



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

### โครงการ

*การเชื่อมโยงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน และเหตุการณ์น้ำท่วม ในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่าง: ผลกระทบและความเสียหาย*

*Linking Climate Change, Land Use Change, and Flood Events in the Lower Nam Phong River Basin: Impacts and Damages*

โดย

ผศ.ดร.กิตติเวช ขันติยวิชัย

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เดือน ปี ที่เสร็จโครงการ

เมษายน พ.ศ. 2563

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

### โครงการ

*การเชื่อมโยงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน และเหตุการณ์น้ำท่วม ในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่าง: ผลกระทบและความเสียหาย*

*Linking Climate Change, Land Use Change, and Flood Events in the Lower Nam Phong River Basin: Impacts and Damages*

ผู้วิจัย สังกัด

ผศ.ดร.กิตติเวช ขันตียวิชัย

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และ มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง “การเชื่อมโยงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน และเหตุการณ์น้ำท่วม ในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่าง: ผลกระทบและความเสียหาย” สัญญาเลขที่ MRG6180170 อยู่ภายใต้ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ โดยได้รับการสนับสนุนจาก “สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)” ตามโครงการความร่วมมือกับ “สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา” ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ให้การสนับสนุนทุนแก่โครงการวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนการขอทุนวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ส่งเสริมและอำนวยความสะดวกต่อการดำเนินการตามโครงการวิจัยจนงานสำเร็จลุล่วงตามเป้าหมาย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณนักวิจัยที่ปรึกษาซึ่งประกอบไปด้วย ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ และ รศ.วินัย ศรีอำพร ที่ให้คำปรึกษาในกระบวนการวิจัย ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการเตรียมความพร้อมและรับมือกับสถานการณ์อุทกภัยแก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้องรวมถึงประชาชนที่อาจจะได้รับผลกระทบจากอุทกภัย ซึ่งจะส่งผลดีต่อการพัฒนามาตรการเฝ้าระวังและติดตามอุทกภัยที่มีประสิทธิภาพต่อไป

ผศ.ดร.กิตติเวช ชันติยวิชัย

เมษายน 2563

## สารบัญ

---

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	1
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	3
บทสรุปผู้บริหาร (Executive Summary)	5
✓ ที่มาและความสำคัญของปัญหา-ทบทวนวรรณกรรม	5
✓ วัตถุประสงค์	7
✓ วิธีทดลอง	7
✓ แผนการดำเนินงาน	9
ผลการทดลอง	11
สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	39
เอกสารอ้างอิง	43
Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.	45
ภาคผนวก	47
✓ บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ ฉบับที่ 1	49
✓ บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ ฉบับที่ 2	75



## บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : MRG6180170

ชื่อโครงการ : การเชื่อมโยงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน และเหตุการณ์น้ำท่วม ในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่าง: ผลกระทบและความเสียหาย

ชื่อนักวิจัย และสถาบัน : ผศ.ดร.กิตติเวช ชันติวิชัย

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

อีเมล : kkitti@kku.ac.th, kittiwet@gmail.com, kittiwet\_k@hotmail.com

ระยะเวลาโครงการ : 2 ปี (2 พฤษภาคม พ.ศ. 2561 ถึง 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2563)

**บทคัดย่อ :** ความรุนแรงจากอุทกภัยในเขตพื้นที่ลุ่มแม่น้ำพองตอนล่างยังไม่สามารถประเมินได้อย่างชัดเจน เนื่องจากยังขาดความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ส่งผลต่อการเกิดอุทกภัย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ส่งผลต่อความเสียหายอันเนื่องมาจากการเกิดอุทกภัย ที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์อุทกภัยที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า HEC-HMS ได้รับการสอบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2548 – 2554 และ 2555 – 2560 ตามลำดับ หลังจากนั้นแบบจำลอง HEC-HMS ที่ผ่านการสอบเทียบได้ถูกนำไปใช้ในการสร้างกราฟพลานน้ำท่า (Hydrograph) โดยใช้ข้อมูลปริมาณฝนคาดการณ์ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2563 – 2582 ที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR และ MPI-ESM-LR ของโครงการ CMIP5 ซึ่งถูกย่อส่วน (Downscale) ให้มีขนาดความละเอียดในทางราบประมาณ 50 กิโลเมตร ภายใต้ภาพฉายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแบบใหม่ (RCP 4.5 และ RCP 8.5) ในขณะที่ปริมาณฝนรายวันสูงสุดในอนาคตและปริมาณฝนรายปีในอนาคตที่รอบปีการเกิดซ้ำ 25, 50 และ 100 ปี ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และ 8.5 จะถูกคำนวณออกมาเช่นกัน หลังจากนั้นแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินได้ถูกนำมาใช้ในการคาดการณ์การใช้ประโยชน์ที่ดินในปี พ.ศ. 2582 โดยอาศัยแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2553 และ 2558 ในส่วนของเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) ได้ถูกปรับและนำเสนอสำหรับการคาดการณ์ในอนาคต ในขณะเดียวกันแบบจำลองทางชลศาสตร์ HEC-RAS ยังได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแผนที่น้ำท่วมจากกราฟพลานน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลอง HEC-HMS โดยที่แบบจำลอง HEC-RAS ได้ถูกสอบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2553 และ 2554 ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่า การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการใช้

ประโยชน์ที่ดินจะไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อเหตุการณ์อุทกภัยที่รอบปีการเกิดซ้ำ 25, 50 และ 100 ปี กล่าวคือ พื้นที่อุทกภัยในปี พ.ศ. 2582 ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 จะมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่อุทกภัยของปีฐาน (ปี พ.ศ. 2543 ถึง 2560) ประมาณ 4.97 – 8.59 ตร.กม. ในขณะที่พื้นที่อุทกภัยในปี พ.ศ. 2582 ภายใต้ภาพฉาย RCP 8.5 จะมีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่อุทกภัยของปีฐานประมาณ 0.39 – 5.30 ตร.กม. ในทางตรงกันข้ามความเสียหายจากอุทกภัยภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 (14.84 – 18.02 ล้านดอลลาร์สหรัฐ) จะสูงกว่าความเสียหายจากอุทกภัยของปีฐานประมาณ 4.32 – 5.33 ล้านเหรียญสหรัฐ ในขณะที่ความเสียหายจากอุทกภัยสูงสุดจะพบในกรณีภาพฉาย RCP 8.5 ประมาณ 16.24 – 18.67 ล้านเหรียญสหรัฐ ซึ่งพบว่าพื้นที่เกษตรกรรมจะมีความเปราะบางต่อการเกิดอุทกภัยมากที่สุด โดยจะมีความเสียหายประมาณ 4.50 – 5.44 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ภายใต้ภาพฉาย RCP 4.5 และ 4.94 – 5.72 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ภายใต้ภาพฉาย RCP 8.5 ในขณะที่ความเสียหายของปีฐานจะอยู่ที่ 4.49 – 6.09 ล้านดอลลาร์สหรัฐ โดยสรุป ในระยะสั้น การปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจะมีแนวโน้มที่จะส่งผลกระทบต่อความเสี่ยงจากอุทกภัย ซึ่งจะนำไปสู่การกำหนดยุทธศาสตร์การบรรเทาอุทกภัยที่เหมาะสม

**คำหลัก :** การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ; การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน; ภาพฉายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแบบใหม่; รอบปีการเกิดซ้ำ; ความเสียหายจากอุทกภัย

## Abstract

---

**Project Code :** MRG6180170

**Project Title :** Linking climate change, land use change, and flood events in the lower Nam Phong River Basin: impacts and damages

**Investigator :** Asst.Prof.Dr.Kittiwet Kuntiyawichai

**E-mail Address :** kkitti@kku.ac.th, kittiwet@gmail.com, kittiwet\_k@hotmail.com

**Project Period :** 2 years (2 May 2018 to 1 May 2020)

### **Abstract:**

Flood severity in the lower Nam Phong River Basin is inadequately evaluated since little is known about the impacts of climate and land use changes on floods. Hence, this research aimed to quantify impacts of climate and land use changes on flood damages at different flood occurrences. A HEC-HMS rainfall-runoff model was calibrated and validated for 2005 – 2011 and 2012 – 2017, respectively. Thereafter, the calibrated model was used to generate hydrographs using projected rainfall from CMIP5 (CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, and MPI-ESM-LR), which were downscaled to 50-km resolution for 2020 – 2039, under RCPs 4.5 and 8.5. Future maximum daily and annual rainfall for 25-, 50-, and 100-year return periods under RCPs 4.5 and 8.5, were calculated. The Land Change Modeler model was then applied to predict the 2039 land use based on the 2010 and 2015 maps. The derived adaptive operating rules for future projections was proposed. A hydraulic HEC-RAS model for generating flood inundation maps from hydrographs produced by HEC-HMS, was calibrated and validated for 2010 and 2011, respectively. The changes in climate and land use showed insignificant impacts on flood extents during 25-, 50-, and 100-year flood events, i.e., inundation in 2039 under RCP 4.5 is smaller than baseline (2000–2017) by 4.97–8.59 km<sup>2</sup>, whereas a larger difference of inundation is found for RCP 8.5 (0.39–5.30 km<sup>2</sup>). In contrast, the flood damage under RCP 4.5 (14.84–18.02 million US\$) is higher than the baseline by 4.32–5.33 million US\$, while the highest was found for RCP 8.5 (16.24–18.67 million US\$). The agriculture was the most vulnerable, with a damage of 4.50–5.44 million US\$ in RCP 4.5 and 4.94–5.72 million US\$ in RCP 8.5, whereas baseline damages were 4.49–6.09 million US\$. Finally, for short-term, individual sources of greenhouse gas emissions and

land use alteration are likely to have effects on flood risk, which is subject to appropriate flood mitigation strategies to be implemented.

**Keywords :** Climate change; Land use change; Representative Concentration Pathway; Return period; Flood damage

### 1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา-ทบทวนวรรณกรรม

น้ำท่วมจัดเป็นปัญหาสำคัญที่ทั่วโลกต้องเผชิญอยู่เป็นประจำทุกปี รวมถึงประเทศไทยที่ประสบปัญหาน้ำท่วมในทุกภูมิภาค ไม่ว่าจะเป็นที่ราบภาคกลาง ที่ราบภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งประสบปัญหาน้ำท่วมอยู่บ่อยครั้ง และได้รับความเสียหายเป็นอย่างมาก โดยมีสาเหตุหลักมาจากอิทธิพลของร่องความกดอากาศต่ำกำลังแรงที่พัดผ่านทางภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ประกอบกับลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่พัดปกคลุมทะเลอันดามันและอ่าวไทย ทำให้มีฝนตกหนักและเกิดน้ำท่วมในหลายจังหวัด ส่งผลให้ประชาชนได้รับความเดือดร้อน สิ่งปลูกสร้างและทรัพย์สินของประชาชนได้รับความเสียหาย ในขณะที่ในระยะหลังปัญหาอุทกภัยเริ่มทวีความรุนแรงมากขึ้น และส่งผลให้มูลค่าความเสียหายจากอุทกภัยเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงปลายปี พ.ศ. 2554 ซึ่งประเทศไทยได้ประสบปัญหาอุทกภัยครั้งใหญ่ในรอบ 70 ปี อันมีสาเหตุมาจากอิทธิพลของลมมรสุมและพายุจำนวน 5 ลูก ส่งผลให้เกิดฝนตกหนักเป็นบริเวณกว้างและสะสมต่อเนื่องตลอดทั้งฤดูฝน และทำให้ทางน้ำไม่สามารถรองรับปริมาณน้ำจำนวนมากมหาศาลได้ จึงเกิดการเอ่อล้นเข้าท่วมพื้นที่การเกษตร ที่อยู่อาศัย พาณิชยกรรม และอุตสาหกรรม โดยส่งผลกระทบและความรุนแรงสูงสุดในช่วงระหว่างเดือนตุลาคมถึงพฤศจิกายน สร้างความเสียหายอย่างหนักต่อภาคการเกษตร อุตสาหกรรม รวมถึงเศรษฐกิจและสังคม และยังส่งผลกระทบเป็นลูกโซ่ไปยังภาคส่วนอื่นๆ อีกเป็นจำนวนมาก โดยมีพื้นที่ที่ประสบอุทกภัยและมีการประกาศเป็นพื้นที่ภัยพิบัติกรณีฉุกเฉินตั้งแต่ปลายเดือนกรกฎาคมจนถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2554 รวมทั้งสิ้น 65 จังหวัด ทั้งนี้ มีผู้เสียชีวิต 657 ราย ราษฎรเดือดร้อน 4,039,459 ครัวเรือน 13,425,869 คน บ้านเรือนเสียหายทั้งสิ้น 2,329 หลัง พื้นที่การเกษตรคาดว่าจะได้รับความเสียหาย 11.20 ล้านไร่ (คลังข้อมูลน้ำและภูมิอากาศแห่งชาติ, ม.ป.ป.)

ในส่วน of พื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่างก็ถือว่าเป็นหนึ่งในพื้นที่ที่มักประสบกับปัญหาน้ำท่วมอยู่เป็นประจำ และมีแนวโน้มที่จะทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับในพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่างมีแนวโน้มและทิศทางของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน รวมถึงการขยายตัวของพื้นที่เมืองเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตลอดจนปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกในอนาคต ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดปัญหาน้ำท่วมที่รุนแรงมากกว่าในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจังหวัดขอนแก่น ในปี พ.ศ. 2560 ซึ่งได้รับผลกระทบจากปัญหาอุทกภัยอย่างรุนแรง อันเนื่องมาจากปริมาณฝนที่ตกหนักอย่างต่อเนื่องในพื้นที่จำนวนมากในช่วงระหว่างเดือนกรกฎาคม – ตุลาคม พ.ศ. 2560 ที่ผ่านมา จากข้อมูลของศูนย์ป้องกันวิฤติน้ำ (2560) พบว่าปริมาณฝนสูงสุดที่ตกในเขตจังหวัดขอนแก่นในรอบ 24 ชั่วโมง คือ 108.5 มิลลิเมตร ซึ่งเกิดขึ้นในวันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ. 2560 และส่งผลให้มีปริมาณน้ำสะสมไหลเข้าแหล่งกักเก็บน้ำ โดยเฉพาะเขื่อนอุบลรัตน์ (ตั้งอยู่ตำบลเขื่อนอุบลรัตน์ อำเภออุบลรัตน์ จังหวัดขอนแก่น มีลักษณะเป็น

เขื่อนหินทิ้งแกนดินเหนียว โดยเป็นเขื่อนอเนกประสงค์เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า การชลประทาน การบรรเทาอุทกภัย และการประมง) ซึ่งถือได้ว่ามีปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนมากที่สุดในรอบ 50 ปี เกินความจุเก็บกักและไม่สามารถรองรับน้ำได้อีก ทำให้ต้องมีการเร่งระบายน้ำออกจากเขื่อนเพื่อรักษาเสถียรภาพของเขื่อน และเป็นเหตุให้พื้นที่ที่รับน้ำต่อจากเขื่อนอุบลรัตน์ ได้รับความเดือดร้อนอันเนื่องมาจากปริมาณน้ำในลำน้ำพองที่เอ่อล้นตลิ่งเข้าท่วมพื้นที่การเกษตรและที่อยู่อาศัยบริเวณ 2 ผังของลำน้ำพอง (คลังข้อมูลน้ำและภูมิอากาศแห่งชาติ, 2561 และสำนักเลขาธิการนายกรัฐมนตรี, 2562) ในขณะที่โรงไฟฟ้าพลังน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (2560) รายงานตรงกันว่าปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนอุบลรัตน์ ตลอดทั้งปี 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) นอกจากนี้ยังพบว่าเกือบทุกปี หลายพื้นที่ยังคงประสบปัญหาจากภัยพิบัติที่เกี่ยวข้องกับน้ำและไม่สามารถแก้ไขได้ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพื่อหาแนวทางแก้ไขและรับมือกับภัยพิบัติที่เกี่ยวข้องกับน้ำที่อาจจะเกิดขึ้น โดยเฉพาะในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่าง ซึ่งตั้งอยู่ท้ายเขื่อนอุบลรัตน์ในเขตพื้นที่จังหวัดขอนแก่น อุดรธานี และมหาสารคาม และประสบปัญหาอุทกภัยอยู่เป็นประจำ ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 2,386 ตารางกิโลเมตร โดยมีแม่น้ำพองเป็นแม่น้ำสายหลัก (สำนักงานทรัพยากรน้ำภาค 4, 2555)

จากปัญหาน้ำท่วมที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงเป็นที่มาของการศึกษาและวิจัยเพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ส่งผลให้เกิดปัญหาน้ำท่วม ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาของ Chacuttrikul et al. (2018) ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำลำชี (ลุ่มน้ำสาขาของลุ่มน้ำมูล) จะส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลในลำน้ำในปัจจุบันและอนาคต (ค.ศ. 2022 – 2031) น้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ในขณะที่ผลกระทบจะตรงกันข้ามในกรณีของอดีตจนถึงเกือบปัจจุบัน (ค.ศ. 1986 – 1995) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Singkran et al. (2015) ที่ทำการศึกษาวิจัยในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย และได้ข้อสรุปของการศึกษาออกมาในลักษณะเดียวกันคือ การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและสภาพภูมิอากาศจะกระทบต่อลักษณะทางอุทกวิทยา ซึ่งส่งผลต่อผลผลิตและอัตราการไหลของน้ำท่า การขาดแคลนน้ำ และลักษณะการเกิดอุทกภัย ดังนั้น เพื่อให้เกิดความรู้และความเข้าใจมากยิ่งขึ้นเกี่ยวกับผลกระทบจากอุทกภัย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ส่งผลต่อความเสียหายอันเนื่องมาจากการเกิดอุทกภัยในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่าง

## 2. วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์หลักของการวิจัยนี้ คือ เพื่อประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ส่งผลต่อความเสียหายอันเนื่องมาจากการเกิดอุทกภัยในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่าง

## 3. วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองสำหรับการศึกษาวิจัยดังกล่าวจะประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญที่สามารถสรุปเป็นประเด็นได้ดังนี้

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล ซึ่งข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้จะประกอบด้วยข้อมูล 2 ส่วน ได้แก่

- ข้อมูลอุตุ-อุทกวิทยา จะประกอบด้วย ข้อมูลปริมาณฝนรายวันจำนวน 24 สถานี ช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2543 – 2560 (ค.ศ. 2000 – 2017) ที่รวบรวมได้จากกรมอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลอัตราการไหลรายวันและระดับน้ำรายวันที่ตรวจวัด ณ สถานีวัดน้ำท่า E.22B ช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2548 – 2560 (ค.ศ. 2005 – 2017) ที่รวบรวมได้จากกรมชลประทาน รวมถึงข้อมูลอัตราการไหลของน้ำท่ารายวันเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนอุบลรัตน์ช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2548 – 2560 (ค.ศ. 2005 – 2017) ที่รวบรวมได้จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- ข้อมูลทางกายภาพของลุ่มน้ำ ได้แก่ ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model, DEM) ที่มีความละเอียดทางราบ 5 x 5 ตร.ม. แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน แผนที่ชนิดดิน ที่รวบรวมได้จากกรมพัฒนาที่ดิน รวมถึงข้อมูลรูปตัดขวางลำน้ำของแม่น้ำพอง ทุกๆ ระยะทางประมาณ 1 กิโลเมตร จำนวน 113 รูปตัด ที่สำรวจโดยศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปี พ.ศ. 2552

3.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในอนาคต สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำท่าในอนาคตด้วยแบบจำลอง HEC-HMS โดยอาศัยข้อมูลจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก (Global Climate Model, GCM) ของโครงการ COordinated Regional climate Downscaling EXperiment (CORDEX) ได้แก่ แบบจำลอง CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR และ MPI-ESM-LR ที่ผ่านการย่อส่วนลดขนาดด้วยเทคนิควิธีการลดขนาด (Downscale) ภายใต้ภาพการณ์จำลอง (Scenario) การปล่อยก๊าซเรือนกระจก ได้แก่ RCP 4.5 และ RCP 8.5 (หมายเหตุ: ตัวเลข 4.5 และ 8.5 จะแสดงถึงพลังงานความร้อนระดับต่างๆ ในบรรยากาศที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจก ในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร) และทำการแก้ไขความคลาดเคลื่อนโดยใช้เทคนิคการปรับแต่งข้อมูล (Bias correction) ด้วยเครื่องมือ CMhyd (Climate Model data for hydrologic modeling) โดยเลือกใช้วิธี Linear scaling

### 3.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคต

จะอาศัยแบบจำลอง Land Change Modeler (LCM) เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตบนพื้นฐานของข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน 2 ช่วงเวลา (ปี พ.ศ. 2553 และ 2558) และใช้แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมาวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคต

3.4 การจำลองสภาพทางอุทกวิทยา จะอาศัยแบบจำลอง HEC-HMS สำหรับคำนวณปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำพองตอนล่าง โดยแบ่งช่วงเวลาออกเป็นช่วงอดีตถึงปัจจุบัน (Baseline) (ปี พ.ศ. 2543 – 2560 หรือ ค.ศ. 2000 – 2017) และในอนาคต (ปี พ.ศ. 2563 – 2582 หรือ ค.ศ. 2020 – 2039)

3.5 การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง HEC-HMS จะอาศัยข้อมูลอัตราการไหลรายวัน ณ สถานี E.22B และอัตราการไหลของน้ำท่ารายวันเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนอุบลรัตน์ โดยแบ่งเป็นช่วงปี พ.ศ. 2548 – 2554 (ค.ศ. 2005 – 2011) สำหรับการสอบเทียบแบบจำลอง และช่วงปี พ.ศ. 2555 – 2560 (ค.ศ. 2012 – 2017) สำหรับการตรวจสอบแบบจำลอง และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination,  $R^2$ ) และค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) (Nash and Sutcliffe, 1970) สำหรับการประเมินผลการสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง HEC-HMS

3.5 การวิเคราะห์ความถี่ด้วยวิธีของกัมเบล (Gumbel distribution) สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณฝนสูงสุดรายวันและปริมาณฝนรายปี ที่รอบปีการเกิดซ้ำ 25 ปี 50 ปี และ 100 ปี

3.6 การจำลองสภาพทางชลศาสตร์ จะอาศัยแบบจำลอง HEC-RAS สำหรับจำลองสภาพการไหลทั้งในแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ และนำไปสู่การสร้างแผนที่แสดงพื้นที่น้ำท่วม

3.7 การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง HEC-RAS จะอาศัยข้อมูลระดับน้ำรายวัน ณ สถานี E.22B โดยจะทำการสอบเทียบในช่วงเดือนสิงหาคมถึงธันวาคม พ.ศ. 2553 (ค.ศ. 2010) และตรวจสอบแบบจำลองช่วงเดือนเดียวกันของปี พ.ศ. 2554 (ค.ศ. 2011) และจะอาศัย  $R^2$  และค่า NSE ในการประเมินผลการสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง HEC-RAS เช่นเดียวกัน ในส่วนของการสอบเทียบและตรวจสอบขอบเขตพื้นที่น้ำท่วม จะประเมินผลจากค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error, RE) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนความถูกต้องของขนาดขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมที่ได้จากแบบจำลอง เมื่อเทียบกับขนาดขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมจากภาพถ่ายดาวเทียม และค่า F-statistics ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงเปอร์เซ็นต์การทับซ้อนกันของพื้นที่น้ำท่วมจากแบบจำลองและจากภาพถ่ายดาวเทียม

3.8 การประเมินผลกระทบความเสียหายจากน้ำท่วม จะพิจารณาในรูปของความสัมพัทธ์ระหว่างความเสียหายจากน้ำท่วมกับความลึกของน้ำท่วมและระยะเวลาที่น้ำท่วม โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน 1) ความเสียหายโดยตรง (Direct flood damage) ต่อการใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทที่อยู่อาศัย พาณิชยกรรม อุตสาหกรรม และเกษตรกรรม และ 2) ความเสียหายโดยอ้อม (Indirect flood damage)



3.10 การประเมินความเสี่ยงจากอุทกภัย จะเป็นวิธีการระบุลักษณะความรุนแรงและโอกาสของการเกิดผลกระทบจากอุทกภัย ซึ่งความเสี่ยงจากอุทกภัยจะเป็นฟังก์ชันของภัย (Hazard) และความเปราะบาง (Vulnerability) โดยอาศัยข้อมูลผลลัพธ์ความลึกน้ำท่วมสูงสุด และความเร็วการไหลของน้ำท่วม จากแบบจำลอง HEC-RAS ร่วมกับแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน

#### 4. แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานของการศึกษาวิจัยดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังตารางด้านล่าง

ที่	กิจกรรม	ปีที่ 1												ปีที่ 2											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	การเก็บรวบรวมข้อมูล ได้แก่ ข้อมูลอุทกวิทยา และข้อมูลทางกายภาพของลุ่ม	■																							
2	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในอนาคต		■	■																					
3	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคต				■	■																			
4	การจำลองสภาพทางอุทกวิทยา ด้วยแบบจำลอง HEC-HMS						■	■	■																
5	การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง HEC-HMS									■	■														
6	การวิเคราะห์ความถี่ด้วยวิธีของกัมเบล (Gumbel distribution) สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณฝนสูงสุดรายวันและปริมาณฝนรายปี ที่รอบปีการเกิดซ้ำ 25 ปี 50 ปี และ 100 ปี												■	■	■										
7	การจำลองสภาพทางชลศาสตร์ ด้วยแบบจำลอง HEC-RAS													■	■	■									
8	การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง HEC-RAS																■	■							
9	การประเมินผลกระทบความเสียหายจากน้ำท่วม																		■	■	■	■			
10	การประเมินความเสี่ยงจากอุทกภัย																							■	■

ผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาวิจัยดังกล่าว สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังนี้

## 1. แบบจำลองภูมิอากาศ

### 1.1 แบบจำลองภูมิอากาศโลก (GCM) และแบบจำลองภูมิอากาศระดับภูมิภาค (RCM)

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในอนาคต จะนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำทำในอนาคตด้วยแบบจำลอง HEC-HMS โดยที่การดำเนินการจะเริ่มจากการดาวน์โหลดข้อมูลภูมิอากาศในอนาคตที่มีความละเอียดสูงสำหรับพื้นที่ในเขตภูมิภาคเอเชียจากการวิจัยสร้างข้อมูลสภาพจำลองภูมิอากาศในอนาคตในโครงการ COordinated Regional climate Downscaling EXperiment (CORDEX) ซึ่งในการศึกษานี้ได้เลือกใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลก (GCM) จำนวน 3 แบบจำลอง ประกอบด้วย แบบจำลอง CNRM-CM5 แบบจำลอง IPSL-CM5A-MR และแบบจำลอง MPI-ESM-LR โดยที่แต่ละแบบจำลองจะพิจารณาภาพการณ์จำลอง (Scenario) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกแบบใหม่ที่เรียกว่า “Representative Concentration Pathways (RCPs)” โดยแสดงถึงปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยออกมาแต่ละปีในอนาคต 2 ภาพการณ์จำลอง ได้แก่ RCP 4.5 และ RCP 8.5 ดังแสดงรายละเอียดของแต่ละแบบจำลองภูมิอากาศในตารางที่ 1

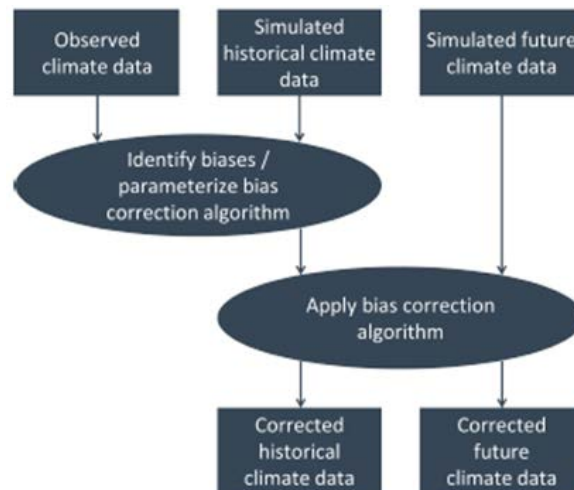
ตารางที่ 1 แบบจำลองภูมิอากาศที่ใช้ในการศึกษา

No.	Driving GCM				RCM			
	Name	Resolution (km)	Scenario	Institute, Country	Name	Resolution (km)	Scenario	Institute, Country
1	CNRM-CM5	155x155	RCP 4.5 RCP 8.5	CNRM-ERFACS, France	RCA4	50x50	RCP 4.5 RCP 8.5	SMHI, Sweden
2	IPSL-CM5A-MR	275x275	RCP 4.5 RCP 8.5	IPSL, France	RCA4	50x50	RCP 4.5 RCP 8.5	SMHI, Sweden
3	MPI-ESM-LR	210x210	RCP 4.5 RCP 8.5	MPI-M, Germany	RCA4	50x50	RCP 4.5 RCP 8.5	SMHI, Sweden

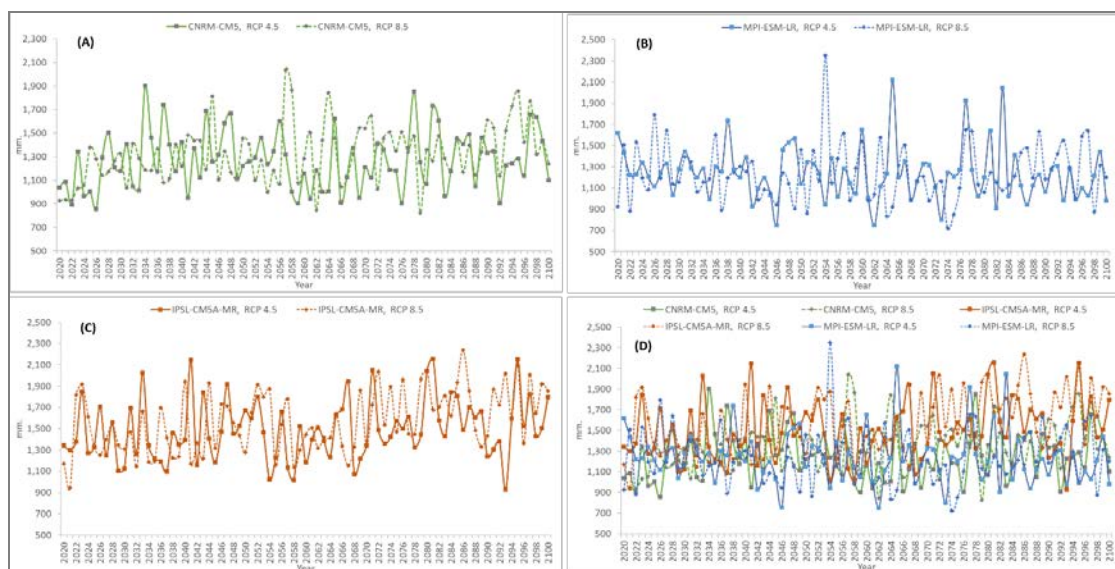
### 1.2 การปรับแก้แบบจำลองภูมิอากาศ (Bias correction)

การปรับแก้แบบจำลองภูมิอากาศ (Bias correction) ได้เลือกใช้เครื่องมือที่เรียกว่า CMhyd (Climate Model data for hydrologic modeling) โดยเลือกใช้วิธี Linear scaling ในการ

ปรับแก้ความคลาดเคลื่อน เพื่อให้ได้ข้อมูลภูมิอากาศที่เป็นตัวแทนของสถานีตรวจวัดในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนบนและตอนล่าง (จำนวน 24 สถานีวัดน้ำฝน) ซึ่งขั้นตอนการปรับแต่งข้อมูลด้วยเครื่องมือ CMhyd สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 1 โดยหลังจากการปรับแต่งข้อมูลจะทำให้ได้ผลลัพธ์ในรูปของค่าเฉลี่ยของปริมาณฝนรายปีของลุ่มน้ำพองของแต่ละแบบจำลองภูมิอากาศในอนาคตดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 ขั้นตอนการปรับแต่งข้อมูล (Bias correction) ด้วยเครื่องมือ CMhyd (Rathjens, et al. 2016)



รูปที่ 2 ปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยของลุ่มน้ำพองในอนาคต ช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2563 – 2643 (ค.ศ. 2020 – 2100) (A) กรณีแบบจำลองภูมิอากาศ CNRM-CM5, (B) กรณีแบบจำลองภูมิอากาศ MPI-ESM-LR, (C) กรณี แบบจำลองภูมิอากาศ IPSL-CM5A-MR, (D) กรณี แบบจำลองภูมิอากาศ CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR และ MPI-ESM-LR

## 2. การวิเคราะห์ความถี่ (Frequency analysis)

ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝน จะแบ่งการวิเคราะห์เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณฝนสูงสุดรายวันและปริมาณฝนรายปี ที่รอบปีการเกิดซ้ำต่างๆ สำหรับการศึกษาจะทำการวิเคราะห์โดยแบ่งช่วงระยะเวลาออกเป็นช่วงอดีตถึงปัจจุบัน (Baseline) (ช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2543 – 2560 (ค.ศ. 2000 – 2017) ส่วนกรณีสภาพอนาคตจะใช้ผลลัพธ์ของข้อมูลจากแบบจำลองภูมิอากาศ 3 แบบจำลอง (CNRM-CM5m, IPSL-CM5A-MR, MPI-ESM-LR) ซึ่งจะต้องผ่านการปรับแต่งข้อมูล (Bias correction) ด้วยแบบจำลอง CMhyd และทำการวิเคราะห์ความถี่ (Frequency analysis) ข้อมูลฝนสูงสุดรายวันด้วยวิธีของกัมเบล (Gumbel distribution) ที่รอบปีการเกิดซ้ำ 25 ปี 50 ปี และ 100 ปี โดยมีผลการวิเคราะห์ปริมาณฝนสูงสุดรายวันของกลุ่มน้ำพองเฉลี่ยของแบบจำลองภูมิอากาศภายใต้ 2 ภาพการณ์จำลอง ได้แก่ RCP 4.5 และ RCP 8.5 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2 ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยของแบบจำลองภูมิอากาศภายใต้ภาพการณ์จำลอง RCP 4.5 และ RCP 8.5 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณฝนสูงสุดรายวันของกลุ่มน้ำพอง เฉลี่ยของทั้ง 3 แบบจำลอง ภูมิอากาศเทียบกับ Baseline

