

การศึกษาการเคลื่อนตัวของตะกอนดินในแม่น้ำลำภาชี A Study of Sediment Transport in Lam Pachi River

วิษุวัตก์ แท้สมบัติ^{1*}, ดวงนภา วานิชสรณ์²

Wisuwat Taesombat^{1*}, Duangnapa Vanichsan²

¹ห้องปฏิบัติการวิจัยการจำลองระบบทรัพยากรน้ำด้วยคอมพิวเตอร์และระบบสารสนเทศ (WRCMIS Lab) ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

²สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

E-mail: wanichsan@hotmail.com

*Corresponding author: fengwwt@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองสภาพทางอุทกพลศาสตร์และการเคลื่อนตัวของตะกอนดินในแม่น้ำลำภาชีตั้งแต่ท้ายสถานีวัดน้ำท่า K.61 จนถึงจุดบรรจบแม่น้ำแควน้อยโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21-HD/ST เริ่มต้นจากการรวบรวมข้อมูลรูปตัดลำน้ำ ข้อมูลปริมาณการไหล ข้อมูลระดับน้ำ และข้อมูลตะกอนในแม่น้ำลำภาชีในช่วงปี พ.ศ. 2556-2559 สำหรับผลการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์ MIKE21-HD ในแม่น้ำลำภาชี พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ Manning's n ทั้งลำน้ำมีค่าเท่ากับ 0.0286 ซึ่งจะทำให้ผลการคำนวณระดับน้ำใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดจริงที่สถานี K.62 โดยจะให้ค่าดัชนีทางสถิติ R^2 และ RMSE เท่ากับ 0.79 และ 0.54 ม. ตามลำดับ ต่อมาทำการเปรียบเทียบแบบจำลอง MIKE21-ST ร่วมกับแบบจำลอง MIKE21-HD โดยใช้การไหลแบบคงที่ในช่วงอัตราการไหล 5 ถึง 100 ลบ.ม./วินาที และใช้ค่าตะกอนที่ตรวจวัดได้ตลอดลำน้ำ จำนวน 3 แห่ง ซึ่งพบว่า มีค่าขนาดเฉลี่ยประมาณ 1.138 มม. ค่าหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินเฉลี่ยเท่ากับ 2,675 กก./ลบ.ม. ค่าความพรุนของตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 0.28 และความเร็วของการตกตะกอนเท่ากับ 0.1504 ม./วินาที ผลการเปรียบเทียบพบว่า การเปลี่ยนแปลงท้องน้ำมีอัตราการตกตะกอนอยู่ในช่วง 0.33 ถึง 0.64 ม./ปี และอัตราการตกตะกอนจะแปรผันตามอัตราการไหล หลังจากนั้นแบบจำลอง MIKE21-HD/ST ได้ถูกประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์อัตราการตกตะกอนรายปีในช่วงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549-2558 โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา คือ 1) กรณีเงื่อนไขขอบเขตเป็นการไหลคงที่ตามเวลา และ 2) กรณีเงื่อนไขขอบเขตเป็นการไหลไม่คงที่ตามเวลา ผลการศึกษาพบว่า กรณีที่ 1 อัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีประมาณ 0.357 ม./ปี ส่วนกรณีที่ 2 อัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีประมาณ 0.111 ม./ปี จะเห็นว่าการไหลแบบคงที่ตามเวลาจะให้อัตราการตกตะกอนมากกว่าการไหลแบบไม่คงที่ตามเวลาโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 32 เนื่องจากการจำลองการไหลแบบไม่คงที่ตามเวลาจะมีความใกล้เคียงกับสภาพการไหลจริงในแม่น้ำลำภาชีมากกว่า อย่างไรก็ตามอัตราการตกตะกอนที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์นั้นจะยังมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง ทั้งนี้เพราะปริมาณตะกอนที่ใช้ในแบบจำลองใช้เป็นค่าเฉลี่ยตลอดช่วงแม่น้ำ แต่ในความเป็นจริงปริมาณตะกอนจะมีความผันแปรไม่เท่ากันในแต่ละเดือนและในแต่ละช่วงลำน้ำ

คำสำคัญ: การเคลื่อนตัวของตะกอนดิน, อุทกพลศาสตร์, แม่น้ำลำภาชี, แบบจำลอง MIKE21

Abstract

The purpose of this study was to simulate the hydrodynamic and sediment transport conditions in Lam Pachi River between a downstream portion of K.61 runoff station and a confluence of Kwa Noi River by an application of MIKE21-HD/ST model. First, observed data of river cross section, discharge, water level, and sediment in Lam Pachi River were collected during year 2013-2016. The result of calibration and verification of MIKE21-HD along Lam Pachi River has shown that the Manning's n roughness coefficient for the whole river was equal to 0.0286, which gave the calculated water level close to the observed values at K.62 runoff station. It provided a statistical index of R^2 and RMSE equal to

0.79 and 0.54 m, respectively. The MIKE21-ST in conjugate with MIKE21-HD models were calibrated using steady state condition in the range of discharge from 5 to 100 m³ s⁻¹ and measured sediment in three places along the river. It found that the average grain size was around 1.138 mm, unit weight of sediment was equal 2,675 kg m⁻³, average porosity was equal 0.28, and settling velocity was equal 0.1504 m s⁻¹. The calibration results showed that the rate of bed level change had a sedimentation rate in the range of 0.33 to 0.64 m yr⁻¹ and the sedimentation rate was directly proportional to the flow rate. Finally, MIKE21-HD/ST model was applied to analyze the annual sedimentation rate during year 2006-2015 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 was around 0.357 m yr⁻¹ while case 2 the average rate was around 0.111 m yr⁻¹. It found that the sedimentation rate of the steady flow case was higher than the sedimentation rate of the unsteady flow case on average approximately 32%. Since unsteady flow model simulation was more similar to the real flow condition in Lam Pachi River. However, sedimentation rate obtained from mathematical models was significantly higher than the actual because of sediment load input to the model was an average throughout the river. In fact, sediment load varied unequally both in each month and section of the river.

