



วิทยานิพนธ์

การพัฒนาแบบจำลอง KU-URBS เพื่อการสอบเทียบแบบอัตโนมัติโดยใช้
MOSCEM และ Genetic Algorithm

DEVELOPMENT OF THE AUTO-CALIBRATED KU-URBS MODEL
USING MOSCEM AND GENETIC ALGORITHM

นายเชียรชาติ สุวงศ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปีการศึกษา ๒๕๖๑

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)

สาขาวิชา วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

ภาควิชา วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

เรื่อง การพัฒนาแบบจำลอง KU-URBS เพื่อการสอบเทียบแบบอัตโนมัติโดยใช้ MOSCEM และ Genetic Algorithm

Development of The Auto-Calibrated KU-URBS Model using MOSCEM and Genetic Algorithm

นามผู้วิจัย นายเชิรชาติ สุววงศ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พรรณพิมพ์ พุทธรักษา มะเปี่ยม, วศ.ด.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรรณดี ไทยสยาม, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์สมหวัง ขันตยานวงศ์, Ph.D.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาแบบจำลอง KU-URBS เพื่อการสอบเทียบแบบอัตโนมัติโดยใช้ MOSCEM และ Genetic Algorithm

Development of The Auto-Calibrated KU-URBS Model using MOSCEM and Genetic Algorithm

โดย

นายเชิรชาติ สุวงค์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)

ปีการศึกษา 2561

ธีรชาติ สุวงศ์ : การพัฒนาแบบจำลอง KU-URBS เพื่อการสอบเทียบแบบอัตโนมัติโดยใช้ MOSCEM และ Genetic Algorithm ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ) สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก: ศาสตราจารย์นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์, Ph.D. ปีการศึกษา 2561

แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการประเมินน้ำท่าทั้งในพื้นที่ที่มีและไม่มีสถานีตรวจวัด อย่างไรก็ตาม แบบจำลองส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองประเภทลัมพ์ที่ประเมินน้ำท่าได้เฉพาะตำแหน่งที่ทำการสอบเทียบ ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ประยุกต์ใช้ URBS ซึ่งเป็นแบบจำลองประเภทกึ่งกระจายตัวที่สามารถประเมินน้ำท่าได้ที่ตำแหน่งใด ๆ นอกเหนือจากตำแหน่งที่ทำการสอบเทียบ อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง URBS ที่มีการใช้งานเป็นโปรแกรมประเภท Black box ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการปรับปรุงแบบจำลอง ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำโครงสร้างของแบบจำลอง URBS มาเขียนโปรแกรมขึ้นใหม่ด้วยภาษา MATLAB เพื่อเชื่อมต่อกับ MOSCEM ซึ่งเป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์เพื่อประเมินพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ทั้งนี้ แบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาซึ่งใช้ชื่อว่า KU-URBS V.1 นั้น ได้มีการนำกระบวนการ Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) มาใช้เพื่อการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติเพื่อเปรียบเทียบกับผลการดำเนินงานโดย MOSCEM นอกจากนั้นแล้ว ในงานวิจัยนี้ได้เสนอแนะวิธีการในการประเมินน้ำได้ดินเพื่อเลียนแบบกระบวนการทางอุทกวิทยาที่สมบูรณ์ขึ้นในส่วนของแบบจำลอง KU-URBS V.2 จากผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-URBS กับสถานีวัดน้ำท่าในกลุ่มน้ำปิงตอนบนพบว่า แบบจำลองที่ได้รับการพัฒนามีความสามารถในการสอบเทียบแบบจำลองเพื่อประเมินค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่ากระบวนการ MOGA จะมีประสิทธิภาพดีไปกว่าโปรแกรม MOSCEM เล็กน้อยก็ตาม นอกจากนั้นแล้ว กระบวนการในการประเมินน้ำได้ดินได้รับพิสูจน์ว่ามีส่วนช่วยในการเพิ่มความถูกต้องให้กับผลการประเมินน้ำท่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับปริมาณการไหลต่ำ ๆ อย่างไรก็ตาม แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ประเภทกึ่งกระจายรวมทั้งแบบจำลอง KU-URBS ยังมีขีดจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดใหญ่ที่อาจได้รับผลกระทบจากโครงสร้างทางชลศาสตร์หรือการบริหารจัดการน้ำที่มากขึ้นด้านท้ายน้ำ

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Thienchart Suwawong : Development of The Auto-Calibrated KU-URBS Model using MOSCEM and Genetic Algorithm. Master of Engineering (Water Resources Engineering), Major Field: Water Resources Engineering, Department of Water Resources Engineering. Thesis Advisor: Professor Nutchanat Sriwongsitanon, Ph.D. Academic Year 2018

Rainfall-runoff model can be used to evaluate runoff in gauged and ungauged catchments. However, most of the models are categorized as lumped models which can estimate runoff only at a calibrated gauging station. URBS - a semi-distributed model - was introduced in this study for runoff estimates at any locations other than at a calibrated station. However, the original version of URBS is a black block programming which is a burden for further development. In this study, the structure of URBS was rewritten using MATLAB and combined with MOSCEM - a multi-objective optimization algorithm - for automatically evaluating the model parameters. The developed model, which is called KU-URBS V.1, has introduced the Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) for automatically calibrating the model parameters to compare to the results provided by MOSCEM. Moreover, this study also initiates a new method to evaluate the base flow to properly imitate the hydrologic cycle in KU-URBS V.2. The results of model applications on the Upper Ping River Basin have shown that KU-URBS is an effective model to be able to automatically calibrating the model parameters - even though MOSCEM performs slightly more accurate results than those provided by MOGA. Furthermore, a new method for evaluating the base flow was proved to enhance the accuracy in runoff estimation, especially for an estimation of low flows. However, the semi-distributed rainfall-runoff models including KU-URBS have a limitation to be successfully applied for the large scale catchments which are normally affected by hydraulic structures and downstream water management.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ช่วยเหลือและสนับสนุนในการวางแผนวิจัยในฉบับนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษาและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ให้มีความสมบูรณ์ และขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณพิมพ์ พุทธรักษา มะเปี่ยม ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำตลอดที่ข้าพเจ้าศึกษา ณ สถาบันแห่งนี้

ขอขอบคุณกรมชลประทานที่ได้สนับสนุนข้อมูลน้ำท่ารายวันในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณศูนย์วิจัยการรับรู้จากระยะไกลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (SENSWAT) ที่ได้สนับสนุนข้อมูลฝนกริดแบบรายวัน SENSWAT-GGR เพื่อใช้ประกอบการวิจัยนี้

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับนิสิตปริญญาโท และทุนวิจัยเพื่อการดำเนินงานของศูนย์วิจัยการรับรู้จากระยะไกลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management; SENSWAT) โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยภายใต้ศูนย์วิจัยฯ ดังกล่าว

ด้วยความดีและประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อคุณแม่และครอบครัวที่ได้ให้กำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยในทุกเรื่องตลอดมา

เชิรชาติ สุวงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำนำ.....	1
วัตถุประสงค์.....	2
ขอบเขตการศึกษา.....	3
การตรวจเอกสาร	4
1. พื้นที่ศึกษา.....	4
1.1 ลักษณะทั่วไปของกลุ่มน้ำปึงตอนบน	4
1.2 สภาพภูมิอากาศ	6
1.2 การใช้ที่ดิน	9
2. การแบ่งลุ่มน้ำย่อยโดยใช้แบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข (Digital Elevation Model, DEM)	12
3. กระบวนการเฉลี่ยเชิงพื้นที่ (Areal Averaging)	13
4. ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ของแบบจำลอง URBS.....	15
4.1 ทฤษฎีของแบบจำลอง URBS.....	15
4.2 การประยุกต์ใช้ของแบบจำลอง URBS.....	21
5. MOSCEM (Multi Objective Shuffle Complex Evolution Matropolis).....	22

6. Genetic Algorithm.....	23
7. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการสอบเทียบอัตโนมัติ	26
8. Nash-Sutcliffe’s Efficiency (NSE).....	27
อุปกรณ์และวิธีการ	28
อุปกรณ์.....	28
วิธีการ	28
1. การรวบรวมข้อมูล	31
1.1 ข้อมูลปริมาณน้ำท่าตรวจวัด	31
1.2 ข้อมูลฝนเชิงพื้นที่แบบกริด (Gridded Gauged Rainfall)	35
1.3 ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลข (DEM)	38
2. การแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยและการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางกายภาพของลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำ ปึงตอนบน	38
2.1 การแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำปึงตอนบน	38
2.2 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางกายภาพของลุ่มน้ำย่อย.....	39
3. การวิเคราะห์ความลึกฝนเชิงพื้นที่แบบรายวันของแต่ละลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำปึงตอนบน	42
4. การพัฒนาแบบจำลอง KU-URBS เพื่อการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติโดยการใช้ MOSCEM	44
5. การประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-URBS โดยการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติด้วย โปรแกรม MOSCEM	46
5.1 การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1	47
5.2 การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73	47
5.3 การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ในกรณี การใช้ข้อมูลน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดทางด้านเหนือหน้าเป็นข้อมูลด้านเข้า.....	48
6. การพัฒนาโปรแกรมการสอบเทียบแบบจำลองอัตโนมัติ Genetic Algorithm และประยุกต์ใช้ เพื่อสอบเทียบแบบจำลอง URBS	51

6.1 การพัฒนาโปรแกรมการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัลกอริทึมพันธุกรรม Genetic Algorithm	51
6.2 การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1	53
ผลการศึกษา	55
1. ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 โดยการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัลกอริทึมพันธุกรรม MOSCEM	55
1.1 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.1 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1	55
1.2 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1	58
1.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง KU-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1	61
2. ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 โดยการสอบเทียบแบบจำลองและตรวจพิสูจน์แบบจำลองแบบอัลกอริทึมพันธุกรรม MOSCEM	78
3. ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ในกรณีการใช้ข้อมูลน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดทางด้านเหนือหน้าเป็นข้อมูลด้านเข้า โดยการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัลกอริทึมพันธุกรรม MOSCEM	84
4. ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 โดยการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัลกอริทึมพันธุกรรม MOGA	89
4.1 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1	89
4.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ระหว่างผลที่ได้จากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยโปรแกรม MOGA และ MOSCEM	91
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	100
1. สรุปผลการศึกษา	100
2. ข้อเสนอแนะ	101
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	102
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	106

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	ลุ่มน้ำสาขาของกลุ่มน้ำปึงตอนบน	6
ตารางที่ 2	สัดส่วนการใช้ที่ดินของแต่ละลุ่มน้ำสาขาในกลุ่มน้ำปึงตอนบนในปี ค.ศ. 2010–2013	10
ตารางที่ 3	รายชื่อสถานีวัดน้ำท่า ตำแหน่งที่ตั้งและช่วงปีสถิติข้อมูลของสถานีวัดน้ำท่า ในลุ่มน้ำปึงตอนบนที่มีข้อมูลระหว่างปี ค.ศ. 2003–2013 และมีการตรวจวัดต่อเนื่องในปัจจุบัน	33
ตารางที่ 4	ปริมาณน้ำท่ารายเดือน รายฤดูกาลและรายปีเฉลี่ยของสถานีวัดน้ำท่าที่ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำปึงตอนบนที่มีข้อมูลระหว่างปี ค.ศ. 2003–2013 และมีการตรวจวัดต่อเนื่องในปัจจุบัน	34
ตารางที่ 5	ข้อมูลฝนเฉลี่ยรายเดือนและเฉลี่ยรายปีในช่วงเวลาปี ค.ศ. 2003 จนถึงปี ค.ศ. 2013 สำหรับแต่ละลุ่มน้ำย่อยในกลุ่มน้ำปึงตอนบน	36
ตารางที่ 6	ข้อมูลฝนเฉลี่ยรายเดือนและเฉลี่ยรายปีในช่วงเวลาปี ค.ศ. 2003 จนถึงปี ค.ศ. 2013 สำหรับแต่ละสถานีวัดน้ำท่าในกลุ่มน้ำปึงตอนบน	36
ตารางที่ 7	ลักษณะเฉพาะและพื้นที่รับน้ำฝนของลุ่มน้ำย่อยของกลุ่มน้ำปึงตอนบนที่ทำการศึกษา....	41
ตารางที่ 8	ความลึกฝนเชิงพื้นที่เฉลี่ยรายเดือน รายฤดูกาล และรายปี	43
ตารางที่ 9	ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.1 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 โดยใช้โปรแกรม MOSCEM.....	57
ตารางที่ 10	พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-URBS V.1 ที่ได้จากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MOSCEM.....	58
ตารางที่ 11	ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 โดยใช้โปรแกรม MOSCEM.....	60
ตารางที่ 12	พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่ได้จากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MOSCEM (1)	61
ตารางที่ 13	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของดัชนีประสิทธิภาพของแบบจำลอง KU-URBS V.2 เปรียบเทียบกับ KU-URBS V.1	63



1532608965

KU Thesisis 6014500987 thesisis / recv: 30072562 16:32:24 / seq: 14

ตารางที่ 14 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) โดยใช้โปรแกรม MOSCEM65

ตารางที่ 15 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 โดยโปรแกรม MOSCEM.....80

ตารางที่ 16 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่ได้จากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM (2).....82

ตารางที่ 17 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ในกรณีที่ 1 โดยโปรแกรม MOSCEM87

ตารางที่ 18 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ในกรณีที่ 2 โดยโปรแกรม MOSCEM87

ตารางที่ 19 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ในกรณีที่ 3 โดยโปรแกรม MOSCEM88

ตารางที่ 20 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่ได้จากการสอบเทียบและ ตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 โดยโปรแกรม MOSCEM (3)88

ตารางที่ 21 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 โดยใช้โปรแกรม MOGA90

ตารางที่ 22 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่ได้จากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MOGA91

ตารางที่ 23 เปรียบเทียบความแตกต่างของดัชนีประสิทธิภาพของแบบจำลอง KU-URBS V.2 (MOGA) เปรียบเทียบกับ KU-URBS V.2 (MOSCEM).....93

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 สภาพภูมิประเทศและขอบเขตของกลุ่มน้ำปึงตอนบน.....	5
ภาพที่ 2 ร่องความกดอากาศต่ำ ทิศทางลมมรสุม และทางเดินพายุหมุนเขตร้อนที่พัดผ่าน ประเทศไทย.....	8
ภาพที่ 3 การใช้ที่ดินของแต่ละกลุ่มน้ำสาขาในกลุ่มน้ำปึงตอนบนในปี ค.ศ. 2010–2013	11
ภาพที่ 4 องค์ประกอบของกลุ่มน้ำ	12
ภาพที่ 5 กลุ่มน้ำย่อยที่ถูกแบ่งโดยเครื่องมือ Watershed ในโปรแกรม ArcGIS 10.....	13
ภาพที่ 6 ตัวอย่างชั้นข้อมูลด้านเข้าและด้านออกสำหรับเครื่องมือ Zonal Statistic as Table.....	14
ภาพที่ 7 กระบวนการซึมลงดิน (Infiltration Loss).....	17
ภาพที่ 8 หลักการของกระบวนการ Pareto Ranking สำหรับปัญหาที่มีสองพารามิเตอร์ (θ_1, θ_2) (a) และ มีสองวัตถุประสงค์ (F_1, F_2) (b)	22
ภาพที่ 9 ขั้นตอนการทำงานของ Genetic Algorithm	25
ภาพที่ 10 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	30
ภาพที่ 11 ตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่าที่ตั้งอยู่ในกลุ่มน้ำปึงตอนบนที่มีข้อมูลยาวเพียงพอและมีการตรวจวัดต่อเนื่องในปัจจุบัน	32
ภาพที่ 12 การกระจายของปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยของสถานีวัดน้ำฝนจำนวน 131 สถานี ที่ตั้งอยู่ในกลุ่มน้ำปึงตอนบน	37
ภาพที่ 13 กลุ่มน้ำย่อยและตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่าที่ตั้งอยู่ในกลุ่มน้ำปึงตอนบน.....	40
ภาพที่ 14 โครงข่ายการวิเคราะห์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 สำหรับกรณีที่ 1.....	50
ภาพที่ 15 โครงข่ายการวิเคราะห์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 สำหรับกรณีที่ 2.....	50
ภาพที่ 16 โครงข่ายการวิเคราะห์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 สำหรับกรณีที่ 3.....	51
ภาพที่ 17 ตัวอย่างการเลือกตำแหน่งสำหรับการ Crossover และ Mutation ที่ได้จากการสุ่ม.....	53

ภาพที่ 31 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.1 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สอบ
 เทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOGA94

ภาพที่ 32 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.20 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่
 สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOGA95

ภาพที่ 33 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.75 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่
 สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOGA96

ภาพที่ 34 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.4A ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่
 สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOGA97

ภาพที่ 35 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.67 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่
 สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOGA98

ภาพที่ 36 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.21 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่
 สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOGA99

คำนำ

ปริมาณน้ำท่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมากของระบบอุทกวิทยาเนื่องจากเป็นปัจจัยหลักที่ใช้กำหนดแนวทางการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ แม้ว่าปริมาณน้ำท่าสามารถทำการวัดได้โดยตรง แต่ต้องใช้ทรัพยากรและเวลามากในการตรวจวัด รวมทั้งไม่สามารถตรวจวัดให้ครอบคลุมพื้นที่รับน้ำฝนของกลุ่มน้ำที่พิจารณาได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (Rainfall-Runoff Model) ช่วยในการประเมินสำหรับกลุ่มน้ำที่ไม่ได้ทำการตรวจวัด (Ungauged Catchment) รวมทั้งสามารถนำไปใช้เพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่าในสภาพอนาคตเมื่อทราบข้อมูลฝนที่กำลังตกอยู่ ณ ช่วงเวลาที่พิจารณาหรือเมื่อสามารถคาดการณ์ข้อมูลฝนในอนาคตได้ แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าที่ได้รับการพัฒนาจากอดีตจนถึงปัจจุบันมีมากมายหลายแบบจำลองและแต่ละแบบจำลองมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้ แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ที่มีการใช้งานจากอดีตจนถึงปัจจุบัน เช่น แบบจำลอง SCS (Sharma, K. D. and Singh, S., 1992), NAM (Yew Gan, T. et al., 1997), Modified NAM, RORB (Laurenson, E. M. and Mein, R. G., 1990), WBMN (Boyd, M. J. et al., 1987), FLEXL (Fenicia, F. et al., 2008) และ FLEX-Topo (Gao, H. et al., 2014) เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองเหล่านี้จัดเป็นแบบจำลองประเภทลัมพ์ (Lumped Model) ที่มีการเฉลี่ยทั่วพื้นที่ลุ่มน้ำที่พิจารณาซึ่งจะให้ค่าตอบของปริมาณน้ำท่าที่จุดท้ายน้ำของกลุ่มน้ำ อย่างไรก็ตาม Carroll, D. (2004) ได้พัฒนาแบบจำลอง URBS ซึ่งเป็นแบบจำลองประเภทกึ่งกระจายตัว (Semi-Distributed Model) ที่สามารถประเมินปริมาณน้ำท่าได้ในระดับลุ่มน้ำย่อยหรือจุดที่สนใจภายในลุ่มน้ำนอกเหนือจากที่จุดพิจารณาด้านท้ายน้ำของกลุ่มน้ำหลัก ซึ่งนับว่าเป็นการเพิ่มศักยภาพของแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ได้เป็นอย่างดีทำให้สามารถทราบปริมาณน้ำท่าได้ทุกจุดพิจารณาที่สนใจได้

ความยากลำบากของการใช้งานแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ประการสำคัญประการหนึ่งคือกระบวนการในการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model Calibration and Model Validation) เพื่อให้ได้มาซึ่งพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง (Control Parameters) ซึ่งโดยทั่วไปใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error) ที่ยากจะได้ค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่แบบจำลองมีพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองจำนวนมาก ดังนั้น แบบจำลอง FLEXL และ FLEX-Topo จึงได้นำโปรแกรม MOSCEM (Reed, P. et al., 2007) ซึ่งเป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) มาใช้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง ซึ่งจากการประยุกต์แบบจำลองทั้งสองแบบจำลองพบว่า

เป็นกระบวนการในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Fenicia, F. et al., 2008; Gao, H. et al., 2014; นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์, 2559)

ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลอง URBS ในการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติโดยการใช้โปรแกรม MOSCEM และนำมาประยุกต์ใช้กับพื้นที่ศึกษา คือลุ่มน้ำปิงตอนบน จากนั้นจะได้นำ Genetic Algorithm มาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง URBS โดยใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับแบบจำลอง MOSCEM เพื่อตรวจสอบความมีประสิทธิภาพของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม โดยทั้งสองวิธีการ เพื่อให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำของประเทศไทยให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลอง KU-URBS ที่สามารถสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติโดยการใช้โปรแกรม MOSCEM และ Genetic Algorithm โดยการหาค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองที่เหมาะสมโดยใช้ฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization)
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการประเมินค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองที่เหมาะสมของแบบจำลอง KU-URBS ที่ได้จากการใช้โปรแกรม MOSCEM และ Genetic Algorithm โดยการประยุกต์ใช้โปรแกรม KU-URBS ที่พัฒนากับพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน

ขอบเขตการศึกษา

1. ในการศึกษานี้ได้เลือกพื้นที่ลุ่มน้ำปึงตอนบนเป็นพื้นที่ศึกษา เนื่องจากเป็นลุ่มน้ำที่มีข้อมูลน้ำฝนและข้อมูลน้ำท่าที่ยาวนานเพียงพอและมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ดี รวมทั้งเป็นลุ่มน้ำที่ไม่ซับซ้อนมากและไม่มีอิทธิพลของโครงสร้างทางชลศาสตร์ขนาดใหญ่มากนักที่จะส่งผลกระทบต่อการประยุกต์ใช้แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า

2. ในการประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-URBS เพื่อการประเมินน้ำท่าได้พิจารณาใช้ข้อมูลน้ำฝนและน้ำท่าแบบรายวัน ในช่วงเวลาจากอดีตจนถึงปี ค.ศ. 2015 ที่ครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำปึงตอนบน โดยข้อมูลน้ำฝนเป็นข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยาและกรมชลประทาน และสำหรับข้อมูลน้ำท่าเป็นข้อมูลของกรมชลประทานเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ในส่วนของข้อมูลฝนนั้นได้พิจารณาใช้ข้อมูลที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องแล้วโดยวิธี Double Mass Curve ที่ดำเนินงานภายใต้โครงการวิจัยเรื่อง The Development of High-Accuracy Remote Sensing Rainfall Products (Sriwongsitanon, N. et al., 2019)

3. ในพัฒนาแบบจำลอง KU-URBS เพื่อการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติและการเพิ่มความถูกต้องให้กับแบบจำลอง พิจารณาใช้โปรแกรม MATLAB ในการดำเนินงาน

4. โปรแกรม MOSCEM ที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดย Vrugt, J. et al. (2003) ซึ่งเชื่อมต่อกับแบบจำลอง FLEXL และ FLEX-Topo ที่ได้ความอนุเคราะห์โปรแกรมดังกล่าวจาก Prof. Hubert Savenije จาก School of Civil and Environmental Engineering, TU Delft ประเทศเนเธอร์แลนด์

5. โปรแกรม Genetic Algorithm เขียนขึ้นโดยโปรแกรม MATLAB โดยในการศึกษานี้ได้ทำการพัฒนาโดยมีพื้นฐานมาจากโปรแกรมการประยุกต์ใช้ Genetic Algorithm สำหรับอ่างเก็บน้ำเดี่ยว (Single Reservoir) ที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว (Single Objective) ที่เขียนขึ้นโดย Siddharth Panwar ภายใต้การดูแลของ ศ.ดร. นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์ เพื่อนำมาใช้แก้ปัญหาสำหรับ Pechiparai Reservoir System ใน Kodaiyar River Basin ประเทศอินเดีย (Jothiprakash, V. and Shanthi, G., 2006)

การตรวจเอกสาร

1. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้คือ พื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน ซึ่งเป็นลุ่มน้ำสาขาของลุ่มน้ำปิง โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังต่อไปนี้

1.1 ลักษณะทั่วไปของลุ่มน้ำปิงตอนบน

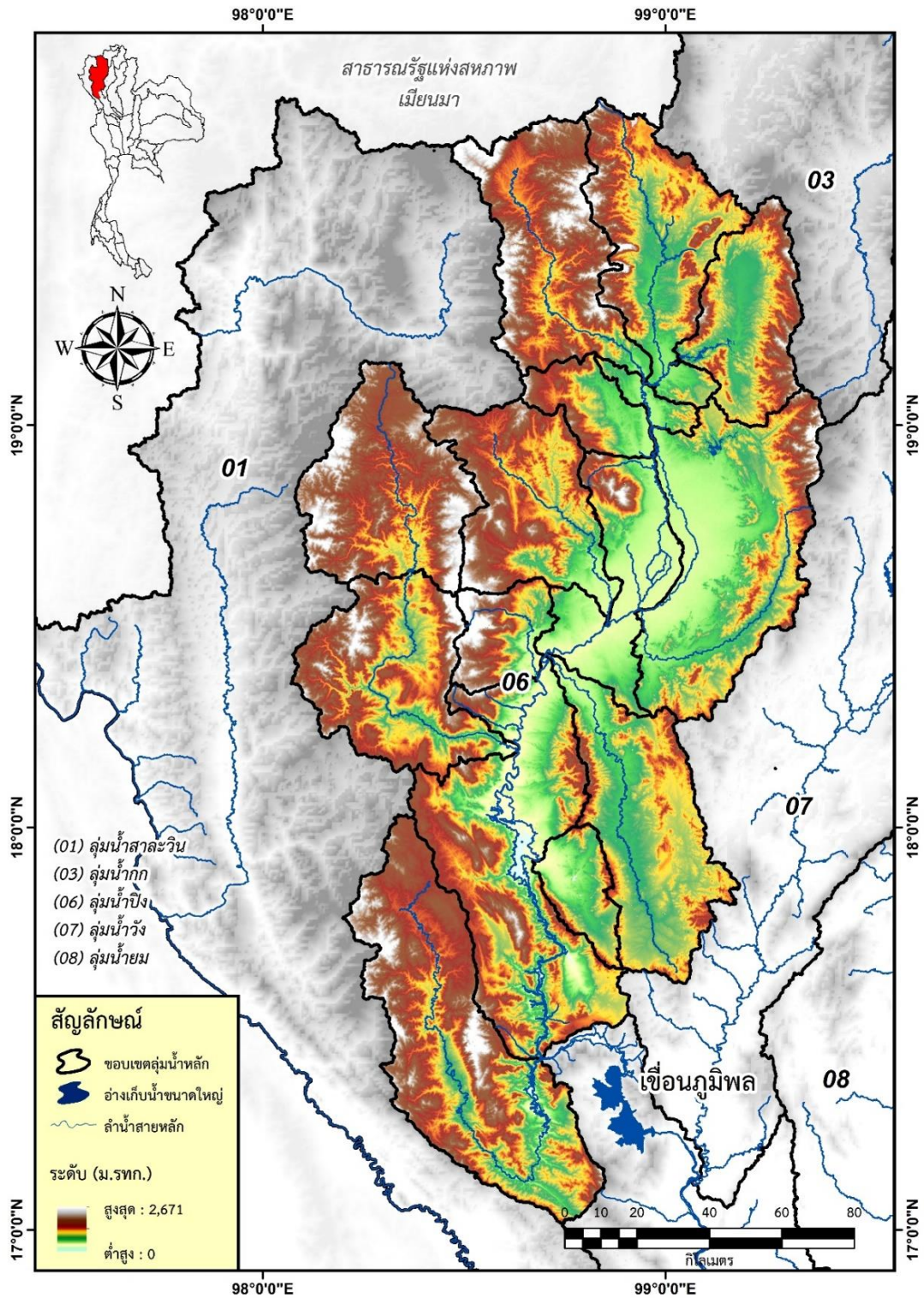
ลุ่มน้ำปิงเป็นลุ่มน้ำสาขาหลักของลุ่มน้ำเจ้าพระยา มีพื้นที่รับน้ำประมาณ 34,856 ตารางกิโลเมตร โดยมีต้นกำเนิดจากทิวเขาผีปันน้ำในเขตอำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ และมีทิศทางการไหลจากทิศเหนือลงมาทางทิศใต้ ผ่านจังหวัดเชียงใหม่ ลำพูน และไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่อำเภอคอยเต่า จากนั้นแม่น้ำปิงจะไหลผ่านที่ราบและมาบรรจบกับแม่น้ำวังที่จังหวัดตาก และไหลผ่านที่ราบกว้างใหญ่ในเขตจังหวัดกำแพงเพชรและไหลมาบรรจบกับแม่น้ำน่านที่ปากน้ำโพ จังหวัดนครสวรรค์ ซึ่งแม่น้ำปิงมีความยาวตั้งแต่ทิวเขาผีปันน้ำจนถึงปากน้ำโพประมาณ 740 กิโลเมตร เนื่องจากมีเขื่อนภูมิพลตั้งอยู่บนแม่น้ำปิงที่อำเภอสามเงาจังหวัดตาก ดังนั้น ลุ่มน้ำปิงจึงถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ลุ่มน้ำปิงตอนบนซึ่งอยู่ทางด้านเหนือเขื่อนภูมิพลและลุ่มน้ำปิงตอนล่างซึ่งอยู่ทางด้านท้ายเขื่อนภูมิพล

ลุ่มน้ำปิงตอนบนมีพื้นที่รับฝนน้ำประมาณ 25,370 ตารางกิโลเมตร พื้นที่ลุ่มน้ำตั้งอยู่ในเขตจังหวัดลำพูนและเชียงใหม่ ระหว่างละติจูด $17^{\circ} 14' 30''$ ถึง $19^{\circ} 47' 52''$ เหนือ และระหว่างลองจิจูด $98^{\circ} 4' 30''$ ถึง $99^{\circ} 22' 30''$ ตะวันออก โดยมีสภาพภูมิประเทศเป็นเทือกเขาสลับซับซ้อนและปกคลุมด้วยป่าไม้ประมาณ 75.5% ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 1 ทั้งนี้ ลุ่มน้ำปิงตอนบนมีการแบ่งลุ่มน้ำสาขาออกเป็น 14 ลุ่มน้ำสาขา ดังแสดงในตารางที่ 1



1532608965

KTU Thesisis 6014500987 thesisis / revc: 30072562 16:32:24 / seq: 14



ภาพที่ 1 สภาพภูมิประเทศและขอบเขตของกลุ่มน้ำปิงตอนบน

ตารางที่ 1 กลุ่มน้ำสาขาของกลุ่มน้ำปิงตอนบน

ลำดับที่	กลุ่มน้ำสาขา	พื้นที่รับน้ำฝน (ตร.กม.)
1	แม่น้ำปิงตอนบน	1,972.33
2	น้ำแม่จัด	1,282.39
3	น้ำแม่แดง	1,955.63
4	แม่น้ำปิงส่วนที่ 2	1,723.15
5	น้ำแมริม	565.45
6	น้ำแม่กวง	2,680.05
7	น้ำแม่งาน	1,731.68
8	น้ำแม่ลี	2,079.86
9	น้ำแม่กลาง	615.84
10	แม่น้ำปิงส่วนที่ 3	3,179.72
11	น้ำแม่แจ่มตอนบน	1,965.24
12	น้ำแม่แจ่มตอนล่าง	1,930.26
13	น้ำแม่หาด	520.76
14	น้ำแม่ตื่น	3,167.27
	กลุ่มน้ำปิงตอนบน	25,369.63

ที่มา: กรมทรัพยากรน้ำ

1.2 สภาพภูมิอากาศ

กลุ่มน้ำปิงตอนบนได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ โดยลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะพัดพามวลอากาศชื้นจากมหาสมุทรอินเดียและอ่าวไทยเข้าปกคลุมกลุ่มน้ำปิงตอนบนระหว่างกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม ซึ่งจะทำให้มีเมฆมากและฝนตกชุก ส่วนลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจะพัดพามวลอากาศเย็นและแห้งจากประเทศจีนเข้าปกคลุมกลุ่มน้ำปิงตอนบนระหว่างกลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ ซึ่งจะทำให้พื้นที่ส่วนใหญ่มีท้องฟ้าโปร่ง อากาศหนาวเย็นและแห้งแล้งทั่วไป นอกจากนั้นแล้ว พื้นที่กลุ่มน้ำปิงตอนบนยังได้รับอิทธิพลจากพายุหมุนเขตร้อนและร่องความกดอากาศต่ำที่พัดผ่านเข้ามาตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม ทั้งนี้ ตำแหน่งร่องความกดอากาศต่ำรวมทั้งทิศทางลมมรสุม

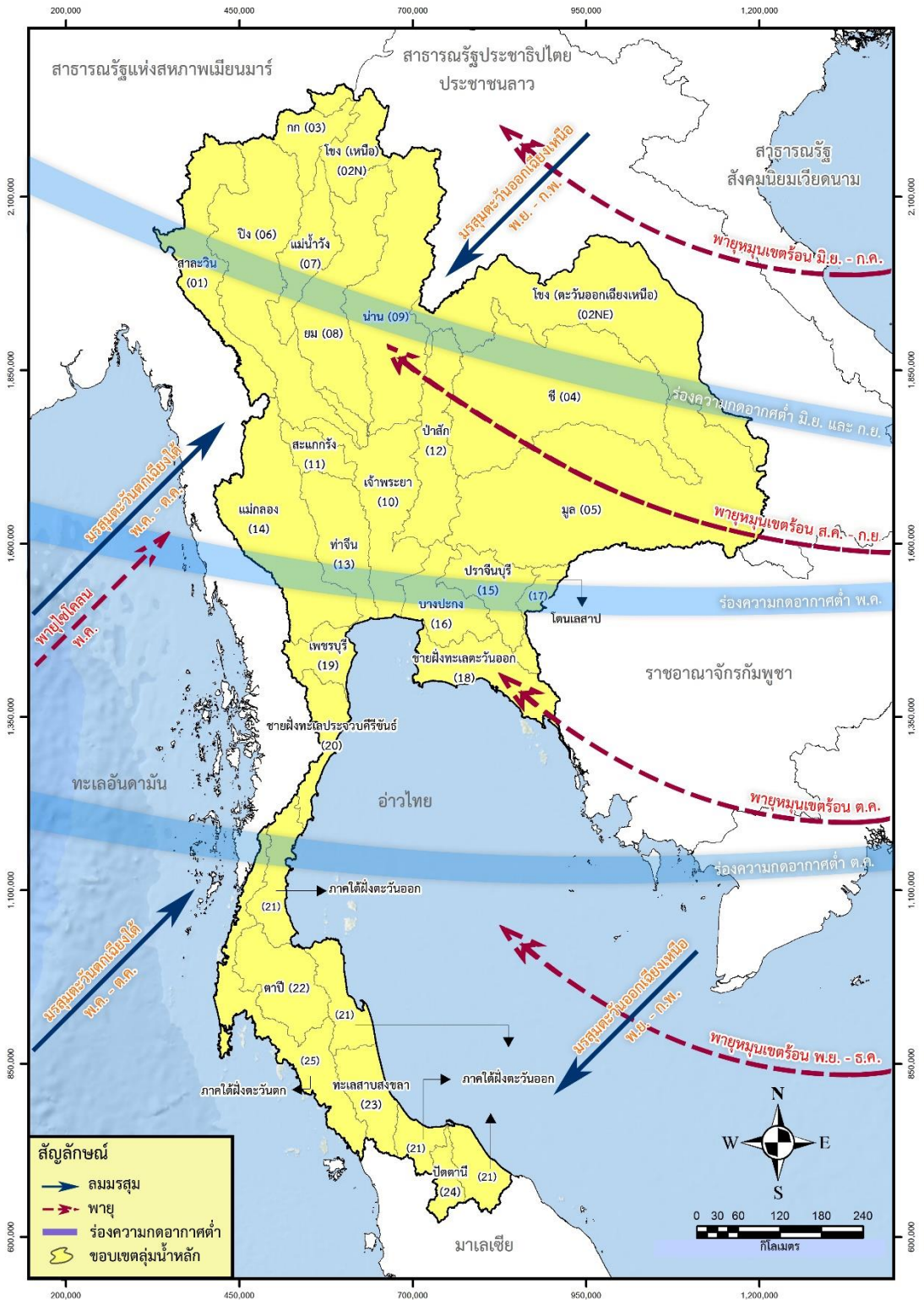
และทางเดินพายุหมุนเขตร้อนที่พัดผ่านลุ่มน้ำปิงตอนบนรวมทั้งประเทศไทยในภาพรวมแสดงดัง
 ในภาพที่ 2 จากอิทธิพลของลมมรสุมรวมทั้งพายุหมุนเขตร้อนและร่องความกดอากาศต่ำดังกล่าวทำ
 ให้สภาพภูมิอากาศของลุ่มน้ำปิงตอนบนมีสภาพภูมิอากาศแบ่งเป็น 3 ฤดูกาล คือ ฤดูร้อน ฤดูฝน
 และฤดูหนาว โดยสภาพภูมิอากาศในแต่ละฤดูกาลสรุปได้ดังนี้

1) ฤดูร้อน เกิดขึ้นระหว่างกลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนเมษายน โดยมีสภาพอากาศ
 ร้อนอบอ้าวและแห้งแล้ง และบางครั้งอาจมีมวลอากาศเย็นจากประเทศจีนแผ่ปกคลุมลงมาปะทะ
 มวลอากาศร้อนทางตอนบนของประเทศทำให้เกิดพายุฝนฟ้าคะนองลมกระโชกแรงและอาจมี
 ลูกเห็บตกซึ่งเรียกว่าพายุฤดูร้อน

2) ฤดูฝน เกิดขึ้นระหว่างกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม โดยเกิดจากมรสุม
 ตะวันตกเฉียงใต้และร่องความกดอากาศต่ำพัดผ่านประเทศไทย ทำให้มีฝนตกชุกโดยทั่วไปร่อง
 ความกดอากาศต่ำนี้จะพัดผ่านตอนกลางของประเทศไทยในเดือนพฤษภาคม แล้วจึงเลื่อนขึ้นไป
 ทางตอนเหนือเรื่อย ๆ จนประมาณปลายเดือนมิถุนายนจะพัดผ่านอยู่บริเวณประเทศจีนตอนใต้ทำ
 ให้ประเทศไทยรวมทั้งลุ่มน้ำปิงตอนบนมีฝนลดลงเรียกว่าฝนทิ้งช่วงซึ่งมีระยะเวลาประมาณ 1-2
 สัปดาห์ หลังจากนั้น ในเดือนกรกฎาคมจะเลื่อนกลับลงมาพัดผ่านประเทศไทยอีกครั้งทำให้มีฝน
 ชุกต่อเนื่องจนกระทั่งประมาณกลางเดือนตุลาคมฝนจะเริ่มลดลง

