

การวิเคราะห์ทิศทางและความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านตอม่อสะพานด้วยแบบจำลองอุทกพลศาสตร์แบบ 1 และ 2 มิติ

Estimation of the Flow Direction and Velocity of Water passing by the Bridge Piers by Using 1 and 2 Dimensional Hydrodynamic Models

พรรณพิมพ์ พุทธิรักษา มะเปี่ยม^{1*}
Punpim Puttaraksa Mapiam^{1*}

ABSTRACT

Bridge piers within the channel can change the water flow behaviour leading to severe scour around the piers themselves and on the channel bed. This study was aimed to estimate the flow direction and velocity of water passing by the bridge piers to obtain useful information for further evaluation of scour creation in the Bang Pakong River. One and two dimensional hydrodynamic models were employed for the simulation of the flow behaviour in the river with and without bridge piers and under the severe flood and lowest tide, respectively, as the upstream and downstream boundary conditions. The results indicated that if there were bridge piers in the channel, the stream flow velocity rose by 0.2 m/s (13%) especially around and in between the two piers in the middle of the channel compared with that under natural river condition. The flow directions passing by piers also turned away from the banks. These therefore indicated that the middle two piers tended to slightly cause scour around the piers and along the channel bed in the middle of the Bang Pakong River during flood period with the lowest tide.

Keywords: Bridge Pier, Hydrodynamic Model, Flow Direction, Flow Velocity, Erosion

บทคัดย่อ

ตอม่อสะพาน (Bridge Pier) ในลำน้ำ อาจส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงสภาพการไหลของน้ำในลำน้ำ และอาจส่งผลกระทบต่อ การกัดเซาะที่เพิ่มขึ้นในลำน้ำเดิมได้ ในที่สุด การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการ วิเคราะห์ทิศทางและความเร็วการไหลของน้ำผ่านตอม่อสะพาน เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์การกัดเซาะ ต่อไป โดยได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองอุทกพลศาสตร์แบบ 1 มิติ และ 2 มิติ เพื่อจำลองสภาพการไหลของน้ำใน แม่น้ำบางปะกง ทั้งในกรณีที่ยังไม่มีการก่อสร้าง และกรณีเมื่อมีการก่อสร้างสะพานแล้ว ผลการศึกษาใน กรณีศึกษาที่ใช้เหตุการณ์น้ำหลากเป็นเงื่อนไขขอบเขตด้านเหนือน้ำ และใช้ระดับน้ำทะเลต่ำสุดกำหนดขอบเขต ด้านท้ายน้ำ เป็นกรณีที่ทำให้ความเร็วการไหลเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อมีการสร้างสะพาน ความเร็วการไหลสูงสุด เพิ่มขึ้น 0.2 ม./วิ. (13 %) เมื่อเทียบกับกรณีก่อนก่อสร้างสะพานที่มีตอม่อ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเร็วการไหล ดังกล่าวนี้จะอยู่ด้านข้างและในบริเวณระหว่าง 2 ตอม่อสะพานตัวกลางลำน้ำ โดยกระแสน้ำเมื่อผ่านตอม่อสะพาน แล้วไม่ได้มีการเบี่ยงเบนไปกัดเซาะตลิ่งแต่อย่างใด ดังนั้นจึงสรุปเบื้องต้นได้ว่า การก่อสร้างสะพานในบริเวณ

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 10900 Thailand.

*Corresponding author: Tel. 02-579-1567, Fax. 02-579-1567, Email Address: fengppm@ku.ac.th

ดังกล่าว มีแนวโน้มที่จะส่งผลกระทบต่อการศึกษาที่เพิ่มขึ้นในบริเวณโดยรอบตอม่อ และบริเวณท้องน้ำในช่วงตอนกลางของแม่น้ำบางปะกงในช่วงฤดูน้ำหลากที่ระดับน้ำทะเลลงต่ำสุด

คำสำคัญ: ตอม่อสะพาน แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ ทิศทางการไหล ความเร็วการไหล การกัดเซาะ

บทนำ

สะพาน (Bridge) เป็นโครงสร้างด้านวิศวกรรมประเภทหนึ่ง ที่ถูกก่อสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการเชื่อมต่อระบบการคมนาคมทั้งสองฝั่งของแม่น้ำ ผลที่ตามมาจากการก่อสร้างสะพานคือ การกีดขวางของตอม่อสะพาน (Pier) ในลำน้ำ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความเร็วและทิศทางการไหลของน้ำ ตลอดจนผลกระทบต่อ การกัดเซาะบริเวณตอม่อและตลิ่งและการตกตะกอนที่เพิ่มขึ้นในลำน้ำได้มากที่สุด

เพื่อลดผลกระทบจากการก่อสร้างสะพาน มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาพฤติกรรมการไหลที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างก่อนและหลังการก่อสร้างสะพาน สำหรับใช้ผลการศึกษามาตรการป้องกันและแก้ไขผลเสียต่อไป แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic Model) นับได้ว่าเป็นเครื่องมือที่ได้รับความนิยมในการนำมาศึกษาสภาพการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางและเวลาต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Singh, 1996; Chow *et al.*, 1988) โดยในกรณีสภาพลำน้ำธรรมชาติ การไหลจะมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางตามความยาวของลำน้ำเป็นสำคัญ ดังนั้นสามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ประเภท 1 มิติได้ (Chow *et al.*, 1988; พรรณพิมพ์และคณะ, 2548; Puttaraksa *et al.*, 2004; ชัยยุทธและคณะ, 2550) แต่ในกรณีที่ทำ การก่อสร้างสะพานขวางทางน้ำแล้ว สภาพการไหล

จะสามารถเปลี่ยนแปลงใน 2 ทิศทาง คือในทิศทางตามแนวยาวของลำน้ำ และทิศทางในแนวตั้งฉากกับทางน้ำ ซึ่งการประยุกต์ใช้แบบจำลองฯ ประเภท 2 มิติ จะมีความเหมาะสมกว่า อย่างไรก็ตามแบบจำลองประเภท 2 มิติ มีวิธีการวิเคราะห์ที่มีความซับซ้อนกว่าประเภท 1 มิติ ซึ่งต้องการข้อมูลนำเข้าที่มีความละเอียดสูงตลอดจนใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่นานกว่า

ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์สำคัญคือ เพื่อต้องการศึกษาผลกระทบของตอม่อสะพาน ต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลผ่านตอม่อสะพาน เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์การกัดเซาะของดินบริเวณตอม่อและริมตลิ่งที่เพิ่มขึ้นในแม่น้ำต่อไป โดยเลือกจุดพิจารณาในแม่น้ำบางปะกงเป็นพื้นที่ศึกษา และได้เลือกแบบจำลอง RMA 2 ซึ่งเป็นแบบจำลองอุทกพลศาสตร์แบบ 2 มิติ สำหรับจำลองสภาพการไหลก่อนและหลังก่อสร้างสะพาน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากต้องการทราบสภาพการไหลเฉพาะในบริเวณตอม่อสะพานเท่านั้น ดังนั้นในการศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง RMA 2 เฉพาะในบริเวณ การก่อสร้างตอม่อสะพานซึ่งมีระยะทางประมาณ 3 กม. และประยุกต์ใช้แบบจำลองประเภท 1 มิติ (แบบจำลอง HEC-RAS) มาวิเคราะห์การไหลสำหรับกำหนดเงื่อนไขขอบเขตด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ (Upstream and Downstream Boundary Condition) ให้แบบจำลอง RMA 2 ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

แม่น้ำบางปะกงเกิดจากการรวมตัวกันของแม่น้ำนครนายกและแม่น้ำปราจีนบุรี ซึ่งมาบรรจบ

กัน ณ บริเวณ ตำบลบางแตน อำเภอบ้านสร้าง จังหวัดปราจีนบุรี จากนั้นจะไหลผ่านพื้นที่ราบในจังหวัดฉะเชิงเทรา และไหลออกสู่อ่าวไทยที่อำเภอบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา รวมระยะทางทั้งหมดของแม่น้ำบางปะกงประมาณ 230 กม. ความ

กว้างของแม่น้ำบางปะกงอยู่ในช่วงประมาณ 100 ถึง 250 ม. และมีระดับท้องน้ำอยู่ในช่วงประมาณ -15.0 ถึง -5.0 ม.รทก. โดยมีค่าเฉลี่ยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ -8 ม.รทก. ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาตำแหน่งที่ก่อสร้างสะพานอยู่เหนือปากแม่น้ำบางปะกงเป็นระยะทางประมาณ 39 กม. ตั้งอยู่ห่างจากเขื่อนทด

น้ำบางปะกงเป็นระยะทางประมาณ 20 กม. และตั้งอยู่ระหว่างสะพานจะเชิงเทรา และสะพานบ้านโพธิ์ (Figure 1) ซึ่ง ณ จุดพิจารณาก่อสร้างนี้มีความกว้างแม่น้ำประมาณ 250 ม. ระดับท้องน้ำที่ -7.8 ม.รทก. และระดับตลิ่งที่ +1.6 ม.รทก.

