

Received: February 17, 2025; Revised: June 16, 2025; Accepted: August 18, 2025

การประเมินคุณภาพน้ำในลุ่มน้ำน่านที่สถานีวัดน้ำ N.1 โดยใช้แบบจำลอง QSWAT Water quality estimation in Nan Basin at station N.1 using QSWAT model

เรวัฒน์ เต็มกล้า¹ ชญานิษฐ์ ยิ้มอยู่² ดวงกมล เปรมสุข²
พงศกร พิมพะนิตย์³ กฤษณะ วังสอง³ สุदारัตน์ คำปลิว³ และอภิรัฐ ปิ่นทอง^{2*}

Rewat Termkla¹, Chayanit Yimyoo², Duangkamol Pramsuk²
Pongsakon Pimpanit³, Kitsana Wangsong³, Sudarat Compliew³ and Apirat Pinthong^{2*}

¹คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์

¹Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus, Surin Province

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

²Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani Province

³คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม

³Faculty of Engineering, Rajabhat Maha Sarakham University, Maha Sarakham Province

*Corresponding Author E-mail Address : api1972pin@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณภาพน้ำในลุ่มน้ำน่านที่สถานีวัดน้ำ N.1 อย่างเช่น ปริมาณดัชนีคุณภาพน้ำ Dissolved Oxygen (DO) และ Biological Oxygen Demand (BOD) โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้โปรแกรม QGIS ประกอบด้วยแบบจำลอง QSWAT ในการติดตามคุณภาพน้ำ โดยเทียบตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 ถึงปี พ.ศ. 2561 พบว่า แบบจำลองสามารถจำลองปริมาณน้ำทำได้อย่างแม่นยำในช่วงการปรับเทียบค่า $R^2=0.7139$ และ $NSE=0.6934$ และยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในช่วงการทวนสอบค่า $R^2=0.6658$ และ $NSE=0.5866$ สำหรับการจำลองค่าดัชนีคุณภาพน้ำ แบบจำลองสามารถแสดงค่าดัชนีคุณภาพน้ำ DO และ BOD ได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงในหลายช่วงการศึกษา โดยเฉพาะในฤดูฝน ซึ่งมีการไหลของน้ำสูง และสามารถเจอจากมลพิษได้ดี อย่างไรก็ตามในฤดูแล้งแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในเดือนที่มีการไหลของน้ำน้อยและมลพิษสะสมสูง จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าแบบจำลอง QSWAT มีประสิทธิภาพสูงในการจำลองปริมาณน้ำทำและคุณภาพน้ำในฤดูฝน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำและติดตามคุณภาพน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: คุณภาพน้ำ โปรแกรม QGIS แบบจำลอง QSWAT ความแม่นยำ ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

Abstract

This research aimed to evaluate water quality in the Nan River Basin at the N.1 gauging station, focusing on key indicators such as Dissolved Oxygen (DO) and Biological Oxygen Demand (BOD). The analysis employed QGIS software integrated with the QSWAT model to simulate and monitor water quality between 2016 and 2018. The model demonstrated high accuracy in streamflow simulation during the calibration period, with $R^2=0.7139$ and $NSE=0.6934$, and remained within an acceptable range during the validation period, with $R^2=0.6658$ and $NSE=0.5866$. For water quality indicators, the model closely approximated

observed DO and BOD levels in many instances, particularly during the rainy season when higher streamflow enhancing pollutant dilution. However, during the dry season, greater discrepancies were observed, especially in months with low flow and high pollutant accumulation. Overall, the findings indicate that the QSWAT model performs effectively in simulating streamflow and water quality during the rainy season and can be applied for water resource management and water quality monitoring in other watershed areas.

Keywords: Water quality, QGIS program, QSWAT model, Accurate, Geographic information systems

บทนำ

ทรัพยากรน้ำถือว่าเป็นสิ่งสำคัญต่อการดำเนินชีวิตของสิ่งมีชีวิตทั้งโลก น้ำที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติเป็นน้ำที่ได้จากฝนที่ตกลงสู่พื้นโลก ในขณะที่น้ำฝนตกลงผ่านบรรยากาศของโลกซึ่งละลายเอาก๊าซและสารต่าง ๆ ในบรรยากาศไว้ด้วยรวมทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่เป็นสาเหตุทำให้น้ำไม่บริสุทธิ์ (Suksomboon & Boonmak, 2023) การพัฒนาและการพัฒนาของตะกอน เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติรวมถึงการกระทำของมนุษย์ เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อประชากรโลกเป็นอย่างมาก ทั้งในส่วนด้านอุปโภคบริโภค ด้านการเกษตรกรรม ด้านอุตสาหกรรม ด้านการท่องเที่ยว และอื่น ๆ โดยมลพิษที่เกิดขึ้นในปริมาณที่มากเกินไปจนเกินขีดจำกัด จะทำให้การใช้ประโยชน์ทางสังคมและระบบนิเวศของแหล่งน้ำลดลง

ในปัจจุบันเมื่อองค์ประกอบความรู้ด้านเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เข้ามามีบทบาทมากขึ้น การพัฒนาเทคโนโลยีระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information Systems; GIS) จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพในการจัดเก็บข้อมูลเพื่อการผลิตแผนที่ให้มีความถูกต้อง แม่นยำ และเป็นวิทยาการที่สำคัญในการเรียนรู้เรื่องภูมิศาสตร์ ซึ่งช่วยสร้างความรู้ความเข้าใจในการพัฒนาการคิดวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ ความเชื่อมโยงและเปรียบเทียบทางภูมิศาสตร์เพื่อประกอบการวางแผนการตัดสินใจในเรื่องต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว (Boochayan et al., 2018) ศูนย์ข้อมูลสารสนเทศ สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ได้ทำการสำรวจทางด้านซอฟต์แวร์ที่ปรากฏอยู่ในขณะนี้ซึ่งได้อ้างอิงมาจากแบบสอบถาม และอีกส่วนหนึ่งได้มาจาก GIS Source book ปี พ.ศ. 2537 มีดังนี้ Arc/INFO, ArcGIS, QGIS, MGE, FRAMME และ PAMAP เป็นต้น โดยผู้วิจัยมีความสนใจในโปรแกรม Quantum GIS หรือ QGIS เป็นโปรแกรม Desktop GIS ในกลุ่มซอฟต์แวร์รหัสเปิด (Free and Open Source Software; FOSS) โดยกลุ่มนักพัฒนาโปรแกรมของชาวเยอรมัน มีลักษณะการใช้งานแบบ Graphic user interface ซึ่งสะดวกในการเรียกใช้ข้อมูลภาพ (Spatial data) และข้อมูลตาราง (Attribute data) สามารถเรียกใช้ข้อมูลเชิงเส้น (Vector data) ในรูปแบบมาตรฐานทั่วไป เช่น Shape file และข้อมูลเชิงกริด (Raster data) นอกจากนี้ยังสามารถสืบค้นข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูล นำเสนอในรูปแบบแผนที่ได้ และนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลอง วัฏจักรทางอุทกวิทยา อย่างแบบจำลอง SWAT ย่อมาจาก Soil and Water Assessment Tool ซึ่งอาศัยเครื่องมือการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ในโปรแกรม GIS โดยการนำชั้นข้อมูล GIS 3 ชั้นข้อมูล ได้แก่ ชั้นข้อมูลการใช้ที่ดิน ข้อมูลชนิดดิน และข้อมูลความลาดชันของพื้นที่ ซ้อนทับข้อมูลจะทำให้ได้ชั้นข้อมูลใหม่ ซึ่งเรียกแต่ละขอบเขตนี้ว่า หน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (Hydrologic Response Units; HRUs) (Wang et al., 2021)