Period	Scenario	Rainfall peak (mm/day)					
		25yr	Relative change (%)	50yr	Relative change (%)	100yr	Relative change (%)
2000-2017		109.2		115.1		120.9	
2020-2039	RCP 4.5	129.4	18.5	143.8	24.9	158.1	30.7
	RCP 8.5	119.2	9.1	130.7	13.5	142.1	17.5
2040-2069	RCP 4.5	139.4	27.7	154.5	34.2	169.5	40.2
	RCP 8.5	186.7	71.0	211.6	83.8	236.3	95.4
2070-2099	RCP 4.5	158.4	45.0	176.9	53.7	195.3	61.5
	RCP 8.5	163.8	50.0	181.6	57.8	199.4	64.9

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณฝนสูงสุดรายปีของกลุ่มน้ำพอง เฉลี่ยของทั้ง 3 แบบจำลอง ภูมิอากาศเทียบกับ Baseline

Period	Scenario	Annual rainfall (mm/year)					
		25yr	Relative change (%)	50yr	Relative change (%)	100yr	Relative change (%)
2000-2017		1,861.5		1,994.6		2,126.7	
2020-2039	RCP 4.5	1,783.4	-4.2	1,911.3	-4.2	2,038.4	-4.2
	RCP 8.5	1,727.4	-7.2	1,848.6	-7.3	1,968.9	-7.4

Period	Scenario	Annual rainfall (mm/year)					
		25yr	Relative change	50yr	Relative change	100yr	Relative change
			(%)		(%)		(%)
2040-2069	RCP 4.5	1,856.6	-0.3	2,003.2	0.4	2,148.8	1.0
	RCP 8.5	1,936.8	4.0	2,091.8	4.9	2,245.7	5.6
2070-2099	RCP 4.5	1,907.8	2.5	2,051.2	2.8	2,193.5	3.1
	RCP 8.5	1,957.8	5.2	2,090.6	4.8	2,222.4	4.5

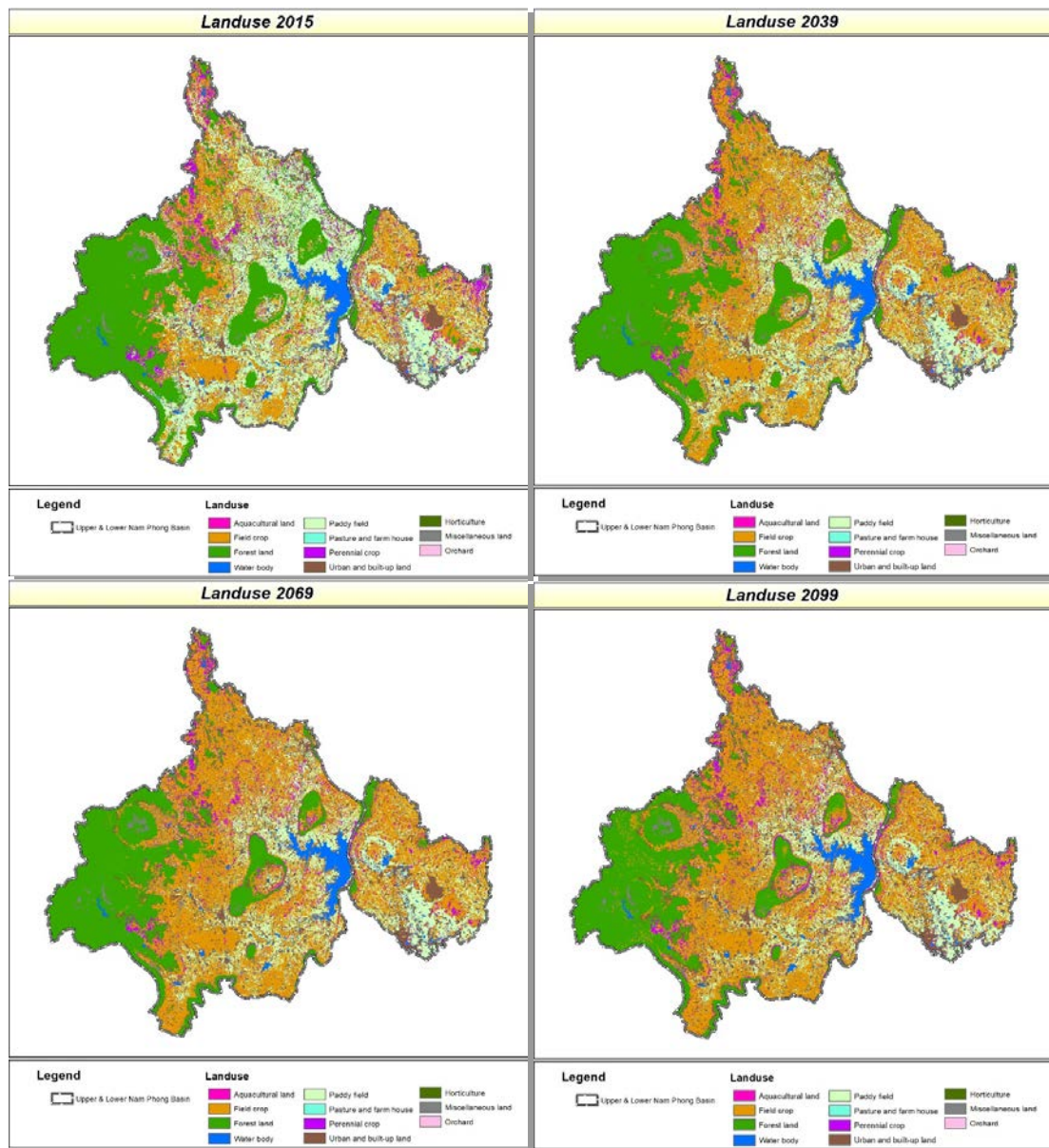
### 3. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคต

ในการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำท่าด้วยแบบจำลอง HEC-HMS จำเป็นจะต้องนำเข้าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการกระบวนการเกิดน้ำท่า ซึ่งข้อมูลที่จำเป็นสำหรับใช้ประกอบการพิจารณาค่าพารามิเตอร์จะเป็นข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ดังนั้นการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำท่าในอนาคต จะต้องนำข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตมาใช้ในการประกอบการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ด้วย

สำหรับการศึกษานี้ จะทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตโดยอาศัย แบบจำลอง Land Change Modeler (LCM) ซึ่งเป็นแบบจำลองย่อยของแบบจำลอง TerrSet โดยที่แบบจำลองดังกล่าวจะใช้ในการวิเคราะห์แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตบนพื้นฐานของข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน 2 ช่วงเวลา คือ ปี พ.ศ. 2553 และ 2558 (อดีตและปัจจุบัน) และใช้แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมาวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคต ซึ่งได้ผลลัพธ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคต ดังตารางที่ 4 และรูปที่ 3

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตเทียบกับปี พ.ศ. 2558 (ค.ศ. 2015)

No.	Land use	Year 2015	Year 2039		Year 2069		Year 2099	
		Area	Area	Change	Area	Change	Area	Change
		(km <sup>2</sup> )	(km <sup>2</sup> )	(km <sup>2</sup> )	(km <sup>2</sup> )	(km <sup>2</sup> )	(km <sup>2</sup> )	(km <sup>2</sup> )
1	Aquacultural land	13.12	13.12	0.00	13.12	0.00	13.12	0.00
2	Field crop	3,582.42	5,385.74	1,803.32	6,035.40	2,452.98	6,259.52	2,677.10
3	Forest land	4,505.61	4,005.04	-500.57	3,500.41	-1,005.20	3,099.86	-1,405.75
4	Horticulture	13.80	13.80	0.00	13.80	0.00	13.80	0.00
5	Miscellaneous land	557.42	525.48	-31.94	509.87	-47.55	499.34	-58.08
6	Orchard	102.18	102.18	0.00	102.18	0.00	102.18	0.00
7	Paddy field	4,045.56	2,767.16	-1,278.40	2,239.63	-1,805.93	2,040.98	-2,004.58
8	Pasture and farm house	19.74	19.74	0.00	19.74	0.00	19.74	0.00
9	Perennial crop	827.59	566.32	-261.27	668.26	-159.33	785.28	-42.31
10	Urban and built-up land	757.36	1,026.22	268.86	1,322.39	565.03	1,590.98	833.62
11	Water body	613.73	613.73	0.00	613.73	0.00	613.73	0.00
Total		15,038.53	15,038.53		15,038.53		15,038.53	



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตเทียบกับปี พ.ศ. 2558 (ค.ศ. 2015)

#### 4. การศึกษาแบบจำลองอุทกวิทยา

การศึกษานี้ได้เลือกใช้แบบจำลอง HEC-HMS ในการหาปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำพองตอนล่าง โดยแบบจำลอง HEC-HMS ซึ่งย่อมาจาก Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System พัฒนาขึ้นโดย U.S. Army Corp of Engineers เป็นแบบจำลองที่ออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับจำลองกระบวนการทางอุทกวิทยาของระบบโครงข่ายลุ่มน้ำ ซึ่งประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ทางอุทกวิทยาต่างๆ ได้แก่ Infiltration, Unit hydrograph และ Hydrologic routing นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยกระบวนการที่สำคัญสำหรับความต่อเนื่องในการจำลองสภาพ ได้แก่ Evapotranspiration, Snowmelt และ Soil moisture accounting

ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง HEC-HMS จะอยู่ในรูปแบบของไฟล์ HEC-DSS (Data Storage System) ซึ่งสามารถที่จะนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเชื่อมต่อกับแบบจำลองอื่นๆ ในตระกูล HEC ได้ โดยในการศึกษานี้จะนำผลลัพธ์ปริมาณน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลอง HEC-HMS ไปเป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับแบบจำลอง HEC-RAS ขั้นตอนหลักๆ ในการสร้างแบบจำลอง HEC-HMS มีดังต่อไปนี้

#### 4.1 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์

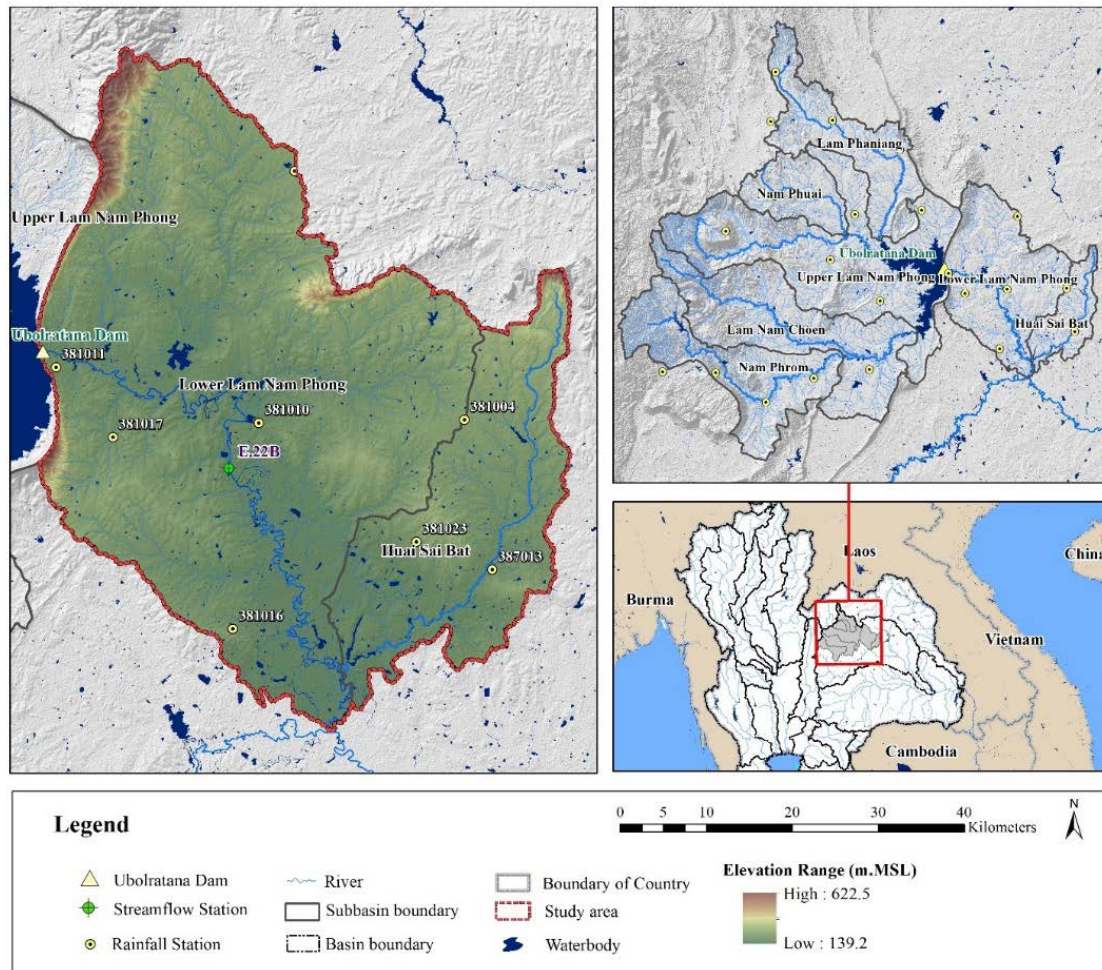
ในการศึกษานี้ การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง HEC-HMS สำหรับลุ่มน้ำพองตอนล่าง ได้ทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญทั้งใน Subbasin และ Reach จำนวน 9 ตัวแปร ซึ่งประกอบด้วย 1) Canopy: Max. Storage 2) Surface: Max. Storage 3) Loss: Initial loss 4) Loss: Constant Rate 5) Transform: Lag time 6) Baseflow: Recession Constant 7) Baseflow: Ratio of Peak 8) Routing: K และ 9) Routing: X

โดยการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงผลลัพธ์ในรูปของอัตราการไหลสูงสุด (Peak discharge) และปริมาณน้ำท่า (Runoff volume) ณ ตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่า E.22B ซึ่งตั้งอยู่ในลำน้ำพองบ้านท่าเมา อ.น้ำพอง จ.ขอนแก่น ดังแสดงตำแหน่งในรูปที่ 4 โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ทั้ง 9 ตัวแปรจากค่าเริ่มต้นที่นำไปในแบบจำลอง HEC-HMS ให้ลดลงจากเดิม -75%, -50%, -30%, -20%, -10%, -5% และเพิ่มขึ้นจากเดิม 5%, 10%, 20%, 30%, 50% และ 75% ซึ่งได้ผลลัพธ์ที่แสดงถึงความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลสูงสุดและปริมาณน้ำท่าดังนี้

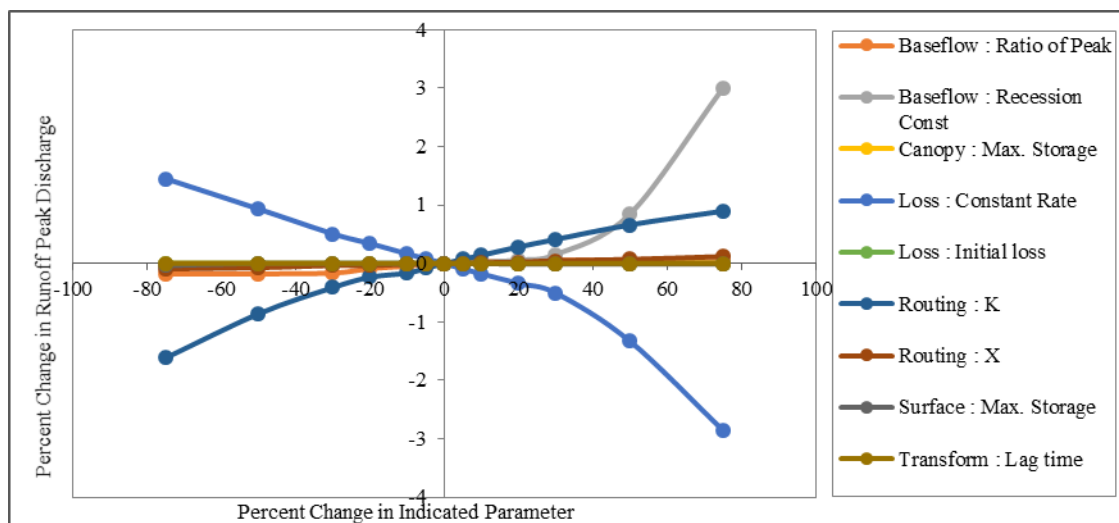
#### 4.2 ความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ต่ออัตราการไหลสูงสุด (Peak discharge)

ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ต่ออัตราการไหลสูงสุด แสดงได้ดังรูปที่ 5 โดยจากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ Loss : Constant Rate จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลลัพธ์ในรูปของอัตราการไหลสูงสุดมากที่สุด โดยที่เมื่อลดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวลงจะส่งผลให้ผลลัพธ์ในรูปของอัตราการไหลสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามหากมีการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวก็จะส่งผลให้อัตราการไหลสูงสุดมีแนวโน้มลดลง





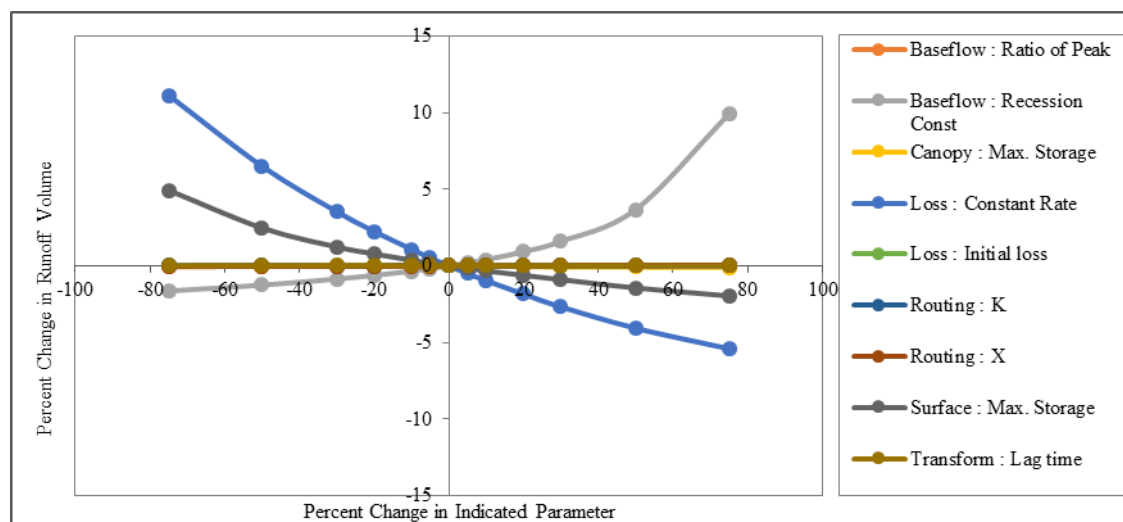
รูปที่ 4 ตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่า E.22B และขอบเขตลุ่มน้ำพองตอนล่าง



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลสูงสุด (Peak discharge) ณ สถานีวัดน้ำท่า E.22B  
ความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ต่อปริมาณน้ำท่า (Runoff volume)



ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ต่อปริมาณน้ำท่าแสดงได้ดังและรูปที่ 6 โดยจากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ Loss : Constant Rate จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลลัพธ์ในรูปของปริมาณน้ำท่ามากที่สุด โดยพบว่าเมื่อลดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวลงจะส่งผลให้ผลลัพธ์ในรูปของปริมาณน้ำท่ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามหากมีการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวก็จะส่งผลให้ผลลัพธ์ในรูปของปริมาณน้ำท่ามีแนวโน้มลดลง

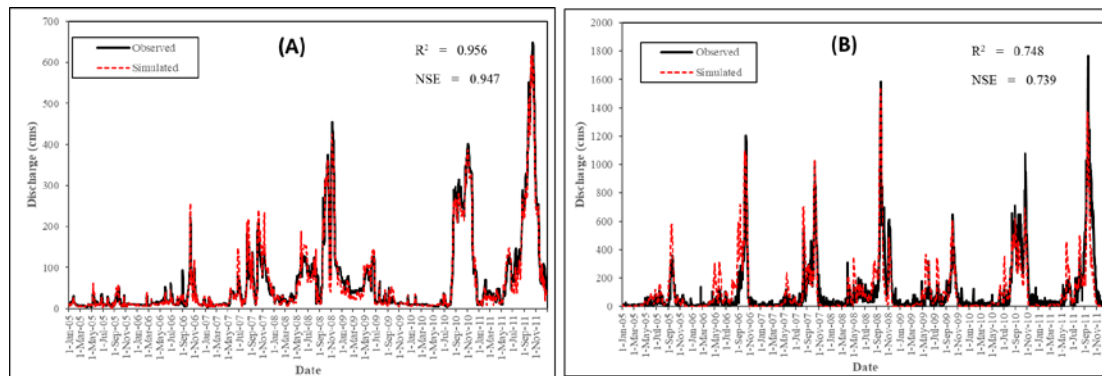


รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลสูงสุด (Peak discharge) ณ สถานีวัดน้ำท่า E.22B

#### 4.3 การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง HEC-HMS

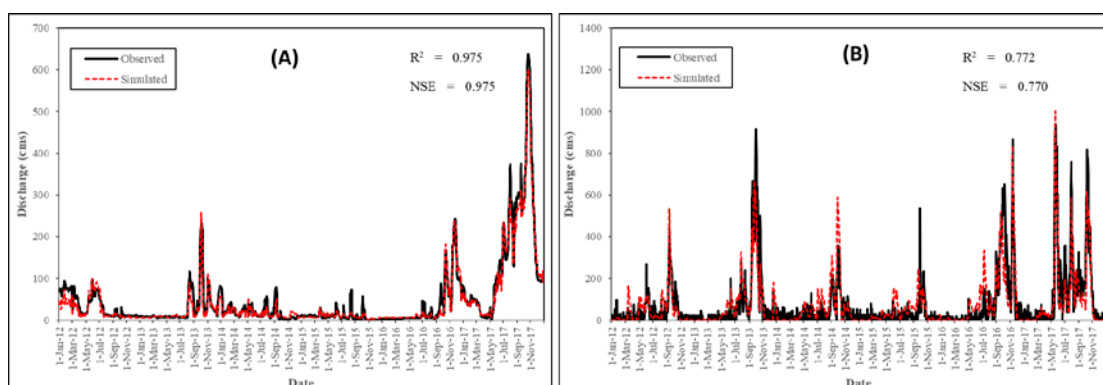
การสอบเทียบแบบจำลอง HEC-HMS จะใช้ข้อมูลอัตราการไหลรายวันที่ตรวจวัด ณ สถานีวัดน้ำท่า E.22B และอัตราการไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนอุบลรัตน์ ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2548 – 2554 (ระยะเวลา 7 ปี) โดยทำการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่ออัตราการไหล จนกระทั่งได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination,  $R^2$ ) และค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) อยู่ในเกณฑ์ที่ดีและยอมรับได้ตามมาตรฐานสากล นั่นคือ ค่า  $R^2$  มีค่าไม่น้อยกว่า 0.60 และค่า NSE มีค่าไม่น้อยกว่า 0.50 (Santhi et al., 2001; Moriasi et al. 2007)

ผลการสอบเทียบแบบจำลอง HEC-HMS โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สามารถสรุปค่าทางสถิติ ( $R^2$  และ NSE) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลที่คำนวณได้จากแบบจำลอง HEC-HMS และอัตราการไหลที่ได้จากการตรวจวัด ณ สถานีวัดน้ำท่า E.22B และอัตราการไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนอุบลรัตน์ ได้ดังรูปที่ 7 ซึ่ง ณ สถานีวัดน้ำท่า E.22B ให้ค่าทางสถิติ  $R^2$  และ NSE เท่ากับ 0.956 และ 0.947 ตามลำดับ ส่วนการสอบเทียบอัตราการไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนอุบลรัตน์ ให้ค่าทางสถิติ  $R^2$  และ NSE เท่ากับ 0.748 และ 0.739 ตามลำดับ



**รูปที่ 7** การสอบเทียบแบบจำลอง HEC-HMS ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2548 – 2554: (A) ณ สถานีวัดน้ำท่า E.22B และ (B) อัตราการไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนอุบลรัตน์

ในส่วนของการตรวจสอบแบบจำลอง HEC-HMS จะเป็นการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ถูกปรับแก้ในขั้นตอนของการสอบเทียบแบบจำลอง HEC-HMS โดยจะเป็นการนำชุดของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง HEC-HMS โดยในการศึกษานี้ได้กำหนดช่วงเวลาของการตรวจสอบแบบจำลองเป็นระยะเวลา 6 ปี (ปี พ.ศ. 2555 – 2560) ซึ่งในการตรวจสอบแบบจำลองโดยใช้อัตราการไหลรายวัน ณ สถานีวัดน้ำท่า E.22B ได้ผลลัพธ์ในรูปของค่าทางสถิติ  $R^2$  และ NSE เท่ากับ 0.975 และ 0.975 ตามลำดับ ในขณะที่การตรวจสอบแบบจำลองโดยใช้อัตราการไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนอุบลรัตน์ ได้ผลลัพธ์ในรูปของค่าทางสถิติ  $R^2$  และ NSE เท่ากับ 0.772 และ 0.770 ตามลำดับ ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 8 ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลที่คำนวณได้จากแบบจำลอง HEC-HMS และอัตราการไหลที่ได้จากการตรวจวัด ณ สถานีวัดน้ำท่า E.22B และอัตราการไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนอุบลรัตน์อยู่ในเกณฑ์ที่ดีและยอมรับได้ ซึ่งจะเป็นการยืนยันถึงประสิทธิภาพของแบบจำลอง HEC-HMS ที่สร้างขึ้นสำหรับการจำลองสถานการณ์ต่างๆ ในอนาคต รวมถึงให้ผลการจำลองสภาพทางอุทกวิทยาที่มีความน่าเชื่อถือและถูกต้อง



**รูปที่ 8** การตรวจสอบแบบจำลอง HEC-HMS ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2555 – 2560: (A) ณ สถานีวัดน้ำท่า E.22B และ (B) อัตราการไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนอุบลรัตน์

#### 4.4 การวิเคราะห์อัตราการไหลสูงสุดกรณีสภาพปัจจุบันและอนาคตที่รอบปีการเกิดซ้ำต่างๆ

จากการนำเข้าข้อมูลปริมาณฝนสูงสุดและปริมาณฝนรายปีของแต่ละแบบจำลองภูมิอากาศ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2 และ 3 รวมถึงนำเข้าข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตเข้าสู่แบบจำลอง HEC-HMS เพื่อทำการจำลองสภาพสำหรับแต่ละกรณีจำลองต่างๆ ได้ผลลัพธ์ในรูปของอัตราการไหลสูงสุดรายวันสูงสุดเฉลี่ย ณ จุดทางออกของกลุ่มน้ำพอง ทั้ง 3 แบบจำลองภูมิอากาศ (CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, MPI-ESM-LR) ในแต่ละ RCP ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 อัตราการไหลสูงสุดเฉลี่ยของทั้งแบบจำลองภูมิอากาศ ณ จุดทางออกของกลุ่มน้ำพองตอนล่าง สำหรับแต่ละกรณีจำลอง

Period	Scenario	Average peak outflow (m <sup>3</sup> /s)					
		25yr	Relative change (%)	50yr	Relative change (%)	100yr	Relative change (%)
2000-2017	Baseline	1,051.6		1,169.0		1,273.6	
2020-2039	RCP 4.5	909.6	-13.5%	1,017.4	-13.0%	1,112.3	-12.7%
	RCP 8.5	1,162.7	10.6%	1,299.5	11.2%	1,436.5	12.8%

#### 5. การศึกษาแบบจำลองอุทกศาสตร์

การศึกษานี้จะอาศัยแบบจำลอง HEC-RAS version 5.0.6 สำหรับการวิเคราะห์พื้นที่น้ำท่วมในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่าง ทั้งนี้แบบจำลอง HEC-RAS ย่อมาจาก Hydrologic Engineering Center - River Analysis System ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย U.S. Army Corp of Engineers เพื่อเป็นเครื่องมือสำหรับการจำลองสภาพการไหลแบบ Steady flow ในแบบ 1 มิติ และจำลองสภาพการไหลแบบ Unsteady flow ทั้งในแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ

##### 5.1 การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง HEC-RAS

การสอบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสำหรับการศึกษานี้แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ 1) การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลองในรูปแบบของข้อมูลอนุกรมเวลา (Time series data) จะเป็นการสอบเทียบและตรวจสอบค่าระดับน้ำ ณ สถานีวัดน้ำท่า E.22B และ 2) การสอบเทียบและตรวจสอบขอบเขตพื้นที่น้ำท่วม โดยในส่วนของ การสอบเทียบและตรวจสอบขอบเขตพื้นที่น้ำท่วม จะพิจารณาจากค่าความสัมพันธ์ของข้อมูลเชิงพื้นที่ระหว่างข้อมูลขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียมของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) (GISTDA) และขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมที่

ได้จากแบบจำลอง HEC-RAS โดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error, RE) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนความถูกต้องของขนาดขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมที่ได้จากแบบจำลองเมื่อเทียบกับขนาดขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมจากภาพถ่ายดาวเทียม ดังแสดงรายละเอียดในสมการที่ 1 และค่า F-statistics ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงเปอร์เซ็นต์การทับซ้อนกันของพื้นที่น้ำท่วมจากแบบจำลองและจากภาพถ่ายดาวเทียม ดังแสดงรายละเอียดในสมการที่ 2

$$RE = \frac{|A_o - A_p|}{A_o} \quad (1)$$

$$F = \left( \frac{A_{op}}{A_o + A_p - A_{op}} \right) \times 100 \quad (2)$$

โดยที่

- RE คือ ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์
- $A_o$  คือ พื้นที่น้ำท่วมจากภาพถ่ายดาวเทียม
- $A_p$  คือ พื้นที่น้ำท่วมจากการจำลองสภาพ
- F คือ ค่า F-statistics
- $A_{op}$  คือ พื้นที่ซ้อนทับของพื้นที่น้ำท่วมจากภาพถ่ายดาวเทียมและจากการจำลองสภาพ

## 5.2 ผลการสอบเทียบแบบจำลอง HEC-RAS

การสอบเทียบแบบจำลอง HEC-RAS จะดำเนินการโดยการปรับแก้ค่า Manning's n ของลำน้ำและพื้นที่ราบริมฝั่งลำน้ำ (ใน 2D area) ซึ่งจากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การสอบเทียบแบบจำลองจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การสอบเทียบค่าระดับน้ำและการสอบเทียบขอบเขตพื้นที่น้ำท่วม โดยมีรายละเอียดและผลลัพธ์ของการสอบเทียบดังต่อไปนี้

### การสอบเทียบค่าระดับน้ำ

การสอบเทียบแบบจำลอง HEC-RAS โดยใช้ค่าระดับน้ำ จะทำการสอบเทียบ ณ สถานีวัดน้ำท่า E.22B ในช่วงระหว่างเดือนสิงหาคมถึงธันวาคม พ.ศ. 2553 (ค.ศ. 2010) ดังแสดงผลลัพธ์ในรูปที่ 9 และได้ค่าทางสถิติ  $R^2$  และ NSE ของการเปรียบเทียบค่าระดับน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลอง HEC-RAS กับค่าระดับน้ำที่ได้จากการตรวจวัดเท่ากับ 0.879 และ 0.824 ตามลำดับ ซึ่งค่าทางสถิติ  $R^2$  และ NSE ที่มากกว่า 0.500 จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับน้ำที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดีมากและยอมรับได้ตามมาตรฐานสากล (Moriassi et al., 2007)

### การสอบเทียบขอบเขตพื้นที่น้ำท่วม

การสอบเทียบแบบจำลอง HEC-RAS โดยใช้ขอบเขตพื้นที่น้ำท่วม จะทำการสอบเทียบโดยใช้ข้อมูลขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมของ

GISTDA ปี พ.ศ. 2553 (ค.ศ. 2010) เปรียบเทียบกับขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมสูงสุดที่ได้จากแบบจำลอง HEC-RAS ปี พ.ศ. 2553 (ค.ศ. 2010) และใช้ค่าความสัมพันธ์ของข้อมูลเชิงพื้นที่ Relative Error (RE) และ F-statistics (สมการที่ 1 และ 2) สำหรับการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง HEC-RAS โดยที่พื้นที่น้ำท่วมสูงสุดที่ได้จากแบบจำลอง HEC-RAS และพื้นที่น้ำท่วมสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมของ GISTDA ปี พ.ศ. 2553 (ค.ศ. 2010) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 และได้ค่าความสัมพันธ์ของข้อมูลเชิงพื้นที่ Relative Error (RE) และ F-statistics เท่ากับ 0.05 และ 43.55% ตามลำดับ ทั้งนี้ ค่า RE ที่มีค่าน้อย และค่า F ที่มีค่ามาก จะแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันของขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมสูงสุดจากภาพถ่ายดาวเทียมและจากการจำลองสภาพ (Jung et al., 2014) ซึ่งจะช่วยให้ยืนยันถึงความถูกต้องและน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสภาพด้วยแบบจำลอง HEC-RAS สำหรับนำไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ในอนาคตต่อไป

