

การเปรียบเทียบเทคนิคการปรับเทียบแบบจำลอง SWAT สำหรับประเมินน้ำท่าลงอ่างเก็บน้ำเขื่อน  
แควน้อยบำรุงแดน จังหวัดพิษณุโลก

Comparison of Calibration Techniques of SWAT Model for Estimation of Reservoir Inflow to  
Khwaeng Noi Bamrungdan Dam, Phitsanulok

กิตติพงษ์ ตุมกoon<sup>1</sup> เกศวรา สิริโชค<sup>1</sup> และ ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์<sup>1\*</sup>  
Kittipong Tumkoon,<sup>1</sup> Ketvara Sittichok<sup>1</sup> and Chaiyapong Theprasit<sup>1\*</sup>

ABSTRACT

The objective of this study is to compare two calibration techniques for SWAT model which is used to simulate inflow of Khwaeng Noi Bamrungdan reservoir. The first technique, using only one set of parameters for the entire basin (case 1) and the other one using different sets of parameters for each sub-basin (case 2) are compared. Observed monthly discharge data at Ban Keang Bua Kham station (091401) are used to evaluate the performance of the SWAT model in both calibration and validation processes using coefficient of determination ( $R^2$ ) and Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE). The durations of calibration and validation periods are April 1998 to March 2004 and April 2004 to March 2010, respectively. The input data used in SWAT model comprise of Digital Elevation Model (DEM) with 30 x 30 m. resolution, soil data, land use data from 2007 to 2009, daily meteorological data from 1998 to 2010 and monthly discharge data from 1998 to 2010 at Ban Keang Bua Kham station (091401), Ban Nong Krathao station (N.36), Ban Na Po Na Chan station (N.59) and Ban Khok Pakwan station (091502). Results reveal that case 2 shows higher performance in both calibration and validation periods with  $R^2$  and NSE of 0.823, 0.763 and 0.928, 0.886, respectively. In case 1,  $R^2$  and NSE of calibration and validation period are 0.819, 0.616 and 0.871, 0.535, respectively.

**Keywords:** SWAT model, Calibration techniques, Khwaeng Noi Bamrungdan reservoir

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการปรับเทียบแบบจำลอง SWAT เพื่อใช้ในการประเมินปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำแควน้อยบำรุงแดน โดยได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างการปรับใช้พารามิเตอร์ชุดเดียวกันทั้งลุ่มน้ำ(กรณี 1) และการปรับใช้พารามิเตอร์ที่แตกต่างกันตามแต่ละลุ่มน้ำย่อย (กรณี 2) และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายเดือนที่สถานีวัดน้ำท่าที่บ้านแก่งบัวคำ (091401) ซึ่งเกณฑ์ที่ใช้ประเมินเชิงประสิทธิภาพ ได้แก่ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และ

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineer at Kamphaengsaen, Kasetsart University Kamphaengsaen Campus, Nakorn Pathom 73140, Thailand.

\*Corresponding author: Tel. 08-6722-8750, Fax. 0-3435-2053, E-mail address: fengcpth@ku.ac.th

Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) ซึ่งมีช่วงเวลาในการเปรียบเทียบแบบจำลองตั้งแต่เดือนเมษายน พ.ศ. 2541 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2547 และมีช่วงเวลาในการตรวจพิสูจน์แบบจำลองตั้งแต่เดือนเมษายน พ.ศ. 2547 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2553 โดยข้อมูลที่ใช้ในการจัดทำแบบจำลอง ประกอบด้วย แผนที่ระดับความสูงภูมิประเทศขนาด 30x30 ม. ข้อมูลชนิดดิน ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินช่วงปี พ.ศ. 2550-2552 ข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายวัน พ.ศ. 2541-2553 และข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายเดือน พ.ศ. 2541-2553 ของสถานีวัดน้ำท่าที่บ้านแก่งบัวคำ (091401) สถานีวัดน้ำท่าที่บ้านหนองกระเถา (N.36) สถานีวัดน้ำท่าที่บ้านนาโพธิ์นาจาน (N.59) และสถานีวัดน้ำท่าที่บ้านโคกผักหวาน (091502) ผลการศึกษาพบว่า ผลการเปรียบเทียบและการตรวจพิสูจน์ของการจัดทำแบบจำลอง SWAT ในกรณีที่ 2 มีประสิทธิภาพของผลการเปรียบเทียบและการตรวจพิสูจน์แบบจำลองสูงกว่ากรณีที่ 1 โดยในกรณีที่ 2 มีผลการเปรียบเทียบให้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.823 และค่า NSE เท่ากับ 0.763 ในขณะที่การตรวจพิสูจน์แบบจำลองให้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.928 และค่า NSE เท่ากับ 0.886 และในกรณีที่ 1 มีผลการเปรียบเทียบให้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.819 และค่า NSE เท่ากับ 0.616 ในขณะที่การตรวจพิสูจน์แบบจำลองให้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.871 และค่า NSE เท่ากับ 0.535

**คำสำคัญ:** แบบจำลอง SWAT แนวทางการเปรียบเทียบ อ่างเก็บน้ำแควน้อยบำรุงแดน

### บทนำ

สภาวะแวดล้อมของพื้นที่ลุ่มน้ำแควน้อยในปัจจุบันมีสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เปลี่ยนแปลงไป โดยอาจมีผลเนื่องมาจากการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาและผลกระทบต่อมนุษย์ทั้งในทางตรงและทางอ้อม และยังส่งผลต่อปริมาณน้ำท่าในทางอุทกวิทยาเช่นกัน อ่างเก็บน้ำแควน้อยบำรุงแดนตั้งอยู่ในเขตจังหวัดพิษณุโลก ซึ่งอยู่ในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย ลุ่มน้ำแควน้อยเป็นพื้นที่ต้นน้ำที่สำคัญของลุ่มน้ำน่านและพื้นที่ชลประทานของลุ่มน้ำน่าน และลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่าง จึงทำให้ปริมาณน้ำของอ่างเก็บน้ำแควน้อยบำรุงแดนมีความสำคัญต่อการบริหารจัดการด้านชลประทาน รวมทั้งการบรรเทาอุทกภัยในพื้นที่ลุ่มน้ำน่านตอนล่าง

แบบจำลองคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือที่สำคัญที่ถูกนำมาใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับด้านทรัพยากรน้ำมานาน โดยเฉพาะการนำแบบจำลองใช้ในการประเมินปริมาณน้ำท่า ซึ่งเป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการวางแผนและการจัดการทรัพยากรน้ำในปัจจุบัน มีแบบจำลองอุทกวิทยาเพื่อใช้ในการประเมินปริมาณน้ำท่าหลายแบบจำลอง ส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองทาง

อุทกวิทยาในกลุ่มของประเภท Lumped-Parameter Model ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีลักษณะของการรวมและเฉลี่ยค่าพารามิเตอร์ทั้งลุ่มน้ำ แต่มีแบบจำลองอีกกลุ่มหนึ่งได้แก่แบบจำลองทางอุทกวิทยาประเภทการกระจายพารามิเตอร์ หรือ Distributed-Parameter Model ซึ่งเป็นประเภทกลุ่มของแบบจำลองทางอุทกวิทยาที่สามารถประเมินปริมาณน้ำท่าในสภาพลุ่มน้ำที่มีความซับซ้อนทางอุทกวิทยาได้เป็นอย่างดี โดยแบบจำลอง Soil And Water Assessment Tool หรือแบบจำลอง SWAT เป็นหนึ่งในแบบจำลองประเภทนี้เช่นกัน

ฤทธิไกร และคณะ (2557) ได้แนะนำการแบ่งแยกการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำท่าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและกิจกรรมของมนุษย์ออกจากกัน โดยพิจารณาสถานีน้ำท่า CT.5A ซึ่งเป็นสถานีดัชนีสำคัญที่ใช้ในการอ้างอิงทางวิศวกรรมแหล่งน้ำในลุ่มน้ำแควน้อย วิธีการประกอบด้วย การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงอนุกรมเวลาโดยการวิเคราะห์ Sequential Cluster และการประเมินปริมาณน้ำท่าด้วยแบบจำลอง SWAT ผลการศึกษาพบว่า ผลกระทบจากกิจกรรมของมนุษย์ทำให้ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีลดลง 5.43% และ

