที่แตกต่างกัน ความไม่แน่นอนของข้อมูลในบางประเด็น ดังนั้น การประเมินความต้องการน้ำด้านอุปโภคบริโภคได้ดำเนินการ โดยแยกประชากรรายตำบลออกเป็นกลุ่มตามการใช้จากระบบประปาในรูปแบบต่าง ๆ รวมถึงในส่วนที่ไม่สามารถใช้น้ำจากระบบประปาได้ จากนั้นนำมาคูณด้วยอัตราการใช้ต่อประชากรของระบบประปาในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งมีความแตกต่างกัน ส่วนการประเมินปริมาณการใช้น้ำเพื่อการท่องเที่ยวพิจารณาเฉพาะ โรงแรม/ที่พักที่อยู่นอกเขตพื้นที่การให้บริการของการประปาส่วนนครหลวงและการประปาส่วนภูมิภาคเท่านั้น สำหรับการประเมินปริมาณความต้องการใช้น้ำในอนาคตได้ประเมินปริมาณความต้องการใช้น้ำที่เพิ่มขึ้นทั้ง จากในส่วนของเปลี่ยนแปลงจำนวนประชากร นักท่องเที่ยว และการขยายความสามารถในการให้บริการ ของระบบประปาขนาดใหญ่ (การประปาส่วนภูมิภาค) ที่จะขยายเข้ามาทดแทนระบบประปาขนาดเล็ก (ประปาหมู่บ้าน) ในพื้นที่ชุมชนหลัก และพื้นที่ที่มีศักยภาพในการพัฒนาได้ว่า ความต้องการใช้น้ำเพื่อการ อุปโภคบริโภคและการท่องเที่ยวในปี พ.ศ. 2558 เท่ากับ 1,428.79 ล้านลูกบาศก์เมตร ในปี พ.ศ. 2568 และ 2578 จะเท่ากับ 1,625.57 และ 1,862.68 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

-ความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุตสาหกรรม การประเมินปริมาณความต้องการใช้น้ำเพื่อการ อุตสาหกรรม ทั้งในส่วนของอุตสาหกรรมที่เป็นกลุ่มก้อน และอุตสาหกรรมที่ตั้งอยู่กระจัดกระจายประเมินจาก พื้นที่ประกอบการอุตสาหกรรม/ขนาดกำลังการผลิต (แรงม้า) คูณด้วยอัตราการใช้ และกำหนดจำนวนวัน ทำงานของแต่ละอุตสาหกรรมเท่ากับ 350 วันต่อปี โดยเป็นวันหยุดเพื่อซ่อมแซมและบำรุงรักษาอุปกรณ์ 15 วันต่อปี ส่วนความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุตสาหกรรมใน 20 ปีข้างหน้าได้ศึกษาการเพิ่มขึ้นของโรงงาน อุตสาหกรรมมาประเมินร่วมกับอัตราความต้องการใช้น้ำของโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภทพบว่า ความ ต้องการใช้น้ำเพื่อการอุตสาหกรรมในปี พ.ศ. 2558 เท่ากับ 442.97 ล้านลูกบาศก์เมตร ในปี พ.ศ. 2568 และ 2578 จะเท่ากับ 557.55 และ 705.94 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

-ความต้องการใช้น้ำเพื่อการเกษตร เป็นการประเมินความต้องการน้ำชลประทานทั้งในและนอกเขต ชลประทานสำหรับพื้นที่เกษตรกรรมตามข้อมูลแผนที่การใช้ที่ดินในช่วงปี พ.ศ. 2552-2553 โดยคำนวณหา ศักยภาพการคายระเหยของพืช (Potential Evapotranspiration) ด้วยสมการของ Penman Monteith ค่า Cropping Intensity ของนาข้าวในเขตชลประทานเท่ากับ 1.25 ส่วนนอกเขตชลประทานไม่มีการปลูกข้าวใน ฤดูแล้ง แต่ในการศึกษายังไม่กำหนดค่าประสิทธิภาพการชลประทาน ได้ความต้องการน้ำชลประทานทั้งในและ นอกเขตชลประทานในปี พ.ศ. 2556 เท่ากับ 2,764 และ 3,591 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

-ปริมาณน้ำรักษาระบบนิเวศและการควบคุมความเค็ม ในงานศึกษานี้กำหนดว่ากลุ่มน้ำเจ้าพระยาซึ่ง อยู่ในกลุ่มน้ำภาคกลางไม่มีปริมาณการไหลออกสำหรับในส่วนของ Committed Outflow และ Navigation Flow แต่สำหรับปริมาณน้ำเพื่อรักษาระบบนิเวศ (Environmental Flow) นั้น สามารถประเมิน โดยการนำปริมาณน้ำท่าที่ไหลออกด้านท้ายน้ำ (Outflow) รายเดือนที่ประเมินได้โดยแบบจำลอง FLEXTopo ของทุกโดเมนย่อยที่พิจารณาจัดทำโค้งอัตราการไหลของน้ำ-ช่วงเวลาเพื่อวิเคราะห์ปริมาณการไหลที่มีความ เป็นไปได้ของการเกิดมากกว่าหรือเท่ากับ 90% ดังนั้น ปริมาณน้ำเพื่อรักษาระบบนิเวศได้จากซึ่งขั้นตอนการ จัดทำบัญชีน้ำของกลุ่มน้ำเจ้าพระยาเท่ากับ 3,156.12 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

สรุปเปรียบเทียบผลการศึกษารองของทั้งสองโครงการกับงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 4-44

ตารางที่ 4-44 เปรียบเทียบปริมาณความต้องการน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา

แหล่งข้อมูล	ปริมาณความต้องการน้ำ (ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี)			
	การอุปโภคบริโภคและการท่องเที่ยว	การอุตสาหกรรม	การเกษตรกรรม	ระบบนิเวศ
โครงการพัฒนาระบบคลังข้อมูล 25 ลุ่มน้ำ (สสน., 2555)	236.42 (พ.ศ. 2551)	931.95 (พ.ศ. 2547)	7,787.60 (พ.ศ. 2546)	2,386.41
โครงการศึกษาความมั่นคงของกลุ่มน้ำอย่างยั่งยืนทั้ง 25 ลุ่มน้ำ (กรมทรัพยากรน้ำ, 2559)	1,428.79 (พ.ศ. 2558)	442.97 (พ.ศ. 2558)	6,355 (พ.ศ. 2556)	3,156.12
งานวิจัยที่ดำเนินการ (สกสว., 2563)	518.31 (พ.ศ. 2561)	1,187.71 (พ.ศ. 2561)	9,984.98 (พ.ศ. 2561)	4,128.69

จะเห็นได้ว่า ผลการประเมินความต้องการน้ำในบางภาคการใช้น้ำมีความแตกต่างกัน ได้แก่ การอุปโภคบริโภคและการท่องเที่ยว และการอุตสาหกรรม เนื่องจากมีการกำหนดเงื่อนไขในการศึกษาที่แตกต่างกัน เช่น อัตราการใช้น้ำของประชากรในแต่ละพื้นที่ ขอบเขตการใช้น้ำจากแหล่งน้ำต่าง ๆ หรือการประเมินการใช้น้ำของโรงงานตามขนาดกำลังเครื่องจักรหรือขนาดของพื้นที่โรงงาน เป็นต้น แต่ในส่วนของ การใช้น้ำของภาคการใช้น้ำเพื่อการเกษตรกรรม และรักษาระบบนิเวศ จะมีแนวโน้มความต้องการน้ำไปในแนวทางเดียวกัน เนื่องจากใช้หลักเกณฑ์ในการวิเคราะห์เหมือนกัน คือ การประเมินความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรกรรมจะใช้สมการของ Penman-Monteith และสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่ศึกษาไว้โดยกรมชลประทาน แต่ในงานศึกษาความมั่นคงของกลุ่มน้ำอย่างยั่งยืนทั้ง 25 ลุ่มน้ำยังไม่ได้ประเมินค่าประสิทธิภาพการชลประทาน ทำให้ปริมาณความต้องการน้ำต่ำกว่าการศึกษาอื่น และการประเมินความต้องการน้ำเพื่อรักษาระบบนิเวศพิจารณาจากโค้งอัตราการไหลของน้ำ-ช่วงเวลาของปริมาณน้ำทำรายเดือนที่ 90% ยกเว้นในงานวิจัยนี้ ใช้ที่ 95% ซึ่งค่าที่ต่างกัน เนื่องจากข้อมูลที่เปลี่ยนไปตามช่วงเวลา

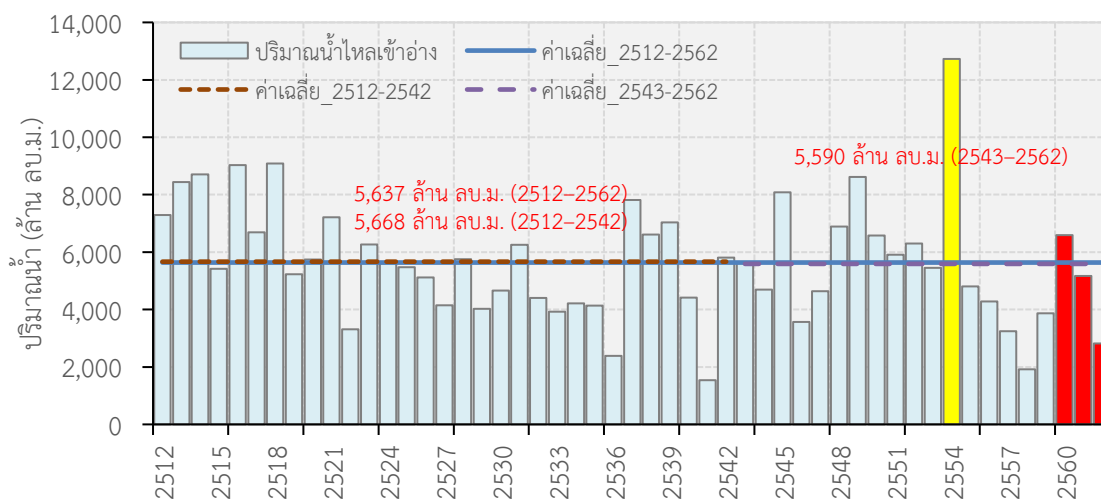
4.3 ผลการวิเคราะห์การบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากอดีตถึงปัจจุบัน

4.3.1 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากอดีตถึงปัจจุบัน

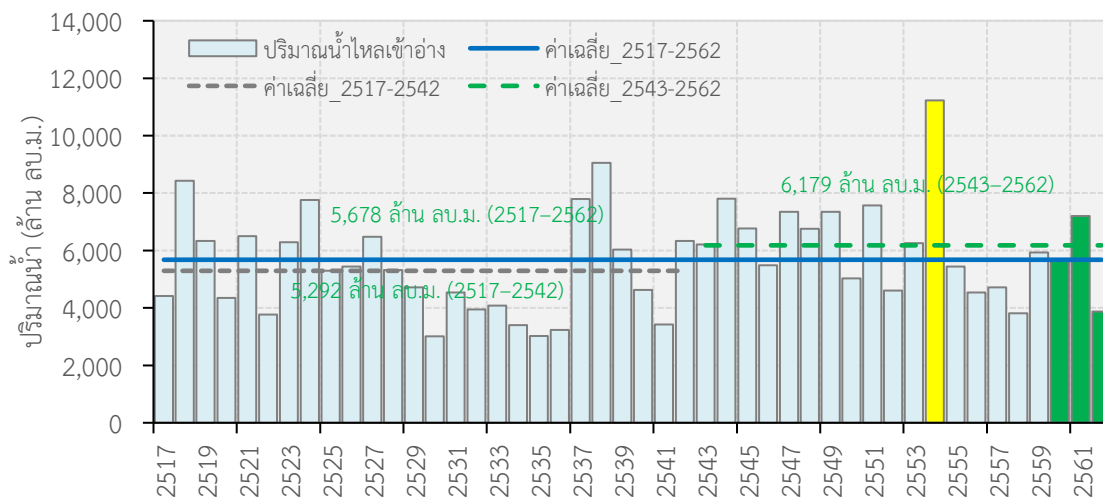
จากการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีของเขื่อนหลักได้แก่ เขื่อนภูมิพล ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2512-2562 และเขื่อนสิริกิติ์ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2517-2562 เพื่อศึกษาถึงสถานการณ์น้ำต้นทุนทั้งในระยะสั้นและระยะยาวให้รายละเอียดที่สำคัญ ดังนี้

(1) เขื่อนภูมิพล : ผลการวิเคราะห์ข้อมูลระยะยาวพบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีมีแนวโน้มคงที่โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 5,637 ล้านลูกบาศก์เมตร อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ข้อมูลระยะสั้นหลังเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ในปี พ.ศ. 2554 พบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างรายปีลดลงเฉลี่ย 1,677 ล้านลูกบาศก์เมตร และในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2555-2562 ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างต่ำกว่าค่าเฉลี่ยระยะยาว ยิ่งไปกว่านั้น ในช่วง 3 ปี หลังระหว่างปี พ.ศ. 2560-2562 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างของเขื่อนภูมิพลมีแนวโน้มลดลง และคาดว่าจะจะเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสถานะของน้ำต้นทุนในปี พ.ศ. 2563 นอกจากนี้ จากรูปที่ 4-71 แสดงให้เห็นถึงสถานการณ์น้ำต้นทุนของเขื่อนภูมิพลในปี พ.ศ. 2560-2562 ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับปี พ.ศ. 2555-2558 ซึ่งพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ต้องเผชิญกับวิกฤตภัยแล้งมาแล้ว

(2) เขื่อนสิริกิติ์ : ผลการวิเคราะห์ข้อมูลระยะยาวพบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีของเขื่อนสิริกิติ์มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 5,678 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเขื่อนภูมิพล อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ข้อมูลระยะสั้นพบว่า ถึงแม้ว่าในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2543-2562 ภาพรวมปริมาณน้ำต้นทุนจากปัจจัยปริมาณน้ำไหลเข้าของเขื่อนสิริกิติ์สูงขึ้นกว่าค่าเฉลี่ยระยะยาวซึ่งมีค่าอยู่ที่ 6,179 ล้านลูกบาศก์เมตร ดังรูปที่ 4-72 แต่หลังเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่มีปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างรายปีลดลงเฉลี่ย 495 ล้านลูกบาศก์เมตร นอกจากนี้ ในปี พ.ศ. 2562 ที่ผ่านมา ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์มีแนวโน้มลดลงต่ำกว่าค่าเฉลี่ยระยะยาวอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งคาดว่าจะส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำต้นทุนและวิกฤตภัยแล้งในปี พ.ศ. 2563

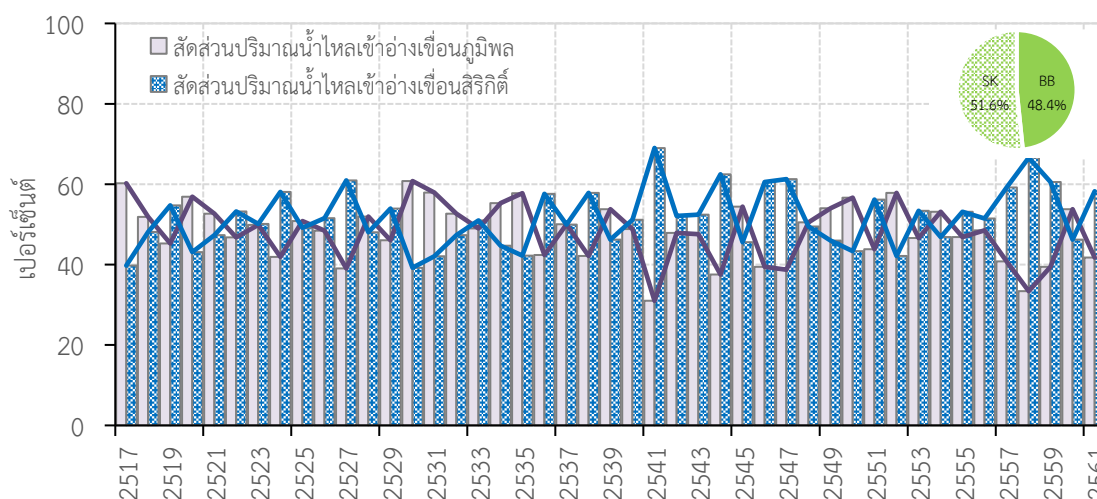


รูปที่ 4-71 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างรายปีของเขื่อนภูมิพลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2512-2562



รูปที่ 4-72 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างรายปีของเขื่อนสิริกิติ์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2517-2562

จากการวิเคราะห์สัดส่วนปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์รายปีตั้งแต่ปี พ.ศ. 2517-2561 พบว่ามีสัดส่วนอยู่ที่ 48.40%:51.60% ดังรูปที่ 4-73



รูปที่ 4-73 สัดส่วนปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์รายปีตั้งแต่ปี พ.ศ. 2517-2561

4.3.2 ผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากอดีตถึงปัจจุบัน

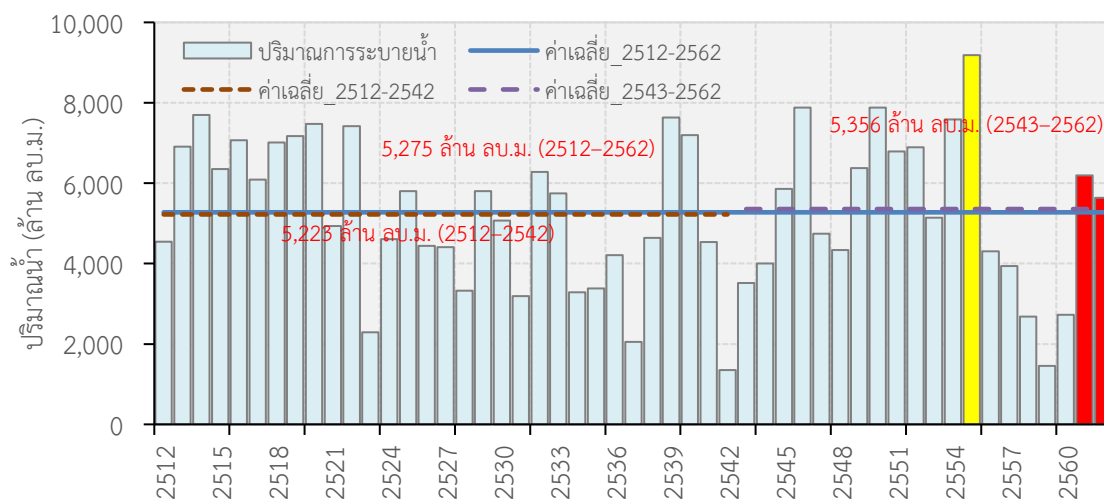
ในส่วนของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำระยะยาวที่ผ่านมาในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ให้รายละเอียดที่สำคัญ ดังนี้

- (1) เขื่อนภูมิพล : จากข้อมูลปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลพบว่า หลังเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ระหว่างปี พ.ศ. 2555-2560 มีการปรับลดปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลลงให้สอดคล้องตามแผนการจัดสรรน้ำ อย่างไรก็ตาม ในปี พ.ศ. 2561-2562 ปริมาณการระบายน้ำอยู่ที่ค่าเฉลี่ยโดยเป็นไปตามแผนการจัดสรรน้ำที่ปรับเพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่าแนวทางปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำดังกล่าวอาจไม่สอดคล้องกับปริมาณน้ำ

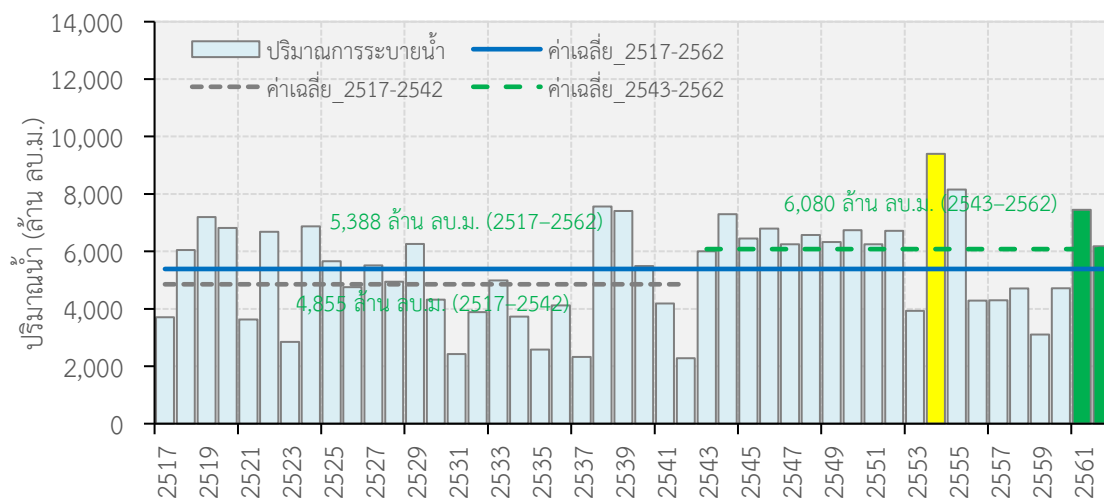
4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

ไหลเข้าที่มีแนวโน้มลดลง และเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเนื่องต่อสถานะน้ำต้นทุนในปี พ.ศ. 2563 ดังแสดงในรูปที่ 4-74

(2) เชื้อนสิริกิติ์ : จากข้อมูลปริมาณการระบายน้ำรายปีของเชื้อนสิริกิติ์พบว่า หลังเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่มีการระบายน้ำรายปีเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 77 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปี พ.ศ. 2561-2562 ที่มีการระบายน้ำสูงขึ้นตามแผนการระบายน้ำซึ่งไม่สอดคล้องตามปริมาณน้ำไหลเข้า และคาดว่าจะส่งผลกระทบต่อเนื่องต่อปริมาณน้ำต้นทุนในปี พ.ศ. 2563 ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 4-75



รูปที่ 4-74 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเชื้อนภูมิพลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2512-2562

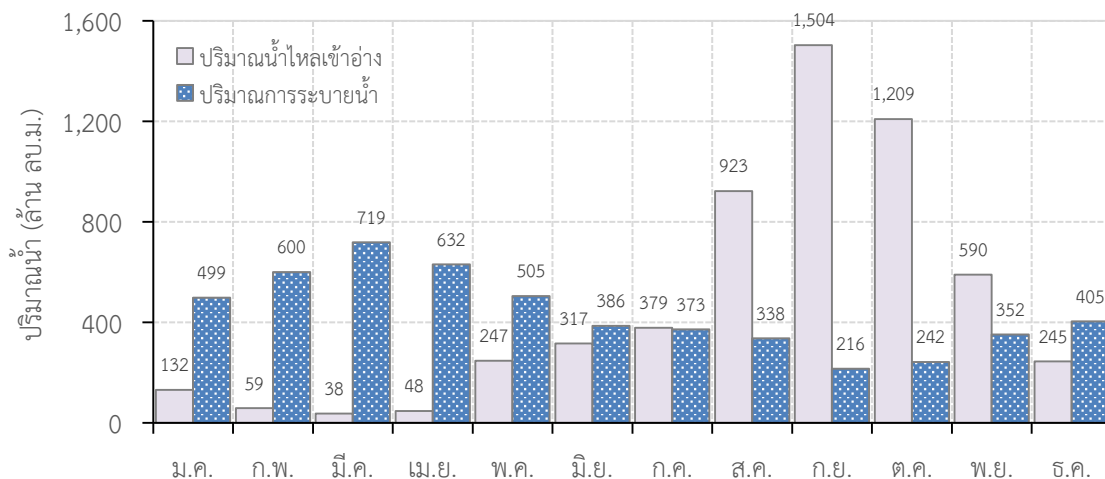


รูปที่ 4-75 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเชื้อนสิริกิติ์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2517-2562

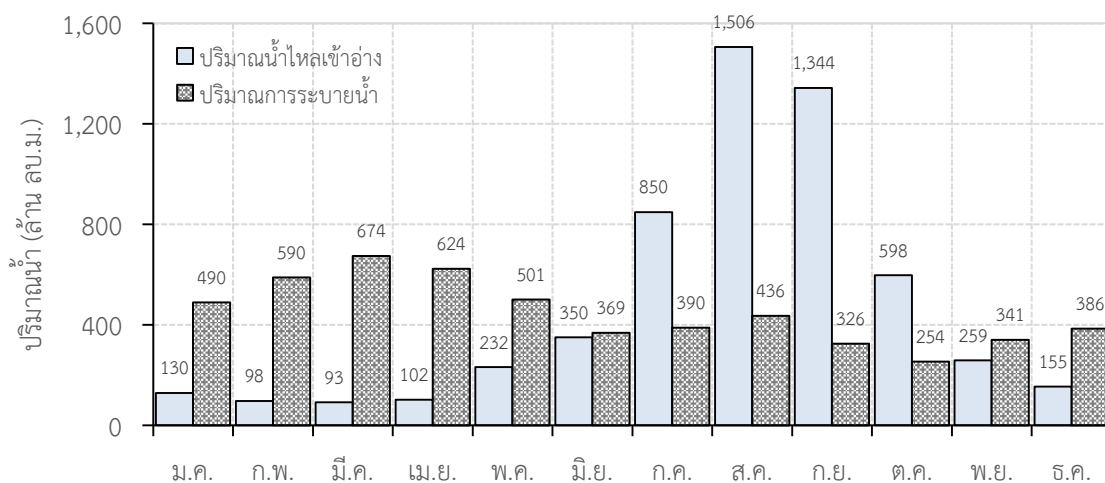
4.3.3 ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากอดีตถึงปัจจุบัน

ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่จากอดีตถึงปัจจุบันเฉลี่ยรายเดือนและรายปีของเชื้อนภูมิพลและเชื้อนสิริกิติ์แสดงรายละเอียดในรูปที่ 4-76 ถึงรูปที่ 4-81 ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำสูงในช่วงกลางฤดูฝนตั้งแต่เดือนสิงหาคมถึง

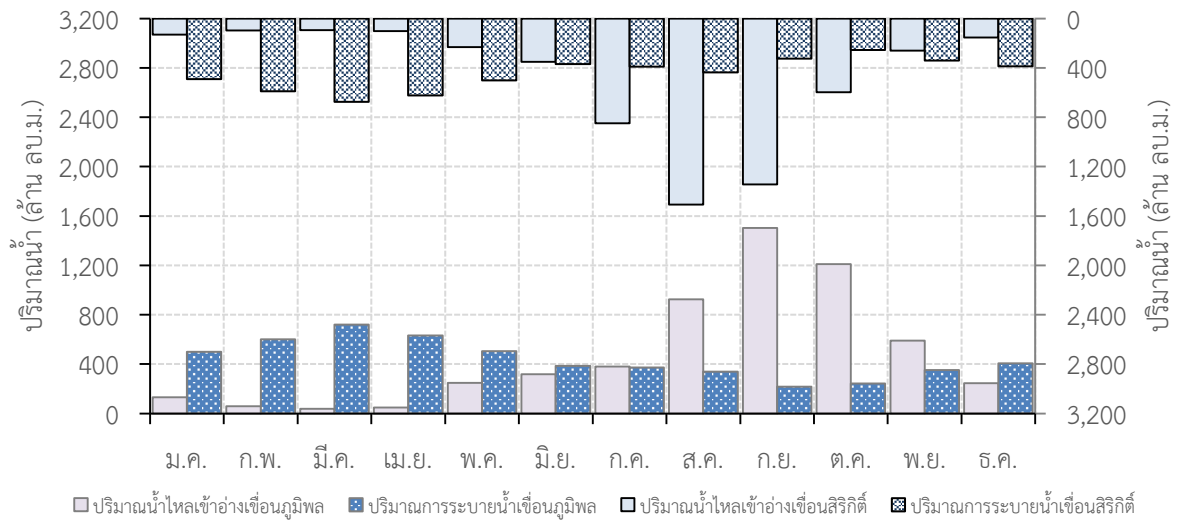
เดือนตุลาคม และจะลดปริมาณลงในช่วงฤดูแล้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน ด้วยเหตุนี้ แนวโน้มปริมาณน้ำที่ระบายในช่วงฤดูฝนจะน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงฤดูแล้ง โดยจะค่อย ๆ เพิ่มการระบายน้ำตั้งแต่ปลายปีตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนจนกระทั่งสูงสุดในเดือนมีนาคมที่มีการเพาะปลูกพืชฤดูแล้ง และหลังจากนั้นจะค่อย ๆ ลดปริมาณน้ำที่ระบายลง



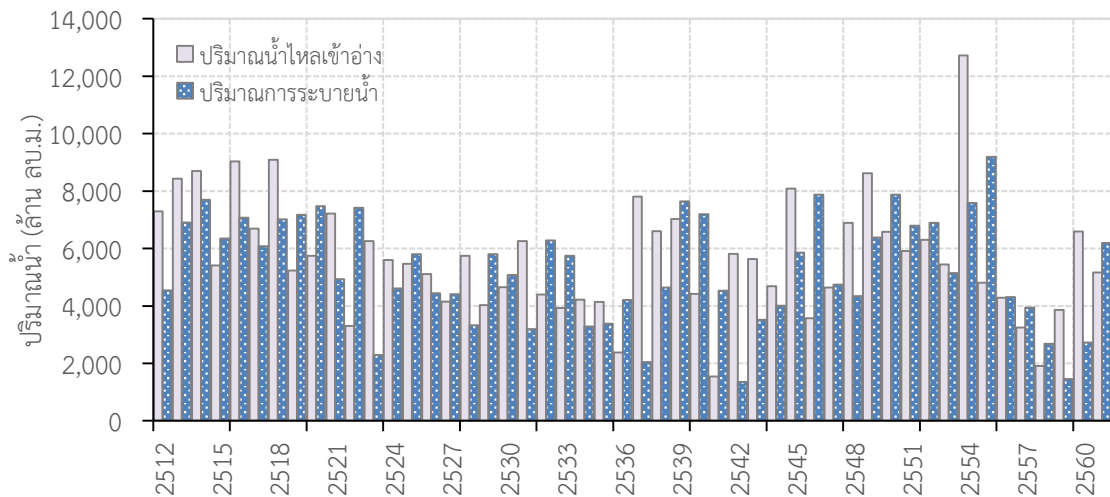
รูปที่ 4-76 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยรายเดือนของเขื่อนภูมิพล



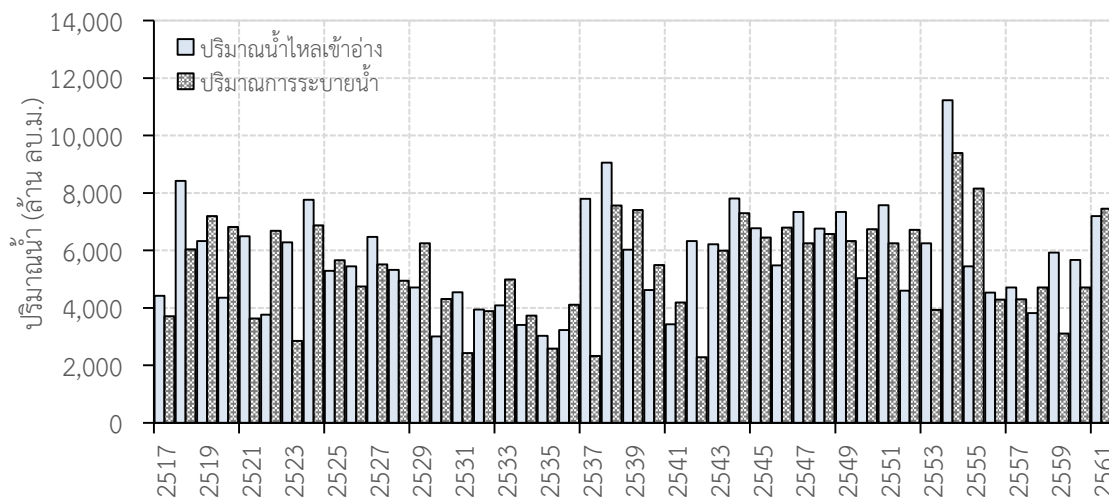
รูปที่ 4-77 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยรายเดือนของเขื่อนสิริกิติ์



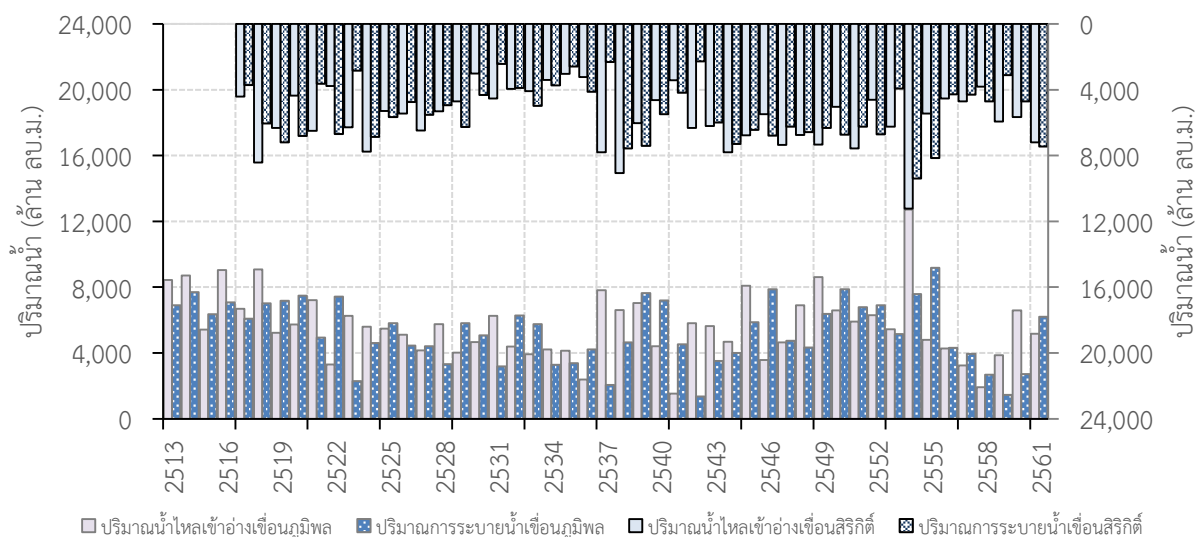
รูปที่ 4-78 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยรายเดือนของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์



รูปที่ 4-79 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพล



รูปที่ 4-80 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนสิริกิติ์

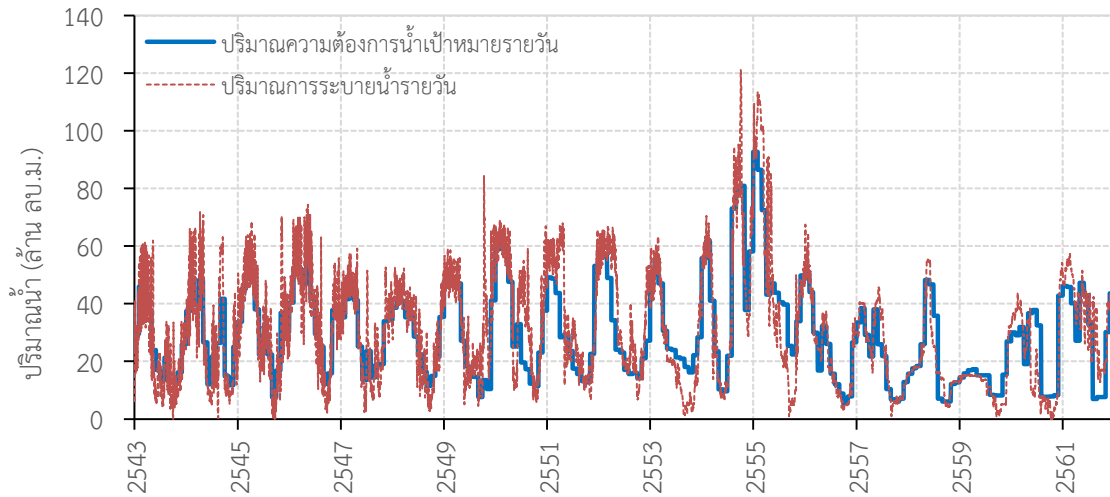


รูปที่ 4-81 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

4.3.4 ผลการเปรียบเทียบแผนการจัดสรรน้ำกับปริมาณการระบายน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

4.3.4.1 ข้อมูลรายวัน

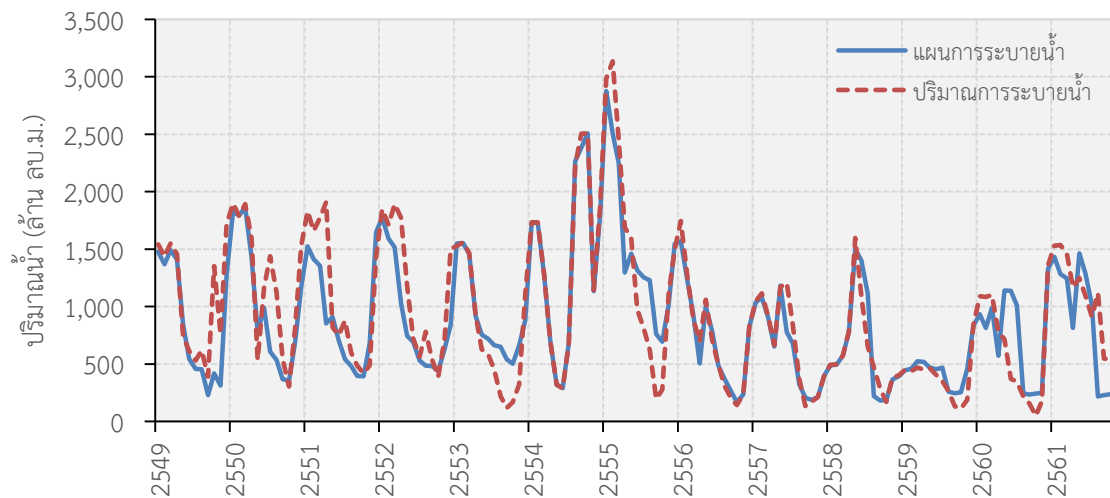
ผลการเปรียบเทียบแผนการจัดสรรน้ำ (แผนการระบายน้ำ) และปริมาณการระบายน้ำรายเดือนของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์รายวันตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2561 พบว่า รูปแบบการระบายน้ำรายวันสอดคล้องตามแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทานและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยดังรูปที่ 4-82



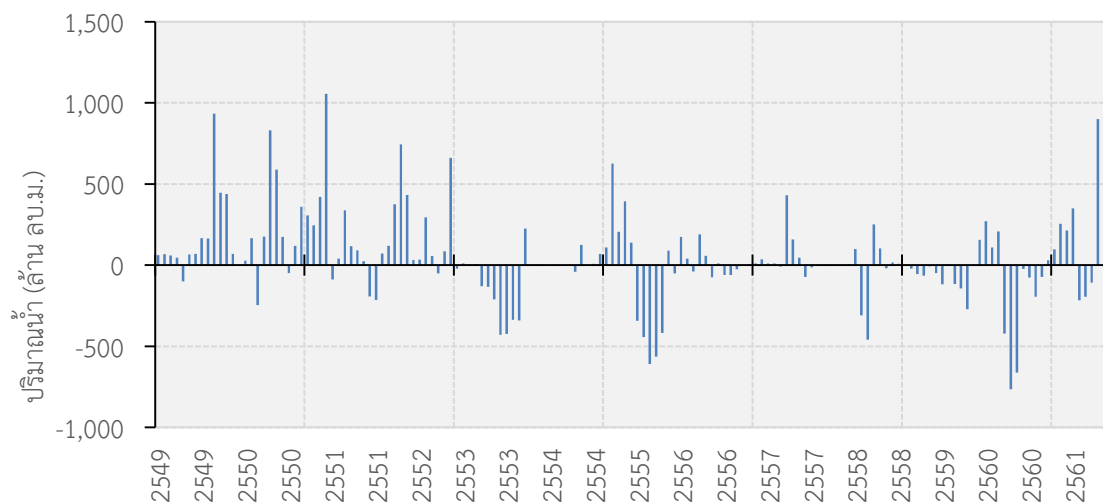
รูปที่ 4-82 ปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายและปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

4.3.4.2 ข้อมูลรายเดือน

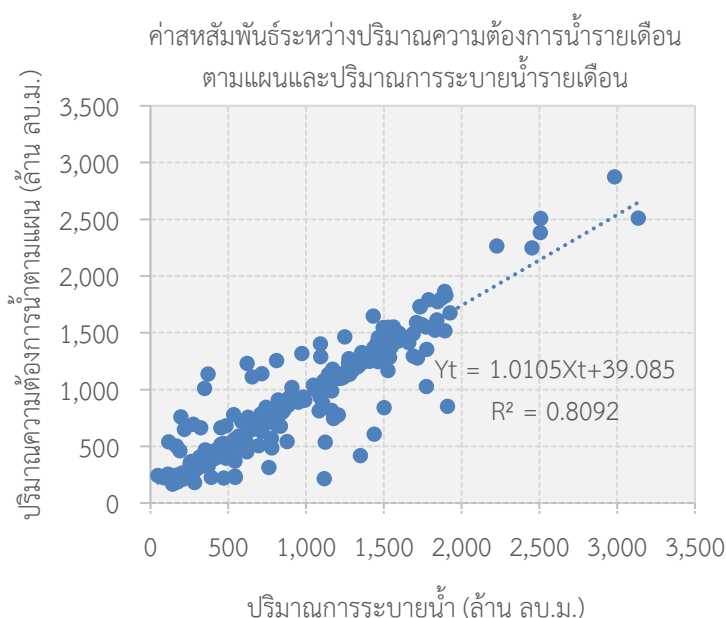
ผลการเปรียบเทียบแผนการจัดสรรน้ำ (แผนการระบายน้ำ) และปริมาณการระบายน้ำรายเดือนของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระยะยาวตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549–2561 พบว่า รูปแบบการระบายน้ำรายเดือนสอดคล้องตามแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทานและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยดังรูปที่ 4-83 โดยค่าผลต่างแผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายเดือนของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ผันแปรตามรูปที่ 4-84 และค่าสหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความต้องการน้ำรายเดือนตามแผนและปริมาณการระบายน้ำรายเดือนสูงถึง 0.8092 รูปที่ 4-85 ซึ่งแนวทางปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าแผนการจัดสรรน้ำมีส่วนสำคัญต่อปัจจัยปริมาณน้ำต้นทุนที่มีมากหรือน้อยของปีถัดไปนั่นเอง



รูปที่ 4-83 แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายเดือนของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์



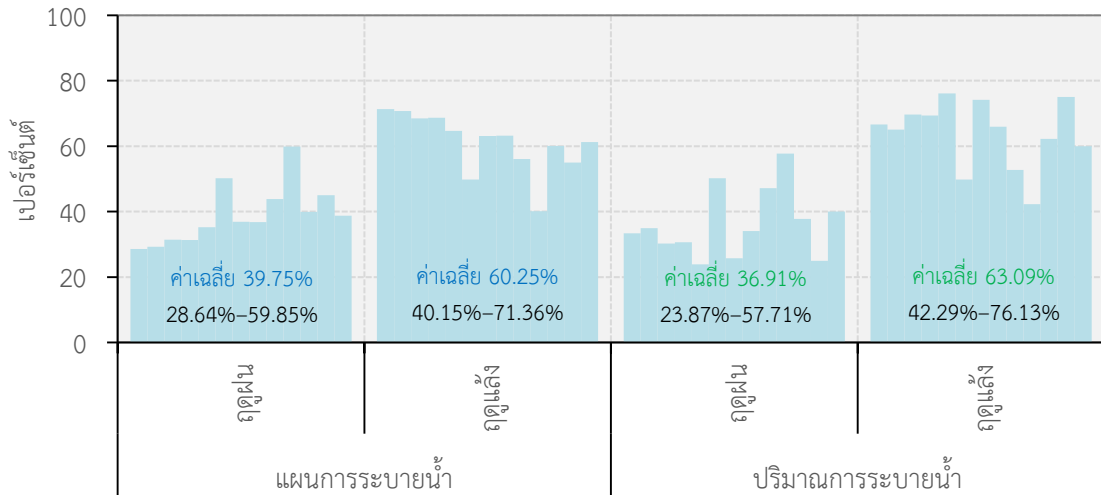
รูปที่ 4-84 ผลต่างแผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายเดือนของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์



รูปที่ 4-85 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความต้องการน้ำรายเดือนตามแผนและปริมาณการระบายน้ำรายเดือน

4.3.4.3 ข้อมูลรายฤดูกาล

ผลการเปรียบเทียบแผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายฤดูกาลของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระยะยาวตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549–2561 พบว่า สัดส่วนการจัดสรรน้ำในช่วงฤดูฝน : ฤดูแล้งตามแผนการจัดสรรน้ำอยู่ที่ 40%:60% อย่างไรก็ตาม สัดส่วนการระบายน้ำจริงในช่วงฤดูฝน : ฤดูแล้งอยู่ที่ 37%:63% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการระบายน้ำจริงในช่วงฤดูแล้งสูงกว่าแผนการจัดสรรน้ำ รวมทั้งผลการระบายน้ำจริงในช่วงฤดูแล้งยังสูงกว่าช่วงฤดูฝนอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 4-86

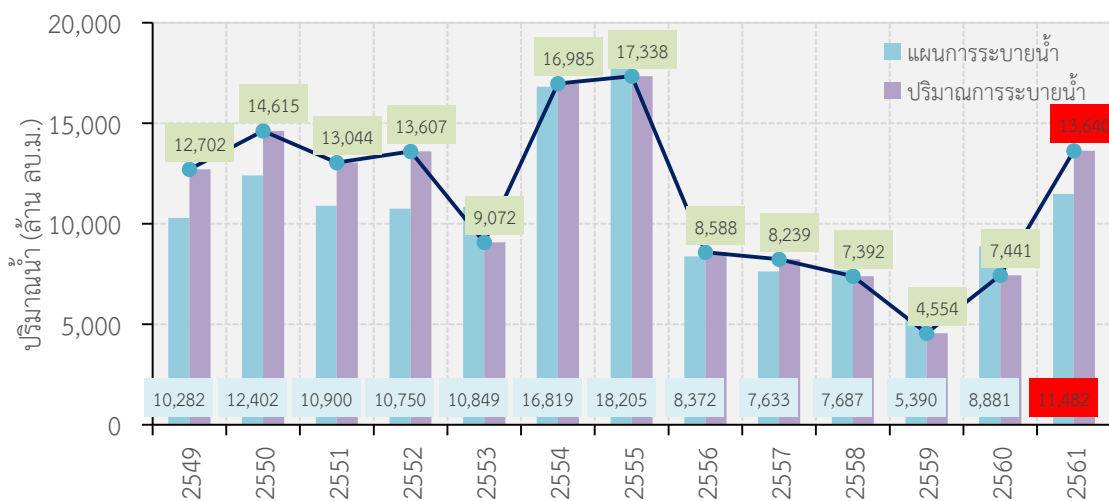


รูปที่ 4-86 แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายฤดูกาลของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระยะยาว

4.3.4.4 ข้อมูลรายปี

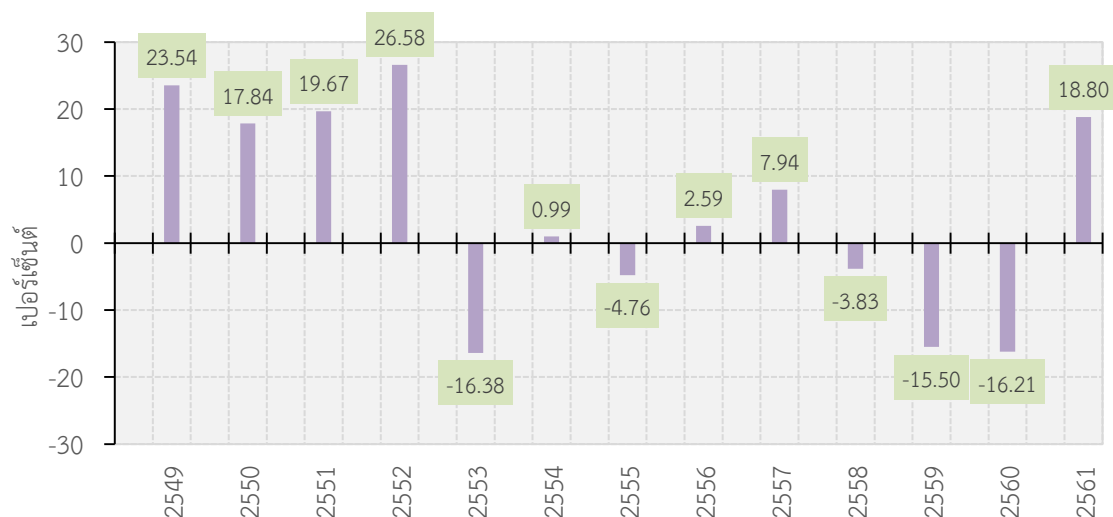
4.3.4.4.1 ข้อมูลรายปีระยะยาว

ผลการเปรียบเทียบแผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระยะยาวตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549–2561 พบว่า หน่วยงานที่เกี่ยวข้องมีการปรับลดปริมาณการจัดสรรน้ำตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556–2559 หลังเกิดเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ อย่างไรก็ตาม มีการปรับเพิ่มปริมาณการจัดสรรน้ำในปี พ.ศ. 2561 ในลักษณะของการปฏิบัติการในภาวะปกติดังแสดงในรูปที่ 4-87 ยิ่งไปกว่านั้น ยังพบอีกว่า มีการระบายน้ำรายปีส่วนใหญ่สูงกว่าแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทานและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่โอกาสความน่าจะเป็น 62% และในปี พ.ศ. 2561 มีการปรับเปลี่ยนแผนการจัดสรรน้ำซึ่งไม่สอดคล้องตามปัจจัยปริมาณน้ำไหลเข้า และมีการระบายน้ำสูงกว่าแผนการจัดสรรน้ำอยู่ได้ถึง 18.80% ดังรูปที่ 4-88 และรูปที่ 4-89 ซึ่งนี่เป็นภาพสะท้อนที่แสดงให้เห็นว่า การมีการวางแผนที่ดีและจัดทำแผนการจัดสรรน้ำที่ถูกต้องสอดคล้องกับปัจจัยน้ำต้นทุนที่แท้จริง ประกอบกับการปฏิบัติตามแผนอย่างจริงจังจะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำเกิดความยั่งยืนในระยะยาว

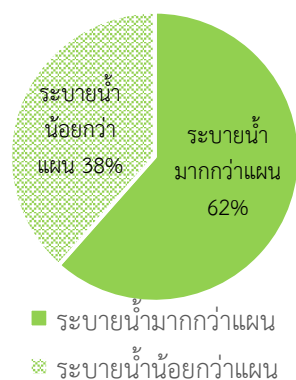


รูปที่ 4-87 แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระยะยาว

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562



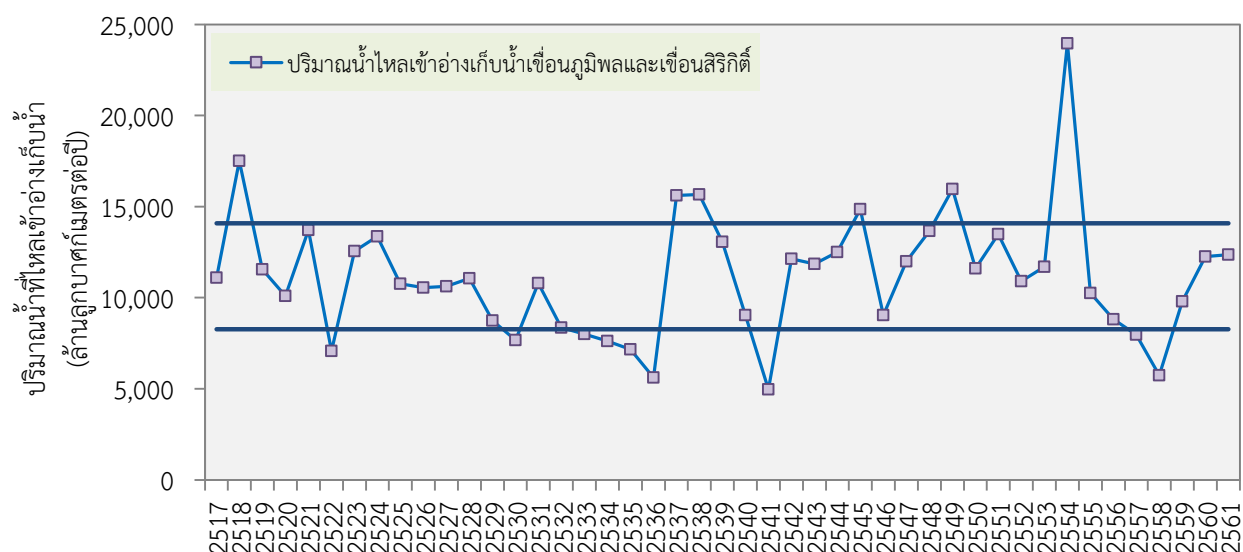
รูปที่ 4-88 ความแตกต่างแผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์



รูปที่ 4-89 โอกาสความน่าจะเป็นในการระบายน้ำเมื่อเทียบกับแผนการจัดสรรน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

4.3.4.4.2 ข้อมูลรายปีระยะสั้น

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ประเภทปีน้ำโดยนำข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและสิริกิติ์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549–2561 โดยประยุกต์หลักสถิติทางอุทกวิทยาในการกำหนดเส้นเกณฑ์ 2 เส้นที่ค่าโอกาสความน่าจะเป็น 0.20 และ 0.80 เพื่อจัดแบ่งปีน้ำมาก ปีน้ำปกติ และปีน้ำน้อย ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 4-90 ซึ่งในภาพรวมจากข้อมูลระยะยาวจำนวน 45 ปี พบว่า โอกาสของการเกิดเหตุการณ์ปีน้ำมาก ปีน้ำปกติ และปีน้ำน้อยเท่ากับ 13.33%, 66.67% และ 20.00% ตามลำดับ

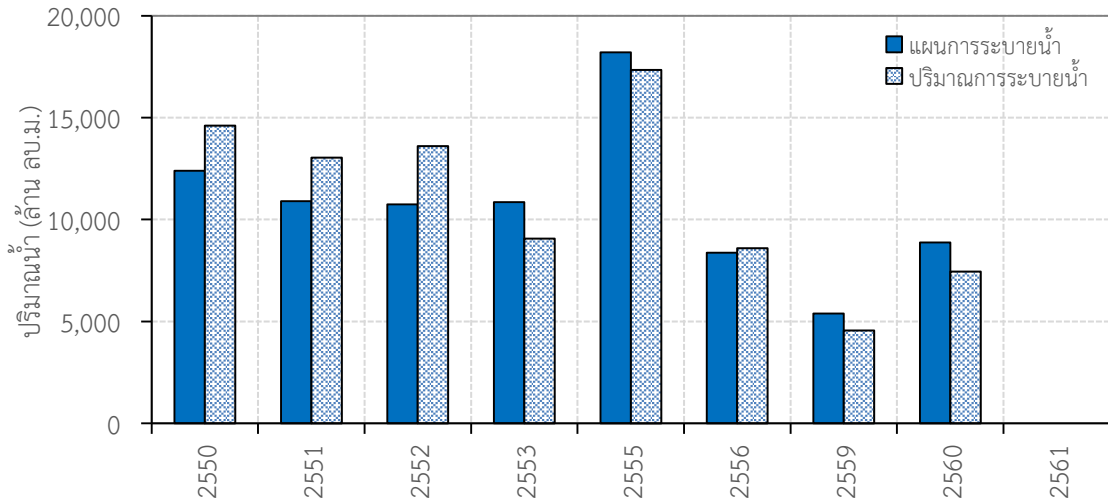


รูปที่ 4-90 การจัดแบ่งประเภทปีน้ำในกลุ่มน้ำปิงและลุ่มน้ำน่าน

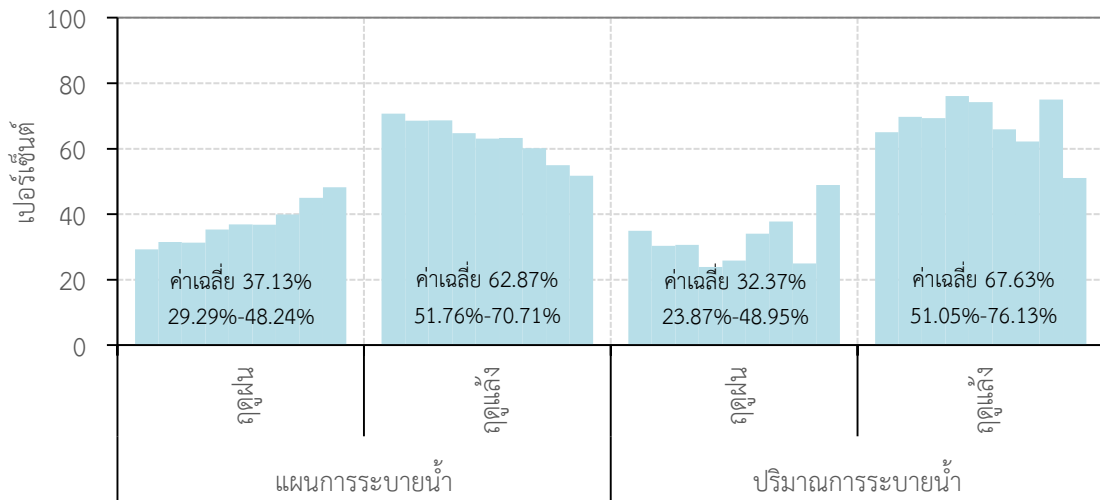
ผลการเปรียบเทียบแผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระยะสั้นโดยแยกเป็นปีน้ำปกติ ปีน้ำน้อย และปีน้ำมาก พบว่า ในปีน้ำปกติและปีน้ำมากมีการระบายน้ำรายปีส่วนใหญ่สูงกว่าแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทานและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยดังรูปที่ 4-91 และรูปที่ 4-96 ในขณะที่แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายฤดูกาลตามประเภทของปีน้ำพบว่า มีการจัดสรรน้ำเฉลี่ยไปใช้ในช่วงฤดูแล้งสูงกว่าในฤดูฝนดังที่สรุปไว้ในตารางที่ 4-45

ตารางที่ 4-45 ความต้องการน้ำเพื่อการรักษาสมดุลระบบนิเวศด้านท้ายน้ำอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่

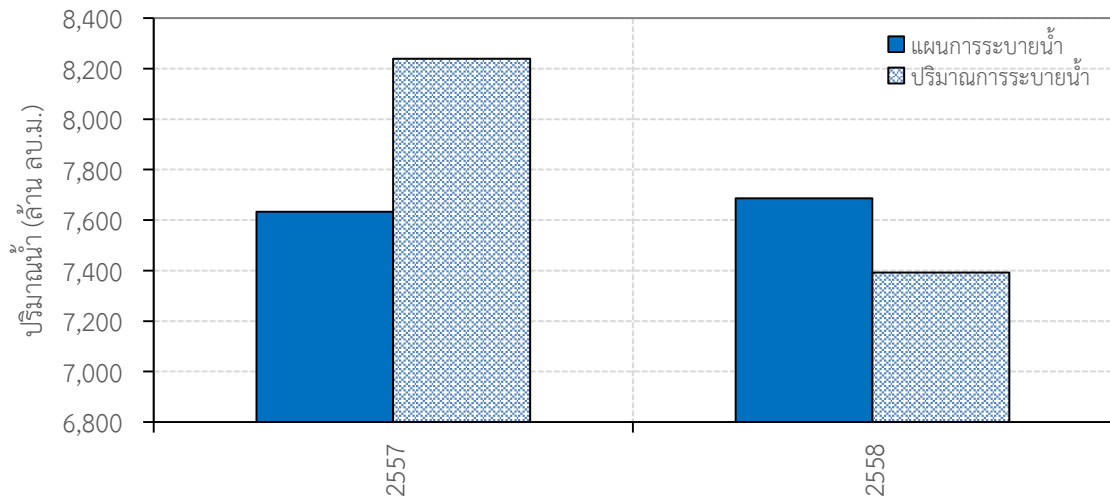
การปฏิบัติการ	แผนการระบายน้ำ (%)		การระบายน้ำจริง (%)	
	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง
ระยะยาว	39.02	60.98	36.22	63.78
ระยะสั้น				
-ปีน้ำปกติ	37.13	62.87	32.37	67.63
-ปีน้ำน้อย	51.87	48.13	52.46	47.54
-ปีน้ำมาก	39.43	60.57	41.80	58.20



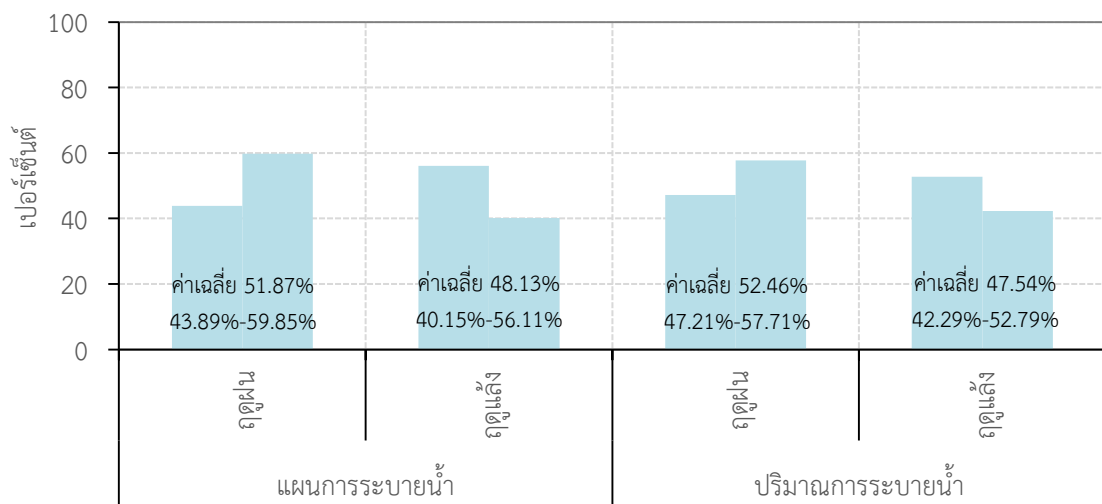
รูปที่ 4-91 แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำปกติ



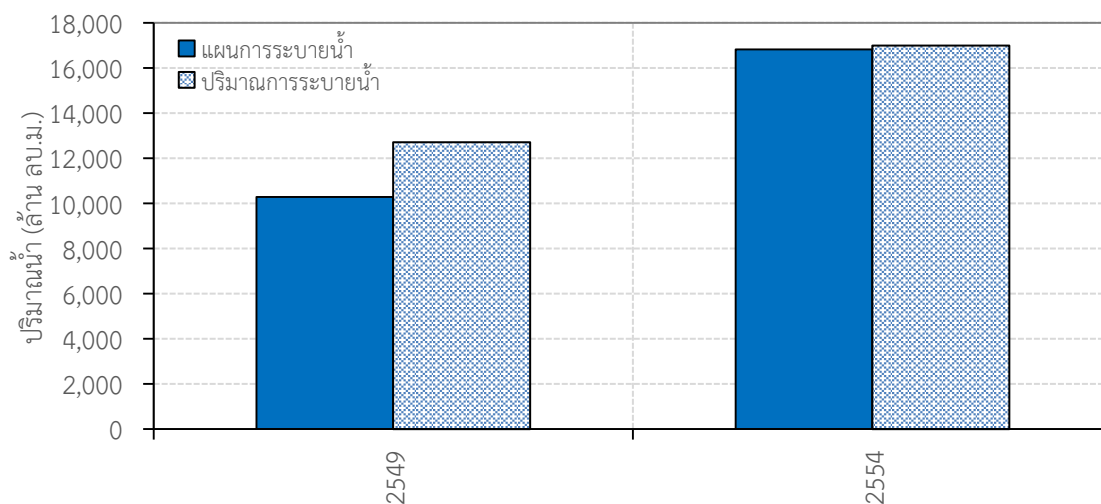
รูปที่ 4-92 แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายฤดูกาลของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำปกติ



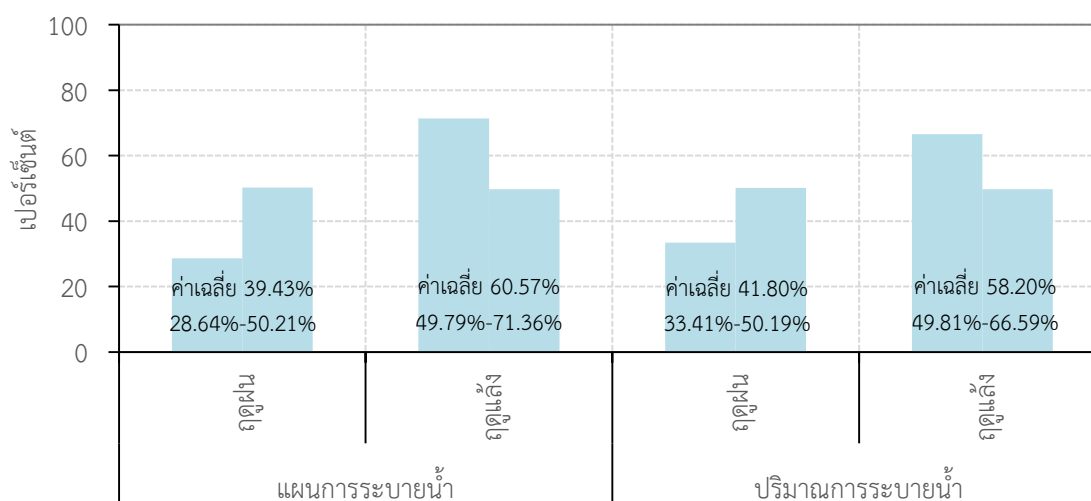
รูปที่ 4-93 แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำน้อย



รูปที่ 4-94 แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายฤดูกาลของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำน้อย



รูปที่ 4-95 แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำมาก

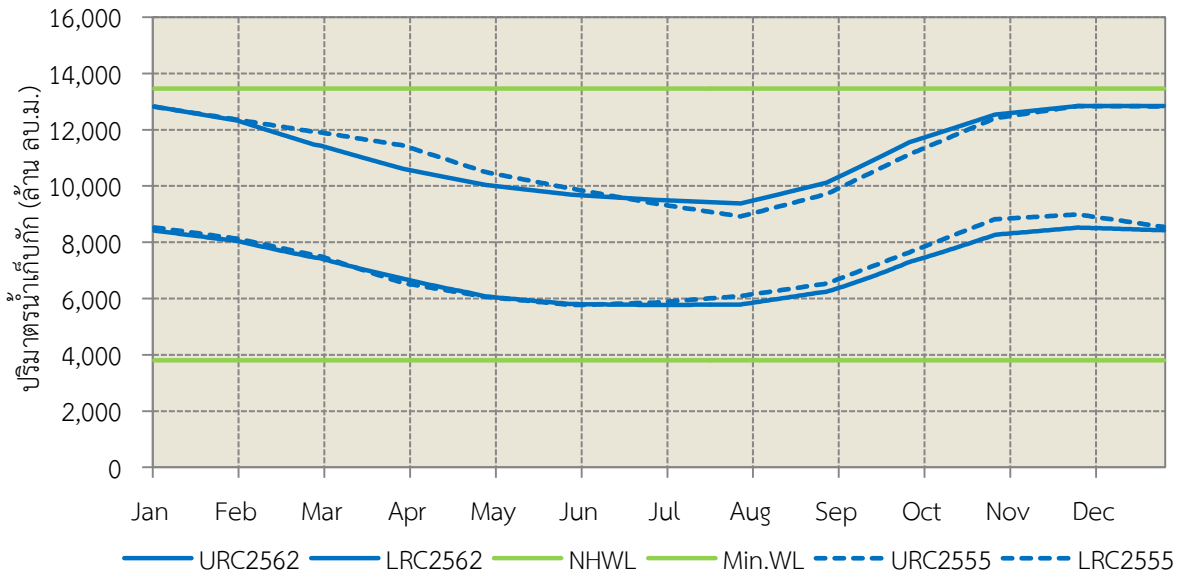


รูปที่ 4-96 แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายฤดูกาลของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำมาก

4.3.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการจัดสรรน้ำร่วมกันระหว่างเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์

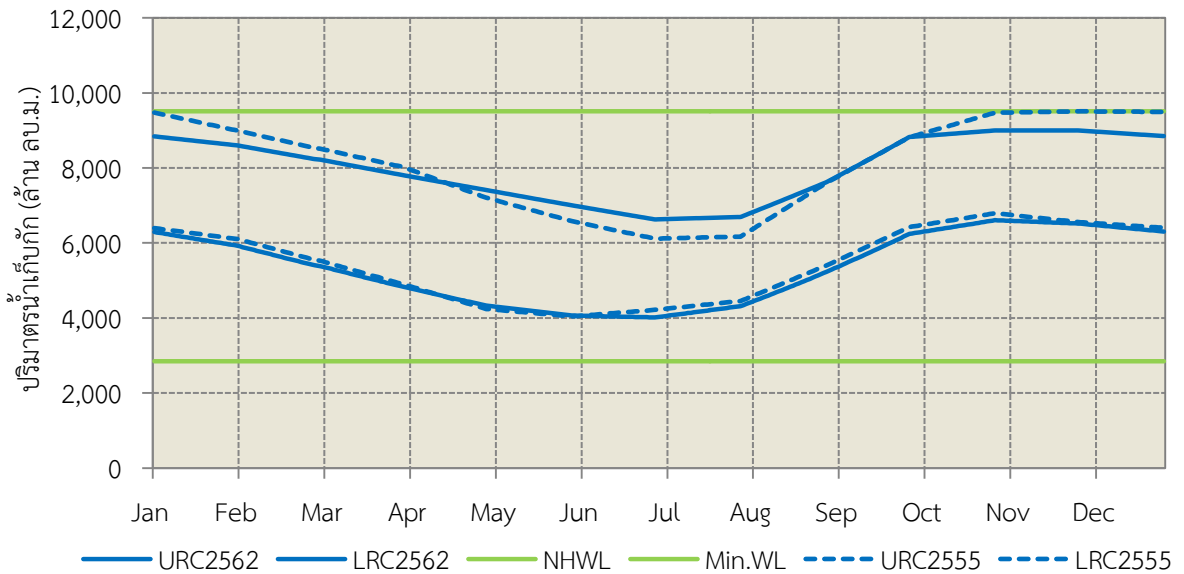
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยซึ่งเป็นหน่วยงานหลักในการจัดสรรน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ร่วมกันได้พัฒนาเครื่องมือที่ใช้เป็นแนวทางในการกำหนดการระบายน้ำในแต่ละช่วงเวลาในรูปของ “โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve)” ซึ่งได้พัฒนาและปรับปรุงล่าสุดในปี พ.ศ. 2555 และ พ.ศ. 2562 ดังแสดงรูปที่ 4-97 และรูปที่ 4-98

โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพล



รูปที่ 4-97 โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลที่พัฒนาขึ้นในปี พ.ศ. 2555 และ 2562

โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนสิริกิติ์



รูปที่ 4-98 โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนสิริกิติ์ที่พัฒนาขึ้นในปี พ.ศ. 2555 และ 2562

4.3.6 ผลการพัฒนาแบบจำลองพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเขื่อนภูมิพล

ข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการพัฒนาแบบจำลองการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ประกอบด้วย อัตราการระบายน้ำผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Water Discharge) อัตราการระบายน้ำผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้สูงสุด (Rated Discharge) ระดับน้ำต่ำสุดที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ (Minimum Water Level for Power Generation) โค้งอัตราการระบายน้ำ-ระดับน้ำ-ประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้า (Capability-Discharge-Efficiency Curves) และความสูงของเสื่อน้ำ (Head) จากนั้นคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการปล่อยน้ำผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยอาศัยสมการดังนี้

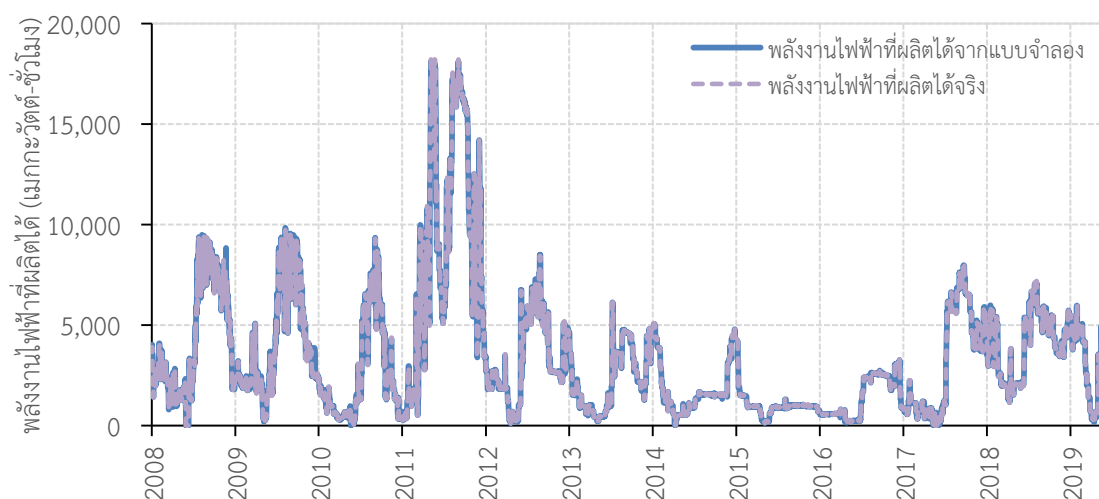
4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

$$G = P_E \cdot T = \eta \cdot \gamma \cdot R \cdot H_T \cdot t \quad \text{-----}(4-3)$$

