

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาโปรแกรม Genetic Algorithm เพื่อการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM
KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII แบบอัตโนมัติ

Development of Genetic Algorithm Program for Auto Calibration KU-MODNAM
KU-MODNAM-SD and KU-MODNAM-SD-NDII Models

โดย

นายณัฐวุฒิ ใจดี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)

พ.ศ. 2563

ณัฐวุฒิ ใจดี 2563: การพัฒนาโปรแกรม Genetic Algorithm เพื่อการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII แบบอัตโนมัติ ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ) สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศาสตราจารย์นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์, Ph.D. 153 หน้า

แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า สามารถนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในกรณีที่แบบจำลองสามารถสอบเทียบเพื่อหาค่าของชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้โดยอัตโนมัติ ดังนั้น ในการศึกษาจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำ Genetic Algorithm (GA) ซึ่งเป็นกระบวนการแบบสุ่มที่เลียนแบบกลไกทางพันธุกรรมมาพัฒนาเป็นโปรแกรม KU-GA ด้วยภาษา MATLAB โดยได้นำกระบวนการเข้ากันได้แบบสัดส่วนและกระบวนการคัดเลือกที่อยู่บนพื้นฐานของลำดับที่ได้จาก Roulette Wheel มาใช้เพื่อหาฟังก์ชันการเข้าได้ที่เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้ประสิทธิภาพของโปรแกรม KU-GA ที่ได้พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้ได้รับการทดสอบโดยการเชื่อมต่อกับ KU-MODNAM, KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII นอกจากนั้นแล้วแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลองได้มีการเชื่อมต่อกับโปรแกรม MOSCEM ที่เป็นกระบวนการในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ได้รับการยอมรับในระดับนานาชาติ จากนั้นโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ที่เชื่อมต่อกับทั้ง 3 แบบจำลองได้ถูกนำมาประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าจำนวน 6 และ 12 สถานีที่ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำปึงตอนบนและในลุ่มน้ำชีตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า KU-GA สามารถประเมินน้ำท่าได้ถูกต้องใกล้เคียงในระดับเดียวกันกับโปรแกรม MOSCEM ในทุกสถานีวัดน้ำท่าของทั้ง 2 ลุ่มน้ำ โดยแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง นอกจากนั้นแล้ว KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM ที่เชื่อมต่อกับ KU-GA สามารถประเมินน้ำท่าด้วยความถูกต้องใกล้เคียงกันที่ 2 สถานีวัดน้ำท่าด้านท้ายน้ำที่ทำการสอบเทียบแบบจำลองของทั้ง 2 ลุ่มน้ำ รวมทั้งผลการประเมินน้ำท่าจำนวน 5 และ 12 สถานีที่สถานีวัดน้ำท่าด้านเหนือของสถานีที่ทำการสอบเทียบแบบจำลองของกลุ่มน้ำปึงตอนบนและลุ่มน้ำชีซึ่งเป็นผลพลอยได้จาก KU-MODNAM-SD ตามลำดับ ทั้งนี้ ยกเว้นผลการประเมินน้ำท่าที่มีปริมาณการไหลต่ำๆ ที่แบบจำลอง KU-MODNAM-SD ให้ผลการประเมินที่ต่ำกว่าแบบจำลอง KU-MODNAM อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เมื่อนำแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII มาประยุกต์เพื่อการประเมินน้ำท่าพบว่าแบบจำลองนี้สามารถช่วยเพิ่มความถูกต้องในการประเมินปริมาณการไหลต่ำๆ ได้อย่างมีนัยสำคัญรวมทั้งให้ผลการประเมินน้ำท่าในภาพรวมในส่วนอื่นได้เท่าเทียมกับแบบจำลอง KU-MODNAM-SD ดังนั้น แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII ที่สามารถสอบเทียบแบบจำลองด้วย KU-GA จึงมีความเหมาะสมมากที่สุดที่แนะนำจากการศึกษานี้เพื่อนำไปใช้เพื่อการประเมินน้ำท่าสำหรับลุ่มน้ำอื่น ๆ ของประเทศไทยต่อไป

Natthawut Jaidee 2020: Development of Genetic Algorithm Program for Auto Calibration KU-MODNAM KU-MODNAM-SD and KU-MODNAM-SD-NDII Models. Master of Engineering (Water Resources Engineering), Major Field: Water Resources Engineering, Department of Water Resources Engineering. Thesis Advisor: Professor Nuchanart Sriwongsitanon, Ph.D. 153 pages.

Rainfall-runoff model can be more effectively utilized by an automatic calibration to obtain the model parameter set. Therefore, this study aims to employ the Genetic Algorithm (GA) which is a random base algorithm by simulating a genetic mechanism to develop Program KU-GA using MATLAB language. The proportional fitness and rank based roulette wheel selection were used to optimize the multi-fitness functions. The performance of developed KU-GA was tested by connecting with the KU-MODNAM, KU-MODNAM-SD and KU-MODNAM-SD-NDII models. Moreover, these 3 models were also connected to Program MOSCEM which is a worldwide accepted optimization procedure. KU-GA and MOSCEM which are connected to these 3 models were later used for runoff estimation at 6 and 13 gauging stations located in the Upper Ping River Basin (UPRB) and Chi River Basin (CRB), respectively. The results show that KU-GA can be used to estimate runoff with the accuracy in the same level as provided by MOSCEM in every station of these 2 river basins by all 3 models. Furthermore, KU-MODNAM-SD and KU-MODNAM which are connected to KU-GA can estimate runoff with the similar degree of accuracy at the 2 calibrated downstream stations of these 2 river basins. This is including runoff estimates at 5 and 12 stations located upstream of calibrated stations of UPRB and CRB which are the by-products produced by KU-MODNAM-SD, respectively. This is except for low flow - estimated by KU-MODNAM-SD - which are significant lower accuracy compared to the results given by KU-MODNAM. However, by applying KU-MODNAM-SD for runoff estimation, the results show that this model can significantly improve the accuracy of low flow estimates while the other overall accuracy is not lower than the result given by KU-MODNAM-SD. Therefore, KU-MODNAM-SD-NDII which can be automatic calibrated using KU-GA is the most suitable model suggested in this study to be applied for runoff estimates for other river basins in Thailand.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้า ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ให้คำแนะนำและสนับสนุนให้ข้าพเจ้าจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งวางแผน ปรับปรุงงานวิจัยให้สามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ จุลล่งไปด้วยดี และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณพิมพ์ พุทธิรักษา มะเปี่ยม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ข้อคิดเห็น และให้คำปรึกษาในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำและคณาจารย์ทุก ๆ ท่าน ทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ขอขอบคุณ นายเชิรชาติ สุวงศ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อมูลและร่วมในการพัฒนาโปรแกรม KU-GA ขอขอบคุณ นางสาววาสนา จันทร์แดง และนายศรัณภัสร์ เอี่ยมอำไพ ที่ได้คำแนะนำและสนับสนุนข้อมูลอัตราการไหลรายวันที่ได้ทำการรวบรวมจากกรมชลประทาน ข้อมูลพื้นที่ลุ่มน้ำ ข้อมูลความลึกฝนรายวันแบบกริดจากผลิตภัณฑ์ SENSWAT-GGR และข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิงรายวันแบบกริด ที่ได้ทำการวิเคราะห์แบ่งตามพื้นที่ลุ่มน้ำ ขอขอบคุณ ศูนย์วิจัย Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management (SENSWAT) ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือเครื่องใช้ รวมทั้งข้อมูลที่จำเป็นในงานวิจัยนี้

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบแต่บิดา มารดา อาจารย์ที่ได้อบรมสั่งสอน รวมทั้งครอบครัวที่เป็นกำลังใจ และสนับสนุนด้านการศึกษาของผู้วิจัยตลอดมา

ณัฐวุฒิ ใจดี

พฤศจิกายน 2563

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	25
อุปกรณ์	25
วิธีการ	25
ผลและวิจารณ์	51
สรุปและข้อเสนอแนะ	89
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	91
ภาคผนวก	94
ภาคผนวก ก ผลการประเมินกราฟน้ำท่าที่ได้จากการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM, KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII	95
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	153

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ช่วงเวลาและสภาพอากาศในแต่ละฤดูของกลุ่มน้ำปึงตอนบน	9
2	ช่วงเวลาและสภาพอากาศในแต่ละฤดูของกลุ่มน้ำชี	10
3	ขั้นตอนการประเมินน้ำท่าโดยแบบจำลอง MODNAM	17
4	พื้นที่ลุ่มน้ำและความยาวลำน้ำจากด้านเหนือน้ำไปยังจุดออกด้านท้ายน้ำของ 11 ลุ่มน้ำย่อย ในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1	28
5	พื้นที่ลุ่มน้ำและความยาวลำน้ำจากด้านเหนือน้ำไปยังจุดออกด้านท้ายน้ำของ 98 ลุ่มน้ำย่อย ในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A	29
6	ข้อมูลความลึกฝนเฉลี่ยของ 11 ลุ่มน้ำย่อย ในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1	34
7	ข้อมูลความลึกฝนเฉลี่ยของ 98 ลุ่มน้ำย่อย ในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A	35
8	อัตราการคายระเหยเฉลี่ยรายเดือนและรายปีของ 11 ลุ่มน้ำย่อย ในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1	39
9	อัตราการคายระเหยเฉลี่ยรายเดือนและรายปีของ 98 ลุ่มน้ำย่อย ในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A	40
10	รายละเอียดของข้อมูลน้ำท่าในกลุ่มน้ำปึงตอนบนที่ใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง	44
11	รายละเอียดของข้อมูลน้ำท่าในกลุ่มน้ำชีที่ใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง	44
12	ค่าที่เหมาะสมที่สุด (X) และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Z) ตามลำดับรุ่นของประชากรจากการดำเนินงานของโปรแกรม KU-GA	53
13	พารามิเตอร์ควบคุมการดำเนินงานของโปรแกรม KU-GA ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM	55
14	พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-MODNAM จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 6 สถานี ในกลุ่มน้ำปึงตอนบน	57

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
15	ตัวแปรทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 6 สถานี ในลุ่มน้ำปึงตอนบน	58
16	พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-MODNAM จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 13 สถานี ในลุ่มน้ำชี	61
17	ค่าทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 13 สถานี ในลุ่มน้ำชี	62
18	พารามิเตอร์ควบคุมการดำเนินงานของโปรแกรม KU-GA ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD	65
19	พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1	67
20	ค่าทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1	67
21	พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A	70
22	ค่าทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A	70
23	พารามิเตอร์ควบคุมการดำเนินงานของโปรแกรม KU-GA ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII	73

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
24	พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1	75
25	ค่าทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1	75
26	พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A	78
27	ค่าทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A	78
28	ค่าทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM และ KU-MODNAM-SD จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วย โปรแกรม KU-GA สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 6 สถานี ในลุ่มน้ำปึงตอนบน	82
29	ค่าทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM และ KU-MODNAM-SD จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 13 สถานี ในลุ่มน้ำชี	83
30	ค่าทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 6 สถานี ในลุ่มน้ำปึงตอนบน	86
31	ค่าทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 13 สถานี ในลุ่มน้ำชี	87

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ขอบเขตของพื้นที่ศึกษาของสถานีวัดน้ำท่า P.1 และสถานีย่อย ในกลุ่มน้ำปึงตอนบน	7
2	ทิศทางของลมมรสุม พายุหมุนเขตร้อน และร่องความกดอากาศต่ำที่มี อิทธิพลต่อสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย	8
3	ขอบเขตของพื้นที่ศึกษาในกลุ่มน้ำชี	10
4	ขั้นตอนการดำเนินงานของ Genetic Algorithm	12
5	โครงสร้างของแบบจำลอง MODNAM	16
6	การเปลี่ยนแปลงของปริมาณการเก็บกักในช่วงเวลา Δt	21
7	การจำลองรูปแบบการเคลื่อนที่ของน้ำผิวดินในลำน้ำ	22
8	ขอบเขตของพื้นที่ศึกษาของสถานีวัดน้ำท่า P.1 และสถานีย่อย ในกลุ่มน้ำปึงตอนบน	27
9	ขอบเขตของพื้นที่ศึกษาของสถานีวัดน้ำท่า E.20A และสถานีย่อย ในกลุ่มน้ำชี	29
10	ขั้นตอนการดำเนินงานของโปรแกรม KU-GA	47
11	การดูเข้าหาค่าที่น้อยที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ โปรแกรม KU-GA ตามจำนวนรุ่นประชากร	54
12	การเปรียบเทียบตัวแปรทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดย โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 6 สถานี ในกลุ่มน้ำปึงตอนบน	59
13	การเปรียบเทียบตัวแปรทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดย โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 13 สถานี ในกลุ่มน้ำชี	64
14	การเปรียบเทียบตัวแปรทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดย โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของ สถานีวัดน้ำท่า P.1	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
15	การเปรียบเทียบตัวแปรทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A	72
16	การเปรียบเทียบตัวแปรทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1	76
17	การเปรียบเทียบตัวแปรทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A	80
ภาพผนวกที่		
ก1	การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า P.4A	96
ก2	การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า P.20	97
ก3	การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า P.75	98
ก4	การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า P.67	99

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก5 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า P.21	100
ก6 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า P.1	101
ก7 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า E.73	102
ก8 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า E.72	103
ก9 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า E.32A	104
ก10 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า E.5	105
ก11 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า E.23	106
ก12 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า E.6C	107

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก13 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า E.21	108
ก14 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า E.9	109
ก15 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า E.66	110
ก16 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า E.18	111
ก17 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า E.54	112
ก18 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า E.70	113
ก19 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า E.20A	114
ก20 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำท่า P.4A	115

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก21 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า P.20	116
ก22 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า P.75	117
ก23 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า P.67	118
ก24 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า P.21	119
ก25 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า P.1	120
ก26 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.73	121
ก27 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.72	122
ก28 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.32A	123

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก29 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.5	124
ก30 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.23	125
ก31 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.6C	126
ก32 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.21	127
ก33 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.9	128
ก34 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.66	129
ก35 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.18	130
ก36 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.54	131

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก37 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.70	132
ก38 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.20A	133
ก39 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า P.4A	134
ก40 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า P.20	135
ก41 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า P.75	136
ก42 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า P.67	137
ก43 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า P.21	138
ก44 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า P.1	139

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก45 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.73	140
ก46 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.72	141
ก47 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.32A	142
ก48 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.5	143
ก49 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.23	144
ก50 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.6C	145
ก51 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.21	146
ก52 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.9	147

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก53 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.66	148
ก54 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.18	149
ก55 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.54	150
ก56 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.70	151
ก57 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.20A	152

**การพัฒนาโปรแกรม Genetic Algorithm เพื่อการสอบเทียบแบบจำลอง
KU-MODNAM KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII แบบอัตโนมัติ**

**Development of Genetic Algorithm Program for Auto Calibration
KU-MODNAM KU-MODNAM-SD and KU-MODNAM-SD-NDII Models**

คำนำ

แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ได้ถูกนำมาใช้เพื่อการประเมินน้ำท่าสำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งที่มีและไม่มีสถานีวัดน้ำท่าตั้งอยู่ (Gauged and Ungauged Catchments) เพื่อนำปริมาณน้ำท่าที่ประเมินได้ไปบริหารจัดการให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อทุกภาคส่วนของการใช้น้ำ รวมทั้งเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากสภาวะน้ำท่วมหรือสภาวะความแห้งแล้ง ดังนั้น แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า จึงได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบัน อาทิเช่น แบบจำลอง SCS (Sharma and Singh, 1992), NAM (สุพรรณษา และนุชนารถ, 2550), FLEXL (Fenicia *et al.*, 2008), FLEX-Topo (Gao *et al.*, 2014) และ TANK (Song *et al.*, 2011) เป็นต้น โดยแต่ละแบบจำลองจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน รวมทั้งมีความแตกต่างของโครงสร้างของแบบจำลอง ความต้องการข้อมูลด้านเข้า และความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่า อย่างไรก็ตาม ทุกแบบจำลองจำเป็นต้องผ่านกระบวนการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model Calibration and Validation) ซึ่งโดยทั่วไปจะดำเนินการโดยใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error) ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง (Model Parameters) เพื่อให้เกิดการเข้ากันได้มากที่สุดระหว่างกราฟน้ำท่าที่ได้จากการประเมิน โดยแบบจำลองและกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด อย่างไรก็ตาม การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยวิธีลองผิดลองถูกมีแนวโน้มที่จะไม่ได้ค่าของพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดรวมทั้งต้องใช้เวลาในการดำเนินงานมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงได้มีการนำกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) มาประยุกต์ใช้เพื่อการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง ทั้งนี้ วิธีการในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่เป็นที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่งคือ Genetic Algorithm (GA) ซึ่งเป็นกระบวนการทางพันธุกรรมเพื่อการสร้างกลุ่มประชากรใหม่ที่มีแนวโน้มไปสู่การหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ผลการประยุกต์ใช้ Genetic Algorithm เพื่อการสอบเทียบแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า อาทิเช่น การสอบเทียบแบบจำลอง SAC-SMA โดยการประยุกต์ใช้ Genetic Algorithm มาช่วยในการหาพารามิเตอร์

ควบคุมแบบจำลอง ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า GA สามารถช่วยลดระยะเวลาในการสอบเทียบแบบจำลอง และให้ค่าพารามิเตอร์ควบคุมแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพ (Chlumecky *et al.*, 2017) นอกจากนี้แล้ว โปรแกรม MOSCEM (Vrugt *et al.*, 2003) ได้รับการยอมรับในการนำมาใช้เพื่อการค้าที่เหมาะสมที่สุด โดยได้ถูกนำมาใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL และ FLEX-TOPO ได้อย่างมีประสิทธิภาพและถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลายพื้นที่ลุ่มน้ำทั่วโลก รวมทั้งลุ่มน้ำปิงตอนบน (กัมพล และนุชนารถ, 2563; Gao *et al.*, 2014; Sriwongsitanon *et al.*, 2016; Gao *et al.*, 2016)

แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ที่ได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้มากที่สุดแบบจำลองหนึ่งคือ แบบจำลอง NAM ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นโดย The Hydrological Section of the Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering at the Technical University of Denmark และต่อมา Danish Hydraulic Institute (DHI) ได้รวมแบบจำลอง NAM ไว้ในซอฟต์แวร์ MIKE 11 (นุชนารถ, 2560) อย่างไรก็ตาม กระบวนการบางส่วนของแบบจำลอง NAM สามารถนำออกโดยไม่สร้างผลกระทบต่อความถูกต้องในการประเมินน้ำท่ารวมทั้งเพื่อให้เหมาะสมกับการประเมินน้ำท่าสำหรับพื้นที่ของประเทศไทย ดังนั้น นุชนารถ (2560) จึงได้ทำการปรับปรุงแบบจำลอง NAM และให้ชื่อว่าแบบจำลอง Modified NAM (MODNAM) เพื่อให้สามารถใช้งานได้ง่ายขึ้นและยังคงมีประสิทธิภาพในการประเมินน้ำท่าที่ถูกต้องใกล้เคียงกับน้ำท่าที่ได้จากสถานีตรวจวัด อย่างไรก็ตามแบบจำลอง MODNAM เป็นแบบจำลองประเภทลัมพ์ ที่มีข้อจำกัดคือไม่สามารถประเมินน้ำท่าในลุ่มน้ำสาขาย่อยของพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่าได้ ในขณะที่แบบจำลองประเภทกึ่งกระจายตัว (Semi-Distributed Model) สามารถประเมินน้ำท่าลงไปถึงระดับลุ่มน้ำย่อยหรือจุดที่สนใจ จึงได้รับความสนใจในการนำมาแก้ปัญหา ตัวอย่างแบบจำลองที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ URBS (Mapiam and Sriwongsitanon, 2009), SWAT (Venkatesh *et al.*, 2018) รวมทั้งแบบจำลอง KU-FLEX-SD ที่ วาสนาและนุชนารถ (2562) ดำเนินการพัฒนาแบบจำลอง FLEX_L ให้สามารถประเมินน้ำท่าลงไปถึงระดับลุ่มน้ำย่อยหรือจุดที่สนใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ Sriwongsitanon *et al.*, 2020 ได้พัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII จากการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และความจุเก็บกักสูงสุดของชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ($S_{u_{max}}$) ที่เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการประเมินน้ำท่าในระดับลุ่มน้ำย่อย ทำให้ประสิทธิภาพการประเมินน้ำท่าของแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII ในช่วงหน้าแล้ง หรือช่วงเวลาที่มียัตราการไหลต่ำ (Low Flow) มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงได้ทำการสร้างโปรแกรม KU-GA ที่เชื่อมต่อกับแบบจำลอง KU-MODNAM รวมทั้งแบบจำลอง KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII ซึ่งเป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าแบบกึ่งกระจายตัว (Semi-Distributed Rainfall-Runoff Model) ที่ได้ทำการพัฒนาในการศึกษานี้ตามหลักการของแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่ได้รับการพัฒนาภายใต้ศูนย์วิจัยการรับรู้จากระยะไกลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management, SENSWAT) จากนั้นทำการตรวจสอบประสิทธิภาพของโปรแกรม KU-GA เปรียบเทียบกับโปรแกรม MOSCEM เพื่อการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM, KU-MODNAM-SD และแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII แบบอัตโนมัติในการประเมินน้ำท่าของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ซึ่งตั้งอยู่ในลุ่มน้ำปิงตอนบนและสถานีวัดน้ำท่า E.20A ซึ่งตั้งอยู่ในลุ่มน้ำชี รวมทั้งสถานีวัดน้ำท่าที่อยู่ในลุ่มน้ำสาขาของพื้นที่รับน้ำฝนทั้ง 2 สถานี นอกจากนั้นแล้วได้มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD ที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง KU-MODNAM รวมทั้งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII ที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลอง KU-MODNAM-SD ก่อนที่จะนำแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII ไปใช้ในการประเมินน้ำท่าสำหรับลุ่มน้ำอื่น ๆ ในประเทศไทยเพื่อใช้ประกอบการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำของประเทศได้ต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาโปรแกรม KU-GA และเชื่อมต่อกับแบบจำลอง KU-MODNAM, KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII เพื่อการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติ
2. เพื่อเชื่อมต่อกับโปรแกรม MOSCEM กับแบบจำลอง KU-MODNAM, KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII เพื่อการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติ
3. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM, KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII สำหรับลุ่มน้ำปึงตอนบนและลุ่มน้ำชี
4. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง KU-MODNAM, KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII ในการประเมินน้ำท่าในลุ่มน้ำปึงตอนบนและลุ่มน้ำชี โดยใช้โปรแกรม KU-GA ในการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติ

ขอบเขตการศึกษา

1. พื้นที่ศึกษาคือลุ่มน้ำปึงตอนบนที่ครอบคลุมพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 และลุ่มน้ำชีซึ่งครอบคลุมพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A ซึ่งมีขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำเท่ากับ 6,140 และ 47,720 ตารางกิโลเมตร ตามลำดับ
2. ใช้ภาษา MATLAB ในการเขียนและพัฒนาโปรแกรม KU-GA แบบจำลอง KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII
3. การพัฒนาแบบจำลอง KU-MODNAM-SD ได้พิจารณาใช้หลักการประเมินน้ำท่าของแบบจำลอง KU-MODNAM และทฤษฎีการเคลื่อนตัวน้ำท่าของ Muskingum ตามแนวทางของการพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-SD

4. การพัฒนาแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII ได้พิจารณาใช้หลักความสัมพันธ์ของดัชนี NDII กับความจุเก็บกักในชั้นดินสูงสุด ตามแนวทางของการพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII

5. ข้อมูลความลึกฝนที่ใช้เป็นข้อมูลด้านเข้าของแบบจำลองเป็นข้อมูลฝนแบบกริดจากผลิตภัณฑ์ SENSWAT-GGR ซึ่งเป็นผลงานวิจัยของศูนย์วิจัย SENSWAT โดยเป็นข้อมูลฝนที่ถูกนำมาตรวจสอบความถูกต้องแบบรายเดือนด้วยวิธี Double Mass Curve และนำมาคำนวณด้วยวิธี Inverse Distance Square ทั้งแบบรายเดือนและรายวัน

6. ข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิงรายวันที่ใช้เป็นข้อมูลด้านเข้าของแบบจำลองเป็นข้อมูลการคายระเหยแบบกริดซึ่งเป็นผลงานวิจัยของศูนย์วิจัย SENSWAT โดยเป็นข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิงที่คำนวณด้วยวิธี Penman Monteith จากข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาทั่วประเทศและนำมาคำนวณด้วยวิธี Inverse Distance Square

7. การแบ่งลุ่มน้ำปึงตอนบนและลุ่มน้ำชีจะใช้ข้อมูลที่ทำการแบ่งไว้แล้วในงานวิจัยที่ดำเนินการโดยวาสนาและนุชนารถ (2562) และศวนันท์และนุชนารถ (2563)

8. แบบจำลอง KU-MODNAM เป็นแบบจำลองที่ทำการเขียนโดยภาษา MATLAB ที่ดำเนินการไว้แล้วในงานวิจัยที่ดำเนินงานโดยศูนย์วิจัย SENSWAT

9. โปรแกรม MOSCEM เป็นโปรแกรมที่ทำการเขียนโดยภาษา MATLAB ที่ดำเนินการไว้แล้วในงานวิจัยของ Vrugt *et al.* (2003)

10. โปรแกรม KU-GA เป็นการพัฒนาเพิ่มเติมให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นจากผลงานของ Siddharth Panwar ซึ่งเป็นนักวิจัยภายใต้ศูนย์วิจัย SENSWAT

การตรวจเอกสาร

1. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 กลุ่มน้ำ คือกลุ่มน้ำปิงตอนบนและกลุ่มน้ำชี โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังต่อไปนี้

1.1 กลุ่มน้ำปิงตอนบน

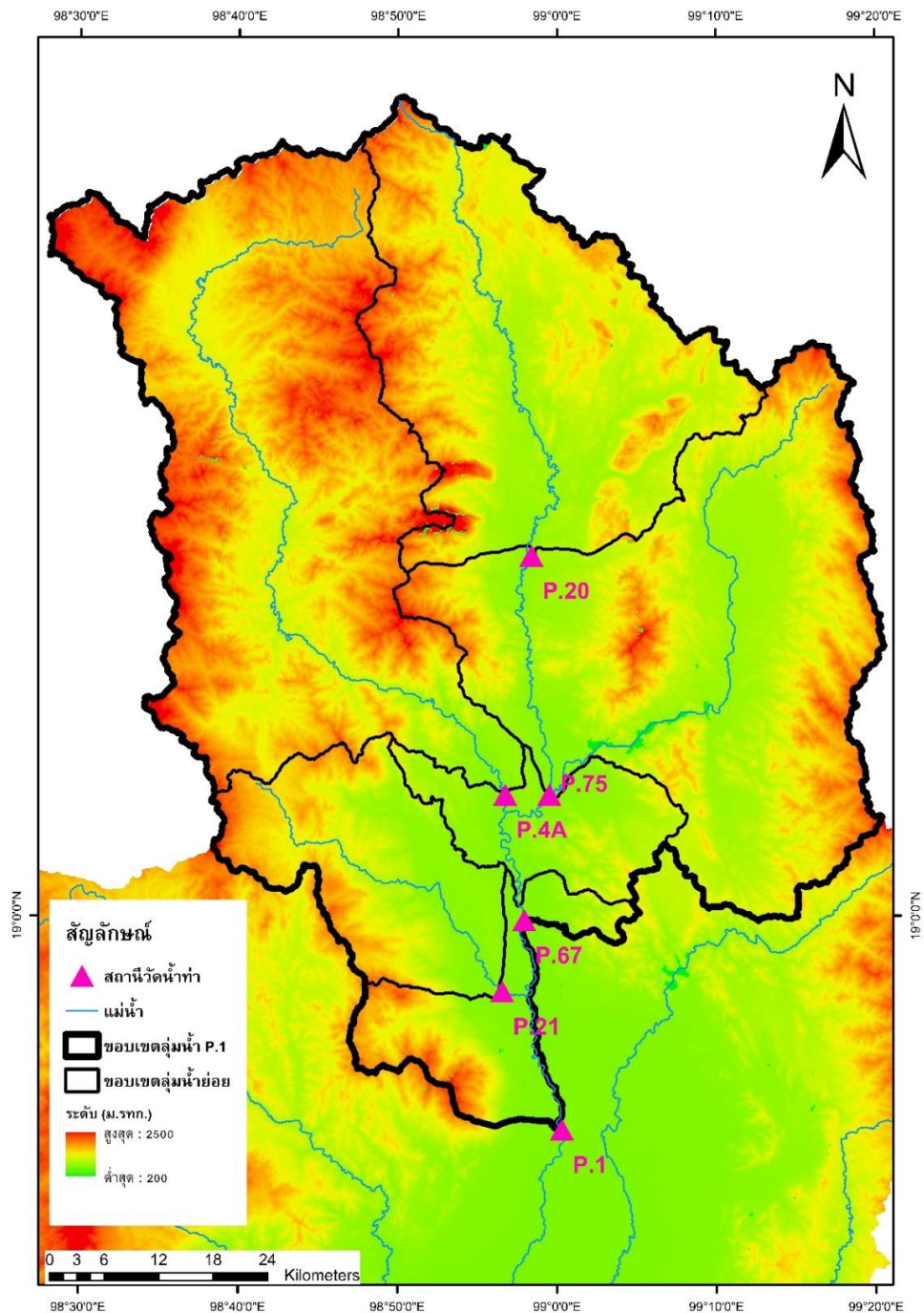
ลักษณะทั่วไป

กลุ่มน้ำปิงตอนบนเป็นพื้นที่ส่วนหนึ่งของกลุ่มน้ำปิงที่ตั้งอยู่เหนืออ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลขึ้นไป มีพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมดประมาณ 25,000 ตารางกิโลเมตร พื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ในเขตจังหวัดเชียงใหม่ และลำพูน ลักษณะภูมิประเทศของกลุ่มน้ำส่วนใหญ่เป็นภูเขาสูงปกคลุมด้วยป่าไม้ และพื้นที่ราบลุ่มบางส่วน แม่น้ำสายหลัก คือ แม่น้ำปิง มีแม่น้ำสาขาที่สำคัญ คือ น้ำแม่จัด น้ำแม่แดง น้ำแม่กวัง แม่น้ำลี และน้ำแม่แจ่ม แม่น้ำปิงมีต้นกำเนิดบริเวณทิวเขาผีปันน้ำในเขตอำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ มีทิศการไหลจากเหนือสู่ใต้ (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร [สสนท.], 2555) สำหรับในการศึกษานี้ได้พิจารณาใช้พื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 6,140 ตารางกิโลเมตร และเป็นส่วนหนึ่งของพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนเป็นพื้นที่ศึกษา รวมทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ซึ่งประกอบด้วยสถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 สำหรับขอบเขตของพื้นที่ศึกษาแสดงดังในภาพที่ 1 (วาสนาและนุชนารถ, 2562)

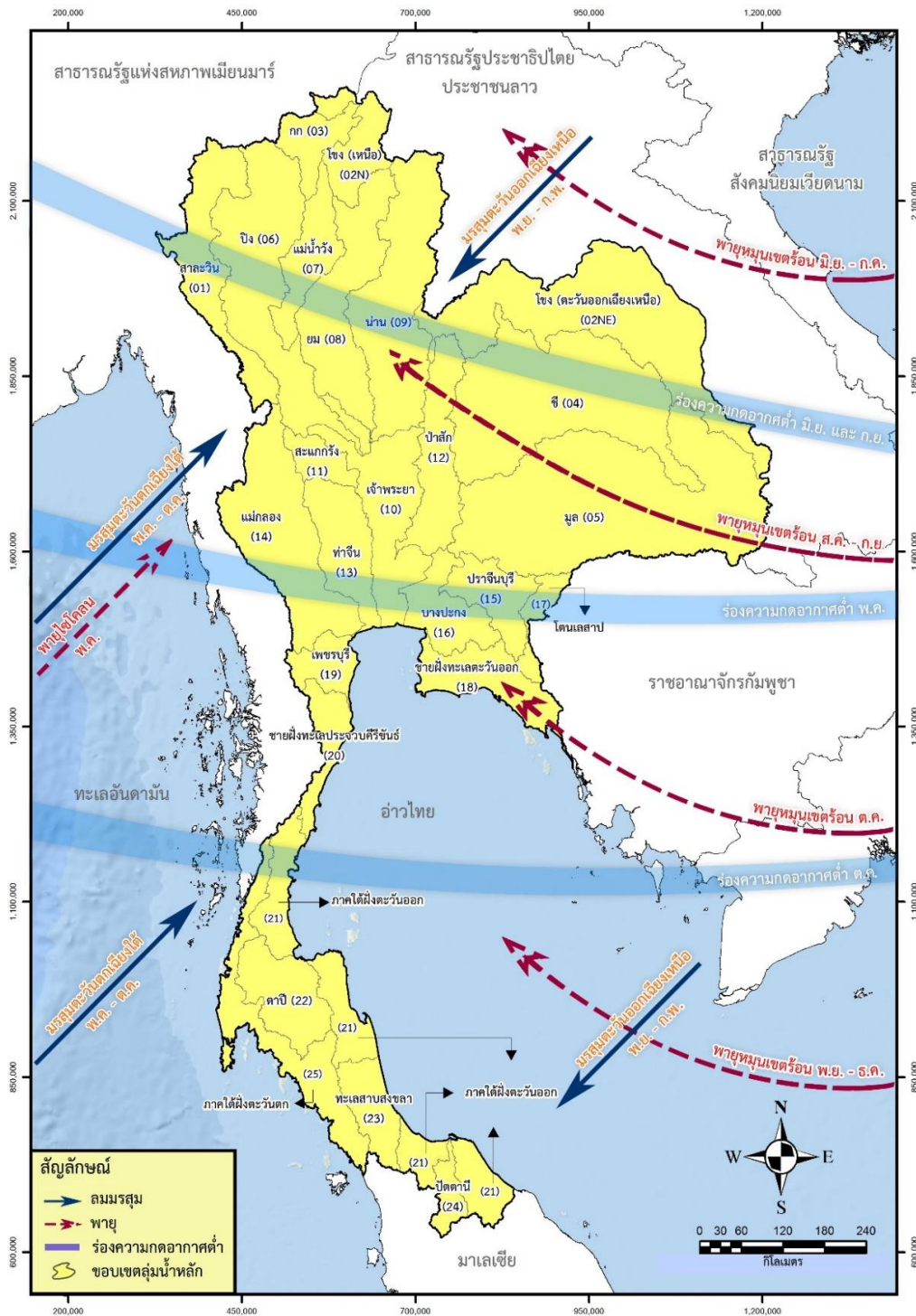
สภาพภูมิอากาศ

กลุ่มน้ำปิงตอนบนมีสภาพภูมิอากาศอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ โดยลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจะพัดพามวลอากาศเย็นและแห้งจากประเทศจีนมาปกคลุมกลุ่มน้ำปิงตอนบนในช่วงเดือนตุลาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ ทำให้มีอากาศหนาวและแห้ง ส่วนลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะพัดพามวลอากาศชื้นจากมหาสมุทรอินเดียและอ่าวไทยปกคลุมกลุ่มน้ำปิงตอนบนในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม ทำให้มีสภาพอากาศชื้นและฝนตกชุก นอกจากนั้นแล้วพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนยังได้รับอิทธิพลจากพายุ

หมุนเขตร้อน และร่องความกดอากาศต่ำที่พัดผ่านในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม ดังแสดงในภาพที่ 2 ส่งผลให้แบ่งสภาพอากาศของกลุ่มน้ำปิงตอนบนได้เป็น 3 ฤดู คือ ฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว ซึ่งมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 1 ขอบเขตของพื้นที่ศึกษาของสถานีวัดน้ำท่า P.1 และสถานีย่อยในกลุ่มน้ำปิงตอนบน



ภาพที่ 2 ทิศทางของลมมรสุม พายุหมุนเขตร้อน และร่องความกดอากาศต่ำที่มีอิทธิพลต่อสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย

ที่มา: โครงการศึกษาความมั่นคงอย่างยั่งยืนทั้ง 25 ลุ่มน้ำ กรมทรัพยากรน้ำ (2559)

ตารางที่ 1 ช่วงเวลาและสภาพอากาศในแต่ละฤดูของกลุ่มน้ำปิงตอนบน

ฤดูกาล	ช่วงเดือน	สภาพอากาศ
ฤดูร้อน	ก.พ. – พ.ค.	ร้อนอบอ้าว เนื่องจากสภาพภูมิประเทศที่มีลักษณะเป็นแอ่งกระทะ บางช่วงอาจมีพายุฤดูร้อนที่ทำให้เกิดฝนตกและลมกระโชกแรง
ฤดูฝน	พ.ค. – ต.ค.	ฝนตกชุก บางช่วงอาจได้รับอิทธิพลจากพายุหมุนเขตร้อนที่อ่อนกำลังลงทำให้ฝนตกหนักถึงหนักมากในช่วงเดือนกันยายน
ฤดูหนาว	ต.ค. – ก.พ.	หนาวเย็นและแห้ง เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่พัดมวลอากาศเย็นและแห้งจากประเทศจีนมาปกคลุมในพื้นที่

ที่มา: กองพัฒนาอตุณิยมวิทยา กรมอตุณิยมวิทยา (2563)

1.2 กลุ่มน้ำชี

ลักษณะทั่วไป

กลุ่มน้ำชีเป็น 1 ใน 25 กลุ่มน้ำหลักของประเทศไทยและมีพื้นที่ลุ่มน้ำประมาณ 49,131.92 ตารางกิโลเมตร หรือ 30,707,453 ไร่ มีพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ในเขต 14 จังหวัด ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้แก่ ชัยภูมิ ขอนแก่น หนองบัวลำภู อุดรธานี มหาสารคาม นครราชสีมา เลย เพชรบูรณ์ กาฬสินธุ์ ร้อยเอ็ด ยโสธร อุบลราชธานี ศรีสะเกษ และมุกดาหาร กลุ่มน้ำชีมีพื้นที่ที่ศเหนือติดกับลุ่มน้ำโขง ทิศใต้ติดกับลุ่มน้ำมูล ทิศตะวันออกติดกับลุ่มน้ำโขงและลุ่มน้ำมูล ทิศตะวันตกติดกับลุ่มน้ำป่าสัก ลักษณะภูมิประเทศบริเวณต้นน้ำ เป็นภูเขาสูง ส่วนบริเวณกลางน้ำและท้ายน้ำของกลุ่มน้ำมีลักษณะพื้นที่เป็นที่ราบและลูกคลื่นลอนตลับกัน แม่น้ำสายหลักคือ แม่น้ำชี มีแม่น้ำสาขาที่สำคัญคือ น้ำพรม น้ำพอง น้ำเชิญ ลำปาว และน้ำยัง สำหรับขอบเขตของพื้นที่ลุ่มน้ำชีแสดงดังในภาพที่ 3

สภาพภูมิอากาศ

กลุ่มน้ำชีมีสภาพอากาศอยู่ภายใต้อิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือเช่นเดียวกับลุ่มน้ำปิงตอนบนแต่ต่างกันที่ช่วงเวลา โดยลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะพัดพามวลอากาศชื้นจากมหาสมุทรอินเดียและอ่าวไทยเข้าปกคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำชีในช่วงเดือน

2. วิธี Genetic Algorithm

2.1 หลักการของ Genetic Algorithm

Genetic Algorithm (GA) เป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ที่มีพื้นฐานมาจากการคัดเลือกทางธรรมชาติและวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ หรือที่เรียกว่าหลักทางพันธุกรรม โดยในปี 1960 John Holland ได้ริเริ่มสร้าง GA ขึ้นมาตามแนวคิดจากทฤษฎีวิวัฒนาการของ Darwin (Darwin's Theory of Evolution) ต่อมาในปี 1989 David E. Goldberg ซึ่งเป็นนักศึกษาในความดูแลของ John Holland ได้ขยายผล GA ให้สามารถใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพ โดย GA มีจุดเด่นที่แตกต่างจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดวิธีอื่นๆ ทั้งนี้ David E. Goldberg ได้สรุปหลักการของ GA ไว้ดังต่อไปนี้

1) GA ดำเนินงานบนพื้นฐานของรหัสของชุดพารามิเตอร์ (Coding of the Parameter Set) ไม่ใช่ค่าของพารามิเตอร์ตรงๆ

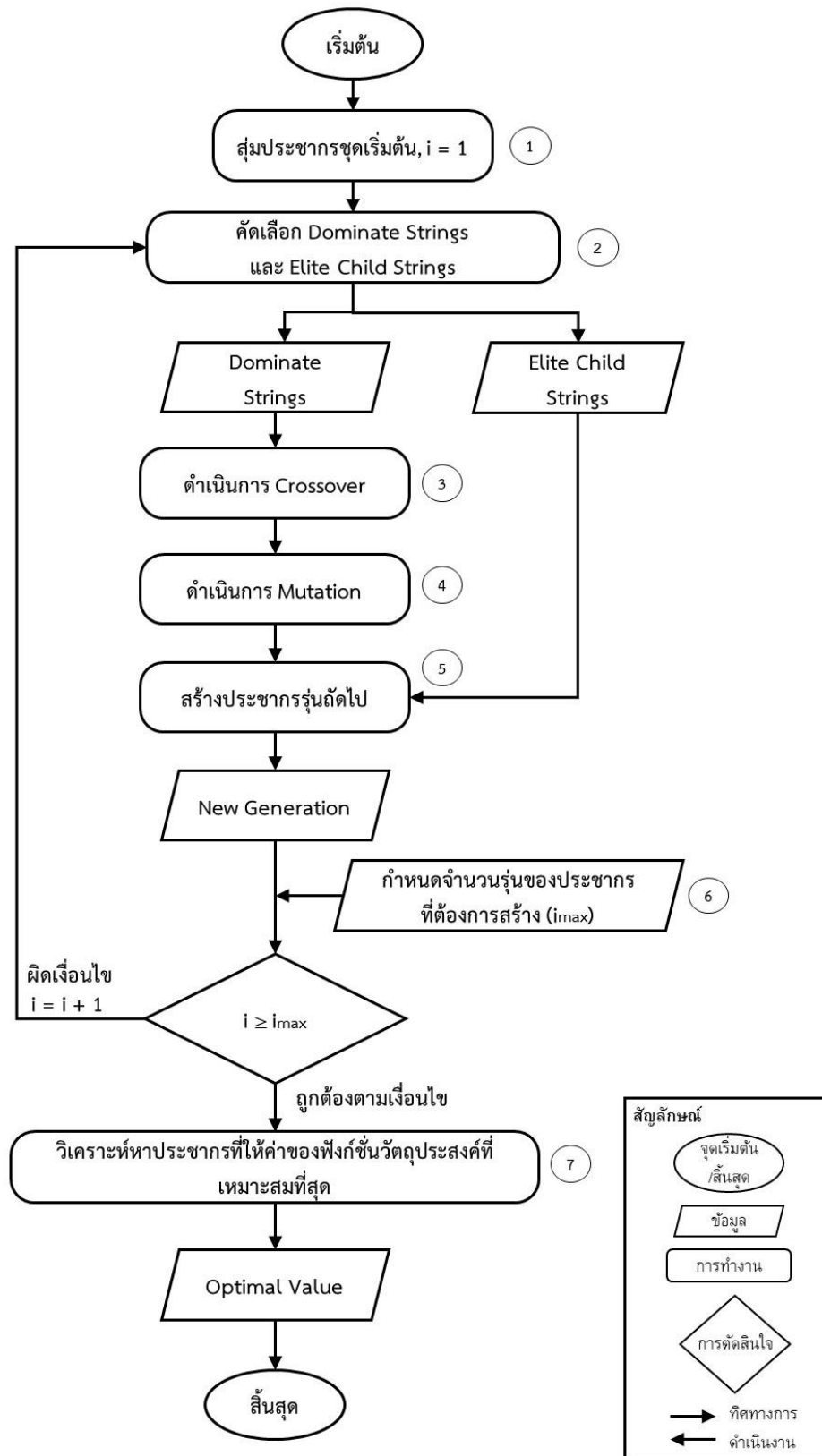
2) GA เป็นกระบวนการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจากประชากรของจุด (A Population of Points) ไม่ใช่การหาจุดเพียงจุดเดียว (Single Point)

3) GA ใช้ข้อมูลที่กำหนดไว้ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function Information) เพื่อการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ไม่ใช่การใช้สมการอนุพันธ์หรือความรู้ด้านอื่นๆ มาช่วย

4) GA ใช้กฎของการเปลี่ยนความน่าจะเป็น (Probabilistic Transition Rules) ไม่ใช่กฎของกระบวนการดีเทอร์มินิสติก (Deterministic Rules)

2.2 ขั้นตอนการดำเนินงานของ Genetic Algorithm

ขั้นตอนการดำเนินงานของ GA แบ่งออกเป็นขั้นตอนย่อยๆ จำนวน 7 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยในแต่ละขั้นตอนในแผนผังสรุปได้ดังนี้



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงานของ Genetic Algorithm

1) กลุ่มประชากรชุดเริ่มต้น

ทำการสุ่มประชากรชุดเริ่มต้น (Initial Population) ในรูปแบบของเลขฐานสอง (Binary Bit Code) โดยประชากรแต่ละตัวที่เรียกว่า 1 สตริง (String) จะมีความยาวของสตริง (String length) ที่ครอบคลุมพารามิเตอร์ที่ต้องการหาค่า อาทิเช่น ในกรณีของการประยุกต์ใช้ GA เพื่อการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM ความยาวของสตริงจะครอบคลุมค่าของพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองและสถานภาพเริ่มต้น

2) คัดเลือก Dominate Strings และ Elite Child Strings

กระบวนการนี้เป็นการนำประชากรชุดเริ่มต้นหรือชุดถัด ๆ ไป ซึ่งอยู่ในรูปแบบของเลขฐานสองมาแปลงเป็นเลขฐานสิบ (Decimal Value) เพื่อไปแทนค่าในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Fitness Function) และนำค่าที่ได้จากประชากรแต่ละตัวมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาประชากรที่ให้ค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในลำดับต้น ๆ จำนวนหนึ่งเพื่อเลือกเป็น Elite Child Strings จากนั้น นำค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากประชากรชุดแรกทั้งหมดมาผ่านกระบวนการ Roulette Wheel เพื่อการตัดประชากรที่ด้อยออกไปและนำประชากรดีเด่นในระดับต้น ๆ มาทดแทนประชากรด้อยที่ถูกตัดออก เพื่อให้เป็น Dominate Strings ที่มีจำนวนประชากรเท่าเดิมสำหรับนำไปสร้างเป็นประชากรชุดใหม่

3) ดำเนินการ Crossover

นำ Dominate Strings ที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้ามาจับคู่โดยกระบวนการแบบสุ่มเพื่อนำไปผ่านกระบวนการ Crossover ซึ่งหมายถึงการสลับกันของ Binary Bit ระหว่างคู่ของ Dominate Strings ณ ตำแหน่งที่ถูกคัดเลือกโดยกระบวนการแบบสุ่ม ทั้งนี้ จำนวนตำแหน่งระหว่างคู่ของ Dominate Strings ที่จะผ่านกระบวนการ Crossover จะขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นที่กำหนดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ประชากรของการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM มีทั้งสิ้น 100 Strings จะทำการจับคู่ได้ 50 คู่ เมื่อความน่าจะเป็นของกระบวนการ Crossover เท่ากับ 0.70 จะเป็นผลให้จำนวนตำแหน่งระหว่างคู่ของ Dominate Strings ที่จะผ่านกระบวนการ Crossover มีทั้งสิ้น 70 จุด ซึ่งแต่ละจุดจะถูกเลือกโดยกระบวนการแบบสุ่ม ทั้งนี้ คู่ของ Dominate Strings บางคู่

อาจไม่มีจุดใดเลยที่จะไม่ผ่านกระบวนการ Crossover หรือบางคู่อาจผ่านกระบวนการ Crossover มากกว่า 1 จุด

4) ดำเนินการ Mutation

นำประชากรของ Dominate Strings ที่ผ่านกระบวนการ Crossover ในขั้นตอนที่ (3) มาผ่านกระบวนการ Mutation ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนค่า Binary Bit จาก 0 เป็น 1 หรือจาก 1 เป็น 0 ณ ตำแหน่งที่ถูกคัดเลือกโดยกระบวนการแบบสุ่ม ทั้งนี้ จำนวนตำแหน่งของจุดใน Dominate Strings ที่จะผ่านกระบวนการ Mutation จะขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นที่กำหนดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ประชากรของการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM มีทั้งสิ้น 100 Strings เมื่อความน่าจะเป็นของกระบวนการ Mutation เท่ากับ 0.02 จะเป็นผลให้จำนวนตำแหน่งของจุดใน Dominate Strings ที่จะผ่านกระบวนการ Mutation มีทั้งสิ้น 2 จุด ซึ่งแต่ละจุดจะถูกเลือกโดยกระบวนการแบบสุ่ม

5) สร้างประชากรรุ่นถัดไป

นำประชากรของ Dominate Strings ที่ผ่านกระบวนการ Mutation ในขั้นตอนที่ (4) ซึ่งอยู่ในรูปแบบของเลขฐานสองมาแปลงเป็นเลขฐานสิบ (Decimal Value) เพื่อไปแทนค่าในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Fitness Function) และนำค่าที่ได้จากประชากรแต่ละตัวมาเปรียบเทียบกันเพื่อการเรียงลำดับจากมากไปน้อยในกรณี ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการหาค่าสูงสุด หรือเรียงลำดับจากน้อยไปมากในกรณี ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการหาค่าต่ำสุด จากนั้นเลือกประชากรที่ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในลำดับล่าง ๆ ออก ด้วยจำนวนเท่ากับ Elite Child Strings ที่จะนำมาแทนที่เพื่อเป็นประชากรในรุ่นถัดไป (New Generation)

6) กำหนดจำนวนรุ่นของประชากรที่ต้องการสร้าง

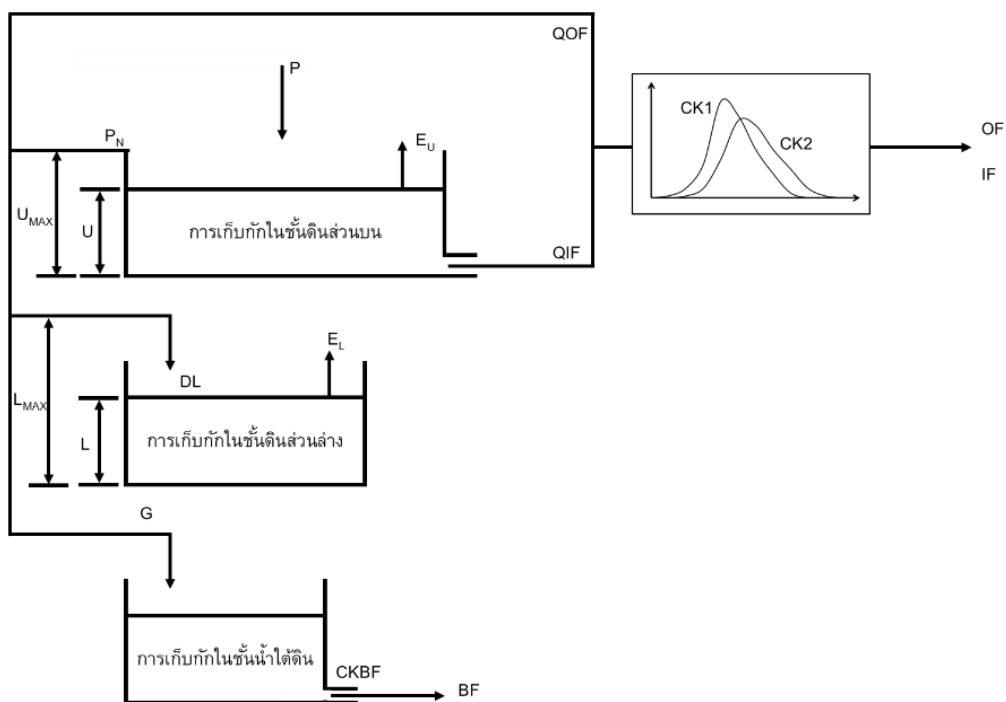
กระบวนการตามขั้นตอน (2) ถึง (5) จะดำเนินไปตามจำนวนรุ่นของประชากรที่กำหนดให้มีการสร้างขึ้น อาทิเช่น ในกรณีที่กำหนดให้จำนวนรุ่นเท่ากับ 50 รุ่น โปรแกรม GA จะดำเนินต่อเนื่องจนได้ประชากรชุดสุดท้ายคือชุดที่ 50 เพื่อนำไปดำเนินการตามขั้นตอนที่ (7)

