

การพัฒนาแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} เพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่า Development of the SENSWAT-FLEX_{SD} Model for Runoff Estimation

วาสนา จันทร์แดง^{1*} และ นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: wasana.jan1@ku.th

บทคัดย่อ

ปริมาณน้ำท่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดองค์ประกอบหนึ่งในวัฏจักรทางอุทกวิทยา อย่างไรก็ตาม จำนวนสถานีวัดน้ำท่าที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณน้ำท่าโดยส่วนใหญ่มีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า จำนวนมากขึ้นมาเพื่อประเมินน้ำท่าทั้งในพื้นที่ที่มีและไม่มีสถานีวัดน้ำท่าตั้งอยู่ อย่างไรก็ตาม แบบจำลองส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองประเภทลัมพ์ที่ให้ผลการประเมินน้ำท่า ณ สถานีตรวจวัดที่ทำการสอบเทียบแบบจำลอง ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำแบบจำลอง FLEX_L ซึ่งเป็นแบบจำลองประเภทลัมพ์มาพัฒนาให้เป็นแบบจำลองประเภทกึ่งกระจายตัวโดยใช้ชื่อว่า SENSWAT-FLEX_{SD} ซึ่งพัฒนาภายใต้ศูนย์วิจัย SENSWAT ทั้งนี้เนื่องจาก FLEX_L เป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพในการประเมินน้ำท่าและสามารถสอบเทียบแบบจำลองได้โดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM ในการพัฒนาแบบจำลองนั้น พื้นที่ลุ่มน้ำจะถูกแบ่งออกเป็นลุ่มน้ำย่อยและน้ำท่าที่เกิดขึ้นในแต่ละลุ่มน้ำย่อยจะถูกเคลื่อนตัวอย่างต่อเนื่องมายังจุดออกของลุ่มน้ำ จากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} และ FLEX_L โดยการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ซึ่งผลการทดสอบพบว่า ค่า NSE เท่ากับ 0.89 และ 0.85 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} ให้ผลการประเมินน้ำท่าที่ดีกว่าแบบจำลอง FLEX_L จากนั้นจึงนำผลการประเมินน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} ณ จุดออกของลุ่มน้ำย่อยต่าง ๆ ที่อยู่ภายในพื้นที่รับน้ำของสถานี P.1 ซึ่งประกอบด้วยสถานี P.4A, P.20, P.75, P.67 และ P.21 เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดที่สถานีเหล่านั้น ซึ่งพบว่า NSE มีค่าเท่ากับ 0.77, 0.63, 0.79, 0.83 และ 0.57 ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.75 ในขณะที่ผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEX_L โดยตรงที่สถานีดังกล่าวให้ค่า NSE เท่ากับ 0.77, 0.67, 0.74, 0.80 และ 0.73 ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.76 ดังนั้น SENSWAT-FLEX_{SD} สามารถนำไปใช้เพื่อการประเมินน้ำท่าที่สถานีตรวจวัดที่ทำ

การสอบเทียบแบบจำลองรวมทั้ง ณ ตำแหน่งใด ๆ ที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าแบบกึ่งกระจายตัว, FLEX_L, SENSWAT-FLEX_{SD}, พื้นที่ที่ไม่มีสถานีวัดน้ำท่า

Abstract

Runoff is one of the most important components in the hydrological cycle. However, the number of gauging stations used to measure runoff are usually limited. Therefore, many rainfall-runoff models were developed to estimate runoff for gauged and ungauged catchments. Most of models are categorized as lumped models which provide runoff only at a calibrated gauging station. In this study, FLEX_L - a lumped model - was chosen to be developed as a semi-distributed model called SENSWAT-FLEX_{SD} which was developed under SENSWAT Research Centre. This is according to its performance in runoff estimation and it can be calibrated automatically using MOSCEM programming. In model development, the catchment area has to be divided into sub-catchments and runoff from upstream sub-catchments are routed downstream to the outlet of a catchment. The performance of SENSWAT-FLEX_{SD} and FLEX_L models was tested by calibrating at P.1 station. The NSE are shown to be 0.89 and 0.85, respectively, which indicates better performance of SENSWAT-FLEX_{SD}. The results of runoff estimates provided by SENSWAT-FLEX_{SD} at the outlets of various sub-catchments within the P.1 station comprising P.4A, P.20, P.75, P.67 and P.21 stations were compared with the observed data. The NSE are shown to be 0.77, 0.63, 0.79, 0.83 and 0.57, respectively, with an average value of 0.75. The FLEX_L was also calibrated at those stations and it provided the NSE of 0.77, 0.67, 0.74, 0.80 and 0.73, respectively, with an average value of 0.76. Therefore, SENSWAT-FLEX_{SD} can be effectively used for runoff estimation not only at a calibrated station but also at any required locations.

Keywords: Semi-distributed rainfall-runoff model, FLEX_L, SENSWAT-FLEX_{SD}, ungauged catchment

1. คำนำและที่มาของงานวิจัย

ปริมาณน้ำท่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญองค์ประกอบหนึ่งในวัฏจักรทางอุทกวิทยา และเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการจัดการทรัพยากรน้ำที่มีอยู่ให้เหมาะสมกับความต้องการใช้น้ำของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดยต้องจัดการไม่ให้เกิดปัญหาอุทกภัย และปัญหาภัยแล้งตามมา ดังนั้น การตรวจวัดปริมาณน้ำท่าจึงมีความจำเป็น โดยหน่วยงานหลักที่ทำการตรวจวัดคือ กรมชลประทานและกรมทรัพยากรน้ำ อย่างไรก็ตาม การวัดปริมาณน้ำท่าจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรบุคคล เวลา และงบประมาณในปริมาณมาก ทำให้จำนวนสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการตรวจวัดโดยหน่วยงานจึงมีอยู่อย่างจำกัด ด้วยเหตุผลดังกล่าว การประเมินปริมาณน้ำท่าโดยวิธีการทางอ้อมจึงมีความจำเป็น จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (Rainfall-runoff model) เพื่อใช้ในการประเมินปริมาณน้ำท่า ณ ตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งสามารถดำเนินการได้ทั้งในกรณีของพื้นที่รับน้ำฝนที่มีสถานีวัดน้ำท่า (Gauged catchment) ตั้งอยู่ และพื้นที่รับน้ำฝนที่ไม่มีสถานีวัดน้ำท่า (Ungauged catchment)

แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบัน อาทิเช่น แบบจำลอง SCS [1], TANK [2], NAM [3], URBS [4], FLEX_L [5], FLEX-Topo [6], Modified NAM [7] เป็นต้น อย่างไรก็ตาม แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ที่ได้รับการพัฒนามานี้ส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองประเภทลัมพ์ (Lumped model) ซึ่งสามารถประเมินปริมาณน้ำท่าที่จุดออกของพื้นที่รับน้ำที่พิจารณาได้เท่านั้น ซึ่งในบรรดาแบบจำลองประเภทลัมพ์เหล่านี้พบว่า แบบจำลอง FLEX_L ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินปริมาณน้ำท่าโดยนักวิจัยหลายกลุ่ม และให้ผลการประเมินปริมาณน้ำท่าได้เป็นอย่างดีในแต่ละพื้นที่ศึกษา อาทิเช่น ผลการศึกษาที่ดำเนินการโดย Fenicia et al. [5]; Kavetski and Fenicia [8]; Gao et al. [6]; Tekleab et al. [9]; Sriwongsitanon et al. [10], นุชชารต และคณะ [7] โดยแนวความคิดพื้นฐานที่สำคัญของแบบจำลอง FLEX_L คือ การแบ่งการเก็บกักออกเป็น 5 ส่วน คือ (1) การเก็บกักในชั้นหิมะ (Snow reservoir) (2) การเก็บกักโดยกระบวนการ Interception (Interception reservoir) (3) การเก็บกักในชั้นดินไม่อิ่มตัว (Unsaturated reservoir) (4) การเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Fast reservoir) และ (5) การเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า (Slow reservoir) [7] อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง FLEX_L สามารถประเมินน้ำท่าได้ที่จุดออกของพื้นที่รับน้ำที่มีสถานีวัดน้ำท่าตั้งอยู่เท่านั้น นอกจากนั้นแล้ว ตามโครงสร้างของแบบจำลอง FLEX_L ไม่มีการแยกการเคลื่อนตัวของน้ำท่าที่เกิดบนพื้นที่ลุ่มน้ำออกจากการเคลื่อนตัวของน้ำท่าในลำน้ำทั้ง ๆ ที่ในสภาพความเป็นจริงการเคลื่อนตัวของทั้งสองส่วนมีความแตกต่างกัน

นอกจากแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ประเภทลัมพ์แล้ว ยังมีแบบจำลองประเภทกึ่งกระจายตัว (Semi-distributed model) ที่สามารถประเมินปริมาณน้ำท่าได้ทั้งจุดออกของพื้นที่รับน้ำ และจุดใด ๆ ที่ต้องการด้านเหนือหน้าของจุดพิจารณาที่สถานีวัดน้ำท่าได้ ซึ่งแบบจำลอง URBS ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Queensland Department of

Natural Resources and Mines ในปี ค.ศ. 1990 [4] เป็นตัวอย่างของแบบจำลองประเภทกึ่งกระจายตัวที่สามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าได้เป็นอย่างดี โดยข้อดีของแบบจำลอง URBS คือการแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำหลักออกเป็นลุ่มน้ำย่อยที่มีขนาดพื้นที่รับน้ำฝนใกล้เคียงกันทุกลุ่มน้ำย่อย การแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำในลักษณะดังกล่าวทำให้สามารถประเมินปริมาณน้ำท่าของทุกลุ่มน้ำย่อย ทั้งนี้ เนื่องจากแบบจำลอง URBS ได้ทำการแบ่งการเคลื่อนตัวของน้ำท่าออกเป็น 2 ส่วน คือ การเคลื่อนตัวของน้ำท่าบนพื้นที่ลุ่มน้ำ (Catchment routing) และการเคลื่อนตัวของน้ำท่าในลำน้ำ (Channel routing) โดยทำการเคลื่อนตัวตามแนวทางการไหลของน้ำจากลุ่มน้ำย่อยบนสุดลงสู่ลุ่มน้ำย่อยด้านท้ายน้ำจนถึงจุดสุดท้ายที่สถานีวัดน้ำท่าด้านท้ายน้ำ

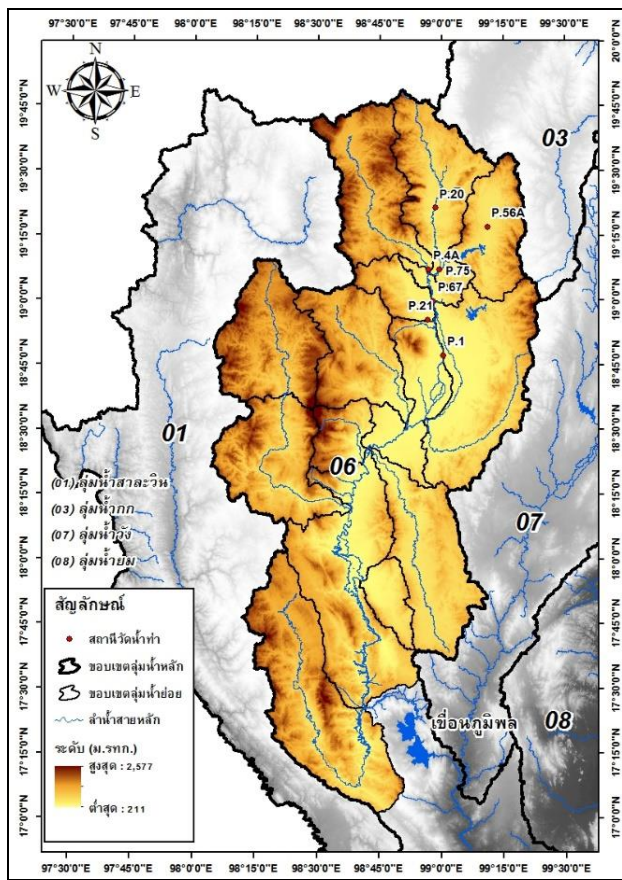
ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำแนวความคิดพื้นฐานของแบบจำลอง FLEX_L และแนวคิดในการแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยของแบบจำลอง URBS มาใช้เพื่อสร้างแบบจำลอง FLEX_L แบบกึ่งกระจายตัว (Semi-distributed FLEX_L model) หรือแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} โดยแต่ละลุ่มน้ำย่อยจะใช้แบบจำลอง FLEX_L ในการประเมินปริมาณน้ำท่าที่จุดออกของแต่ละลุ่มน้ำย่อย จากนั้นจะทำการเคลื่อนตัวของน้ำท่าจากท้ายน้ำของลุ่มน้ำย่อยด้านเหนือน้ำมายังท้ายน้ำของลุ่มน้ำย่อยด้านท้ายน้ำที่อยู่ถัดไป เพื่อนำมารวมกับน้ำท่าที่เกิดขึ้นจากลุ่มน้ำย่อยด้านท้ายน้ำที่กำลังพิจารณา โดยจะดำเนินการต่อเนื่องกันไปจนถึงจุดสุดท้ายที่สถานีวัดน้ำท่าด้านท้ายน้ำ สำหรับการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} เพื่อหาชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองที่เหมาะสมนั้น จะใช้การสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติโดยโปรแกรม MOSCEM ซึ่งเป็นกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective function) โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้เพื่อการเลือกพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองที่เหมาะสมประกอบด้วยตัวแปรทางสถิติ 3 ตัวแปร คือ (1) ประสิทธิภาพการไหล (Efficiencies of flows, KGE_E) (2) ลอการิทึมของการไหล (Logarithm of flows, KGE_L) และ (3) โค้งช่วงเวลาการไหล (Flow duration curves, KGE_F) ทั้งนี้ แบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} จะนำมาประยุกต์ใช้กับพื้นที่ลุ่มน้ำของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ต่อจากนั้นจะทำการตรวจสอบประสิทธิภาพในการประเมินน้ำท่าที่ลุ่มน้ำย่อยต่าง ๆ ของสถานี P.1 ที่วิเคราะห์โดยแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} กับผลการประเมินน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลอง FLEX_L เพื่อสรุปประสิทธิผลของแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} ที่ได้รับการพัฒนาในการศึกษานี้

2. พื้นที่ศึกษา และข้อมูล

2.1 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา คือ ลุ่มน้ำปึงตอนบน ซึ่งเป็นพื้นที่ส่วนหนึ่งของลุ่มน้ำปึงที่อยู่เหนือเขื่อนภูมิพล ลุ่มน้ำปึงตอนบนมีลำน้ำสายหลักไหลผ่านคือ แม่น้ำปึง ซึ่งมีต้นกำเนิดจากทิวเขาผีปันน้ำในเขตอำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ โดยมีทิศทางการไหลจากเหนือลงใต้ ลักษณะภูมิประเทศส่วนใหญ่ของลุ่มน้ำเป็นภูเขาสูง และสภาพภูมิอากาศทั่วไปของลุ่มน้ำอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ นอกจากนั้นแล้ว ในแต่ละปีลุ่มน้ำปึงตอนบนจะ

ได้รับอิทธิพลจากพายุดีเปรสชัน ซึ่งมาจากทะเลจีนใต้ในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนกันยายน ทำให้พื้นที่ลุ่มน้ำปึงมีฝนตกชุกตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม โดยในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาพื้นที่ลุ่มน้ำปึงตอนบนส่วนที่อยู่เหนือสถานีวัดน้ำท่า P.1 เท่านั้น ทั้งนี้ สถานีวัดน้ำท่า P.1 ตั้งอยู่บนพื้นที่ลุ่มน้ำปึงส่วนที่ 2 ซึ่งเป็นลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำปึงตอนบน พื้นที่รับน้ำของสถานีวัดน้ำท่า P.1 อยู่ระหว่างละติจูด 18° 47' 12" ถึง 19° 48' 51" เหนือ และลองจิจูด 98° 27' 48" ถึง 99° 20' 44" ตะวันออก และมีพื้นที่รวมทั้งสิ้น 6,142 ตารางกิโลเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีค่าความลึกฝนเฉลี่ยรายปี และน้ำท่าเฉลี่ยรายปีในระหว่างปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2556 เท่ากับ 1,229 และ 256 มิลลิเมตรต่อปี ตามลำดับ



