

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การศึกษาการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ได้แยกการศึกษาออกเป็น 2 กรณี คือ การกัดเซาะสภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และการกัดเซาะสภาวะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ซึ่งตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อความลึกหลุมกัดเซาะ ได้แก่ ลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตของตอม่อ (pier geometry) ตัวแปรการไหล (flow parameters) และลักษณะของวัสดุท้องน้ำ (characteristics of bed materials) ในการศึกษาี้ กำหนดให้วัสดุท้องน้ำเป็นวัสดุที่ไม่มีแรงเชื่อมแน่น (cohesionless material) โดยใช้ทรายจากลำน้ำธรรมชาติที่มีลักษณะคละกัน (nonuniform sand) มีค่า D_{50} เท่ากับ 0.753 มม. σ_g เท่ากับ 2.75 ϕ เท่ากับ 30 องศา รายละเอียดในภาคผนวก ข เพื่อนำมาหาความสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อหลุมกัดเซาะ โดยทำการทดลองทั้งหมด 145 กรณี แบ่งตามสภาวะเงื่อนไขได้ ดังนี้

1. สภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ

1.1 ตอม่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 5.0 และ 7.5 ซม. ที่อัตราการไหลและความลาดชันต่าง ๆ ทั้งหมด 31 กรณี

1.2 ตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมนขนาดความกว้างต่อความยาว (b/l) 2.0/7.5 2.5/12.5 และ 5.0/15.0 มุมปะทะ 0 องศา ที่อัตราการไหลและความลาดชันต่าง ๆ ทั้งหมด 30 กรณี

1.3 ตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน ขนาดความกว้างต่อความยาว (b/l) 2.0/7.5 2.5/12.5 และ 5.0/15.0 มุมปะทะ 30 องศา ที่อัตราการไหลและความลาดชันต่าง ๆ ทั้งหมด 30 กรณี

1.4 ตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน ขนาดความกว้างต่อความยาวมุมปะทะ 60 องศา ที่อัตราการไหลและความลาดชันต่าง ๆ ทั้งหมด 15 กรณี

2. สภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ทำการทดลองโดยใช้ตอม่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 5.0 และ 7.5 ซม. ที่อัตราการไหลความลาดชันและอัตราการโรยทรายต่าง ๆ ทั้งหมด 35 กรณี

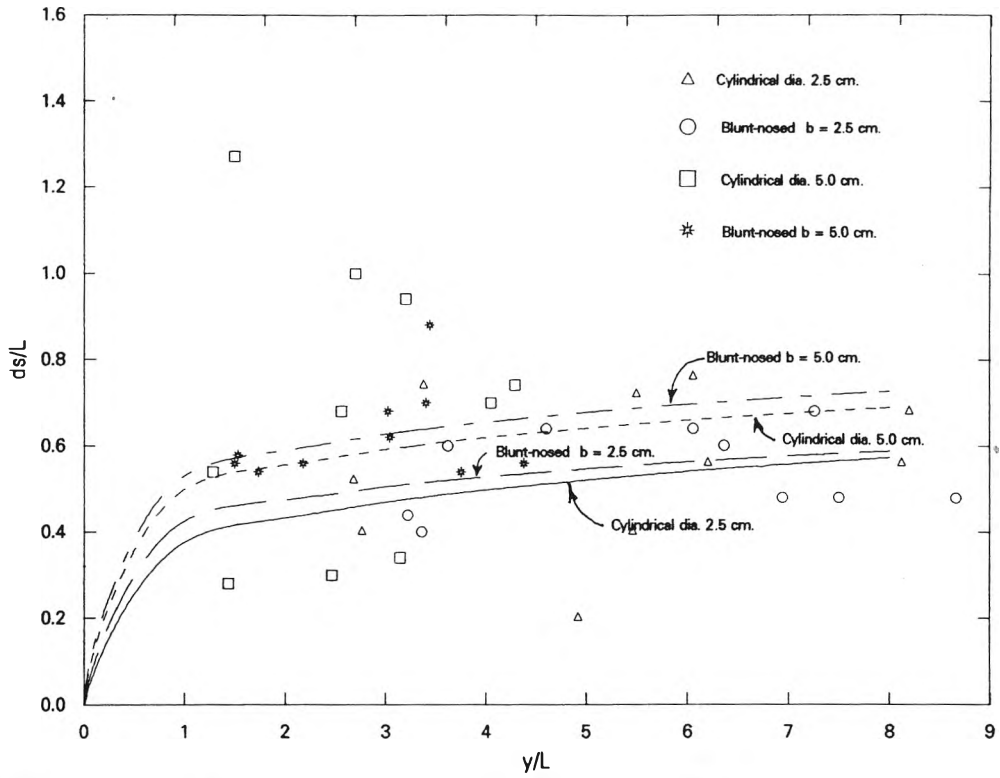
จากกรณีศึกษาทั้งหมดนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ กับหลุมกัดเซาะ ดังนี้

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางเรขาคณิตของตอม่อกับหลุมกัดเซาะ

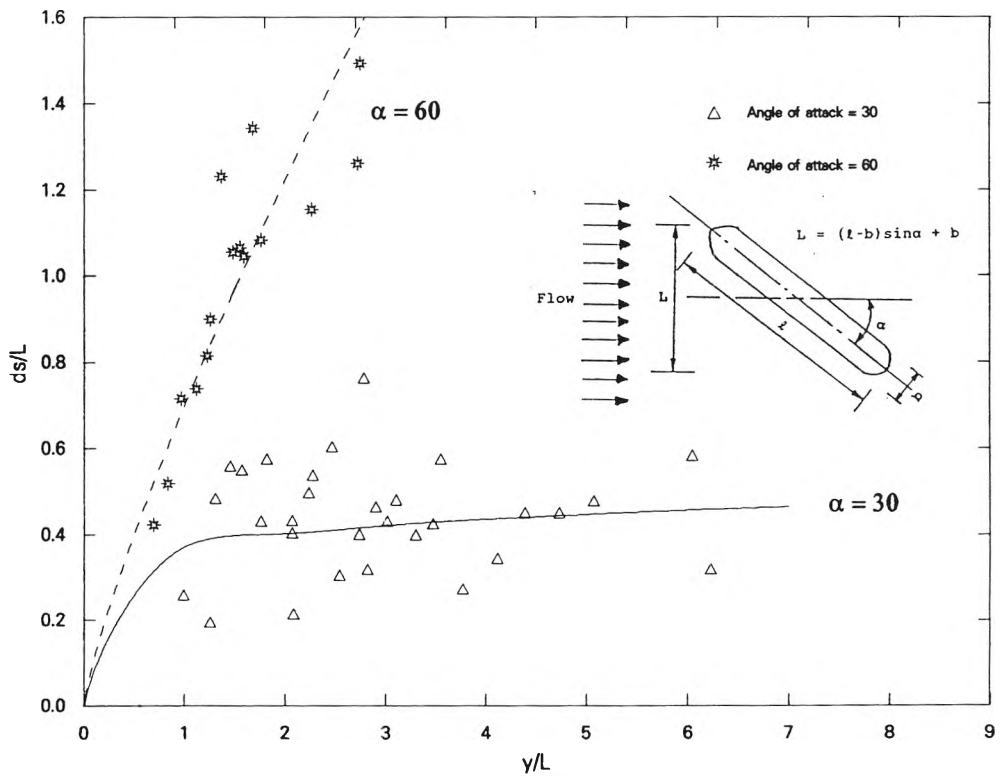
ลักษณะทางเรขาคณิตของตอม่อที่มีผลต่อหลุมกัดเซาะ ได้แก่ รูปทรง ขนาด และมุมปะทะของตอม่อต่อทิศทางการไหล ในการทดลองได้ใช้ตอม่อ 2 รูปทรง คือ ตอม่อทรงกระบอก (cylindrical pier) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 5.0 และ 7.5 ซม. ตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน (blunt-nosed pier) ขนาดความกว้างต่อความยาว (b/l) 2.0/7.5 2.5/12.5 และ 5.0/15.0 มุมปะทะ 0 30 และ 60 องศา จากการทดลอง พบว่า รูปทรงของตอม่อ ได้แก่ รูปทรงกระบอกและรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน ที่มีมุมปะทะกับทิศทางการไหลของน้ำเท่ากับ 0 องศา ซึ่งมีรูปทรงที่กีดขวางทางน้ำมีลักษณะมนเหมือนกัน และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน จะให้ความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลง่ายใกล้เคียงกัน ดังรูป 4.1 แสดงว่าความยาวของตอม่อ (l) ไม่ค่อยมีผลกระทบต่อความลึกการกัดเซาะ เมื่อความยาวของตอม่ออยู่ในทิศทางเดียวกับการไหล ตอม่อที่มีมุมปะทะกับการไหล หรือมี Projected length (L) ยาว จะมีพื้นที่หลุมกัดเซาะใหญ่และลึกกว่าตอม่อที่มี Projected length สั้น ดังรูป 4.2 และ 4.3 และจากรูป 4.3 พบว่าที่ความลึกการไหลใกล้เคียงกัน ตอม่อที่มี Projected length เพิ่มขึ้น จะมีความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลง่ายเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผู้ศึกษาท่านอื่น ๆ นอกจากนั้นขนาดของตอม่อก็มีผลต่อความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลง่าย คือ ตอม่อที่มีรูปทรงเรขาคณิตเหมือนกัน ขนาดของตอม่อเพิ่มขึ้น ความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลง่ายเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูป 4.4 - 4.7

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการไหลกับหลุมกัดเซาะ

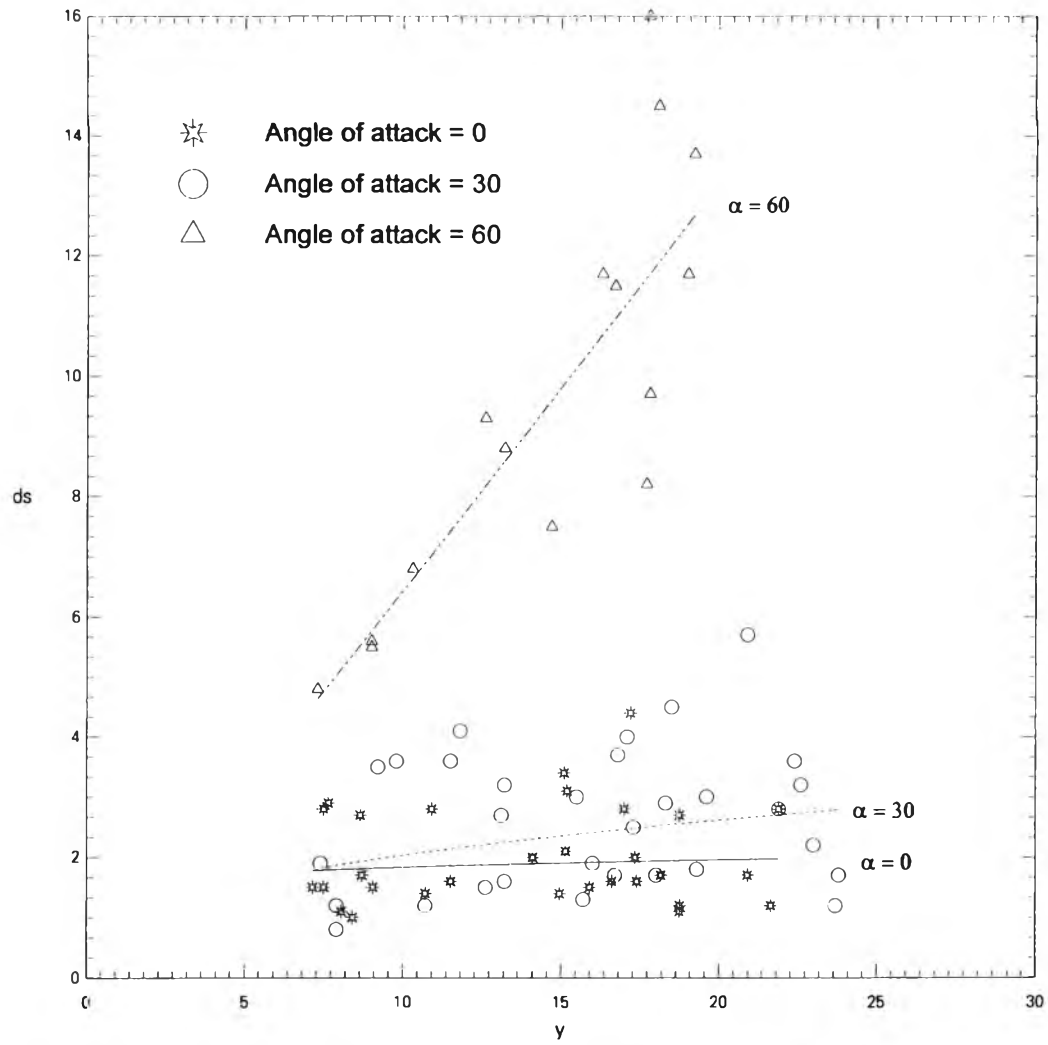
ตัวแปรการไหลที่เกี่ยวข้องกับหลุมกัดเซาะ ได้แก่ ความลึกการไหล (y) และความเร็วเฉลี่ยการไหล (v) ในการทดลองนี้กำหนดการไหลเป็นแบบต่ำกว่าวิกฤต Froude number < 1 โดยที่ความเร็วเฉลี่ยการไหลมีค่าต่ำกว่าความเร็ววิกฤต ในกรณีสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และความเร็วเฉลี่ยการไหลมีค่าสูงกว่าความเร็ววิกฤต ในกรณีสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ จากการทดลองพบว่าที่สภาวะเงื่อนไขของการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ความลึกการไหล (y) เพิ่มขึ้น ความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลง่ายเพิ่มขึ้น ดังรูป 4.8-4.11 ซึ่งตรงกับรายงานของ Laursen ซึ่งศึกษาไว้ระหว่างปี ค.ศ.1960-1963 โดยได้ศึกษาการกัดเซาะเฉพาะแห่งรอบตอม่อ ในสภาวะการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และมีใจความสำคัญว่าความลึกการไหลเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญซึ่งควบคุมความลึกการกัดเซาะ



