

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำตาปีโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT

สายไหม หุ่นกระโทก* เกศวรา สิทธิโชค และ จุติเทพ วงษ์เพ็ชร์
ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 5105 4316 อีเมล: saimai.h@ku.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.07.005
รับเมื่อ 1 มีนาคม 2564 แก้ไขเมื่อ 11 พฤษภาคม 2564 ตอรับเมื่อ 19 สิงหาคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 6 กรกฎาคม 2566
© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT ในการศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่า และผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำตาปี โดยมีการสอบเทียบและทวนสอบผลการคำนวณปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง SWAT กับผลการตรวจวัดปริมาณน้ำท่าที่ 2 สถานี ได้แก่ สถานี X.36 (คลองพุมดวง; บ้านท่าขนอน อ.ศิริราชบุรี จ.สุราษฎร์ธานี) และสถานี X.217 (แม่น้ำตาปี; บ้านเคียนซา อ.เคียนซา จ.สุราษฎร์ธานี) ในการสอบเทียบแบบจำลองในช่วง พ.ศ. 2546–2551 ที่สถานี X.36 ได้ค่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) = 0.77 และค่า Nash-Sutcliffe efficiency; NSE = 0.93 และ PBIAS = -6.77% และที่สถานี X.217 มีค่า R^2 = 0.72 ค่า NSE = 0.65 และ PBIAS = -17.59% และผลการทวนสอบแบบจำลองที่สถานี X.36 มีค่า R^2 = 0.74 ค่า NSE = 0.73 และ PBIAS = 4.00% และที่สถานี X.217 มีค่า R^2 = 0.76 ค่า NSE = 0.75 และ PBIAS = -9.53% ซึ่งการสอบเทียบและทวนสอบแบบจำลอง SWAT อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และจากการศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่าในช่วงอดีต 20 ปี (พ.ศ. 2541–2560) พบว่า ลุ่มน้ำตาปีมีปริมาณน้ำท่าเฉลี่ย 14,634.28 ล้าน ลบ.ม./ปี มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามความสัมพันธ์เชิงเส้นลดลง 38.048 ล้าน ลบ.ม./ปี และผลการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจากการย่อส่วนแบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM2 ด้วยวิธีทางสถิติของข้อมูลอุตุณิยวิทยา ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิอากาศสูงสุด อุณหภูมิอากาศต่ำสุด และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก RCP 2.6, RCP 4.5 และ RCP 8.5 ส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำตาปีในอนาคตช่วง 20 ปี (พ.ศ. 2561–2580) ใน RCP 2.6, RCP 4.5 และ RCP 8.5 มีปริมาณน้ำท่าเฉลี่ย 13,913.83, 13,168.09 และ 14,086.55 ล้าน ลบ.ม./ปี และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง -4.92, -10.02, และ -3.74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

คำสำคัญ: แบบจำลอง SWAT การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ลุ่มน้ำตาปี



Impacts of Climate Change on Streamflow in Tapi River Basin Using SWAT Model

Saimai Hoomgratok*, Ketvara Sittichok and Jutithep Vongphet

Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 5105 4316, E-mail: saimai.h@ku.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.07.005

Received 1 March 2021; Revised 11 May 2021; Accepted 19 August 2021; Published online: 6 July 2023

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aimed at the application of SWAT hydrological model for assessing the trends in streamflow availability and impacts of climate change on streamflow in Tapi river basin. The model was calibrated and validated using streamflow simulation by SWAT model and the observed streamflow volumes at 2 monitoring stations, i.e. Station X.36 (Khlomg Phum Duang; Ban Tha Khanon, Khiri Ratthanikom, Surat Thani) and X.217 (Tapi River; Ban Khian Sa, Khian Sa, Surat Thani). The outcomes of monthly streamflow calibration during 2003–2008 at X.36 were as follows: a coefficient of determination (R^2) = 0.77, Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) = 0.93 and percentage of bias (PBIAS) = -6.77%, at X.217; R^2 = 0.72, NSE = 0.65 and PBIAS = -17.59%. The results of monthly streamflow validation during 2010–2015 at X.36 were depicted as: R^2 = 0.74, NSE = 0.73 and PBIAS = -17.59%, X.217; R^2 = 0.76, NSE = 0.75 and PBIAS = -9.53%. The results from the calibration and validation of SWAT model indicated acceptable ranges of values. The average annual streamflow during the 20-year period (1998–2017) in Tapi river basin was estimated at 14,634.28 mcm/year and linear trend analysis of the streamflow showed a decrease by 38.048 mcm/year. The impacts of future climate changes have been used to project future maximum and minimum temperature, precipitation and relative humidity for the periods 2018–2037 from the second generation Canadian Earth System Model (CanESM2) General Circulation Model (GCM) output by using Statistical Downscaling Model (SDSM) under different Representative Concentration Pathway (RCPs) scenarios (RCP2.5, RCP4.5, and RCP8.5). Based on SWAT model simulation, annual average streamflow would change during the next 20 years (2018–2037.) The annual average streamflows are estimated at 13,913.83 cmc/year, 13,168.09 cmc/year and 14,086.55 cmc/year, representing decreasing trends of 4.92%, -10.02% and -3.74% respectively under RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios.

Keywords: SWAT Model, Climate Change, Tapi River Basin

Please cite this article as: S. Hoomgratok, K. Sittichok, and J. Vongphet, "Impacts of climate change on streamflow in Tapi river basin using SWAT model," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 3, pp. 1–17, ID. 233-074835, Jul.-Sep. 2023 (in Thai).

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกส่งผลกระทบต่อไปยังหลายพื้นที่ทั่วโลก โดยเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และใช้เวลานานกว่าที่จะสังเกตเห็นได้ สำหรับประเทศไทยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้ส่งผลให้อุณหภูมิอากาศมีแนวโน้มสูงขึ้น และปริมาณฝนรวมถึงรูปแบบการตกของฝนเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากปกติ [1] โดยการศึกษาในเชิงสถิติข้อมูลการตรวจวัดที่ผิวพื้นและในบรรยากาศจากสถานีอุตุนิยมวิทยาทั่วประเทศในประเทศไทยในรอบ 55 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2498–2552) บ่งชี้ว่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และปริมาณฝนสะสมรวมรายปีในรอบ 60 ปีระหว่าง พ.ศ. 2498–2557 ในพื้นที่ฝั่งอ่าวไทยใน มีแนวโน้มปริมาณฝนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [2] และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้ส่งผลกระทบต่อประเทศไทยทั้งทางด้านระบบนิเวศและชีวภาพ การเกษตรกรรม ทรัพยากรน้ำ สุขภาพอนามัย การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล ชุมชนและการตั้งถิ่นฐาน และการท่องเที่ยว [3] ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ส่งผลกระทบต่อทรัพยากรน้ำจะมีผลต่อปริมาณน้ำท่าที่เกิดขึ้นในพื้นที่ลุ่มน้ำ รวมไปถึงการเกิดภัยพิบัติมีแนวโน้มรุนแรงขึ้น เช่น การเกิดภัยน้ำท่วม ภัยแล้ง เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาและการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศจึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นเพื่อเตรียมการป้องกันและบรรเทาความรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นทั้งต่อชีวิตและทรัพย์สิน และการวางแผนการพัฒนาได้อย่างสอดคล้องกับสภาพการณ์ในอนาคต[4]

พื้นที่ลุ่มน้ำตาปีตั้งอยู่ในภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งจากการวิเคราะห์พื้นที่เป้าหมายและแนวทางแก้ไขเชิงบูรณาการ (Area-based Approach) พบว่า พื้นที่ลุ่มน้ำตาปีประสบปัญหาน้ำท่วมฉับพลันอยู่บ่อยครั้งในฤดูฝน โดยเฉพาะพื้นที่บริเวณแม่น้ำตาปีและแม่น้ำพุมดวง อันสร้างความเสียหายแก่ที่อยู่อาศัย และพื้นที่ทางการเกษตรของประชาชนเป็นอย่างมาก [5] อีกทั้งประสบปัญหาขาดแคลนน้ำในช่วงฝนทิ้งช่วงเนื่องจากบางพื้นที่อยู่ห่างไกลจากแหล่งเก็บกักน้ำ มีแหล่งน้ำไม่เพียงพอ และฝนไม่ตกตามฤดูกาล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อสภาพปัญหาดังกล่าว