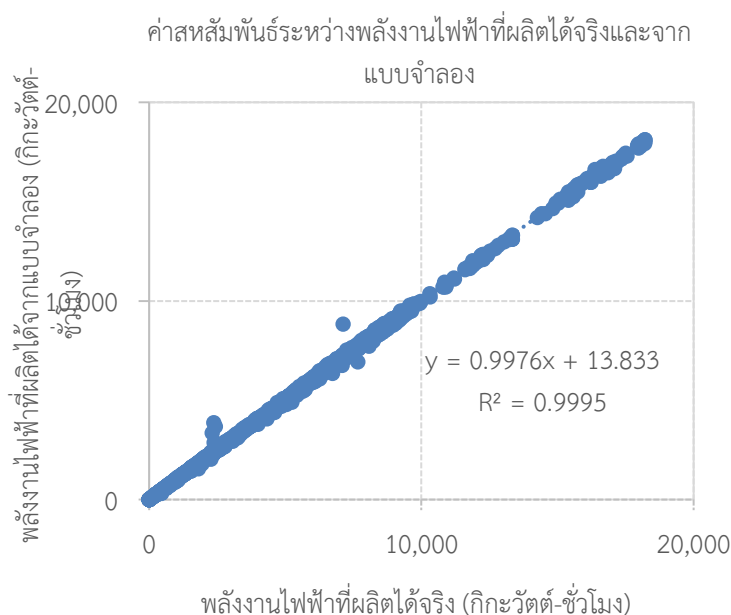
เมื่อ

- G = พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)
 P_E = กระแสไฟฟ้าที่ได้ (กิโลวัตต์)
 t = เวลาในการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ชั่วโมง)
 η = ประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า (เปอร์เซ็นต์)
 γ = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ (9.81 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)
 R = อัตราการระบายน้ำผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
 H_T = เหนื่อน้ำ (เมตร)

ผลจากการพัฒนาแบบจำลองพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายวันโดยได้ทำการปรับเทียบค่าประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าให้ค่าแสดงในรูปที่ 4-99 และรูปที่ 4-100 โดยค่าสหสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงและจากแบบจำลองที่พัฒนาสูงถึง 0.9995



รูปที่ 4-99 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายวันของเขื่อนภูมิพล



รูปที่ 4-100 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงและจากแบบจำลองรายวันของเขื่อนภูมิพล

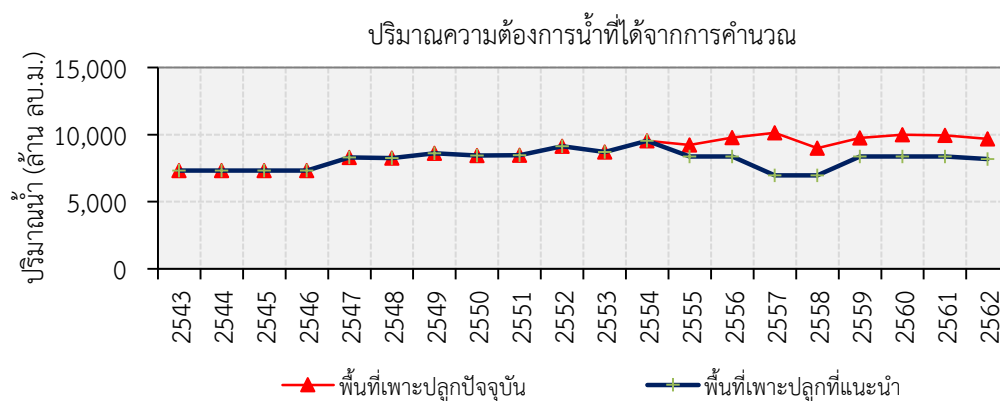
4.4 แนวทางในการเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในอนาคต

4.4.1 แนวทางที่ 1 : การควบคุมพื้นที่เพาะปลูกให้เหมาะสมในพื้นที่โครงการชลประทาน เจ้าพระยาใหญ่

จากการประมาณการปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ด้วยการติดตามพื้นที่เพาะปลูกโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมด้วยเครื่องมือ Cloud Based IrriSAT Application และนำผลใช้การมาเป็นปัจจัยปรับลด (กรมชลประทาน, 2554) พบว่า พื้นที่เพาะปลูกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน ดังนั้น จึงจำเป็นต้องควบคุมพื้นที่เพาะปลูกให้เหมาะสมกับปริมาณน้ำต้นทุน ด้วยเหตุนี้ การศึกษาวิจัยจึงได้เสนอแนะพื้นที่เพาะปลูกที่แนะนำให้ปลูกจากการพิจารณาปัจจัยน้ำต้นทุนของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์เพื่อควบคุมพื้นที่เพาะปลูกให้มีความเหมาะสมโดยเฉพาะหลังเหตุการณ์น้ำท่วมตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555-2561 ซึ่งผลจากการปรับลดพื้นที่เพาะปลูกแยกตามประเภทปีน้ำดังแสดงในตารางที่ 4-46 ส่งผลให้สามารถลดปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการชลประทานได้ถึงเฉลี่ยปีละ 1,700 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งหมายถึงความสามารถในการเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักไว้ในอ่างเก็บน้ำของทั้งสองเขื่อนนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 4-101

ตารางที่ 4-46 พื้นที่เพาะปลูกที่แนะนำจากการพิจารณาปัจจัยน้ำต้นทุน

พื้นที่เพาะปลูกที่แนะนำ	ปีน้ำมาก	ปีน้ำปกติ	ปีน้ำน้อย
ฤดูฝน (ล้านไร่)	7	6	5
ฤดูแล้ง (ล้านไร่)	5	4	2



รูปที่ 4-101 ปริมาณความต้องการน้ำชลประทานจากการปรับลดพื้นที่เพาะปลูก

4.4.2 แนวทางที่ 2 : การปรับลดปริมาณน้ำระบายส่วนเกิน (Excessive Water) ทางด้านท้ายน้ำ

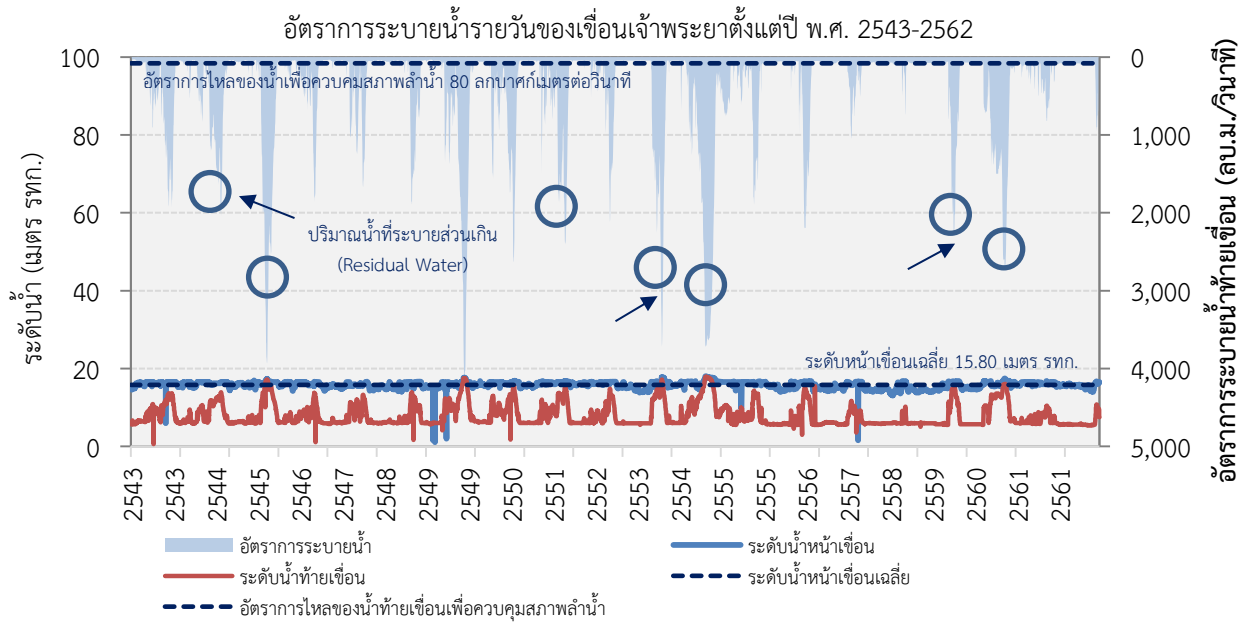
งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์แนวทางการจัดสรรน้ำที่เขื่อนเจ้าพระยารายวันตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2562 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำระบายส่วนเกิน (Excessive Water) ที่เกินปริมาณความต้องการน้ำเพื่อควบคุมสภาพล้นน้ำทางด้านท้ายเขื่อน สำหรับใช้เป็นแนวทางในการปรับลดการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์โดยเฉพาะในช่วงฤดูแล้งที่มีปริมาณถึง 3,000 ล้านลูกบาศก์เมตร ดังแสดงรายละเอียดแผนการจัดสรรน้ำของกลุ่มน้ำเจ้าพระยาในช่วงฤดูแล้ง ปี พ.ศ. 2562/2563 (1 พ.ย. 62–30 เม.ย. 63) ซึ่งผลการศึกษาได้แสดงในตารางที่ 4-47

ตารางที่ 4-47 แผนการจัดสรรน้ำของกลุ่มน้ำเจ้าพระยาในช่วงฤดูแล้งปี พ.ศ. 2562/2563

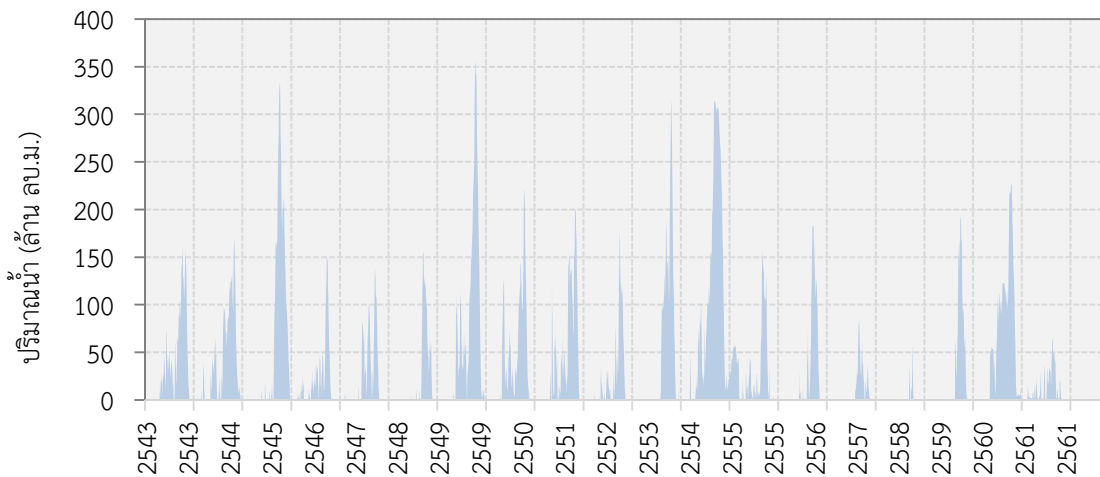
แผนการจัดสรรน้ำ	สมดุลน้ำ	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)
การระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำภูมิพลและสิริกิติ์	+	3,000
ระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำแควน้อยบำรุงแดน	+	250
การใช้น้ำเหนือเขื่อนเจ้าพระยา	-	590
การใช้น้ำทุ่งฝิ่งตะวันตก	-	840
ทุ่งตอนบน	-	760
ทุ่งตอนล่าง	-	280
ผันน้ำจากกลุ่มน้ำแม่กลอง	-	500
รักษาระบบนิเวศและผลักดันน้ำเค็มปากแม่น้ำท่าจีน	-	500
การใช้น้ำทุ่งฝิ่งตะวันออก	-	590
ทุ่งตอนบนและตอนล่าง	-	365
ทุ่งตอนล่าง	-	275
ระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์	-	250
ใช้ปริมาณน้ำระบายจากอ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์	-	50
ระบายน้ำท้ายเขื่อนเจ้าพระยา	-	1,230
ระบายน้ำจากเขื่อนพระรามหก (ระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์ 250)	-	200
รักษาระบบนิเวศและผลักดันน้ำเค็มปากแม่น้ำเจ้าพระยา	-	530

ที่มา : กรมชลประทาน (2562)

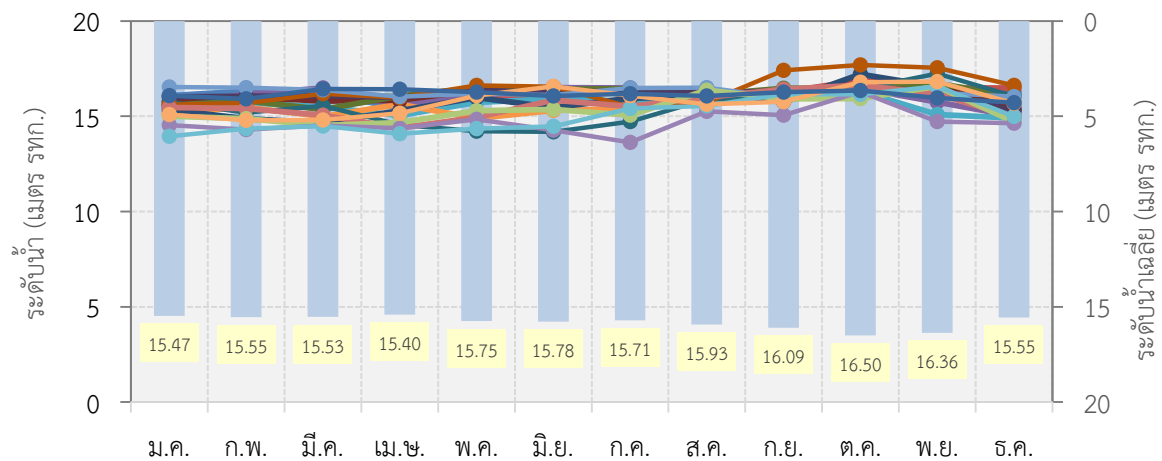
4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562



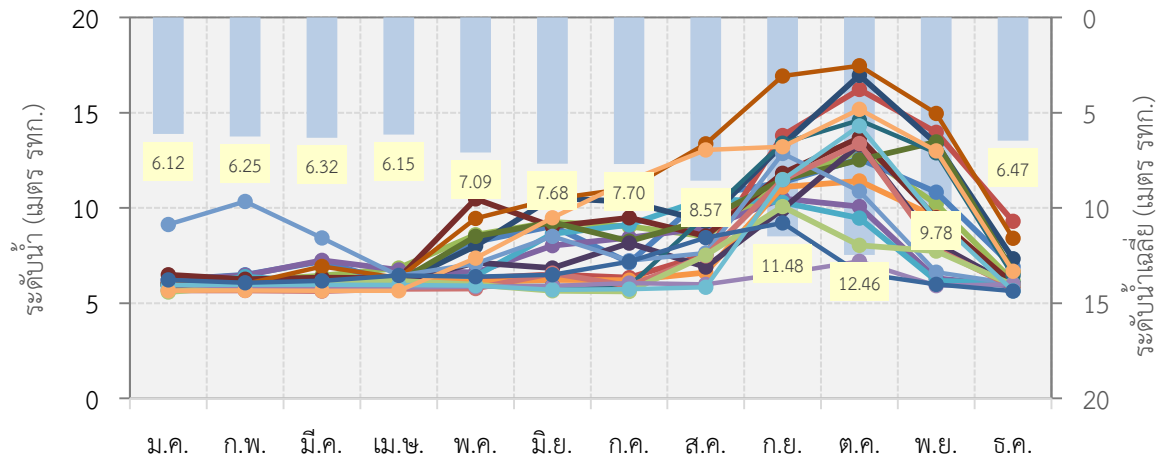
รูปที่ 4-102 แนวทางการจัดสรรน้ำของเขื่อนเจ้าพระยาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2562



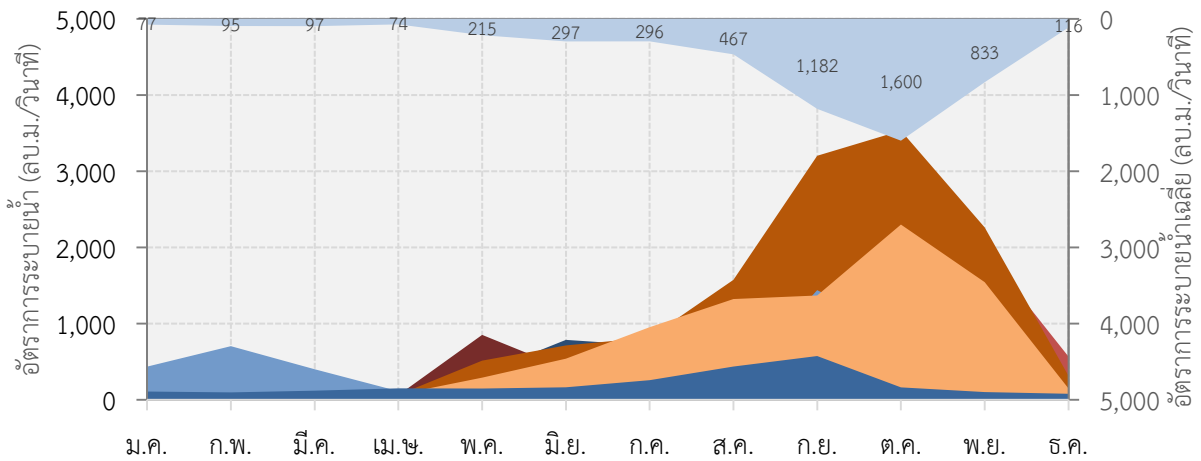
รูปที่ 4-103 ปริมาณน้ำที่ระบายส่วนเกินรายวันของเขื่อนเจ้าพระยาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2562



รูปที่ 4-104 การควบคุมระดับน้ำหน้าเขื่อนเจ้าพระยาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2562



รูปที่ 4-105 การควบคุมระดับน้ำท้ายเขื่อนเจ้าพระยาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2562



รูปที่ 4-106 ปริมาณการระบายน้ำส่วนเกินเฉลี่ยของเขื่อนเจ้าพระยาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2562

ประเด็นสำคัญที่ได้จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลในรูปที่ 4-102 ถึงรูปที่ 4-106 พบว่า เขื่อนเจ้าพระยาถูกออกแบบให้ควบคุมระดับน้ำหน้าเขื่อนที่ +16.50 เมตร รทก. เพื่อให้สามารถทดน้ำเข้าคลองได้เต็มศักยภาพทุกกิจกรรมการใช้น้ำ อย่างไรก็ตาม แนวทางการจัดสรรน้ำที่เขื่อนเจ้าพระยาในอดีตถึงปัจจุบันควบคุมระดับน้ำหน้าเขื่อนเฉลี่ยคงที่อยู่ที่ +15.80 เมตร รทก. และการควบคุมระดับน้ำหน้าเขื่อนในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งแทบจะไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ปริมาณน้ำที่ระบายส่วนเกินเฉลี่ยรายเดือนในช่วงฤดูฝนค่อนข้างสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเดือนกันยายนและตุลาคมมีปริมาณรวมกันสูงกว่า 5,000 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งหากสามารถควบคุมระดับน้ำไว้หน้าเขื่อนได้จะสามารถลดปริมาณน้ำระบายส่วนเกินนี้ลง ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอให้มีการปรับเปลี่ยนการจัดสรรน้ำที่เขื่อนเจ้าพระยาโดยการเพิ่มระดับเก็บกักในฤดูฝนเพื่อปรับลดปริมาณการระบายน้ำส่วนเกิน (Excessive Water) สำหรับเอาไว้ใช้ในหน้าแล้งดังแสดงในตารางที่ 4-48 และยังเป็น การลดการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำทั้งเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ลงจากเดิม

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

ตารางที่ 4-48 ระดับน้ำเก็บกักที่แนะนำสำหรับลดปริมาณน้ำที่ระบายส่วนเกิน

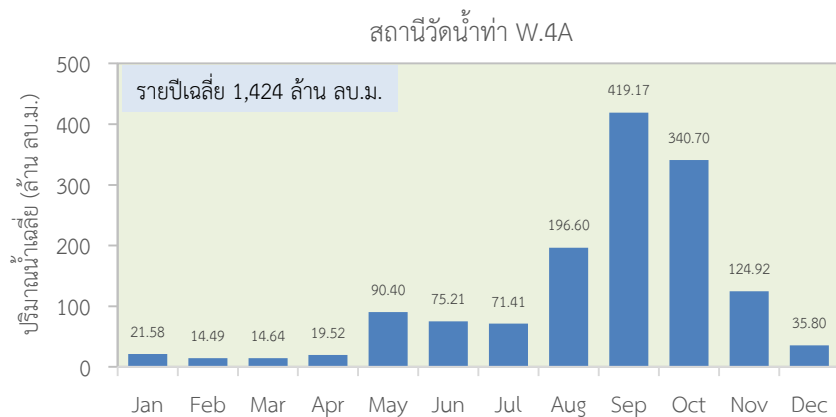
ระดับน้ำเก็บกักที่แนะนำ	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน
ระดับน้ำเก็บกักหน้าเขื่อน (เมตร รทก.)	15.80	16.25-16.50 (+0.50 ถึง +0.70)

4.4.3 แนวทางที่ 3 : การพิจารณา Sidelow ในการกำหนดการระบายน้ำ

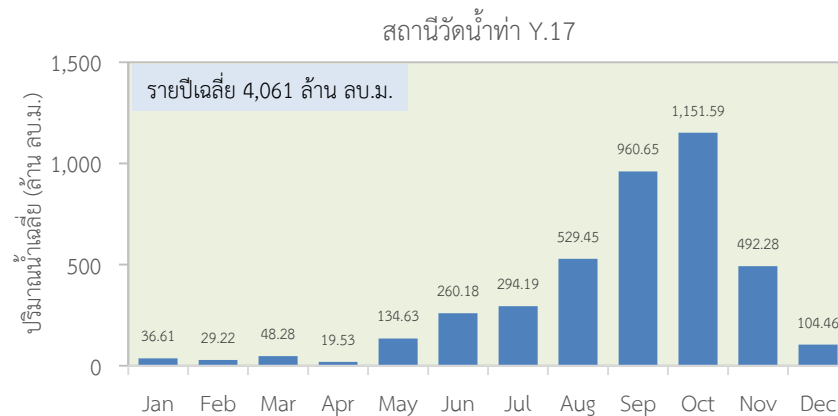
จากการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณ Sidelow รายวันในระบบลุ่มน้ำของ 5 สถานีวัดน้ำท่าโดยครอบคลุมแม่น้ำสายหลักที่สำคัญได้แก่ (1) สถานี W.4A แม่น้ำวัง (2) สถานี Y.17 แม่น้ำยม (3) สถานี N.22A แม่น้ำน่าน (4) สถานี CT.2A แม่น้ำสะแกกรัง และ (5) สถานี S.9 แม่น้ำป่าสัก ดังแสดงรายละเอียดของข้อมูลในตารางที่ 4-49 โดยมีปริมาณ Sidelow รายปีเฉลี่ยสูงถึง 8,765 ล้านลูกบาศก์เมตร ลักษณะการกระจายตัวของปริมาณ Sidelow รายเดือนเฉลี่ยของแต่ละสถานีแสดงในรูปที่ 4-107 ถึงรูปที่ 4-111 และเฉลี่ยรายเดือนและรายปีของทุกสถานีแสดงในรูปที่ 4-112 และรูปที่ 4-113 ซึ่งพบว่า 78.29% ของปริมาณ Sidelow ทั้งหมดเกิดขึ้นในช่วงฤดูฝนระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม และเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการระบายน้ำส่วนเกินท้ายเขื่อนเจ้าพระยาในช่วงฤดูฝนที่ค่อนข้างสูง ด้วยเหตุนี้ หากมีการปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลและสิริกิติ์ด้วยการพิจารณาปริมาณ Sidelow มาประกอบการตัดสินใจปล่อยน้ำที่เหมาะสม จะเป็นการช่วยประหยัดในน้ำเขื่อนและเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักของเขื่อนทั้งสองได้

ตารางที่ 4-49 ระดับน้ำเก็บกักที่แนะนำสำหรับลดปริมาณน้ำที่ระบายส่วนเกิน

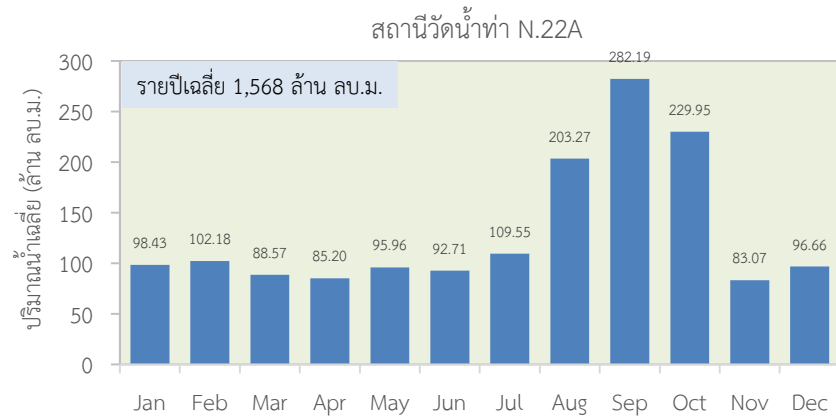
รหัสสถานี	ตำแหน่ง	แม่น้ำ	ช่วงข้อมูล	ปริมาณ Sidelow รายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)
W.4A	ต.วังหมัน อ.สามเงา จ.ตาก	วัง	2543-2561	1,424.45
Y.17	อ.สามง่าม จ.พิจิตร	ยม	2543-2561	4,061.08
N.22A	อ.วัดโบสถ์ จ.พิษณุโลก	แควน้อย	2550-2561	1,567.75
CT.2A	สะแกกรัง	สะแกกรัง	2548-2555	1,837.75
S.9	อ.แก่งคอย จ.สระบุรี	ป่าสัก	2543-2561	2,502.32



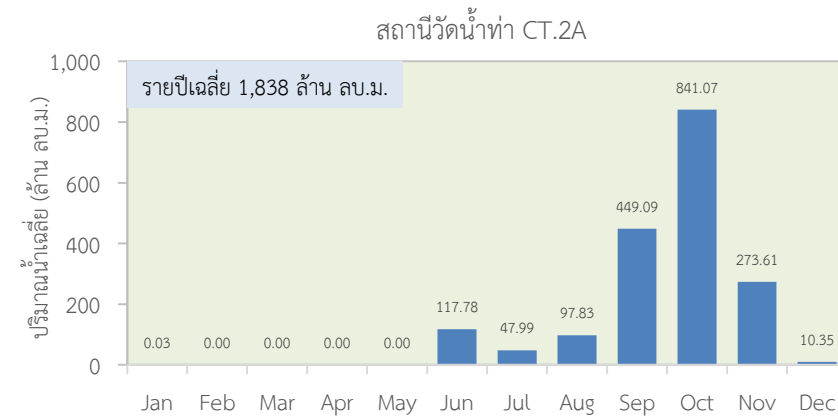
รูปที่ 4-107 การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณ Sideflow ของสถานีวัดน้ำท่า W.4A รายเดือนเฉลี่ย



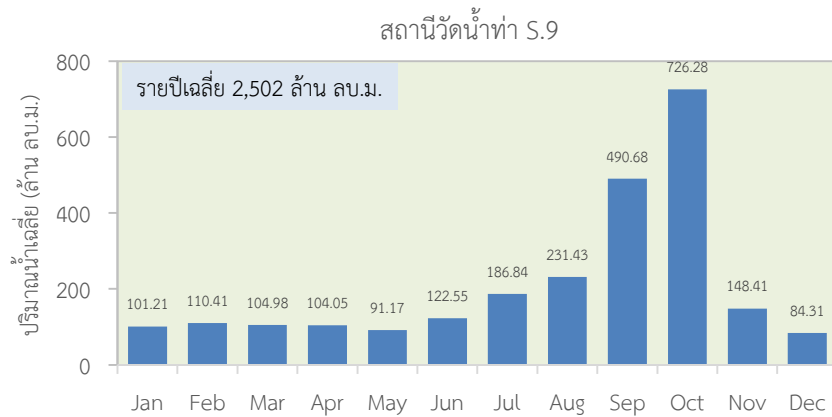
รูปที่ 4-108 การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณ Sideflow ของสถานีวัดน้ำท่า Y.17 รายเดือนเฉลี่ย



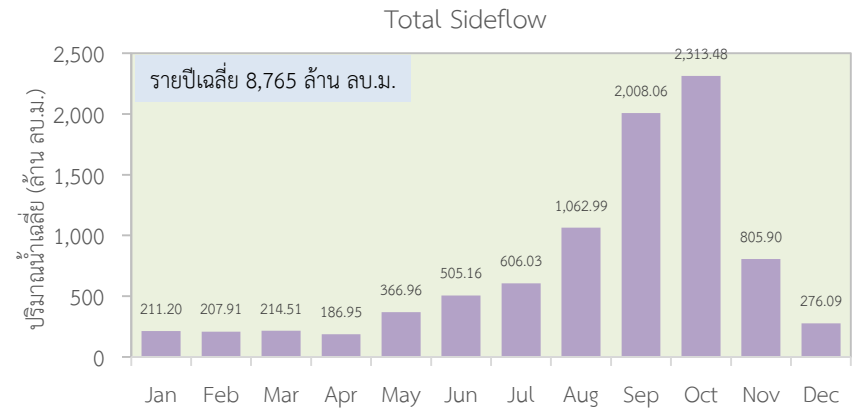
รูปที่ 4-109 การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณ Sideflow ของสถานีวัดน้ำท่า N.22A รายเดือนเฉลี่ย



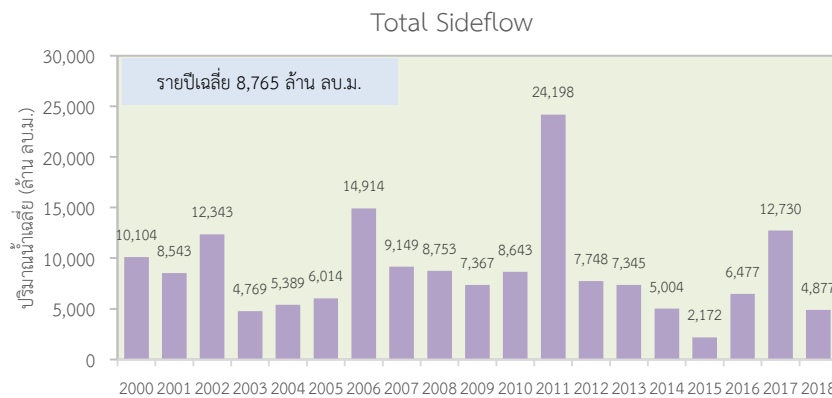
รูปที่ 4-110 การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณ Sideflow ของสถานีวัดน้ำท่า CT.2A รายเดือนเฉลี่ย



รูปที่ 4-111 การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณ Sideflow ของสถานีวัดน้ำท่า S.9 รายเดือนเฉลี่ย



รูปที่ 4-112 การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณ Sideflow ของสถานีวัดน้ำท่าทุกสถานีรายเดือนเฉลี่ย



รูปที่ 4-113 การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณ Sideflow ของสถานีวัดน้ำท่าทุกสถานีรายปีเฉลี่ย

4.4.4 แนวทางที่ 4 : การพัฒนาแบบจำลองเพื่อปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์

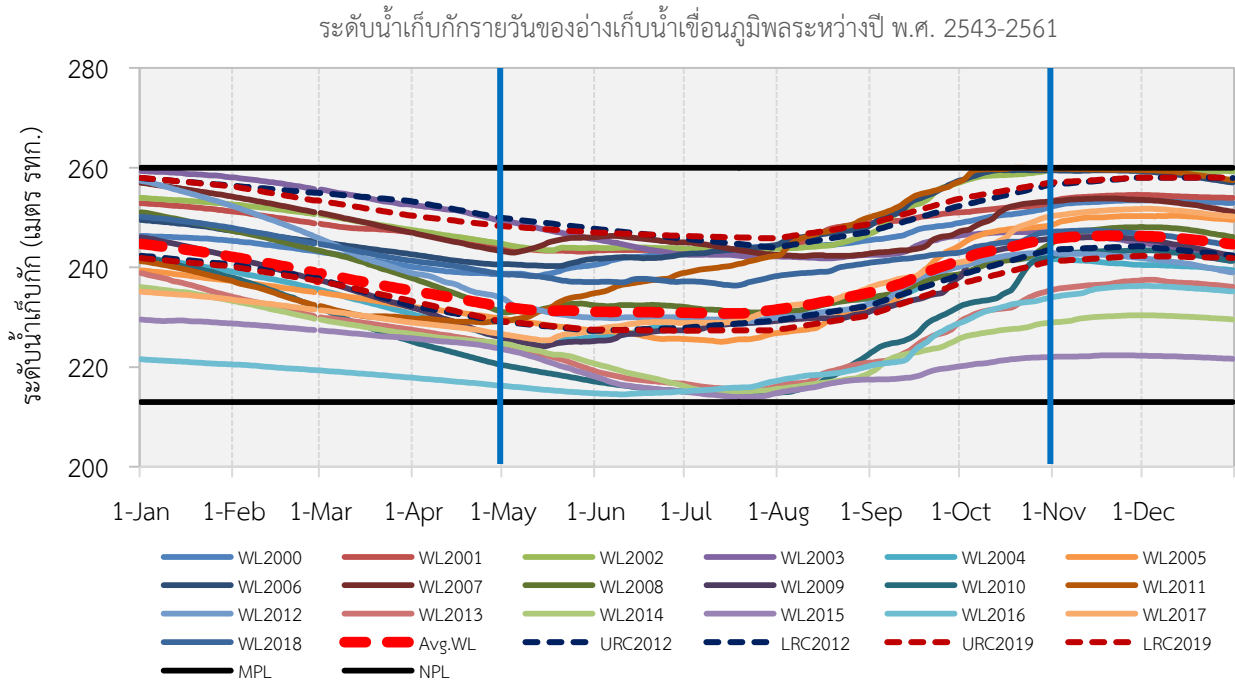
งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางการปรับเปลี่ยนการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลรูปแบบใหม่เพื่อเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักให้เพิ่มขึ้นด้วย 4 แนวทางหลักได้แก่ แนวทางที่ 1 โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่ (Adapted Rule Curve) แนวทางที่ 2 นโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging (Hedging Policy) แนวทางที่ 3 ประกอบด้วย 3 แนวทางย่อยได้แก่ (3.1) แบบจำลองฟัซซี่ (Conventional Fuzzy Model) (3.2) แบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model) และ (3.3) แบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟัซซี่แบบปรับตัวได้และเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model with Reinforce Learning) และแนวทางที่ 4 แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Stochastic Constraint Programming with Machine Learning) ซึ่งรายละเอียดของผลการศึกษาแสดงในหัวข้อ 4.8

4.5 ศักยภาพในการเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ในอนาคต

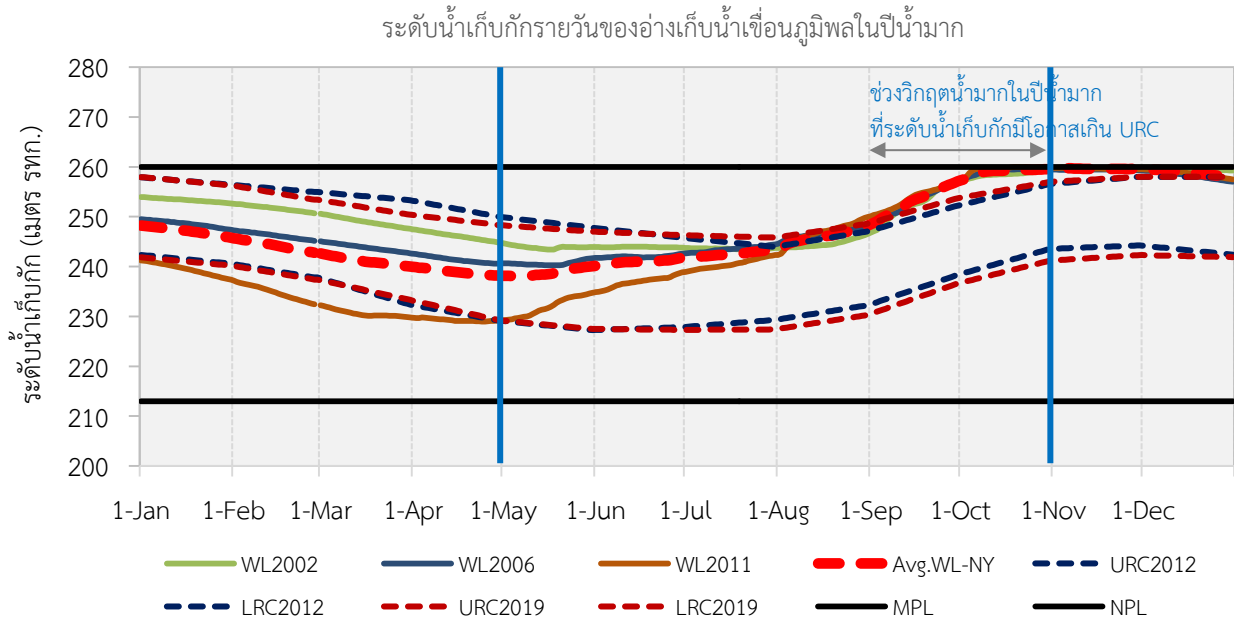
จากการวิเคราะห์ศักยภาพของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและสิริกิติ์ในการเพิ่มการเก็บกักน้ำ หากมีการปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ในอนาคตโดยนำฐานข้อมูลระดับน้ำเก็บกักตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2561 มาเปรียบเทียบกับโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) ปี พ.ศ. 2545 และปี พ.ศ. 2562 โดยทำการวิเคราะห์ใน 2 ลักษณะคือ การปฏิบัติการระยะยาว (Long Term Operation) และการปฏิบัติการระยะสั้น (Short Term Operation) แยกตามปีน้ำ ได้แก่ ปีน้ำมาก (Wet Year) ปีน้ำปกติ (Normal Year) และปีน้ำน้อย (Dry Year) ให้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4-50 และรูปที่ 4-114 ถึงรูปที่ 4-117 สำหรับเขื่อนภูมิพล และแสดงผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4-51 และรูปที่ 4-118 ถึงรูปที่ 4-121 สำหรับเขื่อนสิริกิติ์

ตารางที่ 4-50 เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล

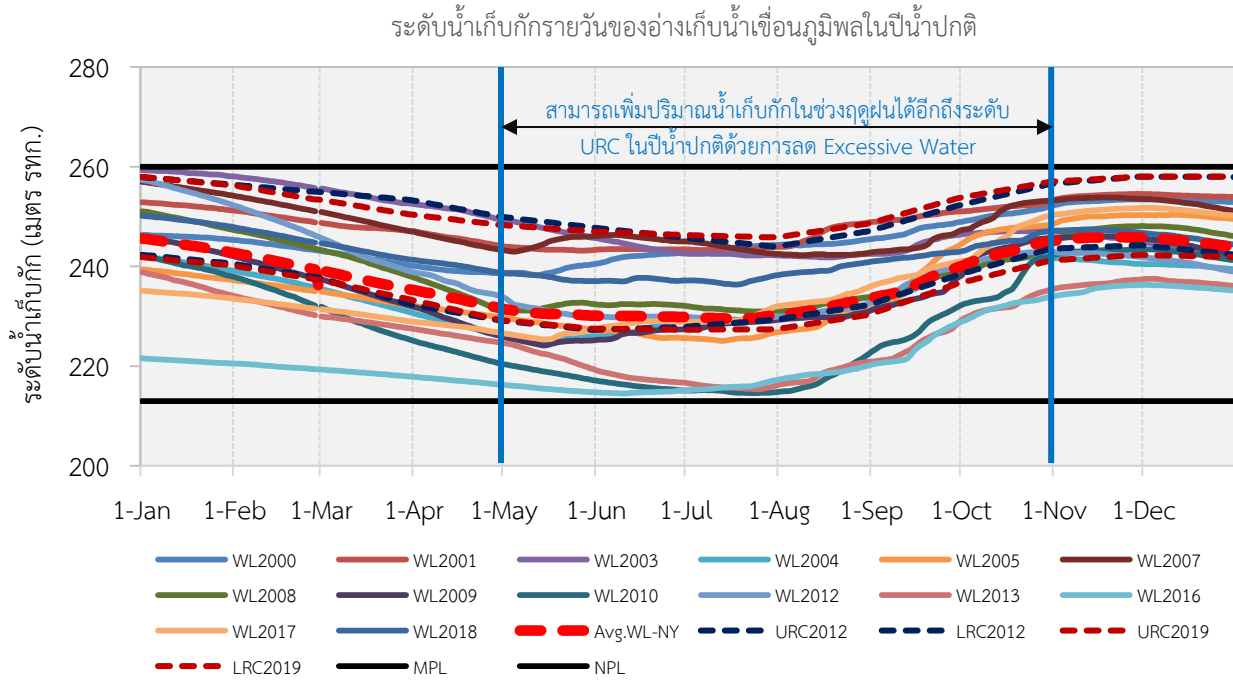
ลักษณะการปฏิบัติการ	ปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่ (%ปริมาตรเก็บกักใช้การ)	
	ต้นฤดูฝน (1 พ.ค.)	ต้นฤดูแล้ง (1 พ.ย.)
ระยะยาว	40.75	69.64
ระยะสั้น		
-ปีน้ำมาก	53.57	99.16
-ปีน้ำปกติ	39.33	68.37
-ปีน้ำน้อย	23.69	26.63



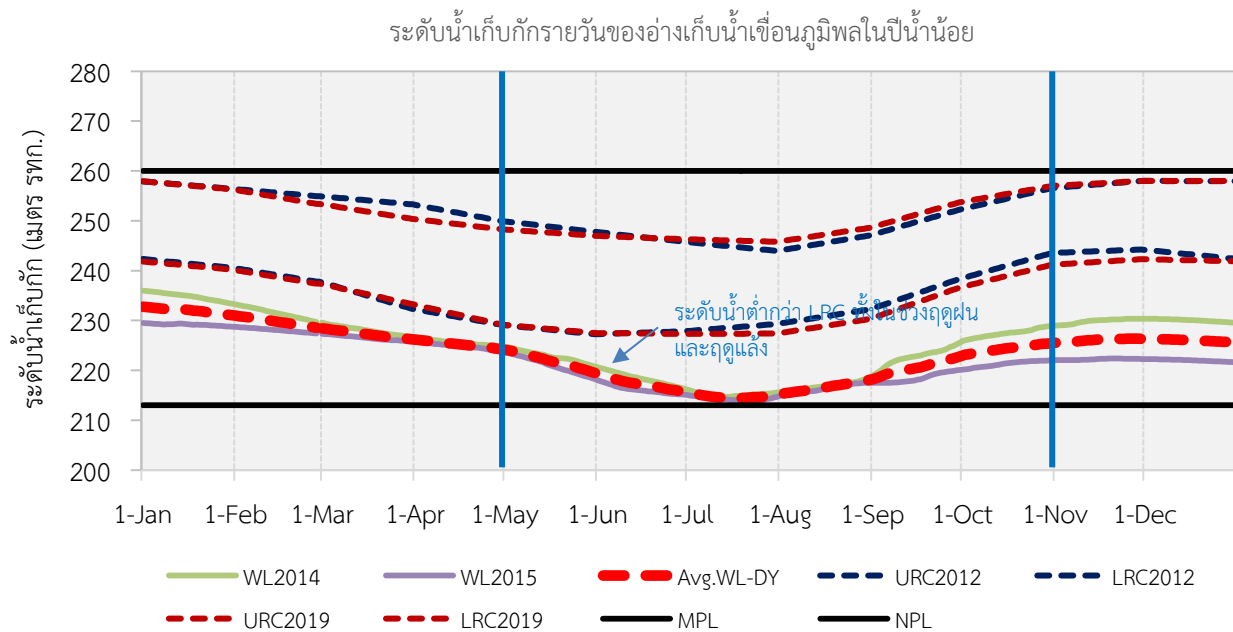
รูปที่ 4-114 ระดับน้ำเก็บกักรายวันของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561



รูปที่ 4-115 ระดับน้ำเก็บกักรายวันของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในปีน้ำมาก



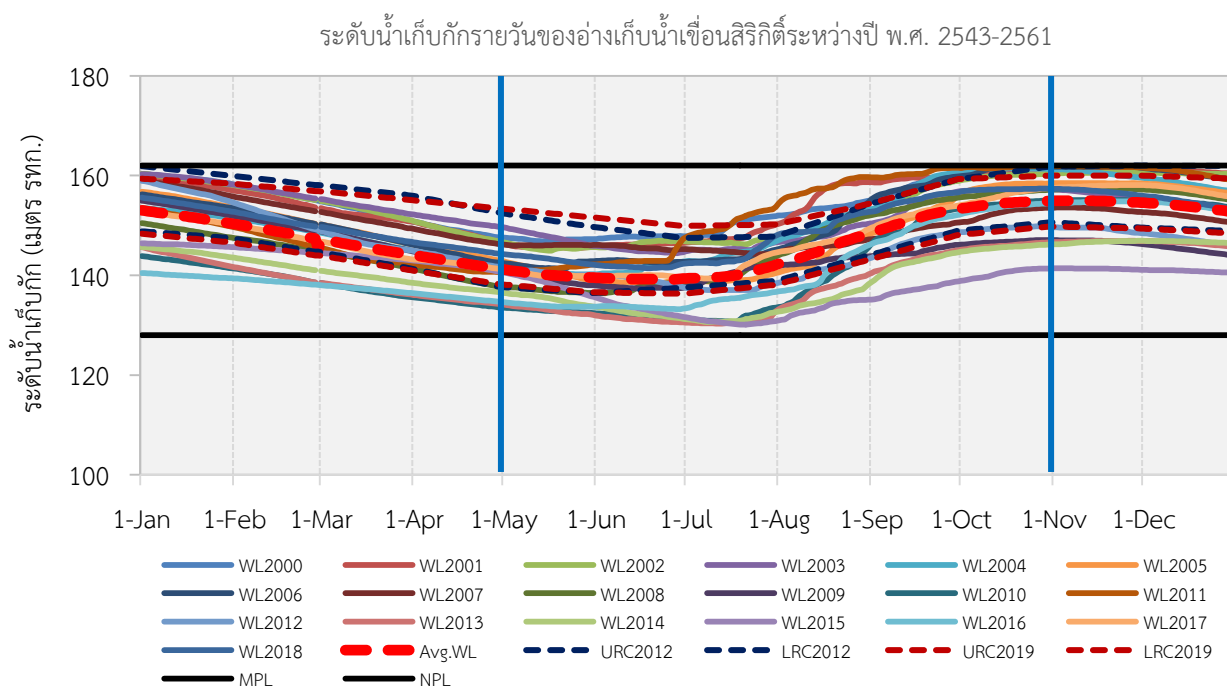
รูปที่ 4-116 ระดับน้ำเก็บกักรายวันของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในปีน้ำปกติ



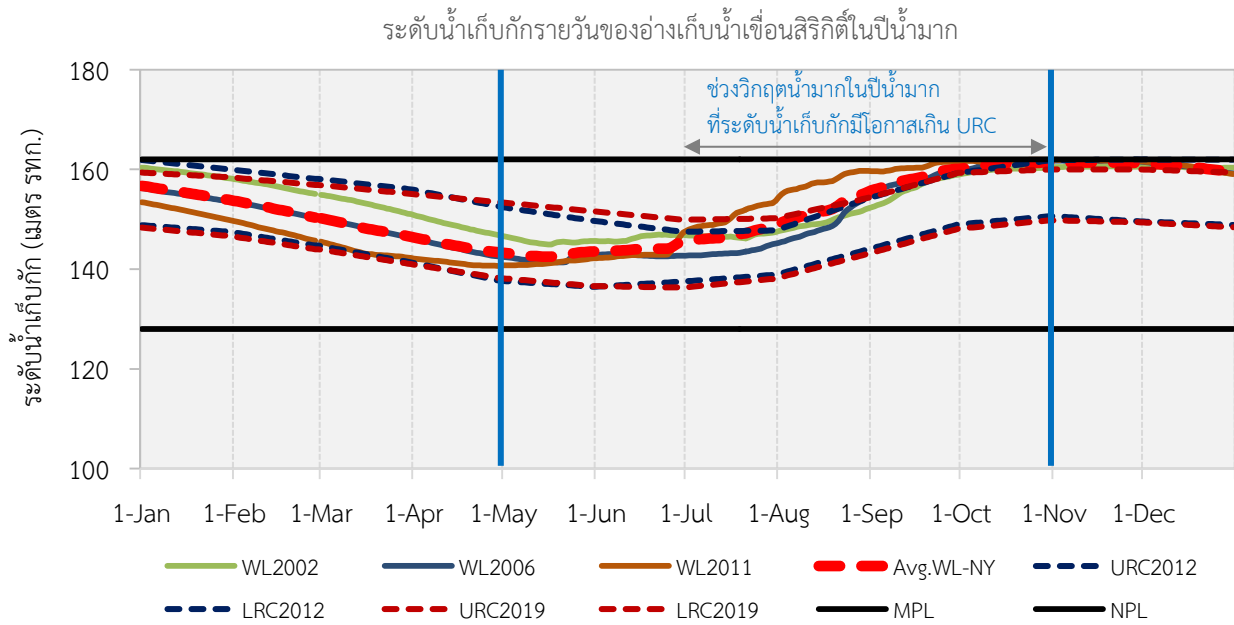
รูปที่ 4-117 ระดับน้ำเก็บกักรายวันของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในปีน้ำน้อย

ตารางที่ 4-51 เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์

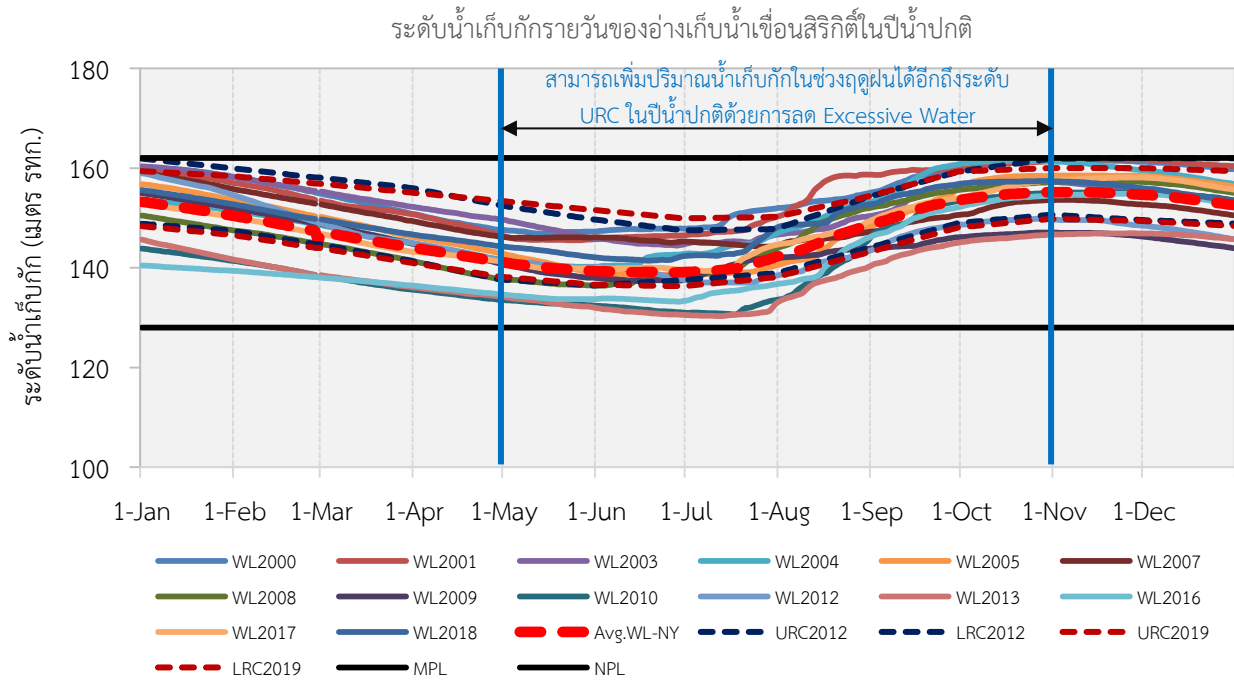
ลักษณะการปฏิบัติการ	ปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่ (%ปริมาณเก็บกักใช้การ)	
	ต้นฤดูฝน (1 พ.ค.)	ต้นฤดูแล้ง (1 พ.ย.)
ระยะยาว	38.71	79.22
ระยะสั้น		
-ปีน้ำมาก	44.89	98.25
-ปีน้ำปกติ	38.46	79.86
-ปีน้ำน้อย	31.03	46.50



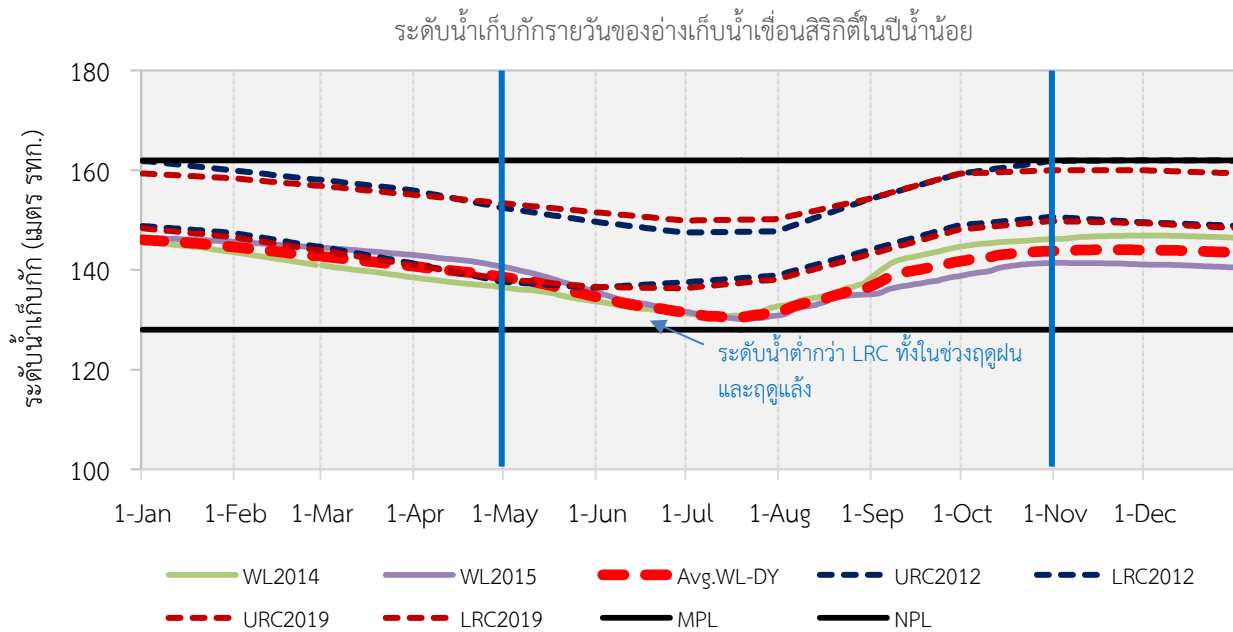
รูปที่ 4-118 ระดับน้ำเก็บกักรายวันของอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561



รูปที่ 4-119 ระดับน้ำเก็บกักรายวันของอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำมาก

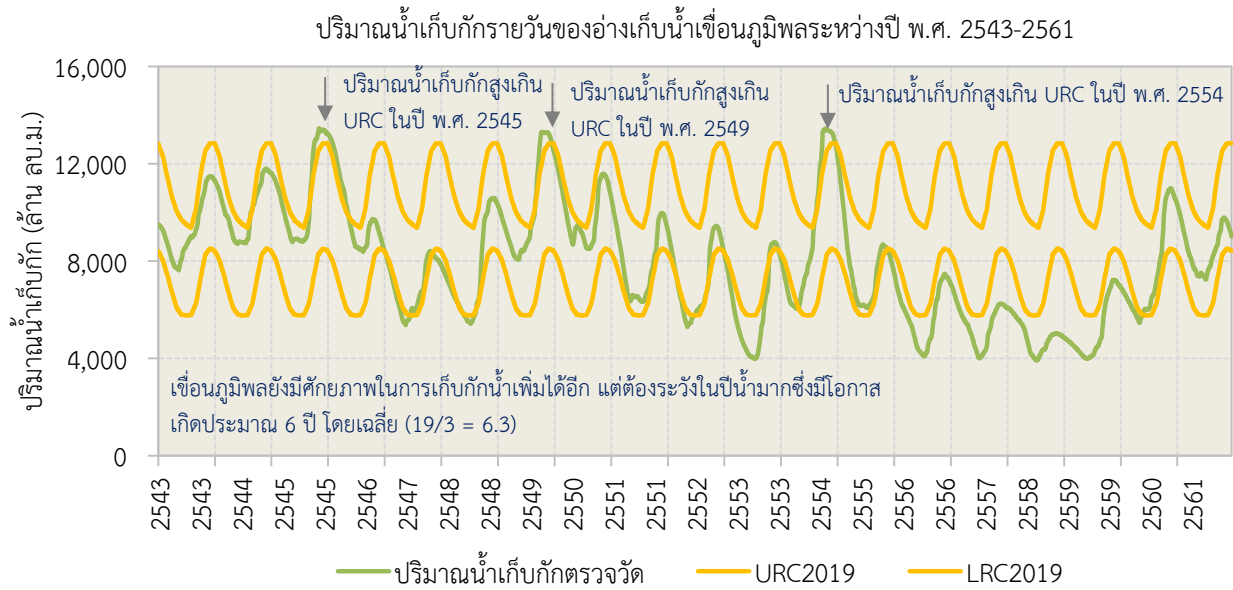


รูปที่ 4-120 ระดับน้ำเก็บกักรายวันของอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำปกติ

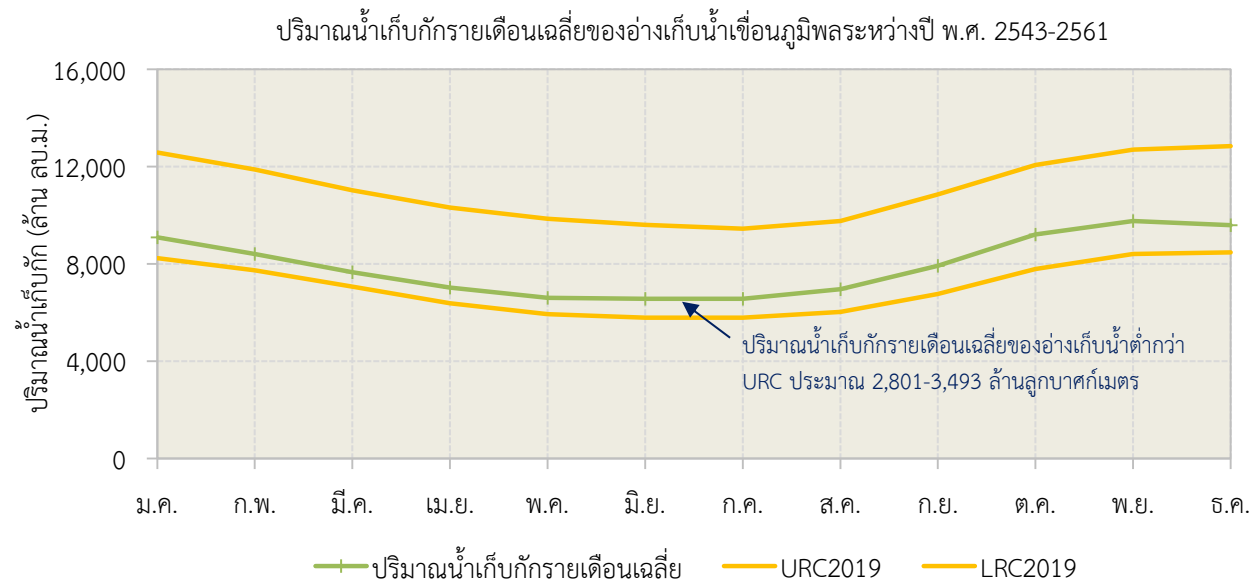


รูปที่ 4-121 ระดับน้ำเก็บกักรายวันของอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์ในปีน้ำน้อย

จากข้อมูลที่แสดงข้างต้นแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของอ่างเก็บน้ำทั้งสองเขื่อนในการเพิ่มการเก็บกักน้ำเพิ่มโดยเฉพาะในช่วงฤดูฝนของปีน้ำปกติที่ระดับเก็บกักเฉลี่ยยังไม่เกินระดับ URC ทั้งเขื่อนภูมิพลและสิริกิติ์ ในขณะที่ในปีน้ำมากจะต้องมีการควบคุมระดับน้ำไม่ให้เกินระดับ URC โดยเฉพาะในเดือนกันยายนและเดือนตุลาคมที่ระดับน้ำมีโอกาสที่จะเกินระดับ URC สำหรับเขื่อนภูมิพล และตั้งแต่เดือนกรกฎาคมถึงเดือนตุลาคมสำหรับเขื่อนสิริกิติ์ ยิ่งไปกว่านั้น ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำเก็บกักรายวัน รายเดือนเฉลี่ย และรายวันเฉลี่ยพบว่าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลยังสามารถเก็บกักน้ำได้ตั้งแต่ในช่วง 2,709-4,153 ล้านลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4-122 ถึงรูปที่ 4-124

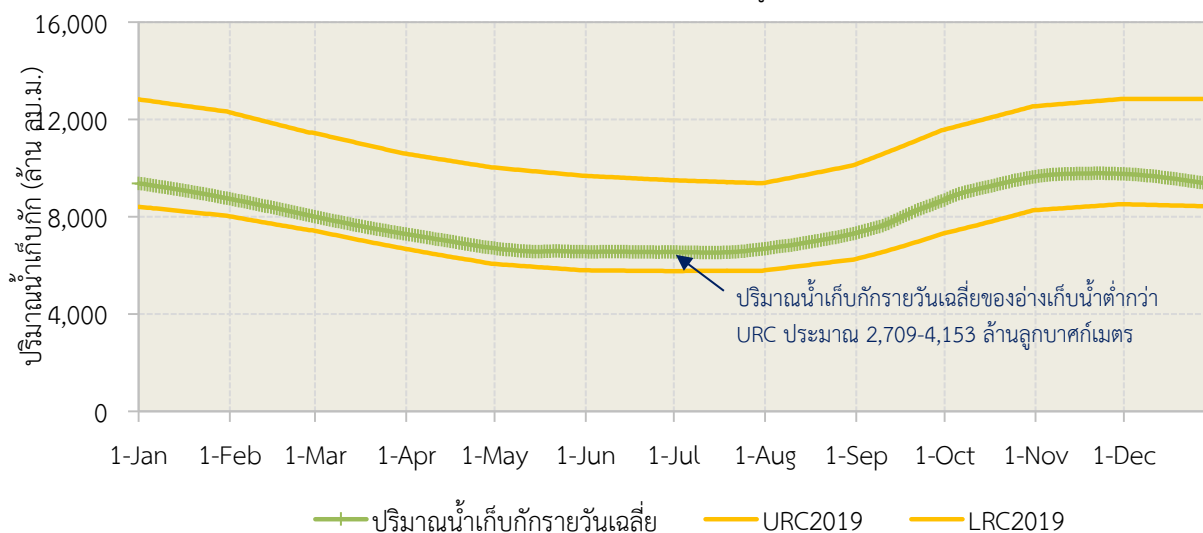


รูปที่ 4-122 ปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561



รูปที่ 4-123 ปริมาณน้ำเก็บกักรายเดือนเฉลี่ยของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561

ปริมาณน้ำเก็บกักรายวันเฉลี่ยของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561



รูปที่ 4-124 ปริมาณน้ำเก็บกักรายวันเฉลี่ยของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561

4.6 ผลการพัฒนากลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลรูปแบบใหม่

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการพัฒนากลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ (Reservoir Re-Operation) เพื่อเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักรายวันเฉลี่ยของเขื่อนภูมิพลในช่วงต้นฤดูแล้งระยะยาวให้สูงขึ้น 15% โดยนำเสนอใน 4 แนวทางหลักได้แก่ แนวทางที่ 1 โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่ (Adapted Rule Curve) แนวทางที่ 2 นโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging (Hedging Policy) แนวทางที่ 3 ประกอบด้วย 3 แนวทางย่อยได้แก่ (3.1) แบบจำลองฟัซซี่ (Conventional Fuzzy Logic Model, FL) (3.2) แบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model, ANFIS) และ (3.3) แบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟัซซี่แบบปรับตัวได้และเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model with Reinforce Learning, ANFIS with RL) และแนวทางที่ 4 แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Stochastic Constraint Programming with Machine Learning) ผลการพัฒนาแบบจำลองในแต่ละแนวทางมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

4.6.1 แนวทางที่ 1 โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่ (Adapted Rule Curve)

แนวทางที่ 1 เป็นความพยายามที่จะพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operation Model) เพื่อจำลองผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำระยะยาวของเขื่อนภูมิพลด้วยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่ปรับค่าใหม่ (Adapted Rule Curve) ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบกับโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน (Current Rule Curve) ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การพัฒนาแบบจำลองอาศัยกล่องเครื่องมือ Simulink MATLAB มาช่วยในการพัฒนาโดยออกแบบให้มีองค์ประกอบ 4 ส่วนหลัก ได้แก่

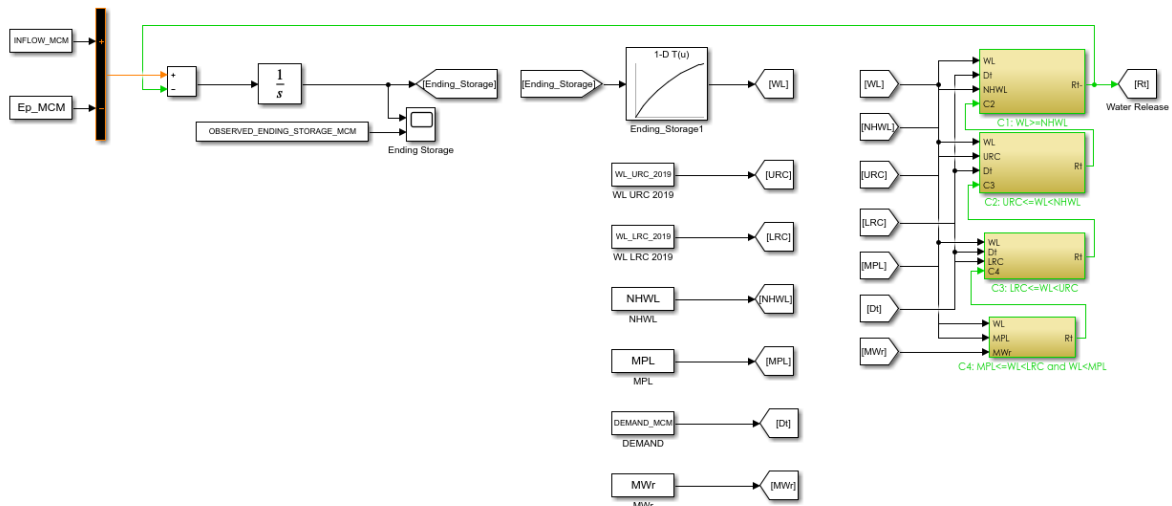
ส่วนที่ 1 ส่วนของข้อมูลนำเข้า (Data Entry) เป็นการจัดเตรียมข้อมูลนำเข้าทั้งในรูปของอนุกรมเวลาและข้อมูลค่าคงที่เฉพาะประกอบด้วย ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำรายวันตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2561 ข้อมูลสภาพของอ่างเก็บน้ำ และข้อมูลโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ

ส่วนที่ 2 ส่วนของระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operation Sytem) เป็นส่วนที่ประยุกต์ใช้สมการสมดุลอ่างเก็บน้ำในการกำหนดการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำที่เวลาต่าง ๆ โดยอาศัยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Current Rule Curve) และโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่ปรับค่าใหม่ (Adapted Rule Curve) และอาศัยข้อมูลนำเข้าจากส่วนที่ 1

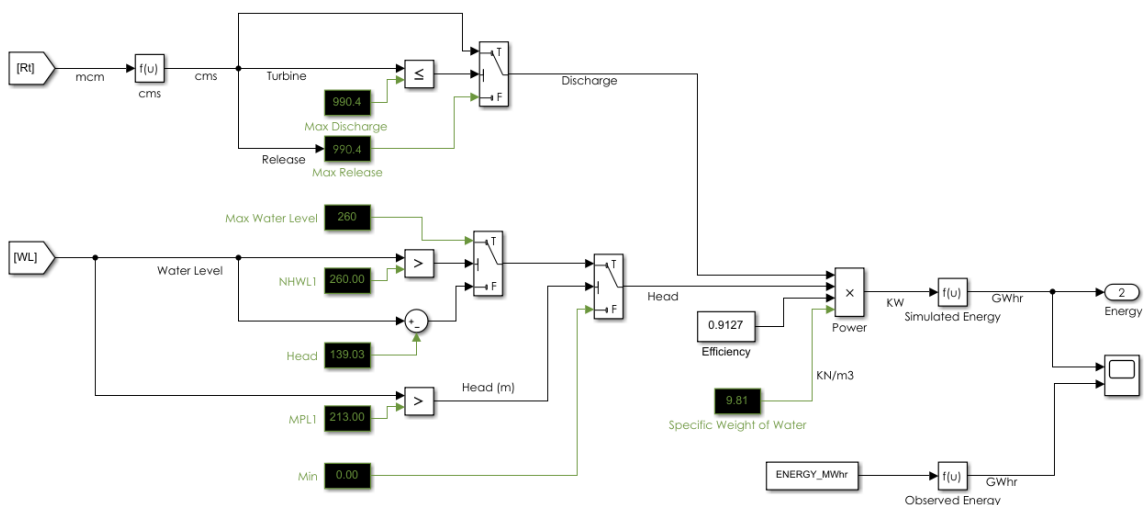
ส่วนที่ 3 ส่วนของการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (Hydropower Production) เป็นส่วนที่ประยุกต์ใช้สมการการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่เป็นผลจากการระบายน้ำด้วยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่กล่าวมาข้างต้นในส่วนที่ 2

ส่วนที่ 4 ส่วนของดัชนีประเมินผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Performance Indicator) เป็นส่วนที่ประเมินประสิทธิภาพในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำด้วยดัชนีชี้วัดที่สำคัญ เช่น ดัชนีความน่าเชื่อถือได้ (Reliability Indicator) ดัชนีวัดความรุนแรง (Vulnerability Indicator) และดัชนีวัดการฟื้นตัวของระบบ (Resiliency Indicator) เป็นต้น

สำหรับผลการพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแสดงดังรูปที่ 4-125 ถึงรูปที่ 4-127

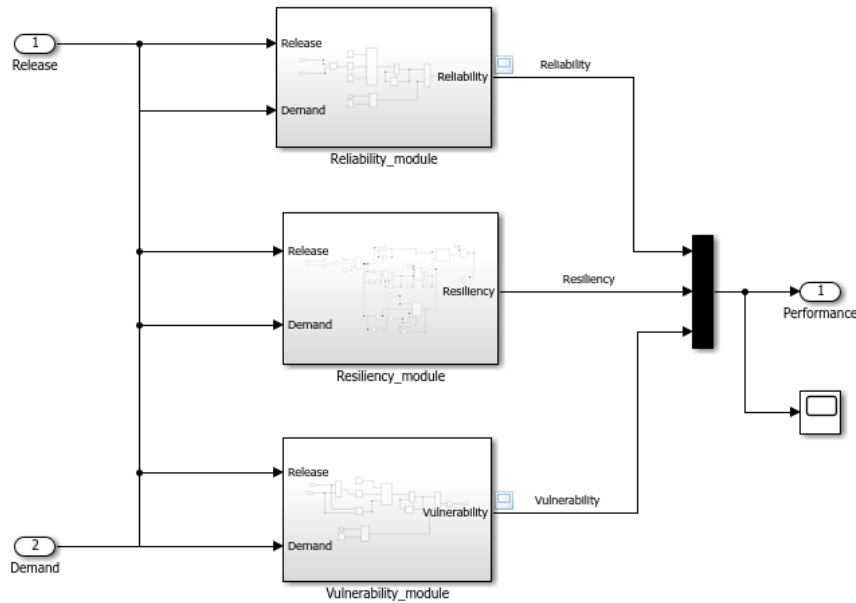


รูปที่ 4-125 แบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลด้วยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ และโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่ปรับค่าใหม่



รูปที่ 4-126 การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพล

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562



รูปที่ 4-127 ดัชนีแสดงผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพล

4.6.2 แนวทางที่ 2 นโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging (Hedging Policy)

นโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging เป็นเครื่องมือที่นิยมนำไปใช้ในการบริหารจัดการน้ำในอ่างเก็บน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูแล้งที่มีน้ำต้นทุนน้อย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเป็นการบริหารจัดการการขาดน้ำ ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอนโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging มาช่วยในการจัดการน้ำต้นทุนของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลร่วมด้วย โดยการพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำด้วยนโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging ได้แก่ One-Point Hedging, Two-Point Hedging, Three-Point Hedging และ Zone-Based Hedging โดยอาศัยกล่องเครื่องมือ Simulink MATLAB ในทำนองเดียวกัน การพัฒนาแบบจำลองได้ออกแบบให้มีองค์ประกอบ 4 ส่วนหลัก ได้แก่

ส่วนที่ 1 ส่วนของข้อมูลนำเข้า (Data Entry) เป็นการเตรียมข้อมูลนำเข้าทั้งในรูปของอนุกรมเวลา และข้อมูลค่าคงที่เฉพาะประกอบด้วย ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำรายวันตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2561 ข้อมูลสภาพของอ่างเก็บน้ำ และข้อมูลโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ

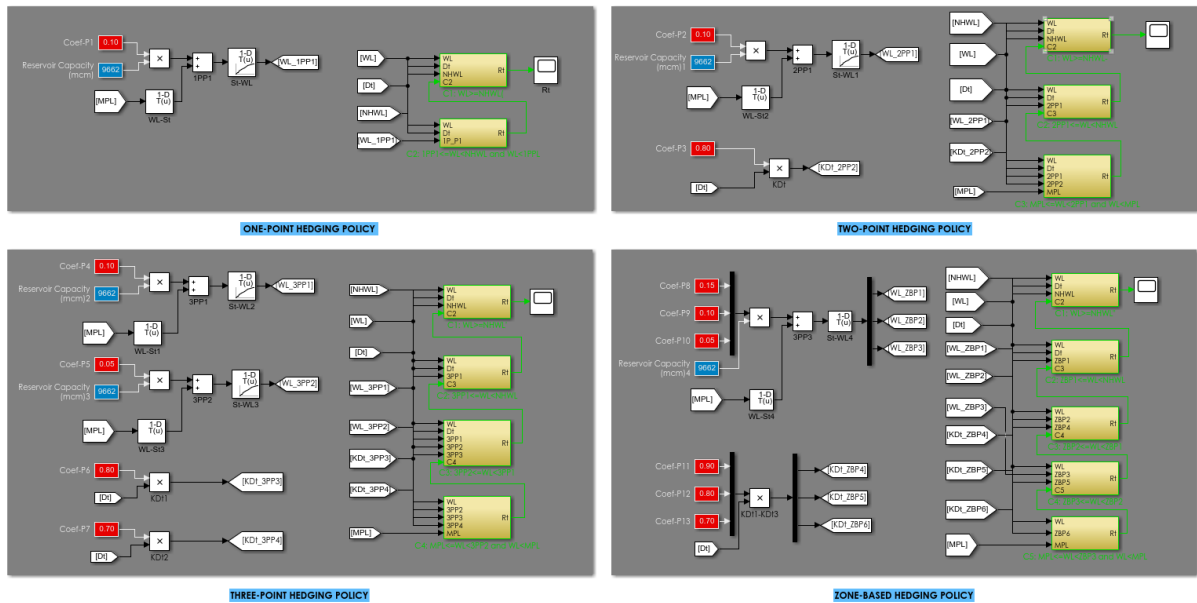
ส่วนที่ 2 ส่วนของระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operation System) เป็นส่วนที่ประยุกต์ใช้สมการสมดุลอ่างเก็บน้ำในการกำหนดการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำที่เวลาต่าง ๆ โดยอาศัยนโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging และอาศัยข้อมูลนำเข้าจากส่วนที่ 1

ส่วนที่ 3 ส่วนของการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (Hydropower Production) เป็นส่วนที่ประยุกต์ใช้สมการการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่เป็นผลจากการระบายน้ำด้วยนโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging ที่กล่าวมาข้างต้นในส่วนที่ 2

ส่วนที่ 4 ส่วนของดัชนีประเมินผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Performance Indicator) เป็นส่วนที่ประเมินประสิทธิภาพในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำด้วยดัชนีชี้วัดที่สำคัญ เช่น ดัชนีความน่าเชื่อถือได้ (Reliability Indicator) ดัชนีวัดความรุนแรง (Vulnerability Indicator) และดัชนีวัดการฟื้นตัวของระบบ (Resiliency Indicator) เป็นต้น

สำหรับผลการพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแสดงดังรูปที่ 4-128

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562



รูปที่ 4-128 แบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลนโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging

4.6.3 แนวทางที่ 3 แบบจำลองฟัซซี่ (Conventional Fuzzy Model) & แบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model) & แบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟัซซี่แบบปรับตัวได้และเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model with Reinforce Learning)

สำหรับกระบวนการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพล การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้ดำเนินการบริหารการระบายน้ำเป็น 2 แผน คือ (1) แผนการระบายน้ำในช่วงปกติ และ (2) แผนการระบายน้ำในช่วงอุทกภัย โดยช่วงปกติจะพิจารณาแผนการระบายน้ำเป็นรายสัปดาห์และรายวัน ข้อมูลปริมาณการใช้น้ำรายสัปดาห์จะถูกนำมาวางแผนเพื่อกำหนดเป็นแผนการระบายน้ำรายวันประจำแต่ละสัปดาห์ ในส่วนการระบายน้ำช่วงอุทกภัย พอจำแนกได้ 3 กรณี คือ กรณีที่ (1) หากระบบผลิตไฟฟ้ามีปัญหาจำเป็นต้องระบายน้ำมากกว่าแผนและจะควบคุมปริมาณน้ำในแม่น้ำปิงให้ไม่เกิน 1,200 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที กรณีที่ (2) หากเกิดสถานการณ์น้ำหลากจะเฝ้าระวังอย่างใกล้ชิดโดยพิจารณาระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำเป็นหลัก และจะนำข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้า (Reservoir Inflow) มาเป็นเกณฑ์กำหนดสัดส่วนการระบายน้ำ และกรณีที่ (3) หากเกิดภาวะความแห้งแล้งจะพิจารณาการระบายน้ำตามความเหมาะสมตามปริมาณน้ำที่มีอยู่

จากกระบวนการระบายน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยข้างต้น งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการเป็น 3 แนวทางได้แก่ (1) การพัฒนาแบบจำลองการระบายน้ำด้วยระบบฟัซซี่ลอจิก (Conventional Fuzzy Logic Model, FL) (2) การพัฒนาแบบจำลองการระบายน้ำด้วยเทคนิคนิวโรฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System, ANFIS) และ (3) การพัฒนาแบบจำลองหาค่าระบายน้ำที่ดีที่สุดด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning, RL)

MATLAB ได้ถูกเลือกเป็นเครื่องมือในการพัฒนาแบบจำลองโดยการเขียนชุดคำสั่งเป็น 2 ลักษณะ คือ (1) Simulink เป็นชุดเครื่องมือ (Toolbox) ที่ประกอบด้วย Block Diagram สำเร็จรูปต่าง ๆ การทำงานจะนำ Block มาต่อกันตามความต้องการ สามารถจำลองระบบเป็นเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้นโดยการป้อนอินพุต

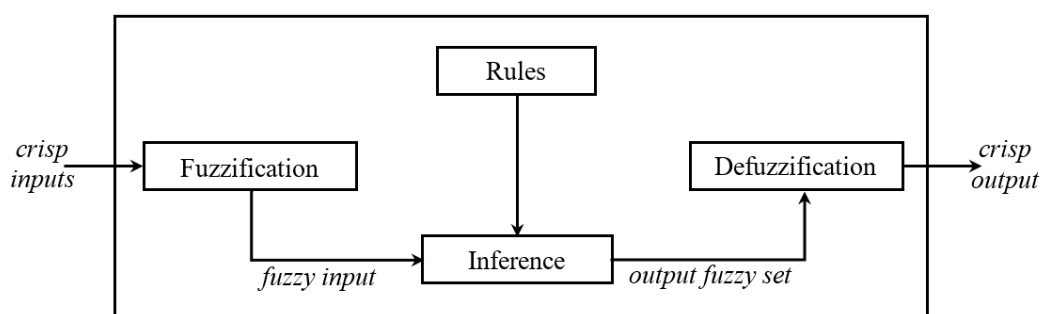
4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเขื่อนภูมิพล ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

ให้กับระบบ (2) การพัฒนาชุดคำสั่งแบบ Script M-Files และ M-Files Functions โปรแกรม MATLAB ถูกใช้เป็นเครื่องมือในการพัฒนาแบบจำลอง เทคนิคและวิธีการหลายด้าน เช่น ระบบปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบหลายวัตถุประสงค์ (Giuliani et al., 2016) พัฒนาแบบจำลองทางอุทกวิทยา (Romanowicz, 1997) การวิเคราะห์หอนุกรมเวลาทางทรัพยากรน้ำ (Wallot & Mønster, 2018) หรือพัฒนาแบบจำลองการใช้น้ำของพืช (ยูทธนา, 2554, Pamungkas et al., 2013) เป็นต้น

4.6.3.1 ผลการพัฒนาแบบจำลองการระบายน้ำด้วยระบบฟัซซีลอจิก (Conventional Fuzzy Logic Model, FL)

ระบบควบคุมแบบฟัซซี (Fuzzy Control System) เป็นระบบควบคุมที่เกี่ยวข้องกับความไม่แน่นอน ความไม่เที่ยงตรง ความคลุมเครือหรือไม่ชัดเจน (Zadeh, 1990) ซึ่งเป็นลักษณะทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นทั่วไป ระบบนี้ถูกพัฒนาจากพื้นฐานของทฤษฎีฟัซซีเซต (Zadeh, 1965) และถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมการควบคุมทางอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก สำหรับงานด้านวิศวกรรมชลประทานและทรัพยากรน้ำเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางอุทกวิทยา อุตุนิยมวิทยา อุทกธรณี ซึ่งส่วนใหญ่มีความซับซ้อนและไม่แน่นอน บางกระบวนการประเมินค่าได้ยาก ดังนั้น ระบบฟัซซีจึงถูกนำมาประยุกต์โดยเฉพาะงานจำลองระบบและงานประมาณค่าที่เหมาะสมที่สุดของระบบแหล่งน้ำ ทั้งนี้ เพื่อลดตัวแปรหรือความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลง งานวิจัยที่ปรากฏ เช่น การพัฒนาแบบจำลองควบคุมระบบส่งน้ำชลประทาน (Mokhtar et al., 2016) ระบบการควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติ (Anand et al., 2015, Touati et al., 2013) การพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ (Allawi et al., 2018) การประเมินสมรรถนะของระบบแหล่งน้ำ (Kumari & Mujumdar, 2017) หรือการประเมินค่าพารามิเตอร์ทางอุทกวิทยา (Li & Xuan, 2018) เป็นต้น

กระบวนการควบคุมระบบด้วยฟัซซีลอจิกมีองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน คือ (1) ส่วนการแปลงค่าตัวแปรอินพุตเป็นตัวแปรฟัซซีแบบฟังก์ชันสมาชิก (Fuzzification) (2) ส่วนการสร้างกฎการควบคุม (Rule-Based) (3) ส่วนกลไกการอนุมานค่า (Inference Engine) และ (4) ส่วนการแปลงตัวแปรฟัซซีเป็นตัวแปรเอาต์พุตของผลลัพธ์ (Defuzzification) ดังแสดงเป็นไดอะแกรมรูปที่ 4-129

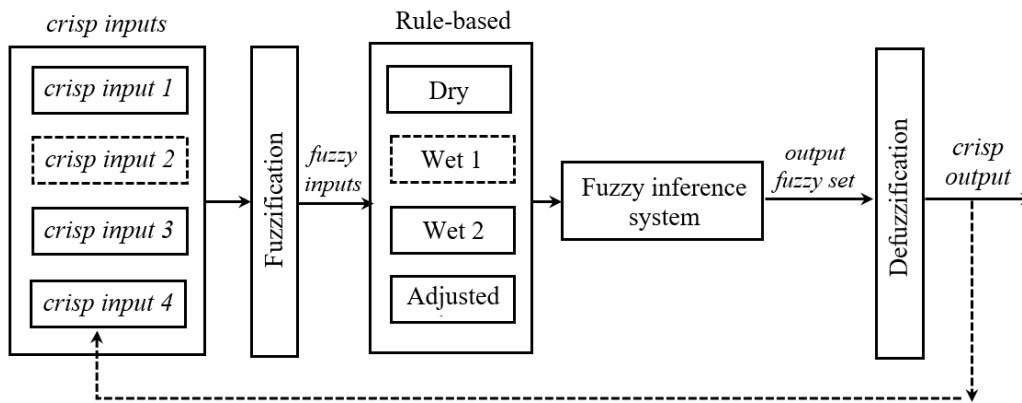


รูปที่ 4-129 ไดอะแกรมระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

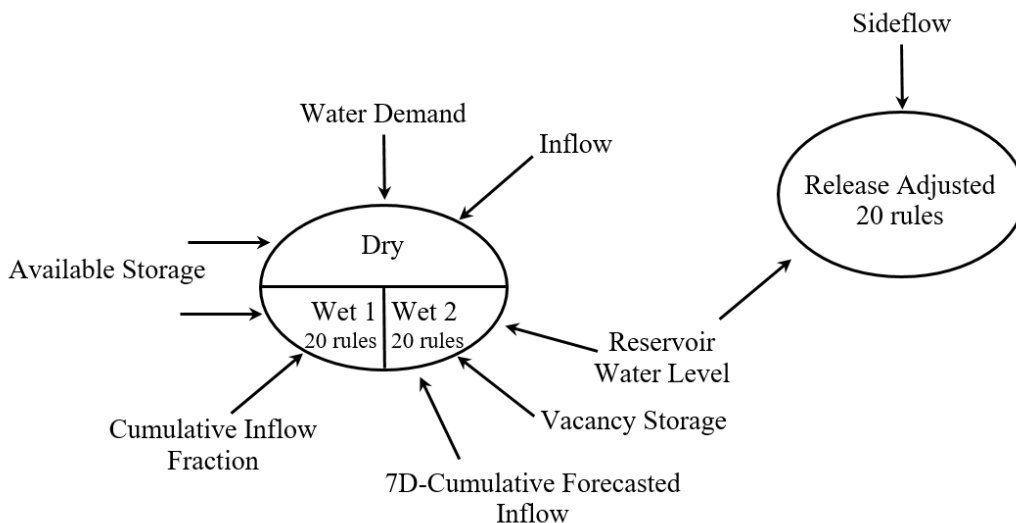
สำหรับแนวคิดในการออกแบบระบบระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลด้วยฟัซซีลอจิกเบื้องต้นได้พิจารณาจากรูปแบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนตามกระบวนการปกติ ซึ่งทางเขื่อนบริหารจัดการน้ำเป็น 2 ช่วง คือ (1) ช่วงฤดูแล้ง (เริ่มต้นวันที่ 1 พฤศจิกายนของทุกปี) และช่วงฤดูฝน (เริ่มต้นวันที่ 1 พฤษภาคมของทุกปี) โดยทั้งสองช่วงจะพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน สำหรับในกรณีปกติ การระบายน้ำจะเป็นไปตามแผนการใช้น้ำ ส่วนหากเกิดกรณีฉุกเฉิน รูปแบบการระบายน้ำจะนำข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าและสภาพของน้ำในอ่างเก็บน้ำมาเป็นปัจจัยในการพิจารณาปริมาณน้ำที่ต้องระบายในแต่ละช่วงเวลาเพื่อลดความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น จาก

กระบวนการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลข้างต้น งานวิจัยนี้ได้ถูกนำมาออกแบบกฎการควบคุมการระบายน้ำรายวันแบบฟัซซีลอจิก (รูปที่ 4-130) โดยแบ่งช่วงเวลาในการออกแบบระบบเป็น 2 ช่วงเวลา คือ (1) กฎการควบคุมช่วงฤดูแล้ง (Dry Season, Dry) (เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 พฤศจิกายนจนถึง 30 เมษายน) มี 20 กฎในส่วนกฎการควบคุมช่วงฤดูฝน (Wet Season, Wet) (เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคมจนถึง 31 ตุลาคม) ทั้งนี้สำหรับกฎการควบคุมในช่วงฤดูฝน ได้จำแนกเป็นกฎย่อย 2 แบบ คือ Wet 1 และ Wet 2 โดยมีจำนวนกฎเท่ากับ 20 และ 100 กฎ ตามลำดับ ซึ่งจำนวนกฎที่มากขึ้นเกิดจากตัวแปรที่แตกต่างกัน และจำนวนฟังก์ชันสมาชิกไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4-131

สำหรับกฎการควบคุมแบบ Release Adjusted ออกแบบไว้สำหรับการปรับแก้ปริมาณการระบายน้ำให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดยจะนำตัวแปรอินพุตคือ ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ และสภาพน้ำในลำน้ำ (ใช้สภาพน้ำที่สถานีวัดน้ำท่า W.4A เป็นตัวแทนในการประเมินสภาพน้ำ) มาเป็นปัจจัยในการพิจารณาว่าปริมาณน้ำที่ระบายออกมาจากกฎการควบคุม Wet 2 จะถูกปรับลดหรือเพิ่มการระบายน้ำ จำนวนกฎการควบคุมมีทั้งหมด 20 กฎ

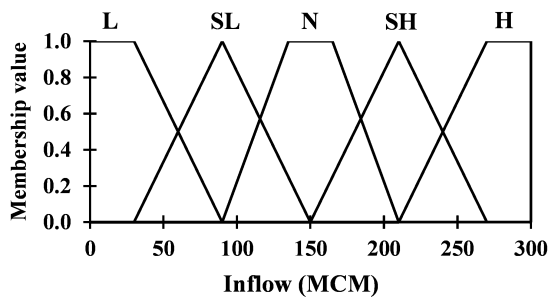


รูปที่ 4-130 ไดอะแกรมระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิกโมดูลที่ 1-3

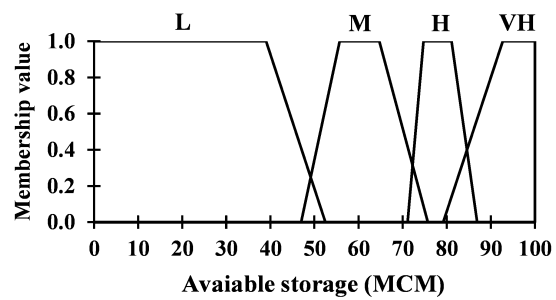


รูปที่ 4-131 ตัวแปรอินพุตของระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

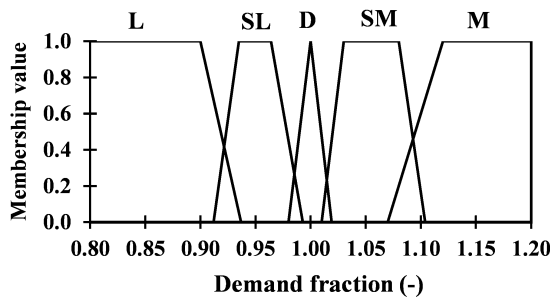
กำหนดฟังก์ชันสมาชิก (Membership Function) เป็นรูปสามเหลี่ยม (Triangular Shape) ร่วมกับรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoid Shape) ทั้งนี้ เนื่องจากรูปร่างทั้งสองง่ายต่อการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของฟังก์ชันสมาชิก ส่วนรูปร่างของข้อมูลเอาต์พุตของค่าการระบายน้ำมีลักษณะคล้ายกัน ดังแสดงรูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกดังรูปที่ 4-132 ถึงดังรูปที่ 4-134 เป็นต้น ตัวอย่างกฎการควบคุมสำหรับเงื่อนไข Dry-Period จำนวน 20 กฎ เช่น ถ้าปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำอยู่ในระดับปกติ (N) และถ้าปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่อยู่ในระดับสูง (H) แล้ว ระบายน้ำเป็นค่าน้ำหนักที่เทียบสัดส่วนกับปริมาณความต้องการน้ำอยู่ในระดับปานกลาง (M) เป็นต้น และตัวอย่างกฎการควบคุมสำหรับเงื่อนไข Release Adjusted จำนวน 20 กฎ เช่น ถ้าระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำอยู่ในระดับสูง (H) และถ้าสภาพน้ำที่สถานี W.4A สภาพมาก (H) แล้ว ให้ปรับการระบายน้ำลดลงในระดับ (R) เป็นต้น



(a) ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต-ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ

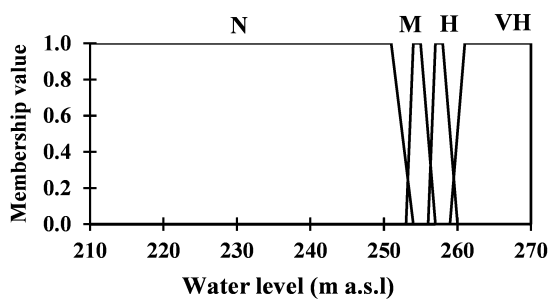


(b) ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต-ปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่

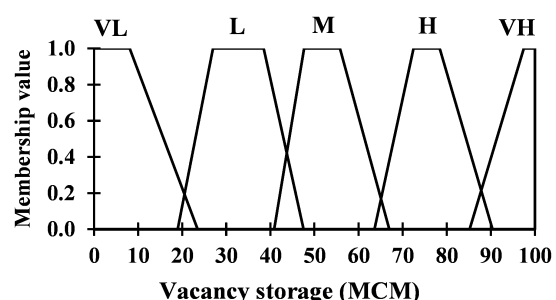


(c) ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต-ค่าสัดส่วนปริมาณความต้องการน้ำ

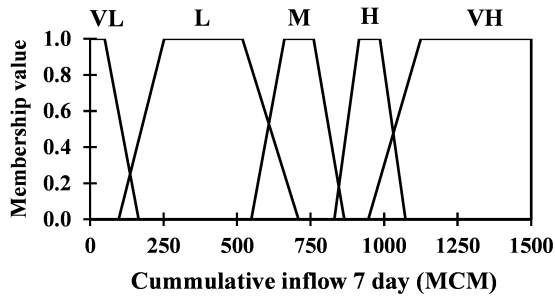
รูปที่ 4-132 ฟังก์ชันสมาชิกสำหรับกฎการควบคุมแบบ Dry-Period



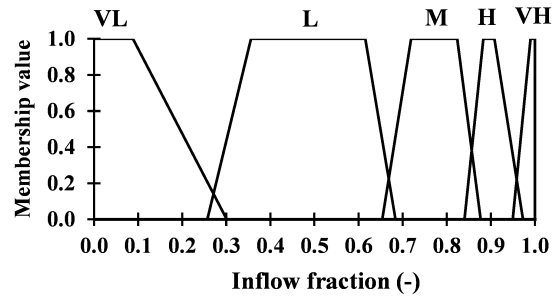
(a) ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต-ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ



(b) ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต-ปริมาตรว่างของอ่างเก็บน้ำ

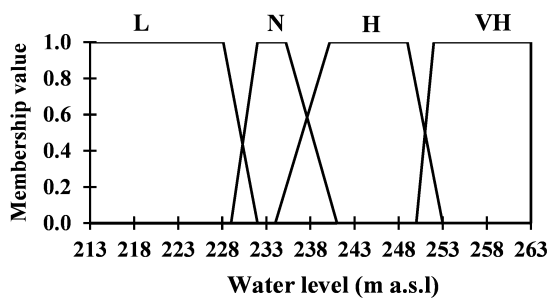


(c) ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต-ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ พยากรณ์สะสมที่เวลา 7 วันล่วงหน้า

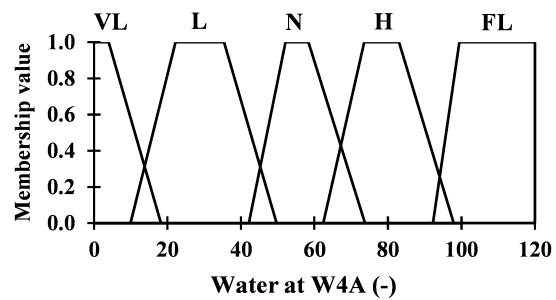


(d) ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต-ค่าสัดส่วนปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ

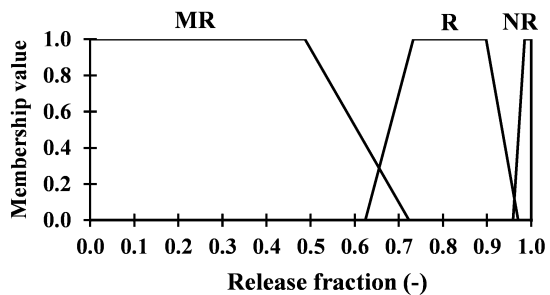
รูปที่ 4-133 ฟังก์ชันสมาชิกสำหรับกฎการควบคุมแบบ Wet-Period



(a) ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต-ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ



(b) ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต-สภาพน้ำที่สถานี W.4A



(c) ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต-ค่าสัดส่วนปริมาณการระบายน้ำ

รูปที่ 4-134 ฟังก์ชันสมาชิกสำหรับกฎการควบคุมแบบ Release Adjusted

4.6.3.1.1 การกำหนดรูปแบบของแบบจำลอง (Model Formulation)

จากแนวคิดในการออกแบบระบบระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลด้วยฟuzzy logic ข้างต้น งานวิจัยนี้ได้กำหนดกรอบการกำหนดรูปแบบของแบบจำลองฟuzzy (Conventional Fuzzy Model) ใน 2 ลักษณะคือ (1) กำหนดกฎฟuzzy แบบรายปี และ (2) กำหนดกฎฟuzzy แบบรายฤดูกาล โดยพัฒนาแบบจำลองฟuzzy 3 แบบจำลองที่มีตัวแปรนำเข้า (Input Variable) และกฎฟuzzy (Fuzzy Rule Base) แตกต่างกัน ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4-52

ตารางที่ 4-52 การกำหนดรูปแบบของแบบจำลองฟัซซี่

ลักษณะสำคัญ	รูปแบบของแบบจำลองฟัซซี่		
	แบบจำลองฟัซซี่ 1	แบบจำลองฟัซซี่ 2	แบบจำลองฟัซซี่ 3
ตัวแปรนำเข้า (Input Variables)			
ปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่ (Available Storage, St)	√	√ (Dry)	√ (Dry)
ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Inflow, It)	√	√ (Dry)	√ (Dry)
ค่าสัดส่วนปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำสะสม (Cumulative Inflow Fraction, Clt)		√ (Wet 1)	
ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำพยากรณ์สะสมที่เวลา 7 วันล่วงหน้า (7D Cumulative Forecasted Inflow, 7DIt)			√ (Wet 2)
ปริมาตรว่างของอ่างเก็บน้ำ (Vacancy Storage, Vt)			√ (Wet 2)
ระดับน้ำ (Water Level, WLt)			√ (Wet 2)
ตัวแปรนำออก (Output Variables)	ค่าสัดส่วนปริมาณการระบายน้ำ (Release Fraction) : 0–1.2 ของความต้องการน้ำ (Water Demand–Dry) และ 0–1.0 ของปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ (Inflow–Wet)		
ฟังก์ชันสมาชิก (Membership Function)	Piece–Wise Linear Membership Function 0–1		
กฎฟัซซี่ (Fuzzy Rule)	20 Fuzzy Rule Base		

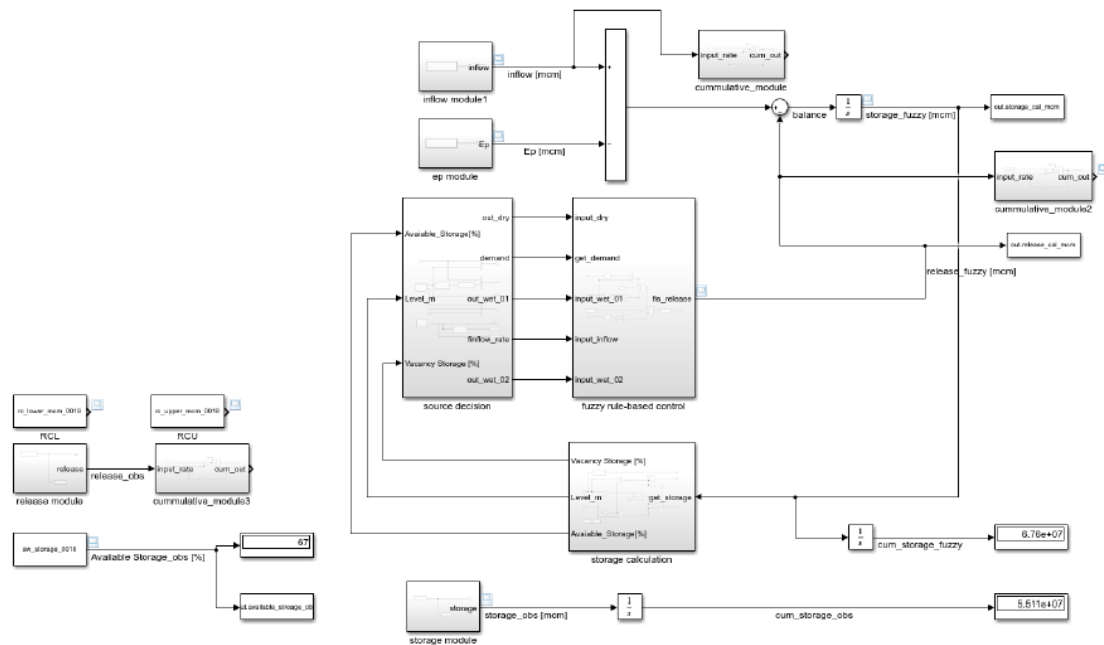
แบบจำลองฟัซซี่ 1 กำหนดรูปแบบของกฎฟัซซี่แบบรายปี ตัวแปรนำเข้าจำนวน 2 ตัวแปร ได้แก่ (1) ปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่ในช่วงเวลา t (Available Storage, St) และ (2) ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในช่วงเวลา t (Reservoir Inflow, It) ตัวแปรนำออกคือ ค่าสัดส่วนปริมาณการระบายน้ำ (Release Fraction) ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0–1.2 ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยความต้องการน้ำในช่วงเวลา t (Water Demand, Dt) ตลอดทั้งปี

แบบจำลองฟัซซี่ 2 กำหนดรูปแบบของกฎฟัซซี่แบบรายฤดูกาล ตัวแปรนำเข้าจำนวน 3 ตัวแปร ได้แก่ (1) ปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่ในช่วงเวลา t (Available Storage, St) (2) ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในช่วงเวลา t (Reservoir Inflow, It) และ (3) ค่าสัดส่วนปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำสะสมในช่วงเวลา t (Cumulative Inflow Fraction, Clt) ตัวแปรนำออกคือ ค่าสัดส่วนปริมาณการระบายน้ำ (Release Fraction) ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0–1.2 ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยความต้องการน้ำในช่วงเวลา t (Water Demand, Dt) ในช่วงฤดูแล้ง และมีค่าอยู่ระหว่าง 0–1.0 ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในช่วงเวลา t (Reservoir Inflow, It) ในช่วงฤดูฝน

แบบจำลองฟัซซี่ 3 กำหนดรูปแบบของกฎฟัซซี่แบบรายฤดูกาล ตัวแปรนำเข้าจำนวน 5 ตัวแปร ได้แก่ (1) ปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่ที่ช่วงเวลา t (Available Storage, St) (2) ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่ช่วงเวลา t (Reservoir Inflow, It) (3) ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำพยากรณ์สะสมที่เวลา 7 วันล่วงหน้า (7D Cumulative Predicted Inflow, $7DIt$) (4) ปริมาตรว่างของอ่างเก็บน้ำที่ช่วงเวลา t (Vacancy Storage, Vt) และ (5) ระดับน้ำเริ่มต้นที่ช่วงเวลา t (Water Level, Wt) ตัวแปรนำออกคือ ค่าสัดส่วนปริมาณการระบายน้ำ (Release Fraction) ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1.2 ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยความต้องการน้ำที่ช่วงเวลา t (Water Demand, Dt) ในช่วงฤดูแล้ง และมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1.0 ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่ช่วงเวลา t (Reservoir Inflow, It) ในช่วงฤดูฝน

4.6.3.1.2 ผลการพัฒนาแบบจำลองและทดสอบการทำงานในการจำลองระบบ

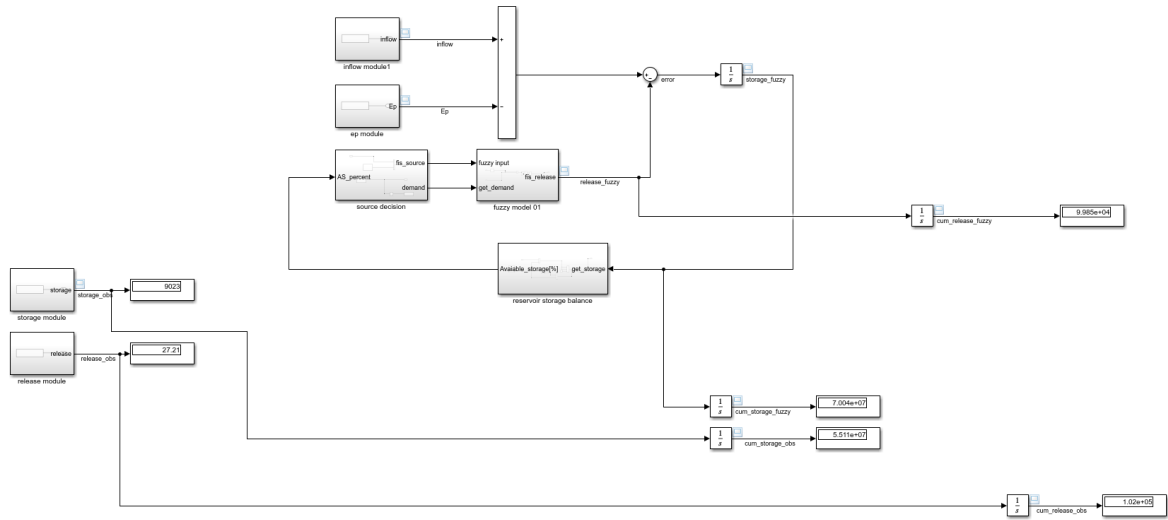
ผลการพัฒนาแบบจำลองฟัซซี่ทั้ง 3 แบบจำลองด้วยกล่องเครื่องมือ Simulink MATLAB แสดงในรูปที่ 4-135



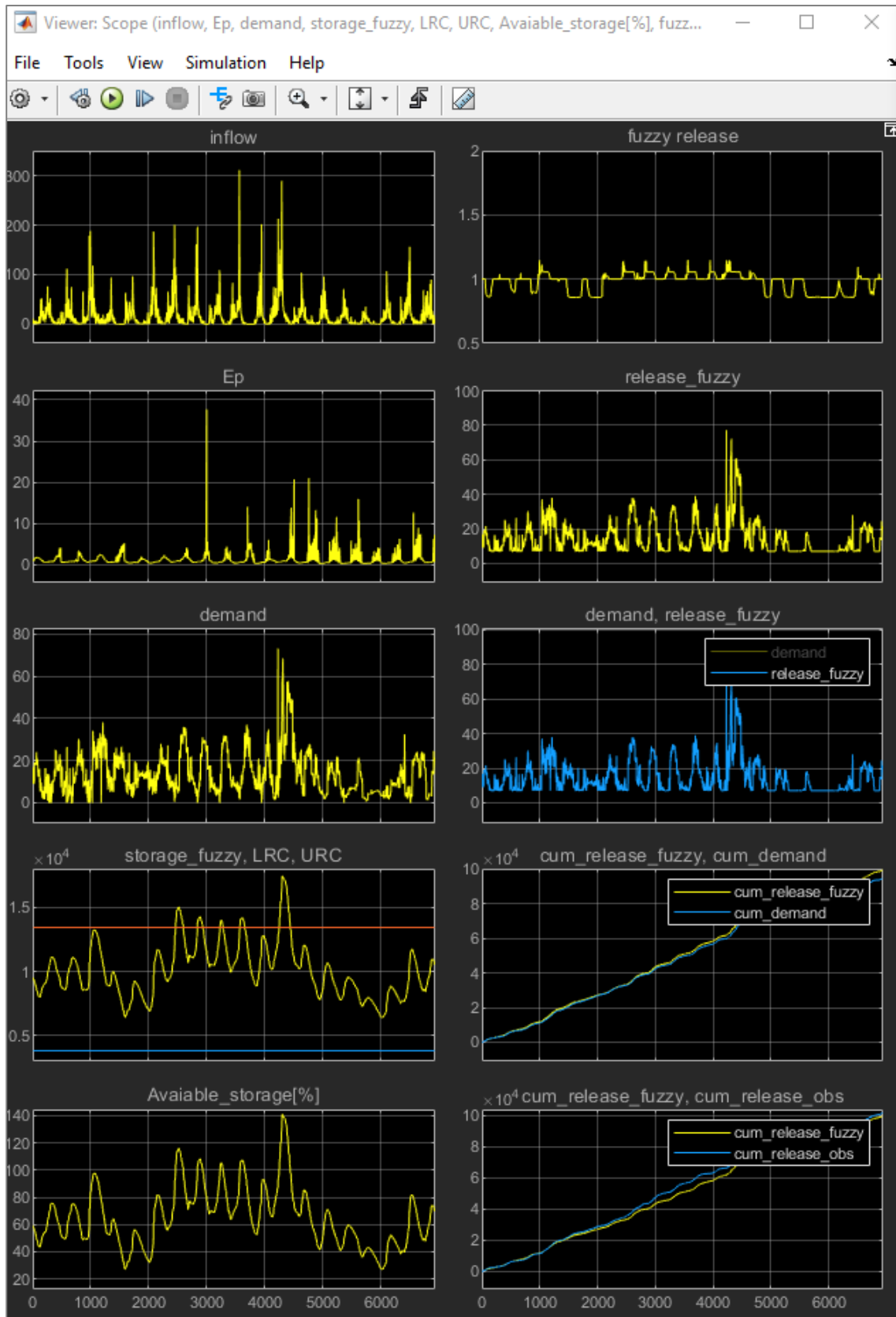
รูปที่ 4-135 ผลการพัฒนาแบบจำลองฟัซซี่ด้วยกล่องเครื่องมือ Simulink MATLAB

(1) แบบจำลองฟัซซี่ 1

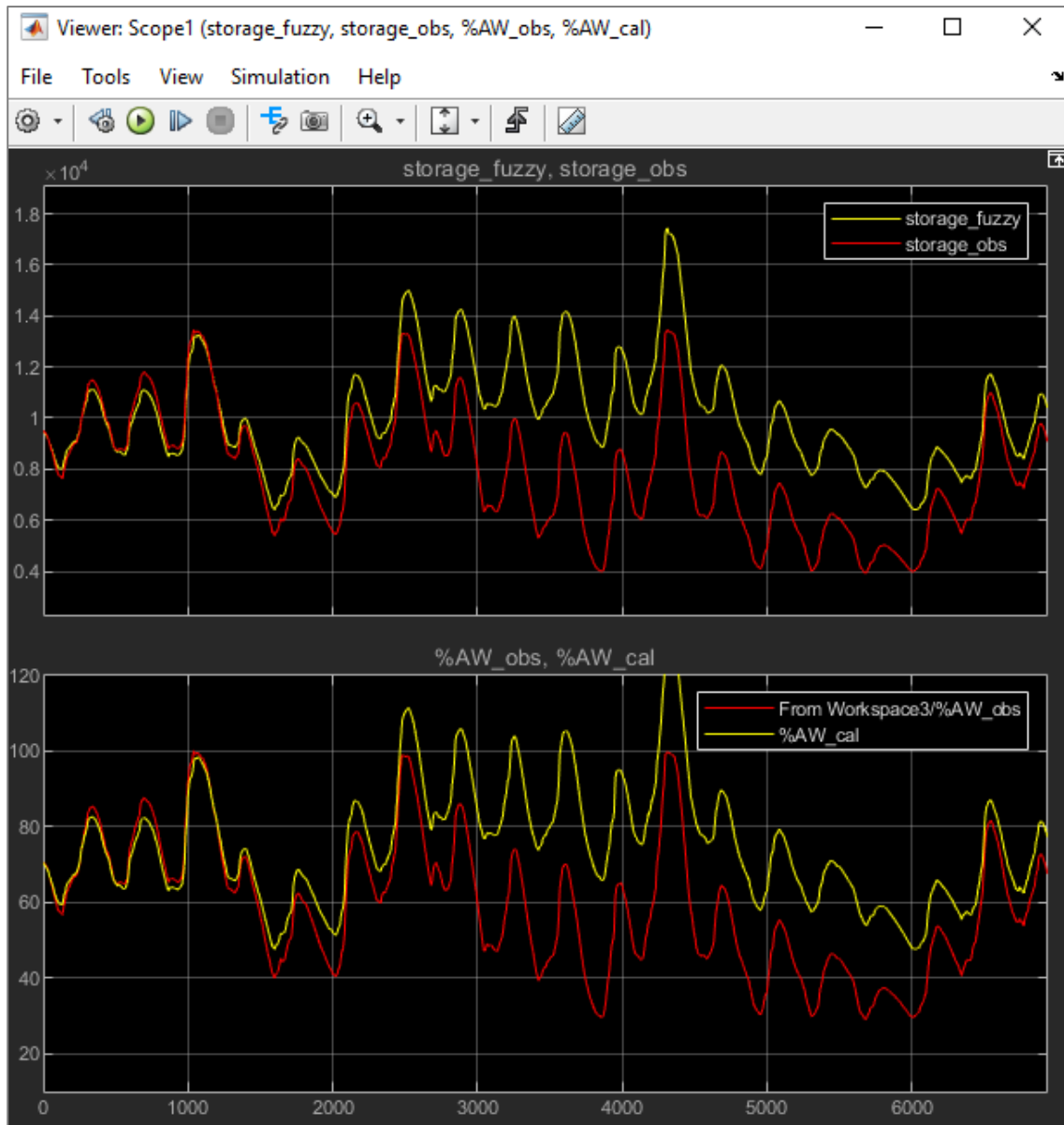
การออกแบบแบบจำลองฟัซซี่ 1 ด้วยกล่องเครื่องมือ Simulink MATLAB แสดงในรูปที่ 4-136 สำหรับผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและปริมาณน้ำเก็บกักที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองฟัซซี่ 1 แสดงในรูปที่ 4-137 และในรูปที่ 4-138



รูปที่ 4-136 ผลการพัฒนาแบบจำลองฟัซซี่ 1



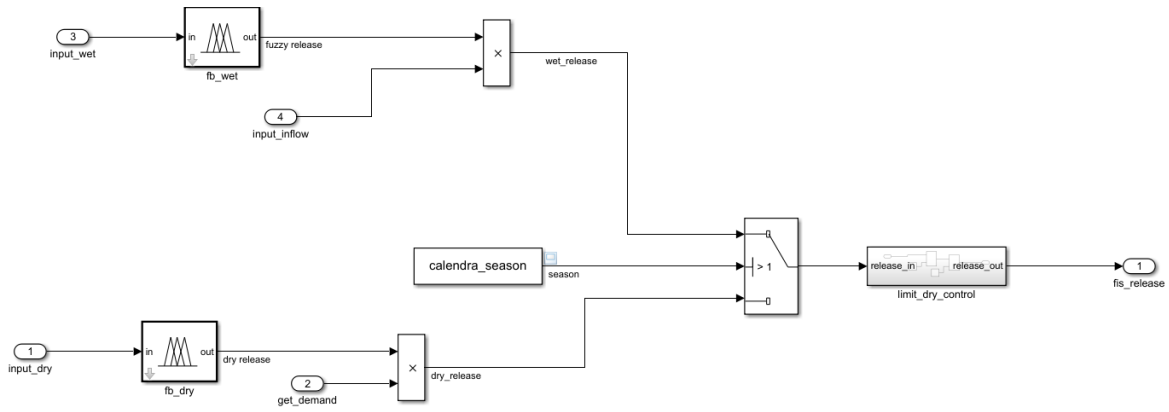
รูปที่ 4-137 ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลแบบจำลองฟัซซี่ 1



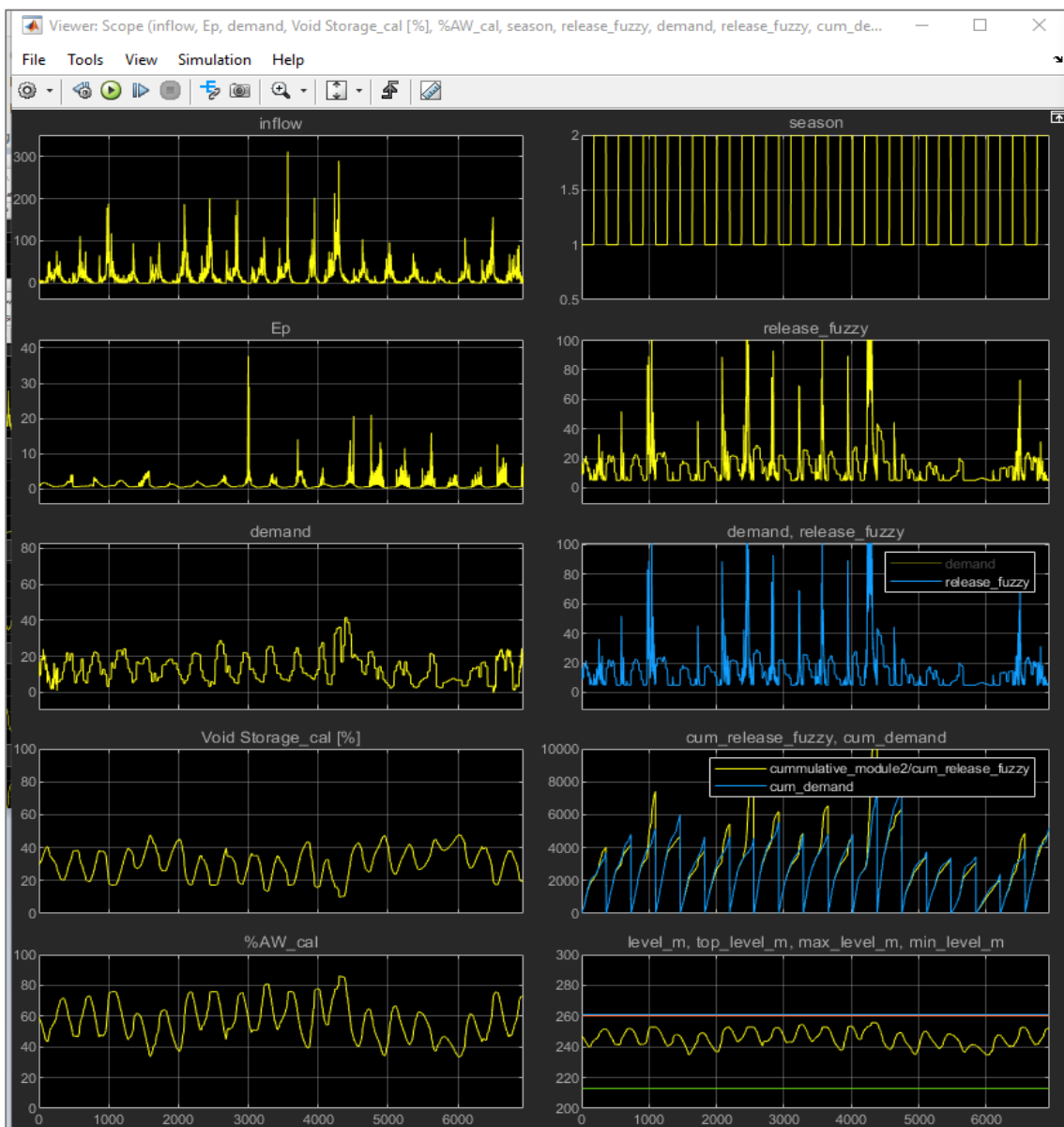
รูปที่ 4-138 ปริมาณน้ำเก็บกักที่ได้จากการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลแบบจำลองฟuzzy 1

(2) แบบจำลองฟuzzy 2

การออกแบบแบบจำลองฟuzzy 2 ด้วยกล่องเครื่องมือ Simulink MATLAB แสดงในรูปที่ 4-139 สำหรับผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและปริมาณน้ำเก็บกักที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองฟuzzy 2 แสดงในรูปที่ 4-140 และในรูปที่ 4-141

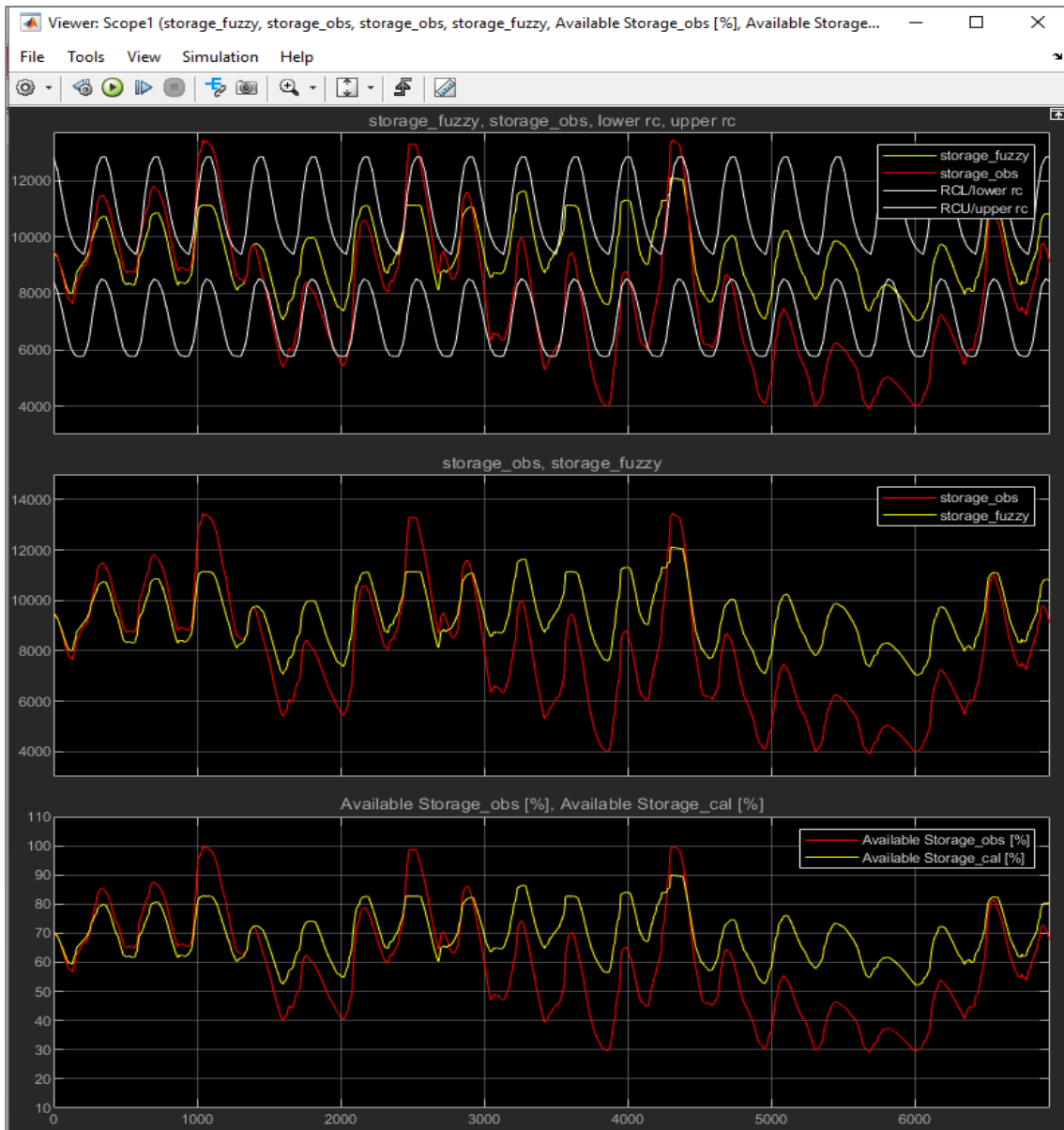


รูปที่ 4-139 ผลการพัฒนาแบบจำลองฟัซซี่ 2



รูปที่ 4-140 ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลแบบจำลองฟัซซี่ 2

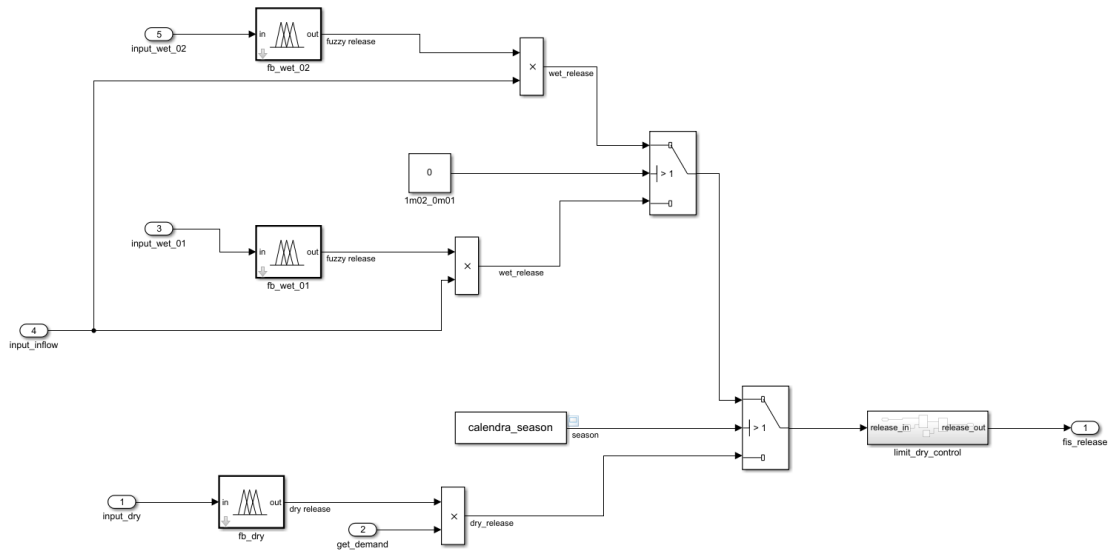
4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข็มมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562



รูปที่ 4-141 ปริมาณน้ำเก็บกักที่ได้จากการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลแบบจำลองฟัซซี่ 2

(3) แบบจำลองฟัซซี่ 3

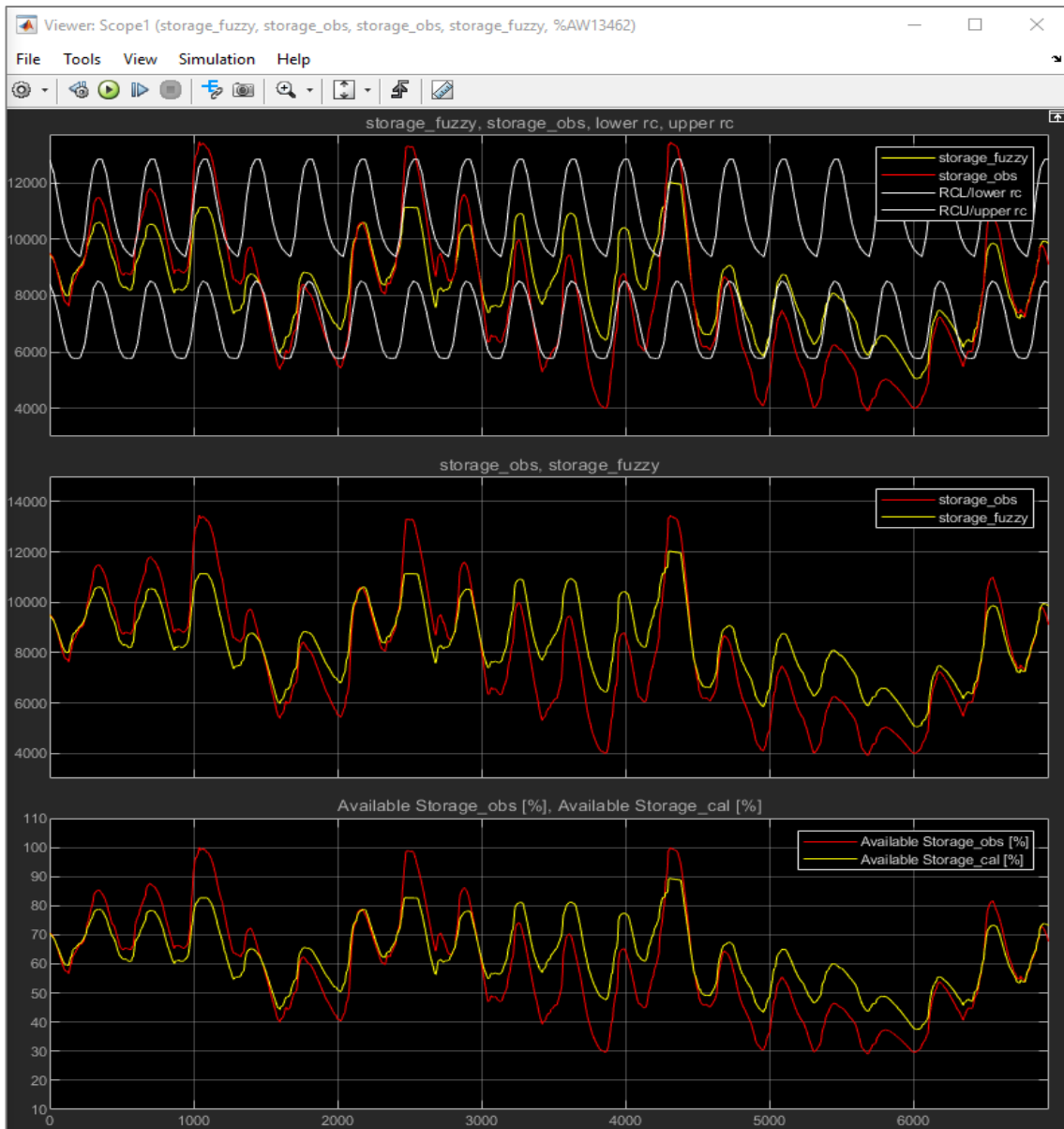
การออกแบบแบบจำลองฟัซซี่ 3 ด้วยกล่องเครื่องมือ Simulink MATLAB แสดงในรูปที่ 4-142 สำหรับผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและปริมาณน้ำเก็บกักที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองฟัซซี่ 3 แสดงในรูปที่ 4-143 และในรูปที่ 4-144



รูปที่ 4-142 ผลการพัฒนาแบบจำลองฟัซซี่ 3



รูปที่ 4-143 ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลแบบจำลองฟัซซี่ 3



รูปที่ 4-144 ปริมาณน้ำเก็บกักที่ได้จากการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลแบบจำลองฟัซซี่ 3

หลังจากการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองฟัซซี่ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ทั้ง 3 แบบจำลองด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม (สังเคราะห์จากแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทานและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย) พบว่า แบบจำลองฟัซซี่ 3 ให้ผลการระบายน้ำรายวัน รายฤดูกาล และรายปีอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองฟัซซี่ 1 และแบบจำลองฟัซซี่ 2 กล่าวคือ สามารถลดปริมาณการระบายน้ำทั้งรายฤดูกาลและรายปี ส่งผลให้ปริมาณน้ำต้นทุนของเขื่อนภูมิพลเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปีเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงผลการระบายน้ำในตารางที่ 4-53 และตารางที่ 4-54 และรูปที่ 4-145 ถึงรูปที่ 4-149 ปริมาณน้ำเก็บกักรายฤดูกาลและรายปีดังแสดงในตารางที่ 4-55 และตารางที่ 4-56 และรูปที่ 4-150 และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายฤดูกาลและรายปีดังแสดงในตารางที่ 4-57 และตารางที่ 4-58 และรูปที่ 4-151 ถึงรูปที่ 4-154

จากการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองฟัซซี่ 3 ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 พบว่าสามารถลดปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยได้ถึง 114.25 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อ

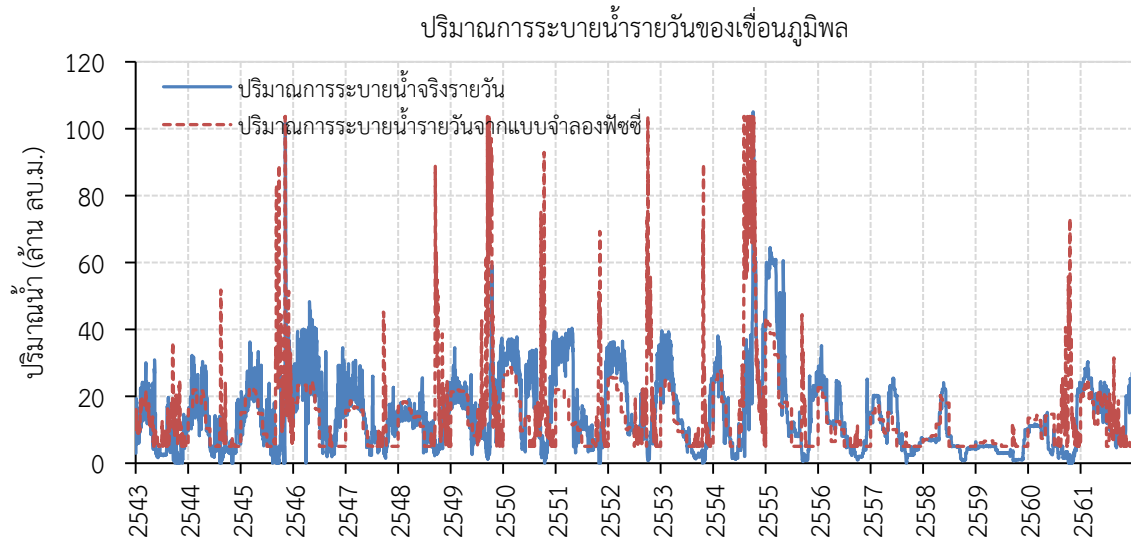
ปี ซึ่งหมายถึงความสามารถในการเก็บกักน้ำในอ่างเก็บน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ แบบจำลองฟิชซีสามารถลดปริมาณการระบายในช่วงฤดูแล้งได้สูงถึง 860 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือลดลงคิดเป็น 24.04% แบบจำลองฟิชซียังสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำได้ถึงประมาณ 1,167.33 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี โดยสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งได้เพิ่มขึ้น 11.57% เมื่อเปรียบเทียบกับผลการระบายน้ำจริงที่ผ่านมา ยิ่งไปกว่านั้น แบบจำลองฟิชซียังสามารถเพิ่มการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำได้สูงขึ้นถึง 249.54 กิกะวัตต์-ชั่วโมงต่อปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำในช่วงฤดูฝนที่เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4-53 ผลการระบายน้ำรายฤดูกาลด้วยแบบจำลองฟิชซีระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม

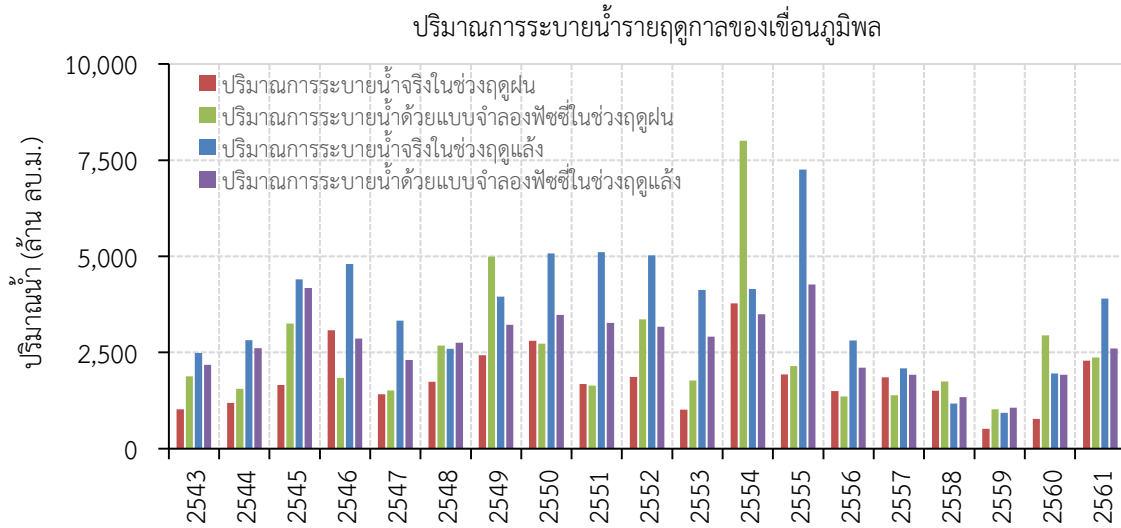
ปี พ.ศ.	ปริมาณการระบายน้ำรายฤดูกาล (ล้านลูกบาศก์เมตร)				ผลต่างการระบายน้ำ (ล้านลูกบาศก์เมตร)	
	แบบจำลองฟิชซี		ข้อมูลการระบายน้ำจริง		ฤดูฝน	ฤดูแล้ง
	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง		
2543	1,877.87	2,180.71	1,026.10	2,487.31	851.77	-306.60
2544	1,551.59	2,612.29	1,187.91	2,818.45	363.68	-206.16
2545	3,255.03	4,173.49	1,654.60	4,400.73	1,600.43	-227.24
2546	1,839.64	2,864.54	3,076.18	4,801.80	-1,236.54	-1937.26
2547	1,512.13	2,304.12	1,415.31	3,327.15	96.82	-1,023.03
2548	2,679.60	2,755.12	1,741.68	2,597.06	937.92	158.06
2549	4,995.07	3,215.90	2,426.31	3,951.67	2,568.76	-735.77
2550	2,730.64	3,476.47	2,803.29	5,073.93	-72.65	-1597.46
2551	1,638.71	3,268.31	1,679.17	5,111.79	-40.46	-1843.48
2552	3,363.51	3,167.95	1,866.22	5,025.53	1,497.29	-1857.58
2553	1,774.21	2,908.43	1,017.68	4,122.50	756.53	-1214.07
2554	8,006.37	3,497.36	3,776.61	4,154.45	4,229.76	-657.09
2555	2,149.00	4,264.62	1,933.42	7,251.08	215.58	-2,986.46
2556	1,357.07	2,105.26	1,493.64	2,809.66	-136.57	-704.40
2557	1,390.70	1,923.72	1,855.32	2,084.07	-464.62	-160.35
2558	1,744.70	1,341.16	1,506.84	1,173.03	237.86	168.13
2559	1,024.14	1,061.39	517.51	933.40	506.63	127.99
2560	2,948.78	1,920.98	770.22	1,955.54	2,178.56	-34.56
2561	2,366.95	2,601.70	2,288.38	3,904.43	78.57	-1,302.73
ค่าต่ำสุด	1,024.14	1,061.39	517.51	933.40	-1,236.54	-2,986.46
ค่าเฉลี่ย	2,537.14	2,718.08	1,791.39	3,578.08	745.75	-860.00
ค่าสูงสุด	8,006.37	4,264.62	3,776.61	7,251.08	4,229.76	168.13
%ปริมาณการระบายน้ำ					+41.63	-24.04
					เพิ่มขึ้น	ลดลง

ตารางที่ 4-54 ผลการระบายน้ำรายปีด้วยแบบจำลองพีซซีระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม

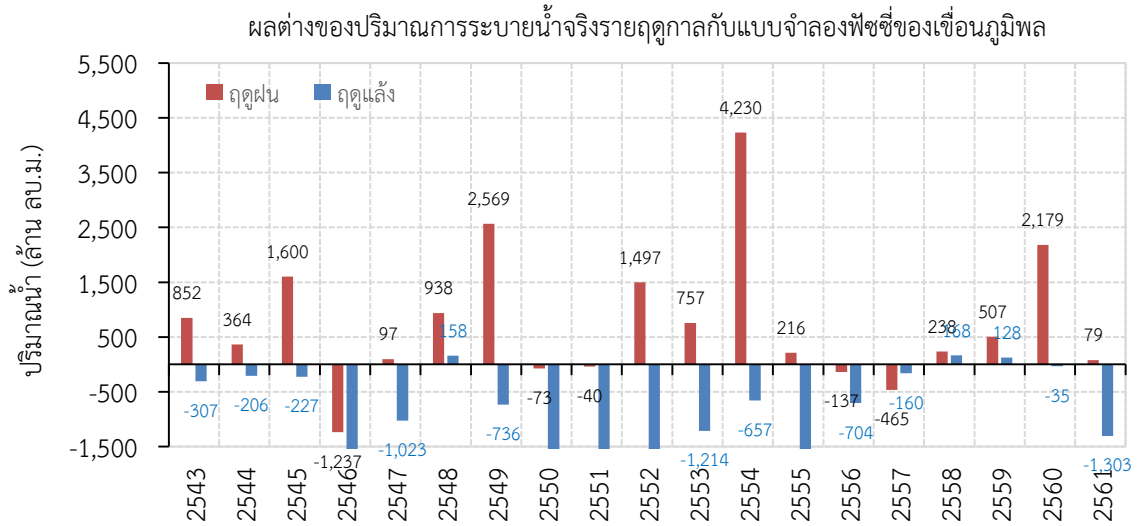
ปี พ.ศ.	ปริมาณการระบายน้ำรายปี (ล้านลูกบาศก์เมตร)		ผลต่างการระบายน้ำ (ล้านลูกบาศก์เมตร)
	แบบจำลองพีซซี	ข้อมูลการระบายน้ำจริง	
2543	4,058.58	3,513.41	545.17
2544	4,163.88	4,006.36	157.52
2545	7,428.52	6,055.33	1,373.19
2546	4,704.18	7,877.98	-3,173.80
2547	3,816.25	4,742.46	-926.21
2548	5,434.72	4,338.74	1,095.98
2549	8,210.96	6,377.98	1,832.98
2550	6,207.12	7,877.22	-1,670.10
2551	4,907.02	6,790.96	-1,883.94
2552	6,531.46	6,891.75	-360.29
2553	4,682.63	5,140.18	-457.55
2554	11,503.73	7,931.06	3,572.67
2555	6,413.62	9,184.50	-2,770.88
2556	3,462.33	4,303.30	-840.97
2557	3,314.42	3,939.39	-624.97
2558	3,085.86	2,679.87	405.99
2559	2,085.53	1,450.91	634.62
2560	4,869.76	2,725.76	2,144.00
2561	4,968.65	6,192.81	-1,224.16
ค่าต่ำสุด	2,085.53	1,450.91	-3,173.80
ค่าเฉลี่ย	5,255.22	5,369.47	-114.25
ค่าสูงสุด	11,503.73	9,184.50	3,572.67
%ปริมาณการระบายน้ำ			-2.13
			ลดลง



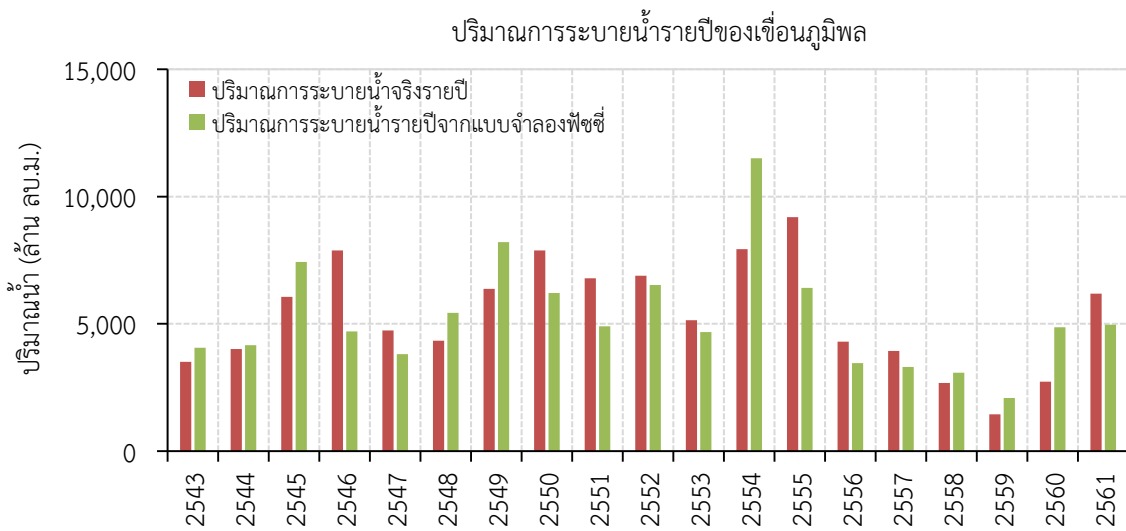
รูปที่ 4-145 ปริมาณการระบายน้ำรายวันของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองพีซีซี 3



รูปที่ 4-146 ปริมาณการระบายน้ำรายฤดูกาลของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองพีซีซี 3

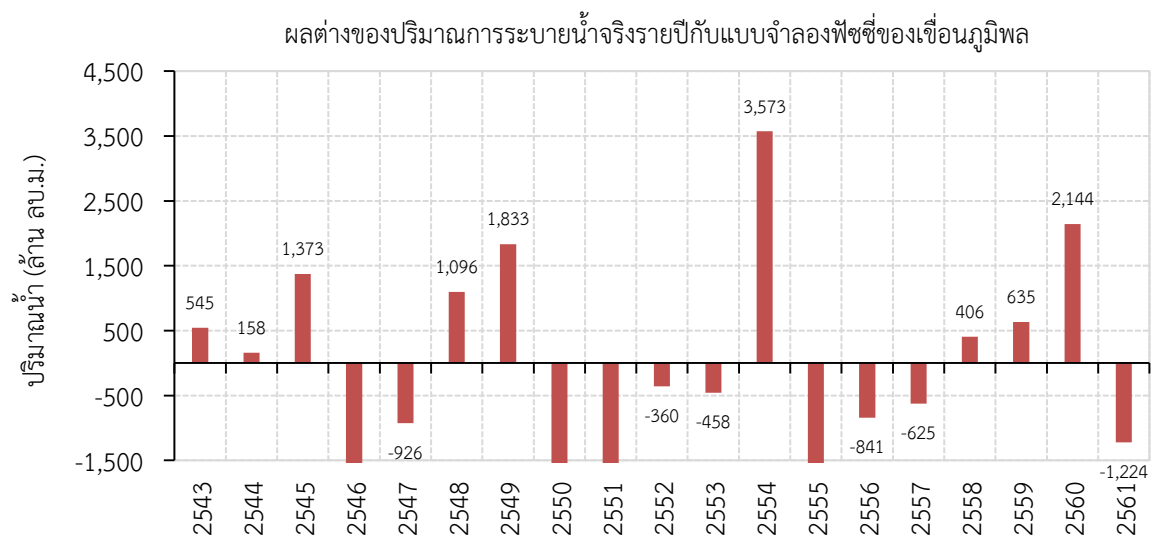


รูปที่ 4-147 ผลต่างของปริมาณการระบายน้ำจริงรายฤดูกาลกับแบบจำลองพีซซีของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองพีซซี 3



รูปที่ 4-148 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองพีซซี 3

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเข็มมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562



รูปที่ 4-149 ผลต่างของปริมาณการระบายน้ำจริงรายปีกับแบบจำลองพีซซีของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองพีซซี 3

ตารางที่ 4-55 ปริมาณน้ำเก็บกักรายฤดูกาลด้วยแบบจำลองพีซซีระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม

ปี พ.ศ.	ปริมาณน้ำเก็บกักรายฤดูกาล (ล้านลูกบาศก์เมตร)				ผลต่างปริมาณน้ำเก็บกัก (ล้านลูกบาศก์เมตร)	
	แบบจำลองพีซซี		ข้อมูลปริมาณน้ำเก็บกักจริง		ฤดูฝน	ฤดูแล้ง
	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง		
2543	9,198.15	9,388.83	9,091.18	9,567.20	106.97	-178.37
2544	8,976.97	10,007.65	9,579.97	10,706.29	-603.00	-698.65
2545	9,126.05	10,195.19	9,983.66	11,471.95	-857.61	-1,276.77
2546	8,650.40	10,022.29	9,069.81	11,057.34	-419.41	-1,035.05
2547	8,172.09	8,819.52	6,561.52	7,415.20	1,610.57	1,404.32
2548	8,310.31	9,450.53	6,732.68	8,156.00	1,577.63	1,294.52
2549	9,698.70	10,151.71	9,923.01	10,502.07	-224.31	-350.37
2550	9,015.24	9,907.67	9,273.33	10,923.92	-258.09	-1,016.25
2551	9,092.24	10,152.22	6,920.08	9,045.48	2,172.16	1,106.74
2552	9,470.52	10,184.34	6,464.82	8,044.15	3,005.70	2,140.19
2553	8,260.70	9,877.70	5,028.74	7,229.11	3,231.96	2,648.59
2554	10,601.30	10,292.35	9,413.20	8,941.37	1,188.09	1,350.98
2555	8,098.45	9,669.53	6,807.13	9,109.65	1,291.33	559.89
2556	7,565.82	8,907.90	4,979.47	6,673.66	2,586.35	2,234.25
2557	8,109.01	9,177.74	4,802.92	6,195.23	3,306.08	2,982.51
2558	7,566.94	8,680.35	4,431.20	5,501.13	3,135.74	3,179.22
2559	7,334.09	8,085.45	4,749.20	5,429.64	2,584.90	2,655.81
2560	8,432.62	9,260.99	6,929.71	7,866.34	1,502.91	1,394.65

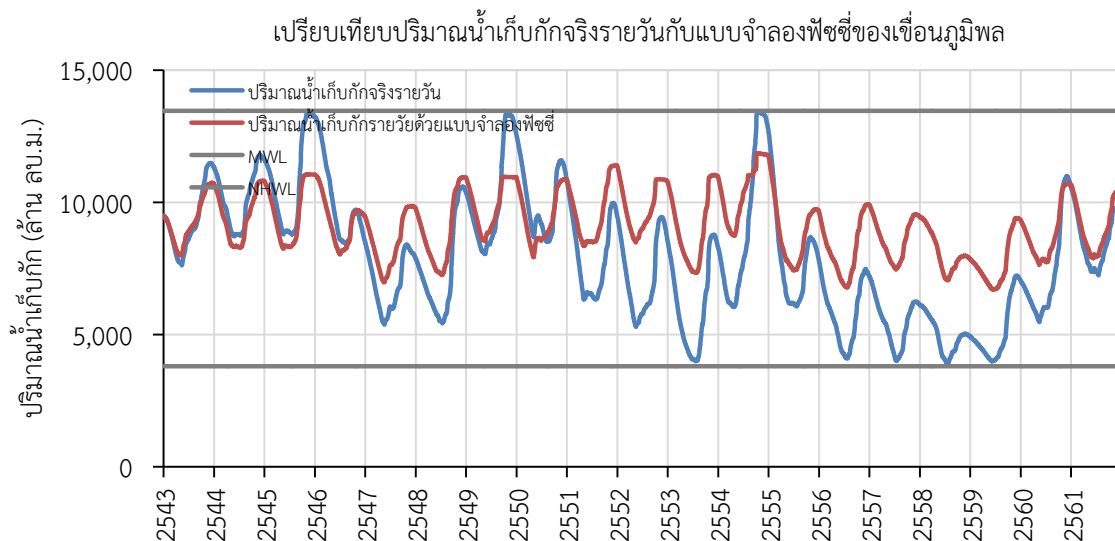
4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเขื่อนภูมิพล ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

ปี พ.ศ.	ปริมาณน้ำเก็บกักรายฤดูกาล (ล้านลูกบาศก์เมตร)				ผลต่างปริมาณน้ำเก็บกัก (ล้านลูกบาศก์เมตร)	
	แบบจำลองพีซซี		ข้อมูลปริมาณน้ำเก็บกักจริง			
	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง
2561	8,528.43	9,737.71	7,980.03	9,261.94	548.39	475.77
ค่าต่ำสุด	7,334.09	8,085.45	4,431.20	5,429.64	-857.61	-1,276.77
ค่าเฉลี่ย	8,642.53	9,577.35	7,301.14	8,584.09	1,341.39	993.26
ค่าสูงสุด	10,601.30	10,292.35	9,983.66	11,471.95	3,306.08	3,179.22
%ปริมาณน้ำเก็บกัก					+18.37	+11.57
					เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4-56 ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีด้วยแบบจำลองพีซซีระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม

ปี พ.ศ.	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปี (ล้านลูกบาศก์เมตร)		ผลต่างปริมาณน้ำเก็บกัก (ล้านลูกบาศก์เมตร)
	แบบจำลองพีซซี	ข้อมูลปริมาณน้ำเก็บกักจริง	
2543	9,293.49	9,329.19	-35.70
2544	9,492.31	10,143.13	-650.82
2545	9,660.62	10,727.81	-1,067.19
2546	9,336.35	10,063.58	-727.23
2547	8,495.80	6,988.36	1,507.44
2548	8,880.42	7,444.34	1,436.08
2549	9,925.20	10,212.54	-287.34
2550	9,461.46	10,098.62	-637.17
2551	9,622.23	7,982.78	1,639.45
2552	9,827.43	7,254.48	2,572.95
2553	9,069.20	6,128.93	2,940.27
2554	10,446.82	9,177.29	1,269.54
2555	8,883.99	7,958.39	925.61
2556	8,236.86	5,826.56	2,410.30
2557	8,643.37	5,499.07	3,144.30
2558	8,123.64	4,966.17	3,157.48
2559	7,709.77	5,089.42	2,620.36
2560	8,846.80	7,398.03	1,448.78
2561	9,133.07	8,620.99	512.08
ค่าต่ำสุด	7,709.77	4,966.17	-1,067.19
ค่าเฉลี่ย	9,109.94	7,942.61	1,167.33
ค่าสูงสุด	10,446.82	10,727.81	3,157.48
%ปริมาณน้ำเก็บกัก			+14.70

ปี พ.ศ.	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปี (ล้านลูกบาศก์เมตร)		ผลต่างปริมาณน้ำเก็บกัก (ล้านลูกบาศก์เมตร)
	แบบจำลองพีชชี	ข้อมูลปริมาณน้ำเก็บกักจริง	
			เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-150 ปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองพีชชี 3

ตารางที่ 4-57 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายฤดูกาลด้วยแบบจำลองพีชชีระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม

ปี พ.ศ.	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายฤดูกาล (กิกะวัตต์-ชั่วโมง)				ผลต่างพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กิกะวัตต์-ชั่วโมง)	
	แบบจำลองพีชชี		พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง			
	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง		
2543	83.61	95.75	-	-	-	-
2544	67.83	117.72	-	-	-	-
2545	146.24	191.58	-	-	-	-
2546	79.10	131.01	-	-	-	-
2547	64.15	98.58	-	-	-	-
2548	116.29	122.10	-	-	-	-
2549	229.86	146.21	-	-	-	-
2550	121.00	156.33	-	-	-	-
2551	73.22	149.51	-	-	-	-
2552	154.76	145.79	69.82	208.84	84.94	-63.05
2553	77.39	131.92	33.54	163.18	43.85	-31.25
2554	378.35	161.15	161.86	181.10	216.50	-19.95
2555	90.15	193.33	73.94	322.05	16.22	-128.72
2556	55.06	91.76	50.13	109.45	4.93	-17.70
2557	57.98	84.34	61.71	78.78	-3.74	5.56

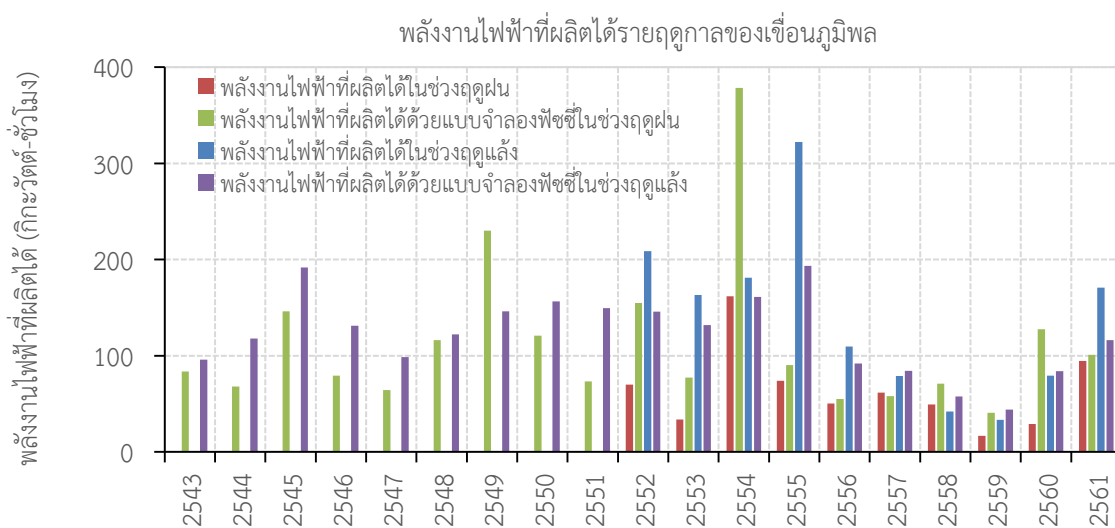
4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

ปี พ.ศ.	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายฤดูกาล (กิกะวัตต์-ชั่วโมง)				ผลต่างพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กิกะวัตต์-ชั่วโมง)	
	แบบจำลองฟิชชี		พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง			
	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง
2558	70.77	57.47	49.22	41.85	21.55	15.62
2559	40.77	43.89	16.69	33.15	24.07	10.74
2560	127.59	84.02	28.91	79.35	98.68	4.67
2561	100.87	116.10	94.47	170.90	6.40	-54.80
ค่าต่ำสุด	40.77	43.89	16.69	33.15	24.07	10.74
ค่าเฉลี่ย	112.37	122.03	64.03	138.87	48.34	-16.83
ค่าสูงสุด	378.35	193.33	161.86	322.05	216.50	-128.72
%พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้					+75.49	-12.12
					เพิ่มขึ้น	ลดลง

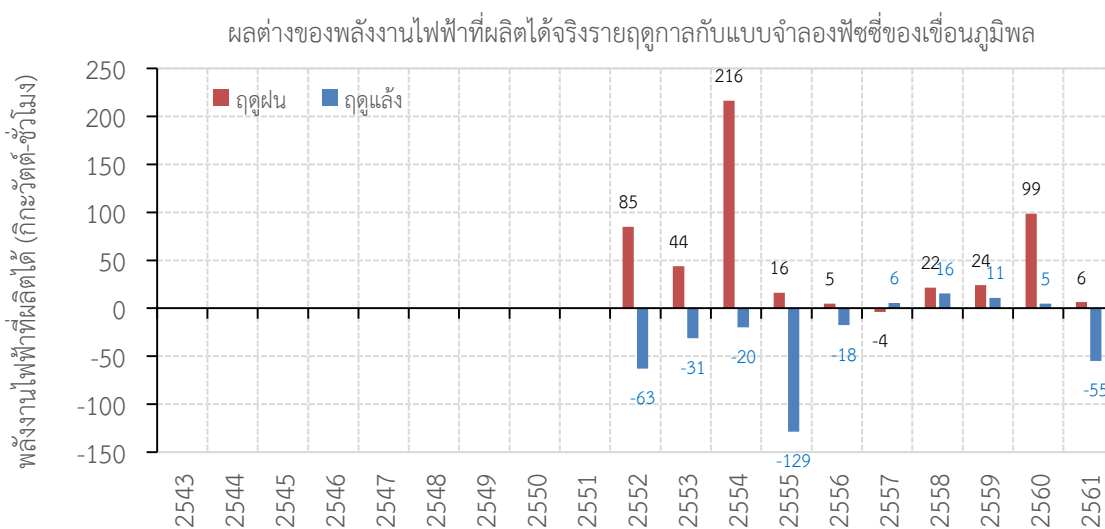
ตารางที่ 4-58 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปีด้วยแบบจำลองฟิชชีระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม

ปี พ.ศ.	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปี (กิกะวัตต์-ชั่วโมง)		ผลต่างพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กิกะวัตต์-ชั่วโมง)
	แบบจำลองฟิชชี	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง	
2543	1,076.19	-	-
2544	1,113.30	-	-
2545	2,026.89	-	-
2546	1,260.65	-	-
2547	976.35	-	-
2548	1,430.32	-	-
2549	2,256.45	-	-
2550	1,663.96	-	-
2551	1,336.35	551.71	-
2552	1,803.35	1,671.98	131.36
2553	1,255.88	1,180.30	75.58
2554	3,237.02	2,057.76	1,179.26
2555	1,700.91	2,375.90	-675.00
2556	880.93	957.53	-76.60
2557	853.92	842.96	10.96
2558	769.44	546.42	223.02
2559	507.94	299.06	208.88
2560	1,269.65	649.51	620.14
2561	1,301.84	1,592.23	-290.38
ค่าต่ำสุด	507.94	299.06	208.88

ปี พ.ศ.	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปี (กิกะวัตต์-ชั่วโมง)		ผลต่างพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กิกะวัตต์-ชั่วโมง)
	แบบจำลองพีซี	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง	
ค่าเฉลี่ย	1,406.39	1,156.85	249.54
ค่าสูงสุด	3,237.02	2,375.90	861.12
%พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้			+21.57
			เพิ่มขึ้น

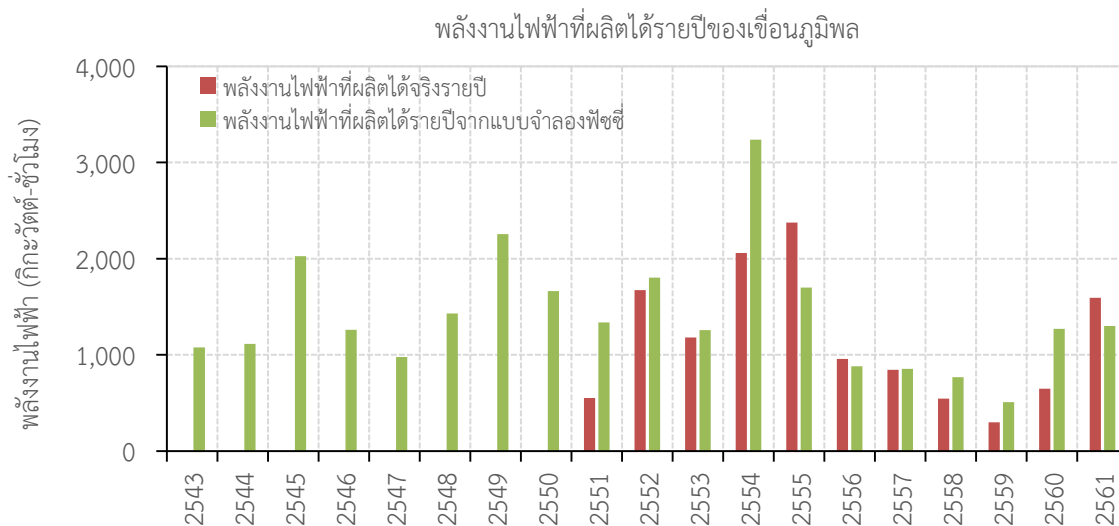


รูปที่ 4-151 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายฤดูกาลของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองพีซี 3

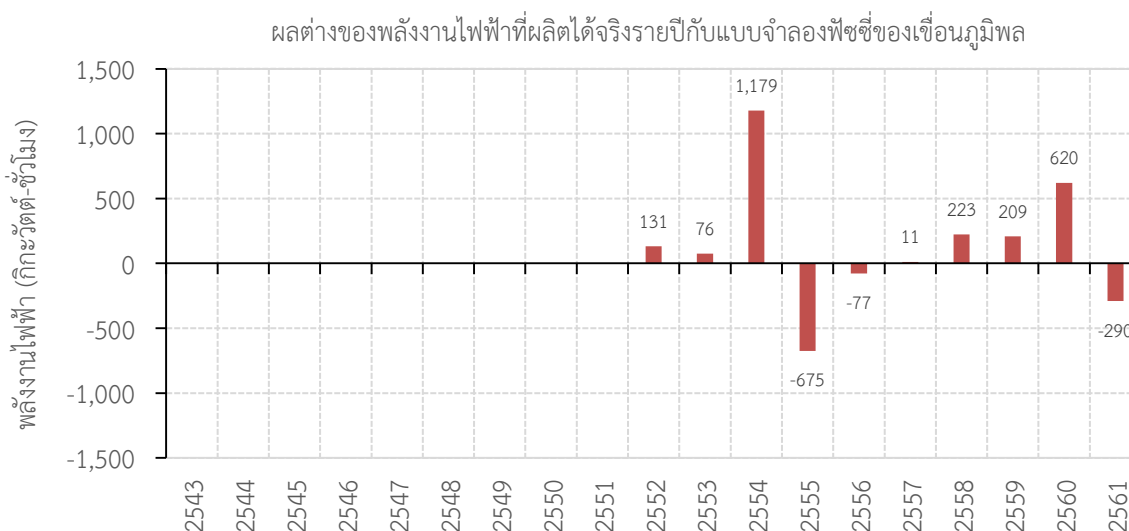


รูปที่ 4-152 ผลต่างของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงรายฤดูกาลกับแบบจำลองพีซีของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองพีซี 3

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติกรอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562



รูปที่ 4-153 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปีของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองฟuzzy 3



รูปที่ 4-154 ผลต่างของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงรายปีกับแบบจำลองฟuzzy ของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองฟuzzy 3

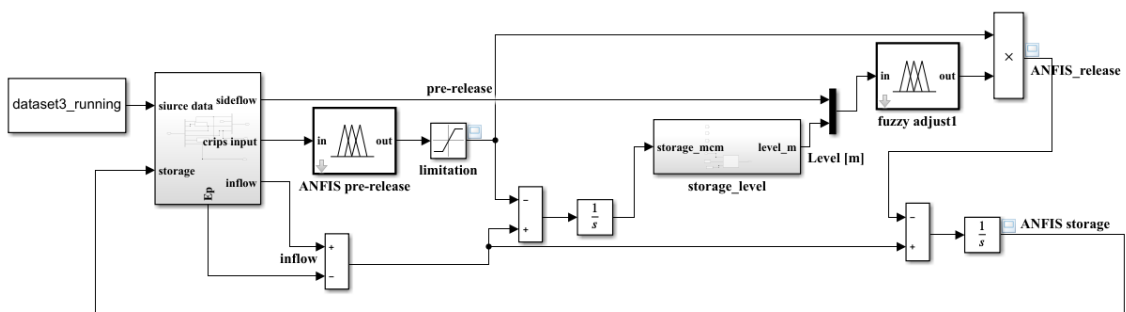
4.6.3.2 ผลการพัฒนาแบบจำลองการระบายน้ำด้วยเทคนิคนิวโรฟuzzy แบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model, ANFIS)

แบบจำลอง ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model/Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System) (Jang, 1993) เป็นแบบจำลองแขนงหนึ่งของ Artificial Neural Networks (ANNs) ซึ่งนำระบบกลไกการอนุมานค่าแบบฟuzzy (Fuzzy Inference System) มาใช้กับโครงสร้างการเรียนรู้ของ ANNs แบบจำลอง ANFIS ถูกพัฒนาและนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ มากมาย ในงานด้านบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ เช่น การประยุกต์ใช้กับการสร้างแบบจำลองในการควบคุมการระบายน้ำของอ่างเก็บน้ำ ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าสามารถสร้างแบบจำลองการระบายน้ำได้ค่อนข้างง่ายและไม่ซับซ้อน (Mehta & Jain, 2009) การพัฒนาจำลองระบบบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำร่วมกับแบบจำลอง GA (Pinthong et al., 2008) เป็นต้น

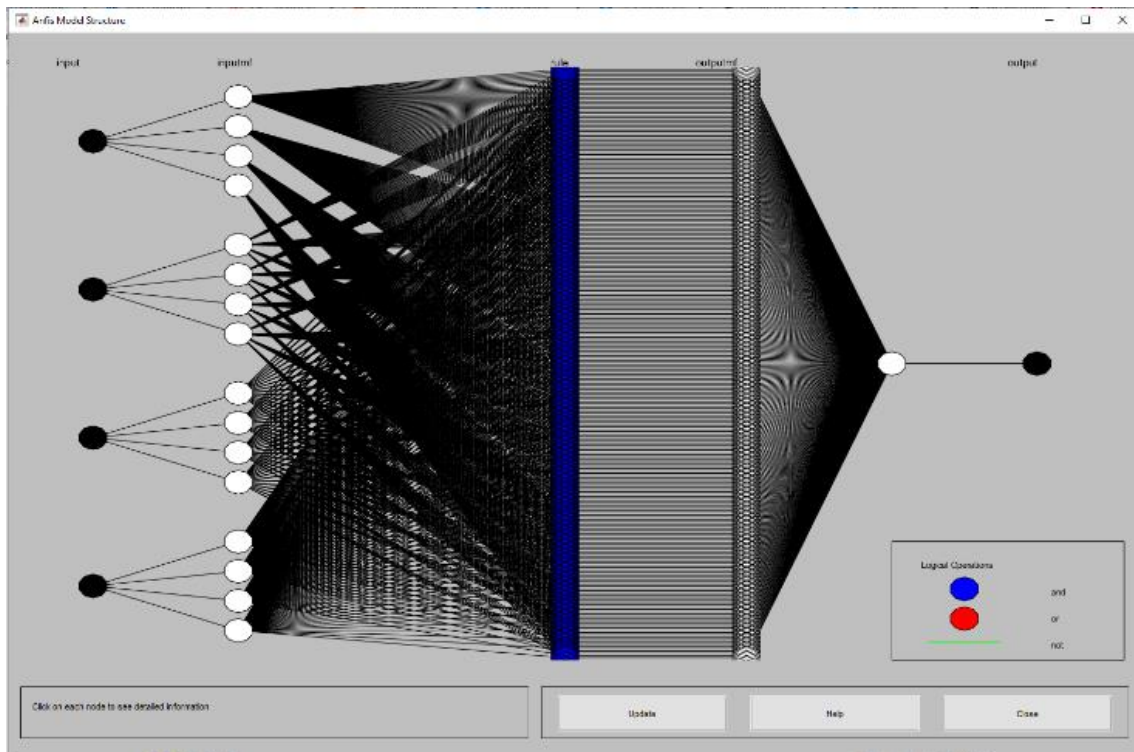
4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

จากการพัฒนาแบบจำลองฟuzzyลอจิกในขั้นก่อนหน้าพบว่า แบบจำลองสามารถจำลองกระบวนการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลได้ อย่างไรก็ตาม ในขั้นตอนการกำหนดฟังก์ชันสมาชิกและการออกแบบกฎการควบคุมผู้วิจัยยังคงต้องประเมินจากการทบทวนเอกสารและสัมภาษณ์ผู้ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำจริง และนำเอาผลการทบทวนนั้นมากำหนดเป็นกลไกในการระบายน้ำ จึงทำให้ผลการคำนวณของแบบจำลองฟuzzyลอจิกยังไม่สอดคล้องกับบางสถานการณ์ ดังนั้น การนำจุดเด่นของแบบจำลอง ANFIS มาช่วยในการกำหนดฟังก์ชันสมาชิกและกลไกการอนุมานค่าของแบบจำลองฟuzzyลอจิกน่าจะมีแนวทางเป็นไปได้ (Mokhtar et al., 2014) ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลอง ANFIS เริ่มจากการกำหนดตัวแปรนำเข้า 4 ชนิด คือ (1) ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Inflow) (2) ปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำ (Water Storage) (3) ปริมาณความต้องการน้ำ (Water Demand) และ (4) สภาพของน้ำท่าที่สถานี W.4A โดยกำหนดช่วงเวลาในการพัฒนาแบบจำลอง ANFIS คือ ช่วงเปรียบเทียบแบบจำลองเริ่มวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2543 จนถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2553 จำนวน 10 ปี กระบวนการพัฒนาแบบจำลองในขั้นนี้ ได้ใช้บล็อกไดอะแกรม ANFIS ใน Matlab โดยเบื้องต้นกำหนดรูปแบบฟังก์ชันสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยมและจำนวนของฟังก์ชันสมาชิกเท่ากับ 4-4-4 และ 4 (รูปที่ 4-156) ตามลำดับ ส่วนกระบวนการ Learning กำหนดให้เป็นวิธี Hybrid และค่า Epoch เท่ากับ 100

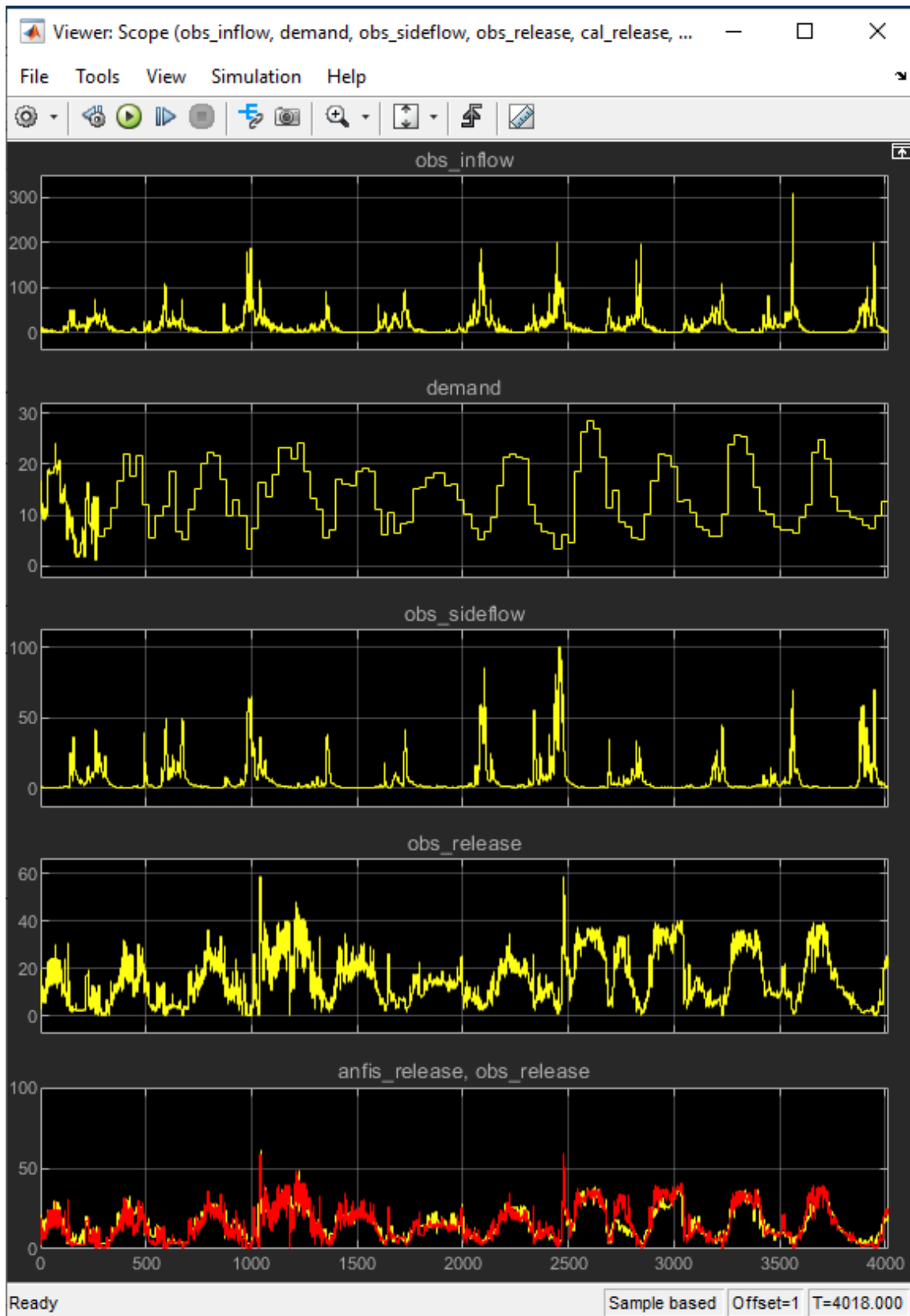
ผลการพัฒนาแบบจำลอง ANFIS สำหรับการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลแสดงในรูปที่ 4-155 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง ANFIS แสดงปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลเทียบกับข้อมูลการตรวจวัดจริงได้แสดงดังรูปที่ 4-157 ส่วนการนำแบบจำลอง ANFIS ไปทดสอบในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำระยะยาว (2543-2553 และ 2543-2562 ในรูปที่ 4-158 และรูปที่ 4-159 ตามลำดับ) รูปที่ 4-159 พบว่า แบบจำลอง ANFIS ยังให้ผลการคำนวณปริมาณการระบายน้ำสูงกว่าปริมาณการระบายน้ำจริงโดยเฉพาะในช่วงฤดูฝน ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำมีค่าต่ำกว่าข้อมูลจริง



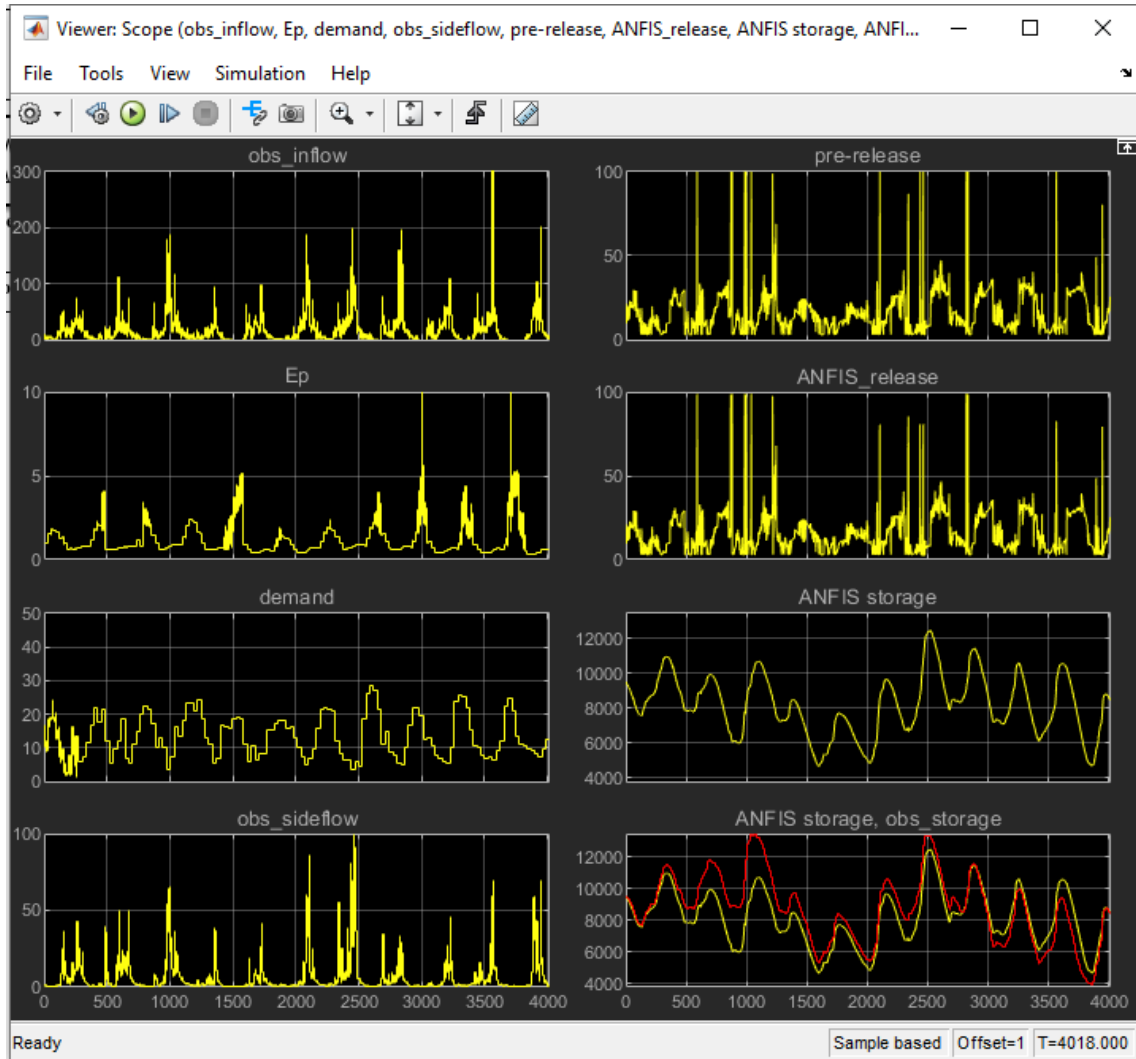
รูปที่ 4-155 ผลการพัฒนาแบบจำลอง ANFIS สำหรับการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพล



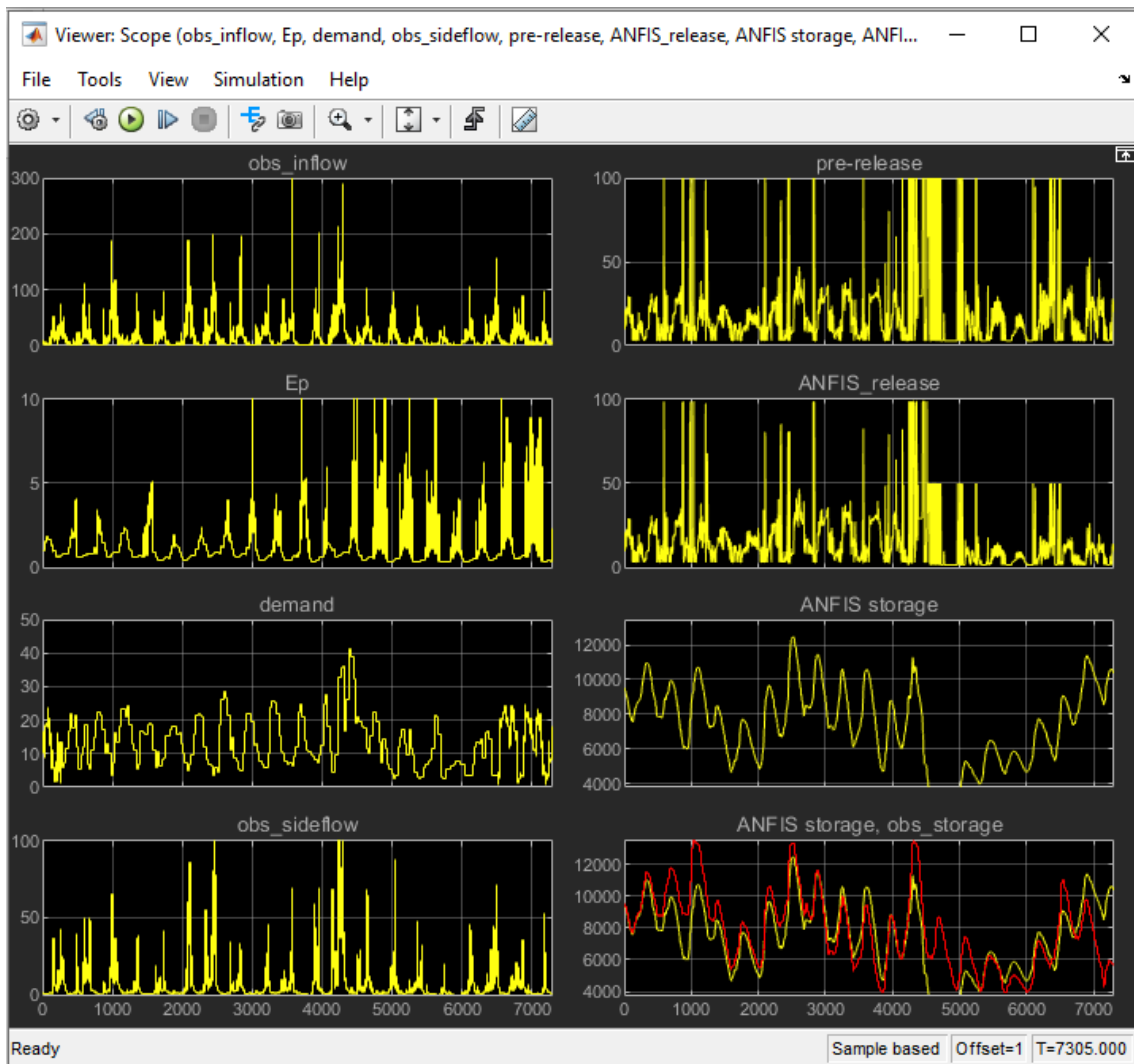
รูปที่ 4-156 โครงสร้างแบบจำลอง ANFIS



รูปที่ 4-157 ผลคำนวณการสอบเทียบแบบจำลอง ANFIS ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553



รูปที่ 4-158 ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553 โดยเอา Fuzzy Rule Adjusted มาใช้

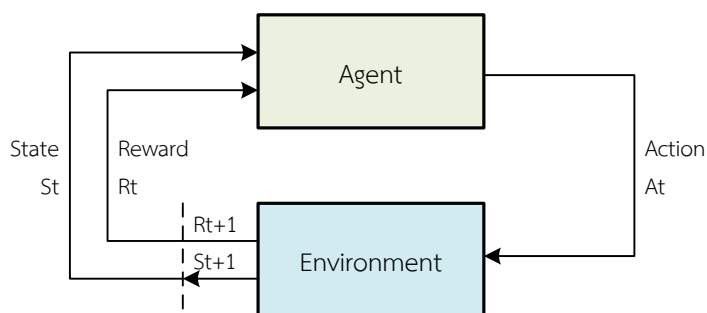


รูปที่ 4-159 ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543–2562 โดยเอา Fuzzy Rule Adjusted มาใช้

4.6.3.3 ผลการพัฒนาแบบจำลองหาค่าระบายน้ำที่ดีที่สุดด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning, RL)

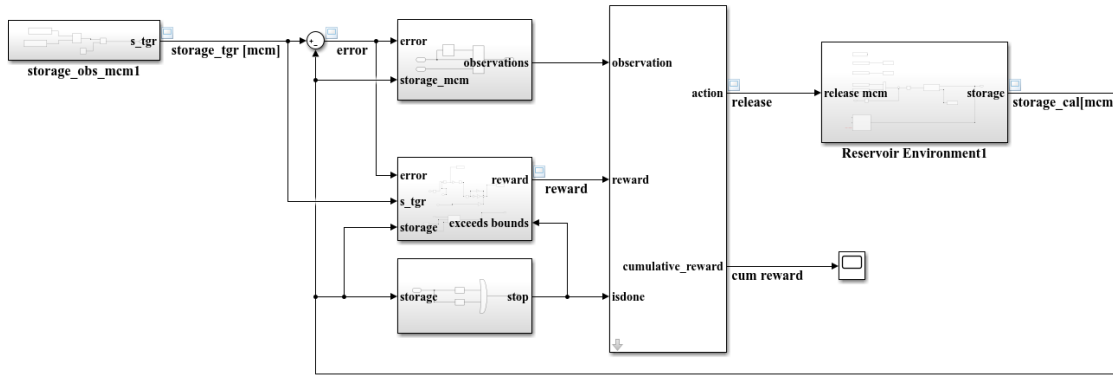
เทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning, RL) (Sutton & Barto, 2018, Richard, 2017) เป็นวิธีการเรียนรู้ประเภทหนึ่งของการเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning) โดยอาศัยให้โครงข่ายคอมพิวเตอร์มีการเรียนรู้จากการลองผิดลองถูก (Trial And Error) โครงข่ายจะใช้ประโยชน์จากข้อมูลต่าง ๆ เพื่อนำไปปรับปรุงอัลกอริทึม (Algorithm) ของโครงข่ายให้ทำงานดีขึ้น ถ้าผลการคำนวณถูกต้องโครงข่ายจะได้รับรางวัล (Reward) ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าถ่วงน้ำหนักให้กับอินพุตบางหน่วย ในทางตรงข้าม ถ้าผลการคำนวณจากโครงข่ายออกมาผิดก็จะถูกบทลงโทษ (Penalty) โดยการลดค่าถ่วงน้ำหนักของอินพุตนั้น ในด้านการประยุกต์ใช้ RL โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับงานบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ เช่น การจำลองระบบและการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในงานปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Castelletti et al., 2010; et al., 2013, Mahootchi et al., 2006, Wenwu et al., 2018) การควบคุมระบบสูบน้ำ (Hajgató et al., 2020) การจัดการระบบพลังงานน้ำ (Zarghami, 2018) เป็นต้น

หลักการของ Reinforcement Learning มีองค์ประกอบที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 4-160 โดยมีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ Agent และ 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 จะมีกระบวนการเรียนรู้หลายวิธี เช่น วิธี Q-Learning หรือวิธี Deep Learning สำหรับงานวิจัยที่เคยนำ RL ไปประยุกต์กับอ่างเก็บน้ำ คือ การประมาณค่าการระบายน้ำรายเดือนที่เหมาะสมที่สุดของอ่างเก็บน้ำ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้แบ่งปริมาตรน้ำเป็นช่วงย่อย ๆ หลายช่วงแทน State และอัตราการระบายน้ำรายเดือน (Release) ในแต่ละรูปแบบเป็น Action และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบ Q-Learning ในการหาค่า Value Function หรือค่าสูงสุดในแต่ละ State ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า RL ให้ค่า Reliability ของการปล่อยน้ำสูงกว่าแนวทางของ Stochastic Dynamic System (Mahootchi et al., 2007, Wenwu et al., 2018) แต่ยังมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถกำหนดจำนวนของ State ให้มีความละเอียดมากพอ ทั้งนี้เนื่องจากทำให้จำนวนของเงื่อนไขที่คอมพิวเตอร์คำนวณสูงไปด้วย



รูปที่ 4-160 กระบวนการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง

สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้นำเอาแนวคิดของกระบวนการเรียนรู้แบบเสริมกำลังมาพัฒนาเป็นแบบจำลองการระบายน้ำต้นแบบ โดยกำหนดองค์ประกอบของแบบจำลองดังนี้ กำหนด Environment จากปริมาณเก็บน้ำในอ่างเก็บน้ำ ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ และปริมาณความต้องการน้ำ ส่วน Action เป็นปริมาณน้ำที่ต้องระบายออกจากอ่างเก็บน้ำในแต่ละช่วงเวลา โดยระบบจะใช้หลักการระบายน้ำแบบลองผิดลองถูกเป็นรอบการคำนวณ (Episode) ซึ่งแต่ละรอบการระบายน้ำระบบจะใช้วิธี Deep Learning ในการเรียนรู้เพื่อปรับปรุงค่าของระบบและจะคำนวณผลลัพธ์ผ่านค่า Reward ของระบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของปริมาณน้ำที่ระบายเทียบกับความต้องการน้ำ ระบบจะให้ค่า Reward ต่อเมื่อปริมาณน้ำที่ระบายน้ำมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณความต้องการ ในทางตรงข้าม หากระบบล้มเหลว ซึ่งเกิดจากปริมาณการระบายน้ำไม่สอดคล้องกับความต้องการหรือปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำอยู่นอกช่วงที่พิจารณา ระบบจะให้ค่า Penalty ดังแสดงผลการพัฒนาแบบจำลองในรูปที่ 4-161



รูปที่ 4-161 MATLAB/Simulink สำหรับจำลองระบบการระบายน้ำด้วยการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง

4.6.3.4 ผลการพัฒนาแบบจำลองการระบายน้ำด้วยเทคนิคนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้

และการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model with Reinforcement Learning, ANFIS with RL)

4.6.3.4.1 การกำหนดรูปแบบของแบบจำลอง (Model Formulation)

กรอบวิจัยแบ่งส่วนงานออกเป็น 3 องค์ประกอบ คือ (1) การวางแผนบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operation and Planning) (2) การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operating Policy) และ (3) การประเมินสมรรถนะการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Performance) การดำเนินงานเริ่มจาก การตั้งโจทย์วิจัยที่ต้องการเพิ่มปริมาณการเก็บกักน้ำในวันที่ 1 พฤศจิกายนของทุกปีให้เพิ่มขึ้นได้เฉลี่ย 85% ซึ่งโจทย์วิจัยดังกล่าวได้จำแนกออกเป็นขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ตั้งโจทย์ย่อยคือปริมาณการระบายน้ำรายเดือน (Monthly Release) ที่เหมาะสมที่สุดควรจะเป็นเท่าไร หากกำหนดให้ปริมาณการเก็บกักน้ำในเดือนพฤศจิกายนอยู่ที่ 85% การดำเนินงานในขั้นตอนนี้จะใช้แนวทางวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการหาค่าที่ดีที่สุดหรือมีค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization Techniques) โดยพิจารณาข้อมูลสถิติของน้ำรายเดือนย้อนหลังปีใดปีหนึ่งระหว่างปี พ.ศ. 2543 จนถึงปี พ.ศ. 2561 การดำเนินงานเบื้องต้นเพื่อทดสอบความเป็นไปได้คือ เลือกข้อมูลทดสอบ 2 ช่วงเวลาคือ ช่วงที่ 1 : เริ่มต้นน้ำน้อย (เลือกเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2559 ถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2560) และส่วนช่วงที่ 2 : เริ่มต้นน้ำปกติ (เลือกเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2560 จนถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2561) การดำเนินการด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเริ่มจากกำหนดปริมาณการเก็บกักเริ่มต้น (Beginning Storage) ให้เท่ากับข้อมูลจริงในเดือนพฤศจิกายน จากนั้นกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) คือ ปริมาณการเก็บกักน้ำเมื่อสิ้นสุดการจำลอง (Ending Storage) เท่ากับหรือมากกว่า 85% ส่วนข้อจำกัด (Constraints) ต่าง ๆ กำหนดตามแนวทางการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำทั่วไป เช่น กำหนดให้การขาดแคลนน้ำ (Shortage) ให้มีค่าน้อยสุด ระดับน้ำอยู่ในช่วงที่เหมาะสม เป็นต้น ผลลัพธ์การคำนวณจะพิจารณาค่าต่าง ๆ ประกอบด้วย ค่า Ending Storage สามารถเพิ่มสูงขึ้นได้ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากน้อยเพียงใด เกิดการขาดแคลนน้ำกี่ครั้งและรุนแรงหรือไม่ โดยเปรียบเทียบกับปริมาณการระบายน้ำจากการตรวจวัดจริง เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ คือ Excel Spreadsheet (เครื่องมือวิเคราะห์ Solver รวม 3 เทคนิค คือ GRG Nonlinear, Simplex LP และ Evolutionary) สรุปผลลัพธ์ขั้นตอนนี้จะได้ปริมาณการระบายน้ำรายเดือนและปริมาณเก็บกักที่เหมาะสมที่สุดเพื่อส่งต่อข้อมูลไปยังขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 2 ปริมาณการเก็บกักที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากขั้นตอนแรกจะถูกนำมากำหนดเป็นค่าเป้าหมาย (Target Storage) เพื่อหารูปแบบการระบายน้ำรายวัน (Daily Release) ที่เหมาะสม

ที่สุดของแต่ละเดือน การดำเนินงานจะกระทำในรูปแบบเดียวกันกับขั้นตอนแรก ต่างกันที่การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ปริมาณการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด ส่วนสมการข้อจำกัดหลักคือ ค่า Ending Storage ต้องเท่ากับ Beginning Storage (Steady State Condition) ค่าอื่น ๆ กำหนดตามเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการจำลองรายวัน การดำเนินงานในขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 เป็นรูปแบบของการวางแผน (Planning) ซึ่งจะทำให้การปรับปรุงค่าเมื่อรับค่าสถิติใหม่ (ค่าคาดการณ์รายเดือน/รายวัน) เข้ามาพิจารณา

การดำเนินงานในขั้นตอนที่ 3 เป็นการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรายวัน การตั้งโจทย์ขั้นตอนนี้คือ จะควบคุมการระบายน้ำรายวัน (Daily Release) โดยยังรักษาปริมาณเก็บกักน้ำเป้าหมาย (Target Storage) ไว้ และเกิดค่าการขาดแคลนน้ำต่ำที่สุด การดำเนินงานในขั้นตอนนี้ จะใช้ค่าการระบายน้ำรายวัน (Daily Release) ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 มาเป็นแนวทางในการระบายน้ำเบื้องต้น และใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) แบบผสมผสานระหว่างฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) และนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ (Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System, ANFIS) และเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning) มาควบคุมการระบายน้ำและประเมินสมรรถนะของระบบบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ โดยแบ่งส่วนหลักของงานออกเป็น 3 ส่วน คือ (1) พัฒนาแบบจำลองการระบายน้ำรายวันโดยใช้ Rule-Based Fuzzy Inference System แบบจำลองจะสร้างขึ้นโดยอาศัยการลอกเลียนรูปแบบการระบายน้ำจริง โดยใช้หลักของเหตุและผลแบบฟัซซีลอจิก (เช่น ถ้าวันนี้มีปริมาณน้ำไหลเข้าสูงมาก และวันนี้ปริมาณการเก็บกักน้ำอยู่ในเกณฑ์สูงแล้ว กำหนดให้สัดส่วนการระบายน้ำสูง เป็นต้น) และควบคุมการระบายน้ำเป็นฤดูกาล (ฝน/แล้ง) ข้อดีของวิธีนี้คือ สร้างแบบจำลองง่าย เข้าใจการทำงานทุกขั้นตอน ตรวจสอบความสมเหตุสมผลได้ง่าย ข้อด้อยคือ การกำหนดกฎเกณฑ์ในการควบคุมน้ำอาจไม่ครอบคลุมกับสภาพจริงมากนัก (2) พัฒนาแบบจำลองการระบายน้ำรายวันโดยใช้ ANFIS แบบจำลองจะสร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลสถิติย้อนหลังมาทำการ training เพื่อให้ได้โครงสร้างการควบคุมแบบฟัซซีลอจิกแบบอัตโนมัติ ไม่ได้ให้คนสร้างขึ้นเหมือนวิธีแรก ข้อดีคือ สร้างแบบจำลองง่าย แต่หารูปแบบที่เหมาะสมกับข้อมูลค่อนข้างยาก งานวิจัยนี้ เมื่อแบบจำลอง ANFIS ถูกพัฒนาขึ้นแล้ว จะทำการปรับแต่งตัวแปรรูปแบบของฟังก์ชันสมาชิก (Membership Function) และกฎฟัซซี (Rule-Based System) โดยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Particle Swarm Optimization อีกครั้งเพื่อให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสม

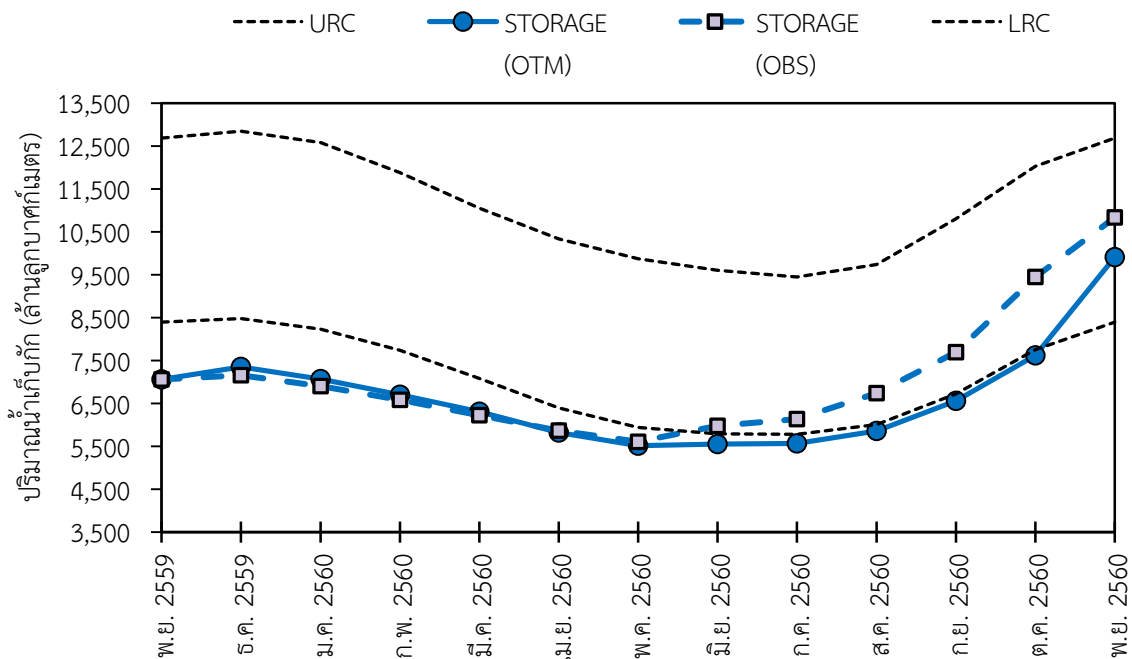
ขั้นตอนที่ 4 เป็นขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองเพื่อปรับจูนค่าการระบายน้ำทั้งระบบในขณะที่ปฏิบัติการ เพื่อให้สมรรถนะของระบบบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning, RL) แนวคิดในขั้นตอนนี้คือ ในขณะที่ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรายวัน หากตัวแปรสถานะ (State Variable) ที่ใช้ในการตัดสินใจมีการเปลี่ยนแปลงไป ระบบจะเรียนรู้และจะ Action โดยการตัดสินใจระบายน้ำได้อย่างไร แนวทางการพัฒนาโมดูลย่อยนี้คือ การกำหนด State Variable และกำหนดตัวแปรในการ Action กับระบบ ส่วนกระบวนการ Learning จะใช้โครงสร้างของ Deep Learning มาเรียนรู้รูปแบบการปล่อยน้ำ โดย RL จะสุ่มการปล่อยน้ำโดยอาศัยการลองผิดและลองถูก (Trail and Error) ในการระบายน้ำ และ RL จะเลือกรูปแบบการปล่อยน้ำที่ดีที่สุดจากค่า Reward ที่ได้

4.6.3.4.2 ผลการพัฒนาแบบจำลองและทดสอบการทำงานในการจำลองระบบ

ผลการดำเนินงานที่ผ่านมาสรุปงานได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

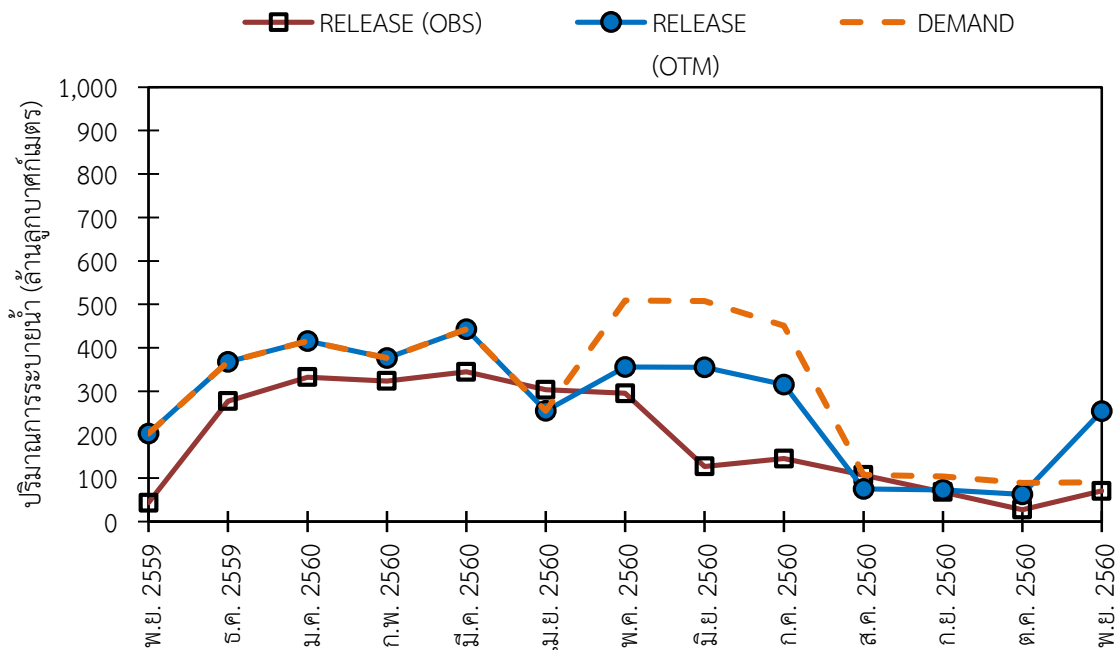
ส่วนที่ 1 การทดสอบหารูปแบบการระบายน้ำรายเดือนที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Technique) กำหนดแนวทางการทดสอบ 2 ช่วงเวลาคือ

ช่วงที่ 1 (เริ่มพฤศจิกายน พ.ศ. 2559 ถึงพฤศจิกายน พ.ศ. 2559) กำหนดค่า Beginning Storage เท่ากับ 7,055 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งเท่ากับข้อมูลจากการตรวจวัดจริง กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้ค่า Ending Storage มากกว่าหรือเท่ากับ 85% ของปริมาตรเก็บกักใช้การ ส่วนสมการข้อจำกัดประกอบด้วย ปริมาณน้ำเก็บกักสูงกว่า 3,800 ล้านลูกบาศก์เมตร ยอมให้เกิดการขาดน้ำได้ต่ำกว่า 5% ผลลัพธ์ (รูปที่ 4-162) พบว่า ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดการจำลองเท่ากับ 9,910 ล้านลูกบาศก์เมตร เทียบเป็นสัดส่วน 75% ต่ำกว่าค่าการตรวจวัดจริง 2% (10,830 ล้านลูกบาศก์เมตร) พิจารณารูปแบบการระบายน้ำ (รูปที่ 4-163) ผลลัพธ์จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดให้รูปแบบการระบายน้ำเท่ากับความต้องการน้ำ (Water Demand) ในช่วงแล้ง ส่วนช่วงฝนต่ำกว่าความต้องการในบางเดือน หากเทียบกับรูปแบบการระบายน้ำจริง พบว่า ในช่วงปีที่พิจารณานี้ การระบายน้ำจริงมีสัดส่วนต่ำกว่าค่าความต้องการค่อนข้างมาก โดยเฉพาะเดือนมิถุนายนและกรกฎาคม



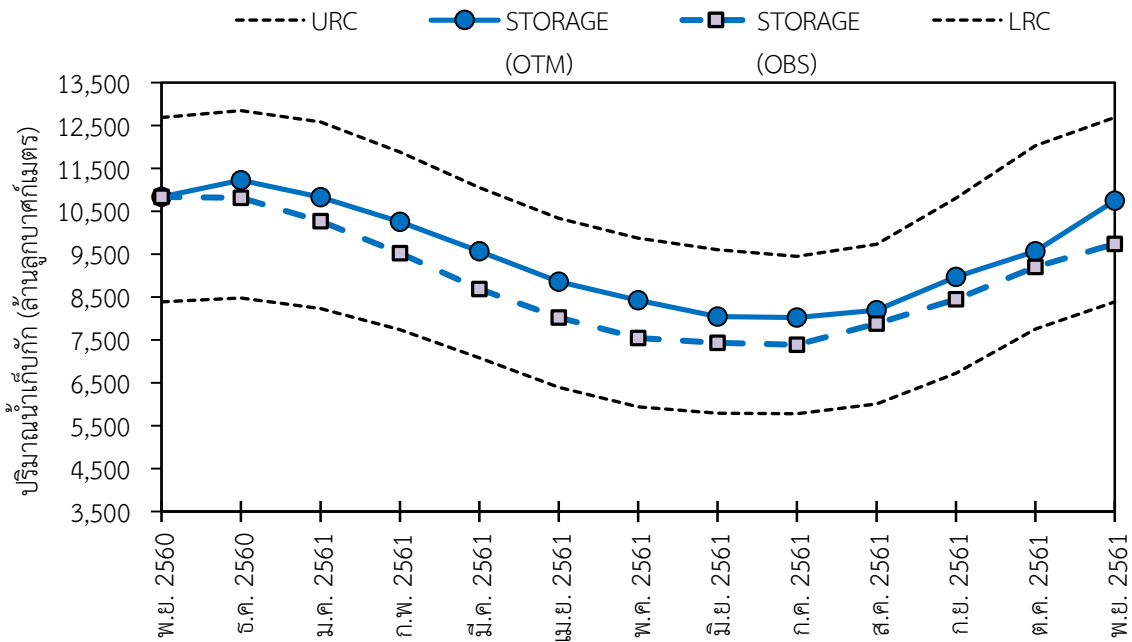
รูปที่ 4-162 เปรียบเทียบผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเก็บกักน้ำของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2559-2560 (OTM : Optimization Techniques, OBS : ปริมาณการเก็บกักน้ำจริง)

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

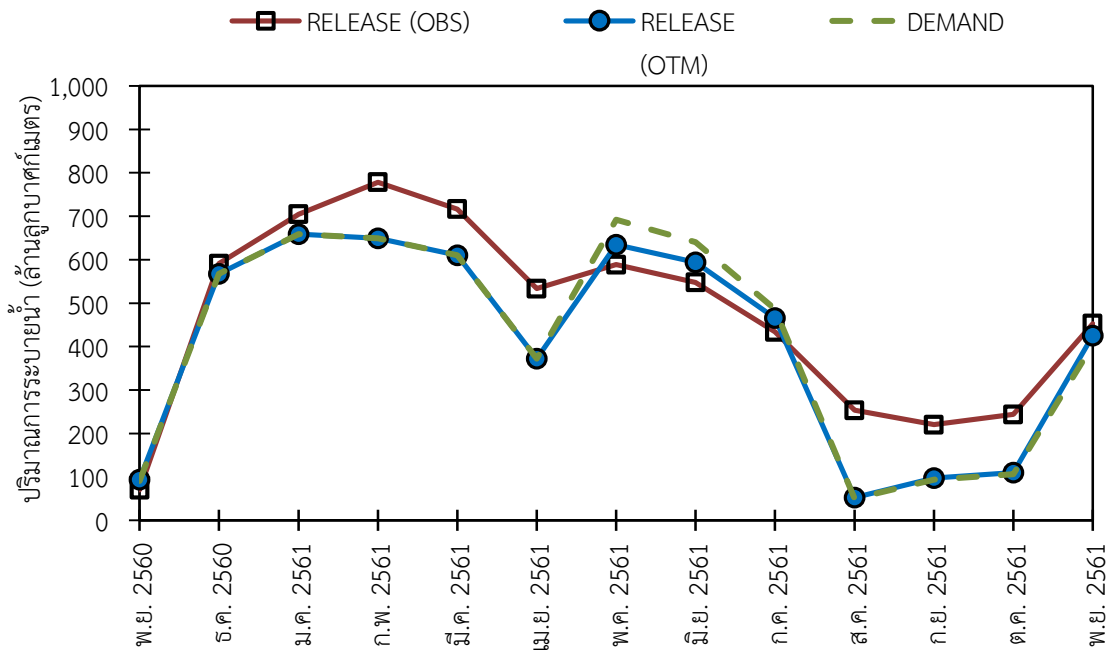


รูปที่ 4-163 เปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2559-2560 (OTM : Optimization Techniques, OBS : ค่าการระบายน้ำจริง)

ช่วงที่ 2 (เริ่มพฤศจิกายน พ.ศ. 2560 ถึงพฤศจิกายน พ.ศ. 2561) กำหนดค่าต่าง ๆ เช่นเดียวกับช่วงแรก โดยค่า Beginning Storage เท่ากับ 10,830 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งปีนี้ถือว่าปริมาณการเก็บกักอยู่ในเกณฑ์ปกติ ผลลัพธ์ (รูปที่ 4-164) พบว่า ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อสิ้นสุดการจำลองเท่ากับ 10,830 ล้านลูกบาศก์เมตร ใกล้เคียงกับค่าปริมาณเก็บกักเริ่มต้นสูงกว่าค่าการตรวจวัดจริง 7% (9,737 ล้านลูกบาศก์เมตร) พิจารณารูปแบบการระบายน้ำ (รูปที่ 4-165) ผลลัพธ์จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดให้รูปแบบการระบายน้ำใกล้เคียงกับความต้องการตลอดทั้งปีเทียบกับรูปแบบการระบายน้ำจริงพบว่า ช่วงปีนี้การระบายน้ำจริงมีสัดส่วนสูงกว่าต้องการ



รูปที่ 4-164 เปรียบเทียบผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเก็บกักน้ำของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2560-2561 (OTM : Optimization Techniques, OBS : ปริมาณการเก็บกักน้ำจริง)



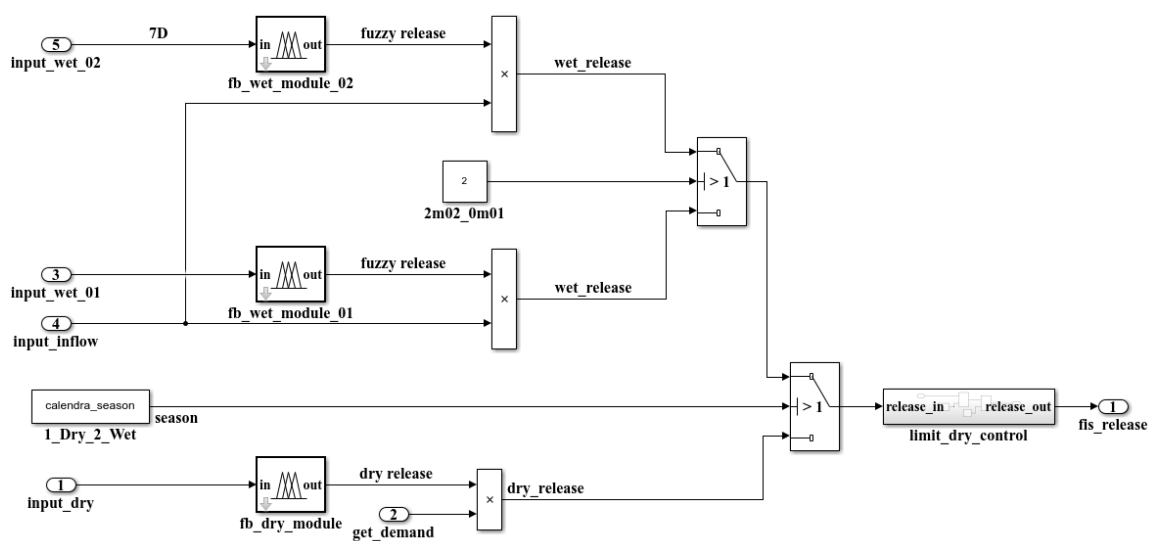
รูปที่ 4-165 เปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2560-2561 (OTM : Optimization Techniques, OBS : ค่าการระบายน้ำจริง)

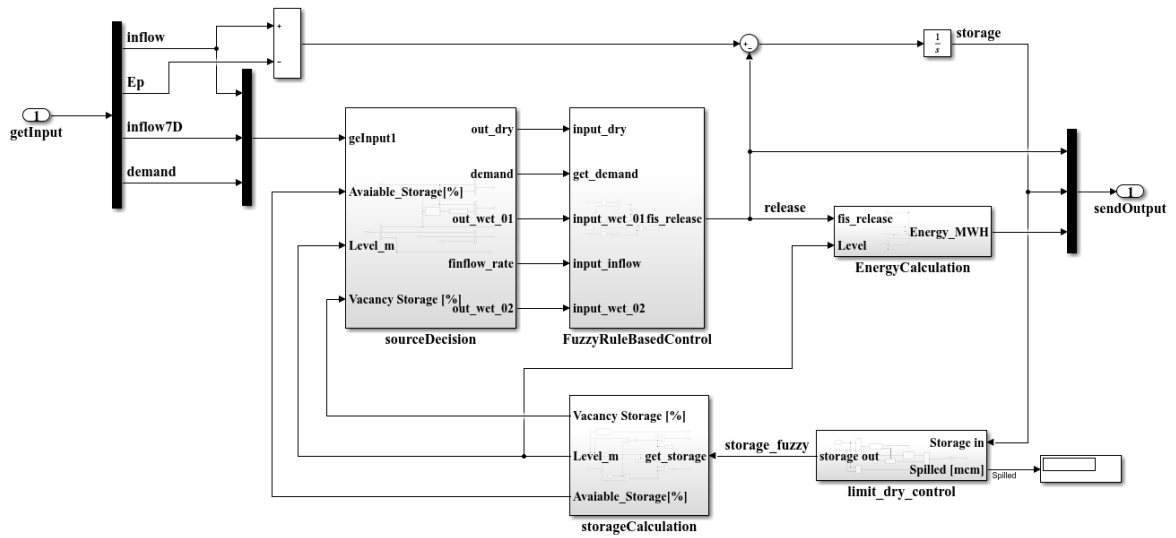
4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

สรุปผลการดำเนินงานในส่วนที่ 1 ยังมีข้อจำกัดในส่วนของ Excel Spreadsheet ที่สร้างขึ้นมามีจำนวนเนื่องจากจำกัดปริมาณข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ อาจต้องพัฒนาชุดคำสั่งโดยโปรแกรม Matlab เพื่อใช้คำนวณเอง

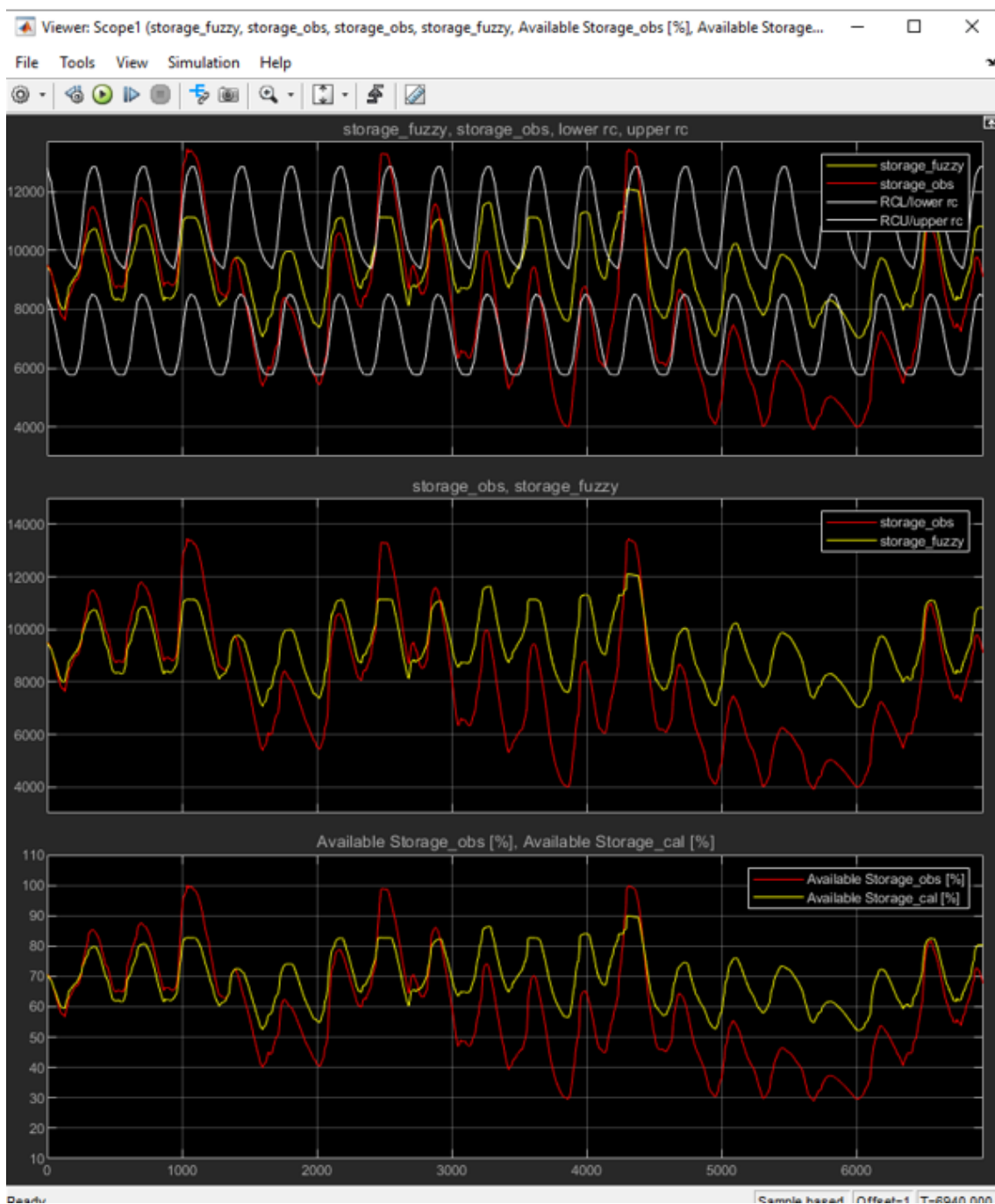
ส่วนที่ 2 การพัฒนาแบบจำลองการระบายน้ำรายวันด้วยแบบจำลอง Rule-Based Fuzzy Inference System แบบจำลอง ANFIS และแบบจำลอง Reinforcement Learning การดำเนินงานในส่วนนี้ได้พัฒนาแบบจำลองในลักษณะโมดูล (Module) การไหลเวียนของน้ำในระบบบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ ด้วยโปรแกรม MATLAB รูปแบบของ Live Script File, M-file และ Simulink โดยใช้ Application ประกอบด้วย Fuzzy Logic Toolbox, ANFIS, Reinforcement Learning และ Deep Network Designer โดยแบบจำลองในส่วนนี้เป็น Module หลัก ส่วน Module ย่อยจะแบ่งส่วนการพัฒนากออกเป็น

