



พฤติกรรมของตะกอนแขวนลอยบริเวณแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง
BEHAVIOR OF SUSPENDED SEDIMENT AT THE LOWER CHAO PHRAYA RIVER

ณัฐดนัย ธรรมประเสริฐดี¹ และชัยยุทธ ชินณะราศรี²

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท, ²ศาสตราจารย์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนน ประชาอุทิศ แขวง บางมด เขต ทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

บทคัดย่อ

แม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างเป็นพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเล ทำให้เกิดการไหลและการขนส่งตะกอนใน 2 ทิศทาง ขึ้นอยู่กับระดับน้ำขึ้นน้ำลงและระดับน้ำทะเล การศึกษาพฤติกรรมของตะกอนบริเวณนี้มีความสำคัญต่อการแก้ปัญหาในด้านการขนส่งทางน้ำ และการบริหารจัดการน้ำ ข้อมูลทางชลศาสตร์ถูกเก็บวัดโดย Acoustic Doppler Current Profiler, Echo Sounder และเครื่องมือวัดตะกอนแขวนลอย บริเวณบริเวณแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2558 ถึง พฤษภาคม 2559 ผลของการศึกษา พบว่าขนาดตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 0.027 มม. ความเร็วการตกของตะกอนแขวนลอยเท่ากับ 21.31 มม./วินาที และลักษณะน้ำเกิดน้ำตายมีผลต่อพฤติกรรมของตะกอนแขวนลอย สมการอัตราการขนส่งตะกอน สามารถแสดงในรูปแบบสมการเส้นตรง 3 ตัวแปร $q = (9 \times 10^{-5})Q - 0.0002D$ ในกรณีน้ำเกิด และ $q = (4 \times 10^{-5})Q + 0.0032D$ ในกรณีน้ำตาย ซึ่งมีค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.6484 และ 0.6007 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ตะกอนแขวนลอย / อัตราการขนส่งตะกอน / น้ำขึ้นน้ำลง / ปากแม่น้ำ / แม่น้ำเจ้าพระยา

ABSTRACT

The Lower Chao Phraya River is area that is affected by changing of sea level resulting in two directions of flow and sediment transports depending on the upstream water levels and sea water levels. The study of sediment behavior in this area is important for solving problem about water transportation and water management. Hydraulics data were collected by Acoustic Doppler Current Profiler, echo sounder and suspended sediment equipment in the Lower Chao Phraya River between November 2015 and May 2016. It is found that the diameter of suspended sediment is 0.027 mm. Sediment settling velocity is 21.31 mm/s. Spring tide and neap tide are the most effect to behavior of suspended sediment. Sediment load equations are presented by three variable linear equation $q = (9 \times 10^{-5})Q - 0.0002D$ in spring tide and $q = (4 \times 10^{-5})Q + 0.0032D$ in neap tide. R^2 are equal 0.6484 and 0.6007 respectively.

KEYWORDS: Suspended sediment / sediment Load / Tidal / Estuary / Chao Phraya River.

Natdanai Thammapraserdee¹ and Chaiyuth Chinnarasri²

Graduate students¹, Professor² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thung Khru, Bangkok 10140

1. บทนำ

สันดอนปากแม่น้ำเจ้าพระยา จังหวัดสมุทรปราการ ที่เกิดจากตะกอนที่ถูกพัดพามาจากต้นน้ำ ทั้งแม่น้ำเจ้าพระยาและแม่น้ำสาขา แล้วค่อยๆ ตกสู่ท้ายน้ำบริเวณนี้เป็นอุปสรรคขัดขวางการระบายน้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยาลงสู่ทะเลอ่าวไทย จึงจำเป็นต้องมีการขุดลอกบริเวณสันดอนปากแม่น้ำขึ้น สำหรับการขุดลอกร่องน้ำตรงกลางระหว่างร่องน้ำทางเข้าท่าเรือกรุงเทพ ร่องที่ 1 และทางเข้าท่าเรือกรุงเทพ ร่องที่ 2 บริเวณสันดอนปากแม่น้ำเจ้าพระยานั้นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายน้ำ ประกอบกับช่วยบรรเทาและลดปัญหาอุทกภัยได้ นอกจากนี้ยังเป็นประโยชน์ต่อการเดินเรือลากจูงขนส่งสินค้าและเรือขนาดใหญ่ด้วย [1]

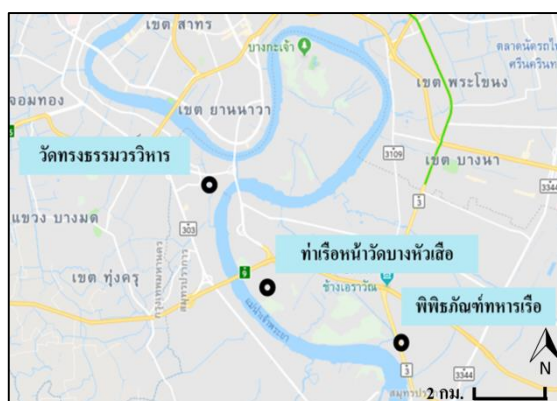
ปากแม่น้ำเจ้าพระยาจังหวัดสมุทรปราการ เป็นแหล่งการเกษตรที่สำคัญ รู้จักกันดีว่าเป็นแหล่งปลูกข้าว รวมถึงเป็นแหล่งประมงทั้งสัตว์น้ำจืดและน้ำเค็ม ทั้งยังเป็นเส้นทางการเดินเรือ การนำเข้าและส่งออกสินค้า ที่สำคัญ รวมถึงโรงไฟฟ้าพระนครใต้ที่ผลิตไฟฟ้าจากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ จำเป็นต้องอาศัยการลดอุณหภูมิจากการสูบน้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยาเข้าไปในระบบเพื่อได้ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด ยังประสบกับปัญหาตะกอนแขวนลอยที่เข้าไปรบกวนการทำงานระบบ จนจำเป็นต้องทำการขุดลอกเพื่อแก้ปัญหา [2]

ความรู้และความเข้าใจเรื่องพฤติกรรมของตะกอนในแม่น้ำเจ้าพระยามีความสำคัญต่อศึกษาเพื่อให้นำความรู้มาใช้แก้ปัญหาได้อย่างถูกต้อง ทั้งทางคมนาคมทางน้ำ การเชิงบูรณาการด้านการบริหารจัดการน้ำ [3] ซึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้นพื้นที่ที่น่าสนใจ คือ แม่น้ำเจ้าพระยาที่ติดกับปากแม่น้ำ จังหวัดสมุทรปราการที่ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเล ทำให้เกิดน้ำไหลของน้ำใน 2 ทิศทาง ส่งผลให้บริเวณนี้เป็นจุดที่เกิดการสะสมตัวของตะกอนที่พัดมาจากต้นน้ำและท้ายน้ำ

2. การเก็บข้อมูลและเครื่องมือที่ใช้

2.1 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่บริเวณท่าเรือหน้าวัดบางหัวเสือ ตำบลบางหัวเสือ อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ (รูปที่ 1) เป็นพื้นที่บริเวณใกล้เคียงปากแม่น้ำเจ้าพระยาที่ติดกับอ่าวไทยที่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเล ประกอบกับบริเวณนี้มีความโค้งเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับเส้นทางต้นน้ำที่คดโค้งมาก (วัดทรงธรรมวรวิหาร) และทางท้ายน้ำที่คดโค้งมากเช่นกัน (พิพิธภัณฑสถานเรือ) บริเวณนี้จึงถูกรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วกระแสน้ำที่ได้รับผลกระทบมาจากการเลี้ยวโค้งของลำน้ำน้อย จึงเหมาะกับการเก็บข้อมูลทางชลศาสตร์ ที่ได้ผลกระทบจากน้ำขึ้นน้ำลงโดยมีปัจจัยอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องน้อยที่สุด



รูปที่ 1 แผนที่พื้นที่ศึกษา

ในการเก็บข้อมูลภาคสนามนั้น จะทำการเก็บทั้งหมด 6 ครั้ง โดยครอบคลุมทั้งฤดูน้ำมาก น้ำปานกลาง และน้ำน้อย รวมถึงช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วันที่เก็บข้อมูลทางชลศาสตร์

รอบ	วันที่ เดือน ปี	ฤดูน้ำ	ลักษณะน้ำ	ระยะเวลาเก็บ (ชม.)	จำนวนข้อมูล (ชุด)
1	14 – 15 พ.ย. 2558	มาก	เกิด	19	10
2	12 – 13 ธ.ค. 2558	มาก	เกิด	14	7
3	19 – 20 ธ.ค. 2558	มาก	ตาย	19	14
4	9 – 10 ม.ค. 2559	ปานกลาง	เกิด	14	10
5	12 – 13 มี.ค. 2559	น้อย	ตาย	19	10
6	2 – 3 เม.ย. 2559	น้อย	เกิด	14	6

2.2 การเก็บข้อมูลความลึกของน้ำ

เครื่องมือ Echo Sounder ประกอบไปด้วย Pulse Generator มีหน้าที่ผลิตพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (CW Electromagnetic Signal) พลังงานนี้จะถูกส่งไปที่ Transducer ซึ่งทำหน้าที่ส่งผ่านคลื่นเสียงแบบ Pulse ลงน้ำในแนวดิ่ง ลำคลื่นของเสียงที่ส่งมีลักษณะรูปกรวย (Cone) เมื่อเสียงกระทบพื้นท้องทะเลก็จะสะท้อนกลับมายังเครื่องมือในรูปแบบเวลา แล้วเครื่องมือจะแปลงเป็นความลึก โดยจะแสดงผลเป็นตัวเลขเป็นฟุต หรือ เมตร (รูปที่ 2) ในการเก็บวัดความลึกของน้ำ ด้วยการจุ่มหัว Transducer (หัวสีดำที่มีปลายสายต่อไปถึง Echo Sounder หรือ หัวสีเหลืองที่ปลายเครื่อง Echo Sounder) ลึกลงไปในน้ำ แล้วทำการกดบันทึกความลึกระดับน้ำ



รูปที่ 2 Echo Sounder [4]

2.3 การเก็บข้อมูลความเร็วกระแสน้ำ

เครื่องมือ Acoustic Doppler Current Profiler (River Surveyor M9) เป็นเครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำที่ใช้ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler) [5] ซึ่งใช้ความถี่ของคลื่นเสียงที่ส่งออกไป และสะท้อนกลับมาในทิศทางขนานกับทิศทางคลื่นเสียง ซึ่งประกอบไปด้วยหัวส่งสัญญาณคลื่นความถี่ (Transducer) จำนวน 3 หรือ 4 หัว เพื่อใช้ในการวัดความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเล็กๆ ที่ไหลมาตามน้ำ (รูปที่ 3)