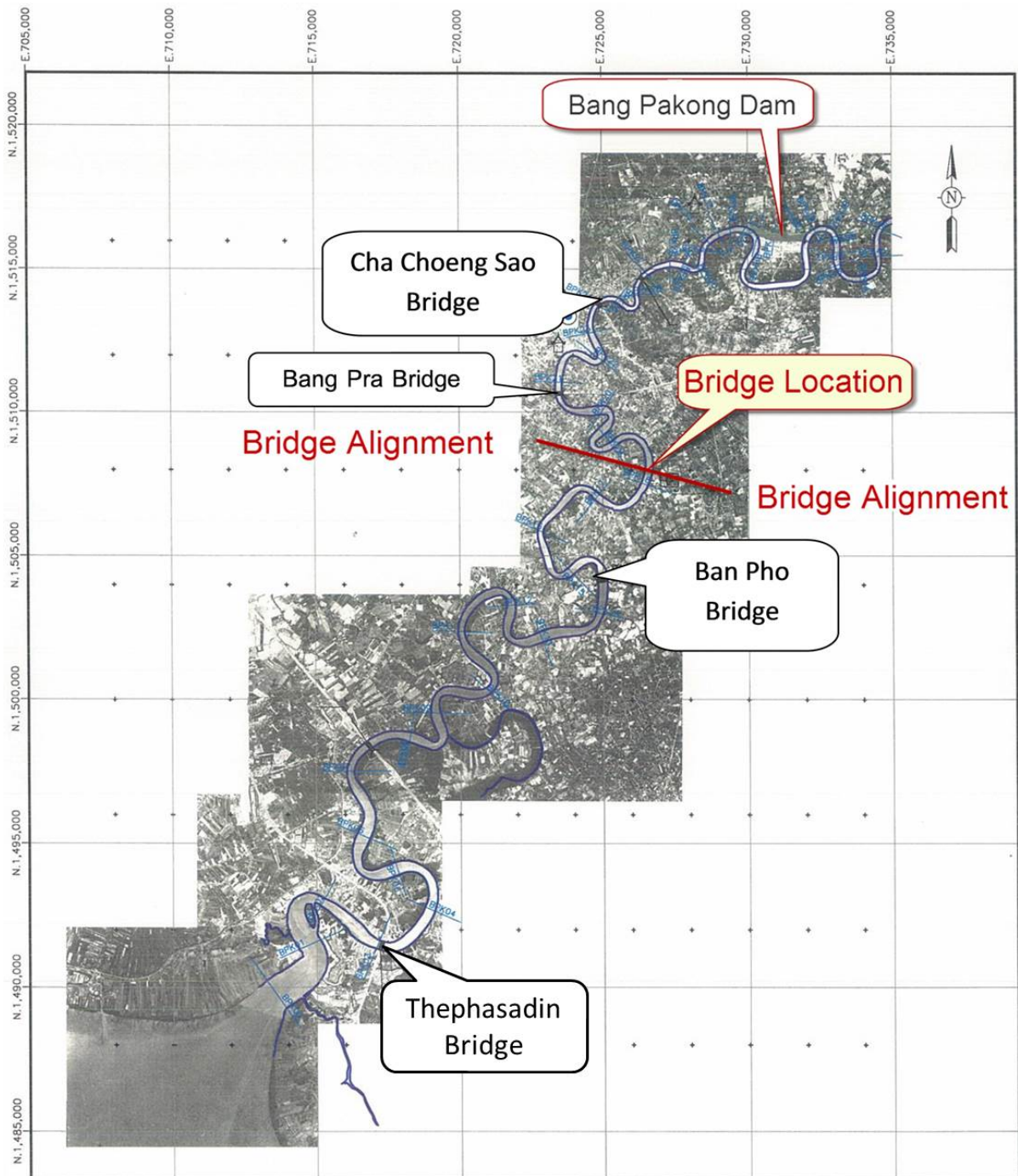


Figure 1 Bridge location over the Bang Pakong River

การวิเคราะห์การไหล 1 มิติ

แบบจำลอง HEC-RAS (USACE, 2001; Tate, 1999; Chuenchooklin, 2007; Sargison and Barton, 2008) ถูกพัฒนาขึ้นโดยศูนย์วิจัยในการศึกษานี้ สำหรับสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ สมการเซนต์-วีแนนท์ (St. Venant Equations) ซึ่งประกอบด้วย 2 สมการย่อยคือ สมการต่อเนื่อง

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e \right) - \beta q v_x + W_f B = 0 \quad (2)$$

เมื่อ x คือ ระยะทางในแนวราบตามแนวทงน้ำและแม่น้ำ, t คือเวลา, Q คือ อัตราการไหล, A คือหน้าตัดขวางของการไหล, q คือ ปริมาณการไหลเข้าด้านข้าง (Lateral Inflow) ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของทางน้ำ, h คือ ระดับผิวน้ำ, v_x คือ ความเร็วของปริมาณการไหลเข้าด้านข้างในทิศทางของการไหลในทางน้ำ, S_f คือ ความลาดชันของความเสียดทาน (Friction Slope), S_e คือ ความลาดชันของ Eddy Loss, B คือ ความกว้างของทางน้ำที่ผิวน้ำ, W_f คือ แรงเฉือนเนื่องจากลม (Wind Shear Force), β คือ แฟคเตอร์ปรับค่าโมเมนตัม (Momentum Correction Factor) และ g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง โดยมีขั้นตอนในการศึกษามีดังนี้

- 1) การกำหนดขอบเขตการศึกษาโดยด้านเหนือน้ำเริ่มจากสถานี Kgt. 3 (ที่ตั้งของสถานีอุทกวิทยาปากแม่น้ำบางปะกง
- 2) การรวบรวมข้อมูลรูปตัดตามขวาง (Cross Section) ของแม่น้ำบางปะกงตั้งแต่สถานี Kgt.3 จนถึง ปากแม่น้ำบางปะกง
- 3) การรวบรวมข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายวันของสถานี Kgt. 3 จากกรมอุทกศาสตร์กองทัพเรือ และข้อมูลระดับน้ำทะเลรายชั่วโมง ณ ปากแม่น้ำบางปะกง จากกรมชลประทาน สำหรับกำหนดเงื่อนไขขอบเขตด้านเหนือน้ำ และท้ายน้ำ ตามลำดับ การรวบรวมข้อมูลตรวจวัดระดับน้ำรายชั่วโมงที่บริเวณเขื่อนทดน้ำบางปะ

(Continuity Equation) และสมการโมเมนตัม (Momentum Equation) ดังแสดงรายละเอียดในสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

กง สะพานจะเชิงเทรา และสะพานบ้านโพธิ์ สำหรับใช้สอบเทียบแบบจำลอง HEC-RAS (Model Calibration) ตลอดจนการรวบรวมข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวันที่อยู่ในการรับผิดชอบของกรมชลประทานและกรมอุตุวิทยามา จากสถานีที่ตั้งอยู่โดยรอบพื้นที่โครงการ สำหรับการประเมินการไหลด้านข้าง

- 4) การคัดเลือกเหตุการณ์น้ำหลากในช่วงวันที่ 15 มิถุนายน ถึง 30 กันยายน 2549 ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเก็บรวบรวมข้อมูลตรวจวัดอย่างต่อเนื่อง ตลอดจนเป็นช่วงที่หลายพื้นที่ในลุ่มน้ำบางปะกงประสบปัญหา น้ำท่วมขังและน้ำล้นตลิ่ง สำหรับใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) เพื่อนำไปเป็นตัวแทนการกำหนด

สภาพการไหลที่อาจส่งผลต่อการกัดเซาะในแบบจำลอง Kgt. 3 (ที่ตั้งของสถานีอุทกวิทยาปากแม่น้ำบางปะกง) แบบ 2 มิติ ในลำดับต่อไป

- 5) การประเมินปริมาณการไหลด้านข้างที่เข้ามาระหว่างสถานี Kgt. 3 และปากแม่น้ำบางปะกงด้วยแบบจำลองอุทกวิทยา สำหรับช่วงเวลาเดียวกับการสอบเทียบแบบจำลอง

- 6) การสอบเทียบแบบจำลอง เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของทางน้ำ (Manning's n) สำหรับเป็นตัวแทนแม่น้ำบางปะกงในช่วงทางน้ำที่ศึกษา

การวิเคราะห์การไหล 2 มิติ

แบบจำลอง RMA 2 (สามารถ, 2546; กรมควบคุมมลพิษ, 2545; Nielsen, 2000) ได้รับการพัฒนาโดยห้องวิจัยแบบจำลองทางสิ่งแวดล้อม (Environmental Modeling Research Laboratory: EMRL) ที่มหาวิทยาลัยบริกแฮมยัง (Brigham Young University)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0$$

(3)

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + gh \left[\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial a}{\partial y} \right] + \frac{g n^2}{\left(\frac{1}{h^6} \right)^2} (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} - \xi V_a^2 \cos \psi - 2hv\omega \sin \Phi = 0$$

(4)

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + gh \left[\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial a}{\partial y} \right] + \frac{g v n^2}{\left(\frac{1}{h^6} \right)^2} (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} - \xi V_a^2 \sin \psi + 2hu\omega \sin \Phi = 0$$

(5)

เมื่อ h คือ ความลึกของน้ำ (ม.), u, v คือ ความเร็วของกระแส (ม./วิ.), x, y, t คือ โคออร์ดิเนตในระบบพิกัดฉาก (ม.) และเวลา (วิ.), ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (น้ำจืดและน้ำเค็มมีค่า ρ เท่ากับ 1,000 และ 1,026 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ), E คือ สัมประสิทธิ์ความหนืด (Eddy Viscosity Coefficient), g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (9.81 ม/วิ²), a คือ ระดับของพื้นที่ท้องทะเล (ม.), n คือ สัมประสิทธิ์ความขรุขระของท้องน้ำ, ξ คือ สัมประสิทธิ์ของความเค้นเนื่องจากลม, V_a คือ ความเร็วของลม (ม./วิ.), ψ คือ ทิศทางของลม (องศา), ω คือ ความเร็วเชิงมุมที่โลกหมุนรอบตัวเอง (7.29 x 10⁻⁵ /วิ.), Φ คือ ละติจูด ณ พื้นที่แบบจำลอง (องศา)