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษาและตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษาซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของลุ่มน้ำปึงตอนบน

ตารางที่ 1 รายละเอียดของสถานีวัดน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับที่	รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ลำน้ำ	พื้นที่รับน้ำฝน (ตร.กม.)	ช่วงปีสถิติข้อมูล (พ.ศ.)	ปริมาณการให้น้ำจำเพาะ (ลิตร/วินาที/ตร.กม.)
1	P.4A	บ้านแม่แดง	น้ำแม่แดง	1,954	2510 - 2556	6.53
2	P.20	บ้านเชียงดาว	แม่น้ำปึง	1,309	2522 - 2556	11.96
3	P.75	บ้านซ้อแล	แม่น้ำปึง	3,029	2542 - 2556	8.18
4	P.67	บ้านแม่แต	แม่น้ำปึง	5,333	2539 - 2556	8.18
5	P.21	บ้านริมใต้	น้ำแม่มิ	516	2503 - 2556	8.75

2.2 ข้อมูล

2.2.1 ข้อมูลฝน

ข้อมูลฝนที่ใช้ในการศึกษา คือ ข้อมูลฝนรายวันแบบกริด (Gauged Gridded Rainfall; GGR) ที่ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้ศูนย์วิจัย Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management (SENSWAT) โดยนำข้อมูลฝนรายวันจากสถานีตรวจวัดทั่วประเทศจำนวน 1,779 สถานี มาตรวจสอบความถูกต้องด้วยกระบวนการโค้งทับทวิ (Double mass curve) [11] จากนั้นนำข้อมูลฝนที่ผ่านการตรวจสอบแล้วมาสร้างเป็นข้อมูลฝนเชิงกริดด้วยวิธีส่วนกลับของระยะทาง (Inverse Distance Weighted; IDW) [12] สำหรับการศึกษานี้ได้พิจารณาข้อมูลฝนแบบกริดในช่วงปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2556 ที่ครอบคลุมพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 และลุ่มน้ำสาขา โดยการเฉลี่ยเชิงพื้นที่เพื่อเป็นข้อมูลด้านเข้าของแบบจำลองเพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่าสำหรับลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณา

2.2.2 ข้อมูลน้ำท่า

ข้อมูลน้ำท่าที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ คือ ข้อมูลน้ำท่าแบบรายวันจำนวน 6 สถานี ในช่วงเวลาระหว่างปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2556 ซึ่งประกอบด้วย สถานีวัดน้ำท่า P.4A, P.20, P.75, P.65, P.20 และ P.1 โดยขนาดพื้นที่รับน้ำฝน ที่ตั้ง ช่วงปีสถิติข้อมูล และปริมาณการให้น้ำจำเพาะของสถานีวัดน้ำท่าที่นำมาใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 1 โดยในตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปริมาณการให้น้ำจำเพาะ (Specific yield) มีค่าอยู่ระหว่าง 6.53 ถึง 11.96 ลิตรต่อวินาทีต่อตารางกิโลเมตร ซึ่งตรวจวัดได้ที่สถานีวัดน้ำท่า P.4A และ P.20 ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.62 ลิตรต่อวินาทีต่อตารางกิโลเมตร สถานีวัดน้ำท่าทั้ง 6 สถานี ที่นำมาใช้ในการศึกษานั้นตั้งอยู่ภายในพื้นที่รับน้ำของสถานี P.1 และเป็นสถานีที่ไม่ได้รับผลกระทบโดยตรงจากโครงการพัฒนาแหล่งน้ำขนาดกลางและขนาดใหญ่ ข้อมูลน้ำท่าจากสถานีเหล่านี้ได้ถูกใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง FLEX_L แบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการประเมินปริมาณน้ำท่าโดยทั้งสองแบบจำลอง สำหรับตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดน้ำท่าดังกล่าวแสดงดังในรูปที่ 1 ทั้งนี้ สถานีวัดน้ำท่า P.56A ถูกตัดออกเนื่องจากเป็นสถานีที่อยู่เหนือเขื่อนแม่งัด โดยในการศึกษานี้ได้นำข้อมูลน้ำที่ปล่อยออกจากเขื่อนแม่งัดมาเป็นข้อมูลด้านเข้าให้กับทั้งสองแบบจำลอง

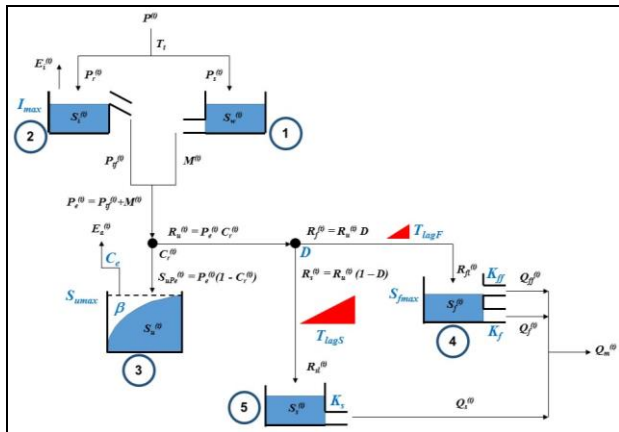
2.2.3 ข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิง

ข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิง (Reference crop evapotranspiration) ที่ใช้มาจากข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิงรายวันแบบกริดที่ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้ศูนย์วิจัย SENSAT โดยสร้างมาจากข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาจากสถานีตรวจอากาศ 103 สถานี ทั่วประเทศ มาคำนวณหาค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิงด้วยวิธี Penman-Monteith [13] โดยมีข้อมูลด้านเข้า คือ ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาต่าง ๆ อาทิเช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ชั่วโมงแสงแดด เป็นต้น จากนั้นนำข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิงที่คำนวณได้มาสร้างเป็นข้อมูลแบบกริดด้วยวิธีส่วนกลับของระยะทาง (Inverse Distance Weighted; IDW) [12] ทั้งนี้ ในการศึกษานี้ได้พิจารณาใช้ข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิงแบบกริดในช่วงปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2556 มาเฉลี่ยเชิงพื้นที่เพื่อเป็นข้อมูลด้านเข้าสำหรับแบบจำลอง

3. ทฤษฎี

3.1 แบบจำลอง FLEX_L

แบบจำลอง FLEX_L เป็นแบบจำลองแบบลัมพ์ (Lumped model) โดยแนวความคิดหลักของแบบจำลองคือการแบ่งปริมาณการเก็บกักของพื้นที่ลุ่มน้ำออกเป็น 5 ชั้นเก็บกัก (Reservoirs) [6] ดังแสดงในรูปที่ 2 และสมการที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง FLEX_L แสดงดังในตารางที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วยสมการสมดุลน้ำและสมการโครงสร้างของแบบจำลองสำหรับรายละเอียดของปริมาณการเก็บกักในแต่ละส่วนแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 โครงสร้างของแบบจำลอง FLEX_L

3.1.1 การเก็บกักในชั้นหิมะ (Snow reservoir)

การเก็บกักในชั้นหิมะเกิดจากหิมะตกลงสู่พื้นที่ลุ่มน้ำในช่วงฤดูหนาว และจะเริ่มละลายในช่วงฤดูใบไม้ผลิ ซึ่งปริมาณน้ำที่เกิดจากการละลายของหิมะจะถูกสมมติว่าซึมลงสู่ดินโดยไม่ผ่านกระบวนการ Interception เนื่องจากในการศึกษานี้แบบจำลอง FLEX_L มาประยุกต์ใช้ในพื้นที่ลุ่มน้ำของประเทศไทยซึ่งไม่มีหิมะจึงไม่พิจารณาการเก็บกักในชั้นหิมะ ทั้งนี้ สมการสมดุลน้ำของการเก็บกักในชั้นหิมะแสดงดังสมการที่ (1) และ

ปริมาณน้ำที่เกิดจากการละลายของหิมะคำนวณได้จากสมการที่ (2) โดยที่ S_w^(t) คือ ปริมาตรเก็บกักในชั้นหิมะ (มิลลิเมตร), P_s^(t) คือ ปริมาณหิมะที่ตกลงสู่พื้นดิน (มิลลิเมตร), M^(t) คือ ปริมาณน้ำที่เกิดจากการละลายของหิมะ (มิลลิเมตร), F_{DD} คือ อัตราการละลายของหิมะ (มิลลิเมตรต่อวันต่อองศา), T^(t) คือ อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส) และ T_i คือ อุณหภูมิเริ่มต้นที่เกิดการละลาย (องศาเซลเซียส)

