



การศึกษาการเคลื่อนที่ของตะกอนดินในแม่น้ำป่าสักโดยใช้แบบจำลอง MIKE21

A Study of Sediment Transport in Pasak River Using MIKE21 Model

อรรถพร พวงพิว¹, วิษุวัตต์ แท้สมบัติ^{1*}

Autthaporn Puangpiw¹, Wisuwat Taesombat^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

¹Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University - Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140

*Corresponding author: Tel: +8-666-383-3289, E-mail: fengwwt@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองสภาพทางอุทกพลศาสตร์และการเคลื่อนที่ของตะกอนดินในแม่น้ำป่าสักตั้งแต่ท้ายเขื่อนพระราม 6 จนถึงจุดบรรจบแม่น้ำเจ้าพระยาโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21-HD/ST เริ่มต้นจากการรวบรวมข้อมูลรูปตัดลำน้ำ ข้อมูลปริมาณการไหล ข้อมูลระดับน้ำ และข้อมูลตะกอนในแม่น้ำป่าสักในช่วงปี พ.ศ. 2556-2557 สำหรับผลการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์ MIKE21-HD ในแม่น้ำป่าสัก พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ Manning's n ทั้งลำน้ำมีค่าเท่ากับ 0.0286 ซึ่งจะทำให้ผลการคำนวณระดับน้ำใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดจริงที่สถานีนครหลวง โดยจะให้ค่าดัชนีทางสถิติ R² และ RMSE เท่ากับ 0.85 และ 0.17 m ตามลำดับ ต่อมาทำการเปรียบเทียบแบบจำลอง MIKE21-ST ร่วมกับแบบจำลอง MIKE21-HD โดยใช้การไหลแบบคงที่ในช่วงอัตราการไหล 100 ถึง 750 m³ s⁻¹ และใช้ค่าตะกอนที่ตรวจวัดได้ตลอดลำน้ำ จำนวน 4 แห่ง ซึ่งพบว่า มีค่าขนาดเฉลี่ยประมาณ 0.12 mm ค่าหน่วยน้ำหนักของตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 2,650 kg m⁻³ ค่าความพรุนของตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 0.4 และความเร็วของการตกตะกอนเท่ากับ 0.0109 m s⁻¹ ผลการเปรียบเทียบพบว่า การเปลี่ยนแปลงท้องน้ำมีอัตราการตกตะกอนอยู่ในช่วง 0.66 ถึง 0.95 m yr⁻¹ และอัตราการตกตะกอนจะแปรผันตามอัตราการไหลซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลวิเคราะห์จากแบบจำลองกายภาพ หลังจากนั้น แบบจำลอง MIKE21-HD/ST ได้ถูกประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์อัตราการตกตะกอนรายปีในช่วงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550-2555 โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา คือ 1) กรณีเงื่อนไขขอบเขตเป็นการไหลคงที่ตามเวลา และ 2) กรณีเงื่อนไขขอบเขตเป็นการไหลไม่คงที่ตามเวลา ผลการศึกษาพบว่า กรณีที่ 1 อัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีประมาณ 0.76 m yr⁻¹ ส่วนกรณีที่ 2 อัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีประมาณ 0.22 m yr⁻¹ จะเห็นว่าการไหลแบบคงที่ตามเวลา จะให้อัตราการตกตะกอนมากกว่าการไหลแบบไม่คงที่ตามเวลาโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 29 เนื่องจากการจำลองการไหลแบบไม่คงที่ตามเวลาจะมีความใกล้เคียงกับสภาพการไหลจริงในแม่น้ำป่าสักมากกว่า อย่างไรก็ตามอัตราการตกตะกอนที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์นั้นจะยังมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง ทั้งนี้เพราะปริมาณตะกอนที่ใช้ในแบบจำลองใช้เป็นค่าเฉลี่ยตลอดช่วงแม่น้ำ แต่ในความเป็นจริงปริมาณตะกอนจะมีความผันแปรไม่เท่ากันในแต่ละเดือนและในแต่ละช่วงลำน้ำ

คำสำคัญ: การเคลื่อนที่ของตะกอนดิน, อุทกพลศาสตร์, แม่น้ำป่าสัก, แบบจำลอง MIKE21

Abstract

The purpose of this study is to simulate the hydrodynamic and sediment transport conditions in Pasak river between a downstream portion of Rama XI dam and a confluence of Chao Phraya river by an application of MIKE21-HD/ST model. First, observed data of river cross section, discharge, water level, and sediment in Pasak river were collected during year 2013-2014. The result of calibration and verification of MIKE21-HD along Pasak river found that the Manning's n roughness coefficient for the whole river is equal to 0.0286, which gave the calculated water level close to the observed values at Nakhon Luang station. It provides statistical index of R² and RMSE equal to 0.85 and 0.17 m, respectively. The MIKE21-ST in conjugate with MIKE21-HD models were calibrated using steady state condition in the range of discharge between 100 to 750 m³ s⁻¹ and measured soil sediment in four places along the river. It found that the average grain size was around 0.12 mm, unit weight of sediment equal to 2,650 kg m⁻³, average porosity equal to 0.4, and settling velocity equal to 0.0109 m s⁻¹. The calibration results

showed that the rate of bed level change has a sedimentation rate in the range of 0.66 to 0.95 m yr⁻¹ and the sedimentation rate is directly proportional to the flow rate which corresponds to the results analyzed by the physical model. Finally, MIKE21 -HD/ST model was applied to analyze the annual sedimentation rate during year 2007-2012 by dividing into two case studies namely 1) steady flow boundary condition and 2) unsteady flow boundary condition. The result showed that case 1 the average annual sedimentation rate is around 0.76 m yr⁻¹ while case 2 the average rate is around 0.22 m yr⁻¹. It will be seen that the sedimentation rate of steady flow is more than unsteady flow conditions on average approximately 29%. Since unsteady flow model simulation is more similar to the real flow condition in Pasak river. However, sedimentation rate obtained from mathematical models are significantly higher than the actual because of sediment load input to the model was an average throughout the river. In the fact that sediment load varies unequal both in each month and section of the river.

