



ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกต่อสมดุลน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำลำเสียวโดยใช้แบบจำลอง SWAT+ Impact of Climate Change on Water Balance in Lam Siao Basin Using SWAT+ Model

อิสเรศ กะการดี¹, เอกสิทธิ์ โสสิตสกุลชัย^{1*}

Isared Kakarndee¹, Ekasit Kositsakulchai^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม, 73140

¹Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Nakhon Pathom, 73140

*Corresponding author: Tel: +66-3435-1897, Fax: +66-3435-2053, E-mail: ekasit.k@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกที่มีต่อสมดุลน้ำระดับลุ่มน้ำในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (ลุ่มน้ำลำเสียว พื้นที่รับน้ำ 4,400 km²) โดยใช้แบบจำลอง SWAT+ ทั้งนี้ ใช้ชุดข้อมูลรายวันของสภาพภูมิอากาศ (ฝน อุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุด) ระยะเวลา 30 ปี (2021–2050) จากโครงการเปรียบเทียบแบบจำลอง (CMIP) ระยะที่ 5 จำนวน 2 ฉากทัศน์ (CMIP5-RCP4.5, CMIP5-RCP8.5) และระยะที่ 6 (CMIP6-SSP5-8.5) แต่ละฉากทัศน์ใช้ชุดข้อมูลจากแบบจำลอง 3 แบบ รวม 9 ชุด ข้อมูล จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสมดุลน้ำ (การระเหยคายน้ำ น้ำท่า น้ำซึมลงดิน) เปรียบเทียบกับผลจากข้อมูลภูมิอากาศช่วงปีฐาน (1981–2010) ตามกลุ่มฉากทัศน์ที่รวมผลของแต่ละกลุ่มด้วยเทคนิคหลายแบบจำลองร่วมกัน จากข้อมูลสภาพภูมิอากาศ พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยและปริมาณฝนรายปีเพิ่มขึ้น โดยช่วงฤดูแล้ง (พฤศจิกายน–เมษายน) อุณหภูมิเพิ่มมากกว่าช่วงฤดูฝน (พฤษภาคม–ตุลาคม) ปริมาณฝนเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูฝน โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงกลางฤดูฝน (มิถุนายน–สิงหาคม) ขณะที่ช่วงต้นและปลายฤดู การเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน ข้อมูลฝนจาก CMIP5 (RCP4.5 และ RCP8.5) เพิ่มสูงกว่า CMIP6-SSP5-8.5 จากการวิเคราะห์สมดุลน้ำด้วย SWAT+ พบว่า ปริมาณน้ำท่าและน้ำซึมลงดินเพิ่มขึ้น ส่วนการระเหยคายน้ำลดลง โดยน้ำท่าและน้ำซึมลงดินเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูฝนและเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยช่วงฤดูแล้ง ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงฝน ส่วนการระเหยคายน้ำลดลงมากในช่วงฤดูแล้งจากการขาดน้ำในดิน ผลจากการเปลี่ยนแปลงสมดุลน้ำอาจทำให้ภัยน้ำท่วมและภัยแล้งมีความรุนแรงมากขึ้น เรื่องเร่งด่วนที่ต้องดำเนินการสำหรับเผชิญความเสี่ยงจากสภาพภูมิอากาศทั้งปัจจุบันและอนาคต ได้แก่ การเพิ่มการเตรียมความพร้อม การกำหนดมาตรการการป้องกันและบรรเทาภัย รวมถึงการหาแนวทางการปรับตัว

คำสำคัญ: การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ, สมดุลน้ำ, ลุ่มน้ำลำเสียว, SWAT+

Abstract

Climate change impact on water balance at basin scale was evaluated in Northeast Thailand (Lam Siao basin, with drainage area of 4,400 km²) using SWAT+ model. The daily projected 30-year (2021–2050) climate datasets (rainfall, minimum and maximum temperature) were selected from the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP): 2 scenarios from the 5th phase (CMIP5-RCP4.5, CMIP5-RCP8.5) and CMIP6-SSP5-8.5 scenario from the 6th phase. In total, 9 datasets were compiled (3 GCMs for each scenario). Water balance components (evapotranspiration (ET), runoff, percolation) were analyzed and compared with those from the baseline climate period (1981–2010) by scenario groups combined using the multi-model ensemble technique. The projected climate datasets revealed that mean temperature and annual rainfall increased. Temperature rises in dry season (November–April) were higher than those in rainy season (May–October), whereas rainfall increased in rainy season with considerable amount in mid-season (June–August) and arbitrary changes at the beginning and the end of seasons. Datasets from the CMIP5 (RCP4.5 and RCP8.5) showed more increasing rainfall than those from the CMIP6-SSP5-8.5. The water balance analysis using SWAT+ indicated runoff and percolation increases but ET reduction. Runoff and percolation change patterns agreed with the rainfall changes—higher increases in rainy season and

Received: March 24, 2023

Revised: May 11, 2023

Accepted: May 15, 2023

Available online: August 30, 2023

slightly decrease in dry season. The remarkable ET reduction in dry season was due to more soil moisture deficit. Consequently, the changes in water balance components would exacerbate flood and drought hazards. To confront the present and future climate-related risks, it is urgently required to improve preparedness efforts, to establish prevention and mitigation measures and to develop adaptation solutions.

Keywords: Climate change, water balance, Lam Sioa basin, SWAT+

1 บทนำ

ภาวะโลกร้อนที่รับรู้ได้จากอุณหภูมิเฉลี่ยสูงขึ้นและสภาพภูมิอากาศที่แปรปรวน (Kumar, 2019) จาก the 5th Assessment Report ของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]) คาดว่าภายในปี ค.ศ.2100 ระดับน้ำทะเลเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้น 0.19 m ปริมาณก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้น 40% อุณหภูมิโลกเฉลี่ยเพิ่มมากกว่า 2°C (IPCC, 2014) และจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก (General circulation models [GCMs]) ในโครงการเปรียบเทียบแบบจำลอง (Coupled Model Intercomparison Project [CMIP]) ซึ่งจำลองภายใต้ฉากทัศน์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (representative concentration pathways [RCP]) 4 ระดับ (RCP2.6, RCP4.5, RCP6, RCP8.5) อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกคาดว่าจะสูงขึ้น 1.4°C ถึง 2.6°C (Pielke et al., 2022) ซึ่งความร้อนที่เพิ่มส่งผลให้ในบางพื้นที่ที่มีความแห้งแล้งยาวนานขึ้นหรือเกิดฝนตกหนักมากขึ้น ความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศมีผลกระทบโดยตรงต่อระบบอุทกวิทยา (IPCC, 2014) ที่ผ่านมามีการศึกษาสภาพภูมิอากาศอนาคตทั้งในประเทศไทยและในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Khadka et al., 2021a; Khadka et al., 2021b; Supharatid et al., 2022) โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและปริมาณฝน โดยในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย Khadka et al. (2021b) พบว่า ฤดูฝนอาจมีช่วงเวลาสั้นลง อย่างไรก็ตาม การประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศต่อองค์ประกอบอื่น ๆ ของสมมูลน้ำในวัฏจักรทางอุทกวิทยาในประเทศไทยยังมีการศึกษาค่อนข้างจำกัด