ในการใช้งาน เริ่มจากการเตรียมอุปกรณ์ให้เรียบร้อยด้วยการตั้งค่าตำแหน่ง (RTK-GPS) ที่จะทำการเก็บวัดความเร็วกระแสน้ำ ที่ถูกต้องผ่านโปรแกรม Software ของ River Surveyor M9 นั่นก็คือ Flow pack Software – Version 1.21 และ River Surveyor Live (RSL) / River Surveyor Live หลังจากนั้นก็ทำการเก็บวัดด้วยการใช้เรือลากไปในบริเวณตำแหน่งที่ต้องการเก็บวัดค่าความเร็วกระแสน้ำ แล้วทำการบันทึกความเร็วกระแสน้ำ (รูปที่ 4)



รูปที่ 3 River Surveyor M9 [6]



รูปที่ 4 การเก็บวัดค่าความเร็วกระแสน้ำ

2.4 การเก็บข้อมูลความเข้มข้นตะกอน

เครื่องมือเก็บวัดตะกอนแขวนลอยได้แนวคิดมาจาก Delft Bottle ที่ถูกพัฒนามาจาก Delft Hydraulics Laboratory มีลักษณะเป็นขวดปลายเรียวเล็ก [7] โดยหลักการของเครื่องมือ น้ำจะไหลเข้าทางปากเครื่องมือภายใต้สภาวะแรงดันต่ำที่ด้านท้ายของขวดทำให้ความเร็วการไหลลดลงอย่างรวดเร็ว ตะกอนจึงตกที่ส่วนล่างของเครื่องมือ น้ำจะไหลผ่านส่วนนี้ไป และไหลออกสู่ด้านท้ายของเครื่องมือ (รูปที่ 5)

ชุดเครื่องมือนี้ จะทำงานควบคู่กับอุปกรณ์เสริมโครงชุดแขวนพร้อมกับชุดรอกสำหรับลากเครื่องมือขึ้นและลงในแนวดิ่ง เพื่อใช้เก็บตะกอนแขวนลอยที่แต่ละระดับความลึก ซึ่งในการเก็บข้อมูลตะกอน จะทำการเก็บเป็นระยะเวลา 5 นาที เพื่อคำนวณหาความเข้มข้นตะกอนต่อไป



รูปที่ 5 เครื่องมือเก็บวัดความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย

3. ผลการศึกษา

3.1 ขนาดและความเร็วการตก

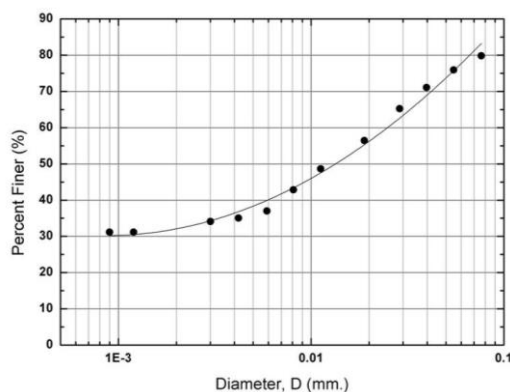
ตัวอย่างตะกอนแขวนลอยที่ถูกเก็บมาจากพื้นที่ศึกษาถูกนำมาทดสอบหาขนาดละเอียดของตะกอนแขวนลอย (รูปที่ 6) ด้วยวิธี Hydrometer Analysis [8-9] โดยใช้สมการคำนวณหาขนาดตะกอนเฉลี่ย

$$D_m = \sum_{i=1}^n (p_i D_i) \quad [1]$$

ผลของตัวอย่างได้ขนาดตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 0.027 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการนำมาวิเคราะห์ใช้สมการหาความเร็วการตกของตะกอนแขวนลอย [7]

$$w = \left(1.143 g D_s \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right)^{1/2} \quad [2]$$

ในการคำนวณได้ค่าเท่ากับ 21.31 มม./วินาที



รูปที่ 6 ขนาดผลของตะกอนแขวนลอย

3.2 ลักษณะทั่วไปของการกระจายตัวของตะกอน

ข้อมูลทางชลศาสตร์ที่ได้จากการเก็บวัดในภาคสนามถูกเก็บวัดในรูปแบบความเข้มข้นตะกอนที่ระดับความลึกต่าง ๆ และความเร็วกระแสน้ำ โดยการเก็บวัดนั้นในแต่ละรอบจะเก็บครอบคลุมตั้งแต่ระดับน้ำทะเลสูงสุด ระดับน้ำทะเลกำลังลง ระดับน้ำทะเลต่ำสุด และระดับน้ำทะเลกำลังขึ้น เพื่อให้เห็นผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำทะเลต่อทิศทางความเร็วกระแสน้ำและทิศทางความเข้มข้นตะกอนมากยิ่งขึ้น ซึ่งตัวอย่างข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์สามารถจำแนกได้ตามลักษณะน้ำ ได้แก่ กรณีน้ำเกิด และน้ำตาย

ตัวอย่างช่วงระดับน้ำทะเลขึ้นสูงสุดกรณีน้ำเกิด (รูปที่ 7A) ในช่วงเวลาประมาณ 18.00 น. ของวันที่ 14 พ.ย. 2558 ระดับน้ำทะเลจะสูงกว่าระดับน้ำในแม่น้ำ ส่งผลให้น้ำเค็มบางส่วนถูกลำเข้ามาในแม่น้ำ โดยสังเกตเห็นว่าทิศทางของความเร็วกระแสน้ำไหลจากท้ายน้ำสู่ต้นน้ำในช่วงอัตราส่วนความลึกที่ 0.5 ถึง 0.6 ส่วนความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย โดยปกติจะมากในบริเวณใกล้ท้องน้ำ และลดน้อยลงที่บริเวณผิวน้ำ แต่เมื่อมีทิศทางของกระแสน้ำมาเกี่ยวข้อง จึงทำให้ความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในช่วงอัตราส่วนความลึกที่ 0.4 ถึง 0.9 มีขนาดใกล้เคียงกัน เนื่องจากการต้านกันของทิศทางน้ำใน 2 ทิศทาง สำหรับช่วงที่น้ำทะเลลำเข้ามา ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยบริเวณนั้นก็จะมีความเข้มข้นด้วย สำหรับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยจะอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.05 ก./ลบ.ม.

ตัวอย่างช่วงระดับน้ำทะเลกำลังลงกรณีน้ำเกิด (รูปที่ 7 B) ในช่วงเวลาประมาณ 22.00 น. ของวันที่ 14 พ.ย. 2558 ระดับน้ำทะเลลดลงอย่างรวดเร็ว ลักษณะทั่วไปของการกระจายความเร็วการไหล คือ ความเร็วกระแสน้ำจะมากที่สุดในช่วงใกล้ผิวน้ำ และช้าที่สุดในช่วงท้องน้ำ ส่วนความเข้มข้นตะกอนเป็นไปตามปกติคือ มีความเข้มข้นมากที่บริเวณใกล้ท้องน้ำ และลดลงตามความลึกที่น้อยลง ซึ่งค่าแนวโน้มความเข้มข้นตะกอนที่อัตราส่วนความลึก 0.2 ถึง 0.4 ที่มีค่าความเข้มข้นตะกอนมากน้อยสลับกันไป เนื่องมาจากความเร็วกระแสน้ำที่พัดไหลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยความเร็วสูงสุดถึง 0.8 ม./วินาที ทำให้ตะกอนฟุ้งกระจาย สำหรับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยจะอยู่ในช่วง 0.05 ถึง 0.08 ก./ลบ.ม.

ตัวอย่างช่วงระดับน้ำทะเลลดต่ำสุดกรณีน้ำเกิด (รูปที่ 7C) ในช่วงเวลาประมาณ 3.00 น. ของวันที่ 15 พ.ย. 2558 น้ำในแม่น้ำไหลลงทะเลอย่างต่อเนื่อง ไม่ได้รุนแรงเหมือนช่วงน้ำกำลังลง ความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 0.6 ม./วินาที ส่วนตะกอนแขวนลอยก็จะมากที่สุด

บริเวณท้องน้ำ และลดลงที่บริเวณฝวน้ำ ปริมาณตะกอนอยู่ในช่วง 0.30 ถึง 0.65 ก./ลบ.ม. ซึ่งค่อนข้างมากกว่ากรณีอื่น เนื่องจากระดับน้ำทะเลต่ำ และความลึกของน้ำในแม่น้ำน้อย จึงทำให้ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยมากเมื่อเทียบกับช่วงที่มีน้ำในแม่น้ำมาก

ตัวอย่างช่วงระดับน้ำทะเลกำลังขึ้นกรณีน้ำเกิด (รูปที่ 7 D) ในช่วงเวลาประมาณ 5.00 น. ของวันที่ 15 พ.ย. 2558 เป็นกรณีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำจากน้อยเป็นมาก อย่างรวดเร็ว จากการที่ระดับน้ำในแม่น้ำค่อนข้างต่ำ จึงทำให้แนวโน้มความเร็วกระแสน้ำไหลไปในทิศทางตรงกันข้ามตั้งแต่ใกล้ฝวน้ำจนถึงเกือบท้องน้ำ ส่วนความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยอยู่ในช่วง 0.14 ถึง 0.25 ก./ลบ.ม. สำหรับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยยังเป็นรูปแบบปกติที่จะมากในช่วงท้องน้ำเนื่องจากการผลักดัน ของทะเลที่น้ำตะกอนย้อนกลับเข้ามาในแม่น้ำ ที่บริเวณ ส่วนล่างของร่องน้ำ

ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย กรณีระดับน้ำทะเลสูงสุดและน้ำทะเลกำลังจะลง อยู่ในช่วง 0.05 ถึง 0.07 ก./ลบ.ม. ซึ่งแตกต่างจากกรณีน้ำทะเลต่ำสุดอย่างเห็นได้ชัดซึ่งมีค่า 0.62 ก./ลบ.ม. เนื่องมาจากระดับน้ำทะเลที่สูง ปริมาณน้ำจึงมาก ความเข้มข้น ของตะกอนแขวนลอย จึงต่ำกว่า กรณีที่น้ำทะเลลดต่ำ ปริมาณน้ำในแม่น้ำน้อย อย่างชัดเจน