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทำให้ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีเพิ่มขึ้น 23.94%

Phomchaa (2012) ได้สร้างแบบจำลองจากผลกระทบของการอนุรักษ์ดินในลุ่มน้ำลำสนธิ เพื่อใช้สำหรับใช้อนุรักษ์ดินและการลดตะกอนในลุ่มน้ำลำสนธิ ซึ่งอยู่บริเวณภาคกลางของประเทศไทย โดยใช้แบบจำลอง SWAT ซึ่งใช้ข้อมูลรายวันทางอุตุนิยมนวิทยา ข้อมูลการใช้ที่ดินและข้อมูลดิน ข้อมูลค่าระดับของพื้นที่ (DEM) ข้อมูลปริมาณน้ำท่าของลุ่มน้ำลำสนธิ และข้อมูลการชะล้าง การพังทลายของดิน และปริมาณตะกอนของลุ่มน้ำลำสนธิ ในปี ค.ศ.1997 ถึง ปี ค.ศ. 2002 โดยแบบจำลองมีค่า  $R^2$  และ ค่า NSE มากกว่า 0.70 ซึ่งผลของแบบจำลองให้ค่าตะกอนเฉลี่ยสำหรับการอนุรักษ์ดิน 6 สถานการณ์จำลอง โดยสถานการณ์จำลอง G (มีการปลูกป่า มีการปลูกพืชคลุมดิน และมีการปลูกพืชแบบตัดออก) มีค่าตะกอนต่ำสุด (27.84 ตัน / เฮกตาร์ / ปี) และสถานการณ์ C (มีการปลูกพืชแบบตัดออกอย่างเตี๋ยว) ให้ค่าตะกอนมากที่สุด (58.40 ตัน / เฮกตาร์ / ปี)

Tracy และ Scott (2013) ใช้แบบจำลอง SWAT ศึกษาผลกระทบของปริมาณน้ำท่าจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในลุ่มน้ำแอฟริกาตะวันออก ประเทศเคนยา ซึ่งในการศึกษาใช้ลุ่มน้ำ Njoro ในประเทศเคนยา เพื่อประเมินผลกระทบของทรัพยากรทางด้านแหล่งน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในลุ่มน้ำแอฟริกาตะวันออก โดยใช้ข้อมูลรายวันทางอุตุนิยมนวิทยา ข้อมูลรายวันทางอุตุนิยมนวิทยา ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ข้อมูลน้ำใต้ดิน และข้อมูลปริมาณน้ำท่า ค.ศ. 1986 – 2003 โดยผลที่ได้พบว่า จากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในลุ่มน้ำ ทำให้ปริมาณน้ำผิวดินของลุ่มน้ำจาก ค.ศ.1986 – 2003 มีค่าเพิ่มขึ้น 9% และปริมาณน้ำใต้ดินลดลง 7%

จากการศึกษาข้างต้นและแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง SWAT เป็นแบบจำลองทางอุทกวิทยาที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายและมีการถูกนำไปใช้ในงาน

เป็นอย่างมาก และมีความนิยมใช้กันในปัจจุบัน โดยสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการบริหารจัดการน้ำได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการประเมินปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำแควน้อยบำรุงแดน โดยการปรับใช้พารามิเตอร์ของแบบจำลอง SWAT เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพความน่าเชื่อถือ และความเหมาะสม ซึ่งเทียบเปรียบเทียบระหว่างการปรับใช้พารามิเตอร์ชุดเดียวทั้งลุ่มน้ำและการปรับใช้พารามิเตอร์ที่แตกต่างกันตามแต่ละลุ่มน้ำย่อย โดยใช้ปริมาณน้ำท่าของสถานีวัดน้ำท่าที่บ้านแก่งบัวคำ (091401) เพื่อหาประสิทธิภาพของแบบจำลอง และเพื่อจะใช้เป็นเครื่องมือในการวางแผนการบริหารจัดการน้ำของอ่างเก็บน้ำแควน้อยบำรุงแดนทั้งในปัจจุบันและในอนาคต

## อุปกรณ์และวิธีการ

### พื้นที่ศึกษา

ลุ่มน้ำแควน้อยมีรหัสลุ่มน้ำ 0914 และมีพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมดประมาณ 5,572 ตร.กม. ลุ่มน้ำแควน้อยเป็นลุ่มน้ำสาขาทางฝั่งซ้ายของลุ่มน้ำน่าน มีต้นน้ำของลำน้ำแควน้อย จากเทือกเขาสอยดาวใกล้พรมแดนระหว่างประเทศไทยและสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว ในอำเภอชาติตระการ จังหวัดพิษณุโลก ซึ่งสันปันน้ำเป็นเส้นแบ่งเขตกับอำเภอนาแห้ว จังหวัดเลย สภาพพื้นที่ส่วนใหญ่จะเป็นภูเขาสูงและจะเป็นที่ราบบั้งเล็กน้อย ตามแนวลำน้ำสายหลัก สภาพพื้นที่ส่วนใหญ่จะเป็นภูเขาสูงและจะเป็นที่ราบบั้งเล็กน้อย ตามแนวลำน้ำสายหลักไหลพาดผ่านทิศตะวันออกไปทิศตะวันตก ผ่านอำเภอวัดโบสถ์ มาบรรจบกับแม่น้ำน่านที่อำเภอพรมพิราม จังหวัดพิษณุโลก (กรมชลประทาน, 2556) ดังแสดงสภาพภูมิประเทศลุ่มน้ำแควน้อยไว้ใน Figure 1 โดยพื้นที่รับน้ำฝนของอ่างเก็บน้ำแควน้อยบำรุงแดน มีพื้นที่รับน้ำฝนทั้งหมดประมาณ 4,254 ตร.กม.

(ไชยาพงษ์, 2558)



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

เมื่อ  $SW_t$  คือปริมาณน้ำในดินสุดท้าย (มม.)

$SW_0$  คือปริมาณน้ำในดินเริ่มต้นวันที่  $i$  (มม.)  $t$  คือเวลา (วัน)

$R_{\text{day}}$  คือปริมาณฝนในวันที่  $i$  (มม.)

$Q_{\text{surf}}$  คือปริมาณน้ำท่าผิวดินในวันที่  $i$  (มม.)

$E_a$  คือปริมาณการคายระเหยในวันที่  $i$  (มม.)

$W_{\text{seep}}$  คือปริมาณน้ำไหลซึมลงสู่ชั้นใต้ดินในวันที่  $i$  (มม.)

และ  $Q_{\text{lat}}$  คือปริมาณน้ำใต้ผิวดินที่ไหลกลับสู่ลำน้ำในวันที่  $i$  (มม.)

โดยน้ำท่าผิวดิน (Surface Runoff) ในแบบจำลอง SWAT ผู้ใช้สามารถเลือกคำนวณปริมาณของน้ำท่าผิวดินและค่าอัตราการไหลของน้ำท่าสูงสุดได้ 2 วิธี ได้แก่ SCS Curve Number (USDA Soil Conservation Service, 1972) และวิธี Green and Ampt (Green and Ampt, 1911) โดยในการศึกษา

ครั้งนี้ผู้จัดทำใช้วิธี SCS Curve Number เนื่องจากเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย

การคำนวณปริมาณการไหลของน้ำใต้ดินแบบจำลอง SWAT แบ่งการจำลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ เขต Shallow Aquifer และเขต Deep Aquifer (Neitsch *et al.*, 2011) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ (2) และสมการ (3) ตามลำดับ

$$aq_{\text{sh},i} = aq_{\text{sh},i-1} + W_{\text{rchrg}} - Q_{\text{gw}} - W_{\text{revap}} - W_{\text{deep}} - W_{\text{pump,sh}} \quad (2)$$