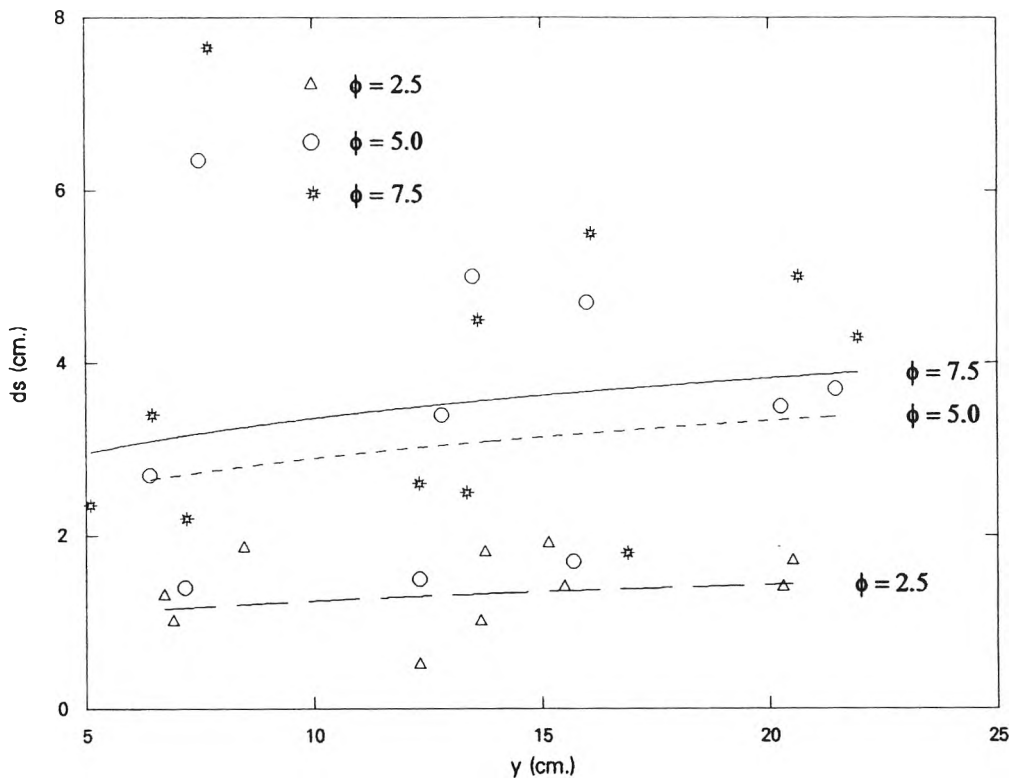
รูป 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุกับรูปทรงเรขาคณิตของตอม่อ



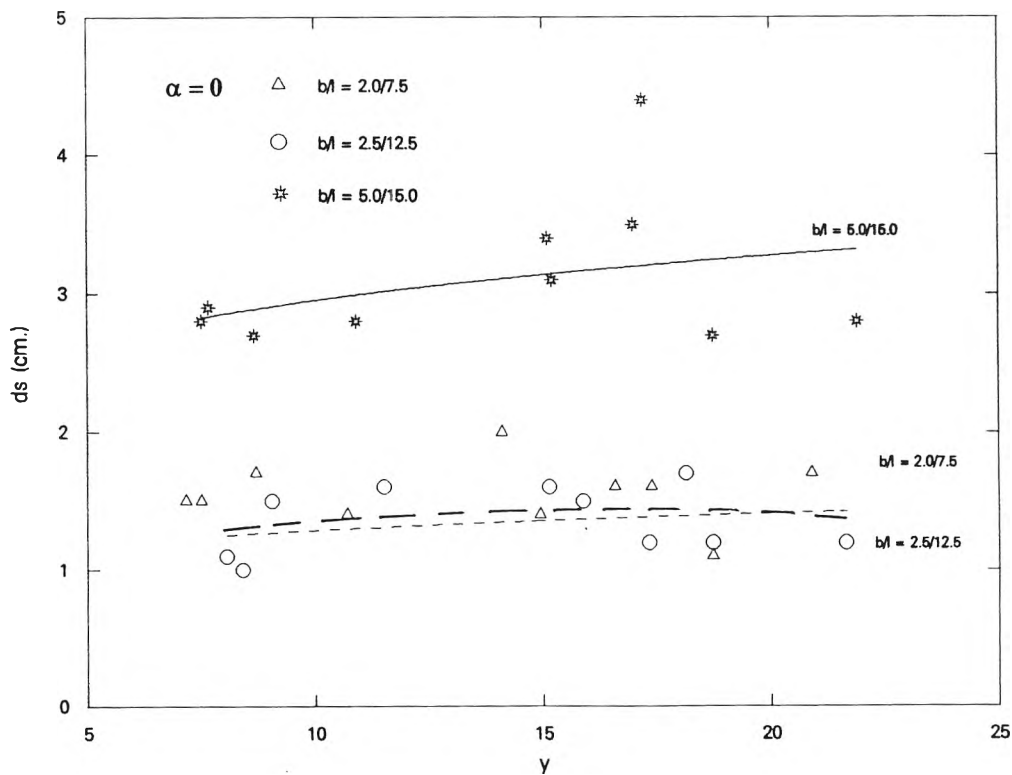
รูป 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุกับมุมปะทะของตอม่อ



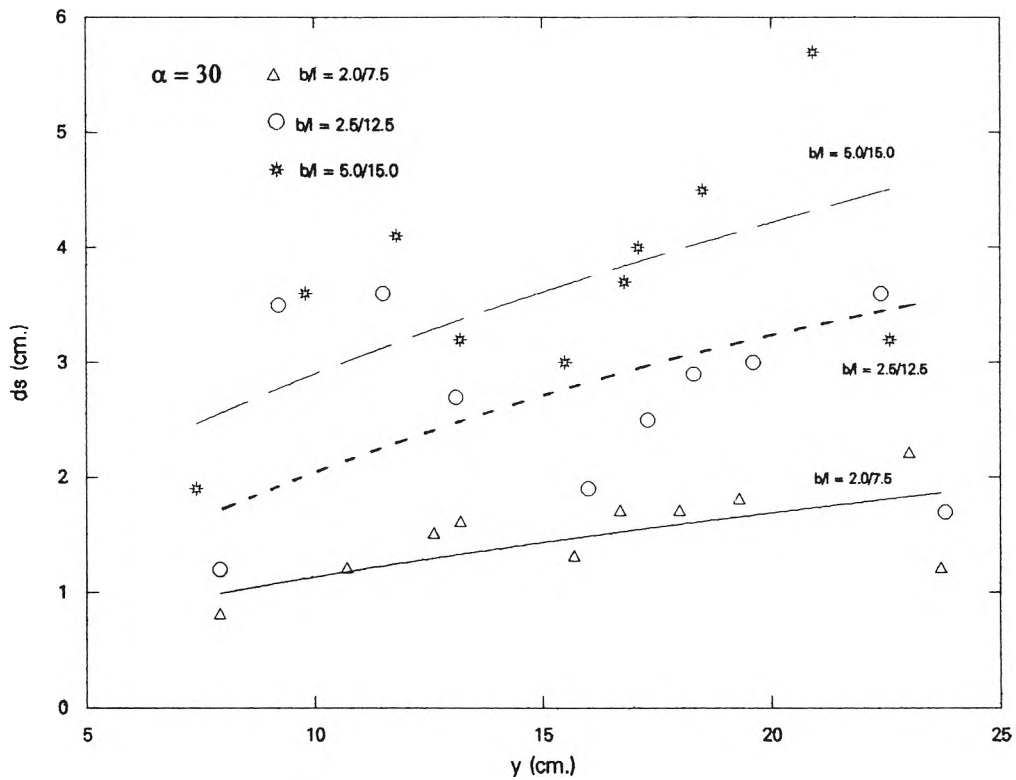
รูป 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุกับความลึกการไหลของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน ที่มุมปะทะต่าง ๆ



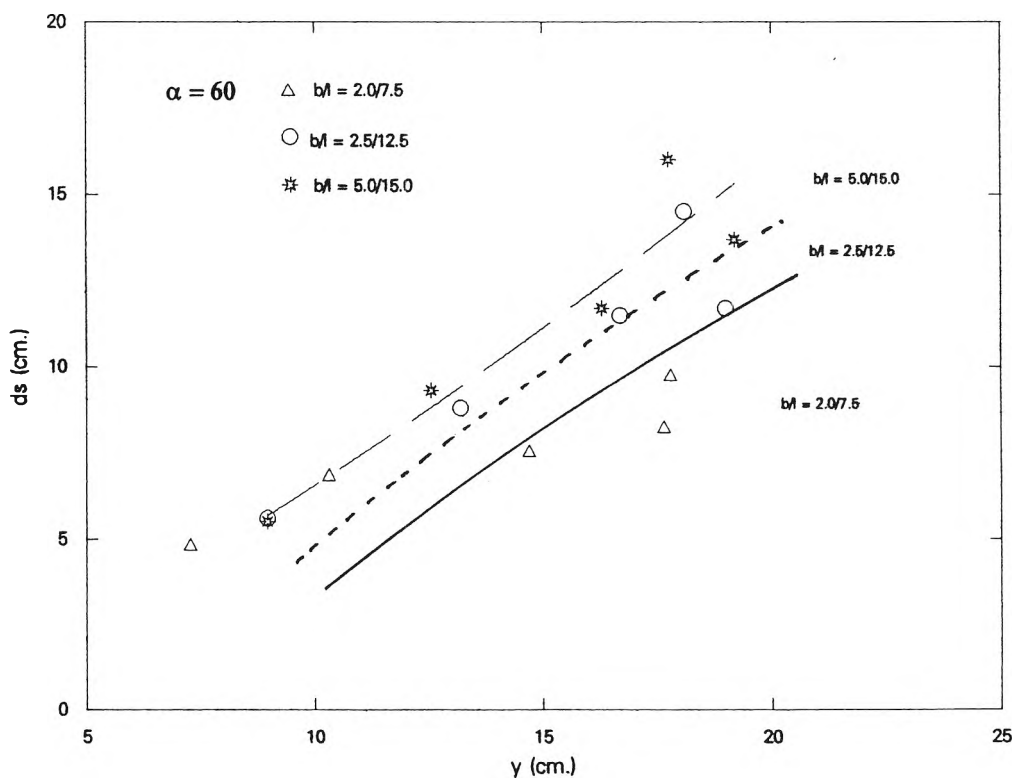
รูป 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลงับความลึกการไหลของตอม่อรูปทรงกระบอก