Keywords: Sediment Transport, Hydrodynamic, Pasak River, MIKE21 Model

1. บทนำ

ลุ่มน้ำป่าสักตั้งอยู่ในเขตภาคกลางของประเทศไทย และมีพื้นที่ตอนบนของลุ่มน้ำบางส่วนอยู่ในเขตภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งมีเทือกเขาเพชรบูรณ์ล้อมรอบ ลักษณะโดยรวมทั้งลุ่มน้ำจะถูกล้อมรอบด้วยภูเขาทั้ง 2 ด้าน และมีแม่น้ำป่าสักไหลอยู่ตรงกลางจากทิศเหนือลงทิศใต้ โดยมีต้นกำเนิดมาจากเทือกเขาเพชรบูรณ์ จากนั้นไหลผ่านจังหวัดเพชรบูรณ์ ลพบุรี และสระบุรี จนมาบรรจบกับแม่น้ำเจ้าพระยา ปัญหาในพื้นที่ลุ่มน้ำส่วนใหญ่ เป็นปัญหาต่อเนื่องมาจากปัญหาด้านสภาพทางกายภาพของพื้นที่ รวมทั้งปัญหาความเสื่อมโทรมของทรัพยากรที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ทำให้เกิดการชะล้างพังทลายของดินลงในลำน้ำ และเคลื่อนที่ไปอย่างต่อเนื่อง จนสุดท้ายตกตะกอนลง โดยมีน้ำเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการกัดเซาะและเป็นตัวพาให้ตะกอนเคลื่อนที่ ทำให้ลำน้ำตื้นเขินเนื่องจากการทับถมของตะกอน ทำให้ประสิทธิภาพในการระบายน้ำลดลง โดยสภาพปัญหาของอุทกภัยตามแนวริมแม่น้ำป่าสักลดลงไปอย่างมาก ภายหลังจากมีเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ ยกเว้นบริเวณด้านท้ายน้ำของเขื่อนฯ จนถึงจุดบรรจบระหว่างแม่น้ำเจ้าพระยาและแม่น้ำป่าสัก บริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยาซึ่งสภาพของแม่น้ำป่าสักในบางช่วงค่อนข้างแคบ และคดเคี้ยวทำให้มีความสามารถในการระบายน้ำต่ำ ซึ่งจะเกิดปัญหาน้ำเอ่อท้นและการตกสะสมของตะกอนภายในลำน้ำซึ่งเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้และเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้พื้นที่หน้าตัดลำน้ำลดลง เป็นผลให้การระบายน้ำลดลงอีกด้วย ซึ่งปัญหาดังกล่าวยังไม่มี การศึกษามากนัก จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาถึงสภาพทางอุทกพลศาสตร์ของแม่น้ำป่าสัก และการเคลื่อนที่ของตะกอน เพื่อให้เข้าใจถึงสภาพลำน้ำในปัจจุบัน และเพื่อทราบแนวโน้มของการตกตะกอนในอนาคต เพื่อที่จะหาแนวทางการพัฒนาที่ยั่งยืนต่อไป งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการศึกษาการเคลื่อนที่ของตะกอนในแม่น้ำโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังมีไม่มากนัก ได้แก่

Duc et al. (2004) ได้ใช้แบบจำลอง depth-average โดยใช้วิธีการ finite volume กับ boundary fitted grids ที่ถูก

พัฒนาขึ้นมาเพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำ ในแบบจำลอง ประกอบด้วย โมดูล unsteady hydrodynamic โมดูลการเคลื่อนที่ของตะกอน และโมดูลการเปลี่ยนรูปท้องน้ำ ผลที่ได้จากแบบจำลองเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้ในห้องปฏิบัติการพบว่าตำแหน่งการกัดเซาะและการตกตะกอนของท้องน้ำมีความใกล้เคียงกัน

รวีทย์ และคณะ (2552) ได้ศึกษาปัญหาการกัดเซาะตามแนวตลิ่ง และการทับถมของตะกอน พื้นที่บริเวณคลองมหาชัย และคลองหลวง จ.สมุทรสาคร จากอิทธิพลของระดับน้ำทะเลที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง โดยการจำลองเหตุการณ์บริหารประตูระบายน้ำกรณีต่างๆ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ 2 มิติ ด้วยโปรแกรม CCHE2D พบว่า การบริหารประตูระบายน้ำสามารถช่วยลดตะกอนทั้งในคลองมหาชัยและในคลองหลวงได้

Poulsen et al. (2013) ได้ศึกษาการกัดเซาะ และการตกตะกอนในแม่น้ำโอเดนเซ ประเทศเดนมาร์ก โดยสร้างแบบจำลองการไหลแบบ 2D และแบบจำลองพื้นที่ทุ่งน้ำท่วม (flood plain model) สรุปได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้น เป็นเครื่องมือที่ช่วยให้อธิบายการตกตะกอนในพื้นที่ทุ่งน้ำท่วม (floodplain) ได้

Gharibreza et al. (2014) ได้ศึกษากระบวนการตก-ตะกอน บริเวณพื้นที่ปากแม่น้ำ Zohreh ซึ่งไหลลงสู่อ่าวเปอร์เซีย โดยการประยุกต์ใช้ข้อมูลที่ตรวจวัดจากสนาม แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE 21 เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล (RS) และการทดลองในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาจากแบบจำลอง MIKE21 พบว่า 80% ของตะกอนจะเคลื่อนที่ลงสู่อ่าวเปอร์เซีย และที่เหลืออีก 20% จะสะสมอยู่บริเวณปากแม่น้ำ ผลวิเคราะห์จาก RS พบว่าอัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีและอัตราการตื้นเขินในระยะยาว เท่ากับ 0.07 m และ 2.45 m ตามลำดับ

Bourgoin et al. (2007) ได้ศึกษาการพัดพาและการสะสมของตะกอนในแม่น้ำและบริเวณที่ราบน้ำท่วมของแม่น้ำอะเมซอน (Amazon) โดยการรวบรวมข้อมูลการตรวจวัดในช่วงปี ค.ศ. 2000-2003 ซึ่งพบว่าส่วนใหญ่จะเกิดการตกตะกอนในช่วงน้ำท่วมที่กินระยะเวลา 5 เดือน คือตั้งแต่ธันวาคมไปจนถึงเมษายน

และพบว่า ค่าเฉลี่ยการสะสมของตะกอนจะอยู่ที่ช่วง 558 และ $828 \times 10^3 \text{ t yr}^{-1}$ ตลอดระยะทาง 130 km การสะสมของตะกอนในแต่ละปีแสดงให้เห็นว่าการไหลของตะกอนดินจากแม่น้ำเข้าสู่ที่ราบน้ำท่วมในแต่ละปีนั้นอยู่ที่ค่าเฉลี่ยในช่วงประมาณ 41%-53% และมีค่าอัตราการตกตะกอนในแม่น้ำประมาณ $517 \text{ t km}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ หรือคิดเป็นอัตราการสะสมของตะกอนเท่ากับ $0.0016 \text{ m yr}^{-1} (\pm 23\%)$

ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อจำลองสภาพทางอุทกพลศาสตร์และการเคลื่อนที่ของตะกอนดินในแม่น้ำป่าสัก เพื่อวิเคราะห์หาอัตราการตกตะกอนรายปีในแม่น้ำป่าสักซึ่งจำเป็นต้องประยุกต์ใช้แบบจำลองการไหล 2 มิติ จึงได้คัดเลือกแบบจำลอง MIKE21 โดยกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษาเป็นบริเวณแม่น้ำป่าสัก ตั้งแต่ท้ายเขื่อนพระราม 6 จนถึงจุดบรรจบแม่น้ำเจ้าพระยา รวมระยะทางประมาณ 51.65 km ดังแสดงใน Figure 1

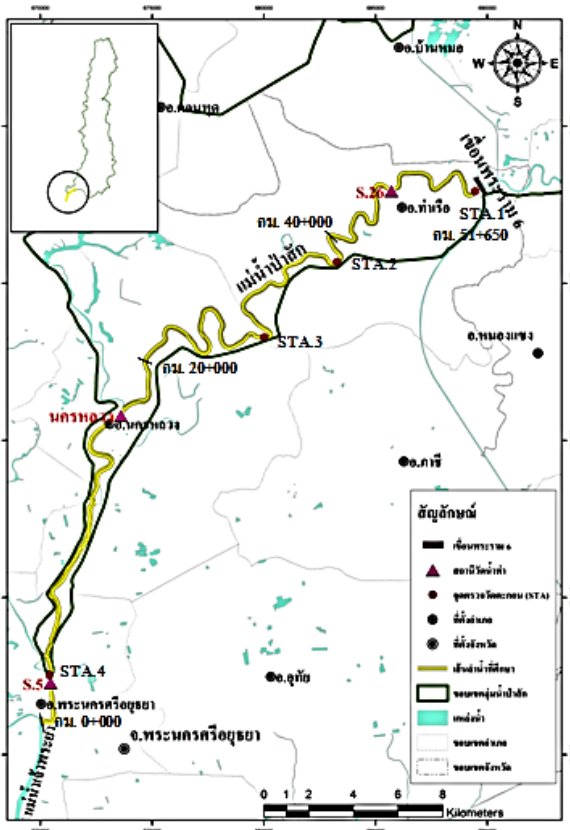


Figure 1 Study area at Pasak River.