เมื่อ  $aq_{\text{sh},i}$  คือปริมาณน้ำที่เก็บกักอยู่ในชั้น Shallow Aquifer ในวันที่  $i$  (มม.)  $aq_{\text{sh},i-1}$  คือปริมาณน้ำที่เก็บกักอยู่ในชั้น Shallow Aquifer ในวันที่  $i-1$  (มม.)  $W_{\text{rchrg}}$  คือปริมาณน้ำที่ไหลสู่ชั้น Shallow Aquifer ในวันที่  $i$  (มม.)  $Q_{\text{gw}}$  คือปริมาณการไหลของน้ำใต้ดินออกสู่แม่น้ำลำธาร ในวันที่  $i$  (มม.)  $W_{\text{revap}}$  คือ

ปริมาณน้ำที่ไหลจากชั้น Shallow Aquifer กลับสู่เขตรากพืช ในวันที่  $i$  (มม.)  $W_{\text{deep}}$  คือปริมาณน้ำที่ไหลจากชั้น Shallow Aquifer สู่ชั้น Deep Aquifer ในวันที่  $i$  (มม.) และ  $W_{\text{pump,sh}}$  คือปริมาณน้ำที่ถูกสูบออกไปจากชั้น Shallow Aquifer ในวันที่  $i$  (มม.)

$$aq_{\text{dp},i} = aq_{\text{dp},i-1} + W_{\text{deep}} - W_{\text{pump,dp}} \quad (3)$$

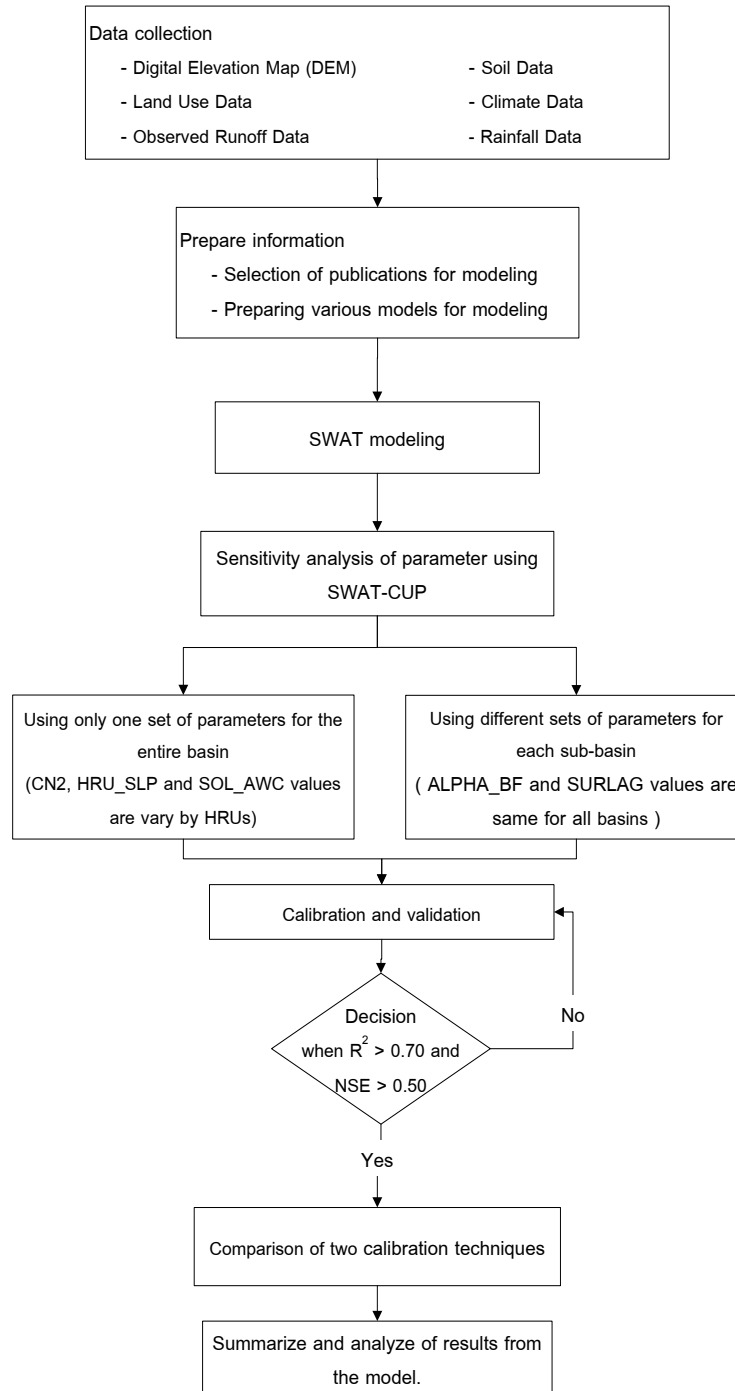
เมื่อ  $aq_{\text{dp},i}$  คือปริมาณน้ำที่เก็บกักอยู่ในชั้น Deep Aquifer ในวันที่  $i$  (มม.)  $aq_{\text{dp},i-1}$  คือปริมาณน้ำที่เก็บกักอยู่ในชั้น Deep Aquifer ในวันที่  $i-1$  (มม.)  $W_{\text{deep}}$  คือปริมาณน้ำที่ไหลจากชั้น Shallow Aquifer สู่ชั้น

Deep Aquifer ในวันที่  $i$  (มม.) และ  $W_{\text{pump,dp}}$  คือปริมาณน้ำที่ถูกสูบออกไปจากชั้น Deep Aquifer ในวันที่  $i$  (มม.)

### ขั้นตอนการศึกษา

สำหรับในการศึกษาเพื่อประเมินปริมาณ  
น้ำท่าที่ไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุง

แดนครั้งนี้ สามารถสรุปขั้นตอนในการศึกษา  
ได้ดัง Figure 2 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



