

การประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำท่า ในลุ่มน้ำแม่งัด จังหวัดเชียงใหม่

Assessment of Climate Change Impact on the Streamflow in Mae Ngat Basin, Chiang Mai

ภัทรวิชญ์ นามราชา*, พีรวัฒน์ ปลาเงิน, ธนพร สุปรียาสิลป์, ชนะ สินทรัพย์วโรดม

Phattrawich Namracha*, Pheerawat Plangoen, Thanaporn Supriyasilp, Chana Sinsabvarodom

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย

Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand

* Corresponding author E-mail: phattrawich_namracha@cmu.ac.th

Received 30 April 2025; Revised 18 July 2025; Accepted 23 July 2025

บทคัดย่อ

ความเป็นมาและวัตถุประสงค์ : การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อทรัพยากรน้ำทั่วโลก รวมถึงประเทศไทย โดยเฉพาะในลุ่มน้ำที่มีความสำคัญด้านการเกษตรและการใช้น้ำในชุมชนท้องถิ่น เช่น ลุ่มน้ำแม่งัด จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นลุ่มน้ำสาขาของแม่น้ำปิงตอนบน มีเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชลเป็นแหล่งเก็บกักน้ำหลักของพื้นที่ งานวิจัยในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาเผยให้เห็นว่าพื้นที่ดังกล่าวประสบกับความผันผวนของปริมาณฝนที่เพิ่มขึ้น ทั้งในแง่ของความถี่ ความเข้ม และช่วงเวลา ทำให้เกิดสถานการณ์น้ำท่วมฉับพลันในฤดูฝน และภัยแล้งในฤดูแล้ง ความไม่แน่นอนทางสภาพอากาศดังกล่าวส่งผลต่อปริมาณน้ำท่า ระบบนิเวศ การเกษตร และประสิทธิภาพการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในพื้นที่ การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำท่าและน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแม่งัด โดยใช้แบบจำลอง SWAT (Soil and Water Assessment Tool) ควบคู่กับข้อมูลจากโครงการ CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) ที่ผ่านการปรับลดขนาดเชิงพื้นที่ด้วยข้อมูลรายวันจาก NEX-GDDP-CMIP6 (NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections) ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ระดับลุ่มน้ำ

วิธีดำเนินการวิจัย : พัฒนาแบบจำลอง SWAT โดยใช้ข้อมูลด้านภูมิประเทศ การใช้ที่ดิน และข้อมูลอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่งัด โดยแบ่งพื้นที่ออกเป็นลุ่มน้ำย่อย (sub-basin) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการจำลองกระบวนการอุทกวิทยา จากนั้น ปรับแก้และสอบเทียบแบบจำลองด้วยข้อมูลสังเกตจริงจากสถานี P.56a ในช่วง พ.ศ. 2546–2557 โดยใช้ดัชนีประสิทธิภาพ ซึ่งผลลัพธ์อยู่ในเกณฑ์ที่เชื่อถือได้และสามารถใช้เพื่อคาดการณ์ล่วงหน้าได้อย่างเหมาะสม ($R^2 = 0.80$, $NSE = 0.80$ และ $PBIAS = -1.31\%$) ในส่วนของข้อมูลภูมิอากาศในอนาคต ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศ CMIP6 จำนวน 10 แบบ ภายใต้สถานการณ์การปล่อย แก๊สเรือนกระจก 4 สถานการณ์ได้แก่ SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 และ SSP5-8.5 ครอบคลุม

ช่วง พ.ศ. 2574–2593 และ พ.ศ. 2594–2613 โดยเปรียบเทียบกับช่วงปีฐาน พ.ศ. 2546–2557 ซึ่งเป็นฐานข้อมูลอ้างอิงในแบบจำลอง เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มและความเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำท่าในระดับรายปี รายเดือน และเชิงพื้นที่

ผลการวิจัย : ผลการคาดการณ์แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำท่ารายปีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอนาคตภายใต้ทุกสถานการณ์เมื่อเทียบกับปีฐาน โดยเฉพาะกรณี SSP1-2.6 และ SSP2-4.5 ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 54.07%–88.14% และ 53.64%–76.32% ตามลำดับ ส่วนกรณี SSP3-7.0 เพิ่มขึ้น 35.79% และ 70.91% และ SSP5-8.5 เพิ่มขึ้น 60.30% และ 78.34% ตามช่วงเวลา จากการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ พบว่า พื้นที่ตอนกลางและตอนล่างของกลุ่มน้ำได้รับผลกระทบจากน้ำท่าที่เพิ่มขึ้นมากที่สุด ซึ่งเพิ่มความเสี่ยงต่อปัญหาน้ำท่วมในฤดูฝน ขณะที่ยังคงมีความเสี่ยงจากภัยแล้งในฤดูแล้ง เนื่องจากการกระจายของปริมาณฝนไม่สม่ำเสมอตลอดปี การวิเคราะห์ในระดับรายเดือนยังพบว่า SSP1-2.6 และ SSP2-4.5 มีการกระจายตัวของน้ำท่าที่เพิ่มขึ้นตลอดทั้งปี จึงส่งผลกระทบต่อภัยแล้ง ในขณะที่ SSP3-7.0 มีปริมาณน้ำท่าในฤดูแล้งใกล้เคียงกับปีฐาน ซึ่งอาจทำให้เกิดภัยแล้ง อีกทั้งยังพบว่า SSP5-8.5 มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำท่าอย่างมีนัยสำคัญในเดือนสิงหาคม–กันยายน ซึ่งเสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วมฉับพลัน สถานการณ์ที่เกิดขึ้นเหล่านี้เน้นย้ำถึงความจำเป็นในการปรับกลยุทธ์ด้านการจัดการทรัพยากรน้ำให้มีความยืดหยุ่นและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

สรุป : จากผลการศึกษาโดยใช้แบบจำลอง SWAT ร่วมกับข้อมูล CMIP6 พบว่า ในช่วง พ.ศ. 2574–2613 กลุ่มน้ำแม่จันจะมีปริมาณน้ำท่าเพิ่มขึ้นในทุกสถานการณ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจก โดยเฉพาะกรณี SSP1-2.6 และ SSP2-4.5 ที่มีลักษณะการกระจายตัวของน้ำท่าที่สม่ำเสมอ ขณะที่พบความแปรปรวนสูงในกรณี SSP3-7.0 และ SSP5-8.5 โดยปริมาณน้ำท่าเพิ่มขึ้นในฤดูฝนและลดต่ำในฤดูแล้ง ผลลัพธ์ดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงความเสี่ยงแบบสองทาง คือ ภัยน้ำท่วมและภัยแล้ง ซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบน้ำในพื้นที่ การจำลองด้วย SWAT ที่ผ่านการปรับแก้แบบจำลองแล้วสามารถใช้เป็นเครื่องมือสำคัญในการวางแผนและบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในระยะยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงปฏิบัติ : ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนเชิงนโยบายสำหรับการจัดการน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่จันอย่างครอบคลุมและยืดหยุ่น แนวทางที่แนะนำ ได้แก่ การเพิ่มขีดความสามารถของอ่างเก็บน้ำ โดยการปรับปรุงโครงสร้างหรือสร้างแหล่งน้ำเสริม เพื่อบรรณน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นในช่วงฝนตกหนัก การออกแบบระบบระบายน้ำเพื่อป้องกันน้ำท่วมฉับพลันในพื้นที่ตอนล่าง การวางแผนการใช้น้ำตามฤดูกาล รวมถึงการส่งเสริมการเกษตรที่ใช้น้ำน้อยในฤดูแล้ง อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้ระบบติดตามอากาศและแบบจำลองการคาดการณ์ร่วมกับเทคโนโลยีสารสนเทศ เพื่อช่วยในการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ เช่น การจัดตารางการปลูกพืช ระบบชลประทานอัจฉริยะ หรือระบบเตือนภัยล่วงหน้า ทั้งนี้ ข้อมูลจากงานวิจัยยังสามารถประยุกต์ใช้เป็นกรอบแนวทางสำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำอื่น ๆ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกันในประเทศไทย

คำสำคัญ : แบบจำลอง SWAT, การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ, แบบจำลองภูมิอากาศโลก, การปรับลดขนาดเชิงพื้นที่

Abstract

Background and Objectives: Climate change has significantly affected water resources worldwide, including Thailand. This is especially true for watershed areas, which are vital for agriculture and local water use. One such area is the Mae Ngat watershed in Chiang Mai Province, a tributary of the upper Ping River, where the Mae Ngat Somboon Chon Dam serves as the primary water reservoir. Studies over the past decade have shown that this region has experienced increasing variability in rainfall, in terms of frequency, intensity and timing. This has led in turn to flash floods during the rainy season and droughts during the dry season. Such climatic uncertainty has impacted streamflow, ecosystems, agriculture and the overall efficiency of water resource management in the basin. To address this uncertainty, the present study aimed to assess the impact of climate change on streamflow and inflow into the Mae Ngat reservoir using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. The analysis incorporated climate data from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), which were spatially downscaled to a daily scale using the NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6). This dataset is highly suitable for watershed-scale hydrological impact assessments and supports long-term water management planning under changing climatic conditions.

Methodology: The SWAT model was developed using input data, including topography, land use, soil characteristics and local meteorological records within the Mae Ngat watershed. The basin was subdivided into multiple sub-basins to enhance the spatial accuracy of hydrological process simulation. Model calibration and validation were performed using observed streamflow data from station P.56a during the period 2003–2014. Model performance was evaluated using statistical indicators, yielding R^2 of 0.80, NSE of 0.80, and PBIAS of -1.31%, indicating satisfactory agreement between the simulated and observed data and the model suitability for future projections. Future climate projections were obtained from 10 Global Climate Models (GCMs) under CMIP6. Four greenhouse gas emission scenarios were applied: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 and SSP5-8.5. Daily downscaled data from NEX-GDDP-CMIP6 were used. Simulations covered two future periods: 2031–2050 and 2051–2070, with the historical baseline of 2003–2014. Streamflow outputs were analyzed on annual, monthly and spatial scales to assess changes and trends in water availability under different climate change scenarios.

Main Results: The projection results indicate that annual streamflow in the Mae Ngat watershed is expected to increase under all future climate scenarios. Notably, under SSP1-2.6 and SSP2-4.5, streamflow is projected to rise by approximately 54.07%–88.14% and 53.64%–76.32%, respectively. For SSP3-7.0, the projected increases are 35.79% and 70.91%, while SSP5-8.5 shows increases of 60.30% and 78.34% during the two future periods. Spatial analysis reveals that the central and lower parts of the watershed are mostly affected, with significant increases in streamflow that heighten the risk of flooding during the rainy season. Meanwhile, drought conditions remain a concern during the dry season due to the uneven distribution of rainfall throughout the year. Monthly-scale analysis shows that both SSP1-2.6 and SSP2-4.5 result in more evenly distributed increases in streamflow throughout the year, potentially reducing hydrological extremes. In contrast, SSP3-7.0 maintains dry-season streamflow levels close to the historical baseline, implying continued drought vulnerability. Additionally, SSP5-8.5 exhibits significant increases in streamflow during August and September, raising the likelihood of flash flood events. These contrasting seasonal patterns underscore the necessity of developing flexible and adaptive water resource management strategies to cope with both flood and drought risks under changing climate conditions.

Conclusions: Based on the SWAT model simulation using downscaled CMIP6 climate projections, streamflow in the Mae Ngat watershed is projected to increase during the period 2031–2070 under all greenhouse gas emission scenarios. Notably, SSP1-2.6 and SSP2-4.5 show a more consistent and evenly distributed increase in the streamflow throughout the year, while SSP3-7.0 and SSP5-8.5 exhibit higher variability, with increased flows during the rainy season and decreased flows during the dry season. These findings highlight a dual-risk scenario, i.e., flooding and drought, that may compromise the stability of the watershed's hydrological system. The calibrated SWAT model proves to be a reliable and effective tool for long-term water resource planning and management under future climate change conditions.

Practical Application: The results of the present study can be used as a policy-support tool for integrated and adaptive water resource management in the Mae Ngat watershed. Recommended strategies include enhancing reservoir capacity through structural improvements or supplementary storage facilities to handle peak rainfall; proper designs of effective drainage systems to mitigate flash flood risks in downstream areas are also recommended. Seasonal water allocation planning and promotion of water-efficient agriculture during the dry season are also essential. The integration of weather monitoring systems, predictive models

and information technology can support strategic decision-making in such terms as crop scheduling, smart irrigation systems and early warning mechanisms. The presented framework and findings can also be applied to other watersheds in Thailand with similar hydrological and climatic characteristics, contributing to national resilience against future climate variability.

Keywords: SWAT Model, Climate Change, General Circulation Model, Downscaling

Introduction

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและทรัพยากรน้ำทั่วโลก รวมถึงประเทศไทย [1-2] ซึ่งส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อทรัพยากรน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านปริมาณน้ำ พบว่า การเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝนทำให้ฝนตกหนักในระยะเวลาสั้นเกิดน้ำท่วมฉับพลัน และช่วงฤดูร้อนที่ยาวนานขึ้นส่งผลให้เกิดภัยแล้ง ในด้านของอุทกภูมิ การเพิ่มขึ้นของอุทกภูมิเฉลี่ยส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำสูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้ปริมาณน้ำในแหล่งกักเก็บธรรมชาติและเขื่อนกักเก็บน้ำลดลง นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่าทำให้เกิดความแปรปรวนของปริมาณน้ำในแม่น้ำและลำธาร ซึ่งกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำและการใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำ

ลุ่มน้ำแม่จิดเป็นลุ่มน้ำสาขาของลุ่มน้ำปิงตอนบน ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 1,281 ตารางกิโลเมตร ลักษณะภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นภูเขาสูงสลับซับซ้อน มีที่ราบลุ่มแคบ ๆ ตามแนวลำน้ำ ความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางอยู่ระหว่าง 350-1,700 เมตร โดยมีเขื่อนแม่จิดสมบูรณ์ชลเป็นแหล่งกักเก็บน้ำหลักสำหรับการเกษตรและการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลกระทบโดยตรงต่อปริมาณน้ำฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่จิด จากการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลัง [3-4] ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา (พ.ศ. 2546–2566) พบว่าการเปลี่ยนแปลงสำคัญหลายประการเกี่ยวกับลักษณะของปริมาณน้ำฝนในลุ่มน้ำ โดยความผันผวนของปริมาณน้ำฝนรายปีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในบางปี เช่น พ.ศ. 2548 และ พ.ศ. 2554 พบว่ามีปริมาณน้ำฝนสูงกว่าค่าเฉลี่ยมาก ขณะที่บางปี เช่น พ.ศ. 2558 และ พ.ศ. 2562 กลับมีปริมาณต่ำกว่าค่าเฉลี่ยอย่างมาก สะท้อนถึงความไม่แน่นอนที่มากขึ้นของปริมาณน้ำฝนในแต่ละปี นอกจากนี้ ยังพบการเปลี่ยนแปลงของฤดูฝน โดยช่วงการเริ่มต้นและสิ้นสุดของฤดูฝนที่เปลี่ยนไป ทำให้ฤดูฝนสั้นลงแต่มีความเข้มข้นของฝนสูงขึ้นในบางช่วง ในทางตรงกันข้ามพบว่าช่วงเวลาที่ไม่มีฝนตกหรือช่วงแล้งมีแนวโน้มยาวนานมากขึ้น ส่งผลให้เกิดภาวะขาดแคลนน้ำในบางพื้นที่ของลุ่มน้ำ การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำแม่จิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการบริหารจัดการน้ำ การเกษตรกรรม และระบบนิเวศในพื้นที่