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์

ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE21 ที่พัฒนาขึ้นโดย DHI Water Environment and Health เป็นแบบจำลองการไหล 2 มิติ สามารถใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกระแสน้ำ และวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของตะกอนอัน

เนื่องจากกระแสน้ำได้ สำหรับทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการจัดทำแบบจำลองการไหล 2 มิติ แสดงได้ดังนี้

2.1.1 แบบจำลองทางอุทกพลศาสตร์ (MIKE21-HD, Hydrodynamic Module)

1) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การจำลองการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ และการไหลที่ตอบสนองต่อการควบคุมพฤติกรรมของการไหลของน้ำแบบ 2 ทิศทาง มีสมการควบคุมการไหลคือ NavieStokes Equation โดยมีสมมติฐานกล่าวคือ การไหลไม่มีการยุบอัดตัว (Incompressible Fluid) การแปรผันในแนวตั้งมีน้อย และไม่มี การแบ่งชั้นของน้ำ สมการที่ใช้แก้ปัญหา คือ สมการต่อเนื่อง และ สมการโมเมนตัม ทั้งแกน x และ y โดยใช้วิธี Finite Volume แสดงได้ดังสมการที่ (1) (2) และ (3) ตามลำดับ สมการความต่อเนื่อง:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (1)$$

สมการโมเมนตัม ทิศทาง x:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{c^2 \cdot h^2} \\ - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega q - fW_x \\ + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_o) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

สมการโมเมนตัม ทิศทาง y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{c^2 \cdot h^2} \\ - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] + \Omega q - fW_y \\ + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_o) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

โดยที่

- $h(x, y, t)$ = ความลึกน้ำ (เท่ากับ $\zeta - d$, m)
- $d(x, y, t)$ = ความลึกน้ำที่แปรผันตามเวลา (m)
- $\zeta(x, y, t)$ = ระดับผิวน้ำเหนือระดับอ้างอิง (m)
- $p(x, y, t)$ = ความหนาแน่นของการไหลในทิศทางแกน x ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$)
- $q(x, y, t)$ = ความหนาแน่นของการไหลในทิศทางแกน y ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$)

| | |
|-----------------------------------|--|
| $C(x, y)$ | = ความต้านทานของ Chezy ($m^{1/2} s^{-1}$) |
| g | = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ($m s^{-2}$) |
| $f(V)$ | = ความฝืดเนื่องจากลม |
| $V, V_x, V_y(x, y, t)$ | = ความเร็วลมและความเร็วในทิศทางแกน x, y ($m s^{-1}$) |
| $\Omega(x, y)$ | = สัมประสิทธิ์คอริออลิส (s^{-1}) |
| $\rho_a(x, y, t)$ | = ความดันอากาศ ($kg m^{-1} s^{-2}$) |
| ρ_w | = ความหนาแน่นของน้ำ ($kg m^{-3}$) |
| x, y | = ระยะพิกัด (m) |
| t | = เวลา (s) |
| $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ | = แรงเฉือนประสิทธิผลในทิศทาง x และ y ($N m^{-2}$) |

2) การสร้างแผนที่แสดงสภาพภูมิประเทศของพื้นที่ท้องลำนน้ำ (Bathymetry)

แบบจำลอง MIKE21 ได้มีการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในการสร้าง Bathymetry แบ่งออกเป็น 4 แบบ ประกอบด้วย Single Grid, Multiple Grids, Curvilinear Grid และ Flexible Mesh ดังแสดงใน Figure 2 โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้ Flexible Mesh โดยแบ่งออกได้เป็นสองแบบคือ Triangles และ Quadrilateral Element ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในการจำลองแบบการไหลให้ครอบคลุมพื้นที่ที่มีขนาดกว้างใหญ่และมีความซับซ้อน ซึ่งอาจจะมีความละเอียด (resolution) ของ Bathymetry ที่แตกต่างกัน กล่าวคือสามารถวิเคราะห์แบบลงรายละเอียดโดยเน้นเฉพาะพื้นที่บางแห่งที่มีข้อมูลละเอียดกว่าอีกพื้นที่หนึ่งซึ่งอยู่ภายในพื้นที่เดียวกันได้ ซึ่งนับว่ามีความเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ในการทำวิจัยด้านแหล่งน้ำของประเทศไทยเป็นอย่างมาก

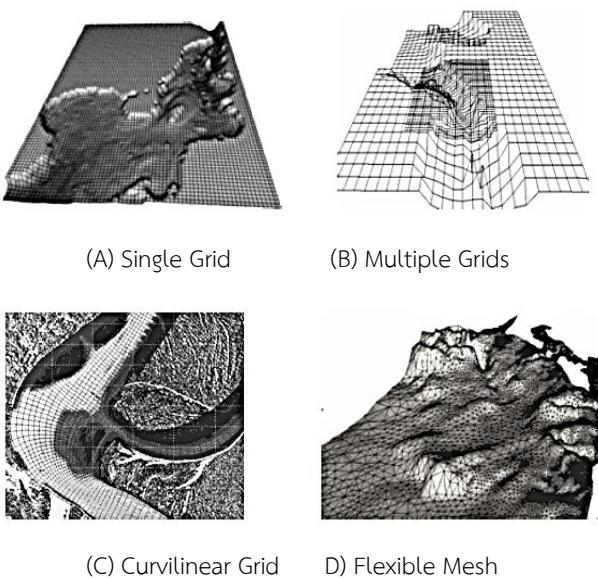


Figure 2 Type of Bathymetry in MIKE21 model.

2.1.2 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอนทราย (MIKE21-ST, Sand Transport Module)

การเคลื่อนที่ของตะกอนทราย จะใช้กำหนดอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนทรายอันเนื่องจากการเคลื่อนที่ของกระแส น้ำเพียงอย่างเดียว หรือรวมผลจากการเคลื่อนที่ของกระแส น้ำ และคลื่นในพื้นที่ท้องน้ำที่มีทราย ทฤษฎีที่ใช้ในแบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอน มีดังนี้

1) ความเร็วของการตกตะกอน (W_s)

ความเร็วของการตกตะกอน มีเงื่อนไขดังนี้

$$W_s = \frac{(s-1)gd_{50}}{18\nu} \text{ for } d_{50} < 0.1mm \quad (4)$$

$$W_s = \frac{\nu}{d_{50}} \left(\sqrt{100 + \frac{(s-1)gd_{50}^3}{\nu^2}} - 10 \right)$$

for $0.1 \leq d_{50} \leq 1mm$ (5)

$$W_s = 1.1\sqrt{(s-1)gd_{50}} \text{ for } d_{50} > 1mm \quad (6)$$

โดยที่

- d_{50} = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดดิน (mm)
- s = ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของตะกอน ($kg m^{-3}$)
- g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ($m s^{-2}$)
- ν = ความหนืดของน้ำ, เท่ากับ $1 \times 10^{-6} (m^2 s^{-1})$

2) ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของตะกอนของ Van-Rijn (1984) Van Rijn ได้เสนอสมการการเคลื่อนที่ของตะกอนออกเป็น 2กรณี ดังนี้

2.1) การเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (S_{bl})

$$S_{bl} = 0.053 \frac{T^{2.1}}{D_*^{0.3}} \sqrt{(s-1)g \cdot d_{50}^3} \quad (7)$$