3) ฤดูหนาว เกิดขึ้นระหว่างกลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ โดยลมมรสุม
 ตะวันออกเฉียงเหนือจะพัดปกคลุมลุ่มน้ำปิงตอนบนตั้งแต่กลางเดือนตุลาคม ซึ่งเป็นช่วงเปลี่ยนจาก
 ฤดูฝนเป็นฤดูหนาว

1532608965 KT Ithesis 6014500987 thesis / rev: 30072562 16:32:24 / seq: 14



ภาพที่ 2 ร่องความกดอากาศต่ำ ทิศทางลมมรสุม และทางเดินพายุหมุนเขตร้อนที่พัดผ่านประเทศไทย

ที่มา: โครงการศึกษาความมั่นคงอย่างยั่งยืนทั้ง 25 ลุ่มน้ำ (กรมทรัพยากรน้ำ, 2559)

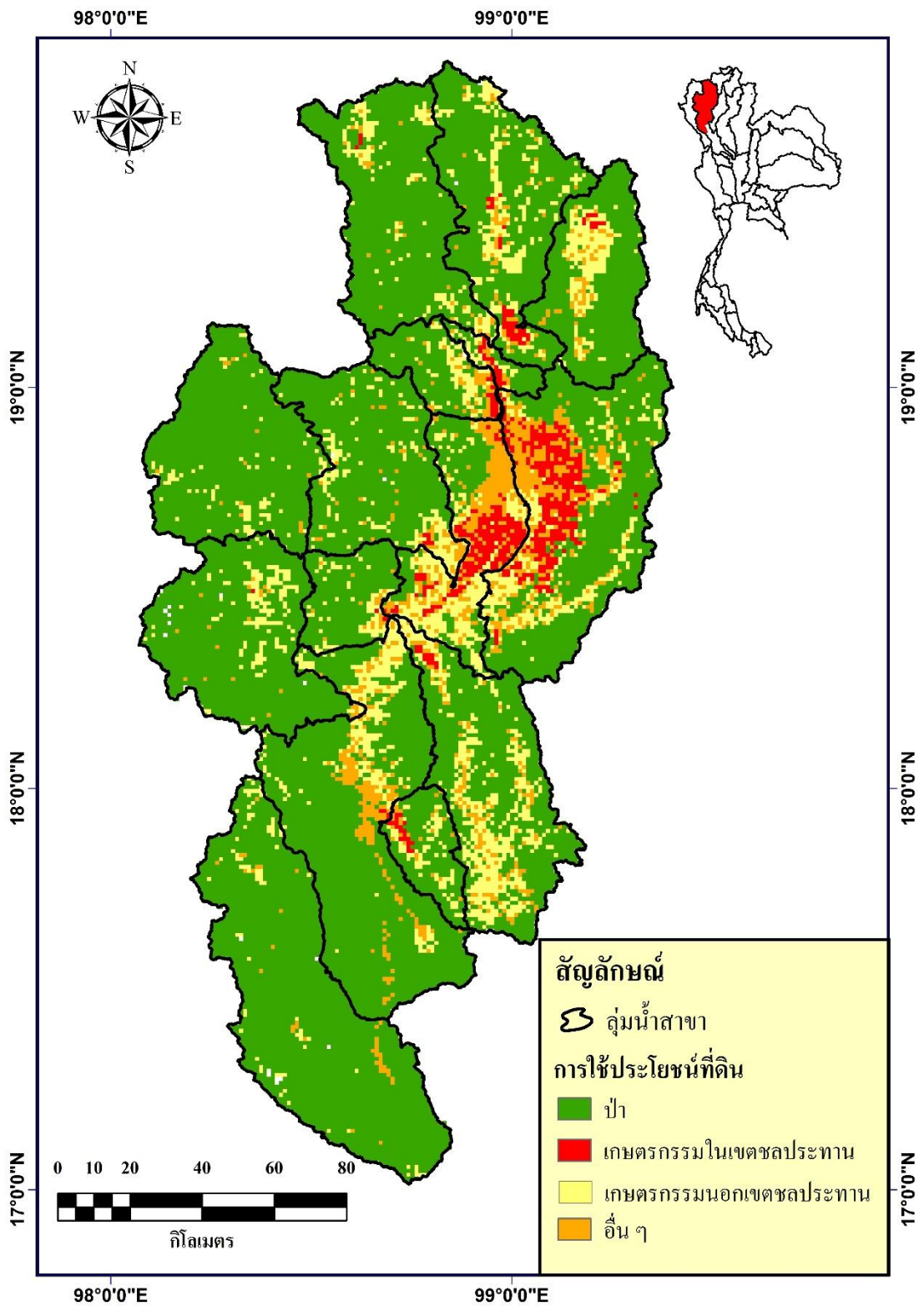
1.2 การใช้ที่ดิน

จากข้อมูลที่ใช้ที่ดินระหว่างปี ค.ศ. 2010–2013 ที่ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยกรมพัฒนาที่ดินสามารถนำมาสรุปการใช้ที่ดินประเภทต่าง ๆ สำหรับลุ่มน้ำปิงตอนบนดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ลุ่มน้ำปิงตอนบนซึ่งมีพื้นที่ทั้งหมด 25,369.63 ตารางกิโลเมตร มีการใช้ที่ดินที่สำคัญแบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลัก คือ (1) ป่าไม้มีพื้นที่ 1,9581.68 ตารางกิโลเมตร ซึ่งคิดเป็น 77 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน (2) เกษตรกรรมในเขตชลประทานมีพื้นที่ 709.16 ตารางกิโลเมตร ซึ่งคิดเป็น 3.11 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน (3) เกษตรกรรมน้ำฝนมีพื้นที่ 3220.92 ตารางกิโลเมตร ซึ่งคิดเป็น 12.70 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน และ (4) การใช้ที่ดินประเภทอื่น ๆ มีพื้นที่ 1776.87 ตารางกิโลเมตร ซึ่งคิดเป็น 7.00 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน 2010–2013

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ป่าไม้มีสัดส่วนการใช้ที่ดินสูงสุดโดยเฉลี่ยคือ 77.2% ซึ่งมีสัดส่วนสูงสุด และต่ำสุด ที่ลุ่มน้ำสาขาน้ำแม่ตื่น และลุ่มน้ำสาขาน้ำแม่ปิงส่วนที่ 2 โดยมีสัดส่วนเท่ากับ 95.6% และ 32.8% ของพื้นที่ลุ่มน้ำสาขา ตามลำดับ สำหรับสัดส่วนการใช้ที่ดินที่รองลงมาคือการใช้ที่ดินประเภทเกษตรกรรมน้ำฝนซึ่งมีค่าเฉลี่ย 12.70% ซึ่งมีสัดส่วนสูงสุด และต่ำสุด ที่ลุ่มน้ำสาขาน้ำแม่ลี และลุ่มน้ำสาขาน้ำแม่ตื่น โดยมีสัดส่วนเท่ากับ 24.66% และ 0.88% ของพื้นที่ลุ่มน้ำสาขา ตามลำดับ ในขณะที่สัดส่วนการใช้ที่ดินประเภทเกษตรกรรมในเขตชลประทาน มีค่าเฉลี่ย 3.11% ซึ่งมีสัดส่วนสูงสุด และต่ำสุด ที่ลุ่มน้ำสาขาน้ำแม่ปิงส่วนที่ 2 และลุ่มน้ำสาขาน้ำแม่ตื่น โดยมีสัดส่วนเท่ากับ 16.71% และ 0.00% ของพื้นที่ลุ่มน้ำสาขา ตามลำดับ และการใช้ที่ดินประเภทอื่น ๆ คิดเป็น 7% ของพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน ซึ่งมีสัดส่วนสูงสุด และต่ำสุด ที่ลุ่มน้ำสาขาน้ำแม่ปิงส่วนที่ 2 และลุ่มน้ำสาขาน้ำแม่แจ่มตอนบน โดยมีสัดส่วนเท่ากับ 24.66% และ 0.88% ของพื้นที่ลุ่มน้ำสาขา ตามลำดับ ทั้งนี้ ได้แสดงแผนที่ใช้ประโยชน์ที่ดินของแต่ละลุ่มน้ำสาขาในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนในปี ค.ศ. 2010–2013 ดังในภาพที่ 3

ตารางที่ 2 สัดส่วนการใช้ที่ดินของแต่ละลุ่มน้ำสาขาในลุ่มน้ำปิงตอนบนในปี ค.ศ. 2010–2013

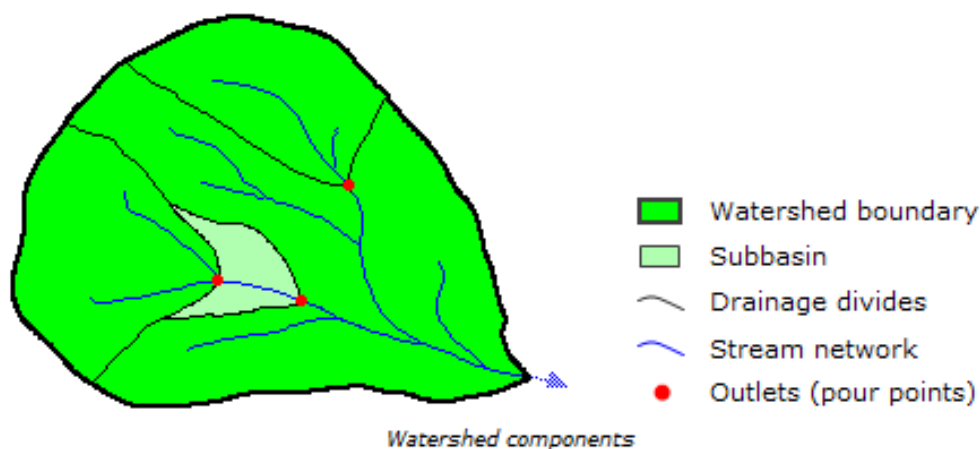
ลำดับที่	ลุ่มน้ำสาขา	พื้นที่รับ น้ำฝน (ตร.กม.)	สัดส่วนการใช้ประโยชน์ที่ดิน							
			ป่าไม้		เกษตรกรรมใน เขตชลประทาน		เกษตรกรรมนอก เขตชลประทาน		อื่น ๆ	
			ตร.กม.	%	ตร.กม.	%	ตร.กม.	%	ตร.กม.	%
1	แม่น้ำปิงตอนบน	1,972.33	1,513.23	(76.7%)	51.52	(2.61%)	325.33	(16.49%)	82.25	(4.17%)
2	น้ำแม่จัด	1,282.39	980.31	(76.4%)	13.37	(1.04%)	213.43	(16.64%)	75.28	(5.87%)
3	น้ำแม่แดง	1,955.63	1,731.19	(88.5%)	5.80	(0.30%)	177.92	(9.10%)	40.72	(2.08%)
4	แม่น้ำปิงส่วนที่ 2	1,723.15	565.55	(32.8%)	287.98	(16.71%)	444.63	(25.80%)	424.99	(24.66%)
5	น้ำแมริม	565.45	383.82	(67.9%)	21.02	(3.72%)	99.35	(17.57%)	61.27	(10.84%)
6	น้ำแม่กวง	2,680.05	1,526.61	(57.0%)	352.08	(13.14%)	350.49	(13.08%)	450.87	(16.82%)
7	น้ำแม่งาน	1,731.68	1,443.84	(83.4%)	7.34	(0.42%)	206.04	(11.90%)	74.46	(4.30%)
8	น้ำแม่ลี	2,079.86	1,359.84	(65.4%)	16.46	(0.79%)	538.61	(25.90%)	164.95	(7.93%)
9	น้ำแม่กลาง	615.84	509.31	(82.7%)	3.43	(0.56%)	78.20	(12.70%)	24.89	(4.04%)
10	แม่น้ำปิงส่วนที่ 3	3,179.72	2,594.73	(81.6%)	5.38	(0.17%)	321.70	(10.12%)	257.91	(8.11%)
11	น้ำแม่แจ่มตอนบน	1,965.24	1,842.38	(93.7%)	0.00	(0.00%)	105.56	(5.37%)	17.29	(0.88%)
12	น้ำแม่แจ่มตอนล่าง	1,930.26	1,724.62	(89.3%)	1.11	(0.06%)	177.47	(9.19%)	27.06	(1.40%)
13	น้ำแม่หาด	520.76	377.73	(72.5%)	24.67	(4.74%)	88.98	(17.09%)	29.39	(5.64%)
14	น้ำแม่ตื่น	3,167.27	3,028.52	(95.6%)	0.00	(0.00%)	93.21	(2.94%)	45.54	(1.44%)
	ลุ่มน้ำปิงตอนบน	25,369.63	19,581.68	(77.2%)	790.16	(3.11%)	3,220.92	(12.70%)	1,776.87	(7.00%)



ภาพที่ 3 การใช้ที่ดินของแต่ละลุ่มน้ำสาขาในลุ่มน้ำปิงตอนบนในปี ค.ศ. 2010–2013

2. การแบ่งลุ่มน้ำย่อยโดยใช้แบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข (Digital Elevation Model, DEM)

ลุ่มน้ำ (Watershed) คือ พื้นที่รองรับน้ำฝนที่ถูกแบ่งด้วยสันปันน้ำ ทำให้เกิดการไหลของน้ำจากสันปันน้ำไปยังพื้นที่ที่ต่ำกว่าและไหลลงสู่ลำน้ำสายย่อย ๆ จากนั้นจึงไหลลงสู่ลำน้ำสายหลักก่อนที่จะไหลไปรวมกันที่จุดออก (Outlet) ซึ่งเป็นจุดที่มีระดับต่ำที่สุดของลุ่มน้ำ โดยลุ่มน้ำสามารถทำการแบ่งแยกเป็นลุ่มน้ำย่อย (Sub-Basin) สำหรับลักษณะทั่วไปของลุ่มน้ำแสดงดังในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 องค์ประกอบของลุ่มน้ำ

ที่มา: ArcGIS 10 Help

สำหรับการแบ่งลุ่มน้ำออกเป็นลุ่มน้ำย่อยสามารถทำได้โดยการพิจารณาขอบเขตของลุ่มน้ำย่อยจากแบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข (DEM) โดยในการศึกษานี้ได้เลือกใช้ผลิตภัณฑ์ SRTM-30 ของหน่วยงาน The U.S. Geological Survey's (USGS) ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น งานวิจัยของ Mukul, M. et al. (2015) เพื่อวิเคราะห์ทิศทางการไหลของน้ำ (Flow Direction) ภายในลุ่มน้ำ จากนั้นจึงกำหนดจุดออก (Pour point, Outlet) ของแต่ละลุ่มน้ำย่อย สำหรับตัวอย่างการแบ่งลุ่มน้ำย่อยโดยใช้เครื่องมือ Watershed ในโปรแกรม ArcGIS 10 แสดงดังในภาพที่ 5 ทั้งนี้ในการศึกษานี้ได้ทำการใช้กระบวนการดังกล่าวเพื่อการแบ่งลุ่มน้ำปึงตอนบนออกเป็นลุ่มน้ำย่อยเพื่อการประยุกต์ใช้กับแบบจำลอง URBS เพื่อประเมินน้ำท่าต่อไป



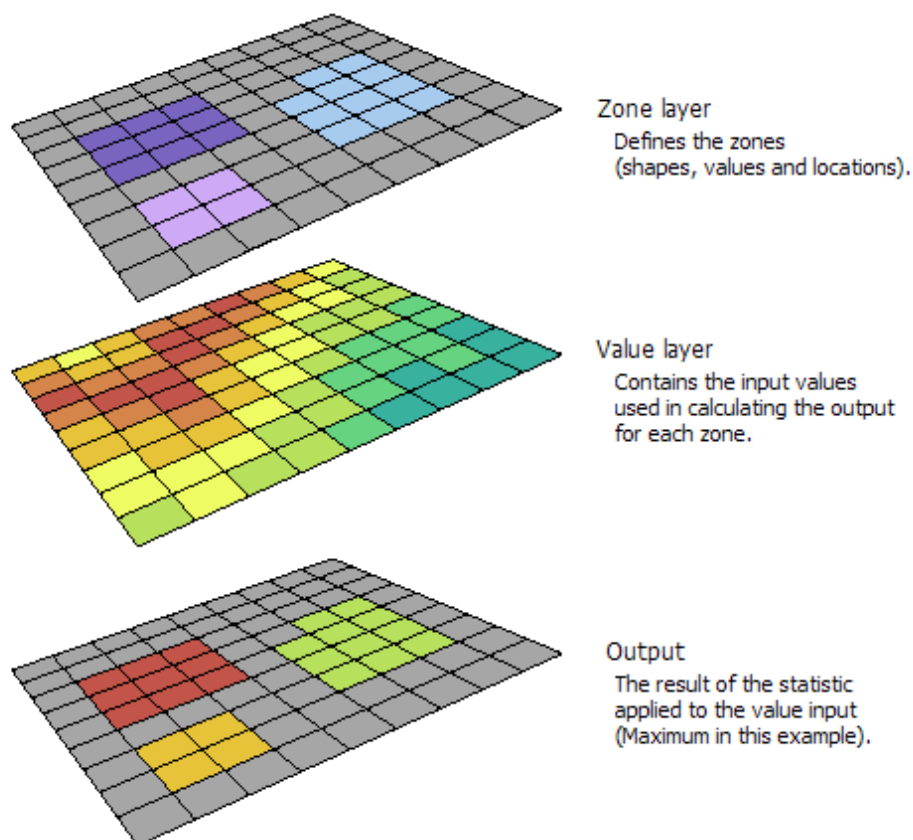
ภาพที่ 5 ลุ่มน้ำย่อยที่ถูกแบ่งโดยเครื่องมือ Watershed ในโปรแกรม ArcGIS 10

ที่มา: ArcGIS 10 Help

3. กระบวนการเฉลี่ยเชิงพื้นที่ (Areal Averaging)

เนื่องจากข้อมูลแผนที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบกริด (Raster) แต่ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาในระดับลุ่มน้ำย่อย จึงจำเป็นต้องเฉลี่ยข้อมูลแผนที่สำหรับทุกกริดภายในลุ่มน้ำย่อยที่ศึกษา โดยได้นำเครื่องมือ Zonal Statistic as Table ที่มีอยู่ใน โปรแกรม ArcGIS 10 มาใช้ในการเฉลี่ยเชิงพื้นที่ (Areal Average) ซึ่งเครื่องมือ Zonal Statistic as Table เป็นเครื่องมือสำหรับหาค่าทางสถิติเชิงพื้นที่ของข้อมูลแบบกริด (Raster) ในขอบเขตที่กำหนด (Zone Layer) สำหรับค่าทางสถิติที่สามารถคำนวณได้ด้วยเครื่องมือ Zonal Statistic as Table ประกอบด้วย (1) ค่าสูงสุด

(Maximum) (2) ค่าต่ำสุด (Minimum) (3) ค่าเฉลี่ย (Mean) (4) มัชยฐาน (Median) (5) พิสัย (Range)
(6) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และ (7) ผลรวม (Sum)



ภาพที่ 6 ตัวอย่างชั้นข้อมูลด้านเข้าและด้านออกสำหรับเครื่องมือ Zonal Statistic as Table
ที่มา: ArcGIS 10 Help

จากภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ข้อมูลด้านเข้ามี 2 ชั้น ประกอบไปด้วย (1) Zone Layer คือ ขอบเขตที่ต้องการประเมินค่าทางสถิติภายใน และ (2) Value Layer คือ ข้อมูลแบบกริดที่ต้องการนำไปประเมินค่าทางสถิติ โดยในที่นี้ได้ยกตัวอย่างการประเมินค่าสูงสุด (Maximum) สำหรับ 3 พื้นที่ และให้ผลลัพธ์ (Output) ดังแสดงในภาพที่ 6

4. ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ของแบบจำลอง URBS

4.1 ทฤษฎีของแบบจำลอง URBS

แบบจำลอง URBS ได้รับการพัฒนาโดย Queensland Department of Natural Resources and Mines ในปี ค.ศ. 1990 เพื่อการพยากรณ์น้ำท่วม URBS เป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ประเภท Semi-Distributed ที่มีหลักการที่สำคัญคือ การแยกการเคลื่อนตัวของน้ำออกเป็น 2 ส่วน คือ การเคลื่อนตัวบนพื้นที่ลุ่มน้ำ (Catchment Routing) และ การเคลื่อนตัวในลำน้ำ (Channel Routing) โดยแบบจำลอง URBS สามารถจำลองการสูญเสียของปริมาณฝนทั้งแบบเหตุการณ์เดียวหรือเหตุการณ์ต่อเนื่องได้ โดยการแยกการจำลองฝนส่วนเกินออกเป็น 2 ส่วน คือ พื้นที่น้ำซึมผ่านไม่ได้และพื้นที่น้ำซึมผ่านได้ แบบจำลอง URBS เป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ที่ได้รับการยอมรับและนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น การศึกษาที่นำเสนอ โดย Carroll, D. (2004); Malone, T. (1999); Mapiam, P. and Sriwongsitanon, N. (2009); Sriwongsitanon, N. (2010) เป็นต้น

โครงสร้างของแบบจำลอง URBS แบ่งออกเป็น 3 ส่วน หลัก ๆ ดังแสดงในภาพที่ 8 ซึ่งประกอบด้วย (1) การวิเคราะห์ฝนส่วนเกิน (Excess Rainfall) (2) การเคลื่อนตัวบนพื้นที่ลุ่มน้ำ (Catchment Routing) และการเคลื่อนตัวในลำน้ำ (Channel Routing) และ (3) การประเมินปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow Model) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การวิเคราะห์ฝนส่วนเกิน (Excess Rainfall)

ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้แบบจำลองปริมาณน้ำท่าแบบสัดส่วน (Proportional Runoff Model) และใช้แบบจำลองการสูญเสียของปริมาณฝนแบบเหตุการณ์ต่อเนื่อง (Continuous Loss) โดยขั้นตอนในการคำนวณมีดังนี้ (นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์, 2556)

1.1) การประเมินปริมาณการสูญเสียเริ่มต้น (Initial Loss, il)

การสูญเสียเริ่มต้น (il) คือ การสูญเสียเนื่องจากการดักโดยพืชพรรณ (Interception) ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณแสดงดังในสมการที่ (1) ถึง สมการที่ (5) โดยปริมาณน้ำฝนทั้งหมดที่ตกลง

มาจะถูกหักการสูญเสียเริ่มต้นดังแสดงในสมการที่ (6) จากนั้นความลึกฝนส่วนที่เหลือ (Effective Rainfall, R_i^{eff}) จะซึมลงไปเก็บกักอยู่ในชั้นดินต่อไป

$$il_i = IL_i \quad \text{เมื่อ } R_i > IL_i \quad (1)$$

$$il_i = R_i \quad \text{เมื่อ } R_i \leq IL_i \quad (2)$$

$$IL_{(i+1)} = IL_i \quad \text{เมื่อ } R_i > rlr \cdot \delta t \quad (3)$$

$$IL_{(i+1)} = IL_i + rlr \cdot \delta t - R_i \quad \text{เมื่อ } R_i \leq rlr \cdot \delta t \quad (4)$$

$$IL_{(i+1)} = IL_{max} \quad \text{เมื่อ } IL_i > IL_{max} \quad (5)$$

$$R_i^{eff} = R_i - il_i \quad (6)$$

โดยที่	il_i	=	ปริมาณการสูญเสียเริ่มต้น ณ ช่วงเวลา i (มิลลิเมตร)
	IL_i	=	ปริมาณการสูญเสียเริ่มต้นที่ยอมรับได้ ณ เวลา i โดยจะต้องไม่เกิน IL_{max} (มิลลิเมตร)
	R_i	=	ปริมาณความลึกฝนทั้งหมด ณ ช่วงเวลา i (มิลลิเมตร)
	R_i^{eff}	=	ปริมาณความลึกฝนหลังจากหักการสูญเสียเริ่มต้น ณ ช่วงเวลา i (มิลลิเมตร)
	$rlr \cdot \delta t$	=	ค่าการคืนสภาพ (มิลลิเมตร)

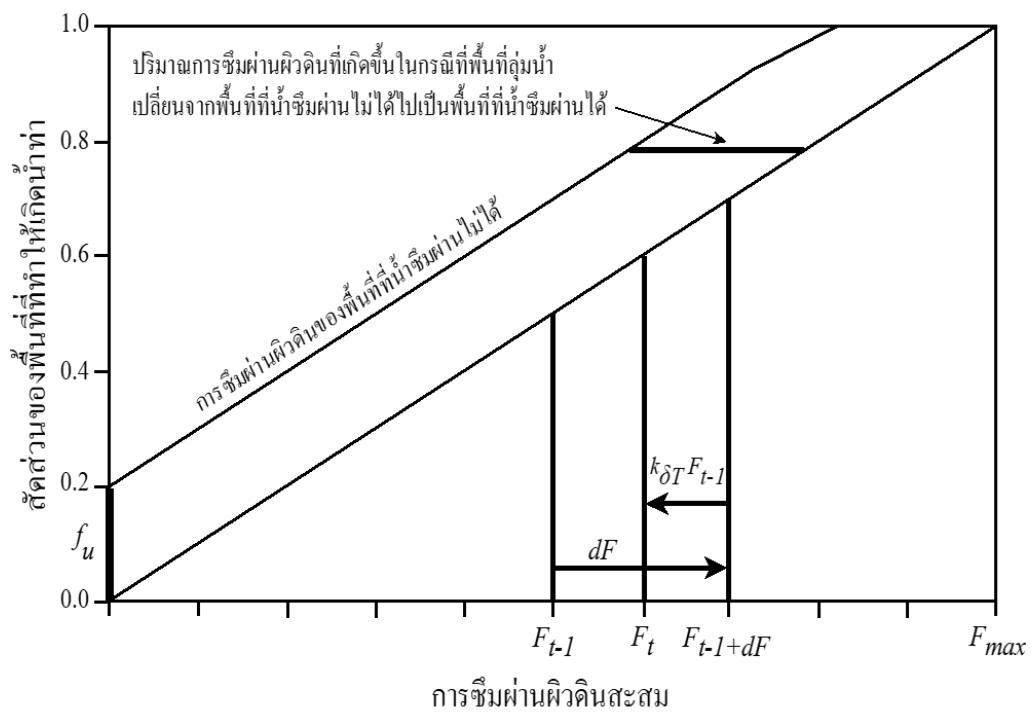
1.2) การประเมินการสูญเสียต่อเนื่องเนื่องจากการซึมลงดิน (Infiltration Loss)

การซึมลงดิน (Infiltration Loss) คือ กระบวนการที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการตัดโดยพืชพรรณ (Interception) โดยที่ปริมาณน้ำฝนส่วนที่เหลือจะซึมลงไปเก็บกักอยู่ในชั้นดิน ซึ่งก็คือความชื้นในดิน (Soil Moisture) โดยที่ปริมาณการซึมลงดินในแต่ละวัน (dF) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (7) หลังจากนั้นปริมาณการซึมในแต่ละวันจะซึมลงไปสะสมเก็บกักอยู่ในดินดังแสดงในสมการที่ (8) ทั้งนี้ได้แสดงแผนภาพกระบวนการซึมลงดินดังในภาพที่ 7

$$dF_i = (1 - pr)R_i^{eff} \quad (7)$$

$$F_i = k_{\delta t}F_{i-1} + dF_i \quad (8)$$

โดยที่	dF_i	=	ปริมาณการซึมลงดิน ณ ช่วงเวลา i (มิลลิเมตร)
	pr	=	สัดส่วนการสูญเสีย
	$k_{\delta t}$	=	สัมประสิทธิ์การคืนสภาพ
	F_i	=	ปริมาณการซึมลงดินสะสม ณ เวลา i (มิลลิเมตร)
	R_i^{eff}	=	ปริมาณความลึกฝนหลังจากหักการสูญเสียเริ่มต้น ณ ช่วงเวลา i (มิลลิเมตร)



ภาพที่ 7 กระบวนการซึมลงดิน (Infiltration Loss)

ที่มา: อุทกวิทยาชั้นสูง (นุชนารถ, 2556)

1.3) การประเมินฝนส่วนเกิน (Rainfall Excess)

การประเมินฝนส่วนเกิน (R^E) ของแบบจำลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ฝนส่วนเกินสำหรับพื้นที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (Impervious Area) และฝนส่วนเกินสำหรับพื้นที่น้ำซึมผ่านได้ (Pervious Area) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (9) สำหรับการแบ่งพื้นที่ทั้ง 2 ส่วน นั้นจะทำการแบ่งโดยสัดส่วนของพื้นที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (F/F_{max}) และสัดส่วนของพื้นที่น้ำซึมผ่านได้ ($1-F/F_{max}$)

$$R_i^E = \frac{F_i}{F_{max}} C_{imp} R_i + \left(1 - \frac{F_i}{F_{max}}\right) R_i^{per} \quad (9)$$

$$R_i^{per} = pr(R_i^{eff}) \quad (10)$$

โดยที่	F_i	=	ปริมาณการซึมลงดินสะสม ณ เวลา i (มิลลิเมตร)
	F_{max}	=	ปริมาณการซึมลงดินสะสมสูงสุดที่ยอมให้ (มิลลิเมตร)
	C_{imp}	=	สัมประสิทธิ์น้ำท่าของพื้นที่ที่น้ำซึมผ่านไม่ได้
	R_i^{per}	=	ปริมาณฝนส่วนเกินของพื้นที่ที่น้ำซึมผ่านได้ ณ ช่วงเวลา i (มิลลิเมตร)
	R_i	=	ปริมาณฝนทั้งหมด ณ ช่วงเวลา i (มิลลิเมตร)
	R_i^{eff}	=	ปริมาณความลึกฝนหลังจากหักการสูญเสียเริ่มต้น ณ ช่วงเวลา i (มิลลิเมตร)
	pr	=	สัดส่วนน้ำฝนที่เหลืออยู่หลังจากหักการสูญเสีย

2) การเคลื่อนตัว (Flow Routing)

2.1) การเคลื่อนตัวบนพื้นที่ลุ่มน้ำ (Catchment Routing)

กระบวนการเคลื่อนตัวบนพื้นที่ลุ่มน้ำของแบบจำลอง URBS มีพื้นฐานมาจาก Reservoir Routing ซึ่งมีสมมุติฐานของแบบจำลอง คือ ปริมาตรเก็บกักในพื้นที่ลุ่มน้ำจะถูกพิจารณาเป็นปริมาตรกักเก็บในลักษณะของอ่างเก็บน้ำแบบไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear Reservoir) โดยเมื่อฝนตกลงสู่พื้นที่ลุ่มน้ำ ปริมาณฝนจะเคลื่อนตัวผ่านแหล่งเก็บกักที่จุดศูนย์กลางของลุ่มน้ำ จากนั้นจะไหล

ออกสู่ลำน้ำ สำหรับการเคลื่อนตัวบนพื้นที่ลุ่มน้ำจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเก็บกัก (S_{catch}) และอัตราการไหลออก (Q) (สมการที่ (10)) ควบคู่กับ สมการต่อเนื่อง (Continuity Equation) (สมการที่ (11))

$$S_{catch} = \left\{ \frac{\beta \sqrt{A}(1+U)^2}{(1+F)^2} \right\} Q^m \quad (10)$$

$$\left(\frac{S_i - S_{i-1}}{\Delta t} \right) = \left(\frac{I_i + I_{i-1}}{2} \right) - \left(\frac{Q_i + Q_{i-1}}{2} \right) \quad (11)$$

โดยที่	S_{catch}	=	ปริมาณการเก็บกักของพื้นที่ลุ่มน้ำ (ลูกบาศก์เมตร ชั่วโมง ต่อ วินาที)
	β	=	พารามิเตอร์การหน่วงของลุ่มน้ำ (Catchment Lag)
	A	=	พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตารางกิโลเมตร)
	F	=	สัดส่วนพื้นที่ป่าไม้
	U	=	สัดส่วนพื้นที่เมือง
	Q	=	ปริมาณการไหลออก (ลูกบาศก์เมตร ต่อ วินาที)
	m	=	พารามิเตอร์การเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเส้นตรง
	S_i	=	ปริมาณการเก็บกักของพื้นที่ลุ่มน้ำ ณ เวลา i (ลูกบาศก์เมตร ชั่วโมง ต่อ วินาที)
	I_i	=	ปริมาณการไหลเข้า (ฝนส่วนเกิน) ณ เวลา i (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
	Q_i	=	ปริมาณการไหลออก ณ เวลา i (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
	Δt	=	ช่วงเวลา (ชั่วโมง)

2.2) การเคลื่อนตัวในลำน้ำ (Channel Routing)

กระบวนการการเคลื่อนตัวในลำน้ำของแบบจำลอง URBS มีพื้นฐานมาจากวิธี Muskingum Routing ซึ่งมีสมมติฐานของแบบจำลอง คือ เมื่อน้ำไหลออกจากแหล่งเก็บกักที่จุดศูนย์กลางของลุ่มน้ำ ซึ่งก็คือปริมาณการไหลเข้าของลำน้ำ หลังจากนั้นจะถูกเคลื่อนตัวไปตามทางน้ำ สำหรับการเคลื่อนตัวในลำน้ำ จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกักเก็บ ($S_{channel}$) และอัตราการไหล (I, Q) ดังแสดงในสมการที่ (12) ควบคู่กับสมการต่อเนื่อง (Continuity Equation)

$$S_{channel} = \alpha f \left\{ \frac{nL}{\sqrt{S_c}} \right\} (XI + (1 - X)Q)^{n1} \quad (12)$$

โดยที่	$S_{channel}$	=	ปริมาณการเก็บกักของลำน้ำ (ลูกบาศก์เมตร ชั่วโมง ต่อ วินาที)
	α	=	พารามิเตอร์การหน่วงของลำน้ำ (Channel Lag)
	L	=	ความยาวลำน้ำ (กิโลเมตร)
	f	=	แฟคเตอร์ความยาวลำน้ำ
	n	=	สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning
	S_c	=	ความชันของลำน้ำ
	$n1$	=	พารามิเตอร์แสดงความไม่เป็นเส้นตรง

3) การประเมินปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow)

แบบจำลอง URBS สามารถประเมินปริมาณการไหลพื้นฐานได้ทั้งแบบคงที่และแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา สำหรับการประเมินการไหลพื้นฐานแบบคงที่ จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับค่าแรกของข้อมูลปริมาณน้ำท่า ตลอดช่วงเวลาที่ทำการศึกษา ในขณะที่ปริมาณการไหลพื้นฐานแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเป็นสัดส่วนแบบไม่เป็นเส้นตรงกับปริมาณน้ำท่าโดยตรง (Q_r) ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยการใช้สมการดังต่อไปนี้

$$Qb_i = BR(Qb_{i-1}) + BC(Q_r)^{BM} \quad (13)$$

โดยที่	Qb	=	ปริมาณการไหลพื้นฐานสำหรับช่วงเวลา i และ $i-1$ ตามลำดับ
	BR	=	แฟคเตอร์ถดถอยของปริมาณการไหลพื้นฐานรายวัน
	BC	=	ค่าคงที่ของการไหลพื้นฐาน
	BM	=	ค่าเลขกำลังการไหลพื้นฐาน

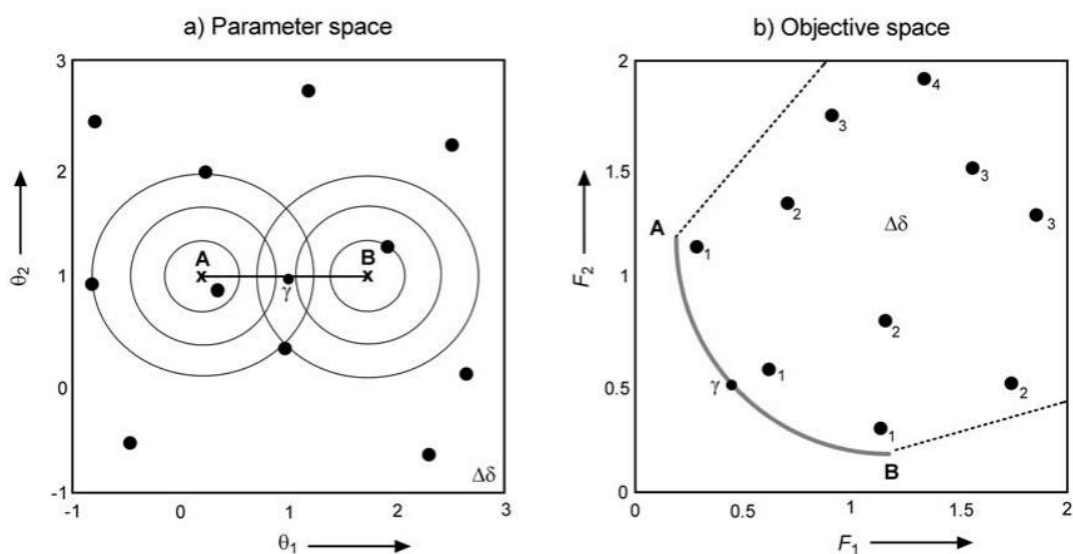
4.2 การประยุกต์ใช้ของแบบจำลอง URBS

นุชนารถ และคณะ (2550) ได้ดำเนินงานวิจัยเรื่อง “การประยุกต์แบบจำลองอุทกวิทยาเพื่อการจำลองปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำท่วมสำหรับลุ่มน้ำปิงตอนบนและลุ่มน้ำยม” ซึ่งเป็นโครงการวิจัยย่อยของโครงการวิจัยหลักเรื่อง “ระบบการพยากรณ์และเตือนภัยน้ำท่วมตามเวลาจริงสำหรับลุ่มน้ำปิงตอนบนและลุ่มน้ำยม” โดยในงานวิจัยย่อยดังกล่าว ได้คัดเลือกแบบจำลอง URBS มาประยุกต์ใช้เพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าต่าง ๆ ในลุ่มน้ำปิงตอนบน และลุ่มน้ำยม ทั้งนี้ ได้ยกตัวอย่างผลการศึกษาลงสำหรับลุ่มน้ำปิงตอนบน โดยแบบจำลอง URBS ได้ถูกประยุกต์ใช้สำหรับสถานีวัดน้ำท่าจำนวน 13 สถานี ซึ่งประกอบด้วย สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.4A, P.28, P.21, P.1, P.71, P.5, P.77, P.24A, P.29, P.76, P.73, และ P.14 ซึ่งตั้งอยู่ที่ลุ่มน้ำย่อยแม่น้ำปิงตอนบน โดยเมื่อพิจารณาค่าทางสถิติทั้ง 3 ตัวแปร ประกอบด้วย r , NSE และ $RMSE$ พบว่าแบบจำลอง URBS มีความสามารถในการประเมินปริมาณน้ำท่วมที่มีความถูกต้องอยู่ในระดับสูง

เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลอง URBS มีความสามารถในการประเมินปริมาณน้ำท่วมได้อย่างมีประสิทธิภาพจริง จึงได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างกราฟน้ำท่วมที่ประเมินได้จากแบบจำลอง URBS และแบบจำลอง NAM โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลการประเมินกราฟน้ำท่วมสำหรับ 5 สถานี ซึ่งประกอบด้วย สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.4A, P.28, P.21, และ P.71 จากผลการศึกษารูปได้ว่าแบบจำลอง URBS มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เพื่อการประเมินกราฟน้ำท่าและกราฟน้ำท่วมสำหรับลุ่มน้ำปิงตอนบน

5. MOSCEM (Multi Objective Shuffle Complex Evolution Matropolis)

โปรแกรม MOSCEM ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย Vrugt, J. et al. (2003) เพื่อการสอบเทียบแบบจำลองทางอุทกวิทยาแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Function) โดยเริ่มจากการสุ่มประชากรชุดแรกด้วยวิธี Latin Hyper Cube เพื่อสร้างประชากรชุดเริ่มต้นที่มีการกระจายตัวทั่วทั้งมิติ และทำการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับประชากรทุกตัวที่สุ่มมา จากนั้นทำการจัดลำดับของประชากรแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยกระบวนการ Pareto Ranking (Goldberg, D. E., 1989) แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการสุ่มซ้ำโดยใช้อัลกอริทึม Markov Chain Monte Carlo Sample เพื่อให้ได้ประชากรชุดถัดไป สำหรับผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาโดย MOSCEM จะเป็นชุดคำตอบที่เหมาะสมที่สุดซึ่ง เรียกว่า Pareto Front ซึ่งก็คือ ชุดพารามิเตอร์ที่มีค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์อยู่ในลำดับที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 8 กล่าวคือ Pareto Front เป็นชุดพารามิเตอร์ที่มีค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ไม่แพ้พารามิเตอร์ชุดอื่น ๆ หรือในกรณีการแก้ปัญหาแบบ Minimize จะไม่มีพารามิเตอร์ชุดไหนที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยกว่าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Pareto Front



ภาพที่ 8 หลักการของกระบวนการ Pareto Ranking สำหรับปัญหาที่มีสองพารามิเตอร์ (θ_1, θ_2) (a) และมีสองวัตถุประสงค์ (F_1, F_2) (b)

6. Genetic Algorithm

ในการศึกษานี้ ได้นำ Genetic Algorithm ซึ่งเป็น Algorithm แบบสุ่มอย่างมีเงื่อนไข (Random Base) โดยการเลียนแบบกลไกทางเพื่อการอยู่รอดของยีนที่แข็งแรงที่สุด (Goldberg, D. E., 1989) และโครงสร้างของ GA มีความแตกต่างจากกระบวนการอื่น ๆ 4 ข้อคือ

- 1) Genetic Algorithm จะมีการประมวลผลโดยใช้ตัวแปรตัดสินใจเป็นชุด (String) ไม่ใช่ตัวเดียว
- 2) Genetic Algorithm จะมีการลู่เข้าโดยใช้กลุ่มของชุดตัวแปรตัดสินใจ (Population) ไม่ใช่ชุดเดียว
- 3) Genetic Algorithm จะมีการลู่เข้าด้วยกระบวนการของตัวเอง ไม่เกี่ยวข้องกั้อัตราการเปลี่ยนแปลงใด ๆ
- 4) Genetic Algorithm จะมีคำตอบที่ไม่เท่ากันสำหรับการคำนวณใหม่เนื่องจากเป็น Probabilistic ไม่ใช่ Deterministic

กลไกการอยู่รอดของโครโมโซมได้นำกระบวนการ Roulette Wheel Method มาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างโครโมโซมชุดใหม่โดยที่โครโมโซมที่แข็งแรงในชุดก่อนจะถูกคัดลอกมาในจำนวนที่เยอะเพื่อมาแทนที่โครโมโซมที่ถูกคัดออกสำหรับเป็นประชากรของโครโมโซมในชุดถัดไป โดยได้แสดงขั้นตอนการทำงานของ Genetic Algorithm ดังในภาพที่ 9

กระบวนการทำงานของ Genetic Algorithm จากภาพที่ 9 สามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) สุ่มประชากรชุดเริ่มต้น (Initial Population) สำหรับกระบวนการรอบแรก ($i = 1$) โดยการกำหนดจำนวนของประชากร
- 2) แปลงค่าของประชากรทุกตัว (Strings) จากเลขฐานสอง (Binary Bit Code) ไปเป็นเลขฐานสิบ (Decimal Value) จากนั้นจึงคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Fitness Function) เพื่อคัดเลือกประชากรที่เหมาะสมที่สุด (Elite Child Strings) ตามจำนวนที่กำหนดสำหรับรอบนั้น ๆ และคัดเลือกประชากรด้วยกระบวนการ Proportionate Rank และ Roulette wheel สำหรับนำไปทำกระบวนการลู่เข้า (Dominate Strings)

3) ทำการ Crossover ระหว่างประชากร (String) 2 ตัว หรือ 1 คู่ โดยที่จำนวนคู่ของการเกิดกระบวนการ Crossover นั้นขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นของการเกิด Crossover และตำแหน่งของการเกิด Crossover ของคู่ประชากรนั้นได้มาจากการสุ่ม

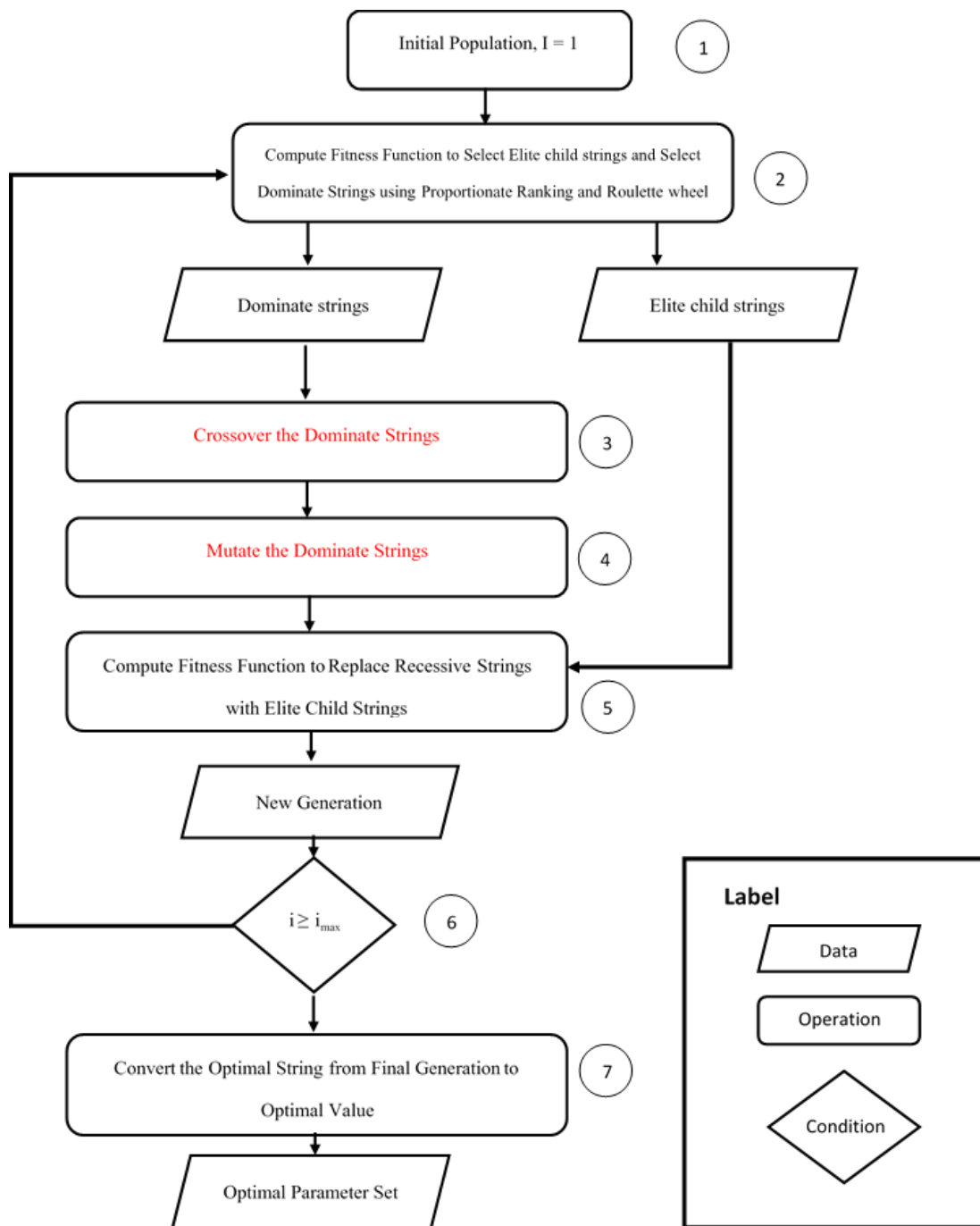
4) ทำการ Mutation ของประชากร (String) แต่ละตัว โดยที่การเกิด Mutation ของประชากรชุดนั้น ๆ (Population) จะเกิดหรือไม่เกิดนั้นขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นของการเกิด Mutation ซึ่งเมื่อเกิดการ Mutation ตำแหน่งของการเกิดจะสอดคล้องไปกับโอกาสของการเกิด และมีผลทำให้ตำแหน่งของการเกิดในประชากรแต่ละตัวมีรูปแบบที่ตายตัวขึ้นอยู่กับกระบวนการที่เลือกใช้

5) ทำการแปลงค่าของประชากรทุกตัว (Strings) จากเลขฐานสอง (Binary Bit Code) เป็นเลขฐานสิบ (Decimal Value) และทำการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Fitness Function) อีกครั้งเพื่อคัดกรองประชากรที่ไม่เหมาะสม (Recessive Strings) ออก แล้วจึงนำประชากรที่เหมาะสมที่สุด (Elite Child Strings) ที่ได้จากกระบวนการที่ 2 มาแทนที่เพื่อเป็นประชากรในรุ่นถัดไป (New Generation)

6) ทำกระบวนการที่ 2 ถึง 5 ซ้ำถ้าจำนวนรอบ (i) ยังไม่ถึงจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนด (imax)

7) ทำการแปลงประชากรที่เหมาะสมที่สุด (Optimal String) ในรุ่นสุดท้าย (Final Generation) จากเลขฐานสอง (Binary Bit Code) ไปเป็นเลขฐานสิบ (Decimal Value) ซึ่งก็คือค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Value)





ภาพที่ 9 ขั้นตอนการทำงานของ Genetic Algorithm

7. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการสอบเทียบอัตโนมัติ

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการสอบเทียบอัตโนมัติ ได้ประยุกต์ใช้ดัชนีประสิทธิภาพ Kling-Gupta Efficiency (KGE) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (14) โดยที่ค่า KGE มีค่าอยู่ระหว่าง $-\infty$ ถึง 1 ในกรณีที่ KGE มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าชุดข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์แบบปฏิกิริยาโดยตรงที่ดีมากและปริมาณทั้งสองสำหรับทุกค่า มีค่าใกล้เคียงกันมาก และในกรณีที่ KGE มีค่าเข้าใกล้ $-\infty$ แสดงว่าชุดข้อมูลทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์ทั้งในเชิงปฏิกิริยาและเชิงปริมาณ

$$KGE = 1 - ED \quad (14)$$

$$ED = \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (15)$$

$$\alpha = S_Y/S_X \quad (16)$$

$$\beta = \bar{Y}/\bar{X} \quad (17)$$

โดยที่	\bar{X}	=	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด
	\bar{Y}	=	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง
	S_X	=	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด
	S_Y	=	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง
	r	=	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ในการศึกษานี้ได้นำ KGE มาประยุกต์ใช้สำหรับการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยแบ่งออกเป็น 3 ฟังก์ชันดังนี้

1) KGE คือการประเมิน KGE ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองและข้อมูลตรวจวัด โดยพิจารณาจากข้อมูลอัตราการไหล

2) KGE_{LF} คือการประเมิน KGE ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองและข้อมูลตรวจวัด โดยพิจารณาจากลอการิทึมของอัตราการไหล เพื่อให้ความสำคัญกับอัตราการไหลในช่วงหน้าแล้ง หรือช่วงเวลาที่อัตราการไหลต่ำ (Low Flow)

3) KGE_{FDC} คือการประเมิน KGE ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองและข้อมูลตรวจวัด โดยพิจารณาจากโค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลา (Flow Duration Curve) เพื่อให้ความสำคัญกับสมดุลน้ำ (Water Balance) โดยที่ปริมาณที่ทุกช่วงเวลาต้องมีปริมาณที่ไม่ต่างกันมาก

8. Nash-Sutcliffe's Efficiency (NSE)

ค่าตัวแปรทางสถิติที่นำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพ ระหว่างผลการคำนวณจากแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า และข้อมูลตรวจวัด คือ Nash-Sutcliffe's Efficiency (NSE) (Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V., 1970) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (18) โดยที่ค่า NSE มีค่าอยู่ระหว่าง $-\infty$ ถึง 1 ในกรณีที่ NSE มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าชุดข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์แบบปฏิภาคโดยตรงที่ดีมากและปริมาณทั้งสองสำหรับทุกค่า มีค่าใกล้เคียงกันมาก และในกรณีที่ NSE มีค่าเข้าใกล้ $-\infty$ แสดงว่าชุดข้อมูลทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์ทั้งในเชิงปฏิภาคและเชิงปริมาณ

$$NSE = 1 - \frac{[\sum_i^N (Y_i - X_i)^2]}{[\sum_i^N (Y_i - \bar{Y})^2]} \quad (18)$$

โดยที่	X_i	=	ผลการคำนวณจากแบบจำลอง
	Y_i	=	ข้อมูลการตรวจวัด
	\bar{Y}	=	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด
	N	=	จำนวนข้อมูล
	i	=	แสดงถึงลำดับของอนุกรมข้อมูล

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อม โปรแกรมมีใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งประกอบด้วย โปรแกรม ArcGIS 10, MATLAB 2017 และ Python 2.7
2. ผลิตภัณฑ์ฝนรายวันแบบกริด SENSWAT-GGR ที่พัฒนาขึ้นโดยศูนย์วิจัยการรับรู้จากระยะไกลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (SENSWAT) และข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายวันในลุ่มน้ำปึงตอนบน ซึ่งทำการตรวจวัดโดยกรมชลประทาน
3. ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model, DEM) ของลุ่มน้ำปึงตอนบน โดยเลือกใช้ผลิตภัณฑ์จากหน่วยงาน Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)
5. ห้องดำเนินงานวิจัยและสาธิตรูปโลก

วิธีการ

วิทยานิพนธ์เรื่อง “การพัฒนาแบบจำลอง KU-URBS เพื่อการสอบเทียบแบบอัตโนมัติโดยใช้ MOSCEM และ Genetic Algorithm” มีขั้นตอนในการดำเนินงานโดยสรุปดังต่อไปนี้

1. รวบรวมข้อมูลเพื่อประกอบการศึกษาซึ่งประกอบด้วย (1) ข้อมูลน้ำท่ารายวันที่สถานีวัดน้ำท่าต่าง ๆ ที่ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำปึงตอนบน ที่มีสถิติข้อมูลยาวนานเพียงพอจากอดีตจนถึงปี ค.ศ. 2013 จากกรมชลประทาน (2) ข้อมูลน้ำฝนรายวันที่ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำปึงตอนบนโดยเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ฝนแบบกริด SENSWAT-GGR ที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องแล้วโดยวิธี Double Mass Curve ที่ดำเนินงานภายใต้โครงการวิจัยเรื่อง The Development of High-Accuracy Remote Sensing Rainfall Products (Sriwongsitanon, N. et al., 2019) จากอดีตจนถึงปี ค.ศ. 2013 และ (3) ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลข (DEM) โดยเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ SRTM-30

2. แบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยสำหรับพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่าที่เลือกพิจารณา จากนั้นวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะทางกายภาพของกลุ่มน้ำย่อยต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย (1) พื้นที่รับน้ำฝน (2) ความยาวลำน้ำจากจุดไกลสุดบนสันปันน้ำจนถึงจุดออกของกลุ่มน้ำย่อย และ (3) ความยาวลำน้ำ ณ จุดที่ใกล้จุดศูนย์ถ่วงลุ่มน้ำมากที่สุดจนถึงจุดออกของกลุ่มน้ำย่อย

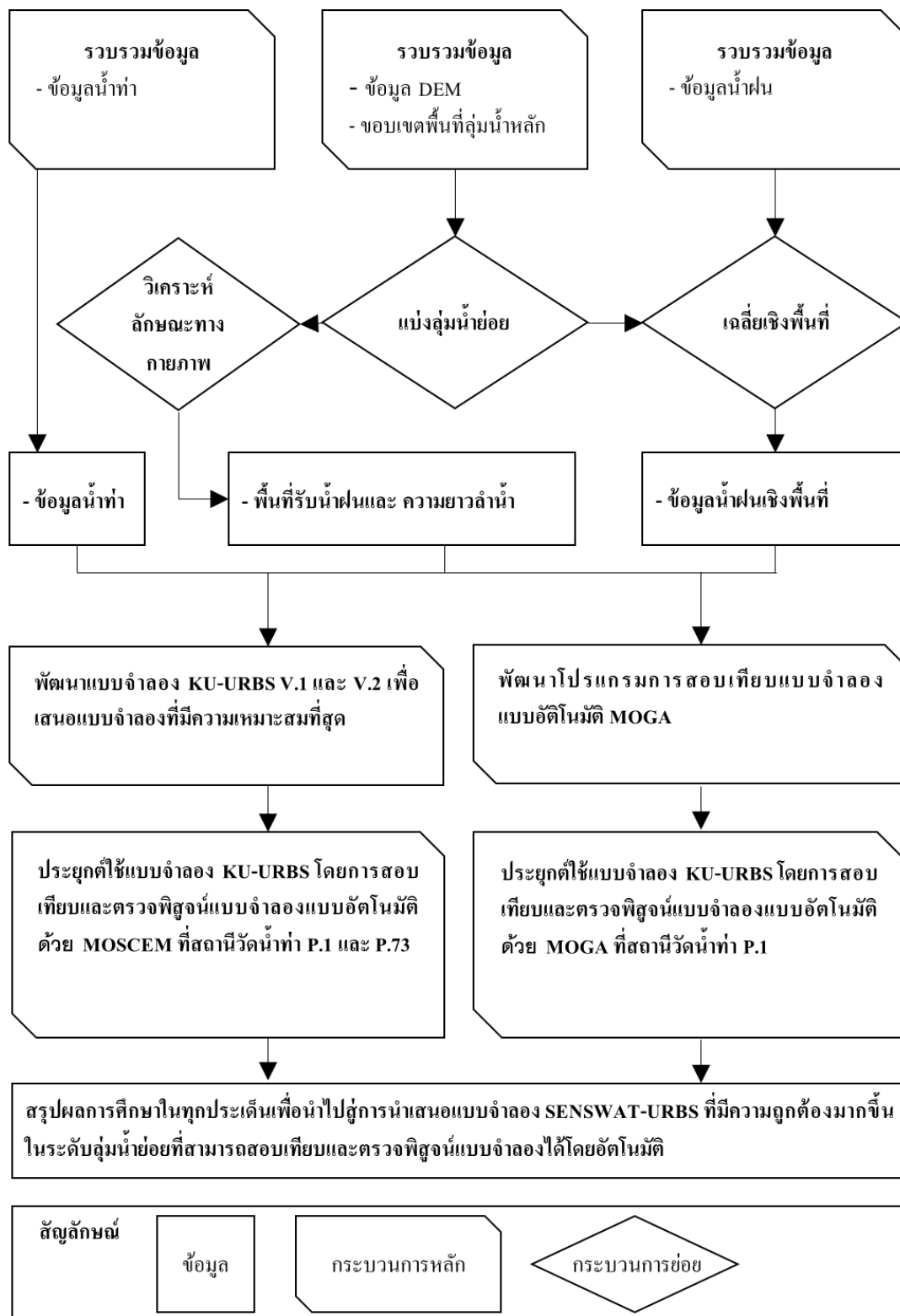
3. วิเคราะห์ข้อมูลความลึกฝนเชิงพื้นที่แบบรายวันของแต่ละกลุ่มน้ำย่อยจากผลิตภัณฑ์ฝนแบบกริด SENSWAT-GGR โดยการเฉลี่ยเชิงพื้นที่ (Areal Average)

4. พัฒนาแบบจำลอง KU-URBS เพื่อการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติโดยการใช้ MOSCEM โดยการเขียน โปรแกรมเชื่อมต่อระหว่างแบบจำลอง KU-URBS กับโปรแกรม MOSCEM ที่ได้รับการพัฒนามาแล้วโดย Vrugt, J. et al. (2003) เพื่อการหาค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองที่เหมาะสม โดยใช้ฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objectives Optimization)

5. ประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-URBS โดยการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติด้วย MOSCEM โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองที่ได้รับการพัฒนากับสถานีวัดน้ำท่าที่ได้รับการคัดเลือกกับลุ่มน้ำปึงตอนบน

6. พัฒนาโปรแกรมการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติ Genetic Algorithm เพื่อการหาค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองที่เหมาะสม โดยใช้ฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) จากนั้นทำการประยุกต์ใช้ Genetic Algorithm เพื่อสอบเทียบแบบจำลอง KU-URBS กับสถานีวัดน้ำท่าที่ได้รับการคัดเลือกกับลุ่มน้ำปึงตอนบน จากนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกระบวนการที่ดำเนินงานโดยโปรแกรม MOSCEM

จากขั้นตอนดังกล่าว สามารถอธิบายขั้นตอนการดำเนินงานในลักษณะของแผนผังดังแสดงในภาพที่ 10 พร้อมทั้งแสดงรายละเอียดสำหรับวิธีการดังกล่าวในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 10 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. การรวบรวมข้อมูล

1.1 ข้อมูลปริมาณน้ำท่าตรวจวัด

ในการศึกษานี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลปริมาณน้ำท่าจากสถานีวัดน้ำท่าต่าง ๆ ที่ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำปิงตอนบน พบว่ามีจำนวนสถานีวัดน้ำท่าของกรมชลประทานทั้งสิ้น 61 สถานี อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ได้พิจารณาเลือกเฉพาะสถานีที่มีข้อมูลอยู่ในช่วงเวลาที่ทำการศึกษาในปี ค.ศ.2003 ถึง ปี ค.ศ. 2013 พร้อมทั้งต้องเป็นสถานีที่ยังคงทำการตรวจวัดข้อมูลน้ำท่าอย่างต่อเนื่องถึงปัจจุบันซึ่งพบว่ามีจำนวนทั้งสิ้น 18 สถานี อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ได้พิจารณาตัดสถานีวัดน้ำท่าออกอีก 5 สถานี ออกจากการศึกษา โดยมีสาเหตุดังต่อไปนี้

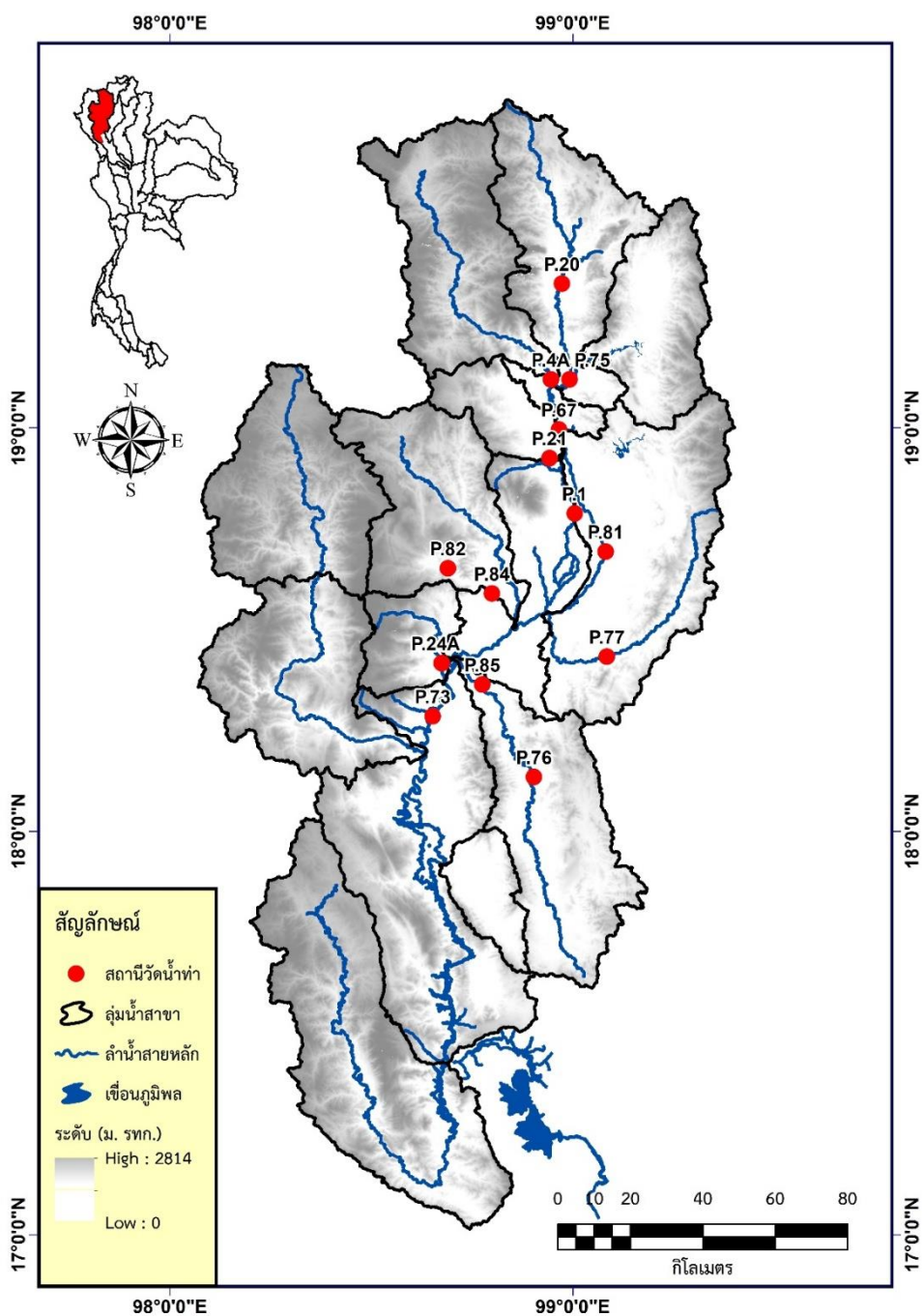
1) สถานีวัดน้ำท่า P.56A เนื่องจากเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชลซึ่งตั้งอยู่ทางด้านท้ายน้ำของกลุ่มน้ำแม่งัดทำให้ไม่สามารถใช้แบบจำลองเพื่อประเมินน้ำท่าของกลุ่มน้ำแม่งัดได้อย่างถูกต้อง ในการศึกษานี้จึงใช้ข้อมูลปริมาณการไหลออกของอ่างเก็บน้ำแม่งัดมาเป็นปริมาณการไหลเข้าด้านข้าง (Lateral Inflow) ของลำน้ำปิง จึงได้ตัดสถานี P.56A ซึ่งตั้งอยู่ทางด้านเหนือน้ำของอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชลออก

2) สถานีวัดน้ำท่า P.5, P.79 และ P.80 เนื่องจากข้อมูลไม่มีความสมบูรณ์ทั้งช่วงเวลาที่ทำการศึกษาในปี ค.ศ.2003 ถึง ปี ค.ศ. 2013 ซึ่งข้อมูลที่ขาดหายเป็นจำนวน 766, 365, 730 วันตามลำดับ ในช่วงเวลาดังกล่าว

3) สถานีวัดน้ำท่า P.85 เนื่องจากมีปริมาณน้ำท่าในฤดูแล้งที่น้อยกว่าสถานีวัดน้ำท่าทางด้านเหนือด้าน ซึ่งก็คือสถานี P.76 โดยมีปริมาณน้ำท่าในฤดูแล้งเฉลี่ยเท่ากับ 24 และ 30 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

สำหรับรายละเอียดของตำแหน่งที่ตั้งและสถิติข้อมูลของสถานีวัดน้ำท่าทั้ง 18 สถานีแสดงดังในตารางที่ 3 สำหรับตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้ดังในภาพที่ 11 นอกจากนี้แล้วในตารางที่ 4 ได้แสดงปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือน เฉลี่ยรายฤดูกาล และเฉลี่ยรายปี ในหน่วยล้านลูกบาศก์เมตร โดยในตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยของสถานีวัดน้ำท่าทั้ง 18 สถานี มีค่าอยู่ระหว่าง 58 ถึง 4,110 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยค่าสูงสุดและต่ำสุดเกิดขึ้นที่สถานี

วัดน้ำท่า P.73 และ P.80 ตามลำดับ สำหรับปริมาณการให้น้ำจำเพาะ (Specific Yield) ของสถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้ มีค่าอยู่ระหว่าง 4.07 ถึง 19.12 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีต่อตารางกิโลเมตร โดยค่าสูงสุดและต่ำสุดเกิดขึ้นที่สถานีวัดน้ำท่า P.85 และ P.79 ซึ่งตั้งอยู่ในลุ่มน้ำสาขาแม่ตี๋ และแม่กง ตามลำดับ



ภาพที่ 11 ตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่าที่ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำปิงตอนบนที่มีข้อมูลยาวเพียงพอและมีการตรวจวัดต่อเนื่องในปัจจุบัน

ตารางที่ 3 รายชื่อสถานีวัดน้ำท่า ตำแหน่งที่ตั้งและช่วงปีสถิติข้อมูลของสถานีวัดน้ำท่า
ในกลุ่มน้ำปิงตอนบนที่มีข้อมูลระหว่างปี ค.ศ. 2003–2013 และมีการตรวจวัดต่อเนื่องใน
ปัจจุบัน

ลำดับ	รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ที่ตั้ง				ลุ่มน้ำย่อย	ช่วงปีสถิติ		พื้นที่รับน้ำ (ตร. กม.)
			อำเภอ	จังหวัด	ละติจูด	ลองจิจูด		ข้อมูล (ค.ศ.)	เริ่มต้น	
1	P.20	บ้านเชียงคาว	อ.เชียงคาว	จ.เชียงใหม่	19.37	98.97	แม่น้ำปิงตอนบน	1979	ปัจจุบัน	1,345
2	P.75	บ้านช่อแล	อ.แม่แตง	จ.เชียงใหม่	18.14	99.01	น้ำแม่ลี	1999	ปัจจุบัน	3,080
3	P.4A	บ้านแม่แตง	อ.แม่แตง	จ.เชียงใหม่	19.12	98.95	แม่น้ำแม่แตง	1955	ปัจจุบัน	1,930
4	P.67	บ้านแม่แต	อ.สันทราย	จ.เชียงใหม่	19.02	98.96	แม่น้ำปิงส่วนที่ 2	1996	ปัจจุบัน	5,323
5	P.21	บ้านริมใต้	อ.แมริม	จ.เชียงใหม่	18.93	98.94	น้ำแมริม	1954	ปัจจุบัน	452
6	P.1	สะพานนารัฐ	อ.เมือง	จ.เชียงใหม่	18.79	99.01	น้ำแม่กวง	1921	ปัจจุบัน	6,350
7	P.81	บ้านโป่ง	อ.สันกำแพง	จ.เชียงใหม่	18.69	99.08	น้ำแม่กวง	2002	ปัจจุบัน	1,190
8	P.77	บ้านสบแม่สะปิวัด	อ.แม่ทา	จ.ลำพูน	18.42	98.08	น้ำแม่แจ่มตอนล่าง	1999	ปัจจุบัน	550
9	P.82	บ้านสบวิน	อ.แม่วาง	จ.เชียงใหม่	18.65	98.69	น้ำแม่งาน	2003	ปัจจุบัน	-
10	P.84	บ้านพันตน	อ.แม่วาง	จ.เชียงใหม่	18.59	98.8	น้ำแม่งาน	2003	ปัจจุบัน	-
11	P.76	บ้านแม่ฮิไซ	อ.ลี่	จ.ลำพูน	18.14	98.9	น้ำแม่ลี	2000	ปัจจุบัน	1,545
12	P.85	บ้านหลายแก้ว	อ.บ้านโฮ้ง	จ.ลำพูน	18.36	98.78	น้ำแม่ลี	2003	ปัจจุบัน	-
13	P.24A	สะพานประชาอุทิศ	อ.จอมทอง	จ.เชียงใหม่	18.42	98.67	น้ำแม่กลาง	1973	ปัจจุบัน	452
14	P.73	บ้านสบสอย	อ.จอมทอง	จ.เชียงใหม่	18.29	98.65	แม่น้ำปิงส่วนที่ 3	1998	ปัจจุบัน	14,814
15	P.5	สะพานท่านาง	อ.เมือง	จ.ลำพูน	18.58	99.01	น้ำแม่กวง	1954	ปัจจุบัน	1,569
16	P.56A	บ้านสหกรณ์ร่มเกล้า	อ.พร้าว	จ.เชียงใหม่	19.28	99.19	น้ำแม่จัด	1999	ปัจจุบัน	546
17	P.79	บ้านแม่หวาน	อ.ดอยสะเก็ด	จ.เชียงใหม่	18.96	99.24	น้ำแม่กวง	2001	ปัจจุบัน	136
18	P.80	บ้านโป่งดิน	อ.ดอยสะเก็ด	จ.เชียงใหม่	18.91	99.24	น้ำแม่กวง	2001	ปัจจุบัน	129

ตารางที่ 4 ปริมาณน้ำท่ารายเดือน รายฤดูกาลและรายปีเฉลี่ยของสถานีวัดน้ำท่าที่ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำปิงตอนบนที่มีข้อมูลระหว่างปี ค.ศ. 2003–2013 และมีการตรวจวัดต่อเนื่องในปัจจุบัน

ลำดับ	รหัสสถานี	ปริมาณน้ำท่า (ล้าน ลบ.ม.)															Specific Yield (ลิตร/วินาที/ ตร.กม.)
		เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	รายปี	
1	P.20	16.9	26.4	24.5	48.4	92.9	131.3	78.9	31.1	17.3	12.0	7.0	6.9	402	91	494	11.64
2	P.75	45.8	47.3	45.2	51	115.5	174.3	114.9	56.9	31	25.8	31.0	42.5	548	233	781	8.04
3	P.4A	7.9	29.7	23.3	23.1	70.2	129.8	59	39.1	15.5	2.5	1.3	1.1	335	67	402	6.61
4	P.67	63.8	83.9	85	90	219.4	371.7	206.1	114.7	50.7	36.8	23.5	30.6	1,056	320	1,376	8.20
5	P.21	2.0	8.6	9.4	13.7	25.2	35.5	22.3	11.9	6.2	4.0	1.8	1.6	115	28	142	9.98
6	P.1	52	95.9	101.2	123.1	259.3	411.3	240.7	125.9	60.3	32.4	29.1	39.7	1,232	339	1,571	7.85
7	P.81	8.1	23.7	14.6	25.7	69.9	83.6	43.2	16.5	5.0	5.9	6.2	5.6	261	47	308	8.21
8	P.77	2.0	6.6	4.9	9.7	20.6	36.7	19.8	8.0	4.0	2.5	1.9	2.2	98	21	119	6.87
9	P.82	4.6	12.8	12.1	12.9	19.6	43.5	38.1	21.3	13.8	9.7	6.1	5.1	139	61	200	16.20
10	P.84	1.7	9.1	6.6	5.5	12.4	33.8	29.8	13.3	7.7	2.8	1.2	1.3	97	28	125	8.75
11	P.76	4.1	28.2	15.4	10.1	24	65.8	73	16.1	4.9	2.5	1.3	1.1	216	30	247	5.06
12	P.85	1.5	19.5	14.3	9.5	28.7	79.2	77.5	13.7	4.3	2.8	0.9	1	229	24	253	4.07
13	P.24A	2.7	12.5	9.2	8.8	16.7	43.8	39.5	16.3	6.9	3.6	2.2	2.1	131	34	164	11.53
14	P.73	63.1	276.8	221.9	255.7	662	1191.4	816	334.5	136.2	66.6	44.6	42.1	3,424	687	4,111	8.80
15	P.5	13.7	41.2	32.7	43.7	125.6	154.2	87.8	37.7	11.9	9.7	9.8	6.9	485	90	575	11.62
16	P.56A	4.6	9.9	10.1	18.7	39	48.3	27.8	14.9	7.7	5.1	3.2	2.7	154	38	192	11.16
17	P.79	3.5	5	5.8	8.2	11.7	14	9.3	6.8	5.5	4.8	3.7	3.7	54	28	82	19.12
18	P.80	1.5	2.5	3	4.5	11.4	14.1	8.8	4.2	3.1	2.2	1.7	1.5	44	14	59	14.38

1.2 ข้อมูลฝนเชิงพื้นที่แบบกริด (Gridded Gauged Rainfall)

ในการศึกษานี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลปริมาณน้ำฝนแบบกริด (Gridded Gauged Rainfall) จากการศึกษาของ Sriwongsitanon, N. et al. (2019) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2003 จนถึงปี ค.ศ. 2013 ที่สร้างจากข้อมูลสถานีตรวจวัดทั่วประเทศไทยของหน่วยงานต่าง ๆ โดยแบ่งออกเป็นสถานีวัดน้ำฝนของกรมชลประทาน จำนวน 1150 สถานี กรมอุตุนิยมวิทยา จำนวน 582 สถานี และหน่วยงานอื่น ๆ จำนวน 47 สถานี สำหรับสถานีวัดน้ำฝนที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนมีทั้งสิ้น 131 สถานี โดยเป็นสถานีวัดน้ำฝนของกรมชลประทาน จำนวน 62 สถานี กรมอุตุนิยมวิทยา จำนวน 46 สถานี และหน่วยงานอื่น ๆ จำนวน 20 สถานี โดยแสดงตำแหน่งของสถานีวัดน้ำฝนดังในภาพที่ 12 โดยข้อมูลฝนเฉลี่ยรายเดือน และเฉลี่ยรายปี ในช่วงเวลาปี ค.ศ. 2003–2013 สำหรับแต่ละลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำปิงตอนบนแสดงดังในตารางที่ 5 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความลึกฝนรายปีเฉลี่ยทั้งลุ่มน้ำปิงตอนบนในช่วงเวลาปี ค.ศ. 2003–2013 มีค่าเท่ากับ 1,168 มิลลิเมตรต่อปี โดยมีค่าสูงสุดในลุ่มน้ำแม่แจ่มตอนบน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,459 มิลลิเมตรต่อปี และต่ำสุดในลุ่มน้ำแม่ปิงส่วนที่ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 984 มิลลิเมตรต่อปี