(1) โมดูลย่อย Rule-Based Fuzzy Inference System แบ่งการควบคุมออกเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมการระบายน้ำในช่วงแล้ง (Dry Module) และช่วงฝน (Wet Module) โดยช่วงแล้งทดสอบตัวแปรนำเข้า 2 ตัวแปร คือ Available Storage และ Inflow ตัวแปรนำออก 1 ตัวแปร คือ สัดส่วนการระบายน้ำโดยกำหนดเป็นสัดส่วนของความต้อการน้ำรายวัน (Demand Fraction) กฎการควบคุมแบบ Fuzzy Logic มีจำนวน 20 กฎ ส่วนช่วงฝนได้ทดสอบ 2 โมดูลย่อย ต่างกันที่ตัวแปรนำเข้า โมดูลย่อย (Wet-1) พิจารณาตัวแปรนำเข้า 2 ตัวแปรคือ Available Storage และ Cumulative Inflow Fraction (สัดส่วนปริมาณน้ำไหลเข้ารายวันสะสม) โมดูลย่อย (Wet-2) พิจารณาตัวแปรนำเข้า 3 ตัวแปร คือ Cumulative 7D-Inflow Fraction (สัดส่วนปริมาณน้ำไหลเข้ารายวันสะสมล่วงหน้า 7 วัน) ค่า Vacancy Storage และ Water Level ส่วนตัวแปรนำออก 1 ตัวแปร กำหนดเหมือนกันคือ สัดส่วนการระบายน้ำโดยกำหนดเป็นสัดส่วนของปริมาณน้ำไหลเข้ารายวัน (Inflow Fraction) การพัฒนาแบบจำลองได้ประมวลผลจากการสัมภาษณ์ผู้ปฏิบัติงานจริงรวมถึงผู้เชี่ยวชาญ ผลการทดสอบการพัฒนาแบบจำลองในโมดูลนี้ ใช้สถิติข้อมูลรายวันย้อนหลังตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543 จนถึง พ.ศ. 2561 ผลลัพธ์พบว่า แบบจำลองสามารถจำลองการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำได้ และสามารถควบคุมปริมาณการเก็บกักน้ำให้สัมพันธ์กับปริมาณการเก็บกักจากการตรวจวัดจริง แต่ยังคงต้องปรับเปลี่ยน Membership Function และ Rule-Based ในช่วงฝนที่มีปริมาณ Inflow สูง โมดูลที่พัฒนาแสดงตัวอย่างบางส่วนในรูปที่ 4-166 และรูปที่ 4-167





รูปที่ 4-166 โมดูลย่อย Rule-Based Fuzzy Inference System สำหรับควบคุมการระบายน้ำรายวัน

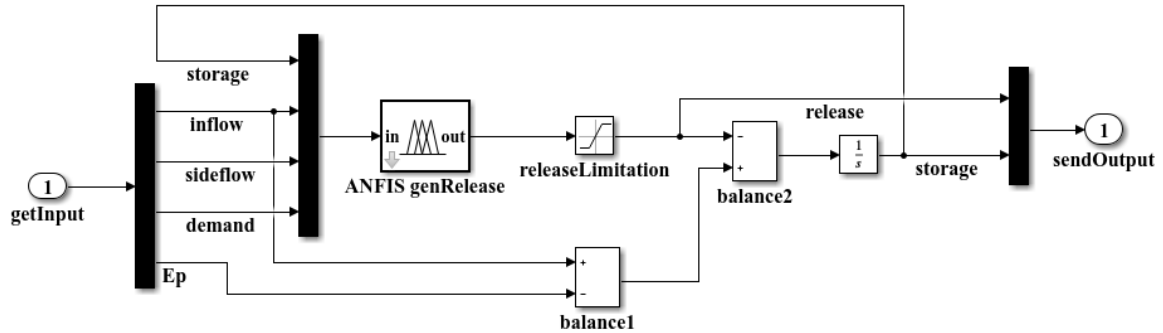


รูปที่ 4-167 ตัวอย่างผลลัพธ์การคำนวณปริมาณการเก็บกักน้ำด้วยโมดูล Rule-Based Fuzzy Inference System

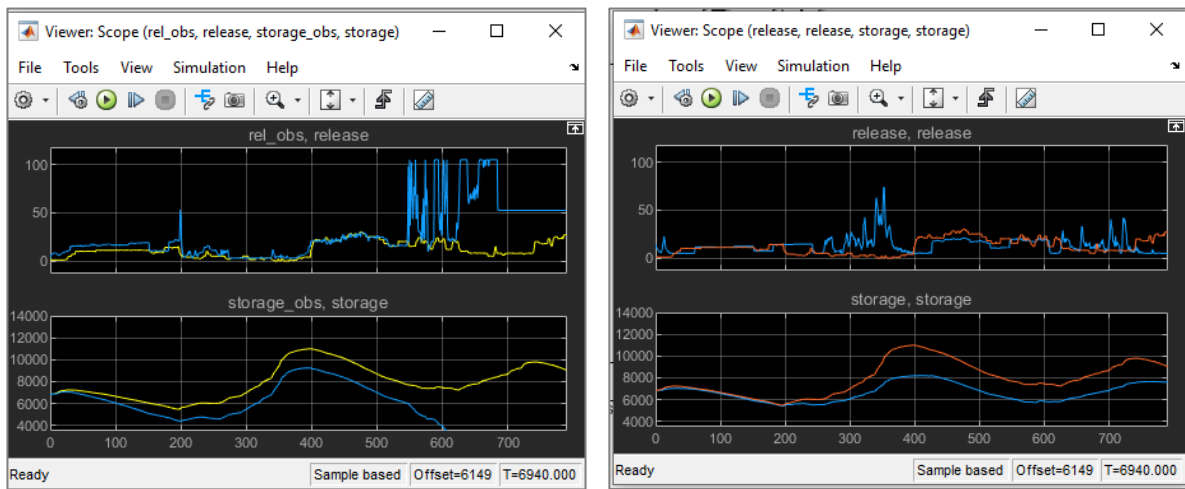
(2) โมดูลย่อย ANFIS ได้นำข้อมูลสถิติย้อนหลังรายวัน 18 ปี โดยกำหนดชุดข้อมูลสำหรับกระบวนการเรียนรู้ (Learning) (15 ปี ระหว่างปี พ.ศ. 2543–2557) กระบวนการทดสอบ (Testing) (3 ปี ระหว่างปี พ.ศ. 2558–2560) กำหนดโครงสร้างแบบจำลองเป็น Sugeno โดยกำหนดตัวแปรสำหรับ Learning คือ Storage, Inflow, Sideflow และ Demand ส่วนตัวแปรนำออกคือ Release กำหนดรูปแบบของ Membership Function เป็นแบบ Triangular และซุ่มจำนวนตัวแปรละ 3 Function ส่วนตัวแปรนำออกกำหนดเป็นเส้นตรง (Linear) จากนั้นใช้กระบวนการฝึกอบรม (Training) เพื่อหาโครงสร้างแบบจำลองที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม เมื่อนำโครงสร้าง ANFIS ที่ได้มาทำการทดสอบโดยจำลองการระบายน้ำแล้ว พบว่า

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

แบบจำลองยังให้ค่าผลลัพธ์คลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก ดังนั้น จึงเขียนโปรแกรมอีกชุดคำสั่งหนึ่งเพื่อปรับค่าโครงสร้างแบบจำลอง ANFIS โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Particle Swarm Optimization อีกครั้ง และพบว่าแบบจำลองให้ผลการคำนวณคลาดเคลื่อนน้อยลงค่อนข้างมาก ผลลัพธ์การคำนวณและโครงสร้างแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4-168 และรูปที่ 4-169

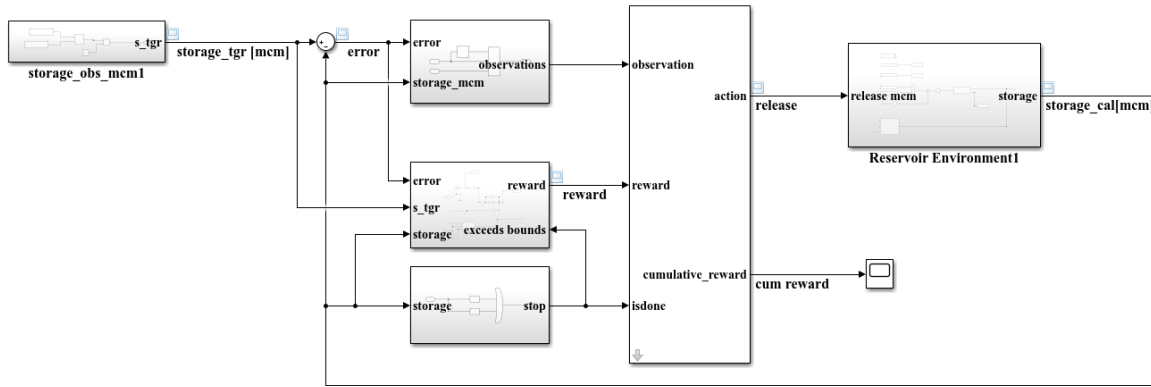


รูปที่ 4-168 โมดูลย่อย ANFIS สำหรับควบคุมการระบายน้ำรายวัน

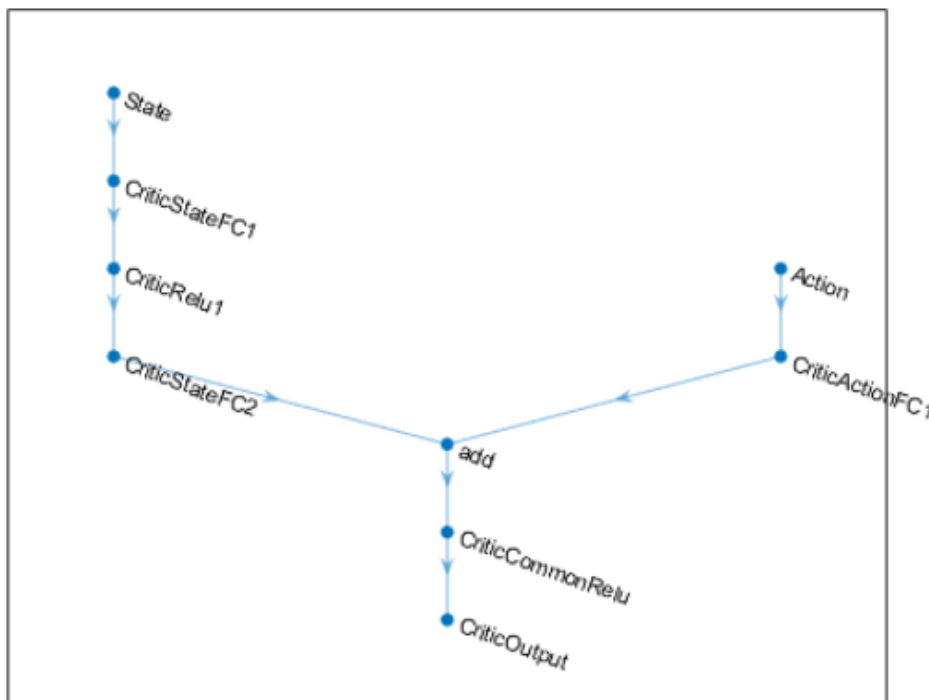


รูปที่ 4-169 ตัวอย่างผลลัพธ์การคำนวณปริมาณการเก็บกักน้ำด้วยโมดูล ANFIS ที่ปรับแก้โครงสร้างแล้ว

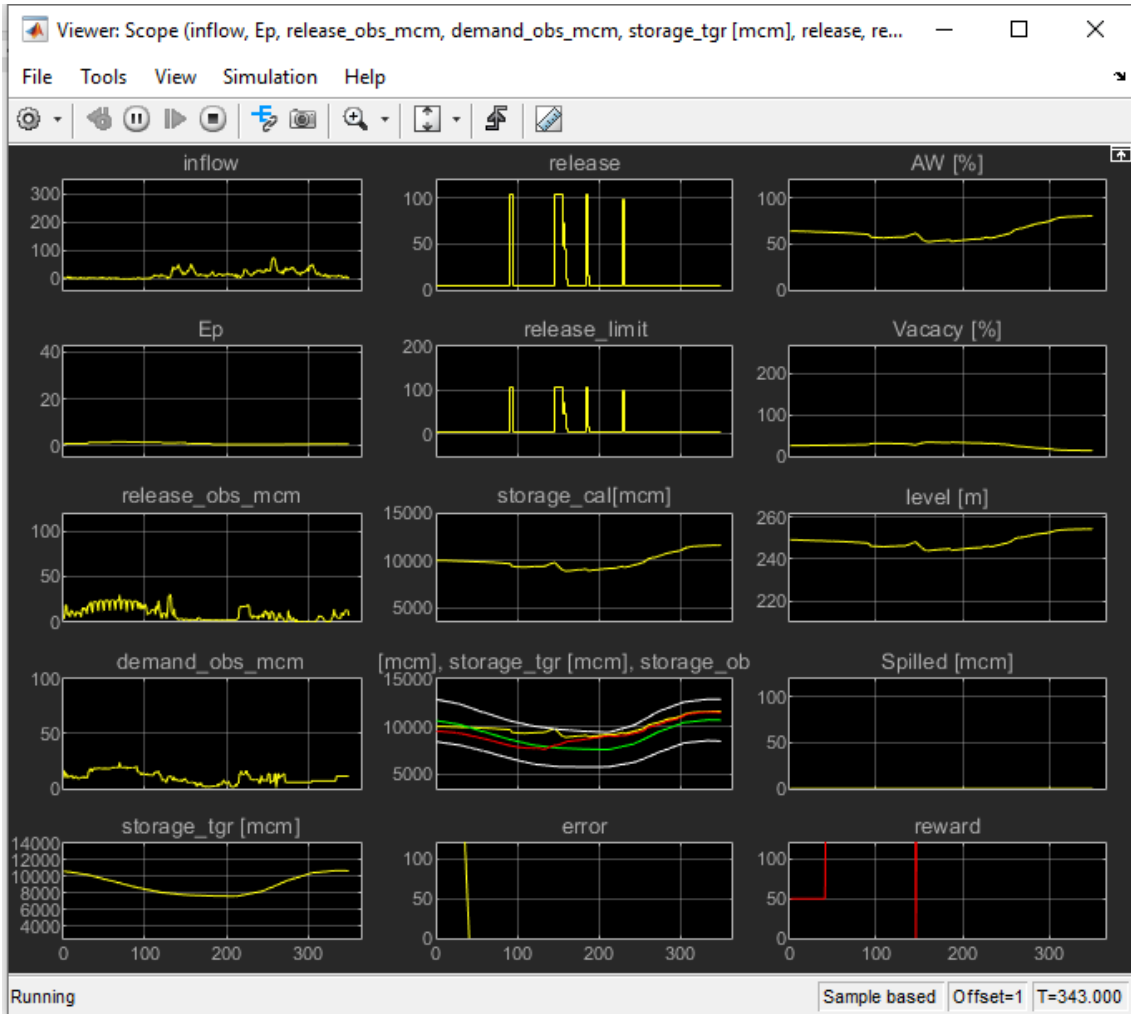
(3) โมดูลย่อย Reinforcement Learning (RL) การดำเนินงานที่ผ่านมาในขั้นตอนนี้ได้พัฒนา RL ต้นแบบอย่างง่าย (รูปที่ 4-170) โดยการทดสอบกำหนด State Variable บางตัว เช่น ค่า Error จาก Target Storage ค่า Inflow ค่า Storage ส่วน Action กำหนด 1 ตัวแปร คือ การสัดส่วนการปล่อยน้ำที่เพิ่มขึ้น/ลดลง (Release Fraction) ส่วนกระบวนการเรียนรู้ (Learning) เขียนชุดคำสั่งโดยใช้โครงสร้างของ Deep Learning กำหนดชั้นของการเรียนรู้แบบไม่ซบซ้อน (รูปที่ 4-171) ผลการทดสอบโมดูล RL โดยทดลองให้ RL ระบายน้ำจำนวน 200 Episode (รูปที่ 4-172) จากนั้น จะประเมินค่า Reward (รูปที่ 4-173) สะสม ดังนั้น ผลการดำเนินงานในขั้นตอนนี้ พอสรุปได้ว่าได้ดำเนินการพัฒนาโมดูล RL และกำลังปรับปรุงชุดคำสั่งในส่วนของการกำหนด State Variable และรูปแบบของค่า Reward ที่เหมาะสม



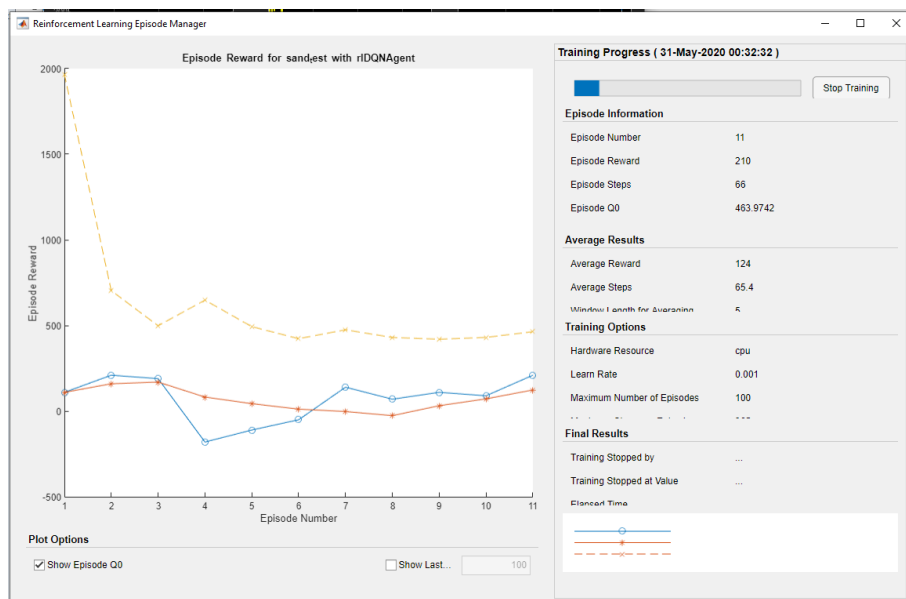
รูปที่ 4-170 โมดูลย่อย Reinforcement Learning



รูปที่ 4-171 การกำหนดโครงสร้าง Deep Learning ใน Reinforcement Learning



รูปที่ 4-172 ตัวอย่างการ Learning ของ RL โดยการระบายน้ำในแต่ละ Episode



รูปที่ 4-173 ค่า Reward สะสมที่ได้จากการระบายน้ำ

4.6.4 แนวทางที่ 4 แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Stochastic Constraint Programming with Machine Learning)

งานวิจัยในส่วนนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการพัฒนาแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำล่องหน้าทั้งการพยากรณ์ระยะสั้น (Short Time Prediction) และการพยากรณ์ระยะยาว (Long Term Prediction) โดยอาศัยหลักการปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) และเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning) ซึ่งได้ดำเนินการแบบจำลองการพยากรณ์ระยะสั้นแล้วเสร็จ และอยู่ในระหว่างการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ระยะยาว ส่วนที่ 2 เป็นการพัฒนาแบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดในรูปแบบของการโปรแกรมเชิงสุ่มแบบข้อจำกัด (Stochastic Constraint Programming) โดยนำเข้าข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำรายวันระยะยาวตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2561 ร่วมกับผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำล่องหน้าที่ได้จากเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่องข้างต้น

4.6.4.1 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Reservoir Inflow Forecasting Model with Machine Learning)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะทำการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำล่องหน้าทั้งการพยากรณ์ระยะสั้นรายวันที่ช่วงเวลา 1 วัน 7 วัน และ 30 วันล่องหน้า และการพยากรณ์ระยะยาวรายเดือนที่ช่วงเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน ล่องหน้า โดยจะพัฒนาแบบจำลองพยากรณ์รายวัน และแบบจำลองพยากรณ์รายเดือน โดยอาศัยหลักการปัญญาประดิษฐ์และเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่องที่มีความทันสมัยและให้ผลการพยากรณ์ที่ระดับความแม่นยำสูง โดยมีโครงสร้างการทำงานพื้นฐานมาจากระบบโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ (Artificial Neural Networks, ANNs) ร่วมกับหลักการทางสถิติ (Statistical Technique) และเทคนิค eXtream Gradient Boosting ในลักษณะ Hybrid Method โดยกำหนดรูปแบบของแบบจำลองการพยากรณ์ในลักษณะต่าง ๆ ด้วยการปรับเปลี่ยนตัวแปรนำเข้า พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม เฟอร์เซ็นต์ชุดข้อมูลฝึกอบรม และชุดข้อมูลทดสอบ และทำการประเมินประสิทธิภาพของการพยากรณ์ในรูปของค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยยกกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, Cor) ดังแสดงในตารางที่ 4-59 ถึงตารางที่ 4-70 และรูปที่ 4-174 ถึงรูปที่ 4-176

ตารางที่ 4-59 ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 1 วันล่องหน้า
Experiment: Training 80: Testing 20

Input: Inflow t-1, Inflow t-2, Inflow t-3, Avg. Inflow t-3, Avg. Inflow t-5, Avg. Inflow t-5, Avg. Inflow t-15

XGBoost parameter: eta = 0.01, gamma = 0.5

Predicted variable: Inflow at 7D

RMSE	Cor	lag1	lag2	lag3	avg3	avg5	avg7	avg15
18.37387	0.579488	/	/	/	/	/	/	/
17.04593	0.626594	/	/	/	/	/	/	
17.26967	0.6233009	/	/	/	/	/		
16.48486	0.6427408	/	/		/	/	/	

RMSE	Cor	lag1	lag2	lag3	avg3	avg5	avg7	avg15
16.35035	0.6426842	/	/		/	/		
17.8595	0.5879647	/			/	/	/	/
16.3172	0.6473194	/			/	/	/	
16.2969	0.648902	/			/		/	
16.62238	0.6342956	/			/	/		
16.63178	0.6257281	/			/			

ตารางที่ 4-60 ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 1 วันล่วงหน้า
Experiment: Training 80: Testing 20

Input: Inflow t-1, Inflow t-2, Inflow t-3, Avg. Inflow t-3, Avg. Inflow t-5, Avg. Inflow t-5, Avg. Inflow t-15

XGBoost parameter: eta = 0.01, gamma = 0

Predicted variable: Inflow at 7D

RMSE	Cor	lag1	lag2	lag3	avg3	avg5	avg7	avg15
18.34339	0.5798925	/	/	/	/	/	/	/
16.87208	0.6307562	/	/	/	/	/	/	
17.50262	0.6199574	/	/	/	/	/		
16.26423	0.6455319	/	/		/	/	/	
16.58670	0.6390268	/	/		/	/		
17.63101	0.5907709	/			/	/	/	/
16.33699	0.6469302	/			/	/	/	
16.27893	0.6495144	/			/		/	
16.71336	0.6337304	/			/	/		
16.63291	0.6258254	/			/			

ตารางที่ 4-61 ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 1 วันล่วงหน้า
Experiment: Training 80: Testing 20

Input: Inflow t-1, Inflow t-2, Inflow t-3, Avg. Inflow t-3, Avg. Inflow t-5, Avg. Inflow t-5, Avg. Inflow t-15

XGBoost parameter: eta = 0.30, gamma = 0

Predicted variable: Inflow at 7D

RMSE	Cor	lag1	lag2	lag3	avg3	avg5	avg7	avg15
18.04417	0.5818536	/	/	/	/	/	/	/
17.67838	0.6080268	/	/	/	/	/	/	

RMSE	Cor	lag1	lag2	lag3	avg3	avg5	avg7	avg15
16.87611	0.6289949	/	/	/	/	/		
16.59273	0.6402118	/	/		/	/	/	
16.12566	0.6562875	/	/		/	/		
17.47404	0.5966096	/			/	/	/	/
16.64839	0.6331023	/			/	/	/	
15.72767	0.6686594	/			/		/	
16.59019	0.6352165	/			/	/		
16.99036	0.6132105	/			/			

ตารางที่ 4-62 ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 1 วันล่วงหน้า

Experiment: Training 80: Testing 20

Input: Inflow t-1, Inflow t-2, Inflow t-3, Avg. Inflow t-3, Avg. Inflow t-5, Avg. Inflow t-5, Avg. Inflow t-15

XGBoost parameter: eta = 0.20, gamma = 0

Predicted variable: Inflow at 7D

RMSE	Cor	lag1	lag2	lag3	avg3	avg5	avg7	avg15
18.16627	0.5848668	/	/	/	/	/	/	/
17.28937	0.6139094	/	/	/	/	/	/	
16.86694	0.6296822	/	/	/	/	/		
16.44713	0.6431550	/	/		/	/	/	
16.34216	0.6448084	/	/		/	/		
17.63439	0.5929770	/			/	/	/	/
16.23538	0.6480426	/			/	/	/	
16.01108	0.6577745	/			/		/	
16.91496	0.6217778	/			/	/		
16.93766	0.6185235	/			/			

ตารางที่ 4-63 ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 1 วันล่วงหน้า

Experiment: Training 80: Testing 20

Input: Inflow t-1, Avg. Inflow t-3, Avg. Inflow t-7, Avg. Humidity t, Avg. Temperature t, Avg. Pressure t, Avg. Precipitation t

XGBoost parameter: eta = 0.2, gamma = 0

Kalman Interpolation (best for time series)

Predicted variable: Inflow at 7D

RMSE	Cor	lag1 avg3,7	avg. humidity	avg.temp	avg. pressure	avg.pcp
17.55914	0.6504672	/	/	/	/	/
17.73965	0.6440032	/	/	/	/	/
16.42620	0.6481013	/	/	/	/	/
15.94969	0.6740718	/	/	/	/	/
16.44876	0.6589034	/	/	/	/	/
16.06910	0.6544575	/	/	/	/	/
16.56759	0.6515262	/	/	/	/	/
17.78242	0.6429944	/	/	/	/	/
16.16356	0.6483415	/	/	/	/	/
17.36092	0.6310647	/	/	/	/	/
17.28849	0.607867	/	/	/	/	/
16.98014	0.6262992	/	/	/	/	/
15.86152	0.6676828	/	/	/	/	/
15.94914	0.6621470	/	/	/	/	/

ตารางที่ 4-64 ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 1 วันล่วงหน้า

Experiment: Training 80: Testing 20

Input: Inflow t-1, Avg. Inflow t-3, Avg. Inflow t-7, Avg. Humidity t, Avg. Temperature t, Avg.

Pressure t, Avg. Precipitation t, Avg. Water Level t, Released Water t, Evaporation t

XGBoost parameter: eta = 0.2, gamma = 0

Kalman Interpolation (best for time series)

Predicted variable: Inflow at 7D

RMSE	Cor	lag1 avg3,7	avg. hm,tp,pr	water.lvl	released	evploss
19.69178	0.5650246	/	/	/	/	/
21.07297	0.5531841	/	/	/	/	/
19.40581	0.5955210	/	/	/	/	/
19.40711	0.5953674	/	/	/	/	/
18.04905	0.5978098	/	/	/	/	/
20.84205	0.5641367	/	/	/	/	/

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเขื่อนภูมิพล ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

ตารางที่ 4-65 ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 1 วันล่วงหน้า

Experiment: Training 80: Testing 20

Input: Inflow t-1, Avg. Inflow t-3, Avg. Inflow t-7, Avg. Humidity t, Avg. Temperature t, Avg. Pressure t, Released Water t

XGBoost parameter: eta = 0.2, gamma = 0

Kalman Interpolation

Predicted variable: Inflow at 7D

RMSE	Cor	lag1	avg3	avg7	avg.hm	avg.tp	avg.pr	released
18.04905	0.5978098	/	/	/	/	/	/	/
18.70236	0.5821870	/	/	/	/		/	/
18.80283	0.5642052	/	/	/			/	/
20.94702	0.5229247	/		/			/	/
17.47084	0.5903734	/		/				/
18.07653	0.5630480	/	/	/				/

ตารางที่ 4-66 ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 1 วันล่วงหน้า

Best Model Params:

Input: Inflow t-1, Avg. Inflow t-3, Avg. Inflow t-7, Avg. Humidity t, Avg. Temp t, Avg. Pressure t

Predicted Variable: Inflow at 1D

Tr:Tt	eta	gamma	RMSE	Cor
[80:20]	0.01	0	12.3936	0.8434525
	0.05	0	12.40012	0.8444401
	0.10	0	12.48392	0.8510118
	0.20	0	13.03909	0.8343842
	0.3	0	12.25208	0.8473791
[70:30]	0.01	0	10.20072	0.8753376
	0.05	0	10.29961	0.8737123
	0.10	0	10.37222	0.8744552
	0.20	0	10.56151	0.8726468
	0.30	0	10.25079	0.8698037

ตารางที่ 4-67 ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 7 วันล่วงหน้า

Best Model Params:

Input: Inflow t-1, Avg. Inflow t-3, Avg. Inflow t-7, Avg. Humidity t, Avg. Temp t, Avg. Pressure t

Predicted variable: Inflow at 7D

Tr:Tt	eta	gamma	RMSE	Cor
[80:20]	0.01	0	16.30156	0.6767470
	0.05	0	17.26516	0.6619975
	0.10	0	17.29023	0.6506895
	0.20	0	15.94969	0.6740718
	0.30	0	19.49444	0.6107131
[70:30]	0.01	0	18.32710	0.6432459
	0.05	0	17.11949	0.6521271
	0.10	0	17.27953	0.6510737
	0.20	0	19.28228	0.6090732
	0.30	0	16.85641	0.6531882

ตารางที่ 4-68 ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 30 วันล่วงหน้า
Best Model Params:

Input: Inflow t-1, Avg. Inflow t-30, Avg. Inflow t-3, Avg. Inflow t-7, Avg. Inflow t-5, Avg.

Inflow t-7, Avg. Inflow t-15, , Avg. Inflow t-30

XGBoost Parameter: eta = 0.3, gamma = 0

Training:Testing: [80:20]

Predicted variable: Inflow at 30D

RMSE	Cor	lag1	lag30	avg3	avg5	avg7	avg15	avg30
24.25517	0.4422314	/	/	/	/	/	/	/
20.33958	0.4495953	/	/	/	/	/	/	
23.15356	0.4275277	/	/	/	/	/		/
23.86732	0.4225344	/	/	/	/		/	/
23.86732	0.4225344	/	/	/		/	/	/
23.50565	0.4186758	/	/		/	/	/	/
20.91887	0.4749975	/		/	/	/	/	/
24.29910	0.4260440		/	/	/	/	/	/
20.42646	0.4024497	/		/	/	/	/	
23.32331	0.4250481	/	/	/			/	/
20.55987	0.4328379	/		/			/	/
20.94820	0.3640291	/		/			/	
20.42352	0.4227848	/		/				/
21.21758	0.3885951	/					/	/

ตารางที่ 4-69 ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 30 วันล่วงหน้า

Best Model Params:

Input: Inflow t-1, Avg. Inflow t-1, Avg. Humidity t, Avg. Temperature t, Avg. Pressure t, Avg. Precipitation t

XGBoost Parameter: eta = 0.3, gamma = 0

Training:Testing: [80:20]

Predicted variable: Inflow at 30D

RMSE	Cor	lag, avg	avg. humidity	avg.temp	avg. pressure	avg.pcp
18.02527	0.5611577	/	/	/	/	/
19.22369	0.5368300	/	/	/	/	
18.87614	0.5095435	/	/	/		/
17.91724	0.5812527	/	/		/	/
18.21028	0.5584587	/		/	/	/

ตารางที่ 4-70 ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 30 วันล่วงหน้า

Best Model Params:

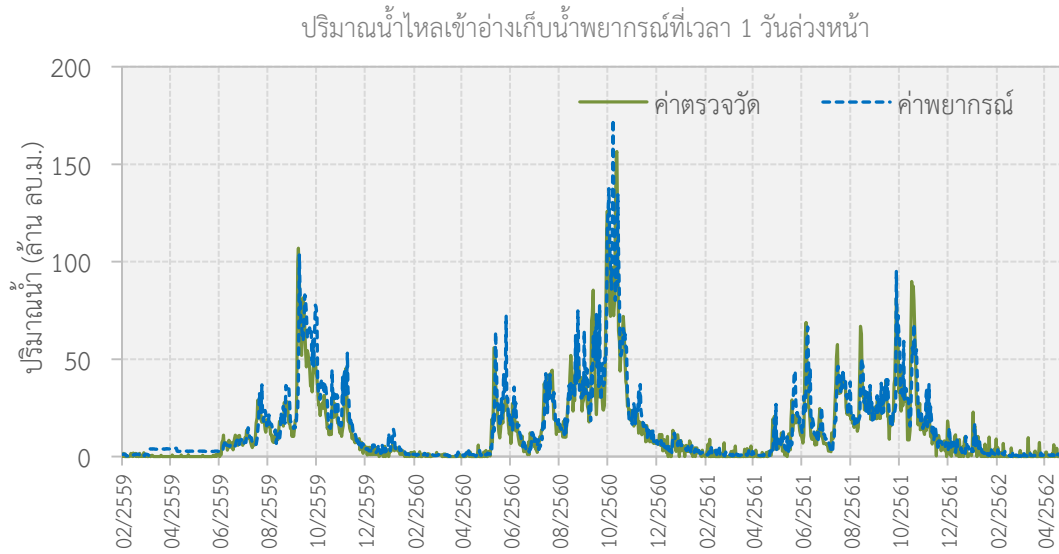
Input: Inflow t-1, Avg. Inflow t-1, Avg. Weather t, Avg. Water Level t, Avg. Released Water t, Avg. Evaporation t

XGBoost Parameter: eta = 0.3, gamma = 0

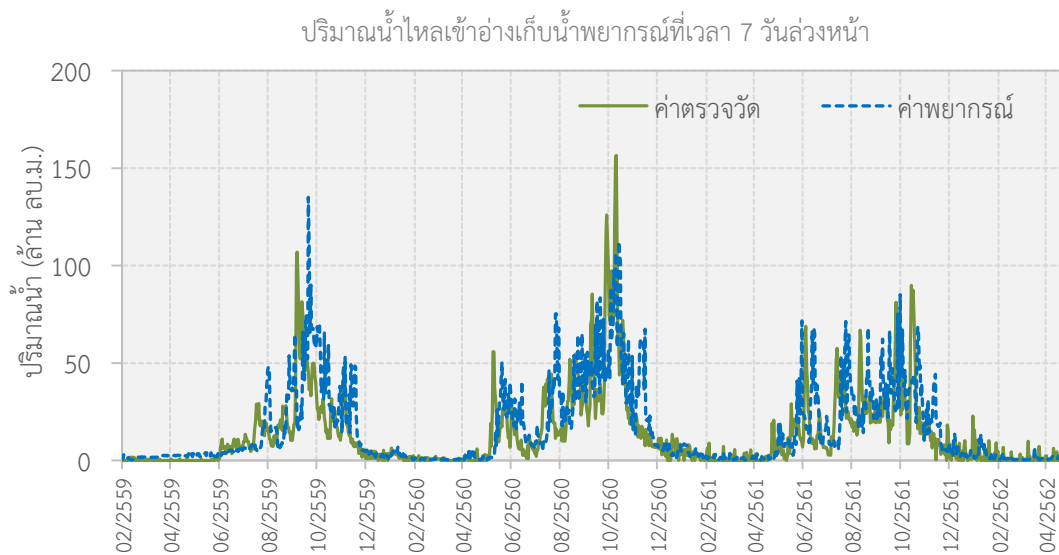
Training:Testing: [80:20]

Predicted variable: Inflow at 30D

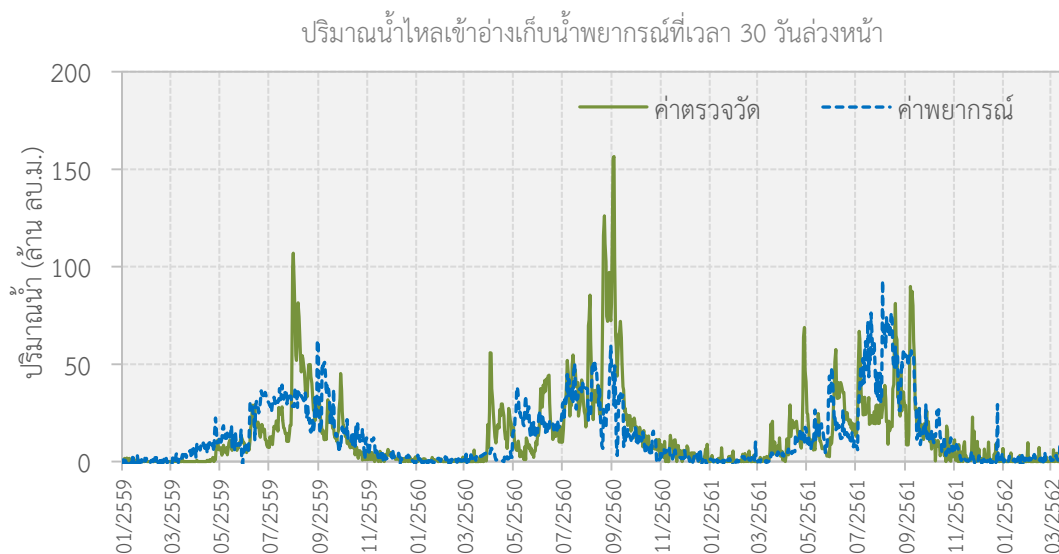
RMSE	Cor	lag, avg	avg. weather	water.lv	released	evploss
20.03857	0.5241941	/	/	/	/	/
20.43446	0.5100074	/	/	/	/	
20.05178	0.5598332	/	/	/		/
20.41329	0.4817544	/	/		/	/
20.89360	0.5271572	/	/	/		
20.93569	0.4879065	/	/		/	
19.24575	0.5596515	/	/			/



รูปที่ 4-174 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 1 วันล่วงหน้าโดยให้ค่า $R^2=0.88$



รูปที่ 4-175 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 7 วันล่วงหน้าโดยให้ค่า $R^2=0.67$



รูปที่ 4-176 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่เวลา 30 วันล่วงหน้าโดยให้ค่า $R^2=0.58$

แบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันของเขื่อนภูมิพลด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง และอัลกอริทึม Gradient Boosting/Regression Tree สามารถช่วยในการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลได้ โดยให้ค่าความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ดีสำหรับผลการพยากรณ์ที่เวลา 1 วันล่วงหน้า โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.88 อย่างไรก็ตาม ค่าความแม่นยำของการพยากรณ์ลดลงที่เวลา 7 วัน และ 30 วันล่วงหน้า โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.67 และ 0.58 ตามลำดับ โดยรูปแบบของโครงสร้างแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันของเขื่อนภูมิพลที่ให้ความแม่นยำที่สุดดังนี้คือ

–แบบจำลองการพยากรณ์ที่เวลา 1 วันล่วงหน้า

$$\text{Inflow } t+1 = f(\text{Inflow } t-1, \text{Avg. Inflow } t-3, \text{Avg. Inflow } t-7, \text{Avg. Humidity } t, \text{Avg. Temp } t, \text{Avg. Pressure } t)$$

–แบบจำลองการพยากรณ์ที่เวลา 7 วันล่วงหน้า

$$\text{Inflow } t+7 = f(\text{Inflow } t-1, \text{Avg. Inflow } t-3, \text{Avg. Inflow } t-7, \text{Avg. Humidity } t, \text{Avg. Temp } t, \text{Avg. Pressure } t)$$

–แบบจำลองการพยากรณ์ที่เวลา 30 วันล่วงหน้า

$$\text{Inflow } t+7 = f(\text{Inflow } t-1, \text{Avg. Inflow } t-1, \text{Avg. Humidity } t, \text{Avg. Temperature } t, \text{Avg. Pressure } t, \text{Avg. Precipitation } t)$$

จากการทดลองในลักษณะเดียวกันเพื่อการสร้างแบบจำลองพยากรณ์ระยะยาวรายเดือนในช่วงเวลา 1 เดือน 3 เดือน และ 6 เดือนล่วงหน้าพบว่า ไม่ได้ให้ค่าประสิทธิภาพของการพยากรณ์ดีเท่าที่ควร เบื้องต้นงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลพยากรณ์รายวันมาหาผลรวมปริมาณน้ำไหลเข้าในแต่ละเดือนเพื่อใช้ในแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ นอกจากนี้ ในการสร้างแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายเดือนยังต้องการข้อมูลรายเดือนระยะยาวเพื่อให้การสร้างแบบจำลองมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ผลการพยากรณ์ด้วยแบบจำลองระยะยาวรายเดือนในช่วงเวลา 1 เดือนจากงานวิจัยนี้ยังมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยยกกำลังสองที่สูง

(RMSE = 433.73) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระดับปานกลาง (Cor = 0.708) ทั้งนี้ คณะผู้วิจัยจึงได้ใช้แบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำระยะสั้นรายวันที่ให้ค่าความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ดีแทน

4.6.4.2 ผลการพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด (Stochastic Constraint Programming)

ผลการพัฒนาแบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดในรูปแบบของการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด (Stochastic Constraint Programming) ได้กำหนดรูปแบบของแบบจำลองเพื่อรองรับวัตถุประสงค์หลักในการตอบสนองความต้องการน้ำอเนกประสงค์ดังนี้คือ (1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการตอบสนองความต้องการน้ำเพื่อกิจกรรมต่าง ๆ ทางด้านท้ายเขื่อนโดยลดปัญหาการขาดแคลนน้ำให้เหลือน้อยที่สุด (Minimization of Water Demand Deficit) และ (2) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำด้วยแนวคิดการลดการปล่อยน้ำส่วนเกินในช่วงน้ำหลาก (Minimization of Surplus Release during Refilled Period) โดยรูปแบบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $F_1(X)$ และสมการข้อจำกัดที่ใช้ในการกำหนดรูปแบบของแบบจำลองได้กล่าวไว้ข้างต้นในบทที่ 3

ในการสร้างแบบจำลองโปรแกรมเชิงข้อจำกัด ผู้วิจัยจำเป็นต้องใช้ภาษาในการสร้างแบบจำลองนั้น ซึ่ง MiniZinc เป็นภาษาที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองในงานวิจัยนี้ MiniZinc เป็นภาษาระดับกลางซึ่งเป็นภาษาที่เข้าใจไม่ยากเท่าภาษา C นอกจากนี้ MiniZinc ยังเป็นภาษาที่ได้รับการพัฒนาเพื่อเป็นมาตรฐานในการพัฒนาโปรแกรมเชิงข้อจำกัด MiniZinc ยังสามารถรองรับสมการข้อจำกัดได้ทุกแบบ อีกทั้งแบบจำลองเชิงข้อจำกัดที่ถูกพัฒนาด้วย MiniZinc ยังสามารถแก้ไขได้ด้วย Constraint Solver ได้อย่างหลากหลาย สำหรับผลการพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดด้วยภาษา Minizinc ที่ได้ประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ของเขื่อนภูมิพลได้แสดงไว้ในรูปที่ 4-177

```

32 constraint forall(i in N)(
33   St1[i] = St[i] + It[i] - Et[i] - Rt[i]
34 );
35
36 constraint forall(i in N)(
37   Smin <= St[i] /\ St[i] <= Smax
38 );
39
40 constraint forall(i in N)(
41   Smin <= St1[i] /\ St1[i] <= Smax
42 );
43
44 constraint forall(i in N)(
45   Ht[i] = Htf[i] - Htt[i]
46 );
47
48 constraint forall(i in N)(
49   Rt[i] >= Dt[i]
50 );
51
52 constraint forall(i in N)(
53   St1[i] >= 0
54 );
55
56 constraint forall(i in N)(
57   St[i] >= 0
58 );
59 constraint forall(i in N)(
60   It[i] >= 0
61 );
62 constraint forall(i in N)(
63   Et[i] >= 0
64 );
65 constraint forall(i in N)(
66   Rt[i] >= 0
67 );
68 constraint forall(i in N)(
69   Sft[i] >= 0
70 );
71
72 constraint forall(i in N)(
73   Gt[i] = ((e/100) * y * ((Rt[i]*pow(10,6))/(24*60*60)) * Ht[i] * Deltat[i]) / pow(10,3) % Converting Rt in MCM to CMS; Gt is
74 );
75
76 constraint Demands = sum(i in N)(pow(Dt[i]-Rt[i],2));
77 constraint Storage = sum(i in N)(abs(St1[i]-Surc[i]));
78 solve maximize -1*Storage - 1*Demands;
79 output ["Rt: "] ++ [show_float(0,2,Rt[i]) ++ " " | i in N] ++ ["\nSt1: "] ++ [show_float(0,2,St1[i]) ++ " " | i in N];

```

รูปที่ 4-177 การพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดด้วยภาษา Minizinc ในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล

การพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลได้กำหนดรูปแบบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในลักษณะหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Optimization) โดยครอบคลุมวัตถุประสงค์ 2 ด้านหลัก ได้แก่ (1) การตอบสนองความต้องการน้ำเพื่อกิจกรรมต่าง ๆ ทางด้านท้ายเขื่อน (Downstream Water Demand) ให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมหรือลดปัญหาการขาดแคลนน้ำมากที่สุด และ (2) หลักการเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำด้วยแนวคิดการลดการปล่อยน้ำส่วนเกินในช่วงน้ำหลากเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักของเขื่อน (Water Storage) ให้อยู่ในระดับสูงที่สุด โดยระบุความสำคัญของแต่ละวัตถุประสงค์ในรูปแบบของการกำหนดค่าน้ำหนัก (Weight) เท่ากัน และกำหนดสมการข้อจำกัดใน 2 ลักษณะคือ (1) สมการข้อจำกัดรายปี (Yearly Constraint) และ (2) สมการข้อจำกัดรายฤดูกาล (Seasonal Constraint) ตามรายละเอียดที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 จากรูปที่ 4-177 โปรแกรมบรรทัดที่ 76 และ 77 เป็นสมการวัตถุประสงค์ในเรื่องของความต้องการใช้น้ำ และการเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในเขื่อน ส่วนในบรรทัดที่ 78 นั้นเป็นสมการในการคำนวณค่าปริมาณน้ำเก็บกักของเขื่อนให้อยู่ในระดับสูงที่สุด และการตอบสนองความต้องการน้ำเพื่อกิจกรรมต่าง ๆ ทางด้านท้ายเขื่อน (Downstream Water Demand) ให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม นอกจากนี้ สมการข้อจำกัดบางสมการเป็นสมการไม่เชิงเส้น ดังนั้น จึงจำเป็นต้องเลือก Solver ที่เหมาะสม ในการนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ Solver ชื่อว่า COIN-OR Interior Point Optimizer (IPOPT) ที่สามารถ

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

สนับสนุนการแก้ไขสมการไม่เชิงเส้นได้ แต่การทำการจำลองการปล่อยน้ำนั้น เนื่องด้วยต้องทำการเรียนรู้แบบจำลองข้อจำกัดหลายครั้ง ผู้วิจัยจึงใช้ภาษา Python ในการทำการจำลองการปล่อยน้ำ

4.6.4.3 ผลการทดสอบการทำงานในการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล ด้วยโปรแกรมเชิงสุ่มแบบข้อจำกัด (Stochastic Constraint Programming)

ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด (Stochastic Constraint Programming, CP) ระหว่างปี พ.ศ. 2543–2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม (สังเคราะห์จากแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทานและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย) พบว่า แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดให้ผลการระบายน้ำรายวัน รายฤดูกาล และรายปีอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจกล่าวคือ สามารถลดปริมาณการระบายน้ำทั้งรายฤดูกาลและรายปี ส่งผลให้ปริมาณน้ำต้นทุนของเขื่อนภูมิพลเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปีเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงผลการระบายน้ำในตารางที่ 4–71 และตารางที่ 4–72 และรูปที่ 4–178 ถึงรูปที่ 4–182 ปริมาณน้ำเก็บกักรายฤดูกาลและรายปีดังแสดงในตารางที่ 4–73 และตารางที่ 4–74 และรูปที่ 4–183 และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายฤดูกาลและรายปีดังแสดงในตารางที่ 4–75 และตารางที่ 4–76 และรูปที่ 4–184 ถึงรูปที่ 4–187

จากการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดระหว่างปี พ.ศ. 2543–2561 และกำหนดสมการข้อจำกัดรายปี (Yearly Constraint) พบว่า สามารถลดปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยได้ถึง 49.81 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งหมายถึงความสามารถในการเก็บกักน้ำในอ่างเก็บน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดยังสามารถลดปริมาณการระบายในช่วงฤดูแล้งได้สูงถึง 333.69 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือลดลงคิดเป็น 9.33% แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดยังสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำได้ถึงประมาณ 955.84 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี โดยสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งได้เพิ่มขึ้น 10.36% เมื่อเปรียบเทียบกับผลการระบายน้ำจริงที่ผ่านมา ยิ่งไปกว่านั้น แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดยังสามารถเพิ่มการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำได้สูงขึ้นถึง 90.89 กิกะวัตต์-ชั่วโมงต่อปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำในช่วงฤดูฝนที่เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4–71 ผลการระบายน้ำรายฤดูกาลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดระหว่างปี พ.ศ. 2543–2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม

ปี พ.ศ.	ปริมาณการระบายน้ำรายฤดูกาล (ล้านลูกบาศก์เมตร)				ผลต่างการระบายน้ำ (ล้านลูกบาศก์เมตร)	
	แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด		ข้อมูลการระบายน้ำจริง			
	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง
2543	1,130.25	2,268.54	1,026.10	2,487.31	104.15	-218.77
2544	1,425.78	2,562.38	1,187.91	2,818.45	237.87	-256.07
2545	1,743.27	4,234.91	1,654.60	4,400.73	88.67	-165.82
2546	2,959.65	4,282.09	3,076.18	4,801.80	-116.53	-519.71
2547	1,561.01	3,031.08	1,415.31	3,327.15	145.70	-296.07
2548	1,858.72	2,387.75	1,741.68	2,597.06	117.04	-209.31
2549	2,716.48	3,576.40	2,426.31	3,951.67	290.17	-375.27
2550	1,950.55	4,683.94	2,803.29	5,073.93	-852.74	-389.99

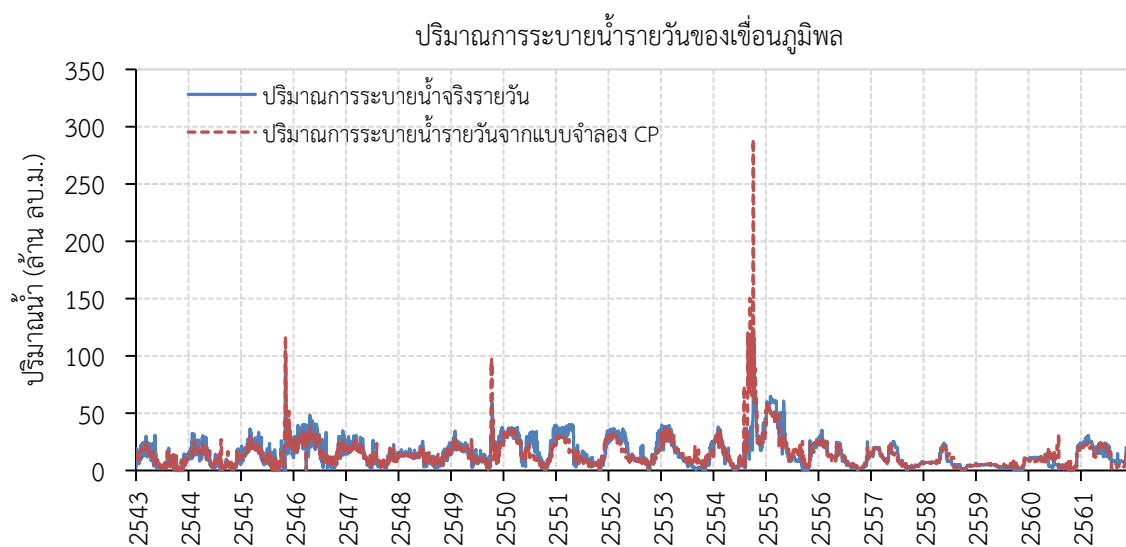
ปี พ.ศ.	ปริมาณการระบายน้ำรายฤดูกาล (ล้านลูกบาศก์เมตร)				ผลต่างการระบายน้ำ (ล้านลูกบาศก์เมตร)	
	แบบจำลองการโปรแกรม เชิงข้อจำกัด		ข้อมูลการระบายน้ำจริง			
	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง
2551	1,418.64	4,049.26	1,679.17	5,111.79	-260.53	-1,062.53
2552	1,538.64	3,935.64	1,866.22	5,025.53	-327.58	-1,089.89
2553	1,840.18	4,112.26	1,017.68	4,122.50	822.50	-10.24
2554	7,448.47	4,120.91	3,776.61	4,154.45	3671.86	-33.54
2555	2,684.50	6,483.21	1,933.42	7,251.08	751.08	-767.87
2556	1,528.71	2,617.75	1,493.64	2,809.66	35.07	-191.91
2557	1,561.68	2,048.26	1,855.32	2,084.07	-293.64	-35.81
2558	1,576.01	1,154.17	1,506.84	1,173.03	69.17	-18.86
2559	689.27	1,042.75	517.51	933.40	171.76	109.35
2560	1,727.76	1,712.78	770.22	1,955.54	957.54	-242.76
2561	2,070.52	3,339.39	2,288.38	3,904.43	-217.86	-565.04
ค่าต่ำสุด	689.27	1,042.75	517.51	933.40	-852.74	-1,089.89
ค่าเฉลี่ย	2,075.27	3,244.39	1,791.39	3,578.08	283.88	-333.69
ค่าสูงสุด	7,448.47	6,483.21	3,776.61	7,251.08	3671.86	109.35
%ปริมาณการระบายน้ำ					+15.85	-9.33
					เพิ่มขึ้น	ลดลง

ตารางที่ 4-72 ผลการระบายน้ำรายปีด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม

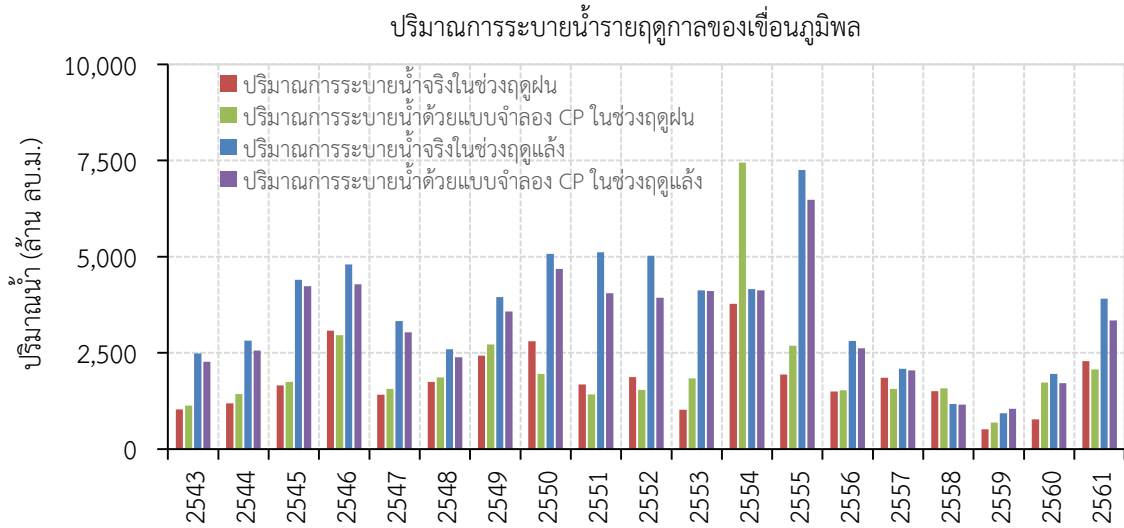
ปี พ.ศ.	ปริมาณการระบายน้ำรายปี (ล้านลูกบาศก์เมตร)		ผลต่างการระบายน้ำ (ล้านลูกบาศก์เมตร)
	แบบจำลองการโปรแกรม เชิงข้อจำกัด	ข้อมูลการระบายน้ำจริง	
2543	3,398.79	3,513.41	-114.62
2544	3,988.16	4,006.36	-18.20
2545	5,978.18	6,055.33	-77.15
2546	7,241.74	7,877.98	-636.24
2547	4,592.09	4,742.46	-150.37
2548	4,246.47	4,338.74	-92.27
2549	6,292.88	6,377.98	-85.10
2550	6,634.49	7,877.22	-1,242.73
2551	5,467.90	6,790.96	-1,323.06
2552	5,474.28	6,891.75	-1,417.47
2553	5,952.44	5,140.18	812.26
2554	11,569.38	7,931.06	3,638.32

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเขื่อนภูมิพล ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

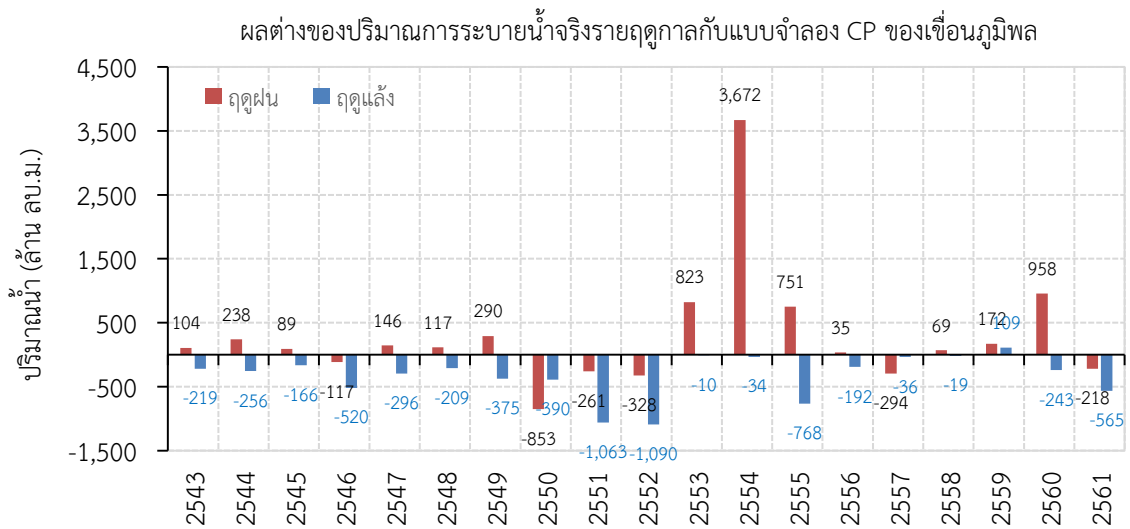
ปี พ.ศ.	ปริมาณการระบายน้ำรายปี (ล้านลูกบาศก์เมตร)		ผลต่างการระบายน้ำ (ล้านลูกบาศก์เมตร)
	แบบจำลองการโปรแกรม เชิงข้อจำกัด	ข้อมูลการระบายน้ำจริง	
2555	9,167.71	9,184.50	-16.79
2556	4,146.46	4,303.30	-156.84
2557	3,609.94	3,939.39	-329.45
2558	2,730.18	2,679.87	50.31
2559	1,732.02	1,450.91	281.11
2560	3,440.54	2,725.76	714.78
2561	5,409.91	6,192.81	-782.90
ค่าต่ำสุด	1,732.02	1,450.91	-1,417.47
ค่าเฉลี่ย	5,319.66	5,369.47	-49.81
ค่าสูงสุด	11,569.38	9,184.50	3,638.32
%ปริมาณการระบายน้ำ			-0.93
			ลดลง



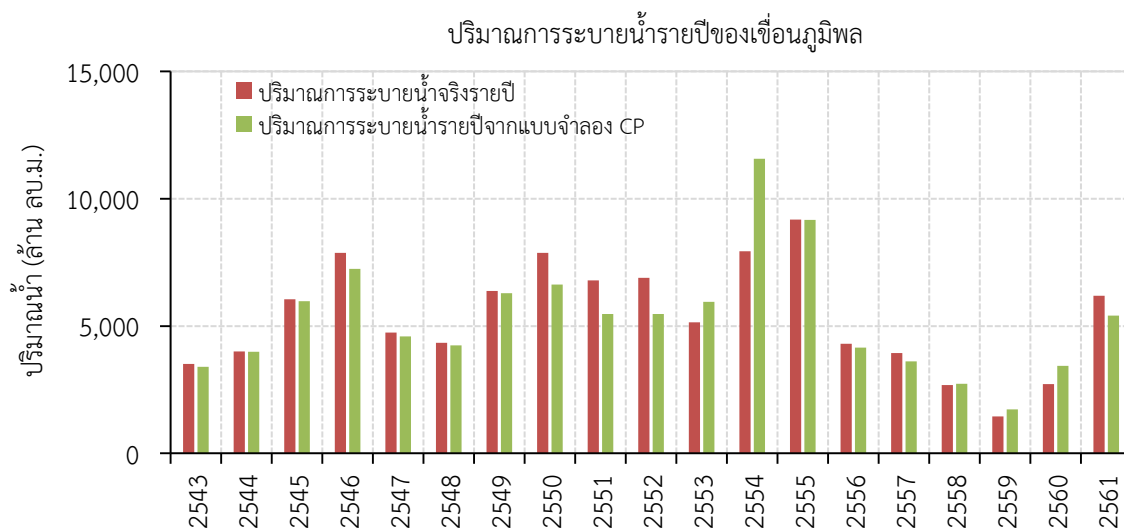
รูปที่ 4-178 ปริมาณการระบายน้ำรายวันของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงสุ่มแบบข้อจำกัด



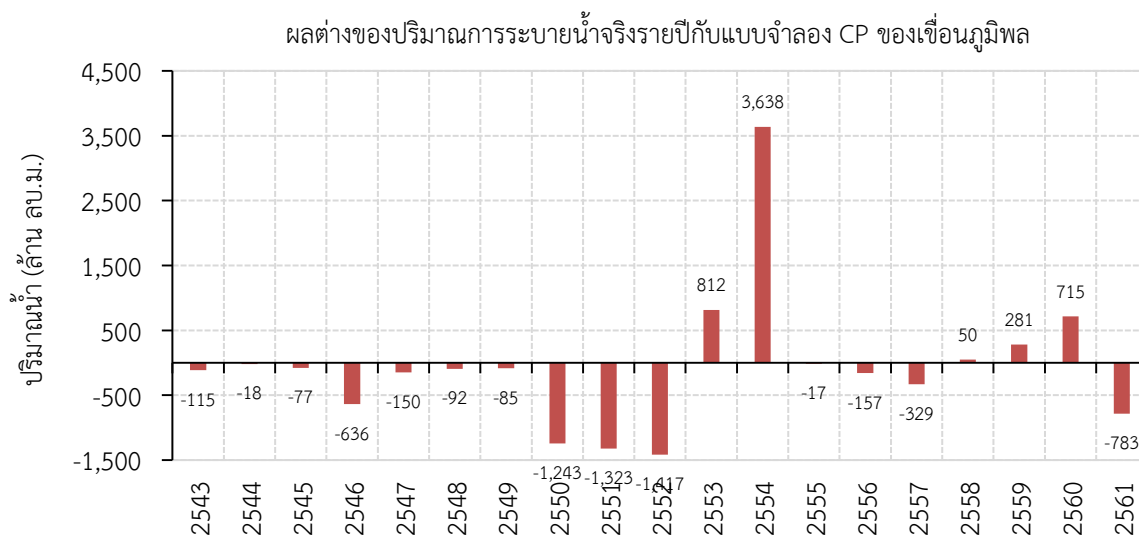
รูปที่ 4-179 ปริมาณการระบายน้ำรายฤดูกาลของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงสุ่มแบบข้อจำกัด



รูปที่ 4-180 ผลต่างของปริมาณการระบายน้ำจริงรายฤดูกาลกับแบบจำลองการโปรแกรมเชิงสุ่มแบบข้อจำกัดของเขื่อนภูมิพล



รูปที่ 4-181 ปริมาณการระบายน้ำรายปีของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด



รูปที่ 4-182 ผลต่างของปริมาณการระบายน้ำจริงรายปีกับแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดของเขื่อนภูมิพล

ตารางที่ 4-73 ปริมาณน้ำเก็บกักรายฤดูกาลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม

ปี พ.ศ.	ปริมาณน้ำเก็บกักรายฤดูกาล (ล้านลูกบาศก์เมตร)				ผลต่างปริมาณน้ำเก็บกัก (ล้านลูกบาศก์เมตร)	
	แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด		ข้อมูลปริมาณน้ำเก็บกักจริง			
	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง
2543	9,222.02	9,613.65	9,091.18	9,567.20	130.84	46.45
2544	9,755.73	10,826.50	9,579.97	10,706.29	175.77	120.21
2545	10,315.05	11,603.73	9,983.66	11,471.95	331.39	131.78

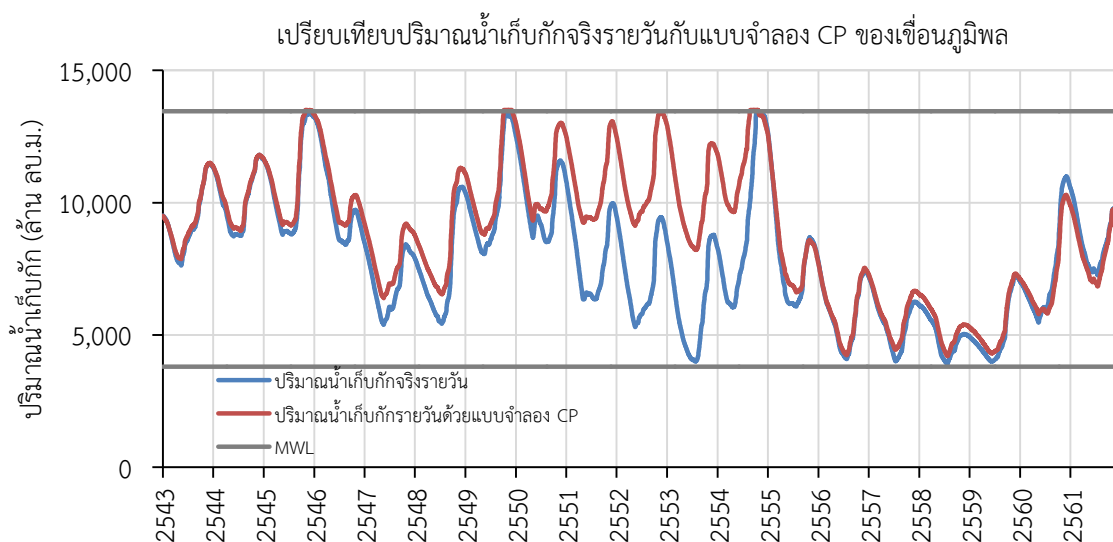
4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

ปี พ.ศ.	ปริมาณน้ำเก็บกักรายฤดูกาล (ล้านลูกบาศก์เมตร)				ผลต่างปริมาณน้ำเก็บกัก (ล้านลูกบาศก์เมตร)	
	แบบจำลองการโปรแกรม เชิงข้อจำกัด		ข้อมูลปริมาณน้ำเก็บกักจริง			
	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง
2546	9,709.37	11,445.78	9,069.81	11,057.34	639.55	388.44
2547	7,449.34	8,253.80	6,561.52	7,415.20	887.82	838.61
2548	7,743.23	9,031.19	6,732.68	8,156.00	1,010.55	875.18
2549	10,483.48	11,078.61	9,923.01	10,502.07	560.47	576.54
2550	10,284.08	11,768.89	9,273.33	10,923.92	1,010.75	844.97
2551	9,936.59	11,476.41	6,920.08	9,045.48	3,016.50	2,430.93
2552	10,382.08	11,542.30	6,464.82	8,044.15	3,917.26	3,498.15
2553	9,117.08	11,339.33	5,028.74	7,229.11	4,088.33	4,110.22
2554	12,106.14	11,298.55	9,413.20	8,941.37	2,692.94	2,357.18
2555	7,225.18	9,281.73	6,807.13	9,109.65	418.06	172.08
2556	5,108.84	6,720.35	4,979.47	6,673.66	129.37	46.69
2557	5,152.57	6,405.38	4,802.92	6,195.23	349.65	210.16
2558	4,796.10	5,897.29	4,431.20	5,501.13	364.90	396.15
2559	5,016.35	5,695.25	4,749.20	5,429.64	267.15	265.61
2560	6,657.77	7,765.46	6,929.71	7,866.34	-271.95	-100.88
2561	7,686.18	8,949.80	7,980.03	9,261.94	-293.85	-312.14
ค่าต่ำสุด	4,796.10	5,695.25	4,431.20	5,429.64	-293.85	-312.14
ค่าเฉลี่ย	8,323.54	9,473.37	7,301.14	8,584.09	1,022.39	889.28
ค่าสูงสุด	12,106.14	11,768.89	9,983.66	11,471.95	4,088.33	4,110.22
%ปริมาณน้ำเก็บกัก					+14.00	+10.36
					เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4-74 ปริมาณน้ำเก็บกักรายปีด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม

ปี พ.ศ.	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปี (ล้านลูกบาศก์เมตร)		ผลต่างปริมาณน้ำเก็บกัก (ล้านลูกบาศก์เมตร)
	แบบจำลองการโปรแกรม เชิงข้อจำกัด	ข้อมูลปริมาณน้ำเก็บกักจริง	
2543	9,417.83	9,329.19	88.65
2544	10,291.12	10,143.13	147.99
2545	10,959.39	10,727.81	231.58
2546	10,577.58	10,063.58	514.00
2547	7,851.57	6,988.36	863.21
2548	8,387.21	7,444.34	942.87
2549	10,781.04	10,212.54	568.50

ปี พ.ศ.	ปริมาณน้ำเก็บกักรายปี (ล้านลูกบาศก์เมตร)		ผลต่างปริมาณน้ำเก็บกัก (ล้านลูกบาศก์เมตร)
	แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด	ข้อมูลปริมาณน้ำเก็บกักจริง	
2550	11,026.49	10,098.62	927.86
2551	10,706.50	7,982.78	2,723.72
2552	10,962.19	7,254.48	3,707.70
2553	10,228.20	6,128.93	4,099.27
2554	11,702.35	9,177.29	2,525.06
2555	8,253.46	7,958.39	295.07
2556	5,914.59	5,826.56	88.03
2557	5,778.98	5,499.07	279.91
2558	5,346.69	4,966.17	380.52
2559	5,355.80	5,089.42	266.38
2560	7,211.61	7,398.03	-186.41
2561	8,317.99	8,620.99	-302.99
ค่าต่ำสุด	5,346.69	4,966.17	-302.99
ค่าเฉลี่ย	8,898.45	7,942.61	955.84
ค่าสูงสุด	11,702.35	10,727.81	4,099.27
%ปริมาณน้ำเก็บกัก			+12.03
			เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-183 ปริมาณน้ำเก็บกักรายวันของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด

ตารางที่ 4-75 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายฤดูกาลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม

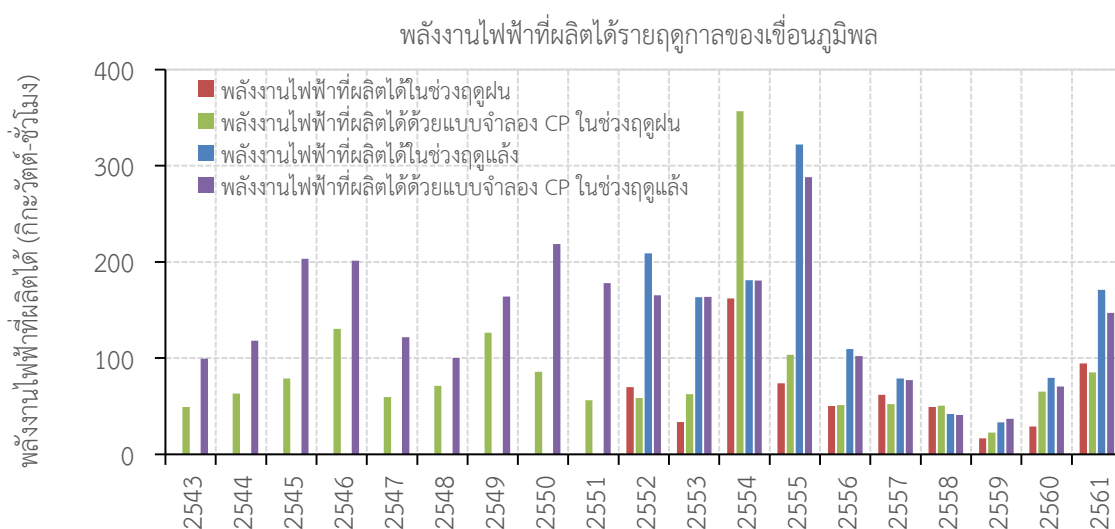
ปี พ.ศ.	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายฤดูกาล (กิกะวัตต์-ชั่วโมง)				ผลต่างพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กิกะวัตต์-ชั่วโมง)	
	แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด		พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง			
	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง
2543	49.25	99.29	-	-	-	-
2544	63.14	118.15	-	-	-	-
2545	78.67	203.13	-	-	-	-
2546	130.30	201.38	-	-	-	-
2547	59.47	121.87	-	-	-	-
2548	70.99	100.02	-	-	-	-
2549	126.52	164.05	-	-	-	-
2550	85.74	218.74	-	-	-	-
2551	56.02	177.95	-	-	-	-
2552	58.58	165.29	69.82	208.84	-11.25	-43.55
2553	62.55	163.63	33.54	163.18	29.01	0.45
2554	356.71	180.79	161.86	181.10	194.86	-0.31
2555	103.30	288.23	73.94	322.05	29.37	-33.82
2556	51.21	102.15	50.13	109.45	1.08	-7.31
2557	52.06	77.07	61.71	78.78	-9.65	-1.71
2558	50.60	40.99	49.22	41.85	1.38	-0.86
2559	22.62	36.86	16.69	33.15	5.93	3.71
2560	65.10	70.52	28.91	79.35	36.19	-8.83
2561	85.08	147.09	94.47	170.90	-9.39	-23.81
ค่าต่ำสุด	22.62	36.86	16.69	33.15	-11.25	-43.55
ค่าเฉลี่ย	85.68	140.91	64.03	138.87	26.75	-11.60
ค่าสูงสุด	356.71	288.23	161.86	322.05	194.86	3.71
%พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้					+41.78	-8.36
					เพิ่มขึ้น	ลดลง

ตารางที่ 4-76 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปีด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเดิม

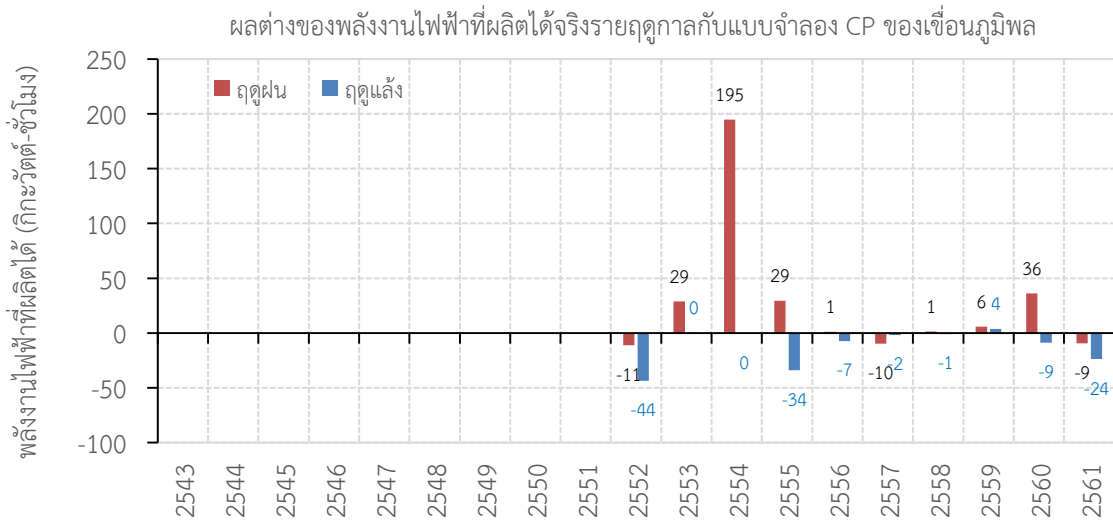
ปี พ.ศ.	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปี (กิกะวัตต์-ชั่วโมง)		ผลต่างพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กิกะวัตต์-ชั่วโมง)
	แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง	
2543	891.22	-	-
2544	1,087.74	-	-

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

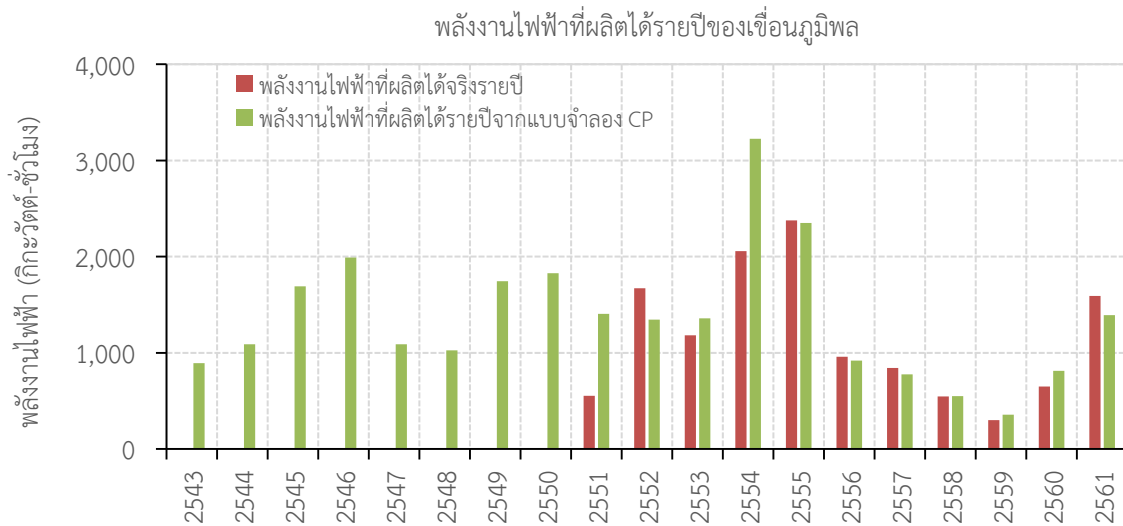
ปี พ.ศ.	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปี (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)		ผลต่างพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)
	แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง	
2545	1,690.79	-	-
2546	1,990.06	-	-
2547	1,088.03	-	-
2548	1,026.06	-	-
2549	1,743.38	-	-
2550	1,826.88	-	-
2551	1,403.84	551.71	-
2552	1,343.23	1,671.98	-328.76
2553	1,357.08	1,180.30	176.78
2554	3,225.01	2,057.76	1,167.25
2555	2,349.18	2,375.90	-26.72
2556	920.14	957.53	-37.39
2557	774.78	842.96	-68.18
2558	549.55	546.42	3.13
2559	356.89	299.06	57.84
2560	813.69	649.51	164.18
2561	1,393.02	1,592.23	-199.21
ค่าต่ำสุด	356.89	299.06	-328.76
ค่าเฉลี่ย	1,359.50	1,156.85	90.89
ค่าสูงสุด	3,225.01	2,375.90	1,167.25
%พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้			+7.86
			เพิ่มขึ้น



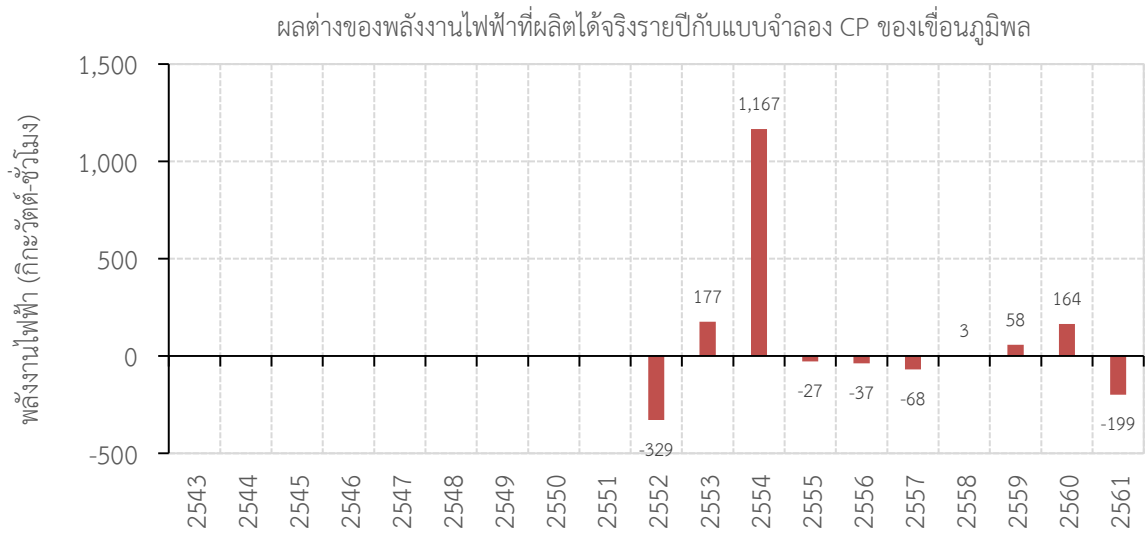
รูปที่ 4-184 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายฤดูกาลของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด



รูปที่ 4-185 ผลต่างของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงรายฤดูกาลกับแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดของเขื่อนภูมิพล



รูปที่ 4-186 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปีของเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด



รูปที่ 4-187 ผลต่างของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงรายปีกับแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดของเขื่อนภูมิพล

4.7 ผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในสถานการณ์ปัจจุบันและอนาคต

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ตั้งเป้าหมายที่จะเพิ่มปริมาณเก็บกักหรือน้ำต้นทุนของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลให้สูงขึ้น 15% ในช่วงต้นฤดูแล้ง (เดือนพฤศจิกายน) จากค่าเฉลี่ยของข้อมูลปริมาณน้ำเก็บกักระยะยาวในช่วงฤดูแล้งในอดีต ซึ่งได้นำเสนอแนวทางการพัฒนากลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ (Reservoir Re-Operation) ของเขื่อนภูมิพลใน 4 แนวทาง

สำหรับแนวทางที่ 1 และแนวทางที่ 2 เป็นการนำเสนอเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่ได้รับความนิยมแต่เดิมมาปรับรูปแบบใหม่ในการจำลองระบบ โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

-แนวทางที่ 1 นำเสนอโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่ (Adapted Rule Curve) จากโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาไว้โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในปี พ.ศ. 2555 โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Rule Curve) เป็นเกณฑ์การปฏิบัติงานซึ่งกำหนดระดับน้ำเก็บกักเป้าหมาย (Target Storage Level) สำหรับช่วยในการตัดสินใจปล่อยน้ำในสถานการณ์น้ำต่าง ๆ เพื่อตอบสนองความต้องการน้ำต่าง ๆ ให้ได้สูงสุด และในขณะเดียวกันยังสามารถจัดการน้ำหลากที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเพื่อลดปัญหาการระบายน้ำให้ไหลล้นอ่างให้เกิดขึ้นน้อยที่สุดอีกด้วย

-แนวทางที่ 2 อาศัยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging (Hedging Rule) เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging เป็นอีกหนึ่งแนวทางที่สามารถนำมาใช้ในการจัดการปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำโดยนำเสนอเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พยายามลดการส่งน้ำในบางช่วงเวลาเพื่อเก็บกักน้ำไว้ในช่วงเวลาที่ถัดไป แม้ว่าปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่ในอ่างจะสามารถตอบสนองต่อปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายได้อย่างเต็มศักยภาพก็ตาม อาจกล่าวได้ว่าเกณฑ์การปฏิบัติการแบบ Hedging เป็นความพยายามที่จะลดปัญหาการขาดน้ำอย่างรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต ด้วยการกระจายการขาดน้ำในเวลาปัจจุบันล่วงหน้า ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับระบบที่มีความต้องการใช้น้ำสูง แต่ประสบปัญหาในด้านความผันแปรของข้อมูลปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ (Neelakantan & Pundarikanthan, 2000; Onoz et al., 2005; Shiau, 2003) วัตถุประสงค์หลักของเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging ก็คือการกระจายการขาดน้ำล่วงหน้าอย่างสม่ำเสมอเพื่อลดความรุนแรงของการขาดน้ำ ณ เวลาปัจจุบันลง กล่าวคือยอมที่จะให้เกิดการขาดน้ำครั้งละน้อย ๆ ได้เพื่อลดโอกาสความน่าจะเป็นของการขาดน้ำรุนแรงหรือผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อยลง

สำหรับแนวทางที่ 3 และแนวทางที่ 4 อาศัยหลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ในการพัฒนาแบบจำลอง โดยมีส่วนของการพัฒนาแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล (Reservoir Inflow Forecasting Model) ด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Machine Learning) เพื่อนำผลการพยากรณ์ล่วงหน้ารายวันมาเป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองของแนวทางที่ 3 และแนวทางที่ 4 สำหรับกำหนดการระบายน้ำในปริมาณที่เหมาะสมในแต่ละช่วงเวลา โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

-แนวทางที่ 3 เป็นการพัฒนาแบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้และเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model with Reinforce Learning) ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญคือ (3.1) แบบจำลองฟัซซี (Conventional Fuzzy Model) และ (3.2) แบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้และเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (ANFIS with RL) ซึ่งเป็นส่วนที่พัฒนาขึ้นมาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองฟัซซีสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในลักษณะของ Day to Day Operation ในช่วงของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ ณ เวลาปัจจุบัน

-แนวทางที่ 4 แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Constraint Programming and Machine Learning) ซึ่งเป็นลักษณะของการแก้โจทย์ปัญหาในการระบายน้ำที่ดีที่สุดของเขื่อนภูมิพลโดยอาศัยหลักการหาที่ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบระยะยาวทั้งในสถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบันและอนาคตตามสถานการณ์สมมติต่าง ๆ ถูกนำมาวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้น/ลดลงเพื่อเปรียบเทียบกับผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำจริง โดยสรุปรายละเอียดได้ดังนี้

4.7.1 โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่ (Adapted Rule Curve)

ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้น/ลดลงจากผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555–2561 ในสถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบัน และสถานการณ์ในอนาคตด้วยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่ (Adapted Rule Curve) แสดงในตารางที่ 4-77 จากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่า การจำลองผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำกรณีที่ 1 ที่อาศัยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาในปี พ.ศ. 2555 ให้ค่าปริมาณน้ำเก็บกักในเดือนพฤศจิกายน และในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งใกล้เคียงกับปริมาณน้ำเก็บกักจริงระหว่างปี พ.ศ. 2543–2561 นอกจากนี้ ผลการจำลองระบบยังแสดงให้เห็นว่าการปรับเพิ่ม/ปรับลดระดับ Upper Rule Curve และ Lower Rule Curve ที่ระดับ ± 0.5 เมตร และใช้เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Standard Operating Policy ที่แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 ไม่ส่งผลกระทบต่อารเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำมากนัก ดังจะเห็นได้จากเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้นยังคงอยู่ในช่วงตั้งแต่ +1.37% ถึง +1.44% เทียบกับกับปริมาณน้ำเก็บกักจริง ในขณะที่ผลการจำลองระบบของสถานการณ์น้ำในอนาคตโดยอาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำคาดการณ์ในอนาคต (Projected Inflow) ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2555–2561 โดยกำหนดปัจจัยความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. ในสภาพจริงพบว่าสามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำให้สูงกว่าสถานการณ์น้ำในอดีตถึงปัจจุบัน

ตารางที่ 4-77 ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่

กรณี	ผลการจำลองระบบ	ช่วงการจำลองระบบ	เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้น/ลดลง ^{3/} (%Active Storage)			
			พฤศจิกายน	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	รายปี
สถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบัน ^{1/}						
1	อาศัยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาในปี พ.ศ. 2555	2555–2561	-0.20	+1.78	+1.05	+1.37
2	ปรับเพิ่มระดับ URC +0.50 เมตร ^{4/}	2555–2561	-0.20 (0.00) ^{5/}	+1.78 (0.00) ^{5/}	+1.05 (0.00) ^{5/}	+1.37 (0.00) ^{5/}
3	ปรับลดระดับ URC -0.50 เมตร ^{4/}	2555–2561	-0.35 (-0.14) ^{5/}	+1.58 (-0.20) ^{5/}	+0.18 (-0.18) ^{5/}	+1.19 (-0.19) ^{5/}
4	ปรับเพิ่มระดับ LRC +0.50 เมตร ^{4/}	2555–2561	-0.14 (+0.06) ^{5/}	+1.86 (+0.08) ^{5/}	+1.10 (+0.05) ^{5/}	+1.44 (+0.07) ^{5/}
5	ปรับลดระดับ LRC -0.50 เมตร ^{4/}	2555–2561	-0.17 (+0.03) ^{5/}	+1.82 (+0.04) ^{5/}	+1.09 (+0.04) ^{5/}	+1.41 (+0.04) ^{5/}
สถานการณ์ในอนาคต ^{2/}						
6	อาศัยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาในปี พ.ศ. 2555	2555–2561	+27.40	+33.96	+27.55	+30.45

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเขื่อนภูมิพล ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

- หมายเหตุ : ^{1/} อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจริง (Observed Inflow) และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2555-2561
- ^{2/} อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำคาดการณ์ในอนาคต (Projected Inflow) ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2555-2561
- ^{3/} เปรียบเทียบกับปริมาณน้ำเก็บกักจริงระหว่างปี พ.ศ. 2555-2561
- ^{4/} ปรับเปลี่ยนจากโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาขึ้นโดย กฟผ. ในปี พ.ศ. 2555
- ^{5/} ผลต่างคำนวณจากการเปรียบเทียบกับกรณี 1

4.7.2 เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging (Hedging Policy)

ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้น/ลดลงจากผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบทั้งในสถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบันและสถานการณ์ในอนาคตของสถานการณ์สมมติทั้ง 8 กรณีด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging (Hedging Policy) แสดงในตารางที่ 4-78 จากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่า การจำลองผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำด้วย Two-Point Hedging, Three-Point Hedging และ Zone-Based Hedging ให้ผลไปในทางเดียวกันที่สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักให้สูงขึ้นกว่าปริมาณน้ำเก็บกักจริงระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ในช่วงตั้งแต่ +19.80% ถึง +31.55% ในเดือนพฤศจิกายน ยกเว้น One-Point Hedging ทั้งนี้เนื่องจากพารามิเตอร์ของเกณฑ์ดังกล่าวนี้ไม่ครอบคลุมการบริหารจัดการน้ำในช่วงน้ำมากที่สามารถกำหนดเกณฑ์ปรับลดปริมาณการระบายน้ำสำหรับเก็บกักน้ำไปใช้ในระยะเวลา ในขณะที่ยกเว้น One-Point Hedging ทั้งนี้เนื่องจากพารามิเตอร์เพื่อลดการระบายน้ำลงในช่วงน้ำมาก ส่งผลทำให้ปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม สถานการณ์ในอนาคตพบว่า เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging ทุกแบบสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักให้สูงขึ้นและให้ค่าสูงกว่าการประยุกต์ใช้โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาในปี พ.ศ. 2555

ตารางที่ 4-78 ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging

กรณี	ผลการจำลองระบบ	ช่วงการจำลองระบบ	เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้น/ลดลง ^{3/} (%Active Storage)			
			พฤศจิกายน	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	รายปี
สถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบัน ^{1/}						
1	One-Point Hedging	2555-2561	-6.93 (-6.73) ^{4/}	-6.95 (-8.73) ^{4/}	-5.47 (-6.51) ^{4/}	-6.14 (-7.51) ^{4/}
2	Two-Point Hedging	2555-2561	+29.20 (+29.41) ^{4/}	+39.69 (+37.92) ^{4/}	+29.63 (+28.59) ^{4/}	+34.18 (+32.80) ^{4/}
3	Three-Point Hedging	2555-2561	+19.80 (+20.00) ^{4/}	+27.70 (+25.92) ^{4/}	+20.27 (+19.23) ^{4/}	+23.63 (+22.26) ^{4/}
4	Zone-Based Hedging	2555-2561	+31.55 (+31.75) ^{4/}	+44.36 (+42.58) ^{4/}	+32.82 (+31.77) ^{4/}	+38.03 (+36.65) ^{4/}
สถานการณ์ในอนาคต ^{2/}						
5	One-Point Hedging	2555-2561	+32.76	+51.98	+32.79	+41.47

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

กรณี	ผลการจำลองระบบ	ช่วงการจำลองระบบ	เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้น/ลดลง ^{3/} (%Active Storage)			
			พฤศจิกายน	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	รายปี
			(+5.36) ^{5/}	(+18.03) ^{5/}	(+35.25) ^{5/}	(+11.02) ^{5/}
6	Two-Point Hedging	2555-2561	+44.83 (+17.44) ^{5/}	+71.96 (+38.03) ^{5/}	+47.59 (+20.04) ^{5/}	+58.59 (+28.14) ^{5/}
7	Three-Point Hedging	2555-2561	+40.74 (+13.14) ^{5/}	+66.19 (+34.03) ^{5/}	+43.50 (+17.00) ^{5/}	+53.75 (+24.67) ^{5/}
8	Zone-Based Hedging	2555-2561	+37.36 (+9.97) ^{5/}	+59.75 (+25.80) ^{5/}	+39.40 (+11.85) ^{5/}	+48.59 (+18.13) ^{5/}

หมายเหตุ : ^{1/} อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจริง (Observed Inflow) และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2555-2561

^{2/} อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำคาดการณ์ในอนาคต (Projected Inflow) ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2555-2561

^{3/} เปรียบเทียบกับปริมาณน้ำเก็บกักจริงระหว่างปี พ.ศ. 2555-2561

^{4/} ผลต่างคำนวณจากการเปรียบเทียบกับการใช้โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาในปี พ.ศ. 2555 กรณีที่ 1 จากตารางที่ 4-77

^{5/} ผลต่างคำนวณจากการเปรียบเทียบกับการใช้โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาในปี พ.ศ. 2555 กรณีที่ 6 จากตารางที่ 4-77

4.7.3 แบบจำลองฟuzzyลอจิก (Conventional Fuzzy Model)

ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ของสถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบันด้วยแบบจำลองฟuzzyลอจิกกรณีที่ 1 ซึ่งกำหนดปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. (สภาพจริง) พบว่า สามารถลดปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยได้ถึง 114.25 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งหมายถึงความสามารถในการเก็บกักน้ำในอ่างเก็บน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ แบบจำลองฟuzzyลอจิกสามารถลดปริมาณการระบายในช่วงฤดูแล้งได้สูงถึง 860 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือลดลงคิดเป็น 24.04% แบบจำลองฟuzzyลอจิกยังสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำได้ถึงประมาณ 1,167.33 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี โดยสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งได้เพิ่มขึ้น 11.57% เมื่อเปรียบเทียบกับผลการระบายน้ำจริงที่ผ่านมา ยิ่งไปกว่านั้น แบบจำลองฟuzzyลอจิกยังสามารถเพิ่มการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำได้สูงถึง 249.54 กิกะวัตต์-ชั่วโมงต่อปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำในช่วงฤดูฝนที่เพิ่มสูงขึ้น

นอกจากนี้ ผลการจำลองในกรณีที่ 2 ที่ทำการปรับลดพื้นที่เพาะปลูกของโครงการเจ้าพระยาใหญ่ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555-2561 และกรณีที่ 3 กรณีพิจารณาปริมาณ Sideflow สถานี W.4A ในการกำหนดการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล และกำหนดปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. พบว่า สามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งได้เพิ่มขึ้นจากกรณีที่ 1 ถึง +4.56% และ +7.80% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองกรณีที่ 3 ยังเกิดการไหลล้นอ่างในปี พ.ศ. 2554

สำหรับผลการจำลองในกรณีที่ 4 โดยอาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำคาดการณ์ในอนาคต (Projected Inflow) ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 พบว่า สามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งได้เพิ่มขึ้น +0.06% ดังแสดงผลในตารางที่ 4-79

ตารางที่ 4-79 ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองฟuzzy

กรณี	ผลการจำลองระบบ	เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้น/ลดลง ^{3/} (%Active Storage)			
		พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์
สถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบัน ^{1/}					
1	กรณีกำหนดปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. (สภาพจริง)	+6.09	+18.37	+11.57	+14.70
2	กรณีปรับลดพื้นที่เพาะปลูกของโครงการเจ้าพระยาใหญ่ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555-2561	+9.86 (+3.77) ^{4/}	+24.50 (+6.13) ^{4/}	+16.13 (+4.56) ^{4/}	+19.98 (+5.28) ^{4/}
3	กรณีพิจารณาปริมาณ Sideflow สถานี W.4A ในการกำหนดการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล และกำหนดปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. ^{5/}	+14.55 (+8.46) ^{4/}	+25.69 (+7.32) ^{4/}	+19.37 (+7.80) ^{4/}	+22.28 (+7.58) ^{4/}
สถานการณ์ในอนาคต ^{2/}					
4	กรณีพิจารณาปริมาณ Sideflow สถานี W.4A ในการกำหนดการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล และกำหนดปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ.	+1.46 (-4.63) ^{4/}	+1.63 (-16.77) ^{4/}	+0.06 (-11.51) ^{4/}	+8.73 (-5.97) ^{4/}

หมายเหตุ : ^{1/} อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจริง (Observed Inflow) และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561

^{2/} อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำคาดการณ์ในอนาคต (Projected Inflow) ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561

^{3/} เปรียบเทียบกับปริมาณน้ำเก็บกักจริงระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561

^{4/} ผลต่างคำนวณจากการเปรียบเทียบกับกรณี 1

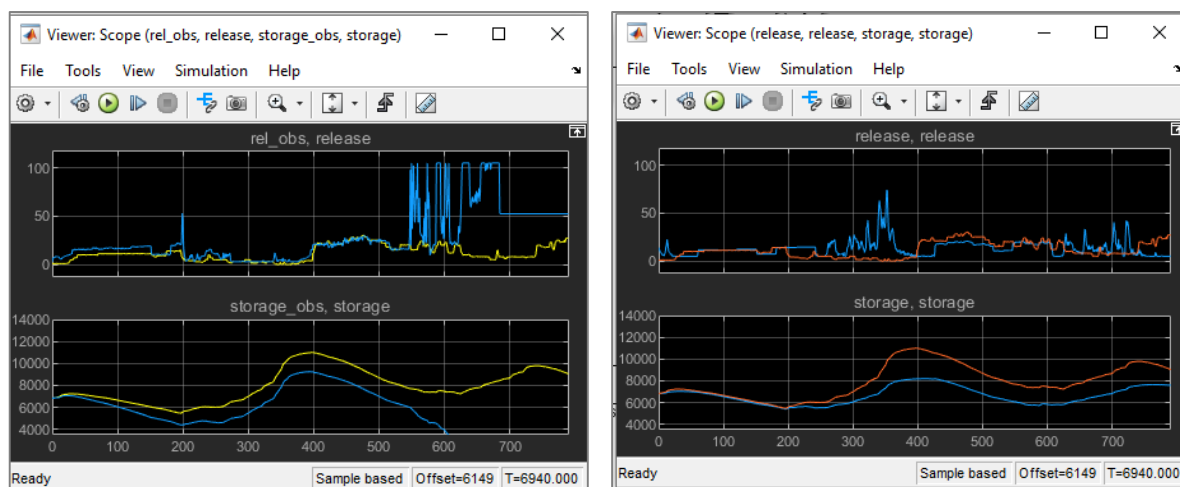
^{5/} ยังเกิดการไหลล้นอ่างในปี พ.ศ. 2554

4.7.4 แบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟuzzy แบบปรับตัวได้และเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง

เนื่องจากแบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟuzzy แบบปรับตัวได้และเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลังได้ถูกพัฒนาต่อจากแบบจำลองฟuzzy เดิมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะ Day to Day Operation ผลการวิจัยได้ออกแบบเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 การวางแผนปฏิบัติการ (Operation Planning) โดยเลือกช่วงข้อมูลของการทดสอบในปี พ.ศ. 2559-2561 สำหรับการทดสอบหารูปแบบการระบายน้ำรายเดือนที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Technique) และกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้มีปริมาณน้ำเก็บกักเพิ่มขึ้น 15% ในเดือนพฤศจิกายน และปริมาณการขาดน้ำและปริมาณน้ำไหลล้นอ่างเกิดขึ้นให้น้อยที่สุด และนำข้อมูลพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำล่วงหน้ามาเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลนำเข้า และส่วนที่ 2 การกำหนดการระบายน้ำจริง (Operating) โดยในส่วนนี้จะมีส่วนของโมดูลย่อยจากแบบจำลองฟuzzy เดิมที่ได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถเก็บกักน้ำได้เพิ่มขึ้นจากผลที่รายงานในหัวข้อ 4.6.3 แล้วและพัฒนาโมดูลย่อย ANFIS และโมดูลย่อย RL เข้ามาเสริมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองในการ

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

กำหนดการระบายน้ำจริงให้สูงขึ้น ซึ่งตัวอย่างของผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 4-188 ที่สามารถปรับจูนค่าปริมาณการระบายน้ำรายวันให้เข้าใกล้กับค่าปริมาณน้ำเก็บกักเป้าหมายที่ได้จากการวางแผนปฏิบัติการในส่วนที่ 1 ข้างต้น



รูปที่ 4-188 ตัวอย่างผลลัพธ์การคำนวณปริมาณการเก็บกักน้ำด้วยโมดูล ANFIS ที่ปรับแก้โครงสร้างแล้ว

4.7.5 แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง

ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในกรณีที่ 1 ซึ่งได้กำหนดสมการข้อจำกัดเป็นลักษณะรายปีโดยอาศัยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. พบว่า สามารถลดปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยได้ถึง 49.81 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งหมายถึงความสามารถในการเก็บกักน้ำในอ่างเก็บน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในกรณีนี้ยังสามารถลดปริมาณการระบายในช่วงฤดูแล้งได้สูงถึง 333.69 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือลดลงคิดเป็น 9.33% แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดนี้ยังสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำได้ถึงประมาณ 955.84 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี โดยสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งได้เพิ่มขึ้น 10.36% เมื่อเปรียบเทียบกับผลการระบายน้ำจริงที่ผ่านมา ยิ่งไปกว่านั้น แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดยังสามารถเพิ่มการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำได้สูงขึ้นไปจนถึง 90.89 กิกะวัตต์-ชั่วโมงต่อปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำในช่วงฤดูฝนที่เพิ่มสูงขึ้น

อย่างไรก็ดี การปรับเปลี่ยนรูปแบบสมการข้อจำกัดเป็นแบบรายฤดูกาลในกรณีที่ 2 ส่งผลให้ความสามารถในการเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งลดลงจากกรณีที่ 1 เล็กน้อยประมาณ -0.95% นอกจากนี้ การพิจารณาปริมาณ Sideflow สถานี W.4A มาช่วยในการกำหนดการระบายน้ำในแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดยังสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ 1 ประมาณ +2.76%

สำหรับผลการจำลองในกรณีที่ 4 โดยอาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำคาดการณ์ในอนาคต (Projected Inflow) ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563 พบว่า ปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งลดลง -14.00% ดังแสดงผลในตารางที่ 4-80

ตารางที่ 4-80 ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิง
ข้อจำกัด

กรณี	ผลการจำลองระบบ	เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้น/ลดลง ^{3/} (%Active Storage)			
		พฤศจิกายน	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	รายปี
สถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบัน ^{1/}					
1	กรณีกำหนดสมการข้อจำกัดรายปีและปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. (สภาพจริง)	+7.94	+14.00	+10.36	+12.03
2	กรณีกำหนดสมการข้อจำกัดรายฤดูกาลและปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. (สภาพจริง)	+7.10 (-0.84) ^{4/}	+12.93 (-1.07) ^{4/}	+9.41 (-0.95) ^{4/}	+11.03 (-1.00) ^{4/}
3	กรณีกำหนดสมการข้อจำกัดรายฤดูกาลและปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. (สภาพจริง) และพิจารณาปริมาณ Sidelow สถานี W.4A ^{5/}	+10.49 (+2.55) ^{4/}	+17.67 (+3.67) ^{4/}	+13.12 (+2.76) ^{4/}	+15.21 (+3.18) ^{4/}
สถานการณ์ในอนาคต ^{2/}					
4	กรณีกำหนดสมการข้อจำกัดรายฤดูกาลและปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. (สภาพจริง) และพิจารณาปริมาณ Sidelow สถานี W.4A และสถานี CT.2A	-23.55 (-31.49) ^{4/}	-16.49 (-30.49) ^{4/}	-14.00 (-24.36) ^{4/}	-29.46 (-41.49) ^{4/}

หมายเหตุ : ^{1/} อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจริง (Observed Inflow) และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561

^{2/} อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำคาดการณ์ในอนาคต (Projected Inflow) ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561

^{3/} เปรียบเทียบกับปริมาณน้ำเก็บกักจริงระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561

^{4/} ผลต่างคำนวณจากการเปรียบเทียบกับกรณี 1

^{5/} ยังเกิดการไหลล้นอ่างในปี พ.ศ. 2554

4.8 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิผลของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในปัจจุบันและ ประสิทธิผลที่ได้จากกลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำใหม่

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิผลของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในปัจจุบัน (Performance of Conventional Operation) และประสิทธิผลที่ได้จากกลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำใหม่ (Performance and Effectiveness of Reservoir Re-Operation) ในรูปของประสิทธิผลในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ และดัชนีแสดงผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ ได้แก่ ดัชนีการระบายน้ำรายปีเฉลี่ย (Mean Annual Release) ดัชนีการผลิตพลังงานไฟฟ้ารายปีเฉลี่ย (Mean Annual Energy Production) เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักหลังสิ้นสุดฤดูฝนเฉลี่ย (% Average Water Storage at the End

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเชิงบูรณาการ ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

of Wet Season) เปรอ์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักหลังสิ้นสุดการจำลองระบบ (%Ending Storage) ดัชนีความน่าเชื่อถือได้ (Reliability Index) ดัชนีวัดระดับความรุนแรง (Vulnerability Index) และดัชนีวัดโอกาสการฟื้นตัวของระบบ (Resiliency Index) จากการนำเข้าสู่ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำในปัจจุบันและจากการปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ 4 แนวทาง เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้และให้ข้อเสนอแนะในการปรับเปลี่ยนแนวทางการบริหารจัดการน้ำต้นทุนของเขื่อนภูมิพลในปัจจุบันสำหรับปรับใช้ในอนาคต นอกจากนี้ ยังได้นำเข้าสู่ข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำในอนาคตที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกและการพัฒนาทางเศรษฐกิจ-สังคมที่มีต่อฐานข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำ และทำการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและประเมินประสิทธิผลในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ และดัชนีแสดงผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ เพื่อวิเคราะห์สถานการณ์การบริหารจัดการน้ำต้นทุนของเขื่อนภูมิพลในอนาคต

ดัชนีความน่าเชื่อถือได้ (Reliability Index) ดัชนีวัดระดับความรุนแรง (Vulnerability Index) และดัชนีวัดโอกาสการฟื้นตัวของระบบ (Resilience Index) เป็นดัชนีตัวชี้วัดที่นิยมนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิผลของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปัจจุบันซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของดัชนีแสดงผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบสมัยใหม่ (Modern Performance Indices) ที่ให้สารสนเทศในการประเมินประสิทธิผลของระบบได้ดี (Cai et al., 2002; Fontane, 2001; Hashimoto, 1982; McMahon et al., 2006; Srdjevic et al., 2005)

-ดัชนีความน่าเชื่อถือได้ (Reliability Index) เป็นดัชนีที่มีความหมายในทางตรงข้ามกับความเสี่ยง (Risk) หมายถึงดัชนีตัวชี้วัดในรูปของโอกาสความน่าจะเป็นที่ใช้ประเมินสมรรถนะของระบบว่าสามารถปฏิบัติงานให้ได้รับความพึงพอใจมากน้อยแค่ไหนในช่วงเวลาที่พิจารณา ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือได้ยิ่งสูงหมายถึงระบบสามารถปฏิบัติงานให้ได้รับความพึงพอใจสูงในการตอบสนองความต้องการทางด้านท้ายเขื่อนไม่ให้เกิดการขาดน้ำ หรือความเสี่ยงในการขาดน้ำตํานั่นเอง

-ดัชนีวัดระดับความรุนแรง (Vulnerability Index) เป็นดัชนีวัดระดับความรุนแรงของความล้มเหลวเฉลี่ยในช่วงที่ระบบประสบความล้มเหลวทั้งหมด ค่าดัชนีวัดระดับความรุนแรงยิ่งต่ำแสดงให้เห็นว่าปริมาณการขาดน้ำตลอดช่วงการจำลองระบบตํานั่นเอง

-ดัชนีวัดโอกาสการฟื้นตัวของระบบ (Resilience Index) เป็นโอกาสความน่าจะเป็นที่ระบบจะกลับคืนจากสภาวะล้มเหลว ค่าดัชนีวัดโอกาสการฟื้นตัวยิ่งสูงแสดงให้เห็นถึงโอกาสความน่าจะเป็นที่ระบบจะกลับคืนจากสภาวะล้มเหลวจากการขาดน้ำไปสู่สภาวะปกติยิ่งสูงตามไปด้วยนั่นเอง

ตารางที่ 4-81 ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลในสถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบันและในอนาคต

กรณี	ลักษณะสำคัญ	ช่วงการจำลองระบบ	ประสิทธิผลของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ						
			ดัชนีการระบายน้ำรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)	ดัชนีการผลิตพลังงานไฟฟ้ารายปีเฉลี่ย (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักหลังสิ้นสุดฤดูฝนเฉลี่ย (%) ^{1/}	เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักหลังสิ้นสุดการจำลองระบบ (%) ^{2/}	ดัชนีความน่าเชื่อถือได้ (%) ^{3/}	ดัชนีจลนศาสตร์ความรุนแรง (%) ^{4/}	ดัชนีวัสดุโอกาสการฟื้นฟูตัวของระบบ (%) ^{5/}
สถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบัน-อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอดีตถึงปัจจุบัน (Observed Inflow)									
1	อาศัยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาในปี พ.ศ. 2555	2555-2561	4,333.64	908.53	40.08	54.50	99.88	0.05	66.67
2	ปรับเพิ่มระดับ URC +0.50 เมตร ^{6/}	2555-2561	4,333.64	908.53	40.08	54.50	99.88	0.05	66.67
3	ปรับลดระดับ URC -0.50 เมตร ^{6/}	2555-2561	4,331.38	907.46	39.97	54.50	99.84	0.11	75.00
4	ปรับเพิ่มระดับ LRC +0.50 เมตร ^{6/}	2555-2561	4,332.03	908.43	40.13	54.62	99.84	0.09	75.00
5	ปรับลดระดับ LRC -0.50 เมตร ^{6/}	2555-2561	4,334.49	908.77	40.11	54.44	99.84	0.04	100.00
6	One-Point Hedging	2555-2561	4,461.27	910.78	34.67	45.25	97.61	1.97	11.48
7	Two-Point Hedging	2555-2561	3,947.28	910.61	63.89	82.49	67.46	9.42	0.60
8	Three-Point Hedging	2555-2561	4,043.20	907.02	56.27	75.54	75.36	7.60	0.79
9	Zone-Based Hedging	2555-2561	3,906.15	909.75	66.13	85.47	12.32	12.62	0.13
10	แบบจำลองพีซซี ^{7/}	2543-2561	5,175.42	1,417.82	74.89	83.43	56.30	10.73	3.66

กรณี	ลักษณะสำคัญ	ช่วงการจำลองระบบ	ประสิทธิผลของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ						
			ดัชนีการระบายน้ำรายปีเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม.)	ดัชนีการผลิตพลังงานไฟฟ้ารายปีเฉลี่ย (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักหลังสิ้นสุดฤดูฝนเฉลี่ย (%) ^{1/}	เปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักหลังสิ้นสุดการจำลองระบบ (%) ^{2/}	ดัชนีความน่าเชื่อถือได้ (%) ^{3/}	ดัชนีระดับความรุนแรง (%) ^{4/}	ดัชนีวิวัฒนาการการฟื้นตัวของระบบ (%) ^{5/}
11	แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด ^{8/}	2543-2561	5,265.64	1,349.39	70.80	65.69	70.29	4.80	12.46
สถานการณ์ในอนาคต-อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอนาคตจากแบบจำลอง RCP 4.5 (Projected Inflow)									
12	อาศัยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาในปี พ.ศ. 2555	2555-2561	6,029.40	1,379.44	62.67	82.96	91.98	8.89	1.46
13	One-Point Hedging	2555-2561	5,922.86	1,408.57	68.07	90.68	90.22	11.07	2.40
14	Two-Point Hedging	2555-2561	5,922.86	1,469.01	77.74	90.68	71.06	17.75	0.27
15	Three-Point Hedging	2555-2561	5,922.86	1,454.76	74.50	90.68	73.76	16.20	0.45
16	Zone-Based Hedging	2555-2561	5,922.86	1,430.89	71.65	90.68	43.88	12.84	0.28
17	แบบจำลองฟิชชี ^{9/}	2543-2563	4,959.05	1,273.98	60.49	38.63	60.81	11.31	3.19
18	แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด ^{10/}	2543-2563	4,958.40	1116.51	36.85	96.38	100	-	-

หมายเหตุ : ^{1/} พิจารณาสถานะของปริมาณน้ำเก็บกักเฉลี่ยรายปี ณ วันที่ 31 พฤศจิกายน โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเก็บกักใช้การ (Active Storage) ของเขื่อนภูมิพล

^{2/} พิจารณาสถานะของปริมาณน้ำเก็บกักเฉลี่ยรายปี ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการจำลองระบบ โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเก็บกักใช้การ (Active Storage) ของเขื่อนภูมิพล

- 3/ ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือได้ยิ่งสูงหมายถึงระบบสามารถปฏิบัติงานให้ได้รับความพึงพอใจสูงในการตอบสนองความต้องการทางด้านท้ายเขื่อนไม่ให้เกิดการขาดน้ำ หรือความเสี่ยงในการขาดน้ำต่าตนเอง
- 4/ เป็นค่าดัชนีวัดระดับความรุนแรงในการตอบสนองความต้องการน้ำของระบบ ค่าดัชนีวัดระดับความรุนแรงยิ่งต่ำแสดงให้เห็นว่าปริมาณการขาดน้ำตลอดช่วงการจำลองระบบต่าตนเอง
- 5/ เป็นค่าดัชนีวัดโอกาสการฟื้นตัวของระบบ ค่าดัชนีวัดโอกาสการฟื้นตัวยิ่งสูงแสดงให้เห็นถึงโอกาสความน่าจะเป็นที่ระบบจะกลับคืนจากสภาวะล้มเหลวจากการขาดน้ำไปสู่สภาวะปกติ ยิ่งสูงตามไปด้วยนั่นเอง
- 6/ ปรับเปลี่ยนจากโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาขึ้นโดย กฟผ. ในปี พ.ศ. 2555
- 7/ กรณีพิจารณาปริมาณ Sideflow สถานี W.4A ในการกำหนดการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล และกำหนดปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. กรณีที่ 3 จากตารางที่ 4-79
- 8/ กรณีกำหนดสมการข้อจำกัดรายฤดูกาลและปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. (สภาพจริง) และพิจารณาปริมาณ Sideflow สถานี W.4A กรณีที่ 3 จากตารางที่ 4-80
- 9/ กรณีพิจารณาปริมาณ Sideflow สถานี W.4A จากแบบจำลองการไหลเวียนของน้ำแบบกระจายตัวที่ผสมผสานกับการใช้น้ำเพื่อการเกษตรกรรม (Distributed Water Circulation Model Incorporating Agricultural Water Use, DWCM-AgWU) ในการกำหนดการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล และกำหนดปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. กรณีที่ 4 จากตารางที่ 4-79
- 10/ กรณีพิจารณาปริมาณ Sideflow สถานี W.4A และสถานี CT.2A จากแบบจำลองการไหลเวียนของน้ำแบบกระจายตัวที่ผสมผสานกับการใช้น้ำเพื่อการเกษตรกรรม (Distributed Water Circulation Model Incorporating Agricultural Water Use, DWCM-AgWU) ในการกำหนดการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล และกำหนดปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. กรณีที่ 4 จากตารางที่ 4-80

จากข้อมูลในตารางที่ 4-81 จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำทั้งสถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบัน (อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจริง (Observed Inflow) และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบ) และสถานการณ์ในอนาคต (อาศัยข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำคาดการณ์ในอนาคต (Projected Inflow) ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำตรวจวัดจริงอื่น ๆ ในการจำลองระบบ) มีความแตกต่างกันไปตามสถานการณ์น้ำ และเทคนิคเครื่องมือที่ใช้ในการบริหารจัดการน้ำ ตลอดจนเงื่อนไขของช่วงข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำที่นำมาใช้ อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองระบบพบว่า

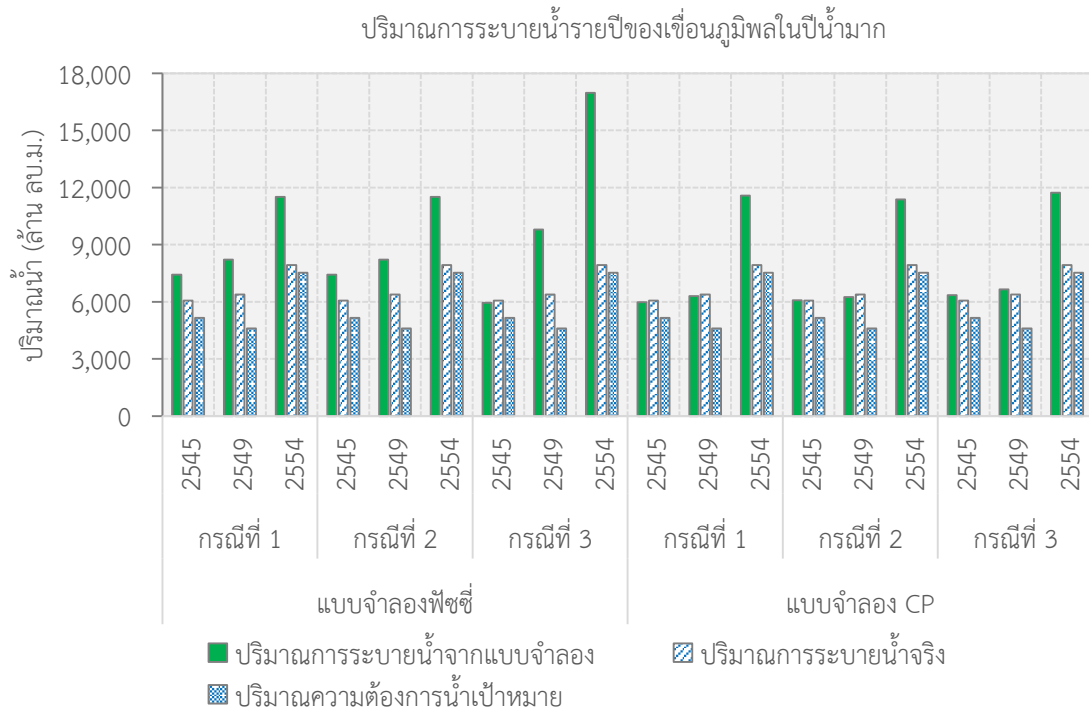
การประยุกต์ใช้แบบจำลองฟิชชีและแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2561 (สถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบัน) ทำให้ดัชนีการระบายน้ำรายปีเฉลี่ยและดัชนีการผลิตพลังงานไฟฟ้ารายปีเฉลี่ยสูงกว่าช่วงที่ทำการจำลองระบบตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555-2561 ซึ่งอาศัยโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาในปี พ.ศ. 2555 โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่รูปแบบต่าง ๆ และเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging (หลังเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ปี พ.ศ. 2554 ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำต่ำกว่าค่าเฉลี่ยระยะยาว ส่งผลให้ปริมาณการระบายลดลง) อย่างไรก็ตาม เฟอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักหลังสิ้นสุดฤดูฝนเฉลี่ย (วันที่ 31 ตุลาคมของทุกปี) และเฟอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักหลังสิ้นสุดการจำลองระบบ (วันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561) ด้วยแบบจำลองฟิชชีและแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดยังคงสูงกว่าการใช้โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พัฒนาในปี พ.ศ. 2555 โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่ และเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging อย่างไรก็ตาม ผลการประเมินดัชนีแสดงผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ ได้แก่ ดัชนีความน่าเชื่อถือได้ ดัชนีวัดระดับความรุนแรง และดัชนีวัดโอกาสการฟื้นตัวของระบบ จากผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองฟิชชีและแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดให้ค่าดัชนีแสดงผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำไม่สูงนัก เนื่องจากแนวคิดที่พยายามเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำในระยะยาวนั่นเอง

สำหรับการประยุกต์ใช้แบบจำลองฟิชชีและแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพล (สถานการณ์ในอนาคต) ที่ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำมีแนวโน้มลดลงพบว่า แบบจำลองแนะนำปริมาณน้ำระบายน้อยกว่าการใช้โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่รูปแบบต่าง ๆ และเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging นอกจากนี้ ผลการประเมินดัชนีแสดงผลการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำทั้ง 4 แนวทาง อยู่ในเกณฑ์ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งดัชนีความน่าเชื่อถือได้และดัชนีวัดระดับความรุนแรง อย่างไรก็ตาม ดัชนีวัดโอกาสการฟื้นตัวของระบบยังอยู่ในสภาวะที่ยากต่อการฟื้นตัวจากสภาวะการขาดน้ำ ยิ่งไปกว่านั้น ผลการจำลองยังพบว่า เฟอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักหลังสิ้นสุดฤดูฝนเฉลี่ย (วันที่ 31 ตุลาคมของทุกปี) และเฟอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำเก็บกักหลังสิ้นสุดการจำลองระบบ (วันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561) ด้วยแบบจำลองฟิชชีและแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดยังต่ำกว่าการใช้โค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่รูปแบบต่าง ๆ และเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging

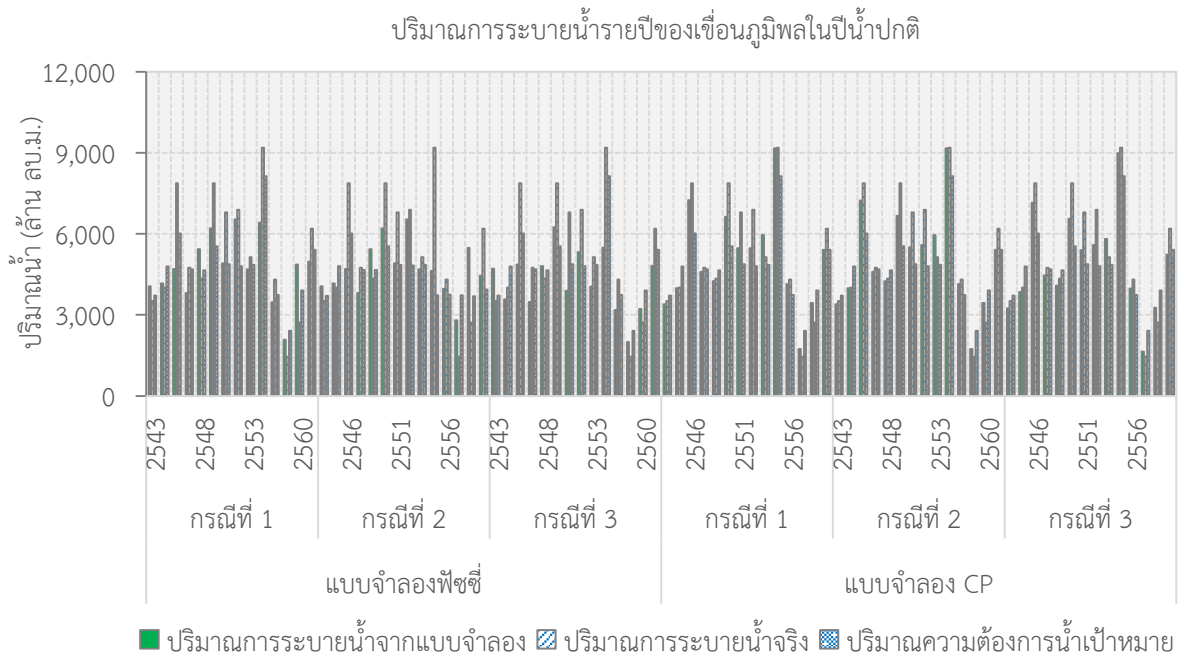
4.9 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในปัจจุบันแยกตามประเภทปีน้ำจากกลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำใหม่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์

งานวิจัยนี้ได้นำผลการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2561 (สถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบัน) ที่ได้จากแบบจำลองฟิชชีและแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดมาทำการวิเคราะห์รูปแบบการระบายน้ำตามสถานการณ์ปีน้ำมาก ปีน้ำปกติ และปีน้ำน้อย โดยได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณผลการระบายน้ำรายปีจากแบบจำลองกับปริมาณการระบายน้ำจริงที่เขื่อนภูมิพล รวมถึงได้

เปรียบเทียบผลการระบายน้ำรายปีจากแบบจำลองกับปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมาย ซึ่งให้ผลแสดงในรูปที่ 4-189 ถึงรูปที่ 4-191

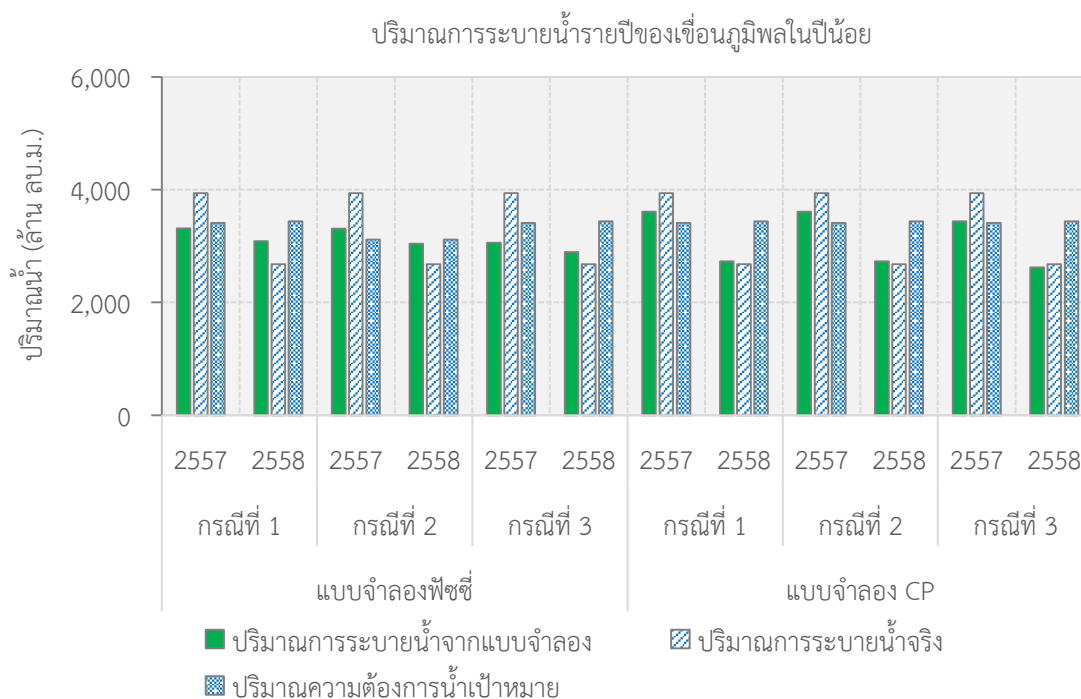


รูปที่ 4-189 เปรียบเทียบรูปแบบการระบายน้ำด้วยแบบจำลองฟัซซี่และแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในปีน้ำมาก



รูปที่ 4-190 เปรียบเทียบรูปแบบการระบายน้ำด้วยแบบจำลองฟัซซี่และแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในปีน้ำปกติ

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562



รูปที่ 4-191 เปรียบเทียบรูปแบบการระบายน้ำด้วยแบบจำลองฟิชชีและแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในปีน้ำน้อย

จะเห็นได้ว่ารูปแบบการระบายน้ำทั้งจากแบบจำลองฟิชชีและแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในปีน้ำมาก (ปี พ.ศ. 2545, 2549 และ 2554) มีปริมาณการระบายน้ำสูงกว่าปริมาณการระบายน้ำจริงและปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายอย่างเห็นได้ชัดทั้ง 3 กรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปี พ.ศ. 2554 ที่ทั้ง 2 แบบจำลองแนะนำให้ระบายน้ำค่อนข้างสูงกว่าผลการระบายน้ำจริง สำหรับผลการจำลองระบบในปีน้ำปกติ (ปี พ.ศ. 2543, 2544, 2546, 2547, 2548, 2550, 2551, 2552, 2553, 2555, 2556, 2559, 2560, 2561) และในปีน้ำน้อย (ปี พ.ศ. 2557 และ 2558) พบว่า ในภาพรวมแบบจำลองฟิชชีแนะนำให้มีการระบายน้ำเฉลี่ยน้อยกว่าปริมาณการระบายน้ำจริง อย่างไรก็ตาม ปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยจากแบบจำลองยังมีค่าต่ำกว่าปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายเฉลี่ยอยู่เล็กน้อย ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากความพยายามที่จะเพิ่มน้ำต้นทุนและยอมให้มีการระบายน้ำต่ำกว่าความต้องการน้ำในบางช่วงเวลาที่สถานะน้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำน้อย นอกจากนี้ ปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยของกรณีที่ 1 (กรณีกำหนดปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. -จำลองสภาพจริง) กรณีที่ 2 (กรณีปรับลดพื้นที่เพาะปลูกของโครงการเจ้าพระยาใหญ่ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555-2561) และกรณีที่ 3 (กรณีพิจารณาปริมาณ Sideflow สถานี W.4A ในการกำหนดการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล และกำหนดปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ.) ที่ได้จากการจำลองระบบด้วยแบบจำลองฟิชชีในปีน้ำปกติและปีน้ำน้อยยังมีแนวโน้มลดลงเป็นลำดับจากเงื่อนไขข้อพิจารณาในแต่ละกรณีทั้งในส่วนของการปรับลดพื้นที่เพาะปลูกที่ส่งผลต่อปริมาณความต้องการน้ำเฉลี่ยที่ลดลงโดยเฉพาะในปีน้ำปกติ และการพิจารณาปริมาณ Sideflow สถานี W.4A มาช่วยในการกำหนดการระบายน้ำ ส่งผลทำให้ปริมาณการระบายน้ำที่ได้จากแบบจำลองฟิชชีในปีน้ำปกติและน้ำน้อยต่ำกว่าความต้องการน้ำเป้าหมาย สำหรับรูปแบบการระบายน้ำจากแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในปีน้ำปกติพบว่าให้ค่าปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยต่ำกว่าปริมาณการระบายน้ำจริง แต่สามารถตอบสนองความต้องการน้ำเป้าหมายได้ทั้ง 3 กรณี อย่างไรก็ตาม จากการกำหนดสมการข้อจำกัดรายฤดูกาลที่ยอมให้มีการระบายน้ำต่ำกว่า

4 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเขื่อนภูมิฯ ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

ความต้องการน้ำในช่วงฤดูแล้งได้ ส่งผลให้ปริมาณการระบายน้ำจากแบบจำลองต่ำกว่าปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายดังที่สรุปไว้ในตารางที่ 4-82

ตารางที่ 4-82 ปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยจากแบบจำลองฟิชซีและแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด แยกตามประเภทปีน้ำ

ประเภทของ แบบจำลอง	การจำลอง ระบบ ^{1/}	ปริมาณน้ำเฉลี่ยตามปีน้ำ (ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี)		
		ปริมาณการระบายน้ำ จากแบบจำลองเฉลี่ย	ปริมาณการระบายน้ำ จริงเฉลี่ย	ปริมาณความต้องการ น้ำเป้าหมายเฉลี่ย
ปีน้ำมาก				
แบบจำลองฟิชซี	กรณีที่ 1	9,047.74	6,788.12	5,757.22
	กรณีที่ 2	9,047.74	6,788.12	5,757.22
	กรณีที่ 3	10,902.77	6,788.12	5,757.22
แบบจำลอง CP	กรณีที่ 1	7,946.81	6,788.12	5,757.22
	กรณีที่ 2	7,904.75	6,788.12	5,757.22
	กรณีที่ 3	8,242.45	6,788.12	5,757.22
ปีน้ำปกติ				
แบบจำลองฟิชซี	กรณีที่ 1	4,736.12	5,359.74	4,823.35
	กรณีที่ 2	4,482.24	5,359.74	4,653.29
	กรณีที่ 3	4,262.24	5,359.74	4,823.35
แบบจำลอง CP	กรณีที่ 1	5,063.79	5,359.74	4,823.35
	กรณีที่ 2	5,076.46	5,359.74	4,823.35
	กรณีที่ 3	4,947.29	5,359.74	4,823.35
ปีน้ำน้อย				
แบบจำลองฟิชซี	กรณีที่ 1	3,200.14	3,309.63	3,424.45
	กรณีที่ 2	3,172.47	3,309.63	3,117.37
	กรณีที่ 3	2,976.58	3,309.63	3,424.45
แบบจำลอง CP	กรณีที่ 1	3,170.06	3,309.63	3,424.45
	กรณีที่ 2	3,170.06	3,309.63	3,424.45
	กรณีที่ 3	3,028.91	3,309.63	3,424.45

หมายเหตุ : ^{1/} อัจฉกรณิการจำลองระบบด้วยแบบจำลองฟิชซีและแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในตารางที่ 4-79 และตารางที่ 4-80 ตามลำดับ

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ข้อสรุปที่สำคัญที่ได้จากโครงการวิจัยเรื่อง “กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)” มีดังนี้

5.1.1 งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักที่จะเพิ่มปริมาณเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลให้สูงขึ้น 15% ในช่วงต้นฤดูแล้ง (เดือนพฤศจิกายน) โดยได้นำเสนอแนวทางการพัฒนากลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ของเขื่อนภูมิพล 4 รูปแบบได้แก่ (1) การโค้งเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำปรับใหม่ (Adapted Rule Curve) (2) เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging (Hedging Policy) (3) การพัฒนาแบบจำลองฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Model) ร่วมกับแบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟัซซี่แบบปรับตัวได้และเทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model with Reinforce Learning) และ (4) แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดและเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Constraint Programming Model with Machine Learning) นอกจากนี้ ยังได้นำเสนอแนวทางการควบคุมพื้นที่เพาะปลูกในพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ให้มีความเหมาะสมตามประเภทปีน้ำ ตลอดจนการนำข้อมูลน้ำท่าของสถานีหลักท้ายเขื่อนมาร่วมพิจารณากำหนดการระบายน้ำตามสถานการณ์น้ำทั้งในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้ง ผลการจำลองระบบระยะยาวตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543–2561 แสดงให้เห็นว่า การปรับเพิ่ม/ปรับลดระดับ Upper Rule Curve และ Lower Rule Curve ที่พัฒนาขึ้นในปี พ.ศ. 2555 ที่ระดับ ± 0.5 เมตร และใช้เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Standard Operating Policy ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำมากนัก ในขณะที่เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Two-Point Hedging, Three-Point Hedging และ Zone-Based Hedging สามารถกำหนดพารามิเตอร์เพื่อลดการระบายน้ำลงในช่วงน้ำมาก ส่งผลทำให้ปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำเพิ่มสูงขึ้นยกเว้น One-Point Hedging อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ Hedging Policy จะสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักได้เพิ่มขึ้น +20.20% ถึง +32.82% แต่มีความเสี่ยงในการบริหารจัดการน้ำในช่วงน้ำมากจากความพยายามที่จะเพิ่มต้นทุน สำหรับผลการจำลองระบบในกรณีอ้างอิงด้วยแบบจำลองฟัซซี่และแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่อาศัยหลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) พบว่า สามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำได้ถึงประมาณ 1,167.33 และ 955.84 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ตามลำดับ และโดยสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งได้เพิ่มขึ้น +11.57% และ +10.36% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการระบายน้ำจริงที่ผ่านมา ผลการจำลองระยะยาวในกรณีที่ทำการปรับลดพื้นที่เพาะปลูกของโครงการเจ้าพระยาใหญ่ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555–2561 และกรณีพิจารณาปริมาณ Sideflow สถานี W.4A ในการกำหนดการระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพล และกำหนดปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยพบว่า สามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งได้เพิ่มขึ้นอีก +4.56% (ควบคุมพื้นที่เพาะปลูก) และ +7.80% (พิจารณา Sideflow) สำหรับแบบจำลองฟัซซี่และ +2.76% (พิจารณา Sideflow) สำหรับแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอ้างอิง

5.1.2 แบบจำลองฟัซซี่ (Conventional Fuzzy Logic Model) สามารถจำลองกระบวนการตัดสินใจในการปล่อยน้ำจากอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลโดยถูกออกแบบให้มีระบบกลไกควบคุมการระบายน้ำ 3 โมดูล คือ (1) กลไกการระบายน้ำในช่วงฤดูแล้ง (2) กลไกการระบายน้ำฤดูฝน และ (3) กลไกการปรับแก้ค่าการระบายน้ำโดยช่วงฤดูแล้งแบบจำลองพิจารณาการระบายน้ำจากข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ ปริมาณน้ำเก็บกักที่

5 | กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเข็มมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

มีอยู่ และปริมาณความต้องการน้ำ ส่วนช่วงฤดูฝนพิจารณาปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำสะสมที่พยากรณ์ไว้ล่วงหน้า 7 วัน ปริมาตรว่างของอ่างเก็บน้ำ และระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ แบบจำลองได้ประมาณค่าการระบายน้ำ จากนั้น แบบจำลองมีกลไกในการปรับแก้ค่าโดยพิจารณาจากสภาพน้ำในลำน้ำที่อยู่ท้ายน้ำ และระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ของสถานการณ์ในอดีตถึงปัจจุบันด้วยแบบจำลองฟuzzyซึ่งกรณีกำหนดปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. (สภาพจริง) พบว่า สามารถลดปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยได้ถึง 114.25 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งหมายถึงความสามารถในการเก็บกักน้ำในอ่างเก็บน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ แบบจำลองฟuzzyสามารถลดปริมาณการระบายในช่วงฤดูแล้งได้สูงถึง 860 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือลดลงคิดเป็น 24.04% แบบจำลองฟuzzyยังสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำได้ถึงประมาณ 1,167.33 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี โดยสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งได้เพิ่มขึ้น 11.57% เมื่อเปรียบเทียบกับผลการระบายน้ำจริงที่ผ่านมา ยิ่งไปกว่านั้น แบบจำลองฟuzzyยังสามารถเพิ่มการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำได้สูงขึ้นถึง 249.54 กิกะวัตต์-ชั่วโมงต่อปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำในช่วงฤดูฝนที่เพิ่มสูงขึ้น

5.1.3 แบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro Fuzzy Optimization Model/Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System, ANFIS) สามารถจำลองระบบปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำได้ในระบบเบื้องต้น แบบจำลองถูกออกแบบโครงสร้างเป็นระบบควบคุมแบบฟuzzyลอจิกโดยการใช้เทคนิค ANN ข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ประกอบด้วย ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ ปริมาณน้ำเก็บกัก ปริมาณความต้องการน้ำ และสภาพน้ำในลำน้ำท้ายเขื่อน แบบจำลองถูกออกแบบให้จำลองระบบกลไกควบคุมการระบายน้ำเป็น 2 โมดูล คือ กลไกการระบายน้ำปกติ โดยพิจารณาข้อมูลสำหรับตัดสินใจจากข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ และแบบจำลองมีกลไกในการปรับแก้ค่าโดยพิจารณาจากสภาพน้ำในลำน้ำที่อยู่ท้ายน้ำ และระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ ผลการจำลองสถานการณ์ระยะยาว พบว่า แบบจำลองสามารถจำลองการระบายน้ำได้ดีในช่วงฤดูแล้ง ส่วนช่วงฤดูฝนแบบจำลองให้ผลลัพธ์การระบายน้ำสูงกว่าการตรวจวัดจริงค่อนข้างมาก

5.1.4 เทคนิคการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning, RL) ถูกออกแบบให้คำนวณค่าการระบายน้ำที่เหมาะสมในสถานการณ์ต่าง ๆ โดยแบบจำลองพิจารณามิโงค์ประกอบของ Environment คือ ปริมาณเก็บน้ำในอ่างเก็บน้ำ ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ และปริมาณความต้องการน้ำ แบบจำลองมี Action เป็นปริมาณน้ำที่ต้องระบายออกจากอ่างเก็บน้ำในแต่ละช่วงเวลา ผลการจำลองโดยใช้หลักการระบายน้ำแบบลองผิดลองถูกพบว่า แบบจำลองสามารถระบายน้ำในรูปแบบต่าง ๆ ได้ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการระบายน้ำจริงพบว่า ผลลัพธ์จากแบบจำลอง RL ยังมีความคลาดเคลื่อนสูง

5.1.5 ผลการจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2561 ด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด (Constraint Programming Model) ในกรณีที่กำหนดสมการข้อจำกัดเป็นลักษณะรายปีโดยอาศัยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายตามแผนการจัดสรรน้ำของ กฟผ. พบว่า สามารถลดปริมาณการระบายน้ำเฉลี่ยได้ถึง 49.81 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งหมายถึงความสามารถในการเก็บกักน้ำในอ่างเก็บน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดในกรณีนี้ยังสามารถลดปริมาณการระบายในช่วงฤดูแล้งได้สูงถึง 333.69 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือลดลงคิดเป็น 9.33% แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดนี้ยังสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำได้ถึงประมาณ 955.84 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี โดยสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในช่วงฤดูแล้งได้เพิ่มขึ้น 10.36% เมื่อเปรียบเทียบกับผลการระบายน้ำจริงที่ผ่านมา ยิ่งไปกว่านั้น แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดยังสามารถเพิ่มการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำได้สูงขึ้นถึง 90.89 กิกะวัตต์-ชั่วโมงต่อปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำในช่วงฤดูฝนที่เพิ่มสูงขึ้น

5.1.6 จุดแข็งที่สำคัญของแบบจำลองฟuzzyคือ ฟuzzyลอจิก หรือ FL อาศัยการสร้างแบบจำลองจากฐานความรู้ของระบบโดยให้เหตุและผลเป็นหลัก ทำให้การพัฒนาแบบจำลองไม่ซับซ้อน ไม่เหมือนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ ที่ต้องใช้ข้อมูลนำเข้าและประมวลผลจำนวนมาก ในขณะที่แบบจำลองการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยนิวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้ หรือ ANFIS มีโครงสร้างแบบจำลองคล้าย FL แต่กระบวนการได้มาซึ่งโครงสร้างแตกต่างกัน กล่าวคือ ANFIS จะสร้างแบบจำลองโดยอาศัยข้อมูลของปัจจัยที่ใช้ในการตัดสินใจในอดีตมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์เพื่อกำหนดเป็น FL แบบอัตโนมัติ (ซึ่งต่างจาก FL ที่สร้างจากประสบการณ์ของผู้พัฒนาแบบจำลองเอง) ข้อดีคือ จะได้โครงสร้างของ Fuzzy แบบอัตโนมัติที่ง่ายและรวดเร็ว แต่ความยากอยู่ที่การเลือกปัจจัยของระบบที่ต้องมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับระบบจริง ยิ่งไปกว่านั้นข้อมูลที่นำมาใช้ในการเรียนรู้ต้องมีมากพอ (จำนวนและช่วงความยาวข้อมูล) และควรครอบคลุมสถานการณ์น้ำวิกฤตต่าง ๆ เพื่อให้แบบจำลองสร้างกระบวนการเรียนรู้เองโดยอัตโนมัติ

5.1.7 จุดแข็งของการพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดด้วยภาษา MiniZinc คือ MiniZinc เป็นภาษาในการเขียนโปรแกรมระดับกลาง ซึ่งหมายถึงทำให้ผู้พัฒนาสามารถพัฒนาแบบจำลองเชิงข้อจำกัดได้ง่ายขึ้น MiniZinc มีส่วนเชื่อมต่อที่สามารถใช้งานกับ Constraint Solver ได้หลายแบบ หรือที่เรียกว่า Constraint Independent จากจุดแข็งนี้ทำให้ผู้ใช้งานสามารถเลือก Constraint Solver ที่เหมาะกับแบบจำลองเชิงข้อจำกัดที่ถูกพัฒนาขึ้น การแก้ปัญหาแบบจำลองเชิงข้อจำกัดมีความเร็วสูง จุดแข็งอีกอย่างหนึ่งคือ การจำลองระบบการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดที่ถูกพัฒนาขึ้นทำให้ผลการระบายน้ำที่ได้มานั้นจะเป็นค่าที่ดีที่สุดเสมอ หรือ Optimal Water Release นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาร่วมกับโปรแกรมภาษาอื่น ๆ เช่น Java, Python และ C# เป็นต้น ได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม จุดอ่อนของ MiniZinc คือจะไม่สนับสนุนแบบจำลองเชิงข้อจำกัดแบบที่มีหลายสมการวัตถุประสงค์โดยตรง อย่างไรก็ตาม ผู้พัฒนาสามารถใช้ทฤษฎีบทมาช่วยได้ ตัว MiniZinc นั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงแบบจำลองเชิงข้อจำกัดแบบไดนามิกได้ หมายความว่า เมื่อแบบจำลองถูกสร้างแล้วจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงระหว่างการแก้เพื่อหาค่าที่ดีที่สุด ดังนั้น ผู้พัฒนาต้องวิเคราะห์ข้อจำกัดให้เสร็จก่อนที่จะสร้างแบบจำลองเชิงข้อจำกัด และผู้พัฒนาจำเป็นต้องเรียนรู้ภาษาใหม่ร่วมด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้ออกแบบวิธีการวิจัยดังนี้ (1) เริ่มวิเคราะห์หาข้อจำกัดที่เหมาะสมกับสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อระบบเขื่อนและการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำ (2) เมื่อได้ข้อจำกัดที่เหมาะสมแล้วก็นำมาสร้างแบบจำลองเชิงข้อจำกัดในภาษา MiniZinc (3) นำเข้าข้อมูลอุทกวิทยาอ่างเก็บน้ำที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองเชิงข้อจำกัดเพื่อหาค่าการระบายน้ำที่ดีที่สุด (4) เปรียบเทียบค่าปริมาณการระบายน้ำที่ดีที่สุดจากแบบจำลองกับปริมาณการระบายน้ำจริง (5) หากยังไม่ได้ค่าปริมาณการระบายน้ำที่ดีขึ้น คณะผู้วิจัยจะต้องวิเคราะห์ข้อจำกัดเพิ่มเติมของระบบและกลับไปข้อ (2) จนกระทั่งได้ค่าการระบายน้ำที่ดีที่สุด

5.1.8 แบบจำลอง MIKE11-HD สามารถจำลองรูปแบบปริมาณการไหลของน้ำเข้าเขื่อนภูมิพลโดยให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.70 อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง MIKE11-HD ของโครงการยังมีข้อจำกัดในการจำลองปริมาณน้ำไหลในช่วงค่าที่สูง ซึ่งอาจเกิดจากความละเอียดของฝนรายวัน เนื่องจากเหตุการณ์พายุฝนในบางครั้งเกิดขึ้นเป็นรายชั่วโมง

5.1.9 ผลการจำลองผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 ด้วยแบบจำลอง MIKE11-RR และ MIKE11-HD พบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอนาคต (Projected Inflow) ของเขื่อนภูมิพลรายปีมีแนวโน้มลดลง ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำส่วนใหญ่มีแนวโน้มลดลงในช่วงฤดูฝน อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในช่วงฤดูแล้ง

5.1.10 ผลการจำลองผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศภายใต้ภาพฉาย RCP 8.5 ด้วยแบบจำลอง MIKE11-RR และ MIKE11-HD พบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายปีในอนาคตมีแนวโน้มลดลงในช่วงปี พ.ศ. 2564-2583 และ 2604-2626 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2584-2603 และ 2624-2642 นอกจากนี้ ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำมีแนวโน้มสูงขึ้นในฤดูแล้ง ในขณะที่ในช่วงฤดูฝน ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำผันแปรในแต่ละช่วงเวลา

5.1.11 แบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันของเขื่อนภูมิพลด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง และอัลกอริทึม Gradient Boosting/Regression Tree สามารถช่วยในการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลได้ โดยให้ค่าความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ดีสำหรับผลการพยากรณ์ที่เวลา 1 วันล่วงหน้า โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.88 อย่างไรก็ตาม ค่าความแม่นยำของการพยากรณ์ลดลงที่เวลา 7 วัน และ 30 วันล่วงหน้า โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.67 และ 0.58 โดยรูปแบบของโครงสร้างแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันของเขื่อนภูมิพลที่ให้ความแม่นยำที่ดีที่สุดดังนี้คือ

-แบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา 1 วันล่วงหน้า

$$\text{Inflow } t+1 = f(\text{Inflow } t-1, \text{Avg. Inflow } t-3, \text{Avg. Inflow } t-7, \text{Avg. Humidity } t, \text{Avg. Temp } t, \text{Avg. Pressure } t)$$

-แบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา 7 วันล่วงหน้า

$$\text{Inflow } t+7 = f(\text{Inflow } t-1, \text{Avg. Inflow } t-3, \text{Avg. Inflow } t-7, \text{Avg. Humidity } t, \text{Avg. Temp } t, \text{Avg. Pressure } t)$$

-แบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่เวลา 30 วันล่วงหน้า

$$\text{Inflow } t+7 = f(\text{Inflow } t-1, \text{Avg. Inflow } t-1, \text{Avg. Humidity } t, \text{Avg. Temperature } t, \text{Avg. Pressure } t, \text{Avg. Precipitation } t)$$

5.1.12 ผลการทดสอบ CO-RUN พบว่า รูปแบบของโครงสร้างแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันของเขื่อนภูมิพลที่ให้ความแม่นยำดีที่สุดคือ $\text{Inflow } t+1 = f(\text{Inflow } t-1, \text{Inflow } t-3, \text{Inflow } t-7, \text{Avg. Inflow } t-3, \text{Avg. Inflow } t-5, \text{Predicted Precipitation } t+1, \dots, t+180)$ (นำเข้าข้อมูลฝนรูปแบบต่าง ๆ ทั้งข้อมูลฝนตรวจวัดและข้อมูลฝนพยากรณ์ล่วงหน้า 3 วัน 14 วัน และ 6 เดือน)

5.1.13 ผลการทดสอบ CO-RUN พบว่า การอัปเดตข้อมูลนำเข้าด้วยข้อมูลตรวจวัดจริงในแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันของเขื่อนภูมิพลให้ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่มีความแม่นยำสูงขึ้น และการ Retraining แบบจำลองทุก 7 วัน ให้ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่มีความแม่นยำสูงขึ้นทั้งรูปแบบและขนาดของข้อมูลพยากรณ์ นอกจากนี้ ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ที่ Lead Time มากขึ้น ทำให้ผลการพยากรณ์มีความแม่นยำน้อยลงซึ่งเป็นไปตามหลักทฤษฎี โดยค่า Lead Time ที่แนะนำอยู่ในช่วง 1-7 วัน ทำให้ค่า R^2 ลดลงถึง -0.0251

5.1.14 ผลการทดสอบ CO-RUN จากการจำลองระบบเพื่อกำหนดการระบายน้ำล่วงหน้าถึงวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2563 ด้วยแบบจำลองพีซซีและแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดสามารถสรุปประเด็นที่สำคัญในช่วงการทดสอบ CO-RUN ดังนี้

- (1) การปรับเปลี่ยนข้อมูลนำเข้ารูปแบบต่าง ๆ ในช่วงการทดสอบ CO-RUN ระหว่างเดือนกรกฎาคม ถึงกันยายนซึ่งปริมาณน้ำเก็บกักหรือสถานะของน้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลยังอยู่ในเกณฑ์ต่ำ (7.07% ของปริมาณเก็บกักใช้การ เมื่อวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2563) ไม่ส่งผลต่อรูปแบบการระบายน้ำมากนัก ไม่ว่าจะเป็นแบบจำลองพีซซีหรือแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดที่พยายามระบายน้ำด้วยเงื่อนไขการระบายน้ำต่ำสุดซึ่งเป็นข้อกำหนดของแบบจำลอง

ถึงแม้ว่าทั้งสองแบบจำลองจะกำหนดการระบายน้ำตามปัจจัยฤดูกาลและนำข้อมูลปริมาณ Sideflow มาพิจารณาร่วมด้วยก็ตาม ประกอบกับปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำซึ่งทำการพยากรณ์ล่วงหน้ายังอยู่ในเกณฑ์ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยระยะยาวค่อนข้างมาก

- (2) แบบจำลองพีซซีกำหนดแนวทางการระบายน้ำในช่วงฤดูแล้งตามปัจจัยความต้องการน้ำท้ายเขื่อน ในขณะที่ในช่วงฤดูฝนจะพิจารณากำหนดการระบายน้ำตามปัจจัยของสถานะน้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำขณะนั้นและปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำพยากรณ์ล่วงหน้า 3 เดือน ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดในแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด อย่างไรก็ตาม ใด ๆ ก็ดี แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดกำหนดให้มีการระบายน้ำในช่วงฤดูแล้งเพียง 80% ของปริมาณความต้องการน้ำทั้งหมด ซึ่งหักลบ 50% ของปริมาณ Sideflow ทางซ้ายท้ายเขื่อนแล้ว ในทำนองเดียวกัน ในช่วงฤดูฝน กำหนดให้มีการระบายน้ำเท่ากับ 100% ของปริมาณความต้องการน้ำทั้งหมด ซึ่งหักลบ 50% ของปริมาณ Sideflow ทางซ้ายท้ายเขื่อนแล้ว
- (3) การจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำระยะยาว (พ.ศ. 2543–2563) และระยะสั้น (พ.ศ. 2562–2563) ด้วยแบบจำลองพีซซีสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลสูงขึ้น 5,278 และ 413 ล้านลูกบาศก์เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำเก็บกักจริงเมื่อวันที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2563

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การวิเคราะห์ความต้องการน้ำของพืชรายวัน (Daily Crop Water Use) สมดุลการขาดน้ำรายวัน (Daily Deficit Water Balance) และการเจริญเติบโตของพืช (Crop Growth) ด้วย Cloud-Based IrriSAT Application ไม่สามารถดำเนินการได้ เนื่องจากเหตุผลของการขาดข้อมูลภูมิอากาศบนภาคพื้นดินในพื้นที่ศึกษาในระบบฐานข้อมูลของ Cloud-Based IrriSAT Application ทำให้ Cloud-Based IrriSAT Application ไม่สามารถคำนวณค่าความต้องการน้ำของพืชรายวันและทำนายความต้องการน้ำของพืชในอนาคตในพื้นที่ศึกษาได้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ได้อาศัยวิธีการคำนวณ ETo โดยใช้สูตร Penman–Monteith แยกใน Excel Spreadsheet และตรวจสอบความถูกต้องของค่าที่ได้อีกครั้งโดยใช้ ETo Calculator ซึ่งพัฒนาไว้โดย FAO สำหรับนำมาใช้ในการคำนวณค่าปริมาณความต้องการน้ำของพืชในพื้นที่ชลประทาน

5.2.2 ข้อมูลอุทกวิทยาที่รวบรวมได้ ได้แก่ ข้อมูลฝน ข้อมูลน้ำท่า ของแต่ละสถานีในพื้นที่ศึกษาขาดหายไปจำนวนมาก และช่วงความยาวของข้อมูลไม่เท่ากัน ทำให้เป็นอุปสรรคในการนำเข้าข้อมูลในแบบจำลอง MIKE11 ซึ่งแนวทางการแก้ไขในงานวิจัยนี้ได้อาศัยเทคนิคการต่อเติมข้อมูล และคัดเลือกเฉพาะสถานีที่มีความยาวใกล้เคียงกับช่วงการจำลองระบบที่กำหนดไว้ระหว่าง พ.ศ. 2543–2561 มากที่สุด เพื่อนำเข้าในแบบจำลอง MIKE11

5.2.3 ข้อมูลฝนที่รวบรวมได้รายสถานีมีจำกัดในบางพื้นที่ ส่งผลต่อการคำนวณหาปริมาณฝนใช้การในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ ซึ่งแนวทางการแก้ไขในงานวิจัยนี้ได้อาศัยเทคนิคการแปลงข้อมูลรายสถานีเป็นข้อมูลฝนเชิงพื้นที่ก่อนนำมาใช้ในการคำนวณ

5.2.4 การปรับปรุงกระบวนการระบายน้ำที่เหมาะสมอาจจะปรับกระบวนการพัฒนาแบบจำลองเป็นดังนี้ (1) พัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในระยะยาว (รายเดือน 1 ปี) เพื่อคาดการณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและปริมาณการระบายน้ำรายเดือนล่วงหน้าที่เหมาะสม โดยใช้เทคนิคการหาที่เหมาะสม เช่น เทคนิค Genetic Algorithm หรือเทคนิค Swarm Optimization (2) พัฒนาแบบจำลองการระบายน้ำรายสัปดาห์/รายวัน โดยนำค่าที่ได้จากแบบจำลองระยะยาวมาหารูปแบบการระบายน้ำที่เหมาะสม

โดยใช้เทคนิคผสมผสานระหว่างเทคนิคฟuzzyลอจิกกับการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง โดยพัฒนาแบบจำลองฟuzzyลอจิกสำหรับควบคุมการปล่อยน้ำในภาพรวม ส่วนการเรียนรู้แบบเสริมกำลังใช้สำหรับการหารูปแบบการระบายน้ำที่เหมาะสมที่สุด

5.2.5 งานวิจัยนี้เป็นเพียงการตรวจพิสูจน์การทำงานของเครื่องมือบริหารจัดการน้ำด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence-AI) ที่ประยุกต์ใช้กับอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในลักษณะการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเก็บน้ำเดี่ยว (Single Reservoir) เท่านั้น อย่างไรก็ตาม ในสภาพจริงที่การบริหารจัดการน้ำเขื่อนภูมิพลเป็นการปฏิบัติการร่วมกันกับเขื่อนสิริกิติ์และเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนในลักษณะของระบบปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบหลายอ่าง (Multiple Reservoir Operation System) ซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อนทั้งปัจจัยระบบเขื่อน-อ่างเก็บน้ำทางตอนบนและตอนล่างของกลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ ปัจจัยความต้องการน้ำ หรือแม้กระทั่งปัจจัยข้อจำกัดทางด้านท้ายน้ำ ปัจจัยการผันน้ำจากลุ่มน้ำข้างเคียง และเงื่อนไขการระบายน้ำตามสถานการณ์น้ำวิกฤตอื่น ๆ ด้วยเหตุนี้ การศึกษาต่อยอดจากโครงการวิจัยเรื่อง “กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)” คาดว่าจะเป็นส่วนที่สำคัญที่ช่วยผลักดันให้เกิดการพัฒนาเครื่องมือที่ทันสมัยเพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่อย่างเป็นระบบโดยมุ่งหวังที่จะเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักในระยะยาวให้สูงขึ้น 15% จากฐานข้อมูลปัจจุบัน ลดปัญหาอุทกภัยและภัยแล้งบนพื้นฐานของการพิจารณาฐานข้อมูลและข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องให้ครอบคลุมมากที่สุดในพื้นที่ศึกษา

5.2.6 จากผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิผลของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในปัจจุบันแยกตามประเภทปีน้ำด้วยแบบจำลองฟuzzyและแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดซึ่งเป็นเทคนิคปัญญาประดิษฐ์พบว่า ยังจำเป็นต้องปรับเกณฑ์ฟuzzyและปรับรูปแบบสมการข้อจำกัดของแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดให้มีความสอดคล้องกับสถานการณ์น้ำมาก น้ำปกติ และน้ำน้อย และปัจจัยความต้องการน้ำเป้าหมายของพื้นที่ศึกษาให้ได้มากที่สุด เพื่อลดปัญหาการระบายน้ำไม่เพียงพอตามความต้องการน้ำเป้าหมายให้น้อยที่สุด

5.2.7 การพิจารณาปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอนาคต (Projected Inflow) ที่ได้จากผลการจำลองผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และ RCP 8.5 อาจมีแนวโน้มที่จะเกิดสถานการณ์น้ำน้อยจากปัจจัยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอนาคตของเขื่อนภูมิพลรายปีที่มีแนวโน้มลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งแบบจำลอง RCP 4.5 ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ในการกำหนดการระบายน้ำจากเขื่อน ด้วยเหตุนี้ อาจพิจารณาปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอนาคต (Projected Inflow) ที่ได้จากแบบจำลองสโตคาสติกซึ่งอาศัยหลักการสังเคราะห์ข้อมูลจากคุณสมบัติทางสถิติพื้นฐานของข้อมูลในอดีตที่มีลักษณะคงที่ (Stationary Data) และไม่นำอิทธิพลของแนวโน้มข้อมูล (Trend) มาเป็นพารามิเตอร์หลักในการสังเคราะห์ข้อมูลชุดใหม่

5.2.8 หลังจากทราบแนวทางในการเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำด้วยการปรับเปลี่ยนวิธีการปฏิบัติการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์แล้วนั้น ควรนำผลการศึกษาที่ได้ไปศึกษาต่อยอดเพื่อกำหนดแนวทางการวางแผนการเพาะปลูกพืชให้มีความเหมาะสมตามสถานะน้ำต้นทุนทั้งในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้ง โดยมุ่งเน้นให้การใช้น้ำเกิดประโยชน์สูงสุดและมีความคุ้มค่า

เอกสารอ้างอิง

- กรมชลประทาน. (2562). โครงการศึกษาทบทวนการเพิ่มปริมาณน้ำต้นทุนให้เขื่อนภูมิพล. กรุงเทพฯ: บริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด บริษัท เอส เอ็น ที คอนซัลแตนท์ จำกัด และมหาวิทยาลัยนเรศวร.
- กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2559). โครงการศึกษาความมั่นคงของกลุ่มน้ำอย่างยั่งยืนทั้ง 25 กลุ่มน้ำ. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2563ก). ข้อมูลโรงงานแยกตามพื้นที่. สืบค้นจาก <http://www2.diw.go.th/factory/tumbol.asp> วันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ.2563.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2563ข). บัญชีประเภทโรงงานอุตสาหกรรม. สืบค้นจาก <https://www.diw.go.th/hawk/data/factype.php> วันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ.2563.
- การท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย. (2563). สถิตินักท่องเที่ยวรายจังหวัด สืบค้นจาก <https://intelligencecenter.tat.or.th/> วันที่ 30 มิถุนายน 2563.
- การประปานครหลวง. (2563). รายงานประจำปี. สืบค้นจาก https://www.mwa.co.th/main.php?filename=annual_report&t=top วันที่ 16 เมษายน พ.ศ. 2563.
- การประปาส่วนภูมิภาค. (2563). รายงานประจำปี. สืบค้นจาก <https://www.pwa.co.th/contents/about/annualreport> วันที่ 28 เมษายน พ.ศ.2563.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2555). คู่มือการระบายน้ำลุ่มน้ำเจ้าพระยา. กรุงเทพฯ: แผนกวางแผนปฏิบัติการพลังน้ำ ฝ่ายควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2559). การพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ในการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมของกลุ่มน้ำแม่กลอง. กรุงเทพฯ: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- ควรรคิด รัตน์รักษ์. (2556). การพัฒนาโปรแกรม PHABSIM โดยใช้ Object Oriented Language (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ฉลอง เกิดพิทักษ์. (2553). วิฤตน้ำในอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล-เขื่อนสิริกิติ์กับการตรวจสอบและศึกษาเพื่อแก้ปัญหา. วิศวกรรมสาร, 63(4).
- นุชนารถ ศรีวงศ์ตานนท์. (2540). การศึกษาสภาวะน้ำท่วมของลุ่มน้ำปิงตอนบนโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE 11 (ตอนที่ 1). วิศวกรรมสาร มก., 12(32), 74-87.
- ฝ่ายควบคุมระบบกำลังไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2553). คู่มือบริหารการระบายน้ำลุ่มน้ำเจ้าพระยา. นนทบุรี: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- ภาวดี ทองอุไทย. (2550). เอกสารประกอบคำบรรยายเศรษฐศาสตร์ทรัพยากรมนุษย์เบื้องต้น ส่วนที่ 2 ประชากร และการพัฒนา. กรุงเทพฯ: คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- วนิดา พงษ์ศักดิ์ชาติ. (2559). การใช้โปรแกรม R เพื่อการวิจัย. ชลบุรี: ภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- วรารุช วุฒิวณิชย์, ทองเปลว กองจันทร์, วัชระ เสือดี. (2550). อุทกวิทยาทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทาน ในพระบรมราชูปถัมภ์ กรมชลประทาน.

- ศรินทร์ทิพย์ พวงเพ็ชร์. (2534). การเพิ่มผลตอบแทนจากการเพิ่มระดับน้ำอ่างเก็บน้ำภูมิพล (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศูนย์วิจัยด้านการตลาดการท่องเที่ยว การท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย. (2563). คาดการณ์แนวโน้มสถานการณ์ท่องเที่ยว. สืบค้นจาก <https://intelligencecenter.tat.or.th/articles/27846> วันที่ 6 กรกฎาคม 2563.
- ศูนย์วิจัยวิศวกรรมน้ำและโครงสร้างพื้นฐาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. (2561). คู่มือการอบรมเชิงปฏิบัติการโครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรในการใช้แบบจำลองสำหรับการติดตามและประเมินสถานการณ์มลพิษในแหล่งน้ำธรรมชาติ, สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาค, สำนักงานปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน). (2555). การดำเนินการด้านการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลโครงการพัฒนาระบบคลังข้อมูล 25 กลุ่มน้ำ และแบบจำลองน้ำท่วมน้ำแล้ง: กลุ่มน้ำเจ้าพระยา. กรุงเทพฯ: สสนก.
- สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. (2554). รายงานการสังเคราะห์และประมวลสถานภาพองค์ความรู้ด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของไทย ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ศูนย์ประสานงานและพัฒนางานวิจัยด้านโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- สำนักงานสถิติแห่งชาติ. (2562). สืบค้น <http://statbbi.nso.go.th/staticreport/page/sector/th/01.aspx> เมื่อ 18 ตุลาคม 2562.
- สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2562ก). รายงานการคาดประมาณประชากรของประเทศไทย พ.ศ. 2553–2583 (ฉบับปรับปรุง) พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ.
- สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2562ข). รายงานการศึกษาข้อสมมติเพื่อใช้ในการคาดประมาณประชากรของประเทศไทย พ.ศ. 2553–2583 (ฉบับปรับปรุง) พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ.
- สุชีพ มีถม. (2547). เขื่อนภูมิพล. สืบค้น <http://www.bhumiboldam.egat.com/index.php/2014-10-10-05-07-47/history> 11 มิถุนายน 2562.
- Alkaeed, O., Flores, C., Jinno, K., Tsutsumi, A. (2006). Comparison of several reference evapotranspiration methods for Itoshima Peninsula area, Fukuoka, Japan. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, 66(1), 1–13.
- 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. doi:10.1007/s00704-017-2292-5.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smiyh, M. (1998). *Crop Evapotranspiration, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*. Rome, Italy.
- Anand, K., Jayakumar, C., Muthu, M., & Amirneni, S. (2015, 10–12 July 2015). Automatic drip irrigation system using fuzzy logic and mobile technology. Paper presented at the 2015 IEEE Technological Innovation in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR).
- Anjaneya Prasad, M., & Mohan, S. (2005). *Fuzzy Logic Model for Multi-Purpose Multi-Reservoir System*, Boston, MA.

- Archibald, T.W., & Marshall, S.E. (2018). Review of mathematical programming applications in water resource management under uncertainty. *Environmental Modeling & Assessment*, 23(6), 753–777.
- 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.011>.
- Bai, Y., Xie, J., Wang, X., & Li, C. (2016). Model fusion approach for monthly reservoir inflow forecasting. *Journal of Hydroinformatics*, 18(4), 634–650. doi:10.2166/hydro.2016.141.
- 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.
- Bhattacharjee, A., Jha, R. (2014). Environmental flows state-of-the-art with details assessment of a typical River basin of India. *International Conference on Innovative Technologies and Management for Water Security*, 1–8.
- 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.
- Caissie, D. & El-Jabi, N. (1995). Comparison and regionalization of hydrologically based instreamflow techniques in Atlantic Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 22, 235–246.
- Cai, X., McKinney, D.C., & Lasdon, L.S. (2002). A framework for sustainability analysis in water resources management and application to the Syr Darya Basin. *Water Resour. Res.*, 38 (6), 1–14.
- Campolo, M., Andreussi, P., & Soldati, A. (1999). River flood forecasting with a neural network model. *Water Resources Research*. 35(4), 1191–1197.
- Castelletti, A., Corani, G., Rizzolli, A., Soncinie-Sessa, R., & Weber, E. (2002). Reinforcement learning in the operational management of a water system. Paper presented at the IFAC workshop on modeling and control in environmental issues.
- Castelletti, A., Galelli, S., Restelli, M., & Soncini-Sessa, R. (2010). Tree-based reinforcement learning for optimal water reservoir operation. *Water Resources Research*, 46(9). doi:10.1029/2009wr008898.
- Castelletti, A., Pianosi, F., & Restelli, M. (2013). A multiobjective reinforcement learning approach to water resources systems operation: Pareto frontier approximation in a single run. *Water Resources Research*, 49(6), 3476–3486.
- 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. doi:10.1002/hyp.5674.
- 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.
- 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.
- Donpapob, M. (2016). *Impact of climate change on reservoir water storage and operation of large scale dams in Thailand (Doctoral Dissertation)*. Kyoto University, Japan. <https://doi.org/10.14989/doctor.k19976>
- D’Urso, G., Vuolo, F. & De Michele, C. (2006). Operational use of satellite remote sensing data for real-time application: Evaluation of the DEMETER project in the Italian study area, *Geophys. Res. Abstr*, 58, 09515.
- D’Urso, G., D’Antonio, A., Vuolo, F., & De Michele, C. (2008). The Irrigation Advisory Plan of Campania Region: from research to operational support for the water Directive in Agriculture; Options méditerranéennes, series A Mediterranean Seminars 2008, number 84, Ciheam.
- D’Urso, G. (2010). Current status and perspectives for the estimation of crop water requirements from Earth Observation. *Italian Journal of Agronomy*, 5 (2), 107–120.
- D’Urso, G., Richter, K., Calera, A. Osann, M.A., Escadafal, R., & Garatuza-Pajan, J. (2010). Earth Observation products for operational irrigation management in the context of the PLEIADeS project. *Agricultural water management*, 98(2), 271–282.
- Ehsani, N., Vörösmarty, C.J., Fekete, B.M., & Stakhiv, E.Z. (2017). Reservoir operations under climate change: Storage options to mitigate risk. *Journal of Hydrology*, 555, 435–446.
- 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.

- Fontane, D. (2001). Reservoir simulation notes : CE546 water resources systems analysis handout. Colorado: Department of Civil Engineering, Colorado State University.
- Ghashghaie, M., & Nozari, H. (2018). Effect of dam construction on Lake Urmia: time series analysis of water level via ARIMA. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 20(7), 1541–1553.
- Giuliani, M., Li, Y., Cominola, A., Denaro, S., Mason, E., & Castelletti, A. (2016). A Matlab toolbox for designing Multi-Objective Optimal Operations of water reservoir systems. *Environmental Modelling & Software*, 85, 293–298.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.08.015>
- Hajgató, G., Paál, G., & Gyires-Tóth, B. (2020). Deep Reinforcement Learning for Real-Time Optimization of Pumps in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(11), 04020079. doi:doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001287.
- Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1, 96–99.
- Hashimoto, T. (1982). Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resour. Res.*, 18 (1), 14–20.
- 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.
- Housh, M., Ostfeld, A., & Shamir, U. (2013). Limited multi-stage stochastic programming for managing water supply systems. *Environmental modelling & software*, 41, 53–64.
<http://www.komchadluek.net/news/lcal/193458>.
- Hunukumbura, P.B., & Tachikawa, Y. (2012). River discharge projection under climate change in the Chao Phraya River Basins, Thailand, using the MRI-GCM3.1S dataset. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90A, 137–150.
- 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.

- Jamshid Mousavi, S., Anzab, N.R., Asl-Rousta, B., & Kim, J.H. (2017). Multi-Objective Optimization-Simulation for Reliability-Based Inter-Basin Water Allocation. *Water Resources Management*, 31(11), 3445–3464. doi:10.1007/s11269-017-1678-6.
- Jang, J.S.R. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23(3), 665–685.
- Joshi, G. S., & Sharma, V. (2017). Simulation Based Fuzzy Model for Operation of a Reservoir Project A Case Study of Sukhi Dam, Gujarat, India. In *World Environmental and Water Resources Congress 2017* (pp. 328–339).
- Hornbuckle, J., Montgomery, J., & Vlesshouwer, 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.
- Kalbali, 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., & Wadatkar, 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.
- Kindler, J. (1992). Rationalizing water requirements with aid of fuzzy allocation model. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 118(3), 308–323. doi:doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(1992)118:3(308).
- Kitpaisalsakul, T. (2018). Impacts of climate change on irrigation water management by the Bhumibol dam in Thailand. *Journal of Thai Interdisciplinary Research*, 13(4), 49–54.
- Kumari, S., & Mujumdar, P. P. (2017). Fuzzy set-based system performance evaluation of an irrigation reservoir system. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(5). doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001155.
- Labadie, J. W. (2004). Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(2), 93–111.
- Lee, J.H., & Labadie, J.W. (2007). Stochastic optimization of multireservoir systems via reinforcement learning. *Water Resources Research*, 43(11).
- Lian, Y., Chan, I-Chi., Singh, J., Demissie, M., Knapp, V., & Xie, H. (2007). Coupling of hydrologic and hydraulic models for the Illinois River Basin. *Journal of Hydrology*, 344, 210–222.
- referred to Motovilov, Y.G., Gottschalk, L., Engeland, K. and A.Rohde (1999), Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agriculture and Forest Meteorology*, 98–99, 257–277.

- Li, H., Bao, S., & Xuan, Y. (2018). Parameter selection for phase space reconstruction in hydrological series and rationality analysis of its chaotic characteristics. *EPiC Series in Engineering*, 3, 1171–1183.
- Limsakul, A., & Singhruck, P. (2016). Long-term trends and variability of total and extreme precipitation in Thailand. *Atmospheric Research*, 169, 301–317.
- Li Wen-wu., Daniel E.M., Zhang X., & You, W. (2018). Model dependent reinforcement learning algorithm for reservoir operation stochastic optimization. *International Journal of Hydrology*, 2(5), 146–150.
- 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.
- Maga Kim, J.Y.C. (2000). *Development of Reservoir Operation Model using Reinforcement Learning*.
- 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*.
- Mann, J.L. (2006). *Instream Flow Methodologies: An Evaluation of the Tennant method for Higher Gradient Streams in the National Forest System Lands in the Western U.S.* Fort Collins: Colorado State University.
- McMahon, T., Adeloje, A.J., & Zhou, S. (2006). Understanding performance measures of reservoirs. *J. Hydrol.*, 324(1–4), 359–382.
- Mehta, R., & Jain, S.K. (2009). Optimal operation of a multi-purpose reservoir using neuro-fuzzy technique. *Water Resources Management*, 23(3), 509–529. doi:10.1007/s11269-008-9286-0.
- 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.
- Moghaddam, K.S., & DePuy, G.W. (2011). Farm management optimization using chance constrained programming method. *Computers and electronics in agriculture*, 77(2), 229–237.
- 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.
- Monteith, J.L. (1965). Evaporation and environment. pp. 205–234. In G.E. Fogg (ed.)
- Montgomery, J. (2017). Update on IrrisAT app functionality. *The Australian Cottongrower*, February–March 2017. Available at

- <https://www.cottongrower.com.au/images/articles/c122a3ca300f331ed1a13deef8e7cc4.pdf> on 19 August 2020.
- Montgomery, J., Hornbuckle, J., Hume, I., & Vleeshouwer, J. (2015). IrrisAT-weather based scheduling and benchmarking technology. Proceedings of the 17th ASA Conference, 20-24 September 2015, Hobart, Australia.
- Neilsen, A.H. (1999). Parametric and non-parametric system modelling (Ph.D. Thesis). Denmark: Technical University of Denmark.
- 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.
- Pamungkas, A.P., Hatou, K., & Morimoto, T. (2013). Modeling the Evapotranspiration Inside the Greenhouse Systems by Using MATLAB Simulink. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(4), 33-37. doi:<https://doi.org/10.3182/20130327-3-JP-3017.00010>.
- Paradis, E. (2015). R for beginners. Institut des Sciences de l' _ Evolution, Universit_e Montpellier, France.
- Pastor, A.V., Ludwig, F., Biemans H., Hoff, H., & Kabat, P. (2014). Accounting for environmental flow requirements in global water assessments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 5041-5059.
- Pastor, A.V., Ludwig, F., Biemans H., Hoff, H., & Kabat, P. (2014). Accounting for environmental flow requirements in global water assessments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 5041-5059.
- 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. doi:10.1007/s11269-008-9295-z.
- Prékopa, A. (2013). *Stochastic programming*. Springer Science & Business Media, 324.
- Pyrce, R.S. (2004). *Hydrological low flow indices and their uses*. Ontario: Watershed Science Centre.
- 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.
- Rendl, A., Tack, G., & Stuckey, P.J. (2014). Stochastic minizinc. *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming* (pp. 636-645). Springer, Cham.
- Rieker, J.D., & Labadie, J.W. (2012). An intelligent agent for optimal river-reservoir system management. *Water Resources Research*, 48(9). doi:10.1029/2012wr011958.

- Romanowicz, R. (1997). A MATLAB implementation of TOPMODEL. *Hydrological processes*, 11(9), 1115–1129. doi:10.1002/(SICI)1099-1085(199707)11:9<1115::AID-HYP548>3.0.CO;2-T.
- Rossi, F., Van Beek, P., & Walsh, T. (2006). *Handbook of constraint programming*. New York: Elsevier Science.
- Russell, S.O., & Campbell, P.F. (1996). Reservoir Operating Rules with Fuzzy Programming. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(3), 165–170. doi:doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:3(165).
- ShahiriParsa, A., Noori, M., Heydari, M., Othman, F., & Qaderi, K. (2015). Introduction to linear programming as a popular tool in optimal reservoir operation, a review. *Advances in Environmental Biology*, 9(3), 906–917.
- Srdjevic, B., Medeiros, Y.D.P., & Porto, R.L.L. (2005). Data envelopment analysis of reservoir system performance. *Comput. Oper. Res.*, 32, 3209–3226.
- Stuckey, P.J., Kim, M., Tack, G. (2018). *MiniZinc Handbook* (Release 2.2.1).
- Sutton, R.S., & Barto, A.G. (2018). *Reinforcement learning: An introduction*. US: MIT Press.
- Symphorian, G.R., Madamombe, E., & Zaag P. (2003). Dam operation for environmental water releases; the case of Osborne dam, Save catchment, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28: 985–993.
- 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. doi:https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.09.048.
- Tennant, D. (1976). Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Instream Flow Needs*, 359–373.
- Thornthwaite, C.W. (1948). An approach towards a rational classification of climate. *Geographical. Review*, 38, 55–94.
- Touati, F., Al-Hitmi, M., Benhmed, K., & Tabish, R. (2013). A fuzzy logic based irrigation system enhanced with wireless data logging applied to the state of Qatar. *Computers and Electronics in Agriculture*, 98, 233–241. doi:https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.08.018.
- U.S. Geological Survey. (2001). *PHABSIM for Windows*. US: Geological Survey.
- Valizadeh, N., & El-Shafie, A. (2013). Forecasting the level of reservoirs using multiple input fuzzification in ANFIS. *Water Resource Management*, 27(33), 3319–3331.
- 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.
- Vijayalaksmi, D.P., & Babu, K.S.J. (2015). Water supply system demand forecasting using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Aquatic Procedia*, 4, 950–956.

- Vleeshouwer, J., Nicholas, J.C., & Hornbuckle, J. (2015). A cotton irrigator's decision support system and benchmarking tool using national, regional and local data. *International Symposium on Environmental Software Systems ISESS 2015*, 187-195. Available at https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-15994-2_18 on 19 August 2020.
- Vonk, E. (2013). Dam reoperation as an adaptation strategy for shifting patterns of water supply and demand (Master Thesis). University of Twente, Enschede.
- Wallot, S., & Mønster, D. (2018). Calculation of Average Mutual Information (AMI) and False-Nearest Neighbors (FNN) for the Estimation of Embedding Parameters of Multidimensional Time Series in Matlab. *Frontiers in psychology*, 9.
- Wang, W.C., Chau, K.W., Xu, D.M., & Chen, X.Y. (2015). Improving forecasting accuracy of annual runoff time series using ARIMA based on EEMD decomposition. *Water Resources Management*, 29(8), 2655-2675.
- 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. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/w10081031>.
- 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.
- 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.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).
- Zadeh, L.A. (1990). Fuzzy sets and systems. *International Journal of General Systems*, 17(2-3), 129-138. doi:10.1080/03081079008935104.
- Zarghami, M. (2018). Short term management of hydro-power system using reinforcement learning. *École de technologie supérieure*.

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
ผลการทดสอบ CO-RUN ในการบริหารจัดการน้ำเขื่อนภูมิพล
1/7/2020-30/9/2020

ตามที่ได้กล่าวรายละเอียดเบื้องต้นในบทที่ 1 ถึงการเชื่อมโยงข้อมูลนำเข้าและข้อมูลผลลัพธ์จากชุดโครงการวิจัยในแผนงานที่ 3 เรื่อง “การพัฒนาเทคโนโลยีสนับสนุนเพื่อการพัฒนาาระบบอัจฉริยะ” ภายใต้แผนงานยุทธศาสตร์ของโครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม การบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562 สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) นั้น โครงการวิจัยเรื่อง “โครงการกลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)” ได้ทำการรวบรวมข้อมูลนำเข้าจากโครงการวิจัยกลุ่มงานที่ 1, 2 และ 3 มาทำการวิเคราะห์และกำหนดเป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบใหม่ที่น่าเสนอในงานวิจัยนี้ใน 2 แนวทางหลักคือ (1) แบบจำลองฟัซซี (Conventional Fuzzy Model) และ (2) แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด (Constraint Programming) เพื่อกำหนดแนวทางการระบายน้ำล้นหน้าทุกสัปดาห์ในช่วงระหว่างที่ทำการทดสอบ CO-RUN ระหว่างวันที่ 1 กรกฎาคม พ.ศ. 2563 ถึงวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2563 รวมทั้งยังได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลที่พัฒนาขึ้นโดยอาศัยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง (Reservoir Forecasting Model Using Machine Learning) ที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ไปพร้อมกับการติดตามสถานการณ์น้ำประจำวัน เพื่อพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำล้นหน้าทุกสัปดาห์ในช่วงระหว่างทำการทดสอบ CO-RUN ซึ่งการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์กำลังอยู่ในสถานการณ์ที่ต้องเผชิญทั้งพายุซินลากูและสถานการณ์ภัยแล้งในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ที่ปริมาณน้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ยังมีจำกัด ด้วยเหตุนี้ ผลการทดสอบ CO-RUN จึงเป็นส่วนที่สำคัญที่ช่วยยืนยันถึงการบูรณาการงานวิจัยและการนำผลลัพธ์จากงานวิจัยไปสู่การใช้งานจริง หรือช่วยสนับสนุนงานของกรมชลประทาน และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำของประเทศให้เกิดความยั่งยืนในระยะยาว

A.1 สถานการณ์น้ำในเขื่อนภูมิพล

A.1.1 สถานการณ์น้ำในเขื่อนภูมิพล

สถานการณ์น้ำในเขื่อนภูมิพลในช่วงที่ทำการทดสอบ CO-RUN (ถึงวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2563) แสดงในตารางผนวกที่ A-1 ปริมาณการระบายน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2562-2563 แสดงในรูปผนวกที่ A-1 และแผนการจัดสรรน้ำและปริมาณการระบายน้ำเขื่อนภูมิพลปี พ.ศ. 2562 และ พ.ศ. 2563 แสดงในรูปผนวกที่ A-2 และรูปผนวกที่ A-3 จากข้อมูลดังกล่าวสามารถสรุปประเด็นที่สำคัญได้ดังนี้

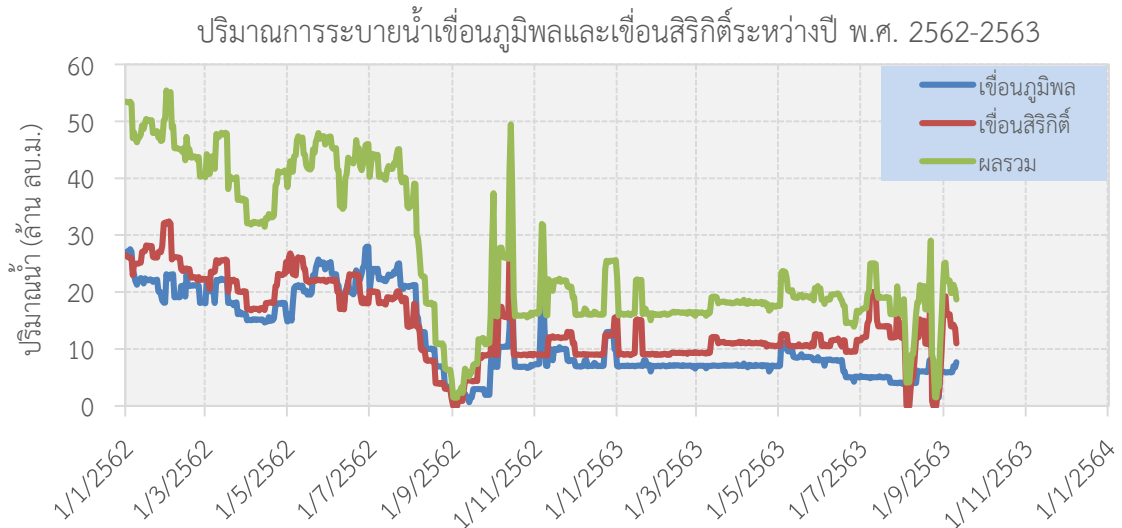
- (1) ปริมาณน้ำใช้การของเขื่อนภูมิพลเมื่อวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2563 เท่ากับ 683.44 ล้านลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็น 7.07% ของปริมาณเก็บกักใช้การ
- (2) ปริมาณน้ำใช้การของเขื่อนสิริกิติ์เมื่อวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2563 เท่ากับ 2,125.34 ล้านลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็น 31.91% ของปริมาณเก็บกักใช้การ
- (3) ปริมาณการระบายน้ำเขื่อนภูมิพลน้อยกว่าเขื่อนสิริกิติ์ตั้งแต่ต้นปี พ.ศ. 2563 ดังแสดงในรูปผนวกที่ A-1
- (4) การระบายน้ำจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์มีแนวโน้มลดลงตั้งแต่ต้นปี พ.ศ. 2562 เป็นต้นมา
- (5) ปริมาณการระบายน้ำจริงของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์สูงกว่าแผนการจัดสรรน้ำ +92.14 ล้านลูกบาศก์เมตร ในปี พ.ศ. 2563 (มกราคม-กันยายน) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในเดือนสิงหาคมมีการระบายน้ำจริงสูงกว่าแผนการจัดสรรน้ำ +166.16 ล้านลูกบาศก์เมตร อย่างไรก็ตาม ปริมาณการระบายน้ำจริงของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ต่ำกว่าแผนการจัดสรรน้ำในช่วงตั้งแต่เดือนเมษายนถึงกรกฎาคม

- (6) ปริมาณน้ำไหลเข้าสะสมเขื่อนภูมิพล 964.67 ล้านลูกบาศก์เมตร และเขื่อนสิริกิติ์ 3,000.37 ล้านลูกบาศก์เมตร ในปี พ.ศ. 2563 ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงวันที่ 2 กันยายน ซึ่งต่ำกว่าปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเฉลี่ยรายปีของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ที่มีค่าเท่ากับ 5,637 และ 5,678 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ค่อนข้างมาก

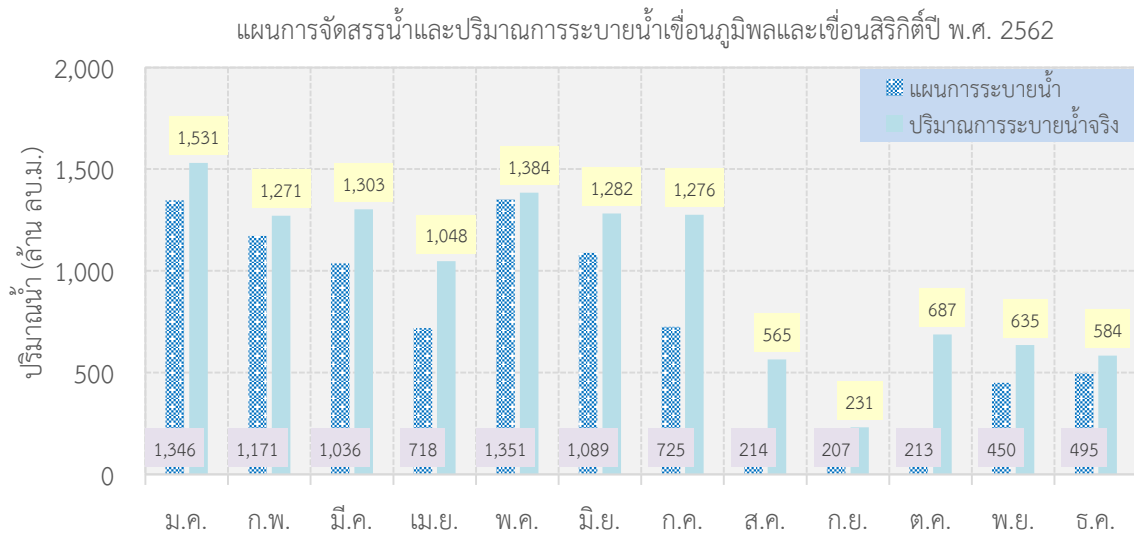
จากข้อมูลสถานการณ์น้ำของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ข้างต้นบ่งชี้ให้เห็นว่าปริมาณน้ำเก็บกักของทั้งสองอ่างมีค่อนข้างจำกัดเพียง 3,965 ล้านลูกบาศก์เมตร เมื่อวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2563 ซึ่งคาดว่าจะส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำต้นทุนที่จะใช้ในช่วงการเพาะปลูกฤดูแล้ง 2563/2564 อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ หากไม่มีน้ำมาเติมในอ่างเก็บน้ำในเดือนตุลาคมนี้

ตารางผนวกที่ A-1 สถานการณ์น้ำในเขื่อนภูมิพลเมื่อวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2563

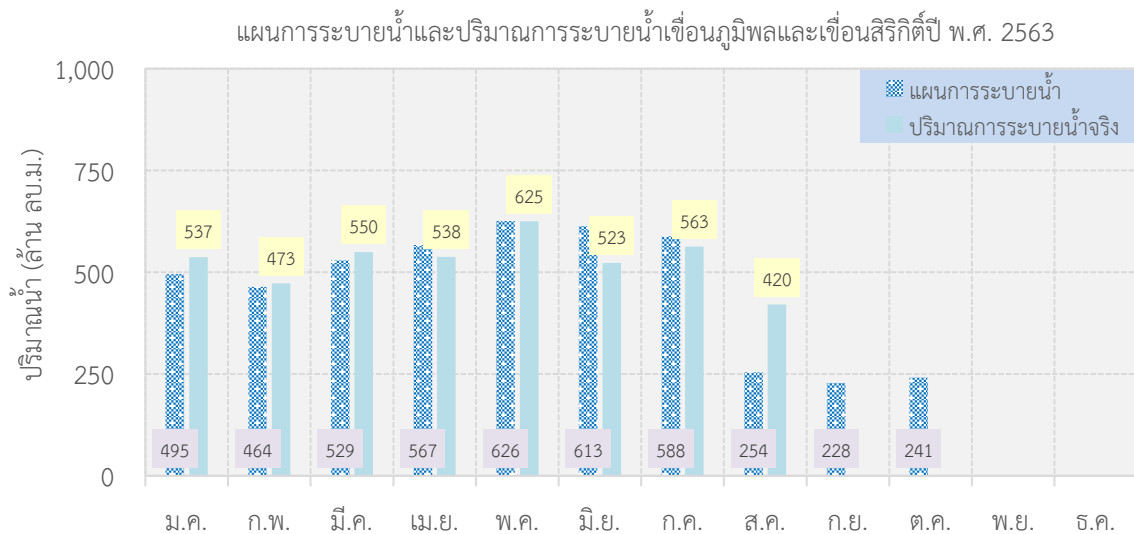
เดือน	ปี พ.ศ. 2563 (ล้าน ลบ.ม.)		ผลต่างการระบายน้ำ	ปริมาณการระบายน้ำตามแผนการจัดสรรน้ำของกรมชลประทาน (ล้าน ลบ.ม.)		
	แผนการระบายน้ำ	การปฏิบัติการจริง		BB	SK	รวม
ม.ค.	495	537	42.24	2561/2562	ฤดูแล้ง	6,500
ก.พ.	464	473	8.57	2562	ฤดูฝน	3,800
มี.ค.	529	550	20.77	2562/2563	ฤดูแล้ง	3,000
เม.ษ.	567	538	-29.20	2563	ฤดูฝน	2,550
พ.ค.	626	625	-0.73	ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำสะสมถึงวันที่ 2 ก.ย. 2563 (ล้าน ลบ.ม.)		
มิ.ย.	613	523	-90.33			
ก.ค.	588	563	-25.34	BB	964.67	
ส.ค.	254	420	166.16	SK	3,000.37	
ก.ย.	228	NA	NA	ปริมาณน้ำเก็บกักเมื่อวันที่ 2 ก.ย. 2563 (ล้าน ลบ.ม.)		
ต.ค.	241	NA	NA			
พ.ย.	NA	NA	NA	BB	4,483.44	
ธ.ค.	NA	NA	NA	SK	4,975.34	
รวม	4,605	4,228	-	ปริมาณน้ำใช้การเมื่อวันที่ 2 ก.ย. 2563 (%-ล้าน ลบ.ม.)		
	ม.ค.-ก.ค.					
	3,882	3,808	-74.02	BB	7.07%	683.44
	ม.ค.-ส.ค.					
	4,136	4,228	92.14	SK	31.91%	2,125.34
				ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเมื่อวันที่ 2 ก.ย. 2563 (ล้าน ลบ.ม.)		
				BB	7.69	
				SK	64.55	
				ปริมาณการระบายน้ำเมื่อวันที่ 2 ก.ย. 2563 (ล้าน ลบ.ม.)		
				BB	6.02	
				SK	10.99	



รูปผนวกที่ A-1 ปริมาณการระบายน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ระหว่างปี พ.ศ. 2562-2563



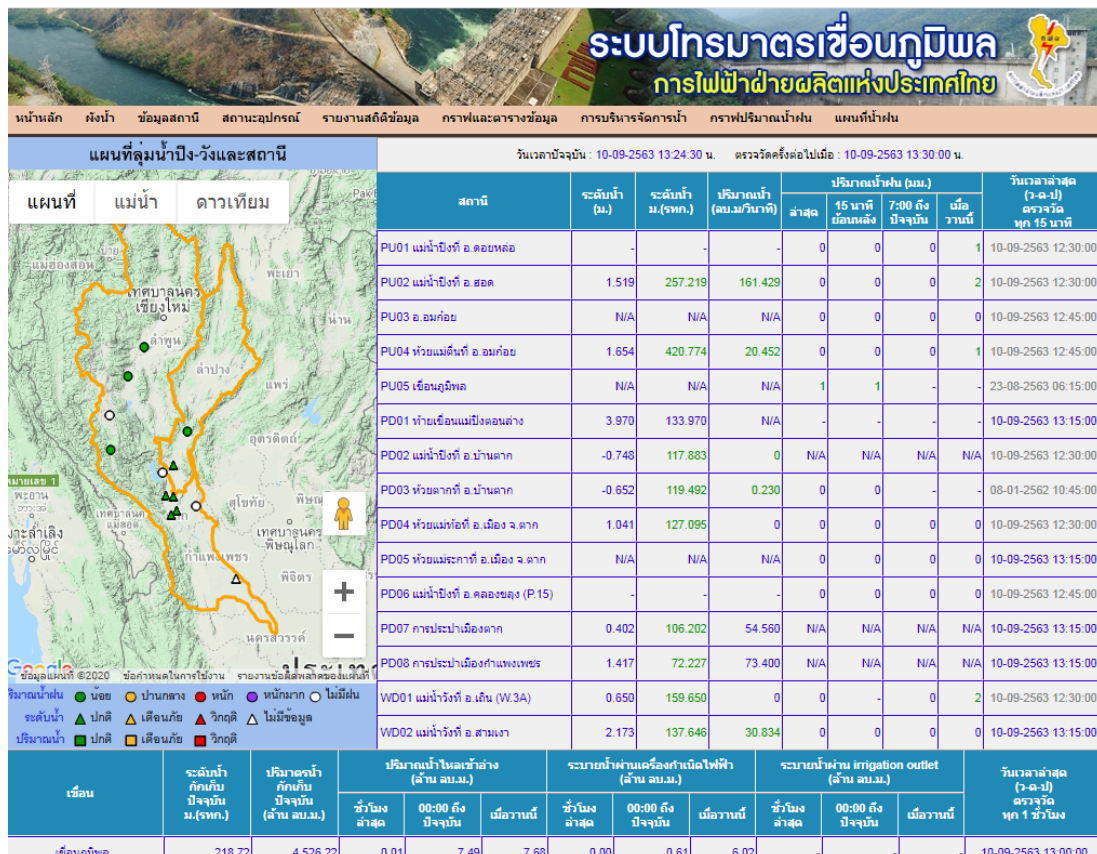
รูปผนวกที่ A-2 แผนการจัดสรรน้ำและปริมาณการระบายน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ปี พ.ศ. 2562



รูปผนวกที่ A-3 แผนการระบายน้ำและปริมาณการระบายน้ำเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ปี พ.ศ. 2563

A.1.2 สถานการณ์ฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบน

สถานการณ์ฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนในอดีตถึงปัจจุบันที่ทำการ CO-RUN โดยทำการวิเคราะห์จากข้อมูลสถานีโทรมาตรตรวจวัดฝนที่รวบรวมมาเพียง 3 สถานีหลักของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งตั้งอยู่บริเวณเหนือเขื่อนภูมิพลได้แก่ (1) สถานี PU01 แม่น้ำปิง อ.ตอยหล่อ (2) สถานี PU02 แม่น้ำปิง อ.ฮอด และ (3) สถานี PU03 อ.อมก๋อย ดังแสดงในรูปผนวกที่ A-4 โดยค่าสถิติข้อมูลฝนจากสถานีโทรมาตรในปี พ.ศ. 2562-2563 แสดงในตารางผนวกที่ A-2



รูปผนวกที่ A-4 สถานีโทรมาตรตรวจวัดฝนของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

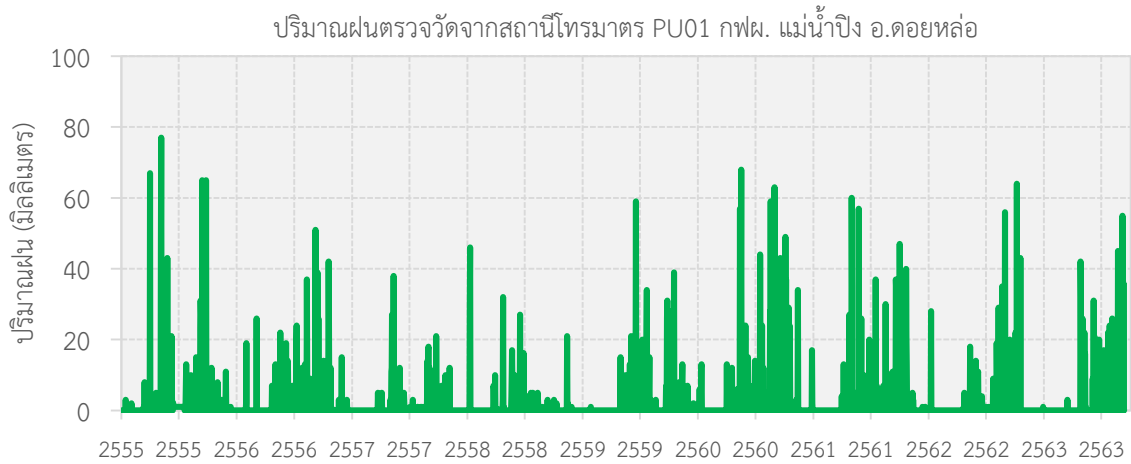
ตารางผนวกที่ A-2 สถิติข้อมูลฝนจากสถานีโทรมาตรเหนือเขื่อนภูมิพลในปี พ.ศ. 2562-2563

ปี	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
สถานี PU01 แม่น้ำปิง อ.ตอยหล่อ													
2562	28.0	0.0	0.0	7.0	52.0	38.0	18.0	212.0	69.0	175.0	0.0	1.0	600.0
2563	0.0	0.0	3.0	82.0	67.0	132.0	88.0	124.0	105.0 ^{1/}	-	-	-	601.0 ^{1/}
สถานี PU02 แม่น้ำปิง อ.ฮอด													
2562	32.0	0.0	2.0	4.0	94.0	64.0	35.0	165.0	79.0	109.0	28.0	0.0	612.0
2563	0.0	1.0	2.0	54.0	87.0	106.0	160.0	198.0	17.0 ^{1/}	-	-	-	625.0 ^{1/}
สถานี PU03 อ.อมก๋อย													
2562	0.0	0.0	0.0	0.0	15.0	103.0	51.0	119.0	38.0	19.0	3.0	0.0	348.0
2563	0.0	0.0	17.0	9.0	18.0	62.0	216.0	186.0	0.0 ^{1/}	-	-	-	508.0 ^{1/}

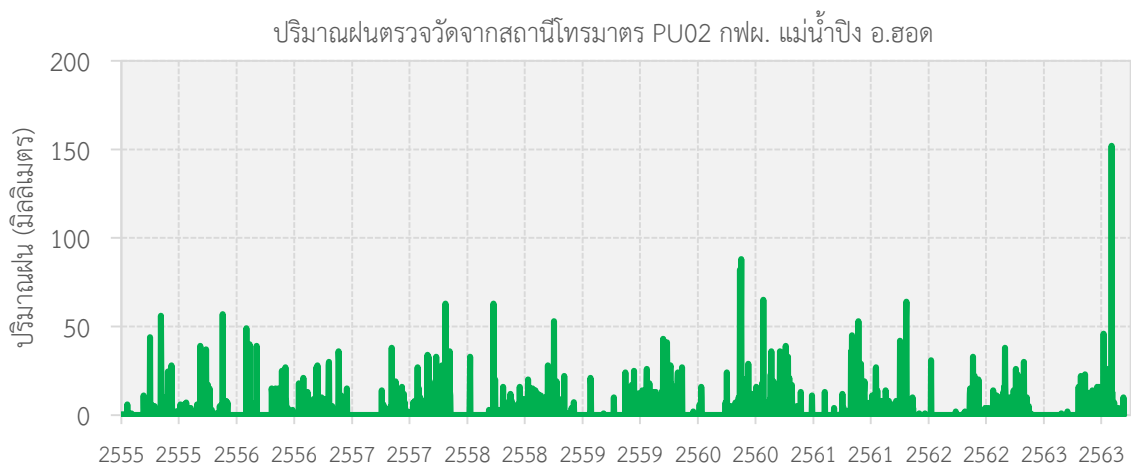
หมายเหตุ : ^{1/}ผลรวมของปริมาณฝนรายเดือนถึงวันที่ 10 กันยายน พ.ศ. 2563

| กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเชิงมุ่ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

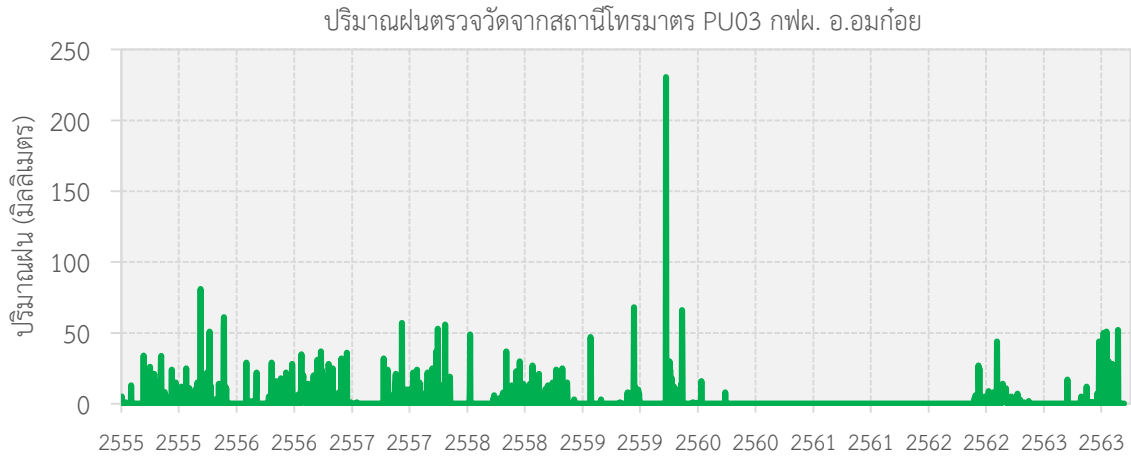
จากสถิติข้อมูลฝนของสถานีโทรมาตรเหนือเขื่อนภูมิพลในปี พ.ศ. 2562-2563 พบว่า ปริมาณฝนรายปีของทั้ง 3 สถานี อยู่ในเกณฑ์ต่ำตั้งแต่ 348-625 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งคาดว่าจะจะเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่มีค่อนข้างน้อยโดยเฉพาะอย่างยิ่งในปี พ.ศ. 2563 นี้ ที่ปริมาณน้ำไหลเข้าสะสมมีเพียงแค่ 964.67 ล้านลูกบาศก์เมตร (ข้อมูลเมื่อวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2563) สำหรับรูปแบบการกระจายของปริมาณฝนรายวันของสถานีเหนือเขื่อนภูมิพลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555-2563 ในช่วงที่ทำการทดสอบ CO-RUN แสดงในรูปผนวกที่ A-5 ถึงรูปผนวกที่ A-10 โดยพบว่า ไม่ปรากฏเหตุการณ์ฝนตกเลยในช่วงต้นเดือนกันยายนของสถานี PU03 ในบริเวณพื้นที่อำเภออมก๋อย



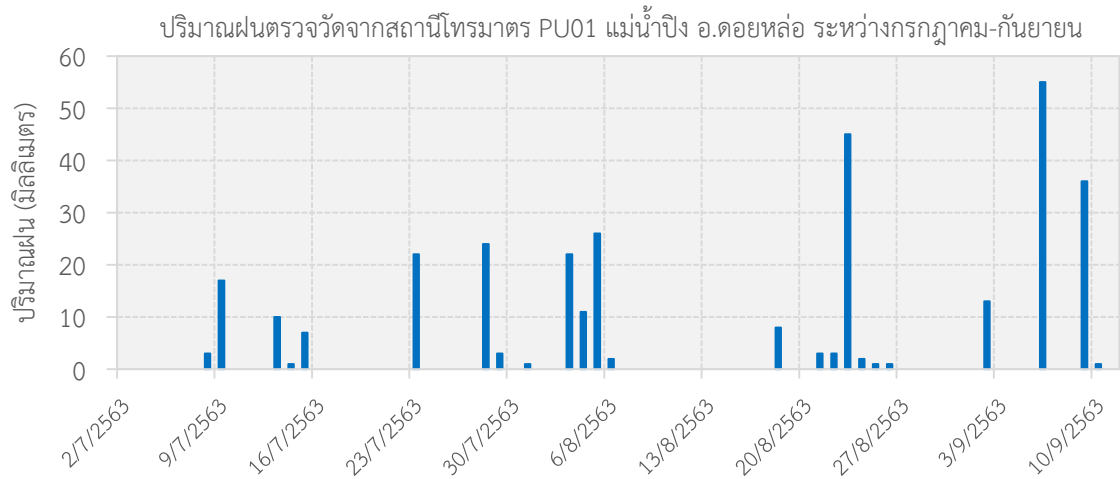
รูปผนวกที่ A-5 ปริมาณฝนตรวจวัดจากสถานีโทรมาตร PU01 กฟผ. แม่น้ำปิง อ.ตอยหล่อ



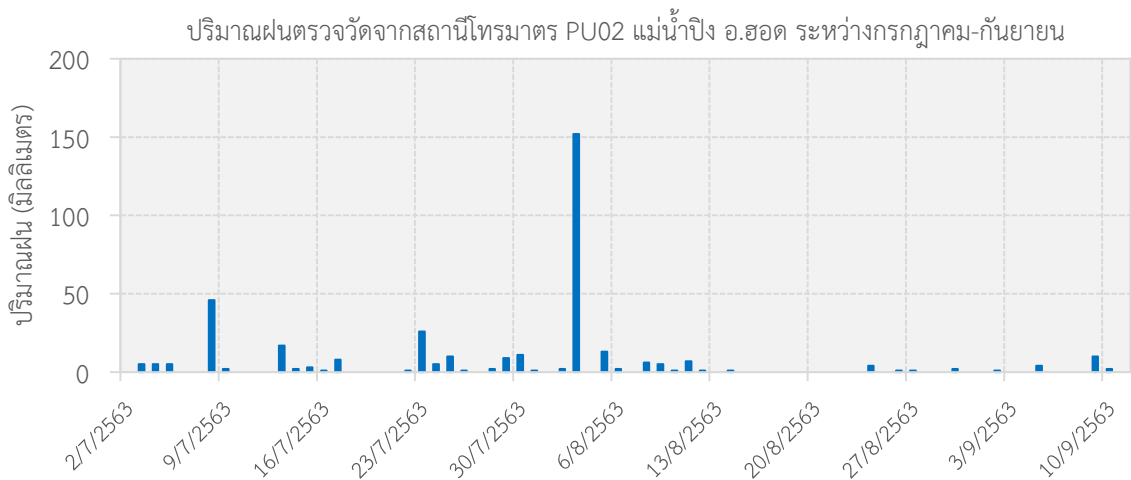
รูปผนวกที่ A-6 ปริมาณฝนตรวจวัดจากสถานีโทรมาตร PU02 กฟผ. แม่น้ำปิง อ.ฮอด



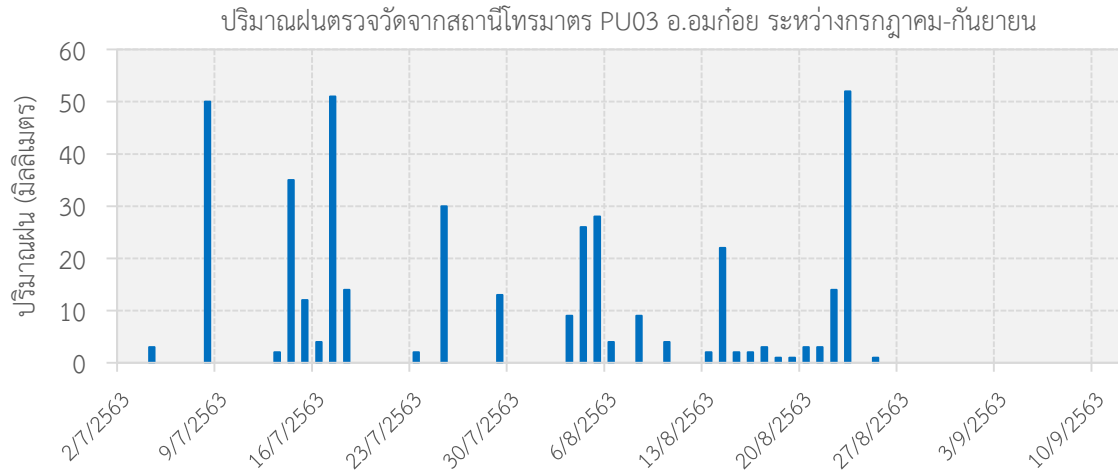
รูปผนวกที่ A-7 ปริมาณฝนตรวจวัดจากสถานีโทรมาตร PU03 กฟผ. อ.อมก๋อย



รูปผนวกที่ A-8 ปริมาณฝนตรวจวัดจากสถานีโทรมาตร PU01 แม่น้ำปิง อ.ดอยหล่อ ระหว่างกรกฎาคม-กันยายน



รูปผนวกที่ A-9 ปริมาณฝนตรวจวัดจากสถานีโทรมาตร PU02 แม่น้ำปิง อ.ฮอด ระหว่างกรกฎาคม-กันยายน

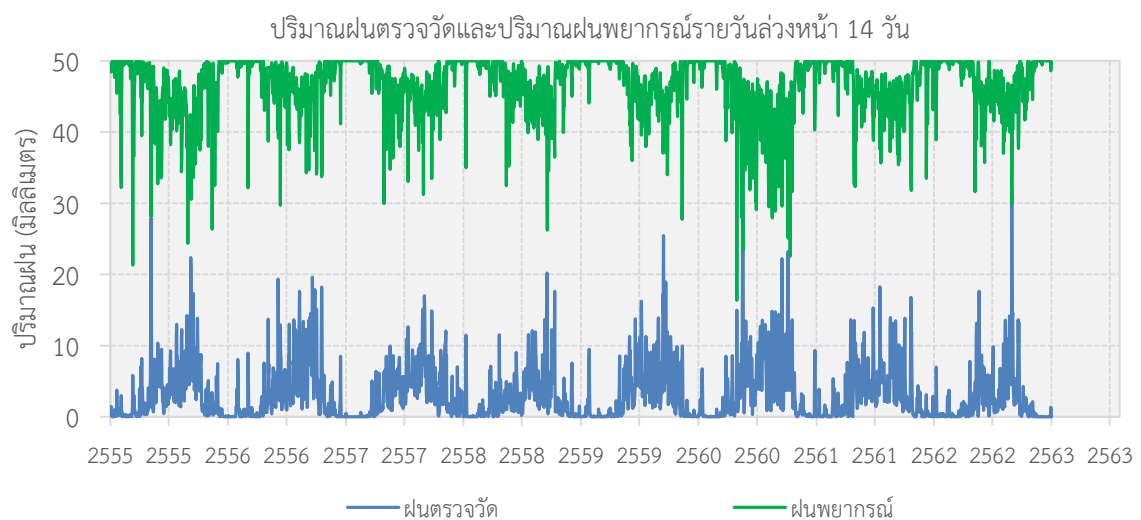


รูปผนวกที่ A-10 ปริมาณฝนตรวจวัดจากสถานีโทรมาตร PU03 อ.อมก๋อย ระหว่างกรกฎาคม-กันยายน

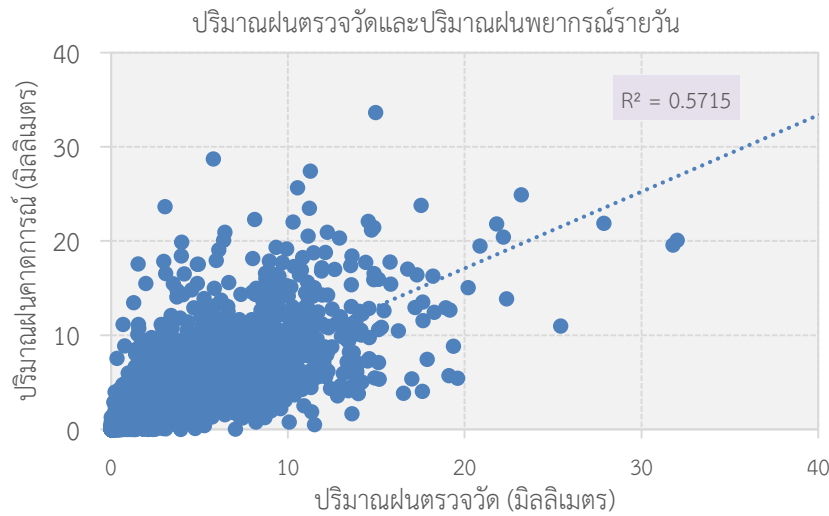
A.2 ข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล

A.2.1 ข้อมูลฝนตรวจวัดและข้อมูลฝนพยากรณ์

งานวิจัยนี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลฝนตรวจวัดและข้อมูลฝนพยากรณ์ล่วงหน้าในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้แก่ ฝนพยากรณ์ล่วงหน้า 14 วัน (แบบจำลอง NHC) ฝนพยากรณ์ล่วงหน้า 3 วัน (WRF-ROMS) ฝนพยากรณ์ล่วงหน้า 4 สัปดาห์ (แบบจำลอง CFS-V2) และฝนพยากรณ์ล่วงหน้า 6 เดือน (แบบจำลอง CFS-V2) ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากแบบจำลองในกลุ่มงานที่ 1 แผนงานที่ 3 รวมทั้งยังได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลฝนตรวจวัดและข้อมูลฝนพยากรณ์รายวันล่วงหน้า 14 วันด้วยแบบจำลอง NHC ในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ที่ได้ทำการพยากรณ์ระหว่างปี พ.ศ. 2555-2563 เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของข้อมูลก่อนนำมาใช้งานในการทดสอบ CO-RUN โดยแสดงอนุกรมเวลาของข้อมูลฝนตรวจวัดและฝนพยากรณ์รายวันไว้ในรูปผนวกที่ A-11 และรูปผนวกที่ A-12 แสดงค่าสหสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลฝนตรวจวัดและฝนพยากรณ์รายวันที่มีค่า R^2 เท่ากับ 0.5715

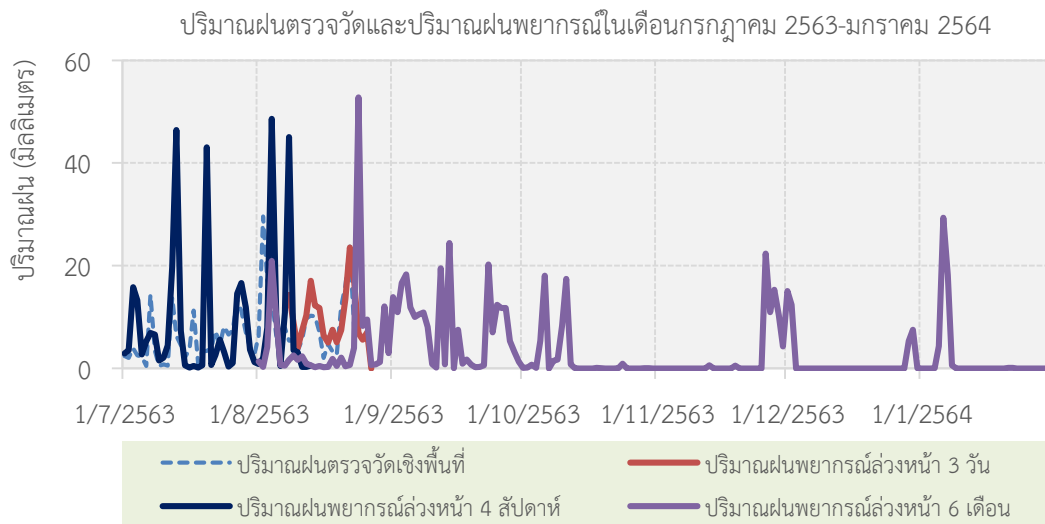


รูปผนวกที่ A-11 ปริมาณฝนตรวจวัดและปริมาณฝนพยากรณ์รายวันล่วงหน้า 14 วันด้วยแบบจำลอง NHC ในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่



รูปผนวกที่ A-12 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนตรวจวัดและปริมาณฝนพยากรณ์รายวันล่วงหน้า 14 วัน ด้วยแบบจำลอง NHC ในลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่

จากนั้นทำการพิจารณาเฉพาะข้อมูลฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน (Upper Ping River Basin) บริเวณเหนือเขื่อนภูมิพลเพื่อกำหนดเป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลที่พัฒนาขึ้นโดยอาศัยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง โดยรายละเอียดที่สำคัญของข้อมูลฝนตรวจวัดและฝนพยากรณ์ล่วงหน้าในช่วงเวลาต่าง ๆ แสดงในรูปผนวกที่ A-13 และตารางผนวกที่ A-3 อย่างไรก็ตาม ผลการพยากรณ์ข้อมูลฝนยังคงให้ค่าต่ำกว่าข้อมูลฝนตรวจวัด



รูปผนวกที่ A-13 รูปแบบข้อมูลฝนตรวจวัดและฝนพยากรณ์รายวันล่วงหน้าในช่วงเวลาต่าง ๆ ระหว่างเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2563 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2564 ในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน

ตารางผนวกที่ A-3 ข้อมูลฝนในลุ่มน้ำปิงตอนบนซึ่งนำเข้าไปในแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล

เดือน	ฝนตรวจวัด (มิลลิเมตร)	ฝนพยากรณ์ล่วงหน้า (มิลลิเมตร)			ฝนโทรมาตร (มิลลิเมตร)		
		3 วัน	4 สัปดาห์	6 เดือน	PU01	PU02	PU03
ก.ค. 2563	158.82	NA	244.95	NA	88.00	160.00	216
ส.ค. 2563	215.27	203.02	236.24	146.37	124.00	198.00	186.00
ก.ย. 2563	NA	NA	82.63	241.88	105.00	17.00	0
ต.ค. 2563	NA	NA	NA	55.28	NA	NA	NA
พ.ย. 2563	NA	NA	NA	64.40	NA	NA	NA
ธ.ค. 2563	NA	NA	NA	40.33	NA	NA	NA
ม.ค. 2564	NA	NA	NA	52.70	NA	NA	NA

A.2.2 ข้อมูลปริมาณ Sideflow ตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลอง

ในการทดสอบ CO-RUN ข้อมูลปริมาณ Sideflow/Localized Flow ที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการไหลเวียนของน้ำแบบกระจายตัวที่ผสมผสานกับการใช้น้ำเพื่อการเกษตรกรรม (Distributed Water Circulation Model Incorporating Agricultural Water Use, DWCM-AgWU) ของกลุ่มงานที่ 3 จะถูกใช้เป็นข้อมูลนำเข้าร่วมด้วยสำหรับใช้ในแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่อาศัยหลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence-AI) เพื่อกำหนดรูปแบบการระบายน้ำที่เหมาะสมของเขื่อนภูมิพล โดยพิจารณาจาก 2 สถานีหลักท้ายเขื่อนภูมิพลคือ สถานี W.4A (แม่น้ำวัง) และ CT.2A (แม่น้ำสะแกกรัง) ซึ่งค่าสถิติของข้อมูลปริมาณ Sideflow จากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง DWCM-AgWU ในปี พ.ศ. 2562-2563 สรุปไว้ในตารางผนวกที่ A-4 ผลการเปรียบเทียบปริมาณ Sideflow รายวันและรายเดือนระยะยาวตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2563 จากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง DWCM-AgWU แสดงในรูปผนวกที่ A-14 และรูปผนวกที่ A-15 และผลการเปรียบเทียบปริมาณ Sideflow รายวันและรายเดือนในปี พ.ศ. 2563 จากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง DWCM-AgWU แสดงในรูปผนวกที่ A-16 และรูปผนวกที่ A-17