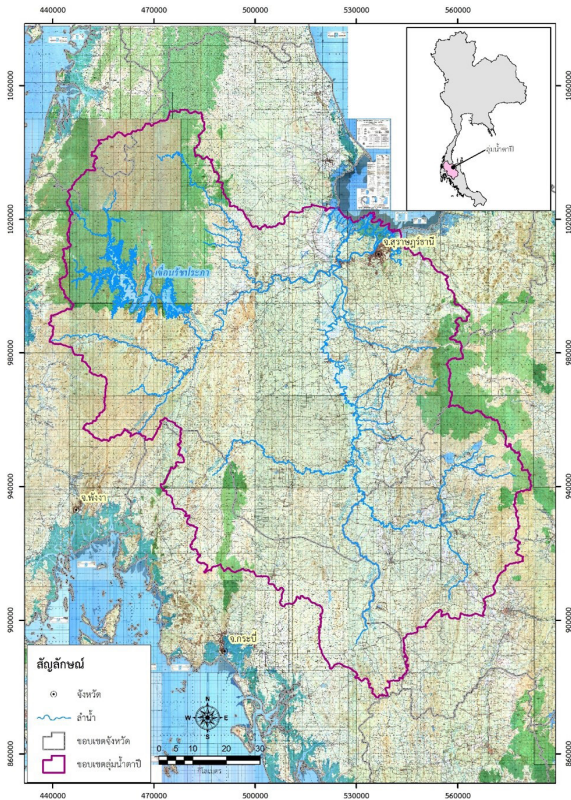
แบบจำลอง SWAT เป็นแบบจำลองทางด้านกายภาพ (Physical Distributed Model) ที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ลุ่มน้ำ เช่น การใช้ประโยชน์ที่ดิน ข้อมูลลักษณะจุดดิน และความลาดชันของพื้นที่กับปัจจัยต่างๆ ด้านอุทกวิทยา เช่น ปริมาณน้ำฝน ปริมาณน้ำท่า การเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน เป็นต้น [6] ในการศึกษาครั้งนี้จึงประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT เพื่อศึกษาปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำตาปี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณน้ำท่า และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่าจากอดีตจนถึงปัจจุบัน และประเมินปริมาณน้ำท่าภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในลุ่มน้ำตาปี ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ และการจัดการทรัพยากรน้ำในอนาคต

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการศึกษา

2.1 ขอบเขตในการศึกษา

ขอบเขตการศึกษาครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำตาปี ซึ่งมีขนาดพื้นที่ 13,454.51 ตารางกิโลเมตร ส่วนใหญ่อยู่ในเขตจังหวัดสุราษฎร์ธานี และบางส่วนของจังหวัดนครศรีธรรมราช จังหวัดกระบี่ จังหวัดระนอง และจังหวัดพังงา มีต้นน้ำเป็นเทือกเขาทางทิศตะวันตก และทิศใต้ของลุ่มน้ำ ลำน้ำหลักแยกจากกัน 2 สาย คือ แม่น้ำตาปี และคลองพุมดวง ซึ่งแม่น้ำตาปี มีลำน้ำสาขา ประกอบด้วย คลองจันดี คลองสินปุน และคลองอิปัน และคลองพุมดวง มีลำน้ำสาขา ประกอบด้วย คลองสก คลองพระแสง และคลองพุมดวง และมีเขื่อนรัชชประภา ซึ่งเป็นเขื่อนขนาดใหญ่ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย สร้างปิดกั้นลำน้ำคลองแสง ที่บ้านเขี้ยวหลาน ตำบลเขาพัง อำเภอบ้านตาขุน จังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยแม่น้ำตาปี และคลองพุมดวง ไหลมาบรรจบกันที่อำเภอฟุนพิน จังหวัดสุราษฎร์ธานี แล้วไหลลงสู่อ่าวไทย[7] ดังแสดงในรูปที่ 1

ในการจำลองสภาพภูมิประเทศของพื้นที่ลุ่มน้ำใช้ข้อมูลแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (DEM) ที่มีความละเอียดของกริดขนาด 30 × 30 เมตร สำหรับการสอบเทียบและการทวนสอบปริมาณน้ำท่าในแบบจำลอง SWAT ใช้ข้อมูลปริมาณ



รูปที่ 1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษาลุ่มน้ำตาปี

น้ำท่าของกรมชลประทาน จากสถานีตรวจวัดน้ำแม่ น้ำตาปี ที่อำเภอเคียนซา จังหวัดสุราษฎร์ธานี (X.217) และ สถานีตรวจวัดน้ำแม่ น้ำพุมดวง ที่อำเภอคีรีรัฐนิคม จังหวัดสุราษฎร์ธานี (X.36) โดยกำหนดเกณฑ์การบริหารจัดการน้ำของเขื่อนรัชชประภาตามการบริหารจัดการน้ำเกณฑ์ควบคุม (Rule Curve) ในปัจจุบัน สำหรับข้อมูลการใช้ที่ดิน ใช้ข้อมูลของกรมพัฒนาที่ดิน พ.ศ. 2559 เป็นตัวแทนในการใช้ที่ดินทั้งสภาพปัจจุบันและอนาคต และในการประเมินการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ประยุกต์ใช้ข้อมูลภูมิอากาศจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM2 โดยการย่อยส่วนแบบจำลองภูมิอากาศโลกด้วยวิธีทางสถิติ (Statistical Downscaling) ภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ RCP2.6, RCP4.5 และ RCP8.5 และข้อมูลอุตุนิมวิทยาสำหรับศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางด้านอุตุนิมวิทยาภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในพื้นที่ลุ่มน้ำตาปี ได้แก่

ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิอากาศสูงสุด อุณหภูมิอากาศต่ำสุด และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ

2.2 แบบจำลอง SWAT

Soil and Water Assessment Tool; SWAT เป็นแบบจำลองทางอุทกวิทยาที่มีความสามารถในการจำลองพื้นที่ที่มีความซับซ้อนทางด้านอุทกวิทยา พัฒนาโดยหน่วยงาน Agriculture Research Service; ARS ภายใต้หน่วยงานหลักของ United States Department of Agriculture; USDA ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีพื้นฐานมาจากสมการสมดุลน้ำ [8] ดังแสดงในสมการที่ (1)

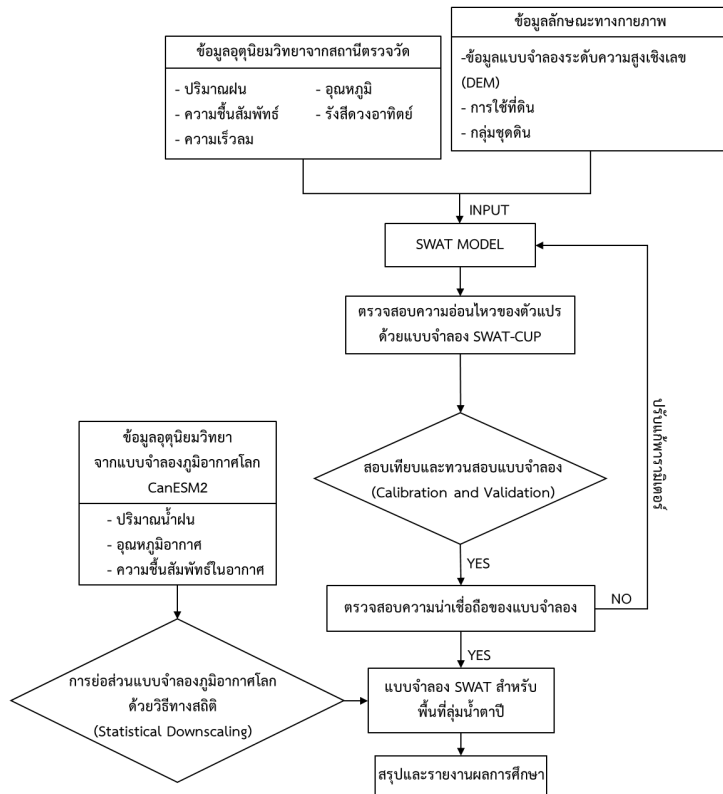
$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \tag{1}$$

โดยที่ SW_t คือ ปริมาณน้ำสุดท้ายที่คงเหลืออยู่ในดิน (มิลลิเมตร) SW_0 คือ ปริมาณน้ำเริ่มต้นที่อยู่ในดินของวันที่ i (มิลลิเมตร) t คือ ช่วงเวลา (วัน) R_{day} คือ ปริมาณน้ำฝนของวันที่ i (มิลลิเมตร) Q_{surf} คือ ปริมาณน้ำผิวดินของวันที่ i (มิลลิเมตร) E_a คือ ปริมาณน้ำที่สูญเสียเนื่องจากการระเหยและการคายน้ำของพืช (Evapotranspiration) (มิลลิเมตร) W_{seep} คือ ปริมาณน้ำที่สูญเสียออกจากหน้าตัดดิน (Soil Profile) ของวันที่ i (มิลลิเมตร) Q_{gw} คือ ปริมาณน้ำใต้ดินของวันที่ i (มิลลิเมตร)

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำตาปีโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT มีขั้นตอนการศึกษาแสดงในรูปที่ 2

2.3 การรวบรวมข้อมูล

การรวบรวมข้อมูลสำหรับนำเข้าแบบจำลอง SWAT ประกอบด้วย ข้อมูลเชิงพื้นที่ และข้อมูลอุตุ-อุทกวิทยา ซึ่งข้อมูลเชิงพื้นที่ ได้แก่ แบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) ขอบเขตลุ่มน้ำ เส้นลำน้ำ ข้อมูลการใช้ที่ดิน และข้อมูลชุดดิน สำหรับข้อมูลอุตุ-อุทกวิทยา เพื่อใช้สำหรับนำเข้าแบบจำลอง SWAT ได้แก่ ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวัน



รูปที่ 2 ผังขั้นตอนการศึกษา

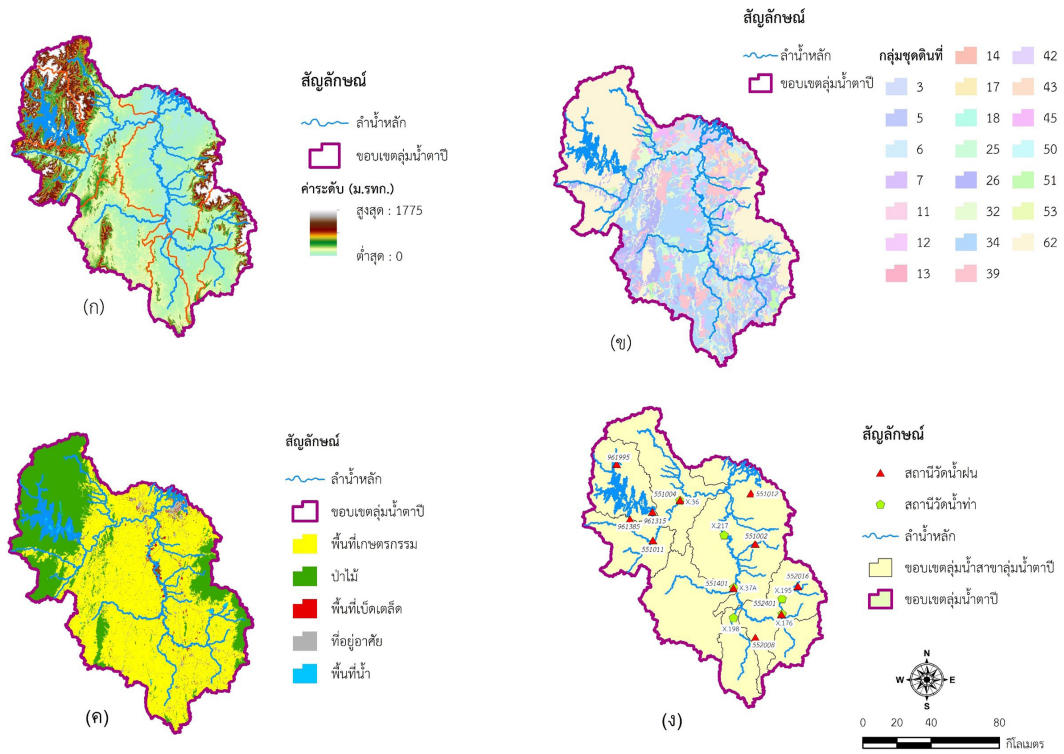
ข้อมูลภูมิอากาศรายวัน เช่น อุณหภูมิอากาศสูงสุด-ต่ำสุด ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ และความเร็วมเฉลี่ย ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลภูมิอากาศหรือข้อมูลขาดหายในแบบจำลอง SWAT สามารถประมาณค่าดังกล่าวได้จากแบบจำลองย่อย Weather Generator จากสถิติข้อมูลภูมิอากาศได้ และข้อมูลสำหรับสอบเทียบแบบจำลองและการทวนสอบแบบจำลอง SWAT ได้แก่ ข้อมูลตรวจวัดปริมาณน้ำท่า [9] ซึ่งจากการรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 3

2.4 การประเมินปริมาณน้ำท่าโดยใช้แบบจำลอง SWAT

ในการประเมินปริมาณน้ำท่าโดยใช้แบบจำลอง SWAT ประกอบไปด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ได้แก่ การกำหนดพื้นที่ลุ่มน้ำ (Watershed Delineation) การกำหนดหน่วย

ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาจากหน่วยงานต่างๆ

ลำดับ	ข้อมูล	ลักษณะข้อมูล	ที่มาของข้อมูล
1	ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM)	GIS file	สำนักงานสำรวจธรณีวิทยาแห่งสหรัฐอเมริกา (USGS)
2	ขอบเขตพื้นที่ลุ่มน้ำ	GIS file	กรมทรัพยากรน้ำ
3	เส้นแนวลำน้ำ	GIS file	กรมทรัพยากรน้ำ
4	ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน	GIS file	กรมพัฒนาที่ดิน
5	ข้อมูลกลุ่มชุดดิน	GIS file	กรมพัฒนาที่ดิน
6	ข้อมูลอุตุ-อุทกวิทยา ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ค่ารังสีดวงอาทิตย์ และปริมาณน้ำท่า	ตารางข้อมูล	กรมอุตุนิยมวิทยา กรมชลประทาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย



รูปที่ 3 (ก) ข้อมูลแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (ข) ข้อมูลกลุ่มชุดดินของกรมพัฒนาที่ดิน (ค) ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินของกรมพัฒนาที่ดิน พ.ศ. 2559 (ง) ตำแหน่งสถานีอุตุ-อุทกวิทยา ในพื้นที่ลุ่มน้ำตาปี

ตอบสนองทางอุทกวิทยา (Hydrologic Response Unit; HRUs) และการสร้างไฟล์นำเข้าข้อมูลแบบจำลอง SWAT ซึ่งในขั้นตอนการกำหนดหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (Hydrologic Response Unit; HRUs) เพื่อกำหนดความละเอียดของหน่วยพื้นที่ลุ่มน้ำให้มีลักษณะทางอุทกวิทยาที่หลากหลายตามลักษณะประเภทของการใช้ประโยชน์ที่ดิน ลักษณะของกลุ่มชุดดิน และความลาดชันของพื้นที่ เพื่อจำลองพื้นที่ให้มีสภาพใกล้เคียงสภาพพื้นที่จริงมากที่สุด [10] ในการศึกษาครั้งนี้มีการแบ่งระดับความลาดชันพื้นที่ออกเป็น 5 ระดับ ตามการแบ่งระดับความลาดชันของกรมพัฒนาที่ดินในการกำหนดมาตรการวิธีกลร่วมกับมาตรการวิธีพืชที่เหมาะสมตามความลาดชัน ได้แก่ ระดับความลาดชัน 0-2 (พื้นที่ราบเรียบถึงค่อนข้างราบเรียบ) ระดับความลาดชัน ร้อยละ 2-5 (ลูกคลื่นลอนลาดเล็กน้อย) ระดับความลาดชัน ร้อยละ 5-12 (ลูกคลื่นลอนลาด) ระดับความลาดชัน

ร้อยละ 12-35 (ลูกคลื่นลอนชันหรือเนินเขา) และระดับความลาดชันมากกว่าร้อยละ 35 (พื้นที่ลาดชันเชิงซ้อนหรือที่ลาดชันสูง) [11] และกำหนดเงื่อนไขของ HRUs จากสัดส่วนการใช้ประโยชน์ที่ดินร้อยละ 20 กลุ่มชุดดิน ร้อยละ 10 และความลาดชันร้อยละ 20 [6]

2.5 การตรวจสอบค่าความอ่อนไหวของตัวแปรในแบบจำลอง

ในการศึกษานี้จึงได้กำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการประเมินปริมาณน้ำท่า ดังแสดงในตารางที่ 2 จำนวน 23 พารามิเตอร์ [12], [13] และตรวจสอบค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์จำนวน 100 ครั้ง โดยกำหนดค่า NSE (Nash-Sutcliffe Model Efficiency Coefficient) เป็นค่า Objective Function เพื่อวิเคราะห์ค่า t-Stat และ p-value ในการทดสอบสมมติฐานค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่า ซึ่งผลการตรวจสอบค่า

ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์จะถูกนำมาปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง SWAT ให้มีความใกล้เคียงกับสภาพพื้นที่จริง เพื่อให้ผลการคำนวณปริมาณน้ำที่ได้จากแบบจำลองสอดคล้องกับค่าตรวจวัดจากสถานีวัดน้ำท่าในพื้นที่ศึกษา

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์สำหรับสอบเทียบแบบจำลอง SWAT

พารามิเตอร์		ค่าพารามิเตอร์
1	ค่าตัวพารามิเตอร์ของ ลุ่มน้ำ (BSN)	EVRCH.bsn
2		SURLAG.bsn
3	ค่าตัวพารามิเตอร์ของ น้ำใต้ดิน (GW)	ALPHA_BF.gw
4		GW_DELAY.gw
5		GW_REVAP.gw
6		GW_SPYLD.gw
7		GWHT.gw
8		GWQMN.gw
9		RCHRG_DP.gw
10		REVAPMN.gw
11	ค่าตัวพารามิเตอร์ของ หน่วยตอบสนองทาง อุทกวิทยา (HRU)	CANMX.hru
12		EPCO.hru
13		ESCO.hru
14		HRU_SLP.hru
15		RSDIN.hru
16		SLSOIL.hru
17		LAT_TTIME.hru
18	ค่าตัวแปรของการไหล ในทางน้ำสายหลัก (RTE)	CH_K2.rte
19		CH_N2.rte
20	ค่าตัวพารามิเตอร์ของ ลุ่มน้ำสาขา (SUB)	CH_K1.sub
21		CH_N1.sub
22	ค่าตัวพารามิเตอร์ ของการจัดการพื้นที่ (MGT)	CN2.mgt
23	ค่าตัวพารามิเตอร์ของ ข้อมูลดิน (GW)	SOL_AWC().sol