Keywords: Sediment Transport, Hydrodynamic, Lam Pachi River, MIKE21 Model

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าการทำลายทรัพยากรธรรมชาติโดยเฉพาะทรัพยากรป่าไม้ย่อมส่งผลเสียต่อมนุษย์ไม่มากนักน้อย สำหรับพื้นที่ในลุ่มน้ำที่หน้าดินปราศจากสิ่งปกคลุม เมื่อเข้าสู่ฤดูฝนและเป็นช่วงที่เกิดฝนตกหนักมักจะเกิดการพัดพาตะกอนดินจากพื้นที่ตอนบนในลุ่มน้ำลงมายังพื้นที่ตอนล่างเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ลำน้ำตอนล่างเกิดการตื้นเขินและมีความจุลำนํ้าลดลง หากเกิดในพื้นที่เหนืออ่างเก็บน้ำย่อมทำให้อ่างเก็บน้ำมีความจุลดลงเช่นกัน ซึ่งปัญหาดังกล่าวนับวันจะทวีความรุนแรงมากขึ้น ด้วยเหตุนี้เองในอดีตและปัจจุบันได้มีนักวิจัยหลายท่านทั้งในประเทศและต่างประเทศได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของตะกอนดินในแม่น้ำที่เป็นสาเหตุของปัญหา อาทิเช่น [1] ได้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขแบบ 2 มิติ เพื่อทำนายการสะสมปริมาณตะกอนแขวนลอยในพื้นที่ทุ่งน้ำท่วมที่มีสภาพภูมิประเทศซับซ้อน และเป็นผลมาจากการไหลล้นคันกันน้ำ ผลที่ได้จากแบบจำลองนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับอัตราการตกตะกอนเฉลี่ยที่ใช้รังสีซีซีเอ็ม-137 ในการวิเคราะห์การตกตะกอนพื้นที่ทุ่งน้ำท่วม ส่วน [2] ใช้แบบจำลอง Depth-averaged 2 มิติ เพื่อจำลองการไหลแบบไม่คงที่และการเคลื่อนที่ของตะกอนในทางน้ำเปิดด้วยวิธีการ Finite volume กับ Nonstaggered และ Curvilinear grid ในการ

พิจารณาผลกระทบของแรงโน้มถ่วงโลกที่มีต่อการเคลื่อนที่และทิศทางการไหลของตะกอนท้องน้ำที่มีความลาดชัน ผลที่ได้จากแบบจำลองในกรณีต่างๆ จะนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากภาคสนาม เพื่อแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีผลสอดคล้องกับข้อมูลที่วัดได้ อีกทั้ง [3] ทำการคำนวณการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำด้วยแบบจำลอง depth-average โดยใช้วิธีการ Finite volume กับ boundary-fitted grids ที่ถูกพัฒนาขึ้น ผลการศึกษาพบว่า ตำแหน่งการกัดเซาะและการตกตะกอนของท้องน้ำที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลที่วัดได้ในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ [4] ได้ศึกษาการพัดพาและการสะสมของตะกอนในแม่น้ำและบริเวณที่ราบน้ำท่วมของแม่น้ำอะเมซอน (Amazon) โดยการรวบรวมข้อมูลการตรวจวัดในช่วงปี ค.ศ. 2000-2003 พบว่า ระยะเวลาการเกิดตะกอนบริเวณที่ราบน้ำท่วมนานถึง 5 เดือน (ธ.ค.-เม.ย.) โดยมีค่าเฉลี่ยการสะสมของตะกอนจะอยู่ที่ช่วง $558-828 \times 10^3$ ตัน/ปี ตลอดระยะทาง 130 กม. ส่วนการสะสมของตะกอนในแต่ละปีมีค่าเฉลี่ยในช่วงประมาณ 41-53% อีกทั้งยังมีค่าอัตราการตกตะกอนในแม่น้ำประมาณ 517 ตัน/กม./ปี หรือคิดเป็นอัตราการสะสมของตะกอนเท่ากับ 0.0016 ม./ปี (23%) ยิ่งไปกว่านั้น [5] ได้ศึกษาสภาพด้านอุทกพลศาสตร์ด้วยแบบจำลอง RMA-10 (1-D/2-D/3-D stratified flow) และ RMA-11 (1-D/2-D/3-D water quality) ในพื้นที่ชายฝั่งทะเล

เมืองดาร์วิน ประเทศออสเตรเลีย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เข้าใจถึงความเชื่อมโยงกันของสภาพด้านอุทกพลศาสตร์ การเคลื่อนตัวของตะกอนดิน และพลศาสตร์ของ Nutrient ที่จะช่วยในการบริหารจัดการการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานบริเวณท่าเรือในพื้นที่ดังกล่าว ผลที่ได้พบว่า แบบจำลองนี้ประสบความสำเร็จในการจำลองการฟุ้งกระจายและการเคลื่อนตัวของตะกอนดินเนื่องการขุดลอกปากแม่น้ำ และยังสามารถใช้ศึกษาเรื่อง Resuspending sediment เนื่องจากการแพร่กระจายของความเค็มเมื่อถูกน้ำสะอาดจากระบบแม่น้ำเคลื่อนทับบริเวณชั้นผิวน้ำตอนบนซึ่งอยู่เหนือชั้นของโคลนที่เกิดจากความเค็มได้ และ [6] ได้ศึกษาการจำลองการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลบริเวณพื้นที่ชายฝั่งท่าเรือเมืองดาร์วิน ประเทศออสเตรเลีย โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE 21 HDFM ในการจำลองแบบการไหลแบบ 2 มิติ ด้วยวิธี Flexible Mesh ในการสร้างข้อมูลภูมิประเทศใต้ท้องทะเล ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ผลการเปรียบเทียบระดับน้ำทะเลรายชั่วโมงที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับค่าที่ตรวจวัดจริงบริเวณท่าเรือเป็นที่น่าพอใจ และแบบจำลองมีความคล่องตัวเมื่อนำมาใช้ศึกษากับพื้นที่ทะเลที่มีขนาดใหญ่ได้เป็นอย่างดี ในการศึกษาเกี่ยวกับการกัดเซาะตามแนวตลิ่งนั้น [7] ได้ศึกษาการกัดเซาะและการตกตะกอนในแม่น้ำโอเดนเซ ประเทศเดนมาร์ก โดยสร้างแบบจำลองการไหลแบบ 2D และแบบจำลองพื้นที่ที่ทุ่งน้ำท่วม สรุปได้ว่า แบบจำลองที่สร้างขึ้นเป็นเครื่องมือที่ช่วยอธิบายการตกตะกอนในพื้นที่ที่ทุ่งน้ำท่วมได้ และเมื่อไม่นานมานี้ [8] ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE 21-HD/ST ในการจำลองสภาพทางอุทกพลศาสตร์และการเคลื่อนที่ของตะกอนดินในแม่น้ำป่าสัก ตั้งแต่ท้ายเขื่อนพระราม 6 จนถึงจุดบรรจบแม่น้ำเจ้าพระยา ผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงท้องน้ำมีอัตราการตกตะกอนอยู่ในช่วง 0.66 ถึง 0.95 ม./ปี และอัตราการตกตะกอนจะแปรผันตามอัตราการไหลซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลวิเคราะห์จากแบบจำลองกายภาพ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการไหลแบบคงที่ตามเวลาให้อัตราการตกตะกอนมากกว่าการไหลแบบไม่คงที่ตามเวลาโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 29 ทั้งนี้เนื่องจากการจำลองการไหลแบบไม่คงที่ตามเวลาจะมีความใกล้เคียงกับสภาพการไหลจริงในแม่น้ำป่าสักมากกว่า

จากการศึกษาที่ได้กล่าวมาข้างต้นทำให้ทราบว่า แบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถเป็นเครื่องมือวิจัยที่ทันสมัยในการศึกษาการเคลื่อนตัวของตะกอนในแม่น้ำได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการศึกษาคครั้งนี้จึงเลือกใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE 21 ที่เป็นลิขสิทธิ์ของ

ห้องปฏิบัติการวิจัยการจำลองระบบทรัพยากรน้ำด้วยคอมพิวเตอร์และระบบสารสนเทศ (WRCMIS Lab) ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน เพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวของตะกอนดินในแม่น้ำลำภาชี รวมทั้งประยุกต์ใช้แบบจำลองดังกล่าวในการประเมินอัตราการตกตะกอน/กัดเซาะของตะกอนดินที่ส่งผลกระทบต่อลำน้ำ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE 21

เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นโดย DHI Water Environment and Health เป็นแบบจำลองการไหลของน้ำที่มีลักษณะเป็น 2 มิติ สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกระแสน้ำและวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของตะกอนอันเนื่องมาจากกระแสน้ำได้นอกจากนี้แบบจำลอง MIKE 21 ได้มีการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างสภาพภูมิประเทศของพื้นที่ท้องน้ำ (Bathymetry) แบ่งออกเป็น 4 แบบ ประกอบด้วย 1) Single Grid 2) Multiple Grids 3) Curvilinear Grid และ 4) Flexible Mesh ในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ Flexible Mesh ซึ่งนับว่าเป็นเครื่องมือใหม่ล่าสุดที่ถูกพัฒนาขึ้นและเริ่มนำมาใช้ในงานด้านวิศวกรรมแหล่งน้ำ [9]

2.2 โมดูลทางอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics Module: HD)

MIKE 21-HD ถือว่าเป็นโมดูลพื้นฐานในการจำลองการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำและการไหลที่ตอบสนองต่อการควบคุมพฤติกรรมของการไหลของน้ำแบบ 2 มิติ มีสมการควบคุมการไหล คือ Navie-Stokes Equation โดยมีสมมติฐานที่ว่า การไหลไม่มีการยุบตัว การแปรผันในแนวตั้งมีน้อย และไม่มีการแบ่งชั้นของน้ำ สมการที่ใช้แก้ปัญหา คือ สมการต่อเนื่องและสมการโมเมนตัมทั้งแกน x และ y โดยใช้วิธี Implicit Finite Difference แสดงได้ดังสมการที่ (1), (2) และ (3) [10]

นอกจากนี้การใช้แบบจำลอง MIKE 21 นั้นจะต้องมีการจัดเตรียมข้อมูลอุทกพลศาสตร์จากโมดูลทางอุทกพลศาสตร์ (HD-Module) ก่อนที่จะใช้ในโมดูลอื่นๆ เช่น โมดูลการพัดพา-การแพร่กระจาย (AD-Module) โมดูลคุณภาพน้ำ (WQ-Module) และโมดูลการเคลื่อนที่ของตะกอน (ST-Module)

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:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q - fV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \quad (2)$$

สมการโมเมนตัม ทิศทาง y:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] + \Omega_p - fV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \quad (3)$$

เมื่อ $h(x, y, t)$ = ความลึกน้ำ (= $\zeta - d$, ม.)

$d(x, y, t)$ = ความลึกน้ำที่แปรผันตามเวลา (ม.)

$\zeta(x, y, t)$ = ระดับผิวน้ำเหนือระดับอ้างอิง (ม.)

$p(x, y, t)$ = ความหนาแน่นของการไหลใน
ทิศทางแกน x (ม.³/วินาที/ม.)

$q(x, y, t)$ = ความหนาแน่นของการไหลใน
ทิศทางแกน y (ลบ.ม./วินาที/ม.)

$C(x, y)$ = ความต้านทานของ Chezy (ม.^{1/2}/วินาที)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง
ของโลก (ม./วินาที²)

$f(V)$ = ความฝืดเนื่องจากลม

$V, V_x, V_y(x, y, t)$ = ความเร็วลมและความเร็วใน
ทิศทางแกน x, y (ม./วินาที)

$\Omega(x, y)$ = สัมประสิทธิ์คอริโอลิส (วินาที⁻¹)

$p_a(x, y, t)$ = ความดันอากาศ (กก./ม.²/วินาที²)

ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ (กก./ลบ.ม.)

t = เวลา (วินาที)

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ = แรงเฉือนประสิทธิผลในทิศทาง x
และ y (นิวตัน/ตร.ม.)

2.3 โมเดลการเคลื่อนตัวของตะกอนทราย (Sand Transport: ST)

โมเดลนี้ใช้กำหนดอัตราการเคลื่อนตัวของตะกอนทรายอันเนื่องมาจากผลของการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำเพียงอย่างเดียว หรือรวมผลจากการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำ และคลื่นในพื้นที่ท้องน้ำที่มีทราย โดย MIKE 21-ST นี้จะใช้ทฤษฎีความเร็วของการตกตะกอนและทฤษฎีการเคลื่อนตัวของตะกอนในการแก้ปัญหาซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1 ทฤษฎีความเร็วของการตกตะกอน ประกอบด้วย 3 เงื่อนไข คือ

(1) เมื่อ $d_{50} < 0.1$ มม.

$$W_s = \frac{(s-1)gd_{50}}{18\nu} \quad (4)$$

(2) เมื่อ $0.1 \leq d_{50} \leq 1$ มม.

$$W_s = \frac{\nu}{d_{50}} \left(\sqrt{100 + \frac{(s-1)gd_{50}^3}{\nu^2}} - 10 \right) \quad (5)$$

(3) เมื่อ $d_{50} > 1$ มม.

$$W_s = 1.1\sqrt{(s-1)gd_{50}} \quad (6)$$

โดยที่ d_{50} = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดดิน (มม.)

s = ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของตะกอน (กก./ลบ.ม.)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที²)

ν = ความหนืดของน้ำมีค่าเท่ากับ 1×10^{-6} (ตร.ม./วินาที)

2.3.2 ทฤษฎีการเคลื่อนตัวของตะกอนของ [11] ซึ่งได้เสนอสมการการเคลื่อนตัวของตะกอนออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

(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

$$T = \left(\frac{u'_f}{u_{f,c}} \right)^2 - 1 \quad (8)$$

u'_f = ประสิทธิภาพของความเร็วเนื่องจากแรงเฉือน

$$u_f' = V \frac{\sqrt{g}}{C'} \quad (9)$$

$u_{f,c}$ = ความเร็วเนื่องจากแรงเฉือน
 วิกฤติ (ม./วินาที)

$$u_{f,c} = \sqrt{\theta_C (s-1) g d_{50}} \quad (10)$$

C' = ค่าความขรุขระท้องน้ำของ
 Chezy

$$C' = 18 \log \left(\frac{4h}{d_{90}} \right) \quad (11)$$

h = ความลึกน้ำ (ม.)

