NUEJ
Naresuan University
Engineering Journal

ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและปริมาณฝนที่ความถี่ต่างๆ ต่ออัตราการไหลสูงสุดและพื้นที่น้ำท่วมในเขตลุ่มน้ำพองตอนล่าง

Impacts of Land Use and Rainfall Frequency Changes on Peak Discharges and Inundation Areas in the Lower Nam Phong River Basin

ชาติชาย ปรือทอง[1] กิตติเวช ขันติยวิชัย[1*] วินัย ศรีอำพร[1] และฉัตรชัย โชติษฐยางกูร[3]

Chatchai Pruethong[1], Kittiwet Kuntiyawichai[1*], Winai Sri-Amporn[1], and Chatchai Jothityangkoon[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

[1] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[2] School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

[*] Corresponding author E-mail: kkitti@kku.ac.th

(Received: November 1, 2018, Revised: December 24, 2018, Accepted: April 10, 2019)

บทคัดย่อ

การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและปริมาณฝนที่ความถี่ต่างๆ ต่ออัตราการไหลสูงสุดและพื้นที่น้ำท่วมในเขตลุ่มน้ำพองตอนล่าง ใช้แบบจำลอง HEC-HMS สำหรับจำลองสภาพทางอุทกวิทยาของลุ่มน้ำพองตอนล่าง โดยใช้ข้อมูลอัตราไหลรายวันปี พ.ศ. 2548 – 2554 ของสถานี E.22B (บ้านท่าเม่า อ.น้ำพอง จ.ขอนแก่น) สำหรับสอบเทียบแบบจำลอง (R^2 = 0.84, Nash-Sutcliffe Efficiency, E_{NS} = 0.82) และข้อมูลปี พ.ศ. 2554 – 2560 สำหรับทดสอบแบบจำลอง (R^2 = 0.84, E_{NS} = 0.83) และใช้แบบจำลอง HEC-RAS สำหรับจำลองสภาพการไหลในลำน้ำและพื้นที่ราบริมฝั่งลำน้ำ โดยใช้ค่าระดับน้ำรายวัน ณ สถานี E.22B ปี พ.ศ. 2548 – 2554 และปี พ.ศ. 2554 – 2560 สำหรับสอบเทียบ (R^2 = 0.91, E_{NS} = 0.75) และทดสอบแบบจำลอง HEC-RAS (R^2 = 0.86, E_{NS} = 0.82) ตามลำดับ ในส่วนของการประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในปี พ.ศ. 2558 และในอนาคต (พ.ศ. 2563, 2568, 2583, 2608, 2658) ควบคู่กับปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำ 5, 10, 25, 50 และ 100 ปี พบว่า อัตราการไหลสูงสุดในอนาคต ณ จุดบรรจบของลำน้ำพองกับลำน้ำชี จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 751.1 ลบ.ม./วินาที (กรณีปริมาณฝนปี พ.ศ. 2558 และการใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2563) เป็น 1,159.0 ลบ.ม./วินาที (กรณีปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำ 100 ปี และการใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2658) ในขณะที่พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยในอนาคตของลุ่มน้ำพองตอนล่างจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน จาก 100.04 ตร.กม. (กรณีปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำ 5 ปี และการใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2558) เป็น 184.26 ตร.กม. (กรณีปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำ 100 ปี และการใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2658) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นข้อมูลสำหรับการจัดการปัญหาน้ำท่วม การเตือนภัย รวมถึงการลดความเสี่ยงและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

คำสำคัญ: พื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วม, แบบจำลอง HEC-HMS, แบบจำลอง HEC-RAS, คาบการเกิดซ้ำ, พื้นที่น้ำท่วม

NUEJ
Naresuan University
Engineering Journal

Abstract

The study on the impacts of land use and rainfall changes on peak discharges and inundation areas in the Lower Nam Phong River Basin was undertaken by applying the HEC-HMS model for simulating the hydrological processes in the lower Nam Phong River Basin. The observed daily discharges at E.22B gauging station during the periods of 2005 – 2011 and 2011 – 2017 were used for model calibration (R^2 = 0.84, Nash-Sutcliffe Efficiency, E_{NS} = 0.82) and model validation (R^2 = 0.84, E_{NS} = 0.83), respectively. In view of hydraulic modelling of river and floodplain systems, the HEC-RAS model was applied by using the observed daily water levels at E.22B gauging station during the years 2005 – 2011 and 2011 – 2017 for model calibration (R^2 = 0.91, E_{NS} = 0.75) and model validation (R^2 = 0.86, E_{NS} = 0.82), respectively. Regarding the sequential application of HEC-HMS and HEC-RAS models for assessing the impacts of land use change (from year 2015 to 2020, 2025, 2040, 2065, and 2115), and the rainfall under 5, 10, 25, 50, and 100 year-return periods, it was found that the future peak discharges at the Nam Phong-Chi confluence will be increased from 751.1 m^3/s (under the 2015 rainfall event and the 2020 land use coverage) to 1,159.0 m^3/s (under the 100 year-return period of rainfall event and the 2115 land use coverage). The future flood risk areas in the Lower Nam Phong River Basin will also be increased from 100.04 km^2 (under the 5 year-return period of rainfall event and the 2015 land use coverage) to 184.26 km^2 (under the 100 year-return period of rainfall event and the 2115 land use coverage). Finally, the main findings from this study will provide important information for dealing with floods, warning purpose, and minimizing possible future flood risks and damages.

Keywords: Flood risk area, HEC-HMS model, HEC-RAS model, Return period, Inundation area

1. บทนำ

ภายใต้แนวความคิดที่ว่าการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำท่านั้น จะต้องอาศัยหลักฐานทางวิชาการเพื่อสนับสนุนแนวความคิดดังกล่าว อีกทั้งภัยพิบัติที่เกี่ยวข้องกับน้ำในปัจจุบันที่ยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ ประกอบกับลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว ยิ่งก่อให้เกิดปัญหาที่เกี่ยวข้องกับน้ำตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และส่งผลให้เกิดความเสียหายทั้งทางด้านเศรษฐกิจและทรัพย์สินเป็นอย่างมาก

ทั้งนี้ แนวความคิดที่กล่าวมาข้างต้นยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ [1] ซึ่งอาศัยแบบจำลองทางอุทกวิทยา H08 ชุดข้อมูลผลการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศภายใต้ CMIP5 ในช่วงปี ค.ศ. 2022 – 2031 และแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน CLUE สำหรับประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและสภาพภูมิอากาศต่ออัตราการไหลในลำน้ำในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำลำชี ซึ่งเป็นลุ่มน้ำสาขาของลุ่มน้ำมูล โดยพบว่าอัตราการไหลจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนทั้งในอดีต (ค.ศ. 1986 – 1995) และในอนาคต (ค.ศ. 2022 – 2031) ในขณะที่อัตราการไหลในเขตพื้นที่ป่าไม้จะต่ำกว่าพื้นที่เกษตรกรรม เนื่องจากความแตกต่างของความลึกของดิน อัตราการไหลใต้ผิวดิน รวมถึงการคายระเหยของพืช ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออัตราการไหลของน้ำท่า นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจะส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลในปัจจุบันและอนาคตน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ในขณะที่ผลกระทบจะตรงกันข้ามในกรณีของอดีตจนถึงเกือบปัจจุบัน

ในขณะที่การศึกษาของ [2] ซึ่งอาศัยแบบจำลอง CA-Markov สำหรับการคาดการณ์การใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคต ควบคู่กับแบบจำลอง Soil and Water Assessment Tool (SWAT) ในการวิเคราะห์ผลกระทบทางอุทกวิทยาที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน ในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำ Andassa ประเทศ Ethiopia ในช่วงปี ค.ศ. 1985 – 2015 ปี ค.ศ. 2030 และ 2045 ซึ่งพบว่า การขยายตัวของพื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่เมือง รวมถึงการตัดไม้ทำลายป่า ไม้พุ่ม ทุ่งหญ้า ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน (ค.ศ. 1985 – 2015) จะส่งผลให้

ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีเพิ่มสูงขึ้น 2.2% อัตราการไหลในช่วงฤดูน้ำหลากเพิ่มขึ้น 4.6% การไหลหลากบนผิวดินเพิ่มขึ้น 9.3% ตลอดจนผลผลิตน้ำท่าเพิ่มขึ้น 2.4% ในทางตรงข้าม อัตราการไหลในช่วงฤดูแล้งจะลดลง 2.8% ปริมาณน้ำหลากจากลำน้ำสาขาลดลง 5.7% การไหลของน้ำใต้ดินลดลง 7.8% และการคายระเหยลดลง 0.3% ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในปี ค.ศ. 2030 และ 2045 จะส่งผลให้เกิดการเพิ่มสูงขึ้นของปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปี อัตราการไหลในช่วงฤดูน้ำหลาก การไหลหลากบนผิวดิน รวมถึงผลผลิตน้ำท่า ในขณะที่อัตราการไหลในช่วงฤดูแล้ง ปริมาณน้ำหลากจากลำน้ำสาขา การไหลของน้ำใต้ดิน และการคายระเหยมีแนวโน้มที่จะลดลง นอกจากนี้ การศึกษาของ [3] และ [4] เป็นต้น ยังได้บทสรุปของการศึกษาออกมาในลักษณะเดียวกันคือ การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและสภาพภูมิอากาศจะกระทบต่อลักษณะทางอุทกวิทยา ซึ่งส่งผลต่อผลผลิตและอัตราการไหลของน้ำท่า การขาดแคลนน้ำ และลักษณะการเกิดอุทกภัย