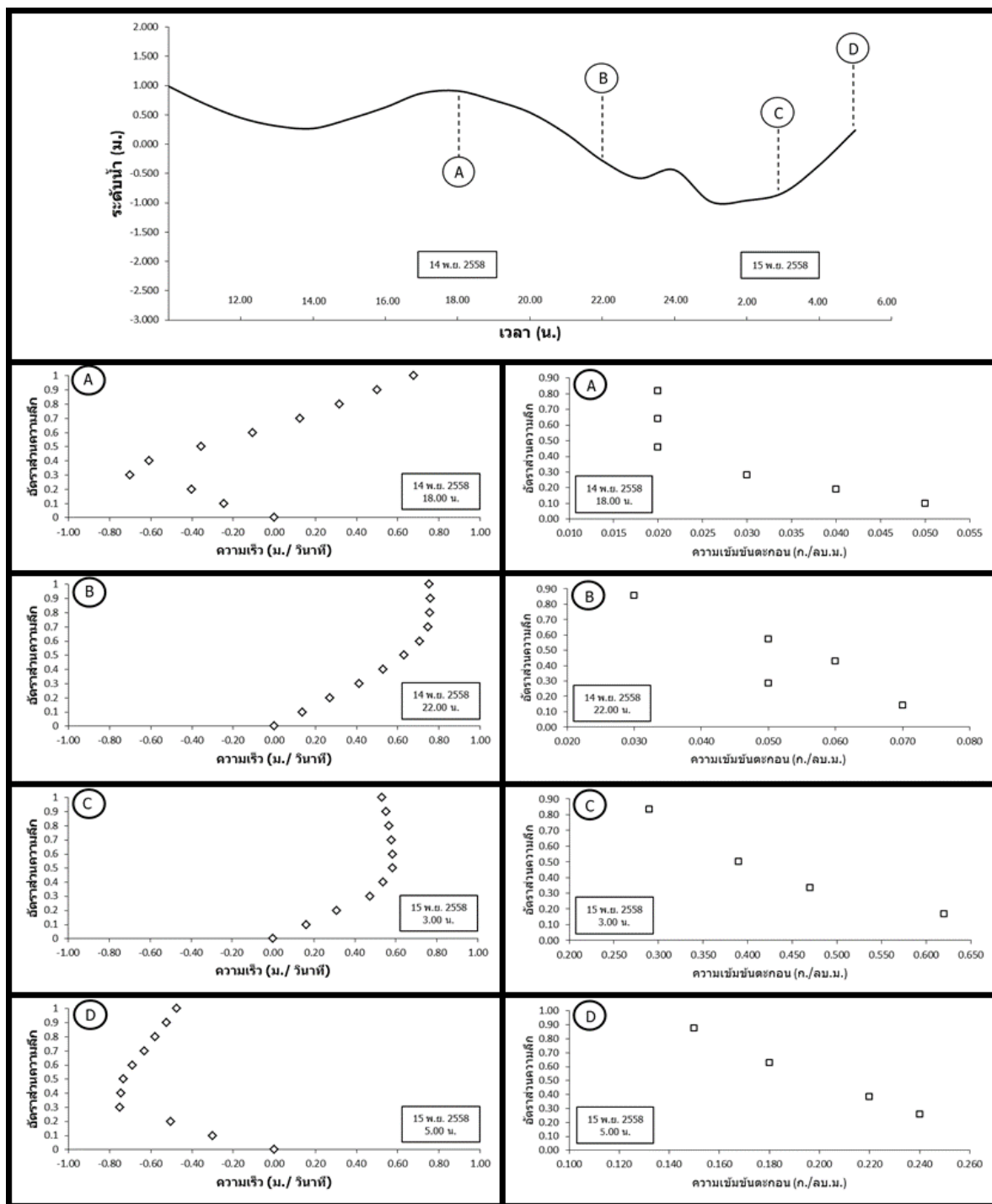
ตัวอย่างช่วงระดับน้ำทะเลกำลังขึ้นกรณีน้ำตาย (รูปที่ 8A) ในช่วงเวลาประมาณ 20.00 น. ของวันที่ 19 ธ.ค. 2558 เป็นการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้น แต่เนื่องจากเป็นช่วงน้ำตายการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำจึงน้อย จึงทำให้แนวโน้มกระแสน้ำไหลยังไหลจากต้นน้ำไปสู่น้ำท้าย แต่ก็ยังมีบางส่วนที่ไม่สามารถไหลได้อย่างเต็มที่ประมาณอัตราส่วนความลึกที่ 0.4 ถึง 1 สำหรับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยอยู่ในช่วง 0.05 ถึง 0.085 ก./ลบ.ม. สำหรับแนวโน้มความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยยังเป็นรูปแบบปกติที่ตะกอนจะมากในช่วงบริเวณท้องน้ำ และลดลงช่วงฝวน้ำ พิจารณาที่อัตราส่วนความลึกที่ 0.85 พบว่าความเข้มข้นตะกอนสูงขึ้นมาก เพราะว่าเป็นขณะที่ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น ย่อมเกิดการไหลใน 2 ทิศทางที่ต้านกัน ทำให้ตะกอนบางส่วนไปกระจุกในส่วนที่น้ำทะเลพยายามดันเข้าสู่แม่น้ำ

ตัวอย่างช่วงระดับน้ำทะเลขึ้นสูงสุดกรณีน้ำตาย (รูปที่ 8 B) ในช่วงเวลาประมาณ 23.00 น. ของวันที่ 19 ธ.ค. 2558 ระดับน้ำทะเลจะสูงกว่าระดับน้ำในแม่น้ำ ความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยเป็นไปตามปกติ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.05 ก./ลบ.ม. แต่ก็มีค่าช่วงอัตราส่วนความลึกที่ 0.35 ที่ความเข้มข้นตะกอนสูงขึ้นจากอิทธิพลของการที่น้ำทะเลพยายามดันเข้าสู่แม่น้ำ

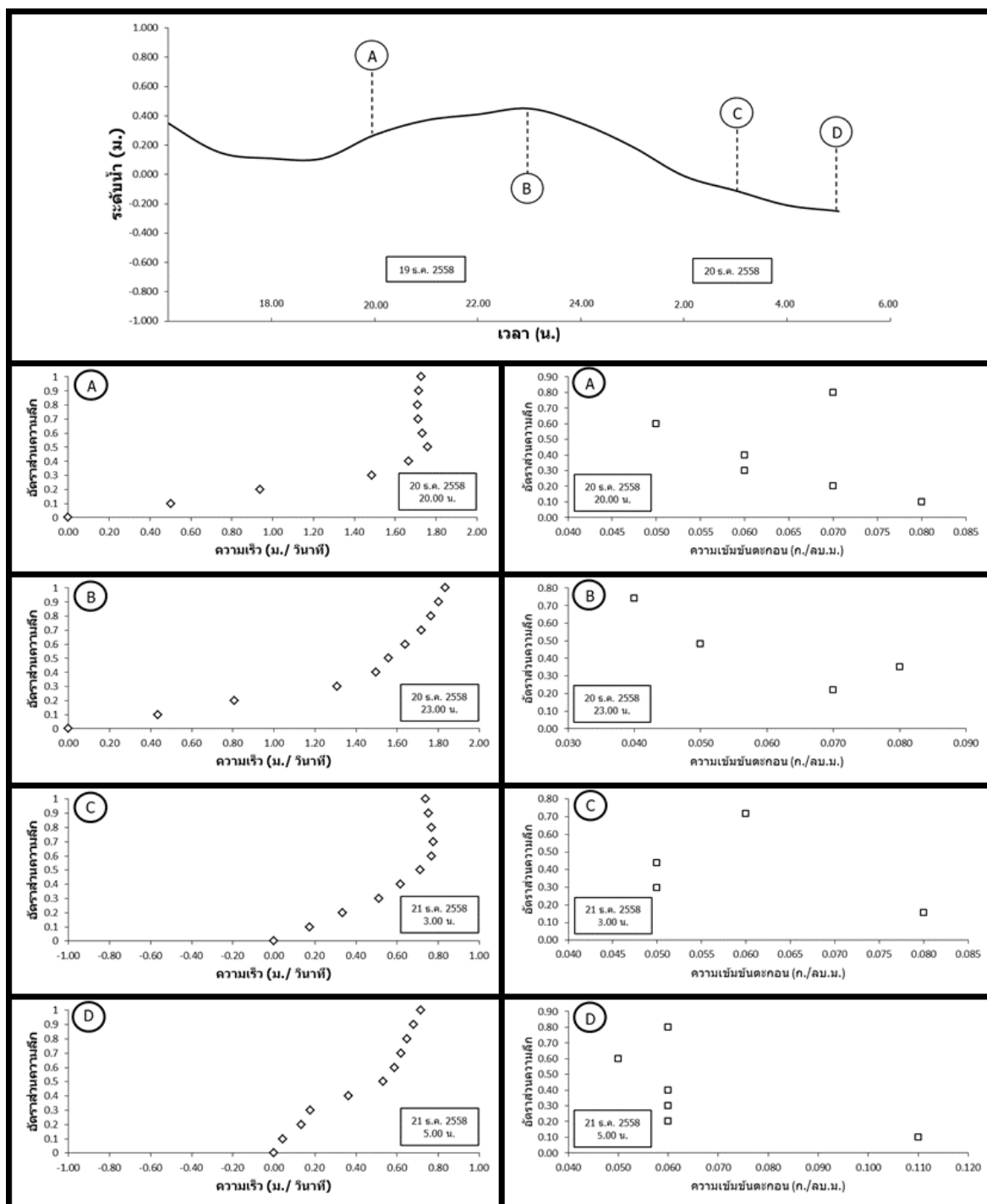
ตัวอย่างช่วงระดับน้ำทะเลกำลังลงกรณีน้ำตาย (รูปที่ 8C) ในช่วงเวลาประมาณ 3.00 น. ของวันที่ 20 ธ.ค. 2558 ระดับน้ำทะเลลดลงอย่างรวดเร็ว ความเข้มข้นตะกอนนั้นก็จะเป็นไปตามปกติ และอยู่ในช่วง 0.045 ถึง 0.08 ก./ลบ.ม. แต่ก็มีค่าช่วงฝวน้ำในอัตราส่วนความลึกที่ 0.7 ที่ความเข้มข้นตะกอนสูงขึ้นมาก เพราะว่าเป็นขณะที่ระดับน้ำทะเลลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ตะกอนแขวนลอยถูกความเร็วการไหลของน้ำที่พัดพาอย่างรวดเร็วจนฟุ้งกระจาย

ตัวอย่างช่วงระดับน้ำทะเลลดต่ำสุดกรณีน้ำตาย (รูปที่ 8D) ในช่วงเวลาประมาณ 5.00 น. ของวันที่ 20 ธ.ค. 2558 น้ำในแม่น้ำไหลลงทะเลอย่างต่อเนื่อง ส่วนตะกอนแขวนลอย เป็นปกติอยู่ในช่วง 0.05 ถึง 0.11 ก./ลบ.ม.

โดยความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยสูงสุดทุกกรณีทั้งระดับน้ำทะเลสูงสุด ระดับน้ำทะเลกำลังลง ระดับน้ำทะเลต่ำสุด และระดับน้ำทะเลกำลังขึ้น อยู่ในช่วง 0.08 ถึง 0.11 ก./ลบ.ม. ซึ่งมีค่าแทบใกล้เคียงกัน เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลที่น้อย จึงไม่ค่อยมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นตะกอนในแม่น้ำเท่าใดนัก



รูปที่ 7 ลักษณะทั่วไปของการกระจายตัวของความเร็วและตะกอน กรณีน้ำเกิด
A: กรณีน้ำขึ้นสูงสุด B: กรณีน้ำกำลังลง C: กรณีน้ำลงต่ำสุด D: กรณีน้ำกำลังขึ้น

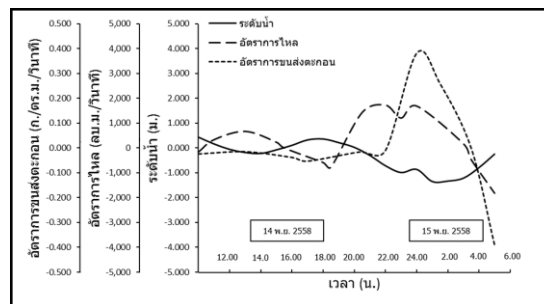


รูปที่ 8 ลักษณะทั่วไปของการกระจายตัวของความเร็วและตะกอนช่วงน้ำตาย
 A: กรณีน้ำกำลังขึ้น B: กรณีน้ำขึ้นสูงสุด C: กรณีน้ำกำลังลง D: กรณีน้ำลงต่ำสุด

3.3 แนวโน้มความสัมพันธ์ของตัวแปรทางชลศาสตร์

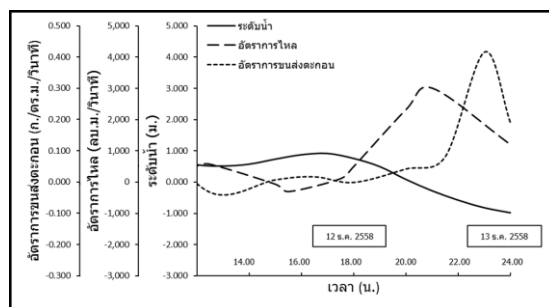
ข้อมูลทางชลศาสตร์ที่ได้จากการลงภาคสนาม ได้แก่ อัตราการขนส่งตะกอน อัตราการไหล และระดับน้ำ ถูกนำมาพิจารณาถึงแนวโน้มและความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นภายใต้อิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง

การเก็บข้อมูลทางชลศาสตร์ รอบที่ 1 วันที่ 14 พ.ย. 2558 – 15 พ.ย. 2558 เป็นช่วงฤดูน้ำมาก ทำให้มีปริมาณน้ำจำนวนมากไหลจากต้นน้ำสู่ท้ายน้ำ โดยมีอัตราการไหลจากต้นน้ำถึงท้ายน้ำสูงถึง 2,408 ลบ.ม./วินาที ในช่วง 22.00 น. ของวันที่ 14 พ.ย. 2558 (รูปที่ 9) ประกอบกับเป็นช่วงน้ำเกิด ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำสูงสุดและต่ำสุดค่อนข้างมาก ต่างกันถึง 1.97 เมตร ในช่วง 5.00 น. ของวันที่ 15 พ.ย. 2558 จะเห็นได้ว่าอัตราการขนส่งตะกอนจะค่อนข้างคงที่ อยู่ในช่วง -0.01 ถึง 0.04 ก./ตร.ม./วินาที และจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ในช่วง 22.00 น. ของวันที่ 14 พ.ย. 2558 จนมีอัตราการขนส่งตะกอนสูงถึง 0.47 ก./ตร.ม./วินาที ในช่วง 1.00 น. ของวันที่ 15 พ.ย. 2558 ซึ่งเป็นช่วงที่ระดับน้ำลดลงกว่า 1.97 เมตร ประกอบกับที่อัตราการไหลของน้ำในแม่น้ำสามารถไหลลงสู่ปากแม่น้ำเป็นจำนวนมาก ในช่วงเวลาเดียวกันกับที่อัตราการขนส่งตะกอนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากตะกอนเพิ่มขึ้นแล้วก็ลดลงอย่างรวดเร็ว ไปจนถึง -0.38 ก./ตร.ม./วินาที ในช่วง 5.00 น. ของวันที่ 15 พ.ย. 2558 ซึ่งเป็นช่วงเวลาเดียวกับอัตราการไหลที่เพิ่มสูงขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม และระดับน้ำสูงกว่าเดิม 1.22 เมตร



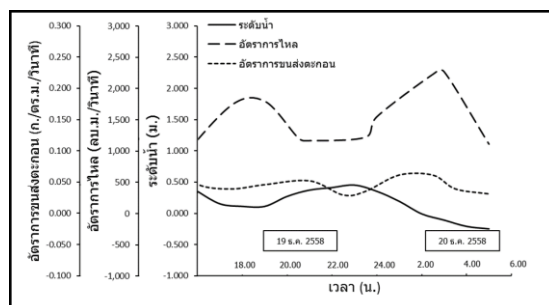
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลทางชลศาสตร์กับเวลา รอบที่ 1

การเก็บข้อมูลทางชลศาสตร์ รอบที่ 2 วันที่ 12 ธ.ค. 2558 – 13 ธ.ค. 2558 เป็นช่วงฤดูน้ำมาก ทำให้มีปริมาณน้ำจำนวนมากไหลจากต้นน้ำสู่ท้ายน้ำ โดยมีอัตราการไหลจากต้นน้ำถึงท้ายน้ำสูงถึง 3,011 ลบ.ม./วินาที ในช่วง 21.00 น. ของวันที่ 12 ธ.ค. 2558 (รูปที่ 10) ประกอบกับเป็นช่วงน้ำเกิด ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำสูงสุดและต่ำสุดค่อนข้างมาก ต่างกันถึง 1.89 เมตร ทำให้เกิดอัตราการไหลในทิศทางตรงกันข้ามซึ่งมีอัตราการไหล -309 ลบ.ม./วินาที ในช่วง 5.00 น. ของวันที่ 13 ธ.ค. 2558 จะเห็นได้ว่าอัตราการขนส่งตะกอนจะค่อนข้างคงที่ อยู่ในช่วง -0.03 ถึง 0.04 ก./ตร.ม./วินาที และจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ในช่วง 18.00 น. ของวันที่ 12 ธ.ค. 2558 จนมีอัตราการขนส่งตะกอนสูงถึง 0.42 ก./ตร.ม./วินาที ในช่วง 23.00 น. ของวันที่ 12 ธ.ค. 2558 ซึ่งเป็นช่วงที่ระดับน้ำลดลงกว่า 1.57 เมตร ประกอบกับที่อัตราการไหลน้ำในแม่น้ำสามารถไหลลงสู่ปากแม่น้ำเป็นจำนวนมาก ในช่วงเวลาเดียวกันกับที่อัตราการขนส่งตะกอนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากตะกอนเพิ่มขึ้นแล้วก็ลดลงอย่างรวดเร็ว ไปจนถึง 0.24 ก./ตร.ม./วินาที ในช่วง 2.00 น. ของวันที่ 13 ธ.ค. 2558 ซึ่งเป็นช่วงเวลาเดียวกับอัตราการไหลที่ลดลง และระดับน้ำค่อนข้างคงที่



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลทางชลศาสตร์กับเวลา รอบที่ 2

การเก็บข้อมูลทางชลศาสตร์ รอบที่ 3 วันที่ 19 ธ.ค. 2558 – 20 ธ.ค. 2558 เป็นช่วงฤดูน้ำมาก ทำให้มีปริมาณน้ำจำนวนมาก ไหลจากต้นน้ำสู่ท้ายน้ำ โดยมีอัตราการไหลจากต้นน้ำถึงท้ายน้ำสูงถึง 2,269 ลบ.ม. ในช่วง 3.00 น. ของวันที่ 20 ธ.ค. 2558 (รูปที่ 11) โดยเป็นช่วงน้ำตาช ทำให้การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำสูงสุดและต่ำสุดค่อนข้างน้อย ต่างกันเพียง 0.7 เมตร จะเห็นได้ว่าอัตราการขนส่งตะกอนจะค่อนข้างคงที่ อยู่ในช่วง 0.04 ถึง 0.05 ก./ตร.ม./วินาที และจะเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ในช่วง 21.00 น. ของวันที่ 19 ธ.ค. 2558 จนมีอัตราการขนส่งตะกอนลดลงเหลือ 0.03 ก./ตร.ม./วินาที ในช่วง 22.30 น. ของวันที่ 20 ธ.ค. 2558 ซึ่งเป็นช่วงที่ระดับน้ำเพิ่ม 0.34 เมตร ประกอบกับที่อัตราการไหลน้ำในแม่น้ำสามารถไหลลงสู่ปากแม่น้ำเพียงเล็กน้อย ในช่วงเวลาเดียวกันกับที่อัตราการขนส่งตะกอนลดลง หลังจากนั้นก็เพิ่มขึ้นไปจนถึง 0.06 ก./ตร.ม./วินาที ในช่วง 2.30 น. ของวันที่ 20 ธ.ค. 2558 ซึ่งเป็นช่วงเวลาเดียวกับอัตราการไหลที่เพิ่มสูงขึ้น และระดับน้ำก็ลดลงกว่าเดิม 0.34 เมตร