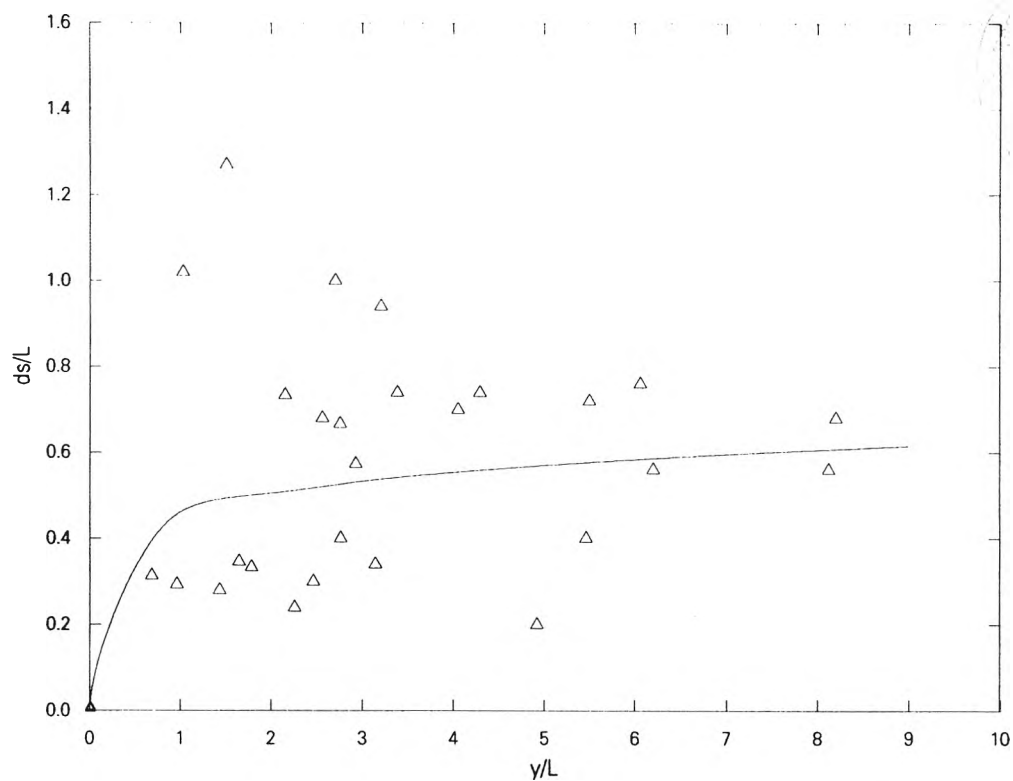
รูป 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลงับความลึกการไหลของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 0 องศา



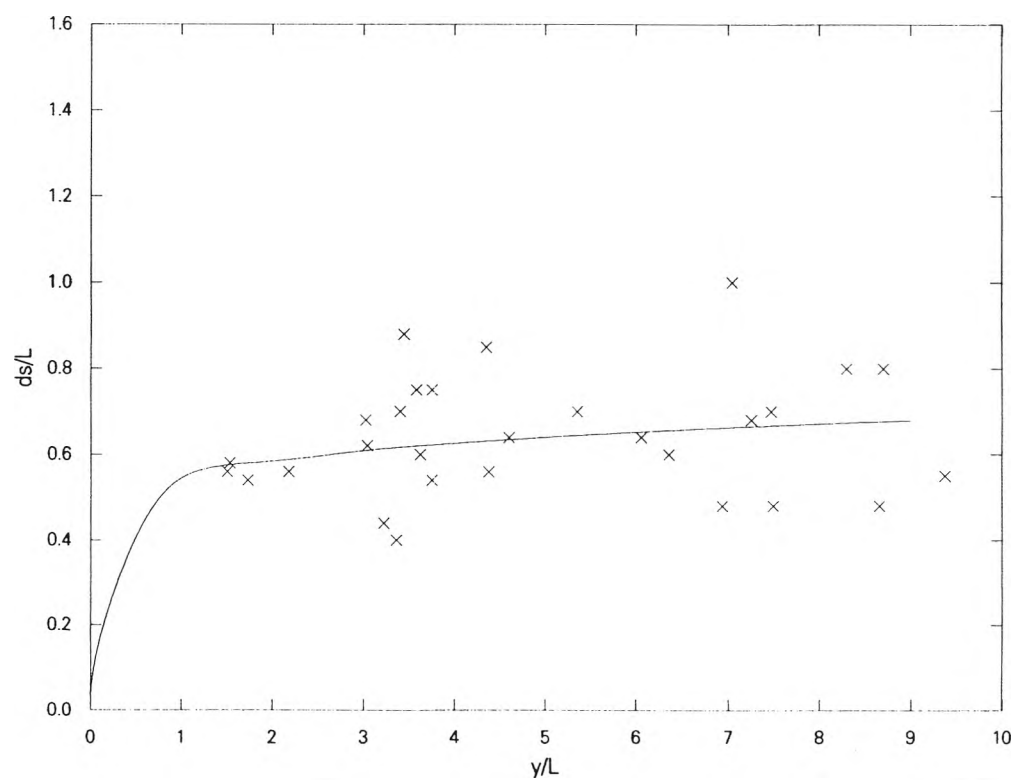
รูป 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลงกับความลึกการไหลของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 30 องศา



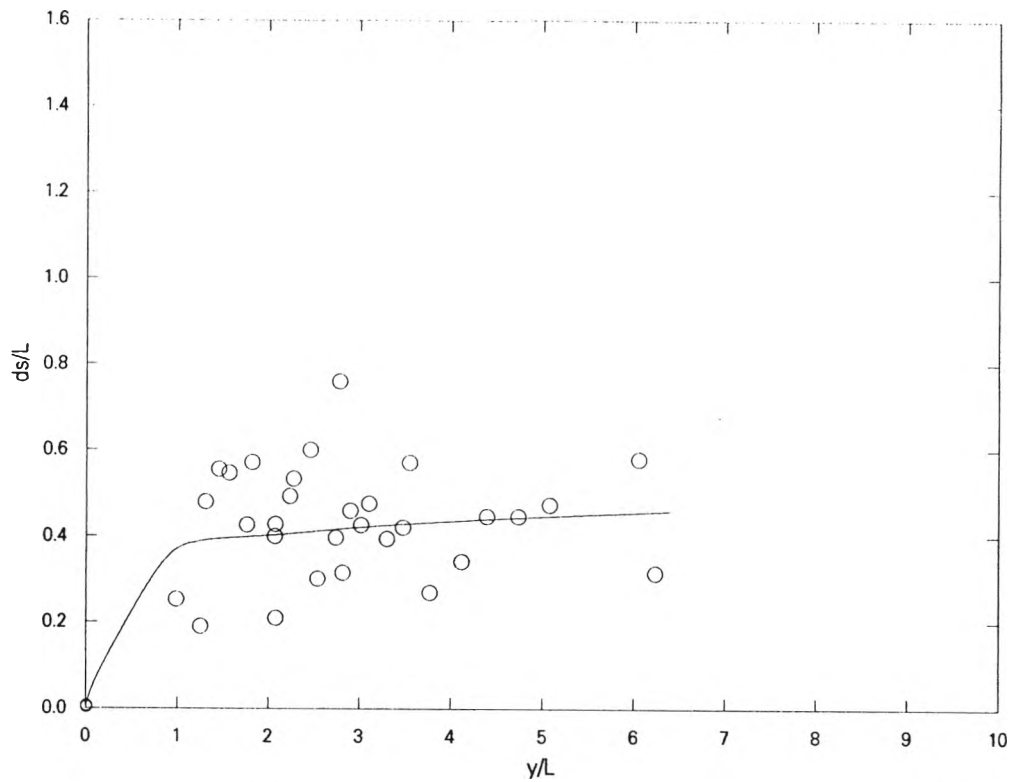
รูป 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลงกับความลึกการไหลของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 60 องศา