โดยที่

- T = ตัวแปรไร้มิติ,
- h = ความลึกน้ำ (m)
- D_* = ตัวแปรไร้มิติของการเคลื่อนที่ของตะกอน,

2.2) สมการการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย (S_{st})

$$S_{st} = f \cdot c_o \cdot V \cdot h \quad (8)$$

การเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยเกิดขึ้นได้ ถ้าหนึ่งในเกณฑ์ดังต่อไปนี้เป็นที่ยอมรับ

$$u_f > \frac{4w_s}{D_*} \quad \text{for } D_* < 10 \quad (9)$$

$$u_f > 4w_s \quad \text{for } D_* > 10 \quad \dots(10)$$

โดยที่

f = แฟคเตอร์ปรับแก้ของการเคลื่อนที่ของตะกอน

C_o = ความเข้มข้นของชั้นตะกอนที่ตื้นน้ำ (kg m^{-3})

V = ความเร็วการไหล (m s^{-1})

2.2 วิธีวัดผลการศึกษา

ในการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองฯ จะใช้ดัชนีทางสถิติมาเป็นตัวแทนในการเปรียบเทียบและตัดสินใจ ประกอบด้วย ค่าความแม่นยำจะใช้วิธี Root mean square error (RMSE) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (11)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - y)^2}{n}} \quad (11)$$

ค่าความสอดคล้องกันจะใช้วิธีทาง Goodness-of-fit โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กำลังสอง (Coefficient of determination, R^2) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (12)

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad (12)$$

โดยที่

x = ระดับน้ำที่ได้จากการตรวจวัด

y = ระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง

\bar{x} = ค่าเฉลี่ยระดับน้ำที่ได้จากการตรวจวัด

\bar{y} = ค่าเฉลี่ยระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง

i = ลำดับของข้อมูล

n = จำนวนข้อมูล

ค่าที่ยอมรับได้ของค่าดัชนีทางสถิติ RMSE ต้องมีค่าน้อยที่สุด (เข้าใกล้ 0) และค่าสัมประสิทธิ์ Coefficient of determination (R^2) ต้องเข้าใกล้ 1 และควรมากกว่า 0.6

2.3 ขั้นตอนการศึกษา

โดยขั้นตอนการศึกษาสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงใน Figure 3

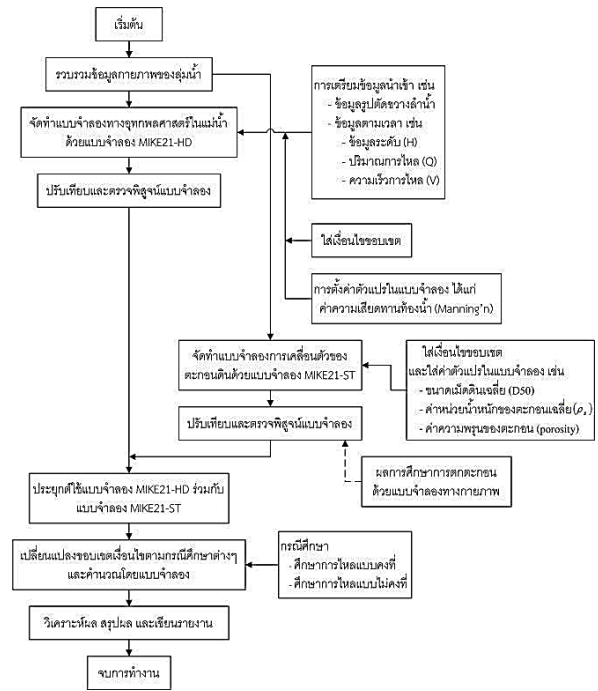


Figure 3 Research methodology.

แต่ละขั้นตอนสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

1) รวบรวมข้อมูลกายภาพของกลุ่มน้ำ ประกอบไปด้วย

1.1) ข้อมูลรูปตัดขวางลำน้ำ (river cross section) ทำการสำรวจในช่วงระหว่างเดือนธันวาคม 2556 จนถึงเดือนมกราคม 2557 โดยมีระยะห่างระหว่างรูปตัดประมาณ 50 m เป็นระยะทางรวมทั้งสิ้น 51.65 km จำนวน 1,033 รูปตัด โดยแต่ละจุดที่สำรวจมีค่าระดับอ้างอิงจากระดับน้ำทะเล หรือเรียกว่า ม.รทก. (m.MSL) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้กันในประเทศไทย

1.2) ข้อมูลระดับน้ำและปริมาณการไหลรายชั่วโมง/รายวันของสถานี S.5 (กม.2+400) และ S.26 (กม.45+850) ที่ได้มีการบันทึกไว้โดยกรมชลประทาน และสถานีนครหลวง (กม. 16+650) ที่ได้มีการบันทึกไว้โดยกรมเจ้าท่า ซึ่งจะใช้อุณหภูมิการตรวจวัดในช่วงเดือน ธ.ค. 2556 ถึงเดือน ม.ค. 2557 ดังแสดงใน Figure 1

1.3) ข้อมูลตะกอนที่ตื้นน้ำ ที่ทำการตรวจวัดในแม่น้ำ ตั้งแต่ท้ายเขื่อนพระราม 6 โดยทำการตรวจวัด 4 จุดด้วยกัน ได้แก่ 1) วัดสะตือ ตำบลท่าหลวง อ.ท่าเรือ จ.พระนครศรีอยุธยา (กม. 51+650) 2) วัดศาลาลอย ตำบลศาลาลอย อำเภอท่าเรือ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา (กม.38+400) 3) วัดแค ต.แค อ.ท่าเรือ จ.พระนครศรีอยุธยา (กม.30+400) และ 4) วัดธรรมนิมย์ ตำบลหัวรอ อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา (กม. 2+100) ในช่วงเดือนธันวาคม 2556 ดังแสดงใน Figure 1

2) การจัดทำแบบจำลองทางอุทกพลศาสตร์ในแม่น้ำด้วยแบบจำลอง MIKE21-HD

2.1) การสร้าง Bathymetry เป็นแบบ Flexible Mesh

โดยนำข้อมูลรูปตัดขวางลำน้ำที่ได้จากการสำรวจจริงเข้าสู่แบบจำลอง MIKE21-HD แล้วทำการสร้างโนด (Node) และอีลิเมนต์ (Element) ของ Bathymetry

2.2) การกำหนดขอบเขตเงื่อนไข และการเปรียบเทียบแบบจำลอง MIKE21-HD

การกำหนดขอบเขตเงื่อนไขของแบบจำลองฯ สำหรับการเปรียบเทียบแบบจำลองฯ ได้พิจารณาเลือกข้อมูลที่สามารถใช้ได้จริงในช่วงระหว่างวันที่ 1-31 ธันวาคม 2556 โดยขอบเขตด้านเหนือน้ำใช้เป็นข้อมูลปริมาณการไหลรายชั่วโมงที่สถานี S.26 ส่วนขอบเขตด้านท้ายน้ำใช้เป็นข้อมูลระดับน้ำรายชั่วโมงที่สถานี S.5 และปริมาณการไหลเข้าด้านข้าง (sideflow) ประเมินได้จากสภาพตามธรรมชาติของน้ำที่ไหลเข้าสู่แม่น้ำป่าสักในช่วงระหว่างสถานี S.26 และ S.5