ในแง่ของพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งจังหวัดขอนแก่น ในปี พ.ศ. 2560 ซึ่งได้รับผลกระทบจากปัญหาอุทกภัยอย่างรุนแรง อันเนื่องมาจากปริมาณฝนที่ตกหนักอย่างต่อเนื่องในพื้นที่จำนวนมากในช่วงระหว่างเดือนกรกฎาคม – ตุลาคม พ.ศ. 2560 ที่ผ่านมา จากข้อมูลของ [5] พบว่า ปริมาณฝนสูงสุดที่ตกในเขตจังหวัดขอนแก่นในรอบ 24 ชั่วโมง คือ 108.5 มิลลิเมตร ซึ่งเกิดขึ้นในวันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ. 2560 และส่งผลให้มีปริมาณน้ำสะสมไหลเข้าแหล่งกักเก็บน้ำ โดยเฉพาะเขื่อนอุบลรัตน์ (ตั้งอยู่ตำบลเขื่อนอุบลรัตน์ อำเภออุบลรัตน์ จังหวัดขอนแก่น มีลักษณะเป็นเขื่อนหินทิ้งแกนดินเหนียว โดยเป็นเขื่อนอเนกประสงค์เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า การชลประทาน การบรรเทาอุทกภัย และการประมง) ซึ่งถือได้ว่ามีปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนมากที่สุดในรอบ 50 ปี เกินความจุเก็บกักและไม่สามารถรองรับน้ำได้อีก ทำให้ต้องมีการเร่งระบายน้ำออกจากเขื่อนเพื่อรักษาเสถียรภาพของเขื่อน และเป็นเหตุให้พื้นที่ที่รับน้ำต่อจากเขื่อนอุบลรัตน์ได้รับความเดือดร้อนอันเนื่องมาจากปริมาณน้ำในลำน้ำพองที่เอ่อล้นตลิ่งเข้าท่วมพื้นที่การเกษตรและที่อยู่อาศัยบริเวณ 2 ฝั่งของลำน้ำพอง [6 และ 7] ในขณะที่ [8] รายงานตรงกันว่าปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนอุบลรัตน์ตลอดทั้งปี พ.ศ. 2560 มีปริมาณสูงถึง 5,606 ล้าน ลบ.ม. (เดือนตุลาคมมีปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างฯ สูงสุดอยู่ที่ 2,229 ล้าน ลบ.ม. โดยวันที่ 8 ตุลาคม มีปริมาณน้ำไหลเข้าสูงสุด 141 ล้าน ลบ.ม.) ซึ่งสูงเป็นลำดับที่ 3 รองจากปี พ.ศ. 2521 (5,887 ล้าน ลบ.ม.) และปี พ.ศ. 2523 (5,755 ล้าน ลบ.ม.) ในขณะที่ความจุของอ่างฯ อยู่ที่ 2,431 ล้าน ลบ.ม. จึงส่งผลให้ต้องมีการเพิ่มการระบายน้ำออกจากอ่างฯ รวมตลอดทั้งปี พ.ศ. 2560 อยู่ที่ 3,750 ล้าน ลบ.ม. และก่อให้เกิดสภาพน้ำท่วมพื้นที่ริมฝั่งของลำน้ำพอง (**หมายเหตุ:** ลำน้ำพองสามารถรองรับน้ำได้สูงสุดอยู่ที่ 38 ล้าน ลบ.ม./วัน) นอกจากนี้ยังพบว่าเกือบทุกปีหลายพื้นที่ยังคงประสบปัญหาจากภัยพิบัติที่เกี่ยวข้องกับน้ำและไม่สามารถแก้ไขได้ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพื่อหาแนวทางแก้ไขและรับมือกับภัยพิบัติที่เกี่ยวข้องกับน้ำที่อาจจะเกิดขึ้น โดยเฉพาะในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่าง ซึ่งตั้งอยู่ท้ายเขื่อนอุบลรัตน์ในเขตพื้นที่จังหวัดขอนแก่น อุดรธานี และมหาสารคาม และประสบปัญหาอุทกภัยอยู่เป็นประจำ ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 2,386 ตารางกิโลเมตร โดยมีแม่น้ำพองเป็นแม่น้ำสายหลัก [9] และมีขอบเขตและตำแหน่งของสถานีวัดน้ำฝนและน้ำท่าแสดงได้ดังรูปที่ 1 (**หมายเหตุ:** วงกลมสีฟ้าชี้ให้เห็นถึงบริเวณจุดบรรจบระหว่างแม่น้ำพองกับแม่น้ำชี)

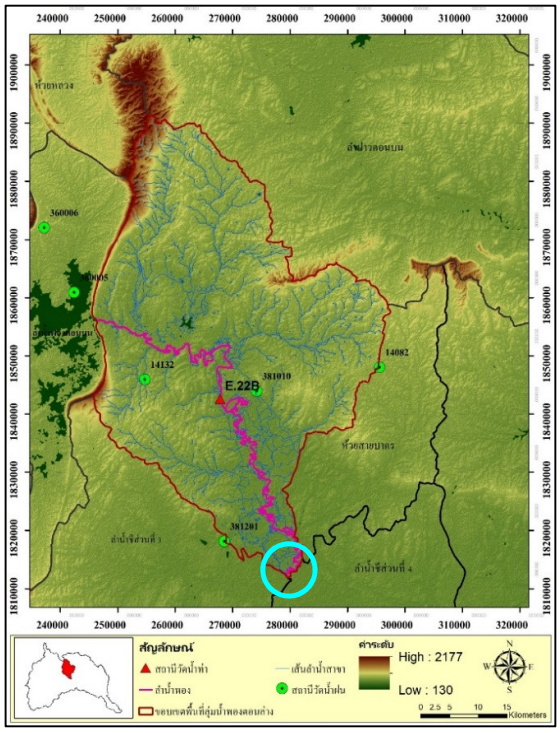
โดยในการศึกษานี้ จะเป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยา HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) สำหรับการจำลองสภาพทางอุทกวิทยาของลุ่มน้ำพองตอนล่าง โดยจะพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน รวมถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำต่างๆ และนำผลการจำลองสภาพทางอุทกวิทยาที่ได้ไปใช้ในการจำลองสภาพการไหลหลากของน้ำในลำน้ำและพื้นที่ราบริมฝั่งลำน้ำด้วยแบบจำลองทางชลศาสตร์ HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System) สำหรับการจำลองสภาพการท่วมนอง ซึ่งจะเป็นข้อมูลสำคัญที่ช่วยในการตัดสินใจ วางแผนและแก้ไขปัญหาน้ำท่วม รวมถึงการคาดการณ์ขนาดของพื้นที่น้ำท่วมสำหรับการเตือนภัยแก่ประชาชนที่อาจได้รับผลกระทบจากน้ำท่วมเพื่อลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต

2. ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

2.1 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาจะพิจารณาพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่าง ซึ่งตั้งอยู่ท้ายเขื่อนอุบลรัตน์ในเขตจังหวัดขอนแก่น อุดรธานี และ

มหาสารคาม ครอบคลุมพื้นที่ 2,386 ตารางกิโลเมตร โดยทางทิศเหนือมีอาณาเขตติดกับลุ่มน้ำห้วยหลวงและลุ่มน้ำลำปาวตอนบน ทิศใต้ติดกับลุ่มน้ำชีส่วนที่ 3 ทิศตะวันออกติดกับลุ่มน้ำห้วยสายบาตร และทิศตะวันตกติดกับลุ่มน้ำพองตอนบน ทั้งนี้จากข้อมูลของ [9] สภาพภูมิประเทศของลุ่มน้ำพองตอนล่างส่วนใหญ่จะเป็นลูกคลื่นลอนลาด มีเทือกเขาสูงบริเวณเขาสวนกวางและภูเม็ง มีความสูงประมาณ 300 เมตรเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง (ม.รทก.) และ 500 ม.รทก. ตามลำดับ และต่ำสุดบริเวณฝายคุยเชือก อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม ความสูงประมาณ 150 ม.รทก. โดยมีปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีประมาณ 1,237.55 มม. (สูงสุดในเดือนกันยายน 224.85 มม. และต่ำสุดในเดือนมกราคม 2.07 มม.) ในขณะที่ปริมาณน้ำท่าสะสมทั้งปีจะอยู่ที่ 1,594.9 ล้าน ลบ.ม. (สูงสุดในเดือนตุลาคม 366.0 ล้าน ลบ.ม. และต่ำสุดในเดือนกุมภาพันธ์ 34.5 ล้าน ลบ.ม.) ในแง่ของจำนวนประชากรในพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่าง พบว่ามีประมาณ 407,730 คน (ข้อมูล ปี พ.ศ. 2551) ในขณะเดียวกัน ขอบเขตของพื้นที่ศึกษา เครือข่ายลำน้ำ รวมถึงตำแหน่งของสถานีวัดน้ำฝนและน้ำท่า สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขอบเขตของลุ่มน้ำพองตอนล่าง [10]