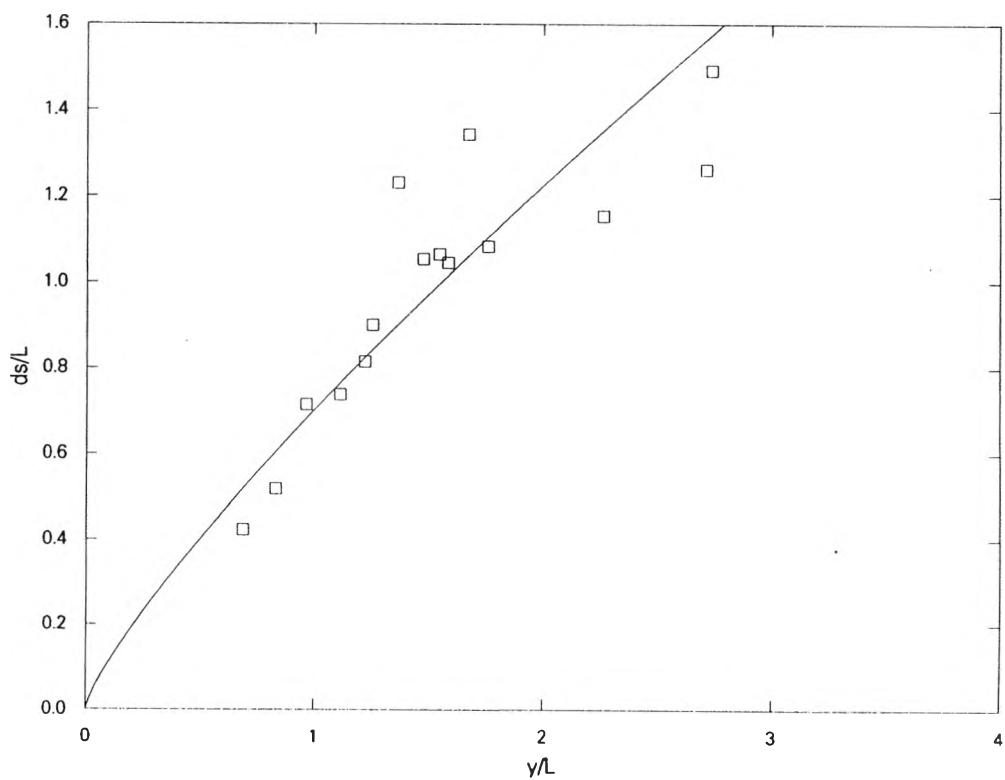
รูป 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุกับความลึกน้ำของตอม่อรูปทรงกระบอก



รูป 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุกับความลึกน้ำของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 0 องศา



รูป 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลงกับความลึกน้ำ
ของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 30 องศา

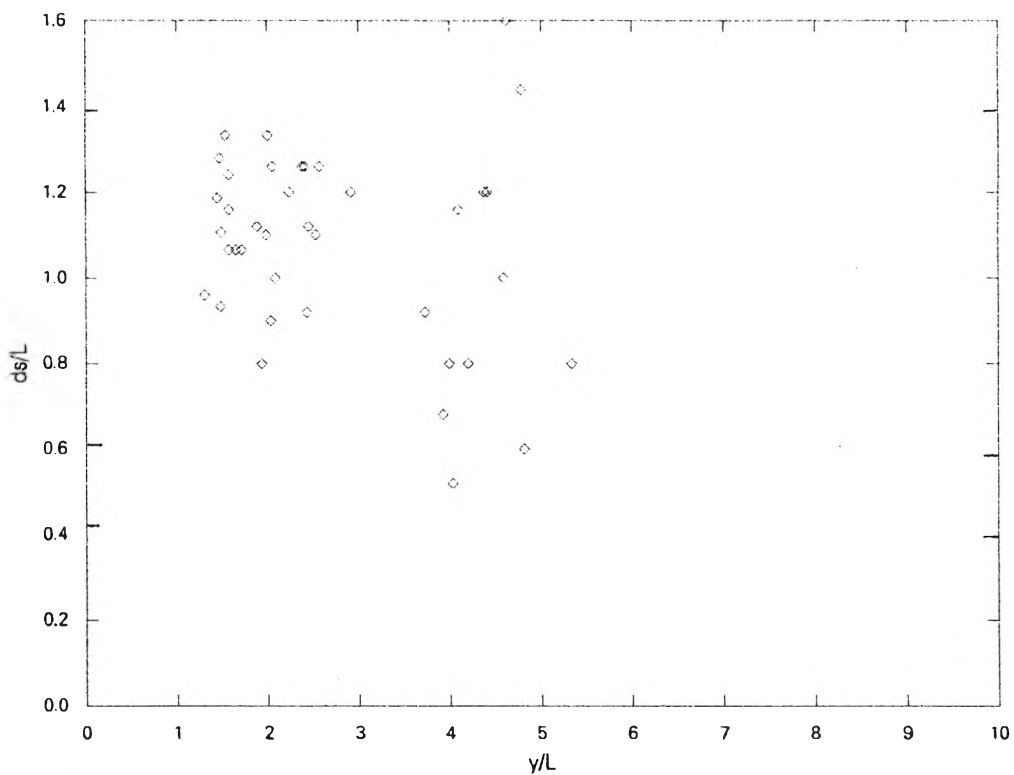


รูป 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลงกับความลึกน้ำ
ของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 60 องศา