D^* = ตัวแปรไร้มิติของการเคลื่อนตัว
 ของตะกอนท้องน้ำ

$$D^* = d_{50} \left(\frac{(s-1)g}{v^2} \right)^{1/3} \quad (12)$$

θ_C = ค่าความเค้นเฉือนวิกฤติท้องน้ำ
 เป็นค่าคงที่และมีเท่ากับ 0.06

(2) สมการการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย (S_{sl})

$$S_{sl} = f \cdot c_a \cdot V \cdot h \quad (13)$$

โดยที่ f = แพลคเตอร์ปรับแก้ของการเคลื่อน
 ตัวของแขวนลอยตะกอน

c_a = ความเข้มข้นของชั้นตะกอนท้อง
 น้ำ (กก./ลบ.ม.)

V = ความเร็วการไหล (ม./วินาที)

2.4 ดัชนีทางสถิติ

ในการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองฯ นั้น จำเป็นต้องใช้ดัชนีทางสถิติในการตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองฯ ซึ่งในการศึกษานี้เลือกใช้ค่า Root mean square error (RMSE) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณกำลังสอง (Coefficient of determination, R^2)

3. วิธีการดำเนินงาน

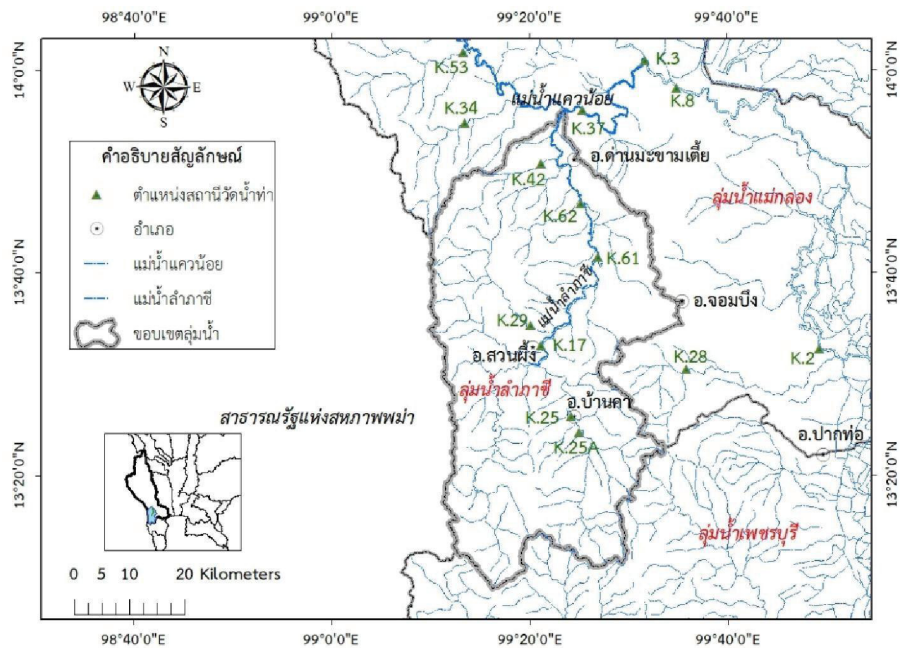
3.1 การรวบรวมข้อมูล

เป็นการรวบรวมข้อมูลพื้นฐานในพื้นที่ลุ่มน้ำลำภาชีจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ข้อมูลด้านอุตุนิยมวิทยา อุทกวิทยา ชลศาสตร์ ลักษณะของดินและการใช้ที่ดิน และสภาพภูมิประเทศของกลุ่มน้ำลำภาชีที่มีความน่าเชื่อถือและมีการบันทึกข้อมูลดังกล่าวลงในระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์

ส่วนข้อมูลจากการสำรวจจริงในภาคสนาม ประกอบด้วย

3.1.1 ข้อมูลระดับน้ำและความเร็วของกระแสน้ำ ได้จากการสำรวจด้วยเครื่องมือวัดระดับน้ำและความเร็วของกระแสน้ำแบบดิจิทัลที่จัดเก็บข้อมูลเป็นรายชั่วโมงโดยจะจัดเก็บข้อมูลไม่น้อยกว่าหนึ่งเดือน จำนวน 2 ช่วงเวลา คือ ฤดูน้ำหลาก และฤดูแล้ง เพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบแบบจำลองการไหลแบบสองมิติต่อไป

3.1.2 ข้อมูลรูปตัดขวางลำน้ำ เป็นข้อมูลตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2559 โดยเริ่มสำรวจตั้งแต่สถานีวัดน้ำท่า K.61 บ้านด่านทับตะโก อ.จอมบึง จ.ราชบุรี ของกรมชลประทาน จนถึงจุดบรรจบแม่น้ำแควน้อย แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตำแหน่งรูปตัดขวางลำน้ำของแม่น้ำลำภาชี

3.1.3 ข้อมูลปริมาณตะกอนดิน ได้จากการสุ่มเก็บตัวอย่างตะกอนดินด้วยเครื่องมือเก็บข้อมูลตัวอย่างตะกอนท้องน้ำ แบบ Helley-Smith Sediment Samples Bed Load Model BL-87 ของกรมชลประทาน ดังแสดงในรูปที่ 2 ในช่วงเดือนมิถุนายนถึงกันยายน พ.ศ. 2559 โดยตรวจวัดและจัดเก็บข้อมูลตะกอนจำนวน 3 สถานีวัดน้ำท่า ได้แก่ สถานี K.25A (ต้นน้ำ) สถานี K.61

(ตอนกลางน้ำ) และสถานี K.62 (ด้านท้ายน้ำ) เพื่อหาขนาดของตะกอนดินเฉลี่ยโดยใช้วิธีการร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) ค่าหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินเฉลี่ย ค่าความพรุนของตะกอนเฉลี่ย เป็นต้น และนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการเปรียบเทียบแบบจำลองการเคลื่อนตัวของตะกอนดินต่อไป



รูปที่ 2 เครื่องมือเก็บตะกอนท้องน้ำ แบบ Helley-Smith Sediment Samples Bed Load Model BL-87

3.2 การจัดทำแบบจำลองทางอุทกพลศาสตร์ในแม่น้ำด้วยแบบจำลอง MIKE 21-HD มีขั้นตอนโดยละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 การสร้าง Bathymetry เป็นแบบ Flexible Mesh

เป็นการนำข้อมูลรูปตัดขวางลำน้ำที่ได้จากการสำรวจจริงเข้าสู่แบบจำลอง MIKE21-HD แล้วทำการสร้างโนดและอีลิเมนต์ของ Bathymetry

3.2.2 การกำหนดขอบเขตเงื่อนไข (Boundary condition)

