บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปการดำเนินการศึกษาและทดลอง

การศึกษาผลของการกระจายขนาดของตะกอนต่อพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของตะกอนในรางน้ำสี่เหลี่ยมนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของการกระจายขนาดของตะกอนท้องน้ำที่มีต่อพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของตะกอน อันได้แก่ อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมด ความสัมพันธ์ของปริมาณตะกอนแขวนลอยต่อตะกอนทั้งหมด ลักษณะรูปร่างท้องน้ำ และการเปลี่ยนแปลงขนาด D_{50} และ σ_g ของวัสดุท้องน้ำตามระยะทาง โดยทำการทดลองในรางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ยาว 18.0 ม. กว้าง 0.60 ม. ลึก 0.75 ม. และวัสดุท้องน้ำที่ใช้เพื่อศึกษาถึงผลของการกระจายขนาด ได้จากการผสมทรายที่มีขนาดสม่ำเสมอ 3 ขนาด คือ ทรายหยาบ D_{50} = 2.90 มม. ทรายปานกลาง D_{50} = 1.18 มม. และทรายละเอียด D_{50} = 0.26 มม. ด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อจำลองวัสดุท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ ทรายชนิดที่ 1 มีขนาดเริ่มต้น $D_{50,i}$ = 1.18 มม., $\sigma_{g,i}$ = 1.32 ทรายชนิดที่ 2 มีขนาดเริ่มต้น $D_{50,i}$ = 1.18 มม., $\sigma_{g,i}$ = 2.11 ทรายชนิดที่ 3 มีขนาดเริ่มต้น $D_{50,i}$ = 1.17 มม., $\sigma_{g,i}$ = 3.90

การศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของตะกอนโดยใช้แบบจำลองชลศาสตร์นี้ สิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึงก็คือ ความสามารถของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เช่น ฝายวัดน้ำสามเหลี่ยมสันคมสามารถวัดน้ำได้สูงสุดประมาณ 100 ลิตร/วินาที ความลาดชันของรางน้ำปรับได้สูงสุด 0.014 เมตร/เมตร เครื่องมือวัดความเปลี่ยนแปลงท้องน้ำวัดได้ลึกสูงสุด 0.40 เมตร เครื่องโรยทรายอัตโนมัติสามารถปรับความเร็วรอบได้ต่ำสุดประมาณ 75 rpm และสามารถโรยทรายได้ในอัตรา 0.018-0.200 กิโลกรัม/วินาที (ถ้าโรยทรายด้วยอัตราที่ต่ำกว่า 0.018 กิโลกรัม/วินาที อัตราการโรยทรายจะไม่ค่อยสม่ำเสมอ และถ้าโรยทรายด้วยอัตราที่สูงกว่า 0.200 กิโลกรัม/วินาที ในการทดลอง พบว่า ไม่สามารถเติมทรายในถังเก็บทรายได้ทันกับอัตราการโรยทรายที่กำหนด) นอกจากนั้น ถังเก็บทรายของเครื่องโรยทรายสามารถบรรจุทรายได้สูงสุดประมาณ 180 กิโลกรัม เครื่องมือวิเคราะห์การกระจายขนาดของทรายสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างทรายแห้งได้หนักสุดไม่เกิน 500 กรัม และอุปกรณ์เก็บตัวอย่างตะกอนทั้งหมดสามารถเก็บตัวอย่างตะกอนทั้งหมดได้เพียง 1 ครั้ง ทั้งนี้เนื่องมาจาก ความจำกัดของเนื้อที่ทางด้านท้ายน้ำ และปริมาณของน้ำที่ใช้ในการทดลองที่สูงมาก ซึ่งจากการทดลอง พบว่า เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ส่วนใหญ่มีความสามารถเพียงพอในการทำการทดลอง แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ในการทดลองก็ยังพบว่าขนาดของถังเก็บทรายของเครื่องโรยทราย มีขนาดเล็กเกินไปสำหรับการโรยทรายที่อัตรา

การโรยทรายมากกว่า 0.050 กิโลกรัม/วินาที ทำให้ต้องมีการเติมทรายในถังเก็บทรายบ่อยครั้ง นอกจากนี้ การวางแผนการทดลองล่วงหน้าให้เป็นระบบ เป็นสิ่งที่จำเป็น และสำคัญอย่างมาก ต้องทำการศึกษาขั้นตอนต่าง ๆ ให้เข้าใจอย่างถ่องแท้ ไม่ว่าจะเป็นทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการทดลอง เงื่อนไขการทดลอง การเตรียมเครื่องมือ และอุปกรณ์ก่อนการทดลอง การสอบเทียบอุปกรณ์การทดลองต่าง ๆ ปริมาณข้อมูลที่จะต้องเก็บขณะทดลอง และหลังการทดลองเสร็จ รวมถึงระยะเวลาในการทดลองอีกด้วย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง แม่นยำ เชื่อถือได้

5.2 สรุปผลการศึกษา

5.2.1 ตัวแปรที่สำคัญ และใช้กันแพร่หลายที่แสดงถึงการกระจายขนาดของทราย ในการศึกษาครั้งนี้ คือ σ_g (geometric standard deviation) ซึ่งเมื่อนำมาใช้ร่วมกับขนาด D_{50} ของทรายแล้ว จะสามารถใช้อธิบายลักษณะของทรายที่เป็นวัสดุท้องน้ำ ที่ซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของตะกอนได้ดีกว่า ขนาด D_{50} เพียงอย่างเดียว ซึ่งค่า σ_g สามารถคำนวณได้จาก D_{84} และ D_{16} ดังนี้

$$\sigma_g = (D_{84}/D_{16})^{1/2} \qquad (5.1)$$

5.2.2 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ไร้หน่วยที่สำคัญ 2 ค่า คือ พารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอน (ϕ) ซึ่งแสดงถึงอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมด และพารามิเตอร์การไหล (ψ) ซึ่งแสดงถึงลักษณะการไหล ของทรายที่มีขนาด D_{50} ใกล้เคียงกัน แต่การกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำต่างกัน โดยมีค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอน (ϕ) อยู่ระหว่าง 0.05-0.35 และมีค่าพารามิเตอร์การไหล (ψ) อยู่ระหว่าง 0.05-0.40 พบว่า อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดเพิ่มขึ้น เมื่อพารามิเตอร์การไหล (ψ) และการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ (σ_g) มากขึ้น เนื่องจาก พารามิเตอร์การไหล (ψ) ที่มากขึ้น ทำให้แรงเฉือนที่ท้องน้ำมากขึ้น และท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดมาก จะมีส่วนประกอบของทรายละเอียดมากกว่าท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดน้อย และปริมาณทรายละเอียดที่มากกว่าเหล่านี้ ที่ทำให้อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดของท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดมาก มีค่ามากกว่าอัตราการนำพาตะกอนตะกอนทั้งหมดของท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดน้อย

5.2.3 สมการความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอน (ϕ) พารามิเตอร์การไหล (ψ) และการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ (σ_g) ของการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นโค้งพหุคูณ (multiple non-linear regression) มีรูปแบบสมการดังนี้

เมื่อไม่พิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ (σ_g)

$$\phi = 0.694\ \psi^{0.797} \qquad (5.2)$$

$$R^2 = 0.901$$

$$R = 0.949$$

$$S_e = 0.024$$

เมื่อพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ (σ_g)

$$\phi = 0.593\ \sigma_g^{0.258}\ \psi^{0.822} \qquad (5.3)$$

$$R^2 = 0.951$$

$$R = 0.975$$

$$S_e = 0.023$$

5.2.4 เมื่อพิจารณาอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการทดลองของทรายทั้ง 3 ชนิด เปรียบเทียบกับอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่คำนวณได้จากสมการของ Shinohara และ Tsubaki, สมการของ Ackers และ White, สมการของ Yang, สมการของ Engelund และ Hansen และ สมการของ Molinas และ Wu พบว่า ทรายชนิดที่ 1 D_{50} = 1.17-1.22 มม., σ_g = 1.31-1.32 ซึ่งเป็นกรณีที่ทรายมีขนาดสม่ำเสมอ (uniform) สมการของ Engelund และ Hansen, สมการของ Ackers และ White และสมการของ Molinas และ Wu ให้ค่าที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ส่วนทรายชนิดที่ 2 D_{50} = 1.17-1.29 มม., σ_g = 1.98-2.11 ซึ่งเป็นกรณีที่ทรายมีการกระจายขนาดทั่วไป พบว่า สมการของ Ackers และ White ให้ค่าที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด โดยสมการของ Engelund และ Hansen และสมการของ Molinas และ Wu ก็ให้ค่าที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากเช่นกัน และทรายชนิดที่ 3 D_{50} = 1.19-1.29 มม., σ_g = 3.77-3.89 ซึ่งเป็นกรณีที่ทรายมีการกระจายขนาดสูงมาก (high gradation) พบว่า สมการของ Molinas และ Wu และสมการของ Ackers และ White ให้ค่าที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด เนื่องจาก ทั้งสองสมการมีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ในขณะที่อีก 3 สมการที่เหลือไม่มีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ

และเมื่อพิจารณาเฉพาะรูปแบบของสมการ โดยไม่พิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ พบว่า สมการของ Engelund และ Hansen และสมการของ Ackers และ White เป็นสมการที่มีรูปแบบที่ให้ค่าที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด และเมื่อพิจารณาสมการของ Molinas และ Wu เปรียบเทียบกับสมการของ Ackers และ White ซึ่งเป็นสมการที่ได้มีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำทั้งคู่ ก็พบว่า สมการของ Molinas และ Wu เป็นสมการที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการคำนวณอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมด สำหรับกรณีท้องน้ำมีการกระจายขนาด มากกว่าสมการของ Ackers และ White นอกจากนั้น ในการทดลองยังพบว่า สมการของ Molinas และ Wu สามารถนำมาใช้กับข้อมูลผลการทดลองที่มีพารามิเตอร์การไหล (ψ) ในช่วง 0.05 ถึง 0.40 และการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ (σ_g) ในช่วง 1.32-3.90 ได้ดีเช่นเดียวกับ ข้อมูลพารามิเตอร์การไหล (ψ) ในช่วง 0.50 ถึง 5.00 และการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ (σ_g) ในช่วง 1.25-3.00 ซึ่งเป็นข้อมูลที่นำเสนอโดย Molinas และ Wu

5.2.5 เมื่อพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ที่มีต่อปริมาณตะกอนแขวนลอย พบว่า ปริมาณตะกอนแขวนลอยมีค่ามากขึ้นตามการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำที่สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจาก ท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำสูง จะมีส่วนประกอบของทรายละเอียดมากกว่าท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ และเนื่องจากทรายละเอียดมีโอกาสแขวนลอยได้มากกว่าทรายหยาบ จึงทำให้ท้องน้ำที่มีส่วนประกอบของทรายละเอียดมากกว่า (การกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำสูง) มีปริมาณตะกอนแขวนลอยมากกว่าท้องน้ำที่มีส่วนประกอบของทรายละเอียดน้อยกว่า (การกระจายขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ) โดยในการทดลอง พบว่า ที่อัตราการไหลในช่วง 25-55 ลิตรต่อวินาที ทรายชนิดที่ 1 D_{50} = 1.17-1.22 มม., σ_g = 1.31-1.32 มีปริมาณตะกอนแขวนลอยอยู่ในช่วง 13-24% ของปริมาณตะกอนทั้งหมด หรือโดยเฉลี่ยคิดเป็น 18.9% ของปริมาณตะกอนทั้งหมด ทรายชนิดที่ 2 D_{50} = 1.17-1.29 มม., σ_g = 1.98-2.11 มีปริมาณตะกอนแขวนลอยอยู่ในช่วง 15-28% ของปริมาณตะกอนทั้งหมด หรือโดยเฉลี่ยคิดเป็น 21.4% ของปริมาณตะกอนทั้งหมด และทรายชนิดที่ 3 D_{50} = 1.19-1.29 มม., σ_g = 3.77-3.89 มีปริมาณตะกอนแขวนลอยอยู่ในช่วง 21-29% ของปริมาณตะกอนทั้งหมด หรือโดยเฉลี่ยคิดเป็น 26.4% ของปริมาณตะกอนทั้งหมด

5.2.6 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยกับปริมาณตะกอนทั้งหมดของทรายทั้ง 3 ชนิด เมื่อมีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำแยกเป็นกรณี และเมื่อไม่มีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ มีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

ทรายชนิดที่ 1 D_{50} = 1.17-1.22 มม., σ_g = 1.31-1.32

$$S_s = 0.2445\ S_T - 134.52 \quad (5.4)$$

$$R^2 = 0.949$$

$$R = 0.974$$

ทรายชนิดที่ 2 D_{50} = 1.17-1.29 มม., σ_g = 1.98-2.11

$$S_s = 0.2611\ S_T - 124.91 \quad (5.5)$$

$$R^2 = 0.917$$

$$R = 0.958$$

ทรายชนิดที่ 3 D_{50} = 1.19-1.29 มม., σ_g = 3.77-3.89

$$S_s = 0.2921\ S_T - 80.16 \quad (5.6)$$

$$R^2 = 0.976$$

$$R = 0.988$$

ทรายทั้ง 3 ชนิด (เมื่อไม่พิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ)

$$S_s = 0.2783\ S_T - 149.66 \quad (5.7)$$

$$R^2 = 0.903$$

$$R = 0.950$$

5.2.7 เมื่อพิจารณารูปร่างท้องน้ำที่ได้จากการทดลอง พบว่า รูปร่างท้องน้ำที่ได้มีลักษณะเป็นริ้วคลื่น (ripple) หรือ ลอนคลื่น (dune) เท่านั้น ทั้งนี้เพราะว่า ช่วงการไหลที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วงการไหลต่ำกว่าวิกฤต นอกจากนั้นยังพบว่า ท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดมากกว่า มีความสูงของรูปร่างคลื่นท้องน้ำที่เล็กกว่าท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดน้อยกว่า เมื่อตัวแปรลักษณะการไหล และลักษณะท้องน้ำอื่น ๆ ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เป็นเพราะว่า ท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดมากกว่า มีปริมาณของทรายละเอียด และอัตราการนำพาตะกอนสูงกว่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่งทำให้มีการเติมของตะกอนในส่วนที่เป็นช่องว่าง และการพัดพาของตะกอนในส่วนบนของคลื่นสูงกว่าท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดน้อยกว่า จึงทำให้ความสูงของรูปร่างคลื่นท้องน้ำที่ได้เล็กกว่า และนอกจากนี้ยังพบว่า การกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำที่มากขึ้น มีแนวโน้มทำให้ลักษณะรูปร่างท้องน้ำที่ได้เปลี่ยนแปลงไป โดยลักษณะรูปร่างท้องน้ำที่ได้จะมีลักษณะที่เล็กลง หรือมีความขรุขระน้อยลงในบางกรณี

และเมื่อพิจารณารูปร่างท้องน้ำที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับรูปร่างท้องน้ำที่หาได้จากวิธีของ Liu และวิธีของ Simon พบว่า วิธีของ Simon ให้รูปร่างท้องน้ำใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าวิธีของ Liu โดยรูปร่างท้องน้ำที่หาได้จากวิธีของ Simon ของทรายขนาดสม่ำเสมอ (uniform) มีลักษณะใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า รูปร่างท้องน้ำที่หาได้จากวิธีของ Simon ของทรายที่มีการกระจายขนาดสูง (high gradation)

5.2.8 สำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาด D_{50} และ σ_g ของวัสดุท้องน้ำตามระยะทางนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด D_{50} และ σ_g ของวัสดุท้องน้ำตามระยะทางอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแตกต่างไปจากการศึกษาของ Sternberg (1875) และการศึกษาของ Morris และ Williams (1997) ทั้งนี้เนื่องมาจาก ในการศึกษาของ Sternberg (1875) และการศึกษาของ Morris และ Williams (1997) เป็นการศึกษาในลำน้ำธรรมชาติ ซึ่งมีความยาวมากกว่ารางน้ำที่ใช้ในการศึกษาเป็นอย่างมาก จึงทำให้สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้

และจากผลการวิเคราะห์การกระจายขนาด ของตัวอย่างท้องน้ำที่เก็บได้ในตำแหน่งต่าง ๆ หลังจากทำการทดลองเสร็จสิ้น พบว่า ขนาด D_{50} เฉลี่ย และ σ_g เฉลี่ย ของทรายทั้ง 3 ชนิด มีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเริ่มต้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจาก ทรายละเอียดที่เป็นส่วนประกอบของทรายทั้ง 3 ชนิดนั้น ถูกพัดพาไปได้มากกว่าทรายหยาบ จึงทำให้ขนาด D_{50} เฉลี่ย และ σ_g เฉลี่ยที่วัดได้หลังจากทำการทดลองเสร็จสิ้น มีการกระจายขนาดน้อยลง และมีขนาด D_{50} สูงขึ้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะ สำหรับการศึกษาวิจัยในคราวต่อไปมีดังนี้

1. การทำการทดลองในรางน้ำเปิด ควรใช้รางน้ำเปิดที่มีความยาวมาก ๆ เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากการไหลแบบไม่สม่ำเสมอ (nonuniform)

2. การทำการทดลองในรางน้ำเปิด ถ้ามีการใช้เครื่องโรยทรายอัตโนมัติ เพื่อจำลองลักษณะการเคลื่อนตัวของตะกอนแล้ว เครื่องโรยทรายที่ใช้ควรมีถังเก็บทรายของเครื่องโรยทรายที่มีขนาดใหญ่เพียงพอกับปริมาณทรายที่จะใช้ในการทดลอง

3. จากการทดลอง การไหลเป็นการไหลต่ำกว่าวิกฤต ดังนั้น ควรมีการศึกษาสภาพเงื่อนไขที่สูงกว่าวิกฤต ว่ามีผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของตะกอนอย่างไรบ้าง

4. จากการทดลอง วัสดุท้องน้ำที่ใช้เป็นวัสดุท้องน้ำที่ไม่มีความเชื่อมแน่น ดังนั้นควรมีการศึกษาวัสดุท้องน้ำที่มีความเชื่อมแน่นบ้าง

5. ควรมีการสำรวจ และเก็บข้อมูลจากลำน้ำธรรมชาติ ที่มีขนาด D_{50} ของท้องน้ำใกล้เคียงกัน แต่การกระจายขนาดของท้องน้ำต่างกัน เพื่อนำมาเปรียบเทียบ หรือวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองในห้องทดลอง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ดียิ่งขึ้น

6. ควรมีการศึกษา และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขนาด D_{50} และ σ_g ของวัสดุท้องน้ำตามระยะทาง ในแม่น้ำสายต่าง ๆ ที่สำคัญในประเทศไทย เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์ต่อไป

7. ควรมีการศึกษาถึงผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำที่มีต่อพฤติกรรมอื่น ๆ ของการไหลในทางน้ำเปิด ที่มีท้องน้ำเป็นทราย (sand bed) อาทิเช่น การตกตะกอนหน้าสันฝาย เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย