การประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองอุทกวิทยา SWAT สำหรับการจำลองปริมาณน้ำท่า โดยใช้เทคนิคการการปรับเทียบและสอบทานแบบหลายสถานีในพื้นที่ลุ่มน้ำมูล

Evaluation of SWAT Hydrological Model Performance for Runoff Simulation Using Multi-Site Calibration and Validation Techniques in Mun River Basin

หริส ประสารฉ่ำ[1,*] วินัย เชาวน์วิวัฒน์[2] สมพินิจ เหมืองทอง[3] กนกศรี ศรินนภากร[2] และ สุรเจตส์ บุญญาอรุณเนตร[2]

[1] สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น จ.ขอนแก่น
[2] สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) กรุงเทพมหานคร
[3] สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา จ.นครราชสีมา
**Corresponding author; E-mail address: haris.pr@rmuti.ac.th*

บทคัดย่อ

การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยาถือได้ว่ามีความสำคัญในการประเมินสภาพทางอุทกวิทยาในระดับลุ่มน้ำ การกำหนดค่าแบบจำลองเพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำมากที่สุดจึงเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญในการชี้วัดประสิทธิภาพของแบบจำลองอุทกวิทยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งลุ่มน้ำขนาดใหญ่ที่มีสถานีตรวจวัดหลายสถานี การศึกษานี้มีเป้าหมายคือการนำเสนอเทคนิคการปรับเทียบและสอบทานผลการจำลองสภาพน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำมูลในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยด้วยแบบจำลองทางอุทกวิทยา SWAT และ SWAT-CUP โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดจำนวน 29 สถานี ระหว่าง พ.ศ.2534-2563 ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การใช้เทคนิคการแบ่งพื้นที่ออกเป็น 3 ส่วนหลัก (ต้นน้ำ กลางน้ำ และปลายน้ำ) และการกำหนดจุดออกของลุ่มน้ำย่อย ณ ตำแหน่งสถานีตรวจวัดสามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ หลังจากปรับแต่งค่าของตัวแปรความอ่อนไหวจำนวน 8 ตัวแปรใน SWAT-CUP ครอบคลุมทุกพื้นที่เพื่อกำหนดค่าที่เหมาะสมของแบบจำลองโดยชี้ให้เห็นได้จากค่าดัชนี R^2 ของตำแหน่งที่เปรียบเทียบโดยส่วนใหญ่ในพื้นที่ลุ่มน้ำมูลทั้ง 29 จุด อยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ อย่างไรก็ตาม การปรับแต่งให้ผลคำนวณได้รับค่าดัชนี NS และ PBIAS ให้อยู่ในระดับที่ผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ยังมีความจำเป็นที่ต้องค้นหาวิธีดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ด้วย SWAT-CUP เทคนิคและรูปแบบของการปรับเทียบและสอบทานแบบจำลองทางอุทกวิทยา SWAT ที่ได้นำเสนอในการศึกษานี้คาดว่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการจำลองสภาพอุทกวิทยาสำหรับลุ่มน้ำที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่และมีสถานีตรวจวัดที่เพียงพอ ทั้งนี้เพื่อเป็นการยืนยันถึงการพัฒนาเครื่องมือให้มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพเป็นที่น่าเชื่อถือและก่อให้เกิดประสิทธิผลสูงสุดสำหรับการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: แบบจำลองอุทกวิทยา, การปรับเทียบ, การสอบทาน, แบบจำลอง SWAT, ลุ่มน้ำมูล

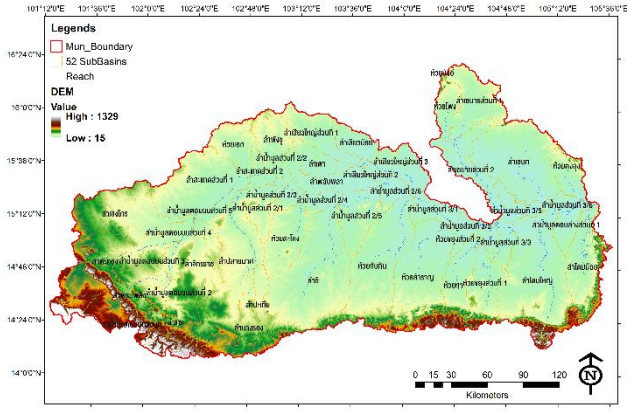
Abstract

The application of hydrological model is important in the assessment of hydrological conditions at the watershed level. Configuring the model to maximize the accuracy of the results is an important step in determining the effectiveness of hydrological models, especially in large watersheds with multiple observed stations. The aim of this study was to present a technique for calibration and validation the results of runoff simulations in Mun River Basin, Northeastern of Thailand when using SWAT and SWAT-CUP between 1991-2020, compared with data from 29 observed stations. The results indicated that the technique of dividing the area into 3 main areas (upstream, midstream and downstream) and the determination of the outlet point of the sub-basins at the observed station could be effectively implemented. In addition, after adjusting the values of 8 sensitivity parameters in SWAT-CUP covered all areas to determine the optimal values of the model. This was indicated by the R^2 index of most of the comparative positions in the 29 Mun River Basin areas at satisfactory level. However, to adjust the calculations to bring the NS and PBIAS indexes to an acceptable level, it was necessary to find a suitable procedure for SWAT-CUP analysis. The techniques presented in this study are expected to be applied to simulate hydrological conditions for large river basins with adequate observed stations. This is to confirm the development of accurate, efficient, reliable and most effective tools for sustainable water resource management.