เมื่อนำมาใช้งานร่วมกับโปรแกรม QGIS แบบจำลองนี้จะเรียกว่า QSWAT ใช้ในการประเมินปริมาณน้ำท่า การหาคุณภาพน้ำ การเคลื่อนที่ของสารเคมี และใช้เป็นเครื่องมือประเมินน้ำต้นทุน เพื่อนำไปใช้ในการบริหารจัดการน้ำ เป็นต้น ตัวอย่างงานวิจัย Tumkoon et al. (2017) ศึกษาแนวทางการปรับเทียบแบบจำลอง SWAT เพื่อใช้ในการประเมินปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำแควน้อยบำรุงแดน โดยได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างการปรับใช้พารามิเตอร์ชุดเดียวทั้งลุ่มน้ำ (กรณีที่ 1) และการปรับใช้พารามิเตอร์ที่แตกต่างกันตามแต่ละลุ่มน้ำย่อย (กรณีที่ 2) และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง ผลการศึกษาพบว่า ผลการเปรียบเทียบ และการตรวจพิสูจน์ในการจัดทำแบบจำลอง SWAT ในกรณีที่ 2 สูงกว่ากรณีที่ 1 รวมถึงงานวิจัยของ Prasanchum et al. (2022) ได้ประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองอุทกวิทยา SWAT สำหรับการจำลองปริมาณน้ำท่า โดยใช้เทคนิคการปรับเทียบและสอบทานแบบหลายสถานีในพื้นที่ลุ่มน้ำมูล จากการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT เพื่อคำนวณปริมาณน้ำท่า และการใช้ SWAT-CUP สำหรับการปรับเทียบและสอบทานระหว่างผลการคำนวณ และค่าตรวจวัดจากสถานีในพื้นที่ลุ่มน้ำมูล ดัชนีทางสถิติจำนวน 3 ดัชนี ได้แก่ R^2 , NS และ PBIAS เพื่อประเมินประสิทธิภาพของผลที่ได้จากแบบจำลอง ผลการศึกษาในภาพรวมพบว่า การทำให้ค่า R^2 ดีที่สุดนั้น ชี้ให้เห็นว่าค่า R^2 ที่ให้ค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (สูงกว่า 0.5) มีจำนวน 18 จุด ในขณะที่ค่า NS และ PBIAS มีค่าที่ผ่านเกณฑ์จำนวน 8 จุด และ 11 จุด ตามลำดับ

จากการศึกษาดังกล่าวทำให้เล็งเห็นถึงความสำคัญของปัญหาด้านคุณภาพน้ำท่าเกิดขึ้น จำเป็นต้องพิจารณาดัชนีสำหรับกำหนดเป็นมาตรฐานสำหรับแหล่งน้ำนั้น ๆ ให้สอดคล้องกับการใช้ประโยชน์ องค์ประกอบที่สำคัญที่สุดจะอธิบายถึงมาตรฐานของคุณภาพน้ำอย่างน้อย ประกอบด้วย ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen; DO) ที่เพียงพอ, ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์ชนิดที่ย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน (Biological Oxygen Demand; BOD) ที่เหมาะสม และค่า pH ควรใกล้เคียงค่าที่เป็นกลาง (Singkran et al., 2010) ในแบบจำลอง SWAT ยังสามารถคำนวณค่าดัชนีคุณภาพน้ำได้ จะมีการจำลองการเคลื่อนที่ของสารเคมี และธาตุอาหาร ของเสียพวกนี้จะไหลไปตามลำน้ำ ผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาในดัชนีคุณภาพน้ำ คือ ปริมาณดัชนีคุณภาพน้ำ DO และ ค่า BOD ดังนั้นการศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการประเมินคุณภาพน้ำในพื้นที่รับน้ำที่สถานีวัดน้ำ N.1 ด้วยแบบจำลอง QSWAT

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

ขั้นตอนการศึกษา

ในการศึกษาคุณภาพน้ำในลุ่มน้ำน่านที่สถานีวัดน้ำ N.1 ลุ่มน้ำน่าน ได้แก่ ปริมาณดัชนีคุณภาพน้ำ DO และ BOD โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้โปรแกรม QGIS และนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลอง วิเคราะห์ทางอุทกวิทยา อย่างแบบจำลอง SWAT ย่อมาจาก Soil and Water Assessment Tool แสดงดัง Figure 1 นอกจากนี้ยังสามารถสืบค้นข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูล การนำเสนอในรูปแบบแผนที่ได้ โดยประกอบด้วยแบบจำลอง QSWAT แสดงดัง Figure 2 ในการติดตามคุณภาพน้ำ โดยเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 ถึงปี พ.ศ. 2561 การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการจัดเตรียมข้อมูลแบบจำลองระดับเชิงตัวเลข การใช้ประโยชน์ที่ดิน ข้อมูลชุดดิน ข้อมูลน้ำฝน เข้าสู่โปรแกรม QSWAT เพื่อทำการประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดมาเปรียบเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงในพื้นที่รับน้ำสถานีวัดน้ำ N.1