2.6 การสอบเทียบ (Calibration) และการทวนสอบ (Validation) แบบจำลอง SWAT

ในการสอบเทียบแบบจำลอง และการทวนสอบแบบจำลอง การศึกษาครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Procedures) โดยใช้วิธี SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting) [14] ในการปรับแก้พารามิเตอร์ที่มีความอ่อนไหวต่อผลการเกิดน้ำท่าในลุ่มน้ำ เพื่อให้ผลการคำนวณปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลองสอดคล้องกับข้อมูลตรวจวัดในพื้นที่ศึกษา

สำหรับเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจพิจารณาความถูกต้องและความสอดคล้องของปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการประเมินด้วยแบบจำลอง SWAT กับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดปริมาณน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำท่าปี จะใช้เกณฑ์การประเมินเชิงประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นดัชนีที่นิยมใช้ในการบอกค่าความแม่นยำของแบบจำลอง หรือประสิทธิภาพของแบบจำลอง ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ค่า Nash-Sutcliffe Efficiency; NSE และ PBIAS (Percent Bias) การศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดเกณฑ์ประสิทธิภาพของแบบจำลอง [15], [16] ดังแสดงในตารางที่ 3 และคำนวณค่า R^2 , ค่า NSE และค่า $PBIAS$ จากสมการที่ (2)-(4)

$$R^2 = \frac{n \sum_{i=1}^n (Q_{obs} Q_{sim}) - \sum_{i=1}^n (Q_{obs}) \sum_{i=1}^n (Q_{sim})}{\left[n \sum_{i=1}^n (Q_{obs}^2) - \sum_{i=1}^n (Q_{obs})^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n (Q_{sim}^2) - \sum_{i=1}^n (Q_{sim})^2 \right]} \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (3)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \sum_{i=1}^n Q_{sim}) \times 100}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \quad (4)$$

เมื่อ i คือ ลำดับที่ของข้อมูล n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด Q_{obs} คือ ค่าจากการตรวจวัด, \bar{Q}_{obs} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลตรวจวัดทั้งหมด Q_{sim} คือ ค่าจากแบบจำลอง และ \bar{Q}_{sim} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากแบบจำลองทั้งหมด

ตารางที่ 3 เกณฑ์ประสิทธิภาพของแบบจำลอง SWAT

ระดับความน่าเชื่อถือ	R^2	NSE	PBIAS (%)
ดีมาก	0.70–1.00	0.75–1.00	$< \pm 10$
ดี	0.60–0.70	0.65–0.75	± 10 – ± 15
พอใช้	0.50–0.60	0.50–0.65	± 15 – ± 25
น้อย	< 0.50	< 0.50	$> \pm 25$

2.7 การย่อส่วนแบบจำลองภูมิอากาศโลกด้วยวิธีทางสถิติ (Statistical Downscaling)

การย่อส่วนแบบจำลองภูมิอากาศโลกด้วยวิธีทางสถิติ (Statistical Downscaling) โดยประยุกต์ใช้แบบจำลอง SDSM (Statistical Downscaling Model) เพื่อลดมาตราส่วนสภาพภูมิอากาศในระดับโลกให้เป็นสภาพภูมิอากาศในระดับภูมิภาคหรือระดับสถานี

การศึกษานี้ประยุกต์ใช้ข้อมูลภูมิอากาศของแบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM2 (Second generation Canadian Earth System Model) จากโครงการ CMIP5 ซึ่งอยู่ในรายงาน AR5 [17] ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 2.81×2.81 องศา และมีข้อมูลภูมิอากาศในอดีตอยู่ในช่วง พ.ศ. 2504–2548 และข้อมูลในอนาคตที่มีการจำลองการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในช่วง พ.ศ. 2549–2643 ภายใต้รูปแบบสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ RCP 2.6, RCP 4.5 และ RCP 8.5 โดยที่

RCP 2.6 เป็นการจำลองแนวทางการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยมาตรการหรือนโยบายควบคุมในการลดก๊าซเรือนกระจก โดยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือทำการแผ่รังสี 3.1 วัตต์ต่อตารางเมตรและค่อยๆ ลดลงเหลือ 2.6 วัตต์ต่อตารางเมตร จนถึงสิ้นสุด พ.ศ. 2643

RCP 4.5 เป็นการจำลองการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยมีการกำหนดมาตรการและนโยบายควบคุมในการลดก๊าซเรือนกระจก รวมถึงมีการพัฒนาทางเทคโนโลยีที่มีความทันสมัย โดยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือทำการแผ่รังสี 4.5 วัตต์ต่อตารางเมตร และมีปริมาณก๊าซเรือนกระจกสูงสุดใน พ.ศ. 2643

RCP 8.5 เป็นการจำลองแนวทางการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยไม่มีมาตรการหรือนโยบายควบคุมในการลดก๊าซเรือนกระจก โดยจำลองการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือทำการแผ่รังสี 8.5 วัตต์ต่อตารางเมตร จนถึง พ.ศ. 2643

ในการย่อส่วนแบบจำลองภูมิอากาศโลกด้วยวิธีทางสถิติ จะคัดเลือกตัวแปร NCEP ซึ่งเป็นข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศ/สมุทรศาสตร์ของโลกเป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดโดย National Centers for Environmental Prediction (NCEP)/Nation Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [18] ที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลภูมิอากาศแต่ละสถานี โดยการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่ทำหน้าที่พยากรณ์ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปกับตัวแปรตาม 1 ตัว จากนั้นนำตัวแปรดังกล่าวไปคาดการณ์ข้อมูลภูมิอากาศจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM2 ภายใต้รูปแบบสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ RCP 2.6, RCP 4.5 และ RCP 8.5

ผลการคาดการณ์ข้อมูลภูมิอากาศด้วยวิธีทางสถิติจะมีความคาดเคลื่อนในการคาดการณ์ข้อมูล จึงจำเป็นต้องมีการปรับแก้ความเอนเอียงของข้อมูล (Bias Correction) ด้วยเทคนิค Linear Scaling Method [19] โดยข้อมูลปริมาณน้ำฝนปรับแก้ดังสมการที่ (5) และข้อมูลอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศปรับแก้ดังสมการที่ (6)

$$P_{cor,m,d} = P_{raw,m,d} \times \frac{\bar{P}_{obs,m}}{\bar{P}_{raw,m}} \quad (5)$$

$$T_{cor,m,d} = T_{raw,m,d} + \bar{T}_{obs,m} - \bar{T}_{raw,m} \quad (6)$$

โดยที่ $P_{cor,m,d}$ และ $T_{cor,m,d}$ คือ ข้อมูลที่ทำการปรับแก้แล้วในเดือนที่ m และวันที่ d , $P_{raw,m,d}$ และ $T_{raw,m,d}$ คือ ข้อมูลจากแบบจำลองภูมิอากาศโลกก่อนการปรับแก้ในเดือนที่ m และวันที่ d , $\bar{P}_{obs,m}$ และ $\bar{T}_{obs,m}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลตรวจวัดในเดือนที่ m และ $\bar{P}_{raw,m}$ และ $\bar{T}_{raw,m}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากแบบจำลองภูมิอากาศโลกก่อนการปรับแก้ ในเดือนที่ m

การประเมินความแม่นยำของการคาดการณ์ข้อมูล

ภูมิอากาศด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ค่า Root Mean Square Error; $RMSE$ และ $PBIAS$ (Percent Bias) จากสมการที่ (7)–(9)

$$R^2 = \frac{n \sum_{i=1}^n (P_{obs} P_{GCM,cor}) - \sum_{i=1}^n (P_{obs}) \sum_{i=1}^n (P_{GCM,cor})}{\left[n \sum_{i=1}^n (P_{obs} P_{GCM,cor}) - \sum_{i=1}^n (P_{GCM,cor}^2) \right] \left[n \sum_{i=1}^n (P_{obs}^2) - \sum_{i=1}^n (P_{obs})^2 \right]} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{obs} - P_{GCM,cor})^2}{n}} \quad (8)$$

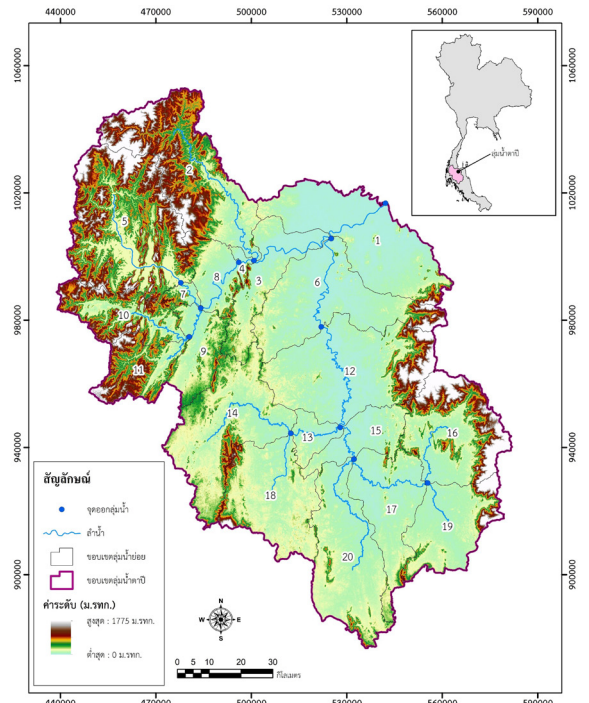
$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{obs} - \sum_{i=1}^n P_{GCM,cor}) \times 100}{\sum_{i=1}^n P_{obs}} \quad (9)$$