Keywords: Hydrological model, Calibration, Validation, SWAT model, Mun River Basin

1. คำนำ

การศึกษาและวิเคราะห์ความผันแปรของสภาพอุทกวิทยาในสภาพอดีต ปัจจุบัน และอนาคต ในพื้นที่ลุ่มน้ำด้วยแบบจำลองอุทกวิทยา ถือได้ว่าเป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจำลองสภาพปริมาณน้ำท่าในลำน้ำต่าง ๆ โดยทั่วไปแบบจำลองทางอุทกวิทยาได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ แบบจำลองแบบรวม (Lump model) แบบจำลองแบบกระจาย (Distributed model) และแบบจำลองแบบกึ่งกระจาย (Semi-distributed model) ซึ่งแต่ละประเภทจะมีความเหมาะสมในการใช้ที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งาน ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาแบบจำลองแบบกึ่งกระจายชนิดหนึ่งที่ได้รับความนิยมและได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศไทยและทั่วโลก [1-2] สำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาด้านอุทกวิทยา คือ แบบจำลอง SWAT (Soil and Water Assessment Tools) ปัจจัยหลักที่ทำให้ SWAT ได้รับการยอมรับคือสามารถใช้ข้อมูลเชิงพื้นที่ต่าง ๆ เช่น แผนที่ระดับชั้น □ สภห ยร ร คื



รูปที่ 1 พื้นที่ลุ่มน้ำมูล

2.2 แบบจำลอง SWAT และการรวบรวมข้อมูล

2.2.1 แบบจำลองทางอุทกวิทยา SWAT

SWAT พัฒนาขึ้นภายใต้ความร่วมมือระหว่าง Blackland Research Center, TAES กับ United States Department of Agriculture–Agricultural Research Service (USDA-ARS) [8] ซึ่งได้มีการนำข้อมูลระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์จากแบบจำลอง ArcGIS ประยุกต์ใช้กับร่วมกับแบบจำลอง SWAT โดยมีวัตถุประสงค์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการประเมินปริมาณน้ำท่า การวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำท่าจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ซึ่งได้แก่ น้ำท่า ตะกอน และสารเคมีจากการเกษตรกรรม ของพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดใหญ่และมีระบบที่สลับซับซ้อน (Large-complex watershed) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพดินและการใช้ที่ดิน ซึ่งใช้สมการสมดุลน้ำมาพิจารณากระบวนทางอุทกวิทยาดังในสมการที่ (1)

(1)

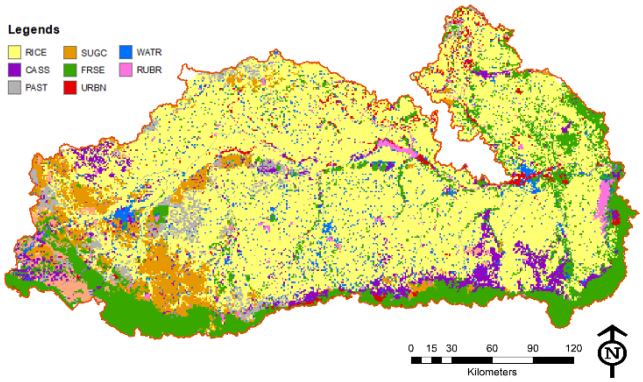
เมื่อ SW_t คือปริมาณน้ำในดินสุดท้าย (มม.) SW_0 คือปริมาณน้ำในดินเริ่มต้น (มม.) t คือเวลา (วัน) R_{day} คือปริมาณฝนในวันที่ i (มม.) Q_{surf} คือปริมาณน้ำผิวดินในวันที่ i (มม.) E_a คือปริมาณการคายระเหยในวันที่ i (มม.) W_{seep} คือปริมาณน้ำไหลซึมลงสู่ชั้นใต้ดินในวันที่ i (มม.) Q_{gw} คือปริมาณน้ำใต้ดินที่ไหลกลับสู่ลำน้ำในวันที่ i (มม.)