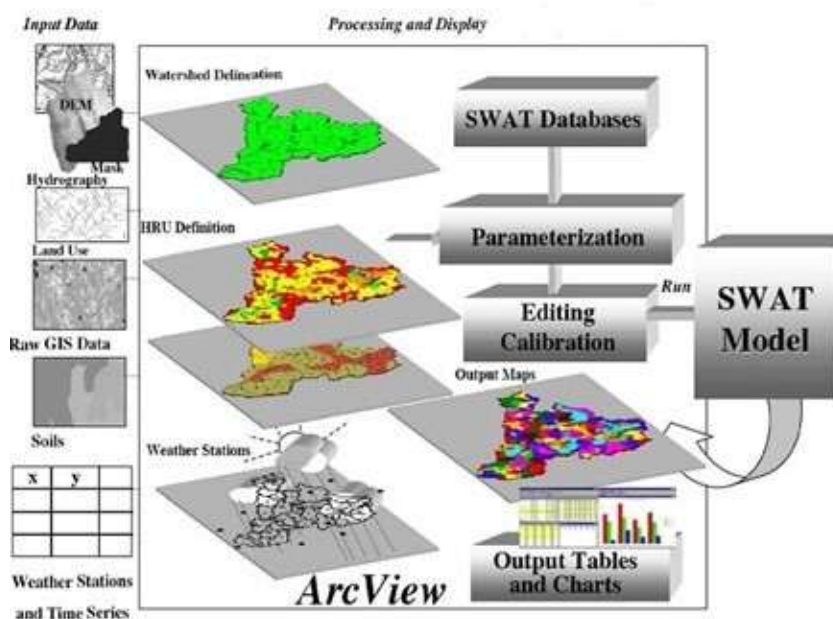


Figure 1 Processing and display concept for SWAT model (Santosa, 2016)

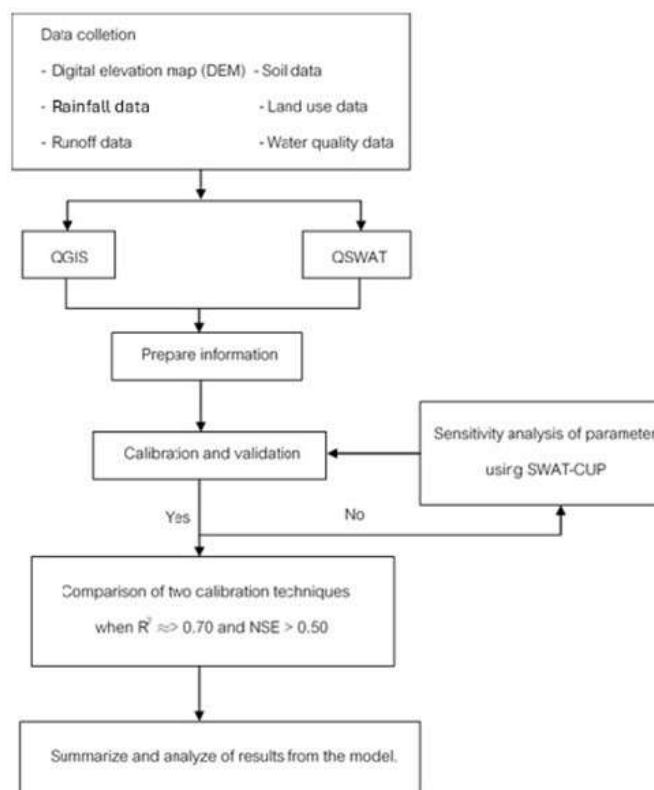


Figure 2 Flowchart of QSWAT modeling study

การเตรียมข้อมูล

ในการศึกษาต้องกำหนดวัตถุประสงค์ และการศึกษาโปรแกรม QGIS 3.2 ประกอบด้วยกับแบบจำลอง QSWAT ข้อมูลสภาพพื้นที่ ลักษณะทางภูมิประเทศ ภูมิอากาศ เป็นต้น ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาพื้นที่รับน้ำที่สถานีวัดน้ำ N.1 แสดงดัง Figure 3 โดยตั้งอยู่ที่ สำนักงานป่าไม้ ตำบลโนนเวียง อำเภอเมือง จังหวัดน่าน ระบบพิกัด UTM ที่ 687854 (X), 2076749 (Y) โดยมีพื้นที่ทั้งหมด 4,592.857 ตารางกิโลเมตร และจากการศึกษาโปรแกรม QGIS ประกอบด้วยกับแบบจำลอง QSWAT ในการประเมินดัชนีคุณภาพน้ำ (DO, BOD) ทำให้ทราบถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในแบบจำลองประกอบไปด้วย ข้อมูลแบบจำลองระดับเชิงตัวเลข (DEM) จากกรมพัฒนาที่ดิน ข้อมูลปริมาณน้ำฝน (Rainfall data) เลือกสถานีวัดน้ำฝน 12 สถานี ข้อมูลปริมาณน้ำท่า (Runoff data) เลือกสถานีวัดน้ำท่า 1 สถานี โดยทำการรวบรวมข้อมูลจากการเก็บข้อมูลของกรมชลประทาน (Royal irrigation department, 2019) ข้อมูลที่ศึกษาเป็นข้อมูลรายวันระหว่างปี พ.ศ. 2559-2561 จะแสดงที่ตั้งของสถานีวัดน้ำฝนและสถานีวัดน้ำท่า แสดงดัง Figure 3