**Figure 2** The process of this study



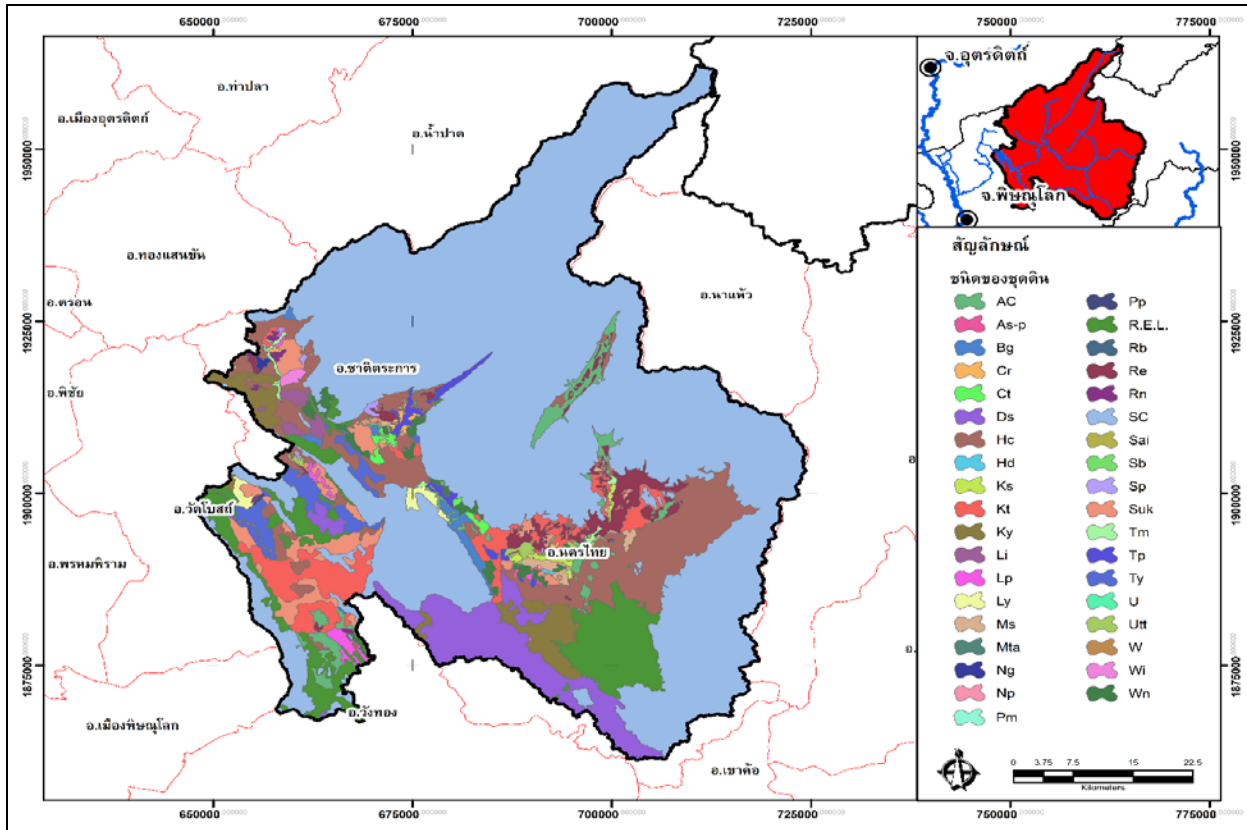


Figure 4 Soil series map

4) ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ (Climate Data)<sub>2</sub> เป็นข้อมูลรายวัน ช่วงปี พ.ศ. 2541-2553 โดยรวบรวมจากกรมอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด อุณหภูมิเฉลี่ย ความเร็วลม การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ จากสถานีอุตุนิยมวิทยา 3 สถานี ได้แก่ สถานีอุตุนิยมวิทยา อ.เมือง จ.พิษณุโลก สถานีอุตุ นิ ย ม วิ ท ย า อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์ และสถานีอุตุนิยมวิทยา อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์ แสดงดัง Figure 5

5) ข้อมูลปริมาณน้ำฝน (Rainfall Data) เป็นข้อมูลรายวันช่วงปี พ.ศ. 2541-2553 โดยเป็นข้อมูลที่รวบรวมจากกรมชลประทาน 7 สถานี ได้แก่ 180032 180212 180382 360402 390142 700022 และ

700212 และข้อมูลที่รวบรวมจากกรมทรัพยากรน้ำ 2 สถานี ได้แก่ 091401 และ 091603 แสดงดัง

Figure 5

6) ข้อมูลปริมาณน้ำท่า (Observed Runoff Data) เป็นข้อมูลรายเดือนช่วงปี พ.ศ. 2541-2553 โดยเป็นข้อมูลที่รวบรวมจากกรมชลประทานและกรมทรัพยากรน้ำ โดยข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่รวบรวมจากกรมทรัพยากรน้ำ มี 2 สถานี ได้แก่ สถานีวัดน้ำท่าที่บ้านแก่งบัวคำ (091401) และสถานีวัดน้ำท่าที่บ้านโคกผักหวาน (091502) และข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่รวบรวมจากกรมชลประทาน มี 2 สถานี ได้แก่ สถานีวัดน้ำท่าที่บ้านหนองกระเถา (N.36) และสถานีวัดน้ำท่าที่บ้านนาโพธิ์นาจาน (N.59)



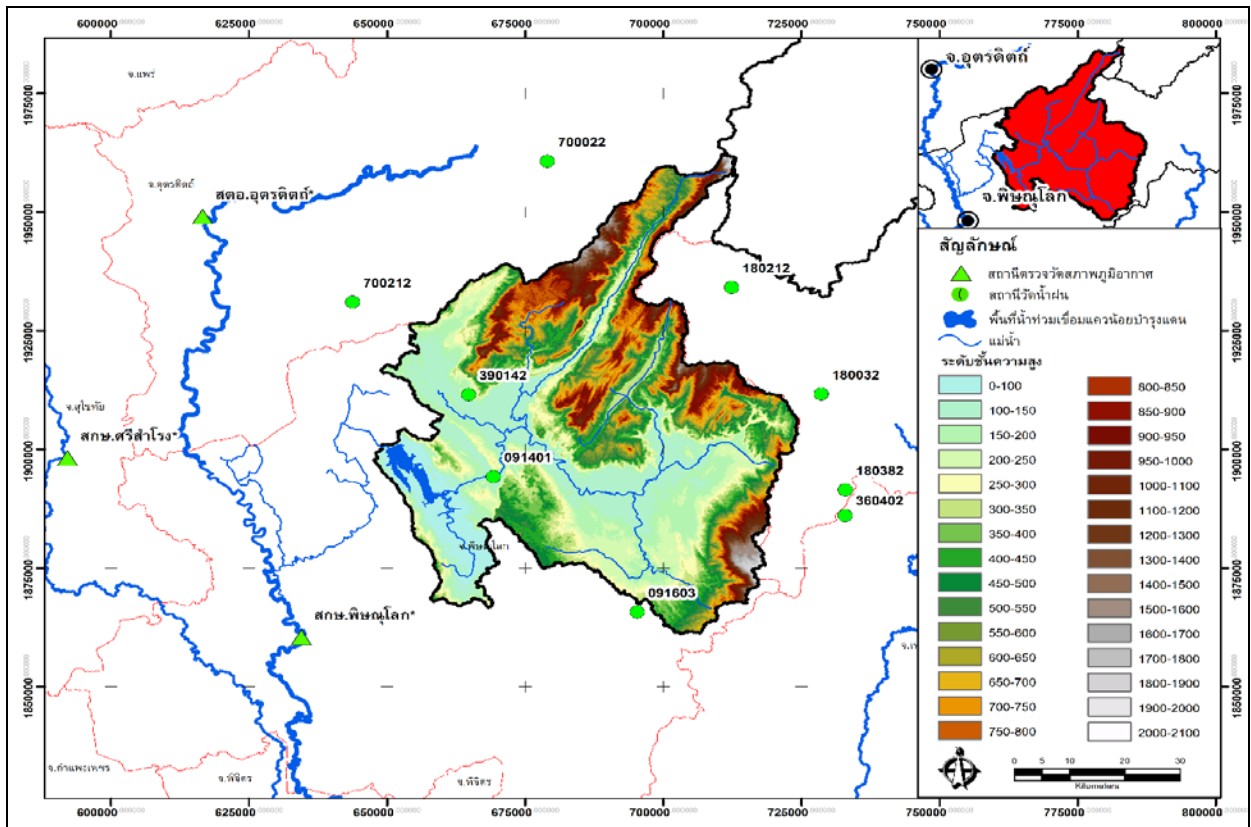


Figure 5 Location of weather stations and rain gauge stations

### การจัดทำแบบจำลอง

การจัดทำแบบจำลองของการวิจัยครั้งนี้ เมื่อนำเข้าข้อมูลพื้นฐาน ได้แก่ แผนที่ระดับความสูงแบบดิจิทัล ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ข้อมูลดิน ข้อมูลสภาพภูมิอากาศและข้อมูลปริมาณน้ำฝนสู่แบบจำลอง SWAT และค่าความลาดชันที่ใช้จัดทำแบบจำลอง ได้แก่ 0-5% 5-10% 10-30% และมากกว่า 30% ซึ่งมีวิธีการกำหนด HRUs ให้แต่ละลุ่มน้ำย่อยมีค่า HRU แบบ Multiple HRUs เพื่อให้เป็นไปตามการใช้ประโยชน์ที่ดิน ชนิดดิน และความลาดชัน ของสภาพพื้นที่ศึกษาให้มากที่สุด และกำหนดสัดส่วนแต่ละประเภท 0:0:0 (การใช้ประโยชน์ที่ดิน : ชนิดดิน : ความลาดชัน)

ในการวิจัยเพื่อศึกษาการประเมินปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนครั้งนี้ ได้คัดเลือกปีเพื่อการจัดทำแบบจำลอง

สำหรับการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองได้แบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ 1) การจัดทำแบบจำลองโดยปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองชุดเดียวทั้งลุ่มน้ำ และ 2) การจัดทำ

แบบจำลองโดยปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองตามแต่ละลุ่มน้ำย่อย ซึ่งเกณฑ์การแบ่งลุ่มน้ำสำหรับการจัดทำแบบจำลองในการวิจัย ผู้วิจัยคำนึงถึงสถานีตรวจวัดที่มีในพื้นที่ศึกษาและตามลุ่มน้ำย่อยเป็นหลัก เพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลที่มีสำหรับการวิจัย และจากข้อมูลปริมาณน้ำท่าสำหรับการเป็นข้อมูลรายเดือน จึงจำเป็นต้องเลือกการคำนวณในแบบจำลองและนำออกเป็นรายเดือน เพื่อสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง ตั้งแต่เดือนเมษายน พ.ศ. 2541 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2553 โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วงปี ได้แก่ ช่วงปีสำหรับใช้ปรับเทียบแบบจำลองคือ ช่วงเดือนเมษายน พ.ศ.