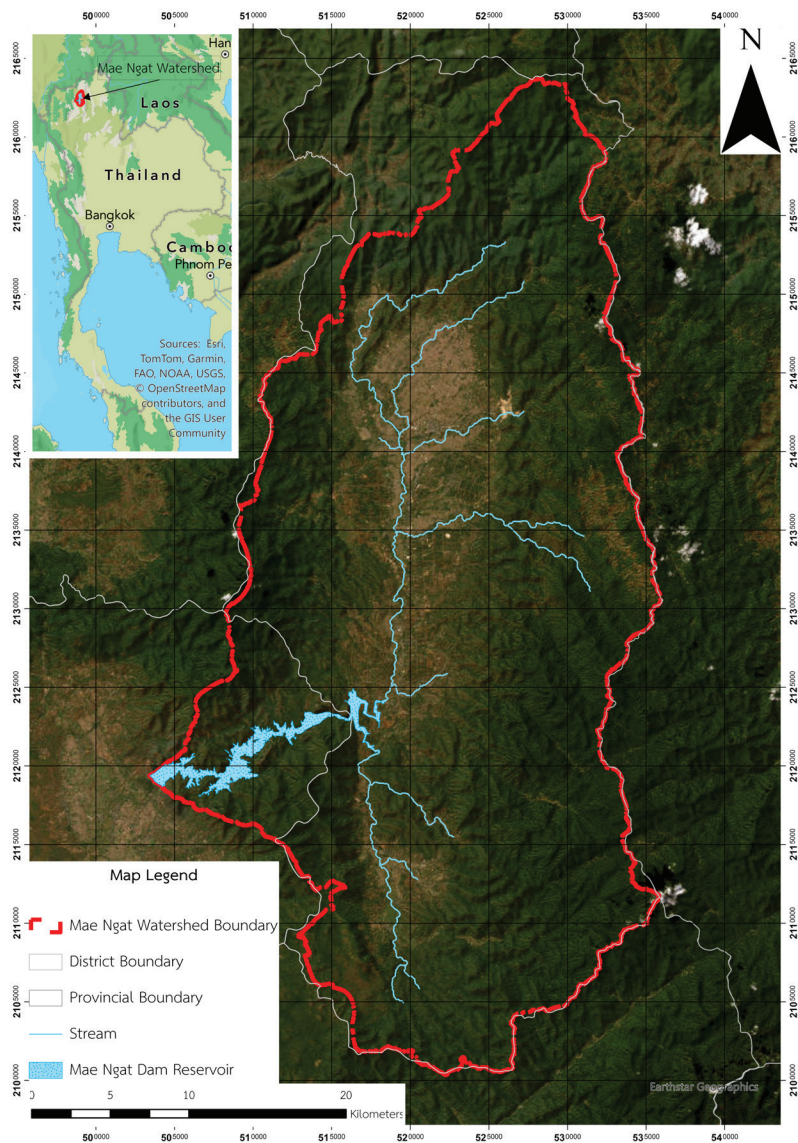


Figure 1 The Mae Ngat watershed boundary within Chiang Mai Province

การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำท่ามีความสำคัญต่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในอนาคต ซึ่งในปัจจุบันแบบจำลอง SWAT (Soil and Water Assessment Tool) เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในการจำลองกระบวนการทางอุทกวิทยาภายในลุ่มน้ำ เนื่องจากสามารถคำนวณการไหลของน้ำท่าและผลกระทบจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมได้อย่างแม่นยำ [5] การใช้ SWAT ร่วมกับ แบบจำลองภูมิอากาศ Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการประเมินแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำท่า เนื่องจาก ข้อมูลจาก CMIP6 ได้รับการพัฒนาให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นทั้งในเชิงพื้นที่และเวลา [6] โดยแบบจำลองส่วนใหญ่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ที่สูงขึ้นจาก CMIP5 ที่มี

ความละเอียดประมาณ $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ [7] เป็นประมาณ $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ หรือละเอียดกว่าใน CMIP6 [8] อีกทั้งยังมีการเพิ่มจำนวนชั้นข้อมูลในแนวดิ่งทั้งในส่วนของชั้นบรรยากาศและมหาสมุทร ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำในการจำลองกระบวนการทางกายภาพที่สำคัญ เช่น การก่อตัวของเมฆ การไหลเวียนในชั้นสตราโตสเฟียร์ และกระบวนการภายในมหาสมุทร นอกจากนี้แบบจำลอง CMIP6 ยังมีการเพิ่มความถี่ของข้อมูลผลลัพธ์ โดยให้ข้อมูลรายวันหรือความถี่สูงในตัวแปรสำคัญ เช่น ปริมาณน้ำฝนและอุณหภูมิ ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการศึกษาผลกระทบด้านอุทกวิทยา การพัฒนาความละเอียดในลักษณะดังกล่าวทำให้ข้อมูลจาก CMIP6 มีความเหมาะสมต่อการประเมินผลกระทบในระดับภูมิภาคและการศึกษาที่เน้นการวิเคราะห์เชิงลึกมากยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจาก CMIP5

ในประเทศไทย มีการศึกษาที่ใช้ SWAT ร่วมกับ CMIP5 เพื่อประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในหลากหลายลุ่มน้ำ เช่น ลุ่มน้ำลำเสียว ซึ่งเป็นลุ่มน้ำสำคัญทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย [9] รวมถึงในลุ่มน้ำตาปี ซึ่งเป็นลุ่มน้ำหลักทางภาคใต้ของประเทศไทย [10] รวมถึงในต่างประเทศมีการใช้ SWAT ร่วมกับ CMIP6 อย่างแพร่หลาย เช่น การประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำตอนบนของแม่น้ำ Huaihe และ ลุ่มน้ำ Qinhuai ในประเทศจีน [11-12] อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการประยุกต์ใช้แบบจำลองเหล่านี้ในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่งัด

ดังนั้น การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำแม่งัดรวมถึงปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล โดยใช้แบบจำลอง SWAT ร่วมกับข้อมูลจาก CMIP6 ที่ได้รับการปรับปรุงความละเอียดให้สูงมากยิ่งขึ้นจาก NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6) ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่พัฒนาโดย NASA สำหรับใช้ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทั่วโลก [13] เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำท่า และเป็นข้อมูลสนับสนุนสำหรับการวางแผนการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในอนาคตอย่างมีประสิทธิภาพ

Methodology

การศึกษานี้ใช้วิธีการจำลองกระบวนการทางอุทกวิทยาในลุ่มน้ำแม่งัดด้วยแบบจำลอง SWAT (Soil and Water Assessment Tool) เพื่อวิเคราะห์และประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำท่า โดยอาศัยข้อมูลพื้นฐานจากหลายแหล่ง ทั้งข้อมูลภูมิประเทศ ดิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน และข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายวัน จากนั้นดำเนินการตั้งค่าแบบจำลอง การปรับแก้ความแม่นยำ และการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าในอนาคตภายใต้สถานการณ์ต่าง ๆ ของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยขั้นตอนทั้งหมดในการดำเนินการศึกษาได้แสดงไว้อย่างเป็นลำดับใน Figure 2 ซึ่งประกอบด้วยการรวบรวมและเตรียมข้อมูลการตั้งค่าแบบจำลอง SWAT การปรับแก้และสอบเทียบแบบจำลอง ตลอดจนการคาดการณ์ผลกระทบในอนาคต โดยรายละเอียดของพื้นที่ศึกษา และวิธีการศึกษาอธิบายไว้ในหัวข้อย่อยต่อไปนี้

พื้นที่ศึกษา

ลุ่มน้ำแม่งัดเป็นลุ่มน้ำสาขาของลุ่มน้ำปิง (Figure 1) โดยลุ่มน้ำแม่งัดอยู่บริเวณตะออกเฉียงเหนือของ จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งครอบคลุมพื้นที่อำเภอแม่แตง และอำเภอพร้าว ลุ่มน้ำแม่งัดมีพื้นที่ลุ่มน้ำเท่ากับ 1,281 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 4 ของพื้นที่ลุ่มน้ำปิง [14] พื้นที่ลุ่มน้ำแม่งัด ตั้งอยู่เส้นละติจูด $18^{\circ}59'31.72''$ ถึง $19^{\circ}34'8.59''$ เหนือ และลองจิจูด $99^{\circ}1'2.22''$ ถึง $99^{\circ}20'34.99''$ ตะวันออก ในพื้นที่ลุ่มน้ำมีเขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล โดยมีความสูง 59 เมตร ความยาว 1,950 เมตร สามารถกักเก็บน้ำได้ประมาณ 265 ล้านลูกบาศก์ เมตรครอบคลุมพื้นที่ 16 ตารางกิโลเมตร ส่งน้ำให้พื้นที่ชลประทานรวม 188,000 ไร่ [15] ลุ่มน้ำแม่งัด ลักษณะภูมิประเทศมีความหลากหลาย ประกอบด้วยพื้นที่ภูเขาสูงชัน ป่าไม้หนาแน่น พื้นที่เชิงเขา และที่ราบลุ่มแม่น้ำ พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรม โดยมีพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ ได้แก่ ข้าว ข้าวโพด และไม้ผล [16]

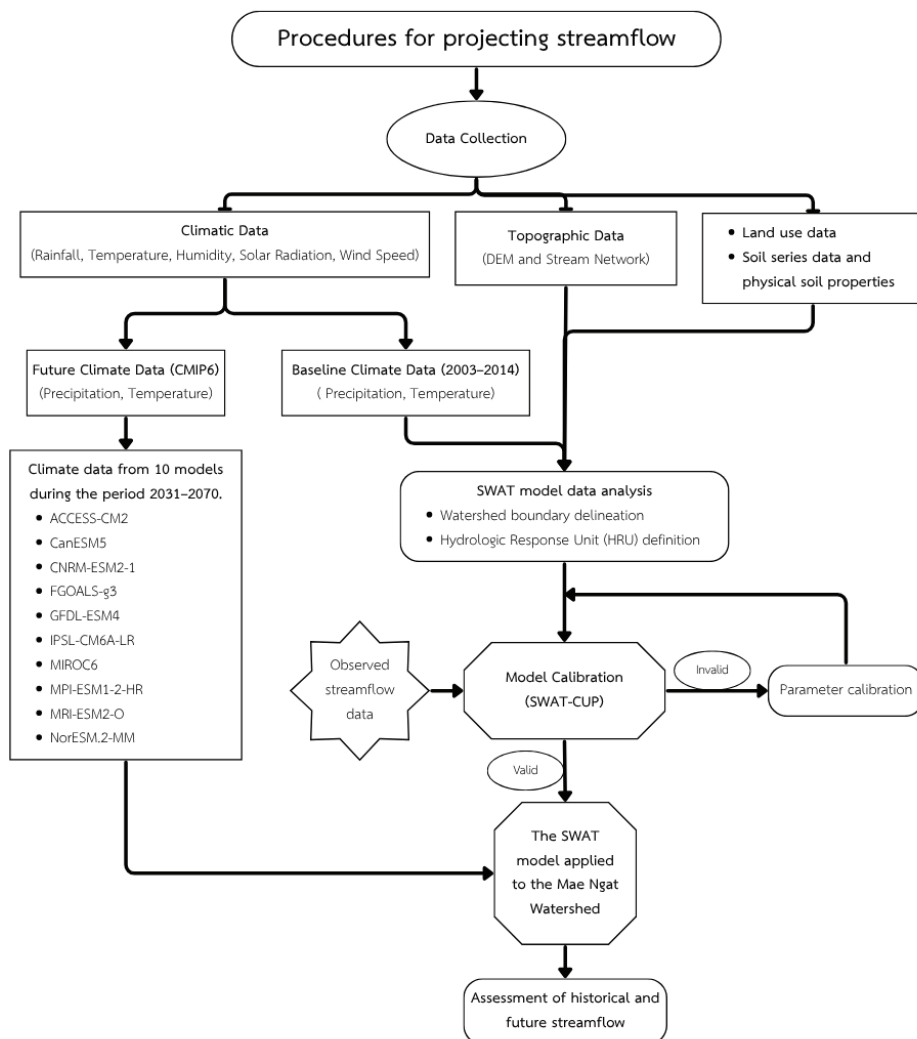


Figure 2 Procedures for projecting streamflow in the Mae Ngat watershed

รายละเอียดของแบบจำลอง SWAT

Soil and Water Assessment Tool หรือ SWAT เป็นแบบจำลองเชิงกระบวนการที่พัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมของน้ำ ตะกอน และสารอาหารในลุ่มน้ำ โดยสามารถจำลองอิทธิพลของปัจจัยทางกายภาพ เช่น สภาพภูมิอากาศ ลักษณะทางธรณีสัณฐาน การใช้ที่ดิน และกิจกรรมทางการเกษตร แบบจำลองนี้ได้รับการพัฒนาโดย Arnold และคณะ [5] และถูกนำไปใช้ในหลายพื้นที่ทั่วโลก รวมถึงประเทศไทย [9-12] ซึ่งมีความจำเป็นในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ ในการจำลองสมมูลน้ำในลุ่มน้ำแม่จิดสามารถใช้สมการพื้นฐานของแบบจำลอง SWAT ซึ่งอาศัยหลักการของสมมูลน้ำระหว่างปริมาณน้ำฝน น้ำท่า การซึมลงดิน และการระเหยคายน้ำ ดังแสดงในสมการที่ (1) [17]

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (P_i - Q_{surf_i} - ET_i - W_{seep_i} - Q_{gwi}) \quad (1)$$

โดยที่ SW_t คือ ปริมาณน้ำในดินที่สะสมอยู่ ณ วันที่ i (มิลลิเมตร) SW_0 คือ ปริมาณน้ำเริ่มต้นของช่วงเวลาการจำลอง (มิลลิเมตร) P_i คือ ปริมาณน้ำฝนในวันที่ i (มิลลิเมตร) Q_{surf_i} คือ ปริมาณน้ำท่าผิวดินที่ไหลออกในวันที่ i (มิลลิเมตร) ET_i คือ ปริมาณการระเหยและการคายน้ำของพืชในวันที่ i (มิลลิเมตร) W_{seep_i} คือ ปริมาณน้ำที่ซึมผ่านชั้นดินลงสู่ระดับลึกในวันที่ i (มิลลิเมตร) และ Q_{gwi} คือ ปริมาณน้ำใต้ดินที่ระบายออกจากระบบลุ่มน้ำในวันที่ i (มิลลิเมตร)

การนำ SWAT มาประยุกต์ใช้ในลุ่มน้ำแม่จิดจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการวางแผนบริหารจัดการน้ำ

การรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในแบบจำลอง SWAT ประกอบด้วยข้อมูลทางกายภาพของลุ่มน้ำและข้อมูลสภาพภูมิอากาศรายวัน โดยข้อมูลทางกายภาพได้แก่ แบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM), ชนิดและคุณสมบัติของดิน, รวมถึงการใช้ประโยชน์ที่ดิน ส่วนข้อมูลสภาพภูมิอากาศรายวันประกอบด้วย ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด ความชื้นสัมพัทธ์ รังสีแสงอาทิตย์ และความเร็วลม ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยสำคัญในการจำลองกระบวนการอุทกวิทยาภายในลุ่มน้ำ ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลสภาพภูมิอากาศรายวันหรือข้อมูลไม่สมบูรณ์ แบบจำลอง SWAT สามารถประมาณค่าดังกล่าวโดยใช้แบบจำลองย่อยที่เรียกว่า Weather Generator ซึ่งอาศัยข้อมูลทางสถิติจากสถานีอุตุนิยมวิทยาในการสร้างพารามิเตอร์ของสภาพอากาศจำลอง [18] โดยรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลอง SWAT ของการศึกษานี้แสดงไว้ใน Table 1

ในการศึกษานี้ได้กำหนดช่วงเวลาการจำลองปริมาณน้ำท่าด้วยแบบจำลอง SWAT ครอบคลุมช่วง พ.ศ. 2546–2613 โดยแบ่งเป็นช่วงปีฐาน (Baseline) ในช่วง พ.ศ. 2546–2557 และช่วงการคาดการณ์อนาคต (Future) ในช่วง พ.ศ. 2574–2613 เพื่อนำไปใช้ประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในลุ่มน้ำ จึงมีการรวบรวมข้อมูลดังต่อไปนี้

สำหรับข้อมูลปริมาณน้ำฝน ได้ทำการรวบรวมจากสถานีของกรมอุตุนิยมวิทยาภายในลุ่มน้ำจำนวน 1 สถานี จากสถานีของกรมชลประทานจำนวน 2 สถานี และจากสถานีของกรมทรัพยากรน้ำจำนวน 1 สถานี และในส่วนของคุณลักษณะภูมิประเทศ-ต่ำสุด ได้ทำการรวบรวมจากสถานีของกรมอุตุนิยมวิทยาบริเวณใกล้เคียงลุ่มน้ำจำนวน 2 สถานี ได้แก่ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ อ.เมืองเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ และสถานีตรวจอากาศลำพูน อ.เมืองลำพูน จ.ลำพูน ดังแสดงไว้ใน Figure 3 โดยจะเป็นข้อมูลช่วง พ.ศ. 2546–2557