3.1.2 การเก็บกักโดยกระบวนการ Interception (Interception reservoir)

ปริมาณฝนที่ตกลงมาจะถูกเก็บกักไว้รวมกับกระบวนการ Interception ในช่วงเวลาก่อนหน้า จากนั้นปริมาตรเก็บกักในกระบวนการ Interception จะระเหยกลับคืนสู่ชั้นบรรยากาศ โดยสมดุลน้ำในส่วนของ การเก็บกักโดยกระบวนการ Interception แสดงดังสมการที่ (3) และ ปริมาณการคายระเหยในกระบวนการ Interception คำนวณได้จากสมการที่ (4) ทั้งนี้ ปริมาณฝนส่วนเกินที่เหลือจากการการคายระเหยคำนวณได้จากสมการที่ (5) โดยที่ S_i^(t) คือ ปริมาตรเก็บกักโดยกระบวนการ Interception (มิลลิเมตร), P_r^(t) คือ ปริมาณฝนที่ตกลงมา (มิลลิเมตร), E_i^(t) คือ ปริมาณการคายระเหยจากการเก็บกักโดยกระบวนการ Interception (มิลลิเมตร), P_{if}^(t) คือ ปริมาณฝนส่วนเกิน (Effective rainfall) จากการสูญเสียโดยกระบวนการ Interception (มิลลิเมตร), E_p^(t) คือ ศักยภาพการคายระเหย (Potential evaporation) ที่คำนวณด้วยวิธี Penman-Monteith และ I_{max} คือ ปริมาตรเก็บกักสูงสุดโดยกระบวนการ Interception (มิลลิเมตร)

3.1.3 การเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil reservoir)

การเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะคำนวณจากปริมาณฝนส่วนเกิน (P_e^(t)) สำหรับประเทศไทยซึ่งไม่มีหิมะ ดังนั้น ปริมาณฝนส่วนเกินจึงเท่ากับปริมาณฝนส่วนเกินจากการสูญเสียโดยกระบวนการ Interception (P_{if}^(t)) จากนั้น P_e^(t) จะซึมลงสู่ชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนหนึ่งจะถูกเก็บกักไว้ในดินในรูปของความชื้นของดิน (Soil moisture) ซึ่งเป็นจุดเด่นของแบบจำลอง FLEX_L โดยใช้ความสัมพันธ์จากแบบจำลอง Xinanjiang [14] และส่วนที่เหลือจะไหลออกจากชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่า (Runoff coefficient; C_r^(t)) จะเป็นตัวแบ่งน้ำทั้งสองส่วนดังกล่าว โดยสมดุลน้ำของการเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำแสดงดังสมการที่ (6) ค่า C_r^(t) ที่ใช้ในแบบจำลองคำนวณได้โดยสมการที่ (7) ปริมาณน้ำที่ไหลออกจากชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (R_u^(t)) คำนวณได้โดยสมการที่ (8) ทั้งนี้ การเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะเกิดการคายระเหยที่ต้องการจากชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (E_a^(t)) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (9) โดยที่ S_u^(t-1) คือ ปริมาตรเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำก่อนวันที่พิจารณา 1 วัน (มิลลิเมตร), S_u^(t) คือ ปริมาตรเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ณ วันที่พิจารณา (มิลลิเมตร), S_{umax} คือ ปริมาตรเก็บกักสูงสุดในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (มิลลิเมตร), β คือ สัมประสิทธิ์การกระจายเชิงพื้นที่ของ ปริมาตรเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำบนพื้นที่ลุ่มน้ำ และ C_e คือ สัมประสิทธิ์การระเหย

3.1.4 การเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Fast respond reservoir)

ปริมาณน้ำที่ไหลออกจากชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ($R_u^{(t)}$) จะถูกแบ่งโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Splitter coefficient; D) และไหลมายังชั้นการเก็บกักของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว สมดุลน้ำของการเก็บกักในชั้นดังกล่าวแสดงดังในสมการที่ (10) โดยปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ($R_f^{(t)}$) คำนวณได้จากสมการที่ (11) โดย $R_f^{(t)}$ จะถูกหน่วงเวลาเพื่อให้การไหลเกิดล่าช้ากว่าการเกิดปริมาณฝน โดยเป็นไปตามฟังก์ชันหน่วงเวลา (Lag function) ดังแสดงในสมการที่ (12) ทั้งนี้ ปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วที่ถูกหน่วงเวลา ($R_{fl}^{(t)}$) คำนวณได้จากสมการที่ (13) โดยที่ $C_{lagF}(i)$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของ $R_f^{(t)}$ ในวันที่ $t - i + 1$ ในเมื่อ i มีค่าตั้งแต่ 1 จนถึง T_{lagF} เมื่อ T_{lagF} คือ การหน่วงเวลาของการเกิดฝนจนถึงเวลาที่เกิดปริมาณการไหลสูงสุด (ชั่วโมง)

$R_{fl}^{(t)}$ ข้างต้นจะถูกนำมารวมกับปริมาตรการเก็บกักของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาก่อนหน้า ($S_f^{(t-1)}$) กลายเป็นปริมาตร

การเก็บกักของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาถัดไป ($S_f^{(t)}$) จากนั้นปริมาณการเก็บกักในส่วนนี้จะถูกนำมาตรวจสอบว่ามีค่ามากกว่าปริมาตรเก็บกักสูงสุดของชั้นน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (S_{fmax}) หรือไม่ โดยถ้ามีค่ามากกว่าแล้วจะเกิดการไหลเหนือผิวดิน ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (14) ทั้งนี้ อัตราการไหลเหนือผิวดินที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะของการตอบสนองแบบเส้นตรง (Linear respond reservoir) ที่ขึ้นกับค่าคงที่ K_{ff} โดยที่ $Q_{ff}^{(t)}$ คือ อัตราการไหลเหนือผิวดินที่เกิดจากการเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (มิลลิเมตร), K_{ff} คือ สัดส่วนของการไหลออกสู่ทางน้ำของน้ำเหนือผิวดิน

ปริมาณน้ำท่าที่เหลืออยู่ในชั้นเก็บกักที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว จะมีการไหลใต้ผิวดินโดยคำนวณได้จากสมการที่ (15) โดยที่ $Q_f^{(t)}$ คือ อัตราการไหลใต้ผิวดินที่เกิดจากการเก็บกักในชั้นที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (มิลลิเมตร), และ K_f คือ สัดส่วนของการไหลออกสู่ทางน้ำของน้ำใต้ผิวดิน

ตารางที่ 2 สมการสมดุลน้ำและสมการโครงสร้างของแบบจำลอง FLEX_L

ชั้นที่	ปริมาตรเก็บกัก	สมการสมดุลน้ำ	สมการโครงสร้าง
1	ชั้นหิมะ	$\frac{dS_w}{dt} = P_s^{(t)} - M^{(t)}$ (1)	$M^{(t)} = \begin{cases} F_{DD}(T^{(t)} - T_i); T^{(t)} > T_i \\ 0 & ; T^{(t)} \leq T_i \end{cases}$ (2)
2	กระบวนการ Interception	$\frac{dS_i}{dt} = P_r^{(t)} - E_i^{(t)} - P_{yf}^{(t)}$ (3)	$E_i^{(t)} = \begin{cases} E_p^{(t)}; S_i^{(t)} > 0 \\ 0 & ; S_i^{(t)} = 0 \end{cases}$ (4)
			$P_{yf}^{(t)} = \begin{cases} 0 & ; S_i^{(t)} < I_{max} \\ P_r^{(t)}; S_i^{(t)} = I_{max} \end{cases}$ (5)
3	ชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	$\frac{dS_u}{dt} = P_e^{(t)}(1 - C_r^{(t)}) - E_a^{(t)}$ (6)	$C_r^{(t)} = 1 - \left(1 - \frac{S_u^{(t-1)}}{S_{u,max}}\right)^\beta$ (7)
			$R_u^{(t)} = P_e^{(t)} C_r^{(t)}$ (8)
			$E_a^{(t)} = (E_p^{(t)} - E_i^{(t)}) \min\left(\frac{S_u^{(t)}}{S_{u,max} C_e}, 1\right)$ (9)
			$R_f^{(t)} = R_u^{(t)} D$ (11)
			$c_{lagF}(i) = \frac{i}{\sum_{u=1}^{T_{lagF}} u}$ (12)
4	น้ำท่าที่มีการตอบสนองเร็ว	$\frac{dS_f}{dt} = R_{fl}^{(t)} - Q_{ff}^{(t)} - Q_f^{(t)}$ (10)	$R_{fl}^{(t)} = \sum_{i=1}^{T_{lagF}} c_{lagF}(i) \cdot R_f^{(t-i)}$ (13)
			$Q_{ff}^{(t)} = \frac{\max(0, S_f^{(t)} - S_{f,max})}{K_{ff}}$ (14)
			$Q_f^{(t)} = \frac{S_f^{(t)}}{K_f}$ (15)
			$R_s^{(t)} = R_u^{(t)}(1 - D)$ (17)
5	น้ำท่าที่มีการตอบสนองช้า	$\frac{dS_s}{dt} = R_s^{(t)} - Q_s^{(t)}$ (16)	$c_{lagS}(i) = \frac{i}{\sum_{u=1}^{T_{lagS}} u}$ (18)