2.2.2 การรวบรวมข้อมูล

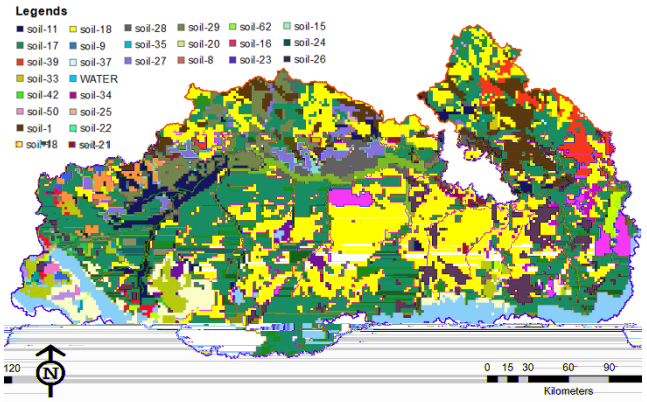
SWAT มีความต้องการนำเข้าข้อมูลเชิงพื้นที่สำหรับดำเนินการ ได้แก่ แผนที่ระดับความสูงเชิงเลข หรือ Digital Elevation Model (DEM) แผนที่ชนิดดิน แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน แผนที่เส้นลำน้ำ ข้อมูลสภาพภูมิอากาศระดับรายวัน ประกอบด้วย ข้อมูลปริมาณฝนจากสถานีตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยา จำนวน 10 สถานี ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ความเข้มของแสงแดด จากสถานีตรวจอากาศจำนวน 71 สถานี นอกจากนี้ ข้อมูลปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนจะถูกนำมาใช้ในการปรับเทียบและทานผลการคำนวณจากแบบจำลองจำนวน 29 สถานี ระหว่างช่วงปี พ.ศ.2534-2563 (30 ปี) จากกรมชลประทาน ดังแสดงตำแหน่งที่ตั้งในรูปที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลแผนที่เชิงพื้นที่สำหรับนำเข้า SWAT แสดงได้ดังรูปที่ 2 (a) ถึง (c) และประเภทข้อมูลสำหรับใช้ในการดำเนินงานสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลเชิงพื้นที่และเชิงอุทกวิทยาในพื้นที่สำหรับใช้ในการนำเข้าแบบจำลอง SWAT

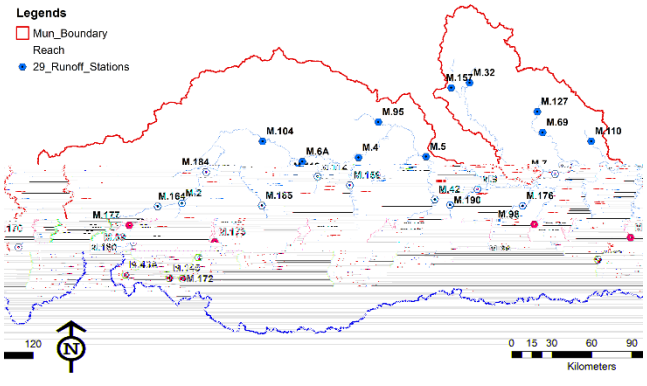
ชนิดข้อมูล	เวลา (พ.ศ.)	มาตราส่วน	แหล่งข้อมูล
แผนที่ความสูงเชิงเลข (DEM)	2558	30x30 ม.	กรมพัฒนาที่ดิน
แผนที่ลำน้ำ	2558	1:50,000	
แผนที่ชนิดดิน	2558	1:50,000	
แผนที่การใช้ที่ดิน	2560-2562	30x30 m	
ปริมาณฝน อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลม	2534-2563 (30 ปี)	รายวัน	กรมอุตุนิยมวิทยา
ความเข้มแสงอาทิตย์	2534-2563 (30 ปี)	รายวัน	กรมชลประทาน



(a) แผนที่การใช้ประโยชน์ดิน



(b) แผนที่ชนิดดิน



(c) แผนที่เส้นลำน้ำและตำแหน่งสถานีตรวจวัด

รูปที่ 2 ข้อมูลแผนที่เชิงพื้นที่สำหรับนำเข้าสู่แบบจำลอง SWAT

2.3 การจำลองสภาพปริมาณน้ำท่าด้วยแบบจำลอง SWAT

2.3.1 แบบจำลอง SWAT-CUP

SWAT-CUP หรือ SWAT Calibration and Uncertainty Programs คือแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการค้นหาคำตอบพารามิเตอร์ความอ่อนไหวทางอุทกวิทยาที่เหมาะสม (Optimal sensitivity parameters) ที่ทำให้ผลการคำนวณปริมาณน้ำท่าจาก SWAT มีความใกล้เคียงกับปริมาณน้ำท่าจากสถานีตรวจวัดที่ดีที่สุด ทดแทนวิธีการเดิมที่ใช้การลองผิด-ลองถูก หลักการทำงานของ SWAT-CUP จะเป็นการค้นหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิค Sequential Uncertainty Fitting version 2 (SUFI-2) [9] เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ต้องการจำนวนตัวแปรความอ่อนไหวน้อยที่สุดแต่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด และแสดงช่วงขอบเขตของผลลัพธ์ตัวแปรความอ่อนไหวได้กว้างที่สุด ผลการคำนวณที่ได้จากเทคนิค SUFI-2 จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดและประเมินประสิทธิภาพโดยใช้ 3 ดัชนีทางสถิติตรวจสอบความแม่นยำของผลลัพธ์ในลำดับถัดไป

2.3.2 ดัชนีทางสถิติสำหรับประเมินประสิทธิภาพแบบจำลอง

การประเมินประสิทธิภาพผลการจำลองปริมาณน้ำท่าเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดระหว่าง พ.ศ. 2534-2563 ระบุใช้ดัชนีทางสถิติ 3 ดัชนีประกอบด้วย

1) ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ดังแสดงในสมการที่ (2) ซึ่งจะมีค่าระหว่าง 0-1 โดยค่ามากกว่า 0.5 นั้นแสดงถึงข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์กันในระดับที่มีความน่าเชื่อถือ

2) ค่าสัมประสิทธิของ Nash Suttclife (Nash-Suttclife efficiency, NS) ดังแสดงในสมการที่ (3) จะมีค่าระหว่าง -∞ ถึง 1 โดย NS เท่ากับ 1 คือค่าที่ได้จากแบบจำลองตรงกับค่าที่ได้จากการวัด NS เท่ากับ 0 คือค่าที่ได้จากแบบจำลองมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการวัด และ NS < 0 คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการวัดดีกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลอง

3) ค่าร้อยละความเอนเอียงของการประมาณ (PBIAS) ดังแสดงในสมการที่ (4) โดยมีค่าเกณฑ์ความเอนเอียงที่ยอมรับได้ต่ำสุดคือไม่เกินร้อยละ 25

(2)

(3)

(4)

เมื่อ n คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด Q_{oi} คือค่าจากการตรวจวัดลำดับที่ i Q_{oa} คือค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัดทั้งหมด Q_{si} คือค่าจากแบบจำลองลำดับที่ i และ Q_{sa} คือค่าเฉลี่ยจากจากแบบจำลองทั้งหมด Q_s คือค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลอง และ Q_o คือ ค่าจากการตรวจวัด

2.4 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ความอ่อนไหวแบบจำลอง SWAT

2.4.1 พารามิเตอร์ความอ่อนไหวทางอุทกวิทยา

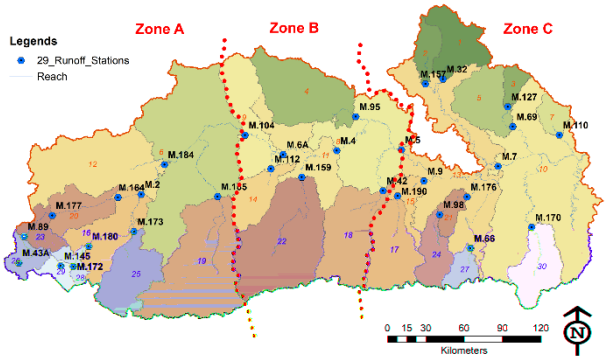
การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ทางอุทกวิทยาในแบบจำลอง SWAT จะดำเนินการด้วยโปรแกรม SWAT-CUP เป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการปรับแก้และส่งผลต่อปริมาณน้ำท่าของลุ่มน้ำจำนวน 8 ค่า และช่วงของการปรับแก้และค้นหาคำตอบที่เหมาะสม โดยได้ทดลองกำหนดพารามิเตอร์อ้างอิงตามผู้ที่เคยศึกษาในพื้นที่ลุ่มน้ำในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ [10] ดังแสดงในตารางที่ 2 การค้นหาคำตอบแบบ SUFI-2 จะถูกกำหนดรอบคำนวณที่ 300 รอบ โดยการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ใช้วิธีการแทนค่าตัวแปรเดิม ยกเว้นค่า CN2 ใช้วิธีการคูณ (Relative) เข้ากับค่าตัวแปรเดิมในสัดส่วนร้อยละ เมื่อทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ในช่วงที่กำหนด และให้ผลการจำลองปริมาณน้ำท่าได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดโดยพิจารณาค่าดัชนีทางสถิติทั้ง 3 ดัชนีที่ดีที่สุด (R^2 NS และ PBIAS) จากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์ความอ่อนไหวดังกล่าวไปปรับแก้ใน SWAT และคำนวณปริมาณน้ำท่าซ้ำอีกครั้ง

ตารางที่ 2 ตัวแปรความอ่อนไหวที่ใช้ในการปรับเทียบแบบจำลอง

ที่	ตัวแปร	รายละเอียด	ช่วงปรับ
1	CN2	SCS runoff curve number	-0.2 to 0.2 (relative)
2	SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	0 to 1
3	CH_N2	Manning's "n" value for the main channel	-0.01 to 0.3
4	ESCO	Soil evaporation compensation factor	0 to 1
5	SLSUBBSN	Average slope length	50 to 450
6	ALPHA_BF	Baseflow alpha factor (days)	0 to 1
7	GW_DELAY	Groundwater delay (days)	0 to 500
8	GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)	0 to 5000