2.2 ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและอุทกวิทยา

การศึกษานี้จะใช้ข้อมูลฝนรายวันในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2548 – 2560 ที่รวบรวมจากสถานีตรวจอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาจำนวน 6 สถานี ได้แก่ สถานี 14132 อำเภออุบลรัตน์ สถานี 14082 อำเภอกระนวน สถานี 381010 อำเภอน้ำพอง สถานี 381201 อำเภอเมืองขอนแก่น สถานี 360005 อำเภอโนนสัง และสถานี 360006 อำเภอโนนสัง (นิคมสร้างตนเอง) สำหรับเป็นข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง HEC-HMS ส่วนข้อมูลอัตราการไหลรายวันจะใช้ข้อมูลในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2548 – 2560 สำหรับสอบเทียบและทดสอบแบบจำลอง HEC-HMS และข้อมูลระดับน้ำรายวันจะใช้ข้อมูลในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2548 – 2560 ที่ตรวจวัด ณ สถานีวัดน้ำท่าของกรมชลประทาน E.22B ซึ่งตั้งอยู่ที่บ้านท่าเม่า อำเภอน้ำพอง จังหวัดขอนแก่น สำหรับสอบเทียบและทดสอบแบบจำลอง HEC-RAS

2.3 ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน

ในการศึกษานี้จะใช้ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ปี พ.ศ. 2553 และ พ.ศ. 2558 ของกรมพัฒนาที่ดิน ซึ่งได้มีการจำแนกพื้นที่ออกเป็น 5 ประเภทหลักๆ ได้แก่ พื้นที่เกษตรกรรม (Agricultural land) พื้นที่ป่าไม้ (Forest land) พื้นที่อื่นๆ (Miscellaneous land) พื้นที่เมือง (Urban land) และพื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetland) สำหรับเป็นข้อมูลพื้นฐานในการทำนายลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคต (พ.ศ. 2563, 2568, 2583, 2608, 2658)

3. วิธีการศึกษา

3.1 การเตรียมข้อมูลพื้นฐาน

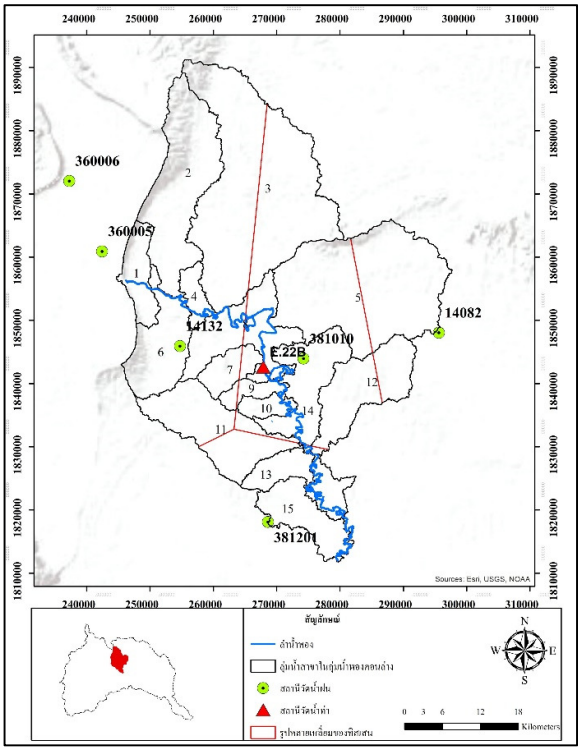
การเตรียมข้อมูลพื้นฐานจะแยกกล่าวเป็นข้อๆ ดังนี้

3.1.1 การเตรียมข้อมูลทางกายภาพของลุ่มน้ำย่อย (โดยการศึกษานี้ได้แบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยออกเป็น 15 ลุ่มน้ำย่อย ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2) ซึ่งข้อมูลทางกายภาพดังกล่าวจะอยู่ในรูปของข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) เช่น ขอบเขตลุ่มน้ำหลักและลุ่มน้ำย่อย จุดน้ำออก (Outlet) ของลุ่มน้ำ เป็นต้น สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลอง HEC-HMS และแบบจำลอง HEC-RAS

3.1.2 การเตรียมข้อมูลฝนรายวัน ซึ่งจะใช้ข้อมูลฝนรายวันที่รวบรวมจากสถานีตรวจอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาจำนวน 6 สถานี สำหรับนำมาคำนวณหาปริมาณฝนเฉลี่ยรายวันที่ตกลงในพื้นที่โดยวิธีของทิสเสน (Thiessen method) ดังแสดงรายละเอียดในสมการที่ 1 และรูปที่ 2 ซึ่งจะเป็นวิธีที่ให้ค่าน้ำหนักของข้อมูลฝนของแต่ละสถานีตามสัดส่วนของพื้นที่ที่อยู่ล้อมรอบสถานีนั้นๆ โดยที่ค่าน้ำหนักจะหาได้จากสัดส่วนของพื้นที่ย่อยที่ล้อมรอบแต่ละสถานีต่อพื้นที่ทั้งหมด [11]

$$\overline{P} = \frac{1}{A}\sum_{i=1}^{n} P_i A_i \qquad (1)$$

โดยที่ $\overline{P}$ คือ ปริมาณฝนเฉลี่ย
A คือ พื้นที่ทั้งหมด
P_i คือ ปริมาณฝนของแต่ละสถานี
A_i คือ พื้นที่ของรูปหลายเหลี่ยมของแต่ละสถานี



รูปที่ 2 ขอบเขตลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำพองตอนล่าง และรูปหลายเหลี่ยมของทิสเสน (จำนวน 4 รูป หรือ 4 พื้นที่ ครอบคลุมสถานีวัดน้ำฝนจำนวน 4 สถานี)

3.1.3 การกำหนดหมายเลขโค้งน้ำท่า (Curve Number, CN) ของแต่ละลุ่มน้ำย่อย ซึ่งจะเป็นตัวเลขที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 100 ที่แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของพื้นที่ลุ่มน้ำที่มีผลต่อการเกิดน้ำท่า โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน รวมถึงความชื้นของดินในขณะนั้น [12] โดยในการศึกษานี้จะใช้ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ปี พ.ศ. 2558 มาทำการกำหนดค่า CN เฉลี่ย (CN_{avg}) ที่เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ของแต่ละลุ่มน้ำย่อย โดยมีสมการคำนวณดังสมการที่ 2

$$CN_{avg} = \frac{CN_1A_1 + CN_2A_2 + \ldots + CN_nA_n}{A_1 + A_2 + \ldots + A_n} \qquad (2)$$

โดยที่ CN_{avg} คือ ค่า CN เฉลี่ยของแต่ละลุ่มน้ำย่อย
CN_i คือ ค่า CN ของพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินแต่ละประเภทและแต่ละชนิดของดิน
A_i คือ พื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินแต่ละประเภทและแต่ละชนิดของดิน

ทั้งนี้ ค่า CN เฉลี่ยของแต่ละลุ่มน้ำย่อยจะถูกนำเข้าสู่แบบจำลองทางอุทกวิทยา HEC-HMS สำหรับการจำลองสภาพทางอุทกวิทยาของลุ่มน้ำพองตอนล่าง รวมถึงการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินตลอดจนการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำต่างๆ

3.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจำลองสภาพทางอุทกวิทยาและชลศาสตร์ของลุ่มน้ำพองตอนล่าง จะมีรายละเอียดสำคัญที่สามารถสรุปได้ดังนี้ (**หมายเหตุ:** แผนภาพระบบลุ่มน้ำพองตอนล่าง (Schematic diagram) ที่แสดงถึงเส้นทางและทิศทางการไหลของน้ำ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3)

3.2.1 แบบจำลองทางอุทกวิทยา HEC-HMS จะถูกสร้างขึ้นสำหรับการวิเคราะห์แนวโน้มของปริมาณน้ำท่าที่เกิดจากฝน รวมถึงลักษณะการไหลทั้งในสภาพทั่วไปและสภาพที่มีการควบคุม การจำลองสภาพการไหลของน้ำท่าผ่านลำน้ำ อ่างเก็บน้ำ ตลอดจนการพิจารณาผลกระทบจากอาคารชลศาสตร์ในระบบเครือข่ายลำน้ำ [13] โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง HEC-HMS ดังนี้

- เตรียมข้อมูลพื้นฐานสำหรับนำเข้าแบบจำลอง HEC-HMS โดยเริ่มจากการเตรียมข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข (Digital Elevation Model, DEM) สำหรับการสร้างลุ่มน้ำย่อย จำนวน 15 ลุ่มน้ำย่อย ขั้นตอนต่อไปคือการเตรียมตำแหน่งของสถานีวัดน้ำฝน สำหรับการคำนวณปริมาณฝนเฉลี่ยโดยวิธีทิสเสน ตลอดจนการเตรียมข้อมูลอุตุ-อุทกวิทยา ได้แก่ ข้อมูลฝนรายวันและข้อมูลน้ำท่ารายวันของแต่ละสถานี โดยนำข้อมูลมาเรียงกันและให้ข้อมูลมีความต่อเนื่องสำหรับการจำลองสภาพด้วยแบบจำลอง HEC-HMS รวมถึงการสอบเทียบและทดสอบแบบจำลอง HEC-HMS (**หมายเหตุ:** นำค่า CN เฉลี่ยของแต่ละลุ่มน้ำย่อยที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อ 3.1.3 มาจัดเตรียมเพื่อนำเข้าสู่แบบจำลอง HEC-HMS ด้วย)

- กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของแต่ละลุ่มน้ำย่อยในแบบจำลอง HEC-HMS ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ 1) Basin models เป็นส่วนของข้อมูลลุ่มน้ำ 2) Meteorologic models เป็นส่วนของข้อมูลอุตุนิยมวิทยา 3) Control specifications เป็นส่วนของการกำหนดช่วงและระยะเวลาของการจำลองสภาพ 4) Time-series data เป็นส่วนของข้อมูลอนุกรมเวลา (ฝนและน้ำท่า) 5) Paired data เป็นส่วนของการกำหนดข้อมูลการระบายน้ำของเขื่อน ฝาย เป็นต้น

- สอบเทียบแบบจำลอง HEC-HMS โดยการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสภาพด้วยแบบจำลอง HEC-HMS มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริงในสนาม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ในตอนเริ่มต้นอาจจะไม่มีความสอดคล้องกันมากนัก เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณอาจจะไม่ใช่ค่าพารามิเตอร์ที่สามารถเป็นตัวแทนของลุ่มน้ำได้ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์หรือเพิ่มจำนวนพารามิเตอร์ให้มากขึ้นกว่าเดิม โดยเริ่มต้นจากการปรับแก้แบบลองผิดลองถูก (Trial and error) เพื่อตรวจหาพารามิเตอร์ที่มีความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) เมื่อทราบพารามิเตอร์ที่มีความอ่อนไหวแล้วจึงทำการปรับค่าพารามิเตอร์อย่างละเอียดและนำผลลัพธ์ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลสนามอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับลุ่มน้ำพองตอนล่าง และส่งผลให้การจำลองสภาพด้วยแบบจำลอง HEC-HMS มีความถูกต้องและแม่นยำ

- ทดสอบแบบจำลอง HEC-HMS ซึ่งจะเป็นการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง HEC-HMS โดยการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสภาพด้วยแบบจำลอง HEC-HMS มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริงในสนามซึ่งจะมีช่วงระยะเวลาที่พิจารณาแตกต่างจากช่วงระยะเวลาที่พิจารณาในการสอบเทียบแบบจำลอง HEC-HMS ทั้งนี้ การทดสอบแบบจำลอง HEC-HMS จะเป็นการยืนยันว่าแบบจำลอง HEC-HMS ที่สร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือและถูกต้องสามารถนำไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ต่างๆ ได้

- จำลองสภาพทางอุทกวิทยาด้วยแบบจำลอง HEC-HMS ภายใต้สถานการณ์ต่างๆ

3.2.2 แบบจำลอง HEC-RAS ถูกสร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์การไหลหลากและสภาพทางชลศาสตร์การไหล สำหรับการจำลองสภาพการไหลแบบคงที่ (Steady flow) ซึ่งเป็นรูปแบบการไหลที่มีสภาพการไหล (ความลึก ความเร็ว และอัตราการไหล) ที่หน้าตัดใดๆ ของลำน้ำคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และการไหลแบบไม่คงที่ (Unsteady flow) ในลักษณะที่การไหลเปลี่ยนแปลงตามเวลา [14] โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง HEC-RAS ดังนี้

- เตรียมข้อมูลเชิงเรขาคณิตสำหรับนำเข้าแบบจำลอง HEC-RAS โดยใช้เครื่องมือสนับสนุนคือ HEC-GeoRAS ซึ่งจะทำงานอยู่บน ArcGIS สำหรับเตรียมข้อมูล เช่น เส้นลำน้ำ ตำแหน่งของรูปตัดลำน้ำ ทิศทางการไหล เส้นกึ่งกลางลำน้ำ (Center line) ตลิ่งของลำน้ำ (Bank) ขอบเขตน้ำท่วมหรือแนวการไหลบ่า (Flow path) เป็นต้น

- เตรียมข้อมูลอุทกวิทยา ได้แก่ อัตราการไหล ระดับน้ำ และข้อมูลค่าพารามิเตอร์เพื่อนำมากำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการจำลองสภาพ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (ประมาณค่าจากข้อมูลลักษณะลำน้ำที่ได้จากการสำรวจ) ค่าความลึกปกติ (ประมาณค่าจากความลาดชันของท้องน้ำหรือผิวน้ำ) เป็นต้น

- นำเข้าข้อมูลเชิงเรขาคณิตเพื่อกำหนดโครงข่ายลำน้ำ รวมถึงการปรับแก้หน้าตัดของลำน้ำให้ตรงตามหน้าตัดของลำน้ำที่ได้จากการสำรวจภาคสนาม (**หมายเหตุ:** หน้าตัดของลำน้ำตามแนวลำน้ำพองช่วงระหว่างท้ายเขื่อนอุบลรัตน์ถึงฝายหนองหวาย ทำการสำรวจโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เมื่อปี พ.ศ. 2538 ทุกๆ ระยะทาง 1 กิโลเมตร ในขณะที่หน้าตัดของลำน้ำช่วงระหว่างฝายหนองหวายถึงจุดบรรจบระหว่างแม่น้ำพองกับแม่น้ำชี ทำการสำรวจโดยศูนย์การจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปี พ.ศ. 2550 ทุกๆ ระยะทาง 1 – 5 กิโลเมตร แตกต่างกันไป

ตามพื้นที่สำรวจหรือตามความเหมาะสมของพื้นที่) แล้วตามด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง HEC-RAS

- สอบเทียบและทดสอบแบบจำลอง HEC-RAS (รายละเอียดเหมือนกับการสอบเทียบและการทดสอบแบบจำลอง HEC-HMS)

- จำลองสภาพการไหลหลากของน้ำในลำน้ำและพื้นที่ราบริมฝั่งลำน้ำด้วยแบบจำลอง HEC-RAS ภายใต้สถานการณ์ต่างๆ

- นำผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง HEC-RAS ไปดำเนินการต่อด้วยโปรแกรม HEC-GeoRAS สำหรับคาดการณ์ขอบเขตของพื้นที่ที่อาจจะได้รับผลกระทบจากน้ำท่วม

ทั้งนี้ การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง HEC-RAS จะอยู่ในรูปของการประเมินความถูกต้องของการคาดการณ์พื้นที่น้ำท่วม ซึ่งจะพิจารณาจาก 1) การเปรียบเทียบพื้นที่น้ำท่วมที่ได้จากการจำลองสภาพกับพื้นที่น้ำท่วมจากภาพถ่ายดาวเทียม เมื่อวันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ. 2554 โดยสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) (GISTDA) และ 2) ค่าทางสถิติ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error, RE) ซึ่งจะเป็นค่าความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับค่าจริง โดยจะพิจารณาเป็นร้อยละของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ และคำนวณได้จากสมการที่ 3

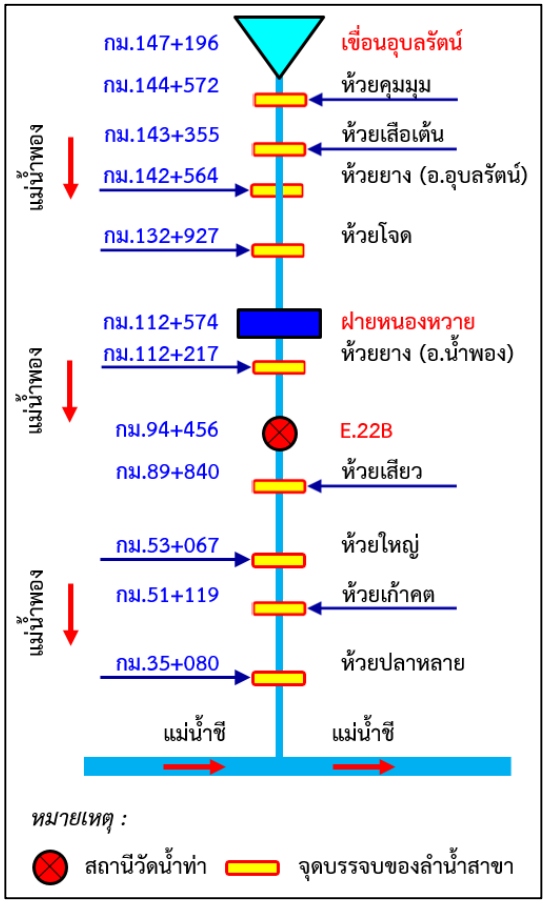
$$RE = \frac{\left|X_0 - X_p\right|}{X_0} \qquad (3)$$

โดยที่ RE คือ ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์
X_0 คือ พื้นที่น้ำท่วมจากภาพถ่ายดาวเทียม
X_p คือ พื้นที่น้ำท่วมจากการจำลองสภาพ

2) ค่า F-statistics (F_s) ซึ่งจะชี้ให้เห็นถึงการซ้อนทับของพื้นที่น้ำท่วม โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$F_s = \left(\frac{X_{op}}{X_0 + X_p - X_{op}}\right) \times 100 \qquad (4)$$