ในการศึกษานี้ เลือกใช้ข้อมูลระดับความสูงเชิงเลข (DEM) ที่มีความละเอียด 30 x 30 เมตร เนื่องจากมีความละเอียดเหมาะสมและเพียงพอสำหรับการจำลองลุ่มน้ำด้วยแบบจำลอง SWAT โดย DEM ช่วยในการกำหนดขอบเขตลุ่มน้ำ คำนวณความลาดชัน และวิเคราะห์เส้นทางการไหลของน้ำได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งทางกายภาพของลุ่มน้ำกับข้อมูลภูมิสารสนเทศ (GIS) จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง พบว่าผลลัพธ์มีความสอดคล้องและน่าพอใจ

สำหรับข้อมูลดินที่ใช้ในการศึกษาเป็นข้อมูลกลุ่มชุดดิน (Soil Series Group) ที่จัดเก็บจากภาคสนาม โดยกรมพัฒนาที่ดิน ซึ่งมีความแม่นยำและสะท้อนลักษณะของดินในพื้นที่ได้อย่างแท้จริง โดยข้อมูลที่ได้จากกรมพัฒนาที่ดินประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีพื้นฐาน ได้แก่ เนื้อดิน (Sand, Silt, Clay), ความลึกของชั้นดิน, ร้อยละของชั้นส่วนหิน (% Rock), ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (% Organic Carbon), ความเป็นกรด-ด่าง (pH), และความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation Exchange Capacity, CEC) อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง SWAT จำเป็นต้องใช้ค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมสำหรับการคำนวณกระบวนการทางอุทกวิทยา เช่น ความหนาแน่นรวม (Bulk Density), ความจุน้ำที่ใช้ได้ (Available Water Content, AWC), การนำไฮดรอลิกอิ่มตัว (Saturated Hydraulic Conductivity, SHC), และความชื้นภาคสนาม (Field Capacity, FC) ซึ่งข้อมูลดังกล่าวไม่ได้มีอยู่ในฐานข้อมูลของกรมพัฒนาที่ดินโดยตรง ในการศึกษาได้ดำเนินการคำนวณค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมดังกล่าว โดยอ้างอิงจากสมการเชิงเส้นและแนวทางที่แนะนำในคู่มือการใช้งานแบบจำลอง SWAT [18] รวมถึงใช้ซอฟต์แวร์ Soil Water Characteristics [19] เป็นเครื่องมือในการคำนวณ โดยนำข้อมูลเนื้อดิน (%Sand, %Silt, %Clay) และ %Organic Carbon เป็นข้อมูลนำเข้า เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นให้ครบถ้วนก่อนนำไปใช้ในการจำลองในแบบจำลอง SWAT

ส่วนข้อมูลการใช้ที่ดินในจังหวัดเชียงใหม่และลำพูน เนื่องจากการศึกษาได้ เลือกใช้ข้อมูล พ.ศ. 2553 จากกรมพัฒนาที่ดิน ซึ่งเป็นข้อมูลที่สอดคล้องกับช่วงปีฐาน (พ.ศ. 2546–2557) ของการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าในแบบจำลอง

Table 1 Input data used in the SWAT model

No.	Data Type	Time Period	Source
1	Digital Elevation Model (DEM), 30 m x 30 m resolution	2024	NASA EarthData (https://search.earthdata.nasa.gov/search)
2	Soil data	2018	Land Development Department, Thailand
3	Land use/land cover data	2010	Land Development Department, Thailand
4	Daily precipitation and minimum - maximum temperature	2003 -2014	Thai Meteorological Department, Royal Irrigation Department, Department of Water Resources
5	Daily streamflow data	2003 -2014	Royal Irrigation Department and Department of Water Resources

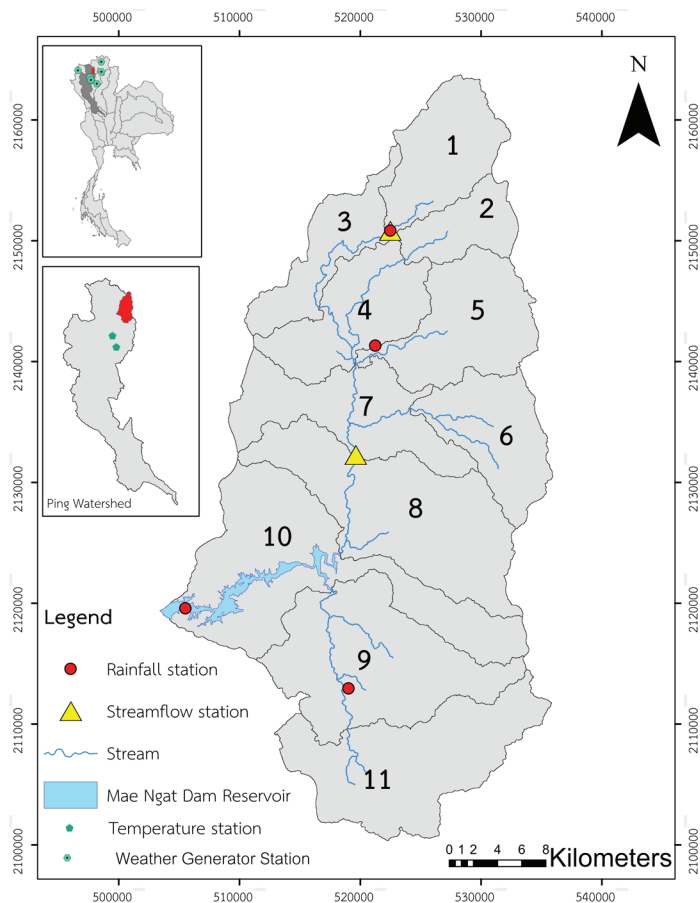


Figure 3 Locations of streamflow gauging stations and meteorological stations

การตั้งค่าพื้นฐานในแบบจำลอง SWAT ก่อนการประมวลผล

การศึกษานี้ใช้โปรแกรม ArcSWAT 2012 (เวอร์ชัน 2012.10.4.21) ในการสร้างแบบจำลอง โดยเริ่มจากการใช้ข้อมูล DEM เพื่อกำหนดแนวลำน้ำและแบ่งพื้นที่ออกเป็นลุ่มน้ำย่อย (sub-basins) ซึ่งในแต่ละลุ่มน้ำย่อยจะถูกแบ่งต่อเป็นหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (Hydrologic Response Units: HRUs) ตามลักษณะการใช้ที่ดิน ชนิดของดิน และระดับความลาดชันของผิวดิน สำหรับการจัดกลุ่มความลาดชันในการศึกษานี้ แบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ 0–5%, 5–12%, 12–20%, 20–35% และมากกว่า 35% โดยอ้างอิงจากแนวทางของกรมพัฒนาที่ดิน ซึ่งได้จัดระดับความลาดชันไว้ทั้งหมด 6 ระดับ [20] การกำหนดช่วงความลาดชันได้รับการปรับให้เหมาะสมกับการจำลองลุ่มน้ำ เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ศึกษา และข้อมูลที่มีอยู่ โดยช่วงความลาดชันที่กำหนดสามารถแทนลักษณะภูมิประเทศในแต่ละประเภท ได้แก่ พื้นที่ลูกคลื่นลอนลาดเล็กน้อย พื้นที่ลูกคลื่นลอนลาด พื้นที่ลูกคลื่นลอนชัน พื้นที่เนินเขา และพื้นที่ลาดชันเชิงซ้อนหรือพื้นที่ลาดชันสูง ตามลำดับ สำหรับกระบวนการคำนวณในแบบจำลอง SWAT จะเริ่มต้นจากระดับหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา จากนั้นจึงรวมผลลัพธ์ในระดับลุ่มน้ำย่อย (Sub-basin) ก่อนเคลื่อนเข้าสู่ระบบลำน้ำหลักในลำดับถัดไป ในการศึกษานี้ กำหนดขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยขึ้นสำหรับการสร้างเส้นลำน้ำเท่ากับ 60 ตารางกิโลเมตร และกำหนดเกณฑ์ในการแบ่งหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (HRUs) โดยพิจารณาจากสัดส่วนของการใช้ประโยชน์ที่ดิน ชนิดของดิน และความลาดชันของผิวดิน ซึ่งต้องมีพื้นที่ครอบคลุมมากกว่าร้อยละ 10 ของแต่ละลุ่มน้ำย่อย ทั้งนี้เพื่อจำกัดจำนวน HRUs ไม่ให้มีมากเกินไปจนความจำเป็น อันอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของการประมวลผลแบบจำลอง โดยเกณฑ์ดังกล่าวอยู่ภายใต้ช่วงที่คู่มือการใช้งานแบบจำลอง SWAT แนะนำ ซึ่งอยู่ระหว่างร้อยละ 5–20 [21] หลังจากดำเนินการแบ่งเส้นลำน้ำและพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยแล้ว ได้มีการตรวจสอบความถูกต้องเชิงพื้นที่โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลภูมิสารสนเทศ (GIS) ของเส้นลำน้ำที่ได้จากสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) (GISTDA) [22] พบว่าเส้นลำน้ำหลักของลุ่มน้ำแม่จืดไม่มีความคลาดเคลื่อนอย่างมีนัยสำคัญ และขอบเขตลุ่มน้ำหลักหลังจากการแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยมีความคล้ายคลึงกับข้อมูลที่ได้จากสำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ [23] ดังแสดงไว้ใน Figure 4

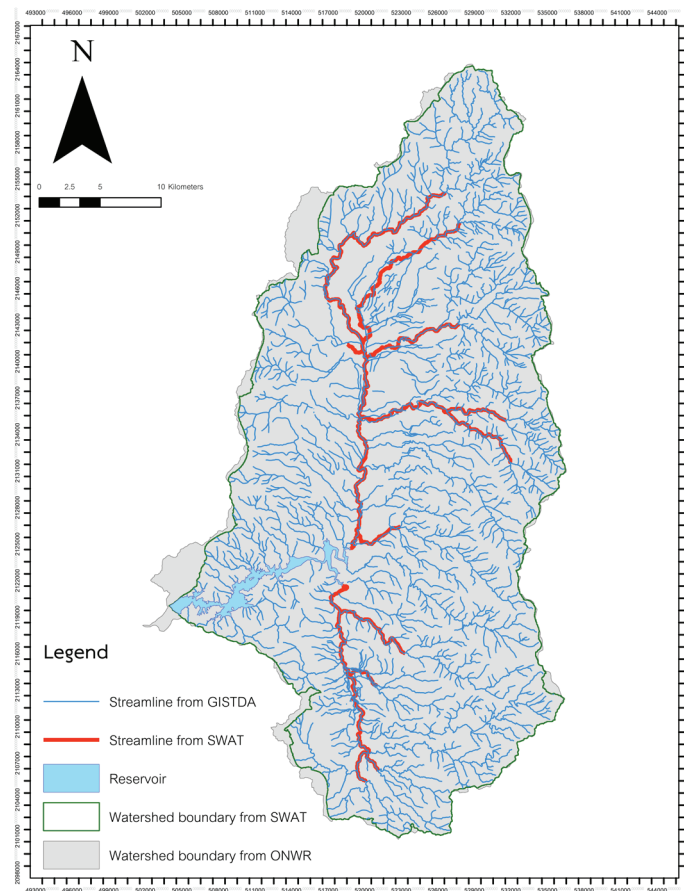


Figure 4 Comparison between SWAT Simulation Results and GIS Data

ในกรณีที่ข้อมูลภูมิอากาศรายวันมีการขาดหาย จะใช้ Weather Generator ที่อ้างอิงจากสถิติข้อมูลสภาพภูมิอากาศรายเดือนเฉลี่ยในรอบ 30 ปี (พ.ศ. 2524–2553) จากสถานีภูมิอากาศในพื้นที่ศึกษาและบริเวณใกล้เคียงเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณ Weather Generator ซึ่งได้แก่ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จ.เชียงใหม่ สถานีอุตุนิยมวิทยาลำพูน สถานีอุตุนิยมวิทยาลำปาง สถานีอุตุนิยมวิทยาแม่ฮ่องสอน สถานีอุตุนิยมวิทยาเชียงราย และสถานีอุตุนิยมวิทยาพะเยา ดังแสดงใน Figure 3

Table 2 Parameters for model calibration

Parameter	Meaning	Unit	Value	
			Min	Max
r__CN2.mgt	SCS runoff curve number for surface runoff potential.	-	-0.3	0.3
v__ALPHA_BF.gw	Baseflow recession constant; controls groundwater flow response to recharge.	1/day	0	1
v__GW_DELAY.gw	Time lag between aquifer recharge and groundwater flow response.	days	0	500
v__GWQMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for groundwater flow.	mm H ₂ O	0	5000
v__ESCO.hru	Soil evaporation compensation factor; controls evaporation depth profile.	-	0	1
v__RCHRG_DP.gw	Fraction of water percolating from root zone contributing to deep aquifer recharge.	-	0	1
v__GW_REVAP.gw	Groundwater "revap" coefficient; controls water movement from shallow aquifer to unsaturated root zone.	-	0.02	0.2
r__SOL_AWC.sol	Available water capacity of soil layer; difference between field capacity and wilting point.	mmH ₂ O /mmsoil	-0.25	0.25
r__SOL_K.sol	Saturated hydraulic conductivity; indicates ease of water movement through soil.	mm/hr	-0.25	0.25
v__CH_N2.rte	Manning's roughness coefficient; controls flow velocity and resistance in main channel	-	0	0.3

การตรวจสอบความอ่อนไหวของตัวแปร (Sensitivity Analysis) ในแบบจำลอง

ในการศึกษานี้วิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรได้โดยการใช้แบบจำลอง SWAT-CUP Version 5.1.6.2 (SWAT Calibration and Uncertainty Procedures) โดยทำการศึกษาค่าตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณน้ำท่า ณ สถานีน้ำท่า P.56a ซึ่งใช้ข้อมูลน้ำท่ารายเดือนในช่วง พ.ศ. 2546 จนถึง พ.ศ. 2552 (84 เดือน) และข้อมูลการใช้ที่ดินของ พ.ศ. 2553 เป็นข้อมูลทดสอบ ได้กำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการประเมินน้ำท่าไว้ทั้งหมด 10 ตัวแปร [24, 25] ดังแสดงใน Table 2 ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ดำเนินการจำนวน 500 ครั้ง โดยกำหนดค่า Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) เป็นค่า Objective Function เพื่อใช้ในการประเมินความอ่อนไหวของตัวแปรผ่านค่าสถิติ t-Stat และ P-Value ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการทดสอบสมมติฐานว่าตัวแปรที่พิจารณามีความสัมพันธ์กับค่า Objective Function หรือไม่ โดยอาศัยการสร้างสมการความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการถดถอยเชิงซ้อน

การปรับแก้และสอบเทียบแบบจำลอง (Model Calibration and Validation)

การปรับแก้แบบจำลองในครั้งนี้อ้างอิงผลการศึกษาจากแบบจำลอง SWAT-CUP 2012 Version 5.1.6.2 โดยใช้วิธี Sequential Uncertainty Fitting version 2 (SUFI2) [26] ในการประเมิน เพื่อให้ผลการจำลองปริมาณน้ำท่ามีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ตรวจวัดจริง โดยทำการศึกษาและเลือกชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการจำลองปริมาณน้ำท่ารายเดือน ณ สถานีน้ำท่า P.56a (ตั้งอยู่ที่ตำบลเขื่อนผาก อำเภอพร้าวก้าง จังหวัดเชียงใหม่) ซึ่งตั้งอยู่บริเวณตอนกลางของกลุ่มน้ำ โดยใช้ข้อมูลช่วง พ.ศ. 2546-2552 (รวมระยะเวลา 84 เดือน) สำหรับการปรับแก้แบบจำลอง และใช้ข้อมูลช่วง พ.ศ. 2553-2557 (รวมระยะเวลา 60 เดือน) สำหรับสอบเทียบแบบจำลอง ทั้งนี้ เนื่องจากสถานี P.56a มีการจัดเก็บข้อมูลปริมาณน้ำท่าอย่างต่อเนื่องและครบถ้วน จึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการปรับแก้และสอบเทียบความแม่นยำของแบบจำลอง