7) วิเคราะห์หาประชากรที่ให้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมที่สุด

นำประชากรชุดสุดท้ายซึ่งอยู่ในรูปแบบของเลขฐานสองมาแปลงเป็นเลขฐานสิบ (Decimal Value) เพื่อไปแทนค่าในฟังก์ชัน วัตถุประสงค์ และเลือกประชากรที่ให้ค่าของฟังก์ชัน วัตถุประสงค์ที่มีค่ามากที่สุดหรือน้อยที่สุด (Optimum Value) ตามที่กำหนดไว้

3. ทฤษฎีของแบบจำลอง MODNAM

MODNAM เป็นแบบจำลองที่ได้รับการปรับปรุงโดยนุชนารถ (2560) จากแบบจำลอง NAM ซึ่งเป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ที่พัฒนาขึ้นโดย The Danish Hydraulic Institute (DHI) ทั้งนี้แบบจำลอง NAM แบ่งปริมาณการเก็บกักออกเป็น 4 ส่วน คือ (1) การเก็บกักในชั้นหิมะ (2) การเก็บกักในชั้นดินส่วนบน (3) การเก็บกักในชั้นดินส่วนล่าง และ (4) การเก็บกักในชั้นน้ำใต้ดิน ในขณะที่แบบจำลอง MODNAM ไม่มีการพิจารณาปริมาณการเก็บกักในชั้นหิมะ เนื่องจากไม่มีหิมะในประเทศไทย รวมทั้งไม่พิจารณากระบวนการย่อย ๆ ที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการประเมินน้ำท่าในภาพรวม ทั้งนี้แผนภาพโครงสร้างของแบบจำลอง MODNAM แสดงดังในภาพที่ 5 โดยแนวทางการประเมินน้ำท่าโดยแบบจำลอง MODNAM ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนการคำนวณ คือ (1) ปริมาณการคายระเหย (2) ปริมาณการไหลระหว่างผิวดินและชั้นน้ำใต้ดิน (3) ปริมาณการไหลบ่าผิวดิน (4) ปริมาณการไหลในชั้นน้ำใต้ดิน (5) การเคลื่อนตัวของปริมาณการไหลบ่าบนผิวดิน และการเคลื่อนตัวของปริมาณการไหลในระหว่างผิวดินและชั้นน้ำใต้ดิน และ (6) การเคลื่อนตัวของปริมาณการไหลของน้ำใต้ดิน สำหรับการคำนวณในแต่ละขั้นตอนแสดงไว้ดังในตารางที่ 3



ภาพที่ 5 โครงสร้างของแบบจำลอง MODNAM

ตารางที่ 3 ขั้นตอนการประเมินน้ำท่าโดยแบบจำลอง MODNAM

ขั้นตอนการคำนวณ	สมการที่	ความหมายของตัวแปร
1) ปริมาณการคายระเหย (ET)		
$E_U = \begin{cases} ET & ; U \geq ET \\ U & ; 0 < U < ET \\ 0 & ; U = 0 \end{cases}$	(1)	E_U = การคายระเหยที่ชั้นดินส่วนบน U = ปริมาณการเก็บกักในชั้นดินส่วนบน
$E_L = (ET - E_U)(L / L_{max})$	(2)	E_L = การคายระเหยที่ชั้นดินส่วนล่าง L = ปริมาณการเก็บกักในชั้นดินส่วนล่าง L_{max} = ความจุเก็บกักสูงสุดของชั้นรากพืช
2) ปริมาณการไหลระหว่างผิวดินและชั้นน้ำใต้ดิน (QIF)		
$QIF = \begin{cases} U \frac{\Delta t}{CKIF} \left(\frac{L / L_{max} - TIF}{1 - TIF} \right) & ; L / L_{max} > TIF \\ 0 & ; L / L_{max} \leq TIF \end{cases}$	(3)	$CKIF$ = ค่าคงที่ของเวลาสำหรับปริมาณน้ำที่ไหลในระหว่างผิวดินและชั้นน้ำใต้ดิน TIF = ค่าเริ่มต้นของการเกิดปริมาณการไหลในระหว่างผิวดิน และชั้นน้ำใต้ดิน Δt = ช่วงเวลาการคำนวณ (Computational Time Step) หน่วยเป็น ชั่วโมง
3) ปริมาณการไหลบ่าผิวดิน (QOF)		
$QOF = \begin{cases} CQOF \left(\frac{L / L_{max} - TOF}{1 - TOF} \right) & ; L / L_{max} > TOF \\ 0 & ; L / L_{max} \leq TOF \end{cases}$	(4)	$CQOF$ = สัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำท่าที่ไหลบ่าบนผิวดิน TOF = ค่าเริ่มต้นของการเกิดการไหลบ่าบนผิวดิน
4) ปริมาณการไหลในชั้นน้ำใต้ดิน (G)		
$G = \begin{cases} (P_N - QOF) \left(\frac{L / L_{max} - TG}{1 - TG} \right) & ; L / L_{max} > TG \\ 0 & ; L / L_{max} \leq TG \end{cases}$	(5)	P_N = ความลึกฝนส่วนเกินสุทธิ TG = ค่าเริ่มต้นของการเกิดการไหลในชั้นน้ำใต้ดิน DL = ปริมาณน้ำที่เติมให้ชั้นดินส่วนล่าง
$DL = (P_N - QOF) - G$	(6)	

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ขั้นตอนการคำนวณ	สมการที่	ความหมายของตัวแปร
5) การเคลื่อนตัวของปริมาณการไหลบ่าบนผิวดินและการเคลื่อนตัวของปริมาณการไหลระหว่างผิวดินและชั้นน้ำใต้ดิน (OF, IF)		
$OF_t^{(1)} = OF_{t-1}^{(1)} \times e^{-\Delta t/CK1} + QOF_t(1 - e^{-\Delta t/CK1})$	(7)	$OF_{t-1}^{(1)}$, = ความลึกของการไหลของปริมาณการไหลบ่าบนผิวดินที่ผ่านการเคลื่อนตัวครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ที่เวลาก่อนหน้า ($t-1$) $OF_t^{(2)}$ เวลาปัจจุบัน (t)
$OF_t^{(2)} = OF_{t-1}^{(2)} \times e^{-\Delta t/CK2} + OF_t^{(1)}(1 - e^{-\Delta t/CK2})$	(8)	$OF_t^{(1)}$, = ความลึกของการไหลของปริมาณการไหลบ่าบนผิวดินที่ผ่านการเคลื่อนตัวครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ที่เวลาปัจจุบัน (t) $OF_t^{(2)}$ เวลาปัจจุบัน (t)
$IF_t^{(1)} = IF_{t-1}^{(1)} \times e^{-\Delta t/CK1} + QIF_t(1 - e^{-\Delta t/CK1})$	(9)	$IF_{t-1}^{(1)}$, = ความลึกของการไหลของปริมาณการไหลระหว่างผิวดินและชั้นน้ำใต้ดินที่ผ่านการเคลื่อนตัวครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ที่เวลาก่อนหน้า ($t-1$) $IF_{t-1}^{(2)}$ และ 2 ตามลำดับ ที่เวลาก่อนหน้า ($t-1$)
$IF_t^{(2)} = IF_{t-1}^{(2)} \times e^{-\Delta t/CK2} + IF_t^{(1)}(1 - e^{-\Delta t/CK2})$	(10)	$IF_t^{(1)}$, = ความลึกของการไหลของปริมาณการไหลระหว่างผิวดินและชั้นน้ำใต้ดินที่ผ่านการเคลื่อนตัวครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ที่เวลาปัจจุบัน (t) $IF_t^{(2)}$ และ 2 ตามลำดับ ที่เวลาปัจจุบัน (t)
		$CK1$, = เวลาหน่วง (Lag Time) ของการเกิดน้ำท่า หน่วยเป็น ชั่วโมง $CK2$
6) การเคลื่อนตัวของปริมาณการไหลของน้ำใต้ดิน (BF)		
$BF_t = BF_{t-1} \times e^{-\Delta t/CKBF} + G(1 - e^{-\Delta t/CKBF})$	(11)	BF_{t-1} = ความลึกของการไหลในชั้นน้ำใต้ดินที่เวลาเริ่มต้น BF_t = ความลึกของการไหลในชั้นน้ำใต้ดินที่เวลาเริ่มต้นที่ผ่านการเคลื่อน $CKBF$ = เวลาหน่วงของการเกิดการไหลของน้ำใต้ดิน

ที่มา: นุชนารถ (2556)

4. ดัชนีประสิทธิภาพ Kling-Gupta

ดัชนีประสิทธิภาพ Kling-Gupta (Kling-Gupta efficiency, KGE) ได้ถูกพัฒนาโดย Gupta *et al.* (2009) เพื่อใช้เป็นดัชนีทางสถิติที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลที่ได้จากแบบจำลองกับปริมาณการไหลที่ได้จากการตรวจวัดที่สถานีวัดน้ำท่า การคำนวณแสดงดังในสมการที่ (12) โดยที่ดัชนี KGE จะมีค่าระหว่าง $-\infty$ ถึง 1 และในกรณีที่ KGE เข้าใกล้ 1 หมายถึงปริมาณการไหลที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับปริมาณการไหลที่ได้จากการตรวจวัดจากสถานีวัดน้ำท่า (Knoben *et al.*, 2019)

$$KGE = 1 - \left[\sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \right] \quad (12)$$

$$\alpha = S_y / S_x \quad (13)$$

$$\beta = \bar{Y} / \bar{X} \quad (14)$$

โดยที่	S_y	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลปริมาณการไหลจากแบบจำลอง
	S_x	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลปริมาณการไหลจากการตรวจวัด
	\bar{Y}	=	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลปริมาณการไหลจากแบบจำลอง
	\bar{X}	=	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลปริมาณการไหลจากการตรวจวัด
	r	=	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson

5. สัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ Nash-Sutcliffe

สัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient, NSE) เป็นตัวแปรทางสถิติที่บ่งบอกถึงสัดส่วนระหว่างผลรวมของความแตกต่างระหว่างปริมาณการไหลจากแบบจำลองเทียบกับปริมาณการไหลที่ได้จากการตรวจวัด $(\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2)$ ต่อผลรวมของความแตกต่างระหว่างปริมาณการไหลที่ได้จากการตรวจวัดแต่ละค่ากับค่าเฉลี่ยของปริมาณการไหลจากการตรวจวัด $(\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q})^2)$ โดยค่า NSE สามารถคำนวณได้ดังในสมการที่ (15) โดยที่ดัชนี NSE จะมีค่าระหว่าง $-\infty$ ถึง 1 และในกรณีที่ NSE เท่ากับ 1 หมายถึงปริมาณการ

ไหลที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีความเข้ากันได้ทั้งหมดกับปริมาณการไหลที่ได้จากการตรวจวัด และสำหรับในกรณีที่ค่า $NSE < 0$ แสดงว่าเทอม $\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2$ มีค่ามากกว่าเทอม $\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q})^2$ ซึ่งหมายความว่าความแตกต่างของผลการคำนวณปริมาณการไหลโดยแบบจำลองเทียบกับข้อมูลปริมาณการไหลที่ได้จากการตรวจวัดมีค่ามากกว่าความแตกต่างของข้อมูลปริมาณการไหลจากการตรวจวัดกับค่าเฉลี่ยของปริมาณการไหลจากการตรวจวัด

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q})^2} \right] \quad (15)$$

โดยที่ Q_t^{obs} = ปริมาณการไหลที่ได้จากการตรวจวัดจากสถานีวัดน้ำท่า ณ เวลาที่ t
 Q_t^{sim} = ปริมาณการไหลที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลอง ณ เวลาที่ t
 \bar{Q} = ปริมาณการไหลเฉลี่ยของปริมาณการไหลที่ได้จากการตรวจวัดจากสถานีวัดน้ำท่า

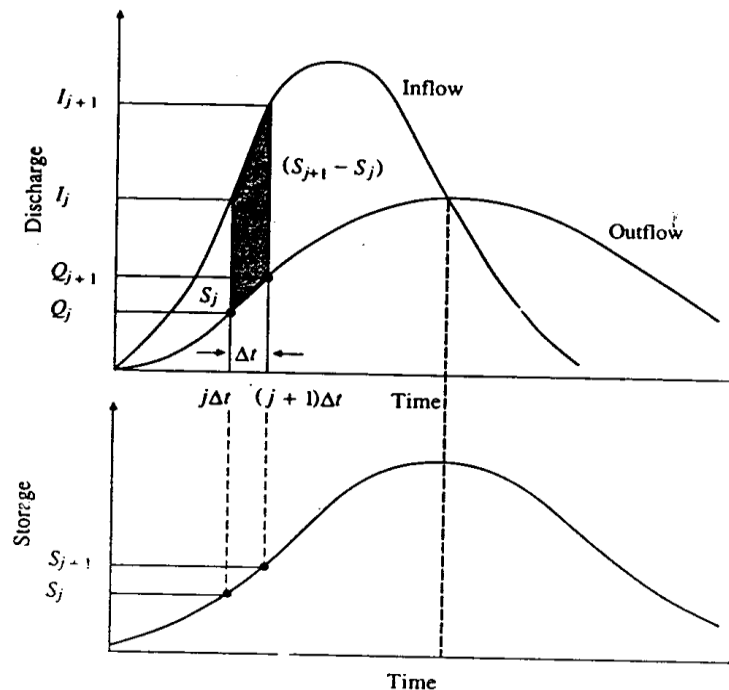
6. ทฤษฎีการเคลื่อนตัวน้ำท่าของ Muskingum (Muskingum Channel Routing Method)

การเคลื่อนตัวของน้ำท่าในลำน้ำ (Channel Routing) มีพื้นฐานการเคลื่อนที่จากสมการต่อเนื่อง (Continuity Equation) ดังแสดงในสมการที่ (16) ซึ่งประกอบด้วยปริมาณการไหลเข้า (I_t), ปริมาณการไหลออก (Q_t) และปริมาณการเก็บกัก (S_t) ทั้งนี้ เมื่อมีปริการไหลเข้าลำน้ำ และปริมาณไหลออกจากลำน้ำ ณ เวลาที่ j ถึง $j+1$ ดังแสดงในภาพที่ 6 จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการเก็บกักในลำน้ำ ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการได้ ดังแสดงในสมการที่ (17) อย่างไรก็ตามสมการดังกล่าวมีตัวแปรที่ทราบค่าคือ I_j, I_{j+1}, Q_j และ S_j และมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือ Q_{j+1} และ S_{j+1} เพื่อการแก้ไขปัญหาของสมการ จำเป็นต้องสร้างสมการที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง I_{j+1}, Q_{j+1} และ S_{j+1} ทั้งนี้ Muskingum จึงเสนอสมการที่เป็นการจำลองรูปแบบการเคลื่อนตัวน้ำท่าในลำน้ำ ดังแสดงในสมการที่ (18)

$$\frac{dS}{dt} = I_t - Q_t \quad (16)$$

$$\frac{S_{j+1} - S_j}{\Delta t} = \frac{(I_j + I_{j+1})}{2} - \frac{(Q_j + Q_{j+1})}{2} \quad (17)$$

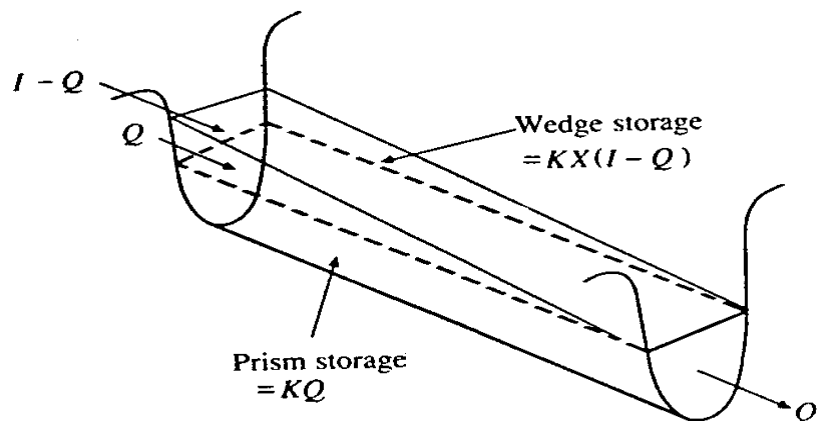
$$S_{j+1} = K [XI_{j+1} + (1-X)Q_{j+1}] \quad (18)$$



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณการเก็บกักในช่วงเวลา Δt

ที่มา: นุชนารถ (2545)

การเคลื่อนตัวน้ำท่าในลำน้ำ Muskingum เป็นการจำลองรูปแบบการเคลื่อนที่ของน้ำผิวดินในลำน้ำซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ Prism Storage และ Wedge Storage ดังแสดงในภาพที่ 7 โดย Prism Storage คือปริมาตรการไหลที่มีค่าคงที่ตามแนวความยาวของลำน้ำที่มีรูปร่างคงที่ซึ่งคำนวณได้จาก KQ โดยที่ K คือค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลในลำน้ำตามสัดส่วน และปริมาตรของ Wedge Storage คำนวณได้จาก $KX(I-Q)$ โดยที่ X คือแฟคเตอร์ถ่วงน้ำหนัก



ภาพที่ 7 การจำลองรูปแบบการเคลื่อนที่ของน้ำผิวดินในลำน้ำ

ที่มา: นุชนารถ (2545)

ทั้งนี้ เมื่อแทนค่าสมการที่ (18) ในสมการที่ (17) จะได้สมการสำหรับการคำนวณการเคลื่อนตัวน้ำท่า (Routing Equation) ดังแสดงในสมการที่ (19)

$$Q_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 Q_j \quad (19)$$

โดยที่

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (20)$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (21)$$

$$C_3 = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (22)$$

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1 \quad (23)$$

7. ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และความจุเก็บกักในชั้นดินสูงสุด

ดัชนี NDII (Normalized Difference Infrared Index) เป็นดัชนีความแตกต่างของคลื่นอินฟราเรดชนิดใกล้และคลื่นอินฟราเรดชนิดคลื่นสั้น ที่ใช้เพื่อตรวจสอบสภาพความชุ่มชื้นในชั้นดิน ทั้งนี้ Sriwongsitanon *et al.* (2020) ได้ศึกษาและพบความสัมพันธ์ของดัชนี NDII กับความจุเก็บกักในชั้นดินสูงสุด (Su_{max}) ดังแสดงในสมการที่ (24) ซึ่ง Su_{max} เป็นส่วนหนึ่งของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินน้ำท่าของแบบจำลอง FLEX_L รวมทั้งนำความสัมพันธ์ดังกล่าวพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII ขึ้น เพื่อให้ประสิทธิภาพการประเมินน้ำท่าในช่วงหน้าแล้ง หรือช่วงเวลาที่มื่ออัตราการไหลต่ำ (Low Flow) มากขึ้น

$$Su_{max,i} = Su_{max} \times \left(\frac{\left[(NDII_{i,max})^b - (NDII_{i,min})^b \right]_{max}}{\left[(NDII_{max})^b - (NDII_{min})^b \right]_{max}} \right) \quad (24)$$

โดยที่	$Su_{max,i}$	=	ความจุเก็บกักในชั้นดินสูงสุด ของลุ่มน้ำย่อยลำดับที่ i
	$NDII_{i,max}$	=	ดัชนี NDII สูงสุดรายปี ของลุ่มน้ำย่อยลำดับที่ i
	$NDII_{i,min}$	=	ดัชนี NDII ต่ำสุดรายปี ของลุ่มน้ำย่อยลำดับที่ i
	Su_{max}	=	ความจุเก็บกักในชั้นดินสูงสุด ของลุ่มน้ำหลัก
	$NDII_{max}$	=	ดัชนี NDII สูงสุดรายปี ของลุ่มน้ำหลัก
	$NDII_{min}$	=	ดัชนี NDII ต่ำสุดรายปี ของลุ่มน้ำหลัก
	b	=	ค่ายกกำลังของดัชนี NDII มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 20

ทั้งนี้เทอมของ $\left[(NDII_{i,max})^b - (NDII_{i,min})^b \right]_{max}$ และ $\left[(NDII_{max})^b - (NDII_{min})^b \right]_{max}$ คือค่าความแตกต่างระหว่างดัชนี NDII สูงสุดและต่ำสุดรายปี ที่มีค่ามากที่สุดของลุ่มน้ำย่อยลำดับที่ i และลุ่มน้ำหลัก

8. โปรแกรม MOSCEM

MOSCEM (Multi Objective Shuffled Complex Evolution Metropolis) เป็น โปรแกรมที่ปรับปรุงจาก โปรแกรม SCEM-UA (Shuffled Complex Evolution Metropolis) ให้ใช้กับแบบจำลองทางอุทกวิทยาที่เป็นปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ ที่พัฒนาโดย Vrugt *et al.* (2003) ขั้นตอนการดำเนินงานของโปรแกรม MOSCEM แบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน คือ (1) กำหนดขอบเขตของจำนวนชุดประชากร (2) สร้างชุดประชากรเริ่มต้นตามจำนวนชุดประชากร โดยวิธี Latin Hyper Cube และคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (3) จัดลำดับชุดประชากรด้วยวิธี Pareto Ranking (4) คำนวณจุดเริ่มต้นของเส้นขอบเขตคู่ขนานเพื่อกำหนดค่าของคำตอบ (5) พัฒนาชุดประชากรคำตอบด้วยวิธี Markov Chain Monte Carlo Sample Algorithm และ (6) กำหนดการดำเนินการซ้ำของวิธีที่ (5) และวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้ ทั้งนี้ผลลัพธ์ที่ได้จาก โปรแกรม MOSCEM จะอยู่ในรูปแบบของประชากรหลาย ๆ ชุดอยู่รวมกันที่เรียกว่า Pareto Front ของปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ที่สามารถนำไปวิเคราะห์ความเหมาะสมในการใช้งานต่อไป

ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ที่โปรแกรม MOSCEM ใช้ในการคำนวณ คือ ค่าดัชนี KGE ที่แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. KGE เป็นค่าดัชนีที่เปรียบเทียบระหว่างปริมาณการไหลที่ได้จากแบบจำลองกับปริมาณการไหลที่ได้จากการตรวจวัดที่สถานีวัดน้ำท่า โดยการใช้ค่าปริมาณการไหลในการคำนวณ

2. KGE_L เป็นค่าดัชนีที่เปรียบเทียบระหว่างปริมาณการไหลที่ได้จากแบบจำลองกับปริมาณการไหลที่ได้จากการตรวจวัดที่สถานีวัดน้ำท่า ในช่วงหน้าแล้ง หรือช่วงเวลาที่มียัตการไหลต่ำ (Low Flow) โดยการใช้ค่าลอการิทึมของปริมาณการไหลในการคำนวณ

3. KGE_{FDC} เป็นค่าดัชนีที่เปรียบเทียบระหว่างปริมาณการไหลที่ได้จากแบบจำลองกับปริมาณการไหลที่ได้จากการตรวจวัดที่สถานีวัดน้ำท่า โดยใช้ค่าปริมาณการไหลที่เรียงข้อมูลจากค่ามากไปค่าน้อยในการคำนวณ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรมพื้นฐานในเครื่องสำหรับใช้ในการศึกษา รวมทั้งโปรแกรม MATLAB 2017 ที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม KU-GA รวมทั้งแบบจำลอง KU-MODNAM และ KU-MODNAM-SD
2. ข้อมูลความลึกฝน ข้อมูลน้ำท่า ข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิง และค่าดัชนี NDII ที่ครอบคลุมพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 และพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A รวมทั้งข้อมูลอื่น ๆ ที่ประกอบการประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-MODNAM และ KU-MODNAM-SD

วิธีการ

งานวิจัยเรื่อง “การพัฒนาโปรแกรม Genetic Algorithm เพื่อการสอบเทียบแบบจำลอง Modified NAM และ Modified NAM-SD แบบอัตโนมัติ” มีขั้นตอนการศึกษาดังสรุปต่อไปนี้

1. รวบรวมข้อมูลสถานีวัดน้ำท่าในกลุ่มน้ำปิงตอนบนและลุ่มน้ำชี เพื่อใช้สำหรับสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM และ KU-MODNAM-SD โดยข้อมูลที่รวบรวมประกอบด้วย
 - 1.1 ข้อมูลพื้นที่ลุ่มน้ำ และการแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย
 - 1.2 ข้อมูลความลึกฝนรายวันแบบกริด
 - 1.3 ข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิงรายวันแบบกริด
 - 1.4 ข้อมูลน้ำท่ารายวัน
 - 1.5 ค่าดัชนี NDII

2. พัฒนาโปรแกรม KU-GA เพื่อการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับฟังก์ชัน วัตถุประสงค์ เดียว
3. พัฒนาแบบจำลอง KU-MODNAM-SD จากพื้นฐานของแบบจำลอง Modified NAM และทฤษฎีการเคลื่อนตัวน้ำท่าของ Muskingum โดยใช้โปรแกรม MATLAB
4. พัฒนาแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII จากหลักความสัมพันธ์ของดัชนี NDII กับ ความจุเก็บกักในชั้นดินสูงสุด ของแบบจำลอง KU-FIEX-SD-NDII โดยใช้โปรแกรม MATLAB
5. ประยุกต์ใช้และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM, KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-NDII

จากขั้นตอนการศึกษาดังกล่าวข้างต้น สามารถอธิบายวิธีการและรายละเอียดต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

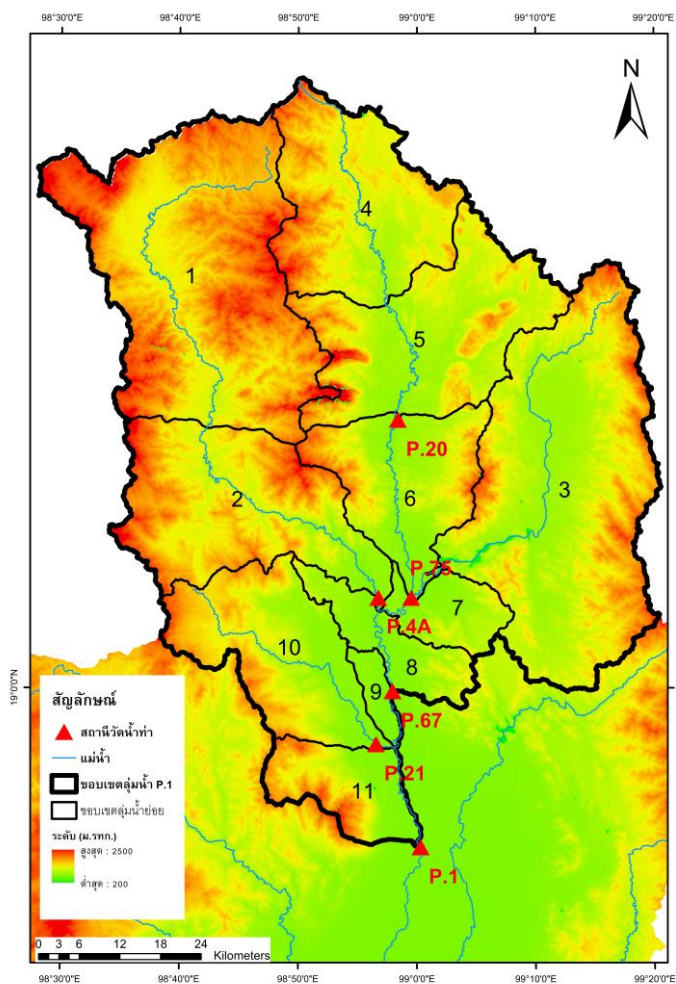
1. รวบรวมข้อมูล

1.1 ข้อมูลพื้นที่ลุ่มน้ำและการแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย

พื้นที่ลุ่มน้ำที่ถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลในการประเมินน้ำท่าของการศึกษานี้ประกอบด้วย 2 พื้นที่ คือ พื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของลุ่มน้ำปึงตอนบนและพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของลุ่มน้ำชี โดยพื้นที่รับน้ำฝนของทั้ง 2 สถานีเป็นข้อมูลที่ดำเนินในงานวิจัยโดยวาสนาและนุชนารถ (2562) และสุวนันท์และนุชนารถ (2563) ตามลำดับ

สถานีวัดน้ำท่า P.1 มีขนาดพื้นที่รับน้ำฝนเท่ากับ 6,142.10 ตารางกิโลเมตร ถูกแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยเป็นทั้งหมด 11 ลุ่มน้ำ โดยวาสนาและนุชนารถ (2562) ดังแสดงในภาพที่ 8 โดยมีรายละเอียดของพื้นที่ลุ่มน้ำและความยาวลำน้ำจากด้านเหนือน้ำ ไปยังจุดออกด้านท้ายน้ำของ 11 ลุ่มน้ำย่อย ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยในลำดับที่ 2 มีขนาดใหญ่ที่สุดคือ 1,279.77 ตารางกิโลเมตร เนื่องจากจุดออกของลุ่มน้ำคือเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล ในส่วน

ของกลุ่มน้ำย่อยอื่นมีขนาดระหว่าง 56.54 ถึง 1,255.78 ตารางกิโลเมตร ทั้งนี้ในตารางที่ 4 ได้แสดงข้อมูลจุดออกของกลุ่มน้ำที่เป็นสถานีวัดน้ำท่าจำนวน 5 สถานี รวมทั้งข้อมูลความยาวลำน้ำจากด้านเหนือน้ำไปยังจุดออกด้านท้ายน้ำ เพื่อใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD ในการประเมินน้ำท่าที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1



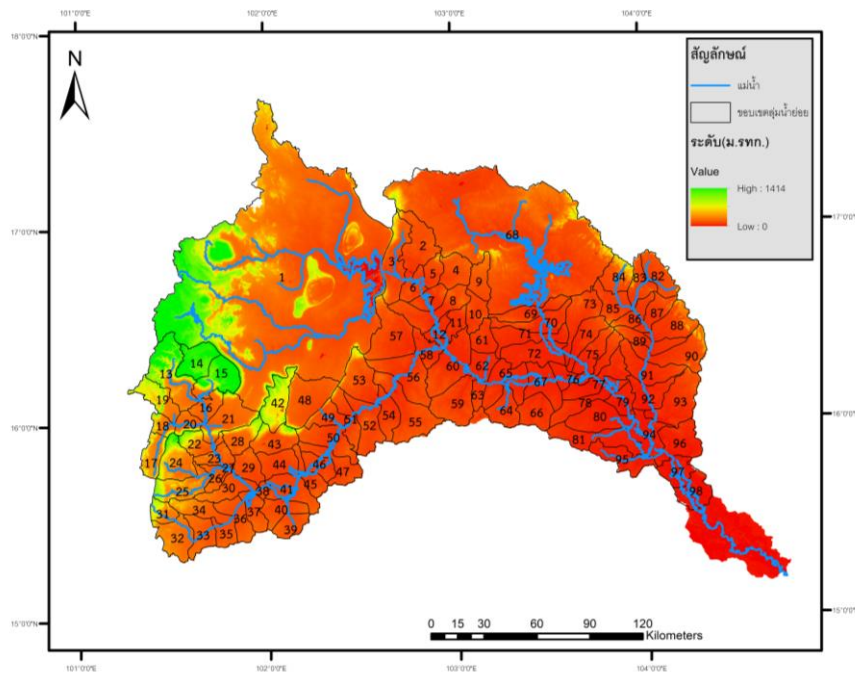
ภาพที่ 8 ขอบเขตของพื้นที่ศึกษาของสถานีวัดน้ำท่า P.1 และสถานีย่อยในกลุ่มน้ำปึงตอนบน

ตารางที่ 4 พื้นที่ลุ่มน้ำและความยาวลำน้ำจากด้านเหนือน้ำไปยังจุดออกด้านท้ายน้ำของ
11 ลุ่มน้ำย่อย ในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1

ลำดับลุ่มน้ำย่อย	พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตร.กม.)	ความยาวลำน้ำด้านเหนือน้ำไปยังจุด ออกด้านท้ายน้ำ (กม.)	จุดออกลุ่มน้ำ
1	1,255.78	-	
2	698.12	55.60	P.4A
3	1,279.77	-	เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล
4	622.29	-	
5	686.78	32.19	P.20
6	439.87	37.00	P.75
7	155.16	9.77	
8	195.40	18.44	P.67
9	56.54	11.55	
10	515.62	-	P.21
11	236.77	18.85	P.1

ที่มา: วาสนาและนุชนารถ (2562)

สถานีวัดน้ำท่า E.20A มีขนาดพื้นที่รับน้ำฝนเท่ากับ 47,720.88 ตารางกิโลเมตร ถูกแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยเป็นทั้งหมด 98 ลุ่มน้ำ โดยสุวพันธ์และนุชนารถ (2563) ดังแสดงในภาพที่ 9 โดยมีรายละเอียดของพื้นที่ลุ่มน้ำและความยาวลำน้ำจากด้านเหนือน้ำไปยังจุดออกด้านท้ายน้ำของ 98 ลุ่มน้ำย่อย ดังแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยในลำดับที่ 1 และ 68 มีขนาดใหญ่ที่สุดคือ 12,057.52 และ 6,019.57 ตารางกิโลเมตร ตามลำดับ เนื่องจากจุดออกของลุ่มน้ำคือเขื่อนอุบลรัตน์และเขื่อนลำปาว ในส่วนของลุ่มน้ำย่อยอื่นมีขนาดระหว่าง 20.53 ถึง 650.88 ตารางกิโลเมตร ทั้งนี้ในตารางที่ 5 ได้แสดงข้อมูลจุดออกของลุ่มน้ำที่เป็นสถานีวัดน้ำท่าจำนวน 12 สถานี รวมทั้งข้อมูลความยาวลำน้ำจากด้านเหนือน้ำไปยังจุดออกด้านท้ายน้ำ เพื่อใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD ในการประเมินน้ำท่าที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า E.20A



ภาพที่ 9 ขอบเขตของพื้นที่ศึกษาของสถานีวัดน้ำท่า E.20A และสถานีย่อยในกลุ่มน้ำชี

ตารางที่ 5 พื้นที่ลุ่มน้ำและความยาวลำน้ำจากด้านเหนือน้ำไปยังจุดออกด้านท้ายน้ำของ 98 ลุ่มน้ำย่อย ในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A

ลำดับลุ่มน้ำย่อย	พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตร.กม.)	ความยาวลำน้ำด้านเหนือน้ำไปยังจุดออกด้านท้ายน้ำ (กม.)	จุดออกลุ่มน้ำ
1	12,057.52	-	เขื่อนอุบลรัตน์
2	478.66	-	
3	494.79	22.44	
4	285.15	-	
5	157.40	19.49	
6	185.51	30.32	
7	200.21	25.13	
8	451.40	14.82	
9	226.69	-	
10	212.00	21.59	
11	149.78	18.64	
12	152.28	40.33	

ตารางที่ 5 (ต่อ)

ลำดับลุ่มน้ำย่อย	พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตร.กม.)	ความยาวลำน้ำด้านเหนือน้ำไปถึงจุด ออกด้านท้ายน้ำ (กม.)	จุดออกลุ่มน้ำ
13	650.88	-	
14	336.43	-	
15	405.88	29.48	
16	198.57	26.54	
17	251.62	-	E.73
18	127.78	14.27	
19	306.63	-	E.72
20	149.16	31.01	
21	450.39	17.16	E.21
22	225.80	10.60	
23	189.96	25.70	
24	382.64	-	
25	377.05	12.95	
26	134.01	23.13	
27	20.53	4.80	E.5
28	256.85	-	
29	237.31	20.80	
30	280.40	34.30	
31	164.52	-	
32	372.43	29.88	
33	264.06	29.13	
34	257.01	-	
35	169.59	21.95	
36	281.47	15.29	
37	223.57	35.45	
38	56.93	22.00	E.23
39	203.39	-	
40	255.52	14.77	
41	368.36	60.26	
42	380.75	-	E.6C

ตารางที่ 5 (ต่อ)

ลำดับลุ่มน้ำย่อย	พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตร.กม.)	ความยาวลำน้ำด้านเหนือน้ำไปถึงจุด ออกด้านท้ายน้ำ (กม.)	จุดออกลุ่มน้ำ
43	333.07	25.35	
44	292.11	17.23	
45	201.13	21.13	E.21
46	199.93	23.38	
47	316.36	8.53	
48	560.00	-	
49	204.89	28.47	
50	392.72	30.40	
51	255.68	22.89	
52	393.53	26.54	E.9
53	429.32	-	
54	255.78	21.44	
55	591.09	25.76	
56	535.57	36.94	
57	606.70	-	
58	208.58	30.95	
59	475.48	-	
60	588.43	46.37	
61	204.81	-	
62	197.51	25.21	
63	107.94	8.56	
64	278.35	-	
65	441.91	40.86	
66	306.94	-	
67	349.43	40.46	E.66A
68	6,019.57	-	เขื่อนลำปาว
69	265.79	7.21	
70	325.87	15.94	
71	337.66	5.42	
72	423.28	28.93	

ตารางที่ 5 (ต่อ)

ลำดับลุ่มน้ำย่อย	พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตร.กม.)	ความยาวลำน้ำด้านเหนือน้ำไปถึงจุด ออกด้านท้ายน้ำ (กม.)	จุดออกลุ่มน้ำ
73	381.16	9.53	
74	280.83	9.65	
75	273.47	21.72	
76	339.60	53.62	
77	364.86	8.48	
78	325.92	11.95	
79	181.52	16.01	E.18
80	461.43	22.02	
81	468.37	32.47	
82	300.69	-	
83	235.31	34.16	
84	285.50	-	
85	282.36	30.79	
86	186.74	11.60	
87	233.05	11.64	E.54
88	380.46	8.55	
89	247.74	8.67	
90	477.94	9.44	E.70
91	394.91	20.31	
92	305.18	27.15	
93	537.08	14.18	
94	337.33	50.91	
95	327.57	4.85	
96	426.54	16.13	
97	259.44	35.55	
98	295.57	32.49	E.20A

ที่มา: สุวพันธ์และอนุชนารถ (2563)

1.2 ข้อมูลความลึกฝนรายวันแบบกริด

ในการศึกษานี้ได้นำข้อมูลฝนจากผลิตภัณฑ์ SENSWAT-GGR ซึ่งเป็นข้อมูลฝนแบบกริดที่ครอบคลุมทั้งประเทศไทย ในระหว่าง ปี พ.ศ.2543-2560 โดยเป็นผลิตภัณฑ์ฝนที่ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้ศูนย์วิจัย SENSWAT ทั้งนี้ ผลิตภัณฑ์ SENSWAT-GGR ถูกสร้างมาจากข้อมูลฝนรายวันที่ถูกเก็บรวบรวมข้อมูลโดยกรมอุตุนิยมวิทยา กรมชลประทาน และหน่วยงานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ ข้อมูลฝนที่เก็บรวบรวมได้จาก 1,897 สถานี ถูกนำมาตรวจสอบความถูกต้องแบบรายเดือนด้วยวิธีการโค้งทับทวิ (Double Mass Curve) เพื่อพิจารณาตัดข้อมูลฝนที่มีความผิดพลาดประมาณ 4% ออกจากอนุกรมเวลา รวมทั้งทำการตัดข้อมูลทั้งหมด 5 สถานี จากนั้นจึงนำข้อมูลฝนที่ผ่านการตรวจสอบมาข้อมูลฝนแบบกริด (Gridded Gauged Rainfall, GGR) ทั้งแบบรายเดือนและรายวันด้วยวิธีส่วนกลับของระยะทางยกกำลังสอง (Inverse Distance Square, IDS) สำหรับในการศึกษานี้ ได้นำข้อมูลฝนรายวันแบบกริดจากผลิตภัณฑ์ SENSWAT-GGR ที่ครอบคลุมพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 แยกตามลุ่มน้ำย่อย 11 ลุ่มน้ำ และพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A ที่แยกตามลุ่มน้ำย่อย 98 ลุ่มน้ำ มาใช้เป็นข้อมูลด้านเข้าให้กับแบบจำลอง KU-MODNAM และ KU-MODNAM-SD

สำหรับข้อมูลความลึกฝนเฉลี่ยของ 11 ลุ่มน้ำย่อย ในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 แสดงดังตารางที่ 6 จากตารางดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ความลึกฝนเฉลี่ยรายปีมีค่าอยู่ระหว่าง 920.1 ถึง 1,075.6 มิลลิเมตร ที่ลุ่มน้ำย่อยลำดับที่ 1 และ 11 อย่างไรก็ตาม เนื่องจากลุ่มน้ำย่อยลำดับที่ 3 คือพื้นที่ลุ่มน้ำที่มีจุดออกคือเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล ซึ่งมีข้อมูลการระบายน้ำที่แทนการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลอง KU-MODNAM และ KU-MODNAM-SD จึงไม่ได้ใช้ข้อมูลความลึกฝนในส่วนพื้นที่ลุ่มน้ำดังกล่าว

ตารางที่ 6 ข้อมูลความลึกฝนเฉลี่ยของ 11 กลุ่มน้ำย่อย ในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1

หน่วย : มิลลิเมตร

ลำดับกลุ่มน้ำย่อย	รายเดือน		ฤดูฝน (พ.ค. – ต.ค.)	ฤดูแล้ง (พ.ย. – เม.ย.)	รายปี	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ต่ำสุด	สูงสุด				
1	3.0	192.1	809.0	111.1	920.1	69.4
2	4.0	210.5	875.6	105.8	981.4	75.1
4	3.3	203.4	868.9	111.5	980.5	73.9
5	4.4	203.2	863.7	120.6	984.3	71.8
6	4.5	228.6	950.5	125.1	1,075.6	80.6
7	3.7	204.0	880.3	89.3	969.6	75.7
8	3.0	198.4	857.4	86.1	943.5	74.2
9	2.7	201.2	838.8	85.0	923.8	73.2
10	2.9	208.1	877.6	88.5	966.1	75.6
11	3.5	227.3	940.4	98.9	1,039.3	81.2
ค่าเฉลี่ย	3.5	207.7	876.2	102.2	978.4	75.1

หมายเหตุ : ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานคำนวณจากข้อมูลความลึกฝนรายเดือนเฉลี่ย

สำหรับข้อมูลความลึกฝนเฉลี่ยของ 98 กลุ่มน้ำย่อย ในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A แสดงดังตารางที่ 7 จากตารางดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ความลึกฝนเฉลี่ยรายปีมีค่าอยู่ระหว่าง 939.7 ถึง 1,579.2 มิลลิเมตร ที่กลุ่มน้ำย่อยลำดับที่ 33 และ 90 อย่างไรก็ตาม เนื่องจากกลุ่มน้ำย่อยลำดับที่ 1 และ 68 คือพื้นที่ลุ่มน้ำที่มีจุดออกคือเขื่อนอุบลรัตน์และเขื่อนลำปาว ตามลำดับ ซึ่งมีข้อมูลการระบายน้ำที่แทนการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลอง KU-MODNAM และ KU-MODNAM-SD จึงไม่ได้ใช้ข้อมูลความลึกฝนในส่วนพื้นที่ลุ่มน้ำดังกล่าว

ตารางที่ 7 ข้อมูลความลึกฝนเฉลี่ยของ 98 กลุ่มน้ำย่อย ในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A

หน่วย : มิลลิเมตร

ลำดับกลุ่มน้ำย่อย	รายเดือน		ฤดูฝน (พ.ค. – ต.ค.)	ฤดูแล้ง (พ.ย. – เม.ย.)	รายปี	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ต่ำสุด	สูงสุด				
2	2.4	252.4	1,039.7	100.2	1,139.9	92.6
3	5.3	246.7	1,010.6	132.3	1,142.8	88.0
4	1.7	295.9	1,165.2	100.3	1,265.5	109.9
5	2.3	257.8	1,052.3	94.8	1,147.1	96.9
6	5.2	233.0	982.9	115.6	1,098.4	86.6
7	3.7	260.9	1,027.4	102.4	1,129.8	94.2
8	3.6	270.6	1,058.6	124.8	1,183.4	96.1
9	1.3	316.7	1,213.2	102.5	1,315.7	116.4
10	1.1	319.6	1,158.1	92.4	1,250.5	113.1
11	3.5	290.3	1,089.9	115.2	1,205.1	102.3
12	4.4	268.3	1,056.3	135.7	1,192.0	94.5
13	6.7	268.8	1,016.2	185.2	1,201.4	84.7
14	6.3	299.1	1,071.2	217.1	1,288.2	91.0
15	5.5	284.8	1,001.0	181.4	1,182.4	86.8
16	4.3	259.3	934.8	160.1	1,094.9	80.3
17	3.4	293.7	1,155.4	188.0	1,343.4	96.7
18	3.8	287.4	1,140.3	199.9	1,340.2	95.1
19	4.6	271.2	1,058.1	171.4	1,229.5	89.0
20	4.8	275.4	1,047.2	185.3	1,232.5	88.1
21	3.9	253.2	906.5	156.5	1,063.0	78.0
22	6.2	274.9	1,024.9	182.3	1,207.2	86.7
23	7.5	257.7	935.5	170.9	1,106.4	79.5
24	4.7	281.8	1,110.2	195.0	1,305.2	92.2
25	5.2	250.2	1,007.1	155.9	1,163.0	83.1
26	7.4	239.6	885.4	177.0	1,062.5	73.7
27	7.8	243.5	877.7	177.8	1,055.4	73.7
28	6.2	262.7	928.9	165.8	1,094.7	80.3
29	5.8	260.0	897.4	157.1	1,054.5	78.6
30	7.1	236.1	861.1	164.6	1,025.8	72.4
31	3.6	242.9	1,006.2	141.2	1,147.4	82.3

ตารางที่ 7 (ต่อ)

หน่วย : มิลลิเมตร

ลำดับลุ่มน้ำย่อย	รายเดือน		ฤดูฝน (พ.ค. – ต.ค.)	ฤดูแล้ง (พ.ย. – เม.ย.)	รายปี	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ต่ำสุด	สูงสุด				
32	2.3	213.6	877.6	147.4	1,025.0	71.2
33	3.4	193.5	795.2	144.5	939.7	64.0
34	4.2	204.8	845.5	143.2	988.6	68.5
35	5.1	199.4	793.4	155.7	949.1	63.9
36	6.0	221.6	834.5	162.4	996.9	68.7
37	5.6	239.4	871.3	172.6	1,044.0	73.2
38	6.4	258.4	902.3	174.3	1,076.6	78.1
39	5.0	236.2	884.3	167.9	1,052.2	73.3
40	3.8	248.2	901.4	182.3	1,083.8	76.3
41	5.9	261.0	923.9	171.3	1,095.2	80.2
42	5.5	279.4	942.5	154.7	1,097.2	84.9
43	7.1	284.5	984.8	178.6	1,163.4	87.1
44	8.0	272.2	945.2	177.7	1,122.9	83.2
45	4.3	258.1	928.5	151.6	1,080.1	81.5
46	3.5	256.4	923.1	145.9	1,069.1	81.4
47	3.1	256.4	925.7	132.9	1,058.6	81.6
48	6.0	286.9	966.8	143.6	1,110.5	87.8
49	3.7	282.7	984.3	127.3	1,111.6	89.8
50	3.3	260.3	933.8	137.7	1,071.5	83.1
51	2.5	317.2	1,048.0	112.4	1,160.4	99.0
52	1.7	336.7	1,085.2	116.1	1,201.3	103.9
53	4.8	334.8	1,097.4	129.1	1,226.5	103.0
54	1.9	346.0	1,101.5	110.8	1,212.3	107.6
55	3.0	331.9	1,066.4	118.9	1,185.3	103.1
56	4.1	282.6	1,008.0	140.1	1,148.1	91.0
57	4.4	242.9	954.6	142.8	1,097.5	83.2
58	3.6	249.8	996.5	148.9	1,145.4	86.6
59	2.4	310.5	1,105.1	116.8	1,221.9	103.8
60	3.4	287.3	1,052.7	131.4	1,184.1	97.0
61	1.6	316.5	1,138.0	87.8	1,225.8	111.2

ตารางที่ 7 (ต่อ)

หน่วย : มิลลิเมตร

ลำดับลุ่มน้ำย่อย	รายเดือน		ฤดูฝน (พ.ค. – ต.ค.)	ฤดูแล้ง (พ.ย. – เม.ย.)	รายปี	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ต่ำสุด	สูงสุด				
62	1.8	314.4	1,133.1	116.4	1,249.5	107.0
63	1.7	312.0	1,139.4	121.5	1,260.9	106.1
64	1.1	296.2	1,168.5	131.8	1,300.3	104.8
65	1.2	294.5	1,134.9	123.4	1,258.3	103.3
66	0.7	272.2	1,172.1	149.9	1,322.0	101.1
67	1.8	278.8	1,171.6	127.1	1,298.7	103.1
69	0.9	303.8	1,129.3	69.5	1,198.8	109.3
70	1.1	299.9	1,141.0	71.2	1,212.2	108.7
71	1.0	283.4	1,106.4	72.5	1,178.9	104.7
72	1.1	273.0	1,119.1	92.5	1,211.5	102.9
73	1.7	321.4	1,206.5	79.8	1,286.3	114.7
74	1.5	332.1	1,247.6	84.1	1,331.6	117.8
75	1.0	354.2	1,347.7	92.2	1,439.9	126.2
76	1.3	335.8	1,313.6	103.4	1,417.1	120.5
77	1.1	337.2	1,328.1	108.5	1,436.5	120.7
78	1.7	305.7	1,270.5	130.7	1,401.1	110.9
79	1.1	345.1	1,320.6	99.8	1,420.4	121.7
80	1.9	304.7	1,244.1	113.7	1,357.8	110.0
81	1.1	285.8	1,182.6	104.7	1,287.3	105.5
82	1.0	376.6	1,393.3	70.8	1,464.1	137.7
83	2.2	397.0	1,477.8	97.8	1,575.7	143.0
84	2.6	383.0	1,439.3	110.2	1,549.5	136.9
85	2.3	364.5	1,361.0	106.1	1,467.1	129.1
86	1.7	393.0	1,450.9	100.6	1,551.4	139.2
87	0.7	405.2	1,461.4	95.2	1,556.7	142.8
88	0.2	392.3	1,470.2	75.4	1,545.6	144.4
89	0.6	380.6	1,449.0	75.8	1,524.7	140.4
90	0.3	386.9	1,513.3	65.9	1,579.2	148.8
91	0.3	359.4	1,386.4	66.4	1,452.9	133.6
92	0.5	351.7	1,335.4	89.6	1,425.0	125.4

ตารางที่ 7 (ต่อ)

หน่วย : มิลลิเมตร

ลำดับลุ่มน้ำย่อย	รายเดือน		ฤดูฝน (พ.ค. – ต.ค.)	ฤดูแล้ง (พ.ย. – เม.ย.)	รายปี	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ต่ำสุด	สูงสุด				
93	1.1	365.6	1,402.1	96.7	1,498.8	134.5
94	0.8	332.3	1,260.7	100.8	1,361.5	116.4
95	0.5	282.1	1,155.4	91.5	1,246.9	105.0
96	2.0	324.3	1,237.8	114.6	1,352.4	114.4
97	2.2	302.7	1,218.4	103.1	1,321.5	112.1
98	3.9	314.6	1,339.5	120.6	1,460.1	122.1
ค่าเฉลี่ย	3.3	292.6	1,101.7	129.7	1,231.4	99.7