โดยที่ F_s คือ ค่า F-statistics
X_{op} คือ พื้นที่ซ้อนทับกันของพื้นที่น้ำท่วมจากภาพถ่ายดาวเทียมและจากการจำลองสภาพ



รูปที่ 3 แผนภาพระบบลุ่มน้ำพองตอนล่าง (Schematic diagram)

3.3 การจำลองสถานการณ์ต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต

การจำลองสถานการณ์ต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคตทั้งในแง่ของการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ สภาพทางอุทกวิทยา สภาพการไหลหลาก รวมถึงสภาพทางชลศาสตร์การไหลของลุ่มน้ำพองตอนล่าง จะครอบคลุมถึงการวิเคราะห์และคาดการณ์ที่สำคัญดังต่อไปนี้

3.3.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน 5 ประเภท ได้แก่ พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่อื่นๆ พื้นที่เมือง และพื้นที่ชุ่มน้ำ จากปี พ.ศ. 2558 ไปอีก 5 ปี (พ.ศ. 2563) 10 ปี (พ.ศ. 2568) 25 ปี (พ.ศ. 2583) 50 ปี (พ.ศ. 2608) และ 100 ปี (พ.ศ. 2658) โดยใช้แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land Change Modeler, LCM) ซึ่งเป็นโปรแกรมย่อยที่อยู่ภายในโปรแกรม TerrSet ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Clark Labs มหาวิทยาลัย Clark ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงและการสร้างภาพฉายจากข้อมูลพื้นฐาน 2

เหตุการณ์ (พ.ศ. 2553 และ พ.ศ. 2558) เพื่อนำมาวิเคราะห์หาความเชื่อมโยงระหว่างเหตุการณ์และใช้คาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินที่จะเกิดขึ้นในอนาคต [15] (**หมายเหตุ:** ข้อมูลทางภูมิศาสตร์พื้นฐานที่นำเข้าสู่แบบจำลอง LCM จะอยู่ในรูปของชั้นข้อมูลแผนที่ ซึ่งประกอบไปด้วย ชั้นข้อมูลการเปลี่ยนแปลงในอดีตร่วมกับชั้นข้อมูลอื่นๆ เช่น ถนนและโครงข่ายคมนาคม ความลาดชัน ชนิดของดิน เป็นต้น เพื่อคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินที่จะเกิดขึ้นในอนาคต โดยผ่านกระบวนการประมาณค่าพารามิเตอร์ร่วมกับการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ Multi-Layer Perceptron (MLP) Neural Network ตลอดจนหลักการของห่วงโซ่มาร์คอฟ (Markov Chain) [15])

3.3.2 การคาดการณ์อัตราการไหลสูงสุดที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคต (พ.ศ. 2563, 2568, 2583, 2608, 2658) (**หมายเหตุ:** ในการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคต จะใช้ค่า CN เฉลี่ยที่แตกต่างกันที่คำนวณโดยสมการที่ 2 สำหรับแต่ละลุ่มน้ำย่อย จากข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ปี พ.ศ. 2563, 2568, 2583, 2608, 2658 และนำเข้าแบบจำลองทางอุทกวิทยา HEC-HMS) และการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำ 5, 10, 25, 50 และ 100 ปี ทั้งนี้ ปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำต่างๆ จะอาศัยข้อมูลปริมาณฝนเฉลี่ยรายวันที่ตกลงในลุ่มน้ำพองตอนล่างที่คำนวณจากปริมาณฝนที่รวบรวมได้ 6 สถานี (ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 2.2 และข้อ 3.1.2) โดยทำการคัดเลือกปริมาณฝนสูงสุดในช่วงเวลา 3 วัน ในแต่ละปี (พ.ศ. 2548 – 2560) สำหรับการวิเคราะห์แจกแจงความถี่ด้วยวิธี Gumbel ซึ่งจะทำให้ได้ปริมาณฝนสูงสุดรายปีสำหรับช่วงเวลา 3 วัน ที่คาบการเกิดซ้ำต่างๆ (**หมายเหตุ:** ฝนตกหนักต่อเนื่อง 3 วัน ส่งผลให้เกิดผลกระทบอย่างรุนแรงในพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่าง [16]) หลังจากนั้นจึงทำการกระจายปริมาณฝนสูงสุดรายปีสำหรับช่วงเวลา 3 วัน ลงบนข้อมูลอนุกรมเวลาปริมาณฝนปี พ.ศ. 2558 โดยการกระจายจะพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การตกของฝนในแต่ละวัน (ในช่วงเวลา 3 วัน) (**หมายเหตุ:** พิจารณาข้อมูลอนุกรมเวลาปริมาณฝนปี พ.ศ. 2558 เนื่องจากตรงกับการกำหนดให้ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ปี พ.ศ. 2558 เป็นข้อมูลในสภาพปัจจุบัน)

3.3.3 การคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคต (พ.ศ. 2563, 2568, 2583, 2608, 2658) ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำ 5, 10, 25, 50 และ 100 ปี ในส่วนของการคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัย จะกำหนดโดยระดับของ “Flood Hazard Rating (FHR)” สำหรับการคาดการณ์พื้นที่ที่มีความเปราะบางต่อการเกิดอุทกภัย ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 5 [17]

$$FHR = d \times (v + 0.5) + DF \quad (5)$$

โดยที่ FHR คือ Flood Hazard Rating (เมตร^2/วินาที)
d คือ ระดับความลึกของน้ำท่วม (เมตร)
v คือ ความเร็วการไหลของน้ำท่วม (เมตร/วินาที)
DF คือ Debris Factor (ไม่มีหน่วย)

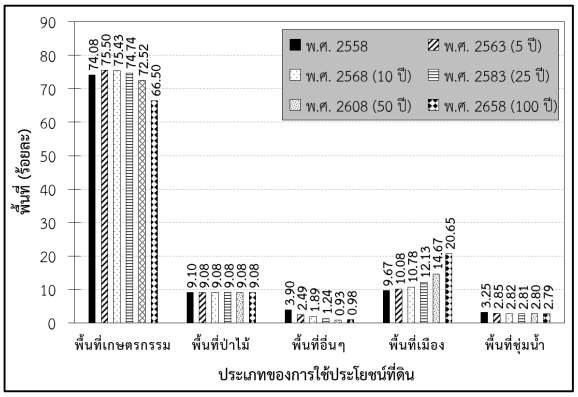
ทั้งนี้ เพื่อให้ได้พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยที่มีความชัดเจนและเข้าใจง่าย จึงได้มีการจำแนกประเภทของพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยออกเป็น 4 โซน คือ 1) พื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยสูงมาก (Extreme) (ระดับของ FHR > 2.50) 2) พื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูง (High) (ระดับของ FHR อยู่ระหว่าง 1.50 – 2.50) 3) พื้นที่ที่มีความเสี่ยงปานกลาง (Moderate) (ระดับของ FHR อยู่ระหว่าง 0.75 – 1.50) และ 4) พื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่ำ (Low) (ระดับของ FHR < 0.75)

4. ผลการศึกษา

4.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจะอาศัยข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2558 ที่มีการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่ พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่อื่นๆ พื้นที่เมือง และพื้นที่ชุ่มน้ำ ซึ่งผลจากการประยุกต์ใช้แบบจำลอง Land Change Modeler สำหรับการจำลองสภาพการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากปี พ.ศ. 2558 ไปอีก 5 ปี (พ.ศ. 2563) 10 ปี (พ.ศ. 2568) 25 ปี (พ.ศ. 2583) 50 ปี (พ.ศ. 2608) และ 100 ปี (พ.ศ. 2658) พบว่าการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปจากปี พ.ศ. 2558 โดยที่การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่เกษตรกรรม (ลดลง) พื้นที่อื่นๆ (ลดลง) และพื้นที่เมือง (เพิ่มขึ้น) ในอนาคตจะมีแนวโน้มที่จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ในส่วนของ

พื้นที่ป่าไม้และพื้นที่ชุ่มน้ำ จะมีแนวโน้มที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในช่วงเวลาต่างๆ

4.2 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง HEC-HMS และแบบจำลอง HEC-RAS

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง HEC-HMS และแบบจำลอง HEC-RAS จะดำเนินการโดยทำการปรับเปลี่ยนค่าของพารามิเตอร์ที่อาจจะส่งผลต่อปริมาณน้ำท่ารายวัน ซึ่งพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อปริมาณน้ำท่าในแบบจำลอง HEC-HMS จะประกอบด้วย Lag Time (t_{lag}), Initial baseflow (Q_0) และ K กับ X ในส่วนของพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลและจะต้องถูกปรับแก้ในแบบจำลอง HEC-RAS จะประกอบด้วย Manning's n, C_c, C_e และ C_d โดยมีรายละเอียดแสดงได้ดังตารางที่ 1 ถึง 6

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ถูกปรับค่าในระหว่างการสอบเทียบแบบจำลอง HEC-HMS