สำหรับการเปรียบเทียบแบบจำลองฯ ได้พิจารณาเลือกข้อมูลที่สำรวจได้จริงในช่วงระหว่างปีน้ำ 2556-2557 หรือตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2556 ถึง 31 มีนาคม พ.ศ. 2558 โดยขอบเขตด้านเหนือน้ำใช้เป็นข้อมูลปริมาณการไหลรายชั่วโมงที่สถานี K.61 ของแม่น้ำลำภาชี ส่วนขอบเขตด้านท้ายน้ำใช้เป็นข้อมูล Rating Curves ที่สถานี K.37 ของแม่น้ำแควน้อย และปริมาณการไหลเข้าด้านข้างประเมินได้จาก Sideflow ตามธรรมชาติที่ไหลเข้าสู่แม่น้ำ

ลำภาชีในช่วงระหว่างสถานีวัดน้ำท่า K.61 และ K.62 ของกรมชลประทาน จนถึงจุดบรรจบแม่น้ำแควน้อย

3.2.3 การเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง MIKE 21-HD

สำหรับการเปรียบเทียบแบบจำลอง MIKE 21-HD ได้พิจารณาใช้สภาพปัจจุบัน โดยเลือกช่วงเวลาที่ได้มีการเก็บข้อมูลสนามจริงในพื้นที่โครงการในช่วงปีน้ำ 2556-2557 ซึ่งประกอบด้วย การเก็บข้อมูลระดับน้ำ และการตรวจวัดกระแสน้ำที่ความลึก 3 ระดับ คือ ที่ระดับ 0.2, 0.6 และ 0.8 ของความลึกน้ำ ตามลำดับ จำนวน 2 บริเวณ ซึ่งตรงกับสถานีวัดน้ำท่า K.61 และ K.62 ของกรมชลประทาน นอกจากนั้นการเปรียบเทียบแบบจำลองฯ จะต้องทำการสมมติค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระลำน้ำ Manning'n ตลอดช่วงแม่น้ำลำภาชี จนกว่าผลการคำนวณระดับน้ำจากแบบจำลองมีค่าเข้าใกล้กับค่าที่ตรวจวัดได้จริงที่สถานี K.62 ของกรมชลประทานมากที่สุด ต่อจากนั้นนำแบบจำลอง MIKE 21-HD ไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาการกัดเซาะและตกตะกอนในแม่น้ำลำภาชี และประเมินประสิทธิผลของการประยุกต์ใช้แบบจำลองด้วยดัชนีทางสถิติซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4

3.3 การจัดทำแบบจำลองการเคลื่อนตัวของตะกอนดินด้วยแบบจำลอง MIKE 21-ST

การกำหนดตัวแปรแบบจำลองฯ ได้จากการรวบรวมข้อมูลตัวอย่างตะกอนดินทั้ง 3 จุด เพื่อนำมาวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนเฉลี่ย (d_{50}) ค่าหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินเฉลี่ย (ρ_s) และค่าความพรุนของตะกอนเฉลี่ย จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นสามารถคำนวณหาความเร็วของการตกตะกอนได้จากสมการ (4) ถึง (6) และกำหนดค่าตัวแปรที่สำคัญในแบบจำลองฯ ได้

3.4 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE 21-HD ร่วมกับแบบจำลอง MIKE 21-ST เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ท้องน้ำ

เนื่องจากแบบจำลอง MIKE21-ST ต้องใช้การวิเคราะห์รูปแบบการกระจายความเร็วของกระแสน้ำในแบบจำลอง MIKE21-HD เป็นตัวพาตะกอนให้เคลื่อนตัว ดังนั้นการเปรียบเทียบแบบจำลอง MIKE21-HD จึงต้องวิเคราะห์ร่วมกับแบบจำลอง HD/ST โดยกำหนดให้อัตราการไหลคงที่และเลือกใช้การไหลที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ (Percentile) ที่ 25% 50% 75% และ 100% ที่วิเคราะห์ได้จากปริมาณการไหลสูงสุดรายปีที่สถานี K.61 เพื่อเป็นตัวแทนการไหลทั้งในช่วงน้ำน้อยจนถึงน้ำมากเท่ากับความจุลำน้ำของแม่น้ำลำภาชี และนำมาจัดทำเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลกับอัตราการตกตะกอนรายปี

3.5 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE 21-HD ร่วมกับแบบจำลอง MIKE 21-ST เพื่อวิเคราะห์อัตราการตกตะกอนรายปี

ในการประยุกต์ใช้แบบจำลองหลังจากการเปรียบเทียบแบบจำลอง MIKE 21-HD และกำหนดตัวแปรที่สำคัญในแบบจำลอง MIKE 21-ST ซึ่งในการศึกษาได้แบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

3.5.1 การศึกษาการไหลแบบคงที่ตามเวลา (Steady flow)

จากผลการศึกษาด้วยการไหลแบบคงที่ตามเวลา นำไปวิเคราะห์หาอัตราการตกตะกอนรายปีในอดีตย้อนหลัง 10 ปีหลังสุดระหว่างปี พ.ศ. 2549-2558 โดยใช้ข้อมูลปริมาณการไหลรายวันที่สถานี K.61 ซึ่งมีปริมาณการไหลที่ผันแปรตลอดปีมาใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลกับอัตราการตกตะกอนที่พัฒนาขึ้น

3.5.2 การศึกษาการไหลแบบไม่คงที่ตามเวลา (Unsteady flow)

กำหนดให้ขอบเขตด้านเหนือของแบบจำลอง MIKE 21-HD เป็นอัตราการไหลรายวันที่สถานี K.61 และขอบเขตด้านท้ายน้ำเป็นระดับน้ำรายวันที่สถานี K.62 ในช่วงปี พ.ศ.2549-2558 ส่วนตัวแปรในแบบจำลอง MIKE 21-ST ใช้เหมือนกับข้อ 3.3 และวิเคราะห์หาอัตราการตกตะกอนรายปีเช่นเดียวกัน

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณตะกอน

จากการสำรวจข้อมูลปริมาณตะกอนในภาคสนามได้ข้อมูลเพียงช่วงเดียว (เดือนกันยายน 2559) ดังแสดงรูปที่ 3 ทั้งนี้เนื่องจากปีดังกล่าวประสบปัญหาฝนทิ้งช่วง โดยเริ่มมีฝนตกในช่วงปลายเดือนพฤษภาคม 2559 และมีฝนตกมากอีกครั้งในช่วงเดือนกันยายน 2559 ผลการทดสอบตัวอย่างตะกอนดินพบว่า ที่ d_{50} ของสถานี K.25A (ต้นน้ำ) สถานี K.61 (ตอนกลางน้ำ) และสถานี K.62 (ด้านท้ายน้ำ) มีค่าเท่ากับ 1.340, 1.519 และ 0.556 มม. ตามลำดับ และคิดเป็นค่าเฉลี่ยทั้งแม่น้ำลำภาชีเท่ากับ 1.138 มม. ส่วนค่าความพรุนของตะกอนดินพบว่า ตัวอย่างตะกอนดินทั้ง 3 แห่ง เป็นดินทรายที่มีขนาดคละกันดี หรือทรายปนกรวดมีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มี ดังนั้นค่าความพรุนของดินทรายจะอยู่ในช่วง 20-35% ซึ่งอ้างอิงจาก [12] และคิดเป็นค่าเฉลี่ยตลอดทั้งแม่น้ำลำภาชีประมาณ 28%