$$R_{sl}^{(t)} = \sum_{i=1}^{T_{lags}} C_{lags}(i) \cdot R_s^{(t-i-1)} \quad (19)$$

$$Q_s^{(t)} = \frac{S_s^{(t)}}{K_s} \quad (20)$$

3.1.5 การเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า

(Slow reacting reservoir)

สมมูลน้ำในเก็บกักของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (16) โดยปริมาณน้ำที่ไหลออกจากชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ($R_u^{(t)}$) ที่ไหลมายังชั้นการเก็บกักที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้าคำนวณได้จากสมการที่ (17) ปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า ($R_s^{(t)}$) จะถูกหน่วงเวลาเพื่อให้การไหลเกิดล่าช้ากว่าการเกิดปริมาณฝน โดยเป็นไปตามฟังก์ชันหน่วงเวลา (Lag function) ดังแสดงในสมการที่ (18) และปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้าที่ถูกหน่วงเวลา ($R_{sl}^{(t)}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (19) โดยที่ $C_{lags}(i)$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของ $R_s^{(t)}$ ในวันที่ $t - i + 1$ ในเมื่อ i มีค่าตั้งแต่ 1 จนถึง T_{lags} เมื่อ T_{lags} คือ การหน่วงเวลาของปริมาณการไหลจากชั้นรากพืชไปยังชั้นน้ำใต้ดิน (ซัวโมง) จากนั้น $R_{sl}^{(t)}$ ที่คำนวณได้จะถูกนำมารวมกับปริมาตรเก็บกักของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้าในช่วงเวลาที่ผ่านมา ($S_s^{(t-1)}$) กลายเป็นปริมาตรเก็บกักของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า ณ ช่วงเวลาที่พิจารณา ($S_s^{(t)}$) จากนั้นปริมาตรเก็บกักในส่วนนี้จะไหลไปรวมกับน้ำใต้ดินและไหลออกสู่ทางน้ำอย่างช้า ๆ โดยคำนวณปริมาณการไหลออกได้จากสมการที่ (20) โดยที่ $Q_s^{(t)}$ คือ อัตราการไหลของน้ำใต้ดินที่เกิดจากการเก็บกักในชั้นเก็บกักที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า (มิลลิเมตร) และ K_s คือ สัดส่วนของการไหลออกสู่ทางน้ำของน้ำใต้ดิน

3.2 การเคลื่อนตัวของน้ำท่าในลำน้ำด้วยวิธีมัสคิงัม (Muskingum method)

วิธีมัสคิงัมเป็นวิธีวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของน้ำในลำน้ำที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดย U.S. Army Corps of Engineers สำหรับโครงการ Muskingum Conservancy District Flood-Control โดยวิธีมัสคิงัมนั้นจะใช้สมการต่อเนื่อง (Continuity equation) ที่แสดงดังสมการที่ (21) ร่วมกับสมการปริมาตรเก็บกักแบบไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear storage equation) ที่แสดงดังสมการที่ (22) [15]

$$\frac{dS_t}{dt} = I_t - O_t \quad (21)$$

$$S_t = K[XI_t + (1-X)O_t]^m \quad (22)$$

โดยที่ S_t คือ ปริมาตรเก็บกักของลำน้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที-ซัวโมง), I_t คือ ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่ลำน้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที), O_t คือ ปริมาณน้ำที่ไหลออกจากลำน้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที), K คือ เวลาในการเดินทางของคลื่นน้ำท่วม (ซัวโมง), X คือ แพลตเตอร์ถ่วงน้ำหนัก และ m คือ เลขยกกำลังสำหรับการพิจารณาการเคลื่อนตัวของน้ำท่าในลำน้ำแบบไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear) ซึ่งในกรณีนี้ m เท่ากับ 1 จะเป็นการพิจารณาการเคลื่อนตัวของน้ำท่าในลำน้ำแบบเส้นตรง (Linear)

3.3 การสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM

โปรแกรม MOSCEM (Multiobjective Shuffled Complex Evolution Matropolis) ถูกพัฒนาขึ้นโดย Vrugt et al. [16] เพื่อใช้ในการหาค่าชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective optimization) โดยเป็นกระบวนการค้นหาชุดค่าตอบจากค่าตอบที่เป็นไปได้ โดยจะได้ค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์พร้อม ๆ กัน โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหา เรียกว่า ชุดค่าตอบที่ดีที่สุด ซึ่งชุดค่าตอบจะอยู่บนเส้นโค้งที่ใช้ในการกำหนดขอบเขตของค่าตอบ (Pareto front) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการศึกษานี้คือ ค่าทางสถิติระหว่างผลการประเมินปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลองน้ำฝนน้ำท่าและข้อมูลจากสถานีตรวจวัด โดยค่าทางสถิติที่นำมาใช้คือ ค่าสัมประสิทธิ์ Kling-Gupta (Kling-Gupta efficiency) [17] จำนวน 3 ค่า ดังนี้ (1) ประสิทธิภาพการไหล (Efficiencies of flows, KGE_E) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 23 (2) ลอการิทึมของการไหล (Logarithm of flows, KGE_L) และ (3) โค้งช่วงเวลาการไหล (Flow duration curves, KGE_F)

$$KGE_E = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{STD_{Mod}}{STD_{Obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{Avg_{Mod}}{Avg_{Obs}} - 1\right)^2} \quad (23)$$

โดยที่ r คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, STD_{Mod} คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลประเมินปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง, STD_{Obs} คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลน้ำท่าจากสถานีวัดน้ำท่า, Avg_{Mod} คือ ค่าเฉลี่ยของผลประเมินปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที) และ Avg_{Obs} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลน้ำท่าจากสถานีวัดน้ำท่า (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที) ในกรณีของค่า KGE_L คำนวณได้จากสมการที่ (23) โดยใช้ค่าลอการิทึมของการไหลในการคำนวณ เช่นเดียวกับค่า KGE_F ที่คำนวณได้จากสมการข้างต้นโดยใช้ค่าปริมาณการไหลที่ถูกเรียงลำดับจากค่ามากไปยังค่าน้อยก่อนนำไปแทนค่าในสมการที่ (23)

4. วิธีการศึกษา

4.1 การพัฒนาแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD}

แบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} ได้รับการพัฒนาตามหลักการของแบบจำลอง FLEX_L เพื่อการประเมินกราฟน้ำท่าที่จุดออกของลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณา โดยพื้นฐานของแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} คือการใช้แบบจำลองแบบลัมพ์สำหรับแต่ละลุ่มน้ำย่อย และใช้แบบจำลองแบบกระจายตัวระหว่างลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำท่าใด ๆ ที่ทำการสอบเทียบแบบจำลอง ดังนั้น พื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่าดังกล่าวจึงต้องถูกแบ่งเป็นลุ่มน้ำย่อย ทั้งนี้ ปริมาณน้ำท่าในแต่ละลุ่มน้ำย่อยสามารถประเมินได้ด้วยแบบจำลอง FLEX_L โดยการคำนวณปริมาณฝนส่วนเกินที่แตกต่างกันในแต่ละลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบแบบจำลอง ปริมาณฝนส่วนเกินข้างต้นของแต่ละลุ่มน้ำย่อยจะเคลื่อนตัวไปยังจุดออก