การประเมินทางอุทกวิทยาด้วยแบบจำลอง Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2005) เป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับการยอมรับและมีการใช้งานแพร่หลายทั่วโลก (Williams et al., 2010) งานศึกษาในประเทศไทย เช่น การศึกษาการตอบสนองทางอุทกวิทยาลุ่มน้ำห้วยขุนแก้วจากฐานข้อมูลอากาศของทั้งโลก (Chuenchooklin, 2018) การประมาณค่าข้อมูลดินที่ไม่สมบูรณ์เพื่อประเมินอัตราการไหลในลุ่มน้ำกระเสียว (Kakarndee and Kositsakulchai, 2019) การคาดการณ์น้ำท่าผิวดินในอนาคตจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในลุ่มน้ำลำภาชี (Kositsakulchai et al., 2021) การประเมินสมมูลน้ำในนาข้าวในพื้นที่ชลประทาน (Phimchaisai and Kositsakulchai, 2020) เป็นต้น ในปัจจุบันมีการพัฒนา

แบบจำลอง SWAT+ ต่อจากแบบจำลอง SWAT2012 และ QSWAT (Dile and Srinivasan, 2014; Bieger et al., 2017) แบบจำลองนี้เป็นโปรแกรมสารสนเทศ ดาวันโฮลด์ได้จาก <https://swat.tamu.edu/software/plus/> โดยมีการประยุกต์ใช้เพิ่มมากขึ้น อาทิ การประเมินน้ำใต้ดิน (Bailey et al., 2020) การจัดการอ่างเก็บน้ำ (Arnold et al., 2018) และการจำลองในพื้นที่ลุ่มน้ำที่ส่วนใหญ่เป็นนา (Kakarndee and Kositsakulchai, 2020) จากการใช้งาน SWAT ในงานศึกษาที่ผ่านมา แบบจำลองนี้จึงเป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบสมมูลน้ำ (Leta et al., 2016)

งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลอง SWAT+ ประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกต่อองค์ประกอบสมมูลน้ำระดับลุ่มน้ำในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเลือกลุ่มน้ำลำเสียวเป็นพื้นที่ศึกษา การประเมินใช้ชุดข้อมูลภูมิอากาศอนาคตของโครงการ CMIP ระยะที่ 5 (CMIP5) สองฉากทัศน์ (RCP 4.5, RCP 8.5) และ ระยะที่ 6 (CMIP6) หนึ่งฉากทัศน์ (SSP5-8.5)

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 พื้นที่ศึกษา

ลำเสียว (Figure 1) เป็นลำน้ำสาขาของแม่น้ำมูล มีพื้นที่รับน้ำ 4,400 km² ลำน้ำหลักยาว 245 km ตั้งอยู่ระหว่าง 15.336°N ถึง 16.075°N และ 103.029°E ถึง 104.252°E ในเขตพื้นที่ 4 จังหวัด (จ.มหาสารคาม จ.ร้อยเอ็ด จ.ยโสธร และ จ.ศรีสะเกษ) ภูมิประเทศมีความสูงระหว่าง 110 m -220 m ความลาดชันระหว่าง 0%-10% ภูมิอากาศได้รับอิทธิพลจากมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือพัดอากาศแห้งและเย็นจากประเทศจีน ช่วงเดือนตุลาคมถึงกุมภาพันธ์ และมรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดพาอากาศชื้นในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมทำให้มีฝนตกชุก ปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยระหว่าง 1,100 mm -1,500 mm มีอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนต่ำสุด 16.9°C ในเดือนมกราคม และสูงสุด 35.7°C ในเดือนเมษายน

2.2 ข้อมูล

ข้อมูล digital elevation model (DEM) ความละเอียด 90 m ดาวันโฮลด์จากเว็บไซต์ srtm.csi.cgiar.org ข้อมูลดิน สมบัติดินและการใช้ประโยชน์ที่ดิน ในรูปของแผนที่จากกรมพัฒนาที่ดิน ข้อมูลภูมิอากาศรายวัน (ปริมาณฝน อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด) ช่วง 1979–2017 จากสถานีอุตุนิยมวิทยาร้อยเอ็ด กรมอุตุนิยมวิทยา ข้อมูลน้ำท่ารายวัน ช่วง 2005–2017 ของสถานี M.95A (ต.สระคู อ.สุวรรณภูมิ จ.ร้อยเอ็ด) และข้อมูลความจุอ่างเก็บน้ำ จากกรมชลประทาน

ชุดข้อมูลภาพถ่ายภูมิอากาศโลกช่วงปี 2021–2050 จำนวน 9 ชุดข้อมูล เป็นข้อมูลจากโครงการ CMIP ระยะที่ 5 (CMIP5) สองฉากทัศน์ (RCP 4.5, RCP 8.5) อย่างละ 3 แบบจำลอง (CCSM4, CMCC-CM, MPI-ESM-MR) รวม 6 ชุดข้อมูล และระยะที่ 6 (CMIP6) หนึ่งฉากทัศน์ (SSP5-8.5) จาก 3 แบบจำลอง (EC-Earth3P, EC-Earth3P-HR, HadGem3-GC31-HH) แบบจำลองภูมิอากาศโลกที่เลือกถูกประเมินและจัดทำชุดข้อมูลเป็นกริดความละเอียด 0.25° (25 km²) ในกรอบโครงการวิจัย Enhancing resilience to future hydrometeorological extremes in the Mun River Basin in Northeast of Thailand (Tingsanchali et al., 2022) ซึ่ง Khadka et al. (2021a) ได้รายงานว่าผลจากแบบจำลองมีความสอดคล้องดีกับข้อมูลตรวจวัดของภูมิอากาศในภูมิภาคนี้ โดยฉากทัศน์ในการศึกษานี้ของ CMIP5 เลือกระดับปานกลาง (RCP 4.5) (Thomson et al., 2011) และระดับสูงสุด (RCP 8.5) (Riahi et al., 2011) ส่วน CMIP6 มีข้อมูลเพียงฉากทัศน์เดียวในขณะที่ทำการศึกษาคือ เส้นทางเศรษฐกิจ-สังคมที่ 5 (Shared Socio-Economic Pathways [SSP]) ร่วมกับ RCP 8.5 (SSP5-8.5) (Kriegler et al., 2017)

2.3 วิธีการ

วิธีการดำเนินงาน (Figure 2) ดังนี้ ขั้นแรกเป็นการจัดเตรียมแบบจำลอง SWAT+ เริ่มจากการนำเข้าข้อมูล DEM และ “burn in” ด้วยข้อมูลลำน้ำ จากนั้นวิเคราะห์เพื่อแบ่งขอบเขตลุ่มน้ำ จากนั้น นำเข้าแผนที่ดินและการใช้ประโยชน์ที่ดิน การกำหนดหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (Hydrologic Response Unit [HRU]) ใช้แบบ Dominated HRUs และเพิ่มอ่างเก็บน้ำและสภาพการเก็บน้ำในลำน้ำเพื่อให้สอดคล้องกับสภาพอุทกวิทยาในพื้นที่ ข้อมูลสำหรับปรับพารามิเตอร์แบบจำลองได้ใช้ตรวจวัดช่วง