2.4.2 การแบ่งพื้นที่สำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ด้วย SWAT-CUP ได้มีการแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยโดยอาศัยเทคนิค Watershed delineation [11-12] ใน SWAT เริ่มจากการกำหนดจุดออก (Outlet) ของลุ่มน้ำย่อยให้ตรงตามตำแหน่งของสถานีตรวจวัดที่ตั้งอยู่บนลำน้ำสายหลัก (ส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในลำน้ำมูล) ทำให้เกิดลุ่มน้ำย่อยจำนวน 29 ลุ่มน้ำ จากนั้นจึงแบ่งลุ่มน้ำย่อยออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) Zone A พื้นที่ต้นน้ำ ประกอบด้วย 10 ลุ่มน้ำย่อยและปรับเทียบกับสถานีตรวจวัด 10 สถานี 2) Zone B พื้นที่กลางน้ำ ประกอบด้วย 7 ลุ่มน้ำย่อยและปรับเทียบกับสถานีตรวจวัด 7 สถานี และ 3) Zone C พื้นที่ปลายน้ำ ประกอบด้วย 12 ลุ่มน้ำย่อยและปรับเทียบกับสถานีตรวจวัด 12 สถานี สำหรับการปรับเทียบและสอบทานกับสถานีตรวจวัดจำนวนทั้งสิ้น 29 สถานี ดังแสดงในรูปที่ 3 ทั้งนี้การเลือกตำแหน่งของการแบ่งพื้นที่ทั้ง 3 แห่งนั้น จะเป็นการเลือกตำแหน่งจุดออกที่ผ่านลำน้ำเพียงเส้นเดียว เนื่องจากจะถือว่าเป็นจุดรวมปริมาณน้ำท่าทั้งหมดที่จะไหลเข้าสู่พื้นที่ถัดไป



รูปที่ 3 การแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยด้วยแบบจำลอง SWAT จำนวน 29 ลุ่มน้ำ และการจัดแบ่งพื้นที่การเปรียบเทียบผลการคำนวณ

3. ผลการศึกษา

3.1 ค่าพารามิเตอร์ความอ่อนไหวที่เหมาะสมที่สุด

ผลการปรับเทียบผลการคำนวณปริมาณน้ำท่าจาก SWAT โดยอาศัยแบบจำลอง SWAT-CUP โดยกำหนดให้คำนวณจำนวน 300 รอบ สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจำนวน 8 ตัวแปร ที่ทำให้ผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับสถานีตรวจวัดมากที่สุดทั้ง 3 พื้นที่ แสดงดังตารางที่ 3 โดยในช่วงเริ่มต้นของการปรับเทียบ ได้ระบุให้แบบจำลอง SWAT-CUP กำหนดฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ในการค้นหาคำตอบที่ทำให้ค่า R^2 มีค่าที่ดีที่สุด (เข้าใกล้ 1) ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าค่า CN2 ซึ่งโดยทั่วไป เป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำผิวดิน สำหรับ Zone A และ Zone B แสดงค่าเป็นบวกเท่ากับ ร้อยละ 11.86 และ 13.21 ตามลำดับ ซึ่งหมายถึงจะต้องมีการปรับปริมาณน้ำท่าให้เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ Zone B ค่า CN2 แสดงค่าติดลบร้อยละ 0.45 ซึ่งหมายถึงการปรับลดปริมาณน้ำท่าที่คำนวณจาก SWAT ให้ต่ำลง นอกจากนี้ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำใต้ดิน ตัวอย่างเช่น ค่า GWQMN แสดงค่าอยู่ระหว่าง -31.39 ถึง 1597.81 แสดงถึงการปรับลดปริมาณน้ำใต้ดิน

ตารางที่ 3 ค่าตัวแปรความอ่อนไหวที่เหมาะสมที่สุดเมื่อกำหนดฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์เป็นค่า R^2

ที่	ตัวแปร	Zone A	Zone B	Zone C
1	CN2 (r)	0.1186	-0.0045	0.1321
2	SOL_AWC (v)	0.7946	0.5375	1.0007
3	CH_N2 (v)	0.1904	0.2556	0.3110
4	ESCO (v)	1.1037	0.4583	0.3949
5	SLSUBBSN (v)	54.1540	95.1666	52.5489
6	ALPHA_BF (v)	0.3409	0.8983	1.3955
7	GW_DELAY (v)	41.4753	35.0000	36.9930
8	GWQMN (v)	1597.8105	575.0000	-31.3937

หมายเหตุ: (r) หมายถึงการนำค่าที่ได้ไปคูณกับค่าเริ่มต้นจากแบบจำลอง และ (v) หมายถึงการนำค่าที่ได้ไปแทนค่าเริ่มต้นจากแบบจำลอง สำหรับใช้ในการคำนวณปริมาณน้ำท่าในแต่ละรอบ