หมายเหตุ : ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานคำนวณจากข้อมูลความลึกฝนรายเดือนเฉลี่ย

1.3 ข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิงรายวันแบบกริด

ในการศึกษานี้ได้มีการใช้ข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิงรายวันที่ครอบคลุมพื้นที่รับน้ำของสถานีวัดน้ำท่า P.1 แยกตามลุ่มน้ำย่อย 11 ลุ่มน้ำ ในช่วงเวลาระหว่างปี พ.ศ.2546 ถึง พ.ศ. 2557 และพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A ที่แยกตามลุ่มน้ำย่อย 98 ลุ่มน้ำ ในช่วงเวลา ระหว่างปี พ.ศ.2544 ถึง พ.ศ.2558 โดยข้อมูลดังกล่าวเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลการคายระเหยทั่วประเทศไทยแบบกริดที่ได้รับการพัฒนาภายใต้ศูนย์วิจัย SENSWAT ทั้งนี้ ข้อมูลการคายระเหยแบบกริดสร้างจากข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาทั้งหมด 103 สถานี ทั่วประเทศ โดยข้อมูลอุตุนิยมวิทยาประกอบด้วยข้อมูลอุณหภูมิ ชั่วโมงแสงแดด ความเร็วลม ความชื้นในอากาศ เป็นต้น ซึ่งถูกนำมาใช้ประกอบการคำนวณการคายระเหยของพืชอ้างอิงด้วยวิธี Penman-Monteith จากนั้นจึงนำค่าการคายระเหยที่ได้ไปสร้างข้อมูลการคายระเหยทั่วประเทศไทยแบบกริดด้วยการเฉลี่ยด้วยวิธีส่วนกลับของระยะทางยกกำลังสอง (Inverse Distance Square, IDS) ทั้งนี้ในตารางที่ 8 และ 9 แสดงถึงอัตราการคายระเหยเฉลี่ยรายเดือนและรายปีที่เกิดขึ้นของ 11 ลุ่มน้ำย่อยในพื้นที่รับน้ำของสถานีวัดน้ำท่า P.1 และ ของ 98 ลุ่มน้ำย่อยในพื้นที่รับน้ำของสถานีวัดน้ำท่า E.20A

จากตารางที่ 8 จะเห็นได้ว่าอัตราการระเหยเฉลี่ยรายปีของ 11 กลุ่มน้ำย่อย มีค่าอยู่ระหว่าง 2.67 ถึง 2.80 มิลลิเมตร บนกลุ่มน้ำย่อยลำดับที่ 9,11 และ 4 สำหรับตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่าอัตราการระเหยเฉลี่ยรายปีของ 98 กลุ่มน้ำย่อย มีค่าอยู่ระหว่าง 3.76 ถึง 4.17 มิลลิเมตร บนกลุ่มน้ำย่อยลำดับที่ 12 และ 14

ตารางที่ 8 อัตราการคายระเหยเฉลี่ยรายเดือนและรายปีของ 11 กลุ่มน้ำย่อย ในพื้นที่รับน้ำฝนของ
สถานีวัดน้ำท่า P.1

หน่วย : มิลลิเมตร

ลำดับ กลุ่มน้ำย่อย	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	รายปี
1	3.74	3.36	2.96	2.72	2.63	2.73	2.53	2.25	1.92	2.11	2.74	3.16	2.74
2	3.67	3.29	2.90	2.67	2.57	2.67	2.52	2.24	1.91	2.15	2.71	3.14	2.70
4	3.82	3.41	3.00	2.75	2.65	2.76	2.61	2.33	1.99	2.18	2.80	3.26	2.80
5	3.79	3.37	2.97	2.72	2.62	2.73	2.56	2.28	1.95	2.15	2.78	3.22	2.76
6	3.69	3.31	2.92	2.69	2.59	2.69	2.50	2.21	1.89	2.11	2.71	3.13	2.70
7	3.64	3.27	2.89	2.65	2.55	2.65	2.51	2.23	1.91	2.17	2.69	3.14	2.69
8	3.61	3.24	2.89	2.65	2.57	2.64	2.51	2.24	1.92	2.18	2.69	3.14	2.69
9	3.50	3.15	2.87	2.62	2.62	2.60	2.49	2.27	1.95	2.22	2.64	3.13	2.67
10	3.55	3.19	2.88	2.63	2.61	2.62	2.50	2.27	1.95	2.21	2.66	3.14	2.68
11	3.49	3.14	2.87	2.62	2.63	2.60	2.49	2.27	1.96	2.23	2.64	3.13	2.67
ค่าเฉลี่ย	3.65	3.27	2.92	2.67	2.60	2.67	2.52	2.26	1.94	2.17	2.71	3.16	2.71

ตารางที่ 9 อัตราการคายระเหยเฉลี่ยรายเดือนและรายปีของ 98 กลุ่มน้ำย่อย ในพื้นที่รับน้ำฝนของ
สถานีวัดน้ำท่า E.20A

หน่วย : มิลลิเมตร

ลำดับ กลุ่มน้ำย่อย	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	รายปี
2	4.98	4.51	4.12	3.82	3.62	3.52	3.85	3.57	3.24	3.38	4.09	4.54	3.94
3	5.00	4.53	4.13	3.82	3.62	3.53	3.85	3.58	3.25	3.39	4.10	4.55	3.95
4	5.07	4.58	4.19	3.89	3.66	3.55	3.91	3.67	3.37	3.51	4.21	4.67	4.02
5	5.09	4.62	4.21	3.90	3.67	3.55	3.92	3.69	3.39	3.53	4.23	4.68	4.04
6	5.10	4.63	4.21	3.90	3.67	3.56	3.92	3.67	3.38	3.52	4.22	4.67	4.04
7	5.08	4.60	4.18	3.86	3.65	3.55	3.88	3.63	3.32	3.46	4.16	4.62	4.00
8	5.09	4.62	4.21	3.89	3.66	3.56	3.90	3.65	3.35	3.49	4.18	4.64	4.02
9	5.03	4.54	4.16	3.86	3.65	3.53	3.89	3.64	3.35	3.48	4.17	4.64	3.99
10	5.13	4.67	4.30	3.99	3.73	3.56	3.95	3.74	3.48	3.60	4.26	4.72	4.09
11	5.19	4.74	4.36	4.04	3.76	3.58	4.00	3.80	3.57	3.69	4.33	4.79	4.15
12	5.21	4.77	4.38	4.05	3.77	3.58	4.00	3.81	3.58	3.70	4.34	4.80	4.17
13	5.01	4.52	4.03	3.71	3.58	3.53	3.71	3.52	3.17	3.34	4.08	4.52	3.89
14	4.88	4.37	3.88	3.56	3.44	3.43	3.60	3.41	3.02	3.20	3.94	4.38	3.76
15	5.01	4.49	4.06	3.73	3.57	3.50	3.77	3.57	3.24	3.37	4.11	4.56	3.91
16	5.09	4.61	4.15	3.80	3.67	3.59	3.76	3.57	3.26	3.41	4.15	4.58	3.97
17	5.02	4.52	4.04	3.67	3.52	3.48	3.68	3.50	3.15	3.30	4.03	4.47	3.86
18	5.06	4.58	4.11	3.75	3.62	3.56	3.73	3.54	3.21	3.36	4.10	4.53	3.93
19	5.09	4.61	4.13	3.80	3.66	3.58	3.77	3.59	3.26	3.43	4.15	4.60	3.97
20	5.06	4.59	4.12	3.76	3.63	3.56	3.74	3.54	3.22	3.37	4.11	4.54	3.94
21	5.01	4.53	4.07	3.74	3.59	3.52	3.74	3.52	3.19	3.34	4.07	4.51	3.90
22	5.03	4.56	4.09	3.75	3.60	3.53	3.72	3.53	3.18	3.35	4.07	4.52	3.91
23	5.05	4.61	4.17	3.88	3.72	3.57	3.75	3.61	3.29	3.43	4.14	4.60	3.99
24	5.03	4.55	4.07	3.72	3.58	3.51	3.69	3.53	3.18	3.33	4.06	4.51	3.90
25	5.01	4.55	4.09	3.79	3.62	3.50	3.71	3.57	3.22	3.36	4.07	4.53	3.92
26	5.03	4.59	4.14	3.85	3.68	3.54	3.74	3.60	3.26	3.41	4.11	4.58	3.96
27	5.04	4.59	4.14	3.85	3.69	3.55	3.75	3.60	3.27	3.42	4.12	4.59	3.97
28	4.99	4.53	4.09	3.80	3.64	3.53	3.76	3.57	3.23	3.38	4.09	4.55	3.93
29	5.04	4.59	4.13	3.84	3.69	3.56	3.76	3.60	3.27	3.42	4.13	4.59	3.97
30	5.01	4.58	4.14	3.86	3.71	3.56	3.73	3.58	3.26	3.40	4.10	4.56	3.96

ตารางที่ 9 (ต่อ)

หน่วย : มิลลิเมตร

ลำดับ ลุ่มน้ำย่อย	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	รายปี
31	4.96	4.52	4.13	3.86	3.66	3.47	3.69	3.60	3.31	3.45	4.09	4.53	3.94
32	4.99	4.61	4.32	4.10	3.87	3.57	3.73	3.73	3.57	3.70	4.25	4.67	4.09
33	4.99	4.59	4.25	3.98	3.80	3.56	3.70	3.66	3.45	3.57	4.18	4.61	4.03
34	4.96	4.52	4.09	3.79	3.64	3.50	3.69	3.54	3.20	3.34	4.04	4.49	3.90
35	4.96	4.53	4.12	3.82	3.69	3.55	3.70	3.53	3.23	3.35	4.06	4.50	3.92
36	4.99	4.56	4.14	3.83	3.71	3.57	3.71	3.55	3.25	3.37	4.08	4.52	3.94
37	5.02	4.58	4.14	3.83	3.71	3.59	3.73	3.57	3.28	3.40	4.12	4.55	3.96
38	5.03	4.58	4.14	3.83	3.72	3.59	3.73	3.57	3.28	3.41	4.12	4.56	3.96
39	5.03	4.59	4.15	3.85	3.73	3.61	3.77	3.59	3.30	3.43	4.14	4.58	3.98
40	5.03	4.58	4.13	3.82	3.71	3.59	3.75	3.57	3.28	3.41	4.13	4.56	3.96
41	4.91	4.45	4.05	3.78	3.64	3.52	3.73	3.52	3.21	3.34	4.04	4.49	3.89
42	4.92	4.44	4.01	3.72	3.53	3.43	3.76	3.54	3.16	3.33	4.03	4.49	3.86
43	4.95	4.49	4.10	3.81	3.64	3.50	3.77	3.58	3.25	3.37	4.08	4.54	3.92
44	4.92	4.45	4.04	3.76	3.60	3.50	3.78	3.54	3.22	3.35	4.06	4.51	3.90
45	4.88	4.42	4.08	3.83	3.65	3.49	3.79	3.55	3.24	3.37	4.06	4.53	3.91
46	4.97	4.53	4.21	3.95	3.73	3.53	3.85	3.64	3.34	3.45	4.15	4.62	4.00
47	4.99	4.55	4.23	3.97	3.75	3.54	3.84	3.65	3.35	3.46	4.16	4.63	4.01
48	4.95	4.49	4.09	3.81	3.60	3.46	3.79	3.58	3.22	3.38	4.07	4.54	3.91
49	5.00	4.58	4.26	3.99	3.79	3.56	3.80	3.64	3.35	3.44	4.15	4.61	4.01
50	4.99	4.56	4.25	3.98	3.77	3.55	3.82	3.64	3.35	3.45	4.16	4.62	4.01
51	4.99	4.58	4.25	3.97	3.77	3.55	3.80	3.63	3.34	3.44	4.14	4.60	4.00
52	5.01	4.57	4.24	3.96	3.73	3.53	3.86	3.64	3.35	3.47	4.13	4.60	4.01
53	5.04	4.62	4.21	3.92	3.68	3.54	3.91	3.66	3.36	3.51	4.18	4.62	4.02
54	5.02	4.58	4.24	3.96	3.71	3.53	3.89	3.64	3.37	3.49	4.14	4.61	4.01
55	5.03	4.60	4.23	3.95	3.70	3.53	3.91	3.67	3.40	3.52	4.18	4.64	4.03
56	5.11	4.69	4.29	3.98	3.72	3.55	3.96	3.73	3.47	3.61	4.26	4.70	4.09
57	5.04	4.61	4.21	3.91	3.67	3.54	3.89	3.63	3.33	3.47	4.16	4.61	4.01
58	5.21	4.77	4.37	4.04	3.76	3.58	4.00	3.80	3.57	3.69	4.33	4.78	4.16
59	5.18	4.72	4.34	4.03	3.75	3.57	4.00	3.80	3.56	3.67	4.33	4.79	4.15
60	5.20	4.75	4.36	4.04	3.76	3.58	4.00	3.81	3.58	3.70	4.34	4.80	4.16

ตารางที่ 9 (ต่อ)

หน่วย : มิลลิเมตร

ลำดับ ลุ่มน้ำย่อย	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ก.	ก.พ.	มี.ค.	รายปี
61	5.15	4.69	4.33	4.02	3.75	3.57	3.98	3.77	3.53	3.64	4.30	4.77	4.12
62	5.16	4.68	4.32	4.01	3.75	3.57	3.99	3.79	3.54	3.66	4.32	4.79	4.13
63	5.16	4.68	4.31	4.01	3.74	3.56	3.99	3.79	3.55	3.66	4.33	4.79	4.13
64	4.97	4.57	4.17	3.89	3.66	3.50	3.89	3.60	3.27	3.41	4.08	4.53	3.96
65	4.99	4.58	4.20	3.91	3.69	3.51	3.90	3.63	3.31	3.44	4.11	4.57	3.99
66	4.87	4.45	4.05	3.79	3.60	3.47	3.80	3.51	3.17	3.32	3.99	4.43	3.87
67	4.82	4.41	4.00	3.76	3.58	3.45	3.78	3.46	3.10	3.25	3.93	4.38	3.83
69	5.01	4.57	4.19	3.90	3.67	3.51	3.90	3.63	3.32	3.45	4.12	4.59	3.99
70	4.95	4.54	4.15	3.86	3.64	3.49	3.87	3.57	3.23	3.38	4.05	4.52	3.94
71	4.96	4.53	4.15	3.87	3.66	3.50	3.88	3.60	3.28	3.41	4.08	4.55	3.96
72	4.91	4.50	4.10	3.83	3.63	3.48	3.85	3.54	3.20	3.34	4.01	4.47	3.90
73	4.90	4.49	4.10	3.81	3.58	3.48	3.82	3.47	3.10	3.26	3.96	4.45	3.87
74	4.84	4.43	4.06	3.77	3.55	3.45	3.77	3.41	3.02	3.20	3.90	4.39	3.81
75	4.81	4.40	4.03	3.76	3.54	3.44	3.75	3.39	3.01	3.19	3.89	4.36	3.80
76	4.82	4.40	4.02	3.76	3.55	3.45	3.76	3.42	3.05	3.21	3.90	4.37	3.81
77	4.90	4.52	4.16	3.88	3.65	3.49	3.83	3.55	3.20	3.34	4.02	4.45	3.91
78	4.96	4.60	4.23	3.95	3.72	3.53	3.88	3.66	3.34	3.45	4.12	4.52	4.00
79	4.99	4.63	4.27	3.98	3.74	3.54	3.90	3.68	3.35	3.47	4.14	4.55	4.02
80	4.99	4.62	4.26	3.97	3.73	3.54	3.89	3.68	3.36	3.48	4.15	4.55	4.02
81	5.02	4.65	4.29	3.99	3.74	3.54	3.91	3.69	3.38	3.50	4.17	4.58	4.04
82	5.00	4.64	4.24	3.90	3.67	3.53	3.91	3.58	3.22	3.36	4.05	4.53	3.97
83	5.04	4.65	4.26	3.93	3.69	3.54	3.93	3.61	3.27	3.41	4.09	4.58	4.00
84	5.08	4.66	4.28	3.96	3.71	3.55	3.95	3.65	3.34	3.46	4.13	4.63	4.03
85	5.04	4.60	4.19	3.89	3.65	3.56	3.91	3.60	3.28	3.43	4.11	4.60	3.99
86	4.99	4.54	4.14	3.84	3.61	3.54	3.87	3.54	3.20	3.36	4.04	4.54	3.93
87	5.01	4.60	4.19	3.87	3.64	3.54	3.90	3.57	3.23	3.38	4.07	4.56	3.96
88	5.01	4.62	4.22	3.90	3.67	3.55	3.91	3.57	3.23	3.37	4.06	4.55	3.97
89	4.93	4.51	4.12	3.80	3.58	3.51	3.83	3.47	3.11	3.28	3.97	4.47	3.88
90	4.93	4.55	4.17	3.84	3.61	3.50	3.85	3.48	3.12	3.27	3.96	4.47	3.90
91	4.91	4.54	4.16	3.84	3.61	3.50	3.84	3.47	3.10	3.25	3.95	4.44	3.88

ตารางที่ 9 (ต่อ)

หน่วย : มิลลิเมตร

ลำดับ	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	รายปี
ลุ่มน้ำย่อย													
92	5.00	4.67	4.27	3.95	3.73	3.55	3.93	3.66	3.32	3.44	4.10	4.54	4.02
93	5.01	4.67	4.26	3.94	3.71	3.54	3.93	3.65	3.31	3.43	4.10	4.55	4.01
94	5.02	4.69	4.32	3.98	3.75	3.55	3.94	3.69	3.36	3.49	4.14	4.58	4.04
95	5.04	4.70	4.33	4.00	3.75	3.55	3.94	3.70	3.38	3.52	4.17	4.60	4.06
96	5.04	4.72	4.33	3.99	3.76	3.55	3.97	3.72	3.39	3.51	4.16	4.60	4.06
97	5.08	4.72	4.35	4.02	3.76	3.56	3.98	3.77	3.47	3.59	4.22	4.67	4.10
98	5.05	4.68	4.34	4.01	3.75	3.54	3.96	3.77	3.47	3.60	4.20	4.67	4.09
ค่าเฉลี่ย	3.65	3.27	2.92	2.67	2.60	2.67	2.52	2.26	1.94	2.17	2.71	3.16	2.71

1.4 ข้อมูลน้ำท่ารายวัน

ในการศึกษานี้ได้นำข้อมูลน้ำท่ารายวันที่ทำการตรวจวัดโดยกรมชลประทานมาใช้เพื่อ การสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM และ KU-MODNAM-SD โดยข้อมูลน้ำท่ารายวัน ประกอบด้วยข้อมูลในกลุ่มน้ำปีงตอนบนจำนวน 6 สถานี ที่มีช่วงข้อมูลระหว่างปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2557 และในกลุ่มน้ำชีจำนวน 13 สถานี ที่มีช่วงข้อมูลระหว่างปี พ.ศ. 2544 ถึง พ.ศ. 2558 โดย รายละเอียดของข้อมูลสถานีวัดน้ำท่าในกลุ่มน้ำปีงตอนบนแสดงดังในตารางที่ 10 จากตารางดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ปริมาณ น้ำท่ารายปีเฉลี่ยของสถานีวัดน้ำท่าทั้ง 6 สถานี มีค่าอยู่ระหว่าง 142.2 ถึง 1,571.3 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งตรวจวัดได้ที่สถานีวัดน้ำท่า P.21 และ P.1 ตามลำดับ และปริมาณการ ให้น้ำจำเพาะ (Specific yield) ของสถานีวัดน้ำท่าทั้ง 6 สถานี มีค่าอยู่ระหว่าง 6.50 ถึง 12.03 ลิตรต่อ วินาทีต่อตารางกิโลเมตร ซึ่งตรวจวัดได้ที่สถานีวัดน้ำท่า P.4A และ P.20 ตามลำดับ นอกจากนั้น แล้วรายละเอียดของข้อมูลสถานีวัดน้ำท่าในกลุ่มน้ำชีแสดงดังในตารางที่ 11 จากตารางดังกล่าวแสดง ให้เห็นว่า ปริมาณ น้ำท่ารายปีเฉลี่ยของสถานีวัดน้ำท่าทั้ง 13 สถานี มีค่าอยู่ระหว่าง 78.0 ถึง 10,499.2 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งตรวจวัดได้ที่สถานีวัดน้ำท่า E.72 และ E.20A ตามลำดับ และ ปริมาณการ ให้น้ำจำเพาะ (Specific yield) ของสถานีวัดน้ำท่าทั้ง 13 สถานี มีค่าอยู่ระหว่าง 5.05 ถึง 14.61 ลิตรต่อวินาทีต่อตารางกิโลเมตร ซึ่งตรวจวัดได้ที่สถานีวัดน้ำท่า E.9 และ E.70 ตามลำดับ

ตารางที่ 10 รายละเอียดของข้อมูลน้ำทำในกลุ่มน้ำปึงตอนบนที่ใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง

รหัส สถานีวัดน้ำทำ	ชื่อสถานี	พื้นที่รับน้ำ (ตร.กม.)	ปริมาณน้ำทำรายปี (ล้าน ลบ.ม.)			ปริมาณ การให้น้ำจำเพาะ (ลิตร/วินาที/ตร.กม.)
			เฉลี่ย	ต่ำสุด	สูงสุด	
P.1	สะพานนารัฐ	6,140	1,571.3	817.2	3,034.8	8.11
P.21	บ้านริมใต้	542	142.2	80.1	269.4	8.32
P.67	บ้านแม่แต	5,269	1,376.5	640.1	2,642.6	8.28
P.4A	บ้านแม่แตง	1,960	402.4	178.7	889.3	6.50
P.75	บ้านช่อแล	3,004	781.4	441.2	1,454.2	8.24
P.20	บ้านเชียงดาว	1,300	493.6	243.7	880.2	12.03

ตารางที่ 11 รายละเอียดของข้อมูลน้ำทำในกลุ่มน้ำชีที่ใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง

รหัสสถานีวัด น้ำทำ	ชื่อสถานี	พื้นที่รับน้ำ (ตร.กม.)	ปริมาณน้ำทำรายปี (ล้าน ลบ.ม.)			ปริมาณ การให้น้ำจำเพาะ (ลิตร/วินาที/ตร.กม.)
			เฉลี่ย	ต่ำสุด	สูงสุด	
E.73	บ้านวังตะกูน	256	100.6	37.5	185.4	12.45
E.72	บ้านเจียง	326	78.0	44.9	167.9	7.58
E.32A	บ้านหนองอ้อ	2,900	952.7	322.9	2,118.1	10.41
E.5	บ้านโนนเปลือย	4,200	1,159.8	450.9	2,019.4	8.75
E.23	บ้านคำย	6,292	1,191.9	330.2	2,285.5	6.00
E.6C	บ้านตาดโค่น	380	105.1	23.3	208.0	8.76
E.21	บ้านแก่งโก	8,766	1,685.8	339.7	3,188.6	6.09
E.9	บ้านโจด	10,890	1,738.3	272.8	3,610.7	5.05
E.66A	บ้านม่วงลาด	31,963	5,560.6	1,791.5	10,715.6	5.51
E.18	บ้านท่าสะแบง	41,200	7,812.8	3,006.7	13,498.1	6.01
E.54	บ้านแก่งยาว	1,560	683.8	161.0	1,206.01	13.89
E.70	บ้านกุดกว้าง	2,660	1,226.7	316.6	2,202.3	14.61
E.20A	บ้านฟ้าหยาด	47,790	10,499.2	4,018.467	18,102.14	6.96

1.5 ค่าดัชนี NDII

ในการศึกษานี้ได้นำค่าดัชนี NDII ที่ผ่านการวิเคราะห์ความแตกต่างของคลื่นอินฟราเรดชนิดใกล้ (Near infrared, NIR) และคลื่นอินฟราเรดชนิดคลื่นสั้น (Shortwave infrared, SWIR) ตามที่แสดงในสมการที่ 25 โดยคลื่นอินฟราเรดชนิดใกล้มีความยาวช่วงคลื่นบริเวณศูนย์กลางที่ 1.64 ไมโครเมตร ส่วนคลื่นอินฟราเรดชนิดคลื่นสั้นมีความยาวช่วงคลื่นบริเวณศูนย์กลางที่ 0.86 ไมโครเมตร ซึ่งได้จากชุดผลิตภัณฑ์ MOD09A1 ที่เป็นข้อมูลภาพที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่เท่ากับ 500 เมตร และมีช่วงระยะเวลาของข้อมูลภาพเท่ากับ 8 วัน ที่ครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทย

$$NDII = \left(\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \right) \quad (25)$$

โดยที่ NIR = ค่าการสะท้อนกลับจากพื้นผิวในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้
 $SWIR$ = ค่าการสะท้อนกลับจากพื้นผิวในช่วงคลื่นอินฟราเรดคลื่นสั้น

2. พัฒนาโปรแกรม KU-GA เพื่อการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว

โปรแกรม KU-GA ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ภาษา MATLAB เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนด โดยเป็นการตรวจสอบความสามารถของโปรแกรม KU-GA ก่อนที่จะนำไปเชื่อมต่อและประยุกต์ใช้ในการสอบเทียบแบบจำลองทางอุทกวิทยาสำหรับการศึกษานี้ โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียวที่นำมาใช้ศึกษานี้คือการหาค่าที่น้อยที่สุดของค่า Z ดังแสดงในสมการที่ (25)

$$Min.Z = 2X^2 + (16/X) \quad (26)$$

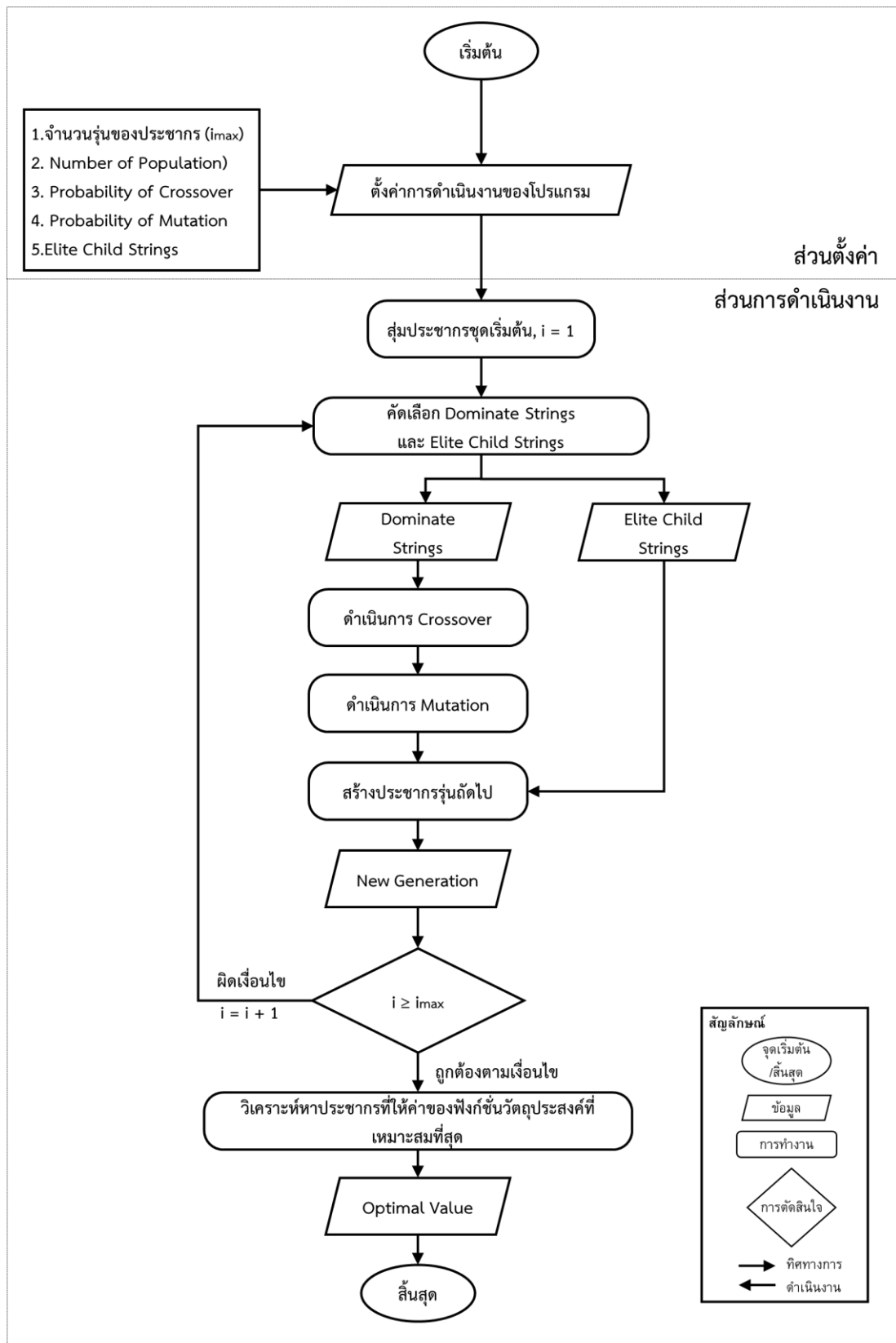
โดยที่ x มีค่าอยู่ระหว่าง 1.00 ถึง 2.00

ในการพัฒนาโปรแกรม KU-GA ได้ดำเนินการแบ่งโครงสร้างออกเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 10 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การตั้งค่าโปรแกรม KU-GA โดยการป้อนค่าเพื่อกำหนดพารามิเตอร์ควบคุมการดำเนินงานของโปรแกรม KU-GA ซึ่งประกอบด้วย (1) จำนวนรุ่นของประชากร (i_{max}) (2) จำนวนประชากร (Number of Population, Strings) (3) ความน่าจะเป็นของการเกิด Crossover (4) ความน่าจะเป็นของการเกิด Mutation และ (5) จำนวน Elite Child Strings ทั้งนี้ ค่าความน่าจะเป็นของการเกิด Crossover และ Mutation มีค่าอยู่ระหว่างที่ 0.00 ถึง 1.00

2) การดำเนินงานของโปรแกรม KU-GA ตามขั้นตอนการดำเนินงานของ GA เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่ามากที่สุดหรือน้อยที่สุด (Optimum Value) ตามที่กำหนดไว้

โปรแกรม KU-GA จะดำเนินการสุ่มค่า x ของประชากรรุ่นเริ่มต้นตามจำนวนประชากรที่กำหนดไว้ โดยค่า x มีค่าอยู่ช่วงระหว่าง 1.00, 1.01, 1.02, ..., 1.98, 1.99 และ 2.00 ต่อมานำประชากรรุ่นเริ่มต้นแทนค่าในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ (สมการที่ (25)) เมื่อได้ผลลัพธ์ (z) จากค่า x แต่ละตัว จึงนำมาจัดอันดับเพื่อเรียงลำดับจากน้อยสุดไปมากที่สุดตามค่า z เพื่อคัดเลือก Elite Child Strings ตามจำนวนที่กำหนด และนำเข้าสู่กระบวนการ Roulette Wheel เพื่อตัดค่า x ที่ทำให้ค่า z สูงออก และนำค่า x ที่ทำให้ค่า z น้อยมาทดแทนเพื่อใช้เป็น Dominate Strings ต่อมานำ Dominate Strings เข้าสู่กระบวนการ Crossover และ Mutation ซึ่งจะเกิดขึ้นหรือไม่ขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็นของการเกิด Crossover หรือ Mutation ที่กำหนด หลังจากนั้น Dominate Strings ที่ผ่านกระบวนการ Crossover และ Mutation จะถูกนำไปแทนค่าในฟังก์ชันวัตถุประสงค์พร้อมจัดอันดับและนำค่า x ที่อยู่ใน Elite Child Strings มาแทนค่า x ใน Dominate Strings ที่ทำให้ค่า z สูงออกตามจำนวน Elite Child Strings พร้อมทั้งกำหนดให้เป็นประชากรรุ่นที่ 2 และดำเนินการซ้ำจนครบจำนวนรุ่นประชากรที่กำหนด อย่างไรก็ตาม การดำเนินการสุ่มค่า x ของประชากรเริ่มต้น จะดำเนินการเพียงครั้งเดียวในช่วงเริ่มต้นเท่านั้น



ภาพที่ 10 ขั้นตอนการดำเนินงานของโปรแกรม KU-GA

3. พัฒนาแบบจำลอง KU-MODNAM-SD จากพื้นฐานของแบบจำลอง Modified NAM และ ทฤษฎีการเคลื่อนตัวน้ำท่าของ Muskingum โดยใช้โปรแกรม MATLAB

ในการศึกษานี้ได้พัฒนาแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยการนำแบบจำลอง KU-MODNAM ที่พัฒนาจากพื้นฐานแบบจำลอง MODNAM ด้วยภาษา MATLAB และนำทฤษฎีการเคลื่อนตัวน้ำท่าของ Muskingum มาใช้ร่วมในการพัฒนาแบบจำลอง KU-MODNAM-SD ให้สามารถประเมินน้ำท่าแบบกึ่งกระจายตัวได้ โดยแบ่งการประเมินน้ำท่าออกเป็น 2 ส่วน คือการประเมินน้ำท่าแบบลัมพ์ในกลุ่มน้ำย่อย และการเคลื่อนตัวของน้ำท่าในลำน้ำระหว่างกลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำท่าที่ใช้ในการสอบเทียบ ทั้งนี้การประเมินน้ำท่าในแต่ละกลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำท่าที่ใช้ในการสอบเทียบแบบจำลองคำนวณได้โดยใช้หลักการของแบบจำลอง KU-MODNAM โดยเวลาดำเนินการของการเกิดน้ำท่า (CK_1 , CK_2) ในแบบจำลอง KU-MODNAM ที่พัฒนาโดยศูนย์วิจัย SENSWAT ได้กำหนดให้ค่า $CK_1 = CK_2$ เพื่อลดจำนวนพารามิเตอร์ของแบบจำลองในการเคลื่อนตัวการไหลบนผิวดิน (Overland Flow) และการไหลระหว่างผิวดินและชั้นน้ำใต้ดิน (Interflow) โดยค่า CK คำนวณได้จากสมการที่ (26)

$$CK_{sub} = CK \sqrt{A_{sub} / A} \quad (27)$$

โดยที่ CK_{sub} = เวลาหน่วงของการเกิดน้ำท่าในกลุ่มน้ำย่อย (ชั่วโมง)
 CK = เวลาหน่วงของการเกิดน้ำท่าในกลุ่มน้ำของสถานีวัดน้ำท่าที่สอบเทียบแบบจำลอง (ชั่วโมง)
 A_{sub} = พื้นที่กลุ่มน้ำย่อย (ตารางกิโลเมตร)
 A = พื้นที่กลุ่มน้ำของสถานีวัดน้ำท่าที่สอบเทียบแบบจำลอง (ตารางกิโลเมตร)

ผลการประเมินน้ำท่าในกลุ่มน้ำย่อยด้านเหนือน้ำจะเคลื่อนตัวตามลำน้ำไปด้านท้ายน้ำตามหลักของ Muskingum เพื่อนำไปรวมกับปริมาณน้ำท่าที่ประเมินได้จากกลุ่มน้ำย่อยทางด้านท้ายน้ำต่อไป โดยการเคลื่อนตัวน้ำท่าในลำน้ำตามหลักของ Muskingum สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (27)

$$S_{sub} = K_{sub} [XQ_1 + (1-X)Q_2] \quad (28)$$

$$K_{sub} = KL_{sub} \quad (29)$$

โดยที่	S_{sub}	=	ปริมาตรเก็บกักในลำน้ำของแต่ละลุ่มน้ำย่อย
	K	=	สัมประสิทธิ์ของการไหลในลำน้ำตามสัดส่วนของกลุ่มน้ำของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบแบบจำลอง
	X	=	แฟลคเตอร์ถ่วงน้ำหนัก
	L_{sub}	=	ความยาวลำน้ำจากด้านเหนือน้ำไปยังจุดออกด้านท้ายน้ำของแต่ละลุ่มน้ำย่อย
	Q_1, Q_2	=	ปริมาณน้ำท่าของกลุ่มน้ำย่อยด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำตามลำดับ

4. พัฒนาแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII จากหลักความสัมพันธ์ของดัชนี NDII กับความจุเก็บกักในชั้นดินสูงสุด ของแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII โดยใช้โปรแกรม MATLAB (ร)

การพัฒนาแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยการนำหลักความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และความจุเก็บกักในชั้นดินสูงสุด ของแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII มาใช้พัฒนาเพื่อคำนวณหาค่าความจุเก็บกักในชั้นดินสูงสุดของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII ทั้งนี้พารามิเตอร์ที่เป็นตัวแทนของความจุเก็บกักในชั้นดินสูงสุดของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII คือ L_{max} ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (29)

$$L_{max,i} = L_{max} \times \left(\frac{\left[(NDII_{i,max})^b - (NDII_{i,min})^b \right]_{max}}{\left[(NDII_{max})^b - (NDII_{min})^b \right]_{max}} \right) \quad (30)$$

โดยที่	$L_{max,i}$	=	ความจุเก็บกักในชั้นดินสูงสุด ของลุ่มน้ำย่อยลำดับที่ i
	L_{max}	=	ความจุเก็บกักในชั้นดินสูงสุด ของลุ่มน้ำหลัก

5. ประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM, KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII

โปรแกรม KU-GA ที่ได้อธิบายในขั้นตอนที่ 2 ได้รับการพัฒนาให้มีความสามารถในการแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) สำหรับการสอบเทียบ

แบบจำลอง KU-MODNAM, KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII โดยใช้ค่าทางสถิติ คือ KGE , KGE_L และ KGE_{FDC} เช่นเดียวกับ โปรแกรม MOSCEM ที่ใช้เป็นค่าดัชนีในการบ่งบอกถึงความเหมาะสมของค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองจึงได้แสดงดัชนี NSE เพิ่มอีก 1 ดัชนี เพื่อใช้เป็นตัวแปรทางสถิติกลางที่ใช้อธิบายการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองในภาพรวม

โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM มีหน้าที่ในการกำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-MODNAM, KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII ตามกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมของโปรแกรม ที่มีการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือดัชนี KGE , KGE_L และ KGE_{FDC} เพื่อนำไปสู่การเข้ากันได้มากที่สุดระหว่างกราฟน้ำท่าที่ได้จากทั้ง 2 แบบจำลอง และกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ทั้งนี้โปรแกรม KU-GA ที่ถูกพัฒนาขึ้นในการศึกษานี้และโปรแกรม MOSCEM ได้ถูกนำมาเชื่อมต่อกับแบบจำลอง KU-MODNAM, KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII สำหรับประยุกต์ใช้เพื่อการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติ โดยการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM จะใช้ข้อมูลในช่วงระหว่างปี 2546-2557 สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 6 สถานี ในลุ่มน้ำปิงตอนบน ซึ่งประกอบด้วยสถานีวัดน้ำท่า P.4A, P.20, P.75, P.67, P.21 และ P.1 และข้อมูลในช่วงระหว่างปี 2544-2558 สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 13 สถานี ในลุ่มน้ำชี ซึ่งประกอบด้วยสถานีวัดน้ำท่า E.73, E.72, E.32A, E.5, E.23, E.6C, E.21, E.9, E.66C, E.18, E.54 E.70 และ E.20A อย่างไรก็ตาม การสอบเทียบโดยแบบจำลอง KU-MODNAM-SD จะดำเนินการสอบเทียบเฉพาะสถานีวัดน้ำท่า P.1 และ E.20A เนื่องจากแบบจำลองจะประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.4A, P.20, P.75, P.67 และ P.21 ที่เป็นลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำท่า P.1 และของสถานีวัดน้ำท่า E.73, E.72, E.32A, E.5, E.23, E.6C, E.21, E.9, E.66C, E.18, E.54 และ E.70 ที่เป็นลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำท่า E.20A ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลการประเมินน้ำท่าโดยแบบจำลอง KU-MODNAM เพื่อการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD รวมทั้งแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII ที่พัฒนาความสามารถในการประเมินปริมาณการไหลต่ำๆ ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลการประเมินน้ำท่าโดยแบบจำลอง KU-MODNAM-SD เพื่อการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII ต่อไป

ผลและวิจารณ์

ผลการศึกษาของงานวิจัยเรื่อง “การพัฒนาโปรแกรม Genetic Algorithm เพื่อการสอบเทียบแบบจำลอง Modified NAM, Modified NAM-SD และ Modified NAM-SD-NDII แบบอัตโนมัติ” สามารถสรุปได้ดังในหัวข้อต่อไปนี้

1. ผลการพัฒนาโปรแกรม KU-GA เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว

2. ผลการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM, KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII สำหรับลุ่มน้ำปึงตอนบนและลุ่มน้ำชี

3. ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM และ KU-MONAM-SD ในการประเมินน้ำท่าในลุ่มน้ำปึงตอนบนและลุ่มน้ำชี โดยใช้โปรแกรม KU-GA ในการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติ

4. ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD และ KU-MONAM-SD-NDII ในการประเมินน้ำท่าในลุ่มน้ำปึงตอนบนและลุ่มน้ำชี โดยใช้โปรแกรม KU-GA ในการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติ

โดยรายละเอียดของผลการศึกษาสรุปได้ดังต่อไปนี้

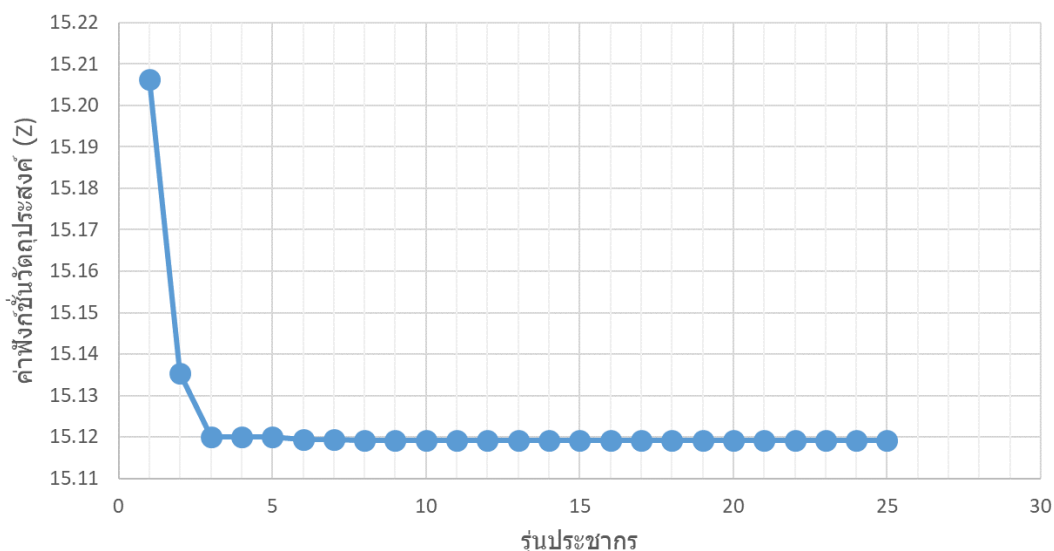
1. ผลการพัฒนาโปรแกรม KU-GA เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว

ตามที่ได้กล่าวไว้ในวิธีการศึกษา ข้อ 2 ในเรื่องการพัฒนาโปรแกรม KU-GA ซึ่งดำเนินงานโดยการกำหนดพารามิเตอร์ควบคุม 5 พารามิเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย (1) จำนวนรุ่นของประชากร (i_{max}) (2) จำนวนประชากร (Number of Population, Strings) (3) ความน่าจะเป็นของการเกิด Crossover (4) ความน่าจะเป็นของการเกิด Mutation และ (5) จำนวน Elite Child Strings ซึ่งในการพัฒนาโปรแกรม KU-GA กำหนดพารามิเตอร์ควบคุมให้มีค่าเท่ากับ 25, 20, 0.80, 0.10 และ 10% ของจำนวนประชากร ตามลำดับ

ผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (X) โดยโปรแกรม KU-GA ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Z) ในสมการที่ (25) มีค่าน้อยที่สุดในแต่ละรุ่น แสดงดังตารางที่ 12 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงค่า X ที่ผ่านกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมของโปรแกรม KU-GA ในแต่ละรุ่นประชากร จากค่า X เท่ากับ 1.47 ที่ทำให้ค่า Z น้อยที่สุดในรุ่นของประชากรลำดับที่ 1 ไปจนถึงค่า X เท่ากับ 1.59 ที่ทำให้ค่า Z มีค่าน้อยที่สุดในรุ่นของประชากรลำดับที่ 25 และเป็นค่าที่น้อยที่สุดของสมการที่ (25) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โปรแกรม KU-GA มีความสามารถในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว และสามารถพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการสอบเทียบแบบจำลองทางอุทกวิทยาได้ ทั้งนี้ภาพที่ 11 ได้แสดงถึงความสามารถของโปรแกรม KU-GA ในการลู่เข้าหาคำตอบตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนด

ตารางที่ 12 ค่าที่เหมาะสมที่สุด (X) และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Z) ตามลำดับรุ่นของประชากร
จากการดำเนินงานของโปรแกรม KU-GA

รุ่นของประชากร (Iterations)	X	Z
1	1.47	15.2062
2	1.64	15.1353
3	1.60	15.1200
4	1.60	15.1200
5	1.60	15.1200
6	1.58	15.1194
7	1.58	15.1194
8	1.59	15.1191
9	1.59	15.1191
10	1.59	15.1191
11	1.59	15.1191
12	1.59	15.1191
13	1.59	15.1191
14	1.59	15.1191
15	1.59	15.1191
16	1.59	15.1191
17	1.59	15.1191
18	1.59	15.1191
19	1.59	15.1191
20	1.59	15.1191
21	1.59	15.1191
22	1.59	15.1191
23	1.59	15.1191
24	1.59	15.1191
25	1.59	15.1191



ภาพที่ 11 การลู่เข้าหาค่าที่น้อยที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของโปรแกรม KU-GA ตามจำนวนรุ่นประชากร

2. ผลการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM, KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII สำหรับลุ่มน้ำปึงตอนบนและลุ่มน้ำชี

ผลการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM และ KU-MODNAM-SD สำหรับลุ่มน้ำปึงตอนบนและลุ่มน้ำชี สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ (1) ผลการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM สำหรับลุ่มน้ำปึงตอนบนและลุ่มน้ำชี (2) ผลการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD สำหรับลุ่มน้ำปึงตอนบนและลุ่มน้ำชี และ (3) ผลการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII สำหรับลุ่มน้ำปึงตอนบนและลุ่มน้ำชี โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ผลการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM

ตามที่ได้กล่าวไว้ในวิธีการศึกษา ข้อ 2 โปรแกรม KU-GA ดำเนินงานโดยการกำหนดพารามิเตอร์ควบคุม 5 พารามิเตอร์ ซึ่งในการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM สำหรับลุ่มน้ำปึงตอนบนและลุ่มน้ำชี แสดงดังตารางที่ 13 ทั้งนี้ค่าที่กำหนดนั้น เป็นค่าพารามิเตอร์ควบคุมที่ทำให้การดำเนินงานของโปรแกรม KU-GA ใช้เวลาน้อยและได้คำตอบที่ดีที่สุดแบบจำลองนั้นๆ

ตารางที่ 13 พารามิเตอร์ควบคุมการดำเนินงานของโปรแกรม KU-GA ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM

ลุ่มน้ำ	พารามิเตอร์ควบคุมโปรแกรม KU-GA				จำนวน Elite Child Strings (% ต่อจำนวนประชากร)
	จำนวนรุ่น ประชากร	จำนวน ประชากร	ความน่าจะเป็น Crossover	จำนวน Mutation	
ปึงตอนบน	500	1,000	0.70	0.10	50
ชี	500	1,000	0.70	0.06	10

ก) ลุ่มน้ำปึงตอนบน

ผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 6 สถานี ในลุ่มน้ำปึงตอนบน แสดงดังตารางที่ 14 และค่าเฉลี่ยของตัวแปรทางสถิติซึ่งประกอบด้วยค่า NSE, KGE, KGE_L และ KGE_{FDC} ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 15 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยของ NSE, KGE และ KGE_{FDC} ที่ได้จากการสอบเทียบ โดยโปรแกรม KU-GA มีค่าเท่ากับ 0.76, 0.87 และ 0.98 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลการสอบเทียบโดยโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 2.67%, 1.15% และ 1.02% ตามลำดับ ในขณะที่ค่า KGE_L ที่ได้จากการสอบเทียบโดยโปรแกรม MOSCEM มีค่าเท่ากับ 0.67 ซึ่งสูงกว่าผลการสอบเทียบ โดยโปรแกรม KU-GA เท่ากับ 2.99% จึงสรุปได้ว่าโปรแกรม KU-GA มีประสิทธิภาพในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 6 สถานี ในภาพรวม ที่ดีกว่าโปรแกรม MOSCEM อย่างไรก็ตาม นับว่าค่าความแตกต่างดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญ นอกจากนั้นแล้ว เพื่อให้เห็นภาพการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ

โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ที่ชัดเจนขึ้น จึงได้ทำการ สร้างแผนภูมิแบบกล่อง (Box Plot) ที่แสดงถึงการกระจายตัวของตัวแปรทางสถิติทั้ง 4 ตัวแปร รวมทั้งข้อมูลที่แสดงค่าสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25, 50 และ 75 รวมทั้งค่าต่ำสุด ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ทั้ง 6 สถานีวัดน้ำท่า ดังแสดงในภาพที่ 12 จากภาพดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของโปรแกรม KU-GA ที่ให้ค่าทางสถิติเฉลี่ยจากการสอบเทียบแบบจำลองสูงกว่าโปรแกรม MOSCEM ในส่วนของค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25, 50 และ 75 รวมทั้งค่าต่ำสุด เท่ากับ 1.6%, 1.7%, 0.6% และ 2.1% ตามลำดับ สำหรับค่าสูงสุด โปรแกรม KU-GA ให้ค่าทางสถิติเฉลี่ยจากการสอบเทียบแบบจำลองน้อยกว่าโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 2.0% อย่างไรก็ตาม ค่าความแตกต่างดังกล่าวไม่นับว่าไม่นัยสำคัญเช่นกัน ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาตามตัวแปรทางสถิติ พบว่า ค่า KGE_L ในส่วนของค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25 รวมทั้งค่า NSE และ KGE_{FDC} ของค่าต่ำสุด จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA มีค่าสูงกว่าจากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 7.3%, 7.7% และ 7.2% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ ในทางกลับกันค่า KGE_L ของค่าสูงสุด และต่ำสุดจากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA มีค่าน้อยกว่าจากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 10.5% และ 19.1% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับผลการประเมินกราฟน้ำท่าที่ได้จากการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 6 สถานี ในลุ่มน้ำปิงตอนบน แสดงดังในภาพผนวกที่ ก1 ถึง ก6 โดยในภาพได้แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างกราฟน้ำท่าที่ได้จากการประเมิน โดยแบบจำลองและกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของทั้ง 6 สถานี พร้อมทั้งแบ่งการเปรียบเทียบออกเป็น 2 แบบ คือ (ก) การเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM กับกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด และ (ข) การเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าสะสมที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM กับกราฟน้ำท่าสะสมที่ได้จากการตรวจวัด