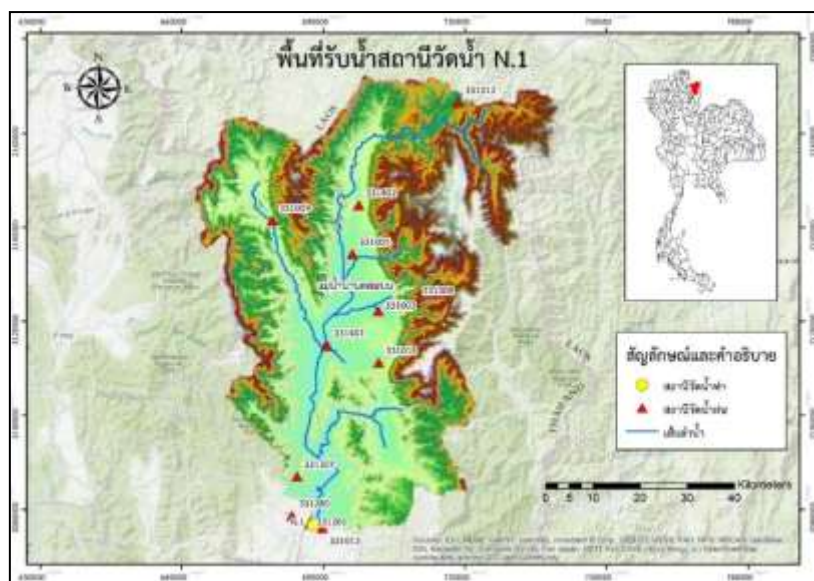


Figure 3 Watershed map at streamflow gauge station N.1

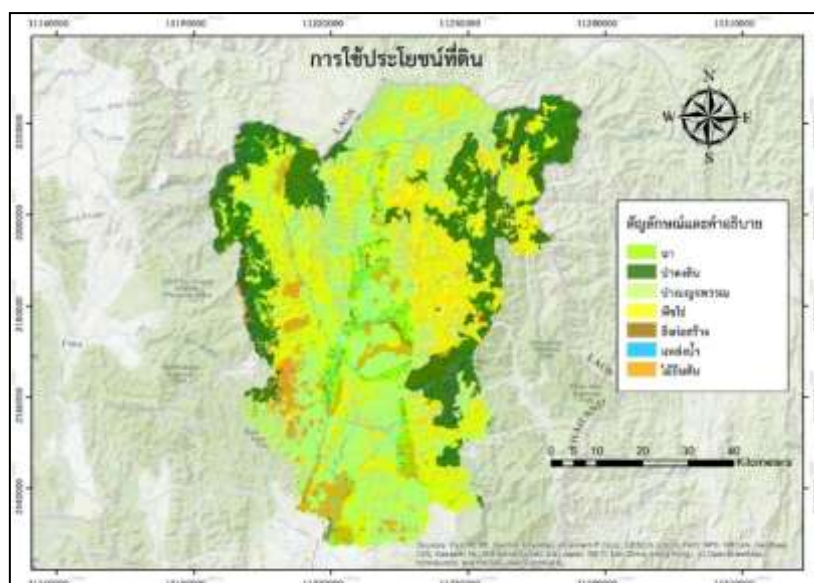


Figure 4 Land use and land cover map

Figure 4 แสดงส่วนข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use data) พบว่า พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพืชไร่ คิดเป็นร้อยละ 35 ของพื้นที่การศึกษา ในส่วนของแหล่งน้ำมีเพียงร้อยละ 0.31 ของพื้นที่การศึกษา รายละเอียดเพิ่มเติมดัง Table 1 ข้อมูลกลุ่มชุดดิน (Soil data) พบว่า ดินส่วนใหญ่เป็นกลุ่มดินร่วน คิดเป็นร้อยละ 78 ของพื้นที่การศึกษา และข้อมูลคุณภาพน้ำเลือกศึกษาเฉพาะค่าดัชนีคุณภาพน้ำ DO และค่า BOD โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ในปี พ.ศ. 2559-2561 เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาเชื่อมโยงตรงกันระหว่างข้อมูลในพื้นที่ศึกษากับข้อมูลพื้นฐานของแบบจำลอง QSWAT (Tufa & Sime, 2021)

Table 1 Land use type and SWAT code

No.	Land Use	SWAT Code	Description	Area (Sq.km)
1	Water	WATR	Water bodies (e.g., rivers, lakes, reservoirs)	14.176
2	Urban-medium density	URML	Medium-density urban or built-up areas	47.242
3	Rice paddy	RICE	Flooded or irrigated rice fields	164.006
4	Deciduous forest	FRSD	Forest dominated by deciduous trees	307.449
5	Evergreen forest	FRSE	Forest dominated by evergreen trees	992.799
6	Mixed forest	FRST	Mixed forest types (deciduous+evergreen)	1,492.532
7	Agricultural land-row crops	AGRRL	General agricultural row crops	1,574.653
Total				4,592.857

การประมวลผลของแบบจำลอง

การจัดทำแบบจำลองของการวิจัยครั้งนี้ เมื่อนำเข้าข้อมูลพื้นฐานต่าง ๆ อาทิเช่น ข้อมูลปริมาณน้ำฝน ปริมาณน้ำท่า ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน และข้อมูลกลุ่มชุดดิน ที่ได้เตรียมไว้ข้างต้นสู่แบบจำลอง QSWAT โดยจะทำการประมวลผลในช่วงการปรับเทียบ (Calibration) ปี พ.ศ. 2559-2560 และในช่วงของการทวนสอบ (Validation) ปี พ.ศ. 2561 เป็นกระบวนการที่ทำให้แบบจำลองให้ผลลัพธ์มีความสอดคล้องต่อสภาพธรรมชาติ หรือลักษณะของพื้นที่ลุ่มน้ำที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน และได้มีการประมวลผลรวมกับโปรแกรม SWAT CUP การประมาณค่าทางอุทกวิทยาจะใช้หลักการทางด้านสมดุลของน้ำโดยการแทนค่าของปัจจัยต่าง ๆ ในธรรมชาติลงไปในสมการทางคณิตศาสตร์ ดัง Eq.1 (Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2011) โดยในการเปรียบเทียบข้อมูลแบบอัตโนมัติ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในแบบจำลองให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดมากที่สุดถึงจะสามารถนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ในการประเมินคุณภาพน้ำ ซึ่งแสดงดัง Eq.2 และ Eq.3 (Wongsasri, 2011)

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^T (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (\text{Eq.1})$$

โดยที่

- SW = ปริมาณน้ำในดินที่เป็นประโยชน์ (มิลลิเมตร)
- t = ช่วงระยะเวลา i คือ เวลา (วัน)
- R = ปริมาณฝน (มิลลิเมตร)
- Q = ปริมาณน้ำไหลบ่า (มิลลิเมตร)
- ET = ปริมาณการคายระเหย (มิลลิเมตร)
- P = ปริมาณน้ำที่ซึมลงไปในดิน (มิลลิเมตร)
- QR = ปริมาณน้ำที่ไหลลงแม่น้ำ (มิลลิเมตร)

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen; DO) ดัง Eq.2

$$OX_{surf} = OX_{sat} - K_1 \times BOD_{surq} \times \frac{t_{ov}}{24} \quad (\text{Eq.2})$$

โดยที่

- OX_{surf} = ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำผิวดิน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- OX_{sat} = ความเข้มข้นของออกซิเจนอิ่มตัว (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- K_1 = BOD deoxygenation rate (ต่อวัน)
- t_{ov} = Time of concentration ของการไหลในผิวดิน (ชั่วโมง)

ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในขบวนการย่อยสลายอินทรีย์ชนิดที่ย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน (Biological Oxygen Demand; BOD) ดัง Eq.3

$$BOD_{surq} = \frac{2.7orgC_{surq}}{Q_{surq}area_{hrurg}} \quad (Eq.3)$$

โดยที่

BOD_{surq} = ความเข้มข้นของ BOD ในน้ำผิวดิน (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$orgC_{surq}$ = ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดที่อยู่ในน้ำผิวดิน (กิโลกรัม)

Q_{surq} = ปริมาณน้ำผิวดิน (มิลลิเมตร)

$area_{hrurg}$ = พื้นที่หน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (ตารางกิโลเมตร)