### 5.3 ผลการตรวจสอบแบบจำลอง HEC-RAS

การตรวจสอบแบบจำลอง HEC-RAS จะดำเนินการโดยการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองมาใช้ในการคำนวณในแบบจำลอง HEC-RAS เพื่อเป็นการยืนยันถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่จัดสร้างขึ้น ซึ่งจะแบ่งการตรวจสอบออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การตรวจสอบค่าระดับน้ำ และการตรวจสอบขอบเขตพื้นที่น้ำท่วม โดยมีรายละเอียดและผลลัพธ์ของการตรวจสอบดังต่อไปนี้

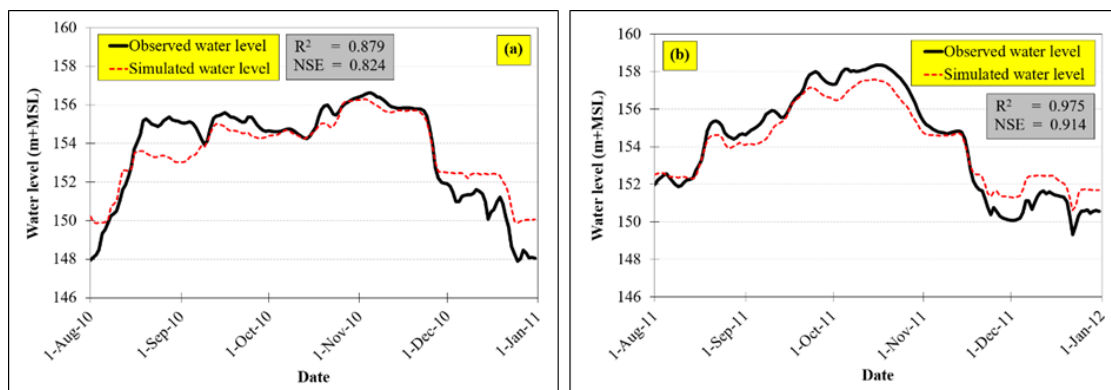
#### การตรวจสอบค่าระดับน้ำ

การตรวจสอบแบบจำลอง HEC-RAS โดยใช้ค่าระดับน้ำ จะทำการตรวจสอบ ณ สถานีวัดน้ำท่า E.22B ในช่วงเดือนสิงหาคมถึงธันวาคม ปี พ.ศ. 2554 (ค.ศ. 2011) ดังแสดงผลลัพธ์ในรูปที่ 9 และได้ค่าทางสถิติ  $R^2$  และ NSE ของการเปรียบเทียบค่าระดับน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลอง HEC-RAS กับค่าระดับน้ำที่ได้จากการตรวจวัดเท่ากับ 0.975 และ 0.914 ตามลำดับ ซึ่งค่าทางสถิติที่มากกว่า 0.500 จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับน้ำที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดีมากและยอมรับได้ตามมาตรฐานสากล (Moriasi et al., 2007) อีกทั้งยังเป็นการยืนยันว่าแบบจำลอง HEC-RAS ที่จัดสร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ในอนาคตต่อไปได้

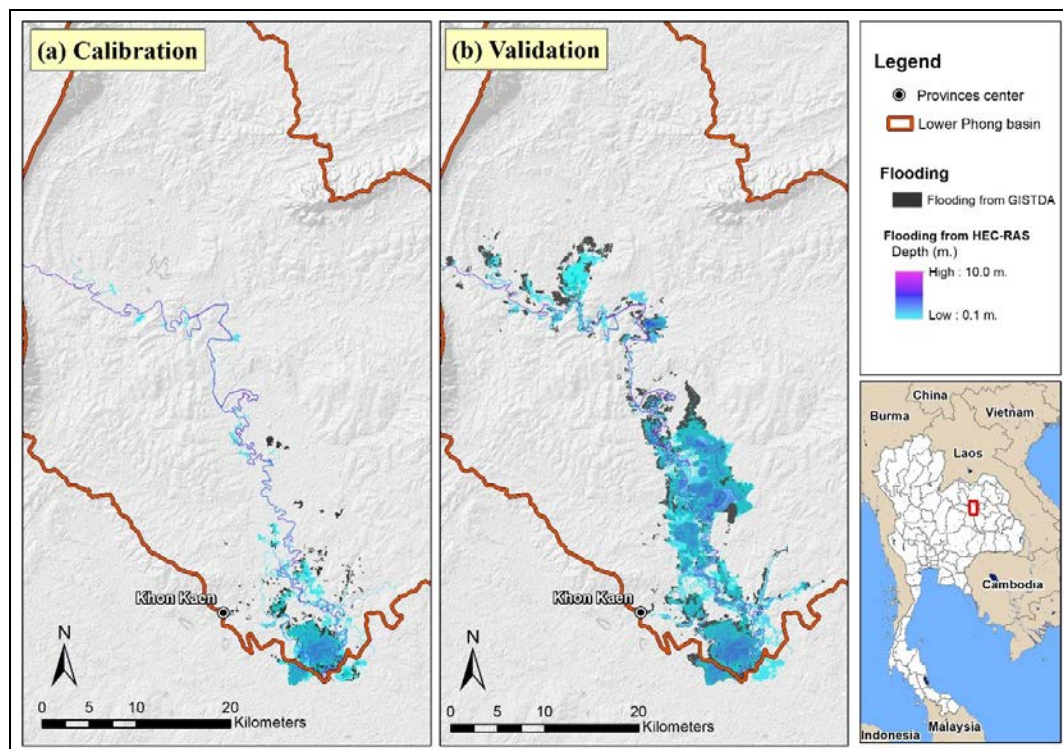
#### การตรวจสอบขอบเขตพื้นที่น้ำท่วม

การตรวจสอบแบบจำลอง HEC-RAS โดยใช้ขอบเขตพื้นที่น้ำท่วม จะทำการตรวจสอบโดยใช้ข้อมูลขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมของ GISTDA ปี พ.ศ. 2554 (ค.ศ. 2011) เปรียบเทียบกับขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมสูงสุดที่ได้จากแบบจำลอง HEC-RAS ปี พ.ศ. 2554 (ค.ศ. 2011) และใช้ค่าความสัมพันธ์ของข้อมูลเชิงพื้นที่

Relative Error (RE) และ F-statistics (สมการที่ 1 และ 2) สำหรับการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง HEC-RAS โดยที่พื้นที่น้ำท่วมสูงสุดที่ได้จากแบบจำลอง HEC-RAS และพื้นที่น้ำท่วมสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมของ GISTDA ปี พ.ศ. 2554 (ค.ศ. 2011) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 และได้ค่าความสัมพันธ์ของข้อมูลเชิงพื้นที่ Relative Error (RE) และ F-statistics เท่ากับ 0.10 และ 47.89% ตามลำดับ ทั้งนี้ ค่า RE ที่มีค่าน้อย และค่า F ที่มีค่ามาก จะแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันของขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมสูงสุดจากภาพถ่ายดาวเทียมและการจำลองสภาพ (Jung et al., 2014) ซึ่งจะช่วยยืนยันถึงความถูกต้องและน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสภาพด้วยแบบจำลอง HEC-RAS สำหรับนำไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ในอนาคตต่อไป



**รูปที่ 9** การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง HEC-RAS ณ สถานีวัดน้ำท่า E.22B: (A) การสอบเทียบแบบจำลองช่วงระหว่างเดือนสิงหาคมถึงธันวาคม พ.ศ. 2553 (ค.ศ. 2010) และ (B) การตรวจสอบแบบจำลองช่วงระหว่างเดือนสิงหาคมถึงธันวาคม พ.ศ. 2554 (ค.ศ. 2011)



รูปที่ 10 การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง HEC-RAS จากขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมสูงสุด:  
**(A)** การสอบเทียบแบบจำลองช่วงระหว่างเดือนสิงหาคมถึงธันวาคม พ.ศ. 2553 (ค.ศ. 2010) และ  
**(B)** การตรวจสอบแบบจำลองช่วงระหว่างเดือนสิงหาคมถึงธันวาคม พ.ศ. 2554 (ค.ศ. 2011)

## 6. การประเมินผลกระทบความเสียหายจากน้ำท่วม

ความเสียหายจากน้ำท่วมจะเป็นฟังก์ชันของความลึกของน้ำท่วมและระยะเวลาน้ำท่วม ซึ่งในการประเมินมูลค่าความเสียหายจากการเกิดน้ำท่วมจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ความเสียหายโดยตรง (Direct flood damage) และ 2) ความเสียหายโดยอ้อม (Indirect flood damage) โดยความเสียหายโดยตรงจะเกิดขึ้นจากความเสียหายทางด้านทรัพย์สินหรือองค์ประกอบอื่นๆ จากน้ำท่วม ส่วนความเสียหายโดยอ้อมนั้นเกิดขึ้นจากผลกระทบของความเสียหายโดยตรง และอาจจะเกิดขึ้นในพื้นที่หรือช่วงเวลาภายหลังจากการเกิดเหตุการณ์น้ำท่วมนั้น ยกตัวอย่างเช่น การจราจร การขนส่งและบริการสาธารณะที่ติดขัด ในการศึกษานี้จะทำการพิจารณาเฉพาะความเสียหายโดยตรง (Direct flood damage) ซึ่งการประเมินความเสียหายโดยตรงถูกพัฒนาโดย Sahasakmontri (1989) ดังแสดงในสมการที่ 3 ซึ่งได้แบ่งประเภทของการใช้ที่ดินสำหรับการประเมินออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ 1) Residential 2) Commercial 3) Industrial และ 4) Agriculture โดยแต่ละประเภทมีค่าสัมประสิทธิ์ตามสมการที่ 3 ดังตารางที่ 6

$$DPE = a_0 + a_1H + a_2L \quad (3)$$

เมื่อ DPE = ความเสียหายโดยตรง (Direct flood damage) ต่อประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน (บาท/ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน)  
H = ความลึกของน้ำท่วมสูงสุด (เซนติเมตร)  
L = ระยะเวลาน้ำท่วม (วัน)  
 $a_0, a_1, a_2$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของน้ำท่วม (Flood damage coefficients)

**ตารางที่ 6** ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของน้ำท่วม (Flood damage coefficients) สำหรับการ  
ใช้ประโยชน์ที่ดินแต่ละประเภท (Lekuthai and Vongvisessomjai, 2001)

No.	Type of land use	$a_0$	$a_1$	$a_2$
1.	Residential	-300.00	45.40	33.80
2.	Commercial	-2.15	88.10	0.00
3.	Industrial	-1,740.00	522.00	181.00
4.	Agriculture	-1,050.00	553.00	0.00

จากสมการที่ 3 เมื่อนำมาคำนวณเป็นผลรวมความเสียหายของทุกประเภทการใช้ที่ดินและทุกเซลล์ของข้อมูลผลลัพธ์น้ำท่วมจะได้ดังสมการที่ 4

$$DAM = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 \frac{DPE(j, H, L)}{APE(j)} \cdot PC(i, j) \cdot AREA(i) \quad (4)$$

เมื่อ DAM = ความเสียหายโดยตรง (Direct flood damage) (บาท)  
DPE(J, H, L) = ความเสียหายโดยตรง (Direct flood damage) ต่อประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน (บาท/ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน)  
APE(j) = พื้นที่เฉลี่ยต่อประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน j (ตารางเมตร)  
PC(I, j) = เปอร์เซนต์ของการใช้ประโยชน์ที่ดิน j ในเซลล์ i  
Area(i) = พื้นที่ของเซลล์ i (ตารางเมตร)  
i = จำนวนของเซลล์  
j = ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน  
H = ความลึกของน้ำท่วมสูงสุด (เซนติเมตร)  
L = ระยะเวลาน้ำท่วม (วัน)



สำหรับพื้นที่เฉลี่ยต่อประเภทการใช้ที่ดิน  $j$  (APE) ได้กำหนดไว้ดังตารางที่ 7 โดยอ้างอิงจาก Ansusinha (1989) อย่างไรก็ตาม Sahasakmontri (1989) ระบุว่าค่าความเสียหายโดยตรง (Direct flood damage) ที่ได้นั้นยังไม่มีมีการพิจารณาค่าความเสียหายของโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงทำการประเมินค่าความเสียหายต่อโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) เป็น 65% ของค่าความเสียหายโดยตรงที่คำนวณได้ โดยค่าเปอร์เซ็นต์ดังกล่าวนี้ Munich Reinsurance Company (1998) ได้ทำการประมาณค่าไว้ ดังนั้นค่าความเสียหายโดยตรงทั้งหมดจากการเกิดน้ำท่วม (Total direct flood damage, TDM) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 5

$$TDM = DAM + (0.65 \cdot DAM) \quad (5)$$

ตารางที่ 7 พื้นที่เฉลี่ยต่อประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน  $j$  (ปรับปรุงจาก Ansusinha (1989))

	Residential (household)	Commercial (shop)	Industrial (factory)	Agriculture (farm)
Average area per unit (m <sup>2</sup> )	1,000	250	4,000	42,000

การประเมินความเสียหายจากน้ำท่วม โดยเมื่อนำผลลัพธ์ความลึกน้ำท่วมและระยะเวลาน้ำท่วม จากแบบจำลอง HEC-RAS ในแต่ละช่วงปีจำลองที่รอบปีการเกิดซ้ำ 25 ปี 50 ปี และ 100 ปี มาคำนวณด้วยสมการที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้ได้ผลลัพธ์ค่าความเสียหายโดยตรงจากการเกิดน้ำท่วมทั้งหมดในกลุ่มน้ำพองตอนล่าง ดังตารางที่ 8

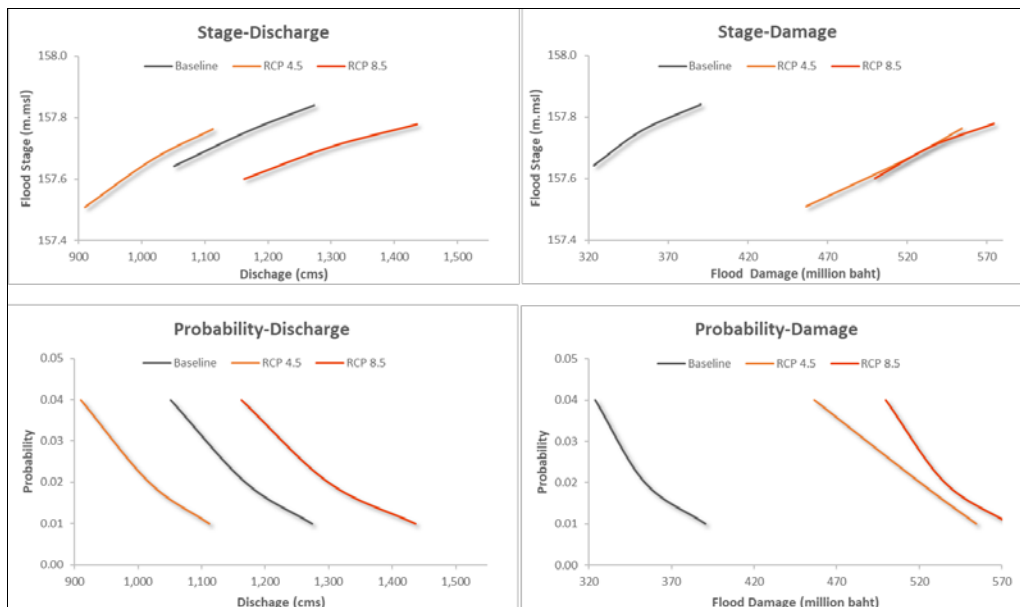
ตารางที่ 8 ค่าความเสียหายโดยตรงจากการเกิดน้ำท่วมทั้งหมดในกลุ่มน้ำพองตอนล่างในแต่ละกรณีจำลอง

Period	Scenario	Land use type	Total direct flood damage (million Baht)		
			25yr	50yr	100yr
2000-2017	Baseline		323.62	353.62	390.34
		Residential	36.19	40.00	43.31
		Commercial	20.64	22.31	23.35
		Industrial	13.46	14.11	14.51
		Agriculture	253.33	277.20	309.17
2020-2039	RCP 4.5		456.48	520.37	554.40
		Residential	178.22	199.48	212.55
		Commercial	27.86	36.05	38.49

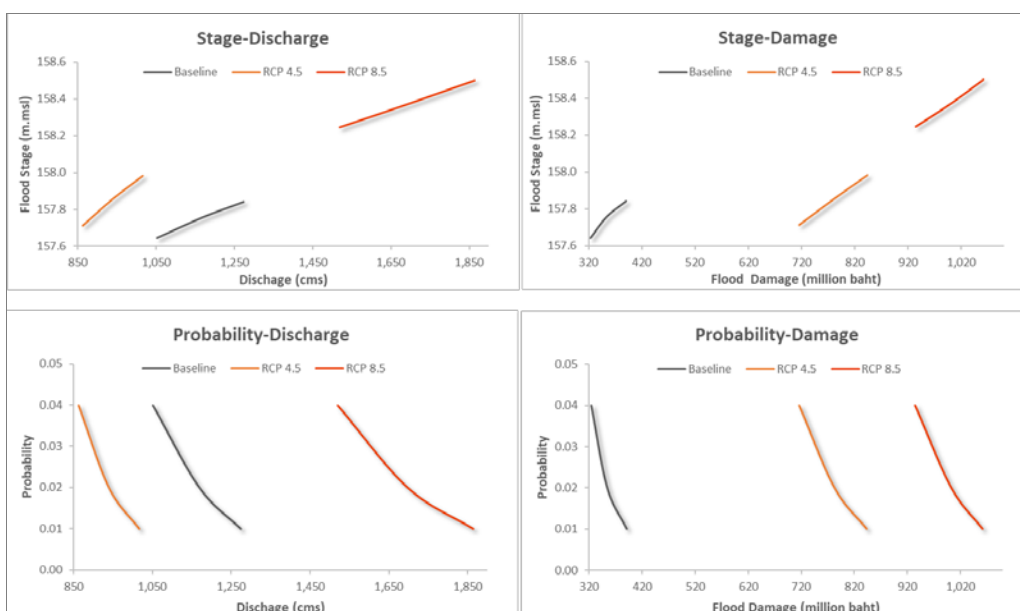
Period	Scenario	Land use type	Total direct flood damage (million Baht)		
			25yr	50yr	100yr
2040-2069	RCP 8.5	Industrial	22.20	26.00	27.41
		Agriculture	228.21	258.84	275.95
			<b>499.80</b>	<b>535.39</b>	<b>574.49</b>
		Residential	189.18	204.45	219.99
		Commercial	34.88	35.47	37.27
		Industrial	24.85	26.58	26.82
	RCP 4.5	Agriculture	250.89	268.90	290.41
			<b>715.87</b>	<b>782.41</b>	<b>843.26</b>
		Residential	340.47	371.63	400.80
		Commercial	76.87	84.96	92.23
		Industrial	36.85	40.02	42.79
		Agriculture	261.67	285.80	307.44
			<b>934.37</b>	<b>1,002.48</b>	<b>1,061.31</b>
		Residential	412.07	439.91	464.51
		Commercial	111.47	120.10	127.16
		Industrial	47.05	52.15	56.54
		Agriculture	363.79	390.31	413.11
2070-2099	RCP 4.5		<b>918.79</b>	<b>1,002.93</b>	<b>1,072.39</b>
		Residential	495.40	539.00	577.33
		Commercial	112.13	123.70	132.98
		Industrial	48.13	52.75	56.37
	RCP 8.5	Agriculture	263.13	287.47	305.71
			<b>992.35</b>	<b>1,065.58</b>	<b>1,130.47</b>
		Residential	503.83	541.66	559.66
		Commercial	132.43	142.74	170.34
		Industrial	51.85	56.07	63.00
		Agriculture	304.23	325.11	337.47

นอกจากนี้ยังสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง 4 ชุดข้อมูล ได้แก่ 1) ระดับน้ำท่วม (Flood stage) ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.22B 2) อัตราระบายน้ำสูงสุดของเขื่อนอุบลรัตน์ (Discharge) 3) ความน่าจะเป็น (Probability) ซึ่งคือส่วนกลับของ Return period และ 4) ค่าความเสียหายจากการเกิดน้ำท่วม (Damage) โดยได้แสดงความสัมพันธ์โดยแบ่งออกเป็นแต่ละ

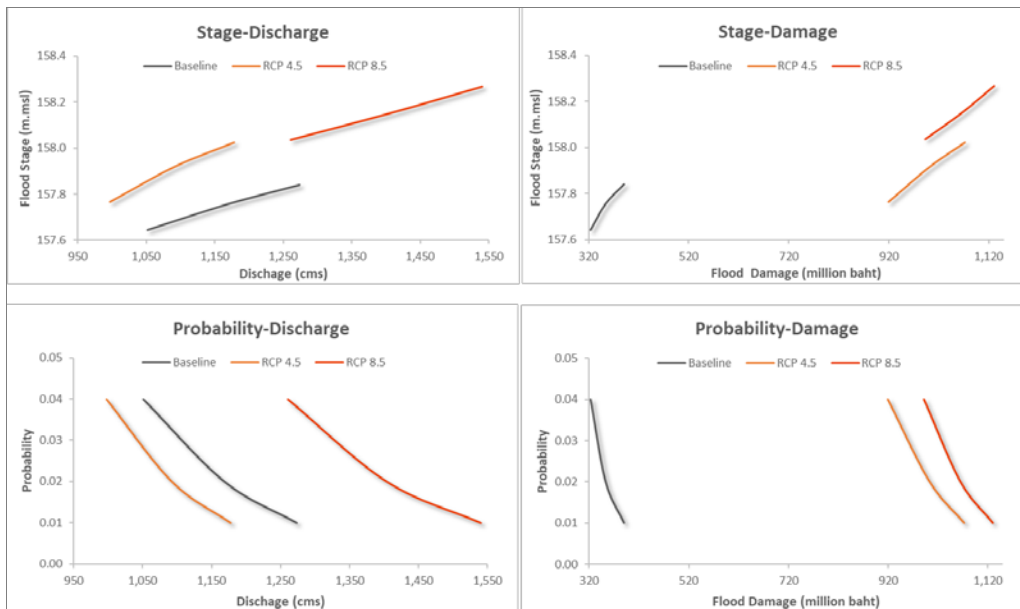
ช่วงปีของการจำลอง และเปรียบเทียบผลลัพธ์ในกรณีสภาพปัจจุบัน กรณีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ RCP 4.5 และ RCP 8.5 ดังแสดงในรูปที่ 11 ถึง 13



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Flood stage/Discharge, Flood Stage/Flood Damage, Probability/Discharge และ Probability/Flood Damage ช่วงปี ค.ศ. 2020 – 2039 เทียบกับสภาพปัจจุบัน



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Flood stage/Discharge, Flood Stage/Flood Damage, Probability/Discharge และ Probability/Flood Damage ช่วงปี ค.ศ. 2040 – 2069 เทียบกับสภาพปัจจุบัน



**รูปที่ 13** ความสัมพันธ์ระหว่าง Flood stage/Discharge, Flood Stage/Flood Damage, Probability/Discharge และ Probability/Flood Damage ช่วงปี ค.ศ. 2070 – 2099 เทียบกับสภาพปัจจุบัน

## 7. การประเมินพื้นที่เสี่ยงจากอุทกภัย

การประเมินความเสี่ยงจากอุทกภัยเป็นวิธีการระบุลักษณะความรุนแรงและโอกาสของการเกิดผลกระทบจากอุทกภัยนั้น ซึ่งความเสี่ยงจากอุทกภัยจะเป็นฟังก์ชันของภัย (Hazard) และความเปราะบาง (Vulnerability) โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 6 (ธวัชชัย, 2550)

$$\text{Disaster Risk} = \text{Hazard} \times \text{Vulnerability} \quad (6)$$

เมื่อ Disaster Risk = ความเสี่ยงด้านภัยพิบัติ  
Hazard = ภัย  
Vulnerability = ความเปราะบาง

### 7.1 การประเมินภัยน้ำท่วม (Flood Hazard Assessment)

ภัยน้ำท่วม (Flood Hazard) เป็นฟังก์ชันของความลึกของน้ำท่วม และความเร็วการไหล โดย HR Wallingford (2006) ได้นิยามสูตรการคำนวณอัตราของภัยน้ำท่วม (Flood hazard rating) ไว้ดังสมการที่ 7 โดยที่นอกจากความลึกของน้ำท่วม และความเร็วการไหลแล้ว ยังมี Debris Factor (DF) ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นตรงกับความลึก/ความเร็วน้ำท่วม และประเภทของการใช้ประโยชน์ที่ดิน ดังแสดงในตารางที่ 9 ซึ่งหลังจากคำนวณค่าอัตราของภัยน้ำท่วมด้วยสมการที่ 7 จะสามารถทำการจำแนกระดับความรุนแรงของภัยน้ำท่วมได้ดังตารางที่ 10

$$HR = d \times (v + 0.5) + DF \quad (7)$$

- เมื่อ
- HR = อัตราของภัยน้ำท่วม (Flood hazard rating)
  - d = ความลึกของน้ำท่วม (Depth of flooding, m)
  - v = ความเร็วการไหลของน้ำท่วม (Velocity of floodwater, m/s)
  - DF = Debris Factor พิจารณาจากตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่า Debris Factor สำหรับแต่ละความลึก/ความเร็วน้ำท่วม และประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน

Depth	Pasture/Arable	Woodland	Urban
0.00 – 0.25 m	0	0	0
0.25 – 0.75 m	0	0.5	1
d>0.75 and/or v>2.0 m/s	0.5	1	1

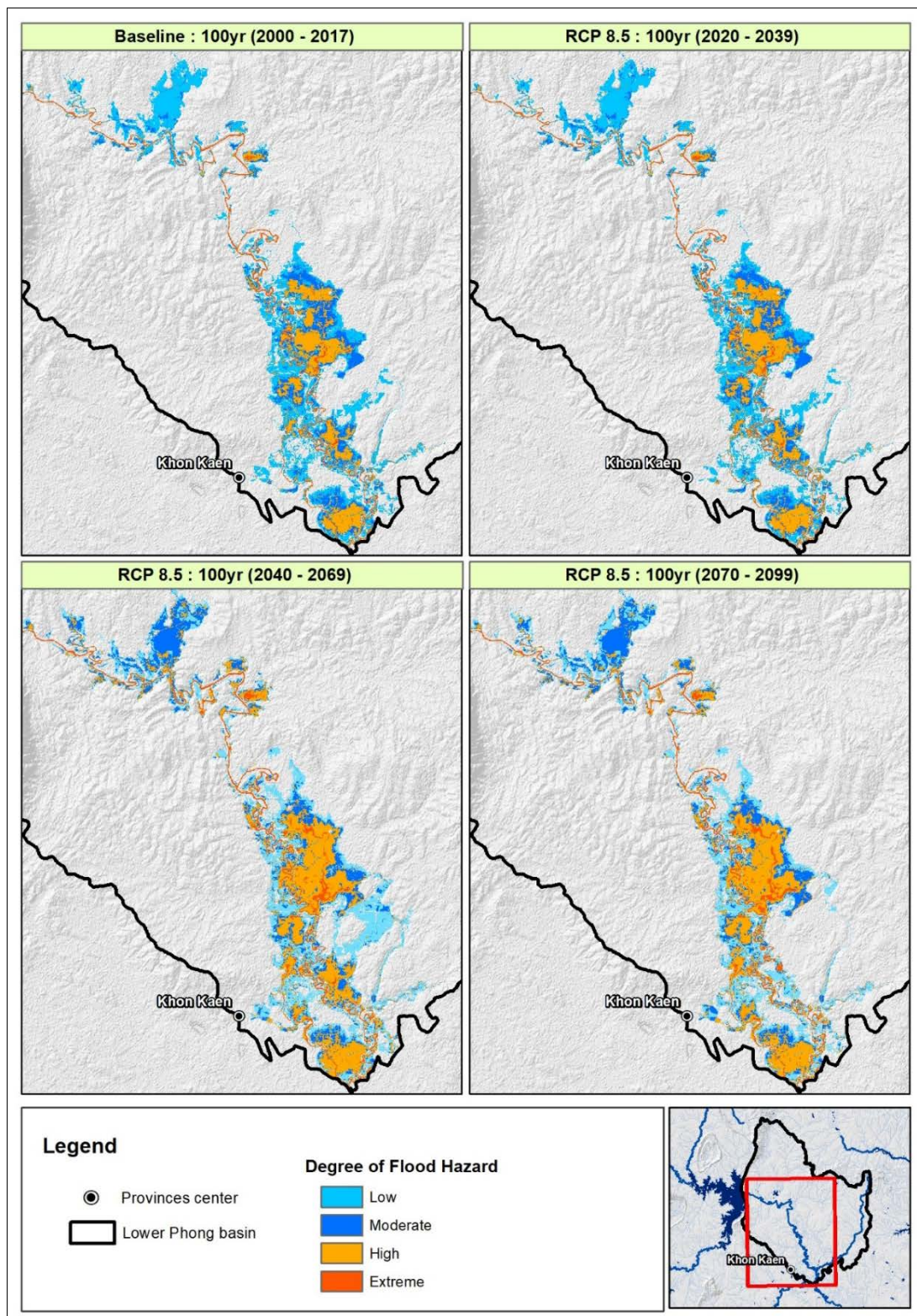
ที่มา: HR Wallingford, 2006

ตารางที่ 10 การจำแนกความระดับความเสี่ยงภัยน้ำท่วม

Flood hazard rating (HR)	Degree of Flood Hazard	Description
<0.75	Low	Caution <i>“Flood zone with shallow flowing water or deep standing water”</i>
0.75 - 1.25	Moderate	Dangerous for some (i.e. children) <i>“Danger: Flood zone with deep or fast flowing water”</i>
1.25 - 2.5	High	Dangerous for most people <i>“Danger: flood zone with deep fast flowing water”</i>
>2.5	Extreme	Dangerous for all <i>“Extreme danger: flood zone with deep fast flowing water”</i>

ที่มา: HR Wallingford, 2006

การประเมินภัยน้ำท่วมในครั้งนี้จะทำการประเมินโดยแบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ 1) กรณีสภาพปัจจุบัน ช่วงปี พ.ศ. 2543 – 2560 (ค.ศ. 2000 – 2017) 2) กรณีอนาคต ช่วงปี พ.ศ. 2563 – 2582 (ค.ศ. 2020 – 2039) 3) กรณีอนาคต ช่วงปี พ.ศ. 2583 – 2612 (ค.ศ. 2040 – 2069) และ 4) กรณีอนาคต ช่วงปี พ.ศ. 2613 – 2642 (ค.ศ. 2070 – 2099) โดยนำผลลัพธ์ความลึกน้ำท่วมและความเร็วน้ำท่วม จากแบบจำลอง HEC-RAS ในลุ่มน้ำพองตอนล่างในกรณีที่มีแนวโน้มของภัยน้ำท่วมรุนแรงมากที่สุดในแต่ละช่วงปีคือ ในกรณี RCP 8.5 ที่รอบปีการเกิดซ้ำ 100 ปี มาใช้ในการพิจารณา นอกจากนี้ได้นำผลลัพธ์ของการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตจากแบบจำลอง Land Change Modeler มาใช้เพื่อหาค่า Debris Factor (DF) โดยผลการประเมินจากสมการที่ 7 ข้างต้น ได้ผลลัพธ์พื้นที่ความรุนแรงของภัยน้ำท่วมโดยแสดงแผนที่เปรียบเทียบความรุนแรงของภัยน้ำท่วมในแต่ละกรณีได้ดังรูปที่ 14 ซึ่งจากพื้นที่ในระดับความรุนแรงต่ำ (Low) จะมีแนวโน้มของลดลงเรื่อยๆจากช่วงปีอดีตถึงปัจจุบัน (ค.ศ. 2000 – 2017) ไปจนถึงช่วงปีในอนาคต (ค.ศ. 2070 – 2099) อย่างเห็นได้ชัด ในทางตรงกันข้ามเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ความรุนแรงในระดับสูง (High) และระดับสูงสุด (Extreme) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจากช่วงปีอดีตถึงปัจจุบัน (ค.ศ. 2000 – 2017) ไปจนถึงช่วงปีในอนาคต (ค.ศ. 2070 – 2099) อย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 14 แผนที่เปรียบเทียบความรุนแรงของน้ำท่วมที่รอบปีการเกิดซ้ำ 100 ปี ในแต่ละกรณี



## 7.2 การประเมินความเปราะบางจากอุทกภัย (Flood Vulnerability Assessment)

การประเมินความเปราะบางจากอุทกภัยในการศึกษานี้ จะทำการประเมินโดยการระบุความเสี่ยงต่อความเปราะบางจากอุทกภัยตามประเภทของการใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยแบ่งระดับความเปราะบางออกเป็น 4 ระดับเช่นเดียวกับความรุนแรงของภัยน้ำท่วม (Flood hazard) คือ ระดับต่ำ (Low) ระดับปานกลาง (Moderate) ระดับสูง (High) และระดับสูงสุด (Extreme) โดยพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินที่นำมาพิจารณาแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ 1) พื้นที่เบ็ดเตล็ด (Miscellaneous land) 2) พื้นที่การเกษตร (Agricultural land) 3) พื้นที่อยู่อาศัย (Residential) และ 4) พื้นที่อุตสาหกรรมและย่านการค้า (Industrial and Commercial)

หลังจากนั้นทำการจำแนกระดับความเปราะบางของประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินตามช่วงของระดับความลึกน้ำท่วมที่ได้จากแบบจำลอง HEC-RAS จำนวน 4 ช่วงความลึก ดังแสดงในตารางที่ 11 โดยในการประเมินจะนำเอาผลลัพธ์ความลึกน้ำท่วม จากแบบจำลอง HEC-RAS ในลุ่มน้ำพองตอนล่างในกรณีที่มีแนวโน้มของภัยน้ำท่วมรุนแรงมากที่สุดในแต่ละช่วงปีคือ ในกรณี RCP 8.5 ที่รอบปีการเกิดซ้ำ 100 ปี มาใช้ในการพิจารณา