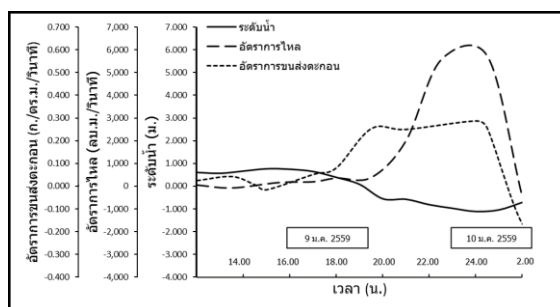


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลทางชลศาสตร์กับเวลา รอบที่ 3

การเก็บข้อมูลทางชลศาสตร์ รอบที่ 4 วันที่ 9 ม.ค. 2559 – 10 ม.ค. 2559 เป็นช่วงฤดูน้ำปานกลาง ทำให้มีปริมาณน้ำค่อนข้างมาก ไหลจากต้นน้ำสู่ท้ายน้ำ โดยมีอัตราการไหลจากต้นน้ำถึงท้ายน้ำสูงถึง 2,877 ลบ.ม./วินาที ในช่วง 0.00 น. ของวันที่ 10 ม.ค. 2559 (รูปที่ 12) ประกอบกับเป็นช่วงน้ำเกิด

การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำสูงสุดและต่ำสุดค่อนข้างมาก ต่างกันถึง 1.89 เมตร การไหลในทิศทางตรงกันข้ามจึงมีอัตราการไหลสูงถึง -1,641 ลบ.ม./วินาที ในช่วง 2.00 น. ของวันที่ 10 ม.ค. 2559 จะเห็นได้ว่าอัตราการขนส่งตะกอนจะค่อนข้างคงที่ อยู่ในช่วง -0.008 ถึง 0.038 ก./ตร.ม./วินาที และจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ในช่วง 19.30 น. ของวันที่ 9 ม.ค. 2559 จนมีอัตราการ

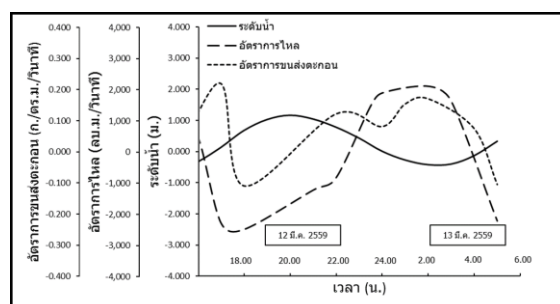
ขนส่งตะกอนสูงถึง 0.57 ก./ตร.ม./วินาที ในช่วง 0.30 น. ของวันที่ 10 มิ.ค. 2559 ซึ่งเป็นช่วงที่ระดับน้ำลดลงกว่า 1.2 เมตร ประกอบกับที่อัตราการไหลน้ำในแม่น้ำสามารถไหลลงสู่ปากแม่น้ำเป็นจำนวนมาก ในช่วงเวลาเดียวกันกับที่อัตราการขนส่งตะกอนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากตะกอนเพิ่มขึ้นแล้วก็ลดลงอย่างรวดเร็ว ไปจนถึง -0.05 ก./ตร.ม./วินาที ในช่วง 2.00 น. ของวันที่ 10 มิ.ค. 2559 ซึ่งเป็นช่วงเวลาเดียวกับอัตราการไหลที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมากในทิศทางตรงกันข้าม และระดับน้ำก็สูงขึ้นกว่าเดิมกว่า 0.4 เมตร



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลทางชลศาสตร์กับเวลา รอบที่ 4

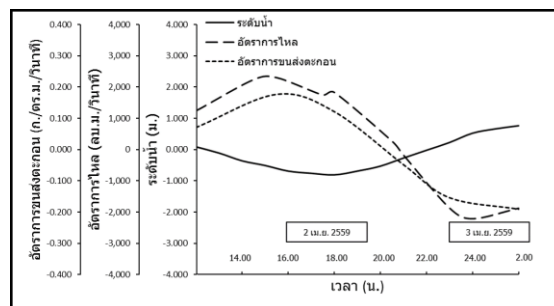
การเก็บข้อมูลทางชลศาสตร์ รอบที่ 5 วันที่ 12 มิ.ค. 2559 – 13 มิ.ค. 2559 เป็นช่วงฤดูน้ำน้อย ทำให้มีปริมาณน้ำจำนวนไม่มาก ไหลจากต้นน้ำสู่ท้ายน้ำ โดยมีอัตราการไหลจากต้นน้ำถึงท้ายน้ำเท่ากับ 2,108 ลบ.ม./วินาที ในช่วง 2.30 น. ของวันที่ 13 มิ.ค. 2559 (รูปที่ 13) ประกอบกับเป็นช่วงน้ำตาย ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำสูงสุดและต่ำสุดค่อนข้างน้อย ต่างกันเพียง 1.58 เมตร

การไหลในทิศทางตรงกันข้ามมีอัตราการไหลเท่ากับ -2,490 ลบ.ม./วินาที ในช่วง 18.00 น. ของวันที่ 12 มิ.ค. 2559 จะเห็นได้ว่าอัตราการขนส่งตะกอนจะลดลง ในช่วง 17.00 น. ของวันที่ 12 มิ.ค. 2559 จนมีอัตราการขนส่งตะกอน -0.109 ก./ตร.ม./วินาที ในช่วง 18.00 น. ของวันที่ 12 มิ.ค. 2559 ซึ่งเป็นช่วงที่ระดับน้ำเพิ่มขึ้น 0.54 เมตร หลังจากตะกอนลดลงแล้วก็เพิ่มขึ้น ไปจนถึง 0.171 ก./ตร.ม./วินาที ในช่วง 2.00 น. ของวันที่ 13 มิ.ค. 2559 ซึ่งเป็นช่วงเวลาเดียวกับอัตราการไหลที่เพิ่มสูงขึ้น และระดับน้ำก็ลดลงกว่าเดิมกว่า 1.58 เมตร



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลทางชลศาสตร์กับเวลา รอบที่ 5

การเก็บข้อมูลทางชลศาสตร์ รอบที่ 6 วันที่ 2 เม.ย. 2559 – 3 เม.ย. 2559 เป็นช่วงฤดูน้ำน้อย ทำให้มีปริมาณน้ำจำนวนไม่มาก ไหลจากต้นน้ำสู่ท้ายน้ำ โดยมีอัตราการไหลจากต้นน้ำถึงท้ายน้ำเท่ากับ 2,306 ลบ.ม./วินาที ในช่วง 15.30 น. ของวันที่ 2 เม.ย. 2559 (รูปที่ 14) ประกอบกับเป็นช่วงน้ำเกิด ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำสูงสุดและต่ำสุดค่อนข้างมาก ต่างกัน 1.58 เมตร การไหลในทิศทางตรงกันข้ามจึงมีอัตราการไหลเท่ากับ -2,209 ลบ.ม./วินาที ในช่วง 0.00 น. ของวันที่ 3 เม.ย. 2559 จะเห็นได้ว่า อัตราการขนส่งตะกอนจะเพิ่ม ในช่วง 12.00 น. ของวันที่ 2 เม.ย. 2559 จนมีอัตราการขนส่งตะกอน 0.177 ก./ตร.ม./วินาที ในช่วง 15.30 น. ของวันที่ 2 เม.ย. 2559 ซึ่งเป็นช่วงที่ระดับน้ำลดลง 0.78 เมตร ทั้งนี้ หลังจากตะกอนเพิ่มขึ้นแล้วก็ลดลง ไปจนถึง -0.191 ก./ตร.ม./วินาที ในช่วง 2.00 น. ของวันที่ 3 เม.ย. 2559 ซึ่งเป็นช่วงเวลาเดียวกับอัตราการไหลที่ลดลง และระดับน้ำก็เพิ่มขึ้นกว่าเดิม 1.58 เมตร



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลทางชลศาสตร์กับเวลา รอบที่ 6

3.4 ตัวแปรทางชลศาสตร์กับทิศทางการไหล

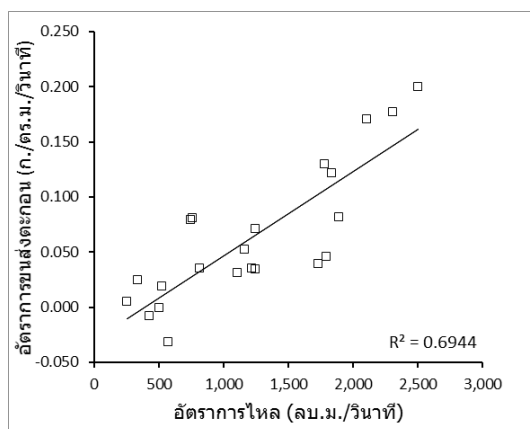
ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางชลศาสตร์ โดยแกน x คือ อัตราการไหล (ลบ.ม./วินาที) และ แกน y คือ อัตราการขนส่งตะกอน (ก./ตร.ม./วินาที) นำมาพิจารณาจากทิศทางการไหลของน้ำในแม่น้ำ ได้แก่ ทิศทางการไหลจากต้นน้ำไปท้ายน้ำ (อัตราการไหลมีค่าเป็นบวก) และทิศทางการไหลจากท้ายน้ำไปต้นน้ำ (อัตราการไหลมีค่าเป็นลบ) เพื่อวิเคราะห์ดูแนวโน้มของตัวแปรทางชลศาสตร์ว่าไปในทิศทางเดียวกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางชลศาสตร์ ทิศทางการไหลจากต้นน้ำไปท้ายน้ำ (รูปที่ 15) พบว่า อัตราการขนส่งตะกอนมีค่าไปในทิศทางเดียวกับอัตราการไหล และเมื่อสร้างเส้นแนวโน้มเส้นตรง พบว่ามีค่า $R^2 = 0.6944$ ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างมาก โดยหากจะสร้างสมการเส้นตรงจากเส้นแนวโน้มนี้เพื่อเอาไปใช้ในการจับความความสัมพันธ์ตัวแปรหรือทำนายค่าก็สามารถทำได้