เป็นแบบจำลองที่คำนวณหาคำตอบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) จากสมการต่อเนื่อง ดังแสดงในสมการที่ (3) และสมการโมเมนตัมในสมการที่ (4) และ (5)

การประยุกต์ใช้แบบจำลอง RMA 2 เพื่อประเมินความเร็วและทิศทางการไหลในแม่น้ำแบบ 2 มิติ มีกระบวนการสำคัญๆ ดังต่อไปนี้

1) การสร้างขอบเขตของแบบจำลอง

จะก่อสร้างสะพานได้ถูกสร้างขึ้น (Figure 2 (a)) จากนั้นทำการสร้างเอลิเมนต์ในแบบจำลองโดยใช้เอลิเมนต์รูปเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม (Triangular Element) ดังแสดงใน Figure 2 (b)

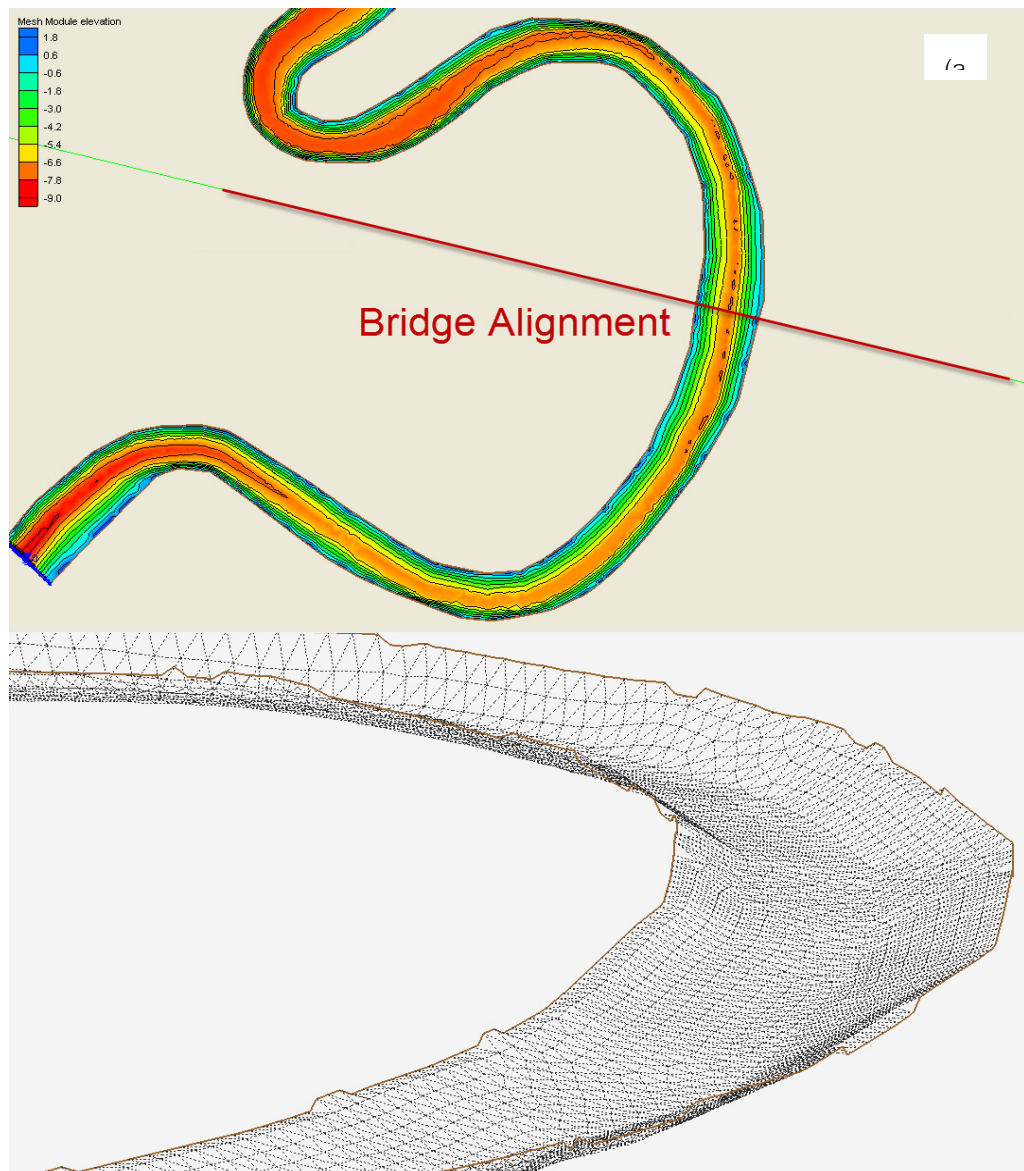


Figure 2 Boundary of study area for RMA 2 model (a) and the constructed elements by RMA 2 model

(b)

2) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้แบบจำลอง การจำลองการไหลด้วยแบบจำลอง 2 มิตินี้ ได้จำลอง ภายใต้ช่วงเวลาที่เกิดน้ำหลากสูงสุดในปี 2549 ซึ่งสามารถส่งผลต่อการกัดเซาะในบริเวณก่อสร้างสะพานที่สูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากไม่มีข้อมูลตรวจวัดในบริเวณก่อสร้างสะพาน ดังนั้นได้นำผลกราฟน้ำท่าจากแบบจำลอง HEC-RAS ณ ตำแหน่งด้านท้ายน้ำของสะพานบางพระ (อ.เมือง จ. ฉะเชิงเทรา) ไปประมาณ 3 กม. และข้อมูลระดับน้ำ ณ ตำแหน่งเหนือหน้าของสะพานบ้านโพธิ์ ไปประมาณ 3 กม. มาใช้เพื่อ

กำหนดเงื่อนไขขอบเขตด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำให้กับแบบจำลอง RMA 2 ตามลำดับ

3) การกำหนดพารามิเตอร์ควบคุมของแบบจำลอง RMA 2 ที่มีความสำคัญและมีผลต่อความถูกต้องของการจำลองการไหลแบบ 2 มิติ ประกอบด้วย 2 ค่า คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระท้องน้ำ (Manning's n) และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด (E , ตร.ม./วิ.) ซึ่งโดยปกติแล้วพารามิเตอร์ทั้งสองจะได้มาด้วยกระบวนการปรับเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) เป็นที่น่าเสียดายที่ไม่มีข้อมูลการตรวจวัดในบริเวณที่ก่อสร้างสะพาน ดังนั้น

จึงได้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของน้ำ ตามผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง HEC-RAS ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด ในแบบจำลอง RMA 2 จะไม่ได้กำหนดโดยตรง แต่จะกำหนดผ่านค่า Peclet number

$$P = \frac{\rho u dx}{E} \quad (6)$$

เมื่อทราบค่า P ก็จะคำนวณหาค่า E ในแต่ละเอลิเมนต์ได้ ซึ่งค่า E นี้จะมีผลต่อความถูกต้องในการคำนวณความเร็วและทิศทางของกระแส น้ำไม่มากนักเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของทางน้ำ แต่จะมีผลต่อเสถียรภาพในการจำลองการไหลเป็นสำคัญ (Khanal, 2012) ซึ่งค่า P ได้รับคำแนะนำว่ามีช่วงอยู่ระหว่าง 15-40 (Olsen, 1994) สำหรับการศึกษาเป็นการศึกษาในช่วงน้ำหลาก ซึ่งน้ำจืดมีอิทธิพลหลักต่อการไหลในลำน้ำ ดังนั้นจึงกำหนดค่า $\rho = 1,000$ กก./ลบ.ม. ในการจำลองการไหล

เกณฑ์การสอบเทียบแบบจำลอง

(P) ซึ่งแปรผันตรงกับความหนาแน่นของน้ำ (ρ , กก./ลบ.ม.) ความเร็วน้ำเฉลี่ยของแต่ละเอลิเมนต์ (u , ม./วิ.) และความยาวของเอลิเมนต์ (dx , ม.) ดังแสดงในสมการที่

การสอบเทียบแบบจำลองมีวัตถุประสงค์หลัก คือเพื่อให้ได้พารามิเตอร์ของแบบจำลองที่เหมาะสม และสามารถใช้เป็นตัวแทนของพื้นที่ศึกษาได้ โดยมีวิธีการคือการนำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์และผลที่ได้จากการตรวจวัดมาเปรียบเทียบกัน ถ้าผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไม่ใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัด จะต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่จนกระทั่งได้ผลการเปรียบเทียบอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สำหรับเกณฑ์การเปรียบเทียบข้อมูล 2 ชุดในการศึกษานี้ ได้พิจารณาใช้ค่าทางสถิติ 2 ค่า คือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, r) และค่า Efficiency Index (EI) ซึ่งแสดงในสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{mi} - \bar{Q}_m) \times (Q_{ci} - \bar{Q}_c)}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^N (Q_{mi} - \bar{Q}_m)^2 \times \sum_{i=1}^N (Q_{ci} - \bar{Q}_c)^2 \right]}} \quad (7)$$

$$EI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{mi} - Q_{ci})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{mi} - \bar{Q}_m)^2} \times 100\% \quad (8)$$

$$\bar{Q}_{m,c} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_{(m,c)i} \quad (9)$$

