บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 การดำเนินการศึกษาและทดลอง

การทดลองการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ซึ่งกระทำในรางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง คือ สภาพการไหลที่เป็น Uniform flow เนื่องจากการไหลในทางน้ำเปิด การพิจารณาการไหลมักจะสมมุติให้เป็นการไหลใน 2 มิติ เพื่อให้ง่ายต่อการวาดภาพเส้นกระแสน้ำ ทำให้สะดวกต่อการวิเคราะห์ปัญหา และสมการที่นำมาวิเคราะห์การไหลในทางน้ำเปิด เช่น Manning formula ก็ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการไหลที่เป็น Uniform flow ดังนั้น ในการทำการทดลอง รางน้ำควรมีความยาวเพียงพอ เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบของน้ำท้นย้อนกลับ (back water) หรือน้ำลด (drawdown) นอกจากนั้น การปรับความลาดเอียงของรางน้ำเปิดเพื่อคำนวณหาความลาดเอียงผิวน้ำก็เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องระมัดระวังเนื่องจากรางน้ำที่ใช้ทำการทดลองระดับพื้นท้องรางน้ำมีการโก่งตัว แต่เนื่องจากในการทดลอง มีวัสดุท้องน้ำเป็นพื้นอีกทีหนึ่ง ปัญหานี้จึงไม่มีผลกระทบต่อการทดลอง

นอกจากนั้นจากการนำเครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำไปทำการสอบเทียบจะพบว่าเครื่องมือมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 4-15% (ดูรายละเอียดภาคผนวก ข.) ดังนั้นในการนำเครื่องมือมาใช้ในการทดลองควรจะมีการสอบเทียบเสียก่อน เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการเก็บข้อมูล

ปัญหาที่พบในการทดลองนี้อีก คือ ข้อจำกัดเนื่องจากความสามารถของเครื่องมือ ได้แก่ แม่แรงที่ใช้ในการปรับความลาดเอียงท้องน้ำ สามารถปรับมุมก้มได้สูงสุด 0.014 เมตร/เมตร ฝายสามเหลี่ยมวัดน้ำสันคมสามารถรับน้ำได้สูงสุด 48 ลิตรต่อวินาที เครื่องโรยทรายอัตโนมัติสามารถโรยทรายได้ในอัตรา 0.018-0.231 กิโลกรัมต่อวินาที จากข้อจำกัดของเครื่องมือดังกล่าวมีผลต่อการเลือกกรณีศึกษา เช่นในกรณีที่ต้องการความเร็วของน้ำมาก ๆ ($F_r > 1$) ข้อจำกัดของการปรับความลาดเอียงท้องน้ำ ทำให้ไม่สามารถปรับความลาดเอียงได้มากตามต้องการ ในกรณีนี้ถ้าปรับเปลี่ยนเป็นการเพิ่มอัตราการไหล ฝายวัดน้ำก็สามารถรับน้ำสูงสุดได้เพียง 48 ลิตรต่อวินาที หรือในสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ที่ต้องการตะกอนแขวนลอยมาก ๆ แต่เครื่องโรยทรายสามารถโรยทรายได้สูงสุดเพียง 0.231 กิโลกรัมต่อวินาที

เมื่อทรายที่โรยลงไปไม่สมดุลกับทรายที่ถูกกัดเซาะ จะทำให้เกิดการกัดเซาะท้องน้ำขึ้นเพื่อให้เกิดสมดุลใหม่ เป็นผลให้ต้องเสียเวลาในการรอให้ท้องน้ำเกิดสมดุลใหม่ หรือรอให้สภาพการไหลปรับสู่สภาพการไหลสม่ำเสมอ (uniform flow) นั้นเอง

อีกปัญหาหนึ่งที่ต้องพึงระวังก็คือ ขนาดของแบบจำลองกับความกว้างของรางน้ำเปิด ถ้าแบบจำลองมีความกว้างมาก เช่น แบบจำลองตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 60 องศา รางน้ำกว้างเพียง 60 เซนติเมตร เมื่อเกิดการกัดเซาะที่รุนแรงหลุมกัดเซาะจะติดผนังของรางน้ำ เป็นการจำกัดเขตการกัดเซาะ ทำให้ขนาดหลุมกัดเซาะคลาดเคลื่อนจากที่ควรจะเป็นได้

การควบคุมการทดลองให้เป็นระเบียบ (controled experiment) ก็มีส่วนสำคัญในการศึกษาเพื่อทำให้การทดลองในแต่ละเงื่อนไขมีแนวทางเดียวกัน เช่น มีอัตราการไหลเท่ากัน มีความลึกการไหลเท่ากัน แต่แตกต่างกันในสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีหรือไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ จะทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลอง

5.2 ผลการศึกษา

5.2.1 รูปร่างของตอม่อและมุมปะทะกับทิศทางการไหลของตอม่อ มีอิทธิพลอย่างมากต่อพื้นที่หลุมกัดเซาะ และมีอิทธิพลน้อยที่สุด ถ้าความยาวตอม่ออยู่ในทิศทางเดียวกับการไหล และขนาดของตอม่อจะมีอิทธิพลต่อหลุมกัดเซาะอย่างมาก ในสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ นอกจากนั้นมุมปะทะกับทิศทางการไหลของตอม่อ ยังมีอิทธิพลต่อปริมาตรหลุมกัดเซาะ เมื่อมุมปะทะมากปริมาตรหลุมกัดเซาะก็มาก ดังนั้นในการออกแบบตอม่อสะพานถ้าต้องการพื้นที่หน้าตัดของตอม่อมาก ควรออกแบบให้มีความกว้างของตอม่อน้อย ๆ และส้นตอม่อควรมีลักษณะมน แต่เพิ่มความยาวของตอม่อ และให้ตอม่อวางในลักษณะที่มีทิศทางเดียวกับทิศทางการไหลของน้ำ เพื่อลด Projected length ซึ่งจะเป็นการลดการกัดเซาะลงอีกด้วย

5.2.2 ความลึกการไหลและความเร็วการไหลมีผลต่อหลุมกัดเซาะ กล่าวคือความลึกการไหลมากขึ้น ความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลก็มากขึ้นด้วย แต่ควรจะกล่าวถึงความเร็วควบคู่กันไปด้วย เนื่องจากการที่ความลึกการไหลมากขึ้น ก็หมายความว่า อัตราการไหลมากขึ้น ความเร็วมากขึ้นด้วย จากการทดลองจะพบว่า ที่ค่าความลึกการไหลเดียวกัน เมื่อเปลี่ยนความลาดเอียงท้องน้ำจะทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้น หลุมกัดเซาะก็เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นการกล่าวถึงความลึกการไหลกับหลุมกัดเซาะ ควรกล่าวถึงความเร็วควบคู่ไปด้วย จะเป็นในรูปของ Froude number (Fr) หรือ Particle

shear (τ_0') ก็ได้ แต่จากการทดลอง จะพบว่า คำกล่าวข้างต้นทั้งหมดจะเป็นจริงเมื่อมีสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (clear water scour)

ดังนั้นการจะหาความสัมพันธ์ที่ใช้ในการคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะ และปริมาตรหลุมกัดเซาะควรพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกับธรรมชาติมากที่สุด จากการศึกษานี้ได้ความสัมพันธ์ต่าง ๆ ดังนี้

5.2.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรการไหล และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่าง ๆ ของตอม่อรูปทรงกระบอก สภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ

$$\frac{d_s}{L} = 1x10^{-6} F_r^{1.419} R_e^{1.216} \tag{5.1}$$

$$\frac{V}{A_p y} = 1.34x10^{5}\left(\frac{d_s}{L}\right)^{0.70}\left(\frac{y}{L}\right)^{-0.306} R_e^{-1.128} \tag{5.2}$$

5.2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรการไหล และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่าง ๆ ของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมนมุมปะทะ 0 องศา สภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ

$$\frac{d_s}{L} = 3.26x10^{-4} F_r^{1.832} R_e^{0.931} \tag{5.3}$$

$$\frac{V}{A_p y} = 2.80x10^{2}\left(\frac{d_s}{L}\right)^{0.236}\left(\frac{y}{L}\right)^{0.526} R_e^{-0.908} \tag{5.4}$$

5.2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรการไหล และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่าง ๆ ของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมนมุมปะทะ 30 องศา สภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ

$$\frac{d_s}{L} = 6.59x10^{-6} F_r^{1.838} R_e^{1.312} \tag{5.5}$$

$$\frac{V}{A_p y} = 1.97x10^{8}\left(\frac{y}{L}\right)^{1.654} R_e^{-1.961} F_r^{2.157} \quad (5.6)$$

5.2.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรการไหล และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่าง ๆ ของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมนมุมปะทะ 60 องศา สภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ

$$\frac{d_s}{L} = 5.05x10^{-6} F_r^{0.665} R_e^{1.224} \quad (5.7)$$

$$\frac{V}{A_p y} = 2.82x10^{17}\left(\frac{y}{L}\right)^{2.772} R_e^{-3.478} F_r^{4.070} \quad (5.8)$$