เกณฑ์การตัดสินใจแบบจำลอง

การประเมินความแม่นยำของแบบจำลองเป็นการพิจารณาความสอดคล้องกันของค่าจากผลของการจำลอง และค่าสังเกต ที่ได้มีการบันทึกไว้หรือค่าจริง โดยใช้เกณฑ์การประเมินเชิงประสิทธิภาพ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2) ดัง Eq.4 (Chacuttrikul et al., 2014; Tumkoon et al., 2017) ซึ่งเป็นดัชนีที่นิยมใช้ในการบอกค่าความแม่นยำของแบบจำลอง ในการคาดคะเนค่าที่ต้องการ โดย R^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้าค่า R^2 เข้าใกล้ 1 แสดงว่ากลุ่มข้อมูลทั้งสองเข้ากันได้มาก ถ้าค่า R^2 เข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์กันน้อยมาก

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2][\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2]}} \right] \quad (Eq.4)$$

โดยที่

R^2 = ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ

X_i = ตัวแปรอิสระที่เกิดขึ้นจริง

$\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยตัวแปรอิสระที่เกิดขึ้นจริง

Y_i = ตัวแปรตามจากแบบจำลอง

$\bar{Y}$ = ค่าเฉลี่ยตัวแปรตามจากแบบจำลอง

ค่าประสิทธิภาพของแบบจำลอง

ค่า Nash–Sutcliffe efficiency (NSE) นิยมใช้ในการบอกระดับความแม่นยำของแบบจำลองหรือประสิทธิภาพ ประสิทธิภาพของแบบจำลอง (Model performance) ในการคาดคะเนค่าที่ต้องการ ดัง Eq.5 (Nash & Sutcliffe, 1970) จะมีค่าอยู่ระหว่าง $-\infty$ ถึง 1 ซึ่งค่า NSE เท่ากับ 1 หมายถึง แบบจำลองสามารถคาดคะเนค่าโดยไม่มีผิดพลาด หากค่า NSE อยู่ระหว่าง 0.36-0.75 หมายถึง แบบจำลองสามารถคาดคะเนค่าอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \right] \quad (Eq.5)$$

โดยที่

Y_i = ค่าสังเกตที่ i เมื่อ i มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง n

$\bar{Y}$ = ค่าการคาดคะเนจากแบบจำลองของค่า Y_i

$\bar{Y}$ = ค่าเฉลี่ยของ Y_i

ผลการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ แบบจำลอง QSWAT ร่วมกับโปรแกรม QGIS สำหรับการติดตามดัชนีคุณภาพน้ำ (DO, BOD) โดยการเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำของหน่วยงานกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 ถึงปี พ.ศ. 2560 ใช้เพื่อการปรับเทียบแบบจำลอง และ ปี พ.ศ. 2561 ใช้เพื่อการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง ในพื้นที่ลุ่มน้ำน่าน สถานีวัดน้ำ N.1 โดยผลการดำเนินงานสรุปได้ดังต่อไปนี้

ผลการประเมินปริมาณน้ำท่า

ผลการประเมินปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง QSWAT ที่สถานีวัดน้ำ N.1 ในช่วงการปรับเทียบ (พฤศจิกายน 2559-ตุลาคม 2560) ค่า R^2 อยู่ที่ 0.7139 และค่า NSE อยู่ที่ 0.6934 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์และความแม่นยำของแบบจำลองในการจำลองปริมาณน้ำท่า ส่วนในช่วงการทดสอบ (พฤศจิกายน 2561-ตุลาคม 2561) ค่า R^2 ลดลงเป็น 0.6658 และค่า NSE อยู่ที่ 0.5866 แต่ยังคงแสดงถึงความแม่นยำที่ยอมรับได้ ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากแบบจำลอง แสดงไว้ใน Table 2 โดยทำการปรับเทียบข้อมูลระหว่างปี พ.ศ. 2559-2560 และการทดสอบข้อมูลระหว่างปี พ.ศ. 2561 แสดงไว้ใน Figure 5 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่าประสิทธิภาพของแบบจำลอง แสดงไว้ใน Table 3

Table 2 Optimized model parameters

Parameter	Minimum	Parameter value	Maximum
r_CN2	-0.2	-0.11	0.2
v_ALPHA_BF	0.0	0.75	1.0
v_GW_DELAY	30.0	158.31	450.0
v_GWQMN	0.0	1.56	2.0
v_GW_REVAP	0.0	0.15	0.2
v_ESCO	0.8	0.89	1.0
v_CH_N2	0.0	0.16	0.3
v_CH_K2	5.0	78.8	130.0
v_ALPHA_BNK	0.0	0.44	1.0
r_SOL_AWC	-0.2	-0.07	0.4
r_SOL_K	-0.8	0.28	0.8
r_SOL_BD	-0.5	-0.37	0.6
v_SFTMP	-5.0	-1.74	5.0

Table 3 Coefficient of determination and model efficiency

Stream flow	R^2	NSE	Period of observed data
Calibration	0.7139	0.6934	November 2016–October 2017
Validation	0.6658	0.5866	November 2018–October 2018

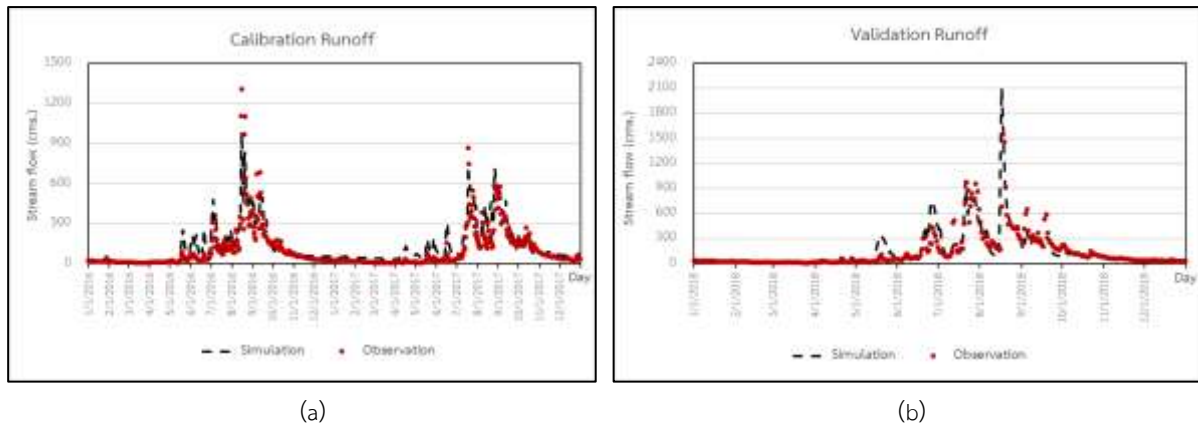


Figure 5 (a) Calibration period for streamflow Data (b) Validation period for streamflow data