2541 ถึง เดือนมีนาคม พ.ศ.2547 และช่วงปีสำหรับใช้ตรวจพิสูจน์แบบจำลองคือ ช่วงเมษายน พ.ศ.2547 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ.2553 ซึ่งจะใช้ปริมาณน้ำท่าของสถานีวัดน้ำท่าที่บ้านแก่งบัวคำ รหัสสถานี 091401 ที่เป็นสถานีวัดปริมาณน้ำท่าก่อนที่น้ำท่าจะไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน เป็นสถานีวัดน้ำท่าที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

#### **การวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ของแบบจำลอง (Sensitivity Analysis)**

จากงานวิจัยของ Me *et al.*(2015) พบว่า มีพารามิเตอร์ที่สำคัญและมีผลต่อปริมาณน้ำท่ามีทั้งหมด 21 พารามิเตอร์ และจากผลการวิจัยครั้งนี้ยังพบว่า มีพารามิเตอร์อื่นที่มีความสำคัญและมีผลต่อ

ปริมาณน้ำท่าเช่นกันอีก 2 พารามิเตอร์ ได้แก่ CN2 (.mgt) และ Sol\_AWC (.sol) รวมพารามิเตอร์ที่นำมา

วิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของแบบจำลองด้วยโปรแกรม SWAT-CUP ทั้งหมด 23 พารามิเตอร์ดังที่แสดงใน Table 1 ซึ่งในการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ของแบบจำลองด้วยโปรแกรม SWAT-CUP ใช้วิธี SUFI2 ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ แม้จะต้องมีการทำซ้ำที่มากกว่าและมี การเปลี่ยนแปลงช่วงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญด้วยตนเอง (Sittichok, 2016)

**Table 1** Summary of sensitivity analysis SWAT parameters

Parameter	Definition	Unit	Default range
EVRCH.bsn	Reach evaporation adjustment factor	-	0.5–1
SURLAG.bsn	Surface runoff lag coefficient	-	0.05–24
ALPHA_BF.gw	Base flow alpha factor	-	0–1
GW_DELAY.gw	Groundwater delay	day	0–500
GW_REVAP.gw	Groundwater “revap” coefficient	-	0.02–0.2
GW_SPYLD.gw	Special yield of the shallow aquifer	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0–0.4
GWHT.gw	Initial groundwater height	m	0–25
GWQMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	mm	0–5000
RCHRG_DP.gw	Deep aquifer percolation fraction	-	0–1
REVAPMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for “revap” to occur	mm	0–500
CANMX.hru	Maximum canopy storage	mm	0–100
EPCO.hru	Plant uptake compensation factor	-	0–1
ESCO.hru	Soil evaporation compensation factor	-	0–1
HRU_SLP.hru	Average slope steepness	1/mm	0–0.6
LAT_TTIME.hru	Lateral flow travel time	day	0–180
RSDIN.hru	Initial residue cover	Kg/ha	0–10000
SLSOIL.hru	Slope length for lateral subsurface flow	m	0–150
CH_K2.rte	Effective hydraulic conductivity in the main channel alluvium	mm/h	0–500
CH_N2.rte	Manning's <i>N</i> value for the main channel	-	0–0.3
CH_K1.sub	Effective hydraulic conductivity in the tributary channel alluvium	mm/h	0–300
CH_N1.sub	Manning's <i>N</i> value for the tributary channel	-	0.01–30
CN2.mgt	Initial SCS runoff curve number for moisture condition II	-	35–98
SOL_AWC.sol	Available water capacity of the soil layer	mm H <sub>2</sub> O/mm soil	0–1

### การปรับเทียบแบบจำลอง (Calibration) และการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Validation)

การประเมินความแม่นยำของแบบจำลองเป็นการพิจารณาความสอดคล้องกันของค่าจากการจำลอง (Simulation) และค่าสังเกตที่ได้มีการบันทึกไว้หรือค่าที่เกิดขึ้นจริง (Observations) โดยใช้เกณฑ์การประเมินเชิงประสิทธิภาพ (Efficiency Criteria) ได้แก่ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient

$$R^2 = \frac{\left[ \frac{\sum_{i=1}^n [(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})]}{\left[ \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2 \right]^{0.5} \cdot \left[ \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2 \right]^{0.5}} \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2} \quad (4)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (5)$$

เมื่อ  $Q_{obs}$  คือ ค่าปริมาณน้ำท่าจากการวัด  $\bar{Q}_{obs}$  คือ ค่าปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยค่าจากการวัด  $Q_{sim}$  คือ ค่าปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง และ  $\bar{Q}_{sim}$  คือ ค่าปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยค่าจากแบบจำลอง

โดย  $R^2$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1 ถ้าค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1 แสดงว่า แสดงว่ากลุ่มข้อมูลทั้งสองเข้ากันได้มาก ถ้าค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์กันน้อยมากตามนัยของนิยาม

### ผลและวิจารณ์

ผลจากการจัดทำแบบจำลอง SWAT พบว่าแบบจำลองแบ่งลุ่มน้ำย่อยออกเป็น 11 ลุ่มน้ำย่อย มีพื้นที่ลุ่มน้ำรวม 4,156.64 ตร.กม. แสดงดัง Figure 6 และมีจำนวน HRUs เท่ากับ 2,663 HRUs

of Determination,  $R^2$ ) และ Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) ซึ่งเป็นตรรกะที่นิยมใช้ในการบอกค่าความแม่นยำของแบบจำลอง (Model Accuracy) หรือประสิทธิภาพของแบบจำลอง (Model Performance) ในการคาดคะเนค่าที่ต้องการ (วรารุช, 2553) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ (4) และ (5) ดังต่อไปนี้

และค่า NSE จะมีค่าอยู่ระหว่าง  $-\infty$  ถึง 1 ซึ่งค่า NSE = 1 หมายถึง แบบจำลองสามารถคาดคะเนค่าโดยไม่มี ความผิดพลาด (Perfect Fit) หากค่า NSE อยู่ระหว่าง 0.36-0.75 หมายถึง แบบจำลองสามารถคาดคะเนค่าอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ (Nash and Sutcliffe, 1970) ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงใช้และยอมรับแบบจำลอง เมื่อแบบจำลองมีประสิทธิภาพที่  $R^2$  มากกว่า 0.70 และ NSE มากกว่า 0.50