เมื่อ i คือ ลำดับที่ของข้อมูล n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด P_{obs} คือ ค่าจากการตรวจวัด \bar{P}_{obs} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลตรวจวัด $P_{GCM,corr}$ คือ ค่าจากแบบจำลองภูมิอากาศโลกที่ปรับแก้ความเอนเอียงของข้อมูลแล้ว และ $\bar{P}_{GCM,corr}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากแบบจำลองภูมิอากาศโลกที่ปรับแก้ความเอนเอียงของข้อมูลแล้ว

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการจำลองสภาพพื้นที่ลุ่มน้ำด้วยแบบจำลอง SWAT

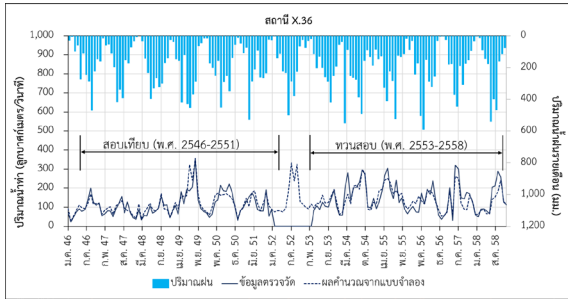
ผลการจำลองสภาพพื้นที่ลุ่มน้ำด้วยแบบจำลอง SWAT มีการกำหนดขอบเขตพื้นที่ลุ่มน้ำของลุ่มน้ำตาปีจากข้อมูลแบบจำลองระดับสูงเชิงเลขขนาดกริด 30×30 เมตร สามารถจำลองสภาพพื้นที่ลุ่มน้ำตาปีได้ขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำ 13,560 ตารางกิโลเมตร มีความคลาดเคลื่อน 0.78 เปอร์เซ็นต์ (เทียบข้อมูล 25 ลุ่มน้ำหลักของประเทศไทย ของกรมทรัพยากรน้ำที่กำหนดขอบเขตลุ่มน้ำตาปี มีพื้นที่ขนาดลุ่มน้ำ 13,454.51 ตารางกิโลเมตร) และแบ่งลุ่มน้ำตาปีออกเป็น 20 ลุ่มน้ำย่อย ดังแสดงในรูปที่ 4 และจากการกำหนดหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (HRUs) ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ตามลักษณะประเภทของการใช้ประโยชน์ที่ดินร้อยละ 20 กลุ่มชุดดินร้อยละ 10 และความลาดชันของพื้นที่ร้อยละ 20 ซึ่งสามารถกำหนด HRUs ในพื้นที่ลุ่มน้ำตาปีได้จำนวน 194 HRUs ดังแสดงขนาดลุ่มน้ำย่อยและจำนวน HRUs ของแต่ละลุ่มน้ำย่อยในตารางที่ 4



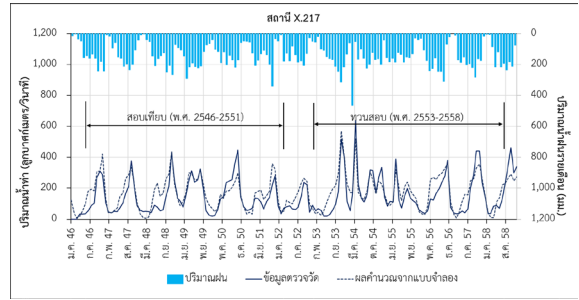
รูปที่ 4 ผลการแบ่งลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำตาปีจากแบบจำลอง SWAT

ตารางที่ 4 ผลการแบ่งลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำตาปี และหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (HRUs) ในแบบจำลอง SWAT

ลุ่มน้ำย่อย	ขนาดพื้นที่ (ตร.กม.)	จำนวน HRUs	ลุ่มน้ำย่อย	ขนาดพื้นที่ (ตร.กม.)	จำนวน HRUs
1	1,065.29	6	11	394.18	6
2	1,157.52	8	12	1,258.00	4
3	505.67	19	13	162.24	10
4	38.56	12	14	1,037.05	13
5	1,397.10	2	15	343.08	4
6	1,013.38	10	16	867.89	7
7	61.71	12	17	658.55	8
8	312.47	10	18	841.68	18
9	376.83	19	19	639.85	11
10	492.37	7	20	938.39	8
			รวม	13,561.81	194



รูปที่ 5 ผลการสอบเทียบและการทวนสอบแบบจำลอง SWAT ในการประเมินปริมาณน้ำรายเดือนที่สถานี X.36



รูปที่ 6 ผลการสอบเทียบและการทวนสอบแบบจำลอง SWAT ในการประเมินปริมาณน้ำรายเดือนที่สถานี X.217

3.2 การสอบเทียบแบบจำลอง (Calibration) และการทวนสอบแบบจำลอง (Validation) แบบจำลอง SWAT

จากการสอบเทียบและทวนสอบแบบจำลอง SWAT ของปริมาณน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำ 2 สถานี เนื่องจากเป็นสถานีที่อยู่ท้ายสุดของลำน้ำหลักในลุ่มน้ำ และมีข้อมูลตรวจวัดต่อเนื่องจำนวนหลายปี ได้แก่ สถานี X.36 (คลองพุมดวง: บ้านท่าখনอน อำเภอคีรีรัฐนิคม จังหวัดสุราษฎร์ธานี) และ สถานี X.217 (แม่น้ำตาปี; บ้านเคียนซา อำเภอเคียนซา จังหวัดสุราษฎร์ธานี) ดังแสดงผลการสอบเทียบและทวนสอบแบบจำลอง SWAT ในตารางที่ 5 โดยผลการสอบเทียบแบบจำลองในช่วง พ.ศ. 2546–2551 ที่สถานี X.36 มีค่า

$R^2 = 0.77$ ค่า $NSE = 0.93$ และค่า $PBIAS = -6.77$ เปอร์เซ็นต์ และที่สถานี X.217 มีค่า $R^2 = 0.72$ และค่า $NSE = 0.65$ และค่า $PBIAS = -17.59$ เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 5

สำหรับผลการสอบทวนสอบแบบจำลองในช่วง พ.ศ. 2553–2558 ที่สถานี X.36 มีค่า $R^2 = 0.74$ ค่า $NSE = 0.73$ และค่า $PBIAS = 4.00$ เปอร์เซ็นต์ และสถานี X.217 มีค่า $R^2 = 0.76$ และค่า $NSE = 0.75$ และค่า $PBIAS = -9.53$ เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการสอบเทียบและการทวนสอบแบบจำลองของสถานี X.36 และ สถานี X.217 ให้ค่าสถิติอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ตารางที่ 5 ค่าสถิติทดสอบของการสอบเทียบ (พ.ศ. 2546–2551) และการทวนสอบ (พ.ศ. 2553–2558) แบบจำลอง SWAT ในการประเมินปริมาณน้ำรายเดือนที่สถานี X.36 และ X.217

สถานีวัดน้ำ	สถิติทดสอบ	การสอบเทียบแบบจำลอง (พ.ศ. 2546–2551)	การทวนสอบแบบจำลอง (พ.ศ. 2553–2558)	ทั้งหมด (พ.ศ. 2546–2558)
X.36	R^2	0.77	0.74	0.76
	NSE	0.93	0.73	0.87
	PBIAS	-6.77%	4.00%	-12.10%
	ปริมาณน้ำสะสม (ลบ.ม. ต่อวินาที)	8,400.45 (แบบจำลอง)	9,682.41 (แบบจำลอง)	20,222.12 (แบบจำลอง)
		7,867.63 (ค่าตรวจวัด)	10,086.21 (ค่าตรวจวัด)	18,039.78 (ค่าตรวจวัด)
X.217	R^2	0.72	0.76	0.75
	NSE	0.65	0.75	0.71
	PBIAS	-17.59%	-9.53%	-15.26%
	ปริมาณน้ำสะสม (ลบ.ม. ต่อวินาที)	11,746.08 (แบบจำลอง)	13,473.16 (แบบจำลอง)	27,091.49 (แบบจำลอง)
		9,988.79 (ค่าตรวจวัด)	12,300.38 (ค่าตรวจวัด)	23,505.29 (ค่าตรวจวัด)

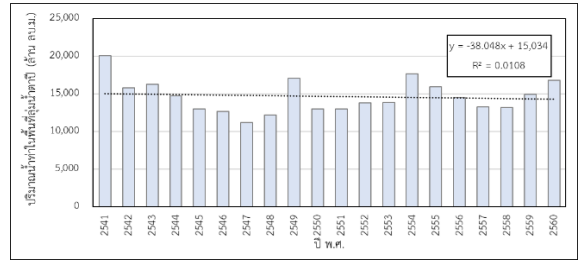
3.3 ผลการประเมินน้ำท่าและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง ปริมาณน้ำท่าบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำตาปีตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน

ผลการประเมินน้ำท่าและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง ปริมาณน้ำท่าบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำตาปีตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน จากการประเมินน้ำท่าด้วยแบบจำลอง SWAT ในช่วง 20 ปี (พ.ศ. 2541-2560) ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่า ลุ่มน้ำตาปีมีความแปรผันของปริมาณน้ำท่าเฉลี่ย รายเดือนในช่วง 485.31-1,809.16 ล้าน ลบ.ม./เดือน โดยในช่วงฤดูฝน (เดือน พ.ค.-ธ.ค.) มีปริมาณน้ำท่า 12,107.56 ลบ.ม./ปี คิดเป็นร้อยละ 82.73 ของปริมาณน้ำท่า ทั้งปี และฤดูแล้ง (เดือน พ.ค.-ธ.ค.) มีปริมาณน้ำท่า 1,850.87 ล้าน ลบ.ม./ปี คิดเป็นร้อยละ 12.65 ของปริมาณน้ำท่าทั้งปี

ตารางที่ 6 ปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ยในช่วง 20 ปี (พ.ศ. 2541-2560) ในพื้นที่ลุ่มน้ำตาปี

เดือน	ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ย (ล้าน ลบ.ม./เดือน) ช่วง 20 ปี (พ.ศ. 2541-2560)	ร้อยละ
ม.ค.	835.04	5.71
ก.พ.	530.52	3.63
มี.ค.	485.31	3.32
เม.ย.	675.85	4.62
พ.ค.	876.19	5.99
มิ.ย.	1,314.78	8.98
ก.ค.	1,595.99	10.91
ส.ค.	1,614.82	11.03
ก.ย.	1,657.52	11.33
ต.ค.	1,809.16	12.36
พ.ย.	1,704.51	11.65
ธ.ค.	1,534.59	10.49
รวมปริมาณน้ำท่ารายปี (ล้าน ลบ.ม./ปี)	14,634.28	100.00
รวมฤดูฝน (เดือน พ.ค.-ธ.ค.) (ล้าน ลบ.ม./ปี)	12,107.56	82.73
รวมฤดูแล้ง (เดือน ม.ค.-เม.ย.) (ล้าน ลบ.ม./ปี)	1,850.87	12.65

ในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยในพื้นที่ลุ่มน้ำตาปี ในช่วง 20 ปี (พ.ศ. 2541-2560) พบว่ามีปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ย ทำเฉลี่ย 14,634.28 ลบ.ม./ปี โดยมีค่าแปรผันของปริมาณ น้ำท่ารายปีอยู่ในช่วง 11,172.82-20,040.57 ลบ.ม./ปี



รูปที่ 7 แนวโน้มน้ำท่ารายปีในพื้นที่ลุ่มน้ำตาปีในช่วง พ.ศ. 2541-2560

และเมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่า ปริมาณน้ำท่า รายปีมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 2,170.64 ล้านลบ.ม. โดยมีจำนวนปีที่ปริมาณน้ำท่ารายปีที่มีค่าที่อยู่ระหว่างค่า เบี่ยงเบนมาตรฐาน 15 ปี สูงกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 3 ปี และต่ำกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2 ปี ดังแสดงในตารางที่ 7 จากการวิเคราะห์แนวโน้มของปริมาณน้ำท่ารายปี ในช่วง 20 ปี (พ.ศ. 2541-2560) พบว่า ปริมาณน้ำท่าใน ลุ่มน้ำตาปีมีแนวโน้มลดลงดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งแนวโน้มที่ ลดลงจากการวิเคราะห์สมการเส้นตรง จะเห็นได้ว่าปริมาณ น้ำท่ารายปีในลุ่มน้ำตาปีในช่วงปี 20 ปี (พ.ศ. 2541-2560) มีแนวโน้มลดลงโดยเฉลี่ย 38.05 ล้าน ลบ.ม./ปี

ตารางที่ 7 ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยในลุ่มน้ำตาปี (พ.ศ. 2541-2560)

พ.ศ.	ปริมาณน้ำท่ารายปี (ล้าน ลบ.ม.)	พ.ศ.	ปริมาณน้ำท่ารายปี (ล้าน ลบ.ม.)
2541	19,022.02	2551	12,291.00
2542	15,630.70	2552	12,666.89
2543	16,670.46	2553	14,378.01
2544	14,615.18	2554	17,962.72
2545	12,602.11	2555	14,863.16
2546	12,856.03	2556	15,102.70
2547	10,647.64	2557	12,914.88
2548	11,714.70	2558	13,513.62
2549	16,693.15	2559	13,670.59
2550	15,666.61	2560	15,500.19
		เฉลี่ย	14,449.12
		ต่ำสุด	10,647.64
		สูงสุด	19,022.02
		ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2,170.64



3.4 ผลการเปลี่ยนแปลงทางด้านอุตุนิยมวิทยาภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในพื้นที่ศึกษา

การศึกษากการเปลี่ยนแปลงทางด้านอุตุนิยมวิทยาภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในพื้นที่ลุ่มน้ำตาปีโดยการย่อยส่วนแบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM2 ในข้อมูลกริด BOX_036X_36Y ด้วยวิธีทางสถิติ ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิอากาศสูงสุด อุณหภูมิอากาศต่ำสุด และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ โดยมีสถานีวัดปริมาณน้ำฝน จำนวน 11 สถานี สถานีตรวจวัดอุณหภูมิอากาศสูงสุด-ต่ำสุด และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ

จำนวน 3 สถานี ดังแสดงผลการสอบเทียบและทวนสอบข้อมูลภูมิอากาศที่ได้จากการย่อยส่วนแบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM2 ด้วยวิธีทางสถิติ ในช่วง พ.ศ. 2528-2548 ในตารางที่ 8 และตารางที่ 9 และแสดงผลจากการคาดการณ์ข้อมูลภูมิอากาศที่ได้จากการย่อยส่วนแบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM2 ด้วยวิธีทางสถิติ (SDSM) และปรับแก้ความเอนเอียงของข้อมูลด้วยเทคนิค Linear Scaling Method ภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก RCP 2.6, RCP 4.5 และ RCP 8.5 ในช่วง พ.ศ. 2561-2680 แสดงในรูปที่ 8 และตารางที่ 10

ตารางที่ 8 ผลการสอบเทียบและทวนสอบข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่ได้จากการย่อยส่วนแบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM2 ด้วยวิธีทางสถิติ ในช่วง พ.ศ. 2528-2548

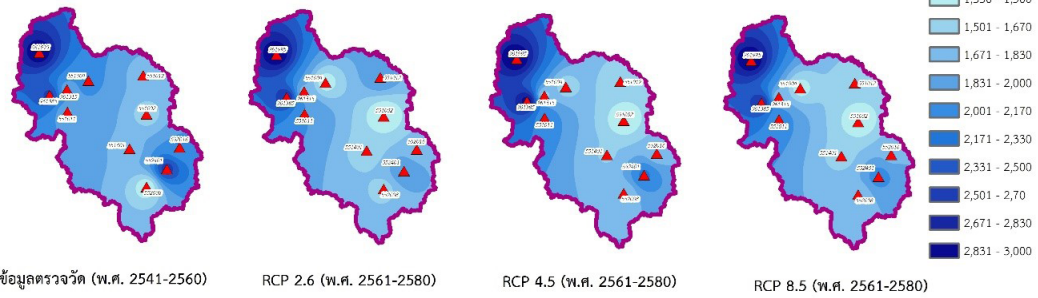
ลำดับ	รหัสสถานี	ผลการวิเคราะห์ SDSM ข้อมูลภูมิอากาศรายเดือน								
		R ²			RMSE			PBIAS		
		สอบเทียบ (พ.ศ. 2528-2538)	ทวนสอบ (พ.ศ. 2539-2548)	ทั้งหมด (พ.ศ. 2528-2548)	สอบเทียบ (พ.ศ. 2528-2538)	ทวนสอบ (พ.ศ. 2539-2548)	ทั้งหมด (พ.ศ. 2528-2548)	สอบเทียบ (พ.ศ. 2528-2538)	ทวนสอบ (พ.ศ. 2539-2548)	ทั้งหมด (พ.ศ. 2528-2548)
ปริมาณน้ำฝน										
1	551002	0.63	0.32	0.48	70.27	85.12	76.79	-0.51	0.55	0.00
2	551004	0.60	0.29	0.43	77.41	106.23	92.30	18.45	-13.84	0.00
3	551011	0.45	0.25	0.34	125.39	149.51	137.67	10.21	-12.65	-1.62
4	551012	0.55	0.17	0.34	91.83	128.60	110.77	6.74	-11.19	-2.48
5	551401	0.63	0.46	0.55	66.53	66.87	66.53	-1.02	-2.94	-1.96
6	552008	0.64	0.24	0.47	70.51	80.26	75.00	-9.25	6.71	-2.55
7	552016	0.56	0.29	0.42	77.61	90.49	82.72	12.25	-13.72	-1.31
8	552401	0.69	0.50	0.59	75.19	105.66	91.01	1.44	-8.33	-3.69
9	961315	0.61	0.31	0.45	64.75	91.90	78.80	1.46	-7.79	-3.18
10	961385	0.52	0.39	0.45	145.09	159.86	152.59	8.97	-10.98	-1.57
11	961995	0.61	0.56	0.58	172.53	170.05	171.70	-2.42	-4.37	-3.41