สำหรับเกณฑ์ในการประเมินความถูกต้องและความสอดคล้องของผลการจำลองปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง SWAT เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ตรวจวัดจริงจากสถานีน้ำท่า ใช้ดัชนีเชิงคุณภาพที่เป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายในการประเมินความแม่นยำและประสิทธิภาพของแบบจำลอง ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2), ค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองตามเกณฑ์ของ Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe Efficiency: NSE) และค่าเปอร์เซ็นต์ความเอนเอียง (Percent Bias: PBIAS) ดังสมการที่ (2) (3) และ (4) ตามลำดับ และได้กำหนดเกณฑ์ประสิทธิภาพของแบบจำลอง [27-29] ดังแสดงใน Table 3

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \right)^2 \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) \times 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (4)$$

เมื่อ i คือ ลำดับที่ของข้อมูล, n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด, O_i คือ ค่าจากการตรวจวัด, $\bar{O}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลตรวจวัดทั้งหมด, S_i คือ ค่าจากแบบจำลอง และ $\bar{S}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากแบบจำลองทั้งหมด

Table 3 Model performance criteria [27–29]

Performance Rating	R ²	NSE	PBIAS
Very good	0.75 - 1.00	0.75 - 1.00	< $\pm 10\%$
Good	0.65 - 0.75	0.65 - 0.75	$\pm 10 - \pm 15\%$
Satisfactory	0.50 - 0.65	0.50 - 0.65	$\pm 15 - \pm 25\%$
Unsatisfactory	< 0.50	< 0.50	> $\pm 25\%$

การรวบรวมข้อมูลภูมิอากาศของแบบจำลองภูมิอากาศโลก

การศึกษานี้ใช้ข้อมูลจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก (GCMs) ภายใต้โครงการ NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP) ซึ่งพัฒนาโดยอิงจากโครงการ Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) ข้อมูลชุดนี้ประกอบด้วยตัวแปรอุตุนิยมวิทยาหลากหลายชนิด โดยผ่านการปรับแก้ความเอนเอียงและกระจายเชิงพื้นที่ (Bias Correction and Spatial Disaggregation: BCSD) ในระดับ รายวัน ซึ่งเป็นการพัฒนาเพิ่มเติมจากวิธีรายเดือนที่ใช้ใน NEX-GDDP รุ่นก่อนหน้า ในทุกสถานการณ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจกระดับ Tier 1 หรือ Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) และมีความละเอียดแนวนอน 1/4 องศา ปัจจุบันมีตัวแปร 8 ชนิดจากสถานการณ์การจำลองของ CMIP6 ซึ่งเป็นข้อมูลจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก (GCMs) จำนวน 35 แบบจำลอง โดยแบ่งเป็น 5 สถานการณ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจก ได้แก่ ในอดีต (พ.ศ. 2494–2557) 1 สถานการณ์ คือ historical และในส่วนของอนาคต (พ.ศ. 2558–2643) 4 สถานการณ์ คือ SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 และ SSP5-8.5 ทำให้ชุดข้อมูล NEX-GDDP-CMIP6 เป็นแหล่งข้อมูลที่มีเหมาะสำหรับการทำความเข้าใจและจัดการกับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยให้การคาดการณ์รายวันที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่สูง [11]

สถานการณ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจก (Shared Socioeconomic Pathways: SSPs) [30] เป็นกรอบแนวคิดที่พัฒนาโดยชุมชนนักวิจัยด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบและการปรับตัวภายใต้บริบทของการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมที่หลากหลาย ร่วมกับระดับการบังคับรังสี (Radiative Forcing) ในช่วงปลายศตวรรษที่ 21 โดยในโครงการ CMIP6 มีการใช้ SSP หลัก 4 แบบ ได้แก่ SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 และ SSP5-8.5 ซึ่งสะท้อนถึงเส้นทางการพัฒนาที่แตกต่างกันดังนี้

SSP1-2.6 แสดงถึงโลกที่มุ่งเน้นการพัฒนาที่ยั่งยืน มีการลงทุนในนโยบายด้านพลังงานสะอาด เทคโนโลยีสีเขียว และการลดความเหลื่อมล้ำอย่างจริงจัง ส่งผลให้การปล่อยแก๊สเรือนกระจกลดลงและสามารถควบคุมภาวะโลกร้อนไว้ไม่เกิน 2°C โดยระดับการบังคับรังสีอยู่ที่ประมาณ 2.6 W/m² ภายใน พ.ศ. 2643

SSP2-4.5 เป็นแนวโน้มการพัฒนาที่ไม่รุนแรงนักและสอดคล้องกับแนวโน้มในอดีต มีการดำเนินนโยบายสิ่งแวดล้อมในระดับปานกลาง ทำให้ระดับการบังคับรังสีอยู่ที่ประมาณ 4.5 W/m² ภายใน พ.ศ. 2643

SSP3-7.0 สะท้อนภาพของโลกที่มีการแข่งขันระหว่างภูมิภาคสูง ความร่วมมือระหว่างประเทศลดลง

การพัฒนาทางเศรษฐกิจเกิดขึ้นแบบไม่ทั่วถึง และยังคงมีการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลัก ส่งผลให้ระดับการบังคับรังสีสูงถึง 7.0 W/m^2 ภายใน พ.ศ. 2643

SSP5-8.5 เป็นสถานการณ์ที่โลกพัฒนาอย่างรวดเร็วภายใต้การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลอย่างเข้มข้น มีการเติบโตทางเศรษฐกิจสูง แต่ขาดการควบคุมด้านสิ่งแวดล้อม ทำให้ระดับการบังคับรังสีสูงสุดที่ประมาณ 8.5 W/m^2 ภายใน พ.ศ. 2643 ถือเป็นกรณีรุนแรงที่สุดที่ใช้เป็นฐานการวิเคราะห์ผลกระทบที่รุนแรงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการรวบรวมข้อมูลภูมิอากาศจาก NASA Center for Climate Simulation (NCCS) ในกรอบเวลา 40 ปีในอนาคต (พ.ศ. 2574–2613) โดยใช้ทั้งหมด 10 แบบจำลองภูมิอากาศโลก (Table 4) ในแต่ละแบบจำลองจะมีสถานการณ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจก 4 สถานการณ์ ได้แก่ SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 และ SSP5-8.5 โดยเป็นข้อมูลปริมาณน้ำฝน และข้อมูลอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด ซึ่งในการพิจารณาเลือกแบบจำลองภูมิอากาศโลกทั้ง 10 แบบจำลอง โดยพิจารณาจาก ความหลากหลายทางภูมิภาค และแหล่งที่มาของแบบจำลอง ความสามารถในการจัดเตรียมข้อมูลรายวันของตัวแปรสำคัญ ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน และ อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด ตลอดจนการที่แบบจำลองเหล่านี้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [31] นอกจากนี้ยังคำนึงถึงความครบถ้วนของตัวแทน สถานการณ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจกทั้ง 4 ระดับดังกล่าว

ข้อมูลที่ได้รับจากแบบจำลองภูมิอากาศโลกทั้งหมด ต้องทำการปรับแก้ความเอนเอียงของข้อมูล (Bias Correction) เพื่อให้ได้ผลที่คลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยจะทำการปรับแก้กับสถานีวัดน้ำฝนทั้ง 4 สถานี และสถานีวัดอุณหภูมิทั้ง 2 สถานี สำหรับการปรับแก้จะใช้วิธี Linear Scaling Model [32] โดยข้อมูลปริมาณน้ำฝนปรับแก้ตามสมการที่ (5) และอุณหภูมิตามสมการที่ (6)

$$P'_i = P_i \times \frac{\bar{P}_{Observed}}{\bar{P}_{Simulated}} \quad (5)$$

โดยที่ P'_i คือ ปริมาณน้ำฝนรายวันหลังปรับแก้ความคลาดเคลื่อน, P_i คือ ปริมาณน้ำฝนรายวันก่อนปรับแก้ความคลาดเคลื่อน, $\bar{P}_{Observed}$ คือ ปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยราย 15 ปี จากการตรวจวัดจริงและ $\bar{P}_{Simulated}$ คือ ปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยราย 15 ปี จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกที่กริด i

$$T'_i = T_i - \bar{T}_{Simulated} + \bar{T}_{Observed} \quad (6)$$

โดยที่ T'_i คือ ข้อมูลอุณหภูมิรายวันหลังปรับแก้ความคลาดเคลื่อน, T_i ข้อมูลอุณหภูมิรายวันก่อนปรับแก้ความคลาดเคลื่อน, $\bar{T}_{Simulated}$ คือ ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนเฉลี่ยราย 15 ปี จากการตรวจวัดจริงและ $\bar{T}_{Simulated}$ คือ ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันเฉลี่ยราย 15 ปี จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกที่กริด i

Table 4 List of 10 Global Climate Models (GCMs) from the NEX-GDDP-CMIP6 dataset

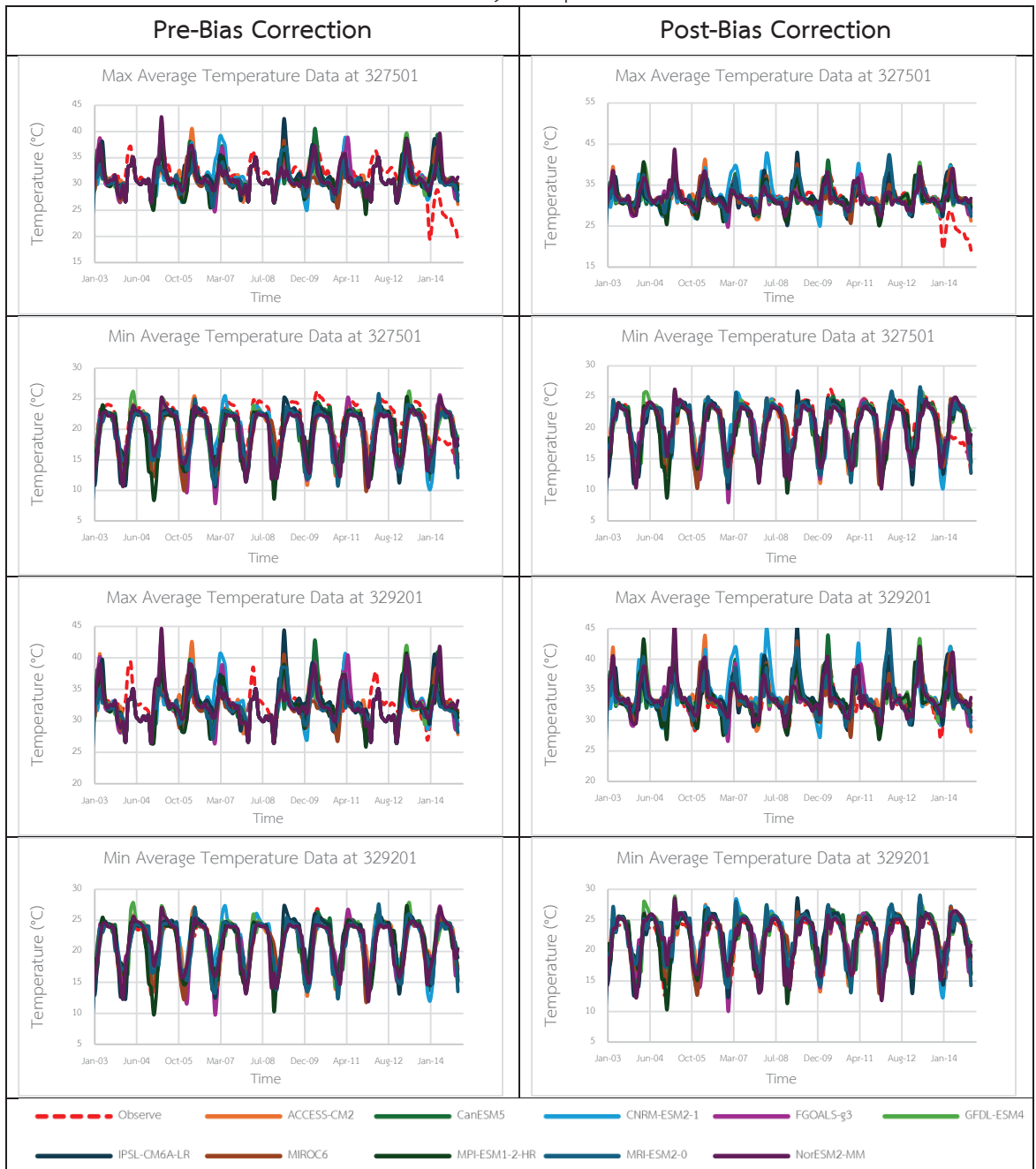
Model Name	Intuition/Country	Horizontal Resolution (lon x lat)	
		Grid	Degree
ACCESS-CM2	CSIRO-ARCCSS/Australia	144 x 192	1.875° x 125°
CanESM5	CCCma/Canada	64 x 128	2.812° x 2.77°
CNRM-ESM2-1	CNRM-CERFACS/France	128 x 256	1.406° x 1.406°
FGOALS-g3	CAS/China	180 x 80	2° x 2.025°
GFDL-ESM4	NOAA-GFDL/USA	288 x 180	1.25° x 1°
IPSL-CM6A-LR	IPSL/France	144 x 143	2.5° x 1.259°
MIROC6	MIROC/Japan	256 x 128	1.403° x 1403°
MPI-ESM1-2-HR	MPI-M, DWD, DKRZ /Germany	384 x 192	0.938° x 0.939°
MRI-ESM2-O	MRI/Japan	320 x 160	1.125° x 1.125°
NorESM.2-MM	NCC / Norway	288 x 192	1.25° x 0.94°

Results and Discussion

ผลการปรับแก้ความเอนเอียงของข้อมูล (Bias Correction)

ได้ผลการปรับแก้ความเอนเอียงของข้อมูล (Bias Correction) ของข้อมูลปริมาณน้ำฝน ณ สถานีฝน 4 สถานี โดยมีรหัสสถานียฝนดังต่อไปนี้ ได้แก่ 060301, 327006, 07670 และ 07780 ซึ่งแสดงผลไว้ใน Table 5 และข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด ณ สถานีตรวจวัดอุณหภูมิ โดยมีรหัสสถานีตรวจวัดอุณหภูมิดังต่อไปนี้ ได้แก่ 327501 และ 329201 โดยแสดงผลไว้ใน Table 6



Table 6 Climate Model vs Observed Monthly Temperatures (2003–2014)

ผลการจำลองสภาพพื้นที่ลุ่มน้ำด้วยแบบจำลอง SWAT

ผลการจำลองสภาพพื้นที่ลุ่มน้ำแม่งัดโดยแบบจำลอง SWAT ที่มีการกำหนดระดับความสูงผิวดินจากข้อมูลระดับความสูงเชิงเลข (DEM) 30 ม. x 30 ม. พบว่าลุ่มน้ำแม่งัดจากแบบจำลอง SWAT มีพื้นที่รับน้ำเท่ากับ 1227.94 ตารางกิโลเมตร ซึ่งมีความใกล้เคียงกับข้อมูลของพื้นที่รับน้ำจากกรมชลประทานที่น้ำเท่ากับ

1281 ตารางกิโลเมตร [3] และแบ่งลุ่มน้ำย่อยออกเป็น 11 ลุ่มน้ำ ดังแสดงใน Figure 5 และจากการกำหนดหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (HRUs) ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ตามลักษณะประเภทของการใช้ประโยชน์ที่ดิน ข้อมูลของดิน และความชันของพื้นที่ผิว ให้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 สามารถกำหนด HRUs ของลุ่มน้ำแม่งัดได้ทั้งหมด 58 หน่วย ดังแสดงไว้ใน Table 7