5.2.3 วัสดุท้องน้ำ เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อหลุมกัดเซาะ จากการศึกษาที่ผ่านมาขนาดของวัสดุท้องน้ำที่มีขนาดเล็กจะมีความลึกกัดเซาะสมดุลมากกว่าวัสดุท้องน้ำที่มีขนาดใหญ่ ในขณะที่ตัวแปรอื่นเหมือนกัน จากการทดลองพบว่านอกจากขนาดวัสดุท้องน้ำแล้ว การกระจายตัวของวัสดุท้องน้ำก็มีอิทธิพลต่อความลึกกัดเซาะสมดุล คือ ถ้าวัสดุท้องน้ำมีการกระจายตัวคละกันมาก หรือมีวัสดุที่มีขนาดใหญ่มากกว่า D_{50} มาก ๆ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ armoring ทำให้ความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลน้อยลง นอกจากนั้น ขนาดของวัสดุท้องน้ำยังมีอิทธิพลต่อเวลาการกัดเซาะสมดุล คือ เมื่อขนาดของวัสดุท้องน้ำใหญ่ขึ้น เวลาในการกัดเซาะสมดุลก็จะน้อยลง

5.2.4 จากการทดลอง พบว่า การกัดเซาะรอบตอม่อสะพานที่ก่อให้เกิดการวิบัติของสะพานเกิดขึ้นในลักษณะสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำมากกว่ากรณีอื่น ๆ ซึ่งในสภาวะ ดังกล่าว จะให้ความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลสูงสุด เนื่องจากกระแสน้ำจะปรากฏพฤติกรรมการกัดเซาะขั้วขณะไหลผ่านตอม่อ รูปทรงตอม่อรบกวนทิศทางและความเร็วของกระแสน้ำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มแรงปะทะต่อมวลวัสดุ ทำให้เกิดการกัดเซาะอัตราการพัดพาตะกอนออกจากหลุมมากกว่าศูนย์ ในขณะที่อัตราการพัดพาตะกอนเข้าสู่หลุมเป็นศูนย์

5.2.5 จากความสัมพันธ์ที่ใช้ในการคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะที่หาได้จากการทดลองจะเป็นเพียงแนวทางหนึ่งในการคาดคะเนหาความลึกหลุมกัดเซาะเท่านั้น เนื่องจากตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อหลุมกัดเซาะไม่ว่าจะเป็นตัวแปรการไหลหรือวัสดุท้องน้ำ เป็นสิ่งที่ยากต่อการรวบรวมข้อเท็จจริงทั้งหมดไว้ด้วยกันได้ ดังเช่น สูตรการคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะจากความสัมพันธ์ของ Froude number จะพบว่า ค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่คำนวณได้จากสูตรบางค่า ก็มีความ

แตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลที่ได้จากการทดลอง ทั้งนี้ เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ Armoring ขึ้น ซึ่งในธรรมชาติ วัสดุท้องน้ำที่ไม่มีแรงเชื่อมแน่น (cohesionless) ส่วนใหญ่จะมีลักษณะคละกัน (nonuniform) การที่จะนำเพียงค่า D_{50} มาคาดคะเนความลึกกัดเซาะสมดุลเพียงอย่างเดียว จึงไม่เพียงพอ การกระจายตัวของวัสดุท้องน้ำก็ควรนำมาพิจารณาด้วย ดังนั้นเพื่อที่จะคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลให้ได้ใกล้เคียงธรรมชาติ ควรมีการศึกษาจากกรณีศึกษาควบคู่ไปด้วย

5.2.6 จากการทดลองสังเกตได้ว่า เมื่อตอม่อมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อความเร็วและวัสดุท้องน้ำเหมือนกัน เวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลจะเพิ่มขึ้นด้วย

5.2.7 เมื่อความเร็วเฉลี่ยการไหลสูง ๆ การเข้าสู่สภาวะสมดุลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกว่ากรณีของความเร็วเฉลี่ยการไหลน้อย ๆ เมื่อตัวแปรอื่น ๆ เหมือนกัน

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรมีการศึกษามุมปะทะในแนวดิ่งของตอม่อกับพื้นท้องน้ำของตอม่อรูปทรงต่าง ๆ

5.3.2 จากการทดลอง กำหนดให้เป็นการไหลต่ำกว่าวิกฤต ดังนั้น ควรมีการศึกษาสภาพเงื่อนไขที่สูงกว่าวิกฤตว่ามีผลต่อการกัดเซาะเฉพาะที่ (local scour) อย่างไรบ้าง

5.3.3 จากการทดลอง กำหนดวัสดุท้องน้ำเป็นแบบ nonuniform sand ที่มีอัตราส่วนการผสม 1:1:1 โดยน้ำหนัก จึงควรจำลองวัสดุท้องน้ำในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน เพื่อหาความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของวัสดุท้องน้ำกับหลุมกัดเซาะ

5.3.4 ควรจะมีการสำรวจข้อมูลหลุมกัดเซาะที่เกิดขึ้นในประเทศไทย เพื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับการทดลองในห้องทดลอง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง

5.3.5 การทำการทดลองในรางน้ำเปิด ควรใช้รางน้ำเปิดที่มีความยาวมาก ๆ เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากการไหลแบบไม่สม่ำเสมอ (nonuniform)

5.3.6 ศึกษาถึงผลกระทบของ Dune และ Ripple ต่อหลุมกัดเซาะ