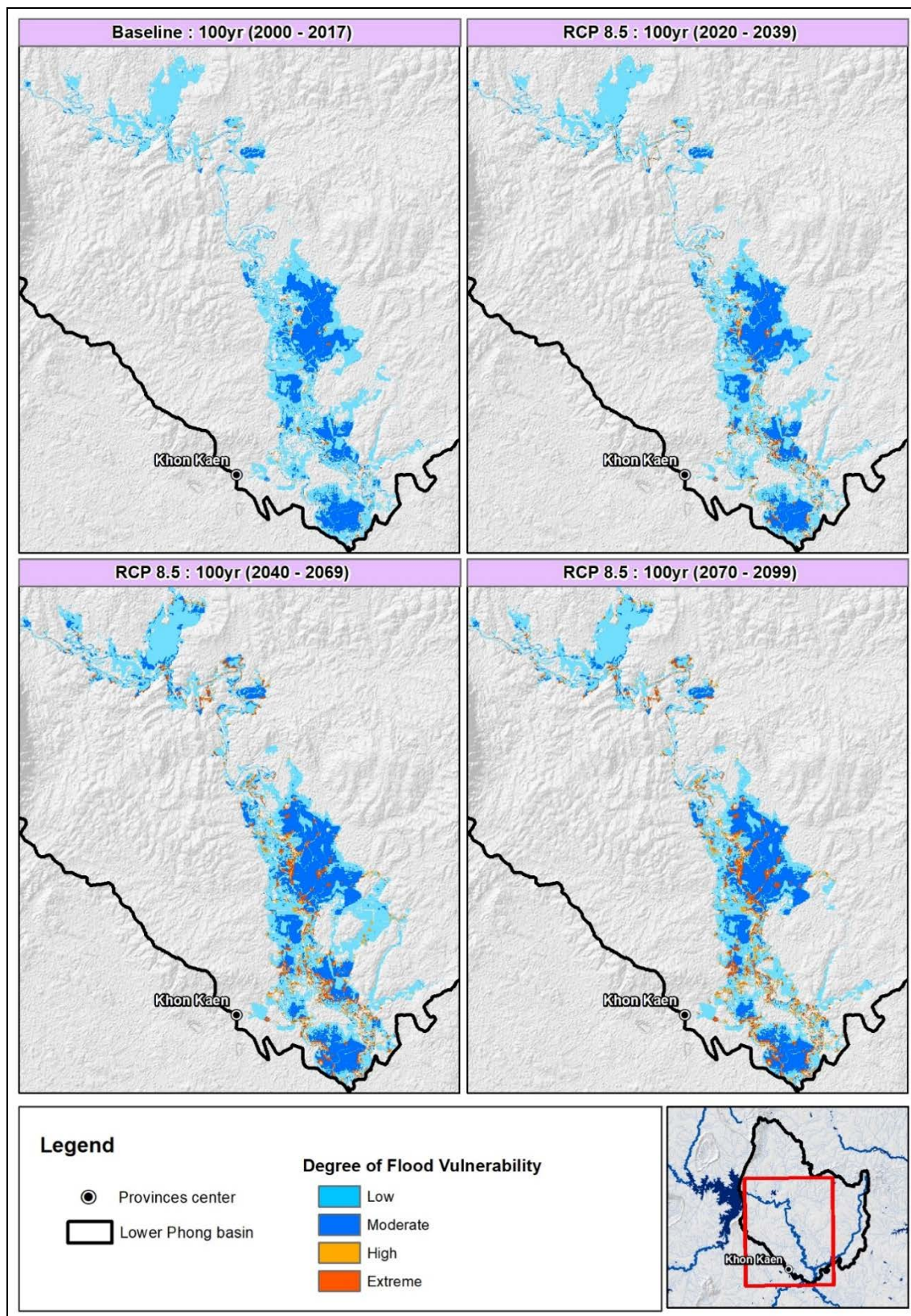
ตารางที่ 11 การกำหนดเกณฑ์การจำแนกระดับความเปราะบางตามการใช้ประโยชน์ที่ดิน

ที่	ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน	ความลึกของน้ำท่วม (m)			
		<0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	>2.0
1	พื้นที่เบ็ดเตล็ด (Miscellaneous land)	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
2	พื้นที่ทำการเกษตร (Agricultural land)	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง
3	พื้นที่อยู่อาศัย (Residential)	สูง	สูง	สูงสุด	สูงสุด
4	พื้นที่อุตสาหกรรมและย่านการค้า (Industrial and Commercial)	สูง	สูงสุด	สูงสุด	สูงสุด

ที่มา: ปรับปรุงจากสำนักงานโครงการพัฒนาแห่งสหประชาชาติ (2559)

ผลลัพธ์ของการประเมินความเปราะบางจากภัยอุทกภัยในพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่างได้ผลลัพธ์ดังแสดงรายละเอียดในรูปแบบของแผนที่เปรียบเทียบความเปราะบางจากอุทกภัยภัยในแต่ละกรณีได้ดังรูปที่ 15 ซึ่งพบว่าพื้นที่ในระดับความเปราะบางต่ำ (Low) และระดับความเปราะบางปานกลาง (Moderate) จะมีแนวโน้มของลดลงเรื่อยๆจากช่วงปีอดีตถึงปัจจุบัน (ค.ศ. 2000 – 2017) ไปจนถึงช่วงปีในอนาคต (ค.ศ. 2070 – 2099) อย่างเห็นได้ชัด ในทางตรงกันข้ามพื้นที่ความเปราะบางระดับสูง (High) และระดับสูงสุด (Extreme) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากช่วงปีอดีตถึงปัจจุบัน (ค.ศ. 2000 – 2017) ไปจนถึงช่วงปีในอนาคต (ค.ศ. 2070 – 2099) อย่างเห็นได้ชัดเช่นกัน จากผลการศึกษานี้อาจจะสรุปได้ว่าพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่างจะมีแนวโน้มของความเปราะบางจากอุทกภัยในอนาคตเพิ่มสูงขึ้น





รูปที่ 15 แผนที่เปรียบเทียบความเปราะบางจากอุทกภัยที่รอบปีการเกิดซ้ำ 100 ปี ในแต่ละกรณี

### 7.3 การวิเคราะห์ความเสี่ยงจากอุทกภัย (Flood Risk Analysis)

การวิเคราะห์ความเสี่ยงจากอุทกภัยจะทำการวิเคราะห์โดยการนำแผนที่ความรุนแรงของภัยน้ำท่วม (Flood Hazard) คูณด้วยแผนที่ความเปราะบางจากอุทกภัย (Flood Vulnerability) โดยทำการกำหนดค่าคะแนนให้กับระดับความรุนแรงของภัยและความเปราะบางจากอุทกภัย เท่ากับ 0.1, 0.4, 0.8 และ 1.0 สำหรับระดับต่ำ (Low) ระดับปานกลาง (Moderate) ระดับสูง (High) และระดับสูงสุด (Extreme) ตามลำดับ ผลลัพธ์การคูณกันของแผนที่ทั้งสองจะได้เป็นผลลัพธ์ของแผนที่ความเสี่ยงจากอุทกภัย (Flood Risk) และจากนั้นนำผลคูณที่ได้มาทำการจัดช่วงค่าคะแนนใหม่ดังแสดงในตารางที่ 12 เพื่อกำหนดระดับเสี่ยงจากอุทกภัย ซึ่งได้ผลลัพธ์พื้นที่ความเสี่ยงอุทกภัยในพื้นที่ลุ่มน้ำปองตอนล่างดังแสดงในตารางที่ 13 และสามารถแสดงในรูปแบบแผนที่ความเสี่ยงอุทกภัยได้ดังรูปที่ 16

จากตารางพบว่าเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ความเสี่ยงอุทกภัยในระดับต่ำ (Extreme) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากช่วงปีอดีตถึงปัจจุบัน (ค.ศ. 2000 – 2017) ไปจนถึงช่วงปีในอนาคต (ค.ศ. 2070 – 2099) อย่างเห็นได้ชัดเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการขยายตัวของพื้นที่เมืองรวมถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต

**ตารางที่ 12** ช่วงค่าคะแนนระดับความเสี่ยงจากอุทกภัยจากผลคูณความรุนแรงจากภัยน้ำท่วม (Flood Hazard) และความเปราะบางจากอุทกภัย (Flood Vulnerability)

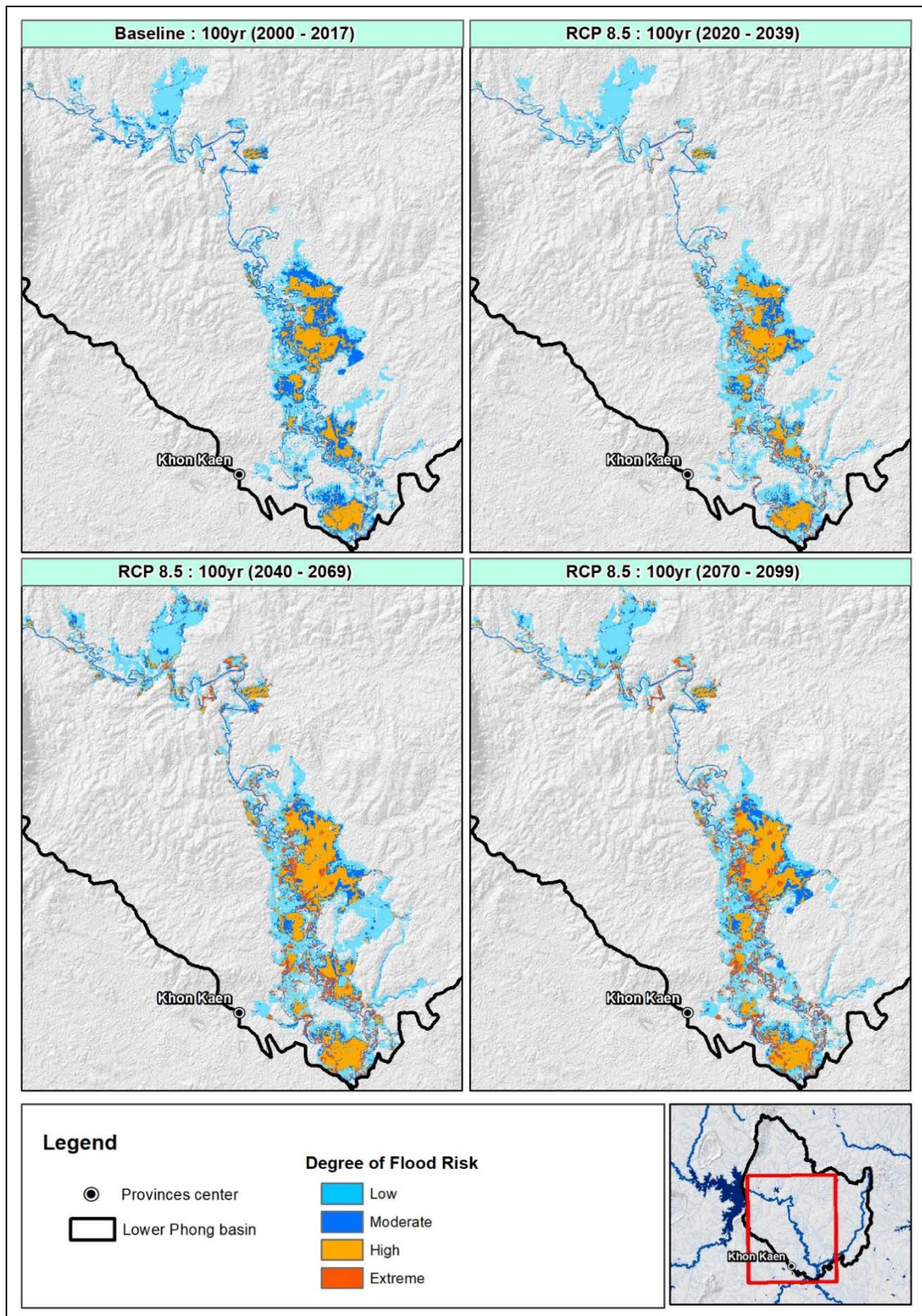
ที่	ระดับความเสี่ยง	ช่วงค่าคะแนน (Hazard x Vulnerability)
1	ต่ำ (Low)	0.00 – 0.01
2	ปานกลาง (Moderate)	0.01 – 0.32
3	สูง (High)	0.32 – 0.64
4	สูงสุด (Extreme)	0.64 – 1.00

**ตารางที่ 13** ผลการประเมินพื้นที่ความเสี่ยงจากอุทกภัยในแต่ละระดับที่รอบปีการเกิดซ้ำ 100 ปี ของแต่ละกรณี

Period	Scenario	Degree of Flood Risk	100yr return period flooded area	
			km <sup>2</sup>	%
2000-2017	Baseline		165.33	100.00
		Low	74.62	45.13
		Moderate	50.13	30.32
		High	38.93	23.54
		Extreme	1.66	1.00

Period	Scenario	Degree of Flood Risk	100yr return period flooded area	
			km <sup>2</sup>	%
2020-2039	RCP 8.5		<b>164.94</b>	<b>100.00</b>
		Low	89.31	54.15
		Moderate	29.02	17.60
		High	38.64	23.43
		Extreme	7.96	4.83
2040-2069	RCP 8.5		<b>223.14</b>	<b>100.00</b>
		Low	102.14	45.78
		Moderate	38.55	17.28
		High	62.90	28.19
		Extreme	19.55	8.76
2070-2099	RCP 8.5		<b>190.83</b>	<b>100.00</b>
		Low	80.75	42.32
		Moderate	36.01	18.87
		High	52.08	27.29
		Extreme	21.98	11.52





รูปที่ 16 แผนที่เปรียบเทียบระดับความเสี่ยงอุทกภัยที่รอบปีการเกิดซ้ำ 100 ปี ในแต่ละกรณี



### 1. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการจำลองสภาพพื้นที่น้ำท่วมด้วยแบบจำลอง HEC-RAS ทั้งในกรณีอดีตถึงปัจจุบัน ปี พ.ศ. 2543 – 2560 (ค.ศ. 2000 – 2017) และกรณีอนาคต ปี พ.ศ. 2563 – 2642 (ค.ศ. 2020 – 2099) สามารถสรุปได้ว่าพื้นที่น้ำท่วมในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่างในกรณีอดีตถึงปัจจุบันที่รอบปีการเกิดซ้ำ 25 ปี 50 ปี และ 100 ปี มีพื้นที่เท่ากับ 140.95, 150.45 และ 165.33 ตร.กม. ตามลำดับ ส่วนในกรณีอนาคต ภายใต้ภาพฉายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแบบใหม่ RCP 4.5 ที่รอบปีการเกิดซ้ำ 25 ปี 50 ปี และ 100 ปี มีพื้นที่น้ำท่วมอยู่ในช่วงระหว่าง 135.98 – 166.85, 149.44 – 176.49 และ 156.74 – 184.21 ตร.กม. ตามลำดับ และในกรณีอนาคต ภายใต้ภาพฉาย RCP 8.5 ที่รอบปีการเกิดซ้ำ 25 ปี 50 ปี และ 100 ปี มีพื้นที่น้ำท่วมเท่ากับ 146.25 – 199.86, 154.31 – 213.22 และ 164.94 – 223.14 ตร.กม. ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตภายใต้ภาพฉาย RCP 8.5 จะส่งผลต่อการเกิดปัญหาน้ำท่วมได้มากกว่ากรณี RCP 4.5

เมื่อพิจารณาในแง่ของขนาดพื้นที่น้ำท่วม จะพบว่ายังไม่ค่อยเห็นความแตกต่างของขนาดพื้นที่น้ำท่วมสำหรับแต่ละภาพการจำลอง (Scenario) มากนัก แต่เมื่อพิจารณาในแง่ของระยะเวลาน้ำท่วมขัง จะพบว่าในกรณีอนาคตจะมีแนวโน้มของระยะเวลาการท่วมขังที่ยาวนานขึ้น โดยสังเกตได้จากขนาดของพื้นที่น้ำท่วมในช่วงระยะเวลาท่วมขัง 0 – 2 เดือน จะมีแนวโน้มลดลงในอนาคต ส่วนแนวโน้มของพื้นที่น้ำท่วมขังระยะเวลา 4 – 6 เดือนจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรอบปีการเกิดซ้ำเพิ่มสูงขึ้นจะยิ่งเห็นแนวโน้มของระยะเวลาการท่วมขังอย่างชัดเจน

ในขณะที่เมื่อนำผลลัพธ์ของความลึกน้ำท่วมสูงสุดและระยะเวลาน้ำท่วมขังที่ได้จากการจำลองสภาพด้วยแบบจำลอง HEC-RAS มาประเมินมูลค่าความเสียหายจากน้ำท่วม จะพบว่าในแต่ละรอบปีการเกิดซ้ำจะมีมูลค่าความเสียหายจากน้ำท่วมเพิ่มสูงขึ้นตามรอบปีการเกิดซ้ำที่สูงขึ้น ทั้งในกรณีอดีตถึงปัจจุบันและในกรณีอนาคต โดยในกรณีอดีตถึงปัจจุบันที่รอบปีการเกิดซ้ำ 25 ปี 50 ปี และ 100 ปี มีมูลค่าความเสียหายจากน้ำท่วมประมาณ 323.62, 353.62 และ 390.34 ล้านบาท ตามลำดับ ส่วนในกรณีอนาคตซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ 1) RCP 4.5 และ 2) RCP 8.5 โดยในกรณี RCP 4.5 ที่รอบปีการเกิดซ้ำ 25 ปี 50 ปี และ 100 ปี มีมูลค่าความเสียหายจากน้ำท่วมอยู่ระหว่าง 456.48 – 918.79, 520.37 – 1,002.93 และ 554.40 – 1,072.39 ล้านบาท ตามลำดับ ในขณะที่กรณี RCP 8.5 ที่รอบปีการเกิดซ้ำ 25 ปี 50 ปี และ 100 ปี มีมูลค่าความเสียหายจากน้ำท่วมอยู่ระหว่าง 499.80 – 992.35, 535.39 – 1,065.58 และ 574.49 – 1,130.47 ล้านบาท ตามลำดับ โดยพบว่ากรณีอนาคต มูลค่าความเสียหายจากน้ำท่วมกรณี RCP 8.5 จะมีมูลค่าความเสียหายสูงกว่ากรณี RCP 4.5 โดยมูลค่าความเสียหายส่วนใหญ่

ทั้งในกรณีอดีตถึงปัจจุบันและกรณีอนาคต จะเกิดขึ้นในเขตพื้นที่เกษตรกรรม (Agriculture) และ รองลงมาคือที่อยู่อาศัย (Residential)

นอกจากนี้ เมื่อนำผลลัพธ์ความลึกน้ำท่วมสูงสุดและความเร็วการไหลของน้ำท่วมที่ได้จากการจำลองสภาพด้วยแบบจำลอง HEC-RAS ร่วมกับแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน มาประเมินพื้นที่เสี่ยงจากอุทกภัย โดยเลือกเฉพาะกรณีที่มีแนวโน้มของภัยน้ำท่วมรุนแรงมากที่สุดในแต่ละช่วงปีคือ ในกรณี RCP 8.5 ที่รอบปีการเกิดซ้ำ 100 ปี มาใช้ในการพิจารณา จะพบว่า เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่มีความเสี่ยงจากอุทกภัยที่ระดับความรุนแรงต่ำ (Low) จะมีแนวโน้มของลดลงเรื่อยๆ จากช่วงปีอดีตถึงปัจจุบัน (ค.ศ. 2000 – 2017) ไปจนถึงช่วงปีในอนาคต (ค.ศ. 2070 – 2099) อย่างเห็นได้ชัด ในทางตรงกันข้ามเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่มีความเสี่ยงจากอุทกภัยที่ระดับความรุนแรงสูง (High) และระดับความรุนแรงสูงสุด (Extreme) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากช่วงปีอดีตถึงปัจจุบัน (ค.ศ. 2000 – 2017) ไปจนถึงช่วงปีในอนาคต (ค.ศ. 2070 – 2099) อย่างชัดเจน ส่วนเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่มีความเสี่ยงจากอุทกภัยที่ระดับความรุนแรงปานกลาง (Moderate) มีแนวโน้มที่ไม่ค่อยชัดเจน ดังนั้น ผลการศึกษานี้จะสามารถสรุปได้ว่าในอนาคตความรุนแรงของภัยน้ำท่วมในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่างจะมีแนวโน้มรุนแรงขึ้น

โดยสรุป แนวโน้มของมูลค่าความเสียหายจากน้ำท่วมและความรุนแรงของพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่างที่เพิ่มสูงขึ้น จะเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากพื้นที่เกษตรกรรม (Agriculture) ไปเป็นที่อยู่อาศัย (Residential) พื้นที่ยาน การค้า (Commercial) และพื้นที่อุตสาหกรรม (Industrial) และยังรวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต

## 2. ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1) ในการศึกษาวิจัยการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินสำหรับการศึกษาได้ใช้ข้อมูลจากกรมพัฒนาที่ดินในการวิเคราะห์ โดยพิจารณาจากข้อมูลแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน 2 ช่วงเวลา มาทำการวิเคราะห์แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลง นั่นคือ ข้อมูลแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2553 และ 2558 โดยมีระยะเวลาห่างกันเพียงแค่ 5 ปี อาจจะทำให้การวิเคราะห์แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินไม่มีความชัดเจนมากนัก ดังนั้นในการศึกษาวิจัยในอนาคตควรจะใช้ข้อมูลแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินที่มีระยะเวลาห่างกันมากกว่านี้ ซึ่งอาจจะได้มาจากการแปลภาพถ่ายทางอากาศหรือจากแหล่งข้อมูลอื่นๆ

2) การประเมินมูลค่าความเสียหายโดยตรงจากน้ำท่วม (Direct flood damage) สำหรับการศึกษาได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของน้ำท่วม (Flood damage coefficients) สำหรับแต่ละประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินจากการศึกษาของ Lekuthai และ Vongvisessomjai (2001) และใช้ค่าพื้นที่เฉลี่ยต่อประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Average area per unit) j ที่ปรับปรุงจากการศึกษาของ Ansusinha (1989) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ที่กล่าวมาข้างต้นได้มาจากการเก็บข้อมูลในพื้นที่กรุงเทพมหานครและบริเวณใกล้เคียง ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงแก้ไขค่า

สัมประสิทธิ์เพื่อให้เข้ากับสถานการณ์ปัจจุบัน โดยควรจะมีการเก็บข้อมูลสำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่างและบริเวณใกล้เคียง เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของพื้นที่ลุ่มน้ำพองตอนล่าง ซึ่งจะส่งผลให้การประเมินความเสียหายโดยตรงจากน้ำท่วมมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

3) ในการประเมินความเปราะบางจากอุทกภัย (Flood Vulnerability Assessment) สำหรับการศึกษานี้ได้ใช้เกณฑ์การจำแนกระดับความเปราะบางตามการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ปรับปรุงจากรายงานผลการศึกษาเชิงวิชาการเรื่อง การประเมินความเสี่ยงจากภัยพิบัติและสภาพภูมิอากาศเพื่อการวางแผนพัฒนาจังหวัดสงขลา ปี พ.ศ. 2559 ซึ่งเกณฑ์ดังกล่าวควรจะได้รับปรับปรุงแก้ไข โดยอาศัยการลงพื้นที่เพื่อเก็บและสอบถามข้อมูลจากประชาชนในพื้นที่ เพื่อให้ได้เกณฑ์ที่สะท้อนสภาพความเป็นจริงในพื้นที่ รวมถึงมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น





คลังข้อมูลน้ำและภูมิอากาศแห่งชาติ. ม.ป.ป. บันทึกเหตุการณ์มหาอุทกภัยปี 2554. สืบค้นเมื่อ 15 เมษายน 2563 จาก <http://www.thaiwater.net/current/flood54.html>

ศูนย์ป้องกันวิกฤติน้ำ. 2560. รายงานสถานการณ์น้ำ วันพฤหัสบดีที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2560. สืบค้นเมื่อ 5 มกราคม พ.ศ. 2562 จาก [http://mekhala.dwr.go.th/imgbackend/report\\_file/report\\_172636.pdf](http://mekhala.dwr.go.th/imgbackend/report_file/report_172636.pdf)

คลังข้อมูลน้ำและภูมิอากาศแห่งชาติ. 2561. บันทึกเหตุการณ์น้ำท่วมภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง ช่วงเดือนตุลาคม 2560. สืบค้นเมื่อ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2561 จาก <http://www.thaiwater.net/current/2017/floodOct2017/floodOct2017.html>

สำนักเลขาธิการนายกรัฐมนตรี. 2562. ข่าวทำเนียบรัฐบาล. สืบค้นเมื่อ 5 มกราคม พ.ศ. 2562 จาก <http://www.thaigov.go.th/news/contents/details/7706>

โรงไฟฟ้าพลังน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. 2560. การบริหารจัดการน้ำของเขื่อนอุบลรัตน์. เอกสารนำเสนอในวันที่ 19 มกราคม พ.ศ. 2560 ณ ห้องประชุมลำพะเนียง กองเดินเครื่อง.

สำนักงานทรัพยากรน้ำภาค 4. 2555. การบริหารจัดการลุ่มน้ำชี. ขอนแก่น: กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

Chacutrikul, 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.

Singkran, N., Tosang, J., Waijaroen, D., Intharawichian, N., Vannarart, O., Anantawong, P., Kunta, K., Wisetsopa, P., Tipvong, T., Janjirawuttikul, N., Masthawe, 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.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. 1970. River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I—A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*. 10. 282–290.

Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., Chaubey, I., and Arnold, J.G. 2016. CMhyd User Manual: Documentation for Preparing Simulated Climate Change Data for

Hydrologic Impact Studies. Available online:  
[https://swat.tamu.edu/media/115265/bias\\_cor\\_man.pdf](https://swat.tamu.edu/media/115265/bias_cor_man.pdf) (accessed on 6 January 2020).

Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., and Hauck, L. M. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*. 37. 1169–1188.

Moriasi, D. N, Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harem, R. D., and Veith, T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 50(3). 850–900.

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.

Sahasakmontri, K. 1989. Estimation of flood damage functions for Bangkok and vicinity. MEng Thesis. Asian Institute of Technology. Bangkok. Thailand.

Lekuthai, A. and Vongvisessomjai, S. 2001. Intangible flood damage quantification. *Water Resources Management*. 15(5). 343 – 362.

Ansusinha, K., 1989. Cost-benefit analysis of flood prevention programs for Bangkok and vicinity. MEng Thesis. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

Munich Reinsurance Company. 1998. World map of natural hazards. Munich. Germany.

รัชชชัย ดิงสัญชลี. 2550. ภัยพิบัติและความเสี่ยงภัยของสภาวะน้ำท่วมในลุ่มน้ำยมตอนบน. โครงการสัมมนาเชิงวิชาการ: มหันตภัย น้ำท่วม ดินโคลนถล่ม ภาคเหนือ. เชียงใหม่.

HR Wallingford. 2006. R&D Outputs: Flood Risks to People: Phase 2 Fd2321/Tr2. Flood Hazard Research Centre. Middlesex University. Risk & Policy Analysts Ltd.

สำนักงานโครงการพัฒนาแห่งสหประชาชาติ. 2559. รายงานผลการศึกษาเชิงวิชาการเรื่อง “การประเมินความเสี่ยงจากภัยพิบัติและสภาพภูมิอากาศเพื่อการวางแผนพัฒนาจังหวัดสงขลา ภายใต้โครงการบูรณาการการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการลดความเสี่ยงจากภัยพิบัติในการวางแผนพัฒนาในประเทศไทย.

## Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

---

### 1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่มที่ เลขที่ และหน้า) หรือผลงานตามที่ได้คาดไว้ในสัญญาโครงการ

จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว. ทำให้ได้ Output ออกมาในรูปของผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล Science Citation Index Expanded ของ Web of Science และมีค่า Impact factor จำนวนทั้งสิ้น 2 บทความ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 1) บทความที่ 1

ชื่อผู้แต่ง : Kittiwet Kuntiyawichai\*, Winai Sri-Amporn, Sarayut Wongsasri, and Prinya Chindaprasit  
ชื่อเรื่อง : Anticipating of Potential Climate and Land Use Change Impacts on Floods: A Case Study of the Lower Nam Phong River Basin  
ชื่อวารสาร : Water (Impact Factor: 2.524, Quartile in Category: Q2)  
ปี : 2020  
เล่มที่ : 12  
เลขที่ : 4  
หน้า : 1 – 24, In Press, Published online: April 18, 2020  
<https://doi.org/10.3390/w12041158>

#### 2) บทความที่ 2

ชื่อผู้แต่ง : Quan V. Dau and Kittiwet Kuntiyawichai\*  
ชื่อเรื่อง : Identifying Adaptive Reservoir Operation for Future Climate Change Scenarios: A Case Study in Central Vietnam  
ชื่อวารสาร : Water Resources (Impact Factor: 0.638, Quartile in Category: Q4)  
ปี : 2020  
เล่มที่ : 47  
เลขที่ : 2  
หน้า : 189 – 199



## ภาคผนวก

---

**ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล *Science Citation Index Expanded* ของ *Web of Science* และมีค่า *Impact factor* จำนวนทั้งสิ้น 2 บทความ**



## บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ ฉบับที่ 1

---

ชื่อผู้แต่ง : Kittiwet Kuntiyawichai\*, Winai Sri-Amporn, Sarayut Wongsasri, and Prinya Chindaprasirt  
ชื่อเรื่อง : Anticipating of Potential Climate and Land Use Change Impacts on Floods: A Case Study of the Lower Nam Phong River Basin  
ชื่อวารสาร : Water (Impact Factor: 2.524, Quartile in Category: Q2)  
ปี : 2020  
เล่มที่ : 12  
เลขที่ : 4  
หน้า : 1 – 24, In Press, Published online: April 18, 2020  
<https://doi.org/10.3390/w12041158>



























































## บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ ฉบับที่ 2

---

ชื่อผู้แต่ง : Quan V. Dau and Kittiwet Kuntiyawichai\*  
ชื่อเรื่อง : Identifying Adaptive Reservoir Operation for Future Climate  
Change Scenarios: A Case Study in Central Vietnam  
ชื่อวารสาร : Water Resources (Impact Factor: 0.638, Quartile in Category: Q4)  
ปี : 2020  
เล่มที่ : 47  
เลขที่ : 2  
หน้า : 189 – 199



























# Anticipating of Potential Climate and Land Use Change Impacts on Floods: A Case Study of the Lower Nam Phong River Basin

Kittiwet Kuntiyawichai <sup>1,2,\*</sup>, Winai Sri-Amporn <sup>1</sup>, Sarayut Wongsasri <sup>1,2</sup> and Prinya Chindaprasirt <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand; winsri@kku.ac.th (W.S.-A.); sarayut\_wo@hotmail.com (S.W.); prinya@kku.ac.th (P.C.)

<sup>2</sup> Water Resources and Environment Institute, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

\* Correspondence: kkitti@kku.ac.th; Tel.: +66-62-896-5559

Received: 4 February 2020; Accepted: 15 April 2020; Published: 18 April 2020

**Abstract:** This study aimed at quantifying the impacts of climate and land use changes on flood damage on different flood occurrences. A Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) model was calibrated for the period 2005–2011 and validated in the period 2012–2017, and was used to generate hydrographs using rainfall during the period 2020–2039 from CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, and MPI-ESM-LR climate models under Representative Concentration Pathways (RCPs) 4.5 and 8.5. A Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) model for use in generating inundation maps from hydrographs produced by HEC-HMS was calibrated and validated for 2010 and 2011 period, respectively. The climate and land use changes showed insignificant impacts on the extent of floods during 25-, 50-, and 100-year flood events, i.e., inundation in 2039 under RCP 4.5 is smaller than baseline (2000–2017) by 4.97–8.59 km<sup>2</sup>, whereas a larger difference of inundation is found for RCP 8.5 (0.39–5.30 km<sup>2</sup>). In contrast, the flood damage under RCP 4.5 (14.84–18.02 million US\$) is higher than the baseline by 4.32–5.33 million US\$, while the highest was found for RCP 8.5 (16.24–18.67 million US\$). The agriculture was the most vulnerable, with a damage of 4.50–5.44 million US\$ in RCP 4.5 and 4.94–5.72 million US\$ in RCP 8.5, whereas baseline damages were 4.49–6.09 million US\$. Finally, the findings are useful in the delivery of flood mitigation strategies to minimize flood risks in the lower Nam Phong River Basin.

**Keywords:** climate change; land use change; CMIP5 general circulation models; representative concentration pathway; return period; flood damage

## 1. Introduction

Floods are major threats to lives and properties in vulnerable areas of Thailand, especially in many provinces in the Central and Northern Plains, and Northeast regions. As stated by [1], the most common cause of floods in Thailand is heavy monsoon rains and tropical storms, which tend to be more disastrous, frequent and costly, and threaten the nation as a whole.

In 2011, Thailand encountered with the worst flood crisis in 70 years [2], with the largest annual rainfall over Thailand among the nation's 61-year rainfall record [3]. More details were added by [4], who observed that the 2011 Thailand floods were mainly caused by a strong Southeast Asian summer monsoon which brought extraordinary rainfall over the country between May to October, whilst the remaining four tropical storms produced high rainfall to northern Thailand between June and

October. The incoming rainfall rate was significantly higher than the controlled releases from dams, of which most dams were almost full by the beginning of October 2011 [5]. During the most critical flood period (October through November 2011), the drainage capacity of rivers was exceeded and resulted in water overflowing the riverbank and encroaching the broad, low-lying surrounding floodplain where agricultural, industrial, and urban development existed. As a result, 65 out of 77 provinces were declared to be flood disaster zones with more than 800 deaths and an estimated extensive economic damage of US\$46.5 billion, in which the manufacturing sector bore approximately 70 percent of the total damage and losses due to the flooding of six industrial estates in Ayuthaya and Pathum Thani [6].

