

## การพัฒนาแบบจำลอง SENSWAT-URBS เพื่อการสอบเทียบแบบอัตโนมัติ Development of the Auto-Calibrated SENSWAT-URBS Model

เถียรชาติ สุวงศ์<sup>1\*</sup> และ นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพมหานคร

<sup>1,2</sup> Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management (SENSWAT) ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพมหานคร

\*Corresponding author; E-mail address: thienchart.su@ku.th

### บทคัดย่อ

แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า สามารถนำมาใช้เพื่อประเมินน้ำท่าทั้งในพื้นที่ที่มีและไม่มีสถานีตรวจวัด อย่างไรก็ตาม แบบจำลองส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองประเภทลัมพ์ที่ประเมินน้ำท่าได้เฉพาะตำแหน่งที่ทำการสอบเทียบ ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง URBS ซึ่งเป็นแบบจำลองประเภทกึ่งกระจายตัวที่สามารถประเมินน้ำท่าได้ที่ตำแหน่งใด ๆ นอกเหนือจากตำแหน่งที่ทำการสอบเทียบ อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง URBS ที่มีการใช้งานเป็นโปรแกรมประเภท Black box ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาและการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติ ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำ URBS มาเขียนโปรแกรมขึ้นใหม่ด้วยภาษา MATLAB และเชื่อมต่อกับ MOSCEM ซึ่งเป็นกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์เพื่อประเมินพารามิเตอร์ของแบบจำลอง จากนั้นทำการทดสอบโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนา (SENSWAT-URBS) โดยการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ระหว่างปี พ.ศ. 2546 - 2557 ซึ่งให้ค่า NSE เท่ากับ 0.85 นอกจากนั้นแล้ว ได้นำผลการประเมินน้ำท่าในลุ่มน้ำย่อยต่าง ๆ ภายในลุ่มน้ำ P.1 ซึ่งประกอบด้วย P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 มาเปรียบเทียบกับข้อมูลตรวจวัด พบว่า ค่า NSE มีค่าเท่ากับ 0.58, 0.76, 0.71, 0.78 และ 0.68 ตามลำดับ จากนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบกับค่า NSE ที่ได้จากการสอบเทียบที่สถานีเหล่านั้นโดยตรง ซึ่งพบว่า ค่า NSE มีค่าเท่ากับ 0.66, 0.79, 0.74, 0.78 และ 0.70 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการสอบเทียบดังกล่าวกับผลการสอบเทียบที่สถานี P.1 พบว่า NSE ลดลงเพียง 12.1%, 3.2%, 3.6%, 0.3% และ 2.2% ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า SENSWAT-URBS เป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพในการประเมินน้ำท่าสำหรับลุ่มน้ำย่อยทางด้านเหนือน้ำของสถานีที่สอบเทียบแบบจำลอง

คำสำคัญ: Semi-Distributed rainfall-runoff model, URBS, SENSWAT-URBS, MOSCEM, การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

### Abstract

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 and model calibration cannot be carried out automatically. 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 (SENSWAT-URBS) was tested by model calibration at P.1 gauging station by using runoff events between 2003-2013 and it provided the NSE of 0.85. Moreover, the runoff estimates at P.20, P.75, P.4A, P.67, and P.21 - sub-catchments of P.1 - were compared with observed data. The results of NSE are shown to be 0.58, 0.76, 0.71, 0.78 and 0.68, respectively. These results are compared to the NSE from model calibration evaluated at those stations which are 0.66, 0.79, 0.74, 0.78 and 0.70, respectively. By using calibrated results at P.1 causes a reduction of NSE at those stations only around 12.1%, 3.2%, 3.6%, 0.3% and 2.2%, respectively, compared to the results gained from model calibration at each station. The results show that URBS can be effectively used for runoff estimation not only at calibrating stations but also at their tributaries upstream.

Keywords: Semi-Distributed rainfall-runoff model, URBS, SENSWAT-URBS, MOSCEM, Multi-objective optimization algorithm

## 1. คำนำ

ปริมาณน้ำท่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมากของระบบอุทกวิทยา เนื่องจากเป็นปัจจัยหลักที่ใช้กำหนดแนวทางการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ แม้ว่าปริมาณน้ำท่าสามารถทำการวัดได้โดยตรงแต่ต้องใช้ทรัพยากรและเวลามากในการตรวจวัด รวมทั้งไม่สามารถตรวจวัดให้ครอบคลุมพื้นที่รับน้ำฝนของลุ่มน้ำที่พิจารณาได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (Rainfall-Runoff Model) ช่วยในการประเมินสำหรับลุ่มน้ำที่ไม่ได้ทำการตรวจวัด (Ungauged Catchment) รวมทั้งสามารถนำไปใช้เพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่าในสภาพอนาคตเมื่อทราบข้อมูลฝนที่กำลังตกอยู่ ณ ช่วงเวลาที่พิจารณา หรือเมื่อสามารถคาดการณ์ข้อมูลฝนในอนาคตได้ แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ที่ได้รับการพัฒนาจากอดีตจนถึงปัจจุบันมีมากมายหลายแบบจำลองและแต่ละแบบจำลองมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้ แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ที่มีการใช้งานจากอดีตจนถึงปัจจุบัน เช่น แบบจำลอง SCS [1], NAM [2], Simplified NAM [3], RORB [4], WBMN [5], FLEXL [6] และ FLEX-Topo [7] เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองเหล่านี้จัดเป็นแบบจำลองประเภทลัมป์ (Lumped Model) ที่มีการเฉลี่ยทั่วพื้นที่ลุ่มน้ำที่พิจารณาซึ่งจะให้คำตอบของปริมาณน้ำท่าที่จุดท้ายน้ำของลุ่มน้ำ อย่างไรก็ตาม Carroll [8] ได้พัฒนาแบบจำลอง URBS ซึ่งเป็นแบบจำลองประเภทกึ่งกระจายตัว (Semi-Distributed Model) ที่สามารถประเมินปริมาณน้ำท่าได้ในระดับลุ่มน้ำย่อยหรือจุดที่สนใจภายในลุ่มน้ำนอกเหนือจากที่จุดพิจารณาด้านท้ายน้ำของลุ่มน้ำหลัก ซึ่งนับว่าเป็นการเพิ่มศักยภาพของแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ได้เป็นอย่างดีทำให้สามารถทราบปริมาณน้ำท่าได้ทุกจุดพิจารณาที่สนใจได้