กระบวนการจำลองสภาพ	พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ *ก่อน*ปรับค่า*	ค่าพารามิเตอร์ *หลัง*ปรับค่า	หน่วย
การไหลหลากบนผิวดิน (Direct runoff)	t_{lag}	0-30,000	120-15,000	นาที
การไหลเสริมของน้ำใต้ดิน (Baseflow)	Q_0	0-100,000	0.2-1.0	ลบ.ม./วินาที
การไหลหลากในลำน้ำ (Routing)	K	0.1-150	2-25	ชั่วโมง
	X	0-0.6	0.01-0.35	ไม่มีหน่วย

หมายเหตุ: * อ้างอิงจาก [18]

ตารางที่ 2 ค่า t_{lag} และ Q_0 ของแต่ละลุ่มน้ำย่อย (หลังการสอบเทียบแบบจำลอง HEC-HMS)

ลุ่มน้ำย่อย	t_{lag}	Q_0
1	150	0.20
2	1,300	0.30
3	1,300	0.50
4	150	0.40
5	1,300	1.00
6	2,300	0.75
7	13,000	0.85
8	15,000	1.00
9	350	1.00
10	350	1.00
11	150	1.00
12	120	1.00
13	150	1.00
14	150	1.00
15	350	1.00

ตารางที่ 3 ค่า K และ X ของแต่ละช่วงลำน้ำ (หลังการสอบเทียบแบบจำลอง HEC-HMS)

ช่วงลำน้ำ	1	2	3	4
K	7	5	25	2
X	0.01	0.02	0.35	0.12

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ที่ถูกปรับค่าในระหว่างการสอบเทียบแบบจำลอง HEC-RAS

กระบวนการจำลองสภาพ	ตำแหน่ง/ลักษณะ	ค่าพารามิเตอร์ *ก่อน*ปรับค่า*	ค่าพารามิเตอร์ *หลัง*ปรับค่า*
Manning's	ในลำน้ำ	0.001-0.900**	0.028-0.035
n	ริมตลิ่ง	0.001-0.900**	0.050-0.053
C_c	ช่วงหดตัว (Contraction)	0.100-0.500***	0.100
C_e	ช่วงขยายตัว (Expansion)	0.100-0.650***	0.300
C_d	ช่วงเกิดการไหลล้นข้ามฝาย	0.000-1.000****	0.080-0.100

หมายเหตุ: * ไม่มีหน่วย
** อ้างอิงจาก [19]
*** อ้างอิงจาก [14]
**** อ้างอิงจาก [20]

ตารางที่ 5 ค่า Manning's n ในลำน้ำและริมตลิ่ง ของแต่ละช่วงลำน้ำ (หลังการสอบเทียบแบบจำลอง HEC-RAS)

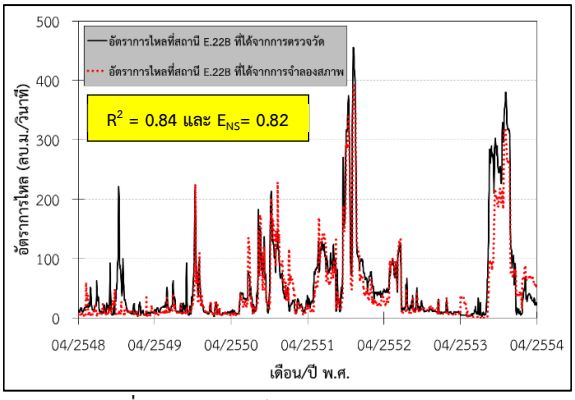
ช่วงลำน้ำ (กม.)	Manning's n	
	ในลำน้ำ	ริมตลิ่ง
0 + 000 ถึง 112 + 217	0.028	0.050
112 + 217 ถึง 147 + 196	0.035	0.053

ตารางที่ 6 ค่า C_c, C_e และ C_d ของแต่ละช่วงลำน้ำ (หลังการสอบเทียบแบบจำลอง HEC-RAS)

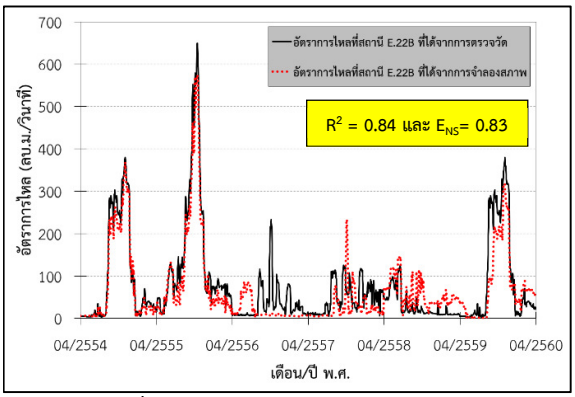
ช่วงลำน้ำ (กม.)	C_c	C_e	C_d
0 + 000 ถึง 112 + 217	0.100	0.300	0.100
112 + 217 ถึง 147 + 196	0.100	0.300	0.080

4.3 การสอบเทียบและทดสอบแบบจำลอง HEC-HMS และแบบจำลอง HEC-RAS

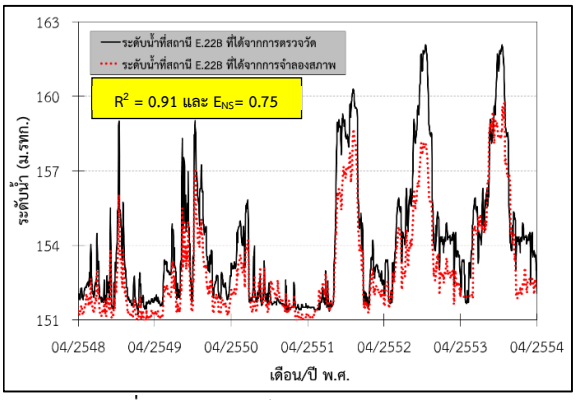
การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองทางอุทกวิทยา HEC-HMS และแบบจำลองทางชลศาสตร์ HEC-RAS จะอยู่ในรูปของการสอบเทียบและทดสอบแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลอัตราการไหลในช่วงปี พ.ศ. 2548 – 2554 และ พ.ศ. 2554 – 2560 สำหรับการสอบเทียบและทดสอบแบบจำลอง HEC-HMS ตามลำดับ ในส่วนของระดับน้ำที่ได้จากการตรวจวัดจริงในสนามในช่วงปี พ.ศ. 2548 – 2554 และ พ.ศ. 2554 – 2560 ถูกใช้สำหรับการสอบเทียบและทดสอบแบบจำลอง HEC-RAS ตามลำดับ (**หมายเหตุ:** ตำแหน่งข้อมูลเงื่อนไขขอบเขตทางด้านต้นน้ำ (Upstream boundary condition) จะอยู่ที่อาคารระบายน้ำ (Outlet) ทางด้านท้ายน้ำของเขื่อนอุบลรัตน์ และใช้ข้อมูลการระบายน้ำรายวันจากเขื่อนอุบลรัตน์เป็นข้อมูลเงื่อนไขขอบเขตทางด้านต้นน้ำ ในขณะที่บริเวณจุดบรรจบระหว่างแม่น้ำพองกับแม่น้ำชี จะถูกกำหนดให้เป็นตำแหน่งข้อมูลเงื่อนไขขอบเขตทางด้านท้ายน้ำ (Downstream boundary condition) และควบคุมการไหลด้านท้ายน้ำโดยความลึกปกติ (Normal depth) ส่วนข้อมูลเงื่อนไขขอบเขตที่เกี่ยวข้องกับการไหลเข้าด้านข้าง (Lateral flow) จะใช้ข้อมูลอัตราการไหลรายวัน ณ จุดทางออกของแต่ละลุ่มน้ำย่อยที่คำนวณจากแบบจำลอง HEC-HMS) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (E_{NS}) ในการตรวจสอบความถูกต้องและความเหมาะสมของแบบจำลอง HEC-HMS (**หมายเหตุ:** การศึกษาครั้งถัดไป ควรพิจารณาข้อมูลฝนที่ตรวจวัด ณ สถานีวัดน้ำฝนที่ตั้งอยู่บริเวณตอนบนของลุ่มน้ำพองตอนล่าง ตอนบนของลุ่มน้ำลำปาวตอนบน รวมถึงตอนบนของลุ่มน้ำห้วยหลวง เพื่อให้การคำนวณปริมาณฝนเฉลี่ยรายวันและปริมาณน้ำท่ารายวันของแต่ละลุ่มน้ำย่อยโดยแบบจำลอง HEC-HMS มีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น) และแบบจำลอง HEC-RAS โดยมีรายละเอียดของผลการสอบเทียบและทดสอบแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 5 ถึง 8