การเปรียบเทียบแบบจำลองฯ จะทำการสมมติค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระลำน้ำ (Manning's Coefficient) ตลอดช่วงแม่น้ำป่าสัก จนกว่าจะทำให้ผลการคำนวณระดับน้ำจากแบบจำลองเปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้จริงที่สถานีนครหลวง (NK) เข้าใกล้กันมากที่สุด โดยกำหนดค่าดัชนีทางสถิติในการพิจารณา 2 ดัชนี ได้แก่ ค่า R2 และค่า RMSE

3) การจัดทำแบบจำลองการเคลื่อนตัวของตะกอนทรายด้วยแบบจำลอง MIKE21-ST

3.1) การกำหนดตัวแปรแบบจำลองฯ

รวบรวมข้อมูลตัวอย่างตะกอนดินทั้ง 4 จุด เพื่อนำมาวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนเฉลี่ย (d_{50}) ค่าหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินเฉลี่ย (P_s) และค่าความพรุนของตะกอนเฉลี่ย (porosity) จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นสามารถคำนวณหาความเร็วของการตกตะกอน (w_s) ได้จากสมการ (5) และกำหนดค่าตัวแปรที่สำคัญในแบบจำลอง

3.2) การเปรียบเทียบแบบจำลอง MIKE21-ST

แบบจำลอง MIKE21-ST นั้นต้องใช้การวิเคราะห์รูปแบบการกระจายความเร็วของกระแสในแบบจำลอง MIKE21-HD มาเป็นตัวพาตะกอนให้เคลื่อนที่ ดังนั้นจึงกำหนดให้การเปรียบเทียบแบบจำลองนี้ต้องวิเคราะห์ร่วมกันระหว่างแบบจำลอง HD/ST โดยกำหนดให้เป็นอัตราการไหลคงที่ (steady flow) โดยพิจารณาเลือกใช้การไหลที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ (Percentile) ที่ 25%, 50%, 75% และ 95% ซึ่งวิเคราะห์ได้จากปริมาณการไหลสูงสุดรายปีที่สถานี S.5 เพื่อเป็นตัวแทนการไหลทั้งในช่วงน้ำน้อยจนถึงน้ำมาก เท่ากับความจุลำน้ำของแม่น้ำป่าสัก

3.3) การตรวจสอบผลการเปรียบเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์ และผลจากแบบจำลองกายภาพ

เนื่องการข้อมูลการตรวจวัดตะกอนรายวันไม่มีการเก็บบันทึกตั้งแต่บริเวณด้านท้ายน้ำของเขื่อนพระรามหกลงมา ดังนั้นการเปรียบเทียบแบบจำลอง จึงใช้การเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลที่ได้จากแบบจำลองกายภาพ (ศูนย์วิจัยวิศวกรรมและและการจัดการน้ำ, 2557) ที่ทำการศึกษา

พฤติกรรมการตกตะกอนในแม่น้ำป่าสักที่ กม.20+700 ถึง 22+050 และกม.40+300 ถึง 40+900 โดยใช้ข้อมูลรูปตัดลำน้ำชุดเดียวกันซึ่งในการศึกษานี้ได้กำหนดอัตราส่วนของแบบจำลองไว้ดังนี้

- Model ratio = 1:100 all axis
- Velocity ratio = 1:10
- Gravity ratio = 1:1
- γ_r (ความลึก) = 1:100

การทดลองได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 อัตราการไหล เพื่อเป็นตัวแทนของการไหลระดับต่ำและระดับสูง คือ ที่อัตราการไหล 100 และ 500 $m^3 s^{-1}$ และใช้ขนาดตะกอนเท่ากับ 0.02mm โดยใช้เวลาการทดลองประมาณ 4.8 hr ซึ่งคิดเป็นค่าเวลาจริงในแม่น้ำประมาณ 48 hr แบบจำลองดังกล่าวแสดงใน Figure 4

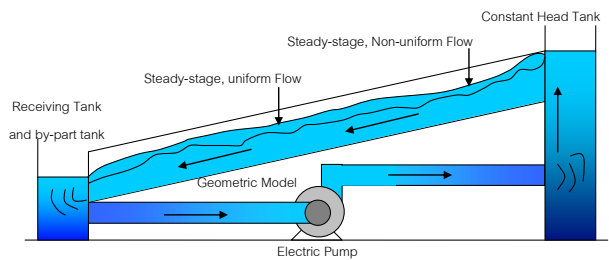


Figure 4 Flow Chart of Pasak Physical Model.

การตรวจวัดปริมาณตะกอน ตรวจวัดโดยใช้ระบบวิเคราะห์แสงเลเซอร์แบบสามเหลี่ยม โดยทำการเก็บข้อมูลระดับพื้นแม่น้ำก่อนทำการทดลอง และหลังการทดลองในขณะที่ไม่มีน้ำ แล้วนำค่าที่ได้มาแปรค่าหาปริมาณตะกอนต่อไป

4) การประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21-HD ร่วมกับแบบจำลอง MIKE21-ST เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ท้องน้ำ

ในการประยุกต์ใช้แบบจำลอง หลังจากการเปรียบเทียบแบบจำลอง MIKE21-HD และกำหนดตัวแปรที่สำคัญในแบบจำลอง MIKE21-ST ซึ่งในการศึกษาได้แบ่งออกเป็น 2 กรณี ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1) การศึกษาการไหลแบบคงที่ตามเวลา (Steady flow)

โดยพิจารณาเลือกใช้การไหลที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ (Percentile) ที่ 25%, 50%, 75% และ 95% ซึ่งวิเคราะห์ได้จากปริมาณการไหลสูงสุดรายปีที่สถานีวัดน้ำท่า S.5 และนำมาจัดทำเป็นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับอัตราการตกตะกอนรายปี และนำไปวิเคราะห์หาอัตราการตกตะกอนรายปีในอดีตย้อนหลัง 6 ปีหลังสุดระหว่างปี พ.ศ. 2550-2555 โดยใช้ข้อมูลปริมาณการไหลรายวันที่สถานี S.5 ซึ่งมีปริมาณการไหลที่ผันแปรตลอดปีมาใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลกับอัตราการตกตะกอนที่พัฒนาขึ้น

4.2) การศึกษาการไหลแบบไม่คงที่ตามเวลา (Unsteady flow)

กำหนดให้ขอบเขตด้านเหนือน้ำของแบบจำลอง MIKE21-HD เป็นอัตราการไหลรายวันที่สถานี S.26 และขอบเขตด้านท้ายน้ำเป็นระดับน้ำรายวันที่สถานี S.5 ในช่วงปี พ.ศ.2550-2555 ส่วนตัวแปรในแบบจำลอง MIKE21-ST ใช้เหมือนกับข้อ 4.1 และวิเคราะห์หาอัตราการตกตะกอนรายปีเช่นเดียวกัน

3. ผลและวิจารณ์

ผลการศึกษานี้แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ 1) ผลการจัดทำแบบจำลอง MIKE21-HD 2) ผลการวิเคราะห์ตะกอนในแม่น้ำ และ 3) ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21-HD ร่วมกับแบบจำลอง MIKE21-ST โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ผลการจัดทำแบบจำลอง MIKE21-HD

ผลการจัดทำแบบจำลอง MIKE21-HD แบ่งออกได้ดังนี้ ผลการสร้างแผนที่แสดงสภาพภูมิประเทศของพื้นที่อ่างน้ำ (Bathymetry) แบบ Flexible Mesh ด้วยแบบจำลอง MIKE21-HD ดังแสดงใน Figure 5

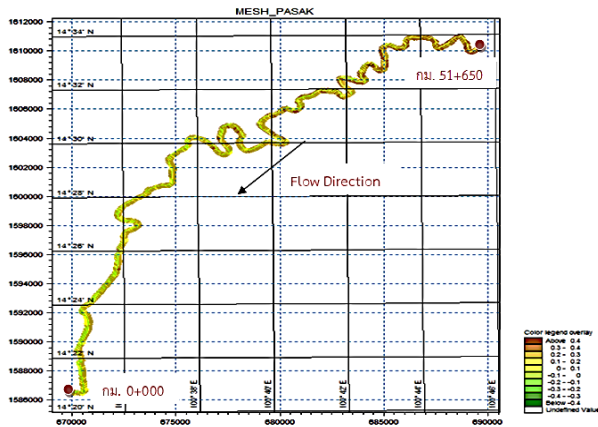


Figure 5 Bathymetry of Pasak River.