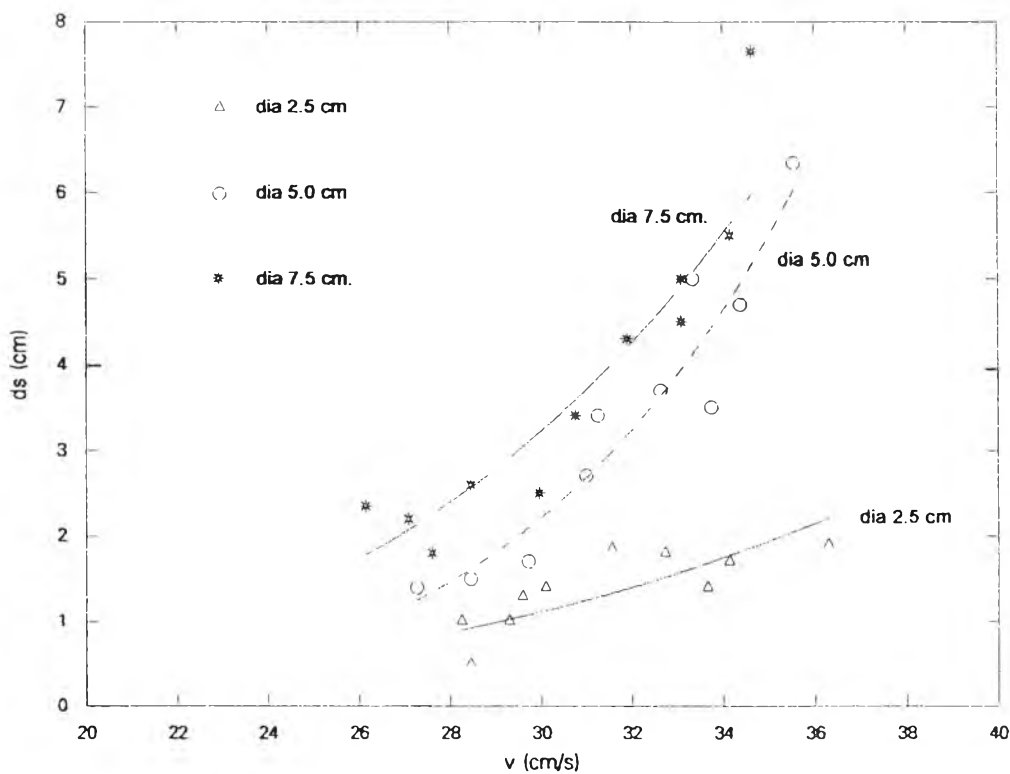
จากการทดลองนี้ยังพบว่า ในสภาวะเงื่อนไขการกักเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ไม่เป็นไปตามรายงานของ Laursen คือ ความลึกกักเซาะสมดุลไม่มีผลกระทบโดยการเปลี่ยน ความลึกการไหล ดังรูป 4.12 แต่ผลการทดลองตรงกันกับรายงานของ Chan ที่ศึกษาไว้ในปี 1980 โดยทำการทดลองการกักเซาะเฉพาะแห่งรอบตอม่อ ในสภาวะเงื่อนไขการกักเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ มีใจความสำคัญว่าความลึกกักเซาะสมดุลไม่มีผลกระทบโดยการเปลี่ยน ความลึกการไหล การที่ข้อสรุปไม่ตรงกับข้อสรุปของ Laursen อาจเนื่องมาจากการทดลองของ Laursen เป็นการทดสอบในสภาวะเงื่อนไขการกักเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ

นอกจากนั้น จากรูป 4.8-4.11 จะพบว่ามีชุดข้อมูลบางชุดที่แสดงว่า ที่ความลึกการไหล น้อย แต่ความลึกหลุมกักเซาะมาก เนื่องจากในการทดลองสามารถควบคุมความลึกการไหลได้ โดยประตูระบายน้ำที่ปลายสุดของรางน้ำ (tail gate) และสามารถเพิ่มความเร็วน้ำได้โดยการ ปรับความลาดเอียงท้องน้ำ (slope) แสดงว่าที่ความลึกการไหลเท่ากัน ความเร็วเพิ่มขึ้นหรืออัตราการไหลมากขึ้น ความลึกหลุมกักเซาะมากขึ้น ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกการไหลกับ หลุมกักเซาะ นอกจากค่าความลึกการไหลแล้ว ความเร็วและอัตราการไหลก็ควรนำมากล่าวถึง พร้อม ๆ กันด้วย ซึ่งตรงกับการศึกษาของ Garde และคณะ (1961) มีใจความสำคัญว่า ความลึกของการไหลมีผลกระทบน้อยมากต่อความลึกการกักเซาะ และความเร็วของการไหลเป็นองค์ประกอบสำคัญ แต่ไม่ได้แบ่งระหว่างการกักเซาะในสภาวะเงื่อนไขที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และสภาวะเงื่อนไขที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ

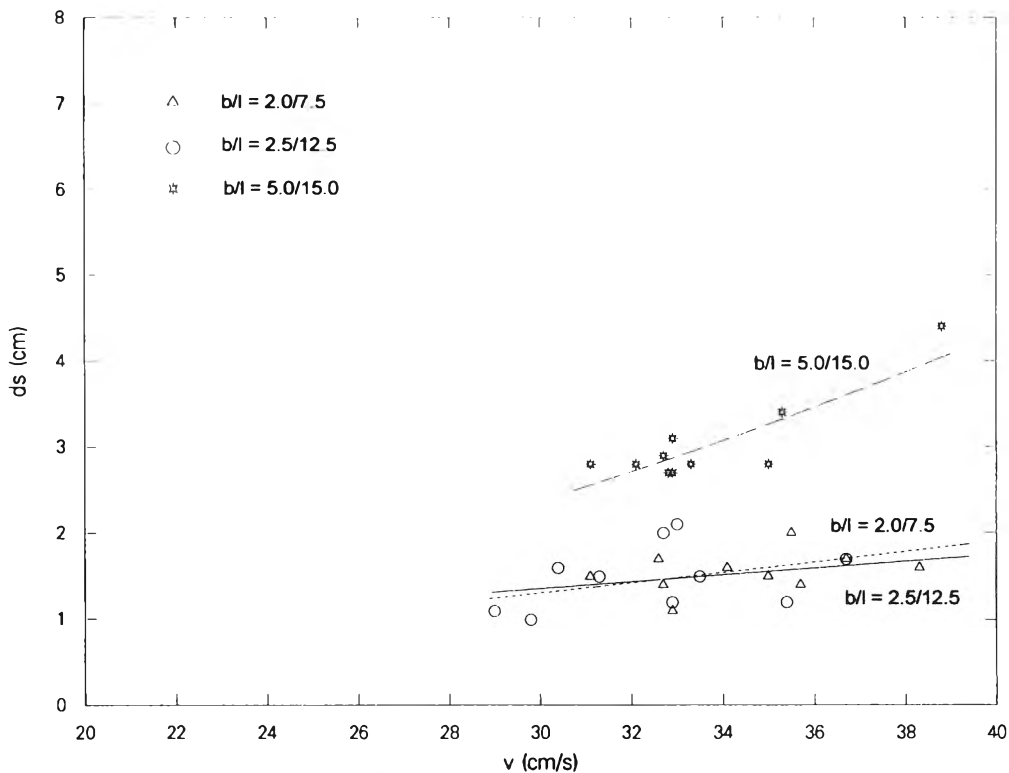
ในการทดลองนี้จึงได้ทำการศึกษาทั้งสองสภาวะเงื่อนไข พบว่าที่สภาวะเงื่อนไขการกักเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ความเร็วเฉลี่ยการไหลเพิ่มขึ้น ความลึกหลุมกักเซาะสมดุลเพิ่มขึ้น และที่ตอม่อรูปทรงเรขาคณิตเหมือนกันความเร็วเฉลี่ยการไหลใกล้เคียงกันขนาดของตอม่อเพิ่มขึ้น ความลึกหลุมกักเซาะสมดุลเพิ่มขึ้น ดังรูป 4.13-4.16 จากรูป 4.14 จะพบว่าตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมนที่มุมปะทะ 0 องศา Projected length มีค่าเท่ากับความกว้างของตอม่อ (b) คือ 2.0 2.5 และ 5.0 ซม. ซึ่งตอม่อที่มีความกว้างใกล้เคียงกันคือ 2.0 และ 2.5 ซม. ที่ความเร็วเฉลี่ยการไหลใกล้เคียงกันจะให้ค่าความลึกหลุมกักเซาะสมดุลใกล้เคียงกัน แม้ว่าความยาวของตอม่อ (l) จะแตกต่างกัน คือ ตอม่อที่มีความกว้าง 2.0 ซม. มีความยาว 7.5 ซม. และตอม่อที่มีความกว้าง 2.5 ซม. มีความยาว 12.5 ซม. ซึ่งเป็นการยืนยันความสัมพันธ์ที่ว่าความยาวของตอม่อ ไม่ค่อยมีผลกระทบต่อความลึกการกักเซาะ เมื่อความยาวของตอม่ออยู่ในทิศทางเดียวกันกับการไหล และที่สภาวะเงื่อนไขการกักเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ความเร็วเฉลี่ยการไหลไม่ได้เป็นผลกระทบที่สำคัญต่อความลึกหลุมกักเซาะสมดุล ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมการกักเซาะเกิดจากความเร็วกะแสน้ำจริง (real velocity, v_r) มีความเร็วมากกว่าความเร็ววิกฤต



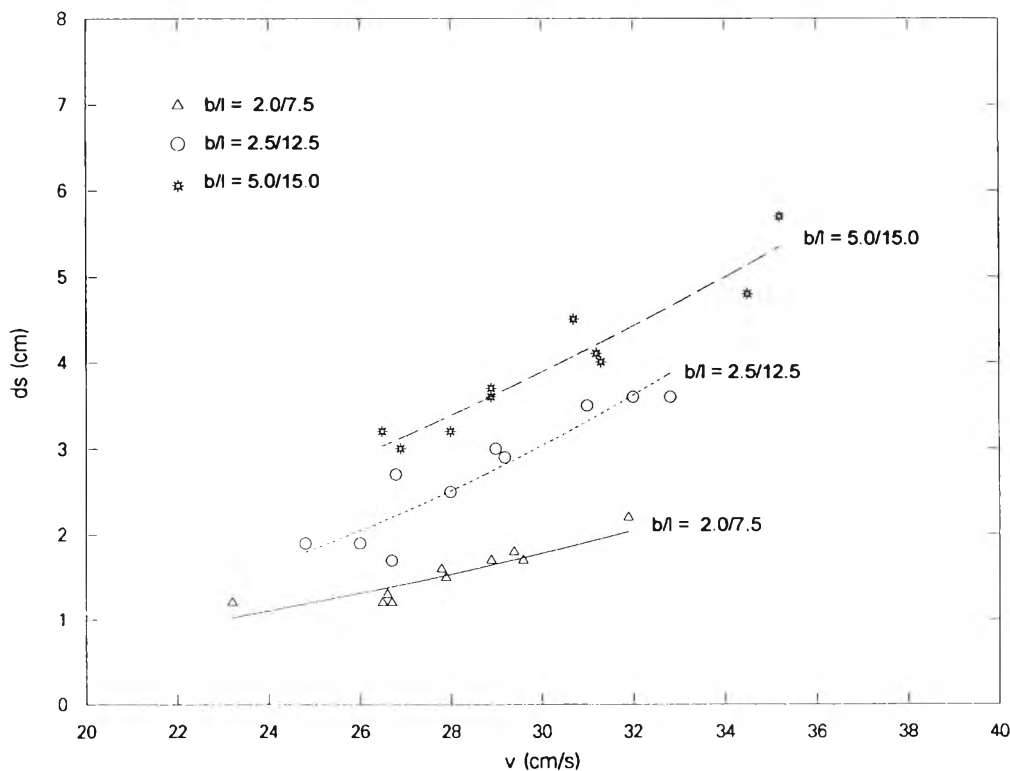
รูป 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุกับความลึกน้ำของตอม่อรูปทรงกระบอก ในสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนของตะกอนท้องน้ำ



รูป 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความลึกกัดเซาะสมดุ ของตอม่อรูปทรงกระบอก



รูป 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความลึกกัตเซาะสมดุ
ของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 0 องศา