ปี 2005–2017 ที่สถานีตรวจ M.95A (มีข้อมูลขาดหายปี 2006 และ 2012) การเปรียบเทียบเลือกช่วงปี 2015–2017 ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่ระยะเวลาใกล้เคียงกับสภาพปัจจุบัน ส่วนการทวนสอบเลือกช่วงปี 2009–2011 การประเมินสมรรถนะแบบจำลองใช้วิธีการพิจารณาเปรียบเทียบความสอดคล้องของกราฟระหว่างผลการจำลองกับข้อมูลตรวจวัด (Moriassi et al., 2007) และวิธีพิจารณาดัชนีสมรรถนะ Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) (Nash and Sutcliffe, 1970) ดังสมการ (1), coefficient of determination (r^2) ดังสมการ (2) และ percentage bias (PBIAS) ดังสมการ (3) โดยพิจารณาตามเกณฑ์ใน Table 1 (Gupta et al., 1999; Moriassi et al., 2007) ผลการจำลองอยู่ในระดับน่าพอใจเมื่อ $NSE > 0.5$, $r^2 > 0.60$ และ $PBIAS < \pm 25\%$

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \right) \quad (1)$$

$$r^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n [(O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)]}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2 \right]^{0.5}} \right]^2 \quad (2)$$

$$PBIAS = \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \times 100 / \sum_{i=1}^n O_i \quad (3)$$

โดย O_i คือ ค่าจากข้อมูลตรวจวัด $\bar{O}_i$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลตรวจวัด P_i คือ ค่าจากการจำลอง $\bar{P}_i$ คือ ค่าเฉลี่ยจากการจำลอง

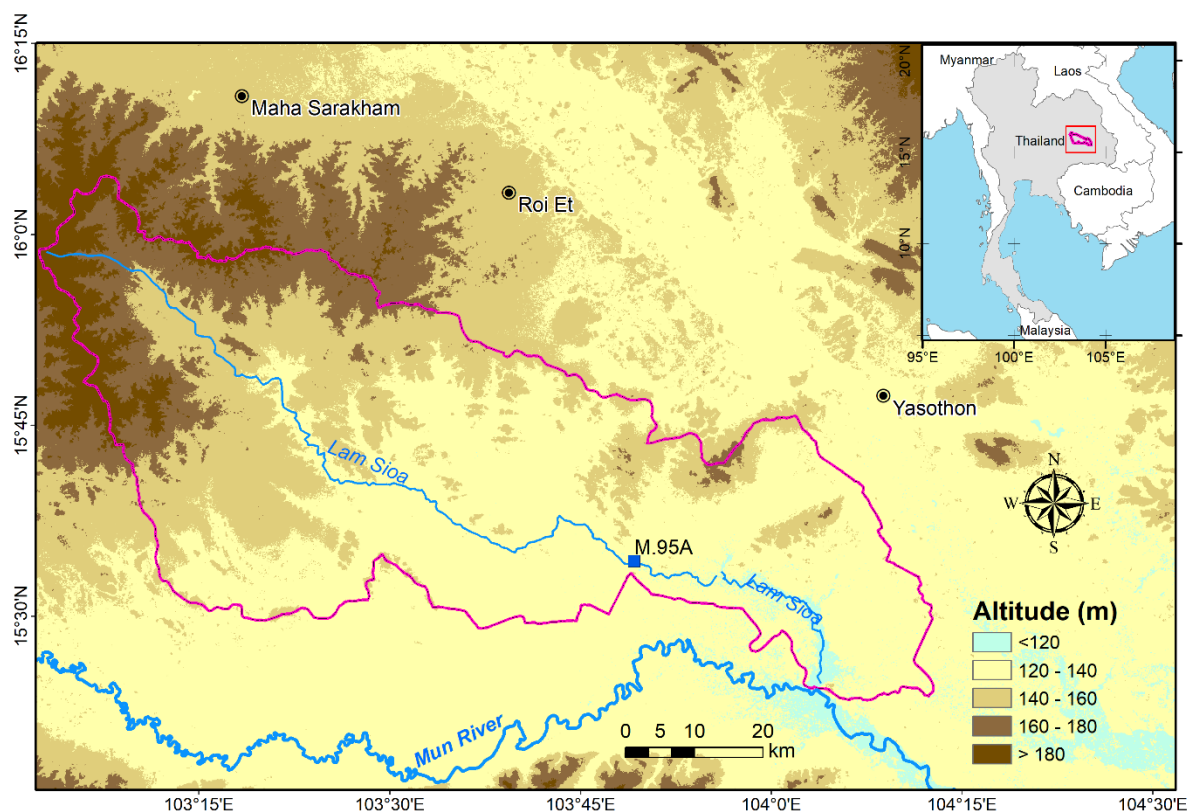


Figure 1 Study area (Lam Sioa basin)

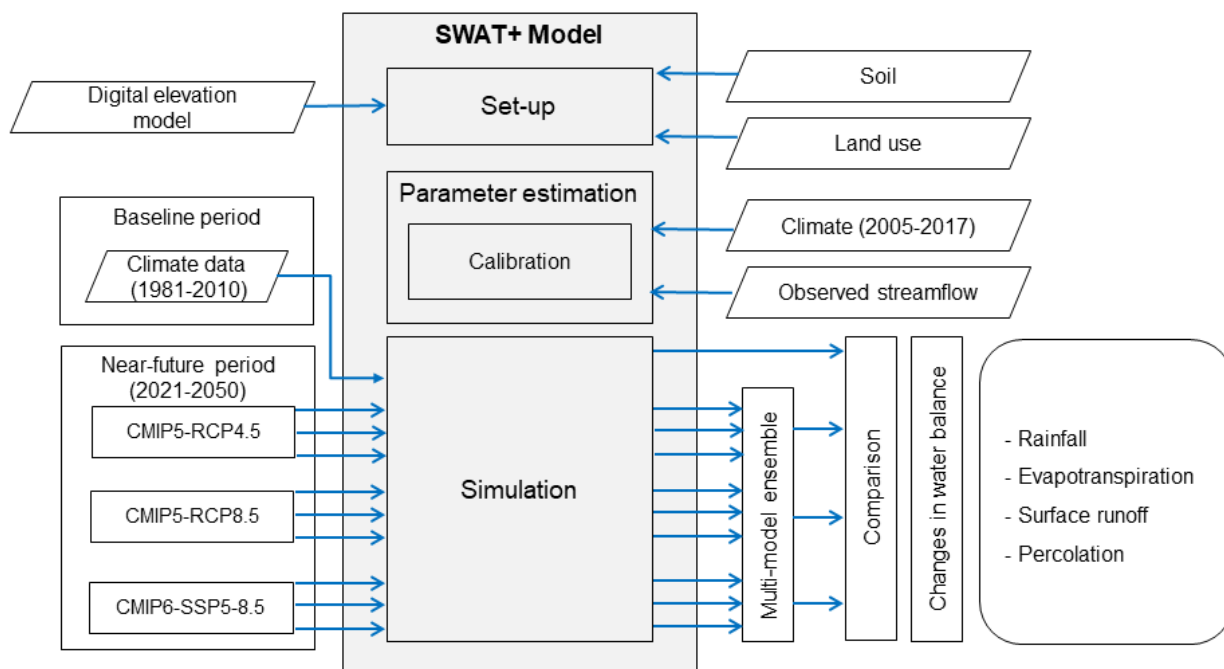


Figure 2 Methodological framework

ขั้นถัดมาเป็นการใช้แบบจำลอง SWAT+ เพื่อประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกต่อสมดุลน้ำ (ปริมาณฝน การระเหยคายน้ำ น้ำท่า และการซึมลงดิน) โดยจำลองสมดุลน้ำ