3.2 ปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง SWAT

ผลการปรับเทียบระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองและสถานีตรวจวัดแบ่งตามพื้นที่ A B และ C โดย SWAT-CUP ในการคำนวณ 300 รอบ โดยเริ่มต้นที่ Zone A (จำนวน 10 จุด) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4 ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงผลการคำนวณปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำย่อยที่ 16 19 และ 19 เปรียบเทียบกับข้อมูลตรวจวัดสถานี M2 M185 และ M164 ตามลำดับ แสดงค่าดัชนีทั้ง 3 ประเภทอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก ผลการเปรียบเทียบในรูปแบบอนุกรมเวลาระหว่าง พ.ศ. 2534 – 2563 แสดงได้ดังรูปที่ 4 (a) ถึง (c) อย่างไรก็ตาม ผลการเปรียบเทียบที่จุดอื่น ๆ มีเพียง R^2 เท่านั้นที่ผ่านเกณฑ์ อันเป็นผลมาจากการใช้ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ที่ระบุการค้นหาคำตอบที่ดีสุดโดยใช้ค่า R^2 ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าของ Zone B (จำนวน 8 จุด) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5 โดยผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับ Zone A แสดงได้จากค่า R^2 ที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ระหว่าง 0.51 ถึง 0.71 จำนวน 4 จุดจากทั้งหมด 8 จุด ผลการเปรียบเทียบที่ดีที่สุดเมื่อพิจารณาทั้ง 3 ดัชนีแล้วนั้น คือ ที่ตำแหน่งสถานี M159 ที่แสดงค่า R^2 NS และ PBIAS เท่ากับ 0.53, 0.52 และ -6.1 ตามลำดับ ทั้งนี้ข้อสังเกตที่แตกต่างจาก Zone A คือผลของดัชนี NS และ PBIAS ได้ค่าที่แตกต่างจากเกณฑ์ต่ำสุดที่ยอมรับได้ค่อนข้างมาก จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงแนวทางการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง SWAT-CUP ต่อไป สำหรับผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าของ Zone C (จำนวน 12 จุด) ได้แสดงไว้ตารางที่ 6 โดยพบว่าค่า R^2 ที่ผ่านเกณฑ์ในระดับที่ยอมรับได้จำนวน 8 จุด ดัชนี NS ผ่านเกณฑ์จำนวน 4 จุด และ PBIAS ผ่านเกณฑ์จำนวน 5 จุด โดยตำแหน่งสถานี M7 ให้ค่าดัชนีต่าง ๆ ดีที่สุดเท่ากับ 0.68, 0.61 และ -24.8 ตามลำดับ

ตัวอย่างกราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าถึงความเข้ากันได้ระหว่างข้อมูลแบบอนุกรมเวลา (Time series) จากสถานีตรวจวัดและแบบจำลอง SWAT-CUP ระหว่าง พ.ศ. 2534 – 2563 แสดงได้ดังรูปที่ 4 โดยเป็นของพื้นที่ Zone A จำนวน 3 จุด ((a) ถึง (c)) Zone B จำนวน 2 จุด ((d) ถึง (e)) และ Zone C จำนวน 3 จุด ((f) ถึง (h))

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าระหว่างแบบจำลองและสถานีตรวจวัดและค่าดัชนีทางสถิติจาก SWAT-CUP ของ Zone A

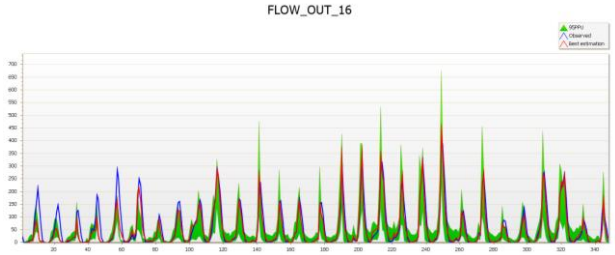
ลุ่มน้ำย่อย	สถานี	Inflow (cms/day)		Index		
		Observed	SWAT	R^2	NS	PBIAS
6	M104	102.92	222.60	0.86	-1.34	-116.3
12	M184	55.80	91.46	0.78	-0.30	-63.9
16	M2	65.17	56.19	0.88	0.87	13.8
19	M185	55.80	48.87	0.89	0.88	12.4
20	M164	22.15	19.04	0.88	0.87	14.0
23	M177	7.38	9.51	0.04	-5.79	-28.8
25	M173	12.89	14.07	0.40	0.39	-9.1
26	M89	6.02	3.86	0.55	0.45	35.9
28	M180	1.88	5.85	0.25	-0.77	-210.6
29	M172	1.06	3.05	0.47	-2.13	-187.7

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าระหว่างแบบจำลองและสถานีตรวจวัดและค่าดัชนีทางสถิติจาก SWAT-CUP ของ Zone B

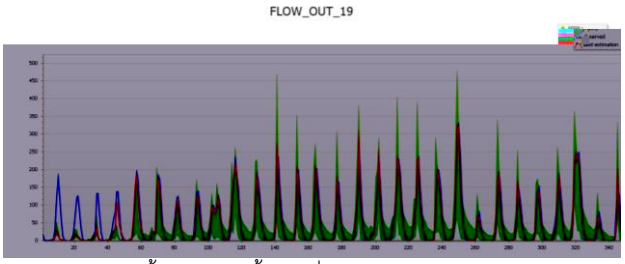
ลุ่มน้ำย่อย	สถานี	Inflow (cms/day)		Index		
		Observed	SWAT	R^2	NS	PBIAS
4	M95	13.82	60.65	0.24	-5.39	-339.0
8	M5	193.60	364.56	0.71	0.22	-88.3
9	M6A	90.01	170.62	0.68	0.11	-89.6
11	M4	120.71	234.00	0.75	-0.10	-93.8
14	M112	7.12	14.89	0.36	-0.24	-109.1
18	M42	21.51	30.45	0.48	0.35	-41.5
22	M159	39.36	41.75	0.53	0.52	-6.1