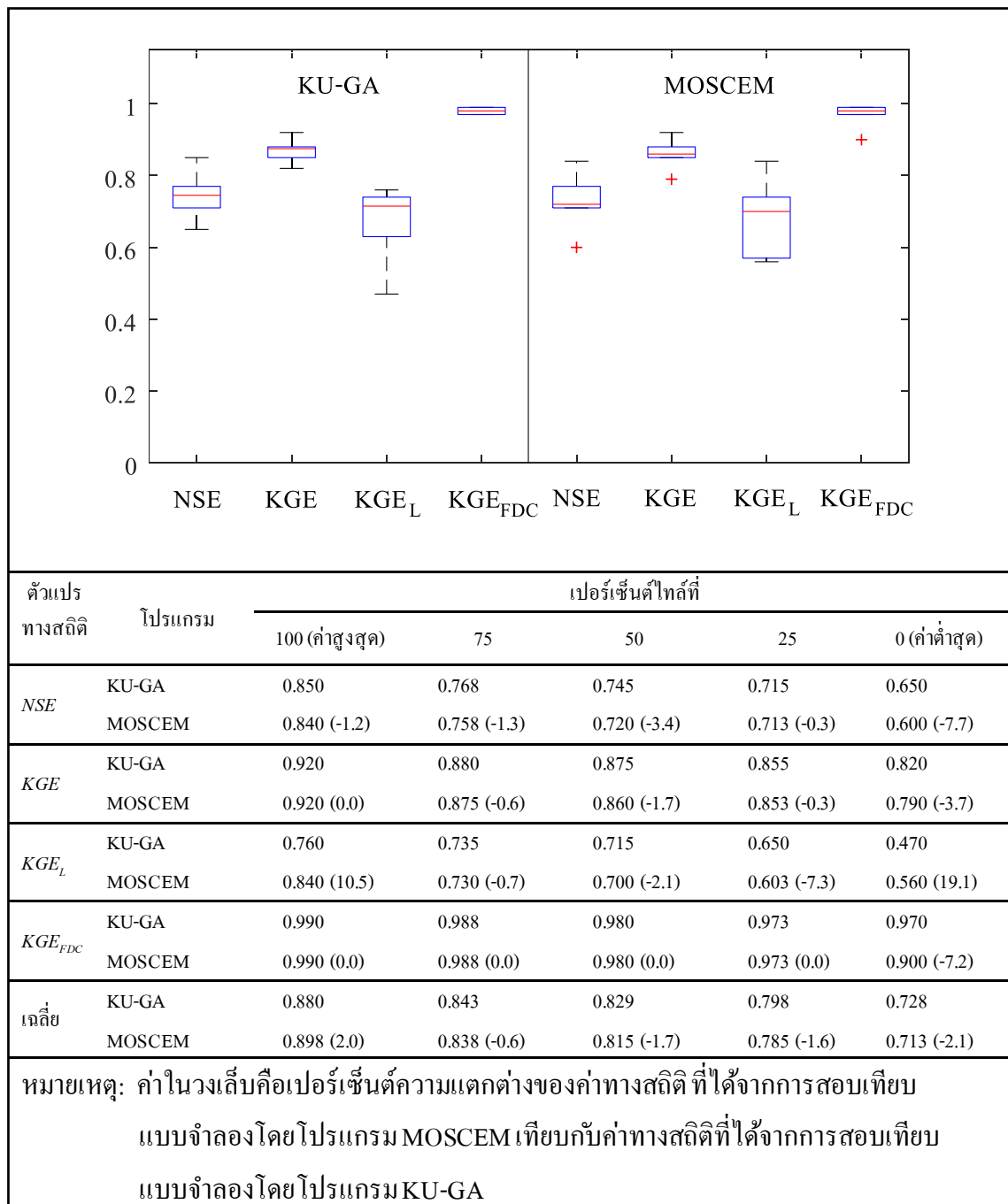
ตารางที่ 14 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-MODNAM จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 6 สถานี ในลุ่มน้ำปิงตอนบน

รหัส สถานี	โปรแกรม	พารามิเตอร์ของแบบจำลอง								
		U_{\max} (มม.)	L_{\max} (มม.)	$CQOF$	$CKIF$ (ชม.)	TOF	TIF	TG	CK (ชม.)	$CKBF$ (ชม.)
P.4A	KU-GA	55	533	0.47	1400	0.29	0.22	0.52	34	800
	MOSCEM	147	431	0.58	900	0.02	0.44	0.44	38	4100
P.20	KU-GA	12	304	0.71	300	0.40	0.48	0.02	32	1400
	MOSCEM	21	307	0.85	1900	0.03	0.35	0.11	38	1900
P.75	KU-GA	51	908	0.87	1500	0.28	0.32	0.03	50	5300
	MOSCEM	75	617	0.81	1900	0.32	0.24	0.05	47	9900
P.67	KU-GA	57	428	0.76	500	0.22	0.93	0.13	52	3000
	MOSCEM	52	507	0.80	4700	0.20	0.65	0.09	58	2300
P.21	KU-GA	39	486	0.40	1400	0.12	0.12	0.80	32	9600
	MOSCEM	39	695	0.51	800	0.34	0.30	0.50	32	7400
P.1	KU-GA	41	662	0.95	700	0.42	0.16	0.27	50	5200
	MOSCEM	63	503	0.52	1500	0.92	0.18	0.29	45	3700

ตารางที่ 15 ตัวแปรทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 6 สถานี ในลุ่มน้ำปิงตอนบน

รหัสสถานี	โปรแกรม	ตัวแปรสถิติของการสอบเทียบแบบจำลอง			
		<i>NSE</i>	<i>KGE</i>	<i>KGE_L</i>	<i>KGE_{FDC}</i>
P.4A	KU-GA	0.76	0.88	0.47	0.98
	MOSCEM	0.72 (-5.26)	0.86 (-2.27)	0.57 (21.28)	0.98 (0.00)
P.20	KU-GA	0.65	0.82	0.71	0.97
	MOSCEM	0.60 (-7.69)	0.79 (-3.66)	0.70 (-1.41)	0.90 (-7.22)
P.75	KU-GA	0.73	0.87	0.74	0.98
	MOSCEM	0.72 (-1.37)	0.86 (-1.15)	0.70 (-5.41)	0.99 (1.02)
P.67	KU-GA	0.77	0.88	0.72	0.99
	MOSCEM	0.77 (0.00)	0.88 (0.00)	0.74 (2.78)	0.98 (-1.01)
P.21	KU-GA	0.71	0.85	0.63	0.97
	MOSCEM	0.71 (0.00)	0.85 (0.00)	0.56 (-11.11)	0.97 (0.00)
P.1	KU-GA	0.85	0.92	0.76	0.99
	MOSCEM	0.84 (-1.18)	0.92 (0.00)	0.84 (10.53)	0.99 (0.00)
เฉลี่ย	KU-GA	0.74	0.87	0.67	0.98
	MOSCEM	0.73 (-2.67)	0.86 (-1.15)	0.69 (2.99)	0.97 (-1.02)

หมายเหตุ : ค่าในวงเล็บคือเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าทางสถิติ ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM เทียบกับค่าทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA



ภาพที่ 12 การเปรียบเทียบตัวแปรทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 6 สถานี ในลุ่มน้ำปึงดอนบน

ข) กลุ่มน้ำชี

ผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 13 สถานี ในกลุ่มน้ำชี แสดงดังตารางที่ 16 และค่าเฉลี่ยของตัวแปรทางสถิติซึ่งประกอบด้วยค่า NSE, KGE, KGE_L และ KGE_{FDC} ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 17 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยของ NSE, KGE และ KGE_{FDC} ที่ได้จากการสอบเทียบโดยโปรแกรม KU-GA มีค่าเท่ากับ 0.74, 0.86 และ 0.95 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลการสอบเทียบ โดยโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 2.70%, 3.49% และ 3.16% ตามลำดับ ในขณะที่ค่า KGE_L ที่ได้จากการสอบเทียบโดยโปรแกรม MOSCEM มีค่าเท่ากับ -1.03 ซึ่งสูงกว่าผลการสอบเทียบ โดยโปรแกรม KU-GA เท่ากับ 20.77% จึงสรุปได้ว่าโปรแกรม KU-GA มีประสิทธิภาพในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 13 สถานี ในภาพรวมที่ดีกว่าโปรแกรม MOSCEM อย่างไรก็ตาม นับว่าค่าความแตกต่างดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญ นอกจากนี้แล้ว เพื่อให้เห็นภาพการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ที่ชัดเจนขึ้น จึงได้ทำการสร้างแผนภูมิแบบกล่อง (Box Plot) ที่แสดงถึงการกระจายตัวของตัวแปรทางสถิติทั้ง 4 ตัวแปร รวมทั้งข้อมูลที่แสดงค่าสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25, 50 และ 75 รวมทั้งค่าต่ำสุด ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ทั้ง 13 สถานีวัดน้ำท่า ดังแสดงในภาพที่ 13 จากภาพดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของโปรแกรม KU-GA ที่ให้ค่าทางสถิติเฉลี่ยจากการสอบเทียบแบบจำลองสูงกว่าโปรแกรม MOSCEM ในส่วนของค่าต่ำสุด เท่ากับ 11.9% สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25, 50 และ 75 โปรแกรม KU-GA ให้ค่าทางสถิติเฉลี่ยจากการสอบเทียบแบบจำลองน้อยกว่าโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 723.8%, 25.0% และ 2.4% ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ ในส่วนของค่าสูงสุด โปรแกรม KU-GA ให้ค่าทางสถิติเฉลี่ยจากการสอบเทียบแบบจำลองเท่ากับโปรแกรม MOSCEM อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาตามตัวแปรทางสถิติ พบว่า ค่า KGE และ KGE_{FDC} ในส่วนของค่าต่ำสุด จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA มีค่าสูงกว่าจากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 20.0% และ 16.9% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ ในทางกลับกันค่า KGE_L ของค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25, 50 และ 75 จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA มีค่าน้อยกว่าจากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 15.2%, 60.8% และ 73.2% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับผลการประเมินกราฟน้ำท่าที่ได้จากการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 13 สถานี ในลุ่มน้ำชี แสดงดังในภาพผนวกที่ ก7 ถึง ก19 โดยในภาพได้แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างกราฟน้ำท่าที่ได้จากการประเมินโดยแบบจำลองและกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของทั้ง 13 สถานี พร้อมทั้งแบ่งการเปรียบเทียบออกเป็น 2 แบบ คือ (ก) การเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM กับกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด และ (ข) การเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าสะสมที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM กับกราฟน้ำท่าสะสมที่ได้จากการตรวจวัด

ตารางที่ 16 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-MODNAM จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติ ด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 13 สถานี ในลุ่มน้ำชี

รหัส สถานี	โปรแกรม	พารามิเตอร์ของแบบจำลอง								
		U_{\max} (มม.)	L_{\max} (มม.)	$CQOF$	$CKIF$ (ชม.)	TOF	TIF	TG	CK (ชม.)	$CKBF$ (ชม.)
E.73	KU-GA	12	304	1.00	2300	0.21	0.20	0.66	32	4900
	MOSCEM	12	443	0.93	4700	0.01	0.40	0.16	26	600
E.72	KU-GA	18	370	0.86	2500	0.12	0.08	0.32	38	1500
	MOSCEM	21	357	0.98	3900	0.12	0.53	0.38	57	5500
E.32A	KU-GA	10	302	0.82	100	0.32	0.16	0.24	50	300
	MOSCEM	130	456	0.37	100	0.45	0.07	0.72	72	4600
E.5	KU-GA	10	308	0.97	100	0.18	0.13	0.92	99	1400
	MOSCEM	10	463	0.94	2700	0.12	0.66	0.24	78	600
E.23	KU-GA	15	303	0.98	600	0.35	0.16	0.80	124	4600
	MOSCEM	88	328	0.41	100	0.54	0.27	0.64	84	1800
E.6C	KU-GA	10	330	0.99	1800	0.33	0.64	0.02	64	300
	MOSCEM	15	320	0.98	4800	0.08	0.68	0.02	93	300
E.21	KU-GA	186	685	0.28	100	0.32	0.06	0.23	71	4400
	MOSCEM	112	402	0.47	100	0.52	0.11	0.58	145	7000
E.9	KU-GA	152	521	0.78	200	0.06	0.11	0.60	164	4100
	MOSCEM	194	640	0.34	200	0.28	0.09	0.44	77	6900
E.66A	KU-GA	177	593	0.68	600	0.76	0.01	0.32	222	7700
	MOSCEM	193	964	0.30	500	0.23	0.04	0.17	124	8200

ตารางที่ 16 (ต่อ)

รหัส สถานี	โปรแกรม	พารามิเตอร์ของแบบจำลอง								
		U_{\max} (มม.)	L_{\max} (มม.)	$CQOF$	$CKIF$ (ชม.)	TOF	TIF	TG	CK (ชม.)	$CKBF$ (ชม.)
E.18	KU-GA	193	662	0.05	900	0.66	0.02	0.16	112	5600
	MOSCEM	182	717	0.72	900	0.93	0.02	0.06	101	2600
E.54	KU-GA	55	551	0.94	1300	0.16	0.57	0.97	65	3600
	MOSCEM	61	521	0.96	1000	0.12	0.56	0.85	68	6000
E.70	KU-GA	76	569	0.94	200	0.03	0.96	0.82	70	3400
	MOSCEM	54	588	0.90	4200	0.03	0.57	0.83	62	3800
E.20A	KU-GA	172	722	0.77	700	0.78	0.03	0.32	132	9800
	MOSCEM	87	556	0.59	400	0.78	0.03	0.46	206	4876

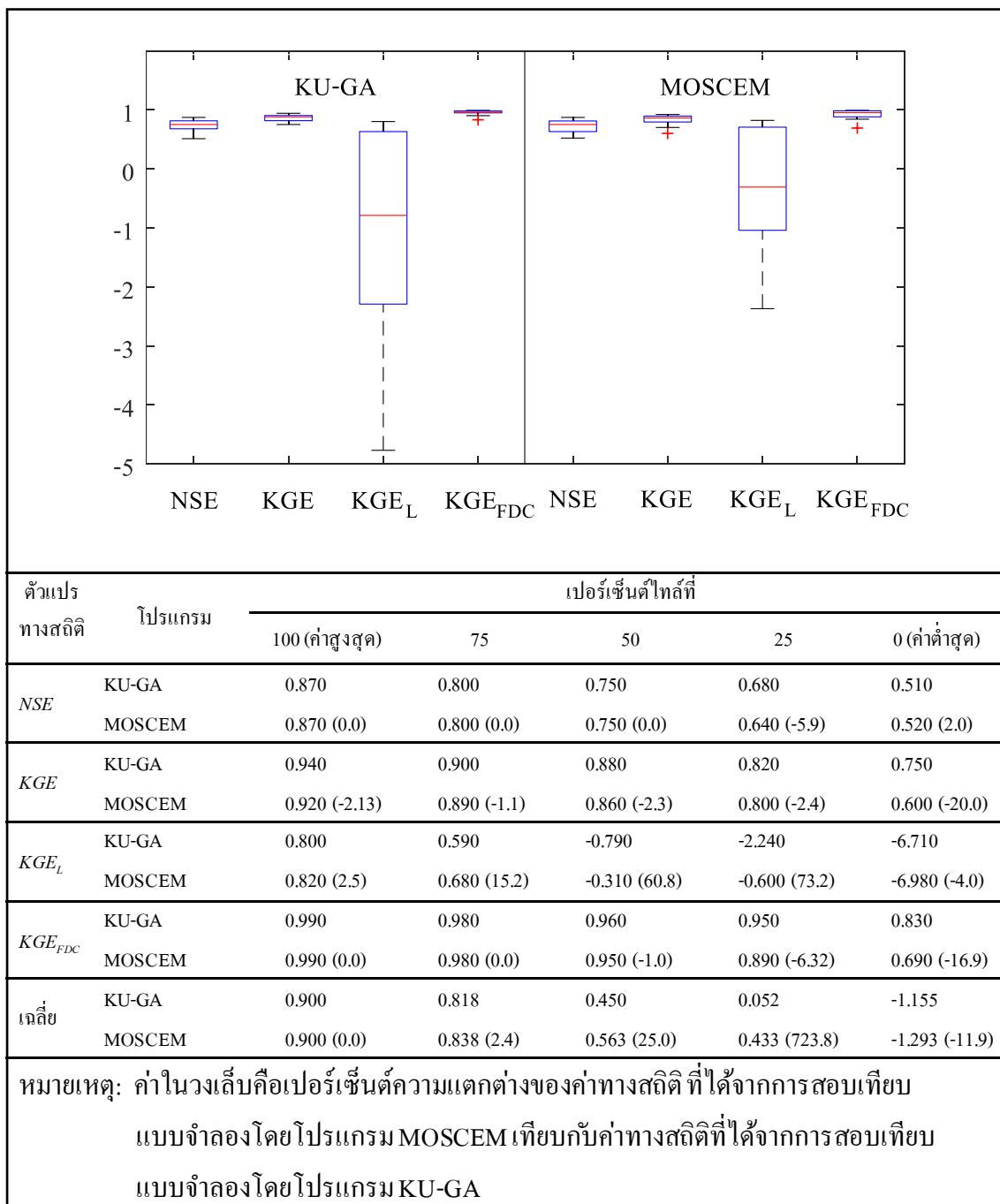
ตารางที่ 17 ค่าทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติ
ด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 13 สถานี ในลุ่มน้ำชี

รหัส สถานี	โปรแกรม	ค่าสถิติของการสอบเทียบแบบจำลอง			
		NSE	KGE	KGE_L	KGE_{FDC}
E.73	KU-GA	0.51	0.75	-0.56	0.90
	MOSCEM	0.52 (1.96)	0.70 (-6.67)	-0.52 (7.14)	0.84 (-6.67)
E.72	KU-GA	0.61	0.80	-2.24	0.96
	MOSCEM	0.60 (-1.64)	0.77 (-3.75)	-0.60 (73.21)	0.91 (-5.21)
E.32A	KU-GA	0.76	0.79	-1.62	0.83
	MOSCEM	0.55 (-27.63)	0.60 (-24.05)	-2.37 (-46.30)	0.69 (-16.87)
E.5	KU-GA	0.85	0.91	-2.45	0.95
	MOSCEM	0.84 (-1.18)	0.83 (-8.79)	0.51 (120.82)	0.85 (-10.53)
E.23	KU-GA	0.80	0.89	0.59	0.95
	MOSCEM	0.77 (-3.75)	0.87 (-2.25)	-5.94 (-1,106.78)	0.92 (-3.16)
E.6C	KU-GA	0.67	0.83	-6.71	0.94
	MOSCEM	0.66 (-1.49)	0.80 (-3.61)	-6.98 (-4.02)	0.89 (-5.32)
E.21	KU-GA	0.87	0.94	-1.03	0.99
	MOSCEM	0.87 (0.00)	0.92 (-2.13)	-0.38 (63.11)	0.96 (-3.03)

ตารางที่ 17 (ต่อ)

รหัส สถานี	โปรแกรม	ค่าสถิติของการสอบเทียบแบบจำลอง			
		<i>NSE</i>	<i>KGE</i>	<i>KGE_L</i>	<i>KGE_{FDC}</i>
E.9	KU-GA	0.85	0.93	-0.79	0.98
	MOSCEM	0.86 (1.18)	0.91 (-2.15)	-0.31 (60.76)	0.95 (-3.06)
E.66A	KU-GA	0.79	0.90	0.75	0.98
	MOSCEM	0.80 (1.27)	0.90 (0.00)	0.78 (4.00)	0.99 (1.02)
E.18	KU-GA	0.72	0.88	0.80	0.96
	MOSCEM	0.78 (8.33)	0.89 (1.14)	0.82 (2.50)	0.98 (2.08)
E.54	KU-GA	0.68	0.82	-4.77	0.99
	MOSCEM	0.64 (-5.88)	0.82 (0.00)	0.19 (103.98)	0.96 (3.03)
E.70	KU-GA	0.75	0.86	0.40	0.98
	MOSCEM	0.72 (-4.88)	0.86 (0.00)	0.68 (70.00)	0.99 (1.02)
E.20A	KU-GA	0.75	0.88	0.77	0.98
	MOSCEM	0.75 (0.00)	0.87 (-1.14)	0.78 (1.30)	0.99 (1.02)
เฉลี่ย	KU-GA	0.74	0.86	-1.30	0.95
	MOSCEM	0.72 (-2.70)	0.83 (-3.49)	-1.03 (20.77)	0.92 (-3.16)

หมายเหตุ : ค่าในวงเล็บคือเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าทางสถิติ ที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM เทียบกับค่าทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA



ภาพที่ 13 การเปรียบเทียบตัวแปรทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 13 สถานี ในลุ่มน้ำชี

2.2 ผลการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD

ตามที่ได้กล่าวไว้ในวิธีการศึกษา ข้อ 2 โปรแกรม KU-GA ดำเนินงานโดยการกำหนดพารามิเตอร์ควบคุม 5 พารามิเตอร์ ซึ่งในการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD สำหรับกลุ่มน้ำปึงตอนบนและกลุ่มน้ำชี แสดงดังตารางที่ 18 ทั้งนี้ค่าที่กำหนดนั้น เป็นค่าพารามิเตอร์ควบคุมที่ทำให้การดำเนินงานของโปรแกรม KU-GA ใช้เวลาน้อยและได้คำตอบที่ดีที่สุดแบบจำลองนั้นๆ

ตารางที่ 18 พารามิเตอร์ควบคุมการดำเนินงานของโปรแกรม KU-GA ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD

กลุ่มน้ำ	พารามิเตอร์ควบคุมโปรแกรม KU-GA				จำนวน Elite Child Strings (% ต่อจำนวนประชากร)
	จำนวนรุ่น ประชากร	จำนวน ประชากร	ความน่าจะเป็น Crossover	จำนวน Elite Child Strings Mutation	
ปึงตอนบน	1,000	500	0.70	0.06	10
ชี	2,500	500	0.70	0.06	30

ก) กลุ่มน้ำปึงตอนบน

ผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD สำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.1 ในกลุ่มน้ำปึงตอนบน แสดงดังตารางที่ 19 และค่าเฉลี่ยของตัวแปรทางสถิติซึ่งประกอบด้วยค่า NSE, KGE, KGE_L และ KGE_{FDC} ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 20 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยของ KGE_L ที่ได้จากการสอบเทียบโดยโปรแกรม KU-GA มีค่าเท่ากับ 0.59 ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลการสอบเทียบโดยโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 16.95% ในขณะที่ค่า NSE ที่ได้จากการสอบเทียบโดยโปรแกรม MOSCEM มีค่าเท่ากับ 0.76 ซึ่งสูงกว่าผลการสอบเทียบโดยโปรแกรม KU-GA เท่ากับ 1.33% รวมทั้งค่าเฉลี่ยของ KGE และ KGE_{FDC} ที่ได้จากการสอบเทียบโดยโปรแกรม KU-GA มีค่าเท่ากับผลการสอบเทียบโดยโปรแกรม MOSCEM จึงสรุปได้ว่าโปรแกรม KU-GA มีประสิทธิภาพในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD สำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.1 ในกลุ่มน้ำปึงตอนบน รวมทั้งสถานีวัดน้ำท่าย่อย 5 สถานี ในภาพรวม ที่ดีกว่าโปรแกรม MOSCEM

อย่างไรก็ตาม นับว่าค่าความแตกต่างดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญ นอกจากนั้นแล้ว เพื่อให้เห็นภาพการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ที่ชัดเจนขึ้น จึงได้ทำการสร้างแผนภูมิแบบกล่อง (Box Plot) ที่แสดงถึงการกระจายตัวของตัวแปรทางสถิติทั้ง 4 ตัวแปร รวมทั้งข้อมูลที่แสดงค่าสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25, 50 และ 75 รวมทั้งค่าต่ำสุด ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง โดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.1 ดังแสดงในภาพที่ 14 จากภาพดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของโปรแกรม KU-GA ที่ให้ค่าทางสถิติเฉลี่ยจากการสอบเทียบแบบจำลองสูงกว่าโปรแกรม MOSCEM ในส่วนของค่าสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25 และค่าต่ำสุด เท่ากับ 0.9%, 0.9% และ 24.6% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 และ 75 โปรแกรม KU-GA ให้ค่าทางสถิติเฉลี่ยจากการสอบเทียบแบบจำลองเท่ากับโปรแกรม MOSCEM ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาตามตัวแปรทางสถิติ พบว่า ค่า KGE_L ในส่วนของค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25 และค่าต่ำสุด จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA มีค่าสูงกว่าจากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 22.5% และ 437.3% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ ในทางกลับกันค่า NSE ของค่าต่ำสุด และค่า KGE และ KGE_{FDC} ของค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25 จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA มีค่าน้อยกว่าจากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 8.7%, 5.1% และ 6.5% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับผลการประเมินกราฟน้ำท่าที่ได้จากการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD สำหรับสำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.1 ในลุ่มน้ำปิงตอนบน รวมทั้งผลการประเมินกราฟน้ำท่าของสถานีวัดน้ำท่าย่อยทั้ง 5 สถานี แสดงดังในภาพผนวกที่ ก20 ถึง ก25 โดยในภาพได้แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างกราฟน้ำท่าที่ได้จากการประเมิน โดยแบบจำลองและกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของทั้ง 6 สถานี พร้อมทั้งแบ่งการเปรียบเทียบออกเป็น 2 แบบ คือ (ก) การเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM กับกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด และ (ข) การเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าสะสมที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM กับกราฟน้ำท่าสะสมที่ได้จากการตรวจวัด

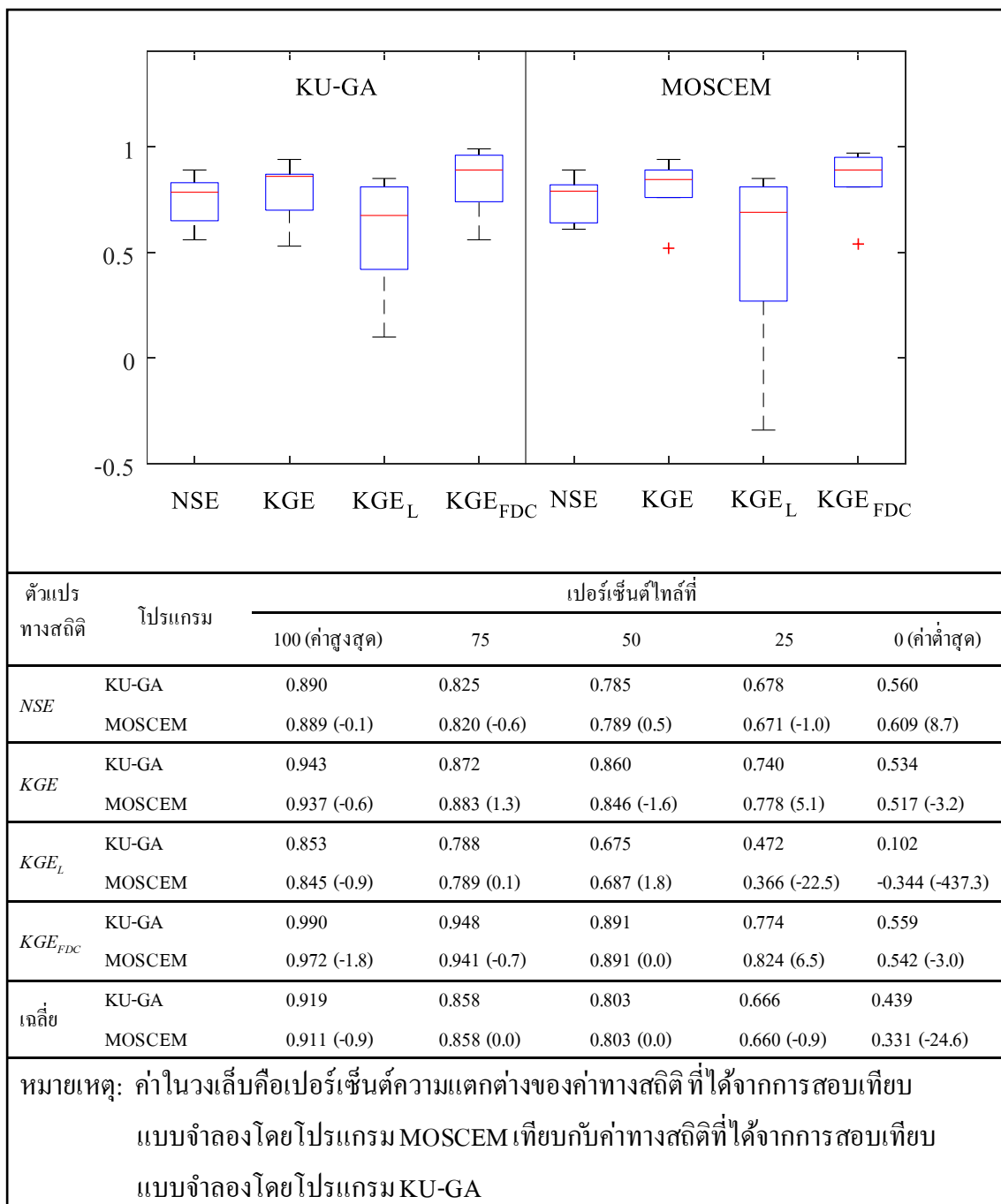
ตารางที่ 19 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติ
ด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1

รหัส สถานี	โปรแกรม	พารามิเตอร์ของแบบจำลอง										
		U_{max}	L_{max}	$CQOF$	$CKIF$	TOF	TIF	TG	CK	$CKBF$	K	X
			(ชม.)					(ชม.)				
P.1	KU-GA	69	608	0.62	3800	0.12	0.07	0.37	92	1200	0.28	0.32
	MOSCEM	43	837	0.62	1300	0.30	0.67	0.24	23	900	0.30	0.32

ตารางที่ 20 ค่าทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติ
ด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1

รหัส สถานี	โปรแกรม	ค่าสถิติของการสอบเทียบแบบจำลอง			
		NSE	KGE	KGE_L	KGE_{FDC}
P.4A	KU-GA	0.76	0.87	0.62	0.96
	MOSCEM	0.76 (0.00)	0.86 (-0.80)	0.65 (4.35)	0.95 (-1.86)
P.20	KU-GA	0.65	0.53	0.42	0.56
	MOSCEM	0.64 (-1.33)	0.52 (-3.17)	0.27 (-35.74)	0.54 (-2.96)
P.75	KU-GA	0.81	0.87	0.85	0.90
	MOSCEM	0.82 (1.30)	0.89 (1.92)	0.85 (0.00)	0.93 (2.72)
P.67	KU-GA	0.83	0.85	0.73	0.88
	MOSCEM	0.82 (-1.17)	0.83 (-2.65)	0.73 (0.00)	0.85 (-2.84)
P.21	KU-GA	0.56	0.70	0.10	0.74
	MOSCEM	0.61 (8.80)	0.76 (8.26)	-0.34 (-437.08)	0.81 (10.17)
P.1	KU-GA	0.89	0.94	0.81	0.99
	MOSCEM	0.89 (0.00)	0.94 (0.00)	0.81 (0.00)	0.97 (-1.86)
เฉลี่ย	KU-GA	0.75	0.80	0.59	0.84
	MOSCEM	0.76 (1.33)	0.80 (0.00)	0.49 (-16.95)	0.84 (0.00)

หมายเหตุ : ค่าในวงเล็บคือเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าทางสถิติ ที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM เทียบกับค่าทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA



ภาพที่ 14 การเปรียบเทียบตัวแปรทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1

ข) กลุ่มน้ำชี

ผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD สำหรับสถานีวัดน้ำท่า E.20A ในกลุ่มน้ำปิงชี แสดงดังตารางที่ 21 และค่าเฉลี่ยของตัวแปรทางสถิติซึ่งประกอบด้วยค่า NSE, KGE, KGE_L และ KGE_{FDC} ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 22 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยของ NSE, KGE, KGE_L และ KGE_{FDC} ที่ได้จากการสอบเทียบ โดยโปรแกรม KU-GA มีค่าเท่ากับ 0.63, 0.65, -1.94 และ 0.72 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลการสอบเทียบโดยโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 1.59%, 4.62%, 18.04% และ 5.56% จึงสรุปได้ว่าโปรแกรม KU-GA มีประสิทธิภาพในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD สำหรับสถานีวัดน้ำท่า E.20A ในกลุ่มน้ำชี รวมทั้งสถานีวัดน้ำท่าย่อย 12 สถานี ในภาพรวม ที่ดีกว่าโปรแกรม MOSCEM ใดๆก็ตาม นับว่าค่าความแตกต่างดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญ นอกจากนั้นแล้ว เพื่อให้เห็นภาพการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ที่ชัดเจนขึ้น จึงได้ทำการสร้างแผนภูมิแบบกล่อง (Box Plot) ที่แสดงถึงการกระจายตัวของตัวแปรทางสถิติทั้ง 4 ตัวแปร รวมทั้งข้อมูลที่แสดงค่าสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25, 50 และ 75 รวมทั้งค่าต่ำสุด ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง โดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า E.20A ดังแสดงในภาพที่ 15 จากภาพดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของโปรแกรม KU-GA ที่ให้ค่าทางสถิติเฉลี่ยจากการสอบเทียบแบบจำลองสูงกว่าโปรแกรม MOSCEM ในส่วนของค่าสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25, 50 และ 75 รวมทั้งค่าต่ำสุด เท่ากับ 0.6%, 26.5%, 6.0%, 6.0% และ 20.2% ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาตามตัวแปรทางสถิติ พบว่า ค่า KGE ในส่วนของค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 75 และค่าต่ำสุด รวมทั้งค่า KGE_L ในส่วนของค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 และ 25 รวมทั้งค่าต่ำสุด จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA มีค่าสูงกว่าจากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 10.4%, 11.4%, 19.2%, 3400% และ 18.4% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับผลการประเมินกราฟน้ำท่าที่ได้จากการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD สำหรับสำหรับสถานีวัดน้ำท่า E.20A ในกลุ่มน้ำปิงตอนบน รวมทั้งผลการประเมินกราฟน้ำท่าของสถานีวัดน้ำท่าย่อยทั้ง 12 สถานี แสดงดังในภาพผนวกที่ ก26 ถึง ก38 โดยในภาพได้แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างกราฟน้ำท่าที่ได้จากการประเมิน โดยแบบจำลองและกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของทั้ง 12 สถานี พร้อมทั้งแบ่ง

การเปรียบเทียบออกเป็น 2 แบบ คือ (ก) การเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM กับกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด และ (ข) การเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าสะสมที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM กับกราฟน้ำท่าสะสมที่ได้จากการตรวจวัด

ตารางที่ 21 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A

รหัสสถานี	โปรแกรม	พารามิเตอร์ของแบบจำลอง										
		U_{max}	L_{max}	$CQOF$	$CKIF$	TOF	TIF	TG	CK	$CKBF$	K	X
			(ชม.)				(ชม.)					
E.20A	KU-GA	181	307	0.20	400	0.62	0.05	0.73	186	8300	1.00	0.20
	MOSCEM	192	543	0.52	300	0.51	0.05	0.60	14	7800	0.90	0.18

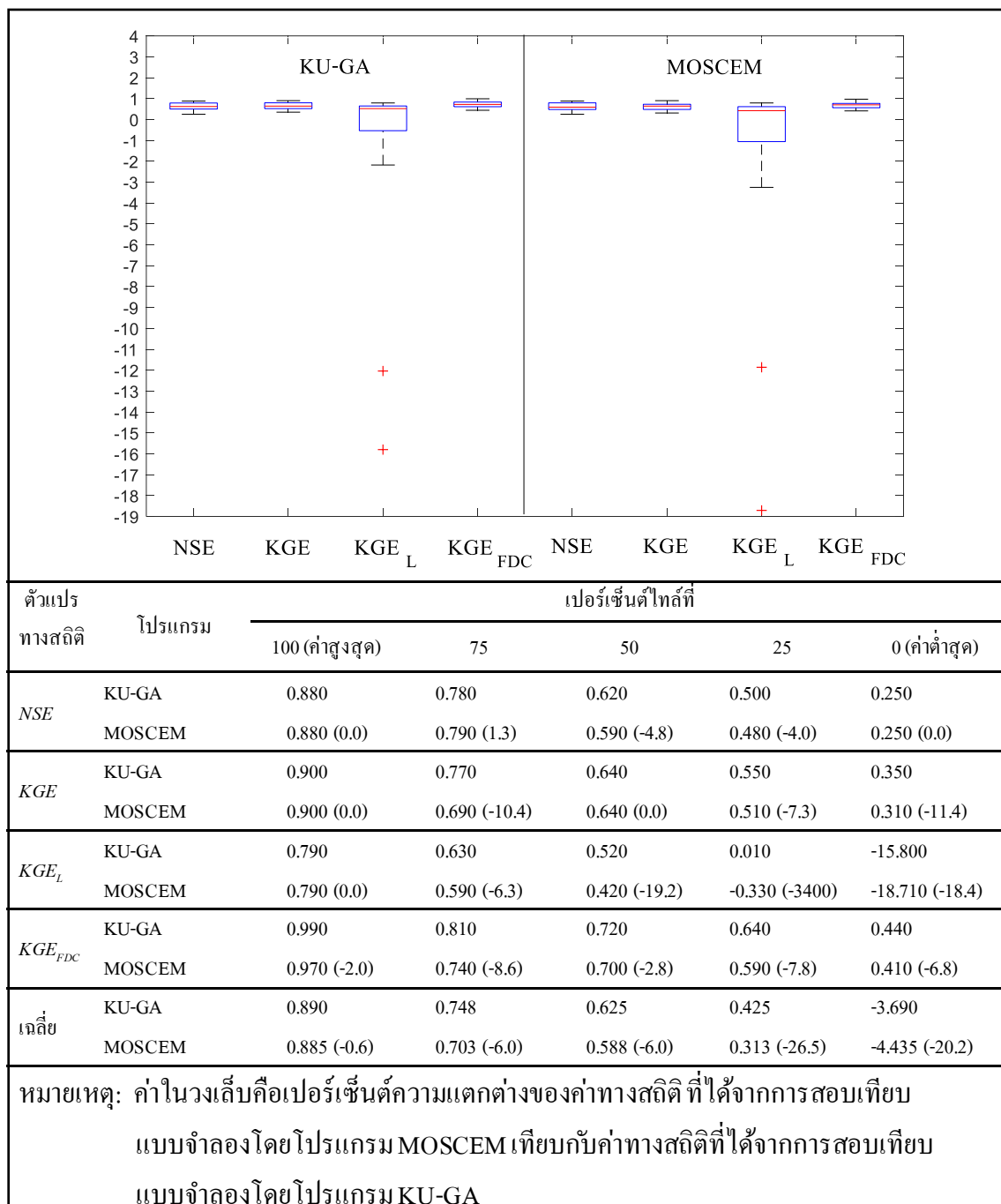
ตารางที่ 22 ค่าทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A

รหัสสถานี	โปรแกรม	ค่าสถิติของการสอบเทียบแบบจำลอง			
		NSE	KGE	KGE_L	KGE_{FDC}
E.73	KU-GA	0.25	0.35	-2.18	0.52
	MOSCEM	0.25 (0.00)	0.31 (-11.43)	-3.25 (-49.08)	0.48 (-7.69)
E.72	KU-GA	0.32	0.55	-15.80	0.76
	MOSCEM	0.35 (9.37)	0.51 (-7.27)	-18.71 (-18.42)	0.69 (-9.21)
E.32A	KU-GA	0.50	0.39	0.01	0.44
	MOSCEM	0.47 (-6.00)	0.35 (-10.26)	-0.33 (-3400)	0.41 (-6.82)
E.5	KU-GA	0.61	0.59	0.21	0.64
	MOSCEM	0.59 (-3.28)	0.54 (-8.47)	-0.16 (-176.19)	0.59 (-7.81)

ตารางที่ 22 (ต่อ)

รหัส สถานี	โปรแกรม	ค่าสถิติของการสอบเทียบแบบจำลอง			
		<i>NSE</i>	<i>KGE</i>	<i>KGE_L</i>	<i>KGE_{FDC}</i>
E.23	KU-GA	0.75	0.77	0.56	0.81
	MOSCEM	0.72 (-4.00)	0.69 (-10.39)	0.42 (-25.00)	0.72 (-11.11)
E.6C	KU-GA	0.50	0.43	-12.04	0.49
	MOSCEM	0.48 (-4.00)	0.39 (-9.30)	-11.86 (1.50)	0.44 (-10.20)
E.21	KU-GA	0.86	0.76	0.63	0.76
	MOSCEM	0.83 (-3.49)	0.69 (-9.21)	0.48 (-23.81)	0.70 (-7.89)
E.9	KU-GA	0.88	0.88	0.70	0.90
	MOSCEM	0.88 (0.00)	0.84 (-4.55)	0.59 (-15.71)	0.85 (-5.56)
E.66A	KU-GA	0.74	0.63	0.55	0.65
	MOSCEM	0.74 (0.00)	0.61 (-3.17)	0.36 (-34.55)	0.63 (-3.08)
E.18	KU-GA	0.78	0.88	0.79	0.96
	MOSCEM	0.79 (1.28)	0.87 (-1.14)	0.79 (0.00)	0.93 (-3.12)
E.54	KU-GA	0.56	0.64	0.52	0.72
	MOSCEM	0.55 (-1.79)	0.64 (0.00)	0.68 (30.77)	0.73 (1.39)
E.70	KU-GA	0.62	0.66	0.12	0.72
	MOSCEM	0.59 (-4.84)	0.67 (1.52)	0.52 (333.33)	0.74 (2.78)
E.20A	KU-GA	0.81	0.90	0.69	0.99
	MOSCEM	0.81 (0.00)	0.90 (0.00)	0.71 (2.90)	0.97 (-2.02)
เฉลี่ย	KU-GA	0.63	0.65	-1.94	0.72
	MOSCEM	0.62 (-1.59)	0.62 (-4.62)	-2.29 (-18.04)	0.68 (-5.56)

หมายเหตุ : ค่าในวงเล็บคือเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM เทียบกับค่าทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA



ภาพที่ 15 การเปรียบเทียบตัวแปรทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A

2.3 ผลการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII

ตามที่ได้กล่าวไว้ในวิธีการศึกษา ข้อ 2 โปรแกรม KU-GA ดำเนินงานโดยการกำหนดพารามิเตอร์ควบคุม 5 พารามิเตอร์ ซึ่งในการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII สำหรับลุ่มน้ำปึงตอนบนและลุ่มน้ำชี แสดงดังตารางที่ 23 ทั้งนี้ค่าที่กำหนดนั้น เป็นค่าพารามิเตอร์ควบคุมที่ทำให้การดำเนินงานของโปรแกรม KU-GA ใช้เวลาน้อยและได้คำตอบที่ดีที่สุดแบบจำลองนั้นๆ

ตารางที่ 23 พารามิเตอร์ควบคุมการดำเนินงานของโปรแกรม KU-GA ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII

ลุ่มน้ำ	พารามิเตอร์ควบคุมโปรแกรม KU-GA				จำนวน Elite Child Strings (% ต่อจำนวนประชากร)
	จำนวนรุ่น ประชากร	จำนวน ประชากร	ความน่าจะเป็น Crossover	จำนวน Elite Child Strings Mutation	
ปึงตอนบน	1,500	1000	0.70	0.06	20
ชี	500	500	0.70	0.06	30

ก) ลุ่มน้ำปึงตอนบน

ผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII สำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.1 ในลุ่มน้ำปึงตอนบน แสดงดังตารางที่ 24 และค่าเฉลี่ยของตัวแปรทางสถิติซึ่งประกอบด้วยค่า NSE, KGE, KGE_L และ KGE_{FDC} ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 25 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยของ NSE, KGE และ KGE_{FDC} ที่ได้จากการสอบเทียบโดยโปรแกรม KU-GA มีค่าเท่ากับ 0.76, 0.81 และ 0.85 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลการสอบเทียบโดยโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 3.95%, 3.70% และ 2.35% ตามลำดับ ในขณะที่ค่า KGE_L ที่ได้จากการสอบเทียบโดยโปรแกรม MOSCEM มีค่าเท่ากับ 0.63 ซึ่งสูงกว่าผลการสอบเทียบโดยโปรแกรม KU-GA เท่ากับ 5.00% จึงสรุปได้ว่าโปรแกรม KU-GA มีประสิทธิภาพในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII สำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.1 ในลุ่มน้ำปึงตอนบน รวมทั้งสถานีวัดน้ำท่าย่อย 5 สถานี ในภาพรวม ที่ดีกว่าโปรแกรม MOSCEM อนุกรมใดก็ตาม นับว่าค่าความแตกต่างดังกล่าวไม่มี

นัยสำคัญ นอกจากนั้นแล้ว เพื่อให้เห็นภาพการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ที่ชัดเจนขึ้น จึงได้ทำการสร้างแผนภูมิแบบกล่อง (Box Plot) ที่แสดงถึงการกระจายตัวของตัวแปรทางสถิติทั้ง 4 ตัวแปร รวมทั้งข้อมูลที่แสดงค่าสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25, 50 และ 75 รวมทั้งค่าต่ำสุด ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.1 ดังแสดงในภาพที่ 16 จากภาพดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของโปรแกรม KU-GA ที่ให้ค่าทางสถิติเฉลี่ยจากการสอบเทียบแบบจำลองสูงกว่าโปรแกรม MOSCEM ในส่วนของค่าสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25, 50 และ 75 รวมทั้งค่าต่ำสุด เท่ากับ 0.5%, 1.8%, 2.6%, 1.5% และ 8.2% ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาตามตัวแปรทางสถิติ พบว่า ค่า KGE_L ในส่วนของค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25 และค่าต่ำสุด รวมทั้งค่า NSE ของค่าต่ำสุด และค่า KGE_{FDC} ของค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 75 จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA มีค่าสูงกว่าจากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 33.2%, 40.3%, 11.6% และ 5.3% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ ในทางกลับกันค่าต่ำสุด ของค่า KGE และ KGE_{FDC} จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA มีค่าน้อยกว่าจากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 10.4% และ 7.6% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับผลการประเมินกราฟน้ำท่าที่ได้จากการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII สำหรับสำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.1 ในลุ่มน้ำปิงตอนบน รวมทั้งผลการประเมินกราฟน้ำท่าของสถานีวัดน้ำท่าย่อยทั้ง 5 สถานี แสดงดังในภาพผนวกที่ ก39 ถึง ก44 โดยในภาพได้แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างกราฟน้ำท่าที่ได้จากการประเมินโดยแบบจำลองและกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของทั้ง 6 สถานี พร้อมทั้งแบ่งการเปรียบเทียบออกเป็น 2 แบบ คือ (ก) การเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM กับกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด และ (ข) การเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าสะสมที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM กับกราฟน้ำท่าสะสมที่ได้จากการตรวจวัด

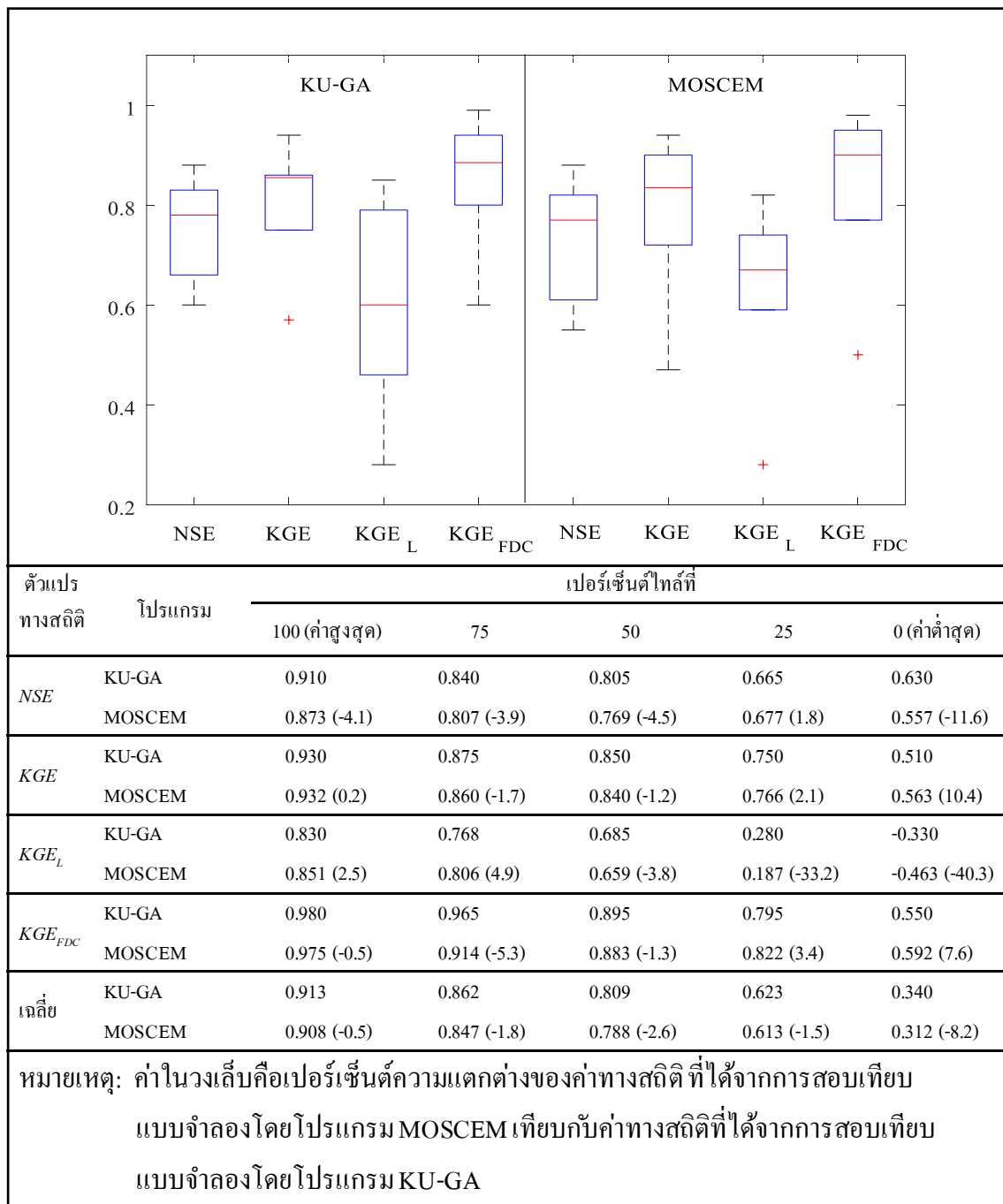
ตารางที่ 24 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติ
ด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1

รหัส สถานี	โปรแกรม	พารามิเตอร์ของแบบจำลอง											
		U_{max}	L_{max}	$CQOF$	$CKIF$	TOF	TIF	TG	CK	$CKBF$	K	X	b
P.1	KU-GA	94	308	0.64	2200	0.13	0.17	0.41	101	1900	0.24	0.15	5.0
	MOSCEM	120	384	0.77	3200	0.15	0.10	0.41	25	4300	0.16	0.17	1.0

ตารางที่ 25 ค่าทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติ
ด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1

รหัส สถานี	โปรแกรม	ค่าสถิติของการสอบเทียบแบบจำลอง			
		NSE	KGE	KGE_L	KGE_{FDC}
P.4A	KU-GA	0.75	0.86	0.46	0.94
	MOSCEM	0.72 (-4.00)	0.85 (-1.16)	0.28 (-39.13)	0.95 (1.06)
P.20	KU-GA	0.66	0.57	0.49	0.60
	MOSCEM	0.61 (-7.58)	0.47 (-17.54)	0.59 (20.41)	0.50 (-16.67)
P.75	KU-GA	0.81	0.86	0.85	0.89
	MOSCEM	0.82 (1.23)	0.90 (4.65)	0.82 (-3.53)	0.95 (6.74)
P.67	KU-GA	0.83	0.85	0.71	0.88
	MOSCEM	0.82 (-1.20)	0.82 (-3.53)	0.67 (-5.63)	0.85 (-3.41)
P.21	KU-GA	0.60	0.75	0.28	0.80
	MOSCEM	0.55 (-8.33)	0.72 (-4.00)	0.67 (139.29)	0.77 (-3.75)
P.1	KU-GA	0.88	0.94	0.79	0.99
	MOSCEM	0.88 (0.00)	0.94 (0.00)	0.74 (-6.33)	0.98 (-1.01)
เฉลี่ย	KU-GA	0.76	0.81	0.60	0.85
	MOSCEM	0.73 (-3.95)	0.78 (-3.70)	0.63 (5.00)	0.83 (-2.35)