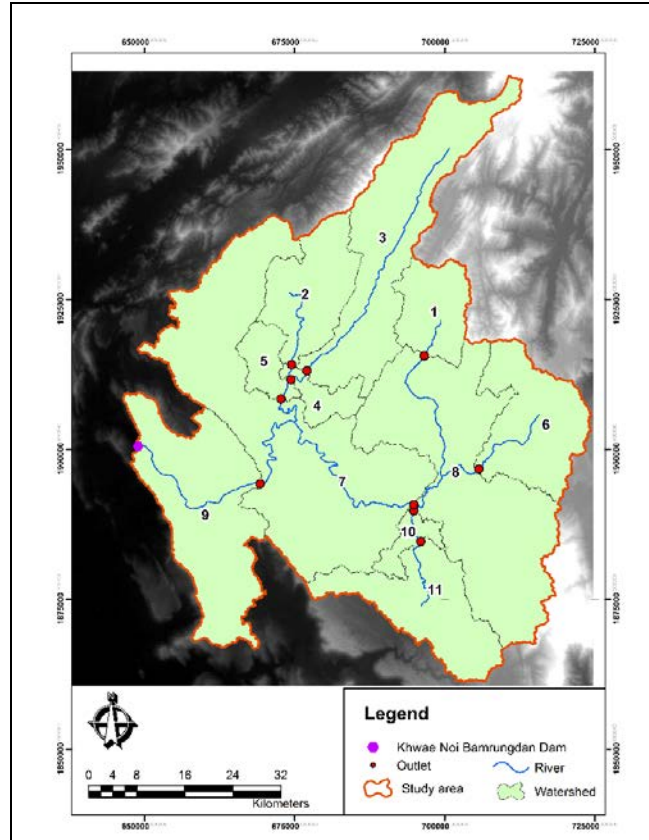


Figure 6 Number of sub-basin from the model

ผลจากการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ของแบบจำลองด้วยโปรแกรม SWAT-CUP ด้วยวิธี SUFI2 พบว่าพารามิเตอร์ที่มีลำดับความสำคัญมากที่สุด 5 ลำดับแรก ได้แก่ CN2.mgt GWQMN.gw CH\_N2.rte HRU\_SLP.hru และ SOL\_AWC.scl ซึ่งพารามิเตอร์กลุ่มนี้จะทำให้ประสิทธิภาพของแบบจำลองดีขึ้นค่อนข้างมาก โดยในการวิจัยครั้งนี้ได้ปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ในการจัดทำแบบจำลองทั้งหมด 12 พารามิเตอร์ ได้แก่ CN2.mgt GWQMN.gw CH\_N2.rte HRU\_SLP.hru SOL\_AWC.scl RCHRG\_DP.gw ALPHA\_BF.gw SURLAG.bsn CH\_K1.sub CH\_K2.rte GWHT.gw และ REVAPMN.gw โดยหลังจากที่ได้ทำการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ของพื้นที่ศึกษาแล้ว พบว่าค่าของประสิทธิภาพของแบบจำลองเพิ่มขึ้นและอยู่ในเกณฑ์เป็นที่น่าพึงพอใจแล้ว ( $R^2 > 0.70$  และ  $NSE > 0.50$ )

จึงไม่ได้มีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์นอกเหนือจาก 12 พารามิเตอร์นี้

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ แบ่งการจัดทำแบบจำลองเพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำของเขื่อนแควน้อยบำรุงแดนออกเป็น 2 วิธี โดยการจัดทำแบบจำลองโดยปรับใช้ค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองและใช้พารามิเตอร์ชุดเดียวทั้งลุ่มน้ำ และการจัดทำแบบจำลองโดยปรับใช้ค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองและใช้พารามิเตอร์ตามแต่ละลุ่มน้ำย่อย ซึ่งมีช่วงค่าของพารามิเตอร์ที่มีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ของพื้นที่ศึกษา แสดงดัง Table 2

**Table 2** Parameter value of model

No.	Parameter Name	Parameter value	
		Case 1	Case 2
1	CN2.mgt	25.1689-74.6948	30.720-92.000
2	HRU_SLP.hru	0.0001-0.7217	0.0086-0.7303
3	SOL_AWC.sol	0.0400-0.2300	0.0500-0.3594
4	CH_K1.sub	0.0000	0.0000-0.2597
5	CH_K2.rte	0.0000	0.0000-0.5000
6	CH_N2.rte	0.0522	0.0140-0.0522
7	RCHRG_DP.gw	0.0823	0.0500-0.0823
8	GWHT.gw	22.5810	1.0000-22.5813
9	GWQMN.gw	1000.0000	1000.0000-1008.7500
10	REVAPMN.gw	285.1250	193.5000-500.0000
11	ALPHA_BF.gw	0.0480	0.0480
12	SURLAG.bsn	4.0000	4.0000

Note : Case 1 used only one set of parameters for the entire basin.

Case 2 used different sets of parameters for each sub-basin.

ดังที่แสดงใน Table 2 พบว่า กลุ่มค่าของชุดพารามิเตอร์ที่ปรับแก้สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ชุดพารามิเตอร์ที่เป็นช่วงค่าทั้ง 2 กรณี มี CN2.mgt HRU\_SLP.hru และ SOL\_AWC.sol เนื่องจากมีค่าของพารามิเตอร์ขึ้นอยู่กับ HRUs ที่ความแตกต่างกันไป ซึ่งในการปรับค่าพารามิเตอร์กลุ่มนี้จะเป็นการคูณค่าคงที่เข้ากับค่าเดิมของพารามิเตอร์ตามแต่ละ HRUs กลุ่มที่ 2 กลุ่มพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่ในกรณีที่ 1 และเป็นช่วงค่าในกรณีที่ 2 เนื่องจากในกรณีที่ 1 ปรับแก้ค่าโดยใช้ค่าเดียวกับทุกกลุ่มน้ำ แต่กรณีที่ 2 ใช้ค่าพารามิเตอร์แต่ละกลุ่มน้ำย่อยแตกต่างกัน และกลุ่มที่ 3 กลุ่มพารามิเตอร์ที่เป็นค่าคงที่ทั้ง 2 กรณี ได้แก่ ALPHA\_BF.gw และ SURLAG.bsn เนื่องจากในกรณีที่ 1 ปรับแก้ค่าโดยใช้ค่าเดียวกับทุกกลุ่มน้ำ แต่ใน

กรณีที่ 2 ที่ใช้ค่าพารามิเตอร์แต่ละกลุ่มน้ำย่อยแตกต่างกันนั้น มีการใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกันทุกกลุ่มน้ำย่อยเช่นกัน

โดยผลการจัดทำแบบจำลองทั้ง 2 กรณีใช้สถานีวัดน้ำท่าที่บ้านแก่งบัวคำ รหัสสถานี 091401 และมีประสิทธิภาพของแบบจำลองดังนี้

1) กรณีที่ 1 การจัดทำแบบจำลองโดยปรับใช้ค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองชุดเดียวทั้งกลุ่มน้ำ เว้นแต่ CN2.mgt HRU\_SLP.hru และ SOL\_AWC.sol ที่จำเป็นต้องมีค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับพื้นที่ ซึ่งผลของการปรับเทียบของแบบจำลองมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.819 และ NSE เท่ากับ 0.616 และผลของการตรวจพิสูจน์ของแบบจำลอง มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.871 และ NSE เท่ากับ 0.535 และมีลักษณะกราฟน้ำท่าแสดงดัง Figure 7

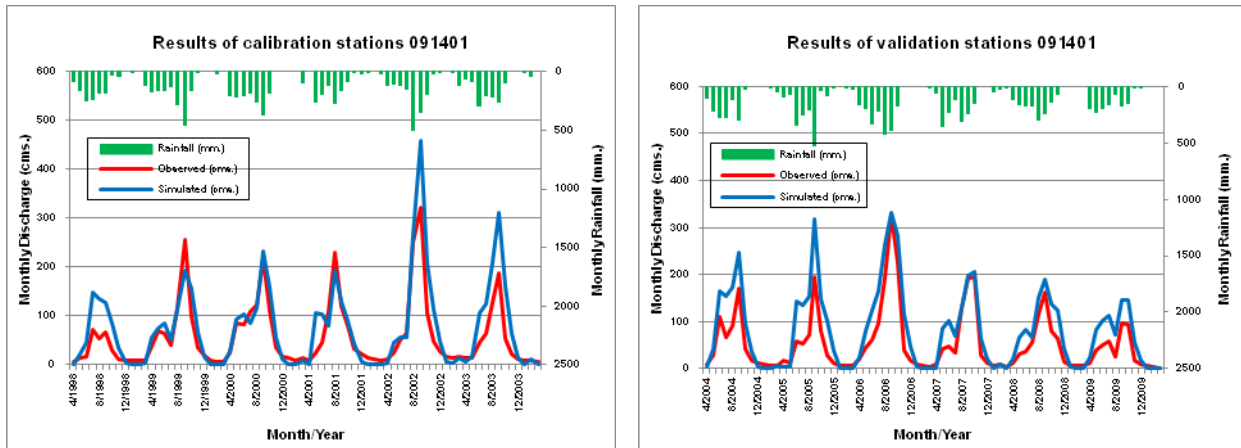


Figure 7 Results of calibrated and validated station 091401 (Case 1)

2) กรณีที่ 2 การจัดทำแบบจำลองโดยปรับใช้ค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองตามแต่ละลุ่มน้ำย่อย เว้นแต่ ALPHA\_BF.gw และ SURLAG.bsn ที่มีค่าของพารามิเตอร์ที่เท่ากันทุกลุ่มน้ำย่อย ซึ่งผลของการปรับเทียบของแบบจำลอง มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.823 และ NSE เท่ากับ 0.763 และผลของการตรวจพิสูจน์ของแบบจำลอง มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.928 และ