ผลการประเมินคุณภาพน้ำ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณภาพน้ำจากการตรวจวัดจริงกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง QSWAT ช่วงการปรับเทียบ (Calibration) แสดงไว้ใน Figure 6 ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองสามารถจำลองค่าดัชนีคุณภาพน้ำ DO ได้สอดคล้องกับค่าจริงในบางเดือน เช่น เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2559 และเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2560 อย่างไรก็ตาม ในบางช่วง เช่น เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 (ค่าจำลอง 9.72 mg/L, ค่าจริง 5.20 mg/L) และเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2559 ค่าจำลองมีแนวโน้มสูงกว่าค่าที่วัดได้จริง สำหรับค่าดัชนีคุณภาพน้ำ BOD แบบจำลองมักจะต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริงในหลายเดือน เช่น เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2559 (ค่าจำลอง 0.70 mg/L, ค่าจริง 1.90 mg/L) อย่างไรก็ตาม ในบางเดือน เช่น เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 แบบจำลองสามารถประเมินค่าดัชนีคุณภาพน้ำ BOD ได้ใกล้เคียงกับค่าจริง (ค่าจำลอง 2.50 mg/L, ค่าจริง 2.20 mg/L) เมื่อพิจารณาตามฤดูกาลพบว่า แบบจำลองมีความสามารถในการจำลองค่าดัชนีคุณภาพน้ำ DO ได้ดีในช่วงฤดูฝน โดยค่าจำลองมีความใกล้เคียงกับค่าจริง เช่น เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2559 (วัดได้ 7.60 mg/L) และเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2560 (วัดได้ 7.00 mg/L) ในขณะที่ช่วงฤดูแล้งแบบจำลองมีแนวโน้มจำลองค่าดัชนีคุณภาพน้ำ DO สูงกว่าค่าจริง และค่าดัชนีคุณภาพน้ำ BOD ต่ำกว่าค่าจริง โดยเฉพาะในเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 ซึ่งพบความคลาดเคลื่อนชัดเจนทั้ง 2 ค่าดัชนีคุณภาพน้ำ

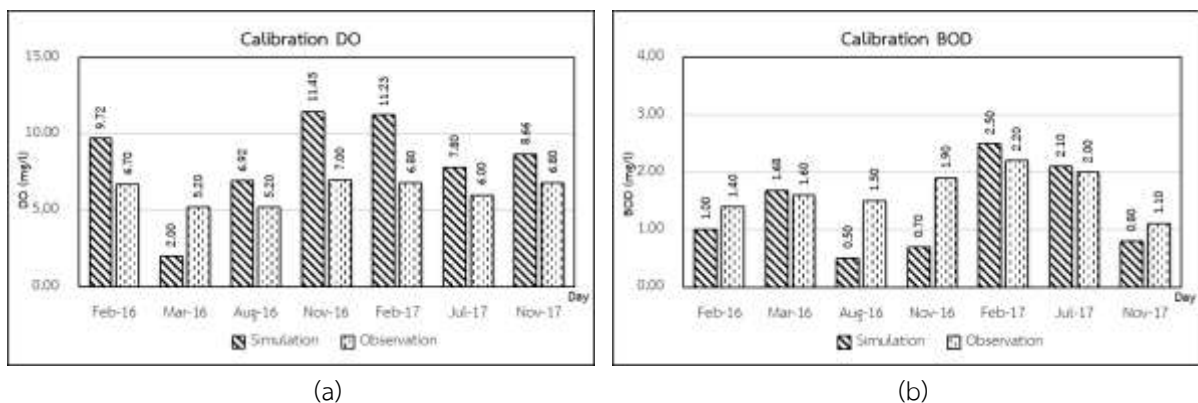


Figure 6 (a) Calibration period of DO water quality index (b) Calibration period of BOD water quality index

ช่วงการทวนสอบ (Validation) ในช่วงปี พ.ศ. 2561 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพน้ำที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับผลลัพธ์จากแบบจำลอง แสดงไว้ใน Figure 7 พบว่า แบบจำลองยังคงมีความคลาดเคลื่อนในบางช่วง โดยเฉพาะในเดือนกุมภาพันธ์ ซึ่งอยู่ในช่วงฤดูแล้ง ค่าดัชนีคุณภาพน้ำ DO ที่จำลองได้สูงถึง 9.00 mg/L ขณะที่ค่าจริงที่วัดได้อยู่เพียง 2.50 mg/L แสดงถึงข้อจำกัดของแบบจำลองในการประเมินคุณภาพน้ำภายใต้สภาพที่มีปริมาณน้ำไหลน้อยและความเข้มข้นของสารมลพิษสูง อย่างไรก็ตาม ในช่วงเดือนที่มีฝนตกต่อเนื่อง เช่น เดือนพฤษภาคมและเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2561 แบบจำลองสามารถจำลองค่าดัชนีคุณภาพน้ำ DO ได้ใกล้เคียงกับค่าจริง แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง มีประสิทธิภาพในการประเมินคุณภาพน้ำ

ในช่วงฤดูฝน ซึ่งมีสภาพการน้ำท่าไหลเวียนและเอื้อต่อการกระจายและเจือจางมลพิษ สำหรับค่าดัชนีคุณภาพน้ำ BOD แบบจำลองมักมีแนวโน้มต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริงในช่วงฤดูแล้ง เช่น เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 ที่ค่าจำลองอยู่ที่ 0.50 mg/L ขณะที่ค่าจริงสูงถึง 3.30 mg/L อย่างไรก็ตามช่วงปลายฝนและต้นฤดูหนาวในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2561 ค่าที่จำลองได้ (0.80 mg/L) มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าจริง (1.60 mg/L) เมื่อพิจารณาตามฤดูกาลพบว่า แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้นในช่วงฤดูฝน (มิถุนายน-ตุลาคม พ.ศ. 2561) ทั้ง 2 ดัชนีคุณภาพน้ำ ส่วนในฤดูแล้ง (มกราคม-พฤษภาคม และ พฤศจิกายน-ธันวาคม พ.ศ. 2561) มีค่าคลาดเคลื่อนสูงกว่า