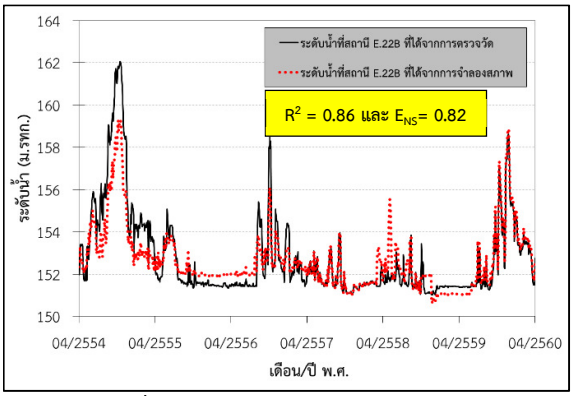
รูปที่ 5 ผลการสอบเทียบแบบจำลอง HEC-HMS



รูปที่ 6 ผลการทดสอบแบบจำลอง HEC-HMS

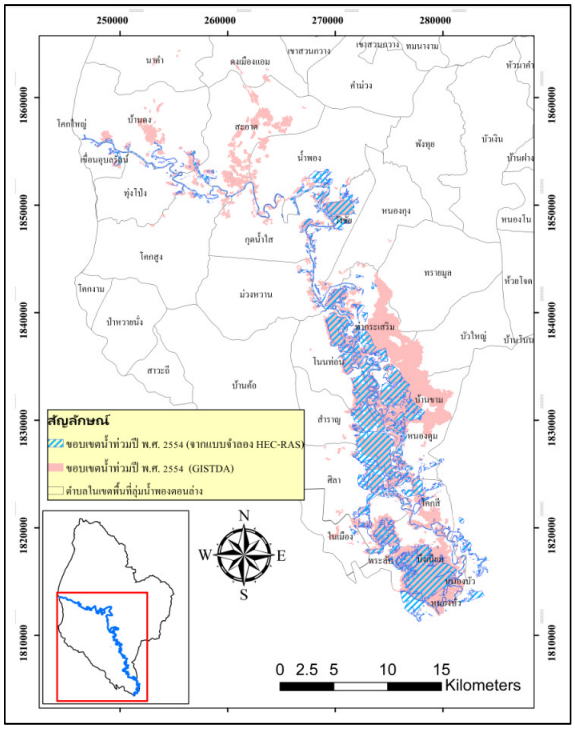


รูปที่ 7 ผลการสอบเทียบแบบจำลอง HEC-RAS



รูปที่ 8 ผลการทดสอบแบบจำลอง HEC-RAS

นอกจากนี้ แบบจำลอง HEC-RAS ยังได้รับการสอบเทียบเพื่อประเมินความถูกต้องของการคาดการณ์พื้นที่น้ำท่วม โดยจะพิจารณาจาก 1) การเปรียบเทียบพื้นที่น้ำท่วมที่ได้จากการจำลองสภาพด้วยแบบจำลอง HEC-RAS และพื้นที่น้ำท่วมจากภาพถ่ายดาวเทียม เมื่อวันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ. 2554 โดย GISTDA ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่าเมื่อพิจารณาพื้นที่ทั้งหมด (รวมพื้นที่น้ำท่วมจากลำน้ำสาขามาพิจารณาประกอบด้วย) แผนที่น้ำท่วมที่ได้จากการจำลองสภาพด้วยแบบจำลอง HEC-RAS กับแผนที่น้ำท่วมปี พ.ศ. 2554 จะมีการซ้อนทับกันอยู่ที่ร้อยละ 70.30 ส่วนในกรณีที่ไม่นำการท่วมนองจากลำน้ำสาขามาพิจารณาประกอบ จะมีการซ้อนทับกันอยู่ที่ร้อยละ 66.41 โดยมีรายละเอียดแสดงได้ดังรูปที่ 9 และ 2) ค่าทางสถิติ ซึ่งพบว่า ค่า RE จะมีค่าเท่ากับ 0.26 และค่า F_s มีค่าเท่ากับ 61.57 ซึ่งจากค่า RE ที่มีค่าน้อย และค่า F_s ที่มีค่ามาก จะชี้ให้เห็นถึงความสอดคล้องกันของพื้นที่น้ำท่วมจากภาพถ่ายดาวเทียมและจากการจำลองสภาพ (ตามคำอธิบายของ [21]) (**หมายเหตุ:** ในการศึกษาครั้งถัดไป ควรจะทำการสำรวจหน้าตัดของลำน้ำใหม่ในช่วงระหว่างท้ายเขื่อนอุบลรัตน์ถึงฝายหนองหวาย (ข้อมูลเดิมสำรวจในปี พ.ศ. 2538 โดย กฟผ. ซึ่งอาจจะมีสภาพของหน้าตัดลำน้ำเปลี่ยนแปลงไป อันเนื่องมาจากการพังทลายของหน้าดินและตลิ่งริมแม่น้ำ ทำให้เกิดการตกตะกอนในลำน้ำ เกิดการตื้นเขิน และส่งผลให้ความจุของลำน้ำลดลง) เพื่อให้ได้ข้อมูลหน้าตัดของลำน้ำที่เป็นปัจจุบัน ซึ่งจะส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง HEC-RAS มีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น)



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบแผนที่น้ำท่วมจากการจำลองสภาพด้วยแบบจำลอง HEC-RAS และแผนที่น้ำท่วมจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียมของ GISTDA ในอดีต (ปี พ.ศ. 2554)

4.4 การคาดการณ์อัตราการไหลสูงสุดที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตร่วมกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำต่างๆ

การคาดการณ์อัตราการไหลสูงสุดจะพิจารณากรณีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอดีต (พ.ศ. 2553) ปัจจุบัน (พ.ศ. 2558) และอนาคต (พ.ศ. 2563, 2568, 2583, 2608, 2658) ควบคู่กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำ 5, 10, 25, 50 และ 100 ปี ซึ่งผลจากการจำลองสภาพทางชลศาสตร์ด้วยแบบจำลอง HEC-RAS พบว่าอัตราการไหลสูงสุด ณ จุดบรรจบระหว่างแม่น้ำพองกับแม่น้ำชี (ตรงบริเวณวงกลมสีฟ้าในรูปที่ 1) มีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้น (รายละเอียดแสดงได้ดังตารางที่ 7) ทั้งนี้พบว่า ในกรณีที่พิจารณาการใช้ประโยชน์ที่ดินในปี พ.ศ. เดียวกัน อัตราการไหลสูงสุดฯ จะมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำที่สูงขึ้น ในขณะเดียวกันหากพิจารณาปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำเดียวกัน อัตราการไหลสูงสุดฯ จะมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นตามการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เปลี่ยนแปลงไปในอนาคต

ตารางที่ 7 อัตราการไหลสูงสุด ณ จุดบรรจบระหว่างแม่น้ำพองกับแม่น้ำชีที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในปี พ.ศ. ต่างๆ ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำต่างๆ

คาบการเกิดซ้ำ	อัตราการไหลสูงสุด (ลบ.ม./วินาที)				
	ปี พ.ศ.*				
	2563	2568	2583	2608	2658
พ.ศ.2558**	751.1	772.0	792.3	832.7	886.5
5	756.3	776.7	797.1	837.7	891.9
10	770.8	798.1	866.4	893.8	907.6
25	856.5	862.8	897.4	925.1	946.0
50	916.1	950.1	979.3	1,015.7	1,037.6
100	1,039.7	1,060.7	1,106.0	1,136.3	1,159.0

หมายเหตุ: * การใช้ประโยชน์ที่ดิน ปี พ.ศ. ต่างๆ
** อัตราการไหลสูงสุดกรณีที่เปลี่ยนแปลงเฉพาะการใช้ประโยชน์ที่ดินในปี พ.ศ. ต่างๆ แต่ใช้ปริมาณฝนปี พ.ศ. 2558

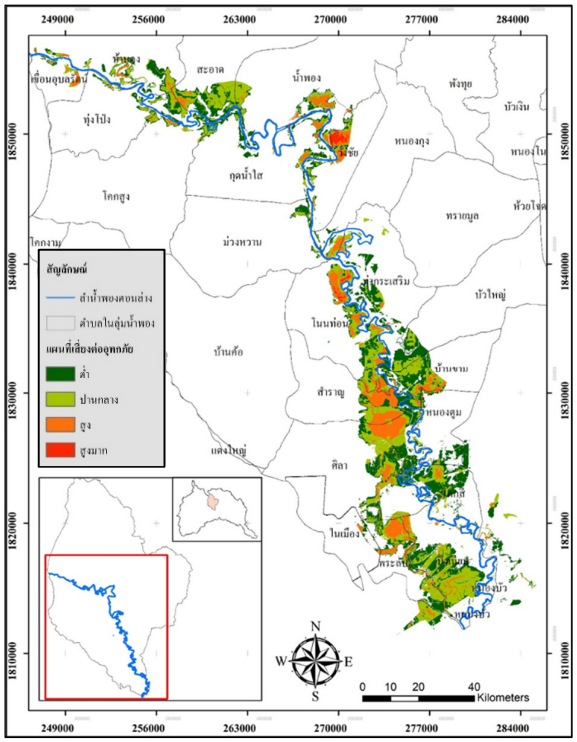
4.5 การคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตร่วมกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำต่างๆ

จากการคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคต (พ.ศ. 2563, 2568, 2583, 2608, 2658) ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำ 5, 10, 25, 50 และ 100 ปี พบว่าพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้น (ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 8) โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณด้านท้ายน้ำของพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่างซึ่งจะมีความเสี่ยงอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง (ดูรูปที่ 10 ประกอบ)

ตารางที่ 8 พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตร่วมกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำต่างๆ