ผลการสร้างโนด (Node) และอีลิเมนต์ (Element) ของ Bathymetry ของบริเวณแม่น้ำป่าสัก โดยสรุปมีจำนวนโนดทั้งสิ้น 11,584 โนด ดังแสดงใน Figure 6 และมีจำนวนอีลิเมนต์ทั้งสิ้น 19,252 อีลิเมนต์ ดังแสดงใน Figure 7 โดยกำหนดขนาดเล็ที่สุดของ Element มีค่าไม่เกิน 600 m² ซึ่งจะทำให้การคำนวณมีเสถียรภาพ

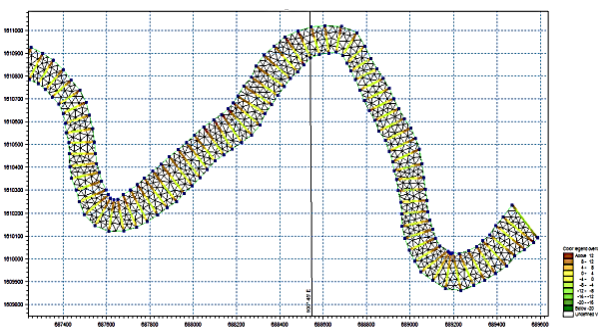


Figure 6 Example Node of Pasak River Bathymetry.

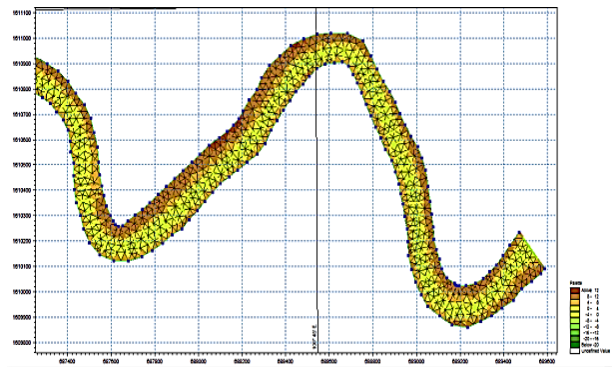


Figure 7 Example Element of Pasak River Bathymetry.

ผลการปรับเทียบ พบว่า ค่า Manning's n เท่ากับ 35 หรือมีค่า Manning's n ซึ่งเป็นส่วนกลับเท่ากับ 0.0286 จะทำให้ค่าผลการคำนวณ ที่สถานีนครหลวง (NK) ใกล้เคียงกับที่ตรวจวัดได้จริงมากที่สุด โดยได้แสดงผลการปรับเทียบระดับน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองเข้ากับระดับน้ำที่ตรวจวัดได้จริงบริเวณสถานีวัดระดับน้ำอำเภอนครหลวงของกรมเจ้าท่าใน Figure 8 โดยมีค่าดัชนีทางสถิติ คือ ค่า r² มีค่าเท่ากับ 0.85 และค่า RMSE มีค่าเท่ากับ 0.17 m ซึ่งผ่านเกณฑ์การปรับเทียบ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในศึกษาขั้นต่อไป

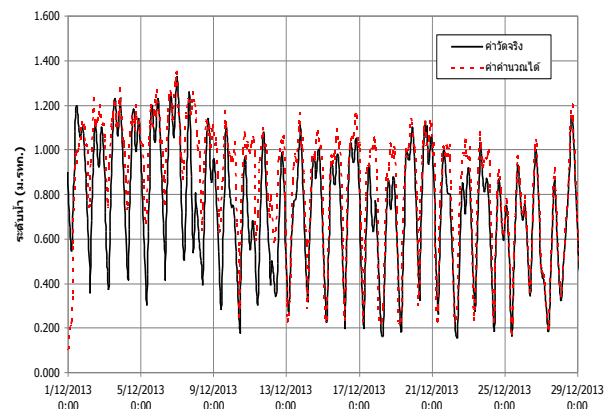


Figure 8 Result of MIKE21-HD Model Calibration and Verification at Nakhon Luang station.

3.2 ผลการวิเคราะห์ตะกอนในแม่น้ำ

3.2.1 ผลการจัดทำแบบจำลอง MIKE21-ST

ผลการวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนเฉลี่ยด้านท้ายเขื่อนพระราม 6 พบว่า มีค่าเฉลี่ย d_{50} ประมาณ 0.12 mm เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของตะกอนในแม่น้ำป่าสักบริเวณด้านเหนือเขื่อนพระราม 6 มีค่าเฉลี่ย d_{50} ประมาณ 1.25 mm ค่าหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินเฉลี่ย (ρ_s) เท่ากับ 2,650 kg m⁻³ ค่าความพรุนของตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 0.4 และความเร็วของการตกตะกอน (W_s) จากสมการ (5) เท่ากับ 0.0109 m s⁻¹ ค่าอัตราความเร็วของการตกตะกอนนี้ จะนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่อ่างน้ำโดยใช้แบบจำลอง MIKE21 ต่อไป

3.2.2 ผลการศึกษากระแสที่โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์

MIKE21-HD กรณี Steady flow

การศึกษากระแสที่โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE21-HD ผลการวิเคราะห์ความเร็วของกระแสน้ำ ที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ (Percentile) ที่ 25%, 50%, 75% และ 95% ซึ่งมีปริมาณการไหลสูงสุดเท่ากับ 100, 240, 500 และ 750 m³ s⁻¹ ตามลำดับ เพื่อเป็นตัวแทนการไหลในทุกช่วงของการไหลตั้งแต่ต่ำไปจนถึงมากจนเต็มความจุของแม่น้ำป่าสักในสภาพปัจจุบัน แสดงใน Table 1

Table 1 Computed current velocity for each percentile at S.5 station.

| ปริมาณการไหล ที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ (%) | ความเร็วของกระแสน้ำ (m s ⁻¹) |
|---|---|
| 25% (100 m ³ s ⁻¹) | 0.76 |
| 50% (240 m ³ s ⁻¹) | 1.13 |
| 75% (500 m ³ s ⁻¹) | 1.41 |
| 95% (750 m ³ s ⁻¹) | 1.50 |

3.2.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ท้องน้ำ

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ท้องน้ำด้วยแบบจำลอง MIKE21-HD/ST โดยกำหนดค่าตัวแปรที่สำคัญ (Parameter) ในแบบจำลองดังกล่าวได้ดังนี้

| Parameter | Value |
|--|---|
| Fluid density, ρ_w | 1,000 kg m ⁻³ |
| Longitudinal dispersion coefficient, D_x | 10 m ² s ⁻¹ |
| Transversal dispersion coefficient, D_y | 10 m ² s ⁻¹ |
| Erosion coefficient, E | 0.4 kg m ⁻² s ⁻¹ |
| Critical shear stress for erosion, τ_e | 0.1 N m ⁻² |
| Settling velocity, W_s | 0.0109 m s ⁻¹ (ได้จากการสำรวจ) |
| Critical shear stress for deposition, τ_d | 0.1 N m ⁻² |
| Boundary suspended-sediment concentration, c_o | 0.0 kg m ⁻³ |
| Bulk density of bottom sediment, ρ_s | 2650 kg m ⁻³ (ได้จากการสำรวจ) |