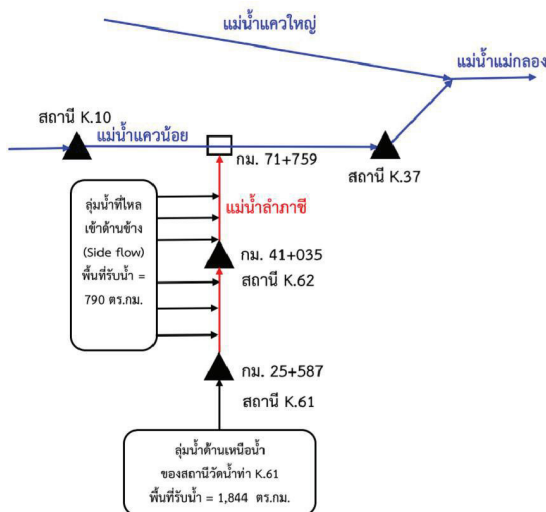


รูปที่ 3 ตัวอย่างตะกอนดินที่เก็บรวบรวมได้ (27 ก.ย. 59)

4.2 ผลการจัดทำแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ของการไหลสองมิติ

MIKE 21-HD

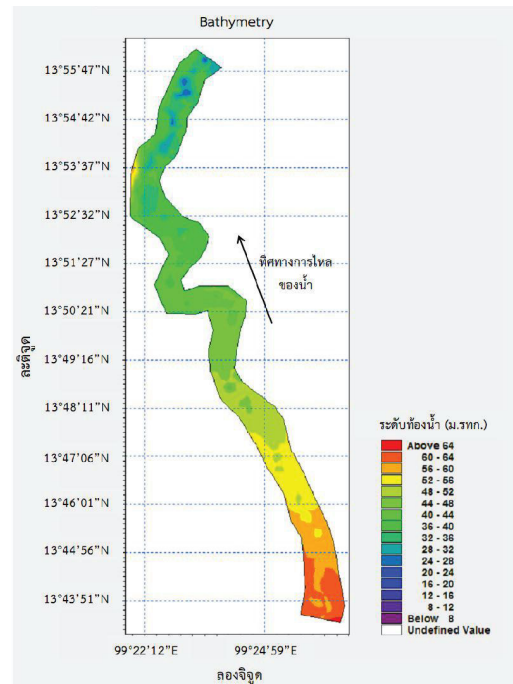
การจัดทำแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ของการไหล 2 มิติ ประกอบด้วย 1) การสร้างแผนที่แสดงสภาพภูมิประเทศของพื้นที่ท้องน้ำ และ 2) การปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองฯ ซึ่งระบบลุ่มน้ำลำภาชีที่ใช้ในการจัดทำแบบจำลองนี้มีแผนผังการไหลดังแสดงในรูปที่ 4 และมีรายละเอียดของการจัดทำแบบจำลอง MIKE 21-HD ดังนี้



รูปที่ 4 แผนผังการไหลของระบบลุ่มน้ำลำภาชี

4.2.1 ผลการสร้างแผนที่แสดงสภาพภูมิประเทศของพื้นที่ท้องน้ำ (Bathymetry)

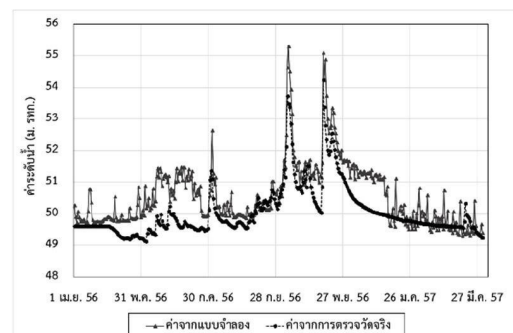
ผลการนำข้อมูลระดับท้องน้ำเชิงตัวเลขที่ได้จากการสำรวจจริงเข้าสู่แบบจำลอง MIKE 21-HD พบว่ามีจำนวนจุดหยั่งน้ำทั้งสิ้น 4,846 จุด ส่วนผลการสร้างโหนดและอีลิเมนต์ของ สภาพภูมิประเทศของพื้นที่ท้องน้ำบริเวณพื้นที่แม่น้ำลำภาชีโดยสรุปมีจำนวนโหนดทั้งสิ้น 523 โหนด และมีจำนวนอีลิเมนต์ทั้งสิ้น 850 อีลิเมนต์ และผลการจัดทำสภาพภูมิประเทศของพื้นที่ท้องน้ำของบริเวณพื้นที่แม่น้ำลำภาชี แสดงเป็นรูปสองมิติได้ดังรูปที่ 5



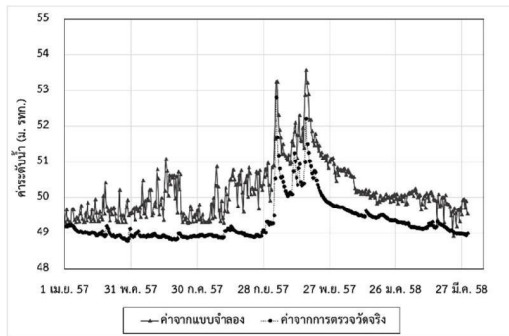
รูปที่ 5 ภาพสองมิติ Bathymetry ของพื้นที่แม่น้ำลำภาชี

4.2.2 ผลการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง MIKE 21-HD

ผลการปรับเทียบฯ พบว่า ค่า Manning's n เท่ากับ 35 หรือมีค่า Manning's n ซึ่งเป็นส่วนกลับเท่ากับ 0.0286 จะทำให้ค่าผลการคำนวณฯ ที่สถานี K.62 ใกล้เคียงกับที่ตรวจวัดได้จริงมากที่สุด โดยได้แสดงผลการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์ค่าระดับน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองฯ กับค่าระดับน้ำที่ตรวจวัดได้จริงบริเวณ สถานี K.62 ในรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ตามลำดับ โดยมีค่าดัชนีทางสถิติ คือ ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.79 และ 0.85 ตามลำดับ ค่า RMSE มีค่าเท่ากับ 0.54 และ 0.49 m ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์การปรับเทียบฯ และสามารถนำแบบจำลอง MIKE 21-HD นี้ไปประยุกต์ใช้ในศึกษาขั้นต่อไป