หมายเหตุ : ค่าในวงเล็บคือเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าทางสถิติ ที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM เทียบกับค่าทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA



ภาพที่ 16 การเปรียบเทียบตัวแปรทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1

ข) กลุ่มน้ำชี

ผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII สำหรับสถานีวัดน้ำท่า E.20A ในกลุ่มน้ำชี แสดงดังตารางที่ 26 และค่าเฉลี่ยของตัวแปรทางสถิติซึ่งประกอบด้วยค่า NSE, KGE, KGE_L และ KGE_{FDC} ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 27 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยของ KGE_L ที่ได้จากการสอบเทียบโดยโปรแกรม KU-GA มีค่าเท่ากับ 0.72 ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลการสอบเทียบโดย โปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 27.78% อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ค่า NSE, KGE และ KGE_{FDC} ที่ได้จากการสอบเทียบโดยโปรแกรม KU-GA มีค่าเท่ากับผลการสอบเทียบโดยโปรแกรม MOSCEM จึงสรุปได้ว่าโปรแกรม KU-GA มีประสิทธิภาพในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII สำหรับสถานีวัดน้ำท่า E.20A ในกลุ่มน้ำชี รวมทั้งสถานีวัดน้ำท่าย่อย 12 สถานี ที่ดีกว่า โปรแกรม MOSCEM ในภาพรวม นอกจากนั้นแล้ว เพื่อให้เห็นภาพการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ที่ชัดเจนขึ้น จึงได้ทำการสร้างแผนภูมิแบบกล่อง (Box Plot) ที่แสดงถึงการกระจายตัวของตัวแปรทางสถิติทั้ง 4 ตัวแปร รวมทั้งข้อมูลที่แสดงค่าสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25, 50 และ 75 รวมทั้งค่าต่ำสุด ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับสถานีวัดน้ำท่า E.20A ดังแสดงในภาพที่ 17 จากภาพดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ โปรแกรม KU-GA ที่ให้ค่าทางสถิติเฉลี่ยจากการสอบเทียบแบบจำลองสูงกว่าโปรแกรม MOSCEM ในส่วนของค่าสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 75 และค่าต่ำสุด เท่ากับ 2.2%, 3.6% และ 8.7% ตามลำดับ สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 และ 25 โปรแกรม KU-GA ให้ค่าทางสถิติเฉลี่ยจากการสอบเทียบแบบจำลองน้อยกว่าโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 5.3% และ 10.9% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาตามตัวแปรทางสถิติ พบว่า ค่า NSE ในส่วนของค่าสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 75 รวมทั้งค่า NSE ในส่วนของค่าสูงสุด และค่า KGE_{FDC} ในส่วนของค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 75 จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA มีค่าสูงกว่าจากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 6.4%, 9.0%, 6.2% และ 8.6% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ ในทางกลับกันค่าสูงสุด ของ KGE_L ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 ของ KGE และ KGE_L ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25 และค่าต่ำสุดของ KGE_L และ KGE_{FDC} จากการสอบเทียบแบบจำลอง โดยโปรแกรม KU-GA มีค่าน้อยกว่าจากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM เท่ากับ 6.3%, 6.2%, 6.1%, 222.5%, 5.5%, 8.9% และ 19.3% อย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับผลการประเมินกราฟน้ำท่าที่ได้จากการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD สำหรับสำหรับสถานีวัดน้ำท่า E.20A ในลุ่มน้ำปึงตอนบน รวมทั้งผลการประเมินกราฟน้ำท่าของสถานีวัดน้ำท่าย่อยทั้ง 12 สถานี แสดงดังในภาพผนวกที่ ก45 ถึง ก57 โดยในภาพได้แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างกราฟน้ำท่าที่ได้จากการประเมิน โดยแบบจำลองและกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดของทั้ง 12 สถานี พร้อมทั้งแบ่งการเปรียบเทียบออกเป็น 2 แบบ คือ (ก) การเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติ โดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM กับกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด และ (ข) การเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าสะสมที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติ โดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM กับกราฟน้ำท่าสะสมที่ได้จากการตรวจวัด

ตารางที่ 26 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติ ด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของ สถานีวัดน้ำท่า E.20A

รหัส สถานี	โปรแกรม	พารามิเตอร์ของแบบจำลอง											
		U_{max}	L_{max}	$CQOF$	$CKIF$ (ชม.)	TOF	TIF	TG	CK (ชม.)	$CKBF$ (ชม.)	K	X	b
E.20A	KU-GA	170	556	0.57	200	0.18	0.15	0.01	26	2000	0.98	0.13	1.0
	MOSCEM	140	539	0.48	200	0.79	0.11	0.21	12	5700	0.86	0.22	3.0

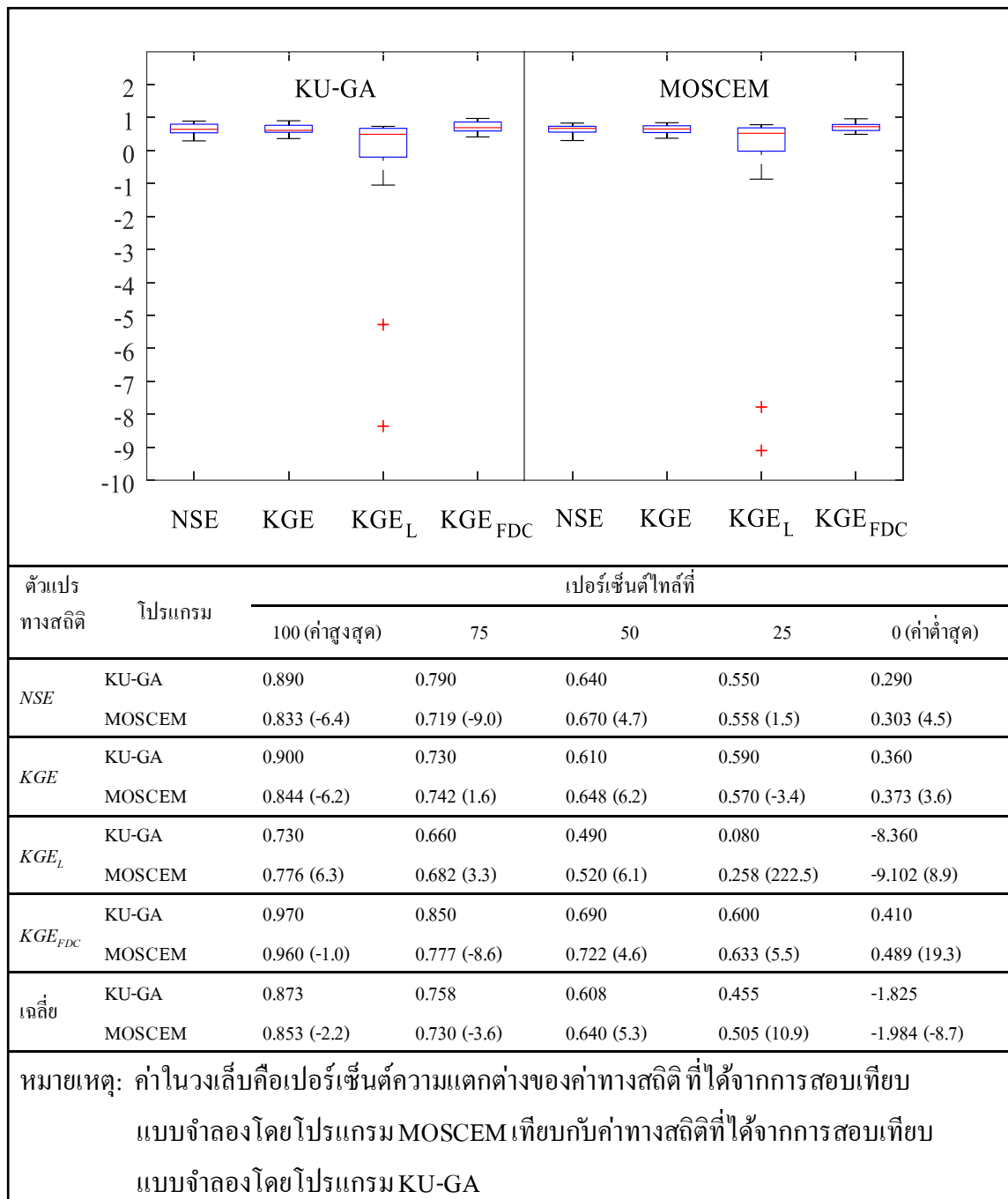
ตารางที่ 27 ค่าทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติ ด้วยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของ สถานีวัดน้ำท่า E.20A

รหัส สถานี	โปรแกรม	ค่าสถิติของการสอบเทียบแบบจำลอง			
		NSE	KGE	KGE_L	KGE_{FDC}
E.73	KU-GA	0.29	0.38	-1.05	0.56
	MOSCEM	0.30 (3.45)	0.37 (-2.63)	-0.87 (-17.14)	0.53 (-5.36)
E.72	KU-GA	0.31	0.61	-8.36	0.85
	MOSCEM	0.40 (29.03)	0.62 (1.64)	-9.10 (8.85)	0.81 (-4.71)

ตารางที่ 27 (ต่อ)

รหัส สถานี	โปรแกรม	ค่าสถิติของการสอบเทียบแบบจำลอง			
		<i>NSE</i>	<i>KGE</i>	<i>KGE_L</i>	<i>KGE_{FDC}</i>
E.32A	KU-GA	0.55	0.43	0.49	0.47
	MOSCEM	0.59 (7.27)	0.46 (6.98)	0.52 (6.12)	0.49 (4.26)
E.5	KU-GA	0.64	0.6	0.52	0.64
	MOSCEM	0.71 (10.94)	0.65 (8.33)	0.60 (15.38)	0.68 (6.25)
E.23	KU-GA	0.75	0.73	0.7	0.76
	MOSCEM	0.77 (2.67)	0.74 (1.37)	0.78 (11.43)	0.76 (0.00)
E.6C	KU-GA	0.49	0.36	-5.28	0.41
	MOSCEM	0.54 (10.20)	0.44 (22.22)	-7.78 (47.35)	0.49 (19.51)
E.21	KU-GA	0.84	0.69	0.65	0.7
	MOSCEM	0.83 (-1.19)	0.77 (11.59)	0.68 (4.62)	0.78 (11.43)
E.9	KU-GA	0.89	0.88	0.37	0.9
	MOSCEM	0.78 (-12.36)	0.72 (-18.18)	0.34 (-8.11)	0.74 (-17.78)
E.66A	KU-GA	0.72	0.59	0.73	0.6
	MOSCEM	0.67 (-6.94)	0.68 (15.25)	0.70 (-4.11)	0.72 (20.00)
E.18	KU-GA	0.79	0.86	0.72	0.92
	MOSCEM	0.70 (-11.39)	0.84 (-2.33)	0.75 (4.17)	0.96 (4.35)
E.54	KU-GA	0.56	0.61	0.35	0.68
	MOSCEM	0.56 (0.00)	0.57 (-6.56)	0.49 (40.00)	0.63 (-7.35)
E.70	KU-GA	0.61	0.63	0.08	0.69
	MOSCEM	0.62 (1.64)	0.60 (-4.76)	0.26 (225.00)	0.65 (-5.80)
E.20A	KU-GA	0.81	0.9	0.66	0.97
	MOSCEM	0.72 (-11.11)	0.84 (-6.67)	0.68 (3.03)	0.91 (-6.19)
เฉลี่ย	KU-GA	0.63	0.64	-0.72	0.70
	MOSCEM	0.63 (0.00)	0.64 (0.00)	-0.92 (-27.78)	0.70 (0.00)

หมายเหตุ : ค่าในวงเล็บคือเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าทางสถิติ ที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM เทียบกับค่าทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA



ภาพที่ 17 การเปรียบเทียบตัวแปรทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยโปรแกรม KU-GA และ MOSCEM สำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.20A

3. ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM และ KU-MODNAM-SD ในการประเมินน้ำท่า ในลุ่มน้ำปึงตอนบนและลุ่มน้ำชีโดยใช้โปรแกรม KU-GA ในการสอบเทียบแบบจำลองแบบ อัตโนมัติ

(ก) ลุ่มน้ำปึงตอนบน

จากผลการศึกษาในข้อย่อที่ 2 ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของตัวแปรทางสถิติซึ่งประกอบด้วย ค่า NSE, KGE, KGE_L และ KGE_{FDC} จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM และ KU-MODNAM-SD โดยใช้โปรแกรม KU-GA ในการประเมินน้ำท่าในลุ่มน้ำปึงตอนบน แสดงดังตารางที่ 28 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยของ NSE ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD มีค่าเท่ากับผลการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM ในขณะที่ค่า KGE, KGE_L และ KGE_{FDC} ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM มีค่าเท่ากับ 0.87, 0.67 และ 0.98 ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD เท่ากับ 8.0%, 11.9% และ 14.3% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาตามตัวแปรทางสถิติ ของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ซึ่งเป็นสถานีวัดน้ำท่าทำน้ำในลุ่มน้ำปึงตอนบน พบว่าค่า NSE, KGE และ KGE_L ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD มีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM เท่ากับ 4.7%, 2.2% และ 6.6% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าแบบจำลอง KU-MODNAM-SD สามารถนำมาใช้เพื่อการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 รวมทั้งสถานีวัดน้ำท่าย่อยทั้ง 5 สถานี ในลุ่มน้ำปึงตอนบน ซึ่งมีความถูกต้องที่น้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการประเมินน้ำท่าโดยแบบจำลอง KU-MODNAM ที่ทำการสอบเทียบในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าทั้ง 6 สถานี ในลุ่มน้ำปึงตอนบน

ตารางที่ 28 ค่าทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM และ KU-MODNAM-SD
จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA สำหรับ
สถานีวัดน้ำท่า 6 สถานี ในลุ่มน้ำปิงตอนบน

รหัส สถานี	แบบจำลอง	ค่าสถิติของการสอบเทียบแบบจำลอง			
		<i>NSE</i>	<i>KGE</i>	<i>KGE_L</i>	<i>KGE_{FDC}</i>
P.4A	MODNAM	0.76	0.88	0.47	0.98
	MODNAM-SD	0.76 (0.0)	0.87 (-1.1)	0.62 (31.9)	0.96 (-2.0)
P.20	MODNAM	0.65	0.82	0.71	0.97
	MODNAM-SD	0.65 (0.0)	0.53 (-35.4)	0.42 (-40.8)	0.56 (-42.3)
P.75	MODNAM	0.73	0.87	0.74	0.98
	MODNAM-SD	0.81 (10.9)	0.87 (0.0)	0.85 (14.9)	0.90 (-8.2)
P.67	MODNAM	0.78	0.88	0.72	0.99
	MODNAM-SD	0.83 (7.8)	0.85 (-3.4)	0.73 (1.4)	0.88 (-11.1)
P.21	MODNAM	0.71	0.85	0.63	0.97
	MODNAM-SD	0.56 (-21.1)	0.70 (-17.6)	0.10 (-84.1)	0.74 (-23.7)
P.1	MODNAM	0.85	0.92	0.76	0.99
	MODNAM-SD	0.89 (4.7)	0.94 (2.2)	0.81 (6.6)	0.99 (0.0)
เฉลี่ย	MODNAM	0.75	0.87	0.67	0.98
	MODNAM-SD	0.75 (0.0)	0.80 (-8.0)	0.59 (-11.9)	0.84 (-14.3)

หมายเหตุ : ค่าในวงเล็บคือเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าทางสถิติ ที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD เทียบกับค่าทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM

(ข) ลุ่มน้ำชี

จากผลการศึกษาในข้อย่อที่ 2 ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของตัวแปรทางสถิติซึ่งประกอบด้วย
ค่า *NSE*, *KGE*, *KGE_L* และ *KGE_{FDC}* จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM และ
KU-MODNAM-SD โดยใช้โปรแกรม KU-GA ในการประเมินน้ำท่าในลุ่มน้ำชี แสดงดังตารางที่ 29
จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยของ *NSE*, *KGE*, *KGE_L* และ *KGE_{FDC}* ที่ได้จากการสอบ

เทียบแบบจำลอง KU-MODNAM มีค่าเท่ากับ 0.74, 0.86, -1.30 และ 0.95 ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD เท่ากับ 14.9%, 22.4%, 49.2% และ 24.2% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาตามตัวแปรทางสถิติ ของสถานีวัดน้ำท่า E.20A ซึ่งเป็น สถานีวัดน้ำท่าทำให้น้ำในลุ่มน้ำชี พบว่าค่า NSE, KGE และ KGE_{FDC} ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD มีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM เท่ากับ 8.0%, 2.3% และ 1.0% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าแบบจำลอง KU-MODNAM-SD สามารถนำมาใช้เพื่อการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า E.20A รวมทั้งสถานีวัดน้ำท่าย่อยทั้ง 12 สถานี ในลุ่มน้ำชี ซึ่งมีความถูกต้องที่น้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการประเมินน้ำท่าโดยแบบจำลอง KU-MODNAM ที่ทำการสอบเทียบในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าทั้ง 13 สถานี ในลุ่มน้ำชี

ตารางที่ 29 ค่าทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM และ KU-MODNAM-SD จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 13 สถานี ในลุ่มน้ำชี

รหัสสถานี	โปรแกรม	ค่าสถิติของการสอบเทียบแบบจำลอง			
		NSE	KGE	KGE_L	KGE_{FDC}
E.73	MODNAM	0.51	0.75	-0.56	0.90
	MODNAM-SD	0.25 (-51.0)	0.35 (-53.3)	-2.18 (-289)	0.52 (-42.2)
E.72	MODNAM	0.61	0.80	-2.24	0.96
	MODNAM-SD	0.25 (-47.5)	0.35 (-31.3)	-2.18 (-605)	0.52 (-20.8)
E.32A	MODNAM	0.76	0.79	-1.62	0.83
	MODNAM-SD	0.50 (-34.2)	0.39 (-50.6)	0.01 (101)	0.44 (-47.0)
E.5	MODNAM	0.85	0.91	-2.45	0.95
	MODNAM-SD	0.61 (-28.2)	0.59 (-35.2)	0.21 (109)	0.64 (-32.6)
E.23	MODNAM	0.80	0.89	0.59	0.95
	MODNAM-SD	0.75 (-6.3)	0.77 (-13.5)	0.56 (-5.1)	0.81 (-14.7)
E.6C	MODNAM	0.67	0.83	-6.71	0.94
	MODNAM-SD	0.50 (-25.4)	0.43 (-48.2)	-12.04 (-79)	0.49 (-47.9)
E.21	MODNAM	0.87	0.94	-1.03	0.99
	MODNAM-SD	0.86 (-1.1)	0.76 (-19.1)	0.63 (161)	0.76 (-23.2)

ตารางที่ 29 (ต่อ)

รหัส สถานี	โปรแกรม	ค่าสถิติของการสอบเทียบแบบจำลอง			
		<i>NSE</i>	<i>KGE</i>	<i>KGE_L</i>	<i>KGE_{FDC}</i>
E.9	MODNAM	0.85	0.93	-0.79	0.98
	MODNAM-SD	0.88 (3.5)	0.88 (-5.4)	0.70 (189)	0.90 (-8.2)
E.66A	MODNAM	0.79	0.90	0.75	0.98
	MODNAM-SD	0.74 (-6.3)	0.63 (-30.0)	0.55 (-26.7)	0.65 (-33.7)
E.18	MODNAM	0.72	0.88	0.80	0.96
	MODNAM-SD	0.78 (8.3)	0.88 (0.0)	0.79 (-1.3)	0.96 (0.0)
E.54	MODNAM	0.68	0.82	-4.77	0.99
	MODNAM-SD	0.56 (-17.6)	0.64 (-22.0)	0.52 (111)	0.72 (-27.3)
E.70	MODNAM	0.75	0.86	0.40	0.98
	MODNAM-SD	0.62 (-17.3)	0.66 (-23.3)	0.12 (-70.0)	0.72 (-26.5)
E.20A	MODNAM	0.75	0.88	0.77	0.98
	MODNAM-SD	0.81 (8.0)	0.90 (2.3)	0.69 (-10.4)	0.99 (1.0)
เฉลี่ย	MODNAM	0.74	0.86	-1.30	0.95
	MODNAM-SD	0.63 (-14.9)	0.65 (-24.4)	-1.94 (-49.2)	0.72 (-24.2)

หมายเหตุ : ค่าในวงเล็บคือเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าทางสถิติ ที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD เทียบกับค่าทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM

4. ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII ในการประเมินน้ำท่าในกลุ่มน้ำปึงตอนบนและลุ่มน้ำชี โดยใช้โปรแกรม KU-GA ในการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติ

(ก) ลุ่มน้ำปึงตอนบน

จากผลการศึกษาในข้อย่อที่ 2 ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของตัวแปรทางสถิติซึ่งประกอบด้วยค่า NSE, KGE, KGE_L และ KGE_{FDC} จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII โดยใช้โปรแกรม KU-GA ในการประเมินน้ำท่าในกลุ่มน้ำปึงตอนบน แสดงดังตารางที่ 30 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยของ NSE, KGE, KGE_L และ KGE_{FDC} ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII มีค่าเท่ากับ 0.76, 0.81, 0.60 และ 0.85 ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD เท่ากับ 1.3%, 1.2%, 1.7% และ 1.2% ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาค่า KGE_L ตามรายสถานี พบว่าค่า KGE_L ที่สถานีวัดน้ำท่า P.20 และ P.21 ของผลการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII ให้ค่าที่สูงกว่าผลการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD เท่ากับ 16.6% และ 180.0% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII สามารถนำมาใช้เพื่อการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 รวมทั้งสถานีวัดน้ำท่าย่อยทั้ง 5 สถานี ในลุ่มน้ำปึงตอนบน ซึ่งมีความถูกต้องที่ไม่ได้ด้อยกว่าที่ดำเนินการโดยแบบจำลอง KU-MODNAM-SD รวมทั้งสามารถเพิ่มความถูกต้องในการประเมินปริมาณการไหลต่ำๆ ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นได้

ตารางที่ 30 ค่าทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII
จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA สำหรับ
สถานีวัดน้ำท่า 6 สถานี ในลุ่มน้ำปึงตอนบน

รหัส สถานี	แบบจำลอง	ค่าสถิติของการสอบเทียบแบบจำลอง			
		NSE	KGE	KGE_L	KGE_{FDC}
P.4A	MODNAM-SD	0.76	0.87	0.62	0.96
	MODNAM-SD-NDII	0.75 (-1.3)	0.86 (-1.2)	0.46 (-25.8)	0.94 (-2.1)
P.20	MODNAM-SD	0.65	0.53	0.42	0.56
	MODNAM-SD-NDII	0.66 (1.5)	0.57 (7.6)	0.49 (16.6)	0.60 (7.1)
P.75	MODNAM-SD	0.81	0.87	0.85	0.90
	MODNAM-SD-NDII	0.81 (0.0)	0.86 (-1.2)	0.85 (0.00)	0.89 (-1.1)
P.67	MODNAM-SD	0.83	0.85	0.73	0.88
	MODNAM-SD-NDII	0.83 (0.0)	0.85 (0.00)	0.71 (-2.74)	0.88 (0.0)
P.21	MODNAM-SD	0.56	0.70	0.10	0.74
	MODNAM-SD-NDII	0.60 (7.1)	0.75 (7.1)	0.28 (180)	0.80 (8.1)
P.1	MODNAM-SD	0.89	0.94	0.81	0.99
	MODNAM-SD-NDII	0.88 (-1.1)	0.94 (0.00)	0.79 (-2.5)	0.99 (0.0)
เฉลี่ย	MODNAM-SD	0.75	0.80	0.59	0.84
	MODNAM-SD-NDII	0.76 (1.3)	0.81 (1.2)	0.60 (1.7)	0.85 (1.2)

หมายเหตุ : ค่าในวงเล็บคือเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าทางสถิติ ที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII เทียบกับค่าทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD

(ข) ลุ่มน้ำชี

จากผลการศึกษาในข้อย่อยที่ 2 ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของตัวแปรทางสถิติซึ่งประกอบด้วย
ค่า NSE , KGE , KGE_L และ KGE_{FDC} จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD และ
KU-MODNAM-SD-NDII โดยใช้โปรแกรม KU-GA ในการประเมินน้ำท่าในลุ่มน้ำปึงตอนบน
แสดงดังตารางที่ 31 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยของ KGE_L ที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII มีค่าเท่ากับ -0.72 ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลการสอบเทียบ

แบบจำลอง KU-MODNAM-SD เท่ากับ 62.9% อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของ KGE และ KGE_{FDC} ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD มีค่าเท่ากับ 0.64 และ 0.70 ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII เท่ากับ 1.5% และ 2.8% อย่างไรก็ตาม นับว่าค่าความแตกต่างดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาค่า KGE_L ตามรายสถานีพบว่าค่า KGE_L ที่สถานีวัดน้ำท่า E.73, E.72, E.32A, E.5, E.23, E.6C และ E.66A ของผลการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII ให้ค่าที่สูงกว่าผลการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD เท่ากับ 51.8%, 47.1%, 4,800%, 147.0%, 25.0%, 56.2% และ 32.7% ตามลำดับอย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII สามารถนำมาใช้เพื่อการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า E.20A รวมทั้งสถานีวัดน้ำท่าย่อยทั้ง 12 สถานี ในลุ่มน้ำชี ซึ่งมีความถูกต้องที่ไม่ได้ด้อยกว่าที่ดำเนินการโดยแบบจำลอง KU-MODNAM-SD รวมทั้งสามารถเพิ่มความถูกต้องในการประเมินปริมาณการไหลต่ำๆ ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นได้

ตารางที่ 31 ค่าทางสถิติของแบบจำลอง KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม KU-GA สำหรับสถานีวัดน้ำท่า 13 สถานี ในลุ่มน้ำชี

รหัสสถานี	โปรแกรม	ค่าสถิติของการสอบเทียบแบบจำลอง			
		NSE	KGE	KGE_L	KGE_{FDC}
E.73	MODNAM-SD	0.25	0.35	-2.18	0.52
	MODNAM-SD-NDII	0.29 (16.0)	0.38 (8.6)	-1.05 (51.8)	0.56 (7.7)
E.72	MODNAM	0.32	0.55	-15.80	0.76
	MODNAM-SD	0.31 (-3.1)	0.61 (10.9)	-8.36 (47.1)	0.85 (11.8)
E.32A	MODNAM	0.50	0.39	0.01	0.44
	MODNAM-SD	0.55 (10.0)	0.43 (10.3)	0.49 (4800)	0.47 (6.8)
E.5	MODNAM	0.61	0.59	0.21	0.64
	MODNAM-SD	0.64 (4.9)	0.60 (1.7)	0.52 (147)	0.64 (0.0)
E.23	MODNAM	0.75	0.77	0.56	0.81
	MODNAM-SD	0.75 (0.0)	0.73 (-5.2)	0.70 (25.0)	0.76 (-6.2)
E.6C	MODNAM	0.50	0.43	-12.04	0.49
	MODNAM-SD	0.49 (-2.0)	0.36 (-16.3)	-5.28 (56.2)	0.41 (-16.3)
E.21	MODNAM	0.86	0.76	0.63	0.76
	MODNAM-SD	0.84 (-2.3)	0.69 (-9.2)	0.65 (3.2)	0.70 (-7.9)

ตารางที่ 31 (ต่อ)

รหัส สถานี	โปรแกรม	ค่าสถิติของการสอบเทียบแบบจำลอง			
		<i>NSE</i>	<i>KGE</i>	<i>KGE_L</i>	<i>KGE_{FDC}</i>
E.9	MODNAM	0.88	0.88	0.70	0.90
	MODNAM-SD	0.89 (1.1)	0.88 (0.0)	0.37 (-47.1)	0.90 (0.0)
E.66A	MODNAM	0.74	0.63	0.55	0.65
	MODNAM-SD	0.72 (-2.7)	0.59 (-6.4)	0.73 (32.7)	0.60 (-7.7)
E.18	MODNAM	0.78	0.88	0.79	0.96
	MODNAM-SD	0.79 (1.3)	0.86 (-2.3)	0.72 (-8.9)	0.92 (-4.2)
E.54	MODNAM	0.56	0.64	0.52	0.72
	MODNAM-SD	0.56 (0.0)	0.61 (-4.7)	0.35 (-32.7)	0.68 (-5.6)
E.70	MODNAM	0.62	0.66	0.12	0.72
	MODNAM-SD	0.61 (-1.6)	0.63 (-4.6)	0.08 (-33.3)	0.69 (-4.2)
E.20A	MODNAM	0.81	0.90	0.69	0.99
	MODNAM-SD	0.81 (0.0)	0.90 (0.0)	0.66 (-4.4)	0.97 (-2.0)
เฉลี่ย	MODNAM	0.63	0.65	-1.94	0.72
	MODNAM-SD	0.63 (0.0)	0.64 (-1.5)	-0.72 (62.9)	0.70 (-2.8)

หมายเหตุ : ค่าในวงเล็บคือเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าทางสถิติ ที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII เทียบกับค่าทางสถิติที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD

สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาเรื่อง “การพัฒนาโปรแกรม Genetic Algorithm เพื่อการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-Modified NAM, KU-Modified NAM-SD และ KU-Modified NAM-SD-NDII แบบอัตโนมัติ” เป็นการนำกระบวนการ Genetic Algorithm มาพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB โดยให้ชื่อว่า KU-GA จากนั้นนำมาทดสอบประสิทธิภาพเพื่อการหาค่าต่ำสุดของสมการ $Z = 2X^2 + (16/X)$ โดยกำหนดให้ X มีค่าระหว่าง 1.00 ถึง 2.00 โดยพบว่า X ที่เหมาะสมที่สุดคือ 1.47 ดังนั้น โปรแกรม KU-GA จึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เพื่อการสอบเทียบแบบจำลอง 3 แบบจำลอง ซึ่งประกอบด้วย (1) แบบจำลอง KU-Modified NAM ซึ่งเป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าแบบ ลัมพ์ (Lumped Rainfall-Runoff Model) ที่ได้รับการปรับปรุงจากแบบจำลอง NAM โดยนุชนารถ (2560) จากแบบจำลอง NAM (2) แบบจำลอง KU-MODNAM-SD ซึ่งเป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าแบบกึ่งกระจายตัว (Semi-Distributed Rainfall-Runoff Model) ที่สามารถประเมินน้ำท่าได้สำหรับทุกกลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณา และ (3) แบบจำลอง KU-MODNAM-SD ซึ่งเป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าแบบกึ่งกระจายตัว ที่สามารถประเมินค่าปริมาณความจุในชั้นดินส่วนล่าง (L_{MAX}) สำหรับแต่ละกลุ่มน้ำย่อย

เพื่อเป็นการตรวจสอบความมีประสิทธิภาพของโปรแกรม KU-GA ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำโปรแกรม MOSCEM ที่ได้รับการยอมรับกันโดยทั่วไปในระดับนานาชาติในการใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุด มาเชื่อมต่อกับแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง จากนั้นจึงนำ โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ที่เชื่อมต่อกับทั้ง 3 แบบจำลอง มาประยุกต์ใช้กับสถานีวัดน้ำท่าจำนวน 6 สถานี ในลุ่มน้ำปึงตอนบน และ 13 สถานี ในลุ่มน้ำชี เพื่อการหาค่าของชุดพารามิเตอร์ของแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง ที่ทำให้เกิดการเข้ากันได้ระหว่างกราฟน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลองและกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชัน คือ ตัวแปรทางสถิติ KGE , KGE_L และ KGE_{FDC} นอกจากนั้นแล้วได้คำนวณค่า NSE เพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์กลางในการสรุปภาพรวมของผลการประเมินน้ำท่าของทุกแบบจำลอง ผลการศึกษาพบว่าโปรแกรม KU-GA มีความสามารถในการประเมินน้ำท่าของทุกสถานีวัดน้ำท่าโดยทั้ง 3 แบบจำลอง ในภาพรวมที่ทัดเทียมกับที่ดำเนินการโดยโปรแกรม MOSCEM ดังนั้น โปรแกรม KU-GA จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้เชื่อมต่อกับแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า อื่น ๆ รวมทั้งสามารถใช้ประกอบการบริหารจัดการน้ำได้เป็นอย่างดี อาทิเช่น การบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ

นอกจากนั้นแล้วในการศึกษานี้พบว่า แบบจำลอง KU-MODNAM-SD ที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้สามารถนำมาใช้เพื่อการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบแบบจำลองรวมทั้งที่ท้ายน้ำของทุกลุ่มน้ำย่อยด้วยความถูกต้องที่น้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการประเมินน้ำท่าโดยแบบจำลอง KU-MODNAM ที่ต้องทำการสอบเทียบแบบจำลองในแต่ละสถานีวัดน้ำท่า ทั้งนี้ผลการประเมินปริมาณการไหลต่ำ ๆ โดยแบบจำลอง KU-MODNAM-SD ก่อนข้างน้อยกว่าที่ดำเนินการโดยแบบจำลอง KU-MODNAM อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เมื่อนำแบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII มาประยุกต์ใช้เพื่อการประเมินน้ำท่า พบว่าสามารถเพิ่มความถูกต้องในการประเมินปริมาณการไหลต่ำ ๆ ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การประเมินน้ำท่าในภาพรวมไม่ได้ดีกว่าที่ดำเนินการโดยแบบจำลอง KU-MODNAM-SD ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในการประเมินน้ำท่า ณ บริเวณที่มีและไม่มีสถานีวัดน้ำท่าตั้งอยู่ ซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากต่อการบริหารจัดการน้ำของประเทศต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์. 2556. อุทกวิทยาขั้นสูง (ADVANCED HYDROLOGY).

พิมพ์ครั้งที่ 2. วีรวรรณ พรินท์ดี้ง แอนด์ แพ็คเกจจิ้ง, นนทบุรี.

กรมทรัพยากรน้ำ. 2559. โครงการศึกษาความมั่นคงอย่างยั่งยืนทั้ง 25 ลุ่มน้ำ. ภาควิชาวิศวกรรม
ทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน.

สุวพันธ์ พุกเที่ยง และ นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์. 2563. การเปรียบเทียบประสิทธิผลของแบบจำลอง
FLEXL KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII เพื่อการประเมินน้ำท่าในลุ่มน้ำชี.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วาสนา จันทร์แดง และ นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์. 2562. การพัฒนาแบบจำลอง SENSWAT-
FLEXL-SD เพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่า, น.2205-2214. ใน การประชุมวิชาการ
วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24. โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัด
อุดรธานี.

กัมพล อินสว่างวงศ์ และ นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์. 2563. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ
แบบจำลอง FLEXL, FLEX-Topo และ Modified NAM. ใน การประชุมวิชาการ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 58. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุพรรณษา บำรุงพงศ์ และ นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์. 2550. ความสัมพันธ์แบบลุ่มน้ำรวมระหว่าง
พารามิเตอร์ของแบบจำลอง NAM และลักษณะเฉพาะทางด้านกายภาพของลุ่มน้ำย่อยใน
ลุ่มน้ำป่าตองบน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Fenicia, F., H. H. G. Savenije, P. Matgen and L. Pfister. 2008. Understanding catchment behavior
through stepwise model concept improvement. **Water Resources Research** 44 (1)

Chen, R.S. and K. H. Yang. 2011. Terraced paddy field rainfall-runoff mechanism and simulation
using a revised tank model. **Paddy and Water Environment** 9 : 237–247

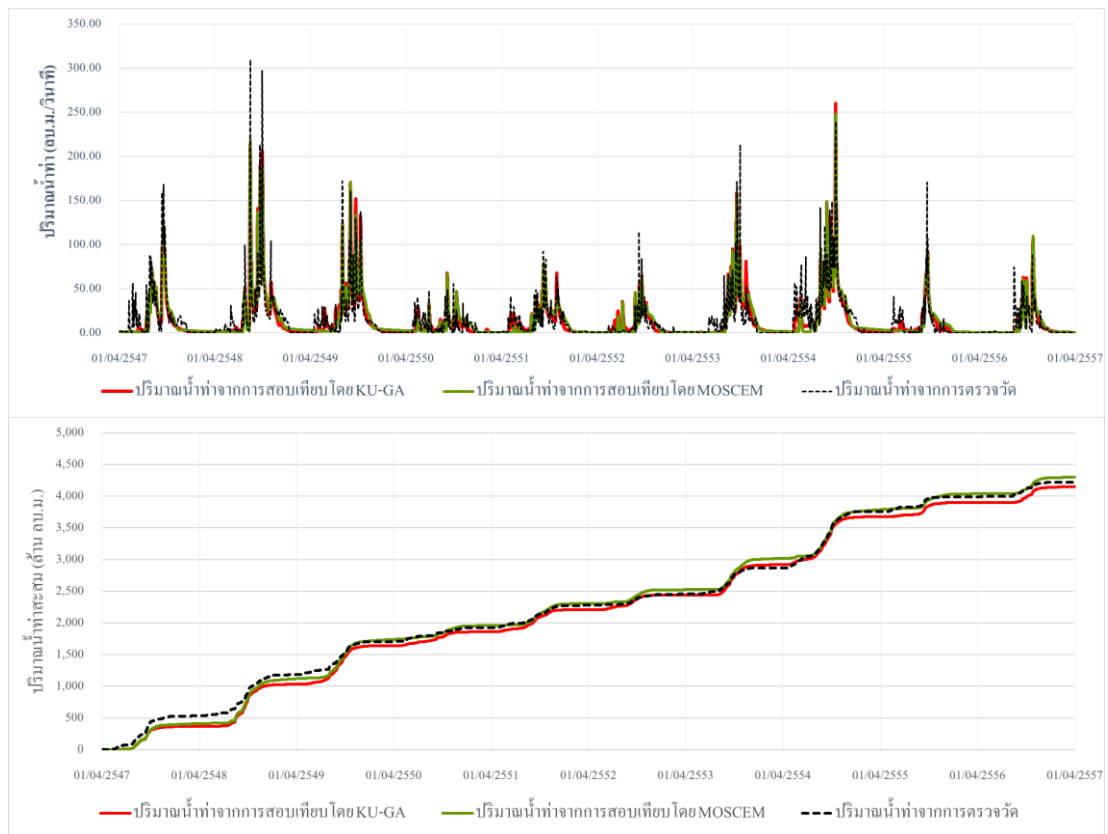
- Vrugt, J.A., H. V. Gupta, L. A. Bastidas, W. Bouten and S. Sorooshian. Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models. **Water Resources Research** 39 (8) : 1214
- K. D. Sharma and S. Singh. 1992. Runoff estimation using Landsat Thematic Mapper data and the SCS model, **Hydrological Sciences Journal** 37 (1) : 39-52
- Gao, H., M. Hrachowitz, F. Fenicia, S. Gharari and H. H. G. Savenije. 2014. Testing the realism of a topography-driven model (FLEX-Topo) in the nested catchments of the Upper Heihe, China. **Hydrology and Earth System Sciences** 18, pp.1895-1915
- Hun Song, J., Her, Y., Park, J. and Seong Kang, M. 2019. Exploring parsimonious daily rainfall-runoff model structure using the hyperbolic tangent function and Tank model. **Journal of Hydrology** 574: 574-587
- Chlumecky, M., J. Buchtele and K. Richta. 2017. Application of random number generators in genetic algorithms to improve rainfall-runoff modelling. **Journal of Hydrology** 553: 350-355
- Sriwongsitanon, N., H. Gao, H. H. G. Savenije, E. Maekan, S. Saengsawang and S. Tianpopirug. (2016). Comparing the Normalized Difference Infrared Index (NDII) with root zone storage in a lumped conceptual model, **Hydrology and Earth System Sciences**, 20: 3361-3377
- Gao, H., M. Hrachowitz, S. J. Schymanski, F. Fenicia, N. Sriwongsitanon, and H. H. G. Savenije. Climate controls how ecosystems size the root zone storage capacity at catchment scale, **Geophys. Geophysical Research Letters.**, 41: 7916-7923

- Gao, H., M. Hrachowitz, N. Sriwongsitanon, F. Fenicia, S. Gharari, and H. H. G. Savenije. Accounting for the influence of vegetation and landscape improves model transferability in a tropical savannah region, **Water Resources Research** 52: 7999-8022
- David E. Goldberg. 1989. **Genetic Algorithms in search, optimization, and machine learning**. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. United States of America.
- Sharma, K.D. and S. Singh. 1992. Runoff estimation using Landsat Thematic Mapper data and the SCS model. **Hydrological Sciences Journal** 37(1): 39-52
- Mapiam, P.P. and N. Sriwongsitanon. 2009. Estimation of the URBS model parameters for flood estimation of ungauged catchments in the upper Ping river basin. **ScienceAsia** 35(1): 49-56
- Venkatesh, B., T. Chandramohan, B. K. Purandara, M. K. Jose and P. C. Nayak. Modeling of a River Basin Using SWAT Model. **Hydrologic Modeling**: 707-714
- Sriwongsitanon, N., W. Jandang, T. Suwawong, and H. H. G. Savenije. 2020. Development of Semi-distributed FLEX-SD Model for runoff estimation in tropical nested catchments. **Hydrology and Earth System Sciences** 192 (1-4): 81-103.

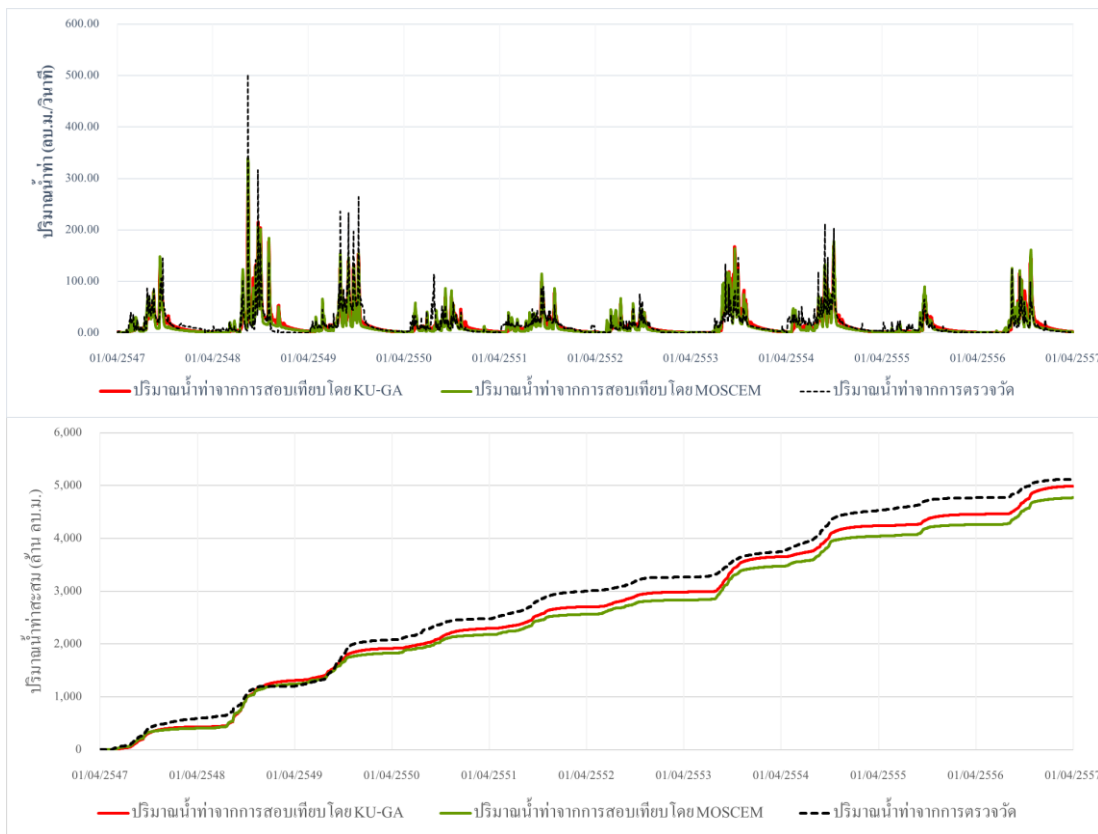
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

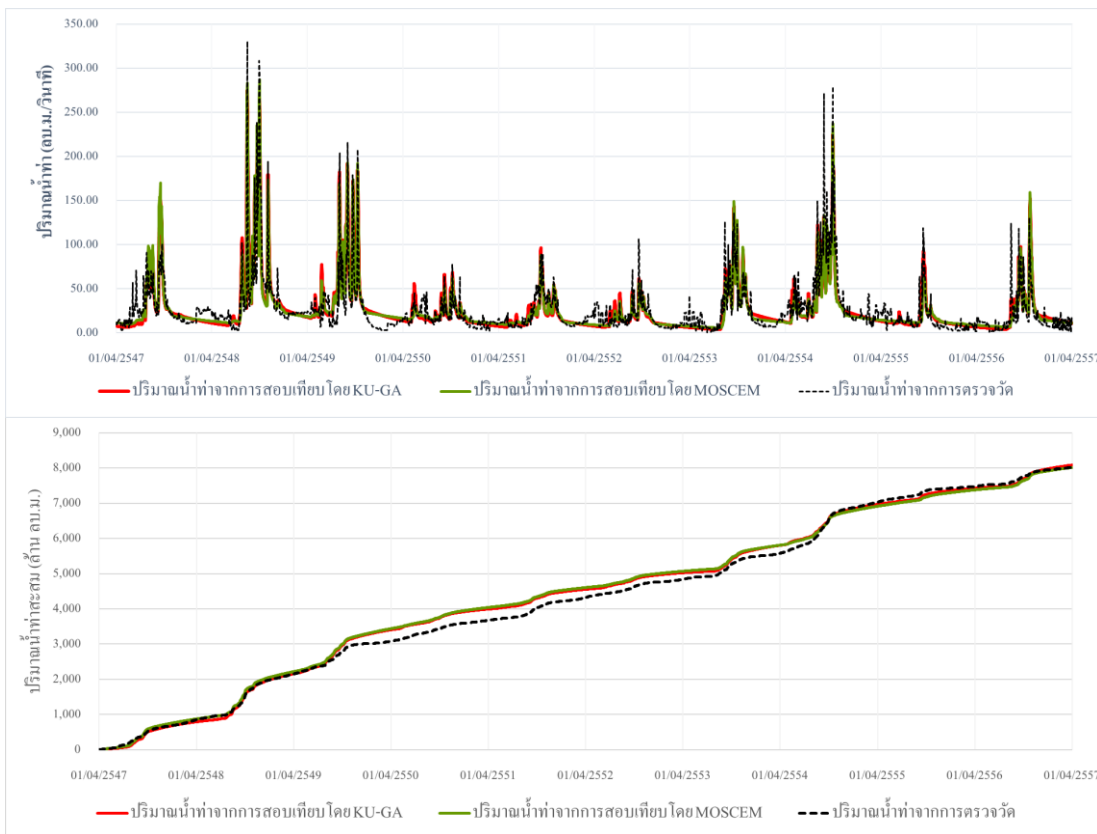
ผลการประเมินกราฟน้ำท่าที่ได้จากการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-GA และ MOSCEM ในการสอบ
เทียบแบบจำลอง KU-MODNAM, KU-MODNAM-SD และ KU-MODNAM-SD-NDII



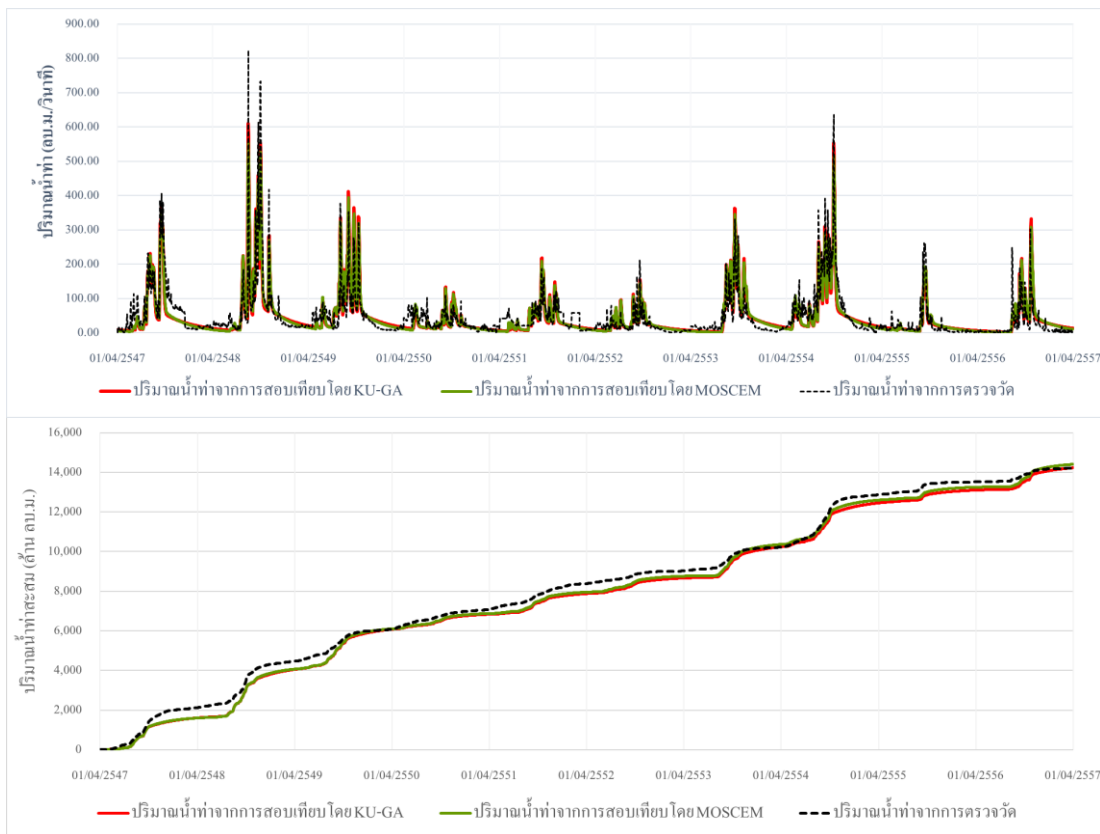
ภาพผนวกที่ ก1 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ P.4A