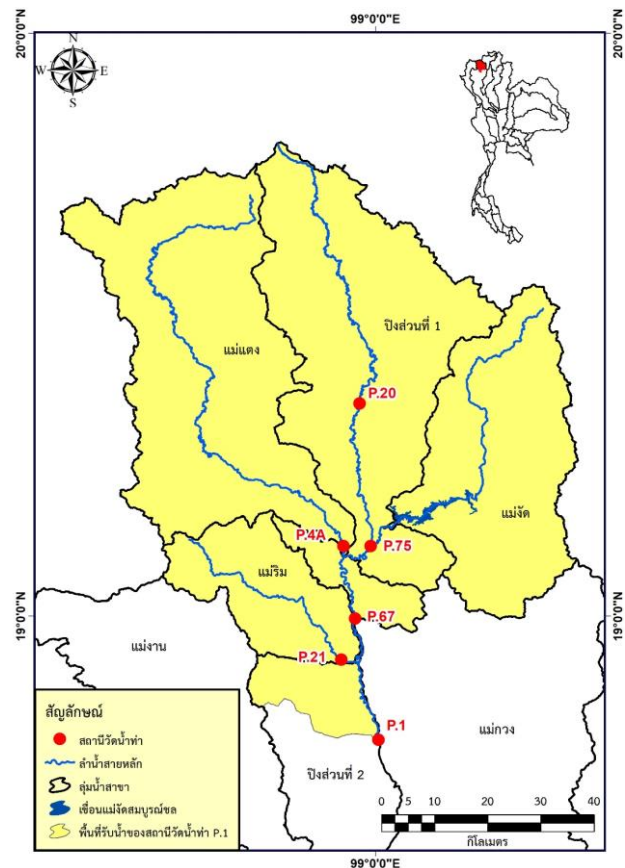
ความยากลำบากของการใช้งานแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ประการสำคัญประการหนึ่งคือ กระบวนการในการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model Calibration and Model Validation) เพื่อให้ได้มาซึ่งพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง (Control Parameters) ซึ่งโดยทั่วไปใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error) ที่ยากจะได้ค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่แบบจำลองมีพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองจำนวนมาก ดังนั้น แบบจำลอง FLEXL และ FLEX-Topo จึงได้นำโปรแกรม MOSCEM [9] ซึ่งเป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) มาใช้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง ซึ่งจากการประยุกต์แบบจำลองทั้งสองแบบจำลองพบว่า เป็นกระบวนการในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ [6, 7, 10]

ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลอง URBS ภายใต้ศูนย์วิจัยการรับรู้จากระยะไกลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management, SENSWAT) โดยเขียนโปรแกรมขึ้นใหม่ด้วยภาษา MATLAB พร้อมทั้งเชื่อมต่อกับ MOSCEM ซึ่งเป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์เพื่อประเมินพารามิเตอร์ของแบบจำลอง และนำมาประยุกต์ใช้เพื่อประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 รวมทั้งในลุ่มน้ำย่อยต่าง ๆ ภายในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ซึ่งประกอบด้วย P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 จากนั้นจึงทำการตรวจสอบประสิทธิภาพของการประเมินน้ำท่า

ของทั้ง 6 สถานี ดังกล่าว นอกจากนั้นแล้วได้ทำการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่าภายในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ดังกล่าวโดยตรง เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่าที่ของสถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ที่เป็นผลจากการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และที่เป็นผลจากการสอบเทียบที่สถานีเหล่านั้นโดยตรง ก่อนจะแนะนำแบบจำลอง SENSWAT-URBS เพื่อไปประยุกต์ใช้ในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำของประเทศไทยให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นต่อไป

## 2. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้คือพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ซึ่งมีพื้นที่รับน้ำฝนประมาณ 6,142 ตารางกิโลเมตร และตั้งอยู่ที่สะพานนาคราญ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 เป็นส่วนหนึ่งของลุ่มน้ำปิงตอนบน ซึ่งมีต้นกำเนิดจากทิวเขาผีปันน้ำในเขตอำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ และมีทิศทางการไหลจากทิศเหนือลงมาทางทิศใต้ผ่านจังหวัดเชียงใหม่ ลำพูน และไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่อำเภอต๋องเต่า ทั้งนี้ลุ่มน้ำปิงตอนบนมีพื้นที่รับน้ำประมาณ 25,370 ตารางกิโลเมตร และตั้งอยู่ในเขตจังหวัดลำพูนและเชียงใหม่ ระหว่างละติจูด 17° 14' 30" ถึง 19° 47' 52" เหนือ และระหว่างลองจิจูด 98° 4' 30" ถึง 99° 22' 30" ตะวันออก โดยสภาพภูมิประเทศของลุ่มน้ำปิงตอนบนมีลักษณะเป็นเทือกเขาสลับซับซ้อนและปกคลุมด้วยป่าไม้ประมาณ 76% ของพื้นที่

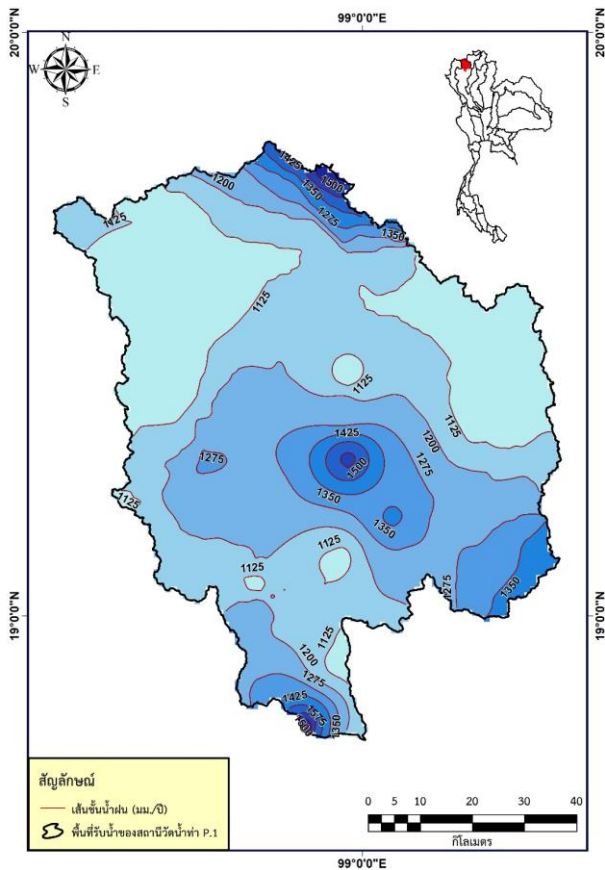


รูปที่ 1 พื้นที่รับน้ำฝนและตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่าที่ศึกษา