เมื่อ Q_{mi} คือ ปริมาณน้ำท่ารายวันที่ได้จากการตรวจวัดที่เวลา i , \bar{Q}_m คือค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำท่ารายวันที่ได้จากการตรวจวัด, Q_{ci} คือ ปริมาณน้ำท่ารายวันที่ได้จากแบบจำลองที่เวลา i , \bar{Q}_c คือค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำท่ารายวันที่ได้จากแบบจำลอง และ N คือ จำนวนของข้อมูล

ชุดของพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่เหมาะสม จะส่งผลต่อการได้มาซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และค่า Efficiency Index (EI) เข้าใกล้ 1 และ 100% ตามลำดับ

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

1.1. ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HEC-RAS

1) ผลการสอบเทียบแบบจำลอง

ผลการสอบเทียบแบบจำลอง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของทางน้ำที่เหมาะสมในช่วงระหว่างเขื่อนทดน้ำบางปะกงถึงปากแม่น้ำ ซึ่งอยู่ในช่วงที่จะทำการก่อสร้างสะพาน มีค่าประมาณ 0.030 ในแม่น้ำ และมีค่า 0.045 สำหรับตลิ่ง ดังแสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลองและการตรวจวัด ณ บริเวณเขื่อนทดน้ำบางปะกง สะพานฉะเชิงเทรา และสะพานบ้านโพธิ์ ในรูปที่ 3 ถึง 5 ตามลำดับ โดยมีผลการวิเคราะห์ค่าสถิติสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ที่ตำแหน่งทั้งสามเท่ากับ 0.933, 0.929, และ 0.942 ในขณะที่ค่า EI เท่ากับ 89.18%, 87.68%, และ 89.98% ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของทางน้ำดังกล่าวมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นตัวแทนสภาพลำน้ำให้แบบจำลอง RMA 2 ต่อไป

2) ผลการจำลองสภาพการไหลด้วยแบบจำลอง HEC-RAS ณ ตำแหน่งก่อสร้างสะพาน

ผลการจำลองการไหลแบบ 1 มิติ ในบริเวณตำแหน่งที่จะทำการก่อสร้างสะพาน พบว่าการขึ้นลงของระดับน้ำในแม่น้ำบางปะกงจะเป็นไปตามอิทธิพลของระดับน้ำทะเล เนื่องจากในช่วงที่ระดับน้ำทะเลขึ้นสูง น้ำจากทะเลจะไหลเข้ามาในแม่น้ำ ทำให้ระดับน้ำในแม่น้ำสูงขึ้น และเมื่อน้ำทะเลลดระดับลง น้ำในแม่น้ำก็จะไหลออกสู่ทะเล ทำให้ในแม่น้ำบางปะกงในช่วงที่ก่อสร้างสะพานมีการไหลแบบสองทิศทาง กล่าวคือ อัตราการไหลมีค่าเป็นบวกเมื่อน้ำไหลออกสู่ทะเล และอัตราการไหลมีค่าเป็นลบเมื่อน้ำทะเลไหลเข้าสู่แม่น้ำ จากผลการศึกษาข้างต้น ผู้วิจัยได้เลือกผลการวิเคราะห์อัตราการไหลและระดับน้ำ ณ จุดสร้างสะพาน ระหว่างวันที่ 7-9 ก.ย. 2549 ดังแสดงในรูปที่ 6 ทั้งนี้เนื่องมาจากในช่วงเวลาดังกล่าวระดับน้ำและอัตราการไหลมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่สูง ประกอบกับมีผลการสอบเทียบแบบจำลองที่มีความถูกต้องสูงเมื่อเทียบกับช่วงที่ระดับน้ำสูงสุดในช่วงเวลาอื่น (ดูรูปที่ 3-5) โดยในช่วงวันที่ 7-9 ก.ย. 2549 ปริมาณน้ำสูงสุดที่ไหลออกสู่ทะเลมีค่าประมาณ 1,610 ลบ.ม./วิ. และมีน้ำไหลย้อนเข้าสู่แม่น้ำด้วยอัตราการไหลสูงสุดประมาณ 1,170 ลบ.ม./วิ. สำหรับค่าระดับน้ำเฉลี่ย (วันที่ 7-9 ก.ย. 2549) ตามแนวความยาวของแม่น้ำ (average longitudinal profile) ตั้งแต่เขื่อนทดน้ำบางปะกง ถึงสะพานบ้านโพธิ์ แสดงดัง Figure 7

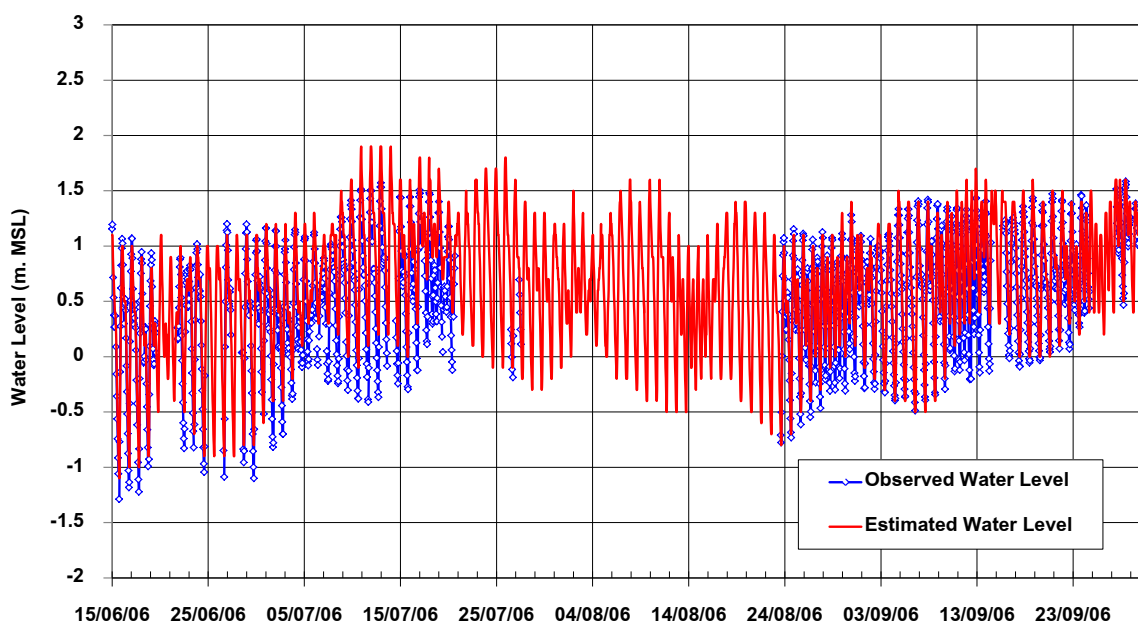


Figure 3 Comparison of hourly observed and calculated stage hydrographs at the Bang Pakong dam during 15 June to 30 September 2006.

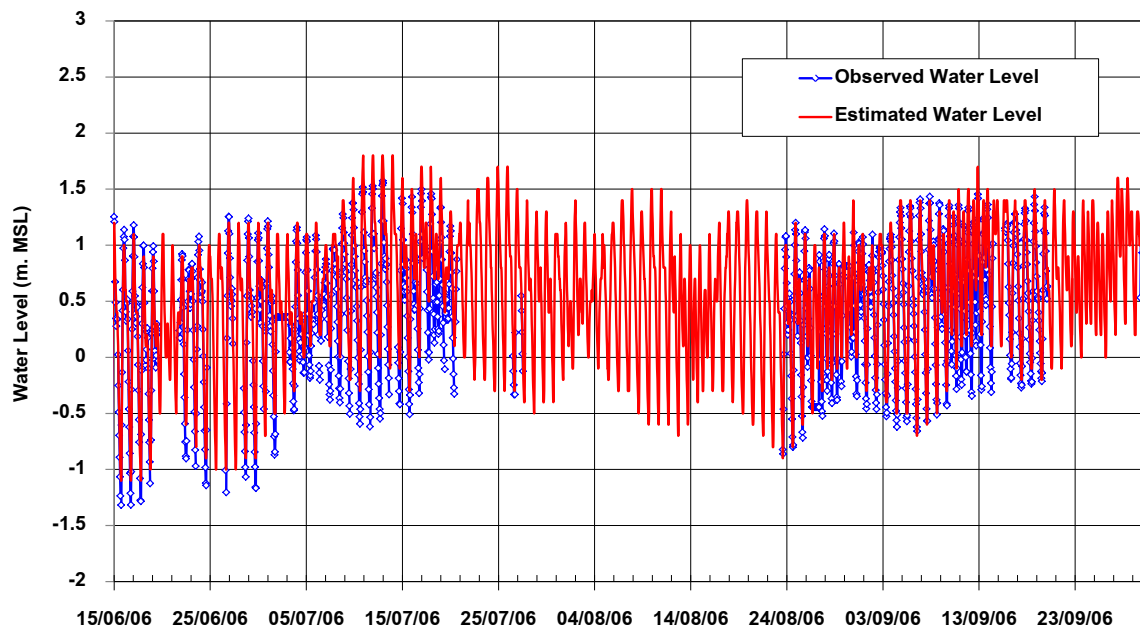


Figure 4 Comparison of hourly observed and calculated stage hydrographs at the Cha Choeng Sao Bridge during 15 June to 30 September 2006.