ของลุ่มน้ำโดยใช้การห้วงเวลาของการเกิดฝนจนถึงเวลาที่เกิดปริมาณการไหลสูงสุด (T_{lagF}) และการห้วงเวลาของปริมาณการไหลจากชั้นรากพืชไปยังชั้นน้ำใต้ดิน (T_{lagS}) ทั้งนี้ ในการศึกษานี้แนะนำให้ T_{lagF} และ T_{lagS} เป็นแบบรายชั่วโมงแทนที่จะเป็นแบบรายวัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลอง เมื่อประเมินปริมาณน้ำท่าจากลุ่มน้ำย่อยด้านเหนือน้ำแล้วจึงเคลื่อนตัวน้ำท่าผ่านลำน้ำจากจุดออกของแต่ละลุ่มน้ำย่อยดังกล่าวไปยังจุดออกของลุ่มน้ำย่อยด้านท้ายน้ำโดยใช้แบบจำลอง Muskingum เพื่อนำไปรวมกับปริมาณน้ำท่าที่ประเมินได้ของลุ่มน้ำย่อยด้านท้ายน้ำต่อไป การเคลื่อนตัวของกราฟน้ำท่าจากแบบจำลอง Muskingum ที่ใช้ในแต่ละลุ่มน้ำย่อยคำนวณได้จากสมการที่ (24)

$$S_{chnl-sub} = K_{sub} (XQ_{up} + (1-X)Q_{down}) \quad (24)$$

$$K_{sub} = KL_{sub} \quad (25)$$

โดยที่ S_{chnl} คือ ปริมาตรเก็บกักในลำน้ำ (ลูกบาศก์เมตร ชั่วโมงต่อวินาที), K คือ พารามิเตอร์ห้วงเวลาของลำน้ำ, X คือ พารามิเตอร์ของการเคลื่อนตัวในลำน้ำ และ K_{sub} สามารถคำนวณได้จากผลคูณของค่า K และความยาวลำน้ำในแต่ละลุ่มน้ำย่อยที่มีการเคลื่อนตัวในลำน้ำ (L_{sub}) ดังสมการที่ (25)

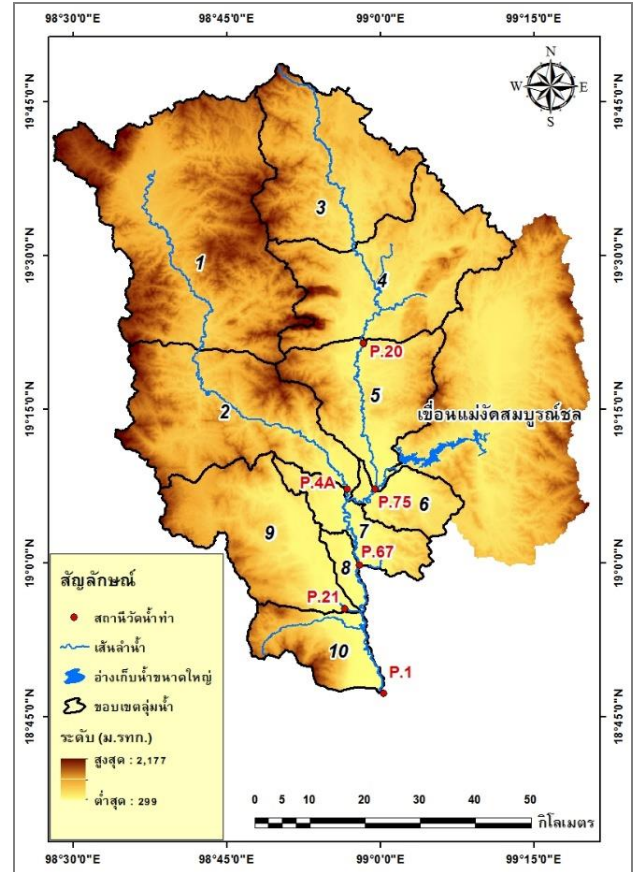
4.2 การรวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่รับน้ำฝนที่ศึกษา

ในการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} และ FLEX_L นั้นต้องทำการรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลความลึกฝน ข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิง และข้อมูลน้ำท่าของสถานีวัดน้ำท่า P.1 รวมทั้งสถานีวัดน้ำท่าที่ตั้งอยู่ภายในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ซึ่งประกอบด้วย สถานีวัดน้ำท่า P.4A, P.20, P.75, P.67 และ P.21 จากนั้นทำการแบ่งพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่าดังกล่าวข้างต้น โดยในกรณีของแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} นั้นได้สอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 จึงต้องแบ่งพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ออกเป็นลุ่มน้ำย่อย ซึ่งในการศึกษานี้แบ่งออกเป็น 10 ลุ่มน้ำย่อย ดังแสดงในรูปที่ 3 เมื่อแบ่งพื้นที่รับน้ำฝนแล้วในลำดับต่อมาคือ การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่รับน้ำฝนเหล่านั้น ซึ่งประกอบด้วย ขนาดของพื้นที่รับน้ำฝน และความยาวลำน้ำที่เชื่อมระหว่างจุดออกของลุ่มน้ำย่อยด้านเหนือน้ำไปยังจุดออกของลุ่มน้ำย่อยด้านท้ายน้ำ ซึ่งความยาวลำน้ำดังกล่าวจะใช้ในกรณีของแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} เท่านั้น รายละเอียดของการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแต่ละลุ่มน้ำย่อยแสดงดังในตารางที่ 3 โดยในกรณีที่ลุ่มน้ำย่อยใดเป็นลุ่มน้ำด้านเหนือน้ำและไม่ได้รับน้ำท่าจากลุ่มน้ำย่อยใด ๆ จะไม่มีกระบวนการเคลื่อนตัวของน้ำในลำน้ำเกิดขึ้น ทำให้ไม่มีการแสดงความยาวของลำน้ำในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รายละเอียดลักษณะทางกายภาพของแต่ละลุ่มน้ำย่อย

ลุ่มน้ำย่อยที่	จุดออกของลุ่มน้ำ	พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตร.กม.)	ความยาวลำน้ำระหว่างลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณา (กม.)
1	-	1,256	-
2	P.4A	698	55.60 (1 ถึง 2)
3	-	622	-

4	P.20	687	32.20 (3 ถึง 4)
5	P.75	440	37.01 (4 ถึง 5)
6	-	155	9.78 (5 ถึง 6)
7	P.67	195	18.45 (6 ถึง 7)
8	-	57	11.56 (7 ถึง 8)
9	P.21	516	-
10	P.1	237	18.85 (9 ถึง 10)



รูปที่ 3 ลุ่มน้ำย่อยและสถานีวัดน้ำท่าที่อยู่ภายในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1

4.3 การสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD}

ดำเนินการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 เพื่อหาชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองโดยการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติที่ดำเนินการด้วยโปรแกรม MOSCEM ซึ่งเป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective function) โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้เพื่อการเลือกชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองที่เหมาะสม คือ ค่า KGE ที่คำนวณจากปริมาณน้ำท่าใน 3 ลักษณะ นำมาเป็นตัวแปรทางสถิติ 3 ตัวแปร ดังนี้ (1) KGE_E เพื่อการให้ความสำคัญกับปริมาณน้ำท่าที่มีค่าสูง (2) KGE_L เพื่อการให้ความสำคัญกับปริมาณน้ำท่าที่มีค่าน้อย และ (3) KGE_F เพื่อการให้ความสำคัญกับปริมาณน้ำท่าในภาพรวม ทั้งนี้ พารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} มีทั้งหมด 13 พารามิเตอร์ โดยแบ่งออกเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลอง FLEX_L จำนวน 11 พารามิเตอร์ และพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Muskingum จำนวน 2 พารามิเตอร์ ซึ่งผลการ

ประเมินน้ำท่าที่ได้ คือ กราฟน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และน้ำท่าของกลุ่มน้ำย่อยที่อยู่ภายในสถานีวัดน้ำท่า P.1