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงท้องน้ำจากแบบจำลองพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ท้องน้ำในแม่น้ำป่าสักมี 2 ลักษณะ คือ พื้นที่ทับถม (deposition area) และพื้นที่กัดเซาะ (erosion area) ซึ่งสามารถสรุปเป็นอัตราการตกตะกอน (ค่าเป็นบวก) และอัตราการกัดเซาะ (ค่าเป็นลบ) ของแต่ละอัตราการไหลได้แก่ 100, 240, 500 และ 750 m³ s⁻¹ ตามลำดับ โดยสามารถสรุปได้ดัง Table 2 และผลจากแบบจำลองกายภาพที่ทำการทดลองที่อัตราการไหล 100 และ 500 m³ s⁻¹ สามารถสรุปเป็นอัตราการตกตะกอนได้ดัง Table 2 ซึ่งพบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองกายภาพ ในช่วงน้ำตมมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลอง

คณิตศาสตร์ ส่วนในช่วงน้ำสูง จะมีน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณตะกอนที่ใส่เข้าไปในแบบจำลองกายภาพมีจำนวนจำกัด ส่วนปริมาณตะกอนในแบบจำลองคณิตศาสตร์จะแปรผันตามกับอัตราการไหลอย่างไม่จำกัด ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงสภาพความเป็นจริงในแม่น้ำ ค่าที่ได้จากแบบจำลองทั้งสองมีค่าสูง เนื่องจากไม่ได้พิจารณาถึงการกระทำของมนุษย์ ยกตัวอย่างเช่น การขุดลอกหรืออุดทรายในแม่น้ำ ซึ่งจะช่วยลดปริมาณตะกอน และในแต่ละฤดูกาล ปริมาณตะกอนในแม่น้ำจะมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลเดียวกัน และปริมาณตะกอนจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝนที่ตกในลุ่มน้ำด้วย ซึ่งไม่ได้นำมาพิจารณาในการศึกษาครั้งนี้

Table 2 Rate of sedimentation in the Pasak River at each flow analyzed by MIKE21 and physical models.

| ผลการศึกษา | อัตราการตกตะกอน (m yr ⁻¹) | | | |
|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | 100 (m ³ s ⁻¹) | 240 (m ³ s ⁻¹) | 500 (m ³ s ⁻¹) | 750 (m ³ s ⁻¹) |
| แบบจำลองคณิตศาสตร์ | 0.66 | 0.73 | 0.82 | 0.95 |
| แบบจำลองกายภาพ | 0.70 | - | 0.79 | - |

3.3 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21-HD ร่วมกับแบบจำลอง MIKE21-ST

ผลการศึกษาส่วนนี้เป็นผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ท้องน้ำ เพื่อนำไปหาอัตราการตกตะกอนรายปีในอดีตย้อนหลัง 6 ปีหลังสุดระหว่างปี พ.ศ. 2550-2555 ของแม่น้ำป่าสัก โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา คือ 1) Steady flow และ 2)

Unsteady flow ผลแสดงดัง Table 3 ซึ่งพบว่า กรณี Steady flow อัตราการตกตะกอนจะผันแปรในแต่ละปีอยู่ในช่วง 0.69 ถึง 1.01 m yr⁻¹ และมีค่าอัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีประมาณ 0.76 m yr⁻¹ ส่วนกรณี Unsteady flow อัตราการตกตะกอนรายปีจะลดลงอยู่ในช่วง 0.18 ถึง 0.33 m yr⁻¹ และมีค่าอัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีประมาณ 0.22 m yr⁻¹ โดย

อัตราการตกตะกอนแต่ละปีไม่เท่ากัน เนื่องจากอัตราการตกตะกอนแปรผันตามอัตราการไหล กล่าวคือ ถ้าอัตราการไหลต่อปีมาก อัตราการตกตะกอนก็มาก แต่ถ้าอัตราการไหลน้อย อัตราการตกตะกอนก็น้อย โดยการไหลแบบ Steady จะให้อัตราการตกตะกอนมากกว่าการไหลแบบ Unsteady โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 29 เนื่องจากการจำลองการไหลแบบ Unsteady จะใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่า แต่มีข้อเสีย คือ ใช้ระยะเวลาในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์มากกว่าค่อนข้างมาก โดยการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ความเร็ว 1.80 MHz แรม 8.00 GB จะใช้เวลาประมาณ 26 วัน ต่อการวิเคราะห์ข้อมูลรายวันเป็นเวลา 1 ปี และเมื่อพิจารณาค่าอัตราการ

ตกตะกอนเปรียบเทียบกับแม่น้ำอื่นๆ ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ พบว่า ในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาอัตราการตกตะกอนรายปีของแม่น้ำมากนัก ส่วนในต่างประเทศ ได้แก่ ในแม่น้ำอเมซอนและแม่น้ำ Zohreh จะมีอัตราการตกตะกอนรายปีประมาณ 0.0016 และ 0.07 m yr⁻¹ ตามลำดับ ซึ่งนับว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแม่น้ำป่าสัก แต่อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้จากแม่น้ำทั้งสองแห่งเป็นพื้นที่ปากแม่น้ำที่อยู่ติดกับทะเล ซึ่งแตกต่างจากแม่น้ำป่าสักที่ไหลลงแม่น้ำเจ้าพระยา ส่วนที่เหมือนกันกับงานวิจัยในต่างประเทศคือ อัตราการตกตะกอนจะเกิดในช่วงฤดูน้ำหลากเป็นส่วนใหญ่ เพราะอัตราการตกตะกอนจะแปรผันตามกันกับอัตราการไหล

Table 3 Annual sedimentation rate in the Pasak River analyzed by MIKE21 model during year 2007-2012.

| กรณีศึกษา | อัตราการตกตะกอน (m yr ⁻¹) | | | | | | ค่าเฉลี่ย |
|-------------------|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | พ.ศ. 2550 | พ.ศ. 2551 | พ.ศ. 2552 | พ.ศ. 2553 | พ.ศ. 2554 | พ.ศ. 2555 | |
| การไหลแบบคงที่ | 0.71 | 0.73 | 0.66 | 0.77 | 1.01 | 0.69 | 0.76 |
| การไหลแบบไม่คงที่ | 0.19 | 0.21 | 0.17 | 0.23 | 0.33 | 0.18 | 0.22 |