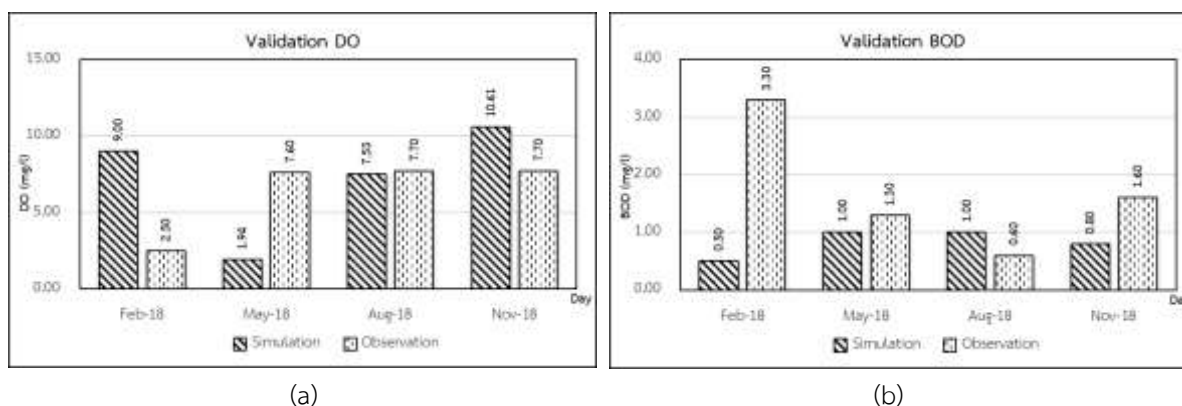


Figure 7 (a) Validation period of DO water quality index (b) Validation period of BOD water quality index

ผลการวิเคราะห์การประเมินจากแบบจำลอง

ผลการประเมินจากแบบจำลอง QSWAT โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงพบว่า แบบจำลองสามารถจำลองค่าปริมาณน้ำท่าและดัชนีคุณภาพน้ำ (DO, BOD) ได้อย่างเหมาะสม โดยเฉพาะในช่วงฤดูฝนที่มีการไหลของน้ำสูง ทำให้มลพิษสามารถกระจายและเจือจางได้ดี ส่งผลให้ค่าจำลองมีความสอดคล้องกับค่าจริงมากกว่าช่วงฤดูแล้ง ซึ่งน้ำมีการไหลช้าลง และความเข้มข้นของสารมลพิษเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของค่าของแบบจำลอง ผลการศึกษาที่สอดคล้องกับงานวิจัย Wongsasri (2011) ที่ประเมินคุณภาพน้ำในลุ่มน้ำพองตอนล่างโดยใช้แบบจำลอง SWAT และพบว่า แบบจำลองสามารถสะท้อนความสัมพันธ์ของค่าคุณภาพน้ำจากการตรวจวัดจริงกับค่าจำลองได้อย่างเหมาะสมเช่นกัน อย่างไรก็ตามความถูกต้องของแบบจำลองยังขึ้นอยู่กับความครบถ้วนของข้อมูลนำเข้า เช่น ข้อมูลภูมิประเทศ การใช้ที่ดิน ดิน และข้อมูลอุทกนิยมนิเวศ ซึ่งหากข้อมูลบางส่วนไม่สมบูรณ์ อาจต้องใช้การประมาณค่าหรือโปรแกรมอื่นช่วยในการต่อเติมข้อมูล และอาจนำไปสู่ความคลาดเคลื่อนได้

การอภิปรายผล

การประเมินคุณภาพน้ำในลุ่มน้ำน่านที่สถานีวัดน้ำ N.1 โดยใช้แบบจำลอง QSWAT ในการติดตามดัชนีคุณภาพน้ำ (DO, BOD) ในพื้นที่ลุ่มน้ำน่านที่สถานีวัดน้ำ N.1 ระหว่างปี พ.ศ. 2559 ถึง พ.ศ. 2561 ผลการศึกษาแสดงถึงข้อดีและข้อจำกัดของแบบจำลอง ดังนี้

1. ผลการประเมินปริมาณน้ำท่า จากแบบจำลอง QSWAT ในช่วงการปรับเทียบ (พฤศจิกายน พ.ศ. 2559-ตุลาคม พ.ศ. 2560) พบว่า แบบจำลองมีความแม่นยำสูง โดยค่า R^2 อยู่ที่ 0.7139 และ NSE ที่ 0.6934 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างค่าที่จำลองและค่าจริง ส่วนในช่วงการทวนสอบ (พฤศจิกายน พ.ศ. 2561-ตุลาคม พ.ศ. 2561) ค่า R^2 และ NSE ลดลงเล็กน้อย ($R^2=0.6658$, $NSE=0.5866$) แต่ยังคงอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tufa et al. (2021) ที่มีผลของค่า R^2 และ NSE แตกต่างกันเล็กน้อยในช่วงการปรับเทียบ และช่วงการทวนสอบของแบบจำลอง ทั้งนี้อาจเกิดจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความแปรปรวนของสภาพอากาศ ปริมาณน้ำฝน และการไหลของน้ำที่มีผลกระทบต่อค่าจำลองในบางช่วงเวลา

2. ผลการประเมินดัชนีคุณภาพน้ำ (DO, BOD) ในช่วงการปรับเทียบ (พฤศจิกายน พ.ศ. 2559-ตุลาคม พ.ศ. 2560) แบบจำลองสามารถจำลองค่าดัชนีคุณภาพน้ำ DO ได้ใกล้เคียงกับค่าจริงในหลายเดือน โดยเฉพาะในเดือนพฤศจิกายน

พ.ศ. 2559 และเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2560 อย่างไรก็ตามในบางเดือน เช่น เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 ค่า DO ที่จำลองได้สูงกว่าค่าจริง ซึ่งอาจเกิดจากข้อจำกัดของแบบจำลองในการจำลองภายใต้สภาพการไหลของน้ำที่ต่ำในช่วงฤดูแล้ง ส่วนดัชนีคุณภาพน้ำ BOD แบบจำลองมักจะจำลองค่าที่ต่ำกว่าค่าจริงในหลายเดือน เช่น เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2559 แต่ในบางเดือน เช่น เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 ค่าดัชนีคุณภาพน้ำ BOD ที่จำลองได้ใกล้เคียงกับค่าจริง ผลการทวนสอบในปี พ.ศ. 2561 พบว่า แบบจำลองยังคงมีความคลาดเคลื่อนในบางช่วง โดยเฉพาะในเดือนกุมภาพันธ์ ซึ่งเป็นช่วงฤดูแล้งที่มีปริมาณน้ำไหลน้อยและสารมลพิษสูง อย่างไรก็ตามในเดือนที่มีฝนตกต่อเนื่อง เช่น เดือนพฤษภาคม และพฤศจิกายน พ.ศ. 2561 แบบจำลองสามารถจำลองค่าดัชนีคุณภาพน้ำ DO ได้ใกล้เคียงกับค่าจริง แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการจำลองคุณภาพน้ำในช่วงฤดูฝน