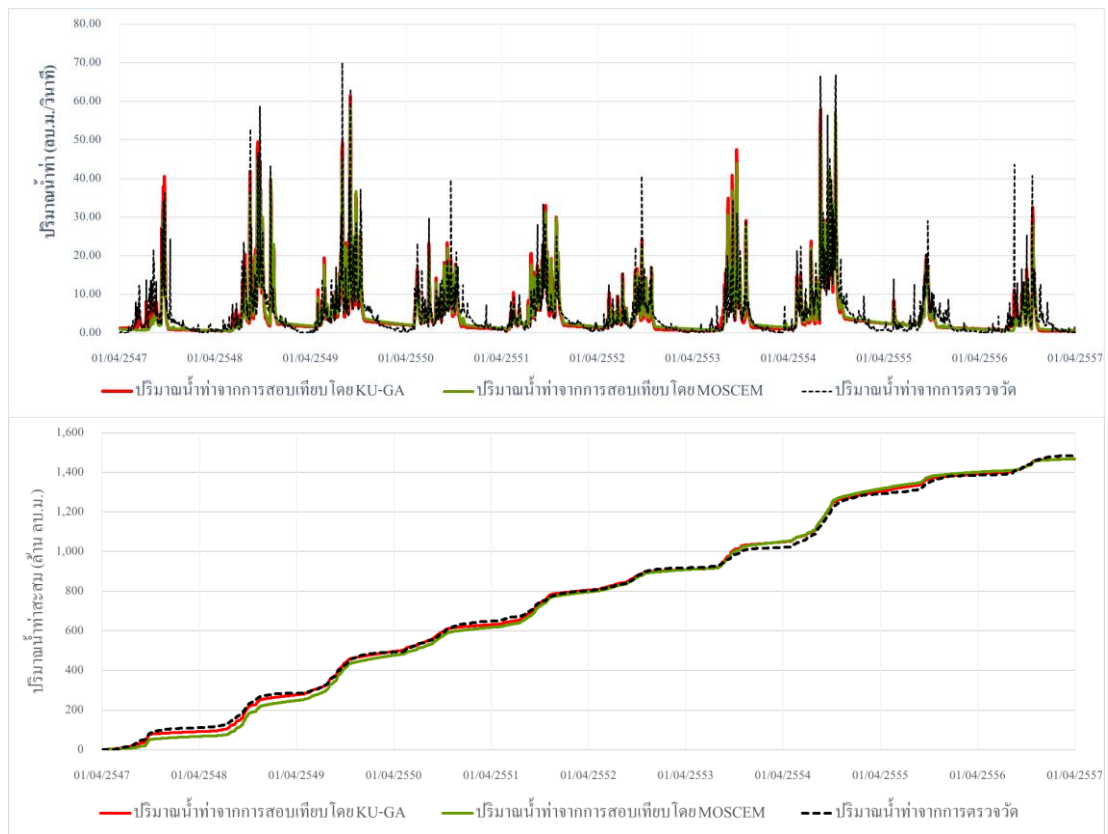
ภาพผนวกที่ ก2 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ P.20



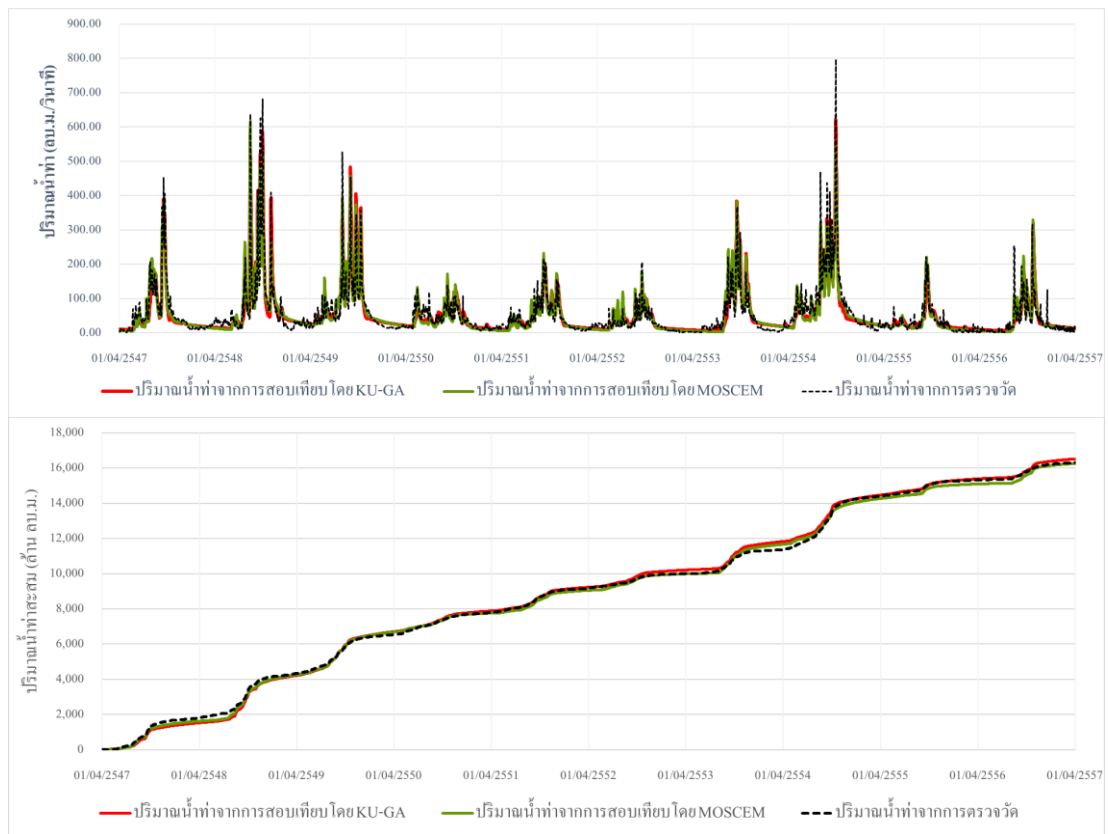
ภาพผนวกที่ ก3 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ P.75



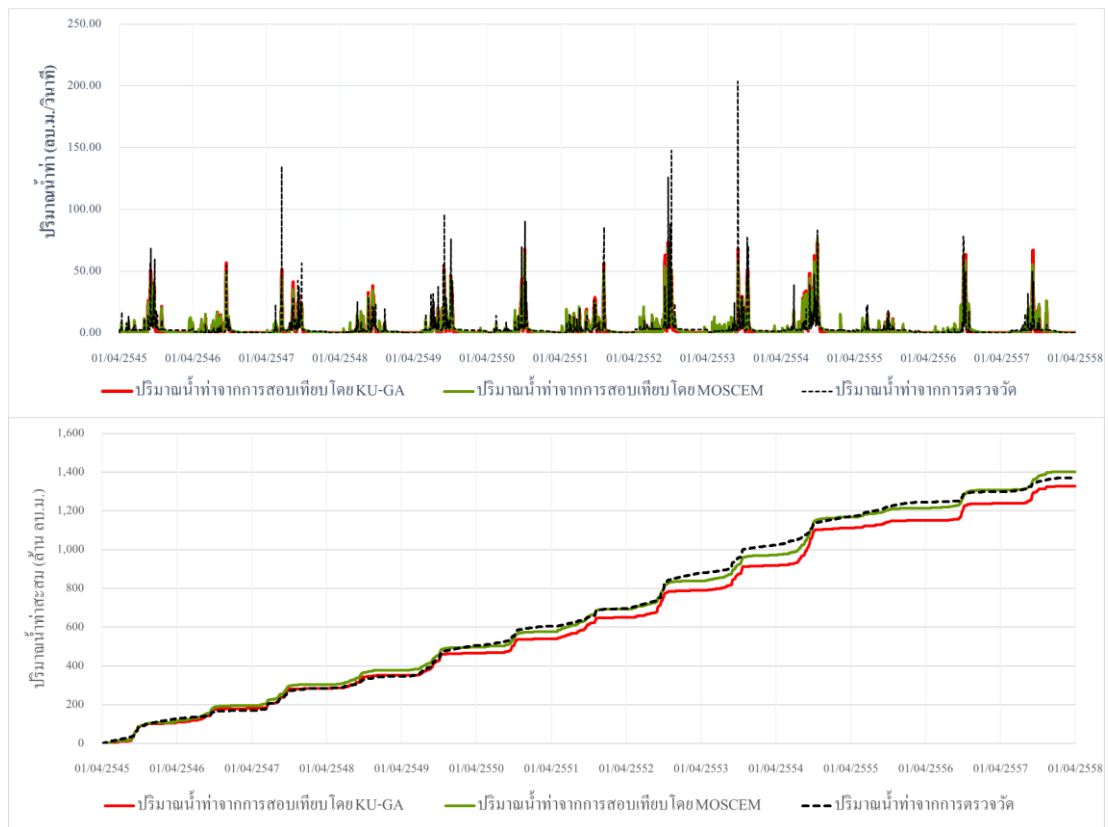
ภาพผนวกที่ ๓4 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ P.67



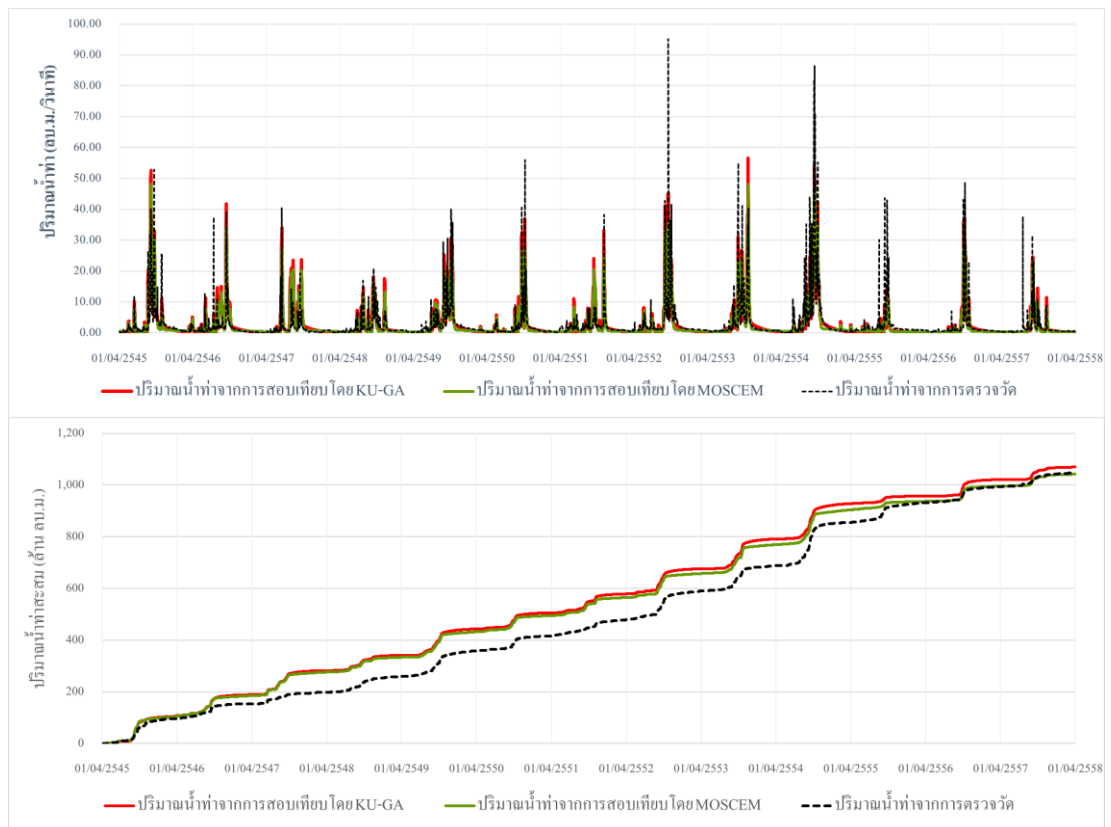
ภาพผนวกที่ ก5 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ P.21



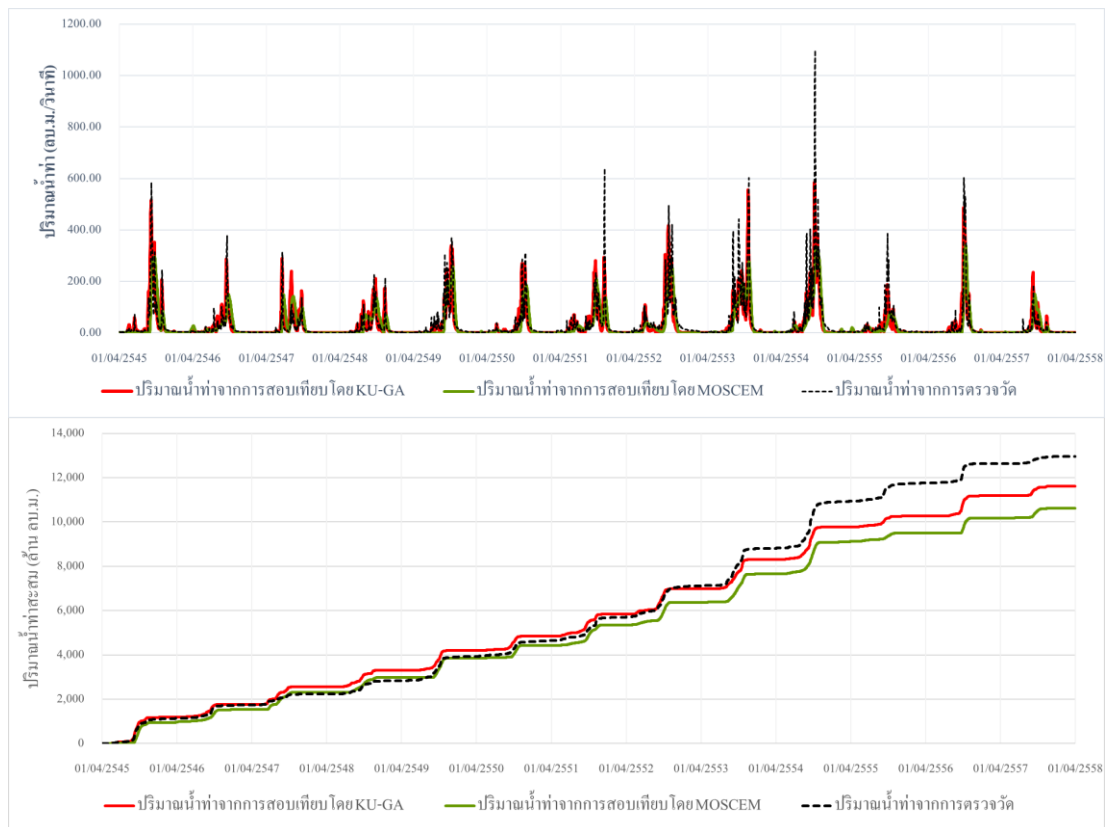
ภาพผนวกที่ 6 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ P.1



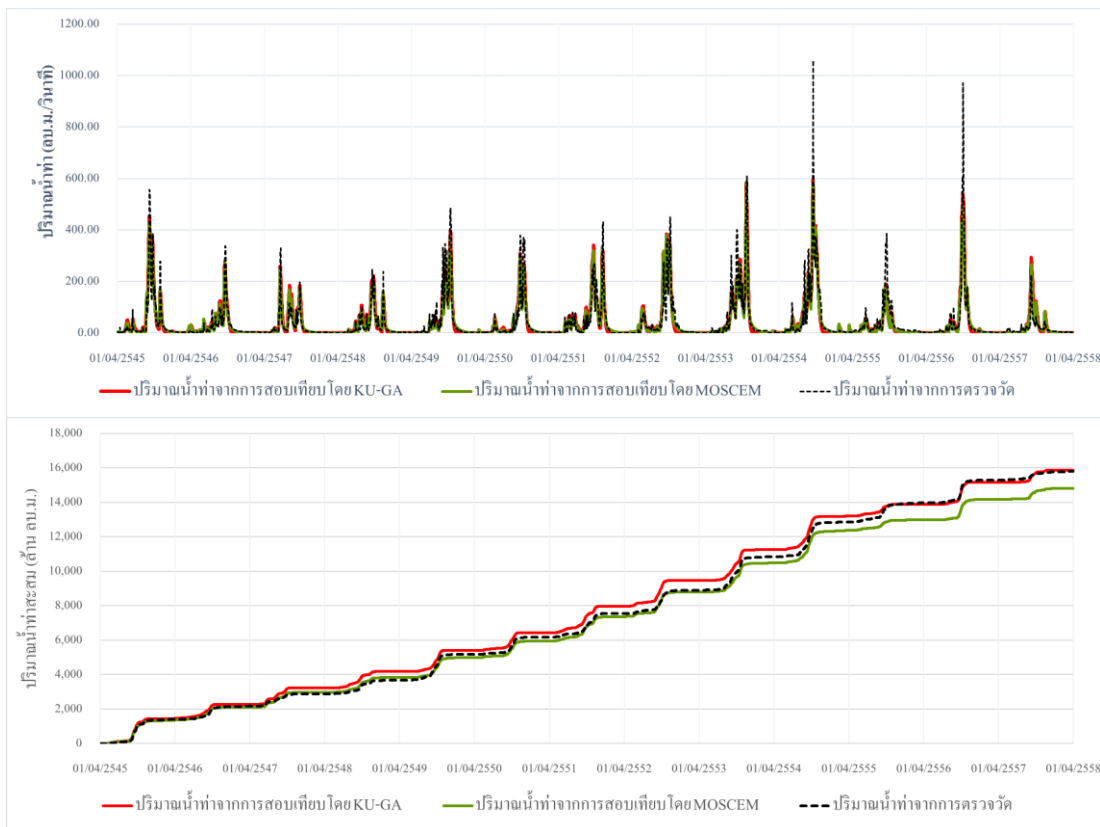
ภาพผนวกที่ ก7 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.73



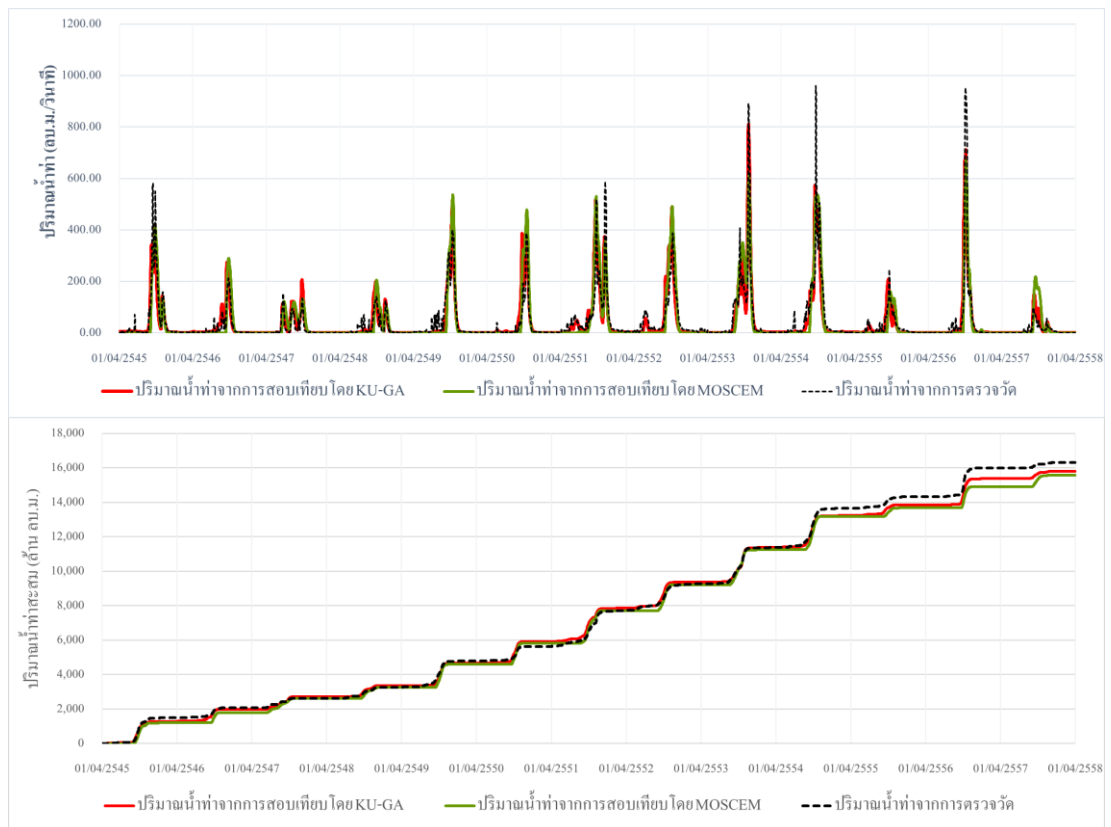
ภาพผนวกที่ ๘๘ การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.72



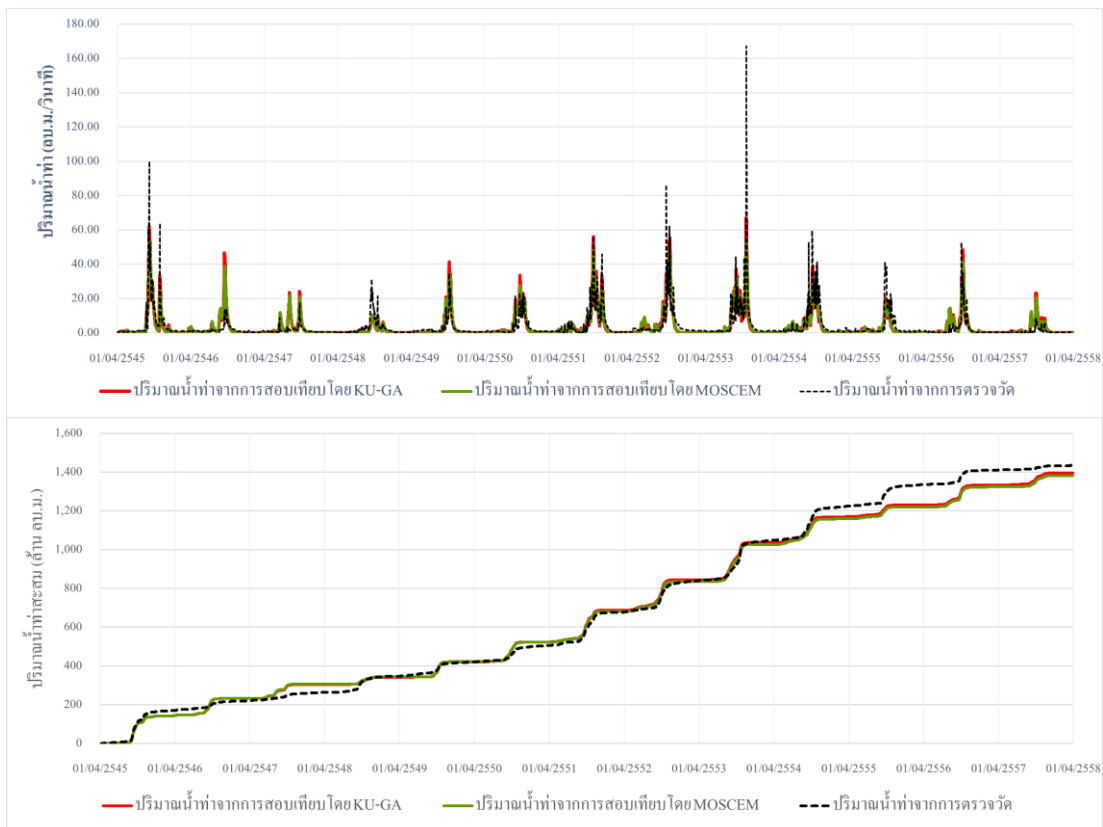
ภาพผนวกที่ ๑๑ การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.32A



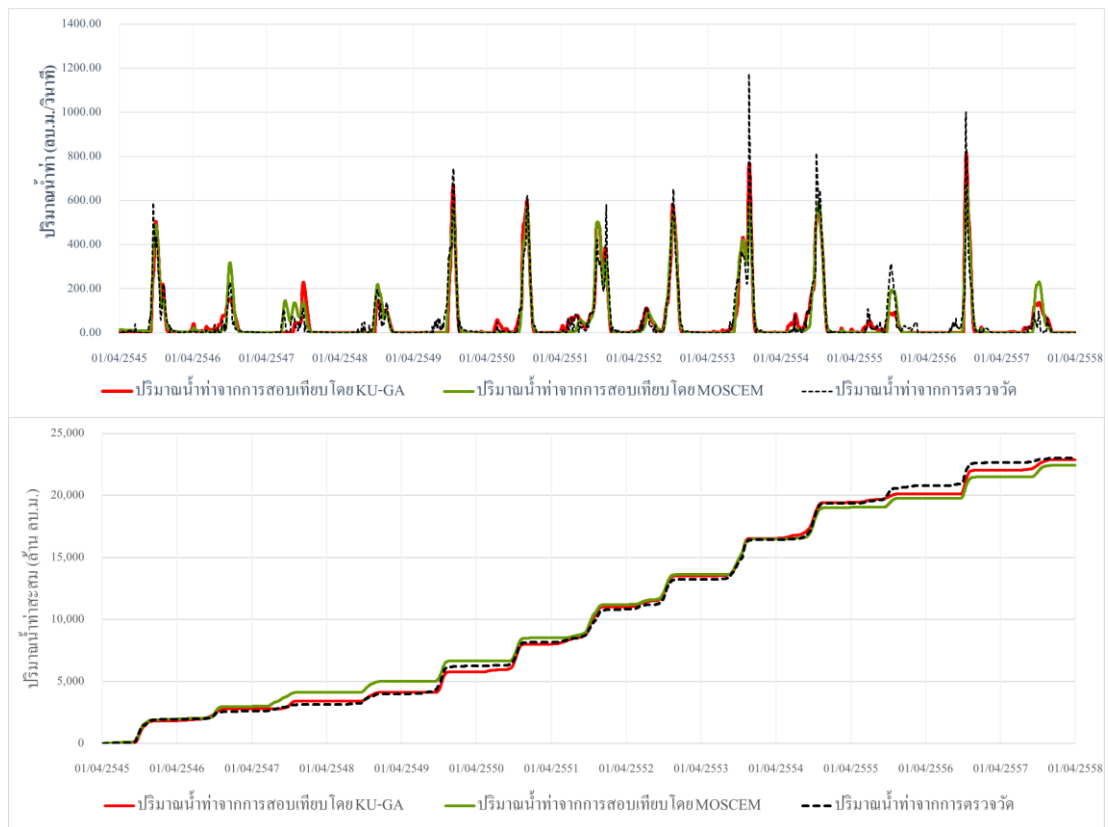
ภาพผนวกที่ ก10 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.5



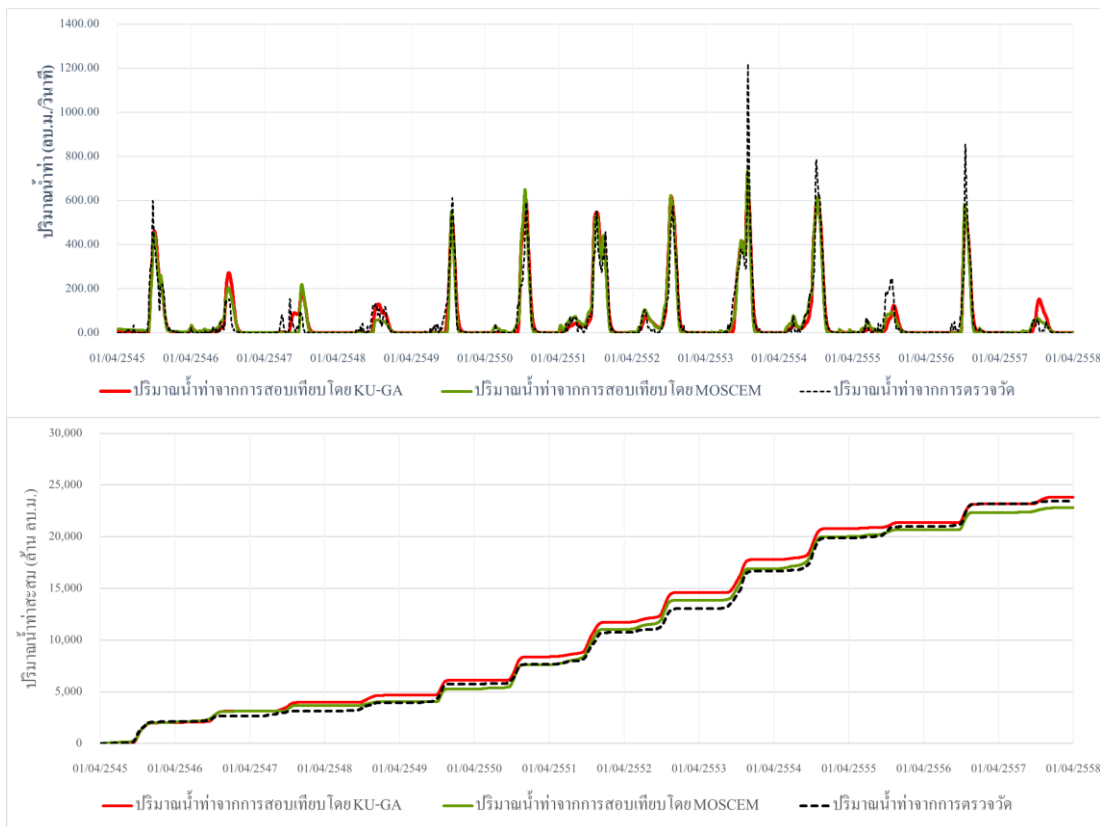
ภาพผนวกที่ ก11 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.23



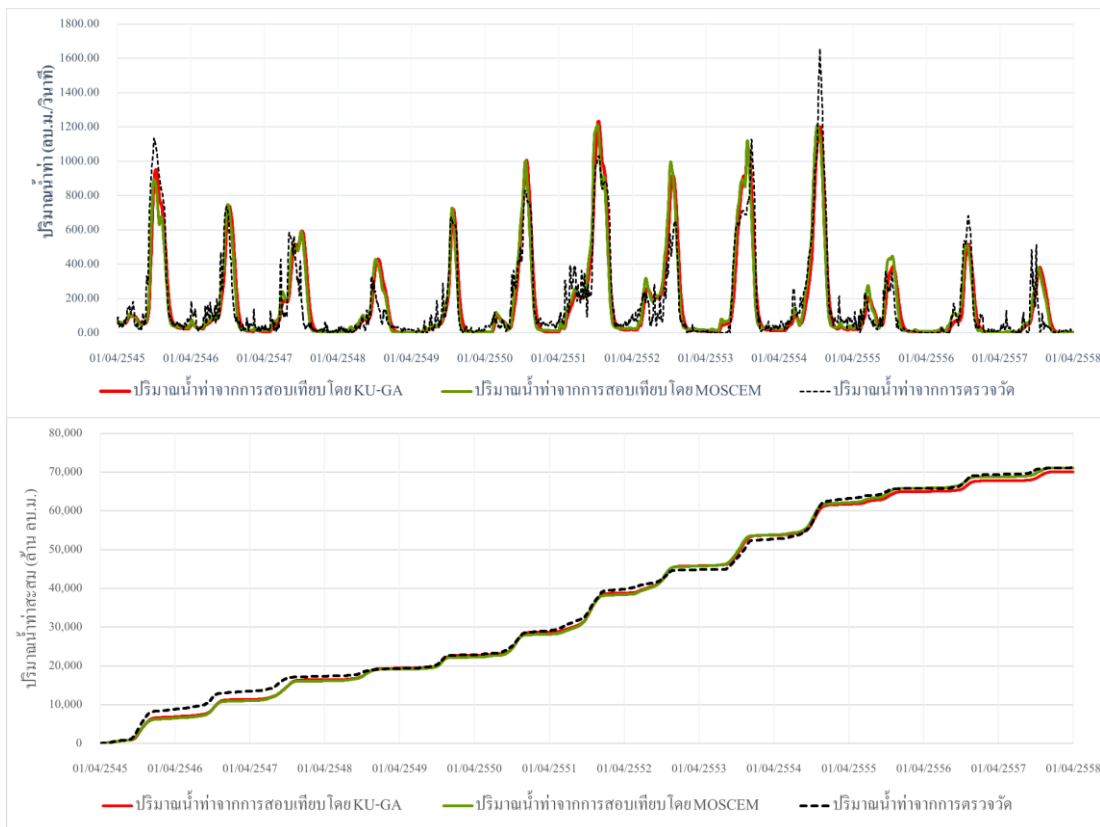
ภาพผนวกที่ ก12 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
 แบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
 ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.6C



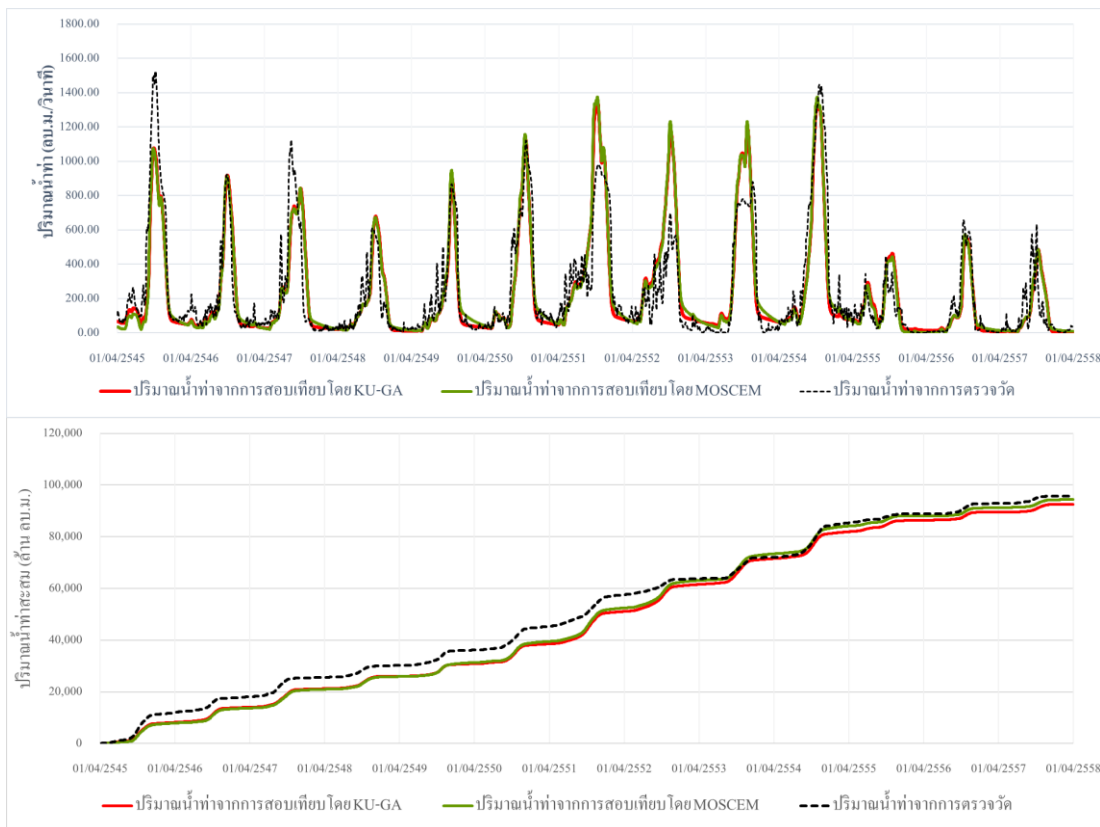
ภาพผนวกที่ ก13 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.21



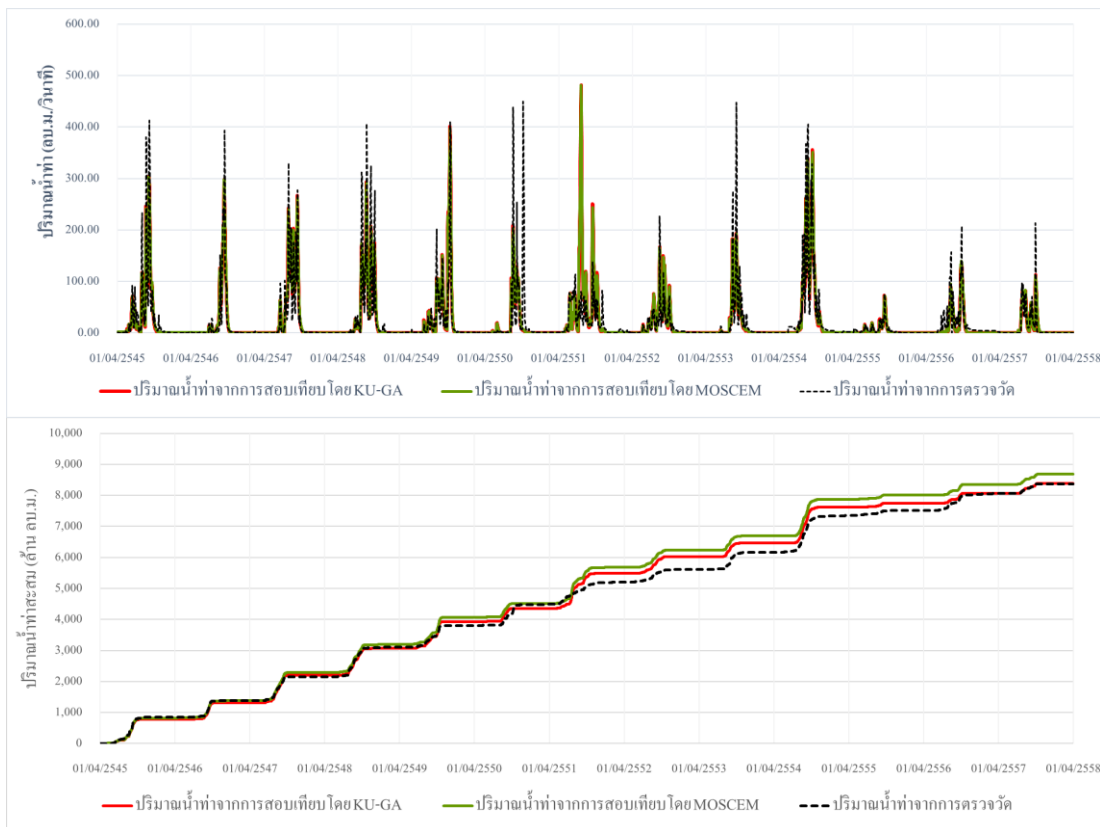
ภาพผนวกที่ ก14 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.9



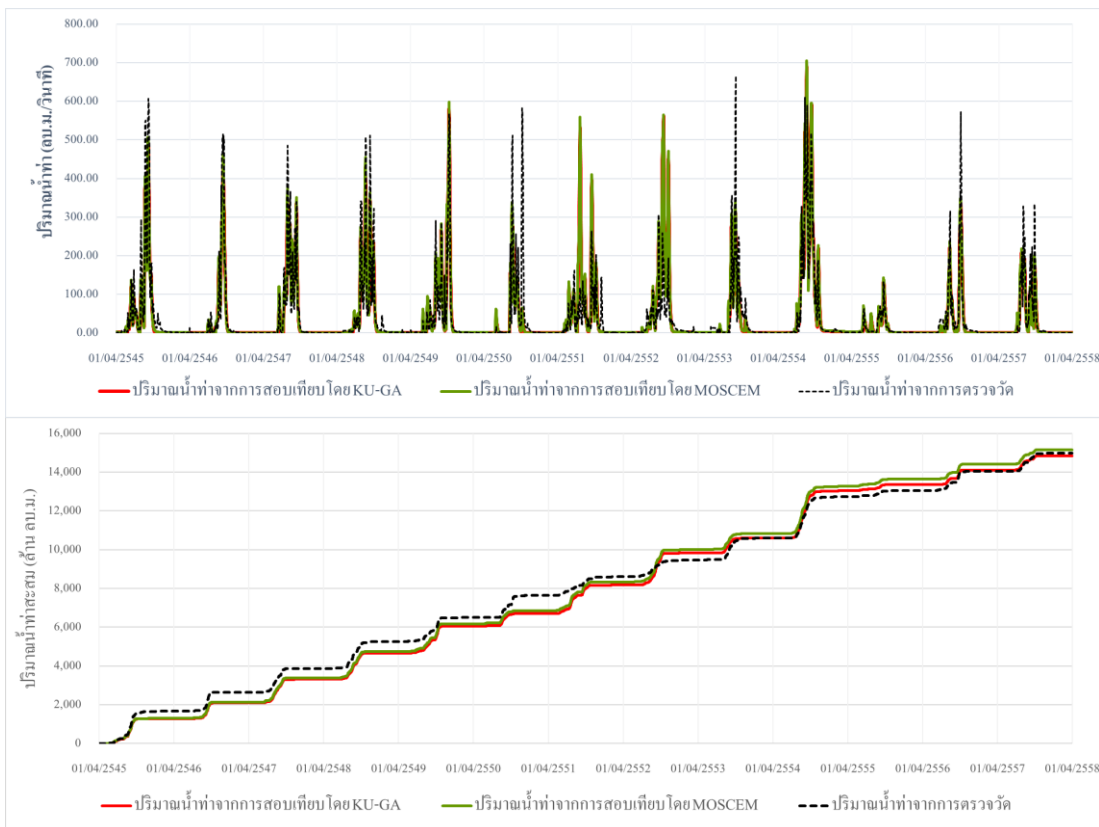
ภาพผนวกที่ ก15 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.66A



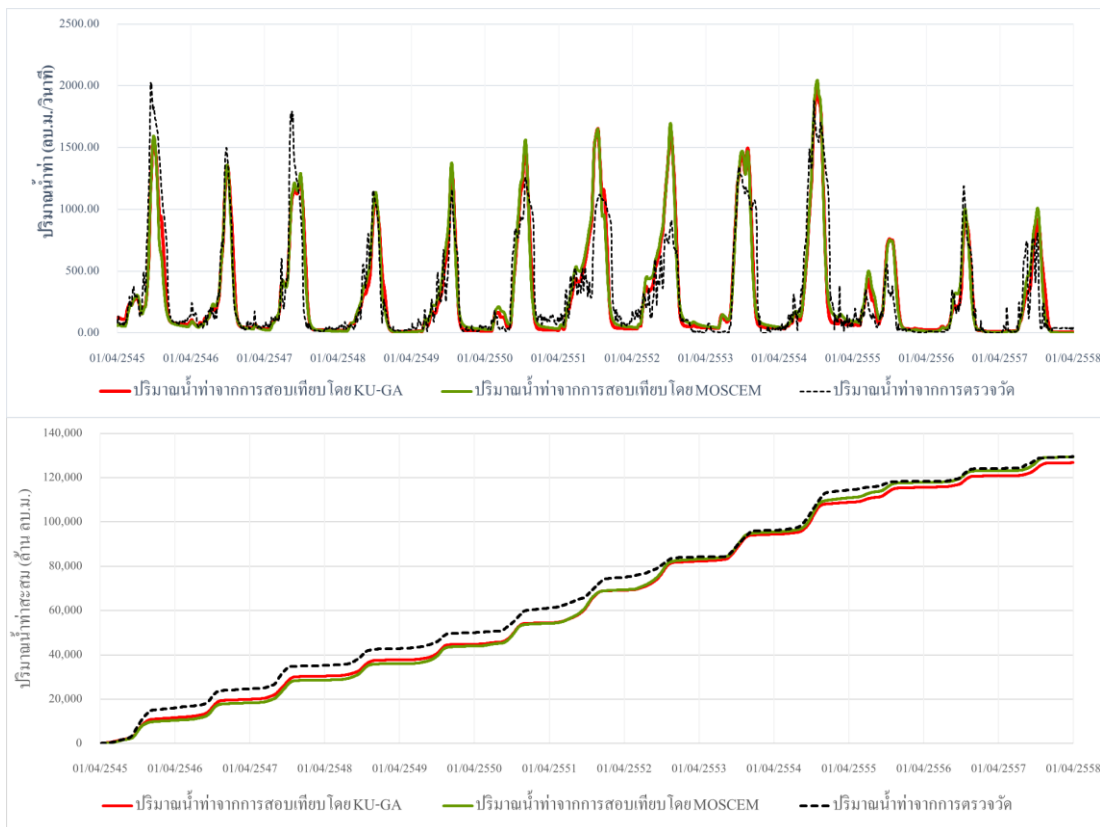
ภาพผนวกที่ ก16 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.18



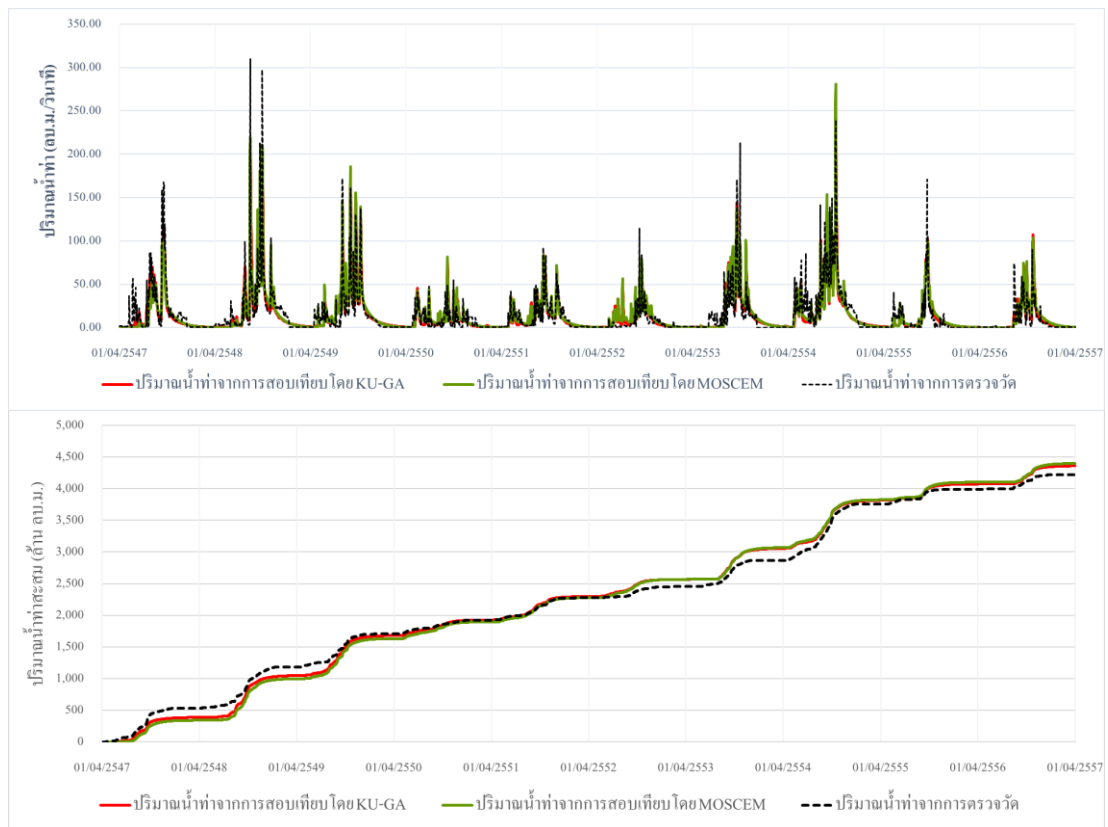
ภาพผนวกที่ ก17 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.54



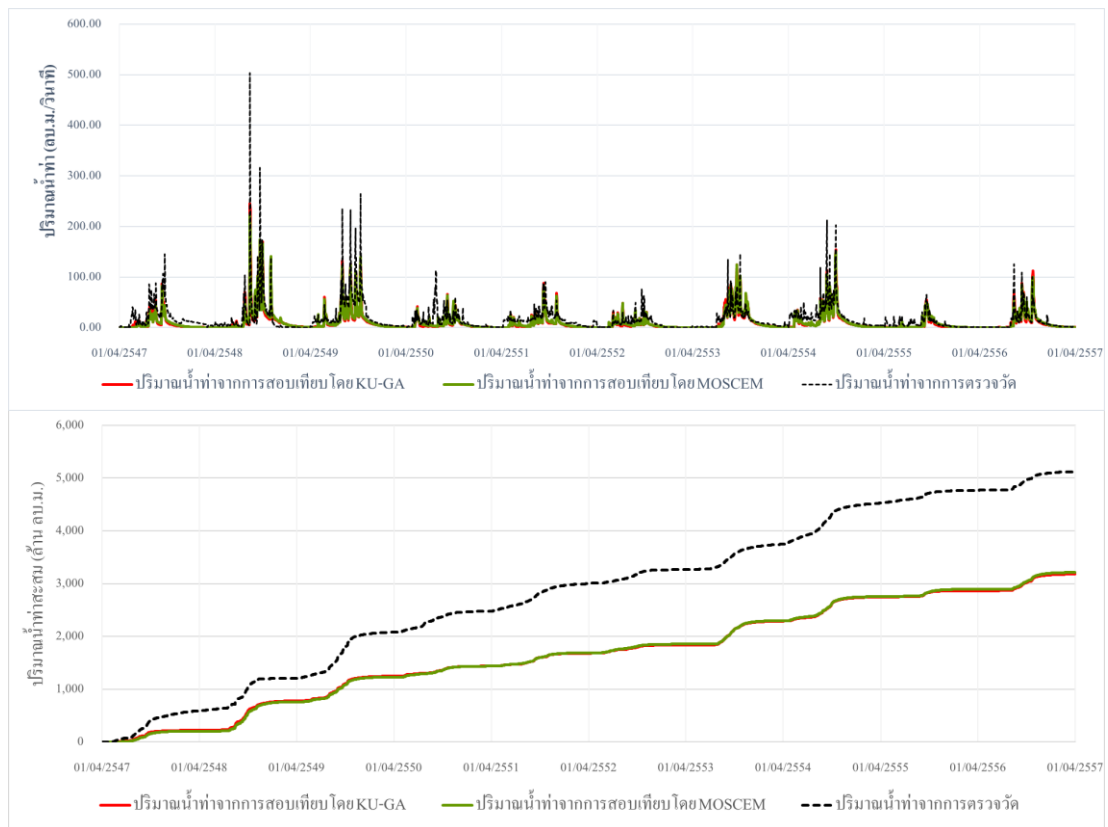
ภาพผนวกที่ ก18 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.70



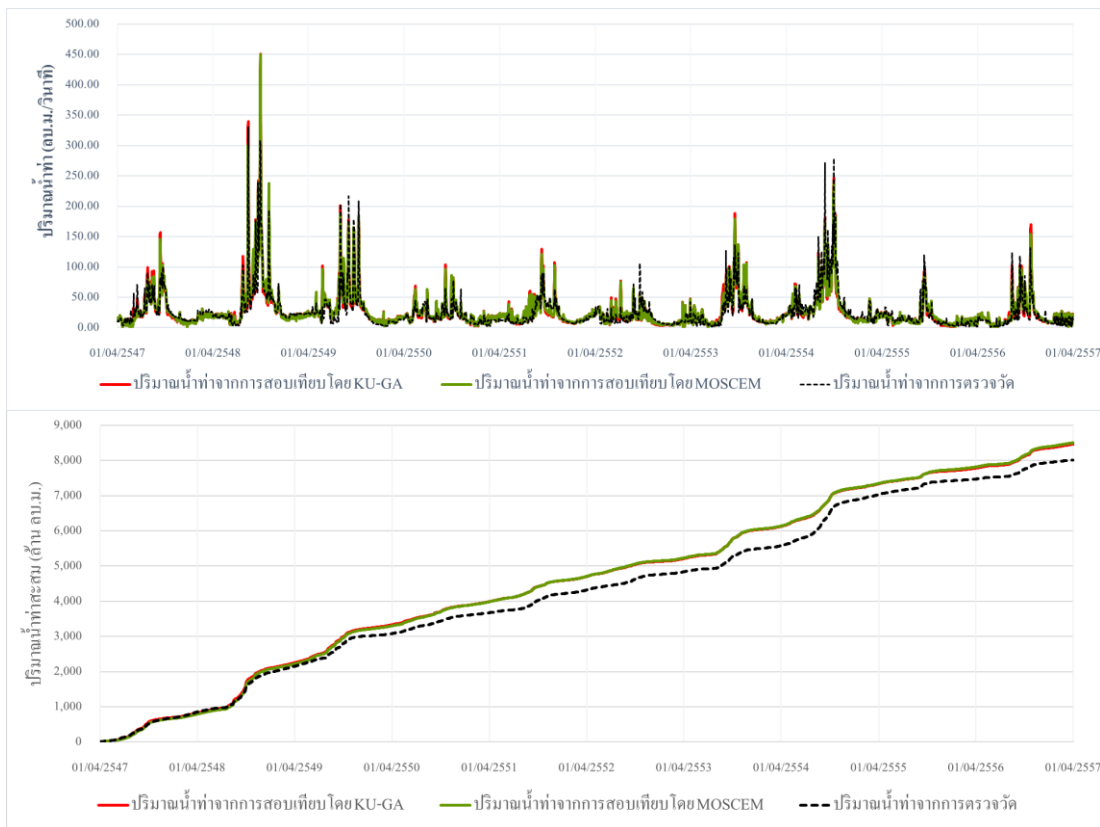
ภาพผนวกที่ ก19 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.20A