ตารางที่ 9 ผลการสอบเทียบและทวนสอบข้อมูลอุณหภูมิอากาศ และความชื้นในอากาศที่ได้จากการย่อยส่วนแบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM2 ด้วยวิธีทางสถิติ ในช่วง พ.ศ. 2528-2548

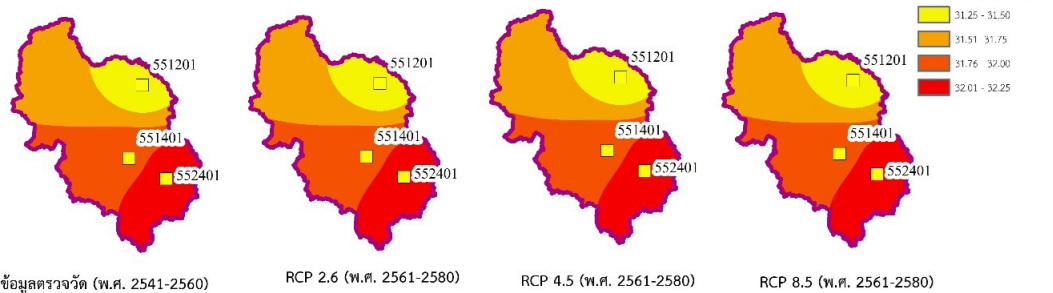
ลำดับ	รหัสสถานี	ผลการวิเคราะห์ SDSM ข้อมูลภูมิอากาศรายเดือน								
		R ²			RMSE			PBIAS		
		สอบเทียบ (พ.ศ. 2528-2538)	ทวนสอบ (พ.ศ. 2539-2548)	ทั้งหมด (พ.ศ. 2528-2548)	สอบเทียบ (พ.ศ. 2528-2538)	ทวนสอบ (พ.ศ. 2539-2548)	ทั้งหมด (พ.ศ. 2528-2548)	สอบเทียบ (พ.ศ. 2528-2538)	ทวนสอบ (พ.ศ. 2539-2548)	ทั้งหมด (พ.ศ. 2528-2548)
อุณหภูมิอากาศสูงสุด										
1	551201	0.43	0.36	0.39	2.32	2.20	2.27	-3.41	0.00	0.00
2	551401	0.50	0.39	0.45	1.72	1.80	1.76	-5.34	-4.58	-4.98
3	552401	0.34	0.22	0.28	1.74	2.02	1.88	-3.55	-3.49	-3.52
อุณหภูมิอากาศต่ำสุด										
1	551201	0.46	0.15	0.21	0.92	1.92	1.49	-3.32	-2.83	0.00
2	551401	0.51	0.38	0.44	0.83	0.85	0.84	0.09	-5.92	-2.87
3	552401	0.62	0.41	0.50	0.92	1.14	1.03	-2.11	-1.51	-1.83
ความชื้นในอากาศ										
1	551201	0.64	0.24	0.47	70.51	80.26	75.00	-1.38	-1.77	0.00
2	551401	0.64	0.24	0.47	70.51	80.26	75.00	-9.25	6.71	-2.55
3	552401	0.64	0.24	0.47	70.51	80.26	75.00	-9.25	6.71	-2.55

สายไหม ทุ้มกระโทก และคณะ, “ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำตาปีโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT.”

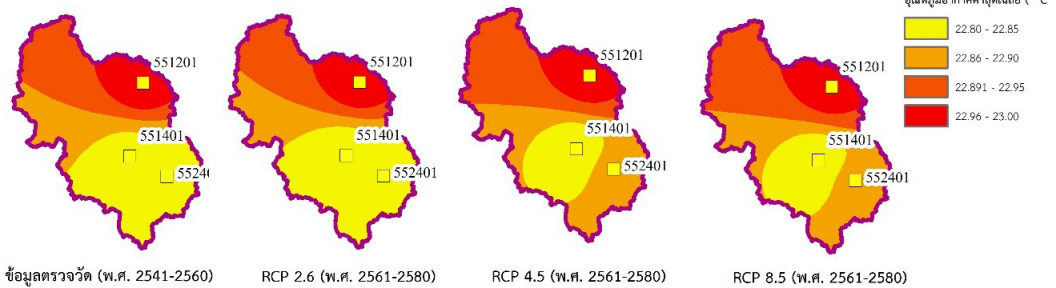
ปริมาณน้ำฝนรายปี (มิลลิเมตร)



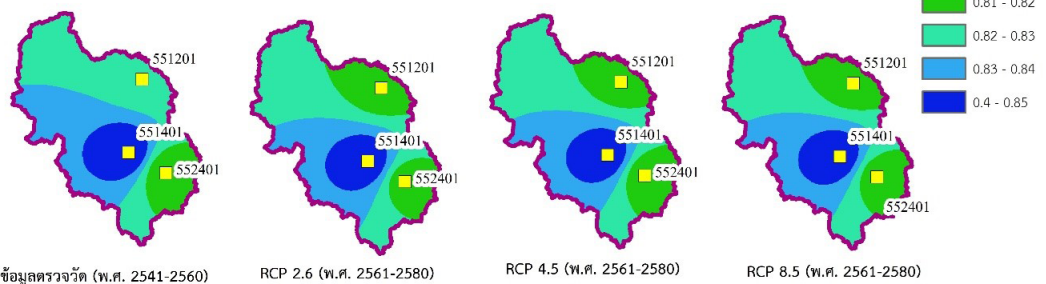
อุณหภูมิอากาศสูงสุดเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)



อุณหภูมิอากาศต่ำสุดเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)



ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (เปอร์เซ็นต์)



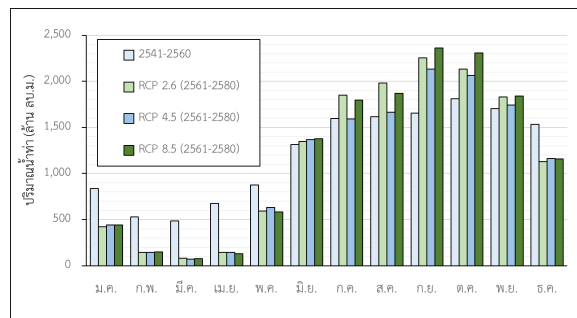
รูปที่ 8 ผลการประเมินข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศได้จากกรย่อยส่วนแบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM2 ภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก RCP 2.6, RCP 4.5 และ RCP 8.5 ในช่วง พ.ศ. 2561-2580

ตารางที่ 10 ผลการประเมินข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศได้จากการย่อยส่วนแบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM2 ภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก RCP 2.6, RCP 4.5 และ RCP 8.5 ในช่วง พ.ศ. 2561–2580

ตัวแปรภูมิอากาศ	สถานี	Obs 2541–2560		RCP 2.6 (พ.ศ.2561–2580)		RCP 4.5 (พ.ศ.2561–2580)		RCP 8.5 (พ.ศ.2561–2580)	
		ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
ปริมาณน้ำฝน สะสมรายปี (มิลลิเมตร)	551002	1,541.91	194.59	1,454.50	110.18	1,438.20	88.92	1,440.81	74.68
	551004	2,034.16	468.17	1,545.16	113.44	1,615.77	88.92	1,511.34	74.68
	551011	1,813.07	468.37	1,956.69	133.93	1,890.08	148.39	1,993.81	153.01
	551012	1,753.05	490.82	1,949.62	129.93	1,603.70	126.69	1,631.23	92.02
	551401	1,746.93	468.37	1,699.88	102.51	1,686.78	150.76	1,679.34	166.25
	552008	1,337.53	324.93	1,729.48	77.25	1,710.40	94.51	1,756.54	105.44
	552016	2,029.22	375.10	1,795.26	149.70	1,734.64	85.30	1,812.22	85.87
	552401	2,605.66	331.62	1,962.63	184.75	2,008.15	130.72	2,020.33	170.04
	961315	1,896.32	487.26	1,786.95	117.92	1,648.07	168.89	1,724.71	122.87
	961385	2,577.46	194.89	2,511.51	172.31	2,602.39	150.12	2,585.41	165.27
961995	3,001.62	647.99	2,792.77	425.11	2,682.92	150.94	2,941.14	127.07	
อุณหภูมิอากาศ สูงสุดเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)	551201	32.37	0.53	31.22	0.13	31.26	0.18	31.25	0.15
	551401	32.80	0.43	31.82	0.13	31.82	0.14	31.84	0.12
	552401	33.06	0.41	32.34	0.10	32.36	0.16	32.35	0.14
อุณหภูมิอากาศ ต่ำสุดเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)	551201	23.84	0.71	22.97	0.09	22.95	0.09	23.00	0.08
	551401	22.90	0.49	22.80	0.09	22.77	0.06	22.80	0.06
	552401	22.76	1.02	22.82	0.08	22.83	0.09	22.87	0.11
ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	551201	82.49%	1.33%	81.19%	0.33%	80.85%	0.54%	81.29%	0.40%
	551401	82.73%	2.12%	84.62%	0.82%	84.23%	0.92%	84.76%	0.86%
	552401	82.44%	2.52%	81.32%	1.72%	80.65%	1.56%	81.25%	1.63%