3. การพิจารณาตามฤดูกาล ผลการจำลองตามฤดูกาลพบว่า แบบจำลอง QSWAT สามารถจำลองค่าดัชนีคุณภาพน้ำ DO และดัชนีคุณภาพน้ำ BOD ได้อย่างแม่นยำในช่วงฤดูฝน (มิถุนายน-ตุลาคม พ.ศ. 2561) ซึ่งมีปริมาณน้ำท่ามากและสภาพการไหลของน้ำที่ดี ทำให้มลพิษสามารถกระจายและเจือจางได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ในช่วงฤดูแล้ง (มกราคม-พฤษภาคม และพฤศจิกายน-ธันวาคม พ.ศ. 2561) แบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น โดยเฉพาะในเดือนกุมภาพันธ์ 2561 ที่มีการไหลของน้ำต่ำและความเข้มข้นของสารมลพิษสูง ทำให้แบบจำลองไม่สามารถจำลองค่าคุณภาพน้ำได้อย่างแม่นยำเท่าที่ควร สอดคล้องกับงานวิจัยของ Prasanchum et al. (2022) ที่เมื่อมีปริมาณน้ำท่าน้อยทำให้ผลของแบบจำลองยังคงมีความคลาดเคลื่อนในบางช่วง โดยรวมแล้วแบบจำลอง QSWAT มีความแม่นยำสูงในการจำลองปริมาณน้ำท่าและดัชนีคุณภาพน้ำ (DO, BOD) ในช่วงฤดูฝน แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งแสดงถึงข้อจำกัดของแบบจำลองในสภาพการไหลของน้ำที่ต่ำและความเข้มข้นของสารมลพิษสูง

บทสรุป

จากผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง QSWAT สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่า และการเปรียบเทียบดัชนีคุณภาพน้ำ (DO, BOD) จากผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำ N.1 ในช่วงปี พ.ศ. 2559 ถึง พ.ศ. 2560 มีค่า $R^2=0.7139$ และค่า $NSE=0.6934$ ในช่วงปี พ.ศ. 2561 มีค่า $R^2=0.6658$ และค่า $NSE=0.5866$ สำหรับการเปรียบเทียบคุณภาพน้ำในสถานีที่เปรียบเทียบคือ สถานีวัดน้ำ N.1 ผลการศึกษาข้อมูลจากการตรวจวัดจริงเทียบกับข้อมูลจากแบบจำลองมีแนวโน้มใกล้เคียงกันและจะไม่มี ความสอดคล้องกันในช่วง

ในส่วนของการจำลองคุณภาพน้ำ พบว่า แบบจำลองสามารถประมาณค่าดัชนีคุณภาพน้ำ DO และ BOD ได้ใกล้เคียงกับค่าจริงในหลายช่วง โดยเฉพาะในฤดูฝน (มิถุนายน-ตุลาคม) ซึ่งมีปริมาณการไหลของน้ำมาก ช่วยกระจายและเจือจางสารมลพิษได้ดี ทำให้แบบจำลองแสดงผลได้แม่นยำกว่าในฤดูแล้ง อย่างไรก็ตามพบข้อจำกัดในช่วงฤดูแล้ง โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองมักมีความคลาดเคลื่อนสูง โดยเฉพาะในเดือนที่มีปริมาณน้ำไหลต่ำและความเข้มข้นของมลพิษสูง เช่น เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 โดยผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลอง QSWAT มีประสิทธิภาพในการประเมินทั้งปริมาณน้ำท่าและคุณภาพน้ำในลุ่มน้ำนานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในฤดูฝน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ และการติดตามคุณภาพน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำอื่น ๆ ได้อย่างเหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมที่สนับสนุนข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment: Part 1. Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>

- Boochayan, A., Pahanich, W., & Sartsin, P. (2018). Geoinformatics technology and geographic literacy. *Journal of Humanities and Social Sciences, Surin Rajabhat University*, 20(2), 385–397. (In Thai)
- Chacuttrikul, P., Pukngam, S., & Thueksathit, S. (2014). Application of the SWAT model to study the impact of El Niño and La Niña on runoff in the Lam Chi sub-basin. *Khon Kaen Research Journal (Graduate Studies)*, 14(1), 24–35. (In Thai)
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009*. Texas Water Resources Institute.
- Prasanchum, H., Chaowiwat, W., Muangthong, S., Sarinnapakorn, K., & Boonyaaronnate, S. (2022). Evaluation of SWAT hydrological model performance for runoff simulation using multi-site calibration and validation techniques in Mun River Basin. In *The 27th National Convention on Civil Engineering (NCCE 27)*(pp. 1-8), Chiang Rai, Thailand. (In Thai)
- Royal Irrigation Department. (2019, February 10). Upper Northern Irrigation Hydrology Center. <http://www.hydro-1.rid.go.th/>. (In Thai)
- Santosa, P. (2016, June 14). QGIS interface for SWAT (QSWAT) tutorial. <https://www.santosasandyputra.wordpress.com/2016/06/14/step-2-qgis-interface-for-swat-qswat-tutorial/>
- Singkran, N., Yenpiem, A., & Sasitorn, P. (2010). Determining water conditions in the northeastern rivers of Thailand using time series and water quality index models. *Journal of Sustainable Energy & Environment*, 1(2), 47–58.
- Suksomboon, R., & Boonmak, P. (2023). Effects of hydraulic loading rate and solids loading rate on groundwater filtration efficiency using groundwater filtration units. *Journal of Agriculture and Technology*, 4(3), 36–44. (In Thai)
- Tufa, F. G., & Sime, C. H. (2021). Stream flow modeling using SWAT model and the model performance evaluation in Toba sub-watershed, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7, 2653–2665. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01039-7>
- Tumkoon, K., Sittichok, K., & Thepprasit, C. (2017). A comparison of calibration techniques of the SWAT model for runoff estimation into Kwaie Noi Bamrung Dan Reservoir, Phitsanulok Province. *Kasetsart University Journal of Science and Technology*, 6(3), 41–59. (In Thai)
- Wang, Z., Cao, J., & Yang, H. (2021). Multi-time scale evaluation of forest water conservation function in the semiarid mountains area. *Forests*, 12, 116. <https://doi.org/10.3390/f12020116>
- Wongsasri, S. (2011). Runoff estimation in the Phong River Basin, Nong Bua Lamphu Province using the SWAT model [Unpublished master's thesis]. Khon Kaen University. (In Thai)