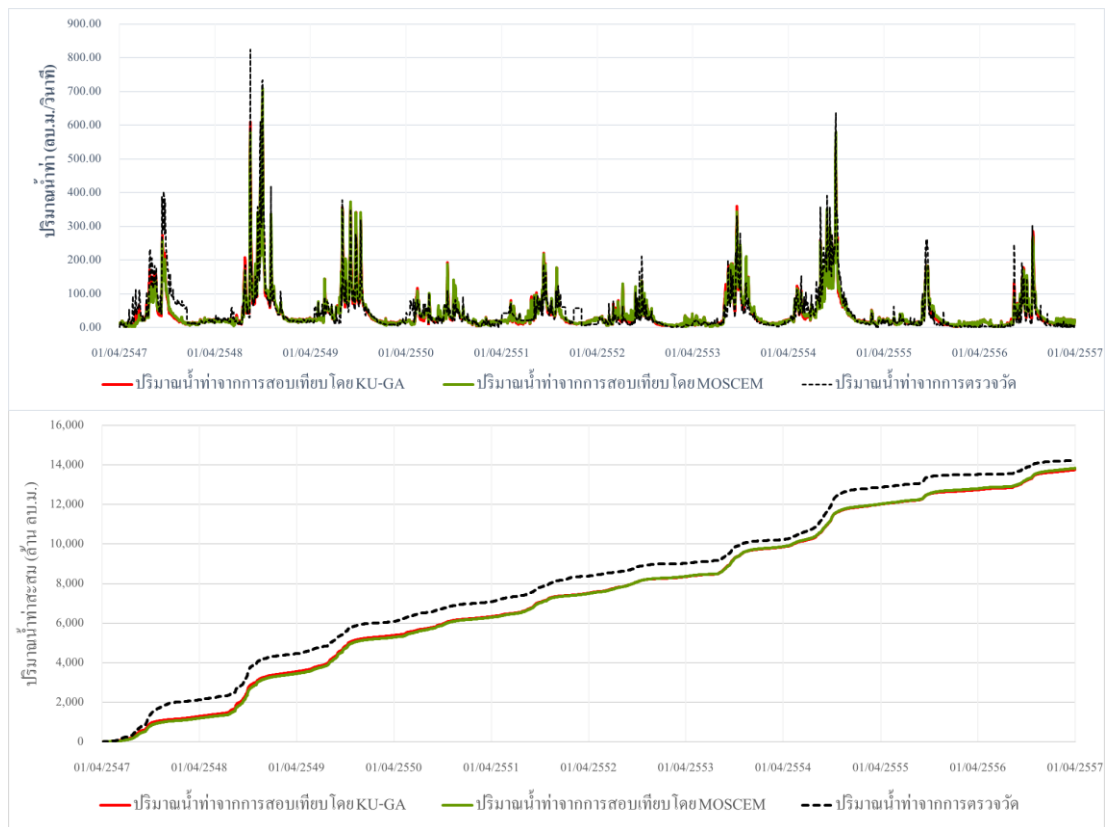
ภาพผนวกที่ ก20 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ P.4A



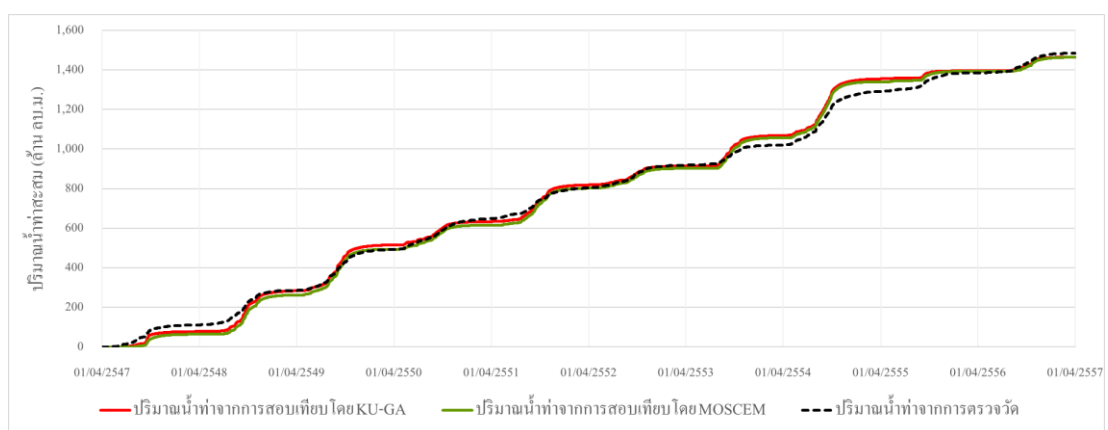
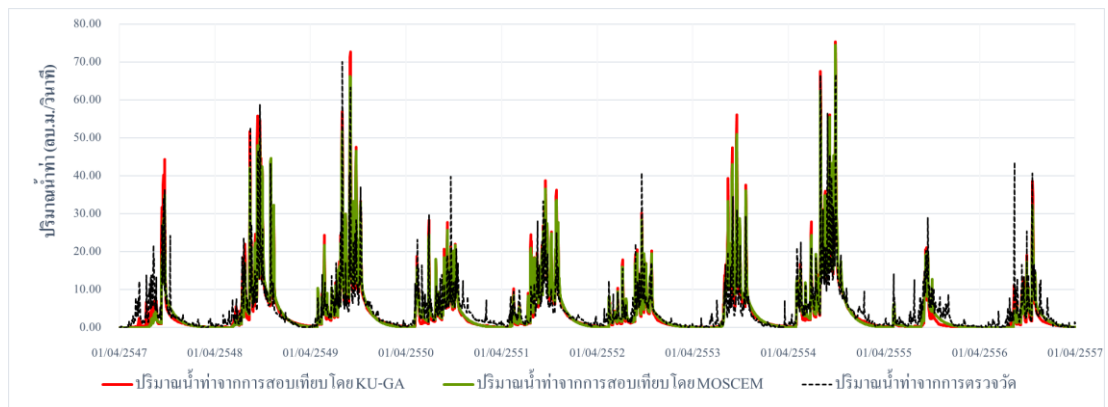
ภาพผนวกที่ ก21 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ P.20



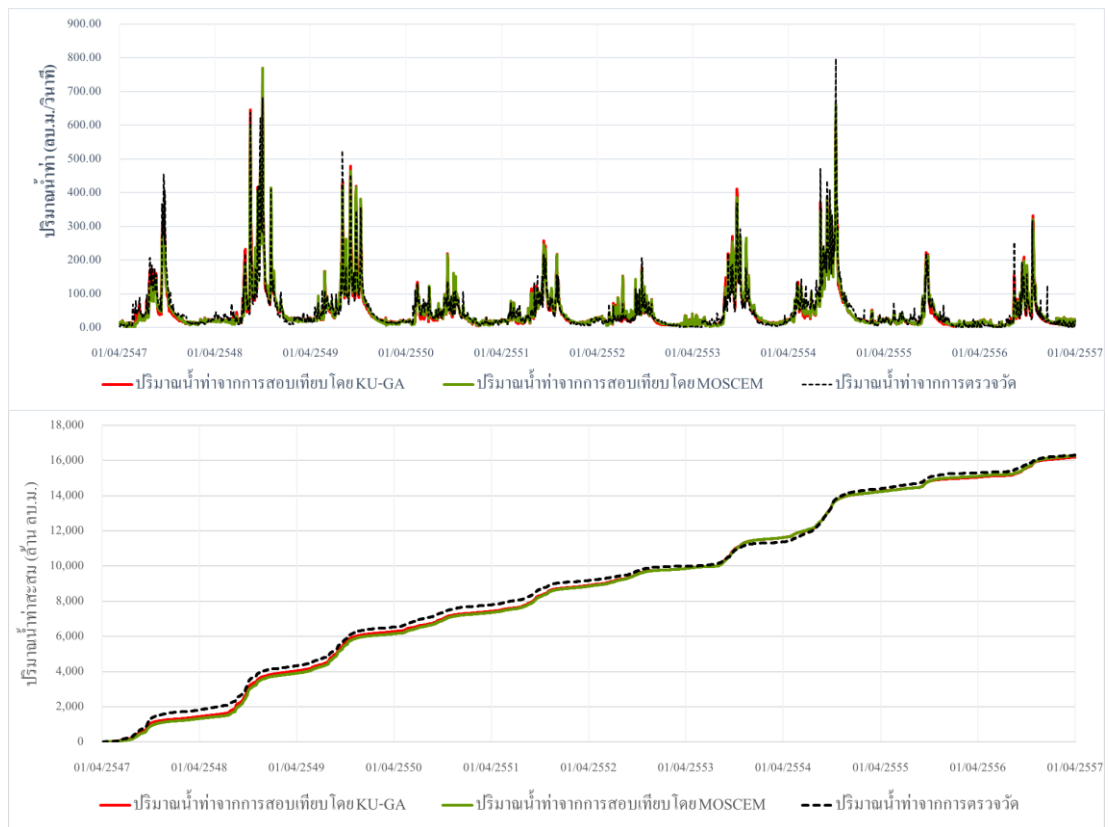
ภาพผนวกที่ ก22 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ P.75



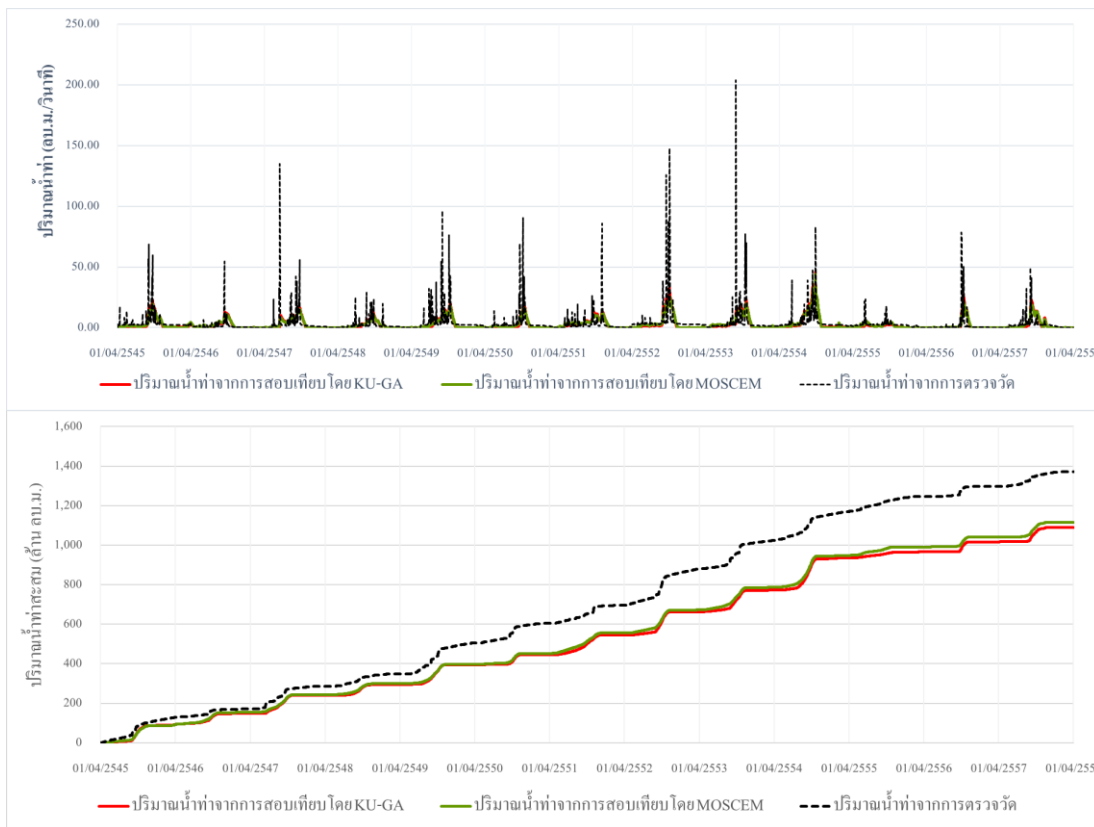
ภาพผนวกที่ ก23 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
 แบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
 ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ P.67



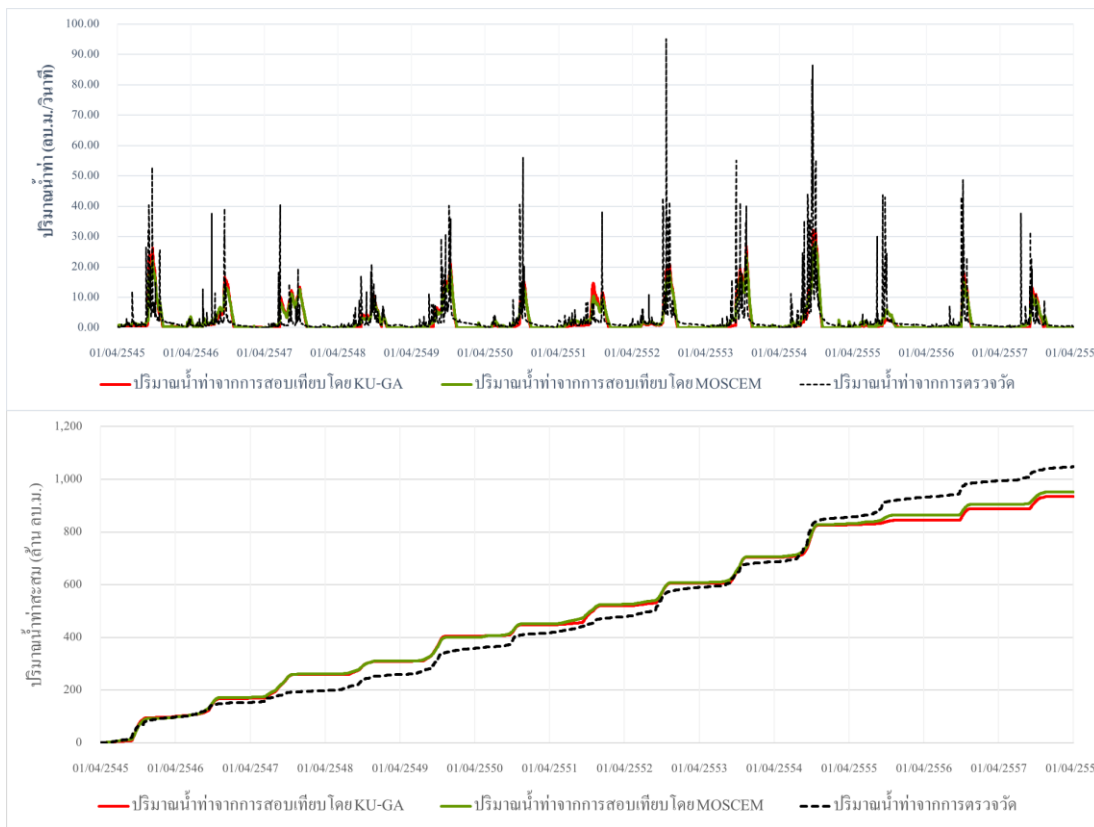
ภาพผนวกที่ ก24 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ P.21



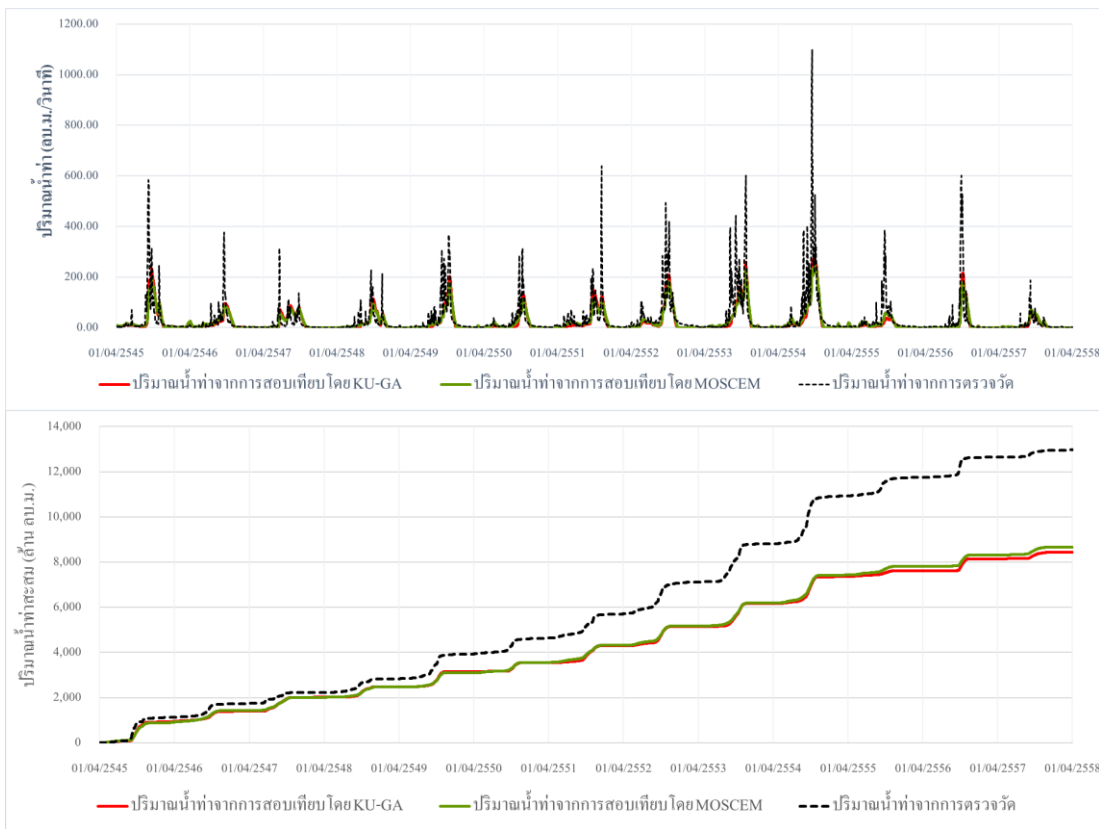
ภาพผนวกที่ ก25 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ P.1



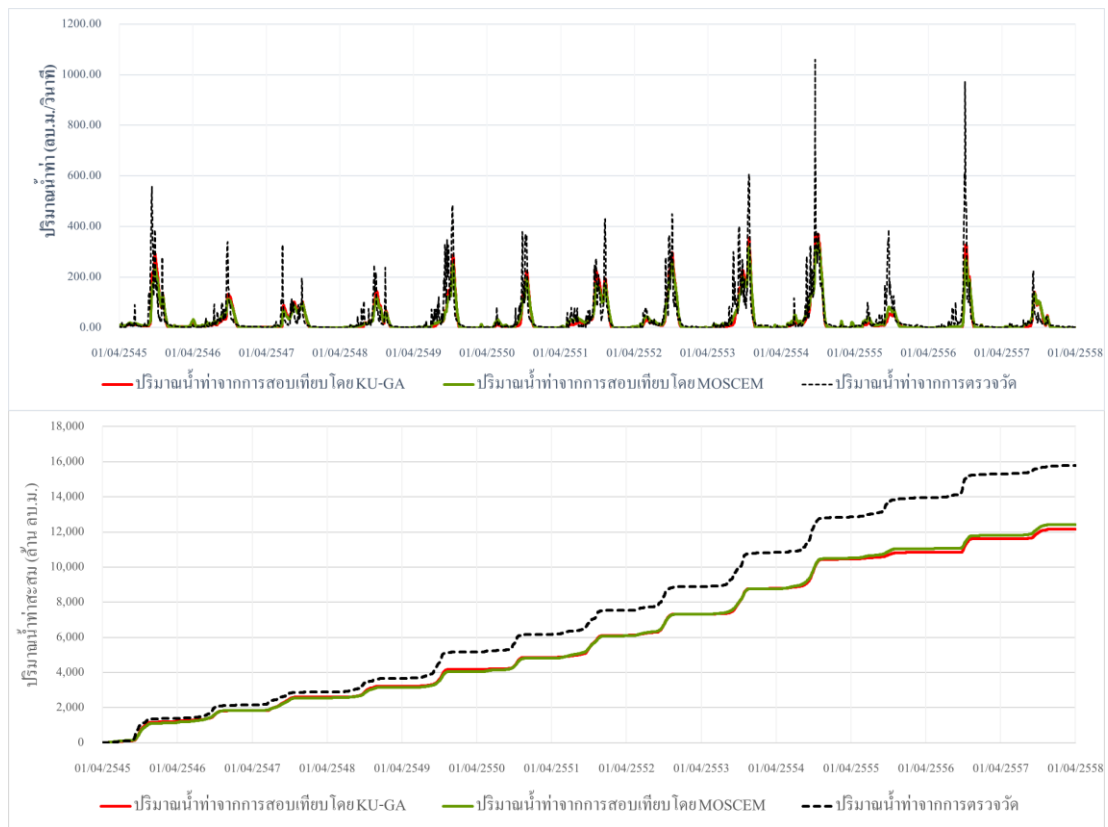
ภาพผนวกที่ ก26 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.73



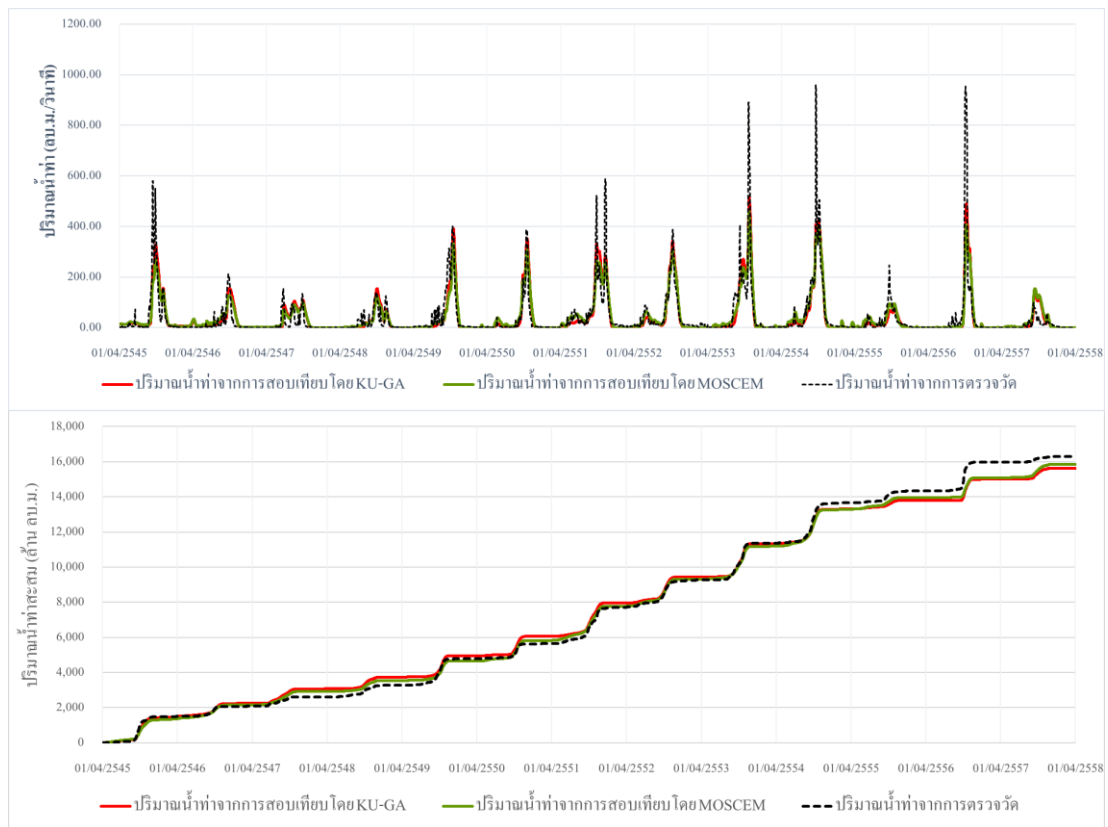
ภาพผนวกที่ ก27 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.72



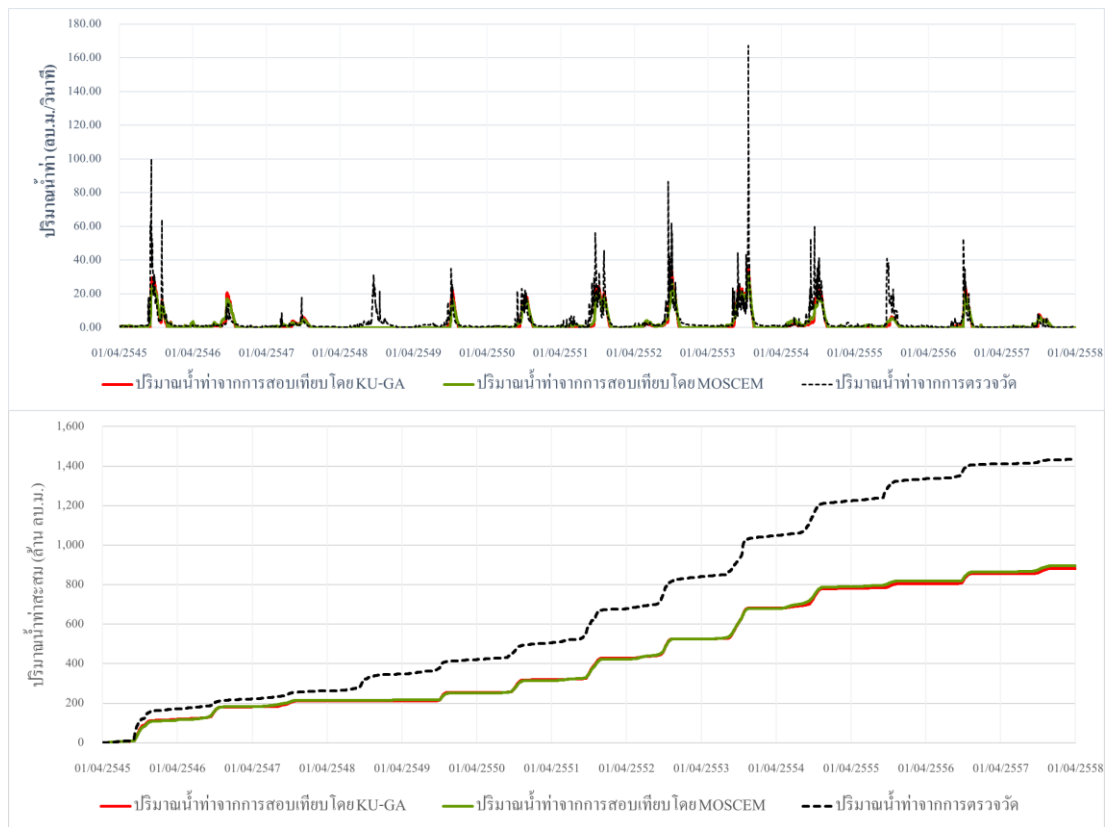
ภาพผนวกที่ ก28 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.32A



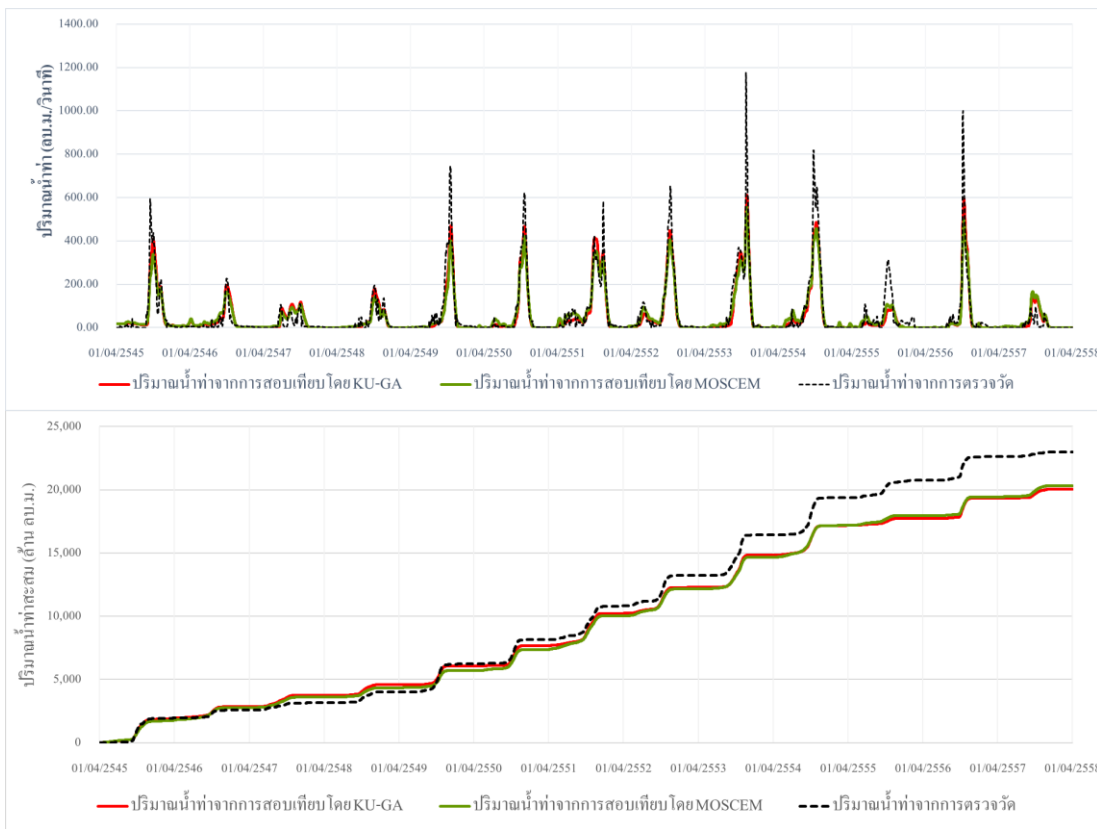
ภาพผนวกที่ ก29 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.5



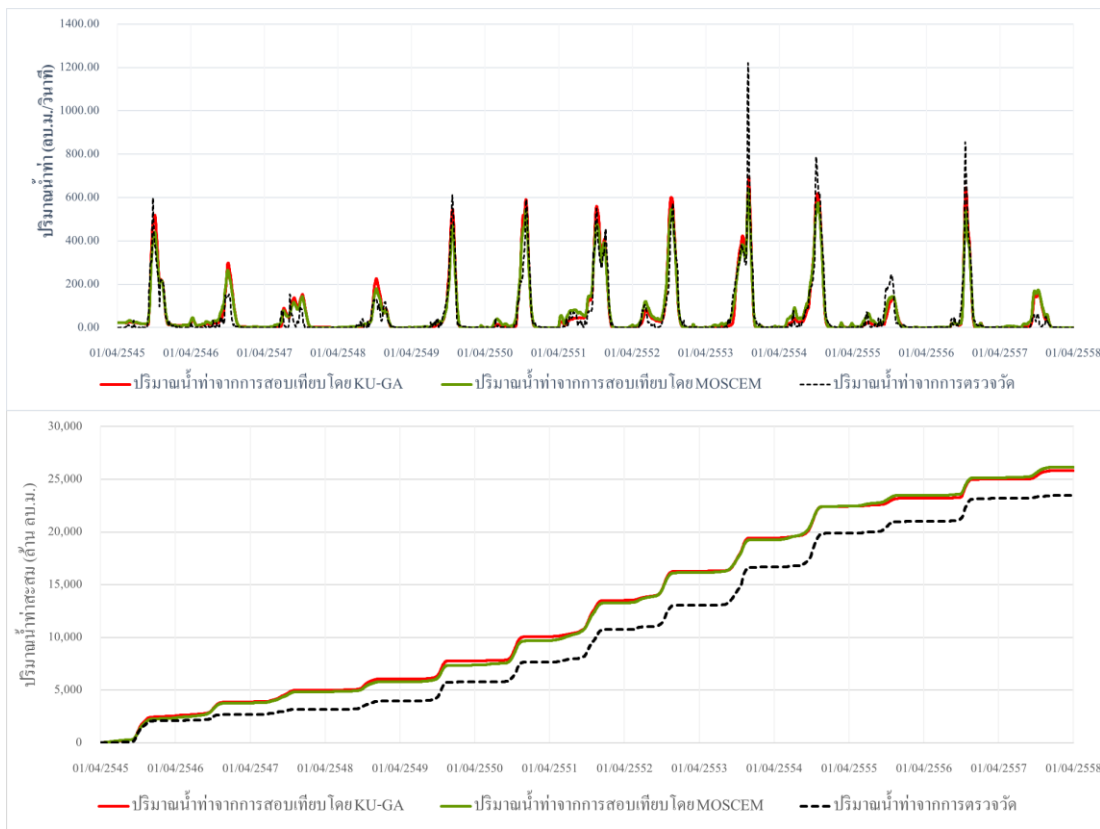
ภาพผนวกที่ ก30 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำทำ E.23



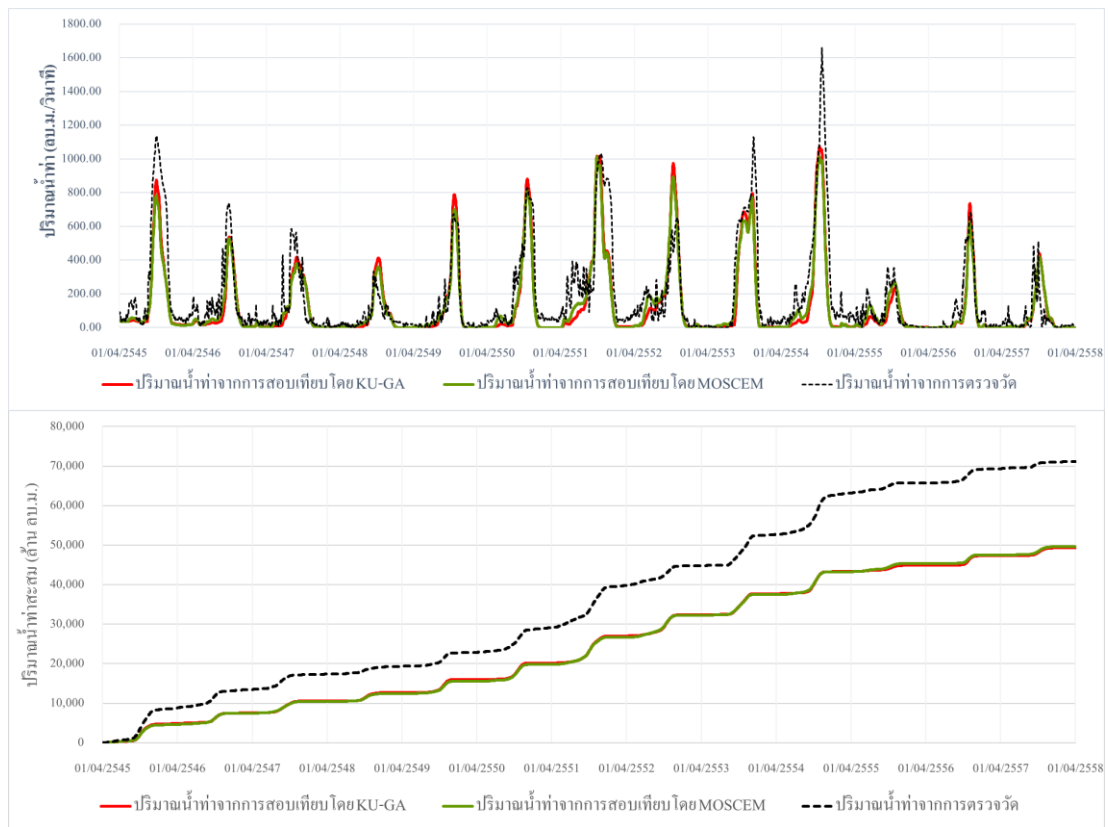
ภาพผนวกที่ ก31 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.6C



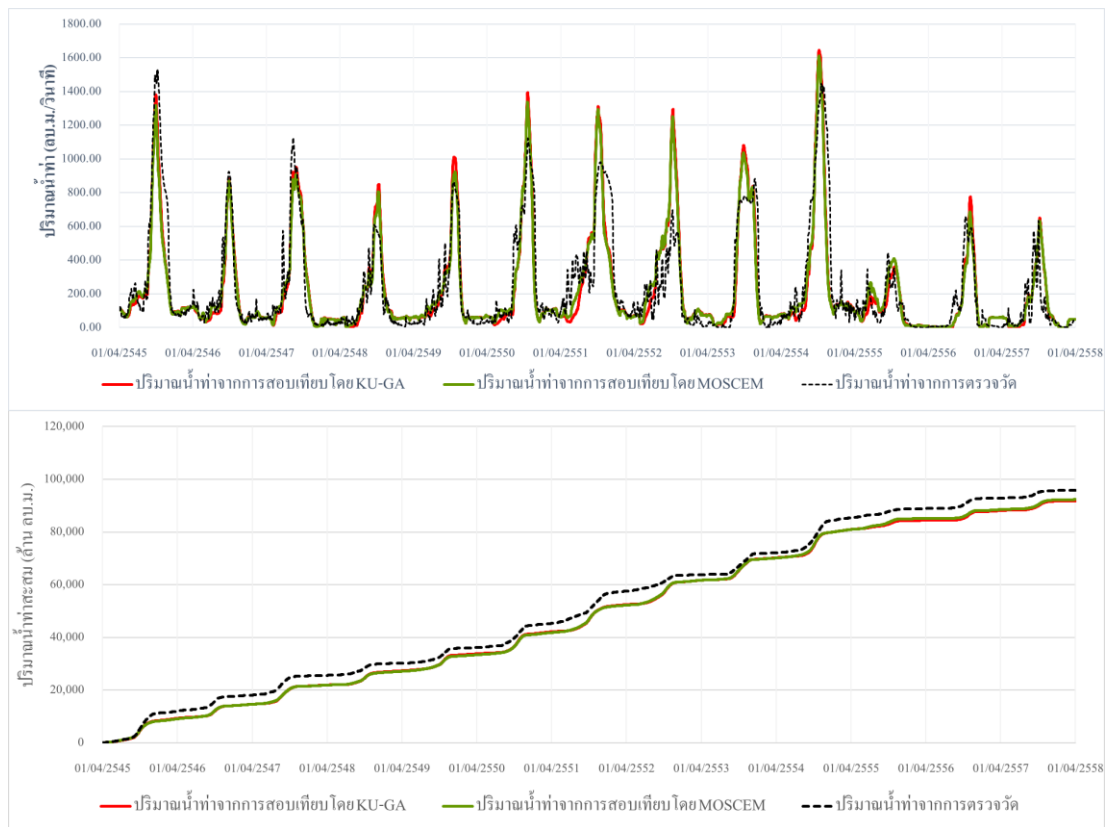
ภาพผนวกที่ ก32 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.21



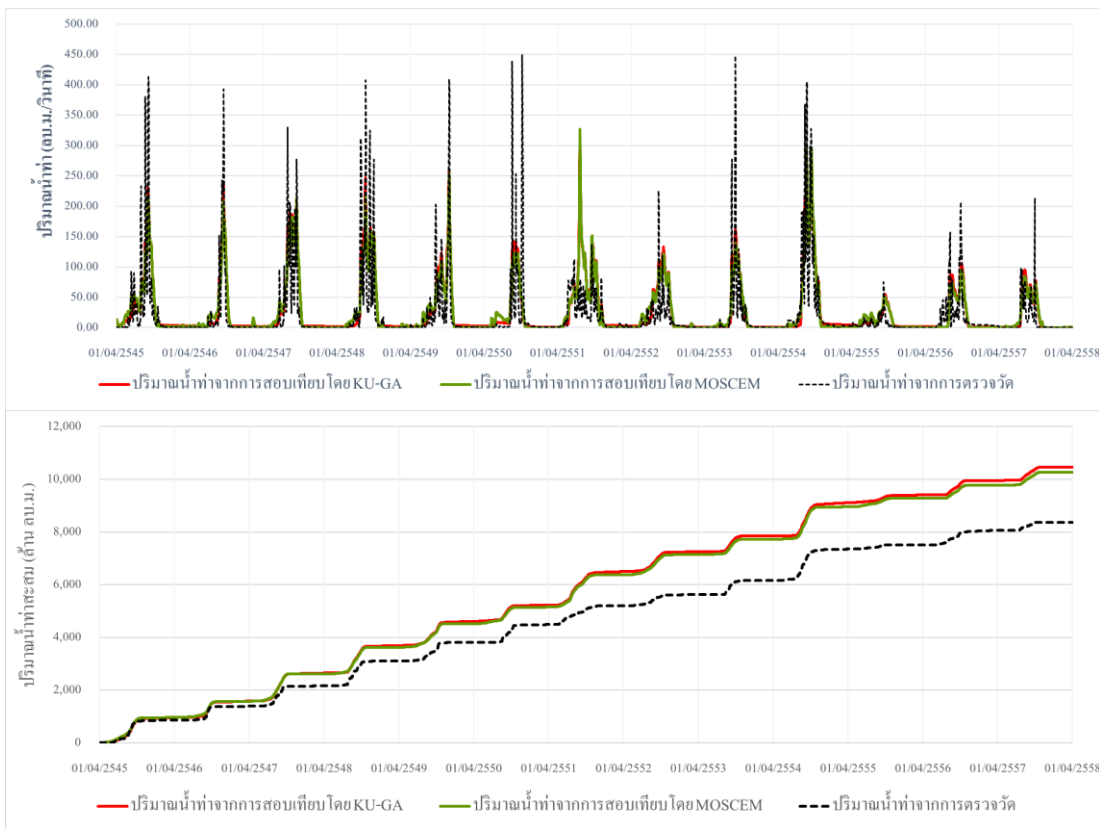
ภาพผนวกที่ ก33 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีวัดน้ำทำ E.9



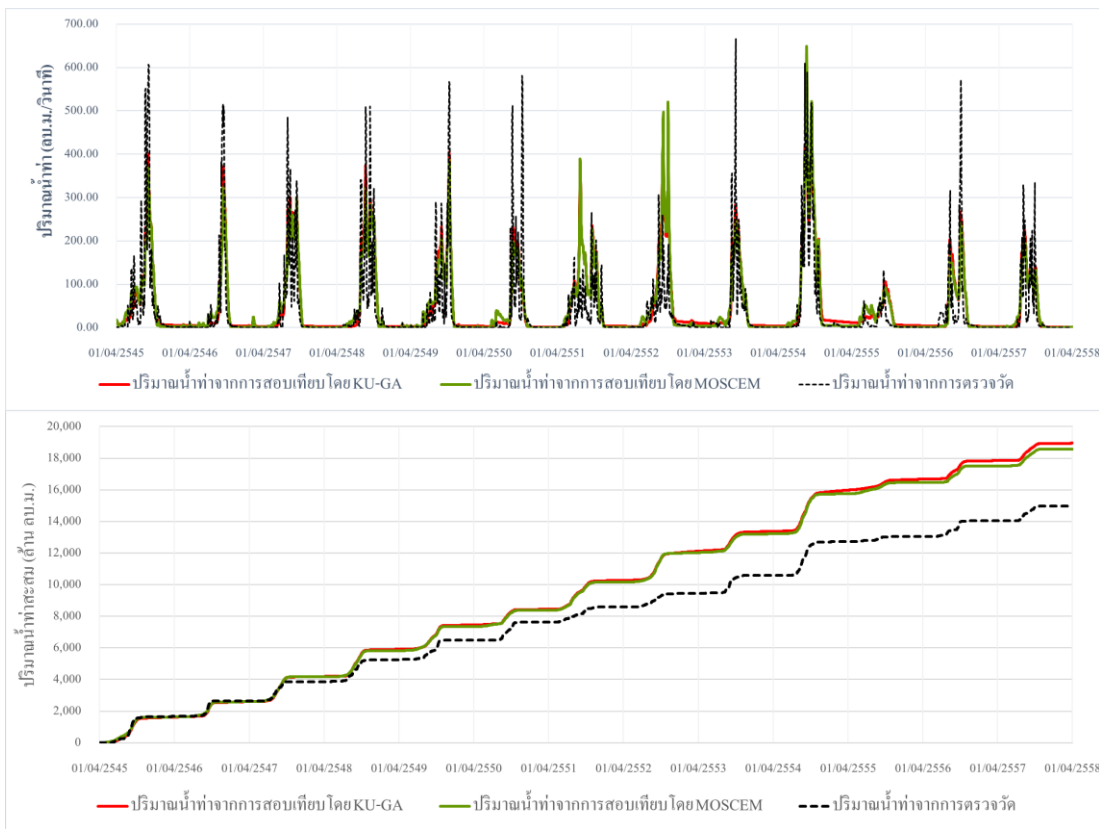
ภาพผนวกที่ ก34 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
 แบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
 ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.66A



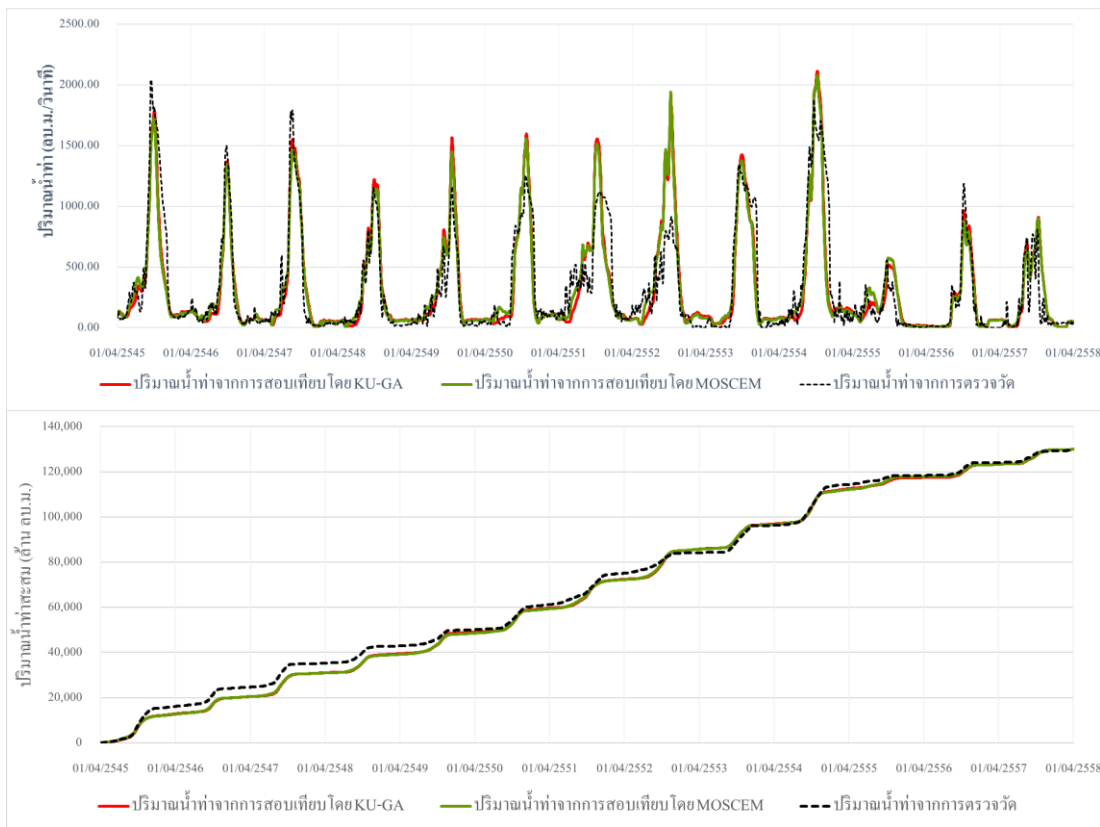
ภาพผนวกที่ ก35 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
 แบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
 ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.18



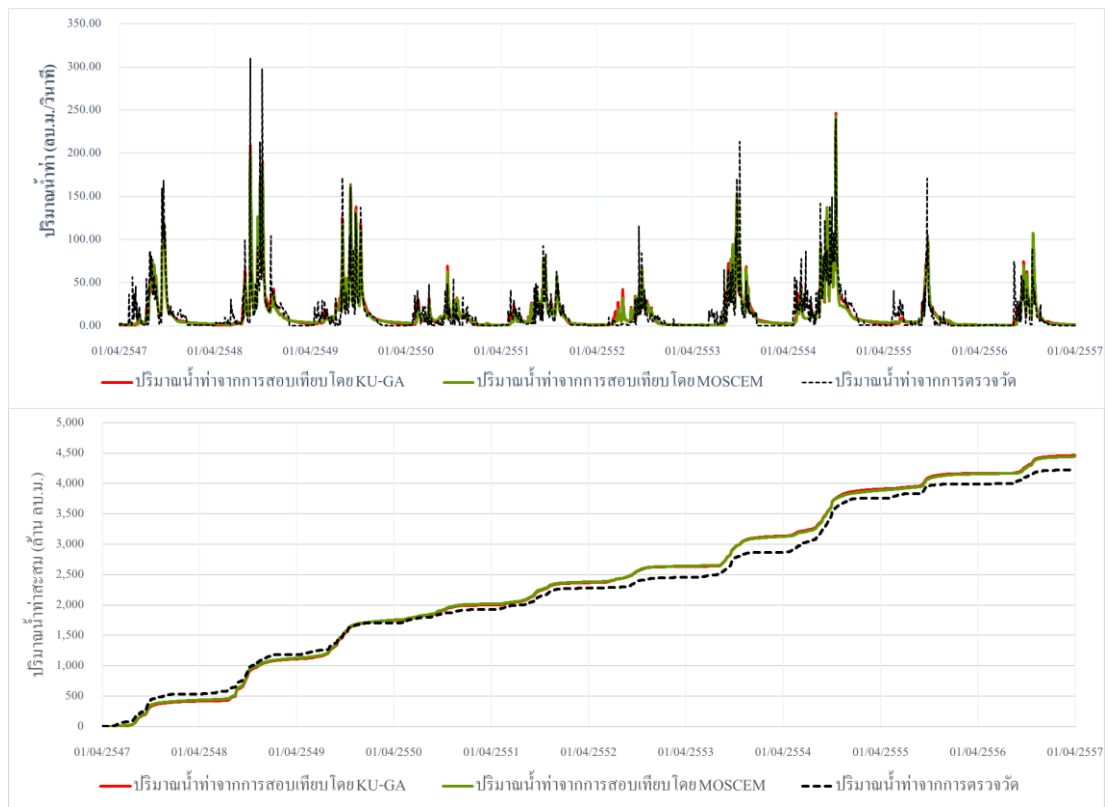
ภาพผนวกที่ ก36 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.54



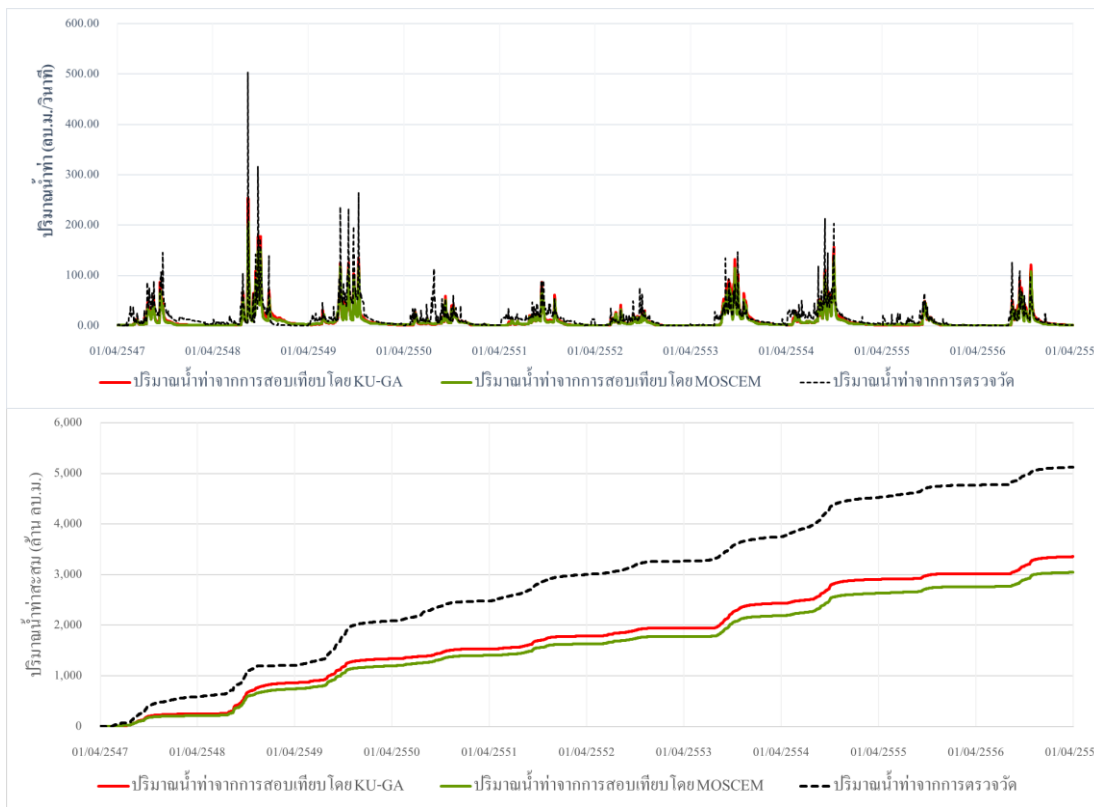
ภาพผนวกที่ ก37 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.70