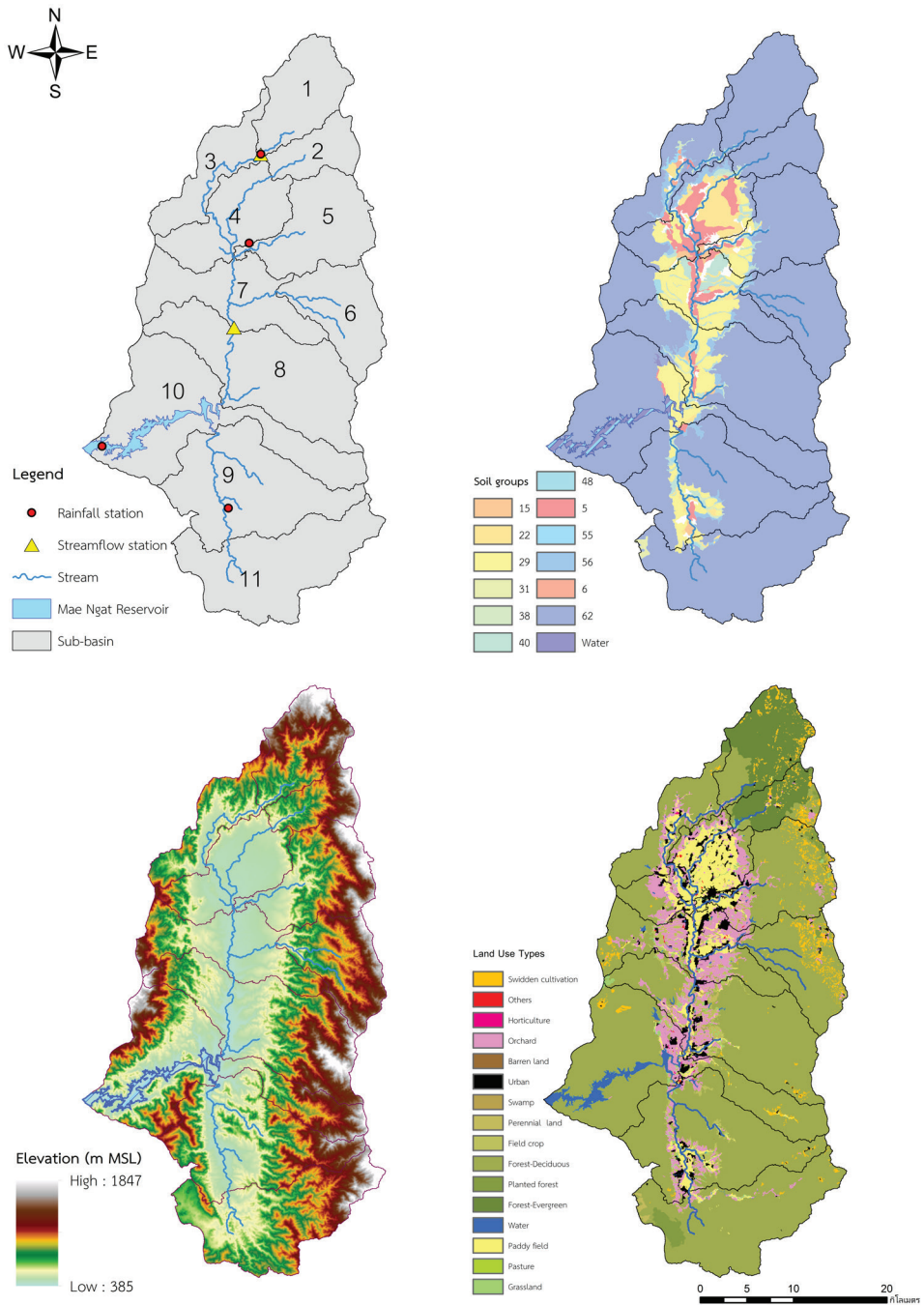


Figure 5 Watershed Simulation Results using the SWAT Model

Table 7 Sub-basin delineation and Hydrologic Response Units (HRUs) of the Mae Ngat watershed in the SWAT model

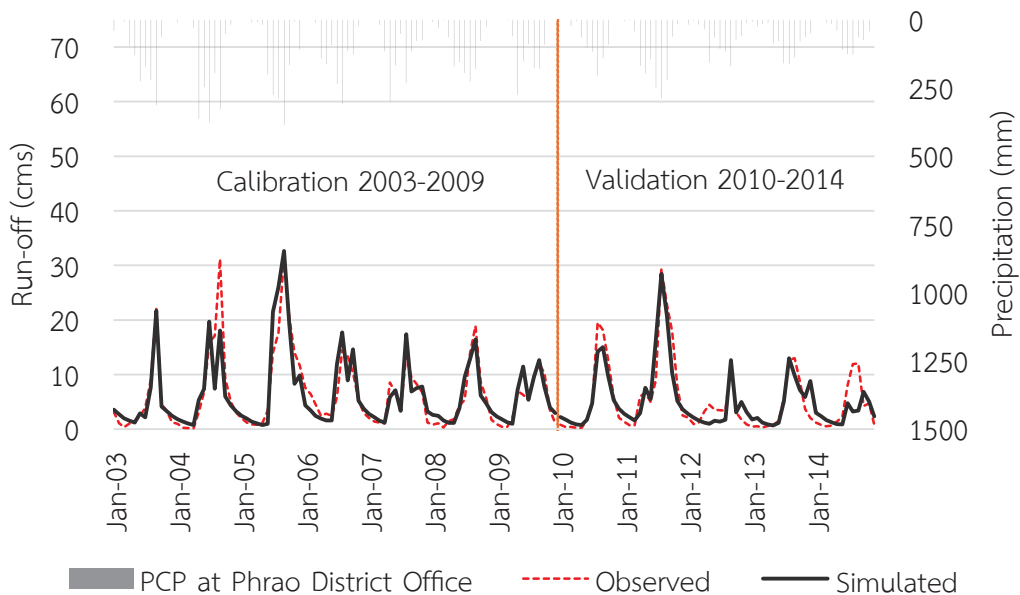
Subbasin	Area (km ²)	HRUs
1	78.22	4
2	43.83	5
3	62.37	3
4	89.32	14
5	99.04	2
6	79.89	6
7	101.02	12
8	169.78	3
9	163.29	3
10	190.82	3
11	150.37	3
Sum	1227.94	58

ผลการปรับแก้และสอบเทียบแบบจำลอง SWAT (Model Calibration and Validation)

จาก Figure 6 แสดงผลการจำลองปริมาณน้ำท่าเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ตรวจวัดจริง ณ สถานีวัดน้ำท่า P.56a สำหรับข้อมูลปริมาณฝนที่ใช้ในการแสดงใน Figure 6 เป็นข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่ว่าการอำเภอพร้าว (รหัสสถานี 327006) ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลที่ใช้ในการปรับแก้และทวนสอบแบบจำลอง โดยได้ดำเนินการปรับแก้แบบจำลองโดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนตั้งแต่ พ.ศ. 2546-2552 รวม 84 เดือน ซึ่งผลการปรับแก้พบว่า ค่า R_2 มีค่าเท่ากับ 0.81 ค่า NSE มีค่าเท่ากับ 0.81 และ PBIAS มีค่าเท่ากับ 0.85% สำหรับการสอบเทียบแบบจำลองในช่วง พ.ศ. 2553-2557 รวม 60 เดือน พบว่า ค่า R_2 มีค่าเท่ากับ 0.79 ค่า NSE มีค่าเท่ากับ 0.79 และ PBIAS มีค่าเท่ากับ -4.94% และรวมทั้งหมดตั้งแต่ พ.ศ. 2546-2557 พบว่า ค่า R_2 มีค่าเท่ากับ 0.80 ค่า NSE มีค่าเท่ากับ 0.80 และ PBIAS มีค่าเท่ากับ -1.31% (Table 8) ซึ่งจากผลการปรับแก้และสอบเทียบแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีระดับความน่าเชื่อถืออยู่ในระดับที่ยอมรับได้

Table 8 SWAT Model Calibration and Validation at Gauging Station P.56a

Parameter	Station (P.56a)		
	Calibrated	Validated	Overall
	(2003-2009)	(2010-2014)	(2003-2014)
R ²	0.81	0.79	0.80
NSE	0.81	0.79	0.80
PBIAS	0.85	-4.94	-1.31

**Figure 6** Comparison of simulated streamflow with observed data at streamflow gauging station P.56a to evaluate the model's performance

ผลการศึกษาปริมาณน้ำท่าของกลุ่มน้ำแม่จัดในอดีต

ผลการศึกษาปริมาณน้ำท่าของกลุ่มน้ำแม่จัดในอดีตตั้งแต่ พ.ศ. 2546 จนถึง 2557 (12 ปี) จากการประเมินปริมาณน้ำท่าด้วยแบบจำลอง SWAT พบว่าปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยทั้งกลุ่มน้ำอยู่ที่ 374 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ค่าต่ำสุดของปริมาณน้ำท่ารายปีอยู่ที่ 230 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ใน พ.ศ. 2555 มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 721 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ใน พ.ศ. 2548 ดังแสดงไว้ใน Table 9 โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณน้ำท่าพบว่ามีความแปรปรวน (Variance) เท่ากับ 18,639 (ล้านลูกบาศก์เมตร)² และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เท่ากับ 137 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งบ่งชี้ว่าปริมาณน้ำท่าในกลุ่มน้ำแม่จัดมีความผันผวนสูงในแต่ละปี

ในการวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำท่าในอดีตจากข้อมูลย้อนหลัง 12 ปี (พ.ศ. 2546–2557) พบว่าปริมาณน้ำท่ามีแนวโน้มลดลงโดยเฉลี่ยประมาณ 17.23 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ดังแสดงไว้ใน Figure 7

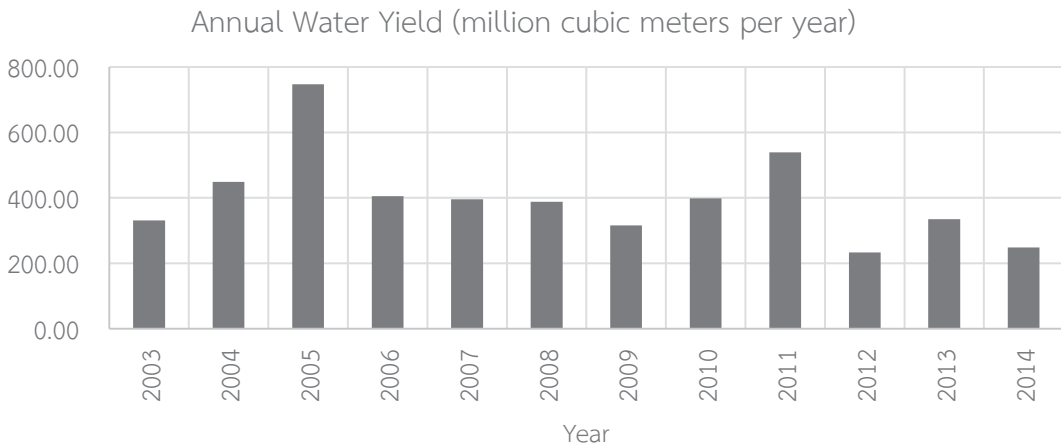


Figure 7 Annual Streamflow Trends in the Mae Ngat Watershed (2003–2014)

ในส่วนของปริมาณน้ำท่ารายเดือนในช่วงปีฐาน (พ.ศ. 2546-2557) ดังแสดงไว้ใน Figure 8 พบว่า เดือนที่มีน้ำท่าต่ำสุด คือเดือนเมษายน ที่ 7.64 ล้านลูกบาศก์เมตร พบว่าเดือนที่มีน้ำท่าสูงสุดคือเดือนสิงหาคม ที่ 84.51 ล้านลูกบาศก์เมตร และยังพบว่าปริมาณน้ำท่าในฤดูฝน (มิถุนายน - ตุลาคม) มีค่าเฉลี่ย 57.49 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อเดือน ปริมาณน้ำท่าในฤดูแล้ง (พฤศจิกายน - พฤษภาคม) มีค่าเฉลี่ย 15.91 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อเดือน

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำท่าของกลุ่มน้ำแม่งัดฝั่งพาฤดูฝนเป็นหลัก และมีความเสี่ยงสูงต่อการขาดแคลนน้ำในฤดูแล้ง โดยเฉพาะในช่วงปีที่มีฝนตกน้อยหรือสภาพอากาศแปรปรวน ดังนั้น การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็น ทั้งในด้านการกักเก็บน้ำ การใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน และการติดตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในระยะยาวเพื่อเตรียมมาตรการรองรับภัยแล้งและความไม่แน่นอนในอนาคต

Table 9 Historical Annual Water Yield in Mae Ngat Sub-basins (2003–2014)

Subbasin	Annual Water Yield (million cubic meters per year)											Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Area (km ²)	78.22	43.83	62.37	89.32	99.04	79.89	101.02	169.78	163.29	190.82	150.37	1227.94
2003	21	12	7	24	31	23	28	49	48	56	44	343
2004	26	15	7	37	44	33	41	70	62	72	57	464
2005	71	40	32	53	49	38	54	79	99	117	91	721
2006	54	30	17	32	26	19	29	39	33	39	30	348
2007	44	25	12	28	31	15	24	30	55	64	50	378
2008	44	24	11	22	44	11	19	22	57	67	53	373
2009	47	26	13	21	39	13	20	26	15	18	14	252
2010	63	35	22	10	18	5	9	11	59	69	54	356
2011	54	30	13	46	67	28	46	59	48	56	44	493
2012	25	14	5	12	19	10	13	22	35	41	33	230
2013	44	25	14	18	23	11	18	22	40	48	39	303
2014	38	21	10	6	10	4	6	8	42	48	40	233
Average	44	25	14	26	33	17	26	36	49	58	46	374
Maximum	71	40	32	53	67	38	54	79	99	117	91	721
Minimum	21	12	5	6	10	4	6	8	15	18	14	230

ผลการประเมินน้ำท่าของกลุ่มน้ำแม่จัดในอนาคต

การศึกษานี้ใช้แบบจำลอง SWAT ร่วมกับข้อมูลภูมิอากาศจาก CMIP6 จำนวน 10 แบบจำลอง เพื่อคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าในกลุ่มน้ำแม่จัดในอนาคต โดยแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลา ได้แก่ พ.ศ. 2574–2593 และ พ.ศ. 2594–2613 ภายใต้ 4 สถานการณ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจก (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, และ SSP5-8.5) ผลการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำท่ามีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปีฐาน (พ.ศ. 2546–2557) ดังนี้

Table 10 Future Projections of Precipitation and Water Yield under 4 SSPs Compared to the Historical Baseline (2003–2014)

SSP	Period	CMIP6	Precipitation		Water Yield		Period	Precipitation		Water Yield	
			(mm)	%Change	(mm)	%Change		(mm)	%Change	(mm)	%Change
Baseline	2003-2014		1193		325		2003-2014	1193		325	
1-2.6	2031-2050	ACCESS-CM2	1224	2.60	498	53.28	2051-2070	1289	8.04	619	90.47
		CanESM5	1333	11.73	602	85.49		1380	15.73	712	119.32
		CNRM-ESM2-1	1174	-1.54	489	50.55		1272	6.64	642	97.58
		FGOALS-g3	1288	8.01	567	74.66		1348	13.00	700	115.51
		GFDL-ESM4	1108	-7.10	404	24.43		1243	4.19	597	83.71
		IPSL-CM6A-LR	1245	4.40	539	65.94		1269	6.37	609	87.54
		MIROC6	1219	2.23	502	54.46		1221	2.39	568	74.74
		MPI-ESM1-2-HR	1315	10.23	601	85.17		1301	9.09	655	101.53
		MRI-ESM2-O	1127	-5.49	395	21.48		1175	-1.53	516	58.95
		NorESM.2-MM	1140	-4.46	407	25.19		1146	-3.95	494	52.05
Average		1217	2.06	500	54.07	1264		6.00	611	88.14	
2-4.5		ACCESS-CM2	1234	3.43	499	53.76		1181	-0.97	515	58.62
		CanESM5	1281	7.40	572	75.99		1377	15.45	702	116.19
		CNRM-ESM2-1	1198	0.47	505	55.59		1153	-3.34	541	66.58
		FGOALS-g3	1268	6.31	558	71.92		1212	1.61	589	81.31
		GFDL-ESM4	1113	-6.70	422	29.94		1174	-1.59	538	65.63
		IPSL-CM6A-LR	1360	14.04	656	102.11		1219	2.19	578	77.98
		MIROC6	1207	1.21	485	49.32		1232	3.25	598	84.09
		MPI-ESM1-2-HR	1243	4.21	533	64.19		1371	14.95	713	119.65
		MRI-ESM2-O	1044	-12.49	332	2.21		1080	-9.47	454	39.84
		NorESM.2-MM	1170	-1.87	427	31.36		1149	-3.65	498	53.30
Average		1212	1.60	499	53.64	1215		1.84	573	76.32	
3-7.0		ACCESS-CM2	1117	-6.33	418	28.64		1126	-5.61	492	51.44
		CanESM5	1261	5.68	547	68.44		1318	10.48	642	97.68
		CNRM-ESM2-1	1111	-6.83	412	26.73		1172	-1.71	573	76.55
		FGOALS-g3	1224	2.63	518	59.59		1217	2.00	591	81.83
		GFDL-ESM4	1046	-12.31	356	9.69		1289	8.08	656	102.06
		IPSL-CM6A-LR	1150	-3.58	462	42.17		1226	2.75	572	76.21
		MIROC6	1150	-3.55	453	39.41		1122	-5.97	494	51.94
		MPI-ESM1-2-HR	1097	-8.04	419	28.91		1290	8.16	660	103.13
		MRI-ESM2-O	1102	-7.60	382	17.67		999	-16.25	385	18.61
		NorESM.2-MM	1176	-1.44	444	36.69		1142	-4.23	486	49.59
Average		1143	-4.14	441	35.79	1190		-0.23	555	70.91	
5-8.5		ACCESS-CM2	1276	6.99	539	66.10		1182	-0.87	529	62.72
		CanESM5	1351	13.29	616	89.75		1359	13.96	689	112.05
		CNRM-ESM2-1	1260	5.62	578	77.98		1221	2.35	572	76.25
		FGOALS-g3	1297	8.70	592	82.41		1243	4.22	603	85.61
		GFDL-ESM4	1142	-4.29	445	36.94		1083	-9.17	448	38.07
		IPSL-CM6A-LR	1257	5.38	567	74.70		1344	12.66	669	106.07
		MIROC6	1164	-2.44	461	41.79		1233	3.41	570	75.53
		MPI-ESM1-2-HR	1328	11.37	604	85.83		1419	18.95	745	129.44
		MRI-ESM2-O	1037	-13.02	347	6.78		1063	-10.90	433	33.21
		NorESM.2-MM	1192	-0.08	457	40.77		1214	1.76	534	64.44
Average		1230	3.15	521	60.30	1236		3.64	579	78.34	

Table 10 ได้แสดงปริมาณน้ำท่าในอนาคตภายใต้สถานการณ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจก 4 รูปแบบ จาก 10 แบบจำลองภูมิอากาศโลก โดยพบว่าปริมาณน้ำท่ารายปีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้ง 10 แบบจำลอง ภายใต้ทั้ง 4 สถานการณ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจก ซึ่งได้เปรียบเทียบกับปีฐานที่มีปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยเท่ากับ 379 มม. เมื่อนำทั้ง 10 แบบจำลองภูมิอากาศโลกมาหาค่าเฉลี่ย โดยแยกตามสถานการณ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจก พบว่าอนาคตอันใกล้ในช่วง พ.ศ. 2574–2593 ปริมาณน้ำท่าเพิ่มขึ้นในทุกสถานการณ์ โดย SSP5-8.5 มีค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่ 60.30% ในขณะที่ SSP3-7.0 มีการเปลี่ยนแปลงต่ำที่สุดที่ 35.79% ส่วน SSP1-2.6 และ SSP2-4.5 มีค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของน้ำท่าที่ 54.07% และ 53.64% ตามลำดับ ซึ่งทั้ง SSP1-2.6, SSP2-4.5 และ SSP5-8.5 ปริมาณน้ำท่ารายปีแปรผันตรงกับปริมาณฝนที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 2.06%, 1.60% และ 3.15% ตามลำดับ แต่สำหรับ SSP3-7.0 มีปริมาณฝนลดลง 4.14% และในช่วง พ.ศ. 2594–2613 สำหรับอนาคตอันไกล ยังคงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นต่อเนื่อง พบว่า SSP1-2.6 มีการเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 88.14% ขณะที่ SSP3-7.0 มีการเพิ่มขึ้นต่ำสุดที่ 70.91% และในส่วนของ SSP2-4.5 และ SSP5-8.5 มีค่าเพิ่มขึ้นที่ 76.32% และ 78.34% ตามลำดับ

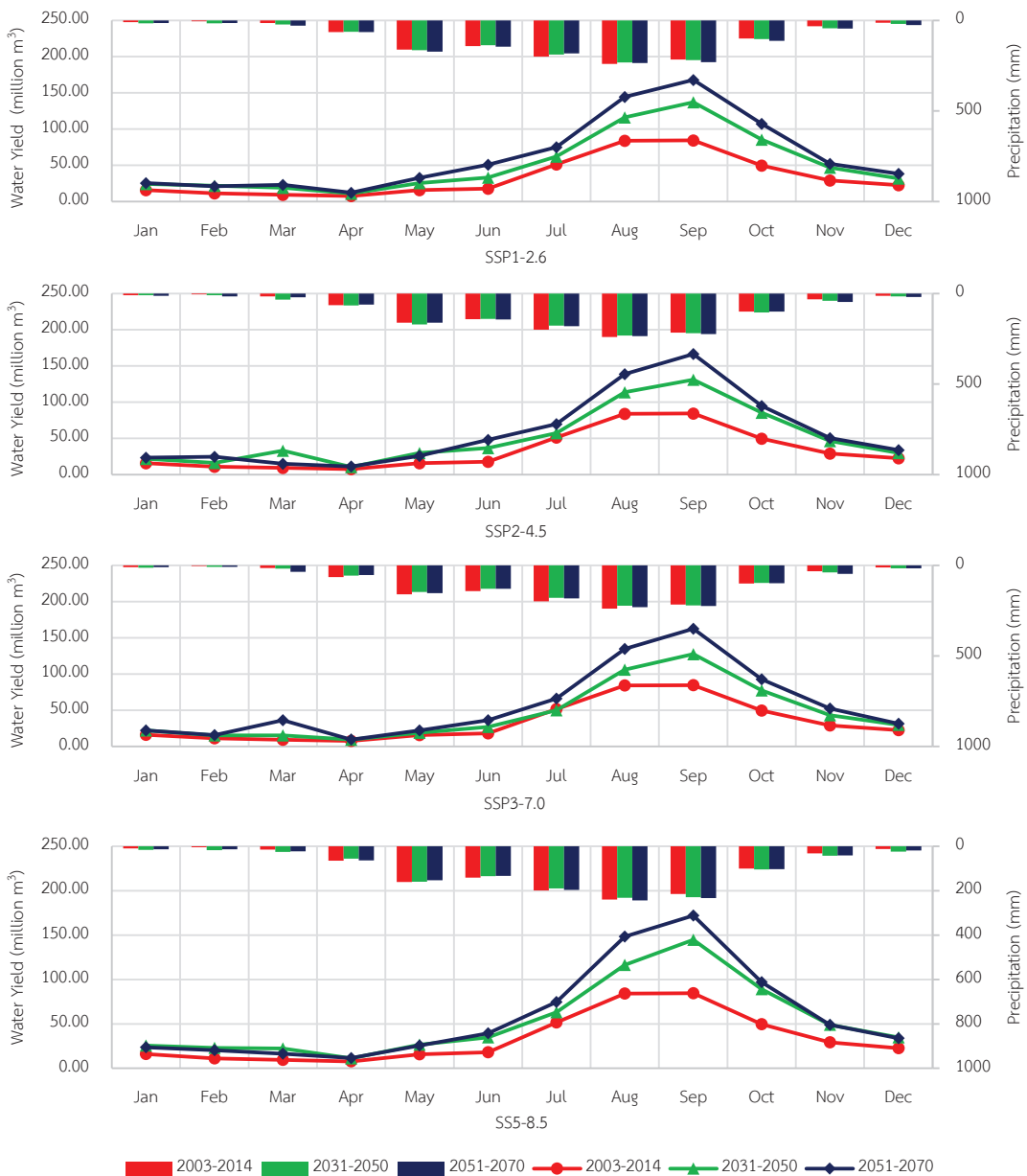


Figure 8 Comparison of Monthly Water Yield and Future Precipitation Based on 10 Global Climate Models under 4 SSP Scenarios

อีกทั้งจาก Figure 8 พบว่าปริมาณน้ำท่ารายเดือนในอนาคตที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยจากทั้ง 10 แบบจำลอง โดยแยกตามสถานการณ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกเดือนทั้ง 2 ช่วงปี โดยพ่วงในฤดูแล้ง (พฤศจิกายน - พฤษภาคม) SSP1-2.6 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องที่ 61.84% และ 84.20% ตามลำดับ SSP2-4.5 เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันทั้ง 2 ช่วงปี คือ 68.77% และ 65.94% ตามลำดับ ใน SSP3-7.0 มี

การเพิ่มขึ้นเช่นกัน คือ 38.24% และ 70.08% ตามลำดับ และสุดท้าย SSP5-8.5 เพิ่มขึ้นแต่มีแนวโน้มลดลง คือ 72.41% และ 61.80% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในฤดูฝน (มิถุนายน - ตุลาคม) พบว่า SSP1-2.6 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 51.05% และ 89.67% ตามลำดับ SSP2-4.5 เพิ่มขึ้น 47.78% และ 80.34% ตามลำดับ แต่ใน SSP3-7.0 เพิ่มขึ้นน้อยที่สุด 34.85% และ 71.22% ตามลำดับ และสุดท้าย SSP5-8.5 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกันที่ 55.62% และ 84.74% ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบว่าเดือนที่มีปริมาณน้ำท่ารายเดือนน้อยที่สุดยังคงเป็นเดือนเมษายน ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นมาจากปีฐานในทุกสถานการณ์ปล่อยแก๊สเรือนกระจก โดยพบว่าใน SSP1-2.6 เพิ่มขึ้นมากที่สุดที่ 45.40% และ 60.50% ตามลำดับ SSP2-4.5 เพิ่มขึ้น 37.89% และ 47.07% ตามลำดับ แต่ SSP3-7.0 เพิ่มขึ้นน้อยที่สุดที่ 23.20% และ 23.35% ตามลำดับ ในส่วนของ SSP5-8.5 พบว่ามีการเพิ่มขึ้นเช่นกัน คือ 46.15% และ 50.36% ตามลำดับ และยังพบว่าเดือนที่มีปริมาณน้ำท่ารายเดือนมากที่สุดยังคงเป็นเดือนกันยายน จากปีฐานในทุกสถานการณ์ปล่อยแก๊สเรือนกระจกเช่นเดียวกัน โดยพบว่าใน SSP1-2.6 เพิ่มขึ้น 65.27% และ 98.78% ตามลำดับ SSP2-4.5 เพิ่มขึ้น 55.15% และ 97.06% ตามลำดับ แต่ SSP3-7.0 เพิ่มขึ้นน้อยที่สุดที่ 50.94% และ 92.31% ตามลำดับ ในส่วนของ SSP5-8.5 พบว่ามีการเพิ่มขึ้นมากที่สุดและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น คือ 71.21% และ 103.50% ตามลำดับ

นอกจากนี้ เมื่อทำการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ของปริมาณฝนและน้ำท่า ซึ่งการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ของปริมาณฝนและน้ำท่าช่วยให้เข้าใจถึงลักษณะการกระจายตัวของน้ำในลุ่มน้ำแม่จัด จาก Figure 9 เมื่อนำทุกแบบจำลองภูมิอากาศโลกมาเฉลี่ยกัน โดยแยกตามสถานการณ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจก พบว่าบริเวณตอนล่างของลุ่มน้ำแม่จัด ปริมาณน้ำฝนมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับตอนกลางและตอนบนที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยพบว่า ปริมาณฝนภายใต้ SSP5-8.5 ปริมาณฝนเพิ่มขึ้นสูงสุด โดยเฉพาะบริเวณตอนล่างของลุ่มน้ำ และใน SSP3-7.0 มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝนต่ำกว่ากรณีอื่น ทำให้มีแนวโน้มของน้ำท่าที่เพิ่มขึ้นต่ำกว่า และในส่วนของ SSP2-4.5 มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในแต่ละช่วงปีในอนาคต แต่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับปีฐาน และสุดท้ายใน SSP1-2.6 พบว่าปริมาณฝนมีการเพิ่มขึ้นทั้งลุ่มน้ำเมื่อเทียบกับปีฐานอย่างเห็นได้ชัด ในส่วนของปริมาณน้ำท่า พบว่าปริมาณน้ำท่าในทุกลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำแม่จัด จาก Figure 10 พบว่ามีการเพิ่มขึ้นในทุกสถานการณ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจกเมื่อเทียบกับปีฐาน และเพิ่มขึ้นในทุกช่วงปีในอนาคต โดยการเพิ่มขึ้นของน้ำท่าในอนาคตมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณฝน ในบริเวณตอนบนของพื้นที่จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากลักษณะของดิน การใช้ที่ และน้ำใต้ดินที่แตกต่างกัน แต่ในบริเวณอื่นพบว่าการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้น จากผลการประเมินปริมาณน้ำท่าในอนาคตของลุ่มน้ำแม่จัด โดยใช้แบบจำลอง SWAT ร่วมกับข้อมูลจาก 10 แบบจำลองภูมิอากาศโลก พบว่า ปริมาณน้ำท่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในทุกสถานการณ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจก (SSPs) และในทุกช่วงเวลาเมื่อเทียบกับปีฐาน โดยเฉพาะช่วง พ.ศ. 2594–2613 ซึ่งแสดงค่าการเพิ่มขึ้นสูงกว่าช่วง พ.ศ. 2574–2593 ทั้งในระดับรายปี รายเดือน และฤดูกาล โดย SSP5-8.5 และ SSP1-2.6 แสดงค่าการเพิ่มขึ้นเด่นชัดที่สุด ขณะที่ SSP3-7.0 มีการเพิ่มขึ้นน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของปริมาณฝนที่เปลี่ยนแปลงน้อยในกรณีนั้น

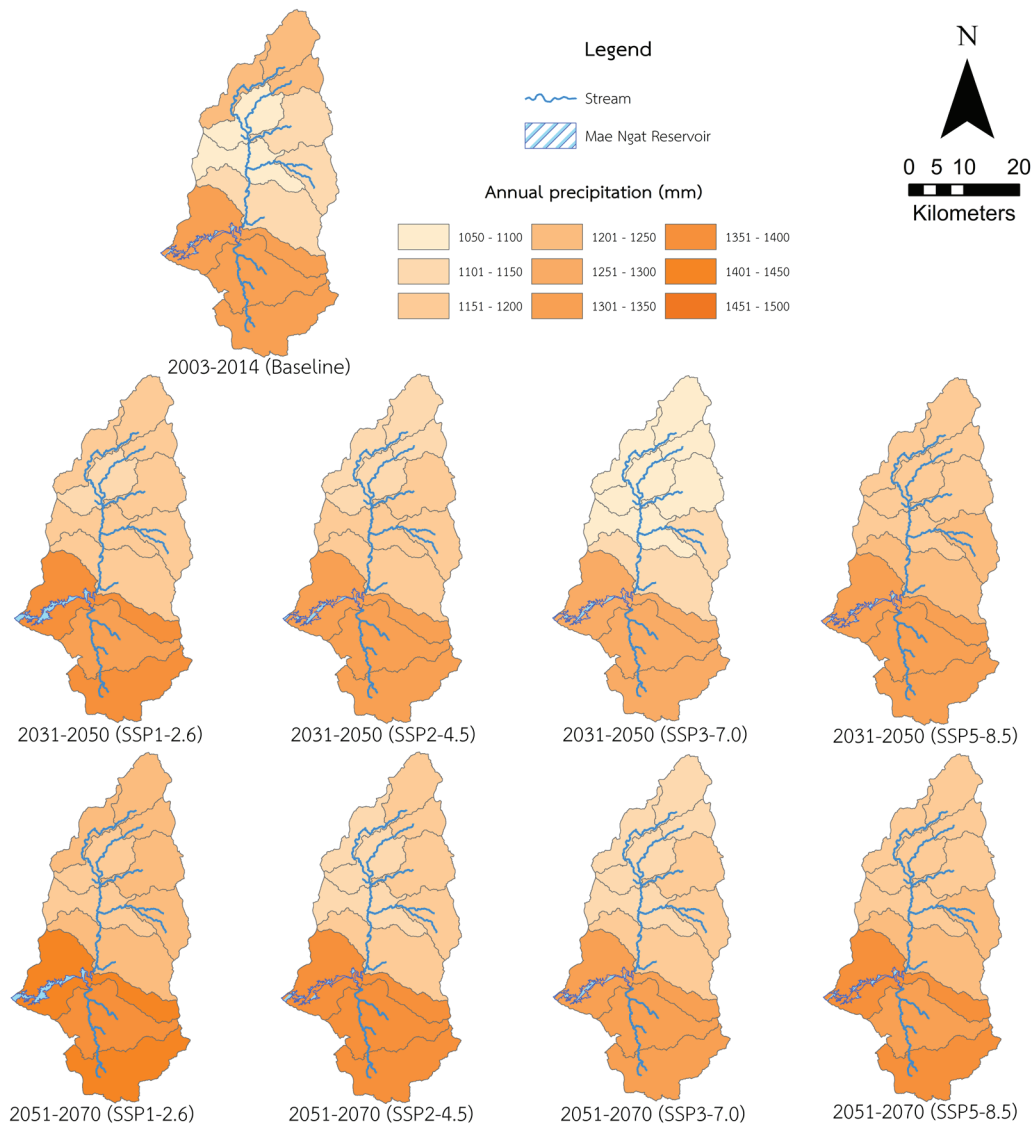


Figure 9 Projected Precipitation in the Sub-basins of the Mae Ngat Watershed Based on Simple Mean of 10 GCMs under Different SSP Scenarios