ทั้งกลุ่มน้ำด้วยชุดข้อมูลภูมิอากาศจากการตรวจวัดช่วงปีฐาน 30 ปี (1981-2010) เปรียบเทียบผลการจำลองด้วยชุดข้อมูลสภาพภูมิอากาศโลก 30 ปี (2021-2050) 3 กลุ่มฉากทัศน์ กลุ่มละ 3

แบบจำลองภูมิอากาศ รวม 9 ชุดข้อมูล (CMIP5-RCP 4.5 3 ชุด CMIP5-RCP 8.5 3 ชุดและ CMIP6-SSP5-8.5 3 ชุด) การวิเคราะห์ผลแต่ละกลุ่มฉากทัศน์ใช้เทคนิคหลายแบบจำลองร่วมกัน (multi-model ensemble) โดยผลแต่ละกลุ่มฉากทัศน์รวมกันโดยการเฉลี่ยแบบไม่ถ่วงน้ำหนัก (equal-weight simple arithmetic average) (Wu and Levinson, 2021)

Table 1 Recommended model performance ratings for streamflow (Gupta et al., 1999; Moriasi et al., 2007)

Indicator	Rating	Range
NSE	Very good	$0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$
	Good	$0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$
	satisfactory	$0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$
	Unsatisfactory	$\text{NSE} \leq 0.50$
r^2	Very good	$0.80 < r^2 \leq 1.00$
	Good	$0.70 < r^2 \leq 0.80$
	satisfactory	$0.60 < r^2 \leq 0.70$
	Unsatisfactory	$r^2 \leq 0.60$
PBIAS (%)	Very good	$\text{PBIAS} < \pm 10$
	Good	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$
	satisfactory	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$
	Unsatisfactory	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$

3 ผลและวิจารณ์

3.1 การเปรียบเทียบแบบจำลอง

ผลการเปรียบเทียบและทวนสอบแบบจำลองแสดงใน Figure 3 และ Table 2 การเปรียบเทียบอัตราการไหลรายวันจากข้อมูลตรวจวัดกับค่าจากการจำลอง ช่วงปี 2005–2017 พบว่าสมรรถนะการจำลองน้ำท่าของแบบจำลองช่วงการเปรียบเทียบ (2015–2017) อยู่ในระดับดี ($\text{NSE} = 0.76$, $r^2 = 0.69$ และ $\text{PBIAS} = -6.2\%$) (Table 2) ส่วนช่วงการทวนสอบ (2009–2011) ค่า $r^2 > 0.80$ แต่ $\text{NSE} = 0.25$ และ $\text{PBIAS} > \pm 25\%$ ยังไม่อยู่ระดับน่าพอใจ เมื่อพิจารณาแยกเป็นรายปี พบว่า มีปีที่ค่า NSE ที่สูงกว่าหรือใกล้เคียงระดับน่าพอใจ ($\text{NSE} > 0.5$) อยู่ 5 ปี (2005, 2011, 2013, 2016, 2017) ส่วนค่า r^2 อยู่ในระดับดี ($r^2 > 0.70$) มี 6 ปี (2005, 2007, 2008, 2009, 2011, 2017) (Table 2) และใกล้เคียงระดับน่าพอใจ ($r^2 > 0.60$) 2 ปี (2010, 2016) โดยปี 2017 ตัวชี้วัดอยู่ในระดับดีมากทุกเกณฑ์ ($\text{NSE} = 0.86$ $r^2 = 0.79$ $\text{PBIAS} < \pm 5\%$)

ข้อมูลตรวจวัดปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ศึกษามีจำกัดและในปัจจุบัน (พ.ศ.2565) สถานี M.95A ได้หยุดตรวจวัด เนื่องจากการก่อสร้างสะพานขยายถนน นอกจากนี้ การใช้ที่ดินในพื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่เป็นนาข้าวมีสภาพกักเก็บน้ำในพื้นที่ ทำให้การตอบสนองทางอุทกวิทยามีลักษณะเฉพาะต่างจากการใช้ที่ดินประเภทอื่น แบบจำลองมีสมรรถนะดีในการจำลองน้ำท่าในปีที่น้ำมาก ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสมรรถนะในภาพรวมทั้งกราฟเปรียบเทียบและค่าดัชนี ผลการจำลองอยู่ในระดับน่าพอใจสำหรับการใช้งานในลำดับต่อไป

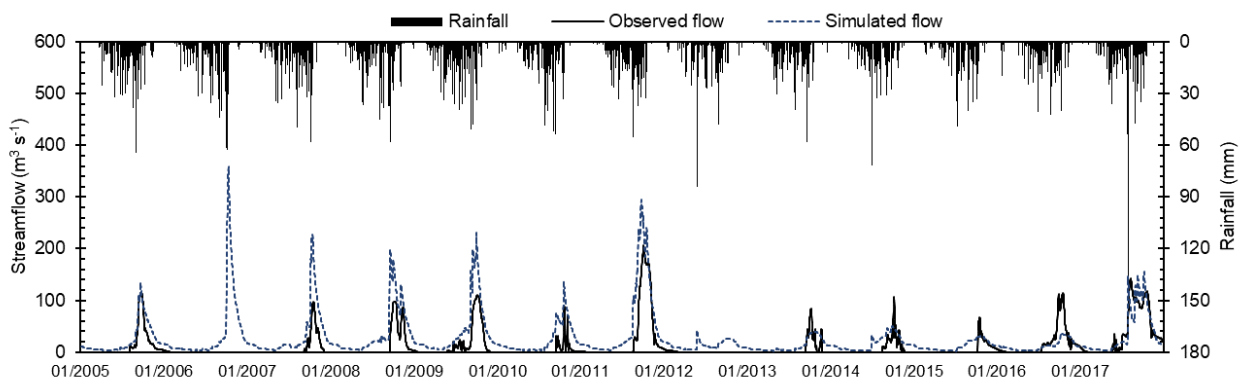


Figure 3 Daily rainfall and observed as well as simulated streamflow at M.95A station (2005–2017)