### 3. ข้อมูลที่ใช้ประกอบการศึกษา

#### 3.1 ข้อมูลฝน

ในการศึกษานี้ได้ทำการประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์ฝน SENSAT-GGR ซึ่งเป็นข้อมูลฝนแบบกริดที่ครอบคลุมพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ในระหว่างปี พ.ศ. 2546-2556 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ฝน SENSAT-GGR ที่ถูกสร้างขึ้นครอบคลุมพื้นที่รับน้ำฝนของประเทศไทยในระหว่างปี พ.ศ. 2543-2560 โดยผลิตภัณฑ์ฝนดังกล่าวมีความละเอียดเชิงพื้นที่เท่ากับ 0.01 องศา หรือประมาณ 1 กิโลเมตร ทั้งนี้ ในการสร้างผลิตภัณฑ์ฝนดังกล่าวภายใต้ศูนย์วิจัย SENSAT นั้น ได้นำข้อมูลฝนจำนวน 1,779 สถานี ทั่วประเทศ ที่ทำการตรวจวัดข้อมูลโดยกรมชลประทาน กรมอุตุนิยมวิทยา และหน่วยงานอื่น ๆ มาผ่านกระบวนการตรวจสอบความถูกต้องแบบรายเดือนโดยกระบวนการโค้งทับทวี (Double Mass Curve) [11] ก่อนที่จะนำไปสร้างข้อมูลฝนแบบกริด (Gridded Gauged Rainfall, GGR) โดยการเฉลี่ยเชิงพื้นที่ด้วยวิธี Inverse Distance Square (IDS) [12] ทั้งนี้ แผนที่แสดงเส้นชั้นน้ำฝนเฉลี่ยรายปีในระหว่างปี พ.ศ. 2546-2556 ที่ครอบคลุมพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 แสดงดังในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ปริมาณความลึกฝนรายปีเฉลี่ยที่ครอบคลุมพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1

#### 3.2 ข้อมูลน้ำท่า

การศึกษานี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลปริมาณน้ำท่าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 จนถึงปี พ.ศ. 2556 ของสถานีวัดน้ำท่า P.1 และ สถานี

ที่ตั้งอยู่ในพื้นที่รับน้ำของสถานี P.1 ซึ่งประกอบด้วย P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ทั้งนี้ สถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้ได้ถูกดำเนินการเก็บข้อมูลโดยกรมชลประทาน สำหรับรายละเอียดของตำแหน่งที่ตั้งและสถิติข้อมูลของสถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้แสดงดังในตารางที่ 1 และตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้แสดงดังในรูปที่ 1 นอกจากนี้แล้วในตารางที่ 2 ได้แสดงปริมาณน้ำท่ารายฤดูกาลเฉลี่ย และรายปีเฉลี่ย โดยในตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยของสถานีวัดน้ำท่าทั้ง 6 สถานี มีค่าอยู่ระหว่าง 142 ถึง 1,571 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งเกิดขึ้นที่สถานีวัดน้ำท่า P.21 และ P.1 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ตำแหน่งที่ตั้งและสถิติข้อมูลของสถานีวัดน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษา

รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ที่ตั้ง				พื้นที่รับน้ำ (ตร. กม.)
		อำเภอ	จังหวัด	ละติจูด	ลองจิจูด	
P.20	บ้านเชียงดาว	เชียงดาว	เชียงใหม่	19.37	98.97	1,345
P.75	บ้านซ้อแล	แม่แตง	เชียงใหม่	18.14	99.01	3,080
P.4A	บ้านแม่แตง	แม่แตง	เชียงใหม่	19.12	98.95	1,930
P.67	บ้านแม่แต	สันทราย	เชียงใหม่	19.02	98.96	5,323
P.21	บ้านริมใต้	แม่ริม	เชียงใหม่	18.93	98.94	452
P.1	สะพานนารัฐ	เมือง	เชียงใหม่	18.79	99.01	6,350

ตารางที่ 2 ปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ย รายฤดูกาลเฉลี่ย และรายปีเฉลี่ยของสถานีวัดน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษา

รหัสสถานี	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	รายปี
P.1	1231.6	339.4	1571.0
P.21	114.7	27.5	142.2
P.75	548.2	232.9	781.1
P.20	402.4	91.1	493.6
P.67	1056.1	320.1	1376.2
P.4A	335.0	67.4	402.4

### 4. ทฤษฎี

#### 4.1 แบบจำลอง URBS

URBS เป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ประเภทกึ่งกระจายตัว (Semi-Distributed) ที่ได้รับการยอมรับและนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น การศึกษาที่ดำเนินการโดย Carroll [8], Malone [13], Mapiam and Sriwongsitanon [14], Sriwongsitanon [15] เป็นต้น สำหรับ โครงสร้างของแบบจำลอง URBS แบ่งออกเป็น 3 ส่วน หลัก ๆ ซึ่งประกอบด้วย (1) การวิเคราะห์ฝนส่วนเกิน (Excess Rainfall) (2) การเคลื่อนตัวบนพื้นที่ลุ่มน้ำ (Catchment Routing) และ (3) การเคลื่อนตัวในลำน้ำ (Channel Routing) โดยมีรายละเอียดดังนี้ [3]

##### 4.1.1 การวิเคราะห์ฝนส่วนเกิน (Excess Rainfall)

ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้แบบจำลองปริมาณน้ำท่าแบบสัดส่วน (Proportional Runoff Model) และใช้แบบจำลองการสูญเสียของปริมาณฝนแบบเหตุการณ์ต่อเนื่อง (Continuous Loss) โดยขั้นตอนในการคำนวณมีดังนี้

ก) การประเมินปริมาณการสูญเสียเริ่มต้น (Initial Loss,  $il$ )