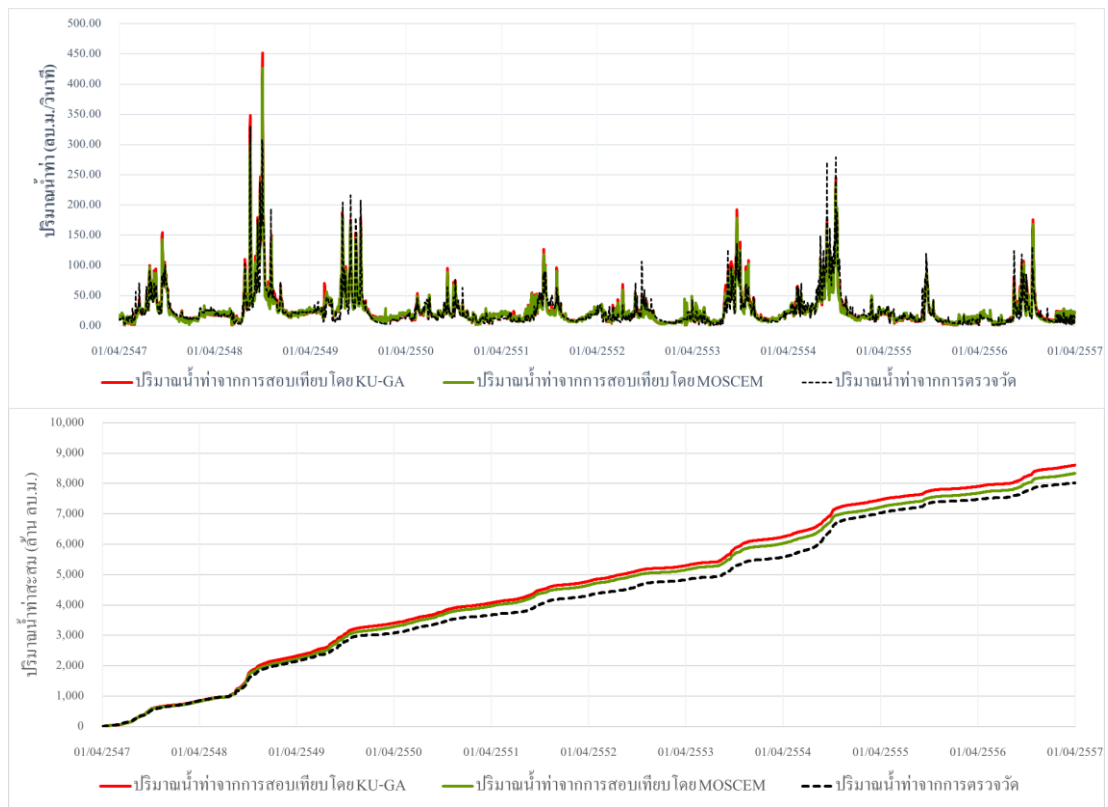
ภาพผนวกที่ ก38 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.20A



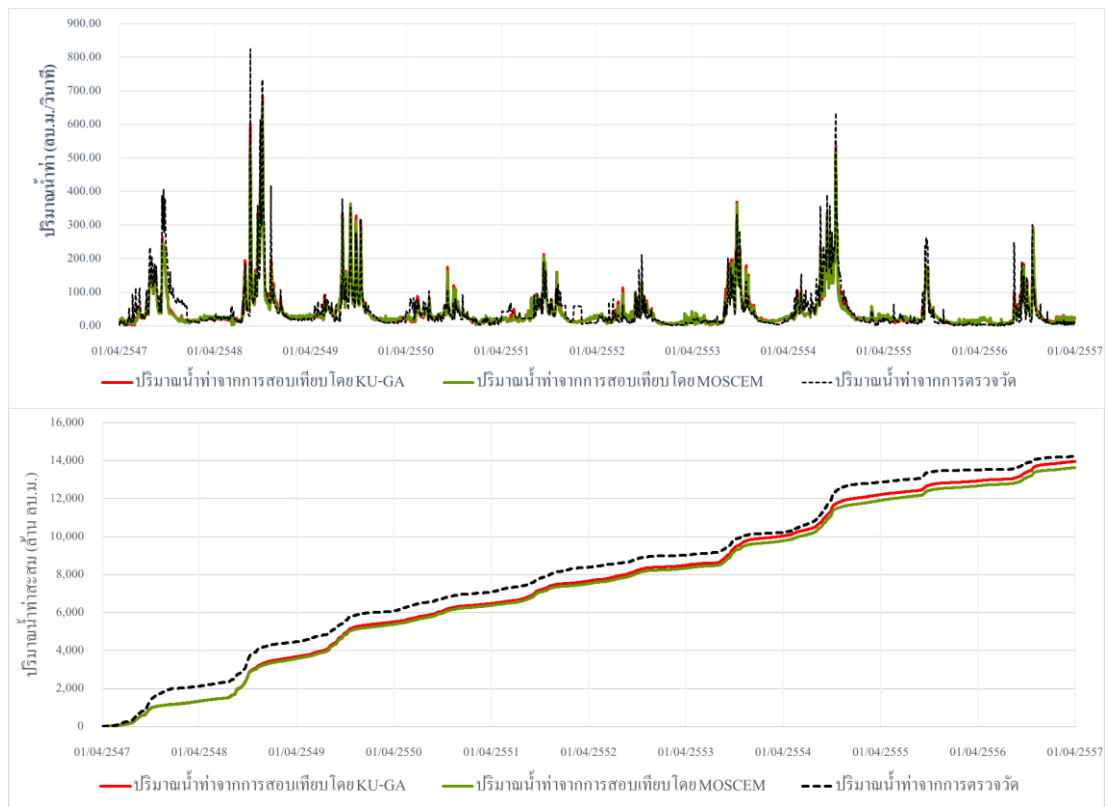
ภาพผนวกที่ ก39 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ P.4A



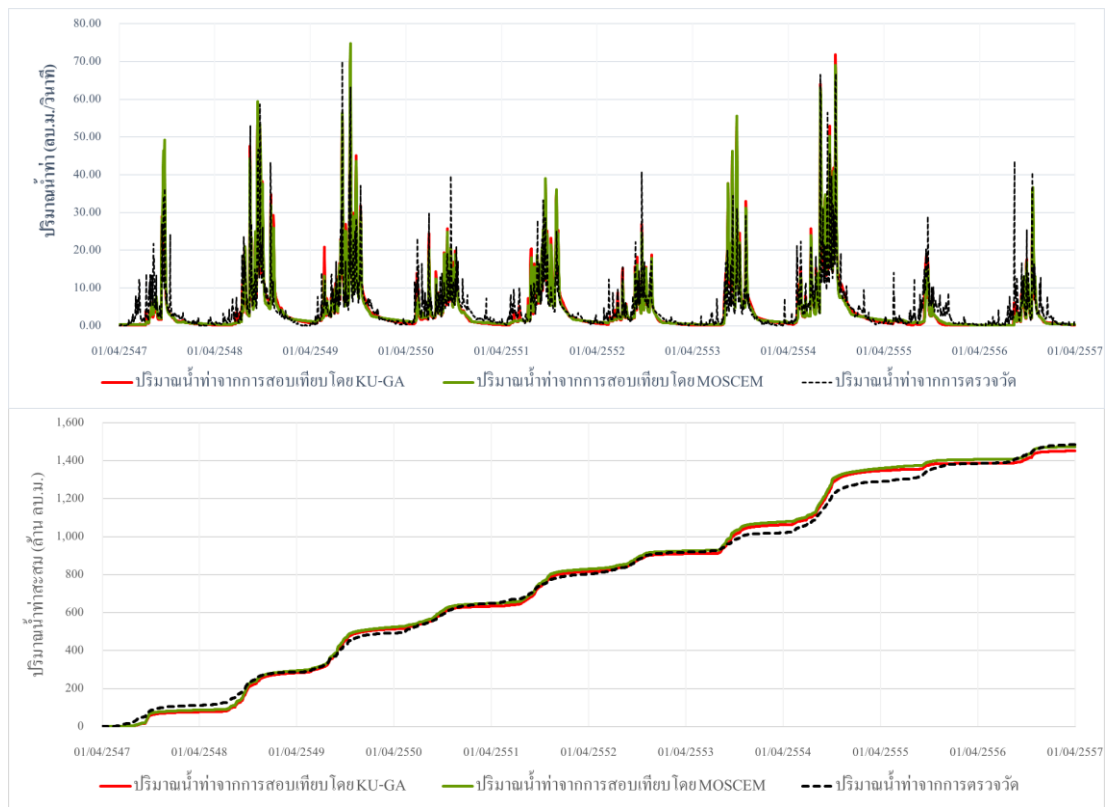
ภาพผนวกที่ ก40 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ P.20



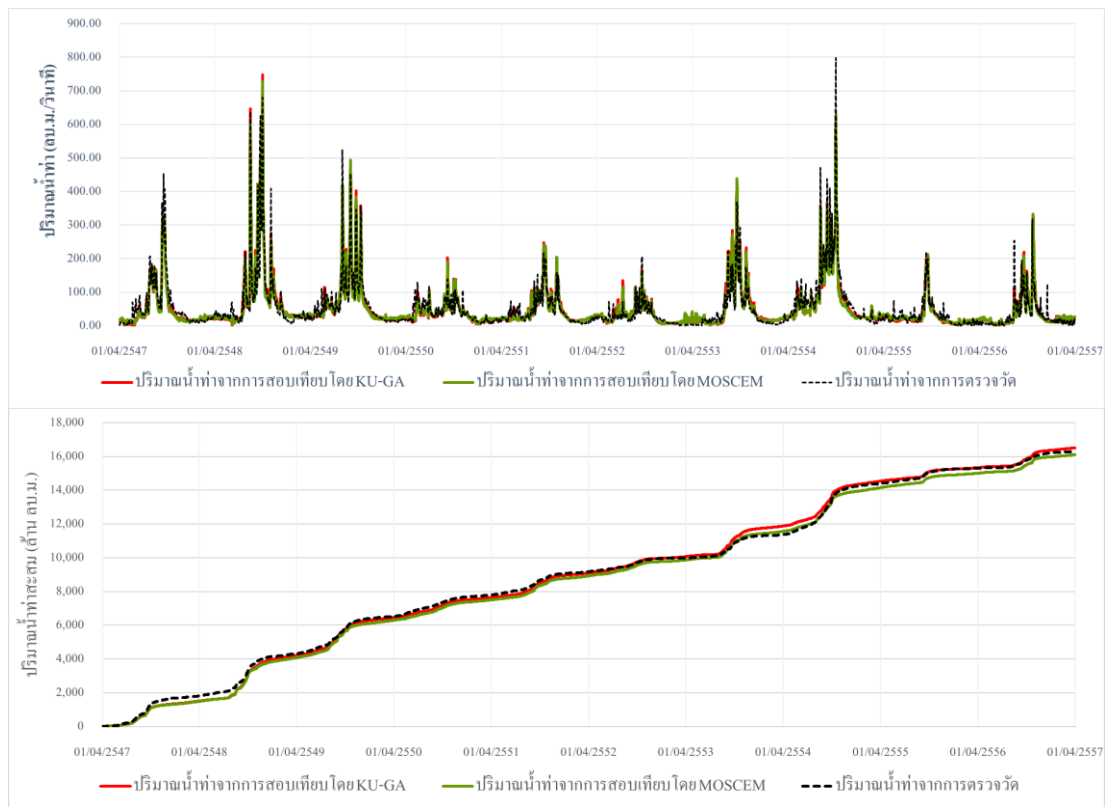
ภาพผนวกที่ ก41 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ P.75



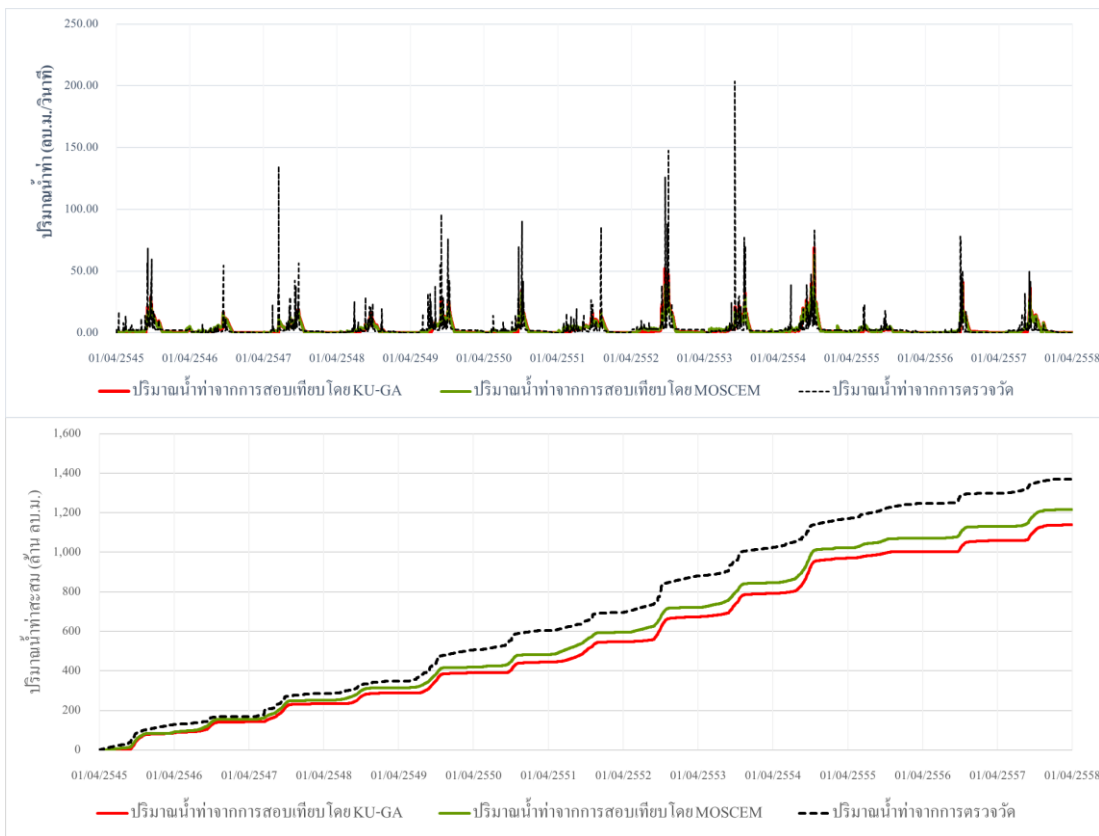
ภาพผนวกที่ ก42 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ P.67



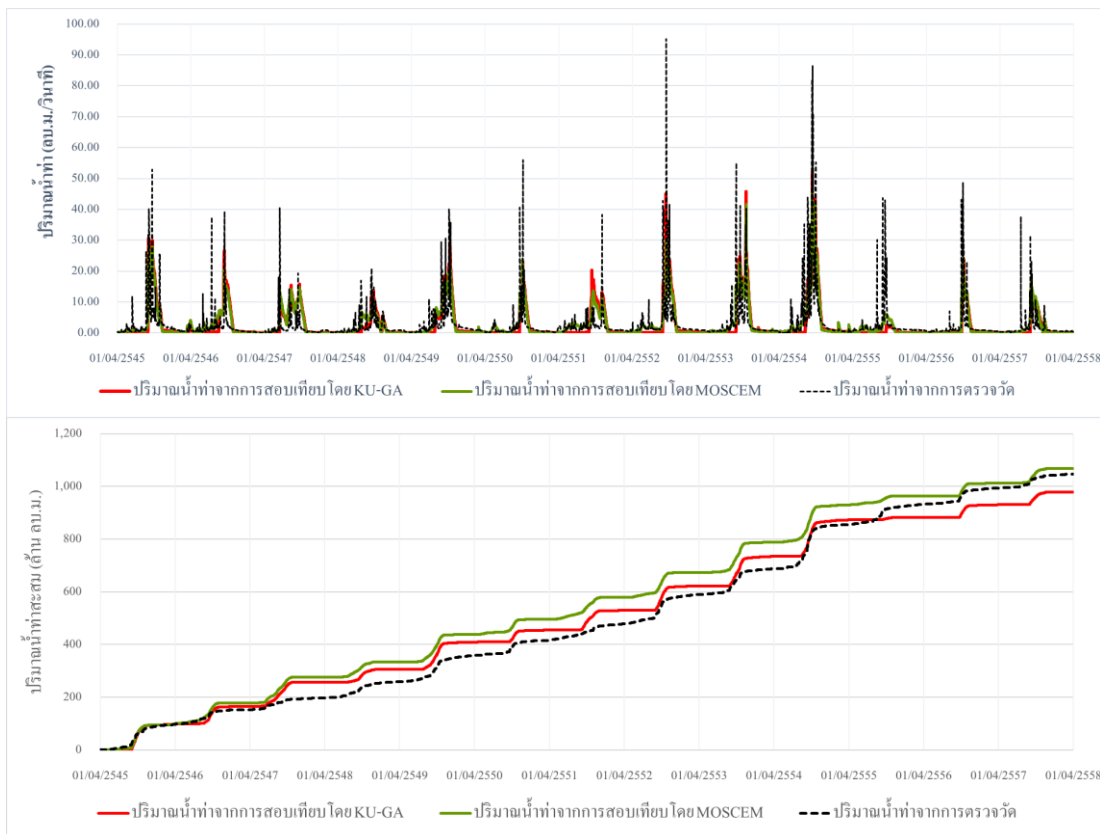
ภาพผนวกที่ ก43 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
 แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
 ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ P.21



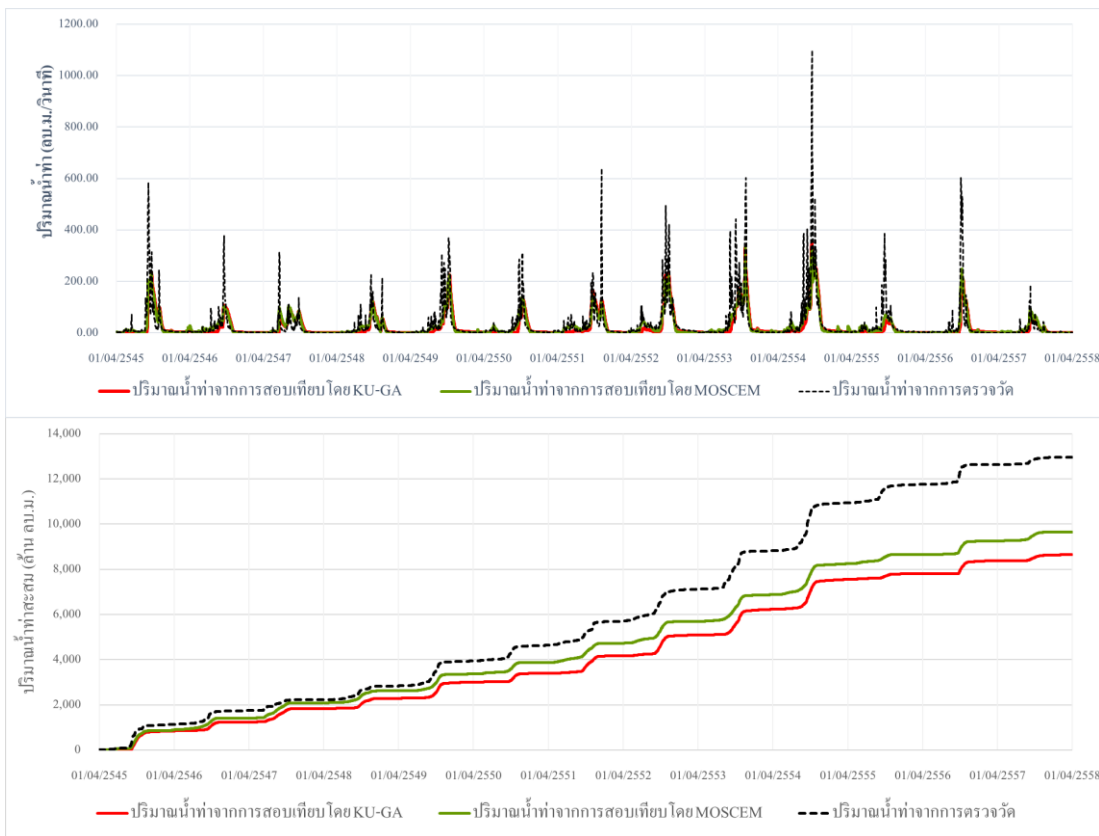
ภาพผนวกที่ ก44 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า P.1



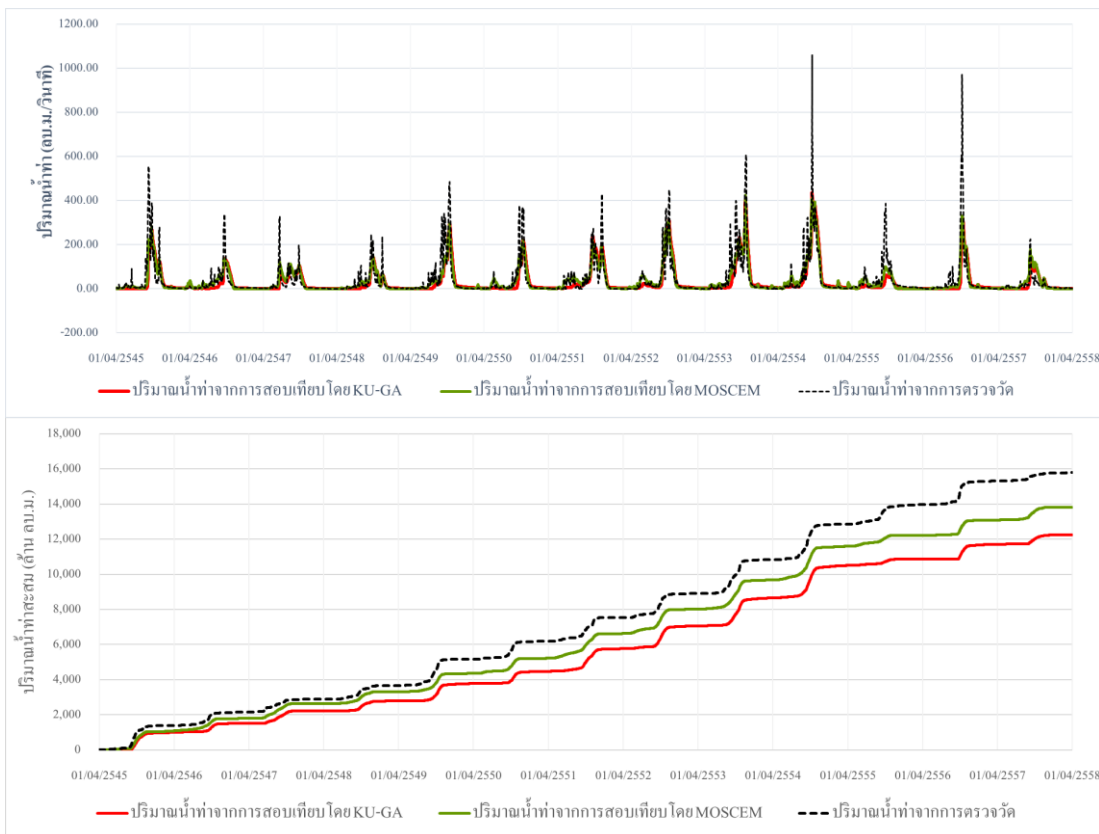
ภาพผนวกที่ ก45 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.73



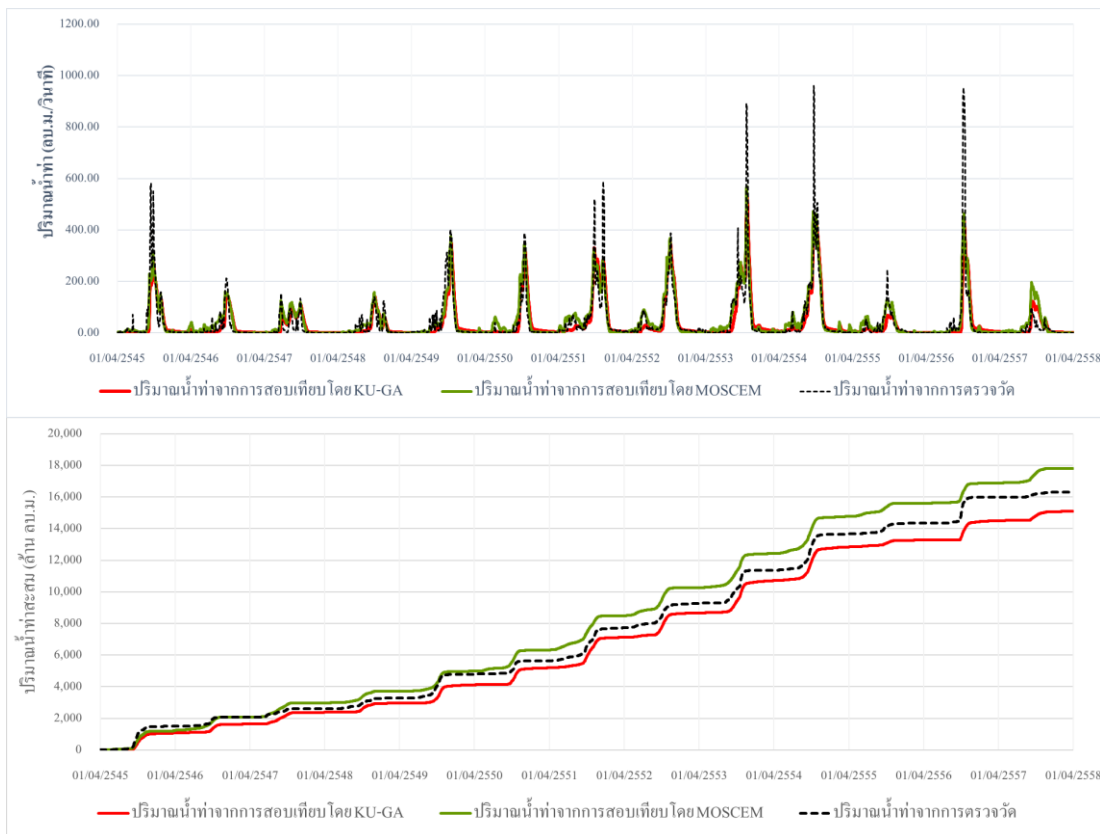
ภาพผนวกที่ ก46 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.72



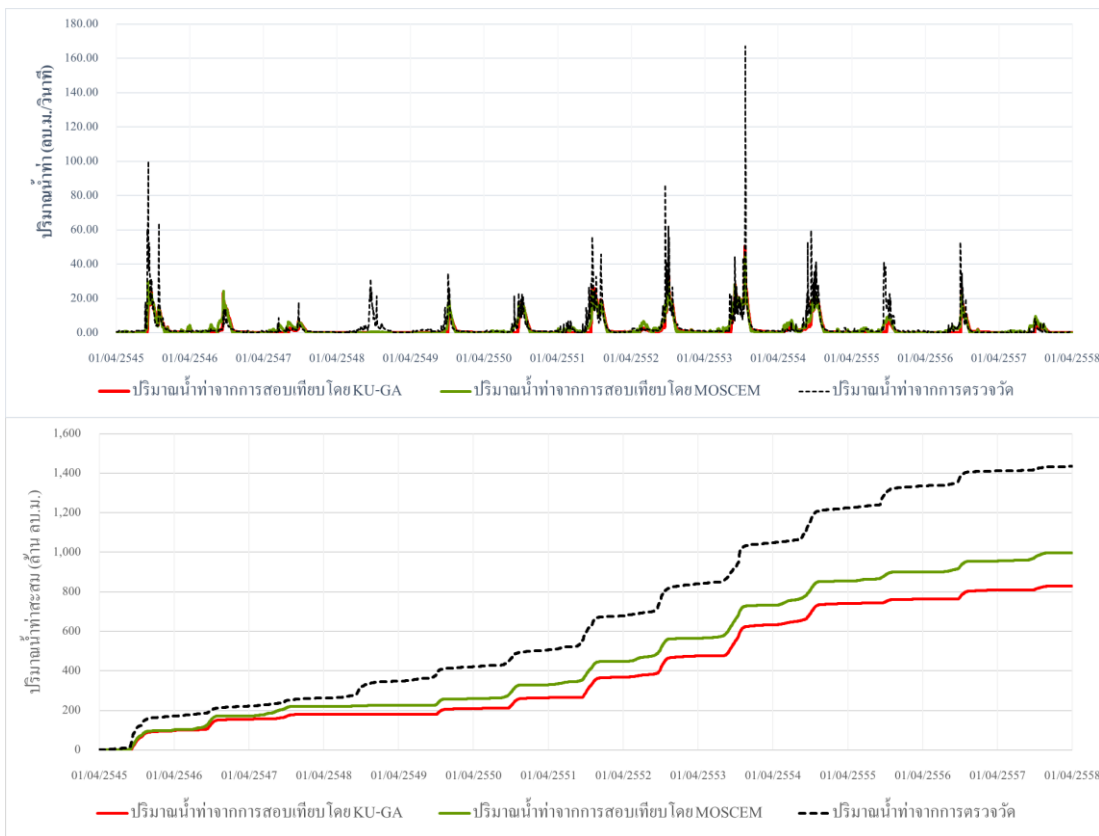
ภาพผนวกที่ ก47 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.32A



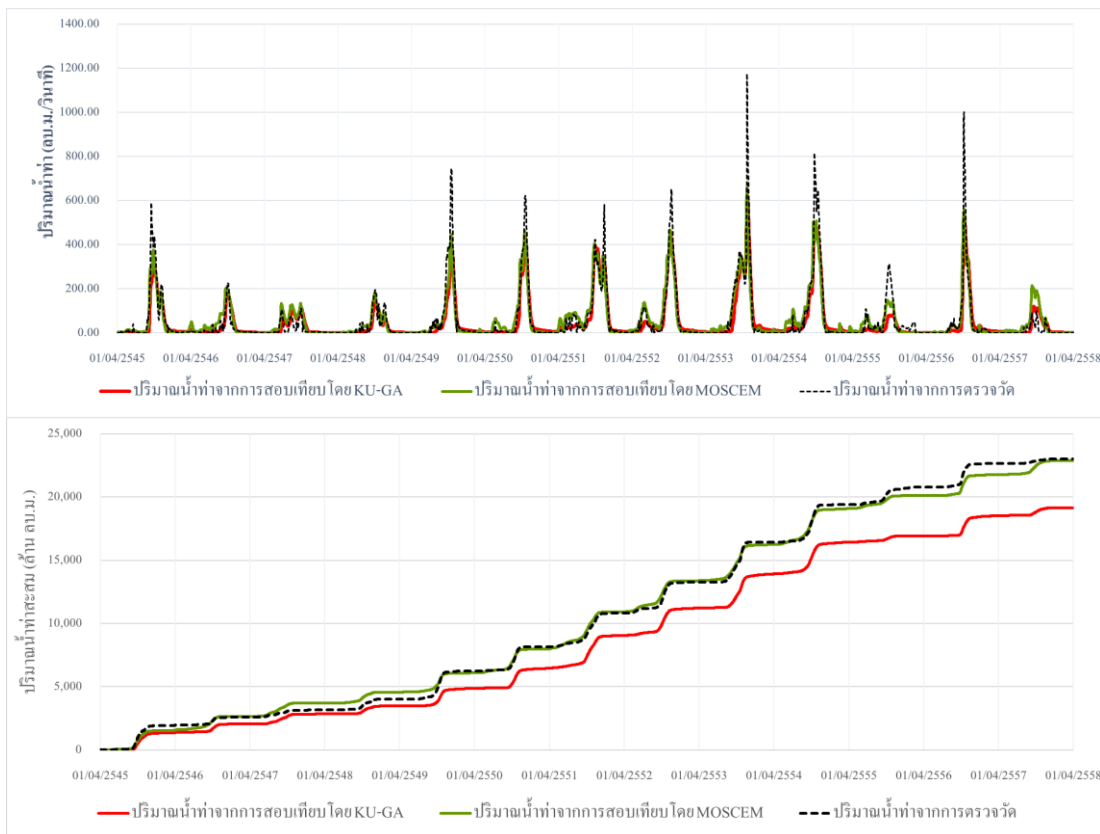
ภาพผนวกที่ ก48 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.5



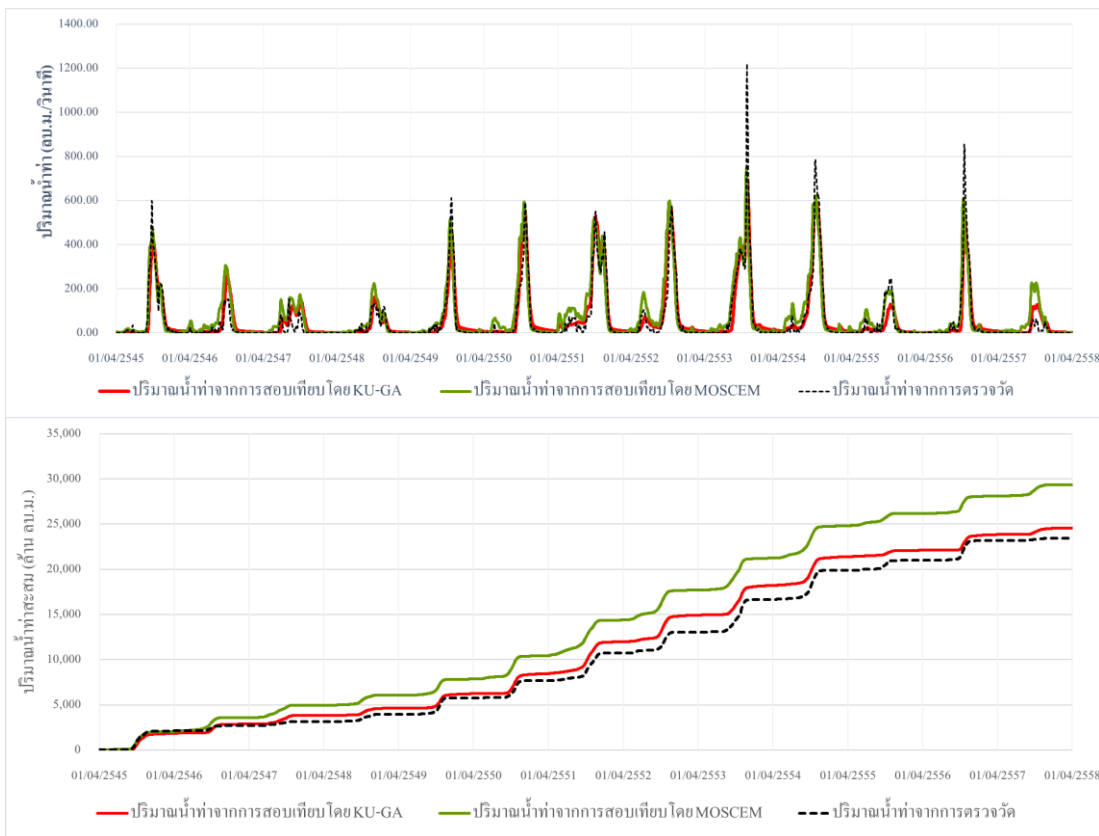
ภาพผนวกที่ ก49 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.23



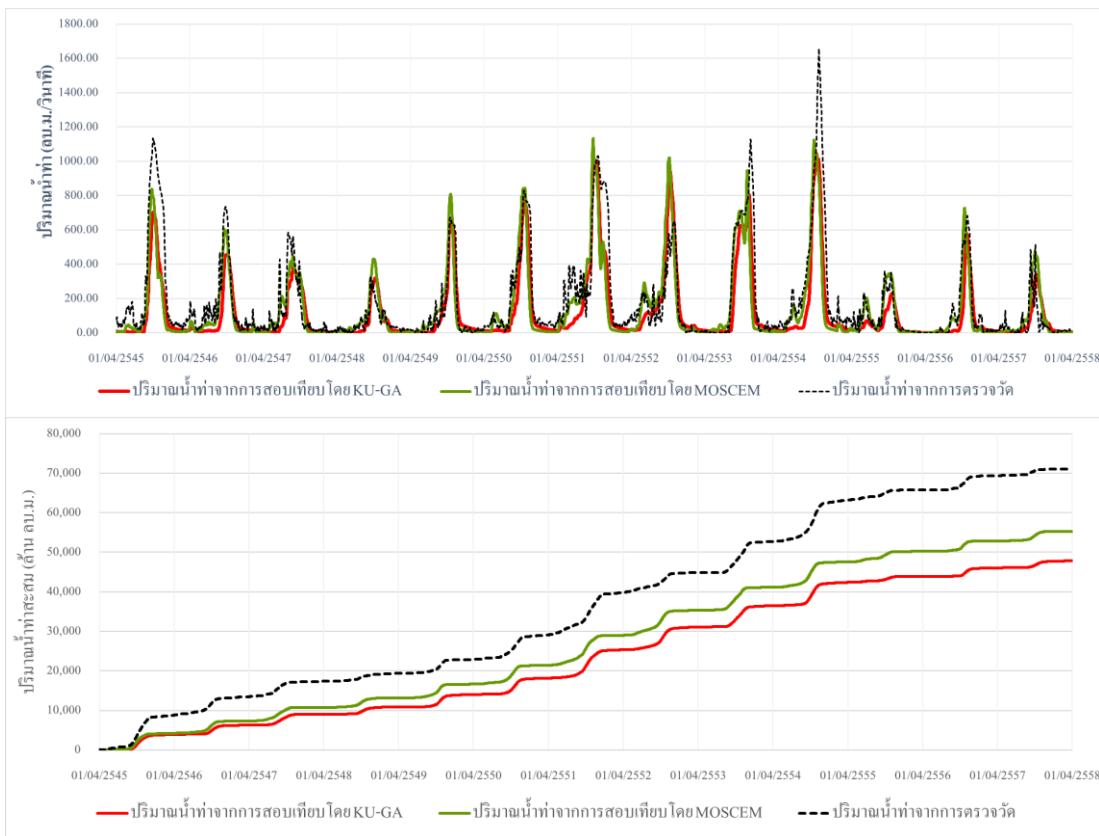
ภาพผนวกที่ ก50 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.6C



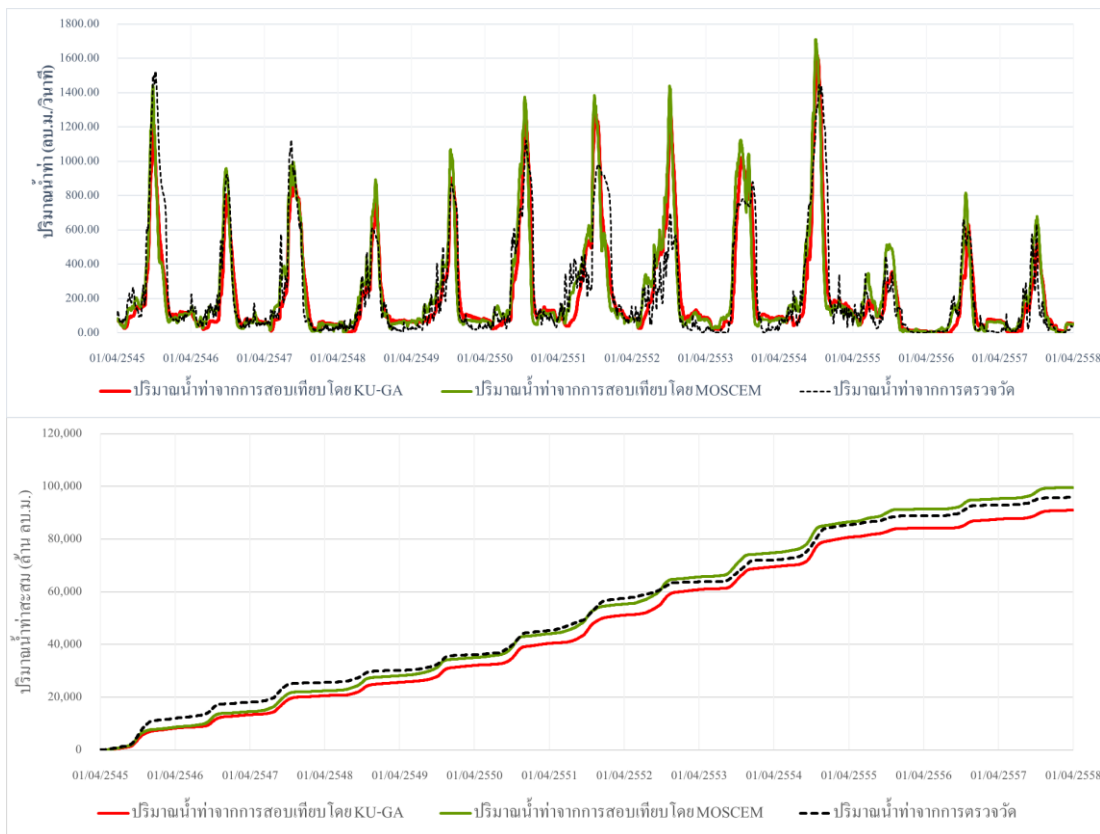
ภาพผนวกที่ ก51 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.21



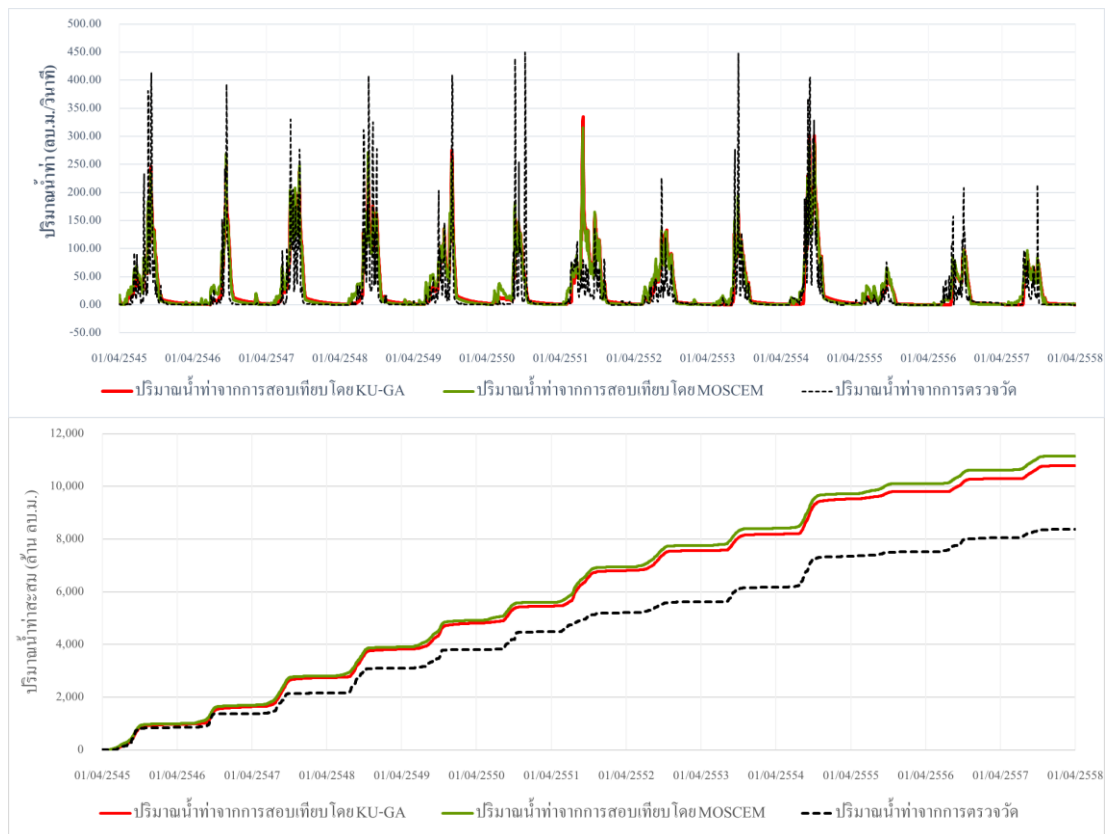
ภาพผนวกที่ ก52 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.9



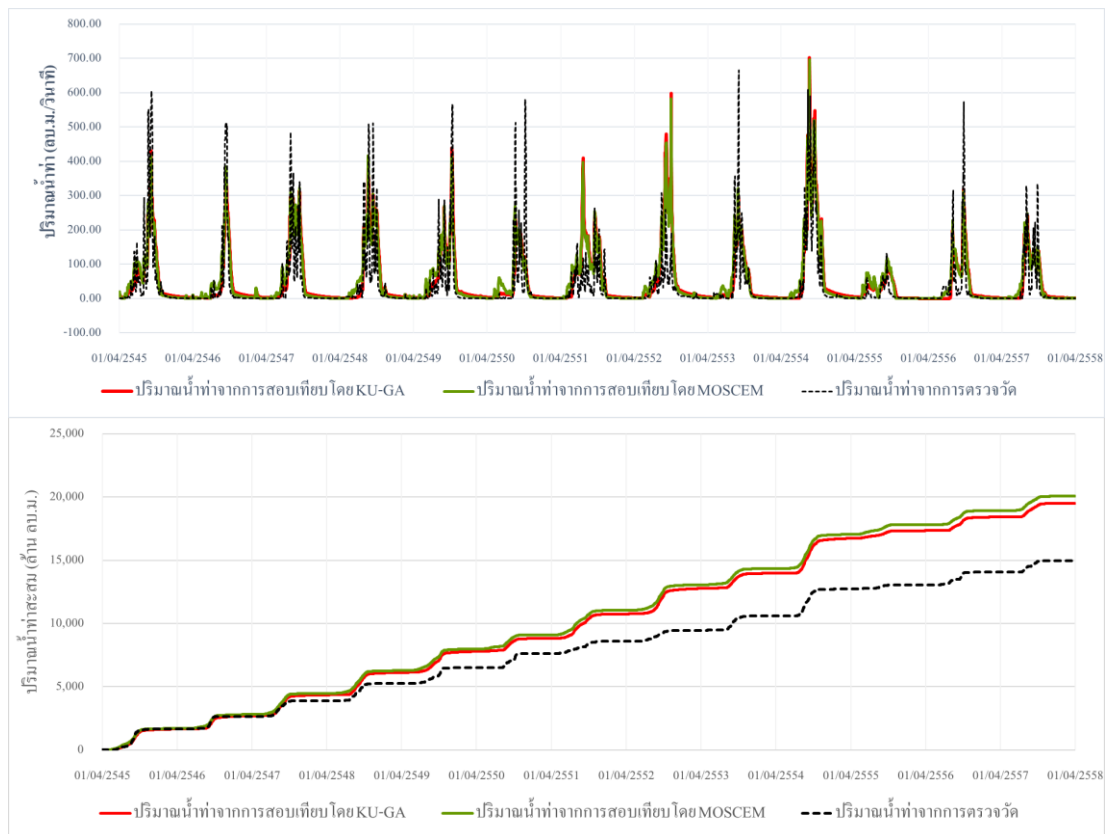
ภาพผนวกที่ ก53 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.66A



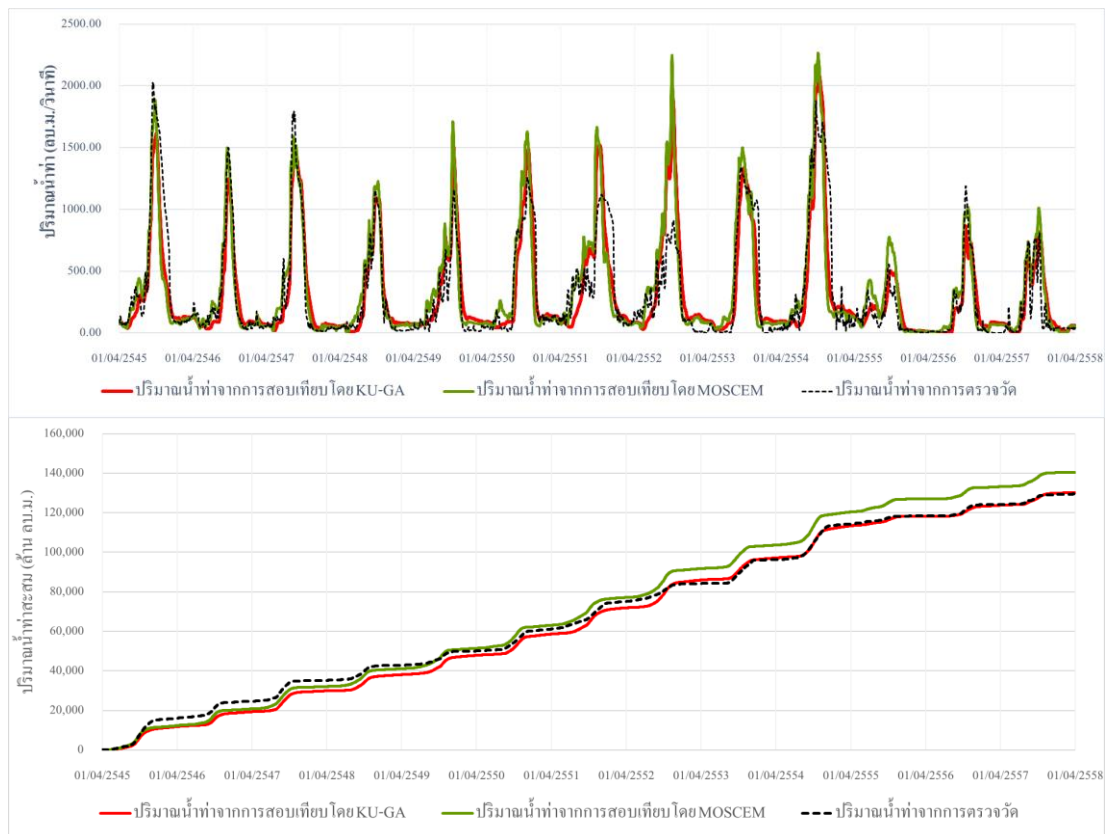
ภาพผนวกที่ ก54 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.18



ภาพผนวกที่ ก55 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.54



ภาพผนวกที่ ก56 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบ
แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำท่าที่
ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำท่า E.70



ภาพผนวกที่ ก57 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบ
 แบบจำลอง KU-MODNAM-SD-NDII โดยโปรแกรมและปริมาณน้ำทำที่
 ได้จากการตรวจวัด ของสถานีวัดน้ำทำ E.20A

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ - นามสกุล	นายณัฐวุฒิ ใจดี
วัน เดือน ปี ที่เกิด	21 พฤศจิกายน 2533
สถานที่เกิด	อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	304/256 ซอยพหลโยธิน 49/1 แขวงตลาดบางเขน เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210
ประวัติการศึกษา	วศ.บ (วิศวกรรมโยธา-ทรัพยากรน้ำ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกรระดับ 6 แผนกบำรุงรักษาอาคาร
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (เขื่อนศรีนครินทร์)
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-