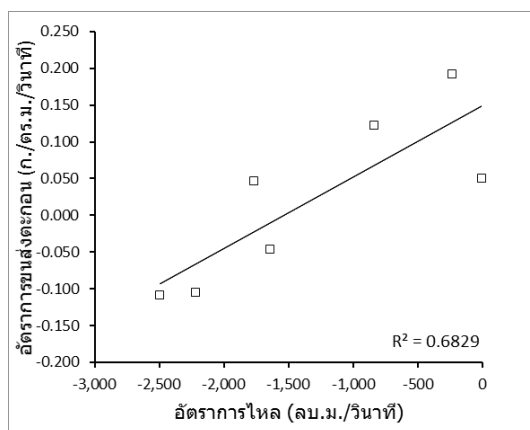
ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางชลศาสตร์ ทิศทางการไหลจากท้ายน้ำไปต้นน้ำ (รูปที่ 16) พบว่า อัตราการขนส่งตะกอนมีค่าไปในทิศทางเดียวกับอัตราการไหลเช่นกัน และเมื่อสร้างเส้นแนวโน้มเส้นตรง พบว่ามีค่า $R^2 = 0.6829$ ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างมากอีกด้วย โดยหากจะสร้างสมการเส้นตรงจากเส้นแนวโน้มนี้ก็สามารถทำได้เช่นกัน

เมื่อพิจารณาจากพื้นที่บริเวณท่าเรือหน้าวัดบางหัวเสือ ตำบลบางหัวเสือ อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ พบว่าพื้นที่ศึกษาเป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเล บริเวณนี้จึงมีการไหลเกิดขึ้นทั้งจากต้นน้ำและจากท้ายน้ำ หากจะใช้ทิศทางการไหลของน้ำมาเป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์จะทำให้เกิดความไม่สะดวกและเหมาะสมต่อผู้ใช้งานสมการที่ได้จากเส้นแนวโน้มเส้นตรงดังกล่าว แม้ว่าจะมีค่า R^2 ที่มากก็ตาม แต่ในความเป็นจริงนั้นเราจะสามารถทำได้แค่ทำนายอัตราการขนส่ง

ตะกอนจากอัตราการไหลเท่านั้น เนื่องจากค่าอัตราการขนส่งตะกอนที่ไม่สามารถทำให้ทราบได้ว่าแท้จริงแล้ว น้ำในแม่น้ำมีทิศทางการไหลใด ประกอบกับเมื่อจะใช้สมการในการวิเคราะห์จากอัตราการไหล ยังต้องมีการแบ่งสมการสำหรับทิศทางทางการไหลจากค่าน้ำหรือจากท้ายน้ำ ด้วยเหตุเหล่านี้จะทำให้เกิดการไม่คล่องตัวหรืออาจสับสนของผู้ใช้งานได้ ความผิดพลาดต่าง ๆ ก็จะตามมาโดยง่าย ดังนั้นจึงไม่ใช้ทิศทางของน้ำในแม่น้ำเป็นเกณฑ์ แต่จะใช้กรณีน้ำเกิดน้ำตาย หรือฤดูน้ำเป็นเกณฑ์แทน



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางชลศาสตร์ทิศทางการไหลจากค่าน้ำไปท้ายน้ำ



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางชลศาสตร์ทิศทางการไหลจากท้ายน้ำไปค่าน้ำ

3.5 การพัฒนาสมการเส้นตรง 2 ตัวแปร

ความสัมพันธ์ของอัตราการขนส่งตะกอนและอัตราการไหลอย่างง่ายสามารถแสดงได้โดยใช้สมการเส้นตรง [10] โดยเป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราการไหล (ลบ.ม./วินาที) กับอัตราการขนส่งตะกอน (ก./ตร.ม./วินาที) ซึ่งแบ่งเกณฑ์ในการจำแนกสมการ 2 กรณี ได้แก่ ช่วงน้ำเกิด และช่วงน้ำตาย เนื่องจากข้อมูลจากความสัมพันธ์ทางชลศาสตร์บ่งชี้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราการขนส่งตะกอนภายใต้อิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงได้รับผลกระทบจากปัจจัยน้ำเกิดน้ำตายมากกว่าฤดูน้ำ

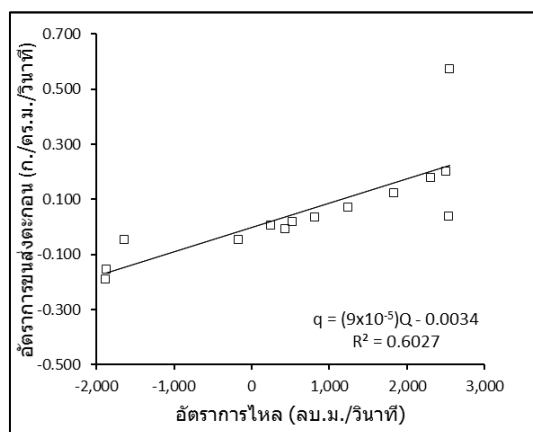
จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนส่งตะกอนและอัตราการไหลพัฒนาสมการเส้นตรง 2 ตัวแปรของอัตราการขนส่งตะกอน ช่วงน้ำเกิด โดยใช้ข้อมูลภาคสนาม รอบที่ 1 (14 พ.ย. 2558 – 15 พ.ย. 2558) รอบที่ 2 (12 ธ.ค. 2558 – 13 ธ.ค. 2558) และรอบที่ 4 (9 ม.ค. 2559 – 10 ม.ค. 2559) ในการพัฒนาสมการ ได้ดังนี้

$$q = (9 \times 10^{-5})Q - 0.0034 \quad [3]$$

เมื่อ q คือ อัตราการขนส่งตะกอน (ก./ตร.ม./วินาที)

Q คือ อัตราการไหล (ลบ.ม./วินาที)

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนส่งตะกอนและอัตราการไหล แสดงดังรูปที่ 17 ซึ่งจะเห็นว่า มีข้อมูลบางส่วนกระจายห่างจากแนวโน้ม เนื่องจากพื้นที่ที่เก็บวัดเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้กับบริเวณปากอ่าวไทย จึงหนีไม่พ้นที่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหล ความปั่นป่วนของกระแสน้ำที่เกิดขึ้น ประกอบกับข้อมูลชุดนี้เป็นช่วงน้ำเกิด ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำค่อนข้างมาก ทิศทางของความเร็วการไหลมีการเปลี่ยนแปลงที่ฉับพลัน ส่งผลให้การขนส่งตะกอนเกิดขึ้นทั้ง 2 ทิศทางเช่นกัน นอกจากนี้การที่มีความเร็วของกระแสน้ำมาก จึงอาจเกิดการกัดเซาะตลิ่งหรือท้องน้ำ จึงทำให้ข้อมูลอัตราการขนส่งตะกอนบางส่วนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว รวมถึงในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ตะกอนบางส่วนสามารถเคลื่อนที่ได้เล็กน้อย ทำให้ข้อมูลบางส่วนไม่ตรงกับแนวโน้มที่เกิดขึ้น โดยมีค่า $R^2 = 0.6027$ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดความแม่นยำของสมการ ซึ่งค่า R^2 จะมีค่าความแม่นยำตั้งแต่ 0 – 1 หากเข้าใกล้ 0 จะถือว่าสมการมีความแม่นยำต่ำ ในทางตรงข้าม ถ้าเข้าใกล้ 1 ถือว่าสมการนั้นมีความแม่นยำสูง ดังนั้นสมการที่พัฒนาขึ้นมานี้ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี สามารถใช้สมการนี้ในการคาดการณ์อัตราการขนส่งตะกอนจากข้อมูลอัตราการไหลที่เก็บวัดได้ หรือสามารถทำนายอัตราการไหลจากอัตราการขนส่งตะกอนที่เก็บวัดได้

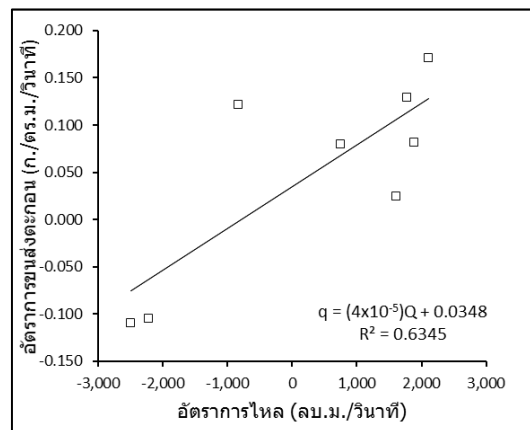


รูปที่ 17 สมการเส้นตรง 2 ตัวแปร ช่วงน้ำเกิด

สมการเส้นตรง 2 ตัวแปรของอัตราการขนส่งตะกอนช่วงน้ำตาย โดยใช้ข้อมูลภาคสนาม รอบที่ 3 (19 ธ.ค. 2558 – 20 ธ.ค. 2558) ในการพัฒนาสมการ คือ

$$q = (4 \times 10^{-5})Q + 0.0348 \quad [4]$$

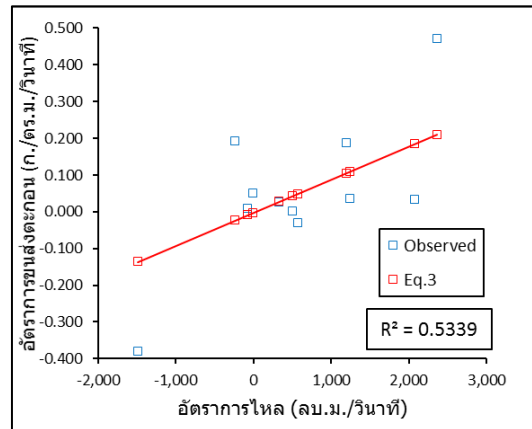
ทั้งนี้จากรูปที่ 18 จะเห็นว่า มีข้อมูลบางส่วนกระจายห่างจากแนวโน้ม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำที่น้อย ทำให้ความปั่นป่วนบริเวณปากแม่น้ำที่ได้รับอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลงจึงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีแรก เป็นสาเหตุให้มีอัตราการไหลที่ช้า และการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลค่อนข้างน้อย ส่งผลให้ตะกอนแขวนลอยที่ถูกพัดพาโดยกระแสน้ำบางส่วนไม่ตรงกับแนวโน้มที่เกิดขึ้น โดยมีค่า $R^2 = 0.6345$ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี สามารถใช้สมการนี้ในการคาดการณ์อัตราการขนส่งตะกอนจากข้อมูลอัตราการไหลที่เก็บวัดได้



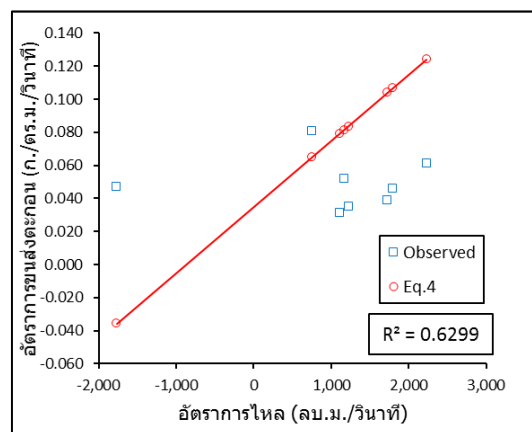
รูปที่ 18 สมการเส้นตรง 2 ตัวแปร ช่วงน้ำตาย