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าระหว่างแบบจำลองและสถานีตรวจวัดและค่าดัชนีทางสถิติจาก SWAT-CUP ของ Zone C

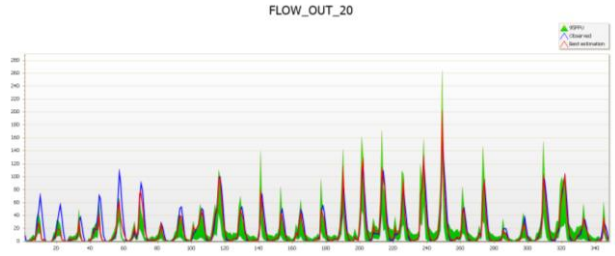
ลุ่มน้ำย่อย	สถานี	Inflow (cms/day)		Index		
		Observed	SWAT	R^2	NS	PBIAS
1	M32	28.27	27.36	0.60	0.54	3.2
2	M157	8.64	17.44	0.51	0.14	-101.7
3	M127	8.49	6.14	0.46	0.39	27.7
5	M69	37.21	34.38	0.54	0.53	7.6
7	M110	15.47	6.46	0.42	0.18	58.3
13	M7	609.22	760.60	0.68	0.61	-24.8
15	M9	22.34	43.07	0.43	0.05	-92.7
17	M190	22.58	32.42	0.15	0.14	-43.6
21	M176	38.79	24.08	0.68	0.51	37.9
24	M98	9.78	16.62	0.55	0.20	-69.9
27	M66	8.77	8.71	0.51	0.46	0.7
30	M170	31.49	18.84	0.63	0.47	40.2



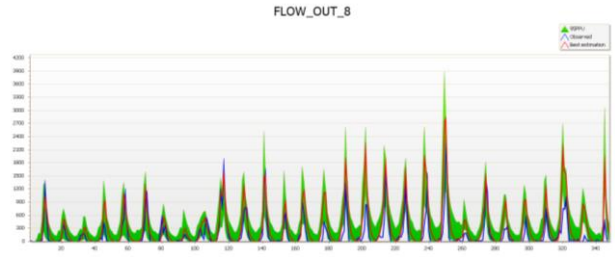
(a) ปริมาณน้ำท่าของลุ่มน้ำย่อยที่ 16 และสถานี M2 Zone A



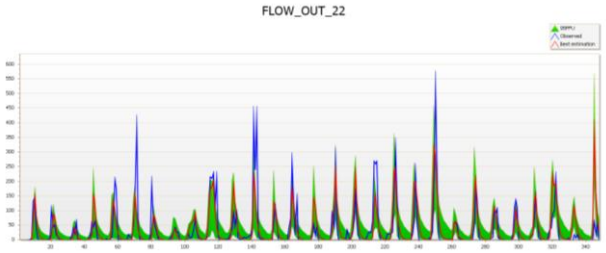
(b) ปริมาณน้ำท่าของลุ่มน้ำย่อยที่ 19 และสถานี M185 Zone A



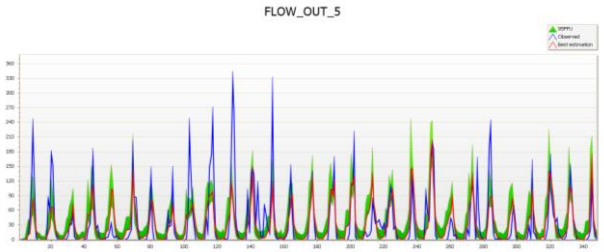
(c) ปริมาณน้ำท่าของลุ่มน้ำย่อยที่ 20 และสถานี M164 Zone A



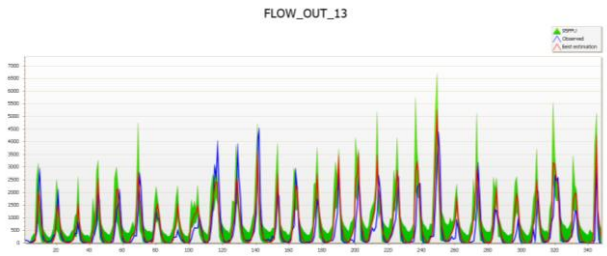
(d) ปริมาณน้ำท่าของลุ่มน้ำย่อยที่ 8 และสถานี M5 Zone B



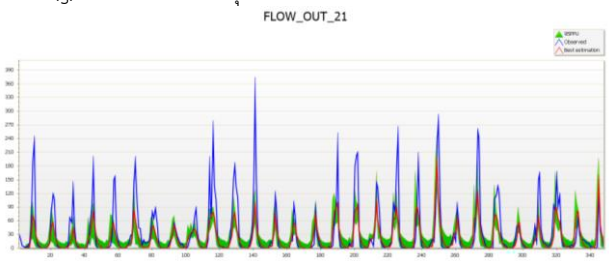
(e) ปริมาณน้ำท่าของลุ่มน้ำย่อยที่ 22 และสถานี M159 Zone B