เนื่องจากในการศึกษานี้ได้ใช้ข้อมูลฝนรายวันแบบกริดเป็นข้อมูลด้านเข้าให้กับแบบจำลอง URBS เพื่อการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าต่าง ๆ ที่เลือกพิจารณาจำนวน 13 สถานี ดังนั้น จึงได้ทำการประเมินความลึกฝนเฉลี่ยรายเดือนและเฉลี่ยรายปีในช่วงเวลาปี ค.ศ. 2003–2013 ดังแสดงในตารางที่ 6 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความลึกฝนรายปีเฉลี่ยมีค่าสูงสุดในสถานี P.4A ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,384 มิลลิเมตรต่อปี และต่ำสุดในสถานี P.76 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,045 มิลลิเมตรต่อปี

ตารางที่ 5 ข้อมูลฝนเฉลี่ยรายเดือนและเฉลี่ยรายปีในช่วงเวลาปี ค.ศ. 2003 จนถึงปี ค.ศ. 2013
สำหรับแต่ละลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำปึงตอนบน

หน่วย: มิลลิเมตร

ลำดับ	ลุ่มน้ำสาขา	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รายปี
1	แม่น้ำปึงตอนบน	11.0	4.9	16.3	59.0	176.7	133.3	184.0	232.7	241.2	106.0	39.5	14.0	1,219
2	น้ำแม้งัด	11.4	4.5	12.8	58.5	172.5	137.5	189.5	238.4	236.5	106.5	40.8	12.7	1,222
3	น้ำแม่แดง	11.4	5.2	13.6	59.2	167.1	129.7	161.6	226.3	225.3	98.0	34.5	9.8	1,142
4	แม่น้ำปึงส่วนที่ 2	12.0	4.2	15.1	49.4	177.0	123.7	140.0	207.9	247.7	116.2	42.7	10.5	1,146
5	น้ำแม่ริม	14.4	4.4	14.1	48.2	163.6	134.1	187.9	222.8	222.1	102.8	36.2	10.6	1,161
6	น้ำแม่กวง	10.4	4.2	16.5	50.5	177.1	128.2	158.4	227.0	238.1	109.3	38.7	9.2	1,168
7	น้ำแม่งาน	12.2	4.0	21.2	61.1	216.6	146.8	162.8	214.1	291.1	146.2	36.6	9.2	1,322
8	น้ำแม่ลี	9.6	4.6	16.5	62.2	176.7	106.3	101.4	161.9	227.9	143.0	24.9	7.1	1,042
9	น้ำแม่กลาง	10.7	4.8	23.5	55.5	205.7	141.9	138.0	191.8	290.9	165.8	38.0	8.5	1,275
10	แม่น้ำปึงส่วนที่ 3	9.8	4.1	22.2	55.2	162.5	107.5	94.4	137.7	212.8	143.0	29.1	6.3	984
11	น้ำแม่แจ่มตอนบน	10.1	4.2	21.7	65.0	225.3	185.7	187.8	230.7	308.1	176.5	34.4	9.6	1,459
12	น้ำแม่แจ่มตอนล่าง	6.4	3.1	21.3	60.1	182.0	141.6	141.8	173.3	241.8	140.2	27.8	7.3	1,147
13	น้ำแม่หาด	9.0	4.1	19.5	53.1	155.6	103.4	99.5	148.0	217.6	156.7	26.4	6.1	999
14	น้ำแม่ต้น	7.8	3.0	24.0	57.9	176.7	165.3	181.0	175.9	211.7	131.5	26.4	7.4	1,169
	ลุ่มน้ำปึงตอนบน	10.1	4.1	18.9	57.3	180.9	135.8	151.3	196.5	240.4	130.5	33.3	9.0	1,168

ตารางที่ 6 ข้อมูลฝนเฉลี่ยรายเดือนและเฉลี่ยรายปีในช่วงเวลาปี ค.ศ. 2003 จนถึงปี ค.ศ. 2013
สำหรับแต่ละสถานีวัดน้ำท่าในลุ่มน้ำปึงตอนบน

หน่วย: มิลลิเมตร

ลำดับ	สถานี วัดน้ำท่า	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	รายปี
1	P.20	80.5	162.0	146.2	186.2	232.0	258.8	117.3	24.5	12.0	7.3	5.0	18.8	1,102	148	1,250
2	P.75	79.7	161.8	149.5	193.8	237.8	266.8	119.7	27.8	12.1	7.5	5.1	18.6	1,129	151	1,280
3	P.4A	80.1	159.5	137.9	171.3	232.3	252.7	105.4	27.3	7.5	6.8	4.3	12.9	1,059	139	1,198
4	P.67	77.4	159.4	143.7	184.0	235.0	259.1	112.2	27.7	9.4	7.2	4.7	15.3	1,093	142	1,235
5	P.21	54.1	160.0	146.5	191.2	238.0	264.8	116.5	23.7	7.0	8.5	3.7	15.6	1,117	113	1,230
6	P.1	73.7	160.8	144.7	184.8	236.4	261.1	112.9	27.4	9.0	7.4	4.5	15.3	1,101	137	1,238
7	P.81	58.9	167.3	145.8	196.5	248.8	257.2	109.6	26.5	7.2	4.5	3.3	10.8	1,125	111	1,236
8	P.77	56.5	187.0	143.1	161.1	201.4	234.5	97.7	21.1	6.2	7.6	5.0	20.5	1,025	117	1,142
9	P.82	52.6	212.1	148.1	167.5	216.9	297.8	155.1	25.9	8.1	6.2	3.8	22.9	1,198	120	1,317
10	P.84	52.3	212.0	147.0	165.7	216.5	297.5	154.5	26.1	8.2	6.1	3.7	22.8	1,193	119	1,312
11	P.76	70.5	190.2	120.5	116.8	144.4	213.7	144.0	13.5	4.3	5.4	4.1	17.9	930	116	1,045
12	P.24A	54.7	224.6	152.6	157.8	216.4	319.6	186.0	28.9	9.1	5.7	4.8	23.4	1,257	127	1,384
13	P.73	65.0	176.8	138.4	157.7	208.8	253.4	123.5	24.5	7.2	6.5	4.2	17.0	1,059	124	1,183

1.3 ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลข (DEM)

ในการศึกษานี้ได้พิจารณาใช้ผลิตภัณฑ์ SRTM-30 ของหน่วยงาน The U.S. Geological Survey's (USGS) ทั้งนี้ ผลิตภัณฑ์ SRTM-30 มีขนาดความละเอียดเชิงพื้นที่ (Spatial Resolution) เท่ากับ 30 เมตร สำหรับในการศึกษานี้ได้นำข้อมูลความสูงดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เพื่อการแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยของกลุ่มน้ำปึงตอนบนสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับแบบจำลอง KU-URBS เพื่อการประเมินกราฟน้ำท่าของกลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณา

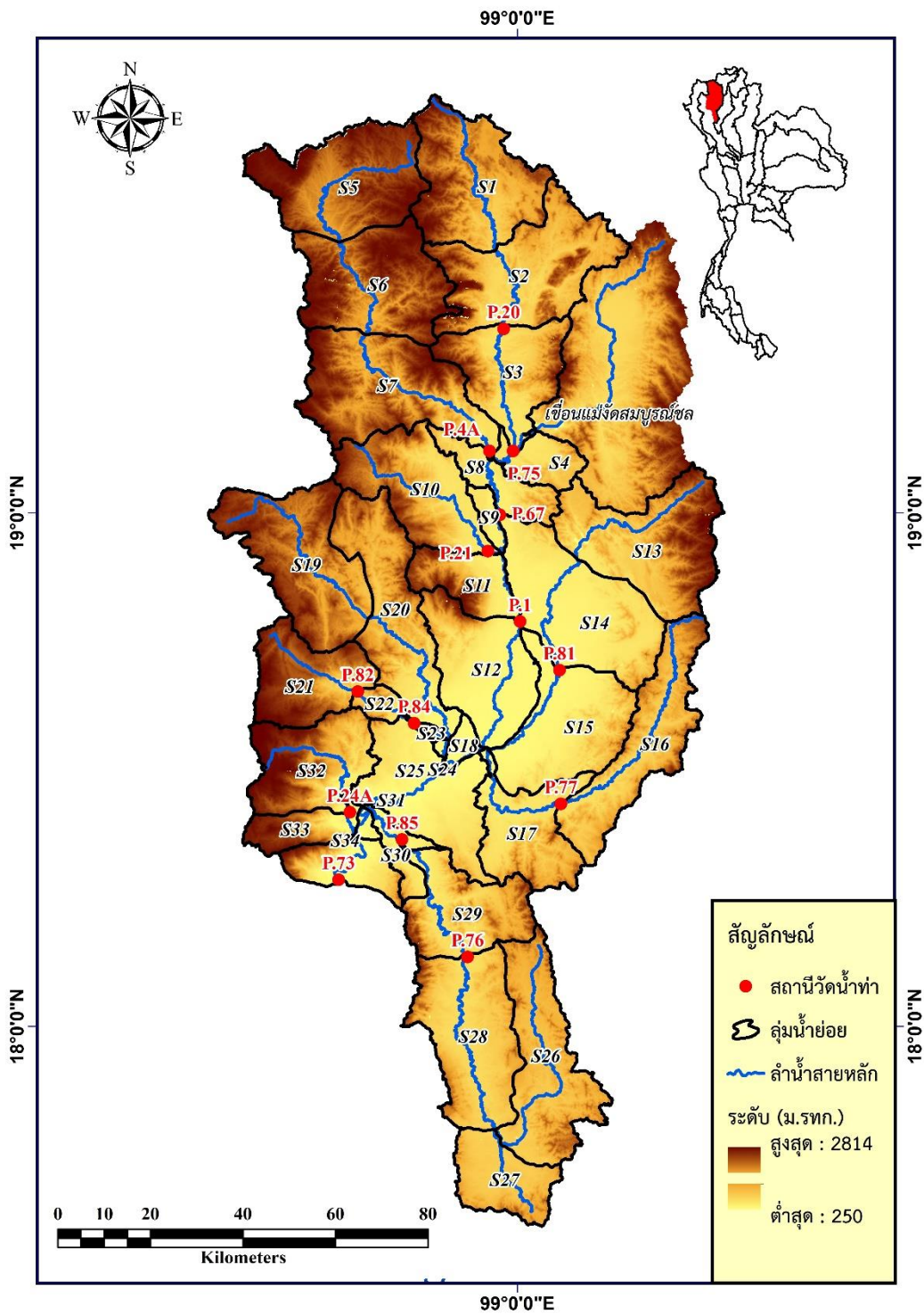
2. การแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยและการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางกายภาพของกลุ่มน้ำย่อยในกลุ่มน้ำปึงตอนบน

2.1 การแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยในกลุ่มน้ำปึงตอนบน

เนื่องจากในการศึกษานี้เป็นการนำแบบจำลอง KU-URBS มาประยุกต์ใช้เพื่อประเมินกราฟน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าต่าง ๆ ในกลุ่มน้ำปึงตอนบน โดยสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการศึกษามีทั้งสิ้น 14 สถานี โดยมีสถานีวัดน้ำท่า P.73 เป็นสถานีวัดน้ำท่าทางด้านท้ายน้ำสุด ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงได้ทำการแบ่งลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำท่า P.73 โดยทำการแบ่งตามตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่าทั้ง 13 สถานี เป็นหลัก ซึ่งประกอบด้วย P.20, P.75, P.4A, P.67, P.21, P.1, P.81, P.77, P.82, P.84, P.76, P.85 และ P.24A รวมทั้ง ณ ตำแหน่งจุดบรรจบของลำน้ำสำหรับแม่น้ำปึงสายหลัก ในกรณีที่ไม่มีการมีสถานีวัดน้ำท่าทางด้านท้ายน้ำของลำน้ำสาขาของกลุ่มน้ำปึงตอนบน ทั้งนี้ ในการแบ่งลุ่มน้ำย่อยดังกล่าวได้ใช้ขอบเขตของกลุ่มน้ำย่อยจากแบบจำลองความสูงเชิงเลข (DEM) ที่ได้จากผลิตภัณฑ์ SRTM-30 ดังกล่าวข้างต้นประกอบการแบ่งลุ่มน้ำย่อยโดยใช้เครื่องมือ Watershed ในโปรแกรม ArcGIS 10 จากผลการดำเนินงานทำให้ได้จำนวนลุ่มน้ำย่อยทั้งสิ้น 34 ลุ่มน้ำย่อย ดังแสดงในภาพที่ 13 ทั้งนี้ ได้ทำการตัดลุ่มน้ำแม้งัดออกไปเนื่องจากมีอ่างเก็บน้ำแม้งัดสมบูรณ์ชลตั้งอยู่ทางด้านท้ายน้ำของกลุ่มน้ำแม้งัดทำให้ไม่สามารถใช้แบบจำลองเพื่อประเมินน้ำท่าของกลุ่มน้ำแม้งัดได้อย่างถูกต้อง ดังกล่าวข้างต้น

2.2 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางกายภาพของกลุ่มน้ำย่อย

การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางกายภาพของกลุ่มน้ำย่อยต่าง ๆ ทั้ง 34 กลุ่มน้ำย่อย ดังแสดงในตารางที่ 7 ประกอบด้วย (1) พื้นที่รับน้ำฝน (2) ความยาวลำน้ำจากจุดไกลสุดบนสันปันน้ำจนถึงจุดออกของกลุ่มน้ำย่อย และ (3) ความยาวลำน้ำ ณ จุดที่ใกล้จุดศูนย์ถ่วงลำน้ำมากที่สุดจนถึงจุดออกของกลุ่มน้ำย่อย โดยแสดงให้เห็นว่ามีขนาดกลุ่มน้ำย่อยเฉลี่ยเท่ากับ 396.98 ตารางกิโลเมตร โดยมีขนาดเล็กสุดเท่ากับ 10.07 ตารางกิโลเมตร และใหญ่ที่สุดเท่ากับ 698.12 ตารางกิโลเมตร ทั้งนี้ แนวความคิดของแบบจำลอง URBS เสนอไว้ว่า ขนาดพื้นที่กลุ่มน้ำย่อยควรมีขนาดไม่แตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตาม บางกลุ่มน้ำย่อยที่มีขนาดเล็กกว่ากลุ่มน้ำย่อยอื่น ๆ มาก เนื่องจาก ในกรณีที่มีสถานีวัดน้ำท่าในลำน้ำสาขาและลำน้ำปิงสายหลักตั้งอยู่ใกล้เคียงกันมาก



1532608965
KU IThesis 6014500987 thesis / rev: 30072562 16:32:24 / seq: 14

ภาพที่ 13 กลุ่มน้ำย่อยและตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่าที่ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำปึงตอนบน

ตารางที่ 7 ลักษณะเฉพาะและพื้นที่รับน้ำฝนของกลุ่มน้ำย่อยของกลุ่มน้ำปิงตอนบนที่ทำการศึกษา

รหัสกลุ่มน้ำย่อย	กลุ่มน้ำสาขา	จุดออก	พื้นที่กลุ่มน้ำ (ตร.กม.)	ความยาวลำน้ำ (กม.)	
				จากเหนือน้ำสุดถึงจุดใกล้ศูนย์ถ่วง	จากจุดใกล้ศูนย์ถ่วงถึงท้ายน้ำสุด
S1	แม่น้ำปิงตอนบน	-	622.29	30.72	25.72
S2	แม่น้ำปิงตอนบน	P.20	686.78	8.23	24.60
S3	แม่น้ำปิงตอนบน	P.75	439.87	13.74	22.52
S4	แม่น้ำปิงตอนบน	-	155.16	4.23	5.95
S5	น้ำแม่แดง	-	615.33	26.22	16.53
S6	น้ำแม่แดง	-	640.45	27.29	17.21
S7	น้ำแม่แดง	P.4A	698.12	20.47	35.74
S8	แม่น้ำปิงส่วนที่ 2	P.67	195.40	7.87	11.28
S9	แม่น้ำปิงส่วนที่ 2	-	56.54	3.52	8.29
S10	น้ำแม่วิม	P.21	515.62	21.65	30.51
S11	แม่น้ำปิงส่วนที่ 2	P.1	236.77	6.66	11.70
S12	แม่น้ำปิงส่วนที่ 2	-	509.35	16.92	19.26
S13	น้ำแม่กวง	P.81	668.43	21.97	17.21
S14	น้ำแม่กวง	-	695.71	22.86	17.92
S15	น้ำแม่กวง	-	559.73	13.24	16.60
S16	น้ำแม่กวง	P.77	550.46	46.95	28.09
S17	น้ำแม่กวง	-	402.38	8.69	26.11
S18	แม่น้ำปิงส่วนที่ 2	-	49.43	3.86	8.15
S19	น้ำแม่งาน	-	614.94	24.66	29.12
S20	น้ำแม่งาน	-	640.04	25.66	30.31
S21	น้ำแม่งาน	P.82	390.86	14.36	11.51
S22	แม่น้ำปิงส่วนที่ 2	P.84	63.07	7.11	10.38
S23	แม่น้ำปิงส่วนที่ 2	-	13.42	5.77	3.19
S24	แม่น้ำปิงส่วนที่ 2	-	10.70	3.77	5.24
S25	แม่น้ำปิงส่วนที่ 2	-	532.11	6.59	16.85
S26	น้ำแม่ลี	-	612.38	31.53	36.11
S27	น้ำแม่ลี	-	289.91	14.45	14.98
S28	น้ำแม่ลี	P.76	638.51	30.30	32.99
S29	น้ำแม่ลี	-	431.33	21.09	24.57
S30	น้ำแม่ลี	-	107.52	0.46	13.76
S31	แม่น้ำปิงส่วนที่ 2	-	23.88	6.92	3.62
S32	น้ำแม่กลาง	P.24A	447.99	17.02	25.24
S33	น้ำแม่กลาง	-	167.00	2.53	3.51
S34	แม่น้ำปิงส่วนที่ 3	P.73	215.69	11.21	5.81
เฉลี่ย			396.98	15.54	17.96

3. การวิเคราะห์ความลึกฝนเชิงพื้นที่แบบรายวันของแต่ละลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำปิงตอนบน

ในการศึกษานี้เป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-URBS เพื่อการประเมินน้ำท่าในแต่ละลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำปิงตอนบน โดยข้อมูลด้านเข้าที่สำคัญที่สุดของแบบจำลองคือ ข้อมูลความลึกฝนเชิงพื้นที่ในแต่ละลุ่มน้ำย่อย ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงทำการประเมินความลึกฝนรายวันสำหรับแต่ละลุ่มน้ำย่อยทั้ง 34 ลุ่มน้ำย่อย ในช่วงเวลาระหว่างปี ค.ศ. 2003 ถึง ปี ค.ศ. 2013 โดยประเมินจากผลิตภัณฑ์ฝน SENSWAT-GGR ซึ่งอยู่ในรูปแบบกริด โดยในการศึกษานี้ได้นำเครื่องมือ Zonal Statistic as Table ที่มีอยู่ในโปรแกรม ArcGIS 10 มาใช้สำหรับกระบวนการเฉลี่ยเชิงพื้นที่ ในตารางที่ 8 ได้แสดงผลการประเมินความลึกฝนเชิงพื้นที่เฉลี่ยรายเดือน เฉลี่ยรายฤดูกาล และเฉลี่ยรายปี สำหรับแต่ละลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำปิงตอนบน โดยในตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปริมาณความลึกฝนเฉลี่ยรายปีของทั้ง 34 ลุ่มน้ำย่อย มีค่าอยู่ระหว่าง 994 ถึง 1,500 มิลลิเมตรต่อปี ตามลำดับ ซึ่งเกิดขึ้นที่ลุ่มน้ำย่อย S31 และ S21 ซึ่งเป็นรหัสลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำสาขาแม่น้ำปิงส่วนที่ 3 และน้ำแม่งาน ตามลำดับ

ตารางที่ 8 ความลึกฝนเชิงพื้นที่เฉลี่ยรายเดือน รายฤดูกาล และรายปี

หน่วย: มิลลิเมตร

รหัสลุ่ม น้ำย่อย														ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	รายปี
	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ต.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	(พ.ค.-ต.ค.)	(พ.ย.-เม.ย.)		
S1	79.7	167.4	136.9	184.7	240.7	258.9	117.3	21.7	11.1	7.7	4.2	17.5	1,106	142	1,248	
S2	81.2	157.0	154.6	187.6	224.1	258.6	117.4	27.0	12.8	6.9	5.6	19.9	1,099	153	1,253	
S3	77.3	161.2	159.3	216.4	255.2	290.9	126.8	37.8	12.4	8.0	5.7	18.0	1,210	159	1,369	
S4	52.6	149.4	147.7	212.9	233.3	259.6	117.4	31.0	4.7	7.9	5.0	12.5	1,120	114	1,234	
S5	90.9	170.5	139.1	170.4	238.4	256.8	106.0	26.9	8.1	6.6	4.1	11.9	1,081	149	1,230	
S6	82.3	154.2	125.8	154.2	215.7	232.3	95.9	24.4	7.3	6.0	3.7	10.8	978	134	1,113	
S7	68.4	154.6	148.0	187.9	242.3	267.9	113.7	30.4	7.2	7.8	5.1	15.8	1,114	135	1,249	
S8	51.1	145.3	146.5	200.5	237.2	252.5	109.2	26.7	7.2	7.8	3.9	12.9	1,091	110	1,201	
S9	50.5	150.6	141.0	179.4	237.3	256.1	103.2	23.5	8.5	8.8	3.4	13.5	1,068	108	1,176	
S10	54.1	160.0	146.5	191.2	238.0	264.8	116.5	23.7	7.0	8.5	3.7	15.6	1,117	113	1,230	
S11	58.6	188.9	158.0	184.9	256.2	289.3	119.6	31.7	7.6	8.6	4.5	14.9	1,197	126	1,323	
S12	55.1	178.0	143.6	145.4	220.2	258.5	110.6	31.5	6.2	7.3	4.1	16.1	1,056	120	1,177	
S13	58.9	167.3	145.8	196.5	248.8	257.2	109.6	26.5	7.2	4.5	3.3	10.8	1,125	111	1,236	
S14	53.3	151.4	131.9	177.8	225.1	232.7	99.2	23.9	6.5	4.1	3.0	9.8	1,018	101	1,119	
S15	53.0	167.6	136.8	128.8	190.0	227.7	95.0	26.7	5.2	5.4	3.6	15.8	946	110	1,056	
S16	56.5	187.0	143.1	161.1	201.4	234.5	97.7	21.1	6.2	7.6	5.0	20.5	1,025	117	1,142	
S17	61.7	183.0	137.0	122.2	171.6	228.8	104.6	21.8	7.0	7.9	5.0	19.7	947	123	1,070	
S18	48.9	155.4	124.0	108.1	181.5	236.7	106.6	30.9	5.4	6.9	1.5	19.2	912	113	1,025	
S19	58.1	212.9	151.2	176.4	227.4	294.0	145.8	25.0	7.8	7.4	3.5	23.2	1,208	125	1,333	
S20	52.5	192.6	136.8	159.6	205.7	266.0	131.9	22.6	7.0	6.7	3.2	21.0	1,093	113	1,206	
S21	52.6	243.8	166.8	180.4	235.3	349.9	193.2	31.4	9.9	5.4	4.8	26.1	1,369	130	1,500	
S22	47.5	211.9	128.4	137.2	209.4	291.7	144.1	28.7	8.8	4.6	3.0	20.8	1,123	113	1,236	
S23	48.7	173.1	121.9	111.6	188.9	248.1	116.1	34.3	6.3	5.9	1.4	19.4	960	116	1,076	
S24	48.5	163.1	123.4	104.4	180.1	233.5	111.0	30.7	5.8	6.9	1.2	20.6	915	114	1,029	
S25	57.1	169.4	118.6	98.2	168.6	238.7	128.5	25.1	5.9	5.8	3.1	17.8	922	115	1,037	
S26	71.7	188.8	118.0	121.6	144.6	212.5	132.1	14.0	3.9	6.5	4.0	17.9	917	118	1,036	
S27	59.6	197.1	114.5	119.9	144.1	226.1	145.9	10.1	3.9	5.5	2.1	18.3	948	99	1,047	
S28	75.4	187.1	123.3	115.5	144.5	208.0	143.1	15.0	4.4	5.3	5.0	17.8	921	123	1,044	
S29	83.6	185.2	124.1	85.6	150.5	216.9	138.3	18.4	4.0	4.7	6.1	15.4	901	132	1,033	
S30	73.7	170.3	114.6	74.4	150.5	233.7	149.5	21.4	5.1	5.2	5.1	14.7	893	125	1,018	
S31	52.1	161.5	109.2	82.5	158.3	225.7	145.7	21.8	5.0	7.4	4.8	20.2	883	111	994	
S32	54.7	224.6	152.6	157.8	216.4	319.6	186.0	28.9	9.1	5.7	4.8	23.4	1,257	127	1,384	
S33	52.4	181.5	122.7	124.1	177.3	247.7	158.1	21.4	5.6	7.0	4.3	21.0	1,011	112	1,123	
S34	61.9	170.9	112.9	91.4	153.7	227.1	144.6	20.2	4.5	7.2	4.7	18.9	901	117	1,018	

4. การพัฒนาแบบจำลอง KU-URBS เพื่อการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติโดยการใช้ MOSCEM

ในขั้นตอนการพัฒนาได้ประยุกต์ใช้ภาษา MATLAB เพื่อเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อระหว่างแบบจำลอง KU-URBS กับ โปรแกรม MOSCEM ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นแล้วโดย Vrugt, J. et al. (2003) ทั้งนี้ ในการศึกษาได้นำโปรแกรม MOSCEM มาใช้เพื่อการหาค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองที่เหมาะสมโดยใช้ฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) สำหรับการประเมินกราฟน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าในกลุ่มน้ำปิงตอนบน

โครงสร้างของแบบจำลอง KU-URBS ที่นำมาเขียนด้วยโปรแกรม MATLAB ในการศึกษา ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ ดังต่อไปนี้

1) การประเมินความลึกฝนส่วนเกิน (Excess Rainfall) ในการศึกษาได้เลือกใช้การประเมินการการสูญเสียแบบต่อเนื่อง (Continuous Loss) พร้อมทั้งมีการใช้กระบวนการคืนสภาพใน 2 ส่วน คือ การคืนสภาพของการสูญเสียเริ่มต้น และการคืนสภาพของการซึมลงดิน เพื่อให้สามารถประยุกต์แบบจำลองกับเหตุการณ์ฝนหลายเหตุการณ์ได้ โดยได้ดำเนินการเขียนโปรแกรม MATLAB ให้คำนวณหาความลึกฝนส่วนเกิน (Excess Rainfall) ตามสมการที่ (1) ถึง (6)

2) การเคลื่อนตัวบนพื้นที่ลุ่มน้ำ (Catchment Routing) และการเคลื่อนตัวในลำน้ำ (Channel Routing) ได้เลือกใช้สมการอย่างง่ายที่ถูกปรับแก้มาแล้ว โดย Carroll, D. (2004) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1) การเคลื่อนตัวบนพื้นที่ลุ่มน้ำ (Catchment Routing) ได้ถูกทำการปรับแก้จากสมการที่ (10) โดยการตัดเอาสัดส่วนพื้นที่ป่าไม้ (F) และสัดส่วนพื้นที่เมือง (U) ออก เพื่อลดความยุ่งยากในการประเมินสัดส่วนทั้งสองของแต่ละลุ่มน้ำย่อย โดยสมการหลังการปรับแก้แสดงดังสมการที่ (19)

$$S_{catch} = \beta \sqrt{A} Q^m \quad (19)$$

2.2) การเคลื่อนตัวบนในลำน้ำ (Channel Routing) ได้ถูกทำการปรับแก้จากสมการที่ (12) โดยการตัดเอาสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning (n) แฟกเตอร์ความยาวลำน้ำ (f) และความชัน

ท้องน้ำ (S) ออก เพื่อลดความยุ่งยากในการประเมินตัวแปรดังกล่าวของแต่ละกลุ่มน้ำย่อย รวมทั้งกำหนดให้พารามิเตอร์แสดงความไม่เป็นเส้นตรง (nI) ให้มีค่าคงที่เป็น 1 ซึ่งทำให้ได้วิธีการ Muskingum แบบเส้นตรง เพื่อลดความยุ่งยากในการใช้งานแบบจำลอง โดยสมการหลังการปรับแก้แสดงดังสมการที่ (20)

$$S_{channel} = \alpha L(XI + (1 - X)Q) \quad (20)$$

3) การประเมินปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) ได้เลือกใช้การประเมินปริมาณการไหลพื้นฐานแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาดังแสดงในสมการที่ (13) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการประเมินปริมาณการไหลพื้นฐานด้วยสมการดังกล่าวเป็นการประเมินจากสัดส่วนแบบไม่เป็นตรงของปริมาณน้ำท่าโดยตรง (Direct Runoff) ซึ่งไม่เป็นไปตามวัฏจักรทางอุทกวิทยา กล่าวคือ ปริมาณการไหลพื้นฐานจะเกิดจากปริมาณการไหลที่ตอบสนองช้า (Slow Components of Hydrologic Response) จึงไม่สมควรที่จะคำนวณจากปริมาณน้ำท่าโดยตรง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้ทำการพัฒนาวิธีการในการประเมินปริมาณการไหลพื้นฐานเพื่อเป็นแนวทางเลือก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากสมการที่ (8) ซึ่งเป็นสมการในการประเมินปริมาณการซึมลงดินสะสม ($F_i = k_{\delta t}F_{i-1} + dF_i$) จากสมการดังกล่าว สังเกตดูได้ว่าจะมีปริมาณน้ำที่หายออกไปจากระบบเท่ากับ $(1 - k_{\delta t})F$ เมื่อพิจารณาตามวัฏจักรทางอุทกวิทยา พบว่า ปริมาณน้ำที่ดังกล่าวที่หายไปคือ ปริมาณน้ำที่เกิดกระบวนการซึมลึกลงสู่ใต้ดิน (Percolation) โดยที่จะซึมลงไปเป็นน้ำใต้ดิน (Groundwater) และแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) ปริมาณการเก็บกักของน้ำใต้ดิน (Groundwater Storage) และ (2) ปริมาณการไหลของน้ำใต้ดิน (Groundwater Flow) ซึ่งจะไหลออกสู่ลำน้ำกลายเป็นปริมาณการไหลพื้นฐานต่อไป

ในการศึกษานี้จึงได้เสนอสมการในการประเมินปริมาณการไหลของน้ำใต้ดิน (Qg) ในหน่วยมิลลิเมตร ดังแสดงสมการที่ (21) โดยที่ G คือสัดส่วนการเกิดการไหลของน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

$$Qg_i = (1 - k_{\delta t})F_iG \quad (21)$$

จากนั้นจึงทำการเคลื่อนตัวปริมาณการไหลของน้ำใต้ดินดังกล่าวไปยังจุดศูนย์กลางของแต่ละลุ่มน้ำย่อย ซึ่งเรียกว่าปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) จากนั้นจึงนำไปรวมกับปริมาณการไหลโดยตรง (Direct Runoff) ทั้งนี้ ในการเคลื่อนตัวปริมาณการไหลของน้ำใต้ดินดังกล่าวได้ประยุกต์วิธีการเคลื่อนตัวบนพื้นที่ลุ่มน้ำ (Catchment Routing) ดังแสดงในสมการที่ (22) และสมการที่ (23) โดยที่การหน่วงเวลาของน้ำใต้ดิน (k_g , ชั่วโมง) ในแต่ละลุ่มน้ำย่อยจะเปลี่ยนแปลงไปตามรากที่สองขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย (\sqrt{A}) ซึ่งจะถูกควบคุมโดยพารามิเตอร์การหน่วงเวลาของน้ำใต้ดิน (β_g) ซึ่งกำหนดให้มีค่าอยู่ระหว่าง 1 – 100

$$k_g = \beta_g \sqrt{A} \quad (22)$$

$$S_g = \beta_g \sqrt{A} Q_g^m \quad (23)$$

5. การประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-URBS โดยการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM

เนื่องจากลุ่มน้ำปึงตอนบนมีสถานีวัดน้ำท่าตั้งอยู่บนแม่น้ำปึงสายหลักจำนวน 4 สถานี ซึ่งประกอบด้วยสถานีวัดน้ำท่า P.75, P.67, P.1, และ P.73 โดยสถานีวัดน้ำท่าดังกล่าวมีพื้นที่รับน้ำฝนเท่ากับ 3,080, 5,323, 6,350 และ 14,814 ตารางกิโลเมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สถานีวัดน้ำท่า P.73 มีพื้นที่รับน้ำฝนที่อาจจะมากเกินความสามารถของแบบจำลองแบบกึ่งกระจายตัว โดยทั่วไปที่จะประเมินกราฟน้ำท่าได้ถูกต้องในทุกลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณา ดังนั้น ในการศึกษาจึงแบ่งการสอบเทียบแบบจำลองออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) การสอบเทียบแบบจำลอง KU-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และ (2) การสอบเทียบแบบจำลอง URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 เพื่อนำผลพลอยได้จากการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่าดังกล่าว ณ ตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่าด้านเหนือน้ำของทั้ง 2 สถานี มาเปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่าด้านเหนือน้ำโดยตรง ซึ่งการศึกษาในส่วนนี้ได้ใช้โปรแกรม MOSCEM ในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-URBS โดยอัตโนมัติ โดยมีรายละเอียดแสดงดังหัวข้อต่อไป

5.1 การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1

การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ดำเนินการโดยการแบ่งข้อมูลด้านเข้าออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ ปี ค.ศ. 2003–2009 จำนวน 7 ปี สำหรับการสอบเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) และปี ค.ศ. 2003 -2013 จำนวน 4 ปี สำหรับการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model Verification) ทั้งนี้ ในการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง URBS ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังต่อไปนี้

(1) การสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 โดยในกรณีนี้จะได้ผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 แล้วจึงนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการดำเนินการในข้อถัดไป

(2) การสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 เพื่อประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านั้นโดยตรง แล้วจึงนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการประเมินโดยทางอ้อมจากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1

นอกจากนั้น ในการศึกษาี้ได้ทำการปรับปรุงวิธีการประเมินปริมาณการไหลพื้นฐานที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4. เรื่อง “การพัฒนาแบบจำลอง SENWAT-URBS เพื่อการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติโดยใช้ MOSCEM” ดังนั้น ในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบผลการประเมินกราฟน้ำท่าระหว่างวิธีการประเมินปริมาณการไหลพื้นฐานแบบเดิม (SENWAT-URBS V.1) กับผลการประเมินที่เสนอไว้ในการศึกษาี้ (KU-URBS V.2) เพื่อเสนอวิธีการที่มีความเหมาะสมมากกว่า

5.2 การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73

การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองที่มีความเหมาะสมที่สุดระหว่างแบบจำลอง KU-URBS V.1 และ KU-URBS V.2 ซึ่งดำเนินการโดยการแบ่งข้อมูลด้านเข้าออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ ปี ค.ศ. 2003–2009 จำนวน 7 ปี สำหรับการสอบเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) และปี ค.ศ. 2010–2013 จำนวน 4 ปี

สำหรับการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model Verification) ทั้งนี้ ในการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง URBS ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังต่อไปนี้

(1) การสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 โดยในกรณีนี้จะได้ผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67, P.21, P.1, P.81, P.77, P.82, P.84, P.76 และ P.24A ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 แล้วจึงนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการดำเนินการในข้อถัดไป

(2) ผลการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67, P.21, P.1, P.81, P.77, P.82, P.84, P.76 และ P.24A เพื่อประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านั้นโดยตรง แล้วจึงนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการประเมินโดยทางอ้อมจากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1

5.3 การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ในกรณีการใช้ข้อมูลน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดทางด้านเหนือน้ำเป็นข้อมูลด้านเข้า

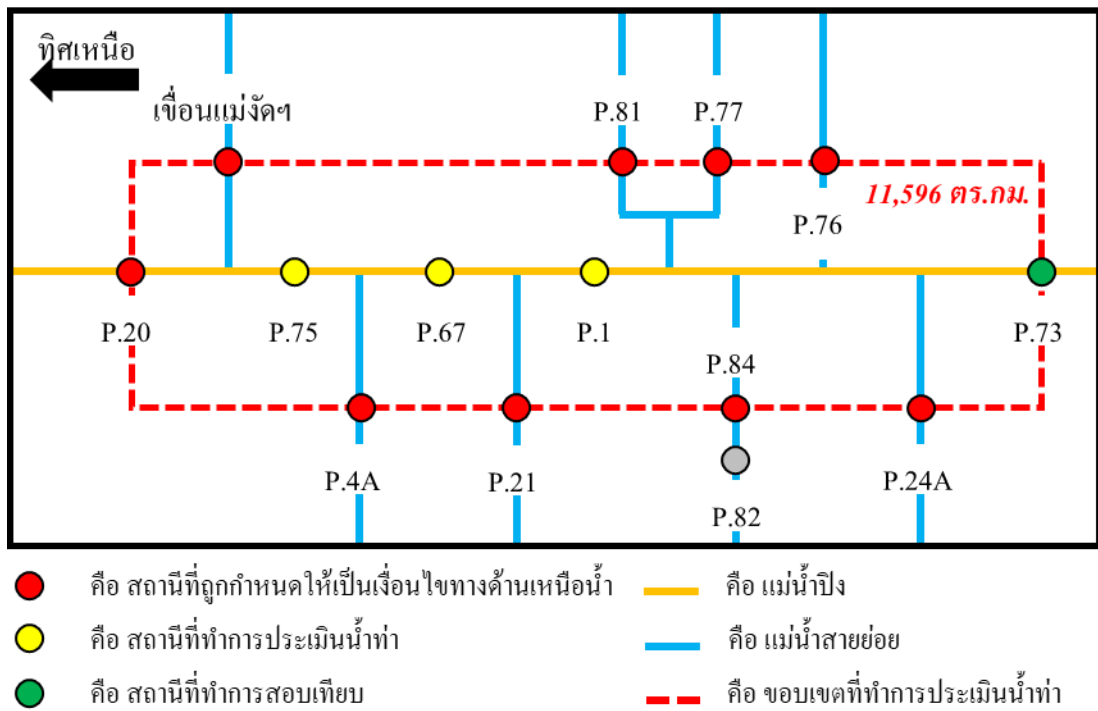
การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองที่มีความเหมาะสมที่สุดระหว่างแบบจำลอง KU-URBS V.1 และ KU-URBS V.2 การดำเนินงานทำได้โดยการแบ่งข้อมูลด้านเข้าออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ ปี ค.ศ. 2003–2009 จำนวน 7 ปี สำหรับการสอบเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) และปี ค.ศ. 2010–2013 จำนวน 4 ปี สำหรับการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model Verification) ทั้งนี้ ในการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง URBS หรือ KU-URBS ได้แบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังต่อไปนี้