รูปที่ 6 ผลการปรับเทียบค่าระดับน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับค่าวัดได้จริง ณ สถานี K.62



รูปที่ 7 ผลการตรวจพิสูจน์ค่าระดับน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับค่าวัดได้จริง ณ สถานี K.62

4.3 ผลการจัดทำแบบจำลองการเคลื่อนตัวของตะกอนดิน MIKE 21-ST

ผลการวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนเฉลี่ยของแม่น้ำลำภาชีพบว่า มีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.138 มม. ค่าหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินเฉลี่ยเท่ากับ 2,675 กก./ลบ.ม. และค่าความพรุนของตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 0.28 และเมื่อนำค่าข้างต้นไปคำนวณหาความเร็วของการตกตะกอน (W_s) จะได้ค่า W_s เท่ากับ 0.1504 ม./วินาที โดยที่ค่า W_s จะนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ท้องน้ำต่อไป

4.4 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE 21-HD ร่วมกับแบบจำลอง MIKE 21-ST เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ท้องน้ำ

4.4.1 ผลการศึกษากระแสน้ำโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE 21-HD กรณีการไหลแบบคงที่ตามเวลา (Steady flow)

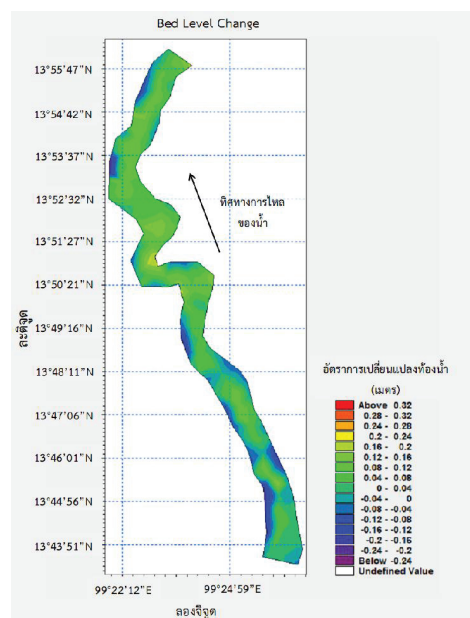
การศึกษาระแสน้ำโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE 21-HD และผลการจำลองสภาพแม่น้ำลำภาชีในสภาพปัจจุบันที่เปอร์เซ็นต์ที่ 25%, 50%, 75% และ 95% ซึ่งมีปริมาณการไหลสูงสุดเท่ากับ 5, 10, 25 และ 100 ลบ.ม./วินาที ตามลำดับ ทำให้ทราบถึงขนาดและทิศทางของกระแสในแม่น้ำลำภาชี อีกทั้งยังพบว่า ปริมาณการไหลสูงสุดเท่ากับ 5, 10, 25 และ 100 ลบ.ม./วินาที มีค่าความเร็วกระแสเท่ากับ 0.36, 0.53, 0.68 และ 0.83 ม./วินาที ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเร็วของกระแสแปรผันตรงตามปริมาณการไหล

4.4.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ท้องน้ำ

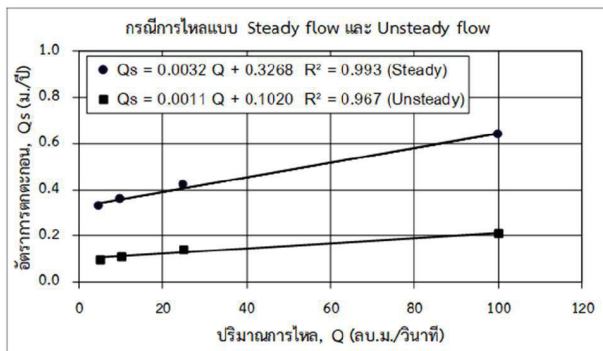
จากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงท้องน้ำจากแบบจำลอง MIKE 21-HD/ST พบว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ท้องน้ำในแม่น้ำลำภาชีมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ พื้นที่ทับถม และพื้นที่กัดเซาะ สามารถสรุปเป็นอัตราการตกตะกอน (+) และอัตราการกัดเซาะ (-) ของแต่ละปริมาณการไหล ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ที่ได้

จากแบบจำลอง MIKE 21 กรณีการไหลแบบคงที่ตามเวลา (Steady flow) แสดงดังรูปที่ 8 โดยแม่น้ำลำภาชีมีอัตราการตกตะกอนอยู่ในช่วงระหว่าง 0.33 ถึง 0.64 ม./ปี และที่ปริมาณการไหลที่ 5, 10, 25 และ 100 ลบ.ม./วินาที ตามลำดับ มีอัตราการตกตะกอนเท่ากับ 0.33, 0.36, 0.42 และ 0.64 ม./ปี ตามลำดับ

นอกจากนี้อัตราการตกตะกอนในแต่ละอัตราการไหลทั้ง 4 ค่าที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง MIKE 21 ยังนำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลกับอัตราการตกตะกอน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 9 เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการตกตะกอนรายปีในอดีตย้อนหลัง 10 ปีหลังสุดระหว่างปี พ.ศ. 2549-2558 ซึ่งกรณีการไหลแบบคงที่ตามเวลา (Steady flow) จะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ว่า $Q_s = 0.0032 Q + 0.3268$ และสมการนี้ให้ค่า $R^2 = 0.993$ ส่วนการไหลแบบไม่คงที่ตามเวลา (Unsteady flow) ให้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ว่า $Q_s = 0.0011 Q + 0.1020$ ซึ่งให้ค่า $R^2 = 0.967$ ทั้งนี้การไหลของน้ำในสภาพความเป็นจริงแล้วจะมีอัตราการไหลไม่เท่ากับ 0 ลบ.ม./วินาที เนื่องจากการไหลของแม่น้ำธรรมชาติจะมี Baseflow ที่ทำหน้าที่ลำเลียงปริมาณตะกอนให้เกิดการตกทับถมและกัดเซาะในลำน้ำอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น จุดตัดแกน Y ในรูปที่ 11 จึงไม่เท่ากับ 0 ลบ.ม./วินาที



รูปที่ 8 ตัวอย่างผลจากแบบจำลอง MIKE21-HD/ST ช่วง กม.25+587-กม. 71+759 อัตราการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำที่อัตราการไหลคงที่เท่ากับ 25 ลบ.ม./วินาที



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหล
กับอัตราการตกตะกอน

4.5 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE 21-HD ร่วมกับ แบบจำลอง MIKE 21-ST เพื่อวิเคราะห์อัตราการตกตะกอนรายปี

ตารางที่ 1 อัตราการตกตะกอนรายปีในแม่น้ำลำภาชีที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง MIKE 21