(f) ปริมาณน้ำท่าของลุ่มน้ำย่อยที่ 5 และสถานี M69 Zone C



(g) ปริมาณน้ำท่าของลุ่มน้ำย่อยที่ 13 และสถานี M7 Zone C



(h) ปริมาณน้ำท่าของลุ่มน้ำย่อยที่ 21 และสถานี M176 Zone C

รูปที่ 4 ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่า Zone C ในเชิงอนุกรมเวลา

3.3 ประสิทธิภาพของแบบจำลอง SWAT

การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง SWAT สำหรับการคำนวณปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำมูล เมื่อเทียบกับข้อมูลของสถานีตรวจวัดทั้ง 29 สถานี โดยพิจารณาจากดัชนีทางสถิติทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ R^2 NS และ PBIAS เมื่อนำผลที่ได้จาก SWAT-CUP ตามที่แสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.2 และตารางที่ 4 ถึง 6 นำมาเปรียบเทียบกันทั้ง 3 พื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยพบว่าเมื่อระบุฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์คือค่า R^2 ในการเริ่มต้นวิเคราะห์นั้น ผลที่ได้คือค่า R^2 ที่ผ่านเกณฑ์ในระดับที่ยอมรับได้ (สูงกว่า 0.5) มีจำนวน 18 จุด ค่าระหว่าง 0.51 ถึง 0.89 สำหรับค่า NS มีจำนวนที่ผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (สูงกว่า 0.5) เป็นจำนวน 8 จุด อยู่ระหว่าง 0.51 ถึง 0.88 ในขณะที่ค่า PBIAS ผ่านเกณฑ์ (ไม่เกินร้อยละ 25) จำนวน 11 จุด โดยแสดงค่าอยู่ระหว่างร้อยละ -28.8 ถึง 27.7 ด้วยผลการศึกษาที่ชี้ให้เห็นในส่วนนี้ จึงสามารถอภิปรายได้ว่า SWAT-CUP สามารถคำนวณผลปริมาณน้ำท่าจนกระทั่งได้รับคำตอบที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดอยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจเมื่อพิจารณาจากค่า R^2 เป็นหลัก

รูปที่ 5 การเปรียบเทียบดัชนีทางสถิติ R^2 NS และ PBIAS ที่ได้จากการเปรียบเทียบ 29 ตำแหน่ง

4. บทสรุป

จากการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT เพื่อคำนวณปริมาณน้ำท่า และการใช้ SWAT-CUP สำหรับการปรับเทียบและสอบทานระหว่างผลการคำนวณและค่าตรวจวัดจากสถานีในพื้นที่ลุ่มน้ำมูล ซึ่งเป็นลุ่มน้ำขนาดใหญ่ และเลือกใช้สถานีตรวจวัดจำนวน 29 สถานี ระหว่าง พ.ศ.2534-2563 โดยใช้ดัชนีทางสถิติจำนวน 3 ดัชนี ได้แก่ R^2

NS

[4] Mengistu, A.G., van Rensburg, L.D. and Yali E.Woyessa, Y.E. (2019). Techniques for calibration and validation of SWAT model in data scarce arid and semi-arid catchments in South Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 25, October 2019, DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.100621.

[5] Prabnakorn, S., Maskey, S., Suryadi, F.X. and de Fraiture, C. (2018), Rice yield in response to climate trends and drought index in the Mun River Basin, Thailand. *Science of The Total Environment*, 621, 108-119, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.136.

[6] Djebou, D.C.S., (2018), Assessment of sediment inflow to a reservoir using the SWAT model under undammed condition: A case study for the Somerville Reservoir, Texas, USA. *Journal of International Soil and Water Conservation Research.* 6 (3), 222–229.

[7] Prasanchum, H. and Kangrang, A., (2016). Impact of Climate and Rapid Land Use Changes on Runoff Quantities in Lower-Lampao River Basin. *Mahasarakham International Journal of Engineering Technology*. 2(2), pp. 1-5.

[8] Arnold, A.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. and Williams, J.R. (1998), Large area hydrological modeling and assessment pert I: model development. *Journal of American Water Resource Association.* 34 (1), 73–89.

[9] Malik, M.A., Dar, A.Q., and Jain M.K. (2021), Modelling streamflow using the SWAT model and multi-site calibration utilizing SUFI-2 of SWAT-CUP model for high altitude catchments, NW Himalaya's. *Modeling Earth Systems and Environment,* 8, 1203–1213.

[10] Prasanchum, H. and Kangrang, A., (2018). Optimal reservoir rule curves under climatic and land use changes for Lampao Dam using genetic algorithm. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 12 (1), pp. 351-364.

[11] Chen, M., Cui, Y., Gassman, P.W. and Srinivasan, R. (2021). Effect of Watershed Delineation and Climate Datasets Density on Runoff Predictions for the Upper Mississippi River Basin Using SWAT within HAWQS. *Water*. 13 (4), 422, DOI: 10.3390/w13040422.

[12] Shivhare, N., Dikshit, P.K.S. and Dwivedi, S.B. (2018). A Comparison of SWAT Model Calibration Techniques for Hydrological Modeling in the Ganga River Watershed. *Engineering*. 4 (5), October 2018, pp. 643-652, DOI: 10.1016/j.eng.2018.08.012.