(1) กรณีที่ 1 การสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 โดยการกำหนดให้อัตราการไหลที่วัดได้ ณ สถานี P.20, P.4A, P.21, P.81, P.77, P.84, P.76, P.24A และปริมาณน้ำที่ไหลออกจากเขื่อนแม่จัดสมบูรณ์ชล เป็นข้อมูลด้านเข้าด้านเหนือน้ำให้กับแบบจำลองดังแสดงในโครงข่ายการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ในภาพที่ 14 โดยในกรณีนี้จะได้ผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.75, P.67 และ P.1 ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 เพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.75,

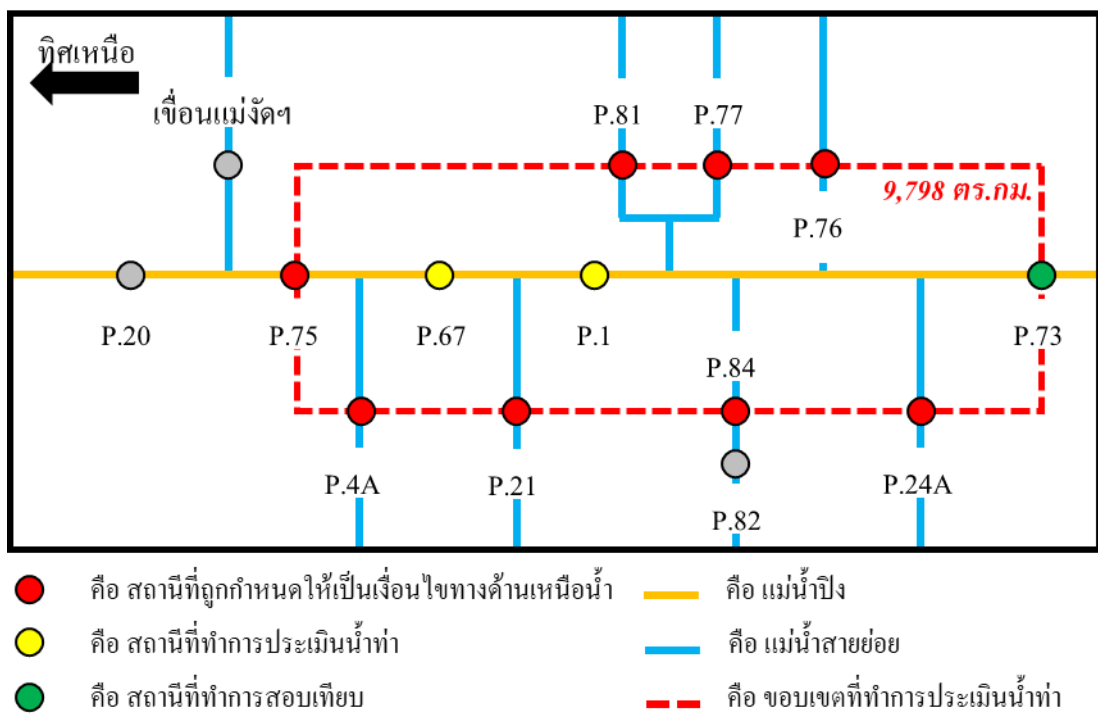
P.67 และ P.1 ที่ดำเนินการในข้อที่ 5.2 เรื่อง “การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73”

(2) กรณีที่ 2 การสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 โดยการกำหนดให้อัตรการไหลที่วัดได้ ณ สถานี P.75, P.4A, P.21, P.81, P.77, P.84, P.76 และ P.24A เป็นข้อมูลด้านเข้าด้านเหนือน้ำให้กับแบบจำลองดังแสดงในโครงข่ายการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ในภาพที่ 15 โดยในกรณีนี้จะได้ผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.67 และ P.1 ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 เพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.67 และ P.1 ที่ดำเนินการในข้อที่ 5.2 เรื่อง “การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73”

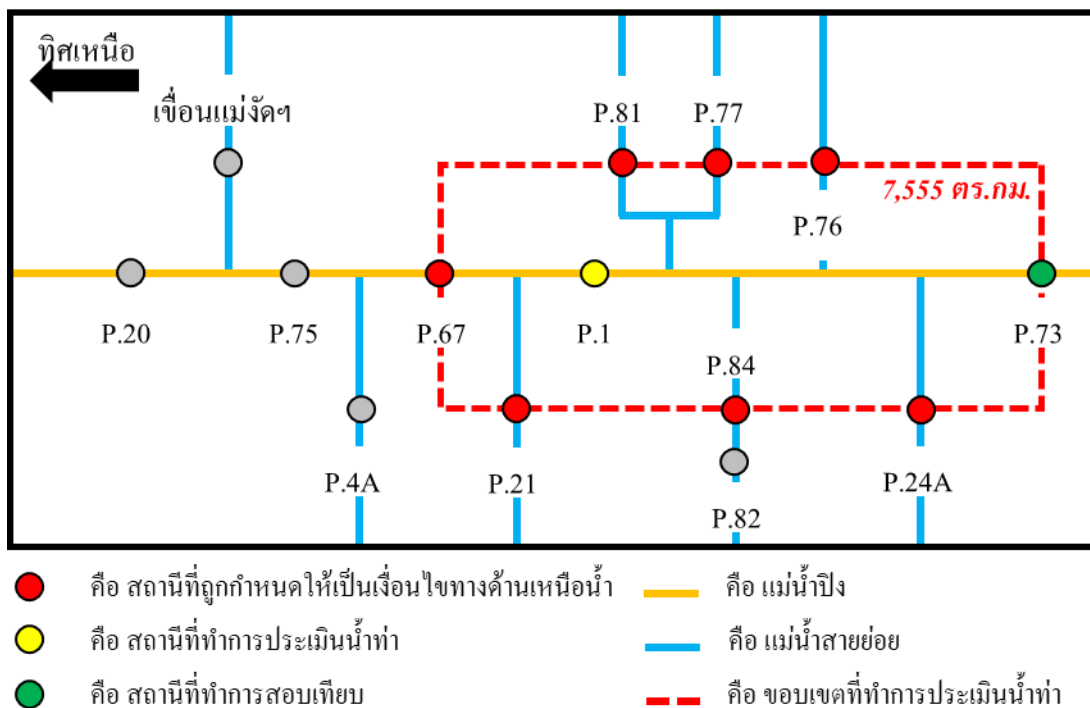
(3) กรณีที่ 3 การสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 โดยการกำหนดให้อัตรการไหลที่วัดได้ ณ สถานี P.67, P.21, P.81, P.77, P.84, P.76 และ P.24A เป็นข้อมูลด้านเข้าด้านเหนือน้ำให้กับแบบจำลองดังแสดงในโครงข่ายการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ในภาพที่ 16 โดยในกรณีนี้จะได้ผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 เพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ที่ดำเนินการในข้อที่ 5.2 เรื่อง “การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73”



ภาพที่ 14 โครงข่ายการวิเคราะห์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 สำหรับกรณีที่ 1



ภาพที่ 15 โครงข่ายการวิเคราะห์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 สำหรับกรณีที่ 2



ภาพที่ 16 โครงข่ายการวิเคราะห์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 สำหรับกรณีที่ 3

6. การพัฒนาโปรแกรมการสอบเทียบแบบจำลองอัตโนมัติ Genetic Algorithm และประยุกต์ใช้เพื่อสอบเทียบแบบจำลอง URBS

6.1 การพัฒนาโปรแกรมการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติ Genetic Algorithm

ในการศึกษานี้ได้ทำการพัฒนา Genetic Algorithm ซึ่งเป็นการพัฒนาต่อจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดย Siddharth Panwar เพื่อการหาค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองที่เหมาะสมโดยใช้ฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objectives Optimization) โดยรายละเอียดของ Genetic Algorithm ที่ได้พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1) กระบวนการสุ่มประชากรชุดเริ่มต้น (Initial Population)

การสุ่มประชากรชุดเริ่มต้นได้ประยุกต์ใช้วิธีการ Latin Hypercube ซึ่งสามารถสุ่มประชากรชุดเริ่มต้นที่มีการกระจายตัวทั่วทั้งมิติแบบ (Multi-Dimension) ได้ อีกทั้งสามารถลดเวลาหรือ

จำนวนรอบในกระบวนการสุ่มเข้าหาคำตอบ และมีความเสถียรภาพมากกว่ากระบวนการสุ่มแบบปกติ (Simple Random)

2) กระบวนการจัดลำดับ (Ranking)

การจัดลำดับของประชากรแบบหลายวัตถุประสงค์ได้ประยุกต์ใช้วิธีการ Pareto Ranking ซึ่งเป็นการจัดลำดับแบบเป็นกลุ่ม (Cluster) โดยที่ประชากรที่จัดอยู่ในลำดับดังกล่าวอาจจะมีจำนวนมากกว่าหนึ่งได้ ยกตัวอย่างเช่น ชุดพารามิเตอร์ที่มีค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์อยู่ในลำดับที่ 1 เป็นชุดพารามิเตอร์ที่มีค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ไม่แพ้พารามิเตอร์ชุดอื่น ๆ หรือในกรณีการแก้ปัญหาแบบ Minimize จะไม่มีพารามิเตอร์ชุดไหนที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยกว่าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของลำดับที่ 1

3) กระบวนการคัดเลือก (Selection)

การคัดเลือกประชากรชุดถัดไปได้ประยุกต์ใช้วิธีการ Roulette Wheel หรือ Proportionate Selection โดยที่จะประเมินสัดส่วนการเกิดใหม่ของประชากรในรุ่นถัดไปจากค่าลำดับที่ได้จากกระบวนการ Pareto Ranking อีกทั้งยังได้เพิ่มพารามิเตอร์บอกความไม่เป็นเส้นตรง (b) เพื่อให้ประชากรที่จัดอยู่ในลำดับที่ 1 เกิดเป็นประชากรในรุ่นถัดมาเพิ่มขึ้น โดยที่ b จะเริ่มต้นจาก 1 จากนั้นจะเพิ่มขึ้นตามระยะห่าง (Δb) เมื่อครบรอบที่กำหนด ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\text{Number of Offspring } (NO_i) = \frac{(R_i - R_{max})^b}{\sum_{i=1}^n (R_i - R_{max})^b} \quad (24)$$

โดยที่	NO_i	คือ	จำนวนของประชากรตัวที่ i ที่จะกลายเป็นประชากรรุ่นถัดไป
	R_i	คือ	ลำดับของประชากรตัวที่ i ที่ได้จาก Pareto Ranking
	R_{max}	คือ	ลำดับสูงสุดของทั้งชุดประชากรในรุ่นนั้น ๆ
	b	คือ	พารามิเตอร์บอกความไม่เป็นเส้นตรง

4) กระบวนการ Crossover และ Mutation

กระบวนการ Crossover และ Mutation จะดำเนินการโดยใช้เลขฐานสอง (Binary Bit) โดยการประยุกต์ใช้วิธีการ Multi-Point Crossover และ Bit String Mutation เพื่อกระบวนการดังกล่าวตามลำดับ ซึ่งเป็นกระบวนการสุ่มแบบปกติ (Simple Random) ในการเลือกตำแหน่งสำหรับการ Crossover และ Mutation โดยมีพารามิเตอร์ควบคุมคือ อัตราการ Crossover (P_c) และอัตราการ Mutation (P_m) ดังแสดงในภาพที่ 17 ก และ ข ตามลำดับ

ก) ตัวอย่างกระบวนการ Crossover

($P_c = 0.6 = 60\%$ ของจำนวน String)

No.	String		
	Sub-String 1	Sub-String 2	Sub-String 3
String 1	1 0 1 0	1 1 0 0	1 1 1 1
String 2	0 0 1 0	1 1 1 1	1 0 0 1
String 3	0 0 1 0	0 0 0 1	0 0 0 0
String 4	0 0 1 1	0 0 0 1	0 0 1 1
String 5	0 1 0 1	0 0 1 0	1 0 1 0
String 6	1 0 0 0	0 1 1 1	1 0 0 0
String 7	1 0 0 0	1 0 1 1	0 0 0 1
String 8	1 1 0 1	1 1 1 1	0 0 1 1
String 9	0 1 1 0	0 0 1 0	1 1 1 1
String 10	1 0 1 0	1 1 1 0	1 1 0 0

ข) ตัวอย่างกระบวนการ Mutation

($P_m = 0.05 = 5\%$ ของจำนวน Bit)

No.	String		
	Sub-String 1	Sub-String 2	Sub-String 3
String 1	1 0 1 0	1 1 0 0	1 1 1 1
String 2	0 0 1 0	1 1 1 1	1 0 0 1
String 3	0 0 1 0	0 0 1 0	0 0 0 0
String 4	0 0 1 1	0 0 0 1	0 0 1 1
String 5	0 1 0 1	0 0 1 0	1 0 1 0
String 6	1 0 0 0	0 1 1 1	1 0 0 0
String 7	1 0 0 0	1 0 1 1	0 0 0 1
String 8	1 1 0 1	1 1 1 1	0 0 1 1
String 9	0 1 1 0	0 0 1 0	1 1 1 1
String 10	1 0 1 0	1 1 1 0	1 1 0 0

ภาพที่ 17 ตัวอย่างการเลือกตำแหน่งสำหรับการ Crossover และ Mutation ที่ได้จากการสุ่ม

6.2 การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1

การสอบเทียบแบบจำลอง URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองที่มีความเหมาะสมที่สุดระหว่างแบบจำลอง KU-URBS V.1 และ KU-URBS V.2 ซึ่งดำเนินการโดยการแบ่งข้อมูลด้านเข้าออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ ปี ค.ศ. 2003–2009 จำนวน 7 ปี สำหรับการสอบเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) และปี ค.ศ. 2010–2013 จำนวน 4 ปี สำหรับการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model Verification) ทั้งนี้ ในการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง URBS ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังต่อไปนี้

(1) ผลการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 โดยในกรณีนี้จะได้ผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1

(2) ผลการสอบเทียบแบบจำลอง URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 เพื่อประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านั้นโดยตรง

จากนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกระบวนการที่ดำเนินงานโดยโปรแกรม MOSCEM ในหัวข้อที่ 5.1 เรื่อง “การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1” เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมการสอบเทียบอัลกอริทึม Genetic Algorithm

ผลการศึกษา

1. ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 โดยการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM

1.1 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.1 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1

ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.1 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ในระหว่างปี ค.ศ. 2003–2009 และ ค.ศ. 2010–2013 ตามลำดับ โดยใช้โปรแกรม MOSCEM แสดงดังในตารางที่ 9 และ ภาพที่ 18 โดยในตารางดังกล่าวได้แสดงค่าทางสถิติที่ใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งประกอบด้วย ค่า KGE , KGE_L และ KGE_{FDC} และเพื่อให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองได้ง่ายขึ้นจึงได้แสดงค่า NSE เพื่อใช้เป็นตัวแปรทางสถิติในภาพรวม จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ผลการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ให้ค่า NSE เท่ากับ 0.82 ซึ่งมากกว่าในกรณีการตรวจพิสูจน์แบบจำลองซึ่งให้ค่า NSE เท่ากับ 0.79

นอกจากนั้นแล้ว ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 จะให้ผลพลอยได้เป็นกราฟน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านั้น ซึ่งจากผลการสอบเทียบแบบจำลองโดยตรงที่สถานีเหล่านั้นแสดงดังในตารางที่ 9 และ ภาพที่ 19 ถึง ภาพที่ 23 ที่แสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยของ NSE สำหรับทุกสถานีเท่ากับ 0.71 ซึ่งมีค่ามากกว่าในกรณีการตรวจพิสูจน์แบบจำลองซึ่งให้ค่าเฉลี่ยของ NSE ต่ำกว่าเล็กน้อยเท่ากับ 0.70 ในขณะที่ผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ให้ค่าเฉลี่ยของ NSE สำหรับทุกสถานี เท่ากับ 0.66 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าในกรณีการสอบเทียบแบบจำลองโดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้ ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยของ NSE 0.71 โดยมีค่าลดลงเฉลี่ยทุกสถานีเท่ากับ 6.7% และสำหรับผลการประเมินน้ำท่าที่เป็นผลพลอยได้จากการตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ให้ค่าเฉลี่ยของ NSE สำหรับทุกสถานี เท่ากับ 0.68 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าในกรณีการตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้ ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยของ NSE 0.70 โดยมีค่าลดลงเฉลี่ยทุกสถานีเท่ากับ 2.7% ดังแสดงในตารางที่ 9 และ ภาพที่ 19 ถึงภาพที่ 23 อย่างไรก็ตาม จากผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และผลพลอยได้ของการประเมินน้ำท่า

ที่สถานีวัดน้ำท่าทั้ง 5 สถานี ดังกล่าว ซึ่งความแตกต่างที่น้อยกว่าในกรณีการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง โดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านั้นจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่แตกต่างมากนัก ดังนั้นแบบจำลอง KU-URBS V.1 จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เพื่อการประเมินน้ำท่าสำหรับลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง ทั้งนี้ สาเหตุสำคัญประการหนึ่งคือ พื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ซึ่งเท่ากับ 6,350 ตารางกิโลเมตร นั้นนับว่ามีขนาดที่ไม่ใหญ่เกินกว่าที่แบบจำลองจะสามารถประเมินน้ำท่าได้ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด

สำหรับผลของพารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-URBS V.1 ที่ได้จากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองด้วยโปรแกรม MOSCEM แสดงดังในตารางที่ 10

ตารางที่ 9 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.1 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 โดยใช้โปรแกรม MOSCEM

ช่วงเวลา	สถานี วัดน้ำท่า	การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์								% ความ แตกต่าง
		ที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง				ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1				
		NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	
การสอบเทียบ (ค.ศ. 2003-2009)	P.1	0.82	0.89	0.82	0.95	0.82	0.89	0.82	0.95	-
	P.20	0.59	0.73	0.70	0.86	0.54	0.48	-0.22	0.54	-8.2%
	P.75	0.79	0.88	0.81	0.95	0.68	0.77	0.77	0.80	-13.1%
	P.4A	0.70	0.83	0.65	0.93	0.64	0.78	0.17	0.88	-9.1%
	P.67	0.79	0.89	0.75	0.97	0.78	0.81	0.76	0.85	-1.0%
	P.21	0.67	0.80	0.83	0.90	0.66	0.74	-1.05	0.81	-2.0%
	เฉลี่ย	0.71	0.83	0.75	0.92	0.66	0.72	0.09	0.78	-6.7%
การตรวจพิสูจน์ (ค.ศ. 2010-2013)	P.1	0.79	0.76	0.81	0.78	0.79	0.76	0.81	0.78	-
	P.20	0.58	0.74	0.74	0.83	0.50	0.46	-0.18	0.51	-13.6%
	P.75	0.74	0.67	0.82	0.69	0.71	0.70	0.82	0.74	-3.9%
	P.4A	0.70	0.83	0.29	0.93	0.70	0.77	0.77	0.83	0.5%
	P.67	0.77	0.77	0.73	0.81	0.73	0.67	0.70	0.69	-4.9%
	P.21	0.73	0.81	0.76	0.87	0.77	0.84	-1.21	0.88	6.4%
	เฉลี่ย	0.70	0.77	0.67	0.83	0.68	0.69	0.18	0.73	-2.7%

หมายเหตุ: % ความแตกต่างประเมินจากค่า NSE ที่ได้จากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 เปรียบเทียบกับที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง

ตารางที่ 10 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-URBS V.1 ที่ได้จากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MOSCEM

สถานี วัดน้ำท่า	IL_{max} (มม.)	pr -	F_{max} (มม.)	C_{imp} -	β -	rlr (มม./ชม.)	$K\delta t$ -	α -	x -	BR -	BC -
P.20	13.57	0.16	621.69	0.91	4.19	0.15	0.93	0.33	0.31	0.98	0.013
P.75	38.47	0.06	1364.67	0.92	4.10	0.29	0.97	0.25	0.29	0.96	0.036
P.4A	35.01	0.10	930.99	0.96	5.08	0.33	0.99	0.23	0.31	0.99	0.000
P.67	29.34	0.11	995.21	0.96	1.18	0.51	0.98	0.43	0.47	0.93	0.067
P.21	26.76	0.13	1170.12	0.96	8.23	0.27	0.97	0.25	0.35	0.98	0.010
P.1	14.51	0.05	1134.88	0.96	2.40	0.60	0.98	0.35	0.36	0.94	0.070

1.2 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1

ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ในระหว่างปี ค.ศ. 2003–2009 และ ค.ศ. 2010–2013 ตามลำดับ โดยใช้โปรแกรม MOSCEM แสดงดังในตารางที่ 11 และ ภาพที่ 24 โดยในตารางดังกล่าวได้แสดงค่าทางสถิติที่ใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งประกอบด้วย ค่า KGE , KGE_L และ KGE_{FDC} และเพื่อให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองได้ง่ายขึ้นจึงได้แสดงค่า NSE เพื่อใช้เป็นตัวแปรทางสถิติในภาพรวม จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ผลการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ให้ค่า NSE เท่ากับ 0.87 ซึ่งมากกว่าในกรณีการตรวจพิสูจน์แบบจำลองซึ่งให้ค่า NSE เท่ากับ 0.83

นอกจากนั้นแล้ว ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 จะให้ผลพลอยได้เป็นกราฟน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านั้น ซึ่งจากผลการสอบเทียบแบบจำลองโดยตรงที่สถานีเหล่านั้นแสดงดังในตารางที่ 11 และ ภาพที่ 25 ถึง ภาพที่ 29 ที่แสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยของ NSE สำหรับทุกสถานีเท่ากับ 0.71 ซึ่งมีค่ามากกว่าในกรณีการตรวจพิสูจน์แบบจำลองซึ่งให้ค่าเฉลี่ยของ NSE ต่ำกว่าเล็กน้อยเท่ากับ 0.70 ในขณะที่ผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ให้ค่าเฉลี่ยของ NSE สำหรับทุกสถานี เท่ากับ 0.70 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าในกรณีการสอบเทียบแบบจำลองโดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้ ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยของ NSE 0.71 โดยมีค่าลดลงเฉลี่ยทุกสถานีเท่ากับ 2.1% และสำหรับผลการประเมินน้ำท่าที่เป็นผลพลอยได้จากการตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ให้ค่าเฉลี่ยของ NSE สำหรับทุกสถานี เท่ากับ 0.73 ซึ่งมีค่ามากกว่าในกรณีการสอบเทียบแบบจำลองโดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้ ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยของ NSE 0.70 ที่มีค่ามากกว่าโดยเฉลี่ยทุกสถานีเท่ากับ 4.6% ดังแสดงในตารางที่ 11 และ ภาพที่ 25 ถึงภาพที่ 29 อย่างไรก็ตาม จากผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และผลพลอยได้ของการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าทั้ง 5 สถานี ดังกล่าว ซึ่งความแตกต่างที่น้อยกว่าในกรณีการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านั้นจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่แตกต่างมากนัก ดังนั้นแบบจำลอง KU-URBS V.2 จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เพื่อการประเมินน้ำท่าสำหรับลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง ทั้งนี้ สาเหตุสำคัญประการหนึ่งคือ พื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ซึ่งเท่ากับ 6,350 ตารางกิโลเมตร นั้นนับว่ามีขนาดที่ไม่ใหญ่เกินกว่าที่แบบจำลองจะสามารถประเมินน้ำท่าได้ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด

สำหรับผลของพารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่เป็นผลจากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองด้วยโปรแกรม MOSCEM แสดงดังในตารางที่ 12

ตารางที่ 11 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 โดยใช้โปรแกรม MOSCEM

ช่วงเวลา	สถานี วัดน้ำท่า	การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์								% ความ แตกต่าง
		ที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง				ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1				
		NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	
การสอบเทียบ (ค.ศ. 2003-2009)	P.1	0.87	0.90	0.82	0.92	0.87	0.90	0.82	0.92	-
	P.20	0.63	0.82	0.68	0.95	0.60	0.55	0.59	0.59	-4.7%
	P.75	0.75	0.87	0.80	0.97	0.70	0.74	0.81	0.76	-6.9%
	P.4A	0.72	0.86	0.66	0.98	0.70	0.73	0.52	0.77	-2.2%
	P.67	0.78	0.88	0.76	0.96	0.81	0.84	0.72	0.88	3.9%
	P.21	0.69	0.84	0.84	0.92	0.68	0.81	0.63	0.86	-1.0%
	เฉลี่ย	0.71	0.85	0.75	0.96	0.70	0.73	0.65	0.77	-2.1%
การตรวจพิสูจน์ (ค.ศ. 2010-2013)	P.1	0.83	0.85	0.74	0.88	0.83	0.85	0.74	0.88	-
	P.20	0.57	0.66	0.66	0.69	0.66	0.68	0.62	0.73	16.2%
	P.75	0.70	0.60	0.77	0.62	0.78	0.81	0.79	0.85	10.6%
	P.4A	0.68	0.81	-0.48	0.92	0.69	0.77	-0.78	0.83	2.1%
	P.67	0.77	0.79	0.70	0.82	0.78	0.74	0.61	0.76	1.4%
	P.21	0.79	0.89	0.85	0.94	0.76	0.85	0.35	0.88	-4.0%
	เฉลี่ย	0.70	0.75	0.50	0.80	0.73	0.77	0.32	0.81	4.6%

หมายเหตุ: % ความแตกต่างประเมินจากค่า NSE ที่ได้จากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 เปรียบเทียบกับที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง

ตารางที่ 12 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่ได้จากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MOSCEM (1)

สถานี วัดน้ำท่า	IL_{max} (มม.)	pr -	F_{max} (มม.)	C_{imp} -	β -	rlr (มม./ชม.)	$K\delta t$ -	α -	x -	G -	β_G -
P.20	41.33	0.11	625.38	0.93	2.05	0.22	0.96	0.06	0.43	0.29	40.30
P.75	27.73	0.01	822.42	0.94	4.92	0.46	0.98	0.11	0.33	0.10	15.77
P.4A	32.55	0.10	624.55	0.98	2.73	0.47	0.98	0.18	0.36	0.12	33.79
P.67	46.09	0.05	433.91	0.91	5.45	0.35	0.97	0.07	0.48	0.19	20.87
P.21	11.12	0.15	1120.58	0.97	4.30	0.44	0.98	0.20	0.42	0.15	24.37
P.1	38.82	0.10	705.68	0.96	4.42	0.33	0.98	0.22	0.46	0.16	33.85

1.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง KU-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1

ในการเปรียบเทียบผลการประเมินกราฟน้ำท่าระหว่างแบบจำลอง KU-URBS V.1 และ KU-URBS V.2 ได้ทำการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของดัชนีประสิทธิภาพระหว่าง 2 แบบจำลอง ดังกล่าว ซึ่งประกอบด้วย เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของ NSE, KGE, KGE_L , และ KGE_{FDC} ดังแสดงในตารางที่ 13 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากผลการสอบเทียบแบบจำลอง KU-URBS V.1 และ KU-URBS V.2 ในช่วงเวลา ปี ค.ศ. 2003–2009 พบว่า ค่า NSE ของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ที่ได้จากแบบจำลอง KU-URBS V.2 มีค่ามากกว่า NSE ที่ได้จากแบบจำลอง KU-URBS V.1 โดยมีค่าเท่ากับ 0.87 และ 0.82 ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 5.9% และเมื่อพิจารณาจากผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลองทั้งสองในช่วงเวลา ปี ค.ศ. 2010–2013 พบว่า ค่า NSE ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 มีค่ามากกว่า NSE ที่ได้จากแบบจำลอง KU-URBS V.1 โดยมีค่าเท่ากับ 0.83 และ 0.79 ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นความแตกต่างเท่ากับ 5.5%

นอกจากนั้นแล้ว เปรอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่า NSE ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ในตารางที่ 11 เปรียบเทียบกับ NSE ของแบบจำลอง KU-URBS V.1 ในตารางที่ 9 สำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 พบว่า ในช่วงของการสอบเทียบแบบจำลอง NSE มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 11.4%, 1.9%, 10.2%, 4.2% และ 3.5% ตามลำดับ และในช่วงของการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง NSE มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 31.1%, 8.8%, -1.5%, 7.4% และ -1.5% ตามลำดับ และ สำหรับ เปรอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่า NSE ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ในตารางที่ 11 เปรียบเทียบกับ NSE ของแบบจำลอง KU-URBS V.1 ในตารางที่ 9 สำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านั้นโดยตรง พบว่า ในช่วงของการสอบเทียบแบบจำลอง NSE มีความแตกต่างเท่ากับ 7.3%, -4.9%, 2.4%, -0.7% และ 2.5% ตามลำดับ และในช่วงของการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง NSE มีความแตกต่างเท่ากับ -2.5%, -5.4%, -3.0%, 0.7% และ 9.1% ตามลำดับ

จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แบบจำลอง KU-URBS V.2 มีประสิทธิภาพในการประเมินน้ำท่าได้ดีกว่าแบบจำลอง KU-URBS V.1 อย่างชัดเจนในภาพรวม สำหรับในกรณีที่เป็นกรณีประเมินน้ำท่าที่ผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ทำการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 โดยตรง พบว่าแบบจำลอง KU-URBS V.2 มีประสิทธิภาพในการประเมินน้ำท่าได้ไม่แตกต่างจากแบบจำลอง URBS V.1 ทั้งนี้ เนื่องจากแบบจำลอง KU-URBS V.2 เป็นแบบจำลองที่ช่วยปรับปรุงความถูกต้องในระดับลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง ดังนั้น จึงไม่มีผลมากนักในกรณีที่ทำการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยตรงในแต่ละสถานีวัดน้ำท่า

ตารางที่ 13 เปรียบเทียบความแตกต่างของดัชนีประสิทธิภาพของแบบจำลอง KU-URBS V.2
เปรียบเทียบกับ KU-URBS V.1

ช่วงเวลา	สถานีวัดน้ำท่า	การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์							
		ที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง				ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1			
		NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}
การสอบเทียบ (ค.ศ. 2003-2009)	P.1	5.9%	0.7%	-0.9%	-2.6%	5.9%	0.7%	-0.9%	-2.6%
	P.20	7.3%	11.6%	-3.8%	11.0%	11.4%	12.9%	365.9%	10.1%
	P.75	-4.9%	-0.5%	-1.2%	2.6%	1.9%	-3.6%	4.8%	-4.8%
	P.4A	2.4%	3.1%	1.3%	5.2%	10.2%	-6.1%	199.0%	-12.7%
	P.67	-0.7%	-0.8%	1.7%	-1.9%	4.2%	4.1%	-4.5%	3.3%
	P.21	2.5%	4.6%	1.4%	2.8%	3.5%	8.6%	160.3%	6.5%
การตรวจพิสูจน์ (ค.ศ. 2010-2013)	P.1	5.5%	12.1%	-9.3%	12.4%	5.5%	12.1%	-9.3%	12.4%
	P.20	-2.5%	-11.5%	-10.9%	-16.3%	31.1%	48.5%	454.8%	42.8%
	P.75	-5.4%	-11.1%	-7.1%	-11.1%	8.8%	15.0%	-3.5%	14.4%
	P.4A	-3.0%	-1.9%	-261.8%	-1.0%	-1.5%	0.0%	-200.8%	-0.5%
	P.67	0.7%	1.7%	-4.8%	1.6%	7.4%	10.7%	-12.4%	10.0%
	P.21	9.1%	8.9%	11.7%	7.0%	-1.5%	1.2%	129.2%	1.0%

หมายเหตุ: % ความแตกต่างประเมินจากค่าดัชนีประสิทธิภาพที่ได้จากการสอบเทียบและ
ตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 เปรียบเทียบกับ KU-URBS V.1

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแบบจำลอง KI-URBS V.2 เป็นการปรับปรุงโครงสร้างของแบบจำลองในส่วนของการประเมินน้ำใต้ดิน ซึ่งจะมีอิทธิพลมากต่อการไหลของน้ำในช่วงฤดูแล้ง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้เปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าเฉพาะในช่วงฤดูแล้งระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเมษายน ทั้งช่วงเวลาของการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.1 และ KU-URBS V.2 โดยได้แสดงค่า NSE ที่ได้จากทั้ง 2 แบบจำลองดังในตารางที่ 14 โดยเมื่อทำการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1, P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 โดยตรง และนำค่า NSE ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ไปเปรียบเทียบกับค่า NSE ในกรณีของ KU-URBS V.1 พบว่าค่าเฉลี่ยของ NSE ของทั้ง 6 สถานี มีค่าเท่ากับ 0.53 และ 0.54 ตามลำดับ โดยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ให้ผลการประเมินได้ใกล้เคียงกว่าผลที่ได้จากแบบจำลอง KU-URBS V.1 เพียง 0.95% นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลองสำหรับสถานีวัดน้ำท่าดังกล่าวระหว่างแบบจำลองทั้งสอง พบว่าค่าเฉลี่ยของ NSE ทั้ง 6 สถานี มีค่าเท่ากับ 0.33 และ 0.44 ตามลำดับ ซึ่งแบบจำลอง KU-URBS V.2 ให้ค่า NSE สูงกว่า KU-URBS V.1 เท่ากับ 34.34%

เมื่อพิจารณาผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 โดยเมื่อนำ NSE ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ไปเปรียบเทียบกับ KU-URBS V.1 พบว่า NSE มีค่าเพิ่มขึ้นทุกสถานีวัดน้ำท่า โดยค่าเฉลี่ยของ NSE ของทั้ง 6 สถานี มีค่าเท่ากับ 0.42 และ 0.58 ตามลำดับ ซึ่งแบบจำลอง KU-URBS V.2 ให้ค่า NSE สูงกว่า KU-URBS V.1 เท่ากับ 38.25% และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลองสำหรับสถานีวัดน้ำท่าดังกล่าวระหว่างแบบจำลองทั้งสอง มีค่าเพิ่มขึ้นทุกสถานีวัดน้ำท่า เช่นเดียวกับในกรณีการสอบเทียบแบบจำลอง โดยค่าเฉลี่ยของ NSE ของทั้ง 6 สถานี มีค่าเท่ากับ 0.26 และ 0.45 ตามลำดับ ซึ่งแบบจำลอง KU-URBS V.2 ให้ค่า NSE สูงกว่า KU-URBS V.1 เท่ากับ 72.61%

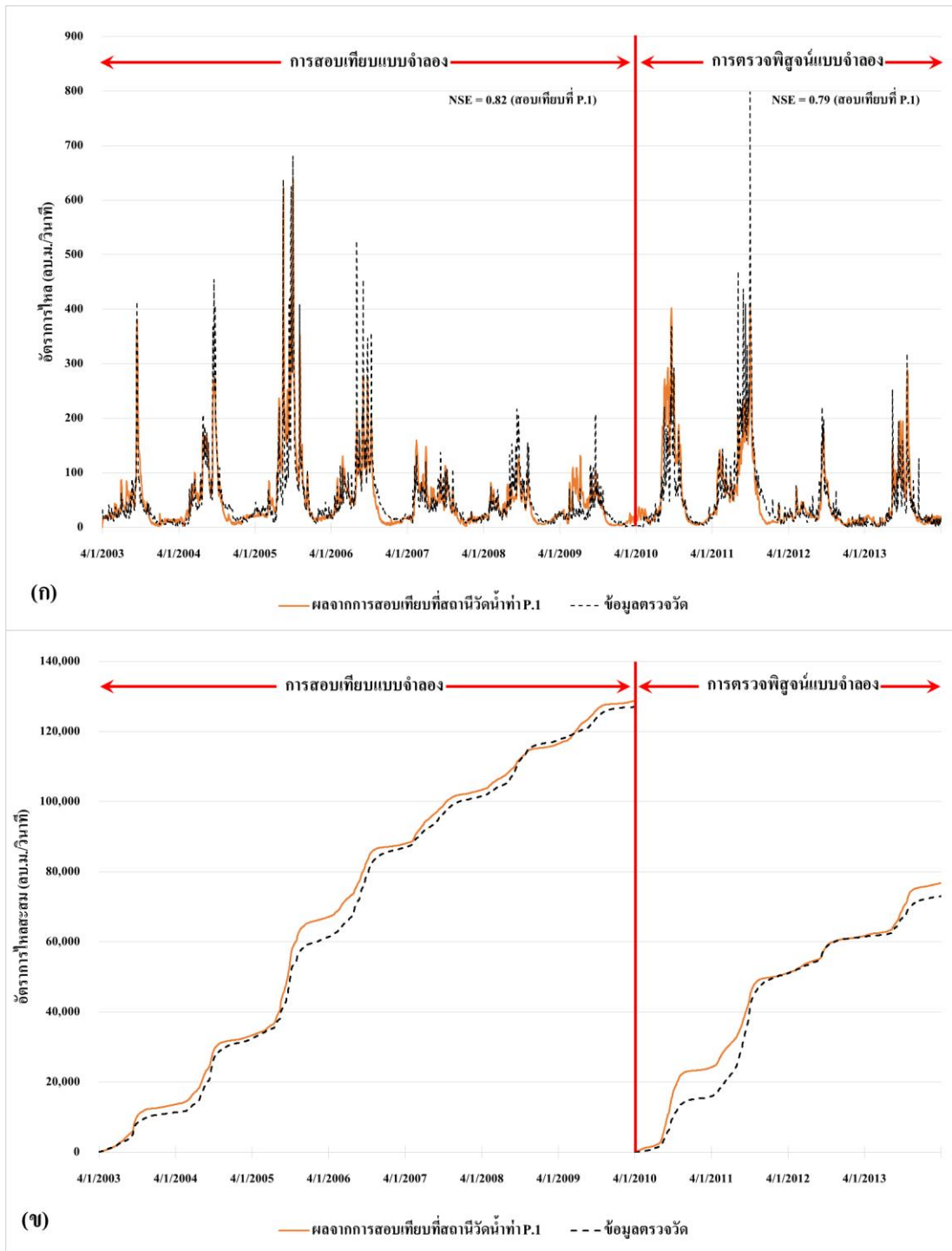
จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง KU-URBS V.2 มีประสิทธิภาพในการประเมินน้ำท่าในฤดูแล้งได้ดีกว่าแบบจำลอง KU-URBS V.1 อย่างชัดเจน สำหรับกรณีที่เป็น การประเมินน้ำท่าที่ผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ทำ การสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 โดยตรง พบว่าแบบจำลอง KU-URBS V.2 มีประสิทธิภาพในการประเมินน้ำท่าในฤดูแล้งได้ไม่แตกต่างจากแบบจำลอง URBS V.1 มากนักในกรณีการสอบเทียบแบบจำลอง แต่ในกรณีการตรวจพิสูจน์ พบว่าแบบจำลอง KU-URBS V.2 ให้ค่า NSE ที่สูงกว่าผลที่ได้จาก KU-URBS V.1 ค่อนข้างมาก ดังนั้น