The signs of the aforementioned flood incidents are clearly visible and linked to the impacts of climate and land use changes on hydrological responses. Therefore, several studies were conducted to investigate whether there was evidence of such potential impacts on flood consequences, especially in Northeast Thailand. The study of [7] revealed that climate and land use changes have a direct impact on runoff in the lower Lam Pao River Basin (situated in Northeast Thailand). In detail, based on the PRECIS Regional Climate Model outputs, the average rainfall will be increased by 14.5 mm, whereas the average daily maximum and minimum temperature will be increased between 1.8 °C to 2.6 °C, respectively, in the next 50 years (2016–2065). In addition, by applying the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model in association with the projection of climate and land use change, the study also found that when changing paddy fields to crops and urban area by 20, 40, 60, 80, and 100 percent increments, the average annual runoff will be lower than the baseline (2006–2015) by 16.6% to 35.0%, while the average runoff will be higher than the baseline by 13.4% during the years 2012–2021. The evaluation was also made by [8] for assessing the impacts of climate and land use changes on river discharge in the Lam Chi sub-watershed in Northeast Thailand by using the global hydrological model, the H08 model, the climate data from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) for the period 2022–2031, and land use data projected by the Conversion of Land Use and its Effects (CLUE) model. It was found that the discharges will increase due to increases in precipitation between the past (1986–1995) and future (2022–2031). Due to differences in soil depth, the subsurface flow rate, and evapotranspiration, the discharge in the forested area is expected to be lower than in the agricultural area. Lastly, the study also indicated that the impact on the progression of current to future discharge due to land use change is smaller than climate change, whereas the opposite was observed for the transition from the historical to more recent past.

Regarding the climate change issue, the research in [9] was carried out to assess the flood hazard potential under climate change scenarios in the Yang River Basin, Northeast Thailand. Through the applications of hydrological model TOPMODEL and Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) hydraulic model, the simulations of floods under future climate scenarios for the periods 2010–2039 (2020s), 2040–2069 (2050s), and 2070–2099 (2080s), were performed. It was found that, in the future, the Yang River Basin will get warmer and wetter, whereas both the minimum and maximum temperature is also projected to increase. Likewise, the average annual rainfall is also projected to be higher in the near future and lower in the far future. In addition, the expected intensity of annual floods is found to be increased for both Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5 and 8.5 scenarios, in which the generated flood inundation map under 100-year return period is found to be larger than the baseline flood inundation map (1980–2009) by approximately 60 km<sup>2</sup>. The impact of climate change on flood events in the Nippersink Creek watershed located in Northeastern Illinois was also assessed by [10], in which the Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) was applied to model the hydrologic processes based on meteorological inputs from the CMIP5 general circulation models. It was found that the increase in greenhouse gas concentration (under RCP 8.5 scenario) can increase the future precipitation, as well as induce a greater impact on flood events (by the 110% increase from the historically-observed 100-year flood). The study performed by [11] examined the impact of climate change on the hydrological behavior of the Jhelum River basin, in which the bias-corrected CMIP5 data from four GCMs (BCC-CSM1.1, INMCM4, IPSL-CM5A-LR, and CMCCCMS) and two emissions scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5) were used to drive the calibrated the Hydrological Modeling System



(HEC-HMS) and the Snowmelt Runoff Model (SRM) for the simulation of projected streamflow. The results revealed that the precipitation (increasing by 183.2 mm or 12.74%) during the monsoon for RCP 4.5 and the rise in temperature (increase in  $T_{\min}$  and  $T_{\max}$  will be 4.77 °C and 4.42 °C, respectively) during the pre-monsoon period for RCP 8.5 during the 2090s will lead to an increase in snowmelt-runoff of up to 48%, evapotranspiration and soil water storage of up to 45%, streamflow by 330 m<sup>3</sup>/s (22.6%) (calculated by HEC-HMS) and 449 m<sup>3</sup>/s (30.7%) (estimated by SRM).

In view of the land use change, relevant research was undertaken by [12] to investigate the influences of land management and conservation practices on discharge and sediment yield for providing alternatives to the current watershed management practices in the Chi River Sub-basin Part II, in Northeast Thailand. Three land management scenarios, i.e., (1) current land use with conservation practices, (2) Land Use Planning (LUP) based on Watershed Classification (WSC), and (3) WSC with conservation practices, were simulated with the SWAT model, and the obtained results were compared with the existing conditions. Based on the simulation results, the current land use with conservation practices (scenario 1) would result in a slight decrease in both total discharge and sediment yield. Under scenario 2, WSC would result in a small decrease in discharge, but a dramatic increase in sedimentation. Referring to scenario 3, WSC together with conservation practices would result in a slight decrease in discharge and a small increase in sedimentation.

Furthermore, there are a lot more studies which are relevant to the potential impacts of climate change and anthropogenic land management activities on hydrologic responses in Northeast Thailand such as [13–17]. In brief, the abovementioned studies showed a corresponding trend towards climate and land use change, which can worsen and trigger an increase in both the magnitude and frequency of extreme flood events and could directly pose a great threat to human well-being and economic development. However, the quantification of expected flood damage in monetary terms was not quantitatively evaluated in the aforementioned studies [7–9,12–17], as they opted to focus more on flow regime (i.e., magnitude, frequency) or flood characteristics (i.e., depth of inundation, duration, and area inundated). To close the knowledge gap, this study aimed to quantify the impacts of climate and land use changes on flood damage (on both a monetary basis and a threat basis, i.e., flood depth, duration, and extent) at different levels of recurrence. A case study of the lower Nam Phong River Basin, situated in Northeast Thailand, which frequently experiences floods which tend to be more severe due to substantial land use alteration and future climate change, was conducted to get a detailed insight into the possible impacts. Above all, the main findings of this study will be helpful to properly formulate adaptation strategies and withstand the adverse impacts of possible future flood risks and damage due to climate and land use changes in the lower Nam Phong River Basin and other areas throughout Thailand.

## 2. Materials and Methods

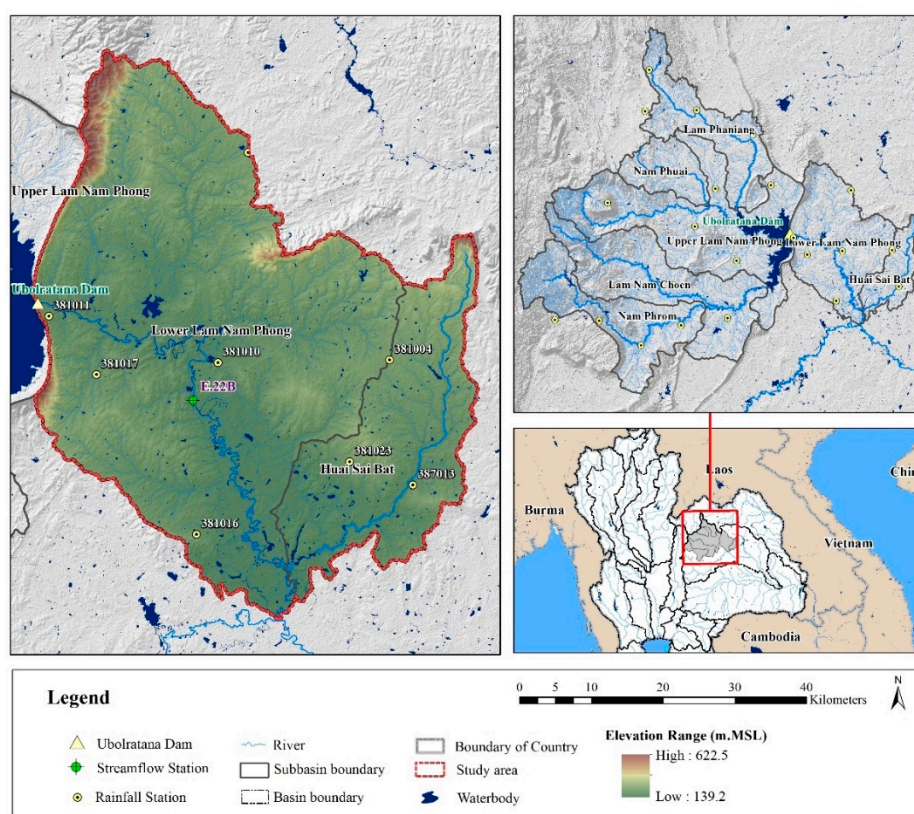
### 2.1. Study Area

The study focused on the lower Nam Phong River Basin, which is located in the Northeastern region of Thailand, with a total area of approximately 2386 km<sup>2</sup>, whereas the topography is undulating, varying in elevation from 139 m to 623 m above mean sea level (m+MSL) (note: since the Huai Sai Bat River is a main tributary of the Nam Phong River, the Huai Sai Bat sub-basin is then considered and included in this study, resulting in a larger study area of approximately 3127 km<sup>2</sup>). The Nam Phong River is considered to be the main river in the Nam Phong River Basin with a length of about 136 km that extends from the Ubol Ratana Dam (receiving the water from Lam Phaniang, Nam Phuay, Upper Lam Nam Phong, Lam Nam Choen, and Nam Phrom sub-basins with the storage capacity of 2431 million m<sup>3</sup> (MCM)) at the upstream end to the Chi River at the downstream end (Figure 1). The climate in the river basin is typically dominated by monsoon winds, i.e., the Northeast monsoon brings cool and dry weather during November to February. A dry season prevails from March to May. After this, the wet season is characterized by the Southwest monsoon that lasts from June to October. The average annual temperature is 26.8 °C, ranging from about 16.7 °C in December to about 36.4 °C in April. The average relative humidity, for the year as a whole, is about 71.1%, in

which the month with the highest relative humidity is September (82.5%) and the lowest is March (60%). The mean annual rainfall is approximately 1237.6 mm/year, whilst the month with most rainfall is September (224.9 mm) and the least is in January (2.1 mm) [18]. The mean annual discharge is about 1594.9 MCM/year with a minimum discharge of 34.5 MCM/year (in February) and a maximum discharge of 366.0 MCM/year (in October) [19].

## 2.2. Data Collection

The data collected for this study consists of 2 parts, which are 1) hydro-meteorological data, and 2) physical data of the river basin. Regarding the hydro-meteorological data, long-term daily datasets were collected from 24 rainfall stations of the Thai Meteorological Department (during 2000–2017), the E.22B gauging station (situated at Ban Tha Mao, Nam Phong District, Khon Kaen Province) of the Royal Irrigation Department (during 2005–2017), and the Ubol Ratana reservoir inflow hydrograph of the Electricity Generating Authority of Thailand (during 2005–2017) (see Figure 1 for locations of gauging stations). The physical river basin data such as the Digital Elevation Model (DEM, 5 m  $\times$  5 m grid spacing with vertical accuracies of 2 m for slope less than 35% and 4 m for slope greater than 35% [20]), land use, and soils were obtained from the Land Development Department (LDD). Other than that, the 2009 bathymetric surveys of 113 river cross sections at almost every 1 km along a 136 km reach of the Nam Phong River was also retrieved from the Research Center for Environmental and Hazardous Substance Management, Khon Kaen University.



**Figure 1.** Location of the study area and its boundary.

## 2.3. GCMs, RCP Climate Scenarios, and Bias Correction

### 2.3.1. Representative Concentration Pathways (RCPs) Scenarios with Global Climate Models (GCMs) for South Asia (CORDEX-SA)

The analysis of future rainfall changes was used for the analysis of future streamflow calculated by the Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) model. In this

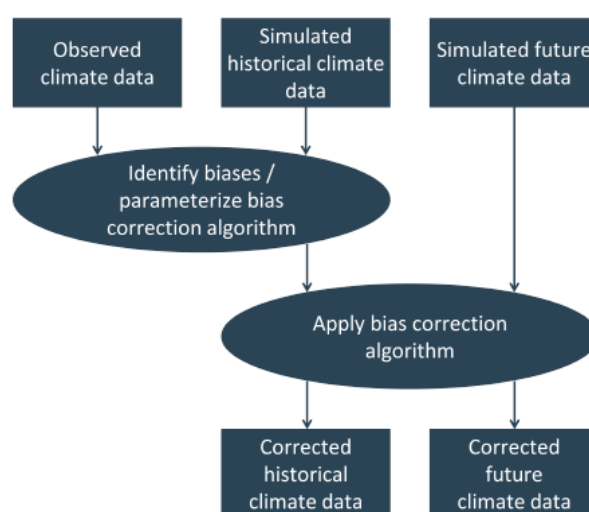
study, three sets of simulations were driven by the following three GCMs viz., CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, and MPI-ESM-LR, for the future climate projections (see Table 1 for more details). Based on the model performance of historical runs, the downscaled future climate data was derived from the Regional Climate Model (RCM) with 50 km grid spacing under the influence of Representative Concentration Pathways (RCPs) 4.5 and 8.5 emission scenarios, from the Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment over the South Asia Domain (CORDEX-SA) (note: RCP 4.5 represents a stable scenario where the radiative force will reach up to 4.5 W/m<sup>2</sup> by 2100) [21–24]. RCP 8.5 represents a relatively extreme scenario where greenhouse gas (GHG) will continuously increase throughout 2100, at which time radiative force will reach 8.5 W/m<sup>2</sup> [25,26].

### 2.3.2. Bias Correction

The RCMs seem to be able to provide a higher spatial resolution and more reliable results on a regional scale in comparison to General Circulation Models (GCMs), as they can produce more spatially and physically coherent outputs with observations [27–29]. Nevertheless, the original RCM outputs still contain considerable bias due to the forcing of GCMs, or from systematic model errors, in which such biases could be amplified during climate change impact studies [30,31]. Therefore, the bias correction of RCM simulated data is of great importance and is a prerequisite step for data correction prior to climate change effect analysis. As such, the bias correction by the Linear Scaling method included in the tailor-made tool dubbed the “Climate Model data for hydrologic modeling (CMhyd)” was used for bias-correcting climate variables obtained from RCMs [32]. The RCMs simulated historical rainfall during the period of 1989–2005, which was calibrated with the historical observed rainfall during the same period, and projected rainfall for the period 2020–2039 under two RCPs (RCP 4.5 and RCP 8.5) (see Figure 2 for detailed bias correction procedure).

**Table 1.** The description of the Global Climate Models (GCMs) downscaled by RCA4 CORDEX.

No	Driving GCM				RCM			
	Name	Resolution (km)	Scenarios	Institute, Country	Name	Resolution (km)	Scenarios	Institute, Country
1	CNRM-CM5	155 × 155	RCP 4.5	CNRM-ERFACS, France	RCA4	50 × 50	RCP 4.5	SMHI, Sweden
			RCP 8.5				RCP 8.5	
2	IPSL-CM5A-MR	275 × 275	RCP 4.5	IPSL, France	RCA4	50 × 50	RCP 4.5	SMHI, Sweden
			RCP 8.5				RCP 8.5	
3	MPI-ESM-LR	210 × 210	RCP 4.5	MPI-M, Germany	RCA4	50 × 50	RCP 4.5	SMHI, Sweden
			RCP 8.5				RCP 8.5	



**Figure 2.** The detailed bias correction procedure using the Climate Model data for hydrologic modeling (CMhyd) tool. [32].

#### 2.4. Analysis of Future Land Use Change

The analysis of future streamflow is based on the simulation results performed by HEC-HMS model, in which a parameter related to future land use would also need to be imported into the model for representing future runoff generation processes. In this study, the Land Change Modeler (LCM) tool, which is the extension of TerrSet software developed by Clark Lab [33], was used to analyze the spatial pattern of changes in predicting the Land Use and Land Cover (LULC) and validating the predicted LULC outputs [34]. A combination of Multi-Layer Perceptron (MLP) and Markov chain analysis was applied to model the transition and projection of historical (2010), present (2015), and future (2039) land use maps. The MLP, which is a feed-forward artificial neural network that generates a set of outputs from a set of inputs with separate training and recall phases [35], was trained to model land use transitions through creating transition maps. The transition potential maps created using MLP are based on a set of explanatory variables called drivers, i.e., agricultural areas, distance to urban areas, rivers, roads, as well as altitude, slope, and aspect of land. The land use modeling requires the integration of both changes in environmental and socio-economic drivers, however, the incorporation of the socio-economic factor is restricted by the lack of spatial data and the difficulties in integration with other environmental data [36]. The Markov chain method was also applied with sufficient accuracy to process the transition maps for the prediction process [37], based on the past trends of the land use changes from the period 2010 to 2015.

#### 2.5. Hydrological Modeling

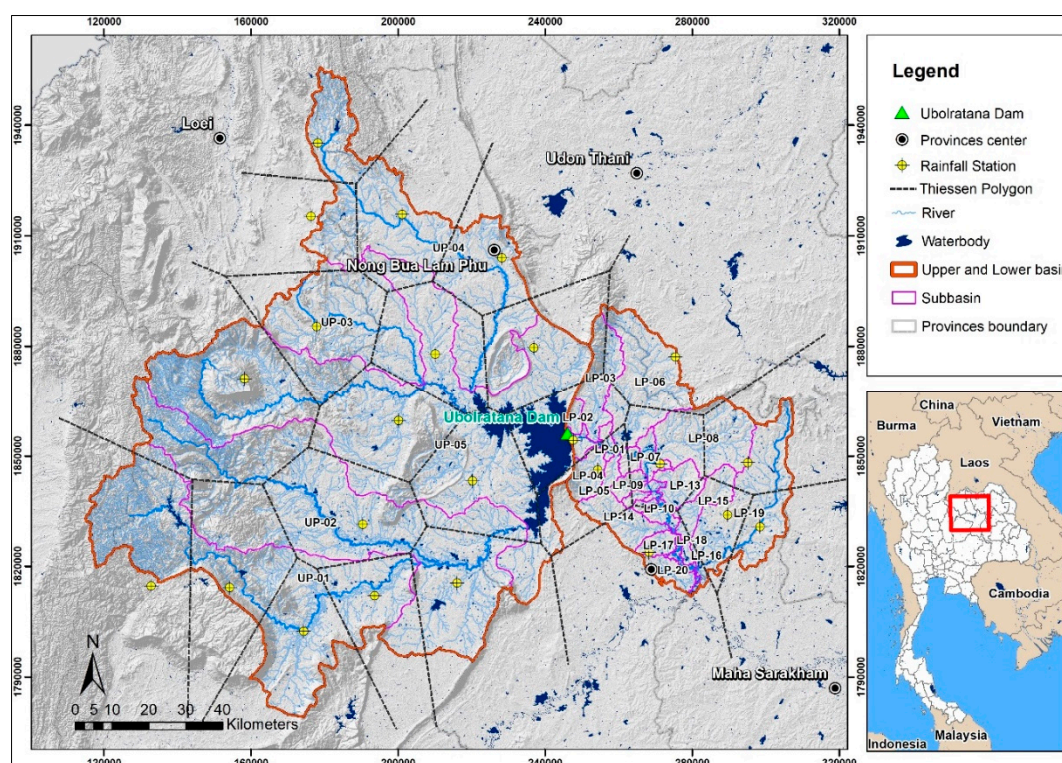
The estimation of streamflow in the Nam Phong River Basin was carried out using HEC-HMS model, which is designed for rainfall-runoff processes based on the relationships among runoff, evapotranspiration, infiltration, excess rainfall transformation, baseflow, and open channel routing of both gauged and ungauged river basins. In principle, the HEC-HMS program is a modeling system, which relies on dividing the hydrologic cycle into separate pieces, constructing watershed boundaries, and representing each water cycle component by a separate mathematical model. As a result, each mathematical model becomes suitable for different environments and conditions [38].

The HEC-HMS simulation results is stored in the HEC-DSS (Hydrologic Engineering Center's Data Storage System), which can be used in conjunction with other HEC software, like Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS), for water availability, urban drainage, flow forecasting, future urbanization impact, reservoir spillway design, flood damage reduction, floodplain regulation, and systems operation. More details on the process of HEC-HMS model construction are presented as follows.

##### 2.5.1. Watershed Delineation

As a prerequisite to the HEC-HMS model set-up, the watershed was delineated and divided into several sub-basins using Arc Hydro Tools in ArcGIS 10.3 software, based on the 30-m Digital Elevation Model (DEM) and stream network. In consequence, the entire study area was then divided into 25 sub-basins consisting of 5 sub-basins for the upper Nam Phong River Basin (covering the areas upstream of the Ubol Ratana reservoir) and 20 sub-basins for the Lower Nam Phong River Basins (covering the areas downstream of the Ubol Ratana reservoir) (see more details in Figure 3).





**Figure 3.** Watershed delineation for the upper and lower Nam Phong River Basins and locations of rainfall stations used in the Hydrologic Engineering Center’s Hydrologic Modeling System (HEC-HMS model).

### 2.5.2. HEC-HMS Hydrologic Elements

The HEC-HMS hydrologic elements, such as sub-basin, reach, junction, reservoir, diversion, source, and sink, are thoroughly connected in the river network, where their connectivity is considered to represent the runoff processes and their effects on the drainage system [38]. In this study, the Nam Phong model set-up contains only 5 of the abovementioned elements, accounting for in total 93 hydrologic elements. In detail, there are 25 sub-basin elements connected with 45 reaches and 22 junctions. In addition, five reservoir elements were also assigned to model the detention and attenuation of hydrographs caused by Ubol Ratana, Kaeng Sua Ten, Huai Siew, and Nong Loeng Yai Reservoirs, including Nong Wai Operation and Maintenance Project (Nong Wai Weir). A diversion element was also added to model the diverted flow from Nong Wai Weir to the left and right main irrigation canals.

### 2.5.3. Importing HEC-HMS Input Parameters

To estimate the water balance components, the following computation models were applied to the sub-basins and reaches in which their detailed descriptions can be described below.

- Runoff-volume models are used to compute the runoff volume of sub-basins by subtracting the rainfall by losses through interception, surface storage, infiltration, evaporation, and transpiration. In this study, the “Initial and constant rate model” was selected and used as sub-basin loss method for sub-basins within the Nam Phong River Basin.
- Direct-runoff models are used to convert excess rainfall into direct runoff at the outlets of each sub-basin. The “Snyder unit hydrograph model”, which is a synthetic unit hydrograph method developed to compute the peak flow as a unit of rainfall, was used in this study (note: a unit hydrograph represents the runoff distribution over time for one unit of rainfall excess over the entire watershed for a specified duration).
- Baseflow models are proposed to simulate the slow subsurface water drainage from the system into the channels, in which the “Exponential recession model” was chosen for this study.

- Routing models are employed to simulate one-dimensional open channel flow for determining the flow hydrograph at the downstream point of the sub-basin in relation to its upstream reach, and functions of sub-basin characteristics, such as slope and length of channel, channel roughness, channel shape, downstream control, and initial flow condition [39]. In this study, the “Muskingum model” was selected.

#### 2.5.4. Importing Rainfall Data

The daily rainfall time-series during the period 2000–2017, collected from 24 selected weather stations of the Thai Meteorological Department (TMD) located within and surrounding the Nam Phong River Basin, was used in this study (see Figure 3 for rainfall station locations). Before importing rainfall data into the HEC-HMS model, the adjustment of point rainfall to areal rainfall distribution was made using the Thiessen Polygon Method, which is a standard method for computing mean areal rainfall for the topographical and meteorological homogeneous areas (see Equation (1) for formula used).

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

where

$\bar{P}$  - the mean areal rainfall

$P_i$  - rainfall observed at the  $i^{\text{th}}$  station inside or outside the Nam Phong River Basin

$A_i$  - in-region portion of the area of the polygon surrounding the  $i^{\text{th}}$  station (area of each polygon)

$A$  - the total area of the Nam Phong River Basin

$n$  - the number of areas

#### 2.6. Frequency Analysis

Frequency analysis was used to estimate the time interval between similar size/intensity of events or the so-called return period of specific events. The frequently used probability function, i.e., Gumbel distribution, was used to estimate the probable (maximum daily and annual) rainfall in the Nam Phong River Basin for different return periods. The time horizon of 38 years was divided into periods of different lengths, i.e., the years 2000–2017 (baseline) and 2020–2039 (future). The RCM projected maximum daily rainfall for the period 2020–2039 was estimated for given return periods, i.e., 25-, 50-, and 100-year periods, based on a frequency-factor formulation of the Gumbel distribution (see Section 2.3.2 for details).

#### 2.7. Hydraulic Modeling

The HEC-RAS hydraulic model, developed by the Hydrologic Engineering Center (HEC) of the U.S. Army Corps of Engineers, was used for flow and flood analysis under different discharge conditions in the river system of the Nam Phong River Basin, since the HEC-RAS set-up is capable of performing 1D steady state water surface profile calculations, as well as unsteady 1D and 2D flow simulations [40]. The water surface profiles are calculated from the previous cross section to the next one by solving the energy equation (Equation (2)) with an iterative procedure: the so-called standard step method [41] (note: the details of terms presented in Equation (2) can be seen in [38]). Furthermore, when carrying out the unsteady flow simulation, the HEC-RAS applies the continuity and momentum equations for determining the stage and flow at all locations in the model (see [38] for more details).

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (2)$$

where

- $Z_1, Z_2$  - elevation of the main channel inverts
- $Y_1, Y_2$  - water depth at cross sections
- $V_1, V_2$  - average velocities
- $a_1, a_2$  - Saint Venant coefficients describing the variability of velocity profile in the particular cross section
- $g$  - gravitational acceleration
- $h_e$  - energy head loss

### 2.7.1. Schematic of the River System

To connect the river system, the schematic of the river system was firstly built using the geometric data editor available in HEC-RAS. Thereafter, the river system parts such as rivers, junctions, and additional hydraulic structures located along the rivers, can be properly depicted. All the values of the cross section, i.e., station, elevation, left and right overbanks, reach length, Manning's roughness coefficients, left bank, right bank, and energy loss coefficients (friction, expansion, and contraction losses), must be entered, as the cross section describes the terrain profile of the river where the flooding on left/right banks can be clearly indicated.

### 2.7.2. Boundary Condition

Boundary conditions are required to establish the starting water surface for HEC-RAS to begin its calculations. The up- and downstream boundary conditions were entered for each reach, whereas the internal boundary conditions were defined for connections to junctions. The flow from each sub-basin determined by HEC-HMS hydrological model, together with the released flow from Ubol Ratana Dam stored in HEC Data Storage System (DSS), were imported into the HEC-RAS model through the unsteady flow data editor option. The diverted flow to irrigation canal system, which was assigned negative values, was also modelled to evaluate canal hydraulics for both steady and unsteady flow conditions. Regarding the downstream boundary condition, the type of boundary condition called "Normal Depth", which is based on the assumption that the river flows under normal flow (uniform flow) conditions at the downstream boundary of the HEC-RAS set-up model, was selected. In detail, the normal depth or the stage for each computed flow was calculated based on Manning's equation, by using the slope of the channel bottom, 0.00011 m/m.

### 2.8. Model Calibration and Validation

The fundamental operation, the model calibration, was undertaken by adjusting/tuning identified sensitive parameters used in the HEC-HMS model at gauging station E.22B (discharge) and inflow to Ubol Ratana reservoir at a daily time-step during the period 2005 to 2011, and the 1D HEC-RAS model for daily water level at gauging station E.22B at a time-step during the flood period (August to December 2010) until the model simulation results closely match the observed values. In addition, the model evaluation procedure was also conducted through model validation process in order to prove that both set-up models are accurately capable of representing physical processes and providing predictive capabilities under different—though similar—conditions, based on a set of calibrated parameters and another set of hydrological data. For validation, the simulated outputs calculated by both models were also compared with the observed data at E.22B, i.e., daily discharge during the years 2012 to 2017 was used to validate the HEC-HMS, and daily water levels during the severe flood period (August to December 2011). The Coefficient of Determination ( $R^2$ ) and Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) [42], which are reliable criteria, were used to assess the goodness of both model performances during calibration and validation periods (see Equations (3) and (4) for the detailed formulas).

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg})(P_i - P_{avg})}{\left( \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg})^2} \right) \left( \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P_{avg})^2} \right)} \right]^2 \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg})^2} \quad (4)$$

where

$O_i$  - observed value at time-step  $i$

$O_{avg}$  - average observed value of the simulation period

$P_i$  - simulated value at time-step  $i$

$P_{avg}$  - average simulated value of the simulation period

To precisely verify the results simulated by the 2D HEC-RAS model, the goodness of fit between the generated flood map from the HEC-RAS and the flood map extracted from the satellite images from Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (Public Organization—GISTDA) was considered and assessed by the measure of Relative Error (RE) (Equation (5)), which is a measure that describes the percentage-difference between observed and simulated values over a specified time period and is useful in diagnostics of over-prediction or under-prediction (smaller values are the indication of better model performance). The F-statistics (F) (Equation (6)), which are the ratios of the area of the overlapping portion of the two flood extents to the area of both flood extents projected on the map, were also used to denote the overall goodness of fit of the HEC-RAS model simulations (a high F-statistic indicates very good model performance).

$$RE = \frac{|A_o - A_p|}{A_o} \quad (5)$$

$$F = \left( \frac{A_{op}}{A_o + A_p - A_{op}} \right) \times 100 \quad (6)$$

where

$A_o$  - the inundation area extracted from satellite images

$A_p$  - the HEC-RAS generated flood inundation area

$A_{op}$  - the intersection of  $A_o$  and  $A_p$

## 2.9. Assessment of Flood Impacts and Damage

The amount of damage resulting from floods relies on flood characteristics, i.e., depth and duration. In this study, the flood damage assessment was performed based on direct damage estimation, which occurs as a consequence of the physical contact of floodwater with lives, properties, and any other objects. The damage functions derived by [43] (Equations (7) and (8)) were used for direct damage determination, in which four major types of land use were included in the calculation, i.e., residential, commercial, industrial, and agricultural. The list of coefficients for each land use type used in Equation (7) can be presented in Table 2.

$$DPE = a_0 + a_1 H + a_2 L \quad (7)$$

where



DPE - direct flood damage per land use type (Thai Baht)

H - maximum flood depth (cm)

L - flood duration (day)

$a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  - flood damage coefficients (see Table 2)

**Table 2.** Estimated flood damage coefficients for each different land use type [43].

No	Type	$a_0$	$a_1$	$a_2$
1	Residential	−300.00	45.40	33.80
2	Commercial	−2.15	88.10	0.00
3	Industrial	−1740.00	522.00	181.00
4	Agriculture	−1050.00	553.00	0.00

The direct flood damage per land use type calculated by Equation (7) was then used to determine the direct flood damage for all land use types in Thai Baht by Equation (8).

$$DAM = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 \frac{DPE(j, H, L)}{APE(j)} \cdot PC(i, j) \cdot AREA(i) \quad (8)$$

where

DAM - direct flood damage (Thai Baht)

DPE (j, H, L) - direct flood damage per land use type j at H, L (Thai Baht /land use type)

APE (j) - average area per land use type j per unit (m<sup>2</sup>) (see Table 3)

PC (i, j) - percentage of land use type j in cell i (-)

AREA (i) - area of cell i (m<sup>2</sup>)

i - number of cell (-)

j - land use type 1, 2, 3, 4 (residential, commercial, industrial, agricultural) (-)

H - maximum flood depth (m)

L - flood duration (day)

**Table 3.** The average area per land use type per unit [44].

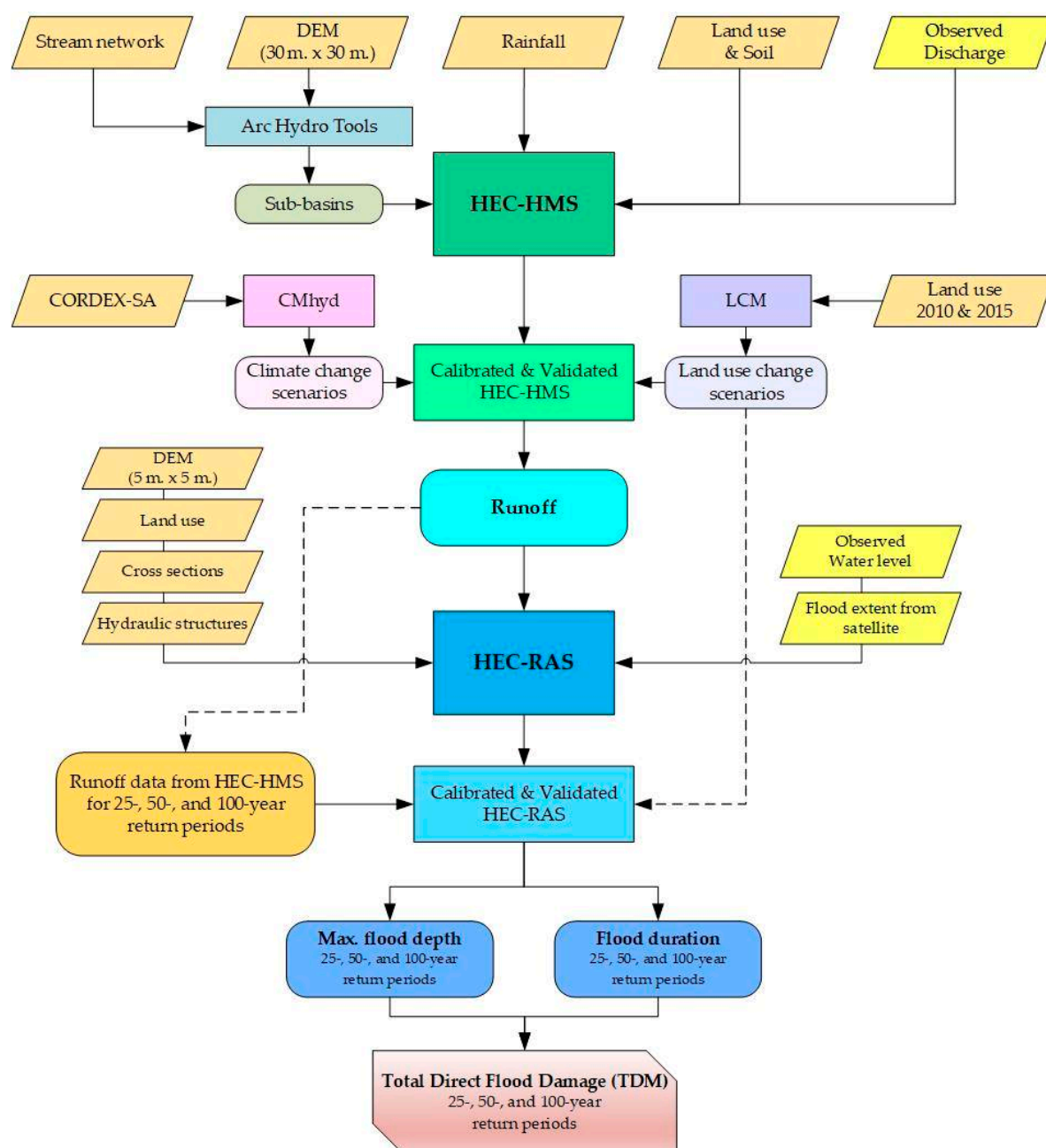
No	Type	Unit	Area Per Unit (m <sup>2</sup> )
1	Residential	Household	1000
2	Commercial	Shop	250
3	Industrial	Factory	4000
4	Agriculture	Farm	42,000

Note: The average household area per household (for residential area), average commercial area per shop (for commercial area), average industrial area per factory (for industrial area), and average agricultural area per farm (for agricultural area), were adjusted from the study of [45] in order to represent the actual land use situation of the lower Nam Phong River Basin.