จากสถิติข้อมูลปริมาณ Sideflow ในตารางผนวกที่ A-4 พบว่า ส่วนใหญ่ปริมาณ Sideflow จากแบบจำลอง DWCM-AgWU ในช่วงฤดูแล้งมีค่าสูงกว่าที่ได้จากการตรวจวัด ในทางกลับกัน ปริมาณ Sideflow จากแบบจำลอง DWCM-AgWU ในช่วงฤดูฝนมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการตรวจวัดอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในเดือนพฤษภาคม กันยายน และตุลาคม

ตารางผนวกที่ A-4 สถิติข้อมูลปริมาณ Sideflow จากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง DWCM-AgWU ของสถานี W.4A และ CT.2A ในปี พ.ศ. 2562-2563

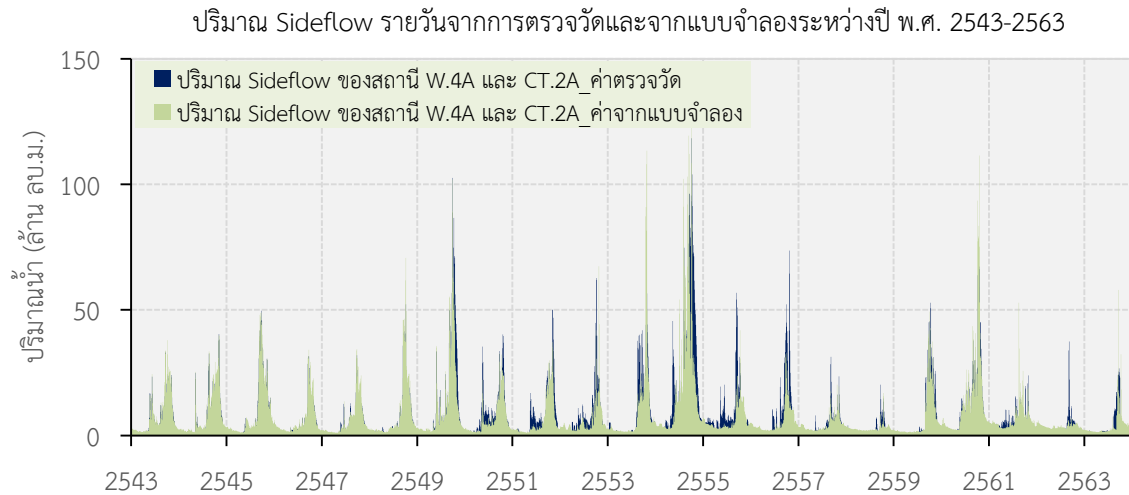
ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี
ปริมาณ Sideflow จากการตรวจวัด (ล้านลูกบาศก์เมตร)													
2562	83.6	54.7	28.0	40.2	34.2	15.8	14.1	99.9	362.4	130.2	28.0	20.1	911.1
2563	12.2	33.3	28.4	16.9	45.3	51.2	47.0	229.3	623.6	-	-	-	1,087.4
เฉลี่ย ^{1/}	45.2	36.4	38.4	42.2	144.2	140.8	130.4	283.0	666.6	759.3	332.3	64.1	2,627.9
ปริมาณ Sideflow จากแบบจำลอง DWCM-AgWU (ล้านลูกบาศก์เมตร)													
2562	151.7	108.4	101.3	83.5	99.8	95.9	102.3	104.0	136.3	134.8	112.5	79.9	1,310.5
2563	63.4	50.7	47.2	43.3	51.1	48.1	64.5	95.8	443.3	261.0	130.4	106.0	1,405.0

^{1/} กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเชิงบูรณาการ ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562

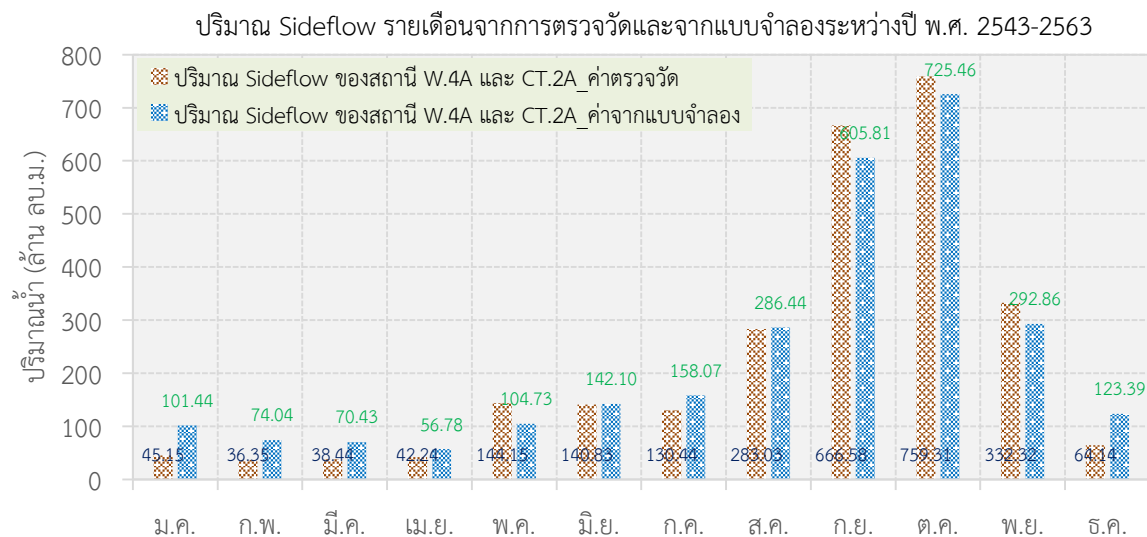
ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี
เฉลี่ย ^{1/}	101.4	74.0	70.4	56.8	104.7	142.1	158.1	286.4	605.8	725.5	292.9	123.4	2,741.6
ผลต่าง ^{2/}	56.28	37.69	31.99	14.54	-39.42	1.27	27.63	3.42	-60.77	-33.85	-39.45	59.25	113.61

หมายเหตุ : ^{1/}ค่าเฉลี่ยของปริมาณ Sideflow ระยะยาวระหว่างปี พ.ศ. 2543–2563

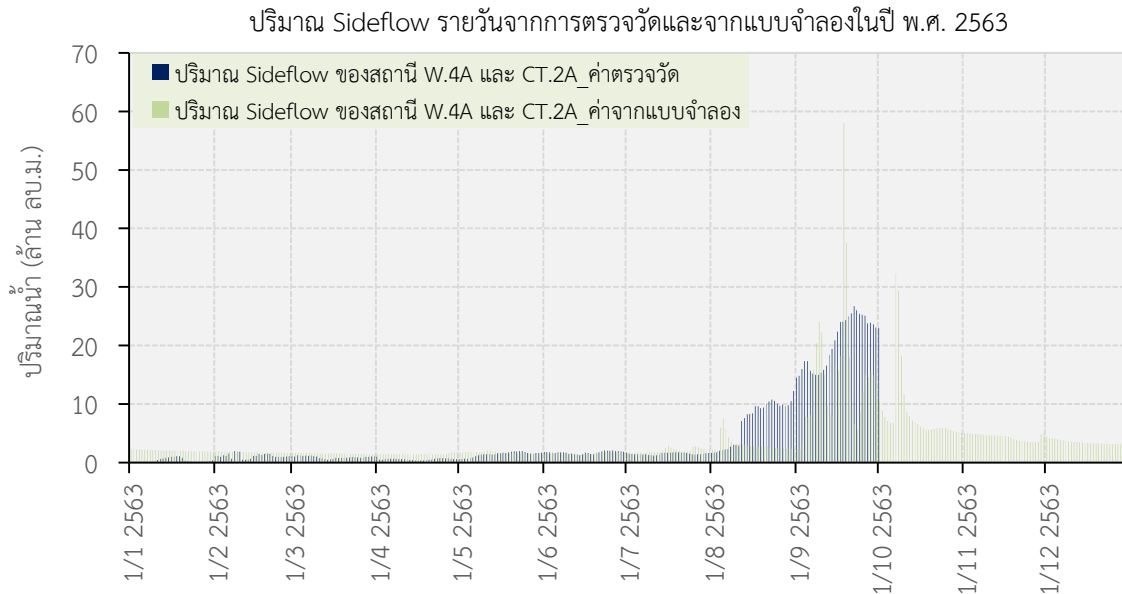
^{2/}ผลต่างระหว่างค่าตรวจวัดเฉลี่ยและค่าที่ได้จากแบบจำลอง DWCM-AgWU เฉลี่ย



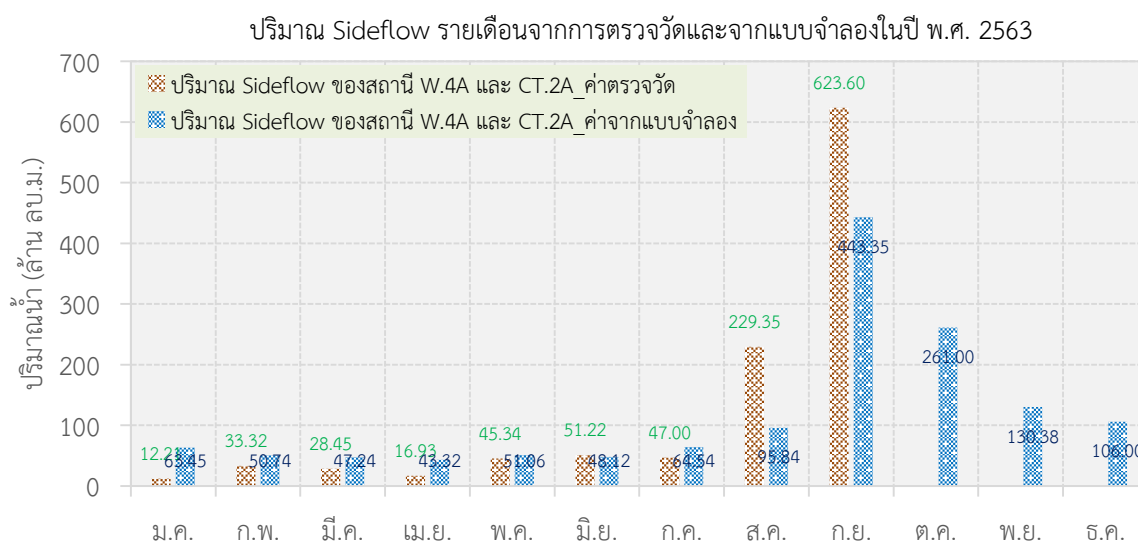
รูปผนวกที่ A-14 ปริมาณ Sideflow รายวันจากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง DWCM-AgWU ของสถานี W.4A และ CT.2A ระหว่างปี พ.ศ. 2543–2563



รูปผนวกที่ A-15 ปริมาณ Sideflow รายเดือนจากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง DWCM-AgWU ของสถานี W.4A และ CT.2A ระหว่างปี พ.ศ. 2543–2563



รูปผนวกที่ A-16 ปริมาณ Sideflow รายวันจากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง DWCM-AgWU ของสถานี W.4A และ CT.2A ในปี พ.ศ. 2563

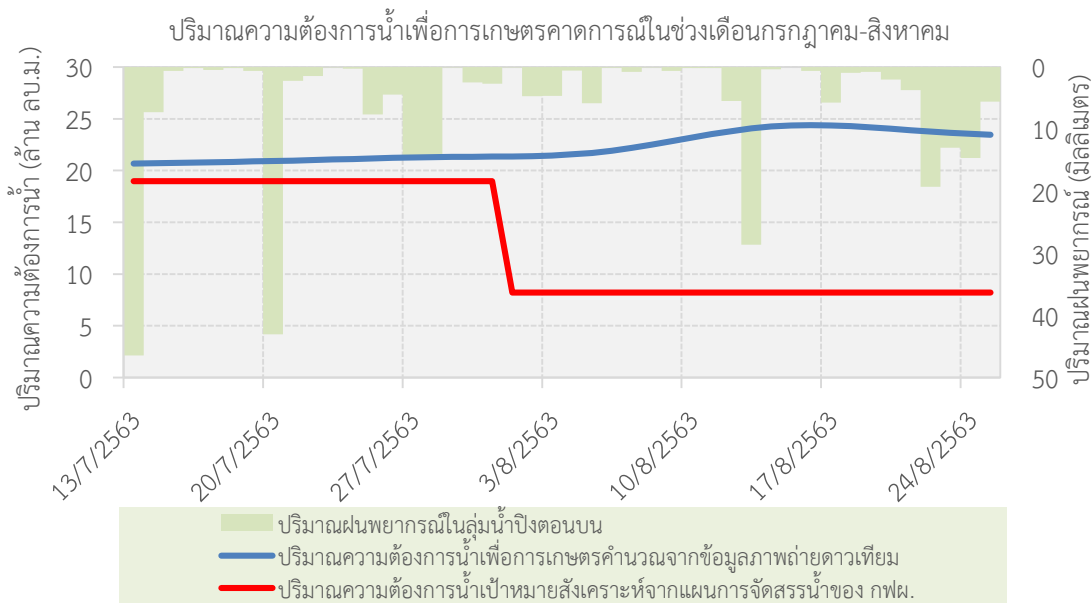


รูปผนวกที่ A-17 ปริมาณ Sideflow รายเดือนจากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง DWCM-AgWU ของสถานี W.4A และ CT.2A ในปี พ.ศ. 2563

A.2.3 ข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรคำนวณจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม

ในทำนองเดียวกัน ข้อมูลความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรคาดการณ์ล่วงหน้า (Forecasted Agricultural Water Demand) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของกลุ่มงานที่ 2 ที่ได้จากการคำนวณจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมร่วมกับปัจจัยข้อมูลฝนพยากรณ์ของกลุ่มงานที่ 1 ในการประเมินปริมาณฝนใช้การ (Effective Rainfall) ในพื้นที่ในช่วงระหว่างทำการทดสอบ CO-RUN จะถูกนำมาประมาณการหาความต้องการน้ำทั้งหมดในกลุ่มเจ้าพระยาใหญ่สำหรับใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่อาศัยหลักปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence-AI) เพื่อกำหนดรูปแบบการระบายน้ำที่เหมาะสมของเขื่อนภูมิพล

นอกจากนี้ ในการทดสอบ CO-RUN ยังคงอาศัยข้อมูลปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายที่สังเคราะห์จากแผนการจัดสรรน้ำในปี พ.ศ. 2563 ของกรมชลประทานและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยร่วมด้วย อย่างไรก็ตาม ผลการเปรียบเทียบปริมาณความต้องการน้ำคาดการณ์ล่วงหน้าในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนสิงหาคมกับปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายที่สังเคราะห์จากแผนการจัดสรรน้ำรายวันพบว่า ข้อมูลความต้องการน้ำคาดการณ์ล่วงหน้ายังคงสูงกว่าแผนการจัดสรรน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ตั้งแต่หลังวันที่ 3 สิงหาคม เป็นต้นมา ดังแสดงในรูปผนวกที่ A-18

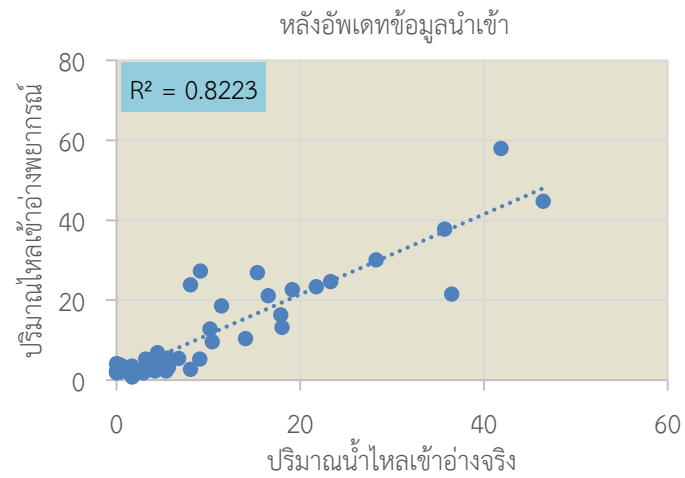
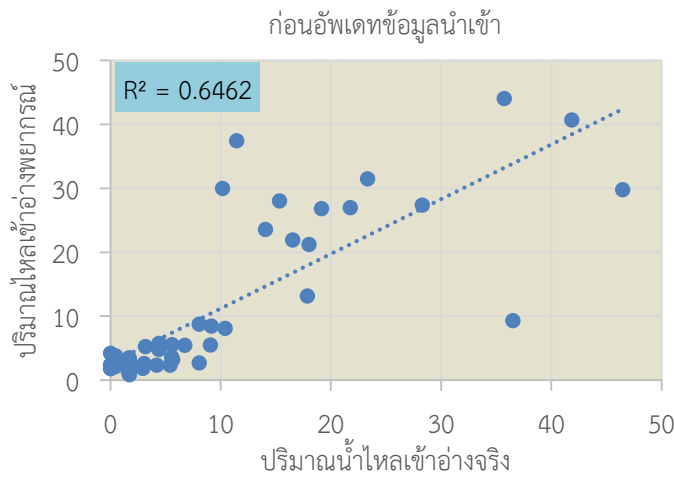
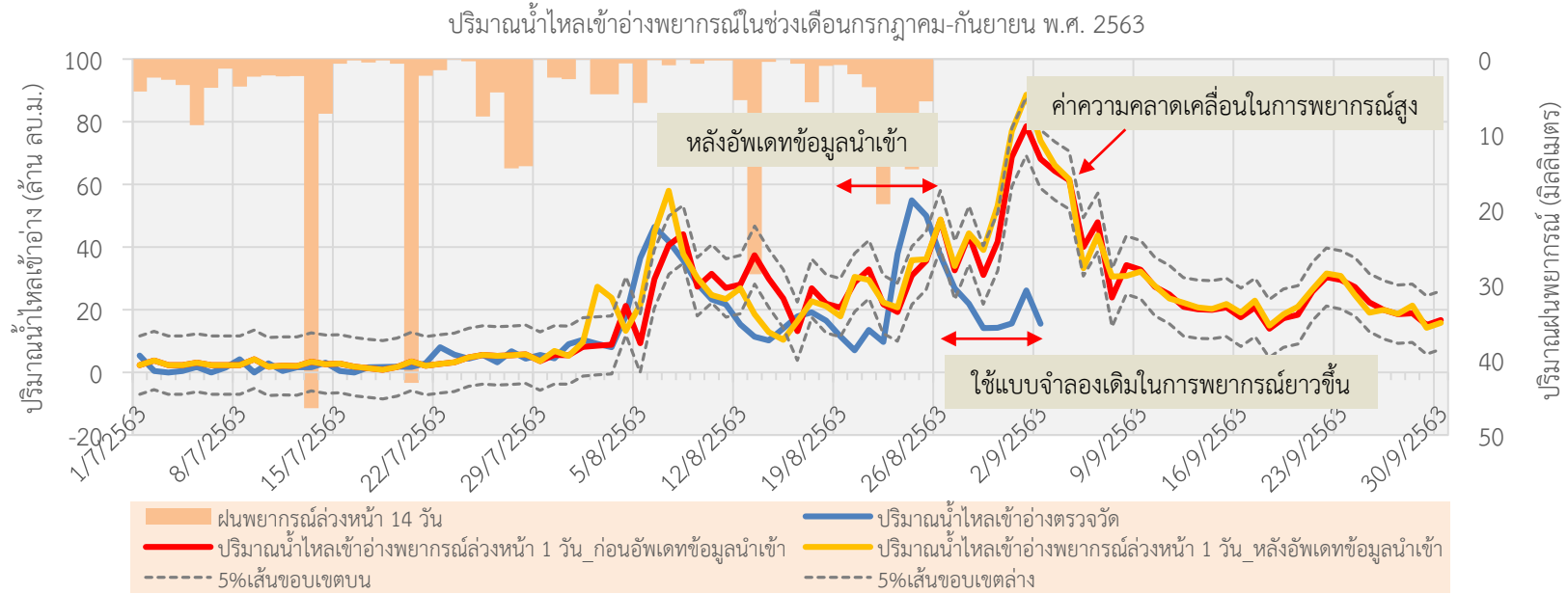


รูปผนวกที่ A-18 ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรคาดการณ์ล่วงหน้าในช่วงเดือนกรกฎาคม-สิงหาคม

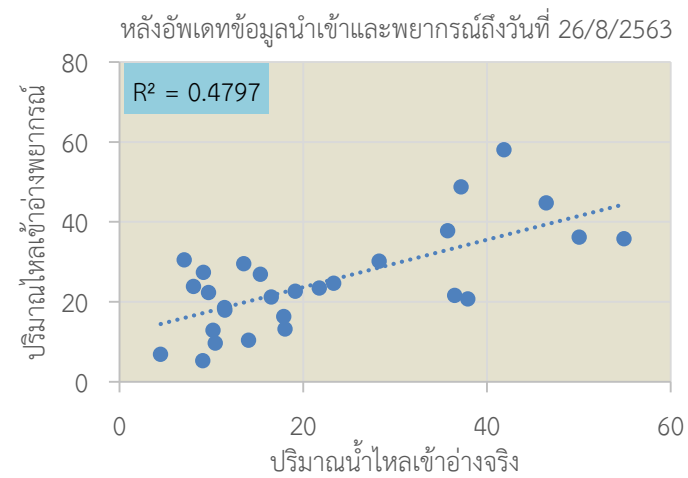
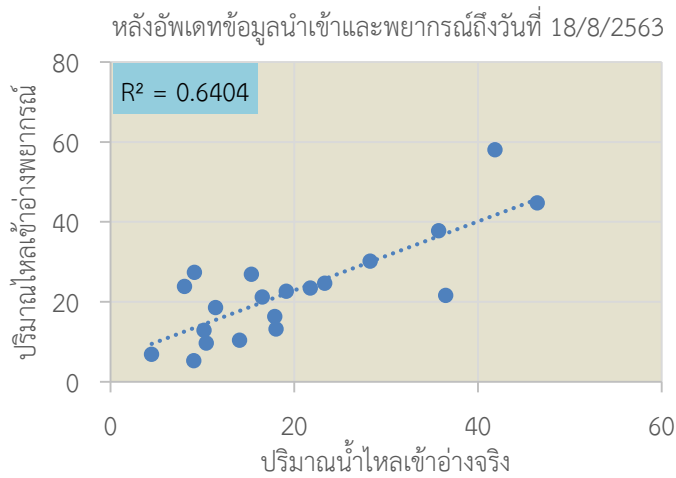
A.3 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำล่งหน้าและประสิทธิผลของการพยากรณ์

A.3.1 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำล่งหน้า

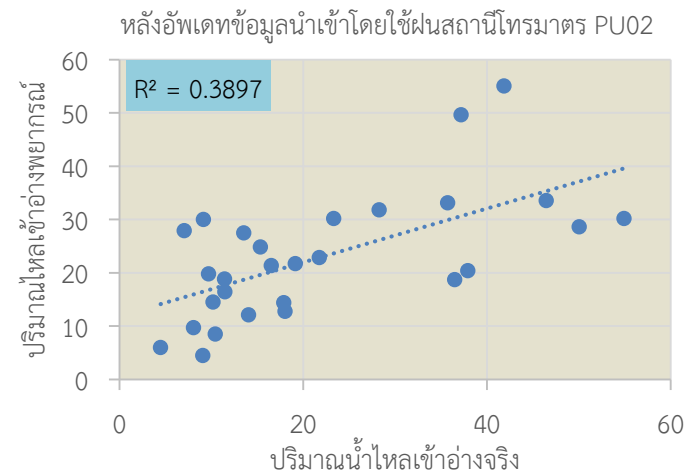
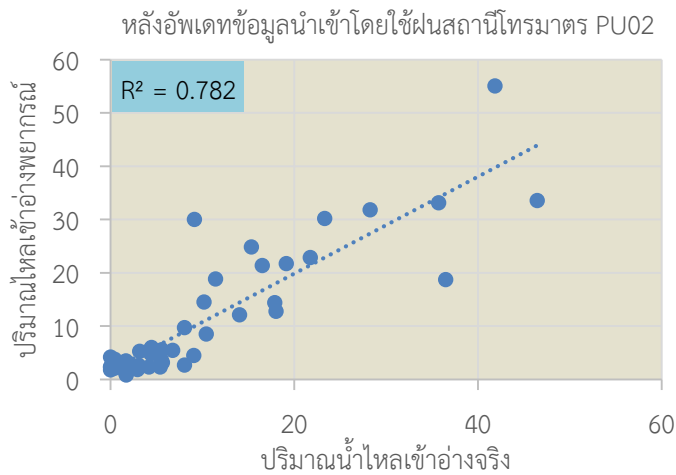
ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่อง และอัลกอริทึม Gradient Boosting/Regression Tree จากแบบจำลองการพยากรณ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ รวมทั้งทำการประเมินประสิทธิผลของการพยากรณ์ในรูปแบบของ R2, NSE, RMSE, Max. Error แสดงผลในรูปผนวกที่ A-19 ถึงรูปผนวกที่ A-24



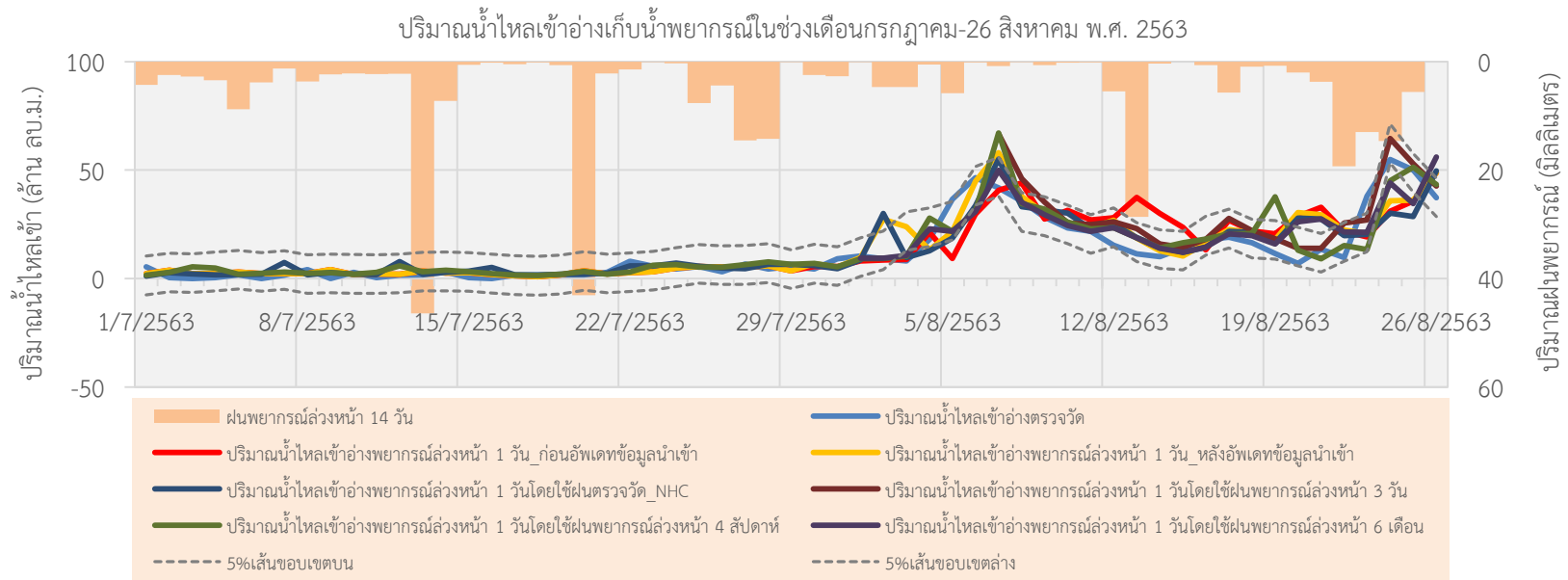
รูปผนวกที่ A-19 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำระหว่างวันที่ 1/7/2563-18/8/2563 โดยอาศัยข้อมูลฝนพยากรณ์ล่วงหน้า 14 วันในกลุ่มน้ำปึงตอนบน



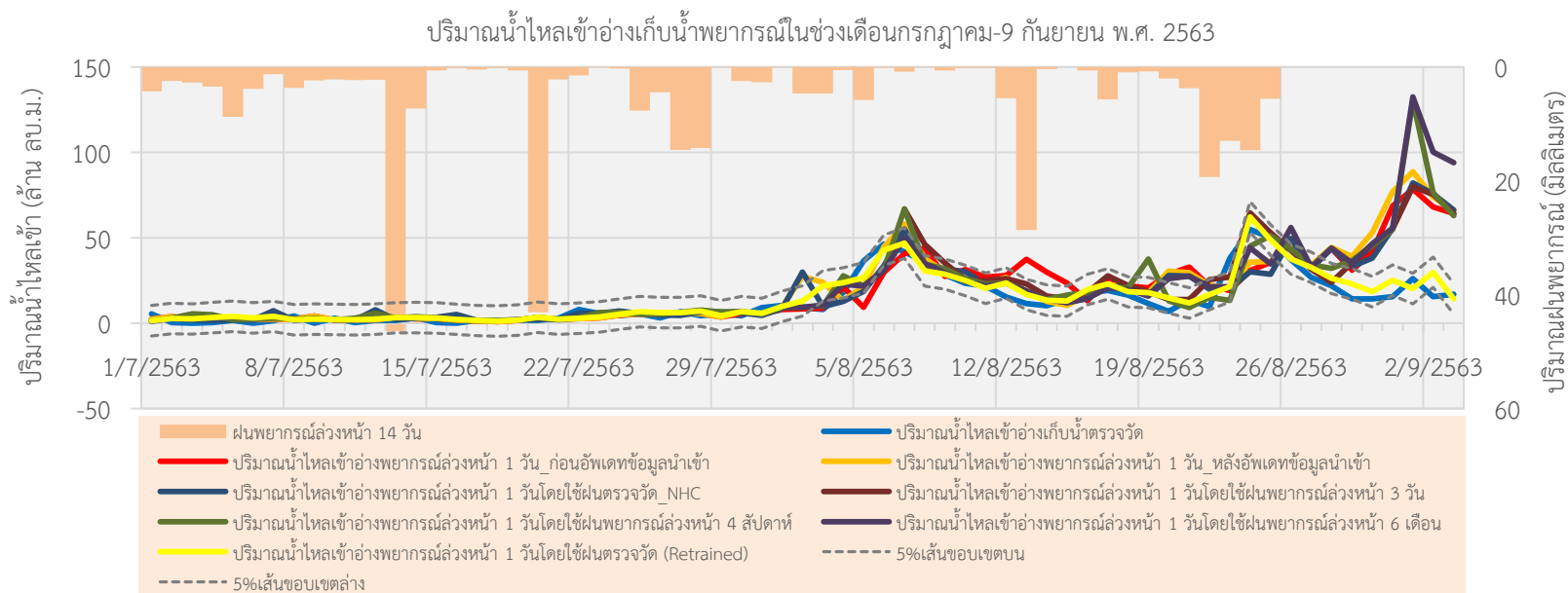
รูปผนวกที่ A-20 ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่ลดลงระหว่างวันที่ 30/7/2563-18/8/2563 (รูปซ้ายมือ) และระหว่างวันที่ 30/7/2563-26/8/2563 (รูปขวามือ) โดยอาศัยข้อมูลฝนพยากรณ์ล่วงหน้าในกลุ่มน้ำปึงตอนบน



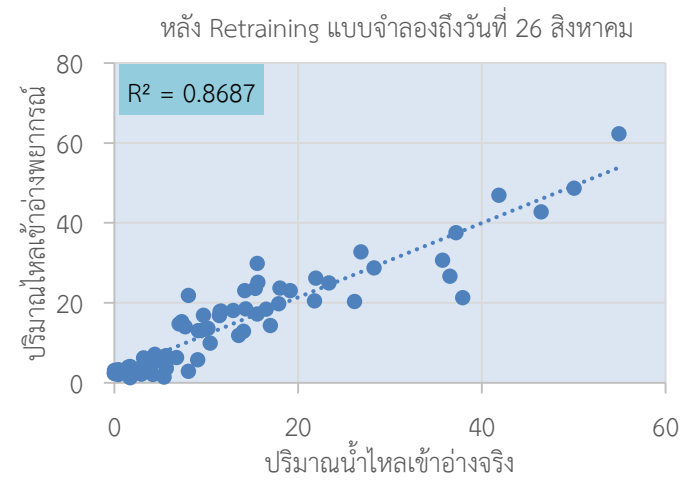
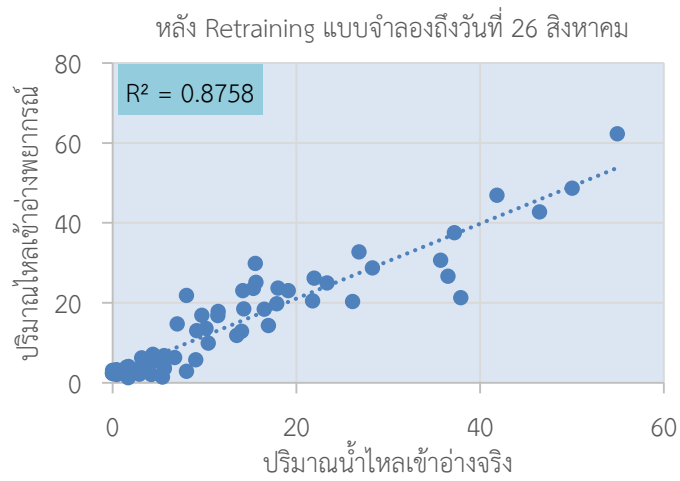
รูปผนวกที่ A-21 ค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่ลดลงระหว่างวันที่ 1/7/2563-18/8/2563 (รูปซ้ายมือ) และระหว่างวันที่ 30/7/2563-26/8/2563 (รูปขวามือ) โดยอาศัยข้อมูลฝนสถานีโทรมาตร PU02 ในกลุ่มน้ำปึงตอนบน



รูปผนวกที่ A-22 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำระหว่างวันที่ 1/7/2563-26/8/2563 โดยอาศัยข้อมูลผนพยากรณ์ล่วงหน้ารูปแบบต่าง ๆ ในลุ่มน้ำปิงตอนบนหลังอัปเดตข้อมูลน้ำเข้าจริงที่ให้ค่าความแม่นยำสูงขึ้น



รูปผนวกที่ A-23 ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำระหว่างวันที่ 1/7/2563-9/10/2563 โดยอาศัยข้อมูลฝนพยากรณ์ล่วงหน้ารูปแบบต่าง ๆ ในกลุ่มน้ำปึงตอนบนหลัง Retraining แบบจำลองที่ให้ค่าความแม่นยำสูงขึ้น



รูปผนวกที่ A-24 ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำระหว่างวันที่ 1/7/2563–3/9/2563 (รูปซ้ายมือ) และระหว่างวันที่ 1/7/2563–9/9/2563 (รูปขวามือ) โดยอาศัยข้อมูลฝนตรวจวัดในลุ่มน้ำที่ให้ค่าความแม่นยำสูงขึ้นหลัง Retraining แบบจำลอง

A.3.2 เปรียบเทียบประสิทธิผลของการพยากรณ์

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิผลของการพยากรณ์ที่ Lead Time 1–14 วัน หลัง Retraining แบบจำลองจนถึงวันที่ 26 สิงหาคม พ.ศ. 2563 แสดงในตารางผนวกที่ A-5

ตารางผนวกที่ A-5 เปรียบเทียบประสิทธิผลของการพยากรณ์ที่ Lead Time 1–14 วัน หลัง Retraining แบบจำลอง

Lead Time	1	2	3	4	5	6	7
R-Squared	0.8758	0.8687	0.9023	0.9024	0.8979	0.8974	0.8925
NSE	0.8585	0.8428	0.8943	0.8934	0.8867	0.8852	0.8774
RMSE	0.6283	0.6064	0.6014	0.5956	0.6040	0.5981	0.6083
Max. Error (MCM)	5.8325	5.8325	-5.9043	-4.2874	-4.2874	-4.1853	-4.1853
Diff. of R-Squared				0.0001	-0.0043	-0.0049	-0.0097
Lead Time	8	9	10	11	12	13	14
R-Squared	0.8892	0.8772	0.8758	0.8749	0.8750	0.8733	0.8703
NSE	0.8763	0.8589	0.8585	0.8563	0.8561	0.8526	0.8472
RMSE	0.6058	0.6368	0.6283	0.6237	0.6149	0.6130	0.6151
Max. Error (MCM)	5.8325	5.8325	5.8325	5.8325	5.8325	5.8325	5.8325
Diff. of R-Squared	-0.0130	-0.0251	-0.0264	-0.0274	-0.0273	-0.0290	-0.0319

จากข้อมูลผลการพยากรณ์ข้างต้นสามารถสรุปประเด็นที่สำคัญที่ได้จากแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในช่วงการทดสอบ CO-RUN ดังนี้

- (1) แบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบเครื่องและอัลกอริทึม Gradient Boosting/Regression Tree สามารถช่วยในการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลได้ โดยให้ค่าความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ดี
- (2) รูปแบบของโครงสร้างแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวันของเขื่อนภูมิพลที่ให้ความแม่นยำที่ดีที่สุดคือ $\text{Inflow } t+1 = f(\text{Inflow } t-1, \text{Inflow } t-3, \text{Inflow } t-7, \text{Avg. Inflow } t-3, \text{Avg. Inflow } t-5, \text{Precipitation } t)$ (นำเข้าข้อมูลฝนรูปแบบต่าง ๆ ทั้งข้อมูลฝนตรวจวัดและข้อมูลฝนพยากรณ์ล่วงหน้า)
- (3) การอัปเดตข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองด้วยข้อมูลตรวจวัดจริงให้ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่มีความแม่นยำสูงขึ้น
- (4) การ Retraining แบบจำลองทุก 7 วัน ให้ผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำที่มีความแม่นยำสูงขึ้นทั้งรูปแบบและขนาดของข้อมูลพยากรณ์
- (5) ประสิทธิภาพของการพยากรณ์ที่ Lead Time มากขึ้น ทำให้ผลการพยากรณ์มีความแม่นยำน้อยลง ซึ่งเป็นไปตามหลักทฤษฎี โดยค่า Lead Time ที่แนะนำอยู่ในช่วง 1–7 วัน ทำให้ค่า R^2 ลดลงระหว่างถึง -0.0251
- (6) การใช้ฝนพยากรณ์ล่วงหน้า 14 วัน ให้ค่าประสิทธิภาพของการพยากรณ์ในรูป R^2 ดีกว่าฝนพยากรณ์ในลักษณะอื่น ๆ (3 วัน/4 สัปดาห์/6 เดือน) อย่างไรก็ตาม ช่วงความยาวของข้อมูลต่างกัน

อาจส่งผลต่อค่าประสิทธิผลของการพยากรณ์กล่าวคือ หากช่วงข้อมูลนำเข้าสั้นอาจทำให้แบบจำลองไม่สามารถเรียนรู้และจดจำรูปแบบของข้อมูลได้ไม่ทันช่วงข้อมูลนำเข้าระยะยาว

A.4 ผลการระบายน้ำด้วยแบบจำลองล่วงหน้า

A.4.1 แบบจำลองฟัซซี (Conventional Fuzzy Model)

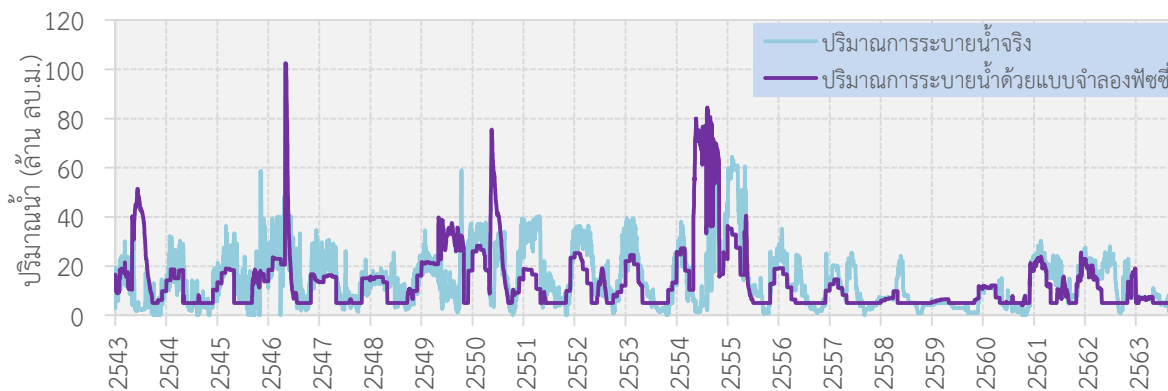
ในช่วงของการทดสอบ CO-RUN แบบจำลองฟัซซี (Conventional Fuzzy Model) ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดรูปแบบการระบายน้ำที่เหมาะสมล่วงหน้าของเขื่อนภูมิพล โดยพิจารณาจากข้อมูลนำเข้า 3 ส่วนหลักคือ (1) ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำพยากรณ์รายวัน 3 เดือนล่วงหน้า (2) ปริมาณ Sidelow รายวันจากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง DWCM-AgWU รายวันล่วงหน้า 14 วัน โดยนำมาพิจารณาเฉพาะสถานี W.4A และ (3) ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรภาคการล่งหน้า 14 วันสำหรับนำมาประมาณการหาความต้องการน้ำทั้งหมดในกลุ่มเจ้าพระยาใหญ่ กับปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายที่สังเคราะห์จากแผนการจัดสรรน้ำรายวันในปี พ.ศ. 2563 โดยอาศัยโครงสร้างของแบบจำลองฟัซซีรูปแบบที่ 3 และทำการจำลองระบบใน 2 ลักษณะคือ

- (1) การจำลองระยะยาว ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2543 ถึงวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2563 และ
- (2) การจำลองระยะสั้น ตั้งแต่วันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2543 ถึงวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2563

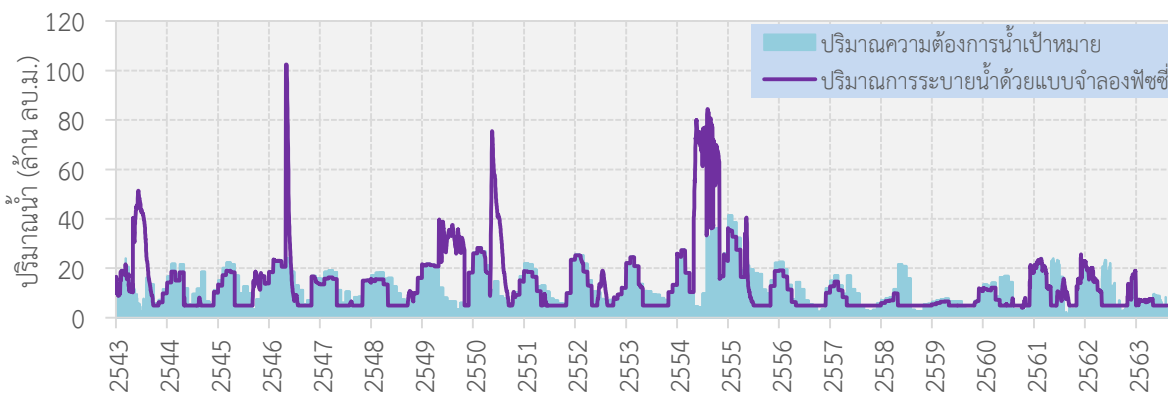
สำหรับผลการจำลองระบบได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันด้วยแบบจำลองฟัซซีกับปริมาณการระบายน้ำจริงของเขื่อนภูมิพล และทำการเปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันด้วยแบบจำลองฟัซซีกับปริมาณความต้องการน้ำดังแสดงในรูปผนวกที่ A-25 ถึงรูปผนวกที่ A-28

A.4.2 แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด (Constraint Programming Model)

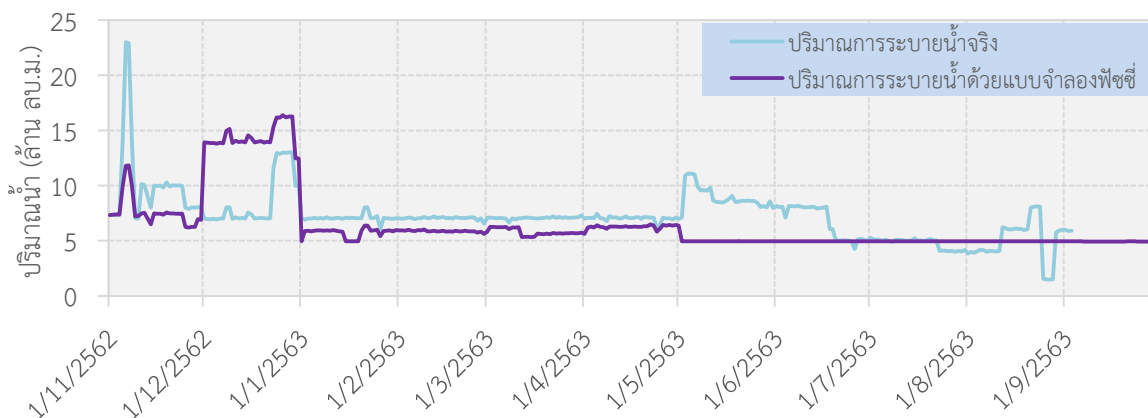
แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด (Constraint Programming Model) ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดรูปแบบการระบายน้ำที่เหมาะสมล่วงหน้าของเขื่อนภูมิพลเช่นเดียวกัน เนื่องจากแนวคิดและหลักการพัฒนาแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดมีความแตกต่างจากแบบจำลองฟัซซี ในที่นี้ได้อาศัยโครงสร้างของแบบจำลองที่ได้กำหนดสมการข้อจำกัดแบบรายฤดูกาล (Seasonal Constraint) มาใช้ในช่วงของการทดสอบ CO-RUN และพิจารณาการระบายน้ำจากข้อมูลนำเข้า 3 ส่วนหลัก คือ (1) ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำพยากรณ์รายวัน 3 เดือนล่วงหน้า (2) ปริมาณ Sidelow รายวันจากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง DWCM-AgWU รายวันล่วงหน้า 14 วัน โดยครอบคลุมทั้งสถานี W.4A และ CT.2A และ (3) ปริมาณความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรภาคการล่งหน้า 14 วันสำหรับนำมาประมาณการหาความต้องการน้ำทั้งหมดในกลุ่มเจ้าพระยาใหญ่ กับปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายที่สังเคราะห์จากแผนการจัดสรรน้ำรายวันในปี พ.ศ. 2563 สำหรับผลการจำลองระบบได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันด้วยแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดกับปริมาณการระบายน้ำจริงของเขื่อนภูมิพลดังแสดงในรูปผนวกที่ A-29



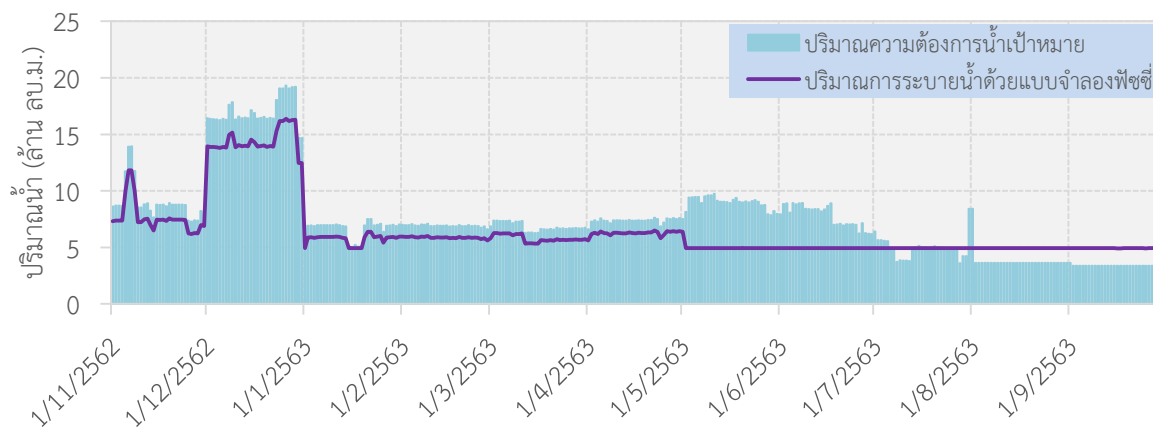
รูปผนวกที่ A-25 เปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันด้วยแบบจำลองพีซีซีกับปริมาณการระบายน้ำจริงของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563



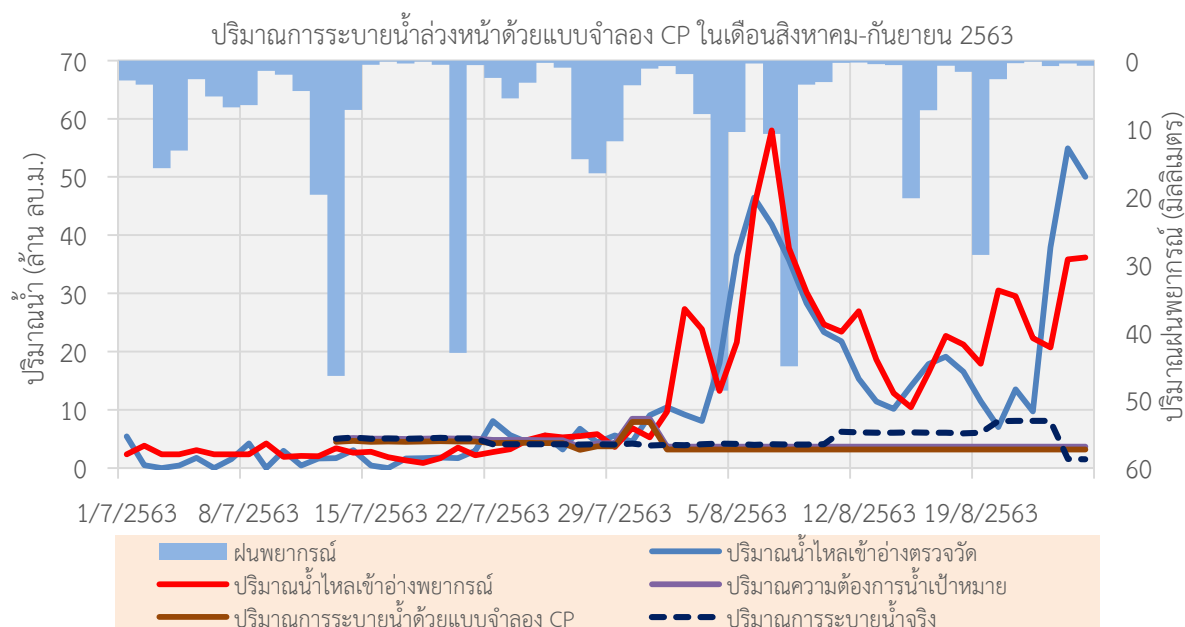
รูปผนวกที่ A-26 เปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันด้วยแบบจำลองพีซีซีกับปริมาณความต้องการน้ำระหว่างปี พ.ศ. 2543-2563



รูปผนวกที่ A-27 เปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันด้วยแบบจำลองพีซีซีกับปริมาณการระบายน้ำจริงของเขื่อนภูมิพลระหว่างปี พ.ศ. 2562-2563



รูปผนวกที่ A-28 เปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันด้วยแบบจำลองพีซีซีกับปริมาณความต้องการน้ำระหว่างปี พ.ศ. 2562-2563



รูปผนวกที่ A-29 ปริมาณการระบายน้ำล่งหน้าด้วยแบบจำลอง CP ในเดือนสิงหาคม-กันยายน 2563

จากผลการจำลองระบบเพื่อกำหนดการระบายน้ำล่งหน้าถึงวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2563 ด้วยแบบจำลองพีซีซีและแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดสามารถสรุปประเด็นที่สำคัญในช่วงการทดสอบ CO-RUN ดังนี้

- (1) การปรับเปลี่ยนข้อมูลนำเข้ารูปแบบต่าง ๆ ในช่วงการทดสอบ CO-RUN ระหว่างเดือนกรกฎาคมถึงกันยายนซึ่งปริมาณน้ำเก็บกักหรือสถานะของน้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำของเขื่อนภูมิพลยังอยู่ในเกณฑ์ต่ำ (7.07% ของปริมาณเก็บกักใช้การ เมื่อวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2563) ไม่ส่งผลต่อรูปแบบการระบายน้ำมากนัก ไม่ว่าจะเป็นแบบจำลองพีซีซีหรือแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดที่พยายามระบายน้ำด้วยเงื่อนไขการระบายน้ำต่ำสุดซึ่งเป็นข้อกำหนดของแบบจำลอง ถึงแม้ว่าทั้งสองแบบจำลองจะกำหนดการระบายน้ำตามปัจจัยฤดูกาลและนำข้อมูลปริมาณ

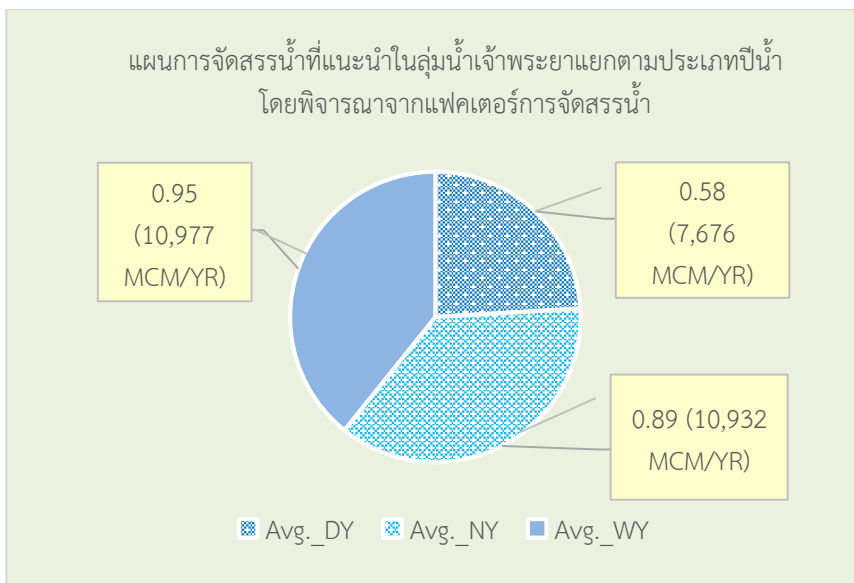
- Sidflow มาพิจารณาร่วมด้วยก็ตาม ประกอบกับปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำซึ่งทำการพยากรณ์ล่วงหน้ายังอยู่ในเกณฑ์ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยระยะยาวค่อนข้างมาก
- (2) แบบจำลองพีซซีกำหนดแนวทางการระบายน้ำในช่วงฤดูแล้งตามปัจจัยความต้องการน้ำท้ายเขื่อน ในขณะที่ในช่วงฤดูฝนจะพิจารณากำหนดการระบายน้ำตามปัจจัยของสถานะน้ำต้นทุนในอ่างเก็บน้ำขณะนั้นและปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำพยากรณ์ล่วงหน้า 3 เดือน ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดในแบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัด อย่างไรก็ตาม แบบจำลองการโปรแกรมเชิงข้อจำกัดกำหนดให้มีการระบายน้ำในช่วงฤดูแล้งเพียง 80% ของปริมาณความต้องการน้ำทั้งหมด ซึ่งหักลบ 50% ของปริมาณ Sidflow ทางซ้ายท้ายเขื่อนแล้ว ในทำนองเดียวกัน ในช่วงฤดูฝน กำหนดให้มีการระบายน้ำเท่ากับ 100% ของปริมาณความต้องการน้ำทั้งหมด ซึ่งหักลบ 50% ของปริมาณ Sidflow ทางซ้ายท้ายเขื่อนแล้ว
 - (3) การจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำระยะยาว (พ.ศ. 2543–2563) และระยะสั้น (พ.ศ. 2562–2563) ด้วยแบบจำลองพีซซีสามารถเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลสูงขึ้น 5,278 และ 413 ล้านลูกบาศก์เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำเก็บกักจริงเมื่อวันที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2563

A.4 ผลการวิเคราะห์แผนการจัดสรรน้ำที่แนะนำ

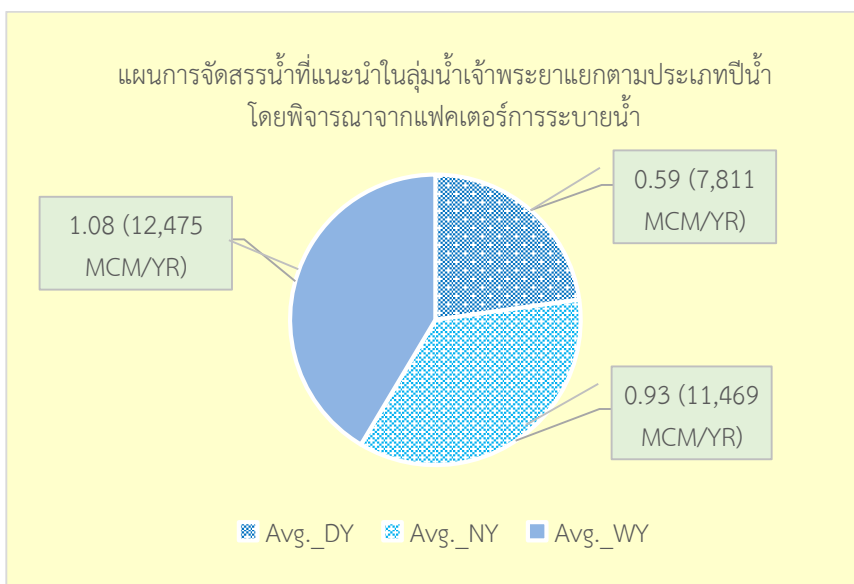
ในท้ายที่สุดของการทดสอบ CO-RUN ได้มีการนำเสนอ 2 แพคเตอร์สำหรับนำไปใช้ในการตัดสินใจบริหารจัดการน้ำในอ่างเก็บน้ำ ได้แก่ (1) แพคเตอร์การจัดสรรน้ำ (Water Allocation Factor) และ (2) แพคเตอร์การระบายน้ำ (Water Release Factor) โดยทำการวิเคราะห์แผนการจัดสรรน้ำที่เหมาะสมแยกตามประเภทปีน้ำได้แก่ ปีน้ำมาก (Wet Year, WY) ปีน้ำปกติ (Normal Year, NY) และปีน้ำน้อย (Dry Year, DY) ดังแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในรูปแผนวทที่ A-30 และรูปแผนวทที่ A-31

สำหรับแพคเตอร์การจัดสรรน้ำ (Water Allocation Factor) ได้จากการคำนวณหาสัดส่วนระหว่างแผนการจัดสรรน้ำรายปี (Yearly Water Allocation from RID and EGAT Plan) ของกรมประมงและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยต่อปริมาณความต้องการน้ำทั้งหมดรายปีในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ (Total Water Demand) จากนั้นหาค่าเฉลี่ยแยกตามประเภทปีน้ำเพื่อนำมากำหนดแผนการจัดสรรน้ำที่เหมาะสม

สำหรับแพคเตอร์การระบายน้ำ (Water Release Factor) ได้จากการคำนวณหาสัดส่วนระหว่างปริมาณการระบายน้ำจริงของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์รายปี (Yearly Actual Release) ต่อปริมาณความต้องการน้ำทั้งหมดรายปีในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาใหญ่ (Total Water Demand) จากนั้นหาค่าเฉลี่ยแยกตามประเภทปีน้ำเพื่อนำมากำหนดแผนการจัดสรรน้ำที่เหมาะสม



รูปผนวกที่ A-30 แผนการจัดสรรน้ำที่แนะนำในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาแยกตามประเภทปีน้ำโดยพิจารณาจากแฟคเตอร์การจัดสรรน้ำ



รูปผนวกที่ A-31 แผนการจัดสรรน้ำที่แนะนำในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาแยกตามประเภทปีน้ำโดยพิจารณาจากแฟคเตอร์การระบายน้ำ

ข้อสรุปที่สำคัญจากผลการวิเคราะห์มีดังนี้

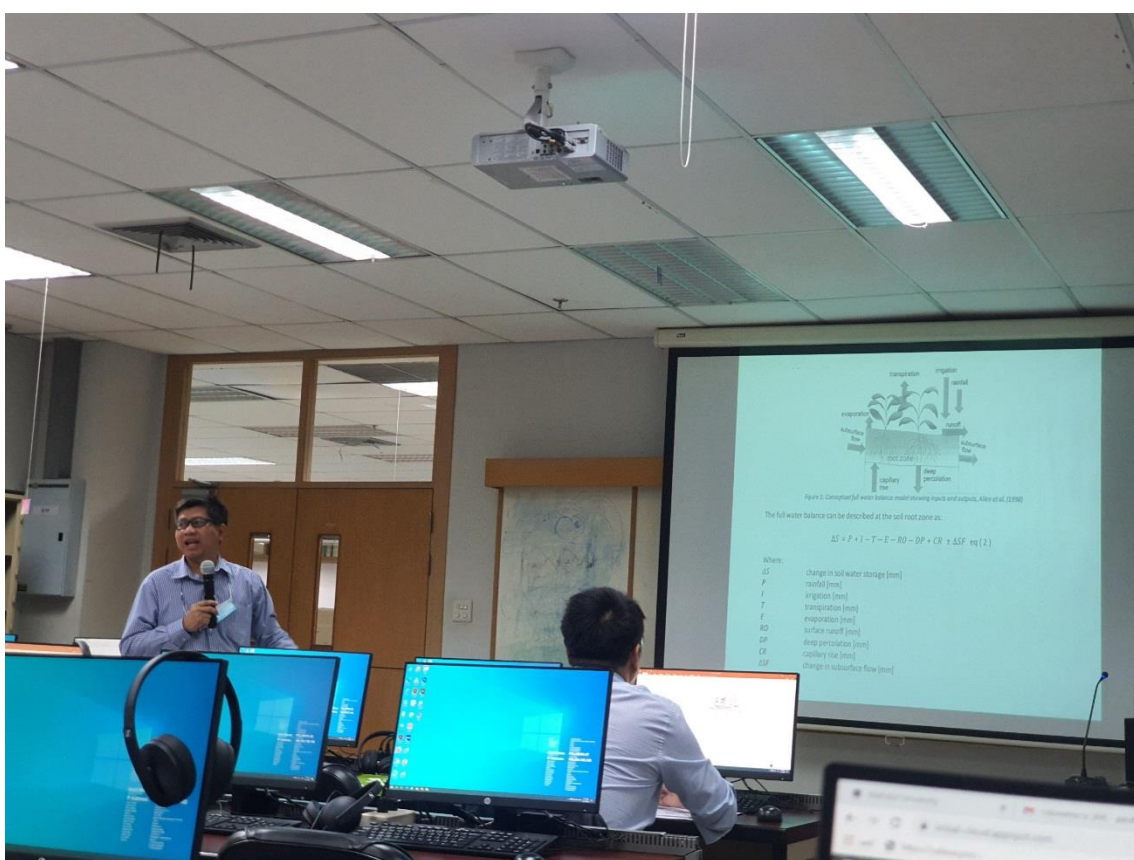
- (1) แผนการจัดสรรน้ำที่แนะนำในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาโดยพิจารณาจากแฟคเตอร์การจัดสรรน้ำในปีน้ำมาก ปีน้ำปกติ และปีน้ำน้อยเท่ากับ 10,977, 10,932 และ 7,676 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปีตามลำดับ
- (2) แผนการจัดสรรน้ำที่แนะนำในกลุ่มน้ำเจ้าพระยาโดยพิจารณาจากแฟคเตอร์การระบายน้ำในปีน้ำมาก ปีน้ำปกติ และปีน้ำน้อยเท่ากับ 12,475, 11,469 และ 7,811 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปีตามลำดับ

ภาคผนวก B

ภาพการจัดการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการเพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้และเทคโนโลยีจากโครงการวิจัย
“การใช้งาน Cloud-Based IrrisAT Application และการสร้างแบบจำลองสำหรับงานบริหารจัดการ
เขื่อนด้วยโปรแกรม MATLAB” และ “การบริหารจัดการเขื่อนด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์เบื้องต้นด้วย
ภาษา R และ MiniZinc”

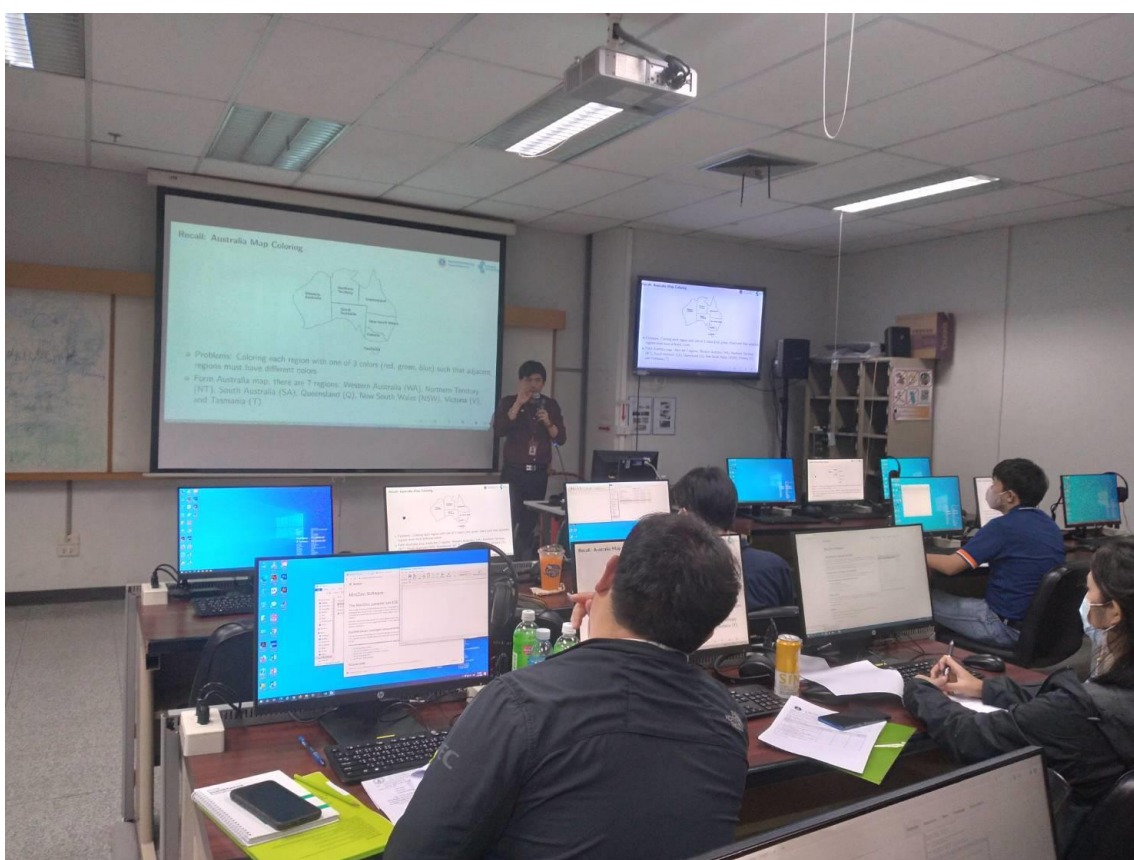


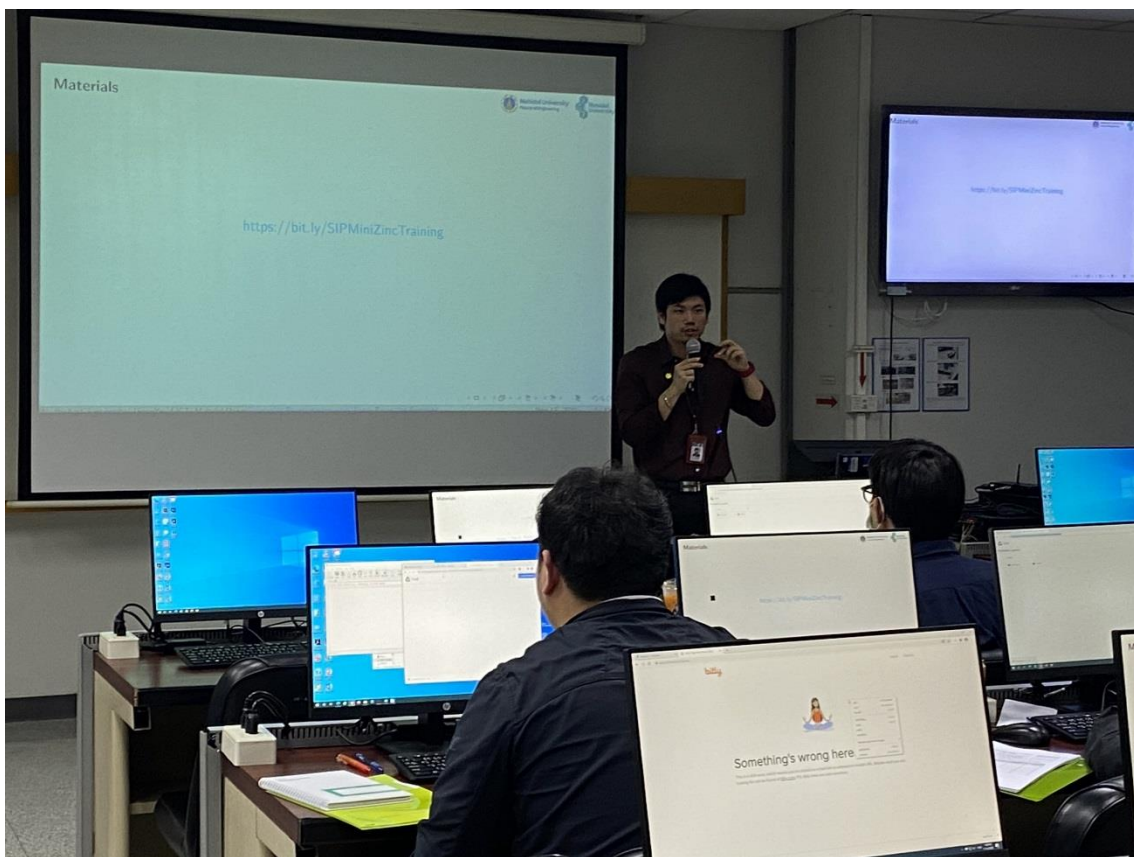
| กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562



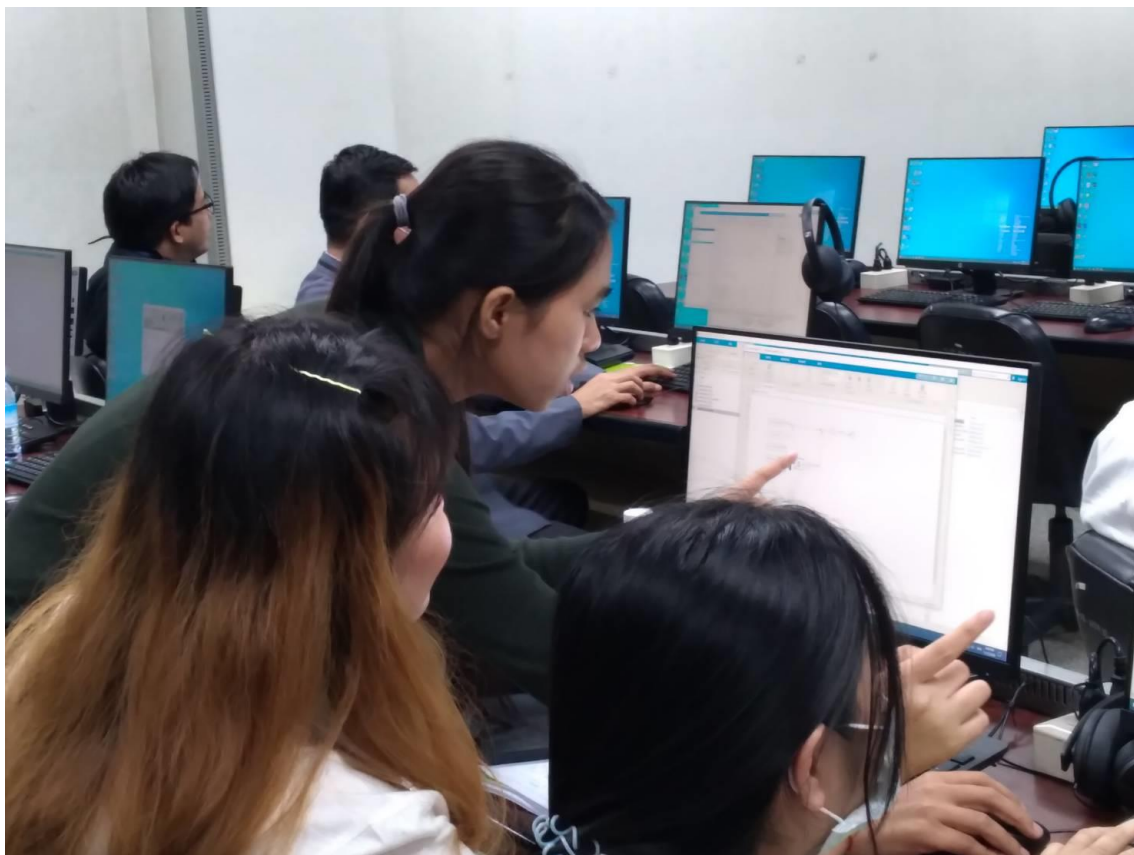


กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1) โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562





| กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562



รูปผนวกที่ B-1 ภาพบรรยากาศการจัดการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการ

| กลยุทธ์การปรับเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำสำหรับพัฒนาการบริหารจัดการน้ำต้นทุนในระยะยาวของเขื่อนภูมิพล (ระยะที่ 1)
โครงการวิจัยเข้มแข็ง ด้านสังคม และการบริหารจัดการน้ำ ประจำปีงบประมาณ 2562