การทดสอบความแม่นยำของสมการเส้นตรง 2 ตัวแปรของอัตราการขนส่งตะกอน ช่วงน้ำเกิด โดยการนำข้อมูลภาคสนาม รอบที่ 6 (2 เม.ย. 2559 – 3 เม.ย. 2559) มาทดสอบสมการ มีค่า $R^2 = 0.987$ (รูปที่ 19) ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี สามารถใช้ได้ ที่ทำการทดสอบอีกครั้งเพื่อให้มีข้อมูลมาสนับสนุนสมการสำหรับให้สมการที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

การทดสอบความแม่นยำของสมการเส้นตรง 2 ตัวแปรของอัตราการขนส่งตะกอน ช่วงน้ำตาย โดยการนำข้อมูลภาคสนาม รอบที่ 5 (12 มี.ค. 2559 – 13 มี.ค. 2559) มาทดสอบสมการ มีค่า $R^2 = 0.6299$ (รูปที่ 20) ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี สามารถใช้ได้ อย่างไรก็ตามมีข้อมูลบางค่าที่เก็บข้อมูลมีค่าแปลกไปจากแนวโน้ม เนื่องจากบริเวณศึกษาได้รับอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลง การที่กระแสน้ำไหลใน 2 ทิศทาง โดยที่อัตราการขนส่งตะกอนจะเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลที่เกิดขึ้นโดยอาศัยระยะเวลาช่วงหนึ่ง ซึ่งอัตราการไหลช่วงเวลานั้นกำลังเปลี่ยนการไหลเข้าสู่แม่น้ำ ส่งผลให้อัตราการขนส่งตะกอนยังคงมีทิศทางการไหลลงสู่ทะเล



รูปที่ 19 การทดสอบความแม่นยำของสมการเส้นตรง 2 ตัวแปร ช่วงน้ำเกิด



รูปที่ 20 การทดสอบความแม่นยำของสมการเส้นตรง 2 ตัวแปร ช่วงน้ำตาย

3.6 สมการเส้นตรง 3 ตัวแปรของอัตราการใช้ของตะกอน

ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของอัตราการใช้ของตะกอนต่อความลึก (ก./ลบ.ม./วินาที) และอัตราส่วนของอัตราการใช้ของตะกอนต่อความลึก (ตร.ม./วินาที) แสดงได้โดยใช้สมการเส้นตรง สาเหตุของการนำข้อมูลความลึกมาวิเคราะห์เพิ่ม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำอันเกิดจากอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงนั้นก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความลึกของน้ำ ซึ่งเหตุนี้เองก็ทำให้อัตราการใช้และอัตราการใช้ของตะกอนเปลี่ยนแปลงเช่นกัน และเพื่อให้สมการที่พัฒนามีความแม่นยำเพิ่มขึ้นจึงได้เพิ่มตัวแปรเข้าไป ซึ่งแบ่งเกณฑ์ในการจำแนกสมการ 2 กรณี ได้แก่ ช่วงน้ำเกิด และช่วงน้ำตาย เนื่องจากข้อมูลจากความสัมพันธ์ทางชลศาสตร์บ่งชี้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้ของตะกอนภายใต้อิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงได้รับผลกระทบจากปัจจัยน้ำเกิดน้ำตายมากกว่าฤดูน้ำ

จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้ของตะกอนและอัตราการใช้ของตะกอนพัฒนาสมการเส้นตรง 3 ตัวแปรของอัตราการใช้ของตะกอน ช่วงน้ำเกิด โดยใช้ข้อมูลภาคสนาม รอบที่ 1 (14 พ.ย. 2558 – 15 พ.ย. 2558) รอบที่ 2 (12 ธ.ค. 2558 – 13 ธ.ค. 2558) และรอบที่ 4 (9 ม.ค. 2559 – 10 ม.ค. 2559) ในการพัฒนาสมการ (รูปที่ 21) ได้ดังนี้

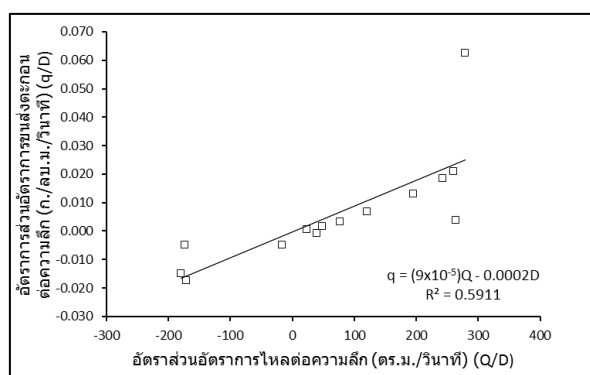
$$q = (9 \times 10^{-5})Q - 0.0002D \quad [5]$$

เมื่อ q คือ อัตราการขนส่งตะกอน (ก./ตร.ม./วินาที)

Q คือ อัตราการไหล (ลบ.ม./วินาที)

D คือ ความลึก (ม.)

จะเห็นว่า มีข้อมูลบางส่วนกระจายห่างจากแนวโน้ม เนื่องจากพื้นที่เก็บวัดเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้กับบริเวณปากอ่าวไทย จึงหนีไม่พื้นที่ได้รับอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลง โดยมีค่า $R^2 = 0.5911$ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี สามารถใช้สมการนี้ในการคาดการณ์อัตราการขนส่งตะกอนจากข้อมูลอัตราการไหลที่เก็บวัดได้

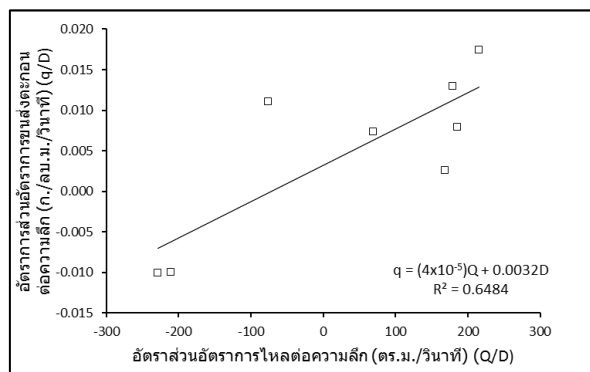


รูปที่ 21 สมการเส้นตรง 3 ตัวแปร ช่วงน้ำเกิด

สมการเส้นตรง 3 ตัวแปรของอัตราการขนส่งตะกอนช่วงน้ำตาย โดยใช้ข้อมูลภาคสนาม รอบที่ 3 (22 ธ.ค. 2558 – 20 ธ.ค. 2558) ในการพัฒนาสมการ (รูปที่ 20) คือ

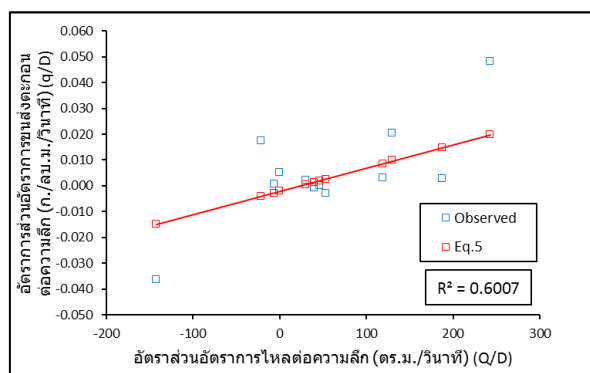
$$q = (4 \times 10^{-5})Q + 0.0032D \quad [6]$$

จะเห็นว่า มีข้อมูลบางส่วนกระจายห่างจากแนวโน้ม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเล โดยมีค่า $R^2 = 0.6484$ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี สามารถใช้สมการนี้ในการคาดการณ์อัตราการขนส่งตะกอนจากข้อมูลอัตราการไหลที่เก็บวัดได้



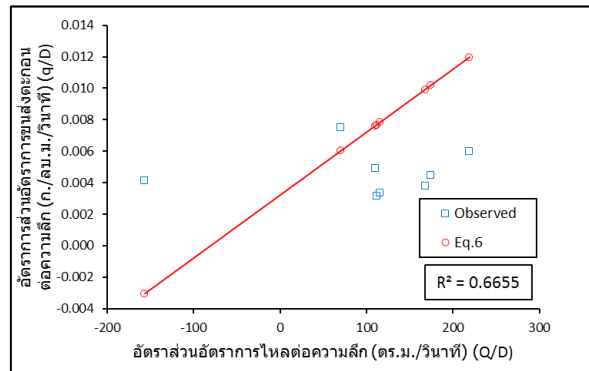
รูปที่ 22 สมการเส้นตรง 3 ตัวแปร ช่วงน้ำตาย

การทดสอบความแม่นยำของสมการเส้นตรง 3 ตัวแปรของอัตราการขนส่งตะกอน ช่วงน้ำเกิด โดยการนำข้อมูลภาคสนาม รอบที่ 6 (2 เม.ย. 2559 – 3 เม.ย. 2559) มาทดสอบสมการ มีค่า $R^2 = 0.6007$ (รูปที่ 23) ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี สามารถนำไปใช้ได้



รูปที่ 23 การทดสอบความแม่นยำของสมการอัตราการขนส่งตะกอนช่วงน้ำเกิด

การทดสอบความแม่นยำของสมการเส้นตรง 3 ตัวแปรของอัตราการขนส่งตะกอน ช่วงน้ำตาย โดยการนำข้อมูลภาคสนาม รอบที่ 5 (12 มี.ค. 2559 – 13 มี.ค. 2559) มาทดสอบสมการ มีค่า $R^2 = 0.6655$ (รูปที่ 24) ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง



รูปที่ 24 การทดสอบความแม่นยำของสมการอัตราการขนส่งตะกอนช่วงน้ำตาย

3.7 สมการ 3 ตัวแปรของอัตราการขนส่งตะกอน

ความสัมพันธ์ของอัตราการขนส่งตะกอน (ก./ตร.ม./วินาที) อัตราการไหล (ลบ.บ./วินาที) และความลาดผิวน้ำ (ไม่มีหน่วย) สามารถแสดงด้วยรูปแบบกราฟ 3 แกน โดยแกน x คือ อัตราการไหล แกน y คือ ความลาดผิวน้ำ และแกน z คือ อัตราการขนส่งตะกอน