Table 2 Model performances on streamflow simulation

Year	Performance indicator		
	NSE	r^2	PBIAS
2005	0.80	0.90	-0.71
2006	NA ¹	NA	NA
2007	-1.56	0.91	-2.6
2008	-0.41	0.75	-1.91
2009	0.05	0.88	-1.5
2010	-2.83	0.56	-4.58
2011	0.59	0.83	-0.84
2012	NA	NA	NA
2013	0.43	0.44	-0.78
2014	0.15	0.52	-1.66
2015	0.25	0.43	-1.31
2016	0.54	0.57	0.3
2017	0.86	0.79	-0.05

¹NA = observed data were not available

3.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

Table 3 แสดงข้อมูลอุณหภูมิรายเดือนเฉลี่ยและรายปีเฉลี่ยจากช่วงปีฐาน (Baseline) และภาพฉายภูมิอากาศโลกภายใต้กลุ่มฉากทัศน์ CMIP5-RCP 4.5, CMIP5-RCP 8.5 และ CMIP6-SSP5-8.5 พบว่า อุณหภูมิรายปีช่วงปีฐานเฉลี่ยเท่ากับ 27.7°C ภาพฉายอนาคตมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น +0.9°C ถึง +1.4°C โดย CMIP6-SSP5-8.5 มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากที่สุด (+1.4°C) รองลงมา CMIP5-RCP 8.5 (+1.1°C) และ CMIP5-RCP 4.5 (+0.9°C) เมื่อพิจารณาข้อมูลรายเดือนในช่วงฤดูแล้ง (พฤศจิกายน-เมษายน) เทียบกับช่วงฤดูฝน (พฤษภาคม-ตุลาคม) พบว่า ช่วงฤดูแล้งมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากกว่าช่วงฤดูฝน โดยช่วงฤดูแล้งอุณหภูมิปีฐานเฉลี่ยเท่ากับ 26.7°C ภาพฉายอนาคตมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น +1.1°C ถึง +1.5°C โดย CMIP5-RCP8.5 และ CMIP6-SSP-8.5 อุณหภูมิเพิ่มขึ้น +1.5°C ขณะที่ CMIP5-RCP4.5 อุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย +1.1°C ส่วนช่วงฤดูฝนอุณหภูมิปีฐานเฉลี่ยเท่ากับ 27.9°C ภาพฉายอนาคตมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น +0.8°C ถึง +1.2°C โดย CMIP6-SSP-8.5 อุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย +1.2°C ขณะที่ CMIP5-RCP4.5 และ CMIP5-RCP8.5 อุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย +0.8°C

ภาพฉายอุณหภูมิรายปีทั้ง 3 กลุ่มฉากทัศน์เพิ่มขึ้น โดยช่วงฤดูแล้งอุณหภูมิเพิ่มมากกว่าช่วงฤดูฝน ภายใต้ CMIP5-RCP8.5

และ CMIP6-SSP5-8.5 อุณหภูมิเพิ่มสูงกว่า CMIP5-RCP4.5 เนื่องจากเป็นฉากทัศน์ที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงกว่า

3.3 การเปลี่ยนแปลงฝน

ฝนรายปี (Table 4) ช่วงปีฐานมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1,310 mm ฝนจาก CMIP5 เพิ่มขึ้น 59.8 mm (RCP4.5) และ 75.8 mm (RCP8.5) ส่วน CMIP6- SSP5-8.5 เพิ่มขึ้น 17.3 mm โดย CMIP5-RCP8.5 เพิ่มขึ้นมากที่สุด เมื่อพิจารณาข้อมูลรายเดือนพบว่า ปริมาณฝนเพิ่มขึ้นช่วงกลางฤดูฝน (มิถุนายน-สิงหาคม) แต่ช่วงต้นและปลายฤดูฝนมีการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน เดือนมิถุนายนฝนเพิ่มขึ้นในสัดส่วนสูง ขณะที่ฝนจาก CMIP6 เพิ่มขึ้นน้อยกว่า CMIP5 ส่วนในช่วงฤดูแล้ง (พฤศจิกายน-เมษายน) ฝนลดลง โดยเฉพาะเดือนมีนาคมและเมษายน ฝนมีค่าเฉลี่ย 36.2 mm และ 76.2 mm ตามลำดับ โดยในเดือนมีนาคม ฝนจาก CMIP5 ลดลง 7.9 mm (RCP4.5) และ 9.4 mm (RCP8.5) ขณะที่ CMIP6-SSP5-8.5 ลดลง 14.9 mm ในเดือนเมษายน

ฝนรายปีจากทั้ง 3 กลุ่มฉากทัศน์มีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยข้อมูลจาก CMIP5 (RCP4.5 และ RCP8.5) เพิ่มสูงกว่า CMIP6-SSP5-8.5 ฝนรายเดือนของ CMIP5 (RCP4.5 และ RCP8.5) เพิ่มมากที่สุดช่วงกลางฤดูฝน (สิงหาคม) ในขณะที่ CMIP6 เพิ่มมากที่สุดช่วงต้นฤดูฝน (มิถุนายน)

3.4 การเปลี่ยนแปลงสมดุลน้ำ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสมดุลน้ำ ประกอบด้วย การระเหยคายน้ำ (Table 5) น้ำท่า (Table 6) และ น้ำซึมลงดิน (Table 7) โดยแสดงข้อมูลรายเดือนและรายปีเฉลี่ยในช่วงปีฐานและช่วงปีอนาคต ดังนี้

การระเหยคายน้ำ (evapotranspiration) ช่วงปีฐานมีค่าเฉลี่ยรายปี 975.0 mm (Table 5) โดยพบว่า CMIP5 ลดลง 45.3 mm (RCP4.5) และ 35.8 mm (RCP8.5) ส่วน CMIP6-SSP5-8.5 ลดลง 35.5 mm เมื่อพิจารณารายเดือน พบว่า เดือนกันยายนและตุลาคม ซึ่งเป็นช่วงฤดูฝนมีการระเหยคายน้ำเพิ่มขึ้น โดยเดือนกันยายน เท่ากับ 109.3 mm ภายใต้ CMIP5 เพิ่มขึ้น 2.4 mm (RCP 4.5) และ 5.4 mm (RCP 8.5) ส่วน CMIP6-SSP5-8.5 เพิ่มขึ้น 1.6 mm ส่วนเดือนตุลาคม เท่ากับ 95.3 mm ภายใต้ CMIP5 เพิ่มขึ้น 2.0 mm (RCP 4.5) และ 1.8 mm (RCP 8.5) ส่วน CMIP6-SSP5-8.5 เพิ่มขึ้น 1.7 mm ในขณะที่ช่วงฤดูแล้ง (พฤศจิกายน-เมษายน) การระเหยคายน้ำลดลง (-0.6 mm ถึง -12.8 mm) ทั้ง 3 กลุ่มฉากทัศน์ ยกเว้น CMIP6-SSP5-8.5 เดือนธันวาคม

Table 3 Temperatures of baseline (1981-2010) and projected (2021–2050) climates.

	Temperature (°C)			
	Baseline	CMIP5-RCP4.5	CMIP5-RCP8.5	CMIP6-SSP5-8.5
Jan	24.2	25.5(+1.3)	25.9(+1.8)	25.5(+1.3)
Feb	26.8	27.6(+0.8)	28.1(+1.3)	28.2(+1.5)
Mar	29.2	30.4(+1.2)	30.8(+1.7)	30.7(+1.5)
Apr	30.7	32.0(+1.3)	32.1(+1.4)	32.3(+1.6)
May	30.0	31.0(+1.1)	31.1(+1.2)	31.5(+1.6)
Jun	29.5	30.1(+0.6)	30.1(+0.7)	30.6(+1.2)
Jul	28.9	29.8(+0.8)	29.8(+0.8)	30.3(+1.4)
Aug	28.5	29.2(+0.7)	29.3(+0.7)	29.7(+1.2)
Sep	28.1	28.6(+0.5)	28.7(+0.6)	29.2(+1.1)
Oct	27.2	27.6(+0.5)	28.0(+0.8)	28.3(+1.2)
Nov	25.5	26.3(+0.8)	26.6(+1.1)	27.0(+1.5)
Dec	23.6	24.6(+1.0)	24.6(+1.0)	25.2(+1.6)
Year	27.7	28.6(+0.9)	28.8(+1.1)	29.1(+1.4)

Table 4 Rainfalls of baseline (1981-2010) and projected (2021–2050) climates.

	Rainfall (mm)			
	Baseline	CMIP5-RCP4.5	CMIP5-RCP8.5	CMIP6-SSP5-8.5
Jan	4.0	3.5 (-0.5)	4.3 (+0.3)	2.7 (-1.3)
Feb	15.0	13.9 (-1.1)	12.0 (-3.0)	15.2 (+0.2)
Mar	36.2	28.3 (-7.9)	26.8 (-9.4)	31.9 (-4.3)
Apr	76.2	72.2 (-4.0)	81.9 (+5.7)	61.3 (-14.9)
May	172.3	169.2 (-3.1)	178.8 (+6.5)	174.7 (+2.4)
Jun	182.2	190.0 (+7.8)	212.0 (+29.8)	208.8 (+26.6)
Jul	190.7	209.6 (+18.8)	209.1 (+18.4)	192.6 (+1.9)
Aug	230.3	265.6 (+35.3)	273.6 (+43.3)	242.3 (+12.0)
Sep	261.6	284.5 (+22.9)	255.7 (-5.9)	270.0 (+8.4)
Oct	117.0	112.8 (-4.2)	109.6 (-7.4)	107.9 (-9.1)
Nov	23.1	17.7 (-5.5)	19.8 (-3.3)	17.6 (-5.5)
Dec	1.4	2.6 (+1.3)	2.2 (+0.8)	2.3 (+0.9)
Year	1,310.0	1,369.8 (+59.8)	1,385.8 (+75.8)	1,327.3 (+17.3)

Table 5 Evapotranspiration of baseline (1981-2010) and projected (2021–2050) climates.

	Evapotranspiration (mm)			
	Baseline	CMIP5-RCP4.5	CMIP5-RCP8.5	CMIP6-SSP5-8.5
Jan	44.9	33.8(-11.1)	32.2(-12.8)	34.8(-10.1)
Feb	14.5	13.6(-0.9)	11.6(-2.9)	13.9(-0.6)
Mar	33.0	22.6(-10.4)	23.2(-9.8)	28.3(-4.7)
Apr	59.5	49.2(-10.3)	50.6(-8.9)	49.0(-10.6)
May	110.9	103.5(-7.5)	107.7(-3.2)	101.6(-9.4)
Jun	122.3	122.0(-0.3)	122.9(+0.6)	121.3(-1.0)
Jul	125.1	124.3(-0.8)	125.8(+0.7)	126.2(+1.1)
Aug	122.9	121.7(-1.1)	120.2(-2.6)	120.0(-2.9)
Sep	109.3	111.7(+2.4)	114.7(+5.4)	110.8(+1.6)
Oct	95.5	97.5(+2.0)	97.3(+1.8)	97.2(+1.7)
Nov	72.8	68.8(-4.0)	71.1(-1.7)	70.4(-2.3)
Dec	64.3	60.9(-3.4)	61.9(-2.3)	66.1(+1.8)
Year	975.0	929.7(-45.3)	939.2(-35.8)	939.5(-35.5)

น้ำท่า (runoff) ช่วงปีฐานมีค่าเฉลี่ย 119.6 mm (Table 6) โดย CMIP5 เพิ่มขึ้น 199.6 mm (RCP 4.5) และ 202.8 mm (RCP 8.5) ส่วน CMIP6 เพิ่มขึ้น 36.1 mm (SSP5-8.5) เมื่อพิจารณารายเดือน พบว่า น้ำท่าในช่วงฤดูแล้งภายใต้ 3 ฉากทัศน์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (0.0 mm ถึง +1.3 mm) โดยเดือนพฤศจิกายนลดลงเล็กน้อย ขณะที่ในช่วงฤดูฝนน้ำท่าเพิ่มขึ้นสูงขึ้น โดยเพิ่มมากในช่วงเดือนกรกฎาคม-กันยายน โดยเดือนกันยายนเพิ่มมากที่สุด ช่วงปีฐานเดือนกรกฎาคมมีน้ำท่าเฉลี่ย 10.9 mm ภายใต้ CMIP5 เพิ่มขึ้น 9.1 mm (RCP4.5) และ 12.3 mm (RCP8.5) ส่วน CMIP6-SSP5-8.5 ลดลง 0.5 mm เดือนสิงหาคมช่วงปีฐานมีน้ำท่าเฉลี่ย 19.8 mm ภายใต้ CMIP5 เพิ่มขึ้น 26.3 mm (RCP4.5) และ 28.4 mm (RCP8.5) ส่วน CMIP6-SSP5-8.5 เพิ่มขึ้น 5.9 mm เดือนกันยายนช่วงปีฐานมีน้ำท่าเฉลี่ย 52.8 mm ภายใต้ CMIP5 เพิ่มขึ้น 37.7 mm (RCP4.5) และ 29.0 mm (RCP8.5) ส่วน CMIP6-SSP5-8.5 เพิ่มขึ้น 21.8 mm

น้ำซึมลงดินผ่านหน้าตัดดิน (percolation) ช่วงปีฐานมีค่าเฉลี่ยรายปี 209.5 mm (Table 7) CMIP5 เพิ่มขึ้น 21.0 mm (RCP 4.5) และ 26.4 mm (RCP 8.5) ส่วน CMIP6-SSP5-8.5 เพิ่มขึ้น 16.8 mm เมื่อพิจารณารายเดือน พบว่า การซึมลงดินภายใต้ 3 กลุ่มฉากทัศน์เพิ่มขึ้นในฤดูฝน (+1.6 mm ถึง +7.4 mm) ส่วนฤดูแล้งมีการเปลี่ยนแปลงน้อย (-0.2 mm ถึง +0.8 mm)