NSE เท่ากับ 0.866 และเนื่องจากวิธีนี้มีสถานีวัดน้ำท่าอื่นนอกจากสถานีวัดน้ำท่าที่บ้านแก่งบัวคำ (091401) ด้วยได้แก่ สถานี N.36 สถานี N.59 สถานี 091502 และมีผลการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองดังที่แสดงใน Table 3 และมีลักษณะของผลเป็นกราฟน้ำท่าแสดงดัง Figure 8-11

Table 3 Conclusion of model efficiencies

Period	Case 1		Case 2							
	091401		N.59		N.36		091502		091401	
	$R^2$	NSE	$R^2$	NSE	$R^2$	NSE	$R^2$	NSE	$R^2$	NSE
4/1998 - 3/2004	0.819	0.616	0.836	0.834	0.723	0.696	0.821	0.817	0.832	0.763
4/2004 - 3/2010	0.871	0.535	0.773	0.698	0.864	0.751	0.808	0.628	0.928	0.886

Note : Case 1 used only one set of parameters for the entire basin.

Case 2 used different sets of parameters for each sub-basin.

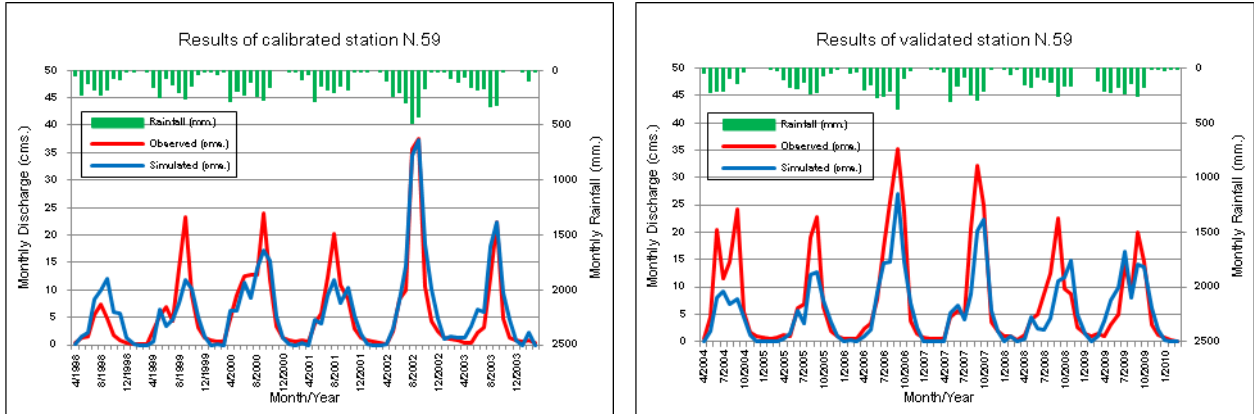


Figure 8 Results of calibrated and validated station N.59 (Case 2)

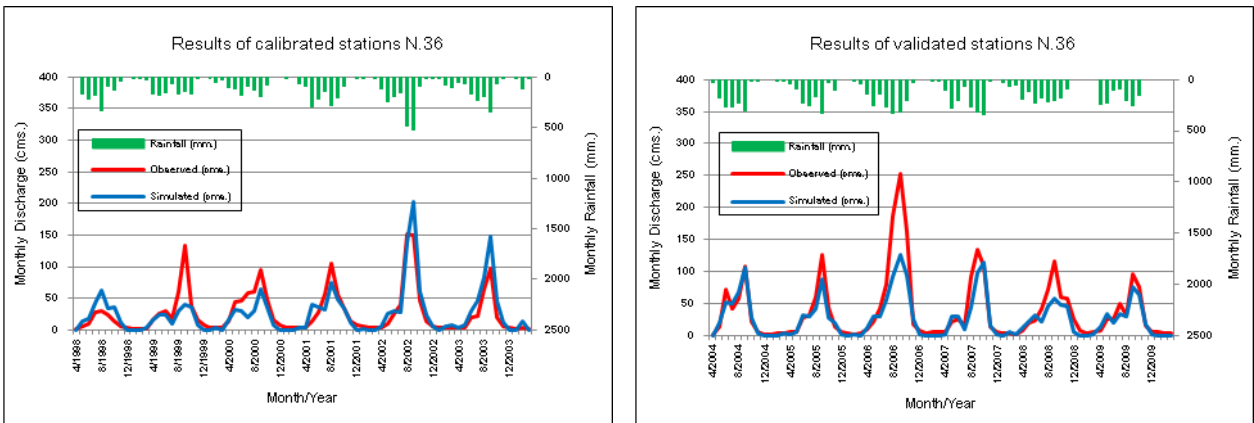


Figure 9 Results of calibrated and validated station N.36 (Case 2)

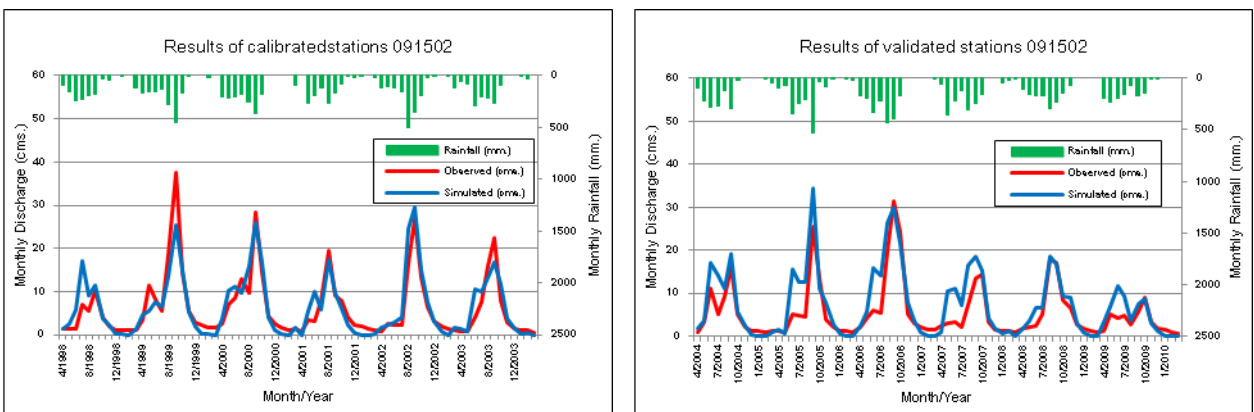


Figure 10 Results of calibration and validation station 091502 (Case 2)



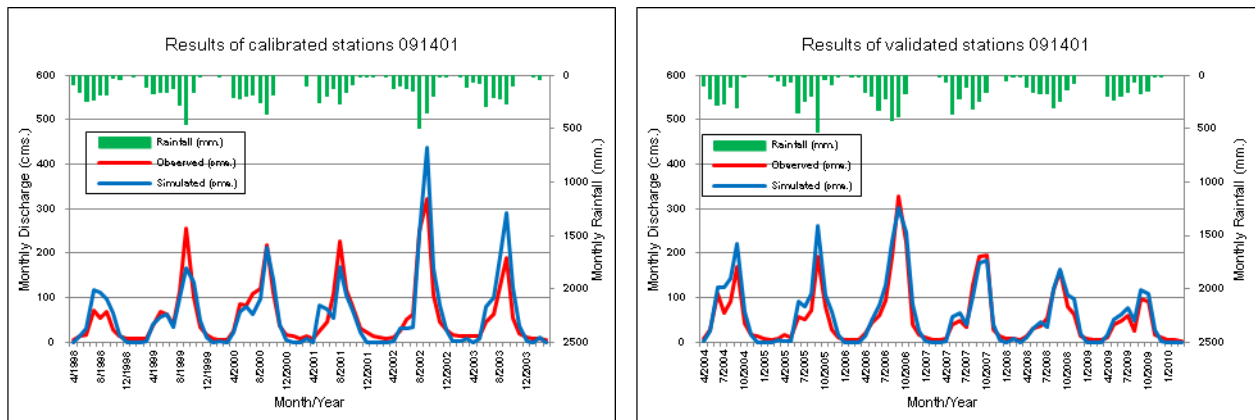


Figure 11 Results of calibrated and validated station 091401 (Case 2)