อย่างไรก็ตาม แม้ในบางช่วง SSP3-7.0 จะมีฝนลดลง แต่ปริมาณน้ำท่ากลับเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจาก อุณหภูมิที่ลดลง ดังแสดงไว้ใน Figure 11 ซึ่งเป็นการนำอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีเฉลี่ยทั้งลุ่มน้ำจากทุกแบบจำลอง ภูมิอากาศโลกมาเฉลี่ยกัน โดยแยกตามสถานการณ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจก ส่งผลให้การระเหยลดลงตามไปด้วย โดยในช่วง พ.ศ. 2574–2593 อุณหภูมิเฉลี่ยทั้งปีของ SSP1-2.6, SSP2-4.5 และ SSP3-7.0 ต่ำกว่าปีฐานประมาณ 0.16–0.64 องศาเซลเซียส และถึงแม้ในช่วง พ.ศ. 2594–2613 อุณหภูมิของ SSP2-4.5 จะกลับมาเท่ากับปีฐาน และของ SSP3-7.0 กับ SSP5-8.5 จะสูงขึ้น แต่ปริมาณน้ำท่ายังคงเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็น

ว่าปริมาณฝนยังคงเป็นปัจจัยหลักในการควบคุมปริมาณน้ำท่า ส่วนอุณหภูมิส่งผลกระทบผ่านกระบวนการระเหยและการอุ้มน้ำในดิน

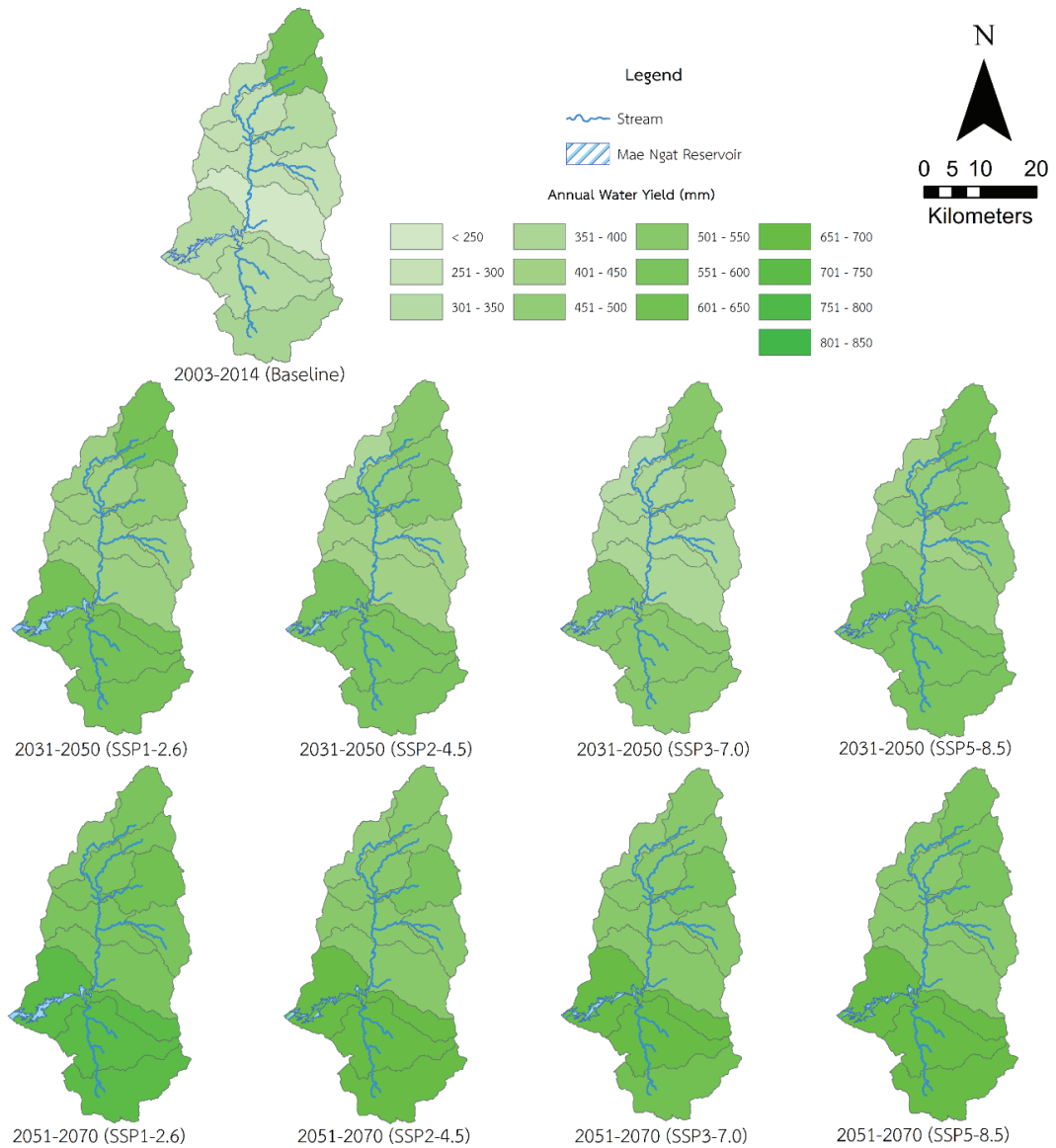


Figure 10 Projected Water Yield in the Sub-basins of the Mae Ngat Watershed Based on Simple Mean of 10 GCMs under Different SSP Scenarios

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิในระดับรายเดือนเฉลี่ยทั้งลุ่มน้ำจากค่าเฉลี่ยทุกแบบจำลองภูมิอากาศโลก โดยแยกตามสถานการณ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจกจะพบว่า SSP1-2.6 และ SSP2-4.5 มีการกระจายตัวของปริมาณน้ำท่าที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งปี ซึ่งแตกต่างจาก SSP3-7.0 และ SSP5-8.5 ที่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเฉพาะในบางเดือน เช่น สิงหาคมและกันยายน ซึ่งอาจก่อให้เกิดน้ำท่วมเฉียบพลัน ขณะเดียวกัน ในช่วงเดือนมกราคมถึงพฤษภาคม ปริมาณน้ำท่าของ SSP3-7.0 และ SSP5-8.5 กลับใกล้เคียงกับปีฐาน ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาภัยแล้งในช่วงต้นปี

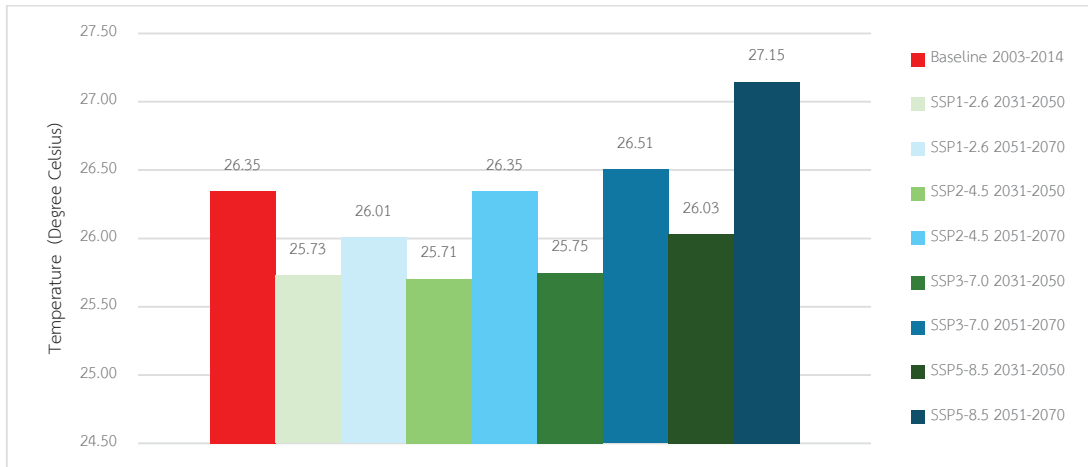


Figure 11 Projected Annual Average Temperature in the Mae Ngat Watershed Based on Simple Mean of 10 GCMs under Different SSP Scenarios

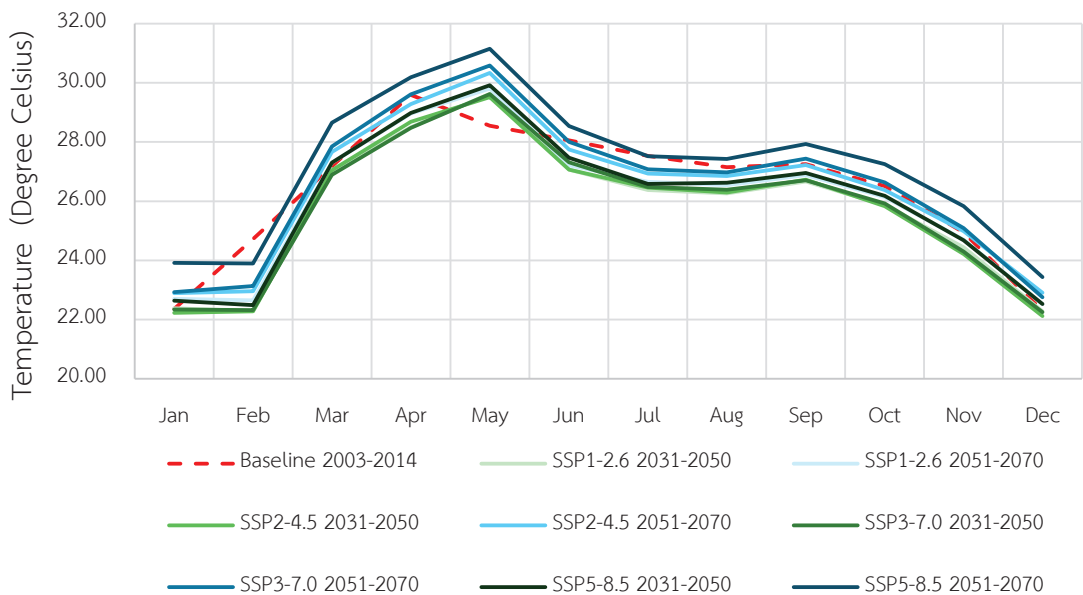


Figure 12 Projected Monthly Average Temperature in the Mae Ngat Watershed Based on Simple Mean of 10 GCMs under Different SSP Scenarios

นอกจากนี้ รูปแบบอุณหภูมิรายเดือนเฉลี่ยจากทั้ง 10 แบบจำลองภูมิอากาศในอนาคต (Figure 12) ยังแสดงความแตกต่างจากปีฐานอย่างชัดเจน แม้จะมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันในแต่ละแบบจำลอง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสมมูลน้ำรายเดือนอย่างมีนัยสำคัญ การวิเคราะห์เชิงพื้นที่ยังพบว่าพื้นที่ตอนล่างของกลุ่มน้ำมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของฝนและน้ำท่าสูงกว่าพื้นที่ตอนบน อาจเนื่องจากลักษณะทางกายภาพ ดิน และการใช้ที่ดินที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่

จากการวิเคราะห์ผลการศึกษานี้ พบว่าแนวโน้มมีความสอดคล้องอย่างกับผลการศึกษาอื่นในพื้นที่ภาคเหนือและลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนบน เช่น Panneerselvam และคณะ [33] พบว่าปริมาณน้ำท่าในแม่น้ำปิงและแม่น้ำวัง ซึ่งเป็นลุ่มน้ำที่อยู่ภายในภาคเหนือตอนบนเช่นกัน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ประมาณ 20% และ 35% ตามลำดับ ภายในช่วงกลางศตวรรษที่ 21 และต่อเนื่องไปในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้สถานการณ์ RCP8.5 และในส่วนของ Petpongpan และคณะ [34] ซึ่งศึกษาในลุ่มน้ำยมและน่าน พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ย ปริมาณฝนรายปี และ ปริมาณน้ำท่ารายปีจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ตั้งแต่ช่วงกลางอนาคต (พ.ศ. 2589–2613) เป็นต้นไป โดยเฉพาะภายใต้ RCP8.5 และยังมี Satriagasa และคณะ [35] ที่ศึกษาในลุ่มน้ำน่านตอนบน แม้ว่าผลการทดสอบทางสถิติจะบ่งชี้ว่าปริมาณน้ำท่ารายปีในอนาคตจะไม่มี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากปริมาณน้ำท่าในอดีต ($p\text{-value} > 0.05$) แต่ก็พบว่าปริมาณน้ำท่ารายปีโดยเฉลี่ย คาดการณ์ว่าจะ เพิ่มขึ้นระหว่าง 0.3% ถึง 5.1% นอกจากนี้ งานวิจัยดังกล่าวยังระบุว่าปริมาณน้ำฝนในพื้นที่ศึกษา (ลุ่มน้ำน่านตอนบน) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นถึง 18-19% ในอนาคต ซึ่งเป็นปัจจัยขับเคลื่อนหลักของการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำท่า การสอดคล้องกันของผลลัพธ์จากงานวิจัยหลายชิ้นที่ใช้แบบจำลองและชุดข้อมูลภูมิอากาศที่ทันสมัย (CMIP5/CMIP6, SSPs/RCPs) บ่งชี้ว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำท่าอาจเป็นภาพรวมที่กำลังเกิดขึ้นหรือคาดว่าจะเกิดขึ้นในหลายลุ่มน้ำสำคัญของภาคเหนือประเทศไทยภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่รุนแรง และเป็นการเสริมความน่าเชื่อถือให้กับผลการศึกษาของเรา

อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษานี้มีแนวโน้มที่ตรงกันข้ามกับผลการศึกษาของ Sharma และ Babel [36] ซึ่งศึกษาในลุ่มน้ำปิงตอนบน และพบว่าปริมาณน้ำท่ารายปีจะลดลง 13-19% เมื่อเทียบกับช่วงฐาน ความแตกต่างนี้สามารถอธิบายได้จากหลายปัจจัย โดยพบว่าชุดข้อมูลแบบจำลองภูมิอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งการศึกษาของ Sharma และ Babel [36] ใช้ข้อมูลจากแบบจำลอง ECHAM4/OPYC General Circulation Model (GCM) ซึ่งเป็นแบบจำลองและชุดข้อมูลที่ค่อนข้างเก่า เมื่อเทียบกับข้อมูลจากโครงการ CMIP6 (NEX-GDDP-CMIP6) ที่ใช้ในการศึกษารั้งนี้ โดยแบบจำลอง GCMs และ RCMs รุ่นใหม่มีการพัฒนาด้านความละเอียดและความสามารถในการจำลองกระบวนการทางภูมิอากาศที่ซับซ้อนได้ดีขึ้น ซึ่งอาจนำไปสู่การคาดการณ์ที่แตกต่างกัน รวมถึงสถานการณ์จำลองการปล่อยแก๊สเรือนกระจก ซึ่งใช้ SRES A2 และ B2 scenarios ซึ่งเป็นชุดสถานการณ์ที่แตกต่างจาก Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) ของ CMIP6 แม้จะมีความคล้ายคลึงกันในแนวคิด แต่รายละเอียดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกและผลลัพธ์ของแบบจำลองที่รองรับ อาจแตกต่างกัน อีกทั้งวิธีการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนและการย่อส่วนข้อมูล เนื่องจากเทคนิคที่แตกต่างกัน โดยการศึกษาของ Sharma & Babel ใช้วิธี Gamma-gamma transformation แต่การศึกษารั้งนี้เลือกใช้