การสูญเสียเริ่มต้น ( $il$ ) คือ การสูญเสียเนื่องจากการดักโดยพืชพรรณ (Interception) ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณแสดงดังในสมการที่ (1) ถึง สมการที่ (5) โดยปริมาณน้ำฝนทั้งหมดที่ตกลงมาจะถูกหักการสูญเสียเริ่มต้นดังแสดงในสมการที่ (6) จากนั้นความลึกฝนส่วนที่เหลือ (Effective Rainfall,  $R_i^{eff}$ ) จะซึมลงไปเก็บกักอยู่ในชั้นดินต่อไป

$$il_i = IL_i; R_i > IL_i \quad (1)$$

$$il_i = R_i; R_i \leq IL_i \quad (2)$$

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

$$IL_{i+1} = IL_i; R_i \leq r / r.\delta t \quad (4)$$

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

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

โดยที่  $il_i$  คือ ปริมาณการสูญเสียเริ่มต้น ณ ช่วงเวลา  $i$  (มิลลิเมตร)  $IL_i$  คือ ปริมาณการสูญเสียเริ่มต้นที่ยอมให้ ณ เวลา  $i$  โดยจะต้องไม่เกิน  $IL_{max}$  (มิลลิเมตร)  $R_i$  คือ ปริมาณความลึกฝนทั้งหมด ณ ช่วงเวลา  $i$  (มิลลิเมตร)  $R_i^{eff}$  คือ ปริมาณความลึกฝนหลังจากหักการสูญเสียเริ่มต้น ณ ช่วงเวลา  $i$  (มิลลิเมตร) และ  $r / r.\delta t$  คือ ค่าการคืนสภาพ (มิลลิเมตร)

ข) การประเมินเนื่องจากการซึมลงดิน (Infiltration Loss)

การซึมลงดิน (Infiltration Loss) คือ กระบวนการที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการดักโดยพืชพรรณ (Interception) โดยที่ปริมาณน้ำฝนส่วนที่เหลือจะซึมลงไปเก็บกักอยู่ในชั้นดิน ซึ่งก็คือความชื้นในดิน (Soil Moisture) โดยที่ปริมาณการซึมลงดินในแต่ละวัน ( $dF$ ) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (7) หลังจากนั้นปริมาณการซึมในแต่ละวันจะซึมลงไปสะสมเก็บอยู่ในดินดังแสดงในสมการที่ (8)

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

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

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

ค) การประเมินฝนส่วนเกิน (Rainfall Excess)

การประเมินฝนส่วนเกิน ( $R_i^E$ ) ของแบบจำลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ฝนส่วนเกินสำหรับพื้นที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (Impervious Area) และฝนส่วนเกินสำหรับพื้นที่น้ำซึมผ่านได้ (Pervious Area) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (9) สำหรับการแบ่งพื้นที่ทั้ง 2 ส่วนนั้นจะทำการแบ่งโดย สัดส่วนของพื้นที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ ( $F_i / F_{max}$ ) และสัดส่วนของพื้นที่น้ำซึมผ่านได้ ( $1 - F_i / F_{max}$ )

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

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

โดยที่  $F_{max}$  คือ ปริมาณการซึมลงดิน สะสมสูงสุดที่ยอมให้ (มิลลิเมตร)  $C_{imp}$  คือ สัมประสิทธิ์น้ำท่าของพื้นที่น้ำซึมผ่านไม่ได้  $R_i^{per}$

คือ ปริมาณฝนส่วนเกินของพื้นที่ที่น้ำซึมผ่านได้ ณ ช่วงเวลา  $i$  (มิลลิเมตร)  $R_i$  คือ ปริมาณฝนทั้งหมด ณ ช่วงเวลา  $i$  (มิลลิเมตร)  $R_i^{eff}$  คือ ปริมาณความลึกฝนหลังจากหักการสูญเสียเริ่มต้น ณ ช่วงเวลา  $i$  (มิลลิเมตร) และ  $pr$  คือ สัดส่วนน้ำฝนที่เหลืออยู่หลังจากหักการสูญเสีย

#### 4.1.2 การเคลื่อนตัวบนพื้นที่ลุ่มน้ำ (Catchment Routing)

กระบวนการเคลื่อนตัวบนพื้นที่ลุ่มน้ำของแบบจำลอง URBS มีพื้นฐานมาจาก Reservoir Routing ซึ่งมีสมมุติฐานของแบบจำลอง คือ ปริมาตรเก็บกักในพื้นที่ลุ่มน้ำจะถูกพิจารณาเป็นปริมาตรกักเก็บในลักษณะของอ่างเก็บน้ำแบบไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear Reservoir) โดยเมื่อฝนตกลงสู่พื้นที่ลุ่มน้ำ ปริมาณฝนจะเคลื่อนตัวผ่านแหล่งเก็บกักที่จุดศูนย์ถ่วงของลุ่มน้ำ จากนั้นจะไหลออกสู่ลำน้ำ สำหรับการเคลื่อนตัวบนพื้นที่ลุ่มน้ำจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเก็บกัก ( $S_{catch}$ ) และอัตราการไหลออก ( $Q$ ) (สมการที่ (11)) ควบคู่กับ สมการต่อเนื่อง (Continuity Equation) (สมการที่ (12))

$$S_{catch} = \beta \sqrt{A} \left( \frac{1+U}{1+F} \right)^2 Q^m \quad (11)$$

$$\left( \frac{S_i - S_{i-1}}{\Delta t} \right) = \left( \frac{I_i + I_{i-1}}{2} \right) - \left( \frac{Q_i + Q_{i-1}}{2} \right) \quad (12)$$

โดยที่  $S_{catch}$  คือ ปริมาณการเก็บกักของพื้นที่ลุ่มน้ำ (ลูกบาศก์เมตร ชั่วโมง ต่อ วินาที)  $\beta$  คือ พารามิเตอร์การหน่วงของลุ่มน้ำ (Catchment Lag)  $A$  คือ พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตารางกิโลเมตร)  $F$  คือ สัดส่วนพื้นที่ป่าไม้  $U$  คือ สัดส่วนพื้นที่เมือง  $Q$  คือ ปริมาณการไหลออก (ลูกบาศก์เมตร ต่อ วินาที)  $m$  คือ พารามิเตอร์การเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเส้นตรง  $S_i$  คือ ปริมาณการเก็บกักของพื้นที่ลุ่มน้ำ ณ เวลา  $i$  (ลูกบาศก์เมตร ชั่วโมง ต่อ วินาที)  $I_i$  คือ ปริมาณการไหลเข้า (ฝนส่วนเกิน) ณ เวลา  $i$  (ลูกบาศก์เมตร ต่อวินาที)  $Q_i$  คือ ปริมาณการไหลออก ณ เวลา  $i$  (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที) และ  $\Delta t$  คือ ช่วงเวลา (ชั่วโมง)