กรณีศึกษา	อัตราการตกตะกอน (ม./ปี)							
	พ.ศ. 2549	พ.ศ. 2550	พ.ศ. 2551	พ.ศ. 2552	พ.ศ. 2553	พ.ศ. 2554	พ.ศ. 2555	พ.ศ. 2556
การไหลแบบคงที่	0.367	0.346	0.335	0.333	0.352	0.346	0.375	0.390
การไหลแบบไม่คงที่	0.115	0.106	0.101	0.101	0.107	0.106	0.119	0.126
กรณีศึกษา	อัตราการตกตะกอน (ม./ปี)							
	พ.ศ. 2557	พ.ศ. 2558	ค่าเฉลี่ย					
การไหลแบบคงที่	0.340	0.386	0.357					
การไหลแบบไม่คงที่	0.103	0.125	0.111					

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาค้นคว้าได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE 21-HD/ST เพื่อศึกษาสภาพทางอุทกพลศาสตร์และการเคลื่อนที่ของตะกอนในแม่น้ำลำภาชี พบว่า ผลการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง MIKE 21-HD พบว่า ค่า Manning'n ที่ทำให้ค่าระดับน้ำที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าตรวจวัดจริงมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.0286 และผลการวิเคราะห์ตะกอนตลอดทั้งแม่น้ำลำภาชี จำนวน 3 แห่ง พบว่า มีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.138 มม. ค่าหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินเฉลี่ยเท่ากับ 2,675 กก./ลบ.ม. ค่าความพรุนของตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 0.28 และความเร็วของการตกตะกอนเท่ากับ 0.1504 ม./วินาที ส่วนผลการนำแบบจำลอง MIKE 21-HD มาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง MIKE 21-ST เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงท้องน้ำโดยใช้การไหลแบบคงที่ในช่วง 5 ถึง 100 ลบ.ม./วินาที พบว่า อัตราการตกตะกอนอยู่ในช่วง 0.33 ถึง 0.64 ม./ปี และผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE 21-

ผลการศึกษาส่วนนี้เป็นผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ท้องน้ำ เพื่อนำไปหาอัตราการตกตะกอนรายปีในอดีตย้อนหลัง 10 ปีหลังสุดระหว่างปี พ.ศ. 2549-2558 ของแม่น้ำลำภาชี 2 กรณีศึกษา พบว่า กรณีการไหลแบบคงที่ตามเวลา (Steady flow) อัตราการตกตะกอนจะผันแปรในแต่ละปีอยู่ในช่วง 0.333-0.390 ม./ปี และมีค่าอัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีประมาณ 0.357 ม./ปี ส่วนการไหลแบบไม่คงที่ตามเวลา (Unsteady flow) อัตราการตกตะกอนรายปีจะลดลงอยู่ในช่วง 0.101-0.126 ม./ปี และมีค่าอัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีประมาณ 0.111 ม./ปี แสดงดังตารางที่ 1 นอกจากนี้ยังพบว่า การไหลแบบคงที่ตามเวลา (Steady flow) ให้อัตราการตกตะกอนมากกว่าการไหลแบบไม่คงที่ตามเวลา (Unsteady flow) โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 32

HD/ST เพื่อวิเคราะห์อัตราการตกตะกอนรายปีในช่วงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549-2558 ที่แบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา พบว่า กรณีการไหลแบบคงที่ตามเวลา (Steady flow) ซึ่งได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและอัตราการตกตะกอน แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการตกตะกอนรายปีในอดีตย้อนหลัง 10 ปี โดยใช้ข้อมูลปริมาณการไหลรายวันที่สถานี K.61 นั้น ให้ค่าอัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีประมาณ 0.357 ม./ปี ส่วนกรณีการไหลแบบไม่คงที่ตามเวลา (Unsteady flow) ให้ค่าอัตราการตกตะกอนเฉลี่ยรายปีประมาณ 0.111 ม./ปี หรือมีอัตราการตกตะกอนเฉลี่ยต่อปีประมาณ 11 ซม. นอกจากนี้ยังพบว่า การไหลแบบคงที่ตามเวลา (Steady flow) จะให้อัตราการตกตะกอนมากกว่าการไหลแบบไม่คงที่ตามเวลา (Unsteady flow) โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 32

อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สามารถนำไปเป็นตัวกำหนดมาตรการในการควบคุมปริมาณตะกอนดินในแม่น้ำลำภาชีได้อย่างเหมาะสม กล่าวคือ ใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการ

ชุดลอกหรือปรับปรุงลำน้ำของหน่วยงานราชการ โดยนำตัวเลขดังกล่าวไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณตะกอนดินที่จะชุดลอก อีกทั้งยังนำไปประยุกต์ใช้กับลุ่มน้ำอื่นๆ ในประเทศไทยได้

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยการจำลองระบบทรัพยากรน้ำด้วยคอมพิวเตอร์และระบบสารสนเทศ (WRCMIS Lab) ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่และซอฟต์แวร์แบบจำลองต่างๆ และขอขอบคุณหน่วยงานกรมชลประทาน และกรมทรัพยากรน้ำที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลประกอบการศึกษาวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] 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(3-4), 202-218.
- [2] Wu, W. (2004). Depth-Averaged Two-Dimensional Numerical Modeling of Unsteady Flow and Nonuniform Sediment Transport in Open Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(10), 1013-1024.
- [3] Minh Duc, B., Wenka, T., & Rodi, W. (2004). Numerical Modeling of Bed Deformation in Laboratory Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9), 894-904.
- [4] Bourgoin, L. M., Bonnet, M.P., Martinez, J.M., Kosuth, 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 Curuai floodplain and the Amazon River, Brazil. *Journal of Hydrology*, 335(1-2), 140-156.
- [5] Williams, D., Wolanski, E., & Spagnol, S. (2006). Chapter 26 Hydrodynamics of Darwin Harbour. pp. 461-476. *In The Environment in Asia Pacific Harbours*. Springer, 498.
- [6] Taesombat, W. (2009). Two Dimensional Flow Modeling by Using MIKE21-HDFM Model for Darwin Harbour, Australia. *Proceeding of 14th National Convention on Civil Engineering, Nakhonratchasima, Thailand*, 13-15 May 2009.
- [7] 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.
- [8] Puangpiw, A., & Taesombat, W. (2015). A Study of Sediment Transport in Pasak River Using MIKE21 Model. *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, 21(1), 45-55.
- [9] DHI Water Environment and Health. 2007b. MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic Module, Step-by-Step training guide. Denmark.
- [10] DHI Water Environment and Health. 2007a. MIKE 21 ST Non-Cohesive Sediment Transport Module, User Guide. Denmark.
- [11] Van Rijn, L.C. (1984). Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), 1431-1456.
- [12] U.S. Geological Survey. (2015). Groundwater Sources Have Their Origins in the Water Cycle and Are Held in Aquifers Beneath the Ground Surface, Available source: <http://www.clean-water-for-laymen.com/groundwater-sources.html>, Feb 14, 2017.