น้ำท่าและน้ำซึมลงดินมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกันเนื่องจาก ช่วงต้นฤดูฝนความชื้นดินมีน้อย ฝนที่ตกสะสมในแหล่งกักเก็บผิวดินและเมื่อน้ำซึมผ่านผิวดิน (infiltration) สะสมในดินมีผลให้ส่วนเกินของน้ำฝนที่ทำให้เกิดน้ำท่ามีน้อยและน้ำซึมลงดินผ่านหน้าตัดดินน้อย การเปลี่ยนแปลงของฝนช่วงต้นฤดูจึงมีผลต่อน้ำท่าและน้ำซึมลงดินน้อย ในขณะที่ช่วงกลางถึงปลายฤดูฝนปริมาณน้ำสะสมในแหล่งกักเก็บใกล้จุดอ้อมตัว ฝนที่ตกลงมาส่วนใหญ่ทำให้เกิดน้ำท่าและน้ำซึมลงดินผ่านหน้าตัดดิน ดังนั้น ฝนที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้น้ำท่าและน้ำซึมลงดินเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่มากกว่าการเพิ่มขึ้นในช่วงต้นฤดูฝน

การระเหยคายน้ำเพิ่มขึ้นจากปริมาณฝนที่เพิ่มขึ้นช่วงฤดูฝนเช่นเดียวกัน ส่วนในช่วงฤดูแล้งองค์ประกอบของสมมูลน้ำลดลงทั้งการระเหยคายน้ำ น้ำท่าและน้ำซึมลงดิน โดยการระเหยน้ำลดลงมากช่วงฤดูแล้งเนื่องจากฝนที่ลดลงทำให้ขาดแคลนน้ำในดิน

มากขึ้น ส่วนองค์ประกอบอื่นลดลงเล็กน้อยเนื่องจากปริมาณฝนน้อย การเปลี่ยนแปลงฝนในช่วงฤดูแล้งจึงมีผลต่อองค์ประกอบสมมูลน้ำน้อยกว่าช่วงฤดูฝน

การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในแต่ละภูมิภาคของโลกมีสภาพต่างกัน ทำให้ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบสมมูลน้ำต่างกันตามภูมิภาค อาทิ กลุ่มน้ำในประเทศจีน (Liu et al., 2020) ประเทศเอธิโอเปีย (Alehu and Bitana, 2023) หรือที่ฮาวาย (Leta et al., 2016) ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการศึกษากรณีเฉพาะในแต่ละพื้นที่ตามสภาพภูมิอากาศ

4 สรุป

การประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศต่อสมมูลน้ำด้วย SWAT+ โดยใช้ข้อมูลสภาพภูมิอากาศโลก 3 กลุ่มฉากทัศน์ (CMIP5-RCP4.5, CMIP5-RCP8.5, CMIP6-SSP5-8.5) เทียบกับภูมิอากาศช่วงปีฐาน สรุปได้ดังนี้ ข้อมูลจากสภาพภูมิอากาศทั้ง 3 กลุ่มฉากทัศน์แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและปริมาณฝนเพิ่มขึ้น โดยช่วงฤดูแล้ง (พฤศจิกายน-เมษายน) อุณหภูมิเพิ่มมากกว่าช่วงฤดูฝน (พฤษภาคม-ตุลาคม) ส่วนปริมาณฝนลดลงในช่วงฤดูแล้งแต่เพิ่มขึ้นในช่วงฤดูฝน โดยเพิ่มขึ้นช่วงกลางฤดูฝน (มิถุนายน-สิงหาคม) ขณะที่ช่วงต้นและช่วงปลายฤดูฝนการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน ข้อมูลสภาพภูมิอากาศจาก CMIP5 (RCP4.5 และ RCP8.5) มีปริมาณฝนเพิ่มขึ้นมากกว่า CMIP6-SSP5-8.5 จากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมมูลน้ำพบว่า ปริมาณน้ำท่าและน้ำซึมลงดินเพิ่มขึ้น ส่วนการระเหยคายน้ำลดลง โดยน้ำท่าและน้ำซึมลงดินเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงฝนซึ่งเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูฝนและเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยช่วงฤดูแล้ง ส่วนการระเหยคายน้ำลดลงมากในช่วงฤดูแล้งมีสาเหตุจากการขาดน้ำในดิน จากการเปลี่ยนแปลงสมมูลน้ำน้ำท่าเพิ่มมากขึ้นในช่วงฤดูฝนเป็นสาเหตุให้ภัยน้ำท่วมอาจรุนแรงมากขึ้น ส่วนช่วงฤดูแล้งการระเหยคายน้ำที่ลดลงจากการขาดน้ำในดินเป็นตัวชี้ว่าภัยแล้งอาจรุนแรงมากขึ้น การเพิ่มการเตรียมความพร้อม การกำหนดมาตรการการป้องกันและบรรเทาภัย และการหาแนวทางการปรับตัว อาทิ การจัดหาแหล่งน้ำ การปรับเปลี่ยนรูปแบบการเพาะปลูก ซึ่งถือได้ว่าเป็นเรื่องเร่งด่วนที่ต้องดำเนินการเพื่อเผชิญกับภัยทั้งในปัจจุบันและในอนาคตอันใกล้

Table 6 Runoffs of baseline (1981-2010) and projected (2021-2050) climates.

	Runoff (mm)			
	Baseline	CMIP5-RCP4.5	CMIP5-RCP8.5	CMIP6-SSP5-8.5
Jan	0.0	0.0(+0.0)	0.0(+0.0)	0.0(+0.0)
Feb	0.1	0.2(+0.1)	0.2(+0.2)	0.2(+0.1)
Mar	0.2	0.2(+0.0)	0.2(+0.0)	0.2(+0.0)
Apr	0.8	1.4(+0.6)	2.1(+1.3)	0.8(+0.0)
May	2.4	3.4(+1.0)	5.6(+3.3)	5.6(+3.3)
Jun	5.4	6.4(+1.0)	11.2(+5.8)	10.8(+5.4)
Jul	10.9	20.1(+9.1)	23.2(+12.3)	10.4(-0.5)
Aug	19.8	46.1(+26.3)	48.3(+28.4)	25.7(+5.9)
Sep	52.8	90.5(+37.7)	81.8(+29.0)	74.6(+21.8)
Oct	26.3	30.8(+4.5)	29.6(+3.3)	27.0(+0.7)
Nov	1.0	0.6(-0.4)	0.6(-0.5)	0.3(-0.7)
Dec	0.0	0.0(+0.0)	0.0(0.0)	0.0(+0.0)
Year	119.6	199.6(+80.0)	202.8(+83.2)	155.8(36.1)

Table 7 Percolation of baseline (1981-2010) and projected (2021-2050) climates.