ข้อมูลจาก NEX-GDDP-CMIP6 ซึ่งใช้เทคนิค Bias Correction and Spatial Disaggregation (BCSD) และการปรับใช้กับ GCMs/RCMs ที่ต่างกัน อาจส่งผลต่อข้อมูลฝนและอุณหภูมิที่ป้อนเข้าแบบจำลองอุทกวิทยา นอกจากแนวโน้มปริมาณน้ำท่ารายปีที่เพิ่มขึ้นแล้ว การศึกษาครั้งนี้ยังพบว่าปริมาณน้ำท่ามีความแปรปรวนสูงในการกระจายตัวรายเดือนและรายฤดูกาล โดยเฉพาะสถานการณ์ SSP3-7.0 และ SSP5-8.5 ที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในฤดูฝน (เช่น เดือนสิงหาคม-กันยายน) แต่กลับมีปริมาณใกล้เคียงกับปีฐานหรือมีแนวโน้มลดลงในฤดูแล้ง (เช่น เดือนมกราคม-พฤษภาคม) ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาภัยแล้ง แนวโน้มนี้มีความสอดคล้องกับงานของ Sharma และ Babel [36] ที่แม้จะคาดการณ์ปริมาณน้ำท่ารายปีลดลง แต่ก็พบการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของปริมาณน้ำท่าตามฤดูกาล โดยมีการลดลงในฤดูฝนและเพิ่มขึ้นในฤดูแล้ง เช่นเดียวกับ Satriagasa และคณะ [35] ที่พบว่าฤดูแล้งจะเปียกขึ้นแต่ฤดูฝนจะแห้งลงเล็กน้อย ความสอดคล้องกันของความแปรปรวนภายในฤดูกาลนี้ชี้ให้เห็นว่า ไม่ว่าแนวโน้มปริมาณน้ำท่ารวมจะไปในทิศทางใด การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจะยังคงส่งผลกระทบต่อสมดุลน้ำในแต่ละช่วงเวลาของปี ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณาในการบริหารจัดการน้ำเพื่อรับมือกับความเสี่ยงแบบสองทางทั้งน้ำท่วมและภัยแล้ง

ดังนั้น การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในลุ่มน้ำแม่จัดในอนาคตจึงควรคำนึงถึงทั้งการเปลี่ยนแปลงของฝน อุณหภูมิ และบริบททางพื้นที่อย่างรอบด้าน เพื่อให้สามารถรับมือกับสถานการณ์น้ำท่าที่เปลี่ยนแปลงไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะควรเพิ่มขีดความสามารถของระบบกักเก็บน้ำเพื่อลดความเสี่ยงของอุทกภัยในช่วงที่น้ำท่าเพิ่มสูง และวางแผนการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพในช่วงที่มีแนวโน้มเกิดภัยแล้ง

Conclusion

จากการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำแม่จัดจังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้แบบจำลอง SWAT ในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าของลุ่มน้ำแม่จัดทั้งในอดีต (พ.ศ. 2546–2557) และการคาดการณ์อนาคต (พ.ศ. 2574–2613) ร่วมกับแบบจำลอง CMIP6 จำนวน 10 แบบจำลอง ภายใต้ 4 สถานการณ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจก (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 และ SSP5-8.5)

จากการจำลองพื้นที่ลุ่มน้ำแม่จัด พบว่าลุ่มน้ำมีพื้นที่รับน้ำรวม 1,227.94 ตารางกิโลเมตร ซึ่งมีความใกล้เคียงกับข้อมูลของกรมชลประทาน และสามารถแบ่งพื้นที่ออกเป็น 11 ลุ่มน้ำย่อย โดยกำหนดหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (HRUs) ได้ทั้งหมด 58 หน่วย บนพื้นฐานของลักษณะการใช้ที่ดินชนิดของดิน และความลาดชัน ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์การไหลของน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยการปรับแก้และสอบเทียบแบบจำลอง SWAT ที่สถานีวัดน้ำท่า P.56a ในช่วง พ.ศ. 2546–2552 ให้ค่าความถูกต้องของแบบจำลองที่น่าเชื่อถือ โดยมีค่า R_2 เท่ากับ 0.85 ค่า NSE เท่ากับ 0.81 และ PBIAS เท่ากับ 18.62% และผลการสอบเทียบในช่วง พ.ศ. 2553–2557 พบว่า มีค่า R_2 เท่ากับ 0.74 ค่า NSE เท่ากับ 0.73 และ PBIAS เท่ากับ 3.68% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพสูงและสามารถนำไปใช้คาดการณ์แนวโน้มปริมาณน้ำท่าในอนาคตได้อย่างเหมาะสมนอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ย้อนหลังในช่วง พ.ศ. 2546–2557 พบว่าปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยทั้งลุ่มน้ำเท่ากับ 374 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีค่าความผันผวน

สูงระหว่างปี สะท้อนจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สูงถึง 137 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี แนวโน้มในช่วงเวลาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำท่ามีแนวโน้มลดลงปีละประมาณ 17.23 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยเดือนที่มีปริมาณน้ำท่าน้อยที่สุดคือเดือนเมษายน และเดือนที่มีน้ำท่าสูงที่สุดคือเดือนสิงหาคม ทั้งนี้ยังพบว่าในฤดูฝน (มิถุนายน–ตุลาคม) มีน้ำท่าเฉลี่ยสูงกว่าฤดูแล้ง (พฤศจิกายน–พฤษภาคม) อย่างชัดเจน ซึ่งแสดงถึงความเสี่ยงต่อการขาดแคลนน้ำในฤดูแล้ง โดยเฉพาะในปีที่มีฝนน้อยหรือเกิดความแปรปรวนของสภาพอากาศ

อย่างไรก็ตาม ในส่วนของการประเมินในอนาคต จากการเปรียบเทียบกับปีฐาน (พ.ศ. 2546–2557) เมื่อนำทุกแบบจำลองภูมิอากาศโลกมาหาค่าเฉลี่ย พบว่า ทุกสถานการณ์ SSP แสดงแนวโน้มปริมาณน้ำท่าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งในช่วง พ.ศ. 2574–2593 และ พ.ศ. 2594–2613 โดยเฉพาะใน SSP1-2.6 และ SSP5-8.5 ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดที่สุด ขณะที่ SSP3-7.0 มีการเพิ่มขึ้นน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณฝนที่ลดลงในสถานการณ์ดังกล่าว อย่างไรก็ตาม แม้ SSP3-7.0 จะมีฝนลดลงในบางช่วง แต่ปริมาณน้ำท่ากลับเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากอุณหภูมิที่ลดลง ส่งผลให้อัตราการระเหยลดลงตามไปด้วยและเมื่อวิเคราะห์ในระดับรายเดือน พบว่า SSP1-2.6 และ SSP2-4.5 มีการเพิ่มขึ้นของน้ำท่าที่สม่ำเสมอตลอดทั้งปี ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงของเหตุการณ์สุดขั้ว เช่น น้ำท่วมเฉียบพลันหรือภัยแล้ง ในทางตรงกันข้าม SSP3-7.0 และ SSP5-8.5 มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเฉพาะในบางเดือน เช่น สิงหาคม–กันยายน ซึ่งอาจเพิ่มความเสี่ยงของอุทกภัยเฉียบพลัน ขณะที่ในช่วงเดือนมกราคม–พฤษภาคม ปริมาณน้ำท่าของทั้งสอง SSP กลับใกล้เคียงกับปีฐาน จึงมีโอกาสเกิดภัยแล้งมากขึ้น

อีกทั้ง การวิเคราะห์เชิงพื้นที่ยังพบว่า พื้นที่ตอนล่างของกลุ่มน้ำแม่จันมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของฝนและน้ำท่าสูงกว่าบริเวณตอนบน อันเนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ เช่น ดิน การใช้ที่ดิน และการไหลของน้ำได้ดินที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรายเดือนในอนาคตยังแสดงความแตกต่างจากปีฐานอย่างชัดเจน แม้จะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกันในแต่ละแบบจำลอง ซึ่งอาจส่งผลต่อสมดุลน้ำในแต่ละเดือน และสร้างความท้าทายต่อการบริหารจัดการน้ำโดยรวม

จากผลการศึกษาทั้งหมด สะท้อนให้เห็นว่าแม้จะมีแนวโน้มที่ปริมาณน้ำท่าจะเพิ่มขึ้นในอนาคต แต่การกระจายของน้ำท่าในแต่ละเดือนและพื้นที่ยังมีความแปรปรวนสูง ส่งผลให้กลุ่มน้ำแม่จันยังคงมีความเสี่ยงทั้งจากปัญหาอุทกภัยในฤดูฝน และภัยแล้งในฤดูแล้ง ดังนั้น การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในอนาคตควรมุ่งเน้นการเพิ่มขีดความสามารถของระบบกักเก็บน้ำเพื่อรองรับน้ำส่วนเกินในช่วงฤดูฝน และควรมีแผนการใช้น้ำที่มีประสิทธิภาพในช่วงฤดูแล้ง เพื่อให้สามารถรับมือกับความไม่แน่นอนของสภาพภูมิอากาศได้อย่างยั่งยืนและครอบคลุม

References

1. Novruzova, A. 2022. Climate change impacts on water resources. *Teka Komisji Politologii i Stosunków Międzynarodowych*, 16, 23–35. <https://doi.org/10.17951/teka.2021.16.2.23-35>
2. Srinivasan, G., Agarwal, A. and Bandara, U. 2024. Climate change impacts on water resources and agriculture in Southeast Asia with a focus on Thailand, Myanmar, and Cambodia (pp. 17–32), in N. Khare (Ed.), *The Role of Tropics in Climate Change*, Elsevier, Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99519-1.02002-0>
3. Royal Irrigation Department. 2023. Supporting Document for the Evaluation of Public Sector Management Quality Development at Mae Faek–Mae Ngat Operation and Maintenance Project, Fiscal Year 2023 [Online]. Available: <https://water.rid.go.th/waterm/template/manager/ProjectP&MQA66.html>. [5 April 2024] (In Thai)
4. Upper Northern Region Irrigation Hydrology Center, Monthly and Annual Rainfall Statistics [Online]. Available: <https://hydro-1.net/>. [24 July 2024] (In Thai)
5. Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. and Williams, J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34, 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
6. Chen, H., Sun, J., Lin, W. and Xu, H. 2020. Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes. *Science Bulletin*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.05.015>
7. Taylor, K.E., Stouffer, R.J. and Meehl, G.A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
8. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J. and Taylor, K.E. 2016. Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
9. Isared, K. and Ekasit, K. 2023. Impact of climate change on water balance in Lam Siao Basin using SWAT+ model. *Journal of the Thai Society of Agricultural Engineering*, 29, 14–24. <https://doi.org/10.14416/j.tsaej.2023.08.296> (In Thai)

10. Saimai, H., Ketvara, S. and Jutitthep, V. 2023. Impacts of climate change on streamflow in Tapi River Basin using SWAT model. *The Journal of KMUTNB*, 33, 1–17. <https://doi.org/10.14416/j.kmutnb.2023.07.005> (In Thai)
11. Chen, C., Gan, R., Feng, D., Yang, F. and Zuo, Q. 2022. Quantifying the contribution of SWAT modeling and CMIP6 inputting to streamflow prediction uncertainty under climate change. *Journal of Cleaner Production*, 364, 132675. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132675>
12. Sun, J., Yan, H., Bao, Z. and Wang, G. 2022. Investigating impacts of climate change on runoff from the Qinhuai River by using the SWAT model and CMIP6 scenarios. *Water*, 14, 1778. <https://doi.org/10.3390/w14111778>
13. Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T. and Nemani, R. 2022. NASA global daily downscaled projections, CMIP. *Scientific Data*, 9, 262. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4>
14. Hydro-Informatics Institute (Public Organization), Data Collection and Analysis of the Ping River Basin under the 25 Basins Information System and Flood-drought Modeling Project [Online]. Available: <https://tiwrm.hii.or.th/web/attachments/25basins>. [25 August 2024] (In Thai)
15. Royal Irrigation Department, Mae Kuang Udom Thara Dam Project Information [Online]. Available: <http://eimp.rid.go.th/maekuang/ข้อมูลโครงการ/>. [7 March 2025] (In Thai)
16. Office of Agricultural Economics, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Economic Crops and Agricultural Overview of Chiang Mai Province [Online]. Available: <https://www.opsmoac.go.th/chiangmai-dwl-files-441291791395>. [2 September 2024] (In Thai)
17. Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. and Williams, J.R. 2011. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Theoretical Documentation Version 2009, Texas Water Resources Institute, Texas A&M University System, Texas.
18. Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., Haney, E.B. and Neitsch, S.L. 2012. SWAT Input/Output Documentation Version 2012, Texas Water Resources Institute.
19. Saxton, K.E. and Rawls, W.J. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1569-1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
20. Land Development Department, Clay Soil in Thailand [Online]. Available: https://www.ldd.go.th/Web_Soil/clay.htm. [7 March 2024] (In Thai)

21. Winchell, M., Srinivasan, R., di Luzio, M.D. and Arnold, J.G. 2013. ArcSWAT Interface for SWAT2012: User's Guide, Blackland Research and Extension Center, Texas A&M AgriLife Research, Texas.
22. Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (GISTDA), 2018, Waterline [Feature Layer] [Online]. Available: <https://gistdaportal.gistda.or.th/portal/home/item.html?id=f8a82f947d1240889a729b1930fd458a>. [25 August 2024]
23. Office of the National Water Resources (ONWR), 2021, Shape File of the 22 Watersheds as Defined by the Royal Decree B.E. 2564 (2021) [Online]. Available: http://www.onwr.go.th/?page_id=9893. [25 August 2024]
24. Shrestha, B., Babel, M. S., Maskey, S., van Griensven, A., Uhlenbrook, S., Green, A. and Akkharath, I. 2013. Impact of climate change on sediment yield in the Mekong River Basin: A case study of the Nam Ou Basin, Lao PDR. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 1–20. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1-2013>
25. Wuttichaikitcharoen, P., Plangoen, P. and Muangthong, S. 2016. Study of runoff simulation in Huai Luang watershed using SWAT. *CRMA Journal*, 14, 145–158. (In Thai)
26. Abbaspour, K.C., 2015, SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs-A User Manual, Eawag, Zurich.
27. Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Liew, M., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50, 885–900.
28. Moriasi, D.N., Gitau, M.W., Pai, N. and Daggupati, P. 2015. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58, 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
29. Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R. and Hauck, L.M. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37, 1169–1188. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03630.x>
30. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [V. Masson-Delmotte et al.] [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>. [6 July 2024]

31. Try, S. and Qin, X. 2024. Evaluation Of future changes in climate extremes over Southeast Asia using downscaled CMIP6 GCM projections. *Water*, 16, 2207. <https://doi.org/10.3390/w16152207>
32. Fang, G.H., Yang, J., Chen, Y.N. and Zammit, C. 2015. Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 2547–2559. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2547-2015>
33. Panneerselvam, B., Charoenlerkthawin, W., Ekkawatpanit, C., Namsai, M., Bidorn, B., Saravanan, S. and Lu, X.X. 2024. Climate change influences on the streamflow and sediment supply to the Chao Phraya River Basin, Thailand. *Environmental Research*, 251, 118638. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118638>
34. Petpongpan, C., Ekkawatpanit, C., Viessri, S. and Kosigtittiwong, D. 2021. Projection of hydro-climatic extreme events under climate change in Yom and Nan River Basins, Thailand. *Water*, 13, 665. <https://doi.org/10.3390/w13050665>
35. Satriagasa, M.C., Tongdeenok, P. and Kaewjampa, N. 2023. Assessing the implication of climate change to forecast future flood using SWAT and HEC-RAS model under CMIP5 climate projection in upper Nan Watershed, Thailand. *Sustainability*, 15, 5276. <https://doi.org/10.3390/su15065276>
36. Sharma, D. and Babel, M.S. 2013. Application of downscaled precipitation for hydrological climate-change impact assessment in the upper Ping River Basin of Thailand. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27, 1745–1760. <https://doi.org/10.1007/s00477-013-0700-y>