4. สรุป

การศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21-HD/ST เพื่อศึกษาสภาพทางอุทกพลศาสตร์และการเคลื่อนที่ของตะกอนในแม่น้ำป่าสัก โดยเริ่มจากผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง MIKE21-HD พบว่า ค่า Manning's n เท่ากับ 0.0286 ซึ่งทำให้ค่าระดับน้ำที่คำนวณได้ มีค่าใกล้เคียงกับค่าตรวจวัดจริงมากที่สุด และผลการวิเคราะห์ตะกอนด้านท้ายเขื่อนพระราม 6 จำนวน 4 แห่ง พบว่า มีค่าเฉลี่ย d_{50} ประมาณ 0.12 mm ค่าหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินเฉลี่ย (ρ_s) เท่ากับ 2,650 kg m⁻³ ค่าความพรุนของตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 0.4 และความเร็วของการตกตะกอน (W_s) เท่ากับ 0.0109 m s⁻¹ ต่อมาได้นำแบบจำลอง MIKE21-HD มาเปรียบเทียบร่วมกับแบบจำลอง MIKE21-ST โดยใช้การไหลแบบคงที่ในช่วง 100 ถึง 750 m³ s⁻¹ ผลการเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงท้องน้ำ พบว่า มีอัตราการตกตะกอนอยู่ในช่วง 0.66 ถึง 0.95 m yr⁻¹ ซึ่งอัตราการตกตะกอนจะแปรผันตามอัตราการไหลซึ่งให้ผลสอดคล้องกับแบบจำลองกายภาพ หลังจากนั้น ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21-HD/ST เพื่อวิเคราะห์อัตราการตกตะกอนรายปีในช่วงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550-2555 โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา คือ 1) Steady flow และ 2) Unsteady flow โดยกรณี Steady flow ซึ่งได้จากการสร้างโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและอัตราการตกตะกอนแล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการตกตะกอนรายปีในอดีตย้อนหลัง 6 ปี โดยใช้ข้อมูลปริมาณการไหลรายวันที่สถานี S.5 ผลการศึกษาพบว่า อัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีประมาณ 0.76 m yr⁻¹ ส่วนกรณี Unsteady flow อัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีประมาณ 0.22 m yr⁻¹ จะเห็นว่าการไหลแบบ Steady จะให้อัตราการตกตะกอนมากกว่าการไหลแบบ Unsteady โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 29 และอัตราการตกตะกอนที่ได้จาก

แบบจำลองคณิตศาสตร์นั้นจะมีค่ามากกว่าความเป็นจริง เพราะตะกอนที่ใช้ในแบบจำลองใช้เป็นค่าเฉลี่ย แต่ในความเป็นจริง ปริมาณตะกอนจะมีความผันแปรไม่เท่ากันในแต่ละเดือน และขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ประกอบด้วย เช่น การขุดลอก หรือการอุดทรายในแม่น้ำป่าสักด้วย ซึ่งไม่มีการเก็บข้อมูลจึงไม่ได้นำมาพิจารณาในการศึกษานี้ อย่างไรก็ตามค่าอัตราการตกตะกอนที่วิเคราะห์จากแบบจำลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประเมินปริมาณตะกอนต่อปีและใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการขุดลอกหรือปรับปรุงลำน้ำของหน่วยงานราชการในอนาคตได้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ หอปฏิบัติการวิจัยการจำลองระบบทรัพยากรน้ำด้วยคอมพิวเตอร์และระบบสารสนเทศ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่ และซอฟต์แวร์แบบจำลองต่างๆ ขอขอบคุณหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กรมชลประทาน กรมเจ้าท่า และ ศ.ดร.ชัยยุทธ ชินณะราศี แห่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่อนุเคราะห์ข้อมูลประกอบการศึกษาวิจัย และขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนและให้คำปรึกษาตลอดการศึกษานี้

6. เอกสารอ้างอิง

กรมทรัพยากรน้ำ. 2546. โครงการจัดทำแผนรวมการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ ในลุ่มน้ำป่าสัก; รายงานฉบับสุดท้าย (รายงานหลัก). กระทรวงทรัพยากร-ธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

- กรมชลประทาน. 2553. โครงการจัดทำแผนพัฒนาการชลประทานระดับลุ่มน้ำอย่างเป็นระบบ, ลุ่มน้ำป่าสัก (12). กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- ศูนย์วิจัยวิศวกรรมและการจัดการน้ำ(วารี) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. 2557. โครงการศึกษาสำรวจ ออกแบบป้องกันตลิ่งและการขุดลอกเพื่อการเดินเรือในแม่น้ำป่าสัก. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ
- ชัยยุทธ ชินฉะราศรี. 2550. กลศาสตร์แม่น้ำและกระบวนการธารน้ำ. หน่วยงานส่งเสริมการสร้างตำรา กองบริการการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- ณัฐภูมิ อินทบุตร และ วิษุวัตม์ แต่สมบัติ. 2555. การศึกษาการเปรียบเทียบแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ของแม่น้ำท่าจีนภายใต้อิทธิพลของระดับน้ำทะเล. การประชุมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 9 - 11 พฤษภาคม 2555.
- วิทย์ มีสุข, สุรเจตส์ บุญญาอรุณเนตร, สินีนาฏ ศรีมงคล, ไชยวรรย์ ชั้นกาญจน์ และ รอยล จิตรดอน. 2552. การศึกษาการพัดพาตะกอนในคลองมหาชัยและคลองหลวง จ.สมุทรสาคร. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 13 -15 พฤษภาคม 2552.
- วราวุธ วุฒิมณีชัย. 2553. การวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองโดยใช้ Nash-Sutcliffe Efficiency และ R2. ชลกร “วันชูชาติ”. 4 มกราคม 2553.
- วิษุวัตม์ แต่สมบัติ. 2552. การจำลองแบบการไหลแบบ 2 มิติด้วยแบบจำลอง MIKE21 HDFM บริเวณพื้นที่ชายฝั่งท่าเรือเมืองดาร์วิน ประเทศออสเตรเลีย. การประชุมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 13 - 15 พฤษภาคม 2552.
- วิษุวัตม์ แต่สมบัติ. 2556. การวิเคราะห์และการจำลองระบบทางชลประทาน. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร. 2554. สภาพปัญหาตื้นน้ำท่วมลุ่มน้ำป่าสัก. ลุ่มน้ำป่าสัก. แหล่งข้อมูล: <http://www.haii.or.th>. เข้าถึงเมื่อ 2 ธันวาคม 2554.
- Bourgoin, L.M., Bonnet, M.P., Martinez, J.M., Ko-suth, P., Cochonneau, G., Moreira-Turcq, P., Guyot, J.L., Vauchel, P., Filizola, N., Seyler, P. 2007. Temporal dynamics of water and sediment exchanges between the Curuaí flood-plain and the Amazon River, Brazil. *Journal of Hydrology* 335, 140– 156.
- Duc, B.M., Wenka, T., Rodi, W. 2004. Numerical Modeling of Bed Deformation in Laboratory Channels. *Journal of Hydraulic Engineering* 130; 894-904.
- DHI Water Environment and Health. 2007 a. MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM, Sand Transport Module, Scientific Documentation. Denmark.
- DHI Water Environment and Health. 2007 b. MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic Module, Step-by-Step training guide. Denmark.
- DHI Water Environment and Health. 2007 c. MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation. Denmark.
- DHI Water Environment and Health. 2007 d. MIKE 21 ST Non-Cohesive Sediment Transport Module, User Guide. Denmark.
- Gharibreza, M., Habibi, A., Imamjomeh, S.R., Ashraf, M.A. 2014. Coastal processes and sedimentary facies in the Zohreh River Delta (Northern Persian Gulf). *Catena* 122, 150–158.
- Hardy, R.J., Bates, P.D, Anderson, M.G. 2000. Modelling suspended sediment deposition on a fluvial floodplain using a two-dimensional dynamic finite element model. *Journal of Hydrology* 229, 202-218.
- Poulsen, J.B., Hansen, F., Ovesen, N.B., Larsen, S.E., Kronvang, B. 2013. Linking floodplain hydraulics and sedimentation patterns along a restored river channel: River Odense, Denmark. *The Journal of Ecological Engineering* 66; 120-128.
- van Rijn, L.C. 1984. Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering* 110, 1431– 1456.
- Wu, W., M.ASCE. 2004. Depth-Averaged Two-Dimensional Numerical Modeling of Unsteady Flow and Nonuniform Sediment Transport in Open Channels. *Journal of Hydraulic Engineering* 130; 1013-1024.