3.5 ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่าภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

จากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางด้านอุตุนิยมิวิทยาภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศบริเวณพื้นที่ที่ศึกษาลุ่มน้ำตาปี โดยการย่อยส่วนแบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM2 ด้วยวิธีทางสถิติ ภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก RCP 2.6, RCP 4.5 และ RCP 8.5 มีผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำตาปีแสดงในรูปที่ 9 และตารางที่ 11



รูปที่ 9 ผลการประเมินปริมาณน้ำท่าภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก RCP 2.6, RCP 4.5 และ RCP 8.5

ตารางที่ 11 ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่าภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก RCP 2.6, RCP 4.5 และ RCP 8.5

เดือน	ปริมาณน้ำท่า (ล้าน ลบ.ม.)			
	สภาพปัจจุบัน (พ.ศ. 2541-2560)	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
ม.ค.	835.04	424.21	440.61	443.65
ก.พ.	530.52	142.23	144.16	148.18
มี.ค.	485.31	79.1	73.52	75.09
เม.ย.	675.85	145.04	142.4	128.27
พ.ค.	876.19	591.74	633.95	580.81
มิ.ย.	1,314.78	1,350.52	1,368.32	1,375.87
ก.ค.	1,595.99	1,852.13	1,594.03	1,797.97
ส.ค.	1,614.82	1,981.88	1,666.46	1,869.56
ก.ย.	1,657.52	2,254.69	2,131.54	2,364.01
ต.ค.	1,809.16	2,132.75	2,065.24	2,308.77
พ.ย.	1,704.51	1,832.10	1,744.20	1,838.21
ธ.ค.	1,534.59	1,127.44	1,163.65	1,156.16
เฉลี่ยทั้งปี	14,634.28	13,913.83	13,168.09	14,086.55
% การเปลี่ยนแปลง	-	-4.92%	-10.02%	-3.74%

4. อภิปรายผลและสรุป

การศึกษานี้เป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT เพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำตาปี ผลการสอบเทียบและทวนสอบแบบจำลอง SWAT มีผลการสอบเทียบแบบและทวนสอบแบบจำลองที่ สถานีวัดน้ำ X.36 และที่สถานีวัดน้ำ X.217 อยู่ในเกณฑ์ดีถึงดีมาก โดยการวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำตาปี ในช่วง 20 ปี (พ.ศ. 2541-2560) พบว่าแนวโน้มของปริมาณน้ำท่าในช่วงดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงโดยเฉลี่ยปีละประมาณ 38.05 ล้าน ลบ.ม./ปี

สำหรับการศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก RCP 2.6, RCP 4.5 และ RCP 8.5 ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ส่งผลให้การวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำตาปี ภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลง

ภูมิอากาศโลก RCP 2.6, RCP 4.5 และ RCP 8.5 ในช่วง 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580) พบว่า ปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำตาปีมีแนวโน้มลดลง 4.92, 10.02 และ 3.74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากข้อมูลเชิงสถิติของการตรวจวัดปริมาณน้ำฝนจากสถานีอุตุนิยมวิทยาของประเทศไทย ในรอบ 60 ปี ระหว่าง พ.ศ. 2498-2557 พบว่า พื้นที่ฝั่งอ่าวไทย มีแนวโน้มปริมาณฝนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในขณะที่ปริมาณน้ำท่ารายปีในช่วง 20 ปี ระหว่าง พ.ศ. 2541-2560 พบว่า มีแนวโน้มของปริมาณน้ำท่าลดลง ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำ เช่น รูปแบบการกระจายน้ำฝน การบริหารจัดการน้ำในเขื่อน ความต้องการใช้น้ำ การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน เป็นต้น

ในการศึกษาด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและผลกระทบต่อทรัพยากรน้ำในอนาคตมักมีความไม่แน่นอนจากหลายปัจจัย เช่น ปัจจัยจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก เป็นต้น ซึ่งในการศึกษานี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในอนาคตจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก CanESM2 เพียงแบบจำลองเดียว โดยในปัจจุบันแบบจำลองภูมิอากาศโลกมีมากกว่า 45 แบบจำลอง ซึ่งแต่ละแบบจำลองอาจให้ผลลัพธ์ของการศึกษาที่แตกต่างกัน ดังนั้นการนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้จึงควรพิจารณาถึงผลจากความไม่แน่นอนนี้ด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยงานต่างๆ ได้แก่ กรมชลประทาน กรมพัฒนาที่ดิน กรมทรัพยากรน้ำ กรมอุตุนิยมวิทยา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และศูนย์อุทกวิทยาและบริหารน้ำภาคใต้ ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลต่างๆ ในการศึกษารังนี้ และขอขอบคุณคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ที่ให้คำปรึกษาและให้ข้อเสนอแนะในการศึกษารังนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] S. Sarawan. (2019), Climate change. The institute for the Promotion of Teaching Science and



- Technology (IPST). Bangkok, Thailand. [Online] (in Thai). Available: <https://www.scimath.org/article-chemistry/item/10620-climate-change>
- [2] A. Limsakul, K. Boonpragob, and A. Chidthaisong, "Thailand's First Assessment Report on Climate Change 2011," Working group I: Scientific Basis of Climate Change, Bangkok, The Joint Graduate School of Energy and Environment (JGSEE), King Mongkut's University of Technology Thonburi, Aug. 2011 (in Thai).
- [3] S. Koontanakulvong, P. Suttinon, P. Ruangrassamee, C. Suthidhumrajit, and W. Hemsatien, "Research report on climate change impact and vulnerability assessment in selected sectors," Chula Unisearch, Chulalongkorn University, June 2017 (in Thai).
- [4] S. Sarawan. (2018), "Climatological center," Changes in Temperature and Rainfall over Thailand under Climate change. Meteorological Department. Bangkok, Thailand. Technical Document no. 551.577.3 - 01 - 2016, 2016.
- [5] Office of the National Water Resources, "Strategic environmental assessment to watershed area of Southern Thailand," Area-based Approach, Bangkok, Thailand, 2017 (in Thai).
- [6] R. Srinivasan, T. S. Ramnarayanan, J. G. Arnold, and S. T. Bednarz, "Large area hydrologic modeling and assessment: Part II," *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 34, no. 1, pp. 91-101, 2007.
- [7] Hydro and Agro Informatics Institute. (2012, February). Data collection and analysis data project of 25 basins and flood drought model, Tapi River Basins [Online] (in Thai). Available: <http://tiwrmdev.hii.or.th/web/attachments/25basins/22-tapee.pdf>
- [8] S. L. Neitsch, J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams, "Soil and water assessment tool, theoretical documentation: Version 2009," USDA Agricultural Research Service and Texas A&M Blackland Research Center, Temple Texas, TR-406, 2011.
- [9] J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney and S. L. Neitsch, "Soil & Water assessment tool: Input/Output documentation. version 2012," Texas Water Resources Institute, College Station, TR-439, 2015.
- [10] M. Winchell, R. Srinivasan, M. D. Luzio, and J. G. Arnold, "Arcswat interface for SWAT2012: User's Guide," Blackland Reserch and Extension center Texas. Agrilife Research, 720 East Blackland Road, Temple, Texas 76506, 2013.
- [11] Office of Research and Development for Land Mangement. (2004). Slope classification criteria for land development and soil and water conservation. Land Development Department. Bangkok, Thailand. [Online] (in Thai). Available: https://www.ddd.go.th/Web_Soil/clay.htm
- [12] K. Tumkoon, K. Sittichok, and C. Thepprasit, "Comparison of calibration techniques of swat model for estimation of reservoir inflow to Khwae Noi Bamrungdan Dam, Phitsanulok," *Journal of Science and Technology Kasetsart University*, vol. 6, no. 3, pp. 41-59, 2017 (in Thai).
- [13] W. Me, J. M. Abell, and D. P. Hamilton, "Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand,"

- Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, no. 10, pp. 4127–4147, 2015.
- [14] K. C Abbaspour, “SWAT-CUP: SWAT calibration and uncertainty programs-a user manual,” Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Zurich, Switzerland, 2015.
- [15] D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith, “Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations,” *Transactions of the ASABE*, vol. 50, no. 3, pp. 885–900, 2007.
- [16] C. Santhi, J. G. Arnold, J. R. Williams, W. A. Dugas, R. Srinivasan, and L. M. Hauck, “Validation of the SWAT model on a Large River Basin with point and nonpoint,” *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 37, no. 5, pp. 1169–1188, 2001.
- [17] IPCC. (2015, March). Fifth assessment report: Climate change 2013: Synthesis report. Contact information for the IPCC Secretariat, Geneva 2, Switzerland [Online]. Available: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- [18] R. L. Wilby, L. E. Hay, W. J Gutowski, R. W. Arritt, E. S. Takle, Z. T. Pan, G. H. Leavesley, and M. P. Clark, “Hydrological responses to dynamically and statistically downscaled climate model output,” *Geophysical Research Letters*, vol. 27, no. 8, pp. 1199–1202, 2000.
- [19] G. Lenderink, A. Buishand, and W. V. Deursen, “Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: Direct versus delta approach,” *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 11, no. 30, pp. 1145–1159, 2007.