It can be seen that the direct flood damage to infrastructure was excluded from the direct flood damage calculation. Therefore, as suggested by [46], the flood damage to infrastructure can be estimated at as high as 65% of the total direct flood damage, which enables the so-called “Total Direct Flood Damage (TDM)” to be calculated in Thai Baht (Equation (9)).

$$TDM = DAM + (0.65 \cdot DAM) \quad (9)$$

To achieve a better understanding from the above-detailed processes, the summarized key steps involved in the estimation of total direct flood damage of different return periods in the lower Nam Phong River Basin for land use and climate change scenarios are presented in Figure 4.



**Figure 4.** The main steps of the estimation of total direct flood damage of different return periods in the lower Nam Phong River Basin for land use and climate change scenarios.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Analysis of Future Land Use Change

##### 3.1.1. Identifying Trends of Land Use Changes

Two sets of land use data (2010 and 2015), which were classified into eleven land use categories, were used to identify trends of land use changes in the lower Nam Phong River Basin. Referring to Table 4, it was found that the paddy field was decreased most significantly by 305.55 km<sup>2</sup>, followed by the forested area, decreasing by 115.68 km<sup>2</sup>, and miscellaneous land, decreasing by 75.77 km<sup>2</sup>. The field (cash) crops, i.e., sugarcane and cassava, tended to be increased most markedly, by 281.62 km<sup>2</sup>, and perennial crops (especially rubber trees) were the second largest increment by 212.26 km<sup>2</sup>, and followed by the urban and built-up land with the increase about 51.37 km<sup>2</sup>.

**Table 4.** Details of land use changes (km<sup>2</sup>) in the lower Nam Phong River Basin during the period of 2010 and 2015.

No	Land Use	Year 2010	Year 2015	Change	
		Area (km <sup>2</sup> )	Area (km <sup>2</sup> )	km <sup>2</sup>	%
1	Aquaculture land	9.59	13.12	3.53	36.8
2	Field crop	3300.80	3582.42	281.62	8.5
3	Forest land	4621.29	4505.61	−115.68	−2.5
4	Horticulture	6.32	13.80	7.48	118.4
5	Miscellaneous land	633.19	557.42	−75.77	−12.0
6	Orchard	161.11	102.18	−58.93	−36.6
7	Paddy field	4351.11	4045.56	−305.55	−7.0
8	Pasture and farm house	22.68	19.74	−2.94	−13.0
9	Perennial crop	615.33	827.59	212.26	34.5
10	Urban and built-up land	705.99	757.36	51.37	7.3
11	Water body	611.12	613.73	2.61	0.4
<b>Total</b>		<b>15,038.53</b>	<b>15,038.53</b>		

### 3.1.2. Projected Land Use Changes During the Period 2020–2039

Regarding the projected land use changes, the potential for land transitions was modeled using transition sub-models of LCM, which consist of a single land cover transition or a group of transitions with the same underlying driver variables [33]. In fact, the more transition sub-models used to generate suitable land use maps, the higher the simulation accuracy of the land use types of the lower Nam Phong River Basin, under the influence of the same driver variables. Therefore, in this study, seven transition sub-models including (1) field crop to urban and built-up land, (2) forest land to perennial crop, (3) forest land to urban and built-up land, (4) miscellaneous land to urban and built-up land, (5) paddy field to field crop, (6) paddy field to urban and built-up land, and (7) perennial crop to field crop, were considered for potential transition modeling. The changes in aquaculture land, horticulture, orchards, pastures and farmhouses, and water bodies were neglected for future projection of land use maps, because their transitions were found to be insignificant.

After the explorations of land use change trends, the possible future land use changes during the period 2020–2039 were investigated based on driver variables used for modeling the historical change process, i.e., agricultural areas, distance to urban areas, rivers, roads, as well as altitude, slope, and aspect of land. Upon the completion of the analysis conducted by LCM, in comparison to 2015 land use data, it was noticed that the projected paddy field in 2039 will be decreased significantly by 1278.40 km<sup>2</sup> (31.6%), whereas the forested area will also be decreased by 500.57 km<sup>2</sup> (11.1%). The field crop was found to be significantly increased by 1,803.32 km<sup>2</sup> (50.3%), whereas the next increment will be urban and built-up land for 268.86 km<sup>2</sup> (35.5%) (see Table 5 for more details). It can be observed that the development scenario changes in the future could either increase or decrease their land use changing rates, which are processed by the change analysis panel of LCM. As a result, based on the earlier land cover areas, the quantitative change of each land use type was determined by adding the gains and then subtracting the losses [47].

In this study, only four types of land use, i.e., residential, commercial, industrial, and agriculture, was used for flood impacts and damages assessment, as they are often at risk, with higher potential use, high possible damage costs, and high exposure to flooding. As such, the potential land use change analysis revealed that the agricultural land will have the largest decrease by 38.27 km<sup>2</sup> (1.7%), followed by the decrease of forested area by 49.76 km<sup>2</sup> (19.5%). The residential area was found to be increased by 95.62 km<sup>2</sup> (51.5%), whereas the industrial area was also found to be increased by 26.27 km<sup>2</sup> (245.1%) (see Table 6 for descriptions).

**Table 5.** The 2039 land use patterns in the lower Nam Phong River Basin compared to the 2015 land use data.

No	Land use	Year 2015		Year 2039	
		Area (km <sup>2</sup> )	Area (km <sup>2</sup> )	Change (km <sup>2</sup> )	Change (%)
1	Aquaculture land	13.12	13.12	0.00	0.0
2	Field crop	3582.42	5385.74	1803.32	50.3
3	Forest land	4505.61	4005.04	−500.57	−11.1
4	Horticulture	13.80	13.80	0.00	0.0
5	Miscellaneous land	557.42	525.48	−31.94	−5.7
6	Orchard	102.18	102.18	0.00	0.0
7	Paddy field	4045.56	2767.16	−1278.40	−31.6
8	Pasture and farmhouse	19.74	19.74	0.00	0.0
9	Perennial crop	827.59	566.32	−261.27	−31.6
10	Urban and built-up land	757.36	1026.22	268.86	35.5
11	Water body	613.73	613.73	0.00	0.0
<b>Total</b>		<b>15,038.53</b>	<b>15,038.53</b>		

**Table 6.** Trends in areas of the seven major land use categories in the lower Nam Phong River Basin between 2015 and 2039.

No	Land Use	Year 2015		Year 2039	
		Area (km <sup>2</sup> )	Area (km <sup>2</sup> )	Change (km <sup>2</sup> )	Change (%)
1	Agricultural land	2253.40	2215.13	−38.27	−1.7
2	Commercial	47.81	54.17	6.36	13.3
3	Forest land	254.53	204.77	−49.76	−19.5
4	Industrial	10.72	36.99	26.27	245.1
5	Miscellaneous land	144.50	98.78	−45.72	−31.6
6	Residential	185.57	281.19	95.62	51.5
7	Water body	88.36	93.86	5.50	6.2
<b>Total</b>		<b>2984.89</b>	<b>2984.89</b>		

### 3.2. Analysis of Rainfall at Various Return Periods

In this study, the analysis of changes in rainfall was distinguished into the determination of daily maximum rainfall and annual rainfall at various return periods. The 18 years of data from historical simulation runs (2000–2017) were used as the baseline period, whereas the short-term future climate was represented by the 20-year period (2020–2039) from the scenario simulation runs. Three CMIP5 General Circulation Models, i.e., CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, and MPI-ESM-LR, were downscaled, whereas the bias correction method, “linear scaling”, was used to adjust the climate models to better represent the observational data. Using the Gumbel distribution, the 25-, 50-, and 100-year return periods of daily maximum and annual rainfall were estimated for each of the CMIP5 GCMs and averaged over three GCMs under both RCP 4.5 and RCP 8.5 in the lower Nam Phong River Basin (see Tables 7 and 8).

**Table 7.** The 25-, 50-, and 100-year return periods of daily maximum rainfall (average from three CMIP5 GCMs) under RCP 4.5 and RCP 8.5 in the lower Nam Phong River Basin compared to baseline period (2000–2017).

Period	Scenario	Rainfall Peak (mm/day)					
		25-yr	Relative Change (%)	50-yr	Relative Change (%)	100-yr	Relative Change (%)
2000–2017	Baseline	109.2		115.1		120.9	
2020–2039	RCP 4.5	129.4	18.5	143.8	24.9	158.1	30.7
	RCP 8.5	119.2	9.1	130.7	13.5	142.1	17.5

**Table 8.** The 25-, 50-, and 100-year return periods of annual rainfall (average from three CMIP5 GCMs) under RCP 4.5 and RCP 8.5 in the lower Nam Phong River Basin compared to baseline period (2000–2017).

Period	Scenario	Annual Rainfall (mm/year)					
		25-yr	Relative Change (%)	50-yr	Relative Change (%)	100-yr	Relative Change (%)
2000–2017	Baseline	1861.5		1994.6		2126.7	
2020–2039	RCP 4.5	1783.4	−4.2	1911.3	−4.2	2038.4	−4.2
	RCP 8.5	1727.4	−7.2	1848.6	−7.3	1968.9	−7.4

### 3.3. Analysis of Runoff Simulated by HEC-HMS

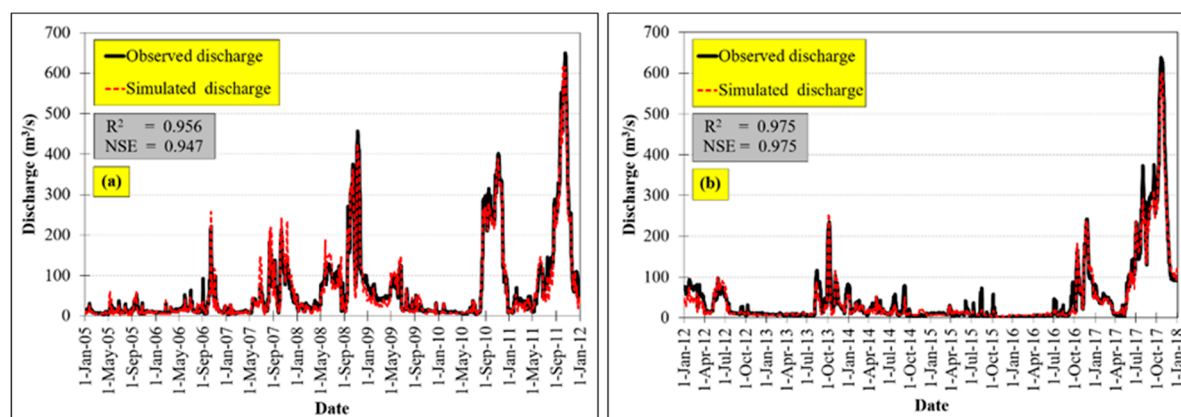
#### 3.3.1. Calibration and Validation of HEC-HMS

The HEC-HMS model calibration was carried out based on parameters identified during sensitivity analysis. The observed daily discharge time series at E.22B gauging station and the daily Ubol Ratana reservoir inflow was used for calibration, in which the dataset of 13 years was split into seven years (2005–2011) for calibration and six years (2012–2017) for validation. Regarding the evaluation criteria, the Coefficient of Determination ( $R^2$ ) and Nash–Sutcliffe Efficiency coefficient (NSE) were calculated and used to evaluate the HEC-HMS model performance, judging whether the model performance is satisfactory or unsatisfactory. For a daily time-step, the model is considered to be acceptable/satisfactory for the simulations of flow hydrograph for both gauged and ungauged river basins, when the values of  $R^2$  and NSE are greater than 0.50 [48].

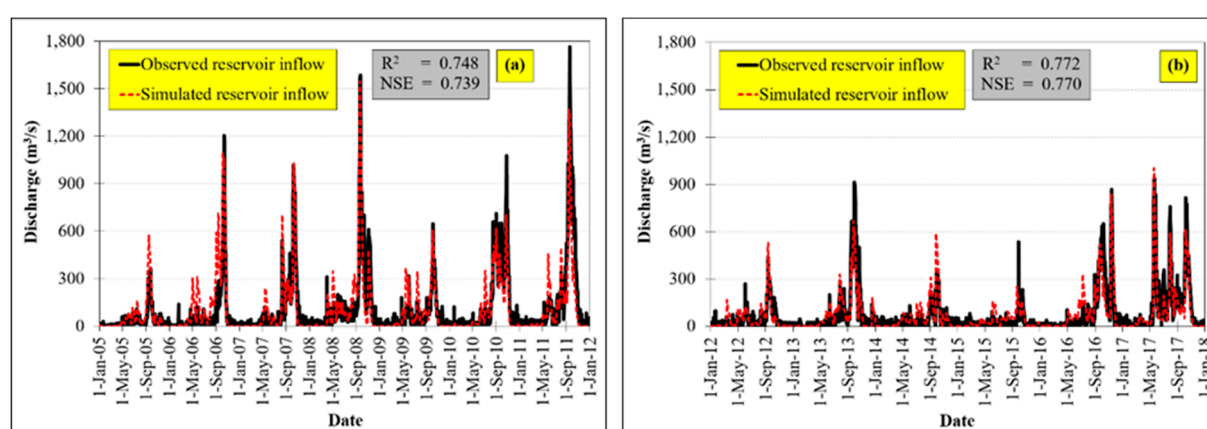
Based on the HEC-HMS calibrated parameters indicated in Table 9, the model calibration and validation results showed a reasonable match between observed and simulated hydrographs (see Figures 5 and 6). In detail, at the E.22B gauging station, the  $R^2$  and NSE values were found to be 0.956 and 0.947, respectively, for calibration, whereas the  $R^2$  and NSE values reached the same values of 0.975, for validation. By considering the daily Ubol Ratana reservoir inflow, the  $R^2$  and NSE values were 0.748 and 0.739, respectively, for calibration, whereas the  $R^2$  and NSE values were 0.772 and 0.770, respectively, for validation. The overall performance and capabilities of the HEC-HMS make it a superior model well-suited for assessing the impacts of future climate and land use change scenarios on streamflow in the lower Nam Phong River Basin.

**Table 9.** The summary of HEC-HMS calibrated parameters for the lower Nam Phong River Basin.

No	Method	Parameter	Calibrated values
1	Simple Canopy	Initial Storage (%)	1.000
		Max Storage (mm)	100.000
		Crop Coefficient	1.000
2	Simple Surface	Initial Storage (%)	1.000
		Max Storage (mm)	50.000
3	Initial and constant rate	Initial Loss (mm)	3.660–11.220
		Constant Rate (mm/hr)	0.240–0.892
		Impervious (%)	2.650–37.570
4	Snyder Unit hydrograph	Lag Time (hr)	0.100–41.15
		Peaking Coefficient	0.100–0.300
5	Exponential recession	Recession Constant	5.000
		Ratio of Peak	5.000
6	Muskingum	Muskingum K (hr)	0.020–4.550
		Muskingum X	0.250



**Figure 5.** Comparison of HEC-HMS simulated and observed daily discharges during: (a) calibration period; and (b) validation period, at the E.22B gauging station.



**Figure 6.** Comparison of HEC-HMS simulated and observed daily Ubol Ratana reservoir inflow during: (a) calibration period; and (b) validation period, at the inlet of the Ubol Ratana reservoir.

### 3.3.2. Analysis of Baseline and Future Peak Discharges Under Different Return Periods

By importing the daily maximum rainfall and annual rainfall of each CMIP5 model indicated in Tables 7 and 8, and the projected future land use into the HEC-HMS model, the hydrological simulations under different scenarios were conducted. At the outlet of the lower Nam Phong River Basin, the maximum daily outflow discharges for each of three CMIP5 GCMs and the average maximum daily outflow discharges for average three GCMs (CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, and MPI-ESM-LR) under both RCP 4.5 and RCP 8.5 at different time periods (2000–2017 and 2020–2039), were then obtained as can be seen in Table 10.

**Table 10.** The average maximum daily outflow discharges at the outlet of the lower Nam Phong River Basin for average three Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) GCMs under both Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5 and RCP 8.5 at different time periods.

Period	Scenario	Average Maximum Daily Outflow Discharge (m³/s)					
		25yr	Relative Change (%)	50yr	Relative Change (%)	100yr	Relative Change (%)
2000–2017	Baseline	1051.6	-	1169.0	-	1273.6	-
2020–2039	RCP4.5	909.6	−13.5%	1017.4	−13.0%	1112.3	−12.7%
2020–2039	RCP8.5	1162.7	10.6%	1299.5	11.2%	1436.5	12.8%

### 3.4. Analysis of Hydraulic Variables Simulated by HEC-RAS

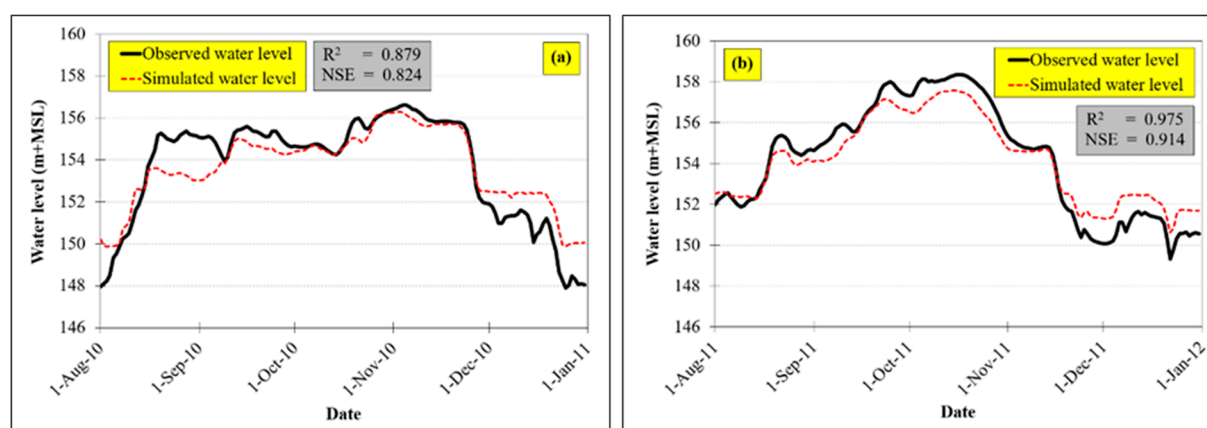
#### 3.4.1. Calibration of HEC-RAS

The calibration process was performed by using both recorded water level time series and historical flood extent. To enable a good match between observed and simulated water levels and

delineated flood extents for given flow events, the key parameter to be adjusted during the calibration phase is the Manning's roughness coefficient (Manning's  $n$ ) of the river channel and floodplain. The closeness of fit between the compared water levels was evaluated using two statistical indicators, i.e., the values of Coefficient of Determination ( $R^2$ ) and Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE), which are used to evaluate the overall performance of the calibrated HEC-RAS model (note: the model is judged to be acceptable or satisfactory when the values of  $R^2$  and NSE are greater than 0.50 [49]). More detailed calibration results are presented below.

### The Calibration of Daily Water Level

The calibration was completed during the flood period (August to December 2010), by raising or lowering the Manning's  $n$  values for both river channel and floodplain, until the best fit between observed and simulated water levels at the E.22B gauging station was achieved as revealed by the  $R^2$  and NSE of 0.879 and 0.824, respectively. A reasonably good agreement among water levels can be seen in Figure 7a.



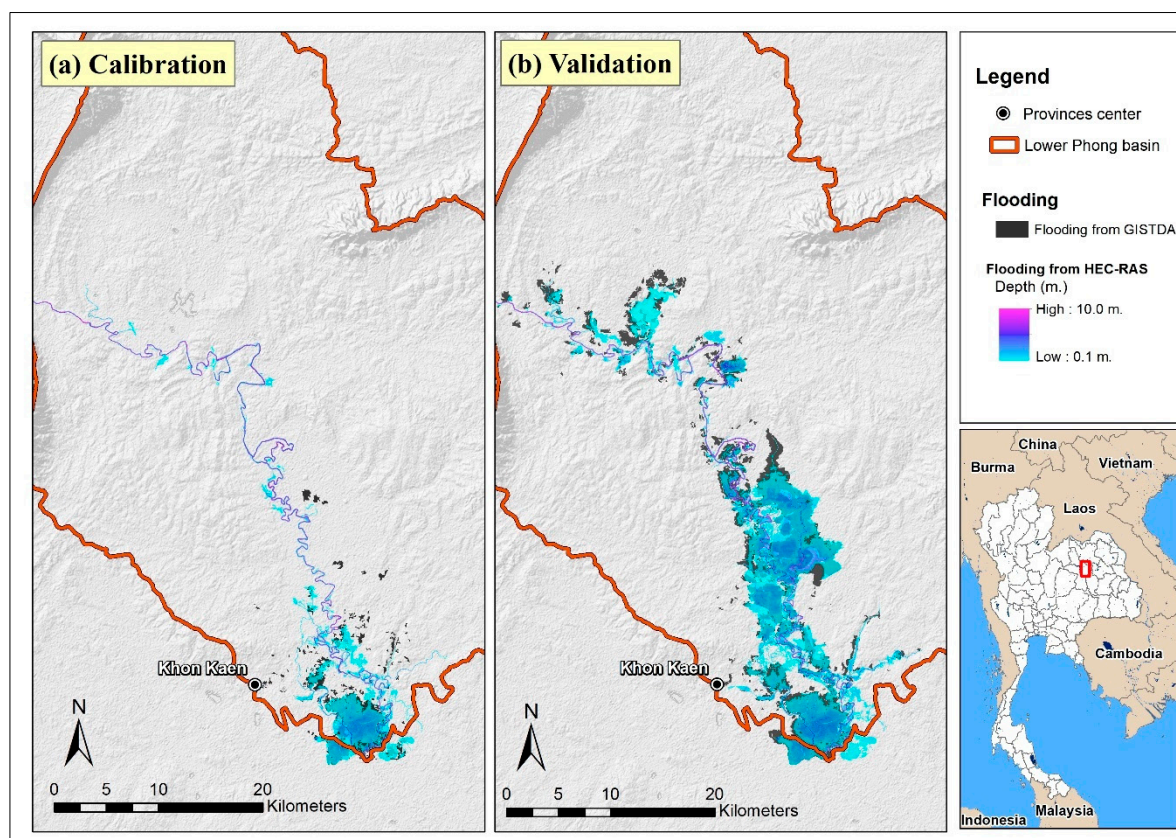
**Figure 7.** The compared daily water levels of the observation and simulation at the E.22B gauging station during: (a) calibration period (August to December 2010); and (b) validation period (August to December 2011).

### The Calibration of Delineated Flood Extents

The map of flood extent was delineated by the post-processing of simulated results of the HEC-RAS. The Manning's  $n$  values were varied during this calibration process in order to match the simulated flood extents with satellite observed ones. Eventually, a comparison of simulated and observed maximum flood extents from GISTDA for the October 2010 flood event was created, as illustrated in Figure 8a.

The graphical method (visual observation) and values of statistical parameters, i.e., Relative Error (RE) and F-statistics (calculated by Equations (5) and (6)), were used as an indication of calibration acceptance. Notably, the simulated flood extent seems to be in good agreement with the observed one, as can be seen from a good match between the flood extent boundaries during the maximum flood condition (on 31 October 2010). Referring to Jung et al. (2014), the values of Relative Error (RE) of 0.05 (with a value closer to zero meaning that no overlapping portion for two flood inundations), and the F-statistic of 43.55% (with high F-statistics indicates the goodness of fit between two flood inundations), also confirm that the calibrated HEC-RAS model is useable for flood extent delineation.





**Figure 8.** Comparison between satellite observed and maximum modelled flood extents during the calibration (31 October 2010 event), and (b) validation (12 October 2011 event).

### 3.4.2. Validation of HEC-RAS

To ensure the accuracy and robustness of HEC-RAS model, the validation was carried out by running the model with the calibrated  $n$ -values using different observed datasets than those used for calibration. The monitoring (observation) of the water level and the flood extent derived from satellite images by GISTDA were used as validation targets to demonstrate the suitability and effectiveness of the calibrated HEC-RAS model for flood hazard assessment in the lower Nam Phong River Basin. More details on validation results are summarized as follows.

#### The Validation of Daily Water Level

The validation was conducted with field water level measurements at the E.22B gauging station, in which the selected validation period was from 1 August to 31 December 2011. Referring to Figure 7b, the  $R^2$  and NSE were reasonably determined to be 0.975 and 0.914, respectively (more than 0.50 as recommended by [49]), which corresponds to a perfect match of the modelled daily water level from the observed data.

#### The Validation of Delineated Flood Extents

Based on the calibrated Manning's  $n$  values, the validation for the calibrated HEC-RAS model was performed for the 2011 flood period. The validation results were found to be satisfactory, as can be observed from the good match between observed flood inundation extent obtained from GISTDA and the flood extent map extracted from the HEC-RAS, with a low Relative Error (RE) of 0.10 and a high F-statistics of 47.89% (see Figure 8b).

According to the above-measured performance, it can be said that the calibrated HEC-RAS model can perfectly simulate the complicated hydraulic behavior of rivers and floodplains and provide satisfied/valid results.



### 3.5. Results of Flood Damage Assessment

#### Assessment of Flood Damage for Different Return Periods

The assessment of flood damage was based on the direct flood damage per land use type (DPE) as calculated by Equation (7). The map overlaying technique of raster data format (storing spatial information) in ArcGIS 10.3 software was applied for flood damage estimation of the lower Nam Phong River Basin. The new map themes were created with a geoprocessing tool called “Raster Calculator” function within the ArcGIS framework, which allows for complex mathematical calculations to be made on rasters. Initially, the 5 m × 5 m raster layers of maximum flood depth (H) and flood duration (L) obtained from the HEC-RAS, including land use for each scenario, were imported into ArcGIS. The raster calculator function was then employed to calculate the direct flood damage per land use type (DPE in Thai Baht) based on flood damage coefficients ( $a_0$ ,  $a_1$ , and  $a_2$ ).

The direct flood damage in Thai Baht (DAM) was then calculated by multiplying the direct flood damage per land use type (DPE) with the area of cell (5 m × 5 m cell size) and the percentage of land use type in specified cell (equal to one as each raster cell contains only one land use type), and divided by the average area per land use type per unit area (APE) (See Equation (8)).

In addition, there is no doubt about the fact that flood damage to infrastructure is of vital importance, as it can cause both short and long-term impacts, i.e., disruptions to electricity and water supply, transportation, communication, education, and health facilities. Therefore, the direct flood damage to infrastructure must be included in the direct flood damage calculation, which is 65% of the total direct flood damage, and leading to the total direct flood damage (TDM) (see Equation (9)). Table 11 shows the total direct flood damage of different return periods and time horizons in the lower Nam Phong River Basin for both the baseline and future climate scenarios.

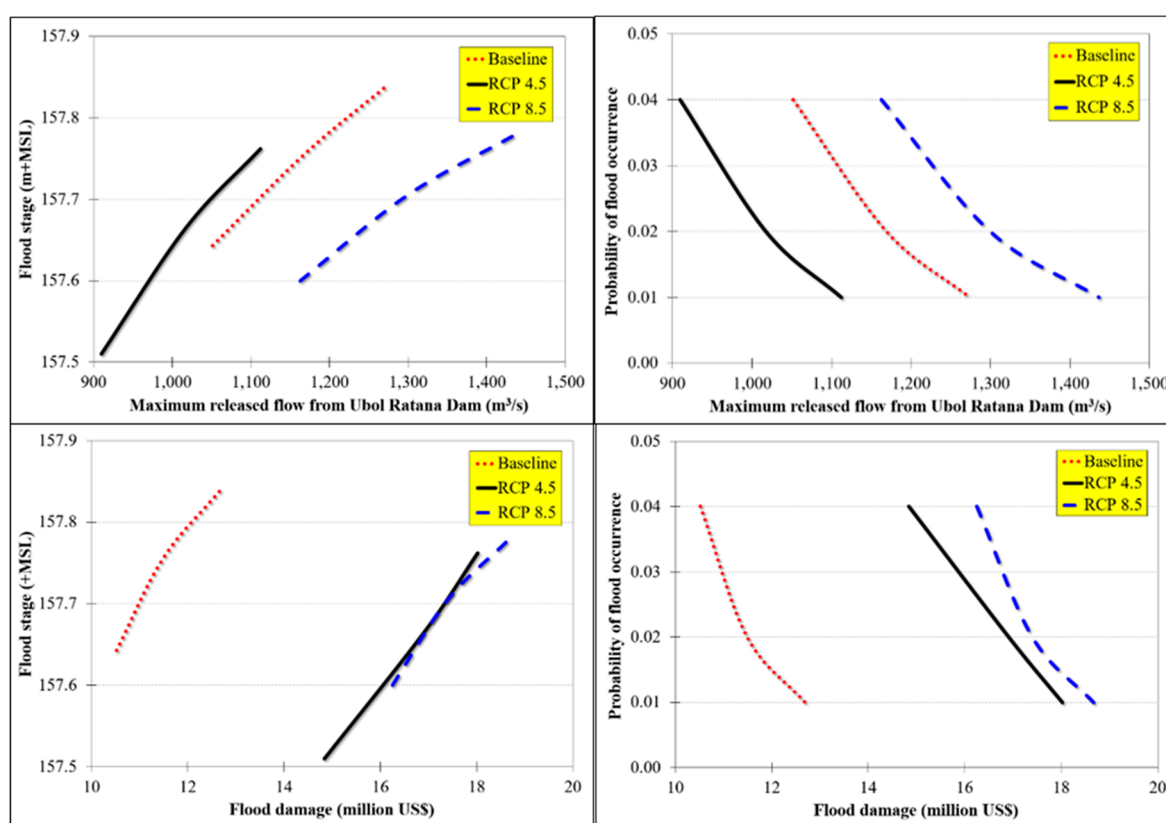
**Table 11.** Estimation of total direct flood damage in the lower Nam Phong River Basin at different return periods for both baseline and future climate scenarios.

Period	Scenario	Land Use Type	Total Direct Flood Damage (TDM)					
			25yr		50yr		100yr	
			(million US\$)	(%)	(million US\$)	(%)	(million US\$)	(%)
2000-2017	Baseline		10.52	100.00	11.50	100.00	12.69	100.00
		Residential	0.72	6.80	0.79	6.85	0.85	6.73
		Commercial	0.41	3.86	0.44	3.85	0.46	3.63
		Industrial	0.27	2.53	0.28	2.43	0.28	2.24
		Agriculture	4.99	47.41	5.46	47.50	6.09	48.00
		Infrastructure	4.14	39.39	4.53	39.37	5.00	39.39
2020-2039	RCP 4.5		14.84	100.00	16.91	100.00	18.02	100.00
		Residential	3.51	23.65	3.93	23.22	4.19	23.24
		Commercial	0.55	3.72	0.71	4.19	0.76	4.20
		Industrial	0.44	2.94	0.52	3.05	0.54	2.99
		Agriculture	4.50	30.30	5.10	30.14	5.44	30.17
		Infrastructure	5.85	39.39	6.66	39.39	7.10	39.39
	RCP 8.5		16.24	100.00	17.40	100.00	18.67	100.00
		Residential	3.73	22.95	4.03	23.16	4.33	23.21
		Commercial	0.68	4.22	0.70	4.01	0.73	3.93
		Industrial	0.49	3.02	0.52	3.00	0.53	2.82
		Agriculture	4.94	30.41	5.30	30.44	5.72	30.64
		Infrastructure	6.40	39.41	6.85	39.39	7.35	39.39

Note: Exchange rate is as of August 6, 2019 (US\$1 = 30.766 Baht).

It can be noted that in Table 11, the direct flood damages significantly increase with higher return periods for both the baseline and future conditions. Damages of 10.52, 11.50, and 12.69 million US\$ are found for 25-, 50-, and 100-year return periods, respectively, under the baseline scenario. Regarding the future period, the damages are found to be 14.84, 16.91, and 18.02 million US\$ for return periods of 25-, 50-, and 100-year, respectively, under the RCP 4.5 scenario, which is less than the damages under RCP 8.5, i.e., 16.24, 17.40, and 18.67 million US\$, respectively. Other than that, when considering each type of land use, the agriculture is found to be the most devastated by floods

during the baseline period by approximately 48% of the total direct flood damage, following by infrastructure (about 40%), residential area (almost 7%), and the rest. Under two emission scenarios (RCPs 4.5 and 8.5), the majority of direct flood damage is still found to be agricultural with somewhat of a decrease from the baseline by roughly 18%, due to the conversion from agricultural to residential (highest increase from the baseline by nearly 17%), commercial, and industrial development. The results can also be shown in the forms of the relationship among four different variables, i.e., 1) flood stage at E.22B gauging station, 2) maximum released flow from Ubol Ratana Dam, 3) probability or likelihood of flood occurrence (inverse of the return period), and 4) total direct flood damage. For ease of viewing, the relationship is presented by different time horizons and emission scenarios as can be seen in Figure 9. The logic of this figure moves counterclockwise starting from the upper right corner and ending in the lower right corner. Firstly, the northeast quadrant describes the probability or likelihood of flood occurrence equal to or greater than the maximum released flow from the Ubol Ratana Dam occurring within a given time period. Next, the relationship between flood stage at E.22B gauging station and maximum released flow from Ubol Ratana Dam is presented in the northwest quadrant, which describes how high the flood stage at E.22B gauging station might be for a given maximum released flow from the Ubol Ratana Dam. After this, the amount of flood damage that might occur in the lower Nam Phong River Basin, in relation to a certain flood stage at the E.22B gauging station is shown in the southwest quadrant. Eventually, the southeast quadrant relates the expected flood damage that might occur in the lower Nam Phong River Basin to the probability of flood occurrence.