#### 4.1.3 การเคลื่อนตัวในลำน้ำ (Channel Routing)

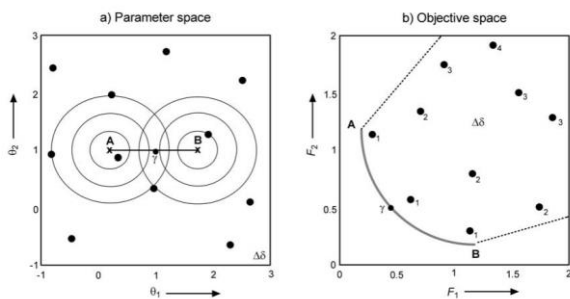
กระบวนการการเคลื่อนตัวในลำน้ำของแบบจำลอง URBS มีพื้นฐานมาจากวิธี Muskingum Routing ซึ่งมีสมมุติฐานของแบบจำลอง คือ เมื่อน้ำไหลออกจากแหล่งเก็บกักที่จุดศูนย์ถ่วงของลุ่มน้ำ ซึ่งก็คือ ปริมาณการไหลเข้าของลำน้ำ หลังจากนั้นจะถูกเคลื่อนตัวไปตามทางน้ำ สำหรับการเคลื่อนตัวในลำน้ำ จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกักเก็บ ( $S_{channel}$ ) และอัตราการไหล ( $I, Q$ ) ดังแสดงในสมการที่ (13) ควบคู่กับสมการต่อเนื่อง (Continuity Equation)

$$S_{channel} = \alpha f \left( \frac{nL}{\sqrt{S_c}} \right) (XI + (1-X)Q)^{n1} \quad (13)$$

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

#### 4.2 การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยกระบวนการ MOSCEM และฟังก์ชันวัตถุประสงค์

โปรแกรม MOSCEM ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย Vrugt, et al. [16] เพื่อการสอบเทียบแบบจำลองทางอุทกวิทยาแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Function) โดยเริ่มจากการสุ่มประชากรชุดแรกด้วยวิธี Latin Hyper Cube เพื่อสร้างประชากรชุดเริ่มต้นที่มีการกระจายตัวทั่วทั้งมิติ และทำการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับประชากรทุกตัวที่สุ่มมา จากนั้นทำการจัดลำดับของประชากรแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยกระบวนการ Pareto Ranking [17] แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการสุ่มเข้าโดยใช้อัลกอริทึม Markov Chain Monte Carlo Sample เพื่อให้ได้ประชากรชุดถัดไป สำหรับผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาโดย MOSCEM จะเป็นชุดคำตอบที่เหมาะสมที่สุดซึ่งเรียกว่า Pareto Front ซึ่งก็คือ ชุดพารามิเตอร์ที่มีค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์อยู่ในลำดับที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3 กล่าวคือ Pareto Front เป็นชุดพารามิเตอร์ที่มีค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ไม่แพ้พารามิเตอร์ชุดอื่น ๆ หรือในกรณีการแก้ปัญหาแบบ Minimize จะไม่มีพารามิเตอร์ชุดไหนที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยกว่าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Pareto Front



รูปที่ 3 หลักการของกระบวนการ Pareto Ranking สำหรับปัญหาที่มีสองพารามิเตอร์ (a) และมีสองวัตถุประสงค์ (b)

การสอบเทียบอัตโนมัติจะดำเนินการโดยการคำนวณค่าทางสถิติระหว่างข้อมูลตรวจวัดและผลการคำนวณจากแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าเพื่อนำมาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการสุ่มเข้าของกระบวนการสอบเทียบอัตโนมัติ โดยตัวแปรทางสถิติที่นำมาใช้ในกระบวนการนี้คือ Nash-Sutcliffe's Efficiency (NSE) [18] โดยมีสมการแสดงการคำนวณดังนี้

$$NSE = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \right) \quad (14)$$

โดยที่  $\bar{Y}$  คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด  $X_i$  คือ ผลการคำนวณจากแบบจำลอง  $Y_i$  คือ ข้อมูลการตรวจวัด  $N$  คือ จำนวนข้อมูล และ  $i$  คือ ลำดับของอนุกรมข้อมูล

โดยที่ค่า NSE มีค่าอยู่ระหว่าง  $-\infty$  ถึง 1 ในกรณีที่ NSE มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าชุดข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์แบบปฏิภาคโดยตรงที่ตีความและปริมาณทั้งสองสำหรับทุกคู่ลำดับ  $i$  มีค่าใกล้เคียงกันมาก และในกรณีที่ NSE มีค่าเข้าใกล้  $-\infty$  แสดงว่าชุดข้อมูลทั้งสองก็ไม่มีความสัมพันธ์ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงปริมาณ ทั้งนี้ ในการศึกษานี้ได้นำ NSE มาประยุกต์ใช้สำหรับการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยแบ่งออกเป็น 3 ฟังก์ชัน คือ (1) ข้อมูลอัตราการไหล (2) ลอการิทึมของอัตราการไหล และ (3) โค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลา (Flow-Duration Curve)

ความสัมพัทธ์ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงปริมาณ ทั้งนี้ ในการศึกษานี้ได้นำ NSE มาประยุกต์ใช้สำหรับการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยแบ่งออกเป็น 3 ฟังก์ชัน คือ (1) ข้อมูลอัตราการไหล (2) ลอการิทึมของอัตราการไหล และ (3) โค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลา (Flow-Duration Curve)

#### 5. วิธีการ

งานวิจัยเรื่องการพัฒนาแบบจำลอง SENSWAT-URBS เพื่อการสอบเทียบแบบอัตโนมัติโดยใช้ MOSCEM มีขั้นตอนในการดำเนินงานดังต่อไปนี้

##### 5.1 การพัฒนาแบบจำลอง SENSWAT-URBS

นาทฤษฎีของแบบจำลอง URBS มาสร้างเป็นแบบจำลอง SENSWAT-URBS ที่สามารถสอบเทียบแบบจำลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองได้โดยอัตโนมัติตามกระบวนการ MOSCEM ซึ่งเป็นกระบวนการในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด แบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) ที่ได้รับการพัฒนาโดย Vrugt, et al. [16] ทั้งนี้ ได้พิจารณาเลือกใช้ภาษา MATLAB ในการเขียนโปรแกรม

##### 5.2 การรวบรวมข้อมูล

รวบรวมข้อมูลน้ำฝนและข้อมูลน้ำท่าที่อยู่ในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1

##### 5.3 การแบ่งลุ่มน้ำย่อย

แบ่งลุ่มน้ำย่อยของพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ออกเป็น 10 ลุ่มน้ำย่อย โดยยึดแนวทางการแบ่งลุ่มน้ำย่อยของคณะกรรมการทรัพยากรน้ำแห่งชาติ รวมทั้งที่ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า P.1 และสถานีวัดน้ำท่าด้านเหนือน้ำที่มีข้อมูลเพียงพอในช่วงของการศึกษาและไม่ได้รับอิทธิพลของโครงการพัฒนาแหล่งน้ำขนาดใหญ่