แบบจำลอง KU-URBS V.2 มีความเหมาะสมในการประเมินน้ำท่าสำหรับลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง ซึ่งมีประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง KU-URBS V.1

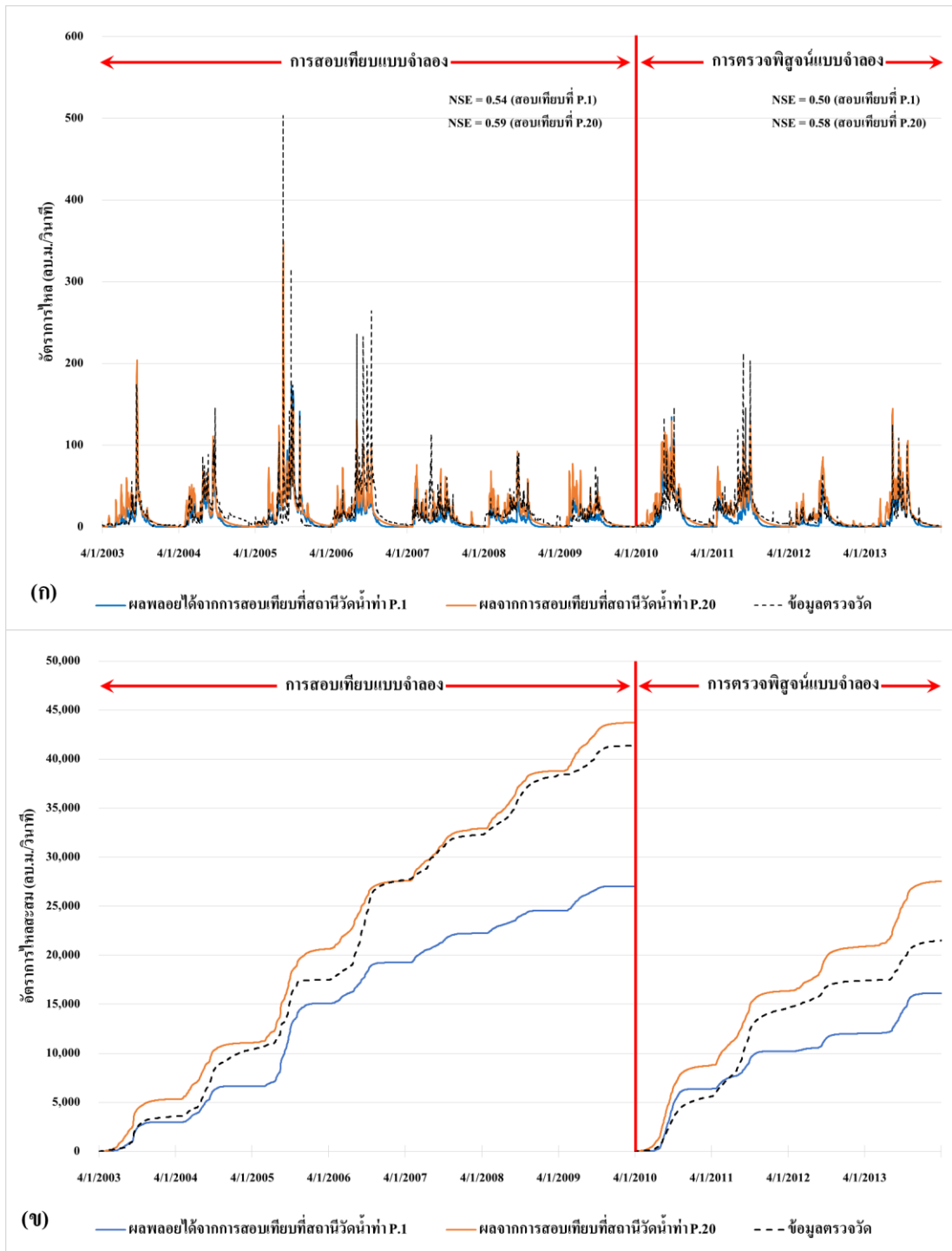
ตารางที่ 14 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) โดยใช้โปรแกรม MOSCEM

ช่วงเวลา	สถานีวัดน้ำท่า	การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์					
		ที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง			ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1		
		NSE (KU-URBS V.1)	NSE (KU-URBS V.2)	% ความแตกต่าง	NSE (KU-URBS V.1)	NSE (KU-URBS V.2)	% ความแตกต่าง
การสอบเทียบ (ค.ศ. 2003-2009)	P.1	0.72	0.82	14.5%	0.72	0.82	14.5%
	P.20	0.24	0.30	21.6%	-0.03	0.22	794.4%
	P.75	0.70	0.68	-2.7%	0.65	0.69	6.3%
	P.4A	0.42	0.51	21.6%	0.56	0.69	22.4%
	P.67	0.43	0.51	19.2%	0.45	0.57	25.9%
	P.21	0.65	0.37	-44.0%	0.16	0.48	195.3%
	เฉลี่ย	0.53	0.54	0.95%	0.42	0.58	38.25%
การตรวจพิสูจน์ (ค.ศ. 2010-2013)	P.1	0.37	0.57	53.3%	0.37	0.57	53.3%
	P.20	0.04	0.05	19.7%	-0.16	0.19	215.9%
	P.75	0.57	0.55	-3.7%	0.42	0.52	23.6%
	P.4A	0.28	0.44	58.9%	0.47	0.50	5.4%
	P.67	0.21	0.53	148.0%	0.40	0.43	7.7%
	P.21	0.51	0.52	2.5%	0.07	0.50	615.6%
	เฉลี่ย	0.33	0.44	34.34%	0.26	0.45	72.61%

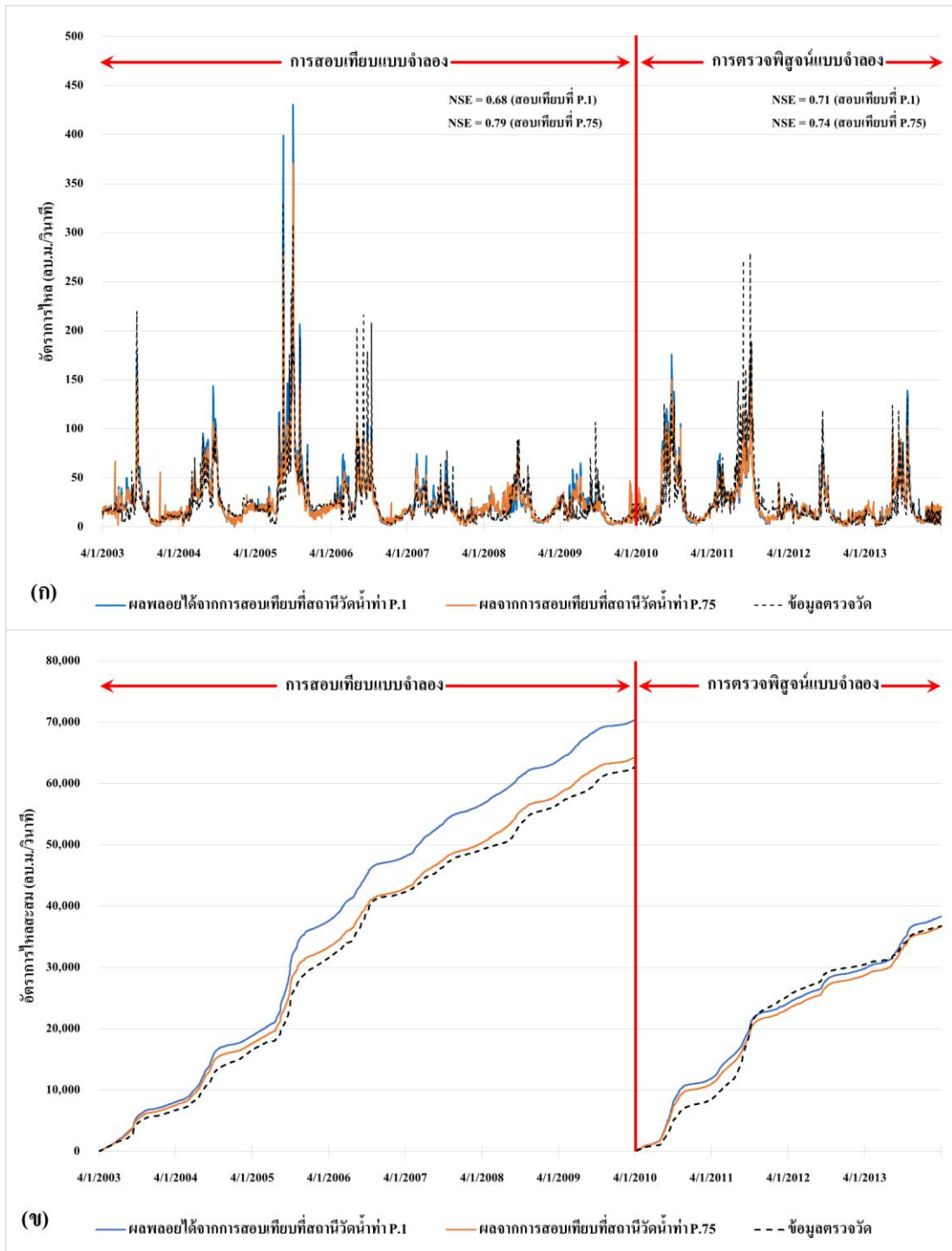
หมายเหตุ: % ความแตกต่างประเมินจากค่า NSE ที่ได้จากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 เปรียบเทียบกับ KU-URBS V.1



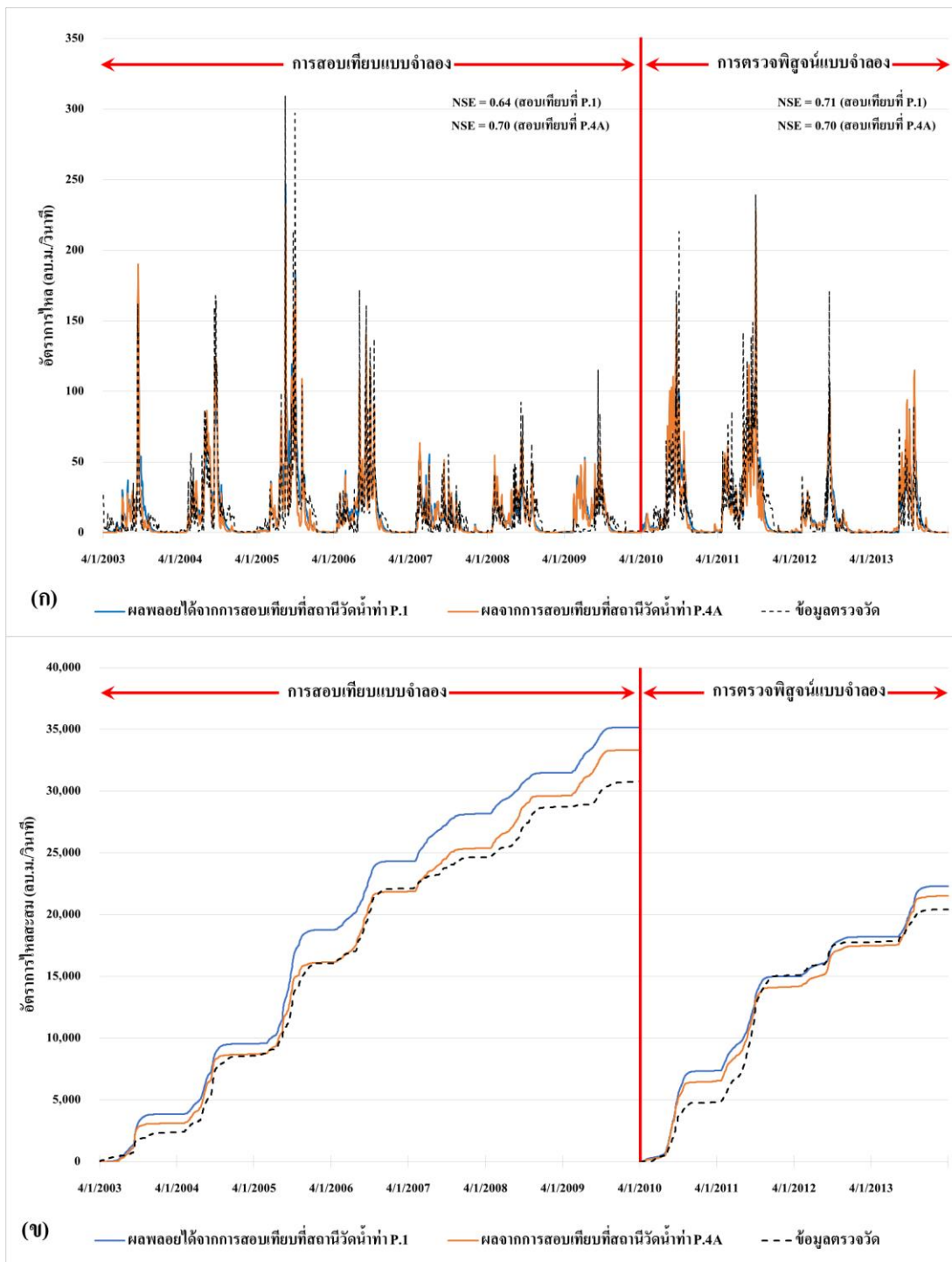
ภาพที่ 18 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.1 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.1 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOSCEM



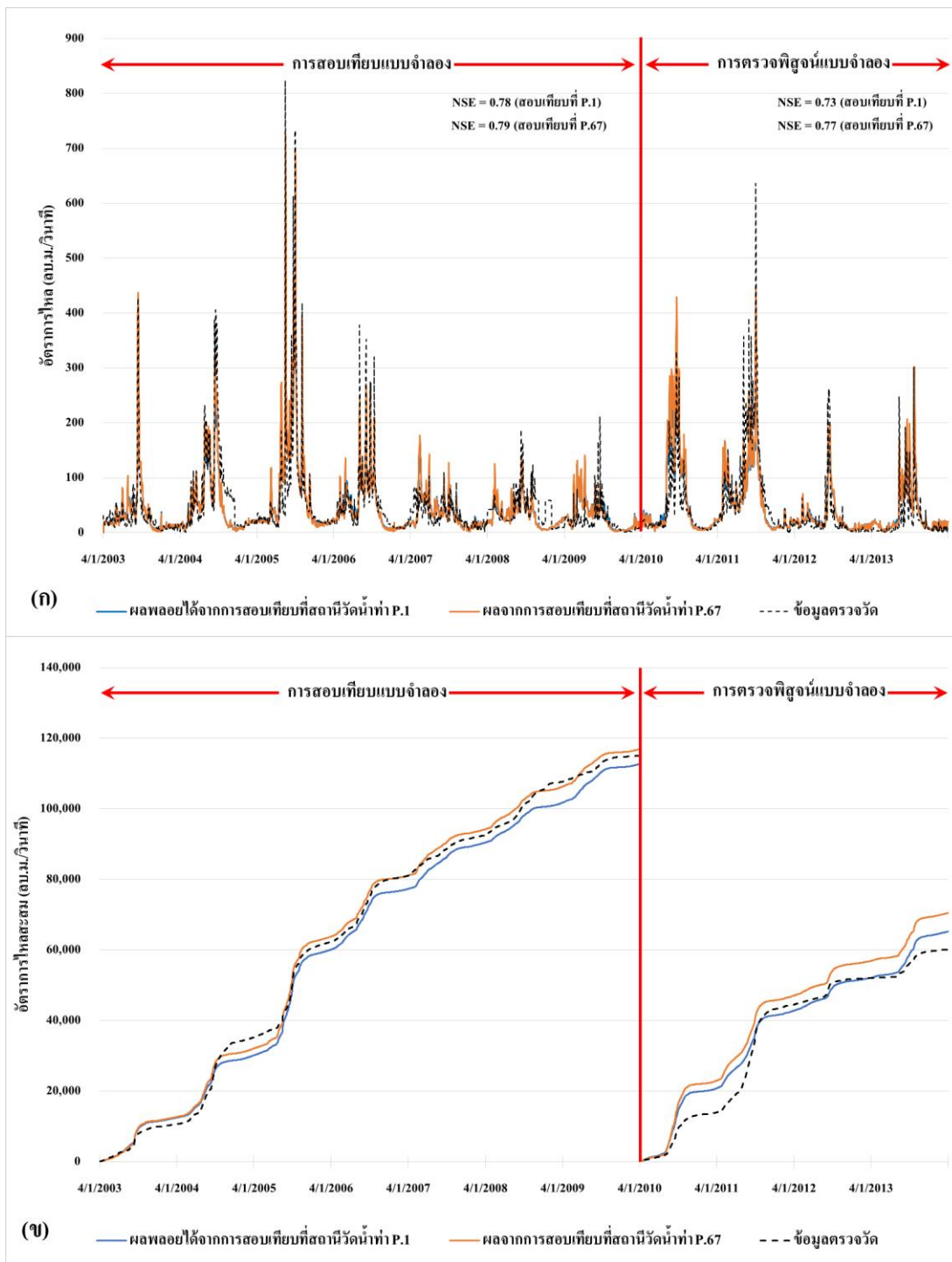
ภาพที่ 19 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.20 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.1 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOSCEM



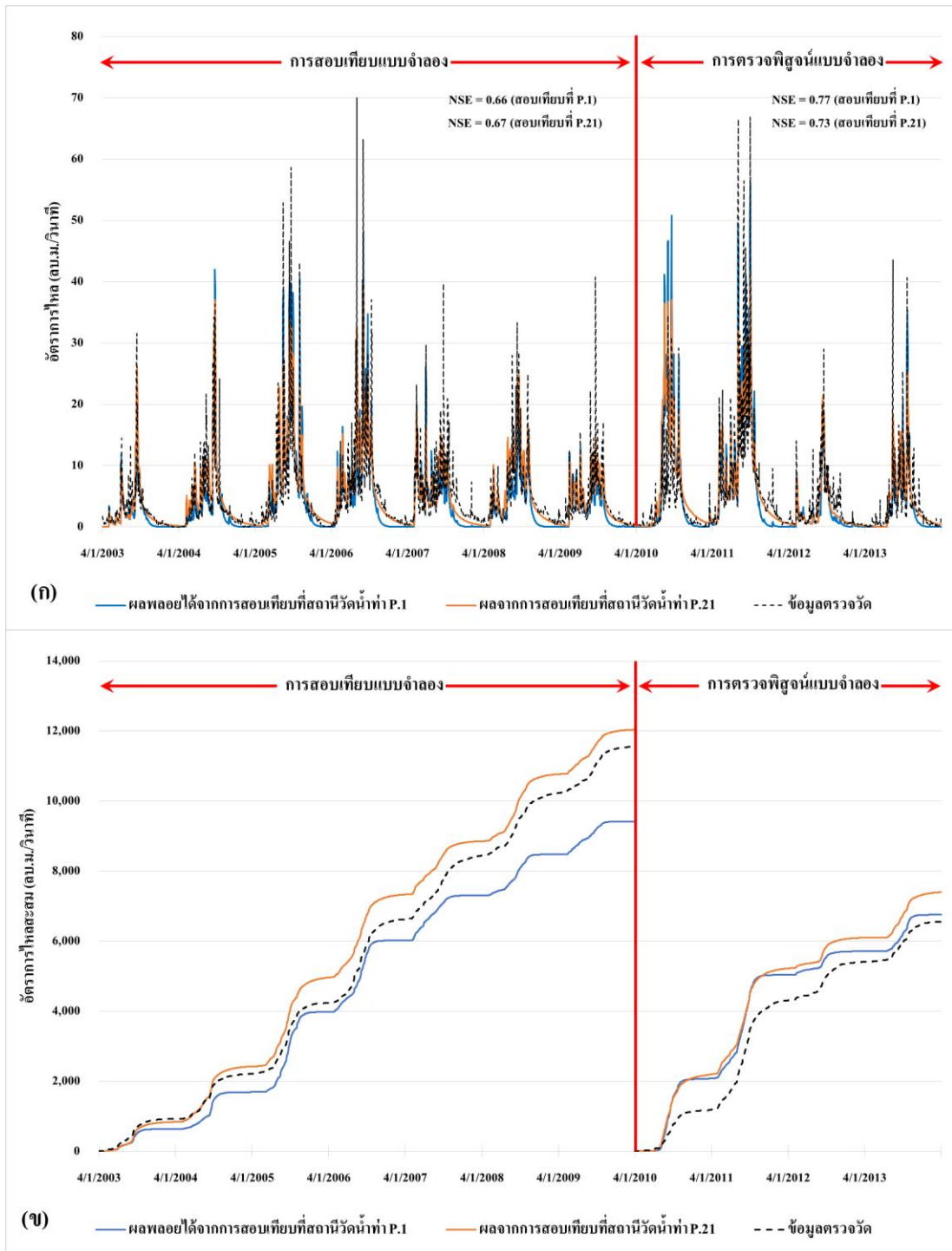
ภาพที่ 20 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.75 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.1 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOSCEM



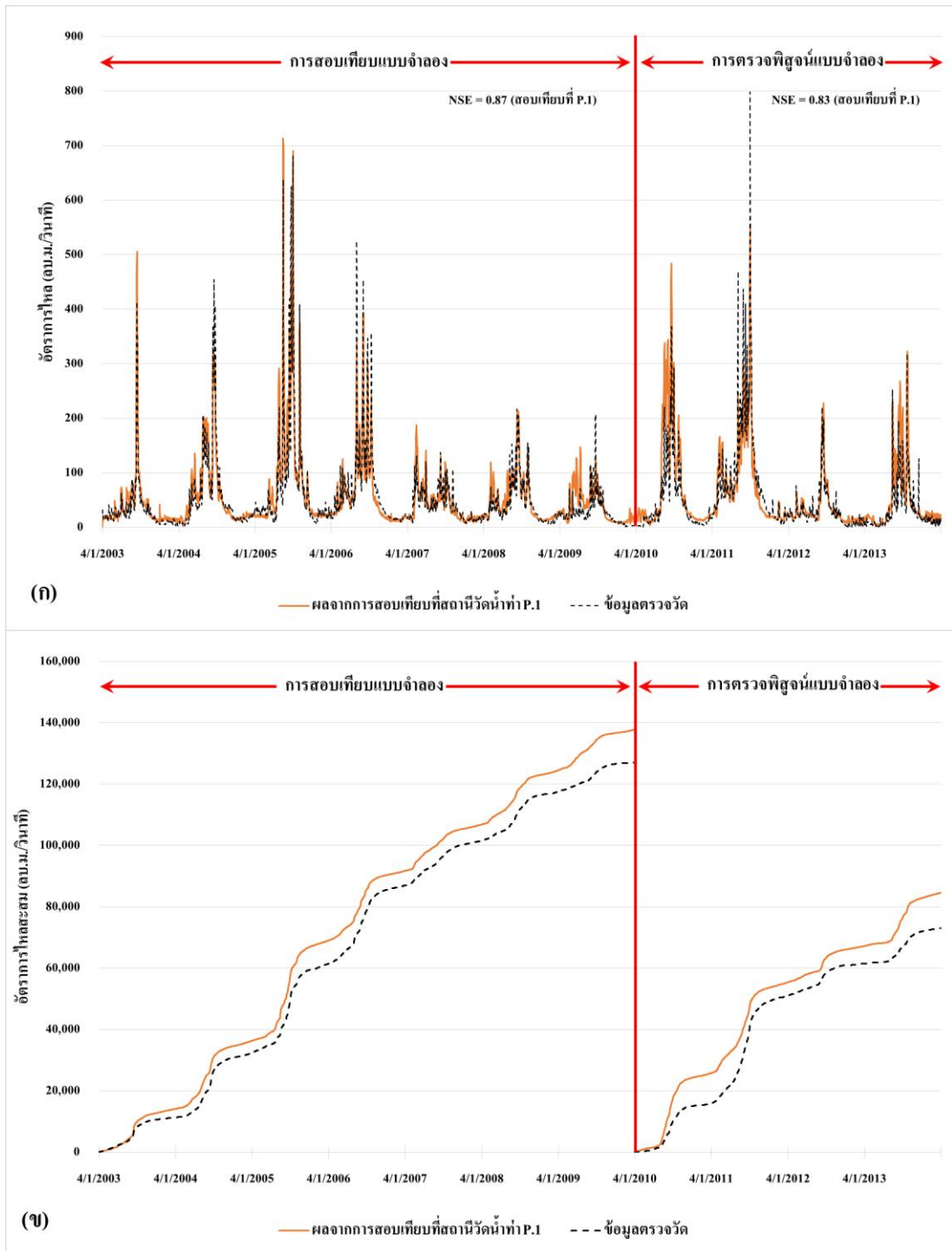
ภาพที่ 21 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.4A ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.1 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOSCEM



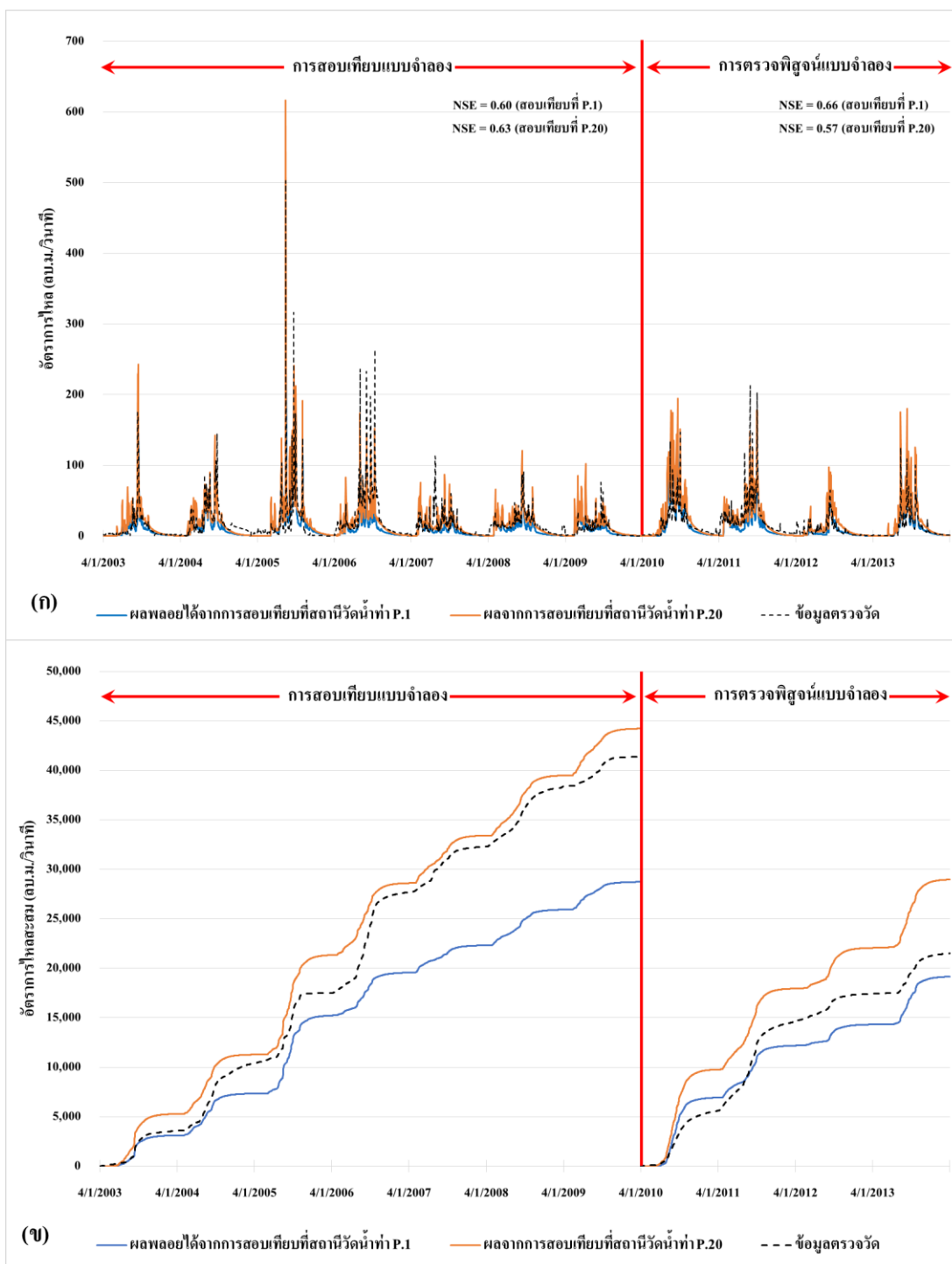
ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.67 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.1 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOSCEM



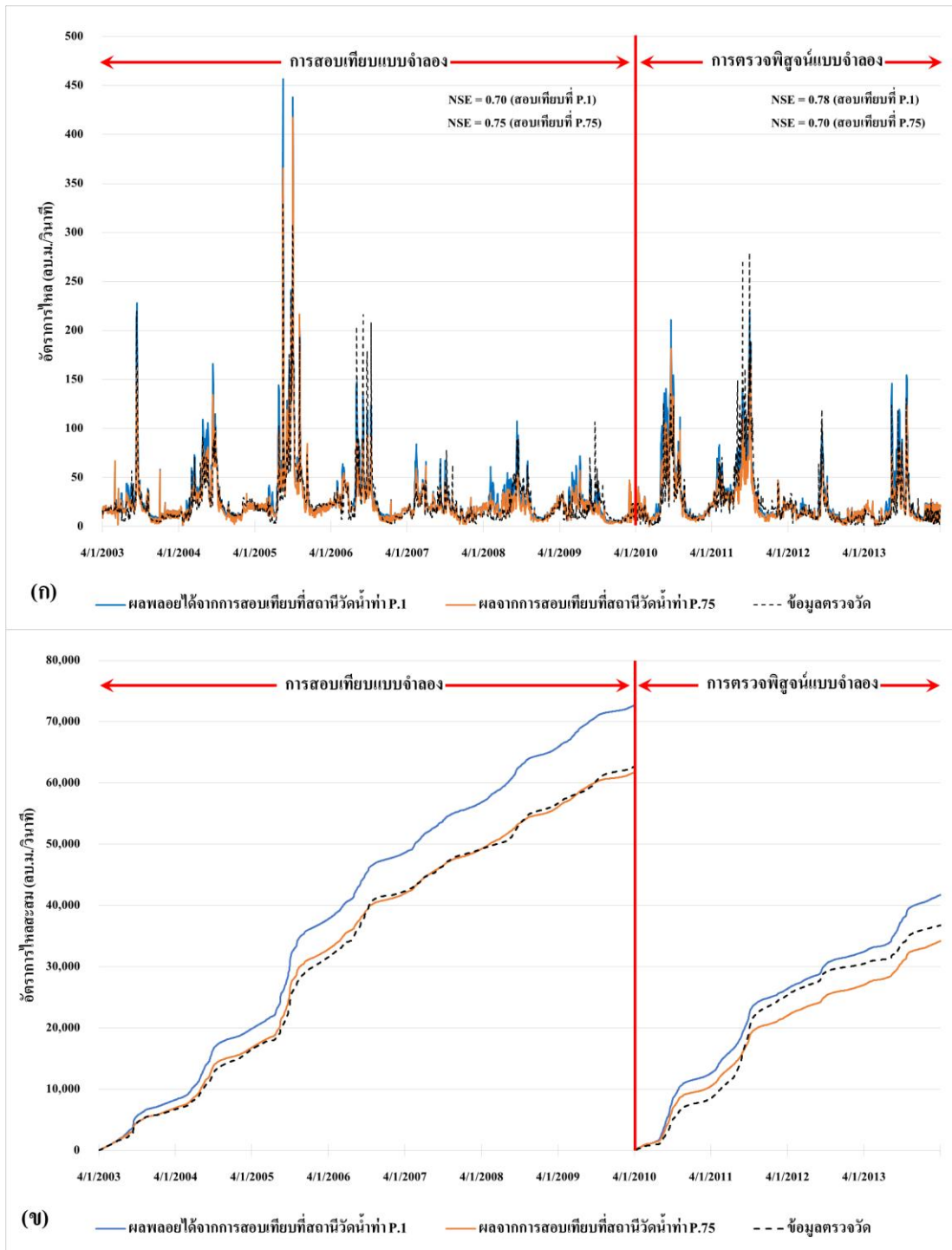
ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.21 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.1 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOSCEM



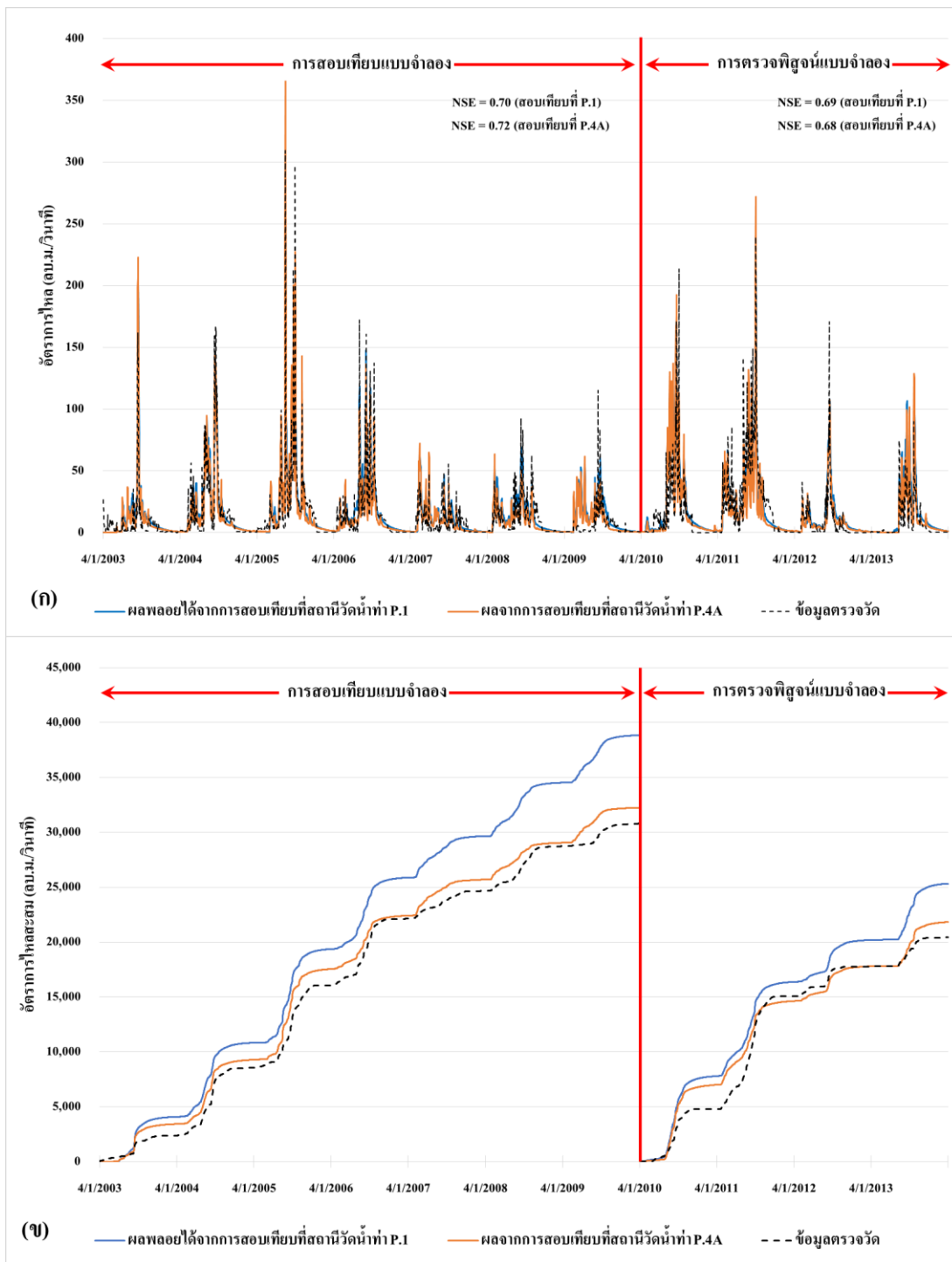
ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.1 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOSCEM



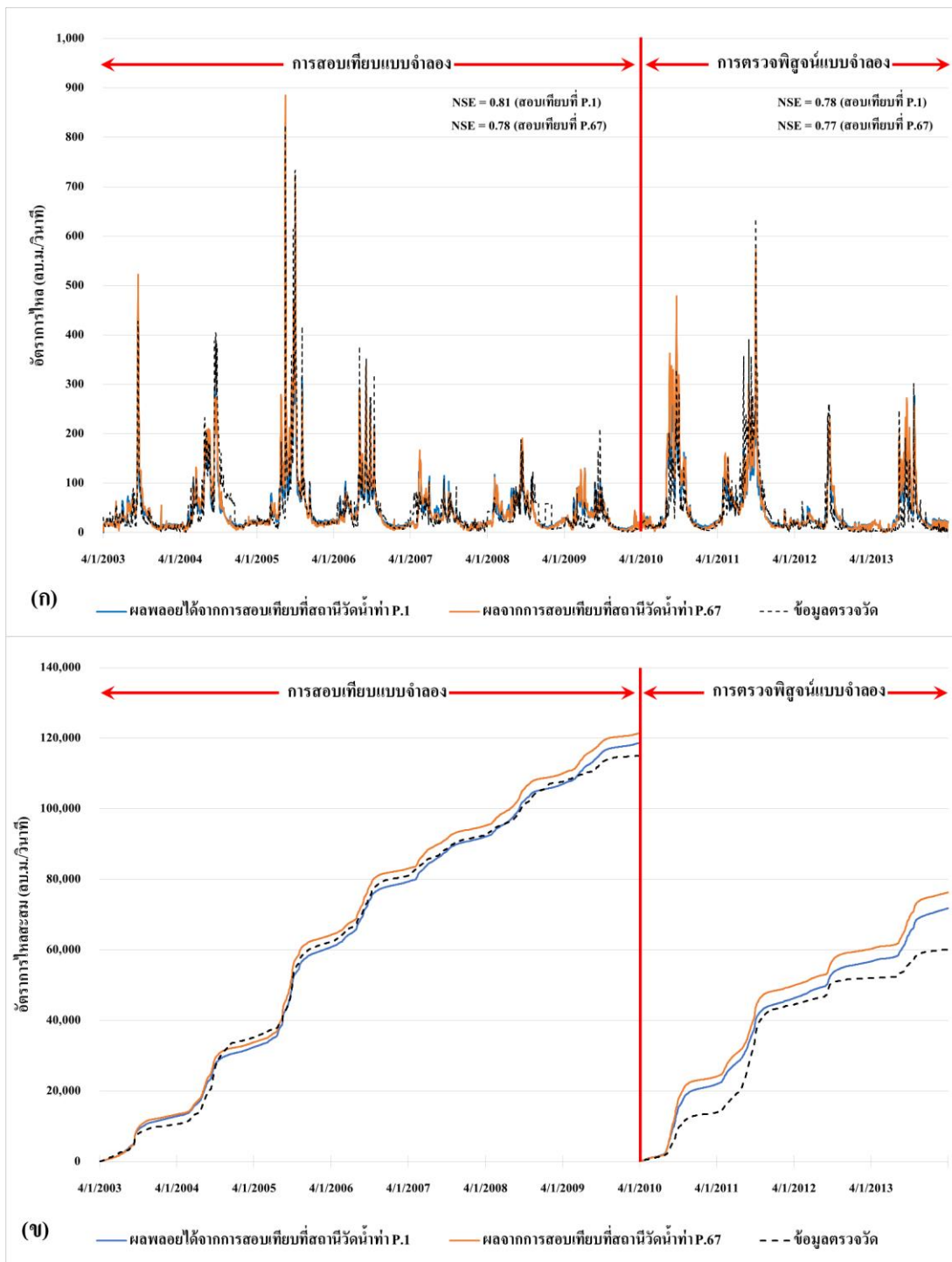
ภาพที่ 25 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.20 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOSCEM



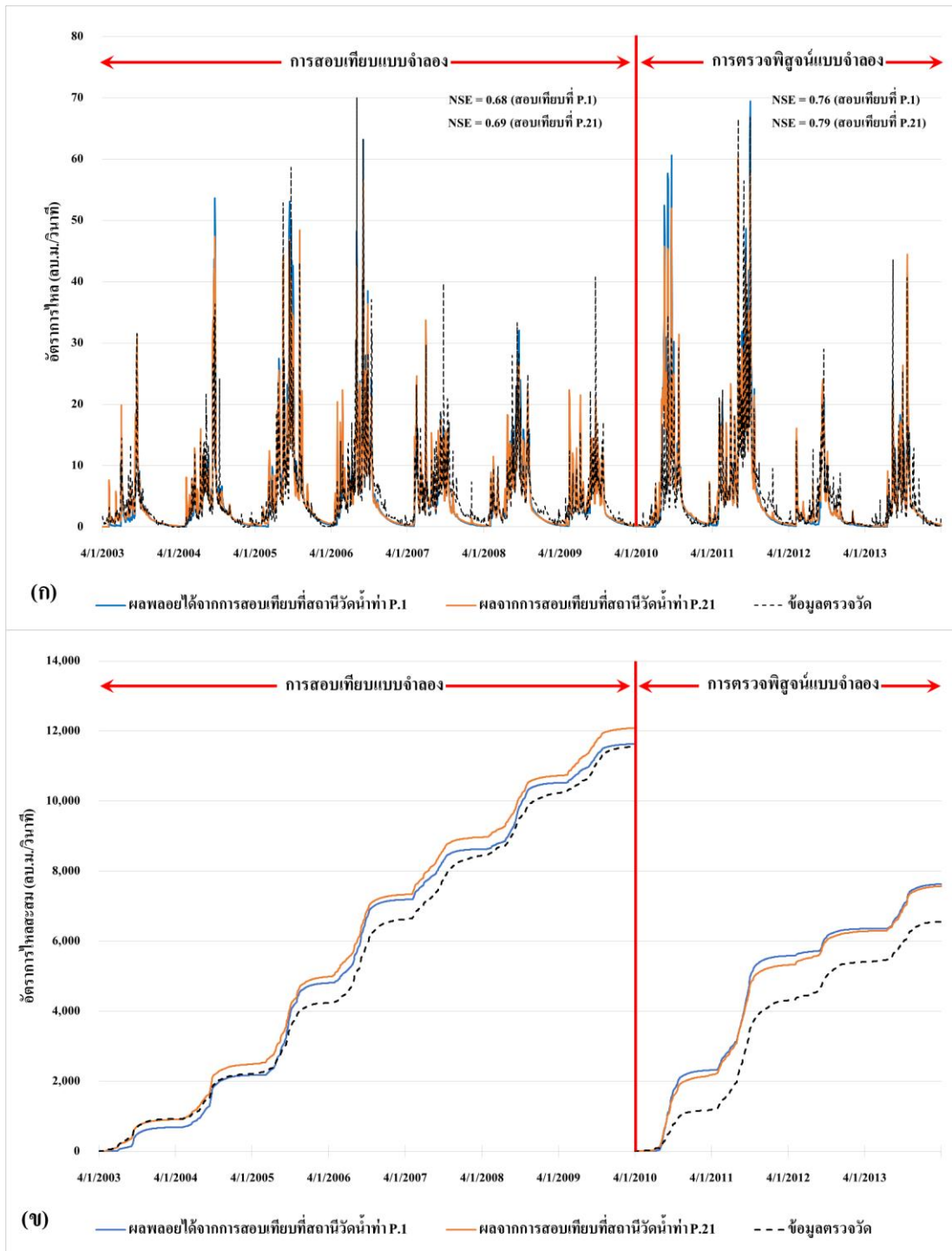
ภาพที่ 26 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.75 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOSCEM



ภาพที่ 27 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.4A ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOSCEM



ภาพที่ 28 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.67 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOSCEM



ภาพที่ 29 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.21 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOSCEM

2. ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 โดยการสอบเทียบแบบและตรวจพิสูจน์จำลองแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM

ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ในระหว่างปี ค.ศ. 2003–2009 และ ค.ศ. 2010–2013 ตามลำดับ โดยใช้โปรแกรม MOSCEM แสดงดังในตารางที่ 15 และ ภาพที่ 30 โดยในตารางดังกล่าวได้แสดงค่าทางสถิติที่ใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งประกอบด้วย ค่า KGE , KGE_L และ KGE_{FDC} และจากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ผลการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ให้ค่า NSE เท่ากับ 0.85 ซึ่งใกล้เคียงกับในกรณีการตรวจพิสูจน์แบบจำลองซึ่งให้ค่า NSE เท่ากับ 0.84

นอกจากนั้นแล้ว เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างกราฟน้ำท่าของสถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67, P.21, P.1, P.81, P.77, P.82, P.84, P.76, P.85 และ P.24A ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ดังแสดงในตารางที่ 15 พบว่า มีเพียงสถานีที่ตั้งอยู่บนแม่น้ำปิงสายหลักเท่านั้นที่ให้ผลการประเมินน้ำท่าจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ กล่าวคือ ผลการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.67 และ P.1 ให้ค่า NSE เท่ากับ 0.54, 0.43, 0.66 และ 0.67 ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อนำผลการประเมินน้ำท่าของสถานีดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านั้นโดยตรงซึ่งมีค่า NSE เท่ากับ 0.63, 0.75, 0.78 และ 0.87 ตามลำดับ พบว่า NSE ในกรณีที่เป็นผลพลอยได้ให้ค่าน้อยกว่าในกรณีการสอบเทียบโดยตรงสำหรับทุกสถานีวัดน้ำท่าเท่ากับ 14.2%, 42.7%, 15.7% และ 22.8% ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อนำผลการประเมินน้ำท่าของสถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.67 และ P.1 ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 มาทำการตรวจพิสูจน์แบบจำลองพบว่า NSE มีค่าเท่ากับ 0.54, 0.68, 0.72 และ 0.70 ตามลำดับ ในขณะที่ผลการตรวจพิสูจน์โดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านั้นให้ค่า NSE เท่ากับ 0.57, 0.70, 0.77 และ 0.83 ตามลำดับ โดยในกรณีที่เป็นผลพลอยได้ให้ค่า NSE ที่น้อยกว่าในกรณีการตรวจพิสูจน์โดยตรงสำหรับทุกสถานีวัดน้ำท่าเท่ากับ 4.3%, 3.1%, 6.6% และ 16.6% ตามลำดับ

สำหรับผลของพารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่เป็นผลจากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ด้วยโปรแกรม MOSCEM แสดงดังในตารางที่ 16

จากผลการศึกษากล่าวมาข้างต้น ซึ่งพบว่า แบบจำลอง KU-URBS V.2 ไม่สามารถให้ผลการประเมินน้ำท่าที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดที่สถานีวัดน้ำท่าด้านเหนือน้ำของ P.73 ได้ ซึ่งแตกต่างจากในกรณีที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.73 มีขนาดใหญ่ คือเท่ากับ 14,814 ตารางกิโลเมตร ดังนั้นอาจมีการส่งน้ำไปใช้ในระหว่างเส้นทางการไหลของน้ำ รวมทั้งสภาพการใช้ที่ดินที่มีความแตกต่างกันในแต่ละลุ่มน้ำย่อย ทั้งนี้ ถ้าได้มีการพัฒนาแบบจำลอง KU-URBS เพิ่มเติมในอนาคตเพื่อให้สามารถประเมินพารามิเตอร์ที่เป็นตัวแทนของแบบจำลองในระดับลุ่มน้ำย่อย โดยการใส่ข้อมูลลักษณะเฉพาะทางกายภาพของลุ่มน้ำย่อย ซึ่งอาจจะทำให้ผลการประเมินน้ำท่าในระดับลุ่มน้ำย่อยมีความถูกต้องเพิ่มมากขึ้น



1532608965

ตารางที่ 15 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 โดยโปรแกรม MOSCEM

ช่วงเวลา	ลำน้ำ	สถานี วัดน้ำท่า	การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์								% ความ แตกต่าง
			ที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง				ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73				
			NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	
การสอบเทียบ (ค.ศ. 2003-2009)	ลำน้ำสายหลัก	P.73	0.85	0.92	0.75	0.98	0.85	0.92	0.75	0.98	-
		P.20	0.63	0.82	0.68	0.95	0.54	0.64	-0.53	0.73	-14.20%
		P.75	0.75	0.87	0.8	0.97	0.43	0.53	0.67	0.55	-42.70%
		P.67	0.78	0.88	0.76	0.96	0.66	0.8	0.69	0.87	-15.70%
		P.1	0.87	0.9	0.82	0.92	0.67	0.69	0.72	0.71	-22.80%
		เฉลี่ย	0.78	0.88	0.76	0.96	0.63	0.72	0.46	0.77	-18.81%
	ลำน้ำสายก	P.4A	0.72	0.86	0.66	0.98	0.36	0.52	-0.2	0.57	-49.40%
		P.21	0.69	0.84	0.84	0.92	0.29	0.47	-1.39	0.49	-57.60%
		P.81	0.66	0.68	0.63	0.77	0.2	0.58	-1.07	0.65	-69.70%
		P.77	0.21	0.6	0.52	0.82	0.3	0.48	-15.39	0.65	41.50%
		P.82	0.71	0.84	0.84	0.95	0	0.34	-1.85	0.37	-99.50%
		P.84	0.6	0.8	0.75	0.98	-1.4	-0.41	-3.11	-0.4	-333.20%
		P.76	0.39	0.64	0.8	0.87	0.36	0.54	-0.61	0.63	-8.70%
		P.24A	0.53	0.75	0.7	0.95	-0.05	-0.25	-3.99	-0.23	-109.70%
		เฉลี่ย	0.56	0.75	0.72	0.91	0.01	0.28	-3.45	0.34	-98.67%
		เฉลี่ยทั้งหมด	0.65	0.80	0.73	0.92	0.25	0.45	-1.95	0.51	-61.74%

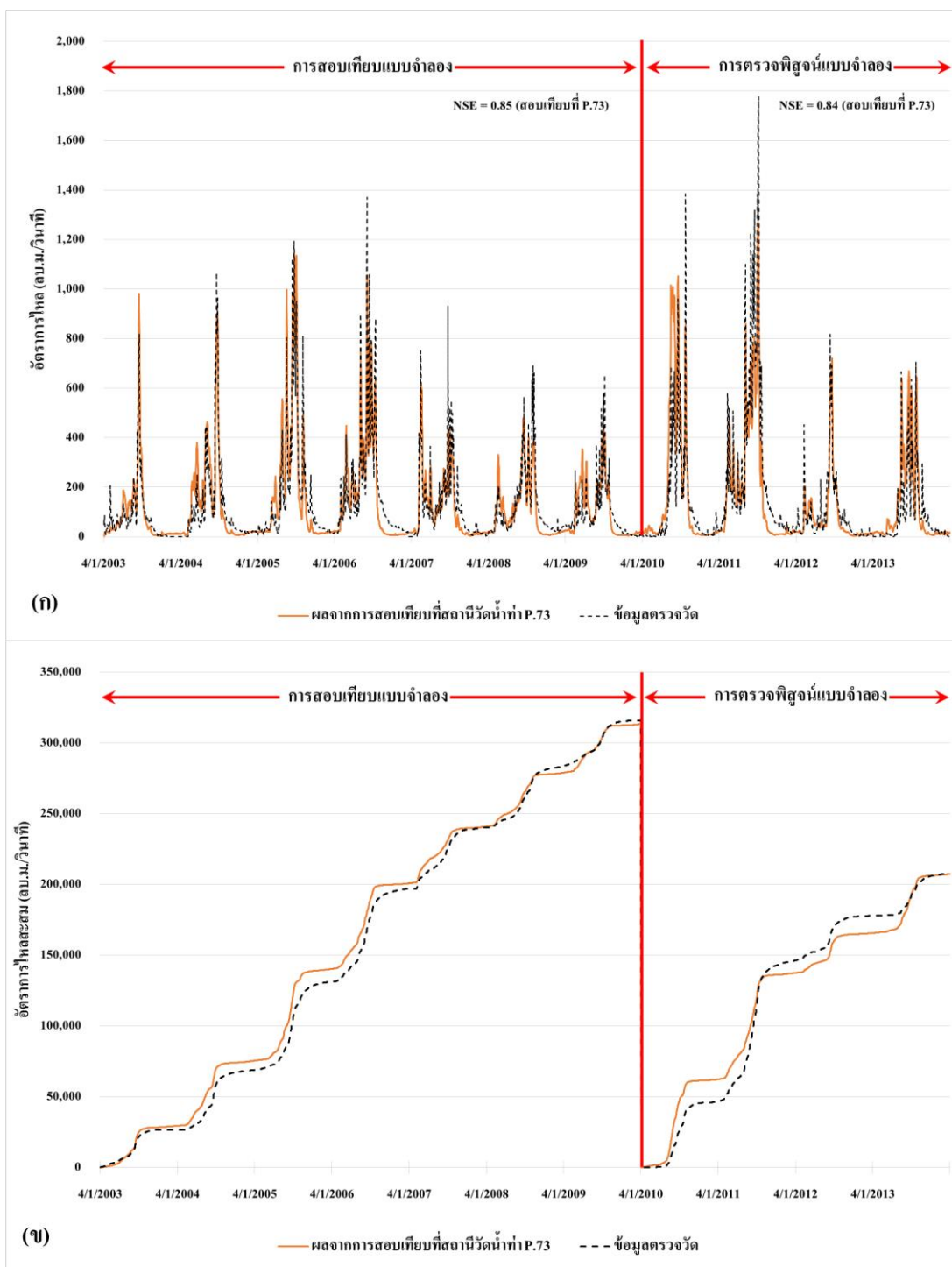
ตารางที่ 15 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 โดยโปรแกรม MOSCEM (ต่อ)

ช่วงเวลา	ลำน้ำ	สถานี วัดน้ำท่า	การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์								% ความ แตกต่าง
			ที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง				ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73				
			NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	
การตรวจพิสูจน์(ค.ศ. 2010-2013	ลำน้ำสายหลัก	P.73	0.84	0.79	0.71	0.8	0.84	0.79	0.71	0.8	-
		P.20	0.57	0.66	0.66	0.69	0.54	0.73	-0.67	0.81	-4.30%
		P.75	0.7	0.6	0.77	0.62	0.68	0.81	0.78	0.87	-3.10%
		P.67	0.77	0.79	0.7	0.82	0.72	0.77	0.75	0.81	-6.60%
		P.1	0.83	0.85	0.74	0.88	0.7	0.77	0.81	0.81	-16.60%
	เฉลี่ย	0.74	0.74	0.72	0.76	0.70	0.77	0.48	0.82	-6.20%	
	ลำน้ำสาขา	P.4A	0.68	0.81	-0.48	0.92	0.47	0.58	0.1	0.62	-30.10%
		P.21	0.79	0.89	0.85	0.94	0.52	0.62	-2.52	0.64	-34.40%
		P.81	0.67	0.65	0.65	0.69	0.66	0.72	-1.04	0.74	-0.90%
		P.77	0.59	0.77	-5.34	0.91	0.03	0.37	-1.68	0.43	-1673.00%
		P.82	0.51	0.69	0.54	0.74	-0.71	-0.02	-2.01	-0.01	-239.80%
		P.84	0.63	0.77	0.37	0.87	-0.75	-0.08	-1.29	-0.06	-219.70%
		P.76	0.51	0.21	0.42	0.22	0.61	0.43	-0.35	0.45	20.40%
		P.24A	0.59	0.58	0.72	0.64	-0.01	-0.29	-4.94	-0.27	-101.50%
		เฉลี่ย	0.62	0.67	-0.28	0.74	0.10	0.29	-1.72	0.32	-83.50%
		เฉลี่ยทั้งหมด	0.67	0.70	0.10	0.75	0.33	0.48	-0.87	0.51	-50.46%

หมายเหตุ: % ความแตกต่างประเมินจากค่า NSE ที่ได้จากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 เปรียบเทียบกับที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง

ตารางที่ 16 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่ได้จากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์
แบบจำลองโดยโปรแกรม MOSCEM (2)

สถานี วัดน้ำท่า	IL_{max} (มม.)	pr -	F_{max} (มม.)	C_{imp} -	β -	rlr (มม./ชม.)	$K\delta t$ -	α -	x -	G -	β_G -
P.20	41.33	0.11	625.38	0.93	2.05	0.22	0.96	0.06	0.43	0.29	40.30
P.75	27.73	0.01	822.42	0.94	4.92	0.46	0.98	0.11	0.33	0.10	15.77
P.4A	32.55	0.10	624.55	0.98	2.73	0.47	0.98	0.18	0.36	0.12	33.79
P.67	46.09	0.05	433.91	0.91	5.45	0.35	0.97	0.07	0.48	0.19	20.87
P.21	11.12	0.15	1120.58	0.97	4.30	0.44	0.98	0.20	0.42	0.15	24.37
P.1	38.82	0.10	705.68	0.96	4.42	0.33	0.98	0.22	0.46	0.16	33.85
P.81	10.23	0.14	901.66	0.96	3.75	0.38	0.92	0.08	0.27	0.18	46.80
P.77	45.16	0.55	426.05	0.93	2.14	0.51	0.99	0.38	0.48	0.36	39.12
P.82	27.79	0.10	1231.37	0.95	3.13	0.51	0.98	0.31	0.45	0.45	25.93
P.84	35.62	0.07	717.83	0.92	6.30	0.52	0.96	0.11	0.35	0.20	44.48
P.85	40.52	0.40	1421.76	0.95	11.71	0.54	0.95	0.28	0.31	0.12	17.59
P.24A	23.47	0.03	233.60	0.93	12.38	0.13	0.99	0.42	0.46	0.30	48.98
P.73	44.61	0.02	426.35	0.91	6.39	0.20	0.96	0.35	0.35	0.14	37.42



ภาพที่ 30 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.73 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOSCEM

3. ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ในกรณีการใช้ข้อมูลน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดทางด้านเหนือน้ำเป็นข้อมูลด้านเข้า โดยการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM

ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า ในกรณีการใช้ข้อมูลน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดทางด้านเหนือน้ำเป็นข้อมูลด้านเข้าในระหว่างปี ค.ศ. 2003–2009 และ ค.ศ. 2010–2013 ตามลำดับ โดยใช้โปรแกรม MOSCEM ซึ่งผลการศึกษาในส่วนนี้เป็น การแสดงผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 โดยการ ใช้ข้อมูลน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดทางด้านเหนือน้ำของสถานีวัดน้ำท่า P.73 ในบางสถานีมา เป็นข้อมูลด้านเข้า เพื่อ ไปเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการนำข้อมูลน้ำท่าทางด้านเหนือน้ำมาใช้เป็น ข้อมูลด้านเข้า ซึ่งได้แสดงผลไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ ทั้งนี้ การเลือกใช้สถานีวัดน้ำท่าด้านเหนือน้ำ มาใช้เป็นข้อมูลด้านเข้าให้กับแบบจำลองได้แบ่งผลการศึกษาออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

1) กรณีที่ 1 กรณีการกำหนดให้อัตราการไหลที่วัดได้ ณ สถานี P.20, P.4A, P.21, P.81, P.77, P.84, P.85, P.24A และปริมาณน้ำที่ไหลออกจากเขื่อนแม่จัดสมบูรณ์ชล เป็นข้อมูลด้านเข้า ด้านเหนือน้ำของสถานีวัดน้ำท่า P.73 ให้กับแบบจำลอง KU-URBS V.2 โดยผลการสอบเทียบและ ตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ทั้งในกรณีการกำหนดอัตราการไหลตรวจวัดเป็น ข้อมูลด้านเข้าและกรณีปกติคือไม่มีการเพิ่มข้อมูลน้ำท่าเป็นข้อมูลด้านเข้าได้แสดงดังในตารางที่ 17 โดยตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองในกรณีที่ 1 ให้ค่า NSE เท่ากับ 0.92 และ 0.90 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง ที่ P.73 แบบปกติ ซึ่งให้ค่า NSE เท่ากับ 0.85 และ 0.84 ตามลำดับ โดยในกรณีที่ 1 ให้ค่า NSE ที่ มากกว่าในกรณีปกติสำหรับการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองคิดเป็น 7.9% และ 6.7% ตามลำดับ

นอกจากนั้นแล้ว ผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าบนลำน้ำสายหลักทั้ง 3 สถานี คือ P.75, P.67 และ P.1 สำหรับในกรณีที่ 1 มีความถูกต้องมากกว่าในกรณีปกติ ทั้งในส่วนของการสอบ เทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง โดยในส่วนของการสอบเทียบของทั้งกรณีการกำหนดอัตราการ ไหลตรวจวัดเป็นข้อมูลด้านเข้าและกรณีปกติ ซึ่งให้ค่า NSE เฉลี่ยของทั้ง 3 สถานี เท่ากับ 0.76 และ 0.64 ตามลำดับ และในส่วนของการตรวจพิสูจน์ของทั้งสองกรณีให้ค่า NSE เฉลี่ยของทั้ง 3 สถานี เท่ากับ 0.89 และ 0.75 ตามลำดับ

2) กรณีที่ 2 กรณีการกำหนดให้อัตราการไหลที่วัดได้ ณ สถานี P.75, P.4A, P.21, P.81, P.77, P.84, P.85 และ P.24A เป็นข้อมูลด้านเข้าด้านเหนือน้ำของสถานีวัดน้ำท่า P.73 ให้กับแบบจำลอง KU-URBS V.2 โดยผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ทั้งในกรณีการกำหนดอัตราการไหลตรวจวัดเป็นข้อมูลด้านเข้าและกรณีปกติคือไม่มีการเพิ่มข้อมูลน้ำท่าเป็นข้อมูลด้านเข้าได้แสดงดังในตารางที่ 18 โดยตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองในกรณีที่ 2 ให้ค่า NSE เท่ากับ 0.92 และ 0.91 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่ P.73 แบบปกติ ซึ่งให้ค่า NSE เท่ากับ 0.85 และ 0.84 ตามลำดับ โดยในกรณีที่ 2 ให้ค่า NSE ที่มากกว่าในกรณีปกติสำหรับการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองคิดเป็น 7.6% และ 7.4% ตามลำดับ

นอกจากนั้นแล้ว ผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าบนลำน้ำสายหลักทั้ง 2 สถานี คือ P.67 และ P.1 สำหรับในกรณีที่ 2 มีความถูกต้องมากกว่าในกรณีปกติ ทั้งในส่วนของ การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง โดยในส่วนของ การสอบเทียบของทั้งกรณีการกำหนดอัตราการไหลตรวจวัดเป็นข้อมูลด้านเข้าและกรณีปกติ ซึ่งให้ค่า NSE เฉลี่ยของทั้ง 2 สถานี เท่ากับ 0.91 และ 0.66 ตามลำดับ และในส่วนของ การตรวจพิสูจน์ของทั้งสองกรณีให้ค่า NSE เฉลี่ยของทั้ง 2 สถานี เท่ากับ 0.95 และ 0.71 ตามลำดับ

3) กรณีที่ 3 กรณีการกำหนดให้อัตราการไหลที่วัดได้ ณ สถานี P.67, P.21, P.81, P.77, P.84, P.85 และ P.24A เป็นข้อมูลด้านเข้าด้านเหนือน้ำของสถานีวัดน้ำท่า P.73 ให้กับแบบจำลอง KU-URBS V.2 โดยผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ทั้งในกรณีการกำหนดอัตราการไหลตรวจวัดเป็นข้อมูลด้านเข้าและกรณีปกติคือไม่มีการเพิ่มข้อมูลน้ำท่าเป็นข้อมูลด้านเข้าได้แสดงดังในตารางที่ 19 โดยตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองในกรณีที่ 3 ให้ค่า NSE เท่ากับ 0.92 และ 0.92 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่ P.73 แบบปกติ ซึ่งให้ค่า NSE เท่ากับ 0.85 และ 0.84 ตามลำดับ โดยในกรณีที่ 3 ให้ค่า NSE ที่มากกว่าในกรณีปกติสำหรับการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองคิดเป็น 8.3% และ 8.4% ตามลำดับ

นอกจากนั้นแล้ว ผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าบนลำน้ำสายหลักซึ่งก็คือสถานีวัดน้ำท่า P.1 สำหรับในกรณีที่ 3 มีความถูกต้องมากกว่าในกรณีปกติ ทั้งในส่วนของ การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง โดยในส่วนของ การสอบเทียบของทั้งกรณีการกำหนดอัตราการไหล

ตรวจวัดเป็นข้อมูลด้านเข้าและกรณีปกติ ซึ่งให้ค่า NSE เท่ากับ 0.93 และ 0.67 ตามลำดับ และใน ส่วนของการตรวจพิสูจน์ของทั้งสองกรณีให้ค่า NSE เท่ากับ 0.95 และ 0.70 ตามลำดับ

สำหรับผลของพารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่เป็นผลจากการสอบเทียบและ ตรวจพิสูจน์แบบจำลองด้วยโปรแกรม MOSCEM แสดงดังในตารางที่ 20

ทั้งนี้ สาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพของแบบจำลองดีขึ้นคือ การใช้ข้อมูลน้ำท่าที่ได้จากการ ตรวจวัดทางด้านเหนือน้ำเป็นข้อมูลด้านเข้าของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ทำให้พื้นที่การประเมิน น้ำท่าลดลงจากในกรณีปกติคือ 14,814 ตารางกิโลเมตร เหลือเพียง 11,596, 9,798 และ 7,555 สำหรับกรณีที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์ ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ของทั้ง 3 กรณี พบว่า ให้ผลการประเมินน้ำท่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก กล่าวคือ ผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ให้ค่า NSE ในกรณีการสอบเทียบแบบจำลอง เท่ากับ 0.92 ทั้ง 3 กรณี และในกรณีตรวจพิสูจน์ของทั้ง 3 กรณี เท่ากับ 0.90, 0.91 และ 0.92 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาถึงผลพลอยได้ของสถานีวัดน้ำท่าด้านเหนือน้ำของสถานีวัดน้ำท่า P.73 ของทั้ง 3 กรณี เห็นได้ว่าในกรณีที่ 1 สามารถให้ผลพลอยได้ในการประเมินน้ำท่าได้ใน 3 สถานี คือ P.75, P.67 และ P.1 ซึ่งให้จำนวนสถานีภายในได้มากกว่ากรณีที่ 2 และ 3 โดยที่ผลลัพธ์ที่สถานี P.75 และ P.67 ของกรณีที่ 1 ให้ผลการประเมินน้ำท่าที่ไม่แตกต่างกับกรณีที่ 2 และ 3 จากผลการศึกษา ดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่ากรณีที่ 1 มีความเหมาะสมมากที่สุดจากทั้ง 3 กรณี ดังนั้น ในกรณีที่ถ้า ต้องการเพิ่มความถูกต้องให้กับผลการประเมินน้ำท่าบนลำน้ำสายหลัก ก็สามารถนำข้อมูลน้ำท่าที่ ได้จากการตรวจวัดในลำน้ำสาขามาใช้เป็นข้อมูลด้านเข้าให้กับแบบจำลองได้

ตารางที่ 17 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73
ในกรณีที่ 1 โดยโปรแกรม MOSCEM

ช่วงเวลา	สถานี วัดน้ำท่า	การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์								% ความ แตกต่าง
		ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 (กรณีที่ 1)				ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 (แบบปกติ)				
		NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	
การสอบเทียบ (ค.ศ. 2003–2009)	P.73	0.92	0.96	0.71	0.99	0.85	0.92	0.75	0.98	7.9%
	P.75	0.49	0.42	0.78	0.42	0.43	0.53	0.67	0.55	12.6%
	P.67	0.86	0.87	0.78	0.88	0.66	0.80	0.69	0.87	23.7%
	P.1	0.90	0.80	0.84	0.80	0.67	0.69	0.72	0.71	25.7%
	เฉลี่ย	0.76	0.75	0.76	0.76	0.64	0.75	0.70	0.80	14.9%
การตรวจพิสูจน์ (ค.ศ. 2010–2013)	P.73	0.90	0.84	0.69	0.85	0.84	0.79	0.71	0.80	6.7%
	P.75	0.85	0.78	0.82	0.79	0.68	0.81	0.78	0.87	20.4%
	P.67	0.93	0.81	0.67	0.81	0.72	0.77	0.75	0.81	22.3%
	P.1	0.92	0.88	0.78	0.89	0.70	0.77	0.81	0.81	24.3%
	เฉลี่ย	0.89	0.81	0.73	0.82	0.75	0.79	0.75	0.82	16.5%

หมายเหตุ: % ความแตกต่างประเมินจากค่า NSE ในกรณีที่ 1 เปรียบเทียบกับแบบปกติ

ตารางที่ 18 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73
ในกรณีที่ 2 โดยโปรแกรม MOSCEM

ช่วงเวลา	สถานี วัดน้ำท่า	การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์								% ความ แตกต่าง
		ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 (กรณีที่ 2)				ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 (แบบปกติ)				
		NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	
การสอบเทียบ (ค.ศ. 2003–2009)	P.73	0.92	0.96	0.75	0.99	0.85	0.92	0.75	0.98	7.6%
	P.67	0.87	0.80	0.80	0.81	0.66	0.80	0.69	0.87	24.8%
	P.1	0.95	0.95	0.87	0.96	0.67	0.69	0.72	0.71	29.3%
	เฉลี่ย	0.91	0.88	0.84	0.88	0.66	0.75	0.71	0.79	27.2%
การตรวจพิสูจน์ (ค.ศ. 2010–2013)	P.73	0.91	0.90	0.75	0.91	0.84	0.79	0.71	0.80	7.4%
	P.67	0.96	0.89	0.81	0.89	0.72	0.77	0.75	0.81	25.3%
	P.1	0.94	0.95	0.90	0.96	0.70	0.77	0.81	0.81	26.3%
	เฉลี่ย	0.95	0.92	0.86	0.93	0.71	0.77	0.78	0.81	25.8%

หมายเหตุ: % ความแตกต่างประเมินจากค่า NSE ในกรณีที่ 2 เปรียบเทียบกับแบบปกติ
ตารางที่ 19 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73
 ในกรณีที่ 3 โดยโปรแกรม MOSCEM

ช่วงเวลา	สถานี วัดน้ำท่า	การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์								% ความ แตกต่าง
		ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 (กรณีที่ 3)				ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 (แบบปกติ)				
		NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	
การสอบเทียบ (ค.ศ. 2003-2009)	P.73	0.92	0.96	0.78	0.99	0.85	0.92	0.75	0.98	8.3%
	P.1	0.93	0.88	0.91	0.88	0.67	0.69	0.72	0.71	27.8%
การตรวจพิสูจน์ (ค.ศ. 2010-2013)	P.73	0.92	0.85	0.82	0.86	0.84	0.79	0.71	0.80	8.4%
	P.1	0.95	0.91	0.90	0.92	0.70	0.77	0.81	0.81	26.9%

หมายเหตุ: % ความแตกต่างประเมินจากค่า NSE ในกรณีที่ 3 เปรียบเทียบกับแบบปกติ

ตารางที่ 20 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่ได้จากการสอบเทียบและ
 ตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 โดยโปรแกรม MOSCEM (3)

กรณี	IL_{max}	pr	F_{max}	C_{imp}	β	rlr	$K\delta t$	α	x	G	β_G
	(มม.)	-	(มม.)	-	-	(มม./ชม.)	-	-	-	-	-
กรณีที่ 1	44.56	0.32	352.22	0.97	5.29	0.26	0.94	0.32	0.40	0.07	14.36
กรณีที่ 2	30.01	0.60	489.83	0.94	9.94	0.35	0.95	0.20	0.37	0.20	11.81
กรณีที่ 3	22.36	0.31	362.21	0.93	5.26	0.38	0.92	0.29	0.41	0.28	10.72

4. ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 โดยการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOGA

4.1 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1

ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ในระหว่างปี ค.ศ. 2003–2009 และ ค.ศ. 2010–2013 ตามลำดับ โดยใช้โปรแกรม Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นในการศึกษานี้ แสดงดังในตารางที่ 21 และ ภาพที่ 31 โดยในตารางดังกล่าวได้แสดงค่าทางสถิติที่ใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งประกอบด้วย ค่า KGE , KGE_L และ KGE_{FDC} และจากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ผลการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ให้ค่า NSE เท่ากับ 0.83 ซึ่งมากกว่าในกรณีการตรวจพิสูจน์แบบจำลองซึ่งให้ค่า NSE เท่ากับ 0.81

นอกจากนั้นแล้ว ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 จะให้ผลพลอยได้เป็นกราฟน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านั้น ซึ่งจากผลการสอบเทียบแบบจำลองโดยตรงที่สถานีเหล่านั้นแสดงดังในตารางที่ 21 และ ภาพที่ 32 ถึง ภาพที่ 36 ที่แสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยของ NSE สำหรับทุกสถานีเท่ากับ 0.69 ซึ่งมีความน้อยกว่าในกรณีการตรวจพิสูจน์แบบจำลองซึ่งให้ค่าเฉลี่ยของ NSE สูงกว่าเล็กน้อยเท่ากับ 0.71 ในขณะที่ผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ให้ค่าเฉลี่ยของ NSE สำหรับทุกสถานี เท่ากับ 0.67 ซึ่งมีความน้อยกว่าในกรณีการสอบเทียบแบบจำลองโดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้ ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยของ NSE 0.69 โดยมีค่าลดลงเฉลี่ยทุกสถานีเท่ากับ 2.4% และสำหรับผลการประเมินน้ำท่าที่เป็นผลพลอยได้จากการตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ให้ค่าเฉลี่ยของ NSE สำหรับทุกสถานี เท่ากับ 0.72 ซึ่งมีความมากกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีการตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้ ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยของ NSE 0.71 โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ยทุกสถานีเท่ากับ 1.5% ดังแสดงในตารางที่ 22 และ ภาพที่ 32 ถึง ภาพที่ 36 อย่างไรก็ตาม จากผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และผลพลอยได้ของการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าทั้ง 5 สถานี ดังกล่าว ซึ่งความแตกต่างที่น้อยกว่าในกรณีการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านั้นจัดอยู่ในเกณฑ์ที่

ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้น แบบจำลอง KU-URBS V.2 จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เพื่อการประเมินน้ำท่าสำหรับลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง

สำหรับผลของพารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่เป็นผลจากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองด้วยโปรแกรม MOGA แสดงดังในตารางที่ 22

ตารางที่ 21 ผลการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 โดยใช้โปรแกรม MOGA

ช่วงเวลา	สถานี วัดน้ำท่า	การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์								% ความ แตกต่าง
		ที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง				ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1				
		NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	
การสอบเทียบ (ค.ศ. 2003-2009)	P.1	0.83	0.91	0.84	0.95	0.83	0.91	0.84	0.95	0.0%
	P.20	0.57	0.78	0.69	0.98	0.56	0.55	0.23	0.60	-0.6%
	P.75	0.74	0.87	0.78	0.98	0.57	0.66	0.78	0.69	-22.6%
	P.4A	0.60	0.79	0.78	0.97	0.66	0.80	0.64	0.88	9.6%
	P.67	0.73	0.86	0.75	0.99	0.79	0.87	0.76	0.93	8.4%
	P.21	0.67	0.83	0.76	0.95	0.62	0.74	-0.18	0.78	-6.8%
	เฉลี่ย	0.69	0.84	0.77	0.97	0.67	0.76	0.51	0.81	-2.4%
การตรวจพิสูจน์ (ค.ศ. 2010-2013)	P.1	0.81	0.88	0.81	0.93	0.81	0.88	0.81	0.93	0.0%
	P.20	0.58	0.79	0.73	0.92	0.61	0.63	0.15	0.67	4.5%
	P.75	0.66	0.58	0.72	0.60	0.75	0.83	0.84	0.89	13.2%
	P.4A	0.63	0.75	0.24	0.85	0.64	0.82	0.43	0.94	0.6%
	P.67	0.73	0.73	0.66	0.77	0.77	0.79	0.70	0.83	5.3%
	P.21	0.81	0.90	0.83	0.96	0.72	0.75	-0.70	0.76	-11.7%
	เฉลี่ย	0.71	0.77	0.67	0.84	0.72	0.78	0.37	0.84	1.5%

หมายเหตุ: % ความแตกต่างประเมินจากค่า NSE ที่ได้จากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 เปรียบเทียบกับที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง

ตารางที่ 22 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่ได้จากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์
แบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MOGA

สถานี วัดน้ำท่า	IL_{max} (มม.)	pr -	F_{max} (มม.)	C_{imp} -	β -	rlr (มม./ชม.)	$K\delta t$ -	α -	x -	G -	β_G -
P.20	41.33	0.11	625.38	0.93	2.05	0.22	0.96	0.06	0.43	0.29	40.30
P.75	27.73	0.01	822.42	0.94	4.92	0.46	0.98	0.11	0.33	0.10	15.77
P.4A	32.55	0.10	624.55	0.98	2.73	0.47	0.98	0.18	0.36	0.12	33.79
P.67	46.09	0.05	433.91	0.91	5.45	0.35	0.97	0.07	0.48	0.19	20.87
P.21	11.12	0.15	1120.58	0.97	4.30	0.44	0.98	0.20	0.42	0.15	24.37
P.1	38.82	0.10	705.68	0.96	4.42	0.33	0.98	0.22	0.46	0.16	33.85

4.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ระหว่างผลที่ได้จากการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยโปรแกรม MOGA และ MOSCEM

ในการเปรียบเทียบผลการประเมินกราฟน้ำท่าระหว่างแบบจำลอง KU-URBS V.2 (MOSCEM) และ KU-URBS V.2 (MOGA) ได้ทำการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของดัชนีประสิทธิภาพระหว่าง 2 แบบจำลอง ดังกล่าว ซึ่งประกอบด้วย เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของ NSE, KGE, KGE_L , และ KGE_{FDC} ดังแสดงในตารางที่ 23 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากผลการสอบเทียบแบบจำลอง KU-URBS V.2 (MOSCEM) ดังแสดงในตารางที่ 11 และ KU-URBS V.2 (MOGA) ดังแสดงในตารางที่ 21 ในช่วงเวลา ปี ค.ศ. 2003–2009 พบว่า ค่า NSE ของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ที่ได้จากแบบจำลอง KU-URBS V.2 (MOGA) มีค่าน้อยกว่า NSE ที่ได้จากแบบจำลอง KU-URBS V.2 (MOSCEM) โดยมีเท่ากับ 0.83 และ 0.87 ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 4.2% และเมื่อพิจารณาจากผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลองทั้งสอง ในช่วงเวลา ปี ค.ศ. 2010–2013 พบว่า ค่า NSE ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 (MOGA) มีค่าน้อยกว่า NSE ที่ได้จากแบบจำลอง KU-URBS V.2 (MOSCEM) โดยมีค่าเท่ากับ 0.81 และ 0.79 ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 2.3%

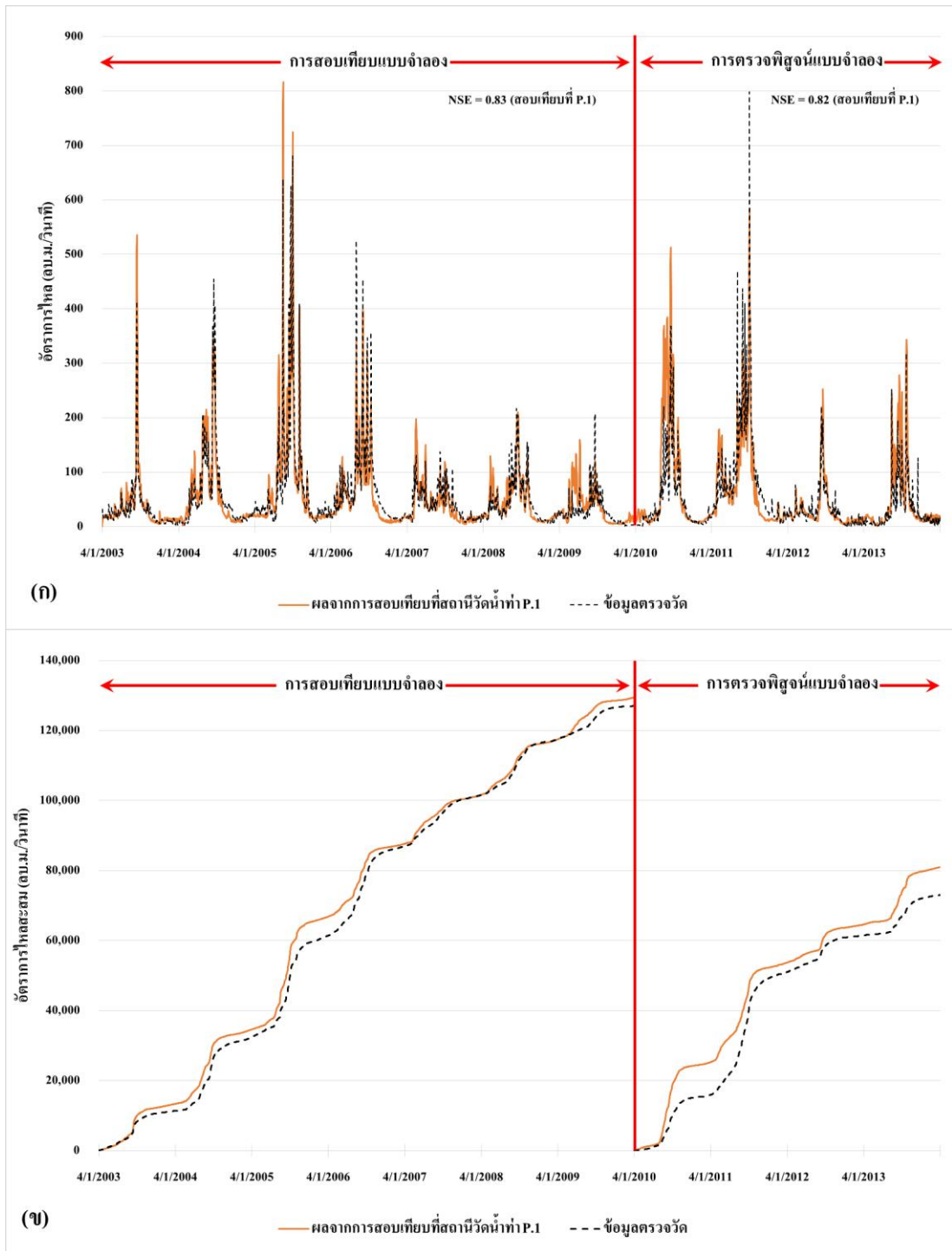
นอกจากนั้นแล้ว เปรอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่า NSE ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 (MOGA) ในตารางที่ 21 เปรียบเทียบกับ NSE ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 (MOSCEM) ในตารางที่ 11 สำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 พบว่า ในช่วงของการสอบเทียบแบบจำลอง NSE มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ -6.6%, -17.4%, -5.8%, -3.0% และ 2.8% ตามลำดับ และในช่วงของการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง NSE มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ -7.6%, -3.1%, -8.0%, -1.7% และ -6.2% ตามลำดับ และ สำหรับเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่า NSE ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 (MOGA) ในตารางที่ 21 เปรียบเทียบกับ NSE ของแบบจำลอง KU-URBS V.2 (MOSCEM) ในตารางที่ 11 สำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านั้นโดยตรง พบว่า ในช่วงของการสอบเทียบแบบจำลอง NSE มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ -10.4%, -0.6%, -15.9%, -7.0% และ -2.8% ตามลำดับ และในช่วงของการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง NSE มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 2.7%, -5.3%, -6.7%, -5.4% และ 1.9% ตามลำดับ

จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า โปรแกรม MOGA มีประสิทธิภาพในการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่ต่ำกว่าโปรแกรม MOSCEM ไม่มากนัก สำหรับทั้งกรณีที่เป็นกรณีประเมินน้ำท่าที่ผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และกรณีที่ทำการศึกษาที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 โดยตรง อย่างไรก็ตาม โปรแกรมการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติ MOGA ที่พัฒนาขึ้นและนำเสนอในการศึกษานี้ยังเป็นเพียงต้นแบบสำหรับการพัฒนาต่อยอดในการศึกษาต่อไปภายใต้การดำเนินงานของศูนย์วิจัยการรับรู้จากระยะเพื่อการบริการจัดการทรัพยากรน้ำ (SENSWAT) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-URBS หรือแบบจำลองทางอุทกวิทยาอื่น ๆ ต่อไป

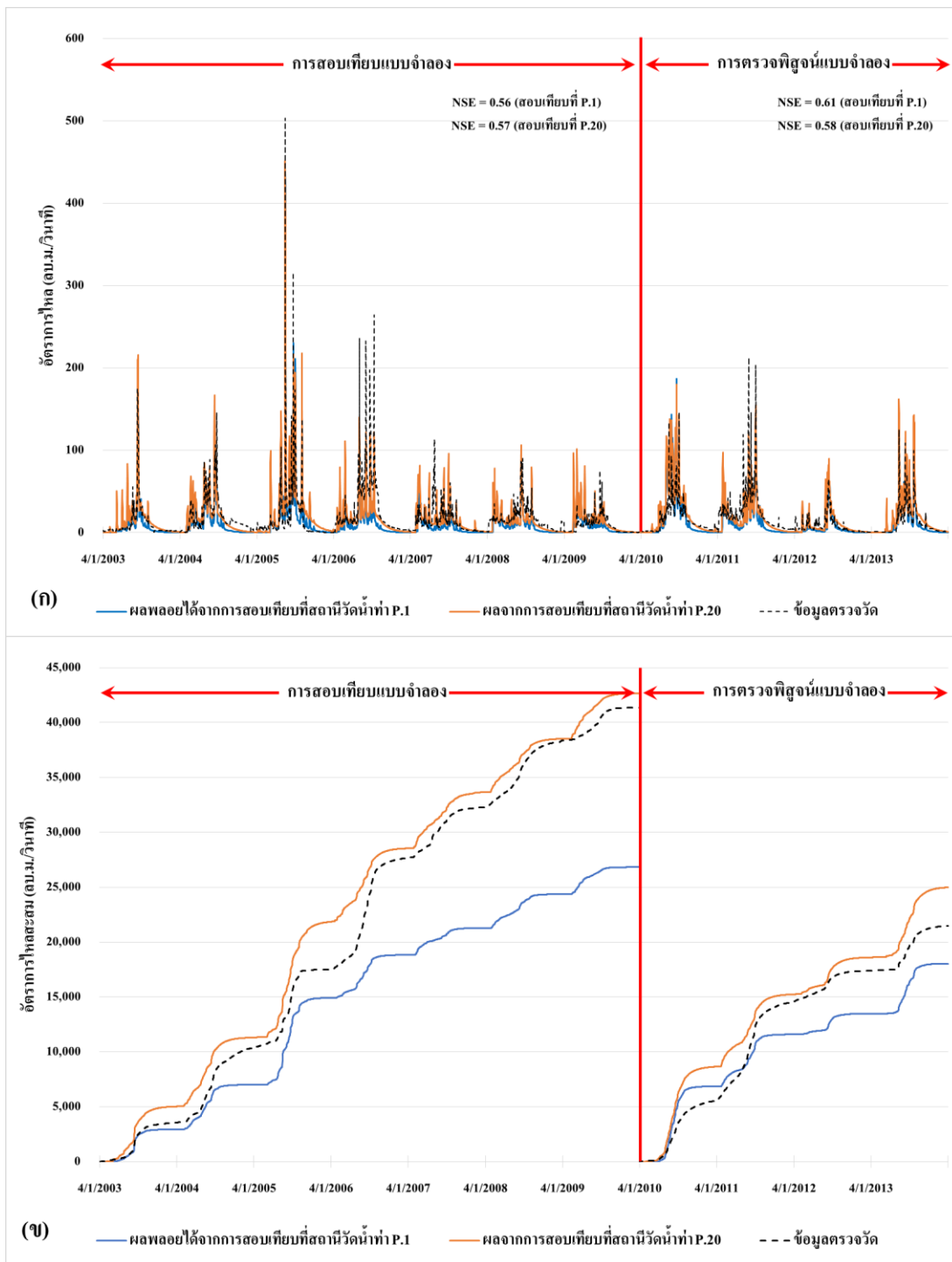
ตารางที่ 23 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของดัชนีประสิทธิภาพของแบบจำลอง KU-URBS V.2 (MOGA) เปรียบเทียบกับ KU-URBS V.2 (MOSCEM)

ช่วงเวลา	สถานีวัดน้ำท่า	การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์							
		ที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง				ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1			
		NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}
การสอบเทียบ (ค.ศ. 2003-2009)	P.1	-4.2%	0.7%	2.9%	2.7%	-4.2%	0.7%	2.9%	2.7%
	P.20	-10.4%	-4.8%	1.3%	2.7%	-6.6%	0.2%	-60.5%	1.5%
	P.75	-0.6%	-0.4%	-1.9%	0.8%	-17.4%	-10.2%	-3.8%	-9.6%
	P.4A	-15.9%	-7.5%	19.0%	-1.5%	-5.8%	10.4%	24.0%	14.6%
	P.67	-7.0%	-1.9%	-2.1%	3.4%	-3.0%	3.1%	4.7%	6.0%
	P.21	-2.8%	-1.1%	-9.6%	2.9%	-8.5%	-8.5%	-129.1%	-9.6%
การตรวจพิสูจน์ (ค.ศ. 2010-2013)	P.1	-2.3%	3.3%	9.9%	5.7%	-2.3%	3.3%	9.9%	5.7%
	P.20	2.7%	20.3%	10.4%	32.9%	-7.6%	-7.9%	-76.1%	-7.6%
	P.75	-5.3%	-3.3%	-5.5%	-1.9%	-3.1%	2.6%	6.2%	5.1%
	P.4A	-6.7%	-7.6%	149.4%	-7.8%	-8.0%	5.9%	155.1%	13.1%
	P.67	-5.4%	-7.3%	-5.1%	-6.5%	-1.7%	6.4%	14.1%	8.2%
	P.21	1.9%	1.5%	-1.7%	2.9%	-6.2%	-11.9%	-298.7%	-13.5%

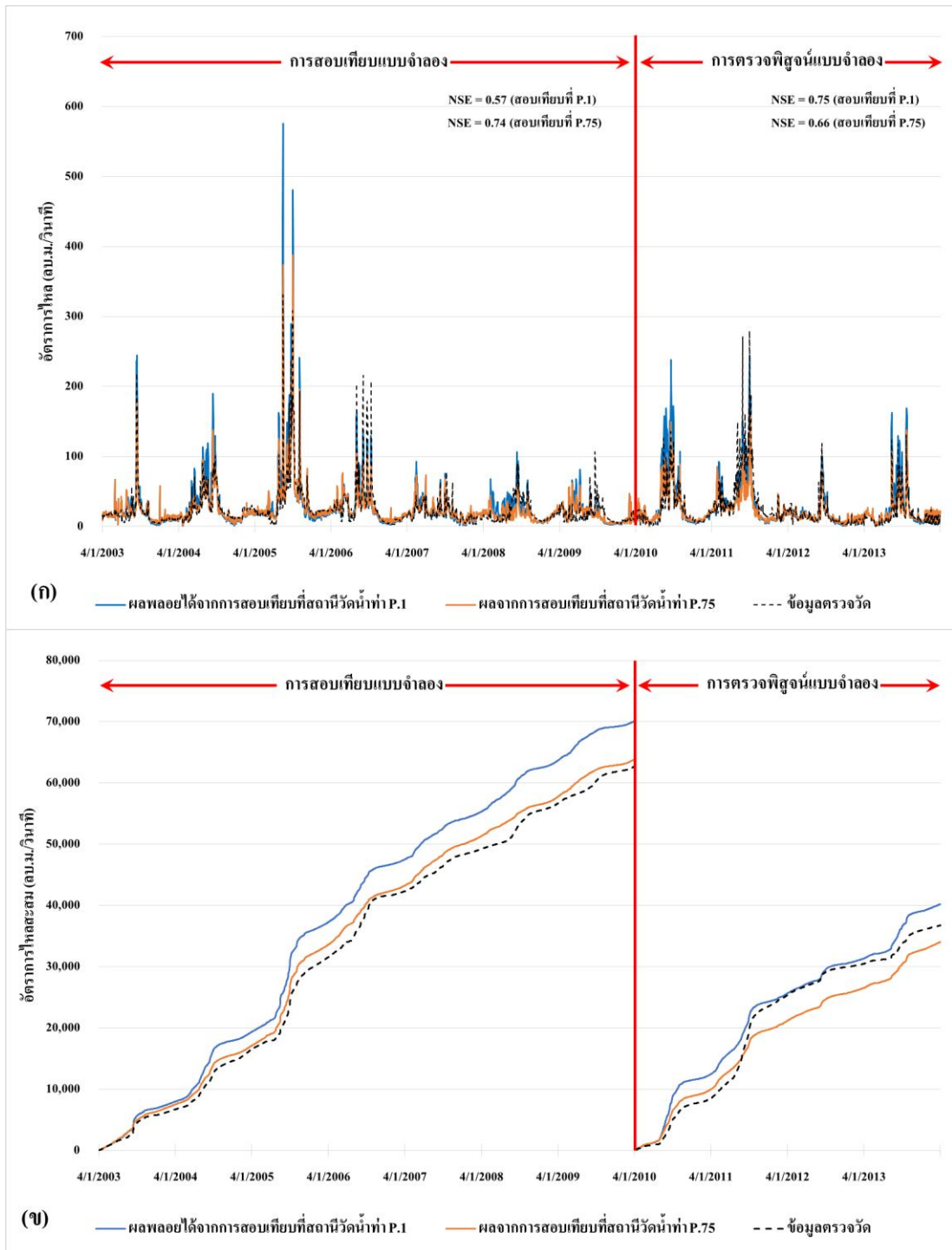
หมายเหตุ: % ความแตกต่างประเมินจากค่าดัชนีประสิทธิภาพของแบบจำลอง KU-URBS V.2 (MOGA) เปรียบเทียบกับ KU-URBS V.2 (MOSCEM)



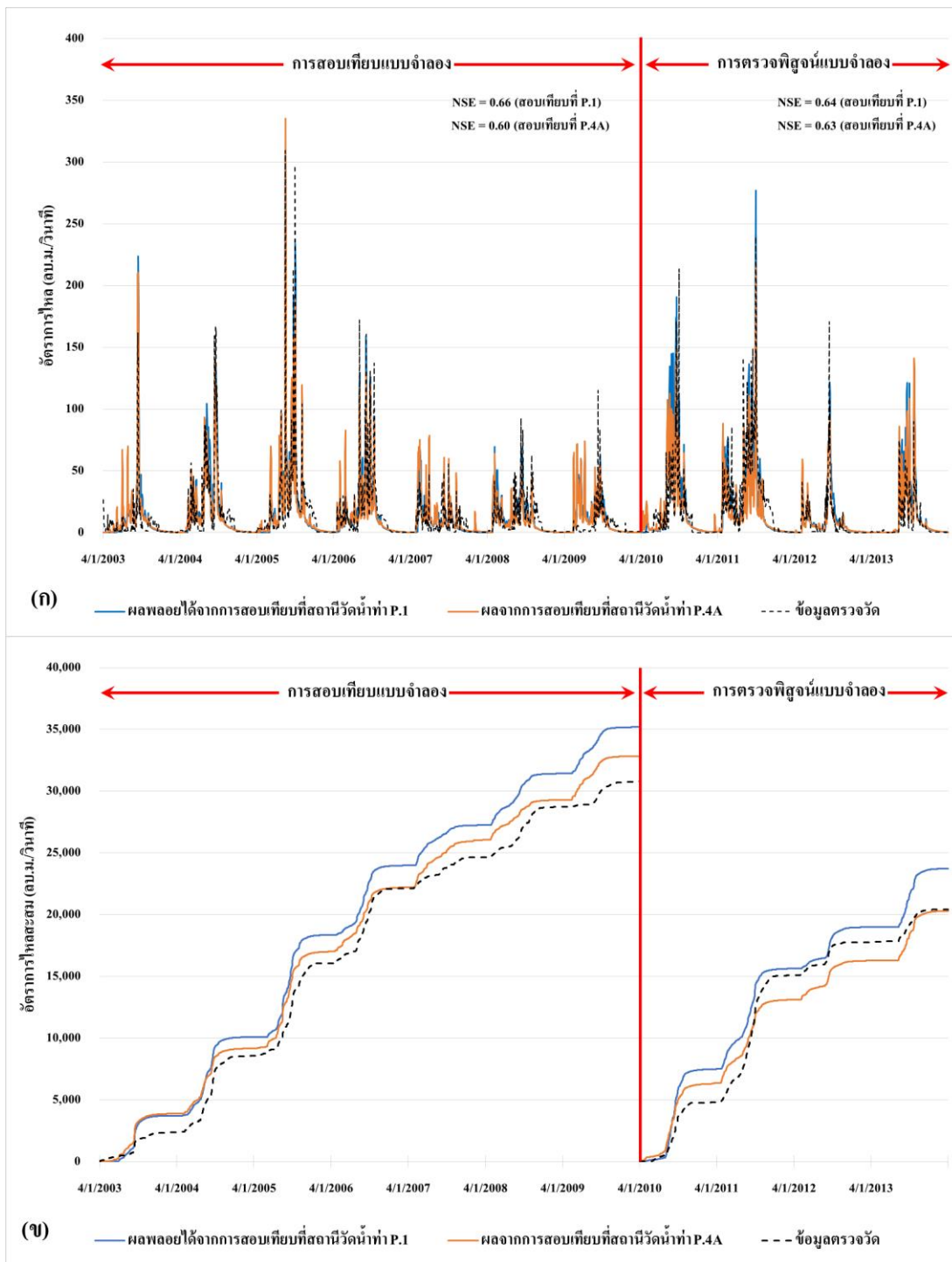
ภาพที่ 31 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.1 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOGA



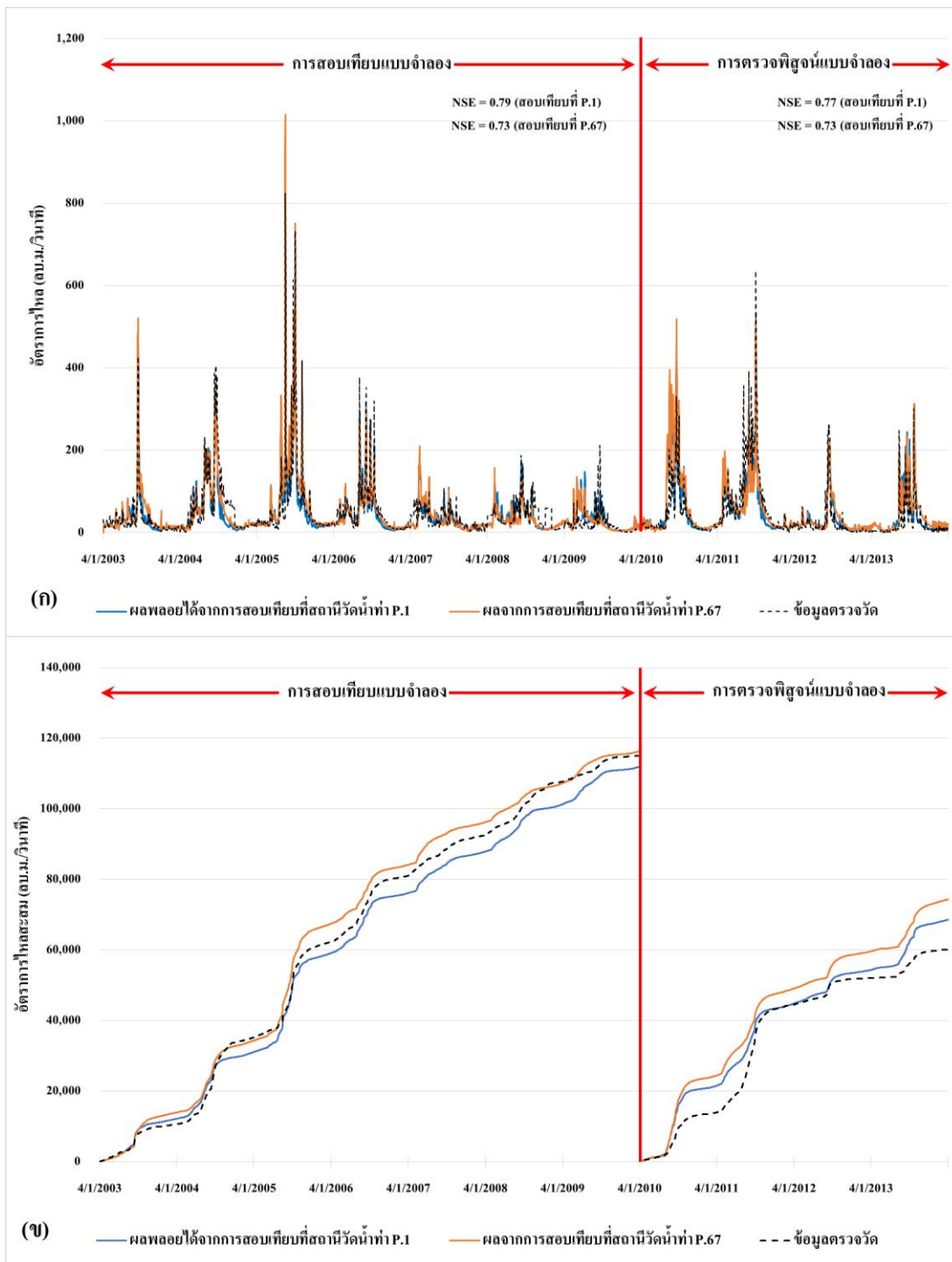
ภาพที่ 32 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.20 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOGA



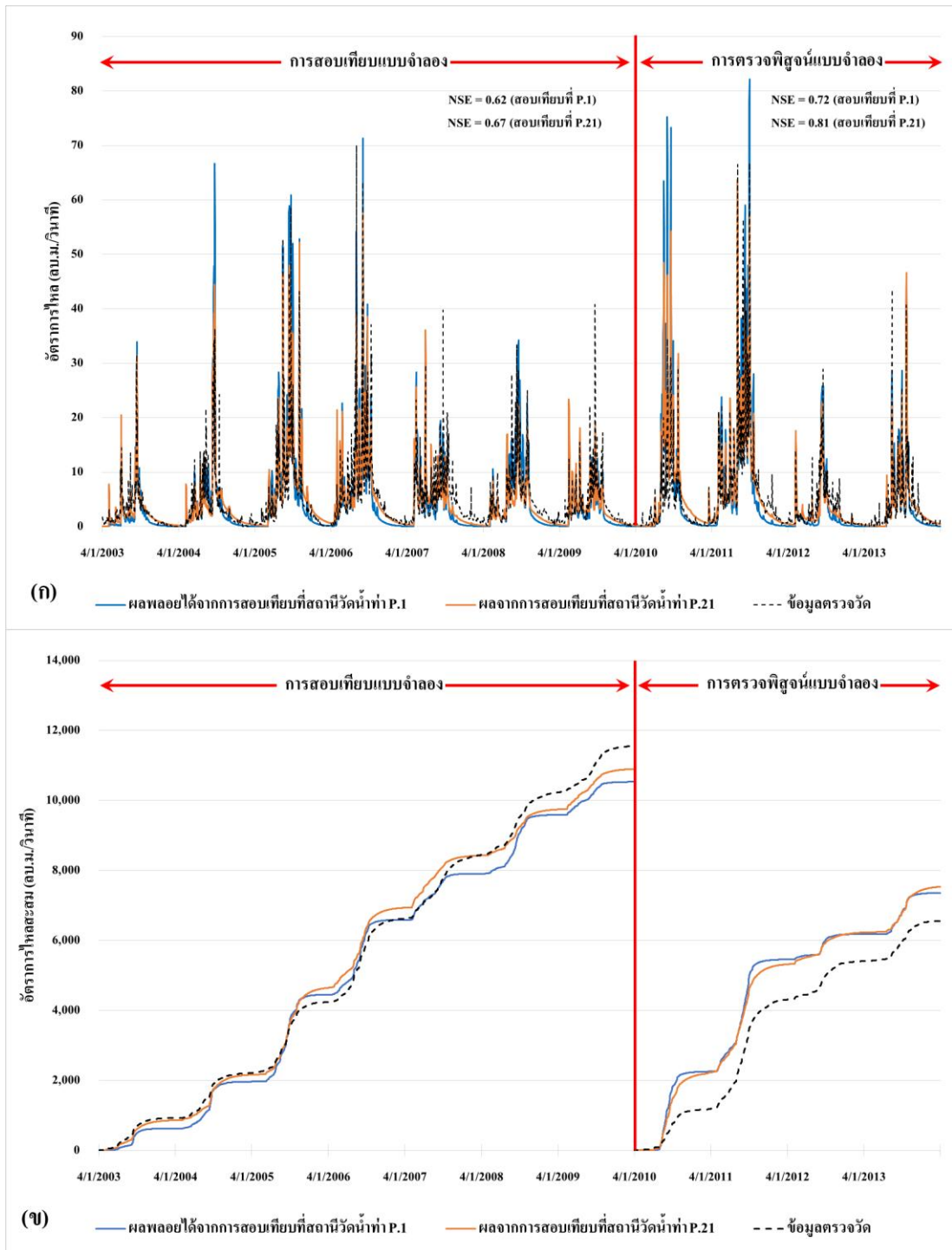
ภาพที่ 33 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.75 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOGA



ภาพที่ 34 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.4A ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOGA



ภาพที่ 35 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.67 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOGA



ภาพที่ 36 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานี P.21 ด้วยแบบจำลอง KU-URBS V.2 ที่สอบเทียบและตรวจพิสูจน์โดยโปรแกรม MOGA

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการศึกษา

แบบจำลอง KU-URBS ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากแบบจำลอง URBS ซึ่งเป็นต้นฉบับที่เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปในลักษณะ Black box ที่ผู้ใช้งานไม่สามารถเข้าไปศึกษาในรายละเอียด ตลอดจนไม่สามารถปรับปรุงแนวทางการดำเนินงานของแบบจำลองได้ ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำทฤษฎีของแบบจำลอง URBS มาเขียนขึ้นใหม่โดยใช้โปรแกรม MATLAB และเชื่อมต่อกับโปรแกรม MOSCEM เพื่อการสอบเทียบแบบจำลองได้โดยอัตโนมัติ จากผลการทดสอบการใช้งานของแบบจำลอง KU-URBS (ในที่นี่ให้ชื่อว่า KU-URBS V.1) เพื่อการประเมินน้ำท่าสำหรับสถานีวัดน้ำท่าในกลุ่มน้ำปิงตอนบน พบว่า แบบจำลอง KU-URBS V.1 มีความสามารถในการประเมินน้ำท่าสำหรับลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำท่าที่มีพื้นที่รับน้ำฝนจำกัด (สำหรับการศึกษานี้คือประมาณ 6350 ตารางกิโลเมตร ซึ่งเป็นขนาดพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1) โดยเมื่อพื้นที่รับน้ำฝนเพิ่มมากขึ้นอาจมีโครงสร้างทางชลศาสตร์และมีการบริหารจัดการน้ำมากขึ้นด้านท้ายน้ำซึ่งจะส่งผลกระทบต่อทำให้สภาพการไหลเป็นแบบ Regulated Flow ซึ่งมีผลในการเพิ่มความผิดพลาดของการประเมินน้ำท่า

จากการใช้โปรแกรม MOSCEM เพื่อการสอบเทียบแบบจำลองได้โดยอัตโนมัติเป็นผลให้การใช้งานแบบจำลองมีความคล่องตัวและทำให้ได้พารามิเตอร์ควบคุมแบบจำลองที่เป็นตัวแทนที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ศึกษาได้มากกว่าการใช้งานแบบจำลอง URBS ที่เป็นต้นฉบับมาก อย่างไรก็ตาม โปรแกรม MOSCEM เป็นโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษา MATLAB ที่พัฒนาขึ้นโดย Vrugt, J. et al. (2003) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้นำทฤษฎี Genetic algorithm มาเขียนขึ้นโดยโปรแกรม MATLAB และเชื่อมต่อกับโปรแกรม KU-URBS V.1 แทนโปรแกรม MOSCEM เพื่อตรวจสอบความสามารถของ Multi-Objective Genetic algorithm (MOGA) จากผลการศึกษาพบว่า MOGA ที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-URBS V.1 ได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพที่ด้อยกว่าโปรแกรม MOSCEM เล็กน้อยก็ตาม นอกจากนั้นแล้ว ในงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาโครงสร้างของแบบจำลอง URBS ในส่วนของการประเมินน้ำใต้ดิน โดยเรียกโปรแกรมในส่วนที่มีการพัฒนาเพิ่มเติมว่าแบบจำลอง KU-URBS V.2 จากการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองที่พัฒนาเพิ่มเติมเพื่อการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าในกลุ่มน้ำปิงตอนบนพบว่า KU-URBS V.2 สามารถเพิ่มความถูกต้องให้กับผลการประเมินน้ำท่าในภาพรวมและ

โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มความถูกต้องให้กับผลการประเมินน้ำใต้ดิน เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ งานแบบจำลอง KU-URBS V.1 ที่ใช้แนวทางการประเมินน้ำใต้ดินตามทฤษฎีของแบบจำลอง URBS ต้นฉบับ

ดังนั้น แบบจำลอง KU-URBS จึงได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการบริหารจัดการน้ำสำหรับประเทศไทย อย่างไรก็ตาม สมควรนำ แบบจำลอง KU-URBS ไปทดสอบกับกลุ่มน้ำอื่น ๆ เพื่อสร้างความเชื่อถือในผลการดำเนินงาน ทั้งนี้ จะเป็นการนำไปสู่การสร้างนวัตกรรมที่ได้จากการพัฒนาโดยนักวิจัยไทยที่จะมีส่วนในการเพิ่มความเข้มแข็งให้กับงานวิจัยของชาติและเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำของประเทศต่อไป

2. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากแบบจำลอง KU-URBS มีขีดจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดใหญ่ซึ่งอาจได้รับผลกระทบจากโครงสร้างทางชลศาสตร์หรือการบริหารจัดการน้ำที่มากขึ้นด้าน ท้ายน้ำ ดังนั้น จึงแนะนำให้มีการพัฒนาแบบจำลองเพิ่มเติมโดยการรวมปัจจัยต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลง โดยมนุษย์เข้าไปในแบบจำลอง อาทิเช่น ผลกระทบของโครงสร้างทางชลศาสตร์ การดึงน้ำเข้าและ ออกจากระบบลุ่มน้ำที่เกิดจากการบริหารจัดการน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้แล้ว ควรพัฒนาแบบจำลอง KU-URBS เพิ่มเติมให้สามารถประเมินน้ำท่าในระดับลุ่มน้ำย่อยให้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยการ เพิ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องของแต่ละลุ่มน้ำย่อย อาทิเช่น การใช้ที่ดิน ความหนาแน่นของพืชพรรณ ลักษณะทางกายภาพของสภาพภูมิประเทศ สภาพความชุ่มชื้นของดิน เป็นต้น ซึ่งหลายปัจจัย สามารถนำข้อมูลที่ได้เทคนิคการรับรู้จากระยะไกลไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ สิ่งเหล่านี้จะเป็น แนวทางในการพัฒนาแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ประเภทกึ่งกระจายตัวให้มีความมีประสิทธิภาพมากขึ้นซึ่งจะช่วยส่งเสริมให้การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำมีความถูกต้องและสมบูรณ์ขึ้นมากกว่าใน สภาพปัจจุบัน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Boyd, M.J., Bates, B.C., Pilgrim, D.H. and Cordery, I. (1987) WBNM: A General Runoff Routing Model Computer Programs and User Guide Water Research Laboratory, The University of New South Wales.
- Carroll, D. (2004) URBS a Rainfall Runoff Routing Model for flood forecasting and design version 4.00.
- Fenicia, F., Savenije, H.H.G., Matgen, P. and Pfister, L. (2008) Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement, Water Resources Research, John Wiley & Sons, Ltd.
- Gao, H., Hrachowitz, M., Fenicia, F., Gharari, S. and Savenije, H.H.G. (2014) Testing the realism of a topography-driven model (FLEX-Topo) in the nested catchments of the Upper Heihe, China, Hydrol. Earth Syst. Sci., Copernicus Publications. pp. 1895-1915.
- Goldberg, D.E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley-Longman, Reading, Mass.
- Jothiprakash, V. and Shanthi, G. (2006) Single Reservoir Operating Policies Using Genetic Algorithm, Water Resources Management. pp. 917-929.
- Laurenson, E.M. and Mein, R.G. (1990) Version 4 Runoff Routing Program User Manual, Depth of Civil Engineering, Monash University. Australia.

- Malone, T. (1999) Using URBS for Real Time Flood Modelling, 2nd International Conference on Water Resources & Environment Research, 25th Hydrology and Water Resources Symposium Brisbane, Qld.).
- Mapiam, P. and Sriwongsitanon, N. (2009) Estimation of the URBS model parameters for flood estimation of ungauged catchments in the upper Ping river basin, Thailand, ScienceAsia. pp. 49-56.
- Mukul, M., Srivastava, V. and Mukul, M. (2015) Analysis of the accuracy of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) height models using International Global Navigation Satellite System Service (IGS) Network, Journal of Earth System Science. pp. 1343-1357.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles, Journal of Hydrology. pp. 282-290.
- Reed, P., Tang, Y. and Wagener, T. (2007) Reply to J. Vrugt's comment on "How effective and efficient are multiobjective evolutionary algorithms at hydrologic model calibration?", Hydrol. Earth Syst. Sci., Copernicus Publications. pp. 1437-1439.
- Sharma, K.D. and Singh, S. (1992) Runoff estimation using Landsat Thematic Mapper data and the SCS model, Hydrological Sciences Journal, Taylor & Francis. pp. 39-52.
- Sriwongsitanon, N. (2010) Flood Forecasting System Development for the Upper Ping River Basin, Kasetsart J. (Nat. Sci.). pp. 717-731.
- Sriwongsitanon, N., Tantisuvanichkul, K., Kaprom, C., Archavakijgosol, S., Williams, J. and Bastiaanssen, W.G.M. (2019) An Advanced Gridded Monthly Rainfall Product for Thailand

Based on Rain Gauges, Double Mass Curves, and Remote Sensing Rainfall Products, J. Hydrol.

Vrugt, J., V Gupta, H., Bastidas, L., Bouten, W. and Sorooshian, S. (2003) Effective and Efficient Algorithm for Multiobjective Optimization of Hydrologic Models, Water Resour. Res.

Yew Gan, T., Dlamini, E.M. and Biftu, G.F. (1997) Effects of model complexity and structure, data quality, and objective functions on hydrologic modeling, Journal of Hydrology. pp. 81-103.

นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์. (2556) อุทกวิทยาขั้นสูง (ADVANCED HYDROLOGY), ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 651 หน้า.

นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์. (2559) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง FLEXL, FLEX-Topo และ Modified NAM โดยการใช้การสอบเทียบอัตโนมัติ, สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพมหานคร.



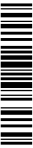
1532608965

KU Theses 6014500987 thesis / rcv: 30072562 16:32:24 / seq: 14

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	เชียรชาติ สุวงศ์
วัน เดือน ปี เกิด	31 มกราคม 2538
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี
ที่อยู่ปัจจุบัน	18/26 หมู่ 6 ซอยชินเขต 1/18 ถนนงามวงศ์วาน แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลัก สี่ กรุงเทพมหานคร 10210
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา-ทรัพยากรน้ำ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต บางเขน
ทุนการศึกษา	ทุนวิจัยปริญญาโท ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รหัสทุน 60/03/WE/M.ENG

1532608965



KTU_Thesis_6014500987_Thesis / recv: 30072562 16:32:24 / seq: 14