**Figure 9.** The relationship between probability of flood occurrence, maximum released flow from Ubol Ratana Dam, flood stage at E.22B gauging station, and total direct flood damage in the lower Nam Phong River Basin, for future time period (2020–2039) compared to baseline time period (2000–2017).

#### 4. Conclusions

In this study, the potential climate and land use change impacts on floods in the selected case study, the lower Nam Phong River Basin, was undertaken using HEC-HMS hydrological and HEC-RAS hydraulic models under different return periods and future emission scenarios. The future

climate change was projected for the years 2020–2039 (early century) in comparison to the baseline period of 2000–2017, under a set of Representative Concentration Pathway (RCP) greenhouse gas scenarios (RCPs 4.5 and 8.5) from CMIP5 model simulations, i.e., CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, and MPI-ESM-LR. The high resolution downscaled (50-km grid spacing) and bias corrected daily rainfall was then used as an input for the calibrated HEC-HMS model (periods of 2005–2011 and 2012–2017 for calibration and validation, respectively) to generate a future daily discharge time series, in which the flood inundation maps were obtained by the calibrated HEC-RAS model (wet periods of 2010 and 2011 for calibration and validation, respectively).

The simulation findings revealed that, during the period 2000–2017, the potential flooded area in the lower Nam Phong River Basin with 25-, 50-, and 100-year return periods are 140.95 km<sup>2</sup>, 150.45 km<sup>2</sup>, and 165.33 km<sup>2</sup>, respectively, meanwhile the 2011 flood extent is about 128.08 km<sup>2</sup>. In view of future scenarios, the extent of flood inundation under RCP 4.5 is smaller than the baseline case for 25-, 50-, and 100-year return periods by 4.97 km<sup>2</sup>, 1.01 km<sup>2</sup>, and 8.59 km<sup>2</sup>, respectively, whereas the flood extent under RCP 8.5 is larger than the baseline condition for 25- and 50-year return periods by 5.30 km<sup>2</sup> and 3.86 km<sup>2</sup>, respectively, and almost no difference is found for the 100-year return period. The severity of flood events is projected to be increased and is likely to be serious in the RCP 8.5 scenario rather than RCP 4.5 scenario. There is little difference, in fact, in flood extent between the baseline and future cases, nevertheless, it is obvious that the future flood duration tends to increase. The inundation extent with zero to two months of flood duration is likely to decrease, whereas the extent with four to six months of flood duration is expected to be increased, especially for high return periods.

By considering the maximum flood depth and flood duration into the calculation of total direct flood damage, the direct flood damage clearly increases, with higher return periods for both the baseline and future conditions. With respect to the baseline, the total direct damage is estimated at 10.52, 11.50, and 12.69 million US\$ at the 25-, 50-, and 100-year return periods, respectively. In terms of future conditions, the total direct damage under RCP 4.5 is expected to be 14.84, 16.91, and 18.02 million US\$ for the 25-, 50-, and 100-year return periods, respectively, whereas the total direct damage under RCP 8.5 is found to be higher by 1.40, 0.49, and 0.65 million US\$, respectively. In addition, most of the total direct flood damage is in agriculture, followed by infrastructure and residential area, for both the baseline and future scenarios. However, the future agricultural damage is detected to be decreased from the baseline by approximately 18%, while the future damage for residential (expected to be increased from the baseline of up to 17%), commercial, and industrial areas tend to be increased from the baseline. Above all, it can be said that the future flood damage tends to increase because of changes in climate, together with the effect of increased exposure due to land use conversion.

Finally, the main findings from this study should prove very useful for defining and directing effective adaptation strategies to limit potential flood risks in the lower Nam Phong River Basin to a low level, both in probability and damage. The findings also could be used as a guideline for other areas throughout Thailand.

**Author Contributions:** Conceptualization, K.K., W.S.-A., and P.C.; methodology, K.K., W.S.-A., and P.C.; software, K.K. and S.W.; validation, K.K. and S.W.; formal analysis, S.W.; investigation, K.K.; writing—original draft preparation, K.K.; writing—review and editing, K.K., W.S.-A., S.W., and P.C.; supervision, W.S.-A. and P.C.; project administration, K.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research was funded by the Thailand Science Research and Innovation (TSRI), grant number MRG6180170.

**Acknowledgments:** The authors are grateful for the contributions by the Sustainable Infrastructure Research and Development Center (SIRDC), Water Resources and Environment Institute (WREI), Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University. A number of institutions, i.e., the Nong Wai Operation and Maintenance Project, Regional Irrigation Office 6, Royal Irrigation Department, the Northeast Hydro Power Plant, Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), the Upper Northeastern Meteorological Center, and the Land Development Department (LDD), also deserve special acknowledgments from the authors for providing meteorological, hydrological, and other relevant data used in this study.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

## References

1. USAID (United States Agency for International Development). Southeast Asia Floods Fact Sheet #1. Available online: [https://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/PA00J4C8.pdf](https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00J4C8.pdf) (accessed on 3 February 2020).
2. Imudom, W.; Phongpiyaphaiboon, N.; Suvattanametukul, C.; Jitsutthiphakorn, U.; Vibulsrisajja, T. *Thailand Floods 2011: Impact and Recovery from Business Survey*; Bank of Thailand: Bangkok, Thailand, 2012.
3. Thai Meteorological Department. *Annual Weather Summary of Thailand in 2011*; Thai Meteorological Department: Bangkok, Thailand, 2012.
4. Gale, E.L.; Saunders, M.A. The 2011 Thailand Flood: Climate Causes and Return Periods. *Weather* **2013**, *68*, 233–237.
5. Bunya, J.; Tang, C.S. Resilient Response and Recovery at Western Digital: After the Thai Flood. Available online: <https://www.thecasecentre.org/educators/products/view?&id=114608> (accessed on 3 February 2020).
6. World Bank. *Thai Flood 2011: Rapid Assessment for Resilient Recovery and Reconstruction Planning*; The World Bank: Bangkok, Thailand, 2012; pp. 1–36.
7. Prasanchum, H.; Kangrang, A.; Hormwichian, R.; Compliew, S. Impact of Climate and Rapid Land Use Changes on Runoff Quantities in Lower-Lampao River Basin. *Maharakham Int. J. Eng. Technol.* **2016**, *2*, 1–5.
8. Chacuttrikul, P.; Kiguchi, M.; Oki, T. Impacts of Climate and Land Use Changes on River Discharge in a Small Watershed: A Case Study of the Lam Chi Subwatershed, Northeast Thailand. *Hydrol. Res. Lett.* **2018**, *12*, 7–13.
9. Shrestha, S.; Lohpaisankrit, W. Flood Hazard Assessment under Climate Change Scenarios in the Yang River Basin, Thailand. *Int. J. Sustain. Built Environ.* **2017**, *6*, 285–298.
10. Bai, Y.; Zhang, Z.; Zhao, W. Assessing the Impact of Climate Change on Flood Events using HEC-HMS and CMIP5. *Water. Air. Soil Pollut.* **2019**, *230*, 119.
11. Azmat, M.; Qamar, M.U.; Huggel, C.; Hussain, E. Future Climate and Cryosphere Impacts on the Hydrology of a Scarcely Gauged Catchment on the Jhelum River Basin, Northern Pakistan. *Sci. Total Environ.* **2018**, *639*, 961–976.
12. Kheereemangkla, Y.; Shrestha, R.P.; Shrestha, S.; Jourdain, D. Modeling Hydrologic Responses to Land Management Scenarios for the Chi River Sub-basin Part II, Northeast Thailand. *Environ. Earth Sci.* **2016**, *75*, 793.
13. Pruethong, C.; Kuntiyawichai, K.; Sri-Amporn, W.; Jothityangkoon, C. Impacts of Land Use and Rainfall Frequency Changes on Peak Discharges and Inundation Areas in the Lower Nam Phong River Basin. *Naresuan Univ. Eng. J.* **2019**, *14*, 113–126.
14. Singkran, N.; Tosang, J.; Waijaroen, D.; Intharawichian, N.; Vannarart, O.; Anantawong, P.; Kunta, K.; Wisetsopa, P.; Tipvong, T.; Janjirawuttikul, N.; et al. Influences of Land Use and Climate Changes on Hydrologic System in the Northeastern River Basin of Thailand. *J. Water Clim. Chang.* **2015**, *6*, 325–340.
15. Shrestha, S. Assessment of Water Availability under Climate Change Scenarios in Thailand. *J. Earth Sci. Clim. Chang.* **2014**, *5*, 1–8.
16. Sukwimolseree, T.; Kosa, P. The Relationship between Land Use Change and Runoff. *Int. J. Environ. Ecol. Eng.* **2014**, *8*, 428–431.
17. Homdee, T.; Pongput, K.; Kanae, S. Impacts of Land Cover Changes on Hydrologic Responses: A Case Study of Chi River Basin, Thailand. *J. Jpn. Soc. Civ. Eng. Ser. B1 Hydraul. Eng.* **2011**, *67*, I\_31–I\_36.
18. Secretariat Office of the Chi River Basin Committee. *Management of the Chi River Basin*. Water Resources Regional Office 4. Department of Water Resources. Ministry of Natural Resources and Environment: Khon Kaen, Thailand, 2012.
19. Kuntiyawichai, K.; Sri-Amporn, W.; Pruethong, C. Quantifying Consequences of Land Use and Rainfall Changes on Maximum Flood Peak in the Lower Nam Phong River Basin. Available online: <https://www.scientific.net/AMR.931-932.791> (accessed on 3 February 2020).
20. Land Development Department. Products from MOAC's Natural Resources and Properties Administration project. Available online:

- [http://www.ldd.go.th/web\\_eng56/Main\\_project/Products%20%20from%20MOAC%E2%80%99s%20Natural%20resources.html](http://www.ldd.go.th/web_eng56/Main_project/Products%20%20from%20MOAC%E2%80%99s%20Natural%20resources.html) (accessed on 14 March 2020).
21. Wise, M.; Calvin, K.; Thomson, A.; Clarke, L.; Bond-Lamberty, B.; Sands, R.; Smith, S.J.; Janetos, A.; Edmonds, J. Implications of Limiting CO<sub>2</sub> Concentrations for Land Use and Energy. *Science* **2009**, *324*, 1183–1186.
  22. Clarke, L.; Edmonds, J.; Jacoby, H.; Pitcher, H.; Reilly, J.; Richels, R. *Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations*; U.S. Climate Change Science Program; Subcommittee on Global Change Research; Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research: Washington, DC, USA, 2007; p. 164.
  23. Smith, S.J.; Wigley, T.M. Multi-Gas Forcing Stabilization with the MiniCAM. *Energy J. Spec.* **2006**, doi:10.5547/ISSN0195-6574-EJ-VolSI2006-NoSI3-19.
  24. Guisan, A.; Thuiller, W. Predicting Species Distribution: Offering more than Simple Habitat Models. *Ecol. Lett.* **2005**, *8*, 993–1009.
  25. Meinshausen, M.; Smith, S.J.; Calvin, K.; Daniel, J.S.; Kainuma, M.L.T.; Lamarque, J.-F.; Matsumoto, K.; Montzka, S.A.; Raper, S.C.B.; Riahi, K.; et al. The RCP Greenhouse Gas Concentrations and their Extensions from 1765 to 2300. *Clim. Chang.* **2011**, *109*, 213.
  26. Riahi, K.; Grübler, A.; Nakicenovic, N. Scenarios of Long-term Socio-economic and Environmental Development under Climate Stabilization. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* **2007**, *74*, 887–935.
  27. Buonomo, E.; Jones, R.; Huntingford, C.; Hannaford, J. On the Robustness of Changes in Extreme Precipitation over Europe from Two High Resolution Climate Change Simulations. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **2007**, *133*, 65–81.
  28. Chen, J.; Brissette, F.P.; Chaumont, D.; Braun, M. Performance and Uncertainty Evaluation of Empirical Downscaling Methods in Quantifying the Climate Change Impacts on Hydrology over Two North American River Basins. *J. Hydrol.* **2013**, *479*, 200–214.
  29. Turco, M.; Llasat, M.C.; Herrera, S.; Gutiérrez, J.M. Bias Correction and Downscaling of Future RCM Precipitation Projections using a MOS-Analog Technique. *J. Geophys. Res. Atmos.* **2017**, *122*, 2631–2648.
  30. Durman, C.F.; Gregory, J.M.; Hassell, D.C.; Jones, R.G.; Murphy, J.M. A Comparison of Extreme European Daily Precipitation Simulated by a Global and a Regional Climate Model for Present and Future Climates. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **2001**, *127*, 1005–1015.
  31. Herrera, S.; Fita, L.; Fernández, J.; Gutiérrez, J.M. Evaluation of the Mean and Extreme Precipitation Regimes from the ENSEMBLES Regional Climate Multimodel Simulations over Spain. *J. Geophys. Res. Atmos.* **2010**, *115*.
  32. Rathjens, H.; Bieger, K.; Srinivasan, R.; Chaubey, I.; Arnold, J.G. CMhyd User Manual: Documentation for Preparing Simulated Climate Change Data for Hydrologic Impact Studies. Available online: [https://swat.tamu.edu/media/115265/bias\\_cor\\_man.pdf](https://swat.tamu.edu/media/115265/bias_cor_man.pdf) (accessed on 6 January 2020).
  33. Eastman, J.R. *Terrset Geospatial Monitoring and Modeling System*; Clark Labs. Clark University: Worcester, MA, USA, 2016.
  34. Gupta, R.; Sharma, L.K. Efficacy of Spatial Land Change Modeler as A Forecasting Indicator for Anthropogenic Change Dynamics over Five Decades: A Case Study of Shoolpaneshwar Wildlife Sanctuary, Gujarat, India. *Ecol. Indic.* **2020**, *112*, 1–19.
  35. Wasserman, T.; Wasserman, L.D. *Therapy and the Neural Network Model, Neural Network Model: Applications and Implications*. Springer: Cham, Switzerland, 2019; p.200.
  36. Veldkamp, A.; Lambin, E.F. Predicting Land-use Change. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2001**, *85*, 1–6.
  37. Kamal, N.; Imran, M.; Tripathi, N.K. Greening the Urban Environment Using Geospatial Techniques, A Case Study of Bangkok, Thailand. *Procedia Environ. Sci.* **2017**, *37*, 141–152.
  38. Scharffenberg, W.A.; Fleming, M.J. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual*; US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA, 2018; p.640.
  39. Rahman, K.U.; Balkhair, K.S.; Almazroui, M.; Masood, A. Sub-catchments Flow Losses Computation using Muskingum–Cunge Routing Method and HEC-HMS GIS based Techniques, Case Study of Wadi Al-Lith, Saudi Arabia. *Model. Earth Syst. Environ.* **2017**, *3*, 4.
  40. Brunner, G.W. *HEC-RAS River Analysis System User's Manual*; US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC): Davis, CA, USA, 2016.
  41. Brunner, G.W. *HEC-RAS River Analysis System Reference Manual*; US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC): Davis, CA, USA, 2016.

41. Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V. River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I—A Discussion of Principles. *J. Hydrol.* **1970**, *10*, 282–290.
42. Tang, J.C.S.; Vongvisessomjai, S.; Sahasakmontri, K. Estimation of Flood Damage Cost for Bangkok. *Water Resour. Manag.* **1992**, *6*, 47–56.
43. Kuntiyawichai, K. Interactions between Land Use and Flood Management in the Chi River Basin. PhD Thesis, Wageningen University and UNESCO-IHE Institute for Water Education, Wageningen, The Netherlands, 2012.
44. Lekuthai, A.; Vongvisessomjai, S. Intangible Flood Damage Quantification. *Water Resour. Manag.* **2001**, *15*, 343–362.
45. Munich Reinsurance Company. *World Map of Natural Hazards*; Munich Reinsurance Company: Munich, Germany, 1998.
46. Clark Labs. *The Land Change Modeler for Ecological Sustainability*; Clark University: Worcester, MA, USA, 2009.
47. Ligaray, M.; Kim, M.; Baek, S.; Ra, J.-S.; Chun, J.A.; Park, Y.; Boithias, L.; Ribolzi, O.; Chon, K.; Cho, K.H. Modeling the Fate and Transport of Malathion in the Pagsanjan-Lumban Basin, Philippines. *Water* **2017**, *9*, 451.
48. Moriasi, D.N.; Arnold, J.G.; van Liew, M.W.; Bingner, R.L.; Harmel, R.D.; Veith, T.L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Trans. ASABE* **2007**, *50*, 885–900.



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

---

## WATER RESOURCES AND THE REGIME OF WATER BODIES

---

# Identifying Adaptive Reservoir Operation for Future Climate Change Scenarios: A Case Study in Central Vietnam

Quan V. Dau<sup>a</sup> and Kittiwet Kuntiyawichai<sup>b, \*</sup>

<sup>a</sup>*Institute for Infrastructure and Environment, Heriot-Watt University, Edinburgh, EH14 4AS United Kingdom*

<sup>b</sup>*Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002 Thailand*

*\*e-mail: kkitti@kku.ac.th*

Received November 17, 2016; revised January 9, 2019; accepted April 1, 2019

**Abstract**—The assessment of flood risk under climate change impacts is necessary for sustainable flood management strategies at national level. Referring to the aforesaid statement, this research aims to evaluate the potential impacts of climate change on reservoir operations in the Huong River Basin, Vietnam. To enable further representation of climate change impacts, the HadGEM3-RA Regional Climate Model (RCM) under Representative Concentration Pathways (RCPs) 8.5 climate change scenario was used in this study. For assessing the level of flood risk posed to the study area, a coupled HEC-HMS hydrologic model and HEC-RAS hydrodynamic model was used to represent the behaviour of flow regimes under climate change impacts in the Huong River Basin. The key results demonstrated that the mean temperature and mean annual rainfall would be increased in the future from 0.2–0.8°C, and 4.8–6.0%, respectively. Consequently, the mean annual runoff and mean water level would also be increased from 10–30%, and 0.1–0.3 m above mean sea level, respectively. Moreover, the proposed reservoir operation rules corresponding to flood control warning stages was also derived to reduce peak flows downstream during the rainy season. Finally, the main findings of this study can be a good example for future planning of flood control reservoir systems in Vietnam.

**Keywords:** reservoir operation, climate change, HEC-HMS, HEC-RAS, flood control

**DOI:** 10.1134/S009780782002013X

## INTRODUCTION

The potential impacts of climate change is likely to be the future vulnerability of changes in flood frequency and magnitude, which can adversely affect the downstream reservoir flood control system [16]. In fact, reservoir operation and management are among the most efficient non-structural measures in flood damage mitigation. Therefore, it is necessary to understand the impacts of climate change on reservoir operations in order to minimize the negative effects on downstream areas. In recent years, floods have taken place and resulted in economic decline and losses in affected areas in the Huong River Basin, Vietnam. It is well known fact that the existing reservoirs, namely Huong Dien and Binh Dien operated since 2009, and the newly developed Ta Trach Reservoir operated since the middle of 2014, would significantly affect the downstream hydrological and hydraulic regimes of the Huong River Basin, especially under the climate change impacts. Presently, the reservoirs located in the Huong River Basin is commonly operated based on seasonal demand, i.e. almost constant release during dry season (January to mid-September), whereas the release will be increased in rainy season (mid-September to December) [11]. Therefore, in this

research, it is essential to determine reasonable and effective reservoir operation rules for increasing climate resilience and flood risk reduction in the Huong River Basin. Referring to climate change effects analysis, bias correction of Regional Climate Model (RCM) data is necessary for predicting the magnitude and reasonably capturing some extreme climate indices such as RCM projected temperature change, rainfall change, and streamflow change. A quantile mapping version called Distribution-Based Scaling (DBS) was used to correct the biases of RCM outputs using two gamma distributions with the 95th percentile cut-off values. Moreover, the evaluation of hydrological processes was accomplished by using a coupling of the HEC-HMS hydrologic and HEC-RAS hydrodynamic models. The warning stages at the downstream of the Huong River Basin was also employed in order to introduce effective rules for adaptively managing reservoir control system for both dry and rainy seasons. Eventually, the main findings from this study will provide an insight to climate change and its potential impacts on reservoirs, which is of importance to open up a discussion on future flood control efforts in the Huong River Basin and other areas in Vietnam.

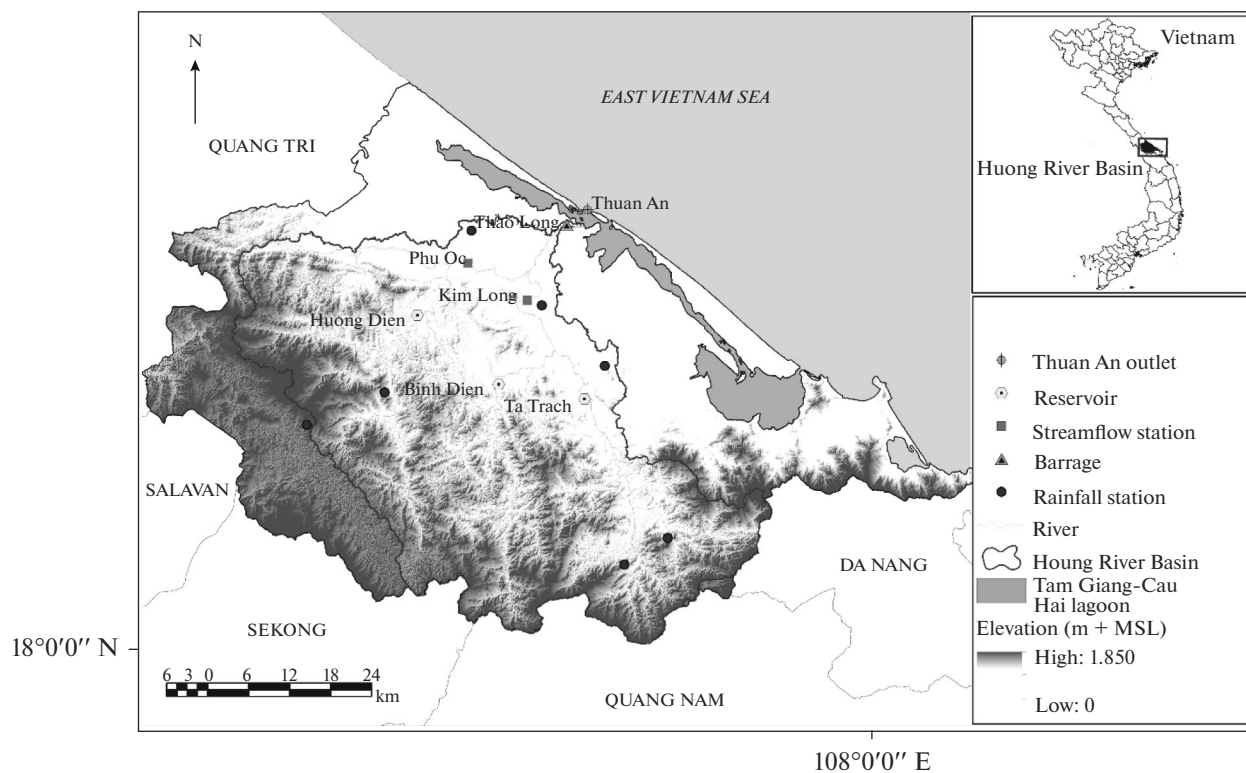


Fig. 1. Map of the Huong river basin, Vietnam.

## MATERIALS AND METHODS

### *Study Area*

The study area of this research is the Huong River Basin located in Thua Thien Hue Province, Vietnam (Fig. 1). Geographically, the study area covers the area of approximately 2830 km<sup>2</sup>, in which almost 80% of the total area is mountainous with the altitude varies between 200–1850 m above mean sea level (MSL). There are three existing major reservoirs in the Huong River Basin, i.e. Ta Trach, Huong Dien, and Binh Dien, which are situated at the tributaries of the Ta Trach, Bo, and Huu Trach Rivers, respectively. The Ta Trach and Huu Trach Rivers meet each other at the Tuan confluence and connect to the Bo River at Sinh confluence before discharging to the Tam Giang-Cau Hai Lagoon (note: Tam Giang-Cau Hai is known as the largest lagoon system in Southeast Asia, with the total area of 216 km<sup>2</sup> and the length of 70 km). Due to the sea level rise at the downstream of the Huong River Basin, the Thao Long Barrage was constructed to prevent seawater intrusion, which can significantly affect agricultural yield. Climatologically, this area has the mean annual temperature ranges from 21–26°C, whereas the average annual rainfall estimated to be between 2500–3500 mm. In particular, along the coastline to the hilly terrains, the temperature will gradually be decreased, while the rainfall will be increased. Basically, there are two main seasons, a dry

season lasting from January–August and a rainy season from September–December. Lastly, as the Huong River Basin located in the directly-affected zone of North-Western Pacific Ocean typhoon centre, it is therefore highly affected by major destructive natural disasters such as tropical cyclones, heavy rain, flood, etc.

### *Data Collection*

The historical daily datasets of rainfall and daily temperature from 1977–2012, and discharge and water level from 2009–2014 were collected from the Thua Thien Hue Hydro-Meteorology and Forecasting Center (TTH-HMFC), Vietnam. To represent the characteristics of the study area, both land use and soil type in 2010 were taken from the Resources and Environment Department of Thua Thien Hue Province. The spatial geo-referenced data, i.e. Digital Elevation Model (DEM) with 10 × 10 m of geometrical resolution, was used to quantitatively represent topographical conditions of the study area. The detailed information about reservoir specifications was provided by the Ministry of Industry and Trade, Vietnam.

Referring to the preparation of climate change scenarios, a newly developed RCM at the Hadley Centre Global Environmental Model version 3 (HadGEM3-RA) for the period 1950–2100 was derived from the Met Office Hadley Centre, England. In details, the



atmospheric model HadGEM3-RA has a horizontal grid spacing of 50 km over the Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment—East Asia (CORDEX-EA) domain, including East Asia, India, the Western Pacific Ocean, and the northern part of Australia [3]. The climate scenario developed with respect to anticipated future climate for assessing potential impacts on flow regime in the lower part of the Huong River Basin, was based on Representative Concentration Pathway (RCP) with nominal radiative forcing at 2100 of 8.5 W/m<sup>2</sup> (RCP 8.5), which represents a future with highest amount of greenhouse gases (GHGs) concentration [14].

#### *Quantile Mapping Bias Correction*

The basic principle to develop effective statistical bias correction is the establishment of statistical relationship or transfer function between historical observed data and GCM outputs [6]. Presently, the quantile mapping approach is widely used (e.g. [5, 13]), for mapping the distribution of daily time series of rainfall and temperature from GCM/RCM outputs with a gridded observation dataset at the same spatial resolution. In details, the application of probability integral transformation approach can be described in Eq. (1):

$$P_c = F_0^{-1}(F_m(P_m)), \quad (1)$$

where:  $P_c$  is corrected bias data,  $F_0^{-1}$  is inverse Cumulative Distribution Function (CDF) (also known as quantile function),  $F_m$  is CDF of RCM, and  $P_m$  is RCM raw data.

The quantile mapping version called Distribution-Based Scaling (DBS) [17] was applied in this study to correct the bias in RCM simulated climate variables. For rainfall, DBS believes that frequency distribution of intensities can accurately be estimated using two gamma distributions, i.e. low and intermediate rainfall intensities (up to the 95% quantile), and extreme intensities (above the 95% quantile). In comparison to rainfall data, the temperature is more symmetrically distributed as can be described by a normal distribution of mean and standard deviation. In this study, the period of 1977–2001 was considered as baseline period and was also defined as the calibration period, whereas the years 2002–2005 was considered as validation period. The future climate was projected in the periods of 2020s (2016–2040), 2050s (2046–2070), and 2080s (2076–2100). To apply appropriate bias correction in RCM outputs, the MATLAB script was coded which enables the differences of precipitation and temperature between RCM data and observations to be decreased significantly.

#### *Rainfall-Runoff Modelling*

Regarding the detailed understanding of rainfall-runoff processes in the Huong River Basin, the Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) model was chosen. It is a semi-distributed event-based model, which is based on the river basin characteristics, meteorological data, and control specifications to calculate runoff response in each divided sub-basin, and routing the river flow to the outlets. Fundamentally, the hydrologic behaviour of the river basin was performed through four main components, i.e. model of runoff volume, model of direct runoff, model of baseflow, and model of channel flow [2].

To perform rainfall-runoff transformation for ungauged sub-basins in the Huong River Basin, there are a number of different calculation methods available, i.e. the Soil Conservation Service (SCS) curve number loss method was chosen for computing excess rainfall (direct runoff) from a rainfall event, whereas the Snyder Unit Hydrograph transform method was utilized for determining the shape and timing of runoff hydrographs for each sub-basin. The recession baseflow method was employed for specifying the rate at which recession flow decreases with time, and the Muskingum routing method was used for flow routing. In addition, the above-mentioned methods were also selected based on the findings of the recent study by [12] at the same river basin.

Regarding the daily historical input time series for HEC-HMS model, stage and discharge hydrograph time-series data at various selected gauging locations, i.e., Phu Oc, Binh Dien, and Ta Trach, were chosen to perform the HEC-HMS model. However, due to the fact that the time series data observations are not available for some possible time-intervals and the desired period of simulation. As a result, at Phu Oc station, the observed water level during the period of 2009–2010 was used for calibration, whereas the years 2011–2012 was used for validation. At Binh Dien station, the observed inflow from 2010–2011 was used for calibration, whereas the year 2012 was used for validation (note: the observed data from 2009 was used because the Huong Dien and Binh Dien Reservoirs were initially operated in 2009). Eventually, as the Ta Trach Reservoir was initially operated by mid of 2014, the observed inflow from the periods of September–October and November–December 2014 were used for calibration and validation, respectively.

#### *Investigation of Hydraulic Behaviour of River System*

The investigation of hydraulic behaviour of river system can be determined by using the Hydrologic Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS) model. The HEC-RAS model has been used in a wide range of areas such as dam break scenarios, floodplain delineation, flood forecasting, and

flow routing [1]. It comprises of four river analysis components such as sediment transport, water quality, steady flow, and unsteady flow, and it is also designed to simulate the hydraulics of one and two-dimensional flow through natural river network and other channels by using the field-collected bathymetric cross sections.

For unsteady flow simulation modelling, the unsteady flow analysis was applied in this study. As described in the HEC-RAS User's manual, the physical laws of the unsteady flow are governed by the principles of conservation of mass and momentum. The conservation of mass is given by the continuity equation in which the net rate of flow into the control volume is equal to the rate of change of storage inside the control volume. The conservation of momentum is given by the dynamic equation which describes the balances of gravity, friction, forces of pressure, and inertia [7]. The Manning's  $n$  values were adjusted within the recommended range for each reach in order to describe the roughness of river channels, in which a realistic model of the flow conditions can be produced. With regard to the boundary conditions in HEC-RAS model, the released discharges from Ta Trach, Huong Dien, and Binh Dien Reservoirs calculated by HEC-HMS model were specified as the upstream boundary conditions and the observed water level at Thuan An outlet was employed as the downstream boundary condition. Moreover, to assess the performance of the HEC-RAS model, the simulated results were plotted on the same axis with the observed time series for both selected gauging stations (i.e. Kim Long and Phu Oc). In details, the water level from 2009–2010 was used for calibration and from 2011–2012 was used for validation.

#### Criteria for Model Evaluation

Two carefully selected statistical criteria were used for judging the goodness-of-fit of the calibrated model, i.e. Coefficient of Determination ( $R^2$ ) and Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient ( $E_{NS}$ ) as shown in Eqs. (2)–(3), respectively.

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (X_{\text{obs}} - \bar{X})(Y_{\text{sim}} - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{\text{obs}} - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_{\text{sim}} - \bar{Y})^2}} \right]^2, \quad (2)$$

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{\text{obs}} - Y_{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{\text{obs}} - \bar{X})^2}, \quad (3)$$

where  $X_{\text{obs}}$  is observed variable,  $\bar{X}$  is mean of observed variable,  $Y_{\text{sim}}$  is simulated variable,  $\bar{Y}$  is mean of simulated variable, and  $n$  is number of variable.

## RESULTS AND DISCUSSIONS

### Evaluation of the Quantile Mapping

To represent the certainness of bias correction results, the historical climate data from the period of 1977–2005 of the HadGEM3-RA model were used and mapped with the observed data at the same period by using the DBS approach. As a result, a large difference of rainfall amount between observed data and RCM data were found to be reduced considerably during the calibration and validation processes. Obviously, at the Hue station, the obtained high values of statistical indices, i.e.  $R^2$  (ranging from 0.80–0.89) and  $E_{NS}$  (ranging from 0.78–0.86) demonstrates a good performance of the DBS approach in mapping rainfall. Referring to the temperature, high values of  $R^2$  (ranging from 0.94–0.95) and  $E_{NS}$  (ranging from 0.93–0.95) can also be rated as more than satisfactory. With the acceptance of statistical results, the DBS approach is robust to better preserve the future variability as it can successfully correct rainfall and temperature biases produced by the RCM. That is to say the usability of improved RCM outputs can be expected to be used for hydrological climate change impact assessment in the Huong River Basin.

### Climate Change Assessment for the Future

To provide insight for changes in rainfall and temperature caused by future climate change, the HadGEM3-RA Regional Climate Model (RCM) was found to be able to reproduce the observed spatial climate pattern, although with some biases. Clearly, the moderate trend of future mean annual rainfall deviations under RCP 8.5 scenario revealed the presence of climate variability in the Huong River Basin, i.e. increasing from 4.8–6.0%. The obtained findings illustrated in Fig. 2 prove that the rainfall tends to increase in the dry season (January–May) from 5–15%, and it is expected to increase during the rainy season (October–December) by approximately 2–5% in comparison to the baseline period (1977–2001). In terms of temperature, it would appear that the weather would be warmer in the future as presented in Fig. 3. In details, during the periods of March–April, August, and November–December, the projected mean monthly temperature tends to increase by 0.5–0.9°C, whereas it shows a decreasing trend in January, June, and the period of September–October, with a range between 0.5–1.0°C. The previous findings are consistent with the prediction that during the period of 2020s–2080s, the mean annual temperature is expected to increase in the range of 0.2–0.8°C.