##### 5.4 วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของลุ่มน้ำย่อย

วิเคราะห์ขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยของทั้ง 10 ลุ่มน้ำย่อย รวมทั้งความยาวลำน้ำจากตำแหน่งด้านเหนือน้ำสุดบนทางน้ำถึงจุดใกล้ศูนย์ถ่วงบนทางน้ำของแต่ละลุ่มน้ำย่อย และจากจุดใกล้ศูนย์ถ่วงบนทางน้ำของแต่ละลุ่มน้ำย่อยถึงตำแหน่งด้านท้ายน้ำสุดบนทางน้ำของแต่ละลุ่มน้ำย่อย

##### 5.5 การสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-URBS

สอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และทำการตรวจสอบความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 รวมทั้งความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1

สอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 รวมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านั้น

##### 5.6 การเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่า

เปรียบเทียบความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และเป็นผลจากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีเหล่านั้นโดยตรง

## 6. ผลการศึกษา

### 6.1 ผลการพัฒนาแบบจำลอง SENSWAT-URBS

แบบจำลอง URBS ที่มีการใช้งานเป็นโปรแกรมประเภท Black box ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาและการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติ ในการศึกษานี้จึงได้นำ URBS มาเขียนโปรแกรมขึ้นใหม่ด้วยภาษา MATLAB และเชื่อมต่อกับ MOSCEM ซึ่งเป็นกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์เพื่อประเมินพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ทั้งนี้ แบบจำลอง SENSWAT-URBS ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นในการศึกษานี้ ได้เลือกใช้การประเมินการสูญเสียแบบต่อเนื่อง (Continuous Loss) เพื่อการวิเคราะห์ความลึกฝนส่วนเกิน (Excess Rainfall) พร้อมทั้งมีการใช้กระบวนการคืนสภาพใน 2 ส่วน คือ การคืนสภาพของการสูญเสียเริ่มต้น และการคืนสภาพของการซึมลงดิน เพื่อให้สามารถประยุกต์แบบจำลองกับเหตุการณ์ฝนหลายเหตุการณ์ได้ อีกทั้งมีการปรับโครงสร้างจากแบบจำลอง URBS ใน 2 ส่วน คือ (1) การเคลื่อนตัวบนพื้นที่ลุ่มน้ำ (Catchment Routing) และ (2) การเคลื่อนตัวในลำน้ำ (Channel Routing) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การเคลื่อนตัวบนพื้นที่ลุ่มน้ำ (Catchment Routing) ได้ถูกทำการปรับแก้จากสมการที่ (11) โดยการตัดเอาสัดส่วนพื้นที่ป่าไม้ (F) และสัดส่วนพื้นที่เมือง (U) ออก เพื่อลดความยุ่งยากในการประเมินสัดส่วนทั้งสองของแต่ละลุ่มน้ำย่อย โดยสมการหลังการปรับแก้แสดงดังสมการที่ (15)

$$S_{catch} = \beta \sqrt{AQ^m} \quad (15)$$

การเคลื่อนตัวบนในลำน้ำ (Channel Routing) ได้ถูกทำการปรับแก้จากสมการที่ (13) โดยการตัดเอาสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning (n) แฟคเตอร์ความยาวลำน้ำ (f) และความชันท้องน้ำ (Sc) ออก เพื่อลดความยุ่งยากในการประเมินตัวแปรดังกล่าวของแต่ละลุ่มน้ำย่อย รวมทั้งกำหนดให้พารามิเตอร์แสดงความไม่เป็นเส้นตรง (n1) ให้มีค่าคงที่เป็น 1 ซึ่งทำให้ได้วิธีการ Muskingum แบบเส้นตรง เพื่อลดความยุ่งยากในการใช้งานแบบจำลอง โดยสมการหลังการปรับแก้แสดงดังสมการที่ (16)

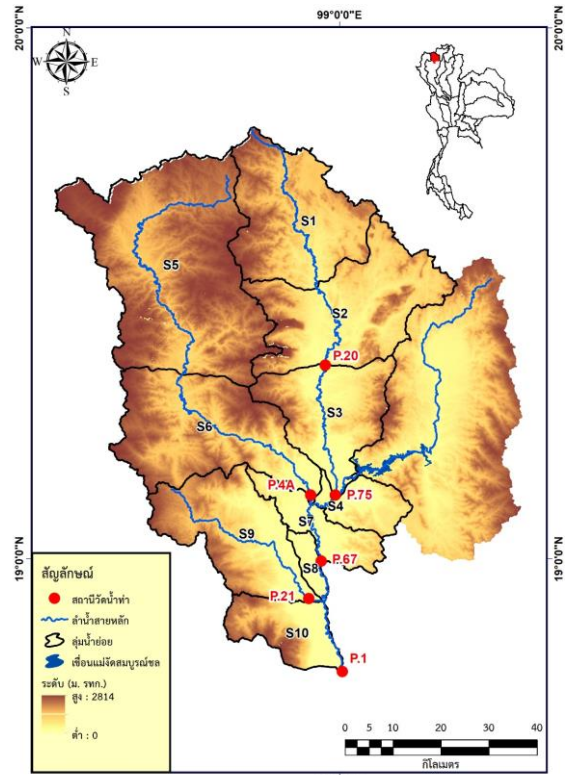
$$S_{channel} = \alpha L(XI + (1-X)Q) \quad (16)$$

### 6.2 ผลการแบ่งลุ่มน้ำย่อยและการประเมินลักษณะเฉพาะของพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1

ในการศึกษานี้ได้ทำการแบ่งลุ่มน้ำย่อยของพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ออกเป็น 10 ลุ่มน้ำย่อย โดยเป็นการแบ่งที่บริเวณจุดบรรจบของลำน้ำ และจุดที่มีสถานีวัดน้ำท่าตั้งอยู่ ซึ่งประกอบด้วย P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยได้ทำการตัดลุ่มน้ำแม่งัดออกไปเนื่องจากมีอ่างเก็บน้ำแม่งัดสมบูรณ์ชลตั้งอยู่ทางด้านท้ายน้ำของลุ่มน้ำแม่งัดทำให้ไม่สามารถใช้แบบจำลองเพื่อ

ประเมินน้ำท่าของลุ่มน้ำแม่งัดได้อย่างถูกต้อง ในการศึกษานี้จึงใช้ข้อมูลปริมาณการไหลออกของอ่างเก็บน้ำแม่งัดมาเป็นปริมาณการไหลเข้าด้านข้าง (Lateral Inflow) ของลำน้ำอิง