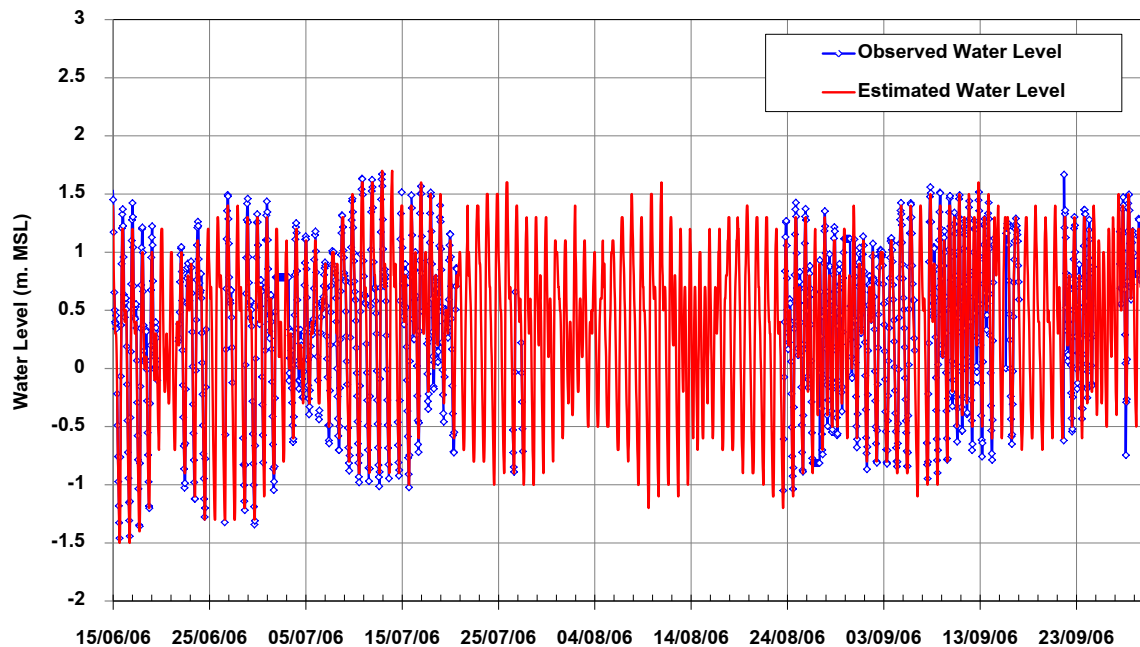


Figure 5 Comparison of hourly observed and calculated stage hydrographs at the Ban Pho Bridge during 15 June to 30 September 2006.

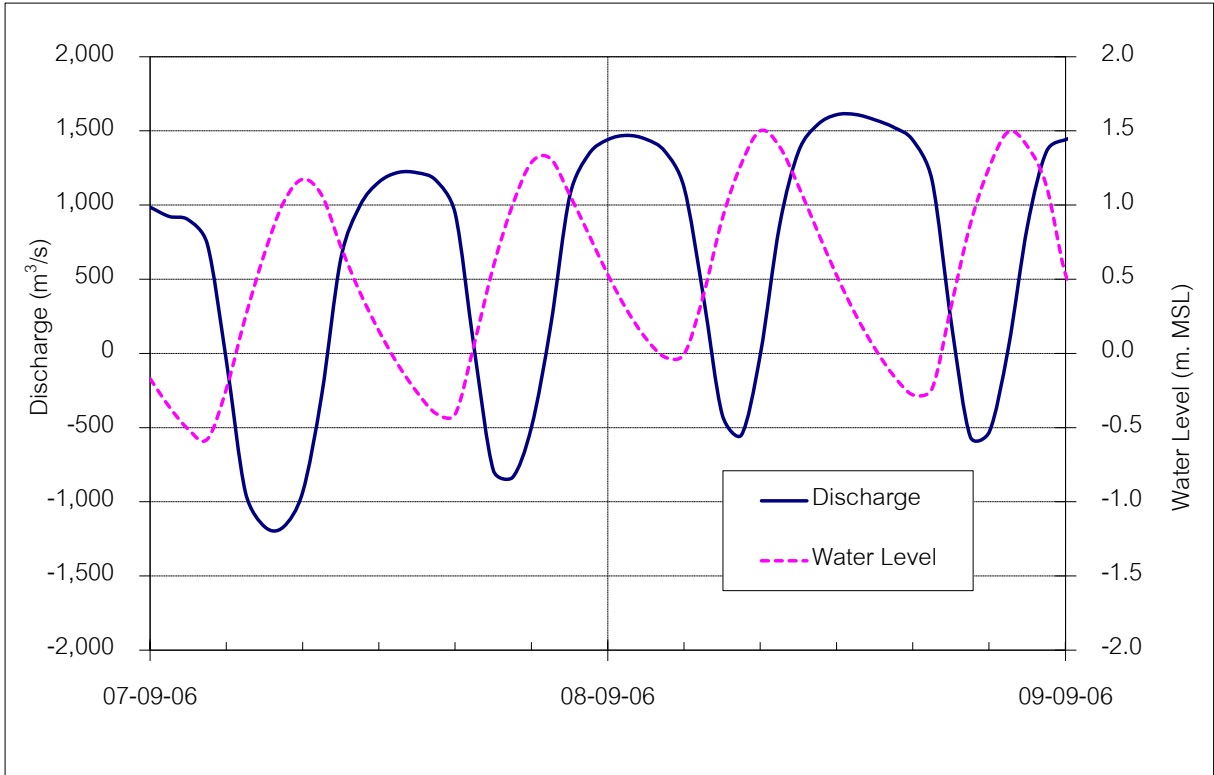


Figure 6 Estimated discharges and water levels at the bridge site obtained by HEC-RAS model during 7-9 September 2006

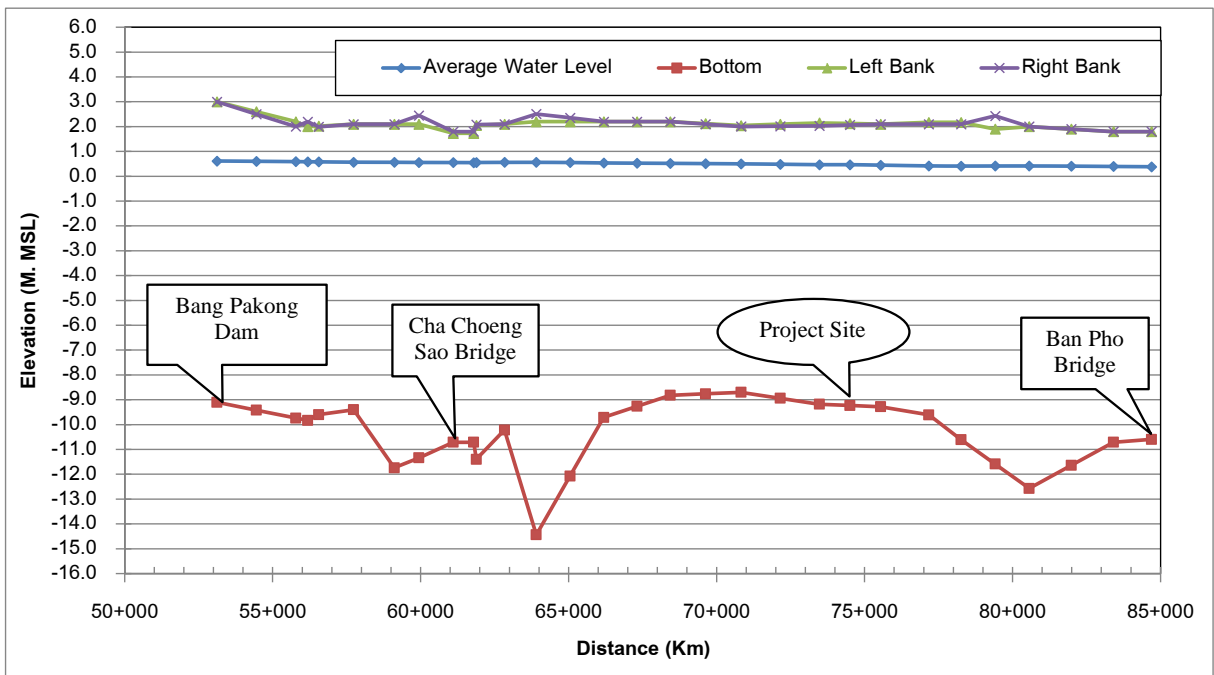


Figure 7 Average longitudinal profile of estimated water levels (during 7-9 September 2006) from Bang Pakong Dam to Ban Pho Bridge