คาบการเกิดซ้ำ	พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัย (ตร.กม.)					
	ปี พ.ศ.*					
	2558	2563	2568	2583	2608	2658
5	100.04	100.22	105.94	106.68	109.97	111.92
10	104.35	105.66	111.38	113.44	116.39	122.78
25	115.27	117.35	118.66	120.18	143.01	154.78
50	130.42	133.88	139.20	142.56	155.76	168.73
100	148.73	150.48	151.11	169.99	171.17	184.26

หมายเหตุ: * การใช้ประโยชน์ที่ดิน ปี พ.ศ. ต่างๆ



รูปที่ 10 พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่าง (กรณีการใช้ประโยชน์ที่ดิน ปี พ.ศ. 2658 (100 ปี) ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำ 100 ปี)

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตและการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำต่างๆ สามารถสรุปผลลัพธ์และประเด็นสำคัญดังแสดงรายละเอียดดังนี้

1. ผลการสอบเทียบและทดสอบแบบจำลอง HEC-HMS แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแบบจำลอง HEC-HMS ในการประยุกต์ใช้กับสถานการณ์ต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต ซึ่งอาจจะส่งผลต่อสภาพทางอุทกวิทยาของลุ่มน้ำพองตอนล่าง โดยในการศึกษานี้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (E_{NS}) ที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องและความเหมาะสมของแบบจำลอง HEC-HMS มีค่ามากกว่า 0.70 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก โดยที่พารามิเตอร์ Lag Time, Initial baseflow และ K กับ X จะมีความสำคัญและมีอิทธิพลต่อกระบวนการทางอุทกวิทยาของลุ่มน้ำพองตอนล่าง

2. ค่า R^2 และ E_{NS} ที่มากกว่า 0.70 ในกรณีของการสอบเทียบและทดสอบแบบจำลอง HEC-RAS ก็แสดงให้เห็นถึงความ

เหมาะสมและน่าเชื่อถือของแบบจำลอง HEC-RAS ในการจำลองสภาพการไหลหลากและสภาพทางชลศาสตร์การไหลของลุ่มน้ำพองตอนล่าง โดยมีพารามิเตอร์สำคัญที่ส่งผลต่อการจำลองสภาพ ได้แก่ Manning's n, C_c, C_e และ C_d ในขณะที่การสอบเทียบแบบจำลอง HEC-RAS โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ในรูปของแผนที่น้ำท่วมจากการจำลองสภาพด้วยแบบจำลอง HEC-RAS และแผนที่น้ำท่วมในอดีต (ปี พ.ศ. 2554) ซึ่งมีร้อยละของการซ้อนทับมากกว่าร้อยละ 60 รวมถึงค่าทางสถิติ ได้แก่ ค่า Relative Error (RE) ที่มีค่าน้อย (0.26) และค่า F-statistics (F_s) ที่มีค่ามาก (61.57) จะยืนยันถึงความถูกต้องและน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสภาพด้วยแบบจำลอง HEC-RAS สำหรับใช้ในการจำลองสถานการณ์ในอนาคตต่อไป

3. จากการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจาก ปี พ.ศ. 2558 ด้วยแบบจำลอง Land Change Modeler พบว่า พื้นที่เกษตรกรรมแนวโน้มที่จะขยายตัวในช่วง 25 ปีข้างหน้า และจะลดลงในช่วง 50 – 100 ปีข้างหน้า ในขณะที่พื้นที่ป่ามีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากในอนาคต ในส่วนของพื้นที่อื่นๆ และพื้นที่ชุ่มน้ำมีแนวโน้มที่จะลดลงในอนาคต ยกเว้นพื้นที่เมืองซึ่งมีแนวโน้มที่จะขยายตัวในช่วง 100 ปีข้างหน้า

4. ผลการคาดการณ์อัตราการไหลสูงสุดที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตร่วมกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำต่างๆ พบว่า อัตราการไหลสูงสุด ณ จุดบรรจบระหว่างแม่น้ำพองกับแม่น้ำชี มีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้น ทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและปริมาณฝนในอนาคต

5. ผลการคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตร่วมกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนที่คาบการเกิดซ้ำต่างๆ พบว่า พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น (โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณด้านท้ายน้ำของพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่างซึ่งจะมีความเสี่ยงอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง) ทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและปริมาณฝนในอนาคต

โดยสรุป ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการให้ข้อมูลเบื้องต้นแก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้องและประชาชน สำหรับเตรียมความพร้อมในการเผชิญและรับมือกับสภาวะน้ำท่วมอย่างทันท่วงที ซึ่งจะส่งผลให้การแก้ไขปัญหาน้ำท่วมเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ไม่ก่อให้เกิดความซ้ำซ้อนในการปฏิบัติงาน รวมถึงลดความสูญเสียที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณสำนักงานชลประทานที่ 6 กรมชลประทาน โรงไฟฟ้าพลังน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาหนองหวาย ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน กรมอุตุนิยมวิทยา กรมพัฒนาที่ดิน และสำนักงานทรัพยากรน้ำภาค 4 กรมทรัพยากรน้ำ ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลสำหรับใช้ในการศึกษาวิจัยและทำให้การวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Chacuttrikul, P., Kiguchi, M., and Oki, T. (2018). Impacts of climate and land use changes on river discharge in a small watershed: a case study of the Lam Chi subwatershed, northeast Thailand. Hydrological Research Letters. 12(2). 7-13

[2] Gashaw, T., Tulu, T., Argaw, M., and Worqlul, A.W. (2018). Modeling the hydrological impacts of land use/land cover changes in the Andassa watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. Science of the Total Environment. Volume 619–620. 1394–1408

[3] Singkran, N., Tosang, J., Waijaroen, D., Intharawichian, N., Vannarart, O., Anantawong, P., Kunta, K., Wisetsopa, P., Tipvong, T., Janjirawuttikul, N., Masthawee, F., Amornpatanawat, S., and Kirtsaeng, S. (2015). Influences of land use and climate changes on hydrologic system in the northeastern river basin of Thailand. Journal of Water and Climate Change. 6(2). 325-340

[4] Zope, P.E., Eldho, T.I., and Jothiprakash, V. (2017). Hydrological impacts of land use–land cover change and detention basins on urban flood hazard: a case study of Poisar River basin, Mumbai, India. Natural Hazards. 87(3). 1267–1283

[5] Water Crisis Prevention Center. (2019, January 5). Water Situation Report on October 5, 2017. Retrieved from

http://mekhala.dwr.go.th/imgbackend/report_file/report_172636.pdf

[6] National Hydro Informatics and Climate Data Center. (2018, May 1). Flood Events in the Northern, Northeastern, and Central Regions during October 2017. Retrieved from http://www.thaiwater.net/current/2017/floodOct2017/floodOct2017.html

[7] Office of the Prime Minister. (2019, January 5). Government News. Retrieved from http://www.thaigov.go.th/news/contents/details/7706

[8] Northeastern Hydro Power Plant. (2018). Water management in the Ubol Ratana Dam. Electricity Generating Authority of Thailand

[9] Secretariat Office of the Chi River Basin Committee. (2012). Management of the Chi River Basin. Water Resource Regional Office 4. Department of Water Resources. Ministry of Natural Resources and Environment

[10] Pruethong, C. (2018). A Study on the impacts of Land Use Change on Flood Peaks of the Lower Nam Phong River Basin and its Sub-basin (Master's Thesis). Khon Kaen University. Khon Kaen. Thailand

[11] Sriboonlue, V. (2009). Hydrology. Faculty of Engineering. Khon Kaen University

[12] Wuttichaikitcharoen, P. (2013). The Prediction of Sediment in the Watershed under Land Use Change using SWAT (Research Report). Rajamangala University of Technology Lanna. Chiang Mai. Thailand

[13] Hydrologic Engineering Center. (2016). Hydrologic Modeling System (HEC-HMS): User's Manual version 4.2. U.S. Army Corps of Engineers. Davis. CA. USA

[14] Hydrologic Engineering Center. (2016). HEC-RAS: River Analysis System: Hydraulic Reference Manual version 5.0. U.S. Army Corps of Engineers. Davis. CA. USA

[15] Eastman, J.R. (2016). Terrset Geospatial Monitoring and Modeling System: Manual. Clark Labs. Clark University. Worcester. MA. USA

[16] Kuntiyawichai, K. (2012). Interactions between Land Use and Flood Management in the Chi River Basin. PhD Thesis. Wageningen University and UNESCO-IHE Institute for Water Education. The Netherlands

[17] Priest, S., Tapsell, S., Penning-Rowsell, E., Viavattene, C., Wilson, T. (2008). Building Models to Estimate Loss of Life for Flood Events. Report number T10-08-10, FLOODsite

[18] Hydrologic Engineering Center. (2001). Hydrologic Modeling System (HEC-HMS): User's Manual version 2.1. U.S. Army Corps of Engineers. Davis. CA. USA

[19] Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M., and Blazkova, S. (2005). Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. Journal of Hydrology. 302(1-4). 46-69

[20] Hydrologic Engineering Center. (2010). HEC-RAS: River Analysis System: User's Manual version 4.1. U.S. Army Corps of Engineers. Davis. CA. USA

[21] Jung, Y., Kim, D., Kim, D., Kim, M., and Lee, S.O. (2014). Simplified flood inundation mapping based on flood elevation-discharge rating curves using satellite images in gauged watersheds. Water. 6. 1280–1299