นอกจากนั้นแล้ว ในการศึกษานี้ได้วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะและพื้นที่รับน้ำฝนของลุ่มน้ำย่อยภายในพื้นที่รับน้ำของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ทั้ง 10 ลุ่มน้ำย่อย ดังแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 4 ลุ่มน้ำย่อยและตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่าที่ตั้งอยู่พื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1

ตารางที่ 3 ลักษณะเฉพาะและพื้นที่รับน้ำฝนของลุ่มน้ำย่อยภายในพื้นที่รับน้ำของสถานีวัดน้ำท่า P.1

รหัสลุ่มน้ำย่อย	จุดออก	พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตร.กม.)	ความยาวลำน้ำ (กม.)	
			จากเหนือสุดถึงจุดใกล้ศูนย์ถ่วง	จากจุดใกล้ศูนย์ถ่วงถึงท้ายน้ำสุด
S1	-	622	30.72	25.72
S2	P.20	687	8.23	24.60
S3	P.75	440	13.74	22.52
S4	-	155	4.23	5.95
S5	-	1,256	53.51	33.74
S6	P.4A	698	20.47	35.74
S7	P.67	195	7.87	11.28
S8	-	57	3.52	8.29
S9	P.21	516	21.65	30.51
S10	P.1	237	6.66	11.70

### 6.3 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SENSWAT-URBS

#### 6.3.1 ผลการประเมินฝนเชิงพื้นที่รายวันสำหรับแต่ละลุ่มน้ำย่อยในพื้นที่รับน้ำของสถานีวัดน้ำท่า P.1

เนื่องจากผลิตภัณฑ์ฝน SENSWAT-GGR ที่ใช้การศึกษานี้ อยู่ในรูปแบบกริด แต่ในการศึกษานี้ต้องการประเมินน้ำท่าในระดับลุ่มน้ำย่อยเท่านั้น จึงจำเป็นต้องทำการเฉลี่ยค่าปริมาณความลึกฝนสำหรับทุกกริดภายในลุ่มน้ำย่อยทั้ง 10 ลุ่มน้ำย่อย เพื่อประเมินความลึกฝนเชิงพื้นที่แบบรายวันตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 ถึงปี พ.ศ. 2556 ที่เป็นตัวแทนของแต่ละลุ่มน้ำย่อยสำหรับการนำไปเป็นข้อมูลด้านเข้าของแบบจำลอง SENSWAT-URBS โดยในการศึกษานี้ได้นำเครื่องมือ Zonal Statistic as Table ที่มีอยู่ในโปรแกรม ArcGIS 10 มาใช้สำหรับกระบวนการเฉลี่ยเชิงพื้นที่ (Areal Average) ทั้งนี้ ในตารางที่ 4 ได้แสดงผลการประเมินความลึกฝนเชิงพื้นที่รายฤดูกาลเฉลี่ย และรายปีเฉลี่ย โดยในตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปริมาณความลึกฝนรายปีเฉลี่ยของทั้ง 10 ลุ่มน้ำย่อย มีค่าอยู่ระหว่าง 1,171.1 ถึง 1,369.0 มิลลิเมตรต่อปี ตามลำดับ ซึ่งเกิดขึ้นที่ลุ่มน้ำย่อย S5 และ S3 ตามลำดับ ตารางที่ 4 ปริมาณความลึกฝนเชิงพื้นที่รายเดือนเฉลี่ย รายฤดูกาลเฉลี่ย และรายปีเฉลี่ย

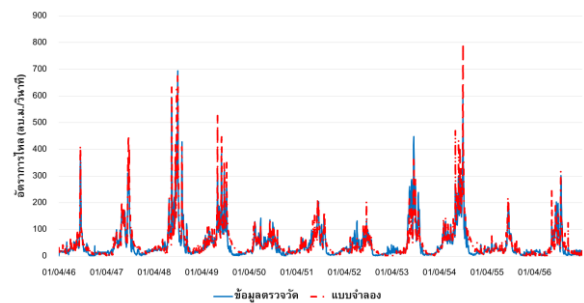
รหัสลุ่มน้ำย่อย	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	รายปี
S1	1105.9	141.9	1247.8
S2	1099.3	153.4	1252.8
S3	1209.8	159.2	1369.0
S4	1120.3	113.7	1234.0
S5	1029.6	141.4	1171.1
S6	1114.4	134.7	1249.1
S7	1091.2	109.6	1200.8
S8	1067.5	108.2	1175.8
S9	1117.0	112.6	1229.6
S10	1196.9	125.9	1322.7

#### 6.3.2 ผลการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-URBS

ผลการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-URBS แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ (1) ผลการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 รวมทั้งผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และ (2) ผลการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 เพื่อประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านั้นโดยตรง ซึ่งมีรายละเอียดผลการสอบเทียบดังต่อไปนี้

ผลการประเมินน้ำท่าโดยแบบจำลอง SENSWAT-URBS ในกรณีที่ 1 แสดงดังในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างกราฟน้ำท่าของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ที่ได้จากแบบจำลอง และได้จากการตรวจวัดในระหว่างปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2556 ซึ่งให้ค่า NSE เท่ากับ 0.85 สำหรับผลการประเมินน้ำท่าในลุ่มน้ำย่อยต่าง ๆ ภายในพื้นที่รับน้ำของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ซึ่งประกอบด้วย P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 พบว่า NSE มีค่าเท่ากับ 0.58, 0.76, 0.71, 0.78 และ 0.68 ตามลำดับ สำหรับผลการสอบเทียบในกรณีที่ 2 โดยการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 โดยตรง ให้ค่า