### Performance Evaluation of the HEC-HMS Hydrologic Model

The evaluation of the behaviour and performance of HEC-HMS model is strictly oriented through a

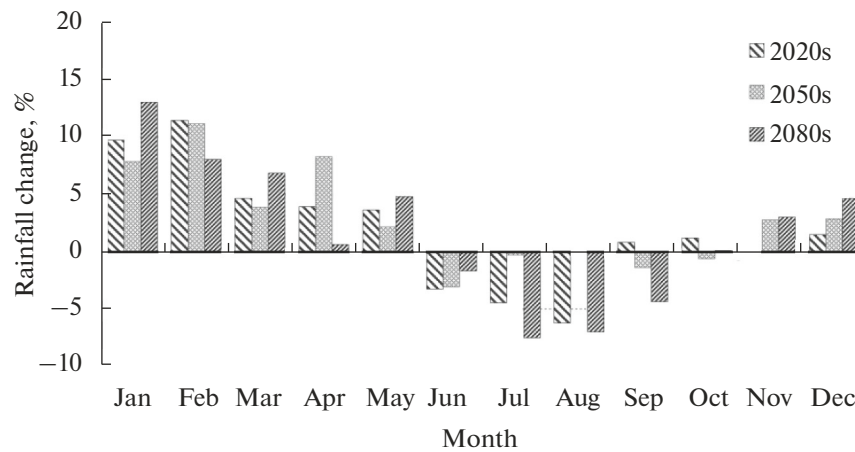


Fig. 2. Projected mean monthly rainfall changes (%) under RCP 8.5 scenario for the decades of the 2020s, 2050s, and 2080s.

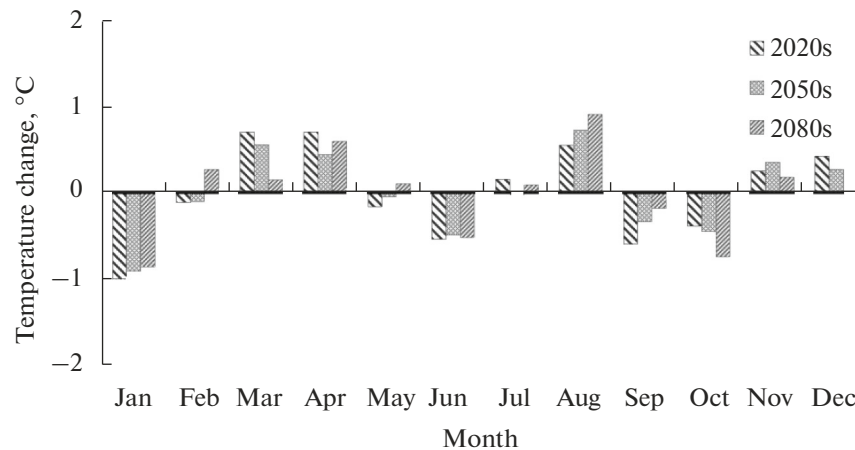


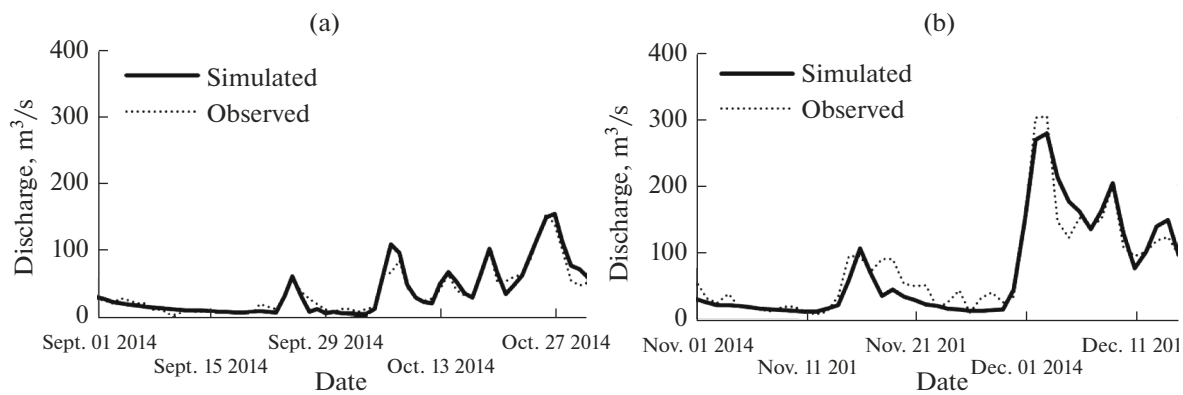
Fig. 3. Projected mean monthly temperature changes (°C) under RCP 8.5 scenario for the decades of the 2020s, 2050s, and 2080s.

process called calibration and validation, i.e. towards the comparison plots of simulated and observed discharges at the Ta Trach, Binh Dien, and Phu Oc gauging stations. It can clearly be seen in Fig. 4 that the calibration and validation results of HEC-HMS model present a proper fit of time and magnitude of hydrograph peaks at the Ta Trach gauging station. Through various statistical and graphical indicators, the HEC-HMS model provides a satisfactory representation of flow with  $R^2$  values ranging from 0.84–0.94 and  $E_{NS}$  values varying from 0.77–0.92. In light of calibration and validation results, it is worth mentioning that the HEC-HMS model has an adequate ability to accurately reproduce very satisfactory hydrographs for given rainfall events over the Huong River Basin (note: despite some underestimation at a higher flow rate by the model, the results still show good performance). However, the availability of observed data can be a significant problem and it is a challenging task particu-

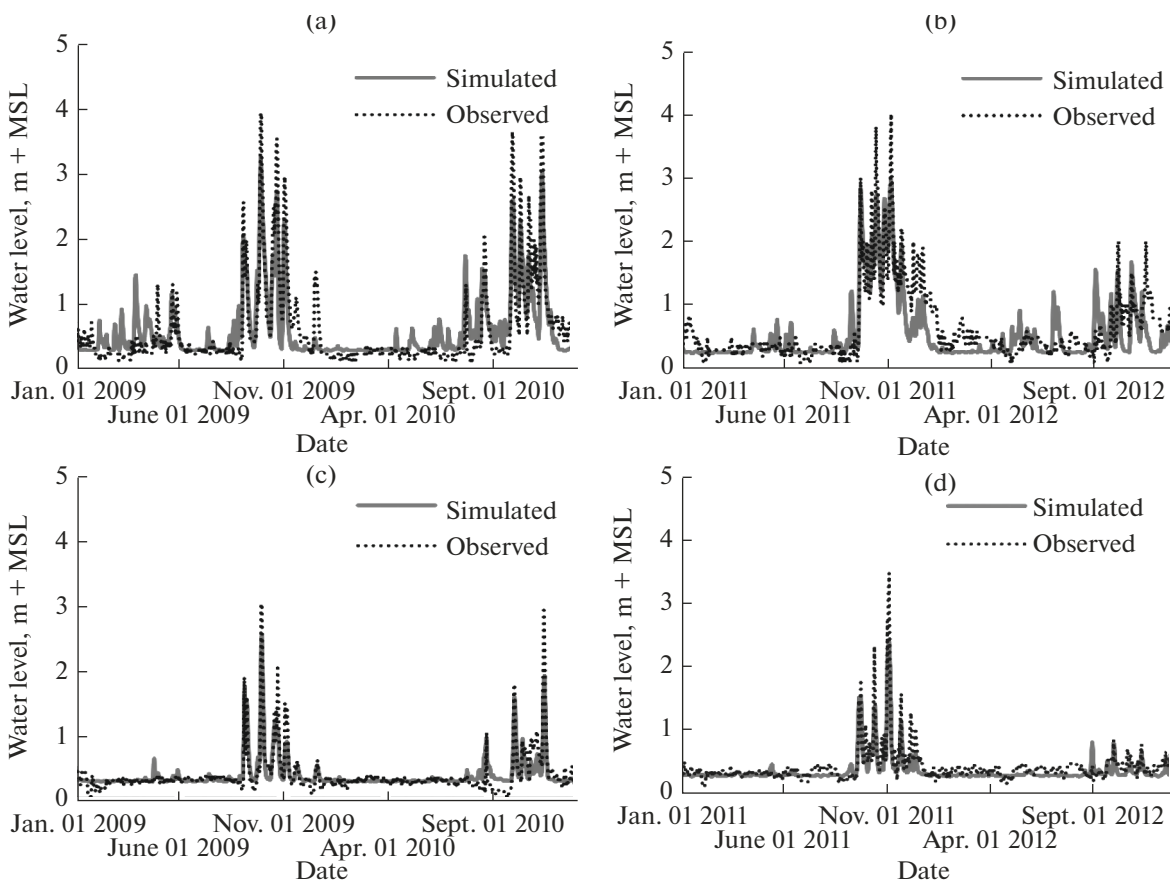
larly for some gauging stations with limited data quality and/or quantity.

#### *HEC-RAS Model for Investigating of Hydraulic Behaviour of River System*

To provide insight into the investigation of hydraulic behaviour of river system, the representation and modelling of river reaches under different flow conditions using the HEC-RAS model is absolutely essential. Based on the calibration and validation results, the water levels calculated by HEC-RAS are in fairly good agreement with the observed one, which indicates good simulation performance at both Phu Oc and Kim Long stations as illustrated in Fig. 5. Obviously, both time series plots and statistical indices of all calibrated stations showed acceptable levels of model fit, i.e.  $R^2$  values ranging from 0.67–0.73 and  $E_{NS}$  values varying from 0.64–0.74 at Phu Oc station, whereas the  $R^2$  values fluctuating from 0.78–0.79 and



**Fig. 4.** HEC-HMS modelling results between observed and simulated discharges during (a) calibration period; and (b) validation period, at Ta Trach gauging station.



**Fig. 5.** HEC-RAS modelling results between observed and simulated water levels during the calibration and validation periods at (a, b) Phu Oc and (c, d) Kim Long gauging stations.

$E_{NS}$  values ranging from 0.74–0.77 at Kim Long station. Referring to the acceptable (obtained) statistical indices, it can be said that the HEC-RAS model is suitable for investigating and simulating hydraulic behaviour of river system in the Huong River Basin.

#### *Flood Modelling Under Future Climate Change Conditions*

Linking to a high concentration of carbon dioxide, the RCP 8.5 scenario was preferable and selected for flood modelling under future climate change condi-

tions. The results showed the increase in water level and discharge at both Phu Oc and Kim Long stations as a result of climate change impacts. In details, the future water level seems to increase from 0.1–0.3 m MSL and the future discharge will also increase from 10–30%. When focusing on the dry season, based on the RCP 8.5 scenario, the future rainfall will increase from 5–15, 5–20, and 5–25% at the Ta Trach, Huong Dien, and Binh Dien Reservoirs, respectively. Interestingly, the obtained results are really similar to the findings of [4], which stated that the rainfall will increase more than 20% in the dry season at the upstream of the Huong River Basin. Under this section, the obtained findings would be very useful as a key information for determining reservoir operation rules under the changed climate conditions in the Huong River Basin.

### *Role of Reservoir Operation*

Intuitively, in particular due to climate change, it seems that hydrological conditions are subject to change, the problems of water management and utilization may severely arise if nothing is done to eliminate the acute problem of water imbalance. Therefore, a clear understanding of consequences of existing reservoir operations, and the detailed guidance of flexibility and adjustability of reservoir operations in the Huong River Basin, would be essential and addressed in this section.

### *Understanding of Current Reservoir Operation Rules*

It is a matter of fact that effective operation of reservoir systems is a challenging task since several complicated issues would be involved, including inflow, release, storage (volume or level), overflow, demand, supply, etc., in which all of them would need to be compiled and linked together. Therefore, a more robust understanding of current reservoir operation rules would be supportive of increased focus on improving the operational effectiveness for maximizing the beneficial uses of all three reservoirs located in the Huong River Basin, i.e. Huong Dien, Binh Dien, and Ta Trach.

The detailed specifications of Huong Dien, Binh Dien, and Ta Trach Reservoirs, and Thao Long Barrage can be presented in Tables 1, 2, respectively. According to the promulgation of inter-reservoir operation procedures, i.e. 3960/QĐ-BCT for Binh Dien Reservoir [8], 5058/QĐ-BCT for Huong Dien Reservoir [9], 1497/QĐ-TTg for Ta Trach Reservoir [10], and 2482/QĐ-TTg for Thao Long Barrage [11], the regulations for each above-mentioned hydraulic structures operated in the Huong River Basin can be summarized as follows:

For Binh Dien Reservoir, during the dry season (January to mid-September), the outflow ( $Q_{\text{outflow}}$ ) is controlled to be released at a rate of 21.99 m<sup>3</sup>/s. For

hydropower generation purpose, the reservoir level ( $Z$ ) is specified not to be less than the dead storage level (+53 m MSL). In the rainy season (mid-September to December), the  $Q_{\text{outflow}}$  is defined to be equal to or less than the inflow ( $Q_{\text{inflow}}$ ) within the range of  $+80.6 < Z \leq +85.96$  m MSL (note: +80.6 m MSL is the reservoir water level before flood arrives ( $Z_{\text{pre-flood}}$ ) which is lower than the normal reservoir level ( $Z_{\text{normal}}$ ), whereas +85.96 m MSL is the flood control level ( $Z_{\text{flood\_control}}$ )). The maximum discharge ( $Q_{\text{max}}$ ) is the combination between maximum spillway discharge ( $Q_{\text{max, Spillway}}$ ) and the turbine discharge ( $Q_{\text{max, Turbine}}$ ), which is equal to 7061 m<sup>3</sup>/s.

For Huong Dien Reservoir, during the dry season, the  $Q_{\text{outflow}}$  can be released at a rate of 43.96 m<sup>3</sup>/s. For hydropower generation purpose, the  $Z$  should not be less than the dead storage level (+46 m MSL). In the rainy season, the  $Q_{\text{outflow}}$  can be equal to or less than  $Q_{\text{inflow}}$  within the range of  $+56 < Z \leq +60$  m MSL (note: +56 m MSL is the  $Z_{\text{pre-flood}}$ , whereas +60 m MSL is the  $Z_{\text{flood\_control}}$ ). The  $Q_{\text{max}}$  is the combination between  $Q_{\text{max, Spillway}}$  and  $Q_{\text{max, Turbine}}$ , which is equal to 7878.2 m<sup>3</sup>/s.

For Ta Trach Reservoir, during the dry season, the  $Q_{\text{outflow}}$  can be released at a rate of 25 m<sup>3</sup>/s. For hydropower generation purpose, the  $Z$  should not be less than the dead storage level (+23 m MSL). In the rainy season, the  $Q_{\text{max}}$  can be equal to or less than  $Q_{\text{inflow}}$  within the range of  $+25 < Z \leq +53.07$  m MSL (note: +25 m MSL is the  $Z_{\text{pre-flood}}$ , whereas +53.07 m MSL is the  $Z_{\text{flood\_control}}$ ). The  $Q_{\text{max}}$  is the combination between  $Q_{\text{max, Spillway}}$ ,  $Q_{\text{max, Turbine}}$ , and the maximum discharge from the outlet  $Q_{\text{max, Outlet}}$ , which is equal to 7483.6 m<sup>3</sup>/s.

For Thao Long Barrage, during the low flow period, the water level at the upstream of Thao Long Barrage should be less than +0.50 m MSL in order to prevent floods due to the overflow from the Huong and Bo Rivers into their floodplains and Hue City. In details, the water levels, which are controlled at the upstream of Thao Long Barrage, can be varied at different periods, i.e. 0.1–0.25 m + MSL during mid-December to January 10th, 0.2–0.4 m MSL during January 11th to mid-February, April to mid-May, and August, 0.3–0.4 m + MSL during mid-February to March, and 0.3–0.5 m MSL during mid-May to July. In contrast, if the water level is higher than +0.50 m MSL, especially in the rainy season (September–December), all gates should totally be opened to release the water from the downstream of the Huong River to Tam Giang-Cau Hai Lagoon. Moreover, if the water level from the lagoon is higher than the upstream of Thao Long Barrage, all gates are suggested to be closed to prevent seawater intrusion.

**Table 1.** Specifications of the reservoirs located in the Huong River Basin [10]

No.	Elements	Reservoir		
		Binh Dien	Ta Trach	Huong Dien
I	Watershed characteristics			
1	Watershed area, km <sup>2</sup>	515	717	707
2	Mean annual rainfall, mm	—	—	3267.60
3	Mean annual discharge, m <sup>3</sup> /s	41.70	—	82.60
4	Crest discharge			
	–P = 0.1%, m <sup>3</sup> /s	6989	14200	9430
	–P = 0.5%, m <sup>3</sup> /s	5187	11200	6920
	–P = 1%, m <sup>3</sup> /s	—	—	5890
	–P = 5%, m <sup>3</sup> /s	—	—	3950
	–P = 10%, m <sup>3</sup> /s	—	—	3170
II	Reservoir characteristics			
1	Normal reservoir level, m MSL	85	45	58
2	Dead storage level, m MSL	53	23	46
3	Flood control level, m MSL	85.96	53.07	60.00
4	Gross storage capacity, 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	423.68	420.50	820.66
5	Active storage capacity, 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	344.39	347.90	350.8
6	Dead storage capacity, 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	79.29	72.60	469.86
7	Reservoir area corresponding to normal reservoir level, km <sup>2</sup>	17.08	—	33.87
8	Maximum release, m <sup>3</sup> /s	72.00	80.32	196.10
9	Plant capacity (MW)	44.00	21.00	81.00

Eventually, when the flood is over, the Z should be lowered to the  $Z_{\text{normal}}$ , so that the reservoirs can provide sufficient capacity for the next upcoming flood.

#### *Reservoir Operation Incorporating Warning Stages Responding to Climate Change Impacts*

It might be expected that successful reservoir operation and management would largely depend on understanding the possible range of potential climate

change impacts. Therefore, in this section, the emphasis will be placed on the reservoir operation rules that foster adaptation and enhanced resilience to climate change.

By considering the impacts of climate change, the results suggested that more water from the reservoirs should be released during the period of January–May as a result of increasing rainfall intensity at the upstream of all three reservoirs located in the Huong River Basin, i.e. Huong Dien, Binh Dien, and Ta Trach, in order to fully meet withdrawal and other downstream water demands. Based on the continuous observation of water level records, the average water level at Thao Long Barrage during the period of January–May is varied between 0.2–0.4 m MSL. However, based on the HEC-RAS modelling results, the water levels at the upstream of Thao Long Barrage were estimated to be 0.28 m MSL during the years 2009–2012, and 0.30 m MSL for the 2080s. As a result, it can be concluded that under the climate change impacts, the water level fluctuations is not significantly changed at

**Table 2.** Specific details of the Thao Long Barrage [11]

Parameter	Value
Number of span, item	15
Width of span, m	31.5
Width of lock, m	8
Width of river, m	480.5
Length of barrage, m	571.15

the Thao Long Barrage (water level  $<0.5$  m MSL). Therefore, a set of gates of Thao Long Barrage is also strictly suggested to be closed in order to prevent sea-water intrusion due to sea level rise. In terms of reservoir operation during the rainy season, the reservoirs should be operated in association with the warning statements and explanatory messages at the downstream gauging stations, i.e. Phu Oc gauging station (for Huong Dien Reservoir) and Kim Long gauging station (for Binh Dien and Ta Trach Reservoirs), in order to attenuate flood peaks and reduce flood risk to downstream communities. Based on the information from the TTH-HMFC, the warning stages is defined at three levels, i.e. Alarm I, II, and III, as shown more details in Table 3.

With respect to the appropriate proposed rules for reservoir operation during floods under potential climate change, the following detailed explanation can be described below and through Table 4 for this phenomenon.

When the water levels at the warning stage is less than the Alarm I (i.e. water levels at Kim Long  $\leq 1.0$  m MSL and Phu Oc  $\leq 1.5$  m MSL), the  $Q_{\max}$  from Ta Trach and Binh Dien Reservoirs (in corresponding to Kim Long warning stage) should be released at the same rate as  $Q_{\max, \text{Turbine}}$ , i.e. 82 and 70  $\text{m}^3/\text{s}$ , respectively. Meanwhile, the  $Q_{\max}$  from Huong Dien Reservoir (in corresponding to Phu Oc warning stage) should also be released at the same rate as  $Q_{\max, \text{Turbine}}$ , i.e. 196.2  $\text{m}^3/\text{s}$  (note: under the condition that the  $Q_{\max}$  is defined to be equal to or less than the  $Q_{\text{inflow}}$ ).

When the water levels at the warning stages fall in between the Alarm II and Alarm III (i.e. water levels at Kim Long vary from 2.0–3.5 m MSL, and at Phu Oc vary from 3.0–4.5 m MSL), it is recommended to gradually increase the releases for each reservoir, as well as the  $Q_{\max}$  is set to be the same rate as the  $Q_{\text{inflow}}$ .

When the water levels at the warning stage is greater than the Alarm III (i.e. water levels at Kim Long  $> 3.5$  m MSL and Phu Oc  $> 4.5$  m MSL), the  $Z$  value should essentially be taken into consideration. In this case, the  $Z_{\text{normal}}$  of +85, +58, and +45 m MSL for Binh Dien, Huong Dien, and Ta Trach Reservoirs, respectively, will be considered instead of using the  $Z_{\text{pre-flood}}$  specified in the current reservoir operation rules (i.e., +80.6, +56, and +25 m MSL, respectively). Therefore, under this condition, the proposed reservoir operation rule adapting to rainy season can be proposed with the details as follows:

(1) For Binh Dien Reservoir, if  $+85 < Z \leq +85.96$  m MSL, the  $Q_{\max}$  is the combination between  $Q_{\max, \text{Spillway}}$  and  $Q_{\max, \text{Turbine}}$ , which is equal to 7061  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

(2) For Huong Dien Reservoir, if  $+58 < Z \leq +60$  m MSL, the  $Q_{\max}$  is the combination between  $Q_{\max, \text{Spillway}}$  and  $Q_{\max, \text{Turbine}}$ , which is equal to 7878.2  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

**Table 3.** Flood warning threshold levels

Station	Warning stages (m MSL)		
	Alarm I	Alarm II	Alarm III
Phu Oc	1.5	3.0	4.5
Kim Long	1.0	2.0	3.5

(3) For Ta Trach Reservoir, if  $+45 < Z \leq +53.07$  m MSL, the  $Q_{\max}$  is the combination between  $Q_{\max, \text{Spillway}}$ ,  $Q_{\max, \text{Turbine}}$ , and  $Q_{\max, \text{Outlet}}$ , which is equal to 7483.6  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

(4) For Thao Long Barrage, all gates should totally be opened when the water level at the upstream of Thao Long Barrage is greater than +0.5 m MSL to enable the maximum flow to be released for attenuating flood flows.

Finally, when the flood is over, the  $Z$  should be lowered to the  $Z_{\text{normal}}$ , so that the reservoirs can provide sufficient capacity for the next upcoming flood.

## CONCLUSIONS

The assessment of potential impacts of climate change on reservoir flood control was conducted for the Huong River Basin. The results showed that the HadGEM3-RA model provided robust and reasonable estimates of changes in regional climate information (i.e., rainfall, temperature) due to anthropogenic emissions. Additionally, the HEC-HMS hydrologic and HEC-RAS hydrodynamic models proved their capability in simulating runoff and gaining a better understanding the hydraulics, respectively, of the Huong River Basin (note: as indicated by high values of  $R^2$  (ranging from 0.84–0.94) and  $E_{\text{NS}}$  (varying from 0.77–0.92) for the HEC-HMS model, whereas the HEC-RAS model with  $R^2$  fluctuating from 0.67–0.79 and  $E_{\text{NS}}$  varying from 0.64–0.77). In addition, the results also demonstrated that the weather would be warmer in the future from 0.2–0.8°C and annual rainfall would also increase from 4.8–6.0%. The water levels and discharges are also likely to increase from 0.1–0.3 m MSL and 10–30%, respectively. Moreover, the findings also highlighted that the rainfall would be increased in the upstream of all three reservoirs located in the Huong River Basin, i.e. Huong Dien, Binh Dien, and Ta Trach, during the dry season from 5–25%, therefore, it is necessary to increase the released flow from the reservoirs during the period of January–May. The proposed change in reservoir operation rules, along with the warning stages during the rainy season at the downstream gauging stations (i.e., Kim Long and Phu Oc), was also delivered to maximize the potential for a wide range of benefits. Finally, the overall outcomes of this research can be used as a guideline for adaptation measures against the

**Table 4.** Proposed rules for operation of different reservoirs responding to climate change impacts ( $Q_{\max}$  is maximum discharge,  $Q_{\max}$ , Turbine is maximum turbine discharge,  $Q_{\text{inflow}}$  is inflow to the reservoir,  $Q_{\max}$ , outlet is maximum discharge from the outlet,  $Q_{\max}$ , Spillway is maximum spillway discharge, and  $Z$  is reservoir water level, WL is water level at gauging stations)

Period	Binh Dien	Huong Dien	Ta Trach	Thao Long	Remark
Jan–Mid-Sep Mid-Sep–Dec	21.99 m <sup>3</sup> /s	43.96 m <sup>3</sup> /s	Current reservoir operation rules		Controlled released discharge, except for some specific flood months $Q_{\max} \leq Q_{\text{inflow}}$
			$Z_{\text{pre-flood}} < Z \leq Z_{\text{flood\_control}}$ (m MSL)	All gates are closed	
			If +80.6 < $Z \leq$ +85.96 m MSL, increasing $Q_{\max}$ $Q_{\max} = Q_{\max, \text{Spillway}} + Q_{\max, \text{Turbine}}$ 6989 + 72 = 7061 m <sup>3</sup> /s	Open (if water level at Thao Long $\geq$ 0.5 m MSL)	
Jan–May	>21.99 m <sup>3</sup> /s	>43.96 m <sup>3</sup> /s	$Z > Z_{\text{flood\_control}}$ (m MSL) $Q_{\max} = Q_{\max, \text{Spillway}} + Q_{\max, \text{Turbine}}$ 6989 + 72 = 7061 m <sup>3</sup> /s	Open (if water level at Thao Long $\geq$ 0.5 m MSL)	Released discharge is at maximum rate for each reservoir
			Proposed reservoir operation rules responding to climate change impacts	All gates are closed	
			>25.00 m <sup>3</sup> /s	All gates are closed	
Jun–Mid-Sep Mid-Sep–Dec	21.99 m <sup>3</sup> /s	43.96 m <sup>3</sup> /s	In combination with the warning statements and explanatory messages at the downstream gauging stations (Kim Long and Phu Oc)		Controlled released discharge can be increased for each reservoir. However, the effectiveness of flood control for each reservoir would need to be taken into consideration and it is not included in this study Except for some specific flood periods
			$Q_{\max} = Q_{\max, \text{Turbine}} = 70 \text{ m}^3/\text{s}$	Open (if water level at Thao Long $\geq$ 0.5 m MSL)	
			Increasing releases as well as $Q_{\max} = Q_{\text{inflow}}$	Open (if water level at Thao Long $\geq$ 0.5 m MSL)	
WL $\leq$ Alarm I Alarm II $\leq$ WL $\leq$ Alarm III WL > Alarm III	If +85 < $Z \leq$ +85.96 m MSL, increasing $Q_{\max}$ $Q_{\max} = Q_{\max, \text{Spillway}} + Q_{\max, \text{Turbine}}$ 6989 + 72 = 7061 m <sup>3</sup> /s	If +58 < $Z \leq$ +60 m MSL, increasing $Q_{\max}$ $Q_{\max} = Q_{\max, \text{Spillway}} + Q_{\max, \text{Turbine}}$ 6989 + 72 = 7061 m <sup>3</sup> /s	Increasing releases as well as $Q_{\max} = Q_{\text{inflow}}$		Kim Long $\leq$ 1.0 m Phu Oc $\leq$ 1.5 m 2.0 $\leq$ Kim Long $\leq$ 3.5 m 3.0 $\leq$ Phu Oc $\leq$ 4.5 m
			$Z_{\text{normal}} < Z \leq Z_{\text{flood\_control}}$ (m MSL)	Open (if water level at Thao Long $\geq$ 0.5 m MSL)	
			$Z > Z_{\text{flood\_control}}$ (m+MSL)	Open (if water level at Thao Long $\geq$ 0.5 m MSL)	
WL $\leq$ Alarm I Alarm II $\leq$ WL $\leq$ Alarm III WL > Alarm III	If +85 < $Z \leq$ +85.96 m MSL, increasing $Q_{\max}$ $Q_{\max} = Q_{\max, \text{Spillway}} + Q_{\max, \text{Turbine}}$ 6989 + 72 = 7061 m <sup>3</sup> /s	If +58 < $Z \leq$ +60 m MSL, increasing $Q_{\max}$ $Q_{\max} = Q_{\max, \text{Spillway}} + Q_{\max, \text{Turbine}}$ 6989 + 72 = 7061 m <sup>3</sup> /s	Increasing releases as well as $Q_{\max} = Q_{\text{inflow}}$		Kim Long $\leq$ 1.0 m Phu Oc $\leq$ 1.5 m 2.0 $\leq$ Kim Long $\leq$ 3.5 m 3.0 $\leq$ Phu Oc $\leq$ 4.5 m
			$Z_{\text{normal}} < Z \leq Z_{\text{flood\_control}}$ (m MSL)	Open (if water level at Thao Long $\geq$ 0.5 m MSL)	
			$Z > Z_{\text{flood\_control}}$ (m+MSL)	Open (if water level at Thao Long $\geq$ 0.5 m MSL)	



impacts of climate change, and future planning for flood control reservoir systems in Vietnam.

#### ACKNOWLEDGMENTS

The authors appreciate the thorough and thoughtful suggestions of the anonymous reviewers of this manuscript. The authors most gratefully acknowledge the generous financial support and substantive contributions received for various stages of this research by Khon Kaen University, Thailand, and the Thailand Research Fund, without their sponsorship this manuscript would not have been possible. A number of institutions, i.e. Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Water Resources and Environment Institute, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, also deserve special acknowledgment from the authors for providing space, facilities, technical support, and administrative support.

#### REFERENCES

1. Brunner, G.W., HEC-RAS, *River Analysis System Hydraulic Reference Manual*, U.S. Army Corps of Engineers, Hydraulic Engineering Center, 2016.
2. Feldman, A.D., *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*, Technical reference manual, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2000.
3. Giorgi, F., Jones, C., and Asrar, G.R., Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework, *World Meteorol. Org. (WMO) Bull.*, 2009, vol. 58, no. 3, pp. 175–183.
4. IUCN-Vietnam, Environmental flows: Rapid environmental flow assessment for the Huong River Basin Vietnam, in *Rapid Environ.l Flow Assessment Workshop*, VN: IUCN Vietnam, 2005, p. 87.
5. Jeon, S., Paciorek, C.J., and Wehner, M.F., Quantile-based bias correction and uncertainty quantification of extreme event attribution statements, *Weather and Climate Extremes*, 2016, vol. 12, pp. 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.02.001>
6. Li, H., Sheffield, J., and Wood, E.F., Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching, *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 2010, vol. 115, no. D10. <https://doi.org/10.1029/2009JD012882>
7. Lopes, L.F.G., Antunes Do Carmo, J.S., Cortes, R.M.V., and Oliveira, D., Hydrodynamics and water quality modelling in a regulated river segment: application on the instream flow definition, *Ecol. Modelling*, 2004, vol. 173, no. 2–3, pp. 197–218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.07.009>
8. Ministry of Industry and Trade, *Decision on the promulgation of inter-reservoir operation procedures number 3960/QĐ-BCT on July 15th 2008 for the Binh Dien Reservoir*, 2008. (In Vietnamese)
9. Ministry of Industry and Trade, *Decision on the promulgation of inter-reservoir operation procedures number 5058/QĐ-BCT on September 16th 2008 for the Huong Dien Reservoir*, 2008. (In Vietnamese)
10. Prime Minister., *Decision on the promulgation of inter-reservoir operation procedures number 1497/QĐ-TTg on August 25th 2014 for the Huong River basin during the annual flood season*, 2014. (In Vietnamese)
11. Prime Minister., *Decision on the promulgation of inter-reservoir operation procedures number 2482/QĐ-TTg on December 30th 2015 for the Thao Long Barrage*, 2015. (In Vietnamese)
12. Dau, V.Q., Kuntiyawichai, K., and Plermkamon, V., Quantification of flood damage under potential climate change impacts in Central Vietnam, *Irrig. Drain.*, 2017, vol. 66, no. 5, pp. 842–853. <https://doi.org/10.1002/ird.2160>
13. Rabiei, E., and Haberlandt, U., Applying bias correction for merging rain gauge and radar data, *J. Hydrol.*, 2015, vol. 522, pp. 544–557. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.020>
14. Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., and Rafaj, P., RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions, *Clim. Change*, 2011, vol. 109, no. 1, pp. 33–57. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>
15. Sharkey, J.K., *Investigating Instabilities with HEC-RAS Unsteady Flow Modeling for Regulated Rivers at Low Flow Stages*, University of Tennessee, 2014.
16. Wu, C., Huang, G., Yu, H., Chen, Z., and Ma, J., Impact of climate change on reservoir flood control in the upstream area of the Beiji River Basin, South China, *J. Hydrometeorol.*, 2014, vol. 15, pp. 2203–2218. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0181.1>
17. Yang, W., Andreasson, J., Graham, L.P., Olsson, J., Rosberg, J., and Wetterhall, F., Distribution-based scaling to improve usability of regional climate model projections for hydrological climate change impacts studies, *Hydrol. Res.*, 2010, vol. 41, nos. 3–4, pp. 211–229. <https://doi.org/10.2166/nh.2010.004>