ผลการประเมินความเร็วและทิศทางการไหลของน้ำด้วยแบบจำลอง RMA 2

จากผลการศึกษาแบบจำลอง HEC-RAS ซึ่งให้เห็นว่า ถ้ามีการก่อสร้างสะพานขึ้น มีโอกาสที่จะเกิดการกัดเซาะในบริเวณดังกล่าวเนื่องมาจากอัตราการไหลที่สูง ทั้งในกรณีที่น้ำไหลออกสู่ทะเล และในกรณีที่น้ำไหลย้อนจากทะเลเข้าสู่แม่น้ำ ดังนั้นในการศึกษาความเร็วและทิศทางการไหลด้วยแบบจำลอง RMA 2 นี้ ได้พิจารณาวิเคราะห์เฉพาะสภาพการไหลที่สามารถส่งผลกระทบต่อเกิดการกัดเซาะสูงที่สุดเท่านั้น กล่าวคือใช้ผลการวิเคราะห์อัตราการไหลสูงสุดจากแบบจำลอง HEC-RAS ณ บริเวณจุดสร้างสะพานด้วยอัตรา 1,610 ลบ.ม./วิ. (อัตราการไหลสูงสุดย่อมส่งผลกระทบต่อเกิดการกัดเซาะมากที่สุด) มากำหนดเงื่อนไขขอบเขตด้านเหนือน้ำให้แบบจำลองในลักษณะคงที่ และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตด้านท้ายน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (ทำหน้าที่ควบคุมการไหลในแม่น้ำ) ด้วยค่าระดับน้ำระหว่างวันที่ 7-9 กันยายน 2549 (Figure 6) อย่างไรก็ตามในการพิจารณาผลการวิเคราะห์ ได้เลือกพิจารณาเฉพาะสภาพการไหลใน 2 กรณี คือ กรณีที่ระดับน้ำทะเลลงต่ำสุด (- 0.60 ม.รทก) และกรณีที่ระดับน้ำทะเลขึ้นสูงสุด (+ 1.49 ม.รทก) เนื่องจาก 2 กรณีดังกล่าว ส่งผลให้เกิดการไหลผ่านจุดสร้างสะพานสูงสุดในทิศทางการไหลออกสู่ทะเล และไหลย้อนจากทะเลเข้าสู่แม่น้ำ ตามลำดับ

นอกจากนี้ได้กำหนดพารามิเตอร์ ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระท้องน้ำในบริเวณที่จะก่อสร้างสะพานให้มีค่าเท่ากับ 0.030 ในแม่น้ำ และมีค่าเท่ากับ 0.045 สำหรับตลิ่งตามผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง HEC-RAS สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด ได้กำหนดผ่านค่า P ซึ่งพบว่าค่า P ที่เหมาะสมคือ 30 โดยผลการประเมินความเร็วและทิศทางการไหลของน้ำบริเวณสะพานด้วยแบบจำลอง RMA 2 ในกรณีก่อนก่อสร้างและหลังก่อสร้างสะพานแสดงได้ดังนี้

1) กรณีก่อนก่อสร้างสะพานข้ามแม่น้ำบางปะกง ผลการศึกษาพบว่าความเร็วและทิศทางการไหลขึ้นอยู่กับระดับน้ำทะเล ซึ่งเป็นขอบเขตทางด้านท้ายน้ำของแบบจำลอง กล่าวคือเมื่อระดับน้ำทะเลลงต่ำสุดส่งผลให้ทิศทางการไหลของน้ำมีทิศออกสู่ทะเล และมีความเร็วสูงสุดอยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 1.5 ม./วิ. โดยความเร็วสูงสุดอยู่บริเวณกลางลำน้ำ และความเร็วต่ำสุดอยู่บริเวณขอบตลิ่ง ดังแสดงใน Figure 8 ในขณะที่เมื่อระดับน้ำทะเลขึ้นสูงสุดส่งผลให้ทิศทางการไหลของน้ำมีทิศการไหลไปทางด้านเหนือน้ำของแม่น้ำบางปะกง และมีความเร็วลดลงเมื่อเทียบกับกรณีระดับน้ำทะเลลงสูงสุด ซึ่งความเร็วมีค่าอยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 0.9 ม./วิ. โดยความเร็วสูงสุดอยู่บริเวณกลางลำน้ำ และความเร็วต่ำสุดอยู่บริเวณขอบตลิ่ง ดังแสดงใน Figure 9

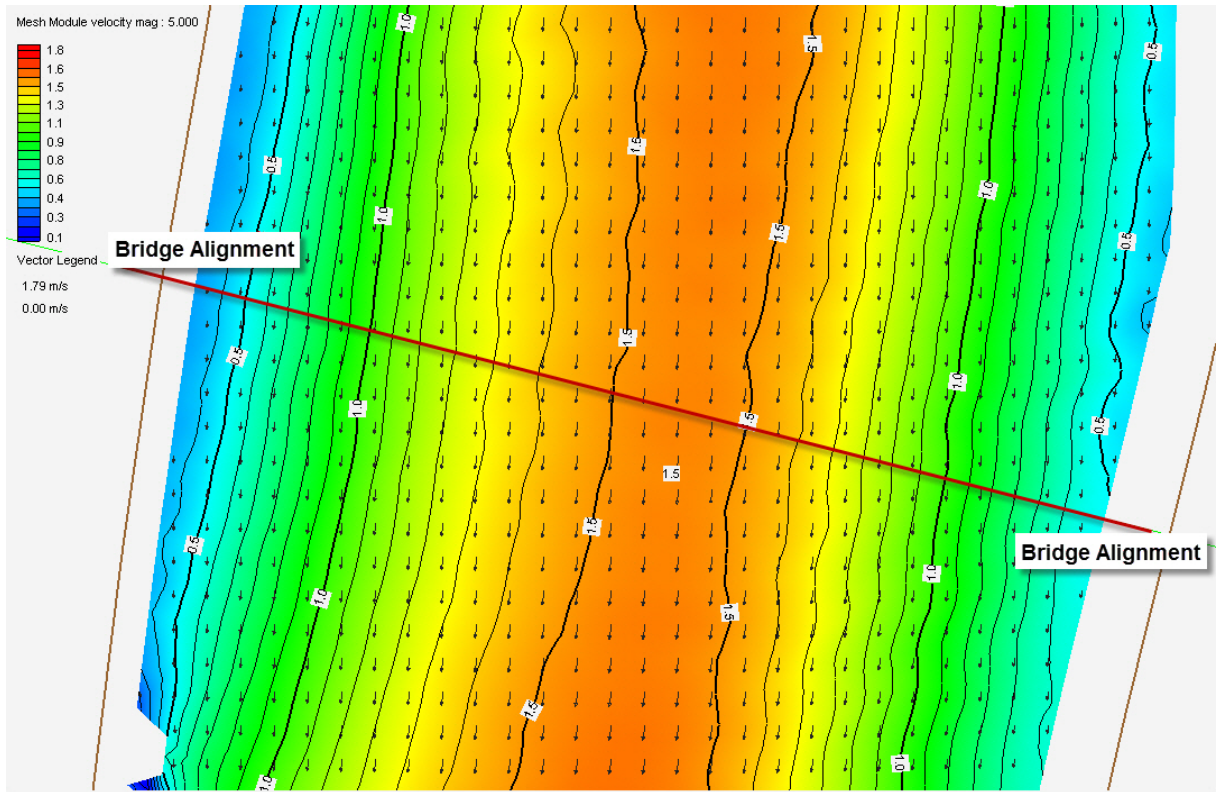


Figure 8 Flow direction and velocity corresponding to the lowest tide under the natural condition.

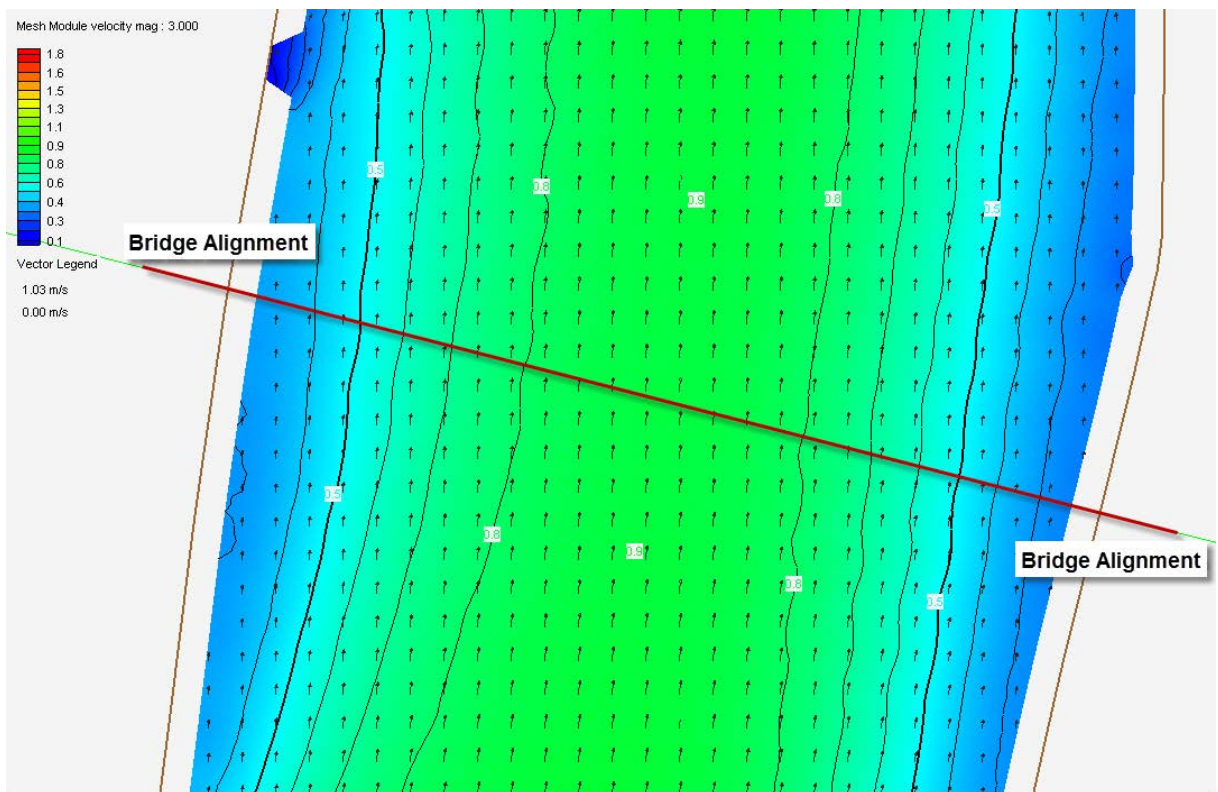


Figure 9 Flow direction and velocity corresponding to the highest tide under the natural condition.