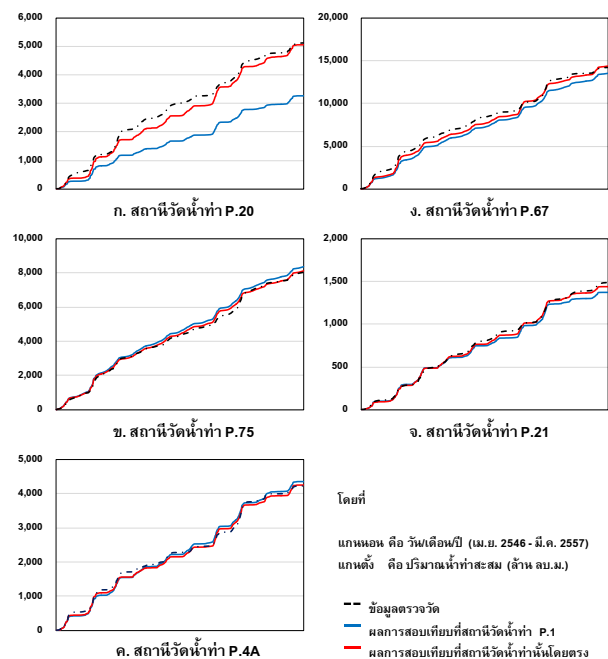
NSE เท่ากับ 0.66, 0.79, 0.74, 0.78 และ 0.70 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการสอบเทียบของกรณีที่ 1 กับกรณีที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่า NSE ในกรณีที่ 2 เพิ่มขึ้นเท่ากับ 12.1%, 3.2%, 3.6%, 0.3% และ 2.2% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ นอกจากนั้นแล้ว ได้แสดงกราฟเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าสะสมระหว่างผลการประเมินน้ำท่าของทั้ง 2 กรณี สำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ยกเว้นที่สถานีวัดน้ำท่า P.20 ซึ่งเป็นสถานีที่ตั้งอยู่ทางด้านเหนือที่สุดของพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1



รูปที่ 5 ผลการประเมินน้ำท่าโดยแบบจำลอง SENSWAT-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1

ตารางที่ 5 ผลการสอบเทียบ URBS ด้วย MOSCEM

NSE	สถานีวัดน้ำท่า				
	P.20	P.75	P.4A	P.67	P.21
กรณีที่ 1	0.58	0.76	0.71	0.78	0.68
กรณีที่ 2	0.66	0.79	0.74	0.78	0.70
ความแตกต่าง (%)	12.12	3.19	3.57	0.34	2.16



รูปที่ 6 ปริมาณน้ำท่าสะสมระหว่างผลการประเมินน้ำท่าของทั้ง 2 กรณี สำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21

## 7. สรุปผลการศึกษา

แบบจำลอง SENSWAT-URBS ได้รับการพิสูจน์ในการศึกษานี้แล้วว่า เป็นแบบจำลองประเภทกึ่งกระจายตัวที่มีประสิทธิภาพในการประเมินน้ำท่าสำหรับลุ่มน้ำย่อยของสถานที่ทำการสอบเทียบแบบจำลองซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการประเมินน้ำท่าสำหรับพื้นที่ที่ไม่สถานีวัดน้ำท่าตั้งอยู่ (Ungauged Catchment) นอกจากนั้นแล้ว แบบจำลอง SENSWAT-URBS ยังสามารถทำการสอบเทียบแบบจำลองได้โดยอัตโนมัติ ทำให้การใช้งานแบบจำลองเป็นไปได้โดยง่ายรวมทั้งมีประสิทธิภาพสูงที่จะให้ผลการประเมินน้ำท่าได้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงสำหรับลุ่มน้ำที่พิจารณา ทั้งนี้ หน่วยงานและบุคลากรที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการด้านทรัพยากรน้ำของประเทศ อาทิเช่น สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ กรมชลประทาน กรมทรัพยากรน้ำ และ กรมอุตุนิยมวิทยา เป็นต้น จะได้รับผลประโยชน์จากการศึกษานี้โดยตรง กล่าวคือ หน่วยงานสามารถนำแบบจำลอง SENSWAT-URBS ซึ่งเป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า แบบกึ่งกระจายตัวที่ได้รับการพัฒนาในการศึกษานี้ ไปใช้งานเพื่อการประเมินน้ำท่าสำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำในประเทศไทยได้ อย่างไรก็ตาม ศูนย์วิจัย SENSWAT มีแนวคิดที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของแบบจำลอง SENSWAT-URBS อย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้กับผลการประเมินน้ำท่าในระดับลุ่มน้ำย่อย ซึ่งเห็นได้จากผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.20 ที่มีความผิดพลาดมากกว่าสถานีวัดน้ำท่าอื่น ๆ สุดท้ายนี้ องค์ความรู้ที่ได้สามารถนำไปถ่ายทอดให้กับนิสิตนักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าแบบกึ่งกระจายตัว ที่สามารถสอบเทียบได้โดยอัตโนมัติ เพื่อสร้างความเข้าใจอย่างชัดเจนต่อพื้นฐานของแบบจำลอง และเพื่อเป็นการสร้างแนวความคิดในการพัฒนาแบบจำลองอื่น ๆ ต่อไป โดยจะนำมาซึ่งความเข้มแข็งให้กับงานวิจัยที่มีคุณภาพของประเทศต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับนิสิตปริญญาโท และทุนวิจัยเพื่อการดำเนินงานของศูนย์วิจัยการรับรู้จากระยะไกลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management; SENSWAT) รวมทั้งกรมชลประทาน และกรมอุตุนิยมวิทยา ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลต่าง ๆ เพื่อการดำเนินงานวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

[1] Sharma, K. D., and Singh, S. (1992). Runoff estimation using Landsat Thematic Mapper data and the SCS model. *Hydrological Sciences Journal*, 37, pp. 39-52.

[2] 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*, 192, pp. 81-103.

[3] นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์ (2556). อุทกวิทยาขั้นสูง (ADVANCED HYDROLOGY). ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 651 หน้า

[4] Laurenson, E. M., and Mein, R. G. (1999). Version 4 Runoff Routing Program User Manual: Depth of Civil Engineering. Monash University, Australia.

[5] 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., vol. Report No 170.

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

[7] 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.*, 18, pp. 1895-1915.

[8] Carroll, D. (2004). URBS a Rainfall Runoff Routing Model for flood forecasting and design version 4.

[9] 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.*, 11, pp. 1437-1439.

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

[11] Searcy, J. K., Hardison, C. H., and Langbein, W. B. (1960). Double-Mass Curves. U.S. Geol. Surv. Water Supply Pap, 1541-B, pp. 31-66.

[12] De Silva, R. P., Dayawansa, N. D. K., and Ratnasiri, M. D. (2007). A comparison of methods used in estimating missing rainfall data. *Journal of Agricultural Sciences – Sri Lanka*, 3(2), pp. 101-108.

[13] Malone, T. (1999). Using URBS for Real Time Flood Modelling. presented at the 2nd International Conference on Water Resources & Environment Research, Brisbane, Qld.

[14] 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*, 35, pp. 49-56.

[15] Sriwongsitanon, N. (2010). Flood Forecasting System Development for the Upper Ping River Basin. *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*, 44, pp. 717-731.



- [16] 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.*, 39.
- [17] Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley-Longman, Reading, Mass.
- [18] Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, pp. 282-290.