4.4 การสอบเทียบแบบจำลอง FLEX_L

ดำเนินการสอบเทียบแบบจำลอง FLEX_L ที่สถานีวัดน้ำท่า P.4A, P.20, P.75, P.67, P.21 และ P.1 โดยตรง เพื่อหาชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองด้วยโปรแกรม MOSCEM โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้เพื่อการเลือกชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองที่เหมาะสมประกอบด้วยตัวแปรทางสถิติ 3 ตัวแปร คือ KGE_E, KGE_L และ KGE_F ทั้งนี้ พารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง FLEX_L มีทั้งหมด 11 พารามิเตอร์ สำหรับแต่ละสถานีวัดน้ำท่าที่พิจารณา

4.5 การเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการประเมินปริมาณน้ำท่าโดยแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} และ FLEX_L

ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่าด้วยแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} และ FLEX_L โดยการนำกราฟน้ำท่าที่ได้จากทั้ง 2 แบบจำลอง มาเปรียบเทียบกับข้อมูลน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดโดยการหาค่า Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) [18] ที่คำนวณได้จากสมการที่ 26 เพื่อให้เห็นภาพรวมของผลการประเมินน้ำท่าด้วยทั้ง 2 แบบจำลอง โดยการนำผลการประเมินน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง ซึ่งประกอบด้วยผลการประเมินปริมาณน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.4A, P.20, P.75, P.67 และ P.21 มาเปรียบเทียบกับข้อมูลน้ำท่าที่สถานีตรวจวัดนั้น ในกรณีของแบบจำลอง FLEX_L ที่ทำการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่าแต่ละสถานีโดยตรง สามารถนำผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับข้อมูลน้ำท่าจากสถานีตรวจวัดได้โดยตรง

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (Obs_i - Mod_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Obs_i - Avg_{Obs})^2} \right) \quad (26)$$

โดยที่ Obs_i คือ ข้อมูลน้ำท่าจากสถานีวัดน้ำท่า (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที), Mod_i คือ ผลการประเมินปริมาณน้ำท่าด้วยแบบจำลอง (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที), Avg_{Obs} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลน้ำท่าจากสถานีวัดน้ำท่า (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

5. ผลการศึกษา

5.1 ผลการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD}

ผลการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 โดยใช้ค่าทางสถิติทั้ง 3 ตัวแปร เป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการประเมินน้ำท่าของแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} แสดงดังในตารางที่ 4 สำหรับชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองทั้ง 13 พารามิเตอร์ แสดงดังในตารางที่ 5 เมื่อนำปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการประเมินด้วยแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} มาตรวจสอบแล้วนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำท่าสะสมจากสถานีวัดน้ำท่า P.1 ดังแสดงในรูปที่ 4b พบว่าปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลอง SENSWAT-

FLEX_{SD} และปริมาณน้ำท่าสะสมของข้อมูลน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 มีค่าใกล้เคียงกันมาก

ตารางที่ 4 ผลการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD}

สถานีวัดน้ำท่า	ค่าทางสถิติ		
	KGE _E	KGE _L	KGE _F
P.1	0.94	0.81	0.98

ตารางที่ 5 ชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD}

สถานีวัดน้ำท่า	พารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง						
	I _{max}	S _{umax}	C _e	β	D	K _f	K _s
P.1	3.82	646.18	0.78	0.34	0.80	7.91	14.89

ตารางที่ 5 (ต่อ) ชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD}

สถานีวัดน้ำท่า	พารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง					
	T _{lagF}	T _{lagS}	S _{fmax}	K _{ff}	K	X
P.1	1.70	26.96	10.70	4.04	0.40	0.55

5.2 ผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEX_L

ผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEX_L โดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่า P.4A, P.20, P.75, P.67, P.21 และ P.1 ได้ดำเนินการโดยใช้ค่าทางสถิติทั้ง 3 ตัวแปร ประกอบด้วยค่า KGE_E, KGE_L และ KGE_F เช่นเดียวกับในกรณีของแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} ทั้งนี้ ค่าทางสถิติทั้ง 3 ตัวแปร ที่เป็นผลจากการสอบเทียบแบบจำลอง FLEX_L แสดงดังในตารางที่ 6 และชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองทั้ง 11 พารามิเตอร์ แสดงดังในตารางที่ 7 เมื่อนำปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการประเมินด้วยแบบจำลอง FLEX_L มาตรวจสอบแล้วนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำท่าสะสมที่ได้จากสถานีวัดน้ำท่าแต่ละสถานีดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำท่าสะสมที่ประเมินจากแบบจำลอง FLEX_L และปริมาณน้ำท่าสะสมจากสถานีวัดน้ำท่ามีค่าใกล้เคียงกันมากในแต่ละสถานีวัดน้ำท่า

ตารางที่ 6 ผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEX_L สำหรับแต่ละสถานีวัดน้ำท่า

สถานีวัดน้ำท่า	ค่าทางสถิติ		
	KGE _E	KGE _L	KGE _F
P.4A	0.88	0.70	0.97
P.20	0.83	0.71	0.98
P.75	0.86	0.71	0.96
P.67	0.90	0.80	0.99
P.21	0.86	0.85	0.99
P.1	0.92	0.73	0.98

ตารางที่ 7 ชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง FLEX_L สำหรับแต่ละสถานีวัดน้ำท่า

สถานีวัด น้ำท่า	พารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง					
	I_{max}	S_{umax}	C_e	β	D	K_f
P.4A	4.20	572.70	0.77	0.33	0.73	10.08
P.20	4.18	325.38	0.94	0.60	0.57	4.63
P.75	3.07	694.13	0.92	0.29	0.57	14.36
P.67	3.45	612.90	0.98	0.32	0.79	14.11
P.21	4.29	761.18	0.81	0.48	0.61	6.83
P.1	3.71	678.61	0.99	0.35	0.69	14.09

ตารางที่ 7 (ต่อ) ชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง FLEX_L สำหรับแต่ละสถานีวัดน้ำท่า

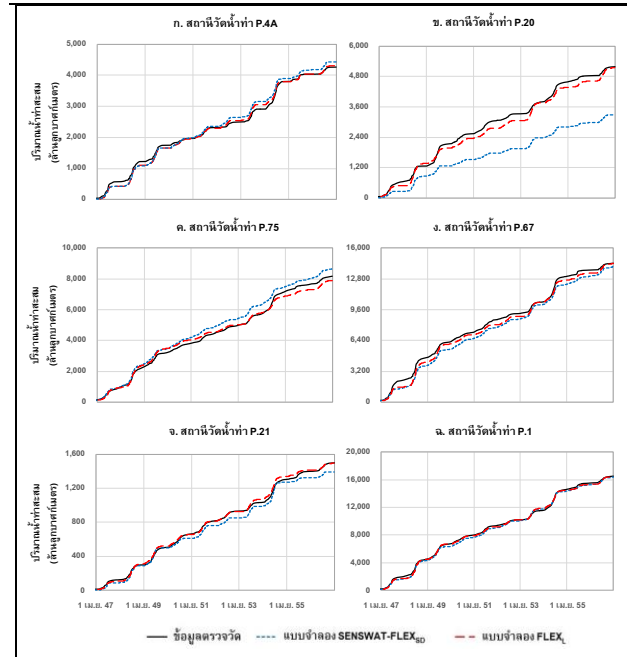
สถานีวัด น้ำท่า	พารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง					
	K_s	T_{lagF}	T_{lagS}	S_{fmax}	K_{ff}	
P.4A	11.56	3.14	44.55	5.97	6.94	
P.20	38.97	1.97	38.01	14.70	3.45	
P.75	109.23	4.03	53.60	9.86	7.45	
P.67	87.51	2.69	71.48	6.76	10.98	
P.21	50.76	3.24	22.35	6.23	3.38	
P.1	54.41	2.12	57.27	10.36	11.53	

5.3 ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการประเมินปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} และ FLEX_L

ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้ (1) ผลการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 รวมทั้งผลการประเมินปริมาณน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.4A, P.20, P.75, P.67 และ P.21 ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง และ (2) ผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEX_L ที่สถานีวัดน้ำท่า P.4A, P.20, P.75, P.67, P.21 และ P.1 โดยตรงพบว่า ค่า NSE สำหรับแต่ละสถานีแสดงดังตารางที่ 8 โดยมีค่า NSE เฉลี่ยเท่ากับ 0.75 และ 0.76 สำหรับกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ตามลำดับ ทั้งนี้ จากตารางที่ 8 เมื่อเปรียบเทียบค่า NSE ของกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ณ สถานีวัดน้ำท่าเดียวกัน โดยใช้ค่า NSE จากกรณีที่ 2 เป็นตัวเทียบ พบว่า ค่า NSE ของกรณีที่ 1 มีค่าเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ 2 จำนวน 4 สถานี ดังนี้ สถานีวัดน้ำท่า P.4A, P.75, P.67 และ P.1 แต่ในทางกลับกันค่า NSE ของกรณีที่ 1 มีค่าลดลงจากกรณีที่ 2 จำนวน 2 สถานี ดังนี้ สถานี P.20 และ P.21 นอกจากนั้นแล้ว กราฟปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการประเมินน้ำท่าจากกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4 โดยจากรูปแสดงให้เห็นว่ากราฟน้ำท่าสะสมจากทั้ง 2 แบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่สถานีวัดน้ำท่า P.21 นั้นกราฟน้ำท่าสะสมจากกรณีที่ 1 มีค่าค่อนข้างแตกต่างจากกราฟน้ำท่าสะสมจากกรณีที่ 2 ซึ่งสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า NSE แต่สำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.21 ที่มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า NSE มากแต่กราฟน้ำท่าสะสมกลับมีค่าใกล้เคียงกันนั้นเป็นเพราะว่าค่า NSE ไม่ใช่ค่าที่ใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง หากแต่เป็นค่าที่นำมาใช้เพื่อให้เห็นภาพรวมของผลการประเมินน้ำท่าด้วยทั้ง 2 แบบจำลอง

ตารางที่ 8 ค่า NSE ของผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} และ FLEX_L

กรณีที่	ค่า NSE ของสถานีวัดน้ำท่า						ค่าเฉลี่ย
	P.4A	P.20	P.75	P.67	P.21	P.1	
1	0.77	0.63	0.79	0.83	0.57	0.89	0.75
2	0.77	0.67	0.74	0.80	0.73	0.85	0.76
ความแตกต่าง (%)	0.67	-5.73	6.33	3.06	-21.29	4.12	-1.79



รูปที่ 4 ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการประเมินน้ำท่าทั้ง 2 กรณีเทียบกับปริมาณน้ำท่าสะสมของข้อมูลน้ำท่าสำหรับแต่ละสถานีวัดน้ำท่า

6. สรุปผลการศึกษา

แบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} ซึ่งเป็นแบบจำลองประเภทกึ่งกระจายตัว (Semi-Distributed Model) ได้รับการพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ภายใต้ศูนย์วิจัย SENSWAT โดยแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพในการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าที่พิจารณาได้เป็นอย่างดี โดยสามารถประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ได้ใกล้เคียงกับปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดมากกว่ากราฟน้ำท่าที่ประเมินโดยแบบจำลอง FLEX_L นอกจากนั้นแล้ว สิ่งที่สำคัญมากที่สุดคือ แบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} สามารถให้ผลพลอยได้ของการประเมินกราฟน้ำท่าสำหรับลุ่มน้ำย่อยต่าง ๆ ภายในสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบแบบจำลองหรือ ณ บริเวณที่ไม่มีสถานีวัดน้ำท่าตั้งอยู่ โดยได้พิสูจน์ว่าจากผลของการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 จะให้ผลพลอยได้ของการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.4A, P.20, P.75, P.67 และ P.21 ในขณะที่การสอบเทียบแบบจำลอง FLEX_L จำเป็นต้องทำการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่าดังกล่าวโดยตรงเนื่องจากเป็นแบบจำลองประเภทลัมพ์ ซึ่งแน่นอนว่าผลการประเมินน้ำท่าโดยตรงที่

สถานีเหล่านี้ควรให้ผลการประเมินน้ำท่าที่ถูกต้องมากกว่าการประเมินน้ำท่าที่เป็นผลพลอยได้จากการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ที่ดำเนินการโดยแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} อย่างไรก็ตาม จากผลการศึกษาพบว่า ผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.4A, P.75 และ P.67 ที่เป็นผลพลอยได้จากแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} กลับให้ผลการประเมินน้ำท่าที่ถูกต้องกว่าการสอบเทียบโดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้โดยแบบจำลอง FLEX_L ในขณะที่การให้ผลที่ต่ำกว่าเกิดขึ้นใน 2 สถานี คือที่สถานีวัดน้ำท่า P.20 และ P.21 ซึ่งนับว่าเป็นสิ่งที่คาดว่าจะเกิดขึ้น จากศักยภาพของแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} ที่ทำการพัฒนาขึ้นในการศึกษานี้ จึงเป็นบทพิสูจน์ถึงความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาศักยภาพของแบบจำลอง SENSWAT-FLEX_{SD} ให้เพิ่มขึ้นเพื่อการเพิ่มความถูกต้องให้กับผลการประเมินน้ำท่าในทุกสถานีวัดน้ำท่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการประเมินน้ำท่าโดยแบบจำลอง FLEX_L ซึ่งแนวทางดังกล่าวจะได้ดำเนินการต่อเนื่องภายใต้ศูนย์วิจัย SENSWAT เพื่อให้ได้แบบจำลองประเภทกึ่งกระจายตัวที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการประเมินน้ำท่าให้กับตำแหน่งที่ต้องการแต่ไม่มีสถานีวัดน้ำท่าตั้งอยู่ได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับนิสิตปริญญาโท และทุนวิจัยเพื่อการดำเนินงานของศูนย์วิจัยการรับรู้จากระยะไกลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management; SENSWAT) รวมทั้งกรมชลประทาน และกรมอุตุฯ มหาวิทยาลัย 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] Sugawara, M. (1974). Tank model and its application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin River, Kitsu River, Sanaga River and Nam Mune. *Research Notes of the National Research Center for Disaster Prevention*, 11, pp.1-64.
- [3] Gan, T.Y., 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.
- [4] Malone, T. (1999). Using URBS for real time flood modelling. *In 25th Hydrology & Water Resources Symposium, 2nd International Conference on Water Resources & Environment Research*, pp. 603, Institution of Engineers, Australia.
- [5] Fenicia, F., Savenije, H.H.G., Matgen, P. and Pfister, L. (2008). Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement. *Water Resources Research*, 44.
- [6] 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. *Hydrology & Earth System Sciences*, 10, pp.1895-1915.
- [7] นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์ (2560). การเปรียบเทียบประสิทธิผลของแบบจำลอง FLEXL, FLEX-Topo และ Modified NAM โดยการใช้การสอบเทียบอัตโนมัติ. สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพมหานคร.
- [8] Kavetski, D. and Fenicia, F. (2011) Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 2. Application and experimental insights. *Water Resources Research*, 47, pp.1-19.
- [9] Tekleab, S., Uhlenbrook, S., Savenije, H.H.G., Mohamed, Y. and Weninger, J. (2015). Modelling rainfall-runoff processes of the Chemoga and Jedeb meso-scale catchments in the Abay/Upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Hydrological Sciences Journal*, 60, 11 (2015), 2029-2046.
- [10] Sriwongsitanon, N., Gao, H., Savenije, H. H. G., Maekan, E., Saengsawang, S. and Thianpopirug, S. Comparing the Normalized Difference Infrared Index (NDII) with root zone storage in a lumped conceptual model. *Hydrology & Earth System Sciences*, 20, pp.3361-3377.
- [11] Searcy, J.K. and Hardison, C.H. (1960). Double-mass curves. *U.S. Geol. Surv. Water Supply Pap*, 3, pp.49-56.
- [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*, 3, pp.101-108.
- [13] Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (2006). FAO Irrigation and Drainage Paper No.56 Crop evapotranspiration, 2006.
- [14] Zhao, R.J., Wang, P.L. and Hu, F.B. (1992). Relations between parameter values and corresponding natural conditions of Xinanjiang model. *Hohai Univ.*
- [15] Chu, H.-J. and Chang, L.-C. (2009). Applying Partial Swarm Optimization to Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14, pp.1024-1027.
- [16] Vrugt, J.A., Gupta, H.V., Batidas, L.A., Bouten, W. and Sorooshian, S. (2003). Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models. *Water Resources Research*, 39.
- [17] Kling, H., Fuchs, M. and Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424-425, pp.264-277.
- [18] Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, pp.282-290.