2) กรณีหลังก่อสร้างสะพานข้ามแม่น้ำบางปะกง เมื่อกำหนดให้มีตอม่อสะพานในลักษณะ Single Column ขนาด/ตัน (กว้าง x ยาว) คือ 9 ม. x 8 ม. จำนวน 4 ตัน ระยะห่างตันละ 80 ม. ตั้งขวางแม่น้ำบางปะกง (Figure 10 and 11) ผลการศึกษาพบว่าทิศทางการไหลโดยรวมขึ้นอยู่กับระดับน้ำทะเลดังเช่นกรณีก่อนมีการสร้างสะพาน แต่จะมีการเบี่ยงเบนทิศทางในบริเวณการไหลผ่านตอม่อสะพาน

สำหรับผลการศึกษาในกรณีที่ระดับน้ำทะเลลงต่ำสุด (Figure 10) พบว่า ความเร็วการไหลสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่ากรณียังไม่มีมีการก่อสร้างสะพาน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 1.7 ม./วิ. สำหรับพฤติกรรมการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปบริเวณตอม่อสะพาน สามารถสรุปในเชิงเปรียบเทียบระหว่างกรณีก่อนมีสะพานและหลังมีสะพานได้ดังนี้ เมื่อการไหล (ในแนวไหลออกสู่ทะเล) กำลังไหลเข้าปะทะกับตอม่อสะพาน 2 ตัวที่ตั้งอยู่บริเวณกลางแม่น้ำ ความเร็วการไหลจะลดลง จาก 1.5 ม./วิ. (กรณีก่อนสร้างฯ) เหลือ 1 ม./วิ. (กรณีหลังสร้างฯ) หลังจากนั้นเมื่อปะทะกับตอม่อที่ขวางกั้นการไหล ส่งผลให้ทิศทางการไหลเบี่ยงเบนเพื่อไหลอ้อมตอม่อ และเพิ่มความเร็วสูงขึ้นจาก 1.5 ม./วิ. (กรณีก่อนสร้างฯ) เป็น 1.7 ม./วิ. (กรณีหลังสร้างฯ) ในบริเวณกลางลำน้ำ และบริเวณด้านข้างของตอม่อสะพาน 2 ตัวที่ตั้งอยู่บริเวณ

กลางแม่น้ำ ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของการลดขนาดหน้าตัดทางน้ำลงในบริเวณดังกล่าว หลังจากนั้นเมื่อการไหลไหลอ้อมตอม่อทั้ง 2 มาทางด้านหลังจะลดความเร็วลงอีกเหลือ 1.0 ม./วิ. เพื่อไหลออกจากแนวตอม่อ แต่ในบริเวณกลางลำน้ำยังคงความเร็วที่ 1.7 ม./วิ. ต่อไปตลอดขอบเขตที่ศึกษา ในขณะที่ความเร็วต่ำสุดสำหรับกรณีนี้ จะอยู่บริเวณขอบตลิ่งโดยเฉพาะบริเวณด้านข้างตอม่อสะพาน 2 ตัวริมแม่น้ำ

สำหรับผลการศึกษาในกรณีที่ระดับน้ำทะเลขึ้นสูงสุด (Figure 11) พบว่า ทิศทางการไหลของน้ำมีทิศการไหลไปทางด้านเหนือหน้าของแม่น้ำบางปะกง และมีความเร็วอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.9 ม./วิ. โดยความเร็วสูงสุดและความเร็วต่ำสุดอยู่บริเวณเดียวกับกรณีน้ำลงต่ำสุด แต่ค่าความเร็วสูงสุดยังคงมีแนวโน้มเท่าเดิมเมื่อเทียบกับกรณีก่อนสร้างสะพาน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของน้ำทะเลที่ดันขึ้นด้านกระแสน้ำที่ไหลลงมาจากด้านเหนือน้ำ ทำให้แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในบริเวณดังกล่าว ในขณะที่ความเร็วต่ำสุดจะลดลง จาก 0.3 ม./วิ. (กรณีก่อนสร้างฯ) เหลือ 0.2 ม./วิ. (กรณีหลังสร้างฯ) ซึ่งจะเกิดในบริเวณด้านหน้าแนวไหลเข้า และด้านหลังแนวไหลออกจาก 2 ตอม่อตัวกลาง และในบริเวณขอบตลิ่งของ 2 ตอม่อตัวริมแม่น้ำ

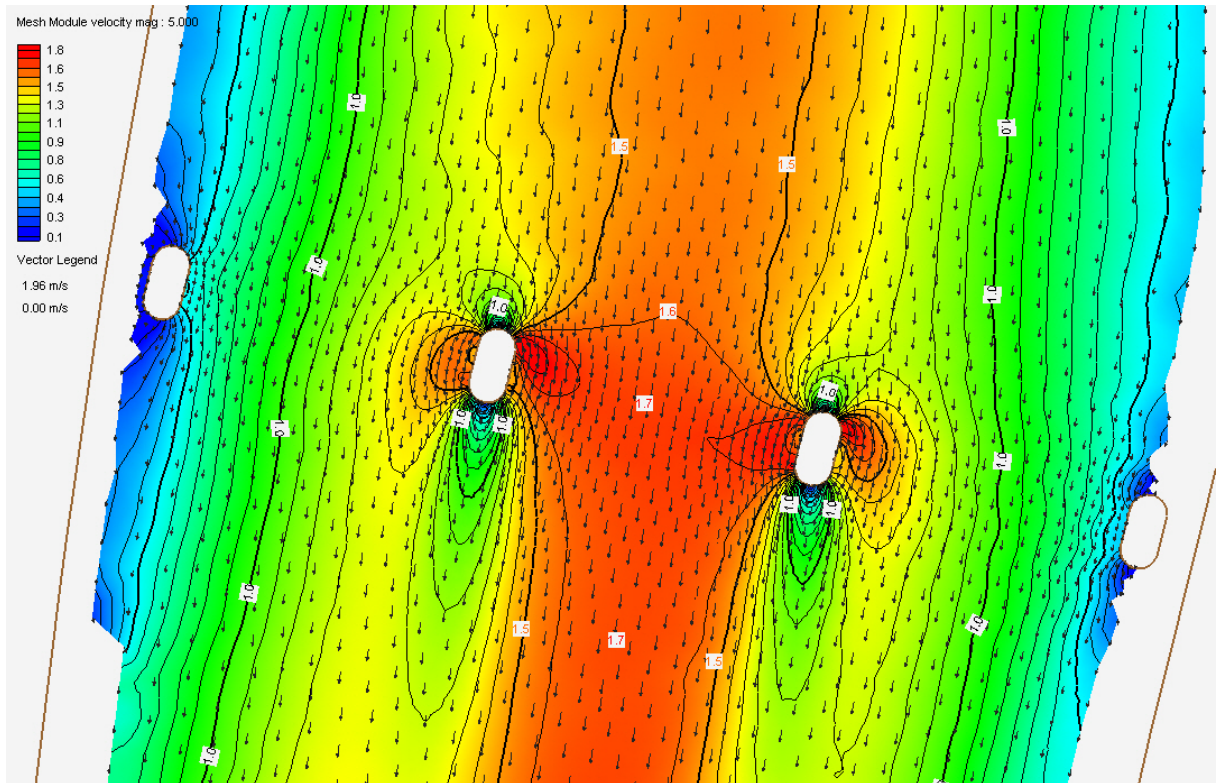


Figure 10 Flow direction and velocity corresponding to the lowest tide under the construction condition.

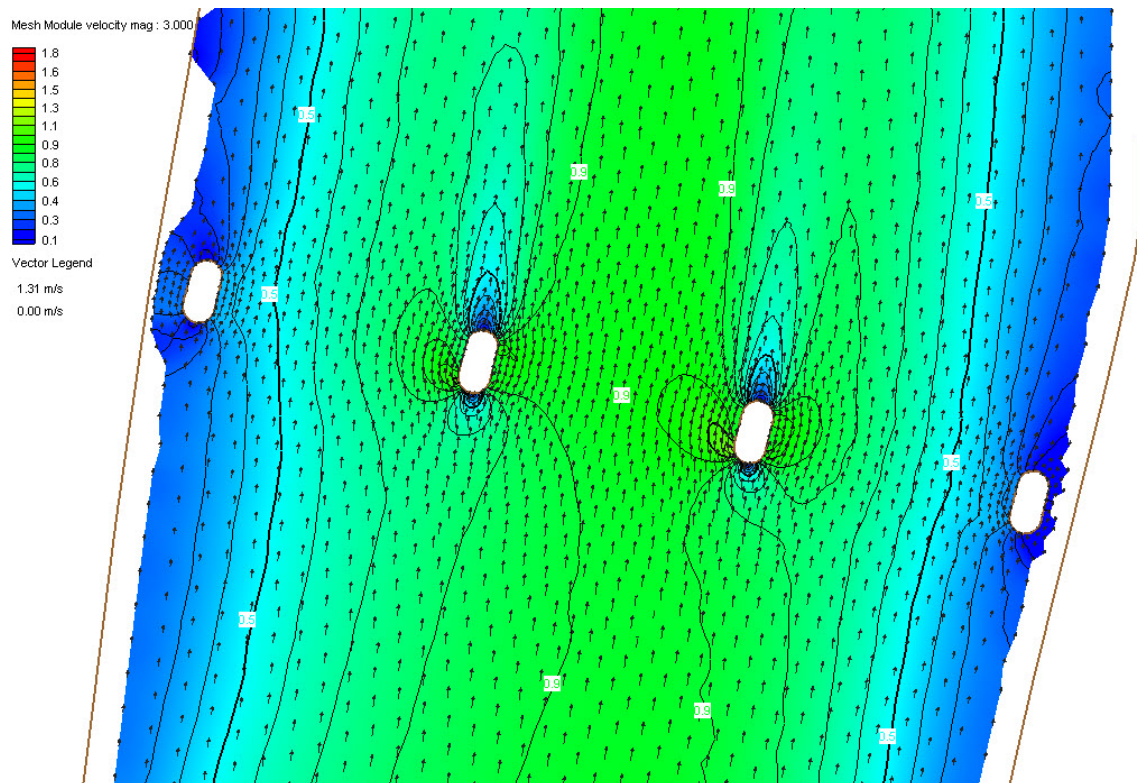


Figure 11 Flow direction and velocity corresponding to the highest tide under the construction condition.

สรุปผลการวิจัย

ผลการจำลองกระแสด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ในช่วงฤดูน้ำหลากในแม่น้ำบางปะกง บริเวณก่อสร้างสะพาน โดยต่อม่อสะพานมีลักษณะ Single Column ขนาด/ตัน (กว้าง x ยาว) คือ 9 ม. x 8 ม. จำนวน 4 ตัน ระยะห่างตันละ 80 ม. พบว่าการที่ระดับน้ำทะเลลงต่ำสุดส่งผลต่อความเร็วการไหลผ่านแนวการก่อสร้างสะพานที่สูงกว่ากรณีที่ระดับน้ำทะเลขึ้นสูงสุด ซึ่งมีแนวโน้มที่จะมีการกัดเซาะที่มากกว่าตามไปด้วย

เมื่อมีการสร้างสะพาน ในกรณีที่ระดับน้ำทะเลลงต่ำสุด ความเร็วการไหลสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 1.5 เป็น 1.7 ม./วิ. หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 13% ทิศทางขนานกับความยาวลำน้ำ โดยไม่มีการเบี่ยงเบนทิศเข้าหาขอบตลิ่งซ้ายหรือขวาแต่อย่างใด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ข้อจำกัดในการได้มาซึ่งข้อมูลในการกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษาสำหรับการศึกษานี้ โดยถ้ามีข้อมูลด้านกายภาพของลำน้ำที่เพิ่มขึ้น จะสามารถจำลองการไหลแบบ 2 มิติ ได้ต่อไปอีกทางด้านท้ายน้ำ ซึ่งจะทำให้ทราบว่าความเร็วการไหล 1.7 ม./วิ. จะเข้าสู่สภาวะปกติ เมื่อเทียบกับก่อนมีการก่อสร้างสะพานในบริเวณใด และทิศทางการไหลจะเบี่ยงเบนเข้าสู่ขอบตลิ่งของแม่น้ำหรือไม่ในจุดใด เพื่อให้เห็นผลกระทบของการกัดเซาะที่ชัดเจนมากขึ้นอีกด้วย

ความเร็วที่เพิ่มขึ้น 13% ประกอบกับทิศทางการไหลที่เปลี่ยนแปลงจากการสร้างสะพานดังกล่าว ทำให้ทราบว่า การสร้างสะพานในเงื่อนไขที่น้ำทะเลลงต่ำสุดมีแนวโน้มที่จะส่งผลกระทบต่ออัตราการกัดเซาะที่เพิ่มขึ้นในบริเวณโดยรอบของ 2 ต่อม่อตัวกลาง และบริเวณท้องน้ำในช่วงกลางแม่น้ำได้ สำหรับผลการวิเคราะห์ความเร็วและทิศทางการไหลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำ (เช่นแบบจำลอง SED2D หรือ Mike 21-ST เป็นต้น) เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์อัตราการกัดเซาะ (ในหน่วย ความลึก/เวลา) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและพื้นที่ต่างๆ ได้ต่อไป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพอย่างหนึ่งในการจำลองสภาพการไหลใน

แม่น้ำ โดยกรณีสภาพธรรมชาติก่อนการก่อสร้างสะพาน พฤติกรรมการไหลในแม่น้ำมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบ 1 มิติ ในขณะที่เมื่อก่อสร้างสะพานแล้ว การไหลมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะ 2 มิติ โดยเฉพาะในบริเวณการไหลผ่านต่อม่อสะพาน ดังนั้นควรเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ตรงกับสถานการณ์การจำลองสภาพการไหล เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ความเหมาะสมของโครงการ ตลอดจนการหามาตรการป้องกันและแก้ปัญหาทางพัฒนานั้นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

การวิเคราะห์ผลกระทบจากการกัดเซาะ ณ จุดก่อสร้างสะพานในภาคนี้พบว่าปี การจำลองค่าเฉลี่ยที่ใช้สถานการณ์น้ำหลากระหว่างวันที่ 7-9 กันยายน 2549 เพียง 1 เหตุการณ์เท่านั้น โดยในการพิจารณาความเหมาะสมของต่อม่อสะพานต่อการกัดเซาะเพื่อการก่อสร้างจริง ควรมีการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากการกัดเซาะสำหรับเหตุการณ์น้ำหลากที่แตกต่างกัน เพื่อให้ครอบคลุมสถานการณ์น้ำหลากที่เป็นไปได้มากที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ ณ จุดสร้างสะพาน เพื่อนำไปสู่การออกแบบขนาดของต่อม่อสะพานที่มีความเหมาะสมต่อลำน้ำในที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ กรมชลประทาน และกรมอุตุนิยมิวิทยา สำหรับความอนุเคราะห์ข้อมูลในการดำเนินงานงานวิจัย และขอขอบคุณภาคีวิชาชีพวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์สำหรับความอนุเคราะห์สถานที่ในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ (2545) โครงการประเมินความสามารถในการรองรับมลพิษและการประเมินความเสี่ยงต่อนิเวศทางทะเล. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

ชัยยุทธ ชินณะราศรี, วรรณชัย บุตรทองดี และสุรไกร บานชื่น. การเปลี่ยนแปลงของแม่น้ำ

- จากการก่อสร้างท่าเรืออำเภอบ้านแพ้ว นครพนม. วิศวกรรมสาร มข., 2550, 34 (1)
- พรรณพิมพ์ พุทธิรักษา, นุชนารถ ศรีวงศ์ตานันท์ และ สุรัชย์ ลิปิวิวัฒนาการ. การพัฒนาแบบจำลองคลื่นพลศาสตร์แบบอิมพลีซิทแบบหนึ่งมิติ, วิศวกรรมสาร มข. 2548; 32 (1)
- สามารถ อ่อนแป้น (2546) อิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงและลมต่อกระแสน้ำจำลองในอ่าวไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Chow V.T, Maidment D.R, and Mays L.W. (1988) Applied hydrology. McGraw-Hill: International Edition.
- Chuenchooklin S, Mekprugsawong P, and Chidchob P. The river analysis simulation model for the planning of retention area and diversion channel for flood reduction in the lower Yom's river basin, Thailand. Proceedings of INWEPF 4th Steering Meeting and Symposium; 2007 July 5-7, Bangkok, Thailand.
- Khanal, A. (2012) Two Dimensional Hydrodynamic Numerical Simulation of Flow Around Chevrons. Master of Science. Southern Illinois University.
- Nielsen, A. F. (2000) Hydrodynamic modelling. Isotope Tracer Demonstration at the Port of Songkla, Thailand. IAEA/RCA/UNDP Project No. RAS/8/071-60, WRL. Technical Report 99/638.
- Olsen, R. B., (1994) A Three-Dimensional Model for Calculation of Hydraulic Parameters. Conference on Hydraulics, Trondheim, Norway.
- Puttaraksa P, Sriwongsitanon N, and Lipiwattanakarn S. Development of One Dimensional Implicit Dynamic Wave Model. Kasetsart Journal. 2004; 38(3): 409-418.
- Sargison JE and Barton AF. Application of HEC RAS to hydraulic modelling of an irrigation scheme to determine potential for capacity increase. In: Engineers Australia, 9th National Conference on Hydraulics in Water Engineering, 23-26 September 2008, Darwin Convention Centre, Australia.
- Singh P. (1996) Kinematic Wave Modeling in Water Resources. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Tate E.C. Floodplain Mapping Using HEC-RAS and Arcview GIS. CRWR Online Report 99-1, Center for Research in Water Resources, Department of Civil Engineering, University of Texas at Austin, 1999.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). HEC-RAS River analysis system: Hydraulics reference manual version 3.0. Retrieved from <http://www.hec.usace.army.mil>, Public distribution unlimited, 2001.

Received 27 August 2013

Accepted 30 December 2013