	Percolation (mm)			
	Baseline	CMIP5-RCP4.5	CMIP5-RCP8.5	CMIP6-SSP5-8.5
Jan	9.9	9.8(-0.1)	9.8(-0.2)	9.9(-0.1)
Feb	7.7	7.6(-0.1)	7.6(-0.1)	7.7(+0.0)
Mar	7.5	7.5(+0.0)	7.5(+0.0)	7.6(+0.1)
Apr	6.8	7.2(+0.3)	7.4(+0.6)	6.8(+0.0)
May	9.1	10.5(+1.4)	10.3(+1.2)	9.1(+0.0)
Jun	14.4	17.3(+2.9)	20.6(+6.2)	21.0(+6.6)
Jul	19.7	23.2(+3.5)	25.4(+5.7)	22.4(+2.7)
Aug	26.4	30.5(+4.1)	33.9(+7.4)	28.3(+1.9)
Sep	38.1	43.1(+5.1)	42.4(+4.4)	41.4(+3.4)
Oct	35.1	38.1(+3.0)	36.6(+1.6)	37.4(+2.3)
Nov	21.2	22.0(+0.8)	21.1(-0.1)	21.2(+0.0)
Dec	13.6	13.7(+0.1)	13.4(-0.2)	13.5(-0.1)
Year	209.5	230.6(+21.0)	235.9(+26.4)	226.3(+16.8)

5 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรม จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ ขอขอบคุณหน่วยงานที่ให้ความอนุเคราะห์ ข้อมูล ประกอบด้วย กรมอุตุนิยมวิทยา กรมชลประทาน กรมพัฒนาที่ดิน กรมทรัพยากรน้ำ

6 เอกสารอ้างอิง

Alehu B.A., Bitana S.G. 2023. Assessment of climate change impact on water balance of Lake Hawassa catchment. Environmental Processes 10(1).

Arnold, J.G., Bieger, K., White, J.M., Srinivasan, R., Dunbar, A.J., Allen, M.P. 2018. Use of decision tables to simulate management in SWAT+. Water, 10(6).

Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. Journal of the American Water Resources Association 34(1), 73-89.

Bailey, R. T., Park, S., Bieger, K., Arnold, J. G., Allen, P. M. 2020. Enhancing SWAT+ simulation of groundwater flow and groundwater-surface water interactions using MODFLOW routines. Environmental Modelling & Software 126, 104660.

Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D. D., Allen, P. M., Volk, M., Srinivasan, R. 2017.

- Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the soil and water assessment tool. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 53(1), 115-130.
- Chuenchooklin, S. 2018. Hydrological study using SWAT and global weather, a case study in the Huai Khun Kaeo watershed in Thailand. *International Journal of Environmental Protection and Policy* 6(2), 36-41.
- Dile, Y. T., Srinivasan, R. 2014. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 50(5), 1226-1241.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., Yapo Patrice, O. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering* 4(2), 135-143.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Kakarndee, I., Kositsakulchai, E. 2019. Estimation of streamflow with incomplete soil dataset in Krasioa basin using soil-landscape evaluation approach and SWAT model. *Applied Environmental Research* 41(3), 1-13.
- Kakarndee, I., Kositsakulchai, E. 2020. Comparison between SWAT and SWAT+ for simulating streamflow in a paddy field dominated basin, northeast Thailand. *E3S Web of Conferences* 187, 06002.
- Khadka, D., Babel, M. S., Abatan, A. A., Collins, M. 2021a. An evaluation of CMIP5 and CMIP6 climate models in simulating summer rainfall in the Southeast Asian monsoon domain. *International Journal of Climatology* 42(2), 1181-1202.
- Khadka, D., Babel, M. S., Collins, M., Shrestha, S., Virdis, S. G. P., Chen, A. S. 2021b. Projected changes in the near-future mean climate and extreme climate events in northeast Thailand. *International Journal of Climatology* 42(4), 2470-2492.
- Kositsakulchai, E., Phankamolail, Y., Yodjaroen, S. 2021. Future runoff projections based on land change using integrated Markov-Cellular Automata model and Soil Water Assessment Tool in Lam Pachi Basin, Thailand. *Agriculture and Natural Resources* 55(5), 807-816.
- Kriegler, E., Bauer, N., Popp, A., Humpenöder, F., Leimbach, M., Strefler, J., Baumstark, L., Bodirsky, B. L., Hilaire, J., Klein, D., Mouratiadou, I., Weindl, I., Bertram, C., Dietrich, J.-P., Luderer, G., Pehl, M., Pietzcker, R., Piontek, F., Lotze-Campen, H., Biewald, A., Bonsch, M., Giannousakis, A., Kreidenweis, U., Müller, C., Rolinski, S., Schultes, A., Schwanitz, J., Stevanovic, M., Calvin, K., Emmerling, J., Fujimori, S., Edenhofer, O. 2017. Fossil-fueled development (SSP5): An energy and resource intensive scenario for the 21st century. *Global Environmental Change* 42, 297-315.
- Kumar, J. 2019. Review of literature of climate change on GCM, RCM, RCP scenarios. *International Journal of Applied Research* 5(4), 139-141.
- Leta O.T., El-Kadi A.I., Dulai H., Ghazal K.A. 2016. Assessment of climate change impacts on water balance components of Heeia watershed in Hawaii. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 8, 182-197.
- Liu J., Xue B., A Y., Sun W., Guo Q. 2020. Water balance changes in response to climate change in the upper Hailar River Basin, China. *Hydrology Research* 51(5), 1023-1035.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3), 885-900.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual model part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3), 282-290.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J., King, K. 2005. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation Version 2005. Temple, Texas: Texas A&M University.
- Pielke, R., Burgess, M. G., Ritchie, J. 2022. Plausible 2005-2050 emissions scenarios project between 2°C and 3°C of warming by 2100. *Environmental Research Letters* 17, 024027.
- Phimchaisai N., Kositsakulchai E. 2020. Evaluation of SWAT model in water balance simulation of paddy field in the Greater Mae Klong Irrigation Project. In: *Proceeding of the 13th TSAE International*

- Conference & the 21st TSAE National Conference, July 30-31, 2017, Nakhon Ratchasima, Thailand. (in Thai)
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., Rafaj, P. 2011. RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* 109(1-2), 33-57.
- Supharatid, S., Nafung, J., Aribarg, T. 2022. Projected changes in temperature and precipitation over mainland Southeast Asia by CMIP6 models. *Journal of Water and Climate Change* 13(1), 337-356.
- Thomson, A. M., Calvin, K. V., Smith, S. J., Kyle, G. P., Volke, A., Patel, P., Delgado-Arias, S., Bond-Lamberty, B., Wise, M. A., Clarke, L. E., Edmonds, J. A. 2011. RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change* 109(1-2), 77-94.
- Tingsanchali, T., Babel, M. S., Shrestha, S. 2022. Enhancing resilience to future hydrometeorological extremes in the Mun River Basin in Northeast of Thailand (ENRICH). Bangkok, Thailand: Thailand Science Research and Innovation and National Research Council of Thailand.
- Williams, J. R., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Gassman, P. W., Green, C. H. 2010. History of model development at Temple, Texas. *Hydrological Sciences Journal* 53(5), 948-960.
- Wu, H., Levinson, D. 2021. The ensemble approach to forecasting: A review and synthesis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 132, 103357.