สาเหตุของการนำข้อมูลความลาดผิวน้ำและอัตราการขนส่งตะกอนมาใช้ในการพัฒนาสมการ เนื่องจากความแตกต่างระหว่างระดับน้ำตื้นน้ำและท้ายน้ำทำให้เกิดความลาดผิวน้ำ และทิศทางการไหลของอัตราการไหล ซึ่งเกิดขึ้นจากอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อพฤติกรรมของอัตราการขนส่งตะกอน และเพื่อให้สมการที่พัฒนามีความแม่นยำเพิ่มขึ้นจึงพิจารณา 3 ตัวแปร ซึ่งแบ่งเกณฑ์ในการจำแนกสมการ 2 กรณี ได้แก่ ช่วงน้ำเกิด และช่วงน้ำตาย เนื่องจากข้อมูลจากความสัมพันธ์ทางชลศาสตร์ บ่งชี้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราการขนส่งตะกอนภายใต้อิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงได้รับผลกระทบจากปัจจัยน้ำเกิดน้ำตายมากกว่าฤดูแล้ง

จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนส่งตะกอนและอัตราการไหลพัฒนาสมการ 3 ตัวแปรของอัตราการขนส่งตะกอน ช่วงน้ำเกิด โดยใช้ข้อมูลภาคสนาม รอบที่ 1 (14 พ.ย. 2558 – 15 พ.ย. 2558) รอบที่ 2 (12 ธ.ค. 2558 – 13 ธ.ค. 2558) รอบที่ 4 (9 ม.ค. 2559 – 10 ม.ค. 2559) และ รอบที่ 6 (2 เม.ย. 2559 – 3 เม.ย. 2559) ในการพัฒนาสมการ ได้ดังนี้

$$q = (9.352 \times 10^{-5})Q + 5.614S - 0.0004I \quad [7]$$

เมื่อ q คือ อัตราการขนส่งตะกอน (ก./ ตร.ม./ วินาที)

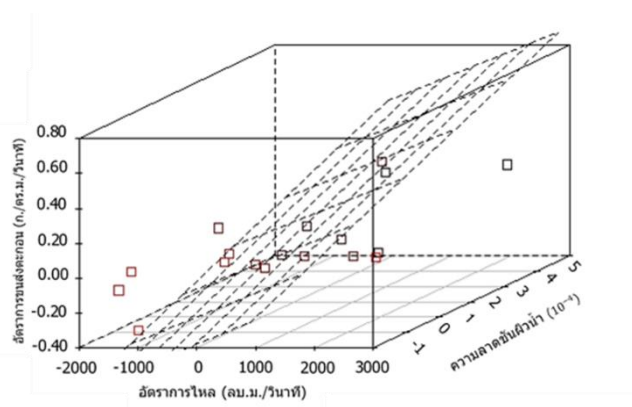
Q คือ อัตราการไหล (ลบ.ม./ วินาที)

S คือ ความลาดผิวน้ำ (ไม่มีหน่วย)

โดยรูปแบบของกราฟมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกัน ดังนี้ อัตราการขนส่งตะกอน (แกน z) เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหล (แกน x) และความลาดผิวน้ำ (แกน y) เนื่องจากความลาดผิวน้ำมีผลต่อทิศทางการไหลของน้ำใน

แม่น้ำ ด้วยเหตุนี้การที่ความลาดชันน้ำมากทำให้มีอัตราการไหลจากต้นน้ำสู่ท้ายน้ำมาก ข่อมส่งผลให้อัตราการขนส่งตะกอนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ทั้งนี้จะเห็นว่า มีข้อมูลบางส่วนกระจายห่างจากแนวโน้ม เนื่องจากพื้นที่เก็บวัดเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้กับบริเวณปากแม่น้ำ จึงหนีไม่พ้นที่ได้รับอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลง (รูปที่ 25) โดยมีค่า $R^2 = 0.4385$ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง สามารถใช้สมการนี้ในการคาดการณ์อัตราการขนส่งตะกอน



รูปที่ 25 สมการ 3 ตัวแปร ช่วงน้ำเกิด

จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนส่งตะกอนและอัตราการไหลพัฒนาสมการ 3 ตัวแปรของอัตราการขนส่งตะกอน ช่วงน้ำตาย โดยใช้ข้อมูลภาคสนามรอบที่ 3 (19 ธ.ค. 2558 – 20 ธ.ค. 2558) และ รอบที่ 5 (12 มี.ค. 2559 – 13 มี.ค. 2559) ในการพัฒนาสมการ ได้ดังนี้

$$q = (6.586 \times 10^{-6})Q + (7.705 \times 10^{-3})S - 0.01156 \quad [8]$$

ทั้งนี้จะเห็นว่า มีข้อมูลบางส่วนกระจายห่างจากแนวโน้ม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำที่น้อย (รูปที่ 26) โดยมีค่า $R^2 = 0.7744$ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดีและแม่นยำกว่ากรณีน้ำเกิด สามารถใช้สมการนี้ในการคาดการณ์อัตราการขนส่งตะกอน

4. สรุปผลการศึกษา

ในการเก็บข้อมูลตะกอนที่บริเวณอำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดสมุทรปราการ พบว่าตัวแทนขนาดตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 0.027 มม. ตัวแทนความเร็วการตกของตะกอน เท่ากับ 21.31 มม./วินาที การกระจายตัวของความเร็วจะมากที่บริเวณใกล้ฝื่อน้ำ ส่วนตะกอนแขวนลอยจะมากบริเวณใกล้ท้องน้ำ การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำช่วงน้ำเกิดมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นตะกอน ต่างจากช่วงน้ำตายที่แทบไม่มีผลเลย แนวโน้มของอัตราการขนส่งตะกอนจะไปในทิศทางเดียวกับอัตราการไหล แต่ตรงกันข้ามกับระดับน้ำ ฤดูน้ำมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการขนส่งตะกอนน้อยมากเมื่อพิจารณาเทียบกับช่วงน้ำเกิดน้ำตาย

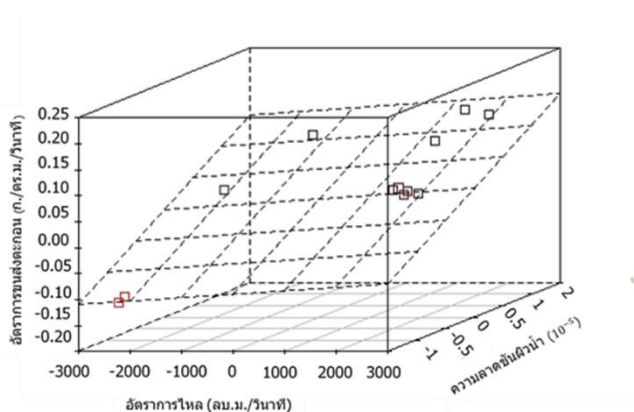
รูปแบบสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ สมการเส้นตรง 2 ตัวแปร สมการเส้นตรง 3 ตัวแปร และสมการ 3 ตัวแปร เพื่อใช้ในการพิจารณาหาสมการตัวแทนที่แม่นยำที่สุด (ตารางที่ 2) พบว่าสมการเส้นตรง 3 ตัวแปรซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนส่งตะกอน อัตราการไหล และความลึกแม่น้ำที่สุด แบ่งสมการภายใต้ น้ำเกิด น้ำตาย ได้ 2 สมการดังนี้ สำหรับกรณีช่วงน้ำเกิด

$$q = (9 \times 10^{-5})Q - 0.0002D \quad [5]$$

โดยที่มีค่า $R^2 = 0.6484$
สำหรับกรณีช่วงน้ำตาย

$$q = (4 \times 10^{-5})Q + 0.0032D \quad [6]$$

โดยที่มีค่า $R^2 = 0.6007$



รูปที่ 26 สมการ 3 ตัวแปร ช่วงน้ำตาย

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่า R^2 ของสมการ

รูปแบบสมการ	R^2	
	น้ำเกิด	น้ำตาย
สมการเส้นตรง 2 ตัวแปร	0.6027	0.6345
สมการเส้นตรง 3 ตัวแปร	0.5911	0.6484
สมการ 3 ตัวแปร	0.4385	0.7744

เอกสารอ้างอิง

- [1] Marine Department, 2012, *Preparing for dredging of the Chao Phraya River Mouth for increasing the performance of drainage*, Retrieved January 3, 2018, Website: http://pr.prd.go.th/samutprakan/ewt_news.php?nid=619&filename=index. (in Thai)
- [2] Electricity Generating Authority of Thailand, 2016, *Contracting work for dredging of mud along the barrier in the Chao Phraya River of Fiscal year 2015-2016*, Retrieved January 3, 2018, Website: <http://bidding.egat.co.th/app1/file/data?id=1478>. (in Thai)
- [3] Marine Department, 2016, *A study of navigation risk in the Chao Phraya River and the Pa Sak River in Ayutthaya Province*, Retrieved January 3, 2018, Website: www.mot.go.th/file_upload/2559/Announcement_risk_by_Withaya2.pdf. (in Thai)
- [4] Honda electronics, 2013, *PS-7 / PS-7FL (Portable depth sounder)*, Retrieved January 3, 2018, Web site: https://www.honda-el.co.th/industry/depth_ps-7.html.
- [5] Chinnarasri, C., Phothiwijit, K. and Apipattanasri, S., 2017, A study of flow characteristics in the lower Chao Phraya River using acoustic doppler velocity technology, *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 40(2), pp. 217-235. (in Thai)
- [6] Sontek, 2016, *RIVERSURVEYOR® S5 and M9*, Retrieved January 3, 2018, Web site: <https://www.sontek.com/riversurveyor-s5-m9>.
- [7] Chinnarasri, C., 2007, *River Mechanics and Fluvial Processes*, King Mongkut's University of Technology Thonburi. (in Thai)
- [8] American Society for Testing and Materials (ASTM), 2007, *Standard test method for particle-size analysis of soils*: D422-63.
- [9] American Society for Testing and Materials (ASTM), 2007, *Standard practice for dry preparation of soil samples for particle-size analysis and determination of soil constants*: D421-85.
- [10] Patchineelam S. M. and Kjerfve B., 2004, Suspended sediment variability on seasonal and tidal time scales in the Winyah Bay Estuarine, *Coastal and Shelf Science*, Vol. 59, pp. 307-318.