โดยประสิทธิภาพของแบบจำลองทั้ง 2 กรณี อยู่ในเกณฑ์เป็นที่น่าพึงพอใจ (มีค่า  $R^2$  มากกว่า 0.70 และมีค่า NSE มากกว่า 0.50) แต่ให้ค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองที่แตกต่างกัน ซึ่งกรณีที่ 1 มีการปรับใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากันทั้งหมด ซึ่งค่าตัวแทนของพารามิเตอร์เป็นการเฉลี่ยค่าพารามิเตอร์ทั้งลุ่มน้ำ และกรณีที่ 2 มีการปรับใช้ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันตามลุ่มน้ำย่อย โดยผลของประสิทธิภาพของแบบจำลอง อาจมีผลเนื่องมาจากคุณลักษณะของลุ่มน้ำย่อยของพื้นที่ศึกษาที่แตกต่างกัน เช่น พารามิเตอร์ปรับแก้ค่าระดับความสูงต่ำพื้นที่ ซึ่งจากแผนที่ระดับความสูงแบบดิจิทัลพบว่าในพื้นที่ศึกษาตอนบนค่อนข้างเป็นภูเขาสูง แต่ตอนกลางของพื้นที่เป็นพื้นที่ราบลุ่ม และหากใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เป็นตัวแทนของลุ่มน้ำย่อยทั้ง 2 พื้นที่ตามกรณีที่ 1 อาจส่งผลให้แบบจำลองไม่สะท้อนถึงคุณลักษณะของพื้นที่ทั้ง 2 จึงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของกรณีที่ 2 ที่มีการปรับใช้ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันตามลุ่มน้ำย่อย มากกว่ากรณีที่ 1 โดยกรณีที่ 1 มีการปรับใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากันทั้งหมด อาจจะไม่เหมาะสมกับพื้นที่ศึกษาขนาดเล็กและมีคุณลักษณะของลุ่มน้ำย่อยของพื้นที่ที่ไม่แตกต่างกันมากนักและมีเวลาจำกัดสำหรับการทำวิจัย

### สรุป

การจัดทำแบบจำลองในพื้นที่ศึกษาที่มีลักษณะของพื้นที่ที่แตกต่างกัน พบว่าในกรณี

ที่ 2 ที่ปรับใช้ค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองตามแต่ละลุ่มน้ำย่อยให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่ากรณีที่ 1 ที่ปรับใช้พารามิเตอร์ในแบบจำลองชุดเดียวกันทั้งลุ่มน้ำ ซึ่งมีผลของการเปรียบเทียบ (ช่วงเดือนเมษายน พ.ศ.2541 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ.2547) และการตรวจพิสูจน์ (ช่วงเมษายน พ.ศ. 2547 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2553) โดยกรณีที่ 1 มีผลของการเปรียบเทียบของแบบจำลอง มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.819 และ NSE เท่ากับ 0.616 และผลของการตรวจพิสูจน์ของแบบจำลอง มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.871 และ NSE เท่ากับ 0.535 และกรณีที่ 2 มีผลของการเปรียบเทียบของแบบจำลอง มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.832 และ NSE เท่ากับ 0.763 และผลของการตรวจพิสูจน์ของแบบจำลอง มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.928 และ NSE เท่ากับ 0.866 โดยผลจากการศึกษานี้สามารถเป็นแนวทางในการจัดทำแบบจำลองและการเปรียบเทียบแบบจำลอง SWAT เพื่อจะใช้เป็นเครื่องมือในการวางแผนการบริหารจัดการน้ำของอ่างเก็บน้ำแควน้อยบำรุงแดนทั้งในปัจจุบันและในอนาคต

### คำขอบคุณ

ทางผู้คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ กรมชลประทาน กรมทรัพยากรน้ำ และกรมพัฒนา

ที่ดิน ที่เอื้อเพื่อข้อมูลให้แก่คณะผู้วิจัยในการ  
ทำวิจัยในครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- กรมชลประทาน. 2556. โครงการศึกษาพร้อมติดตั้ง  
อุปกรณ์ตรวจวัดบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ เพื่อ  
การบริหารจัดการน้ำเขื่อนแควน้อยบำรุง  
แดน (รายงานฉบับสมบูรณ์). ความร่วมมือ  
ทางวิชาการระหว่างกรมชลประทานและ  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์. 2558. การประเมินปริมาณ  
น้ำท่าไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแควน้อยบำรุงแดน  
โดยใช้ดัชนีความชุ่มชื้นในดิน. ใน การ  
ประชุมวิชาการวิศวกรรมแหล่งน้ำแห่งชาติ  
ครั้งที่ 6, 5-7 สิงหาคม 2558 โรงแรมเซ็นทา  
ราไฮเทลแอนด์คอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัด  
อุดรธานี.
- ฤทธิไกร พงษ์จีนะ, สมฤทัย ทะสดวง และ สุวัฒนา  
จิต ต ล ต อ ก ร .2557.ผล ของ การ การ  
เป ลี ย น แ ป ล ง ส ภ า พ  
อุทกวิทยาและกิจกรรมของมนุษย์ต่อ  
คุณลักษณะของน้ำท่าในลุ่มน้ำแม่วังก. ใน  
การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ  
ครั้งที่ 19, โรงแรมพูลแมนขอนแก่นราชาอ  
คิด จังหวัดขอนแก่น.
- วราวุธ วุฒิวิชัย. 2553. การวิเคราะห์ความแม่นยำ  
ของแบบจำลองโดยใช้ Nash-Sutcliffe  
Efficiency และ  $R^2$ . วันชชาติ. สมาคมนิสิต  
เก่าวิศวกรรมชลประทาน ในพระบรม  
ราชูปถัมภ์. 4 มกราคม 2553: 1-10.
- โอพาร เวศอุไร.2548. ผลกระทบของการ  
เปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินต่อปริมาณน้ำท่าใน  
พื้นที่ลุ่มน้ำน่านตอนบนโดยใช้แบบจำลอง  
ทางอุทกวิทยา SWAT. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
โท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Green, W.H. and G. Ampt. 1911. Studies of soil  
physics, part I – the flow of air and water  
through soils. J. Ag. Sci. 4:1-24.
- Me, W.,J.M. Abell, and D.P. Hamilton. 2015.  
Effects of hydrologic conditions on SWAT  
model performance and parameter  
sensitivity for a small, mixed land use  
catchment in New Zealand. Hydrol. Earth  
Syst. Sci. 19: 4127–4147.
- Nash, J.E. and J.E. Sutcliffe. 1970. River flow  
forecasting through conceptual models,  
Part 1—A discussion of principles. J.  
Hydrol. 10: 282-290.
- Neitsch, S.L.,J.G. Arnold, J.R. Kiniry, R.  
Srinivasan and J.R. Williams. 2011. Soil  
and Water Assessment Tool Theoretical  
Documentation Version 2009. Texas  
Water Resources Institute Technical  
Report No. 406, Texas A&M University  
System College Station, Texas, USA.
- Phomcha, P.,P. Wirojanagud, T. Vangpaisal and  
T. Thaveevouthti. 2012. Modeling the  
impacts of alternative soil conservation  
practices for an agricultural watershed  
with the SWAT model. Procedia  
Engineering 32: 1205 – 1213.
- Sittichok, K. 2016. Improving Seasonal Rainfall  
and Streamflow Forecasting in the Sahel  
Region via Better Predictor Selection,  
Uncertainty Quantification and Forecast  
Economic Value Assessment. University  
of Ottawa. Ph.D. thesis. Canada.

Tracy, J.B. and N.M. Scott. 2013. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. J. Hydrol. 486: 100–111.

USDA Soil Conservation Service National Engineering Handbook. 1972. Hydrology Section 4, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. Chapters 4–10.

**Received 1 June 2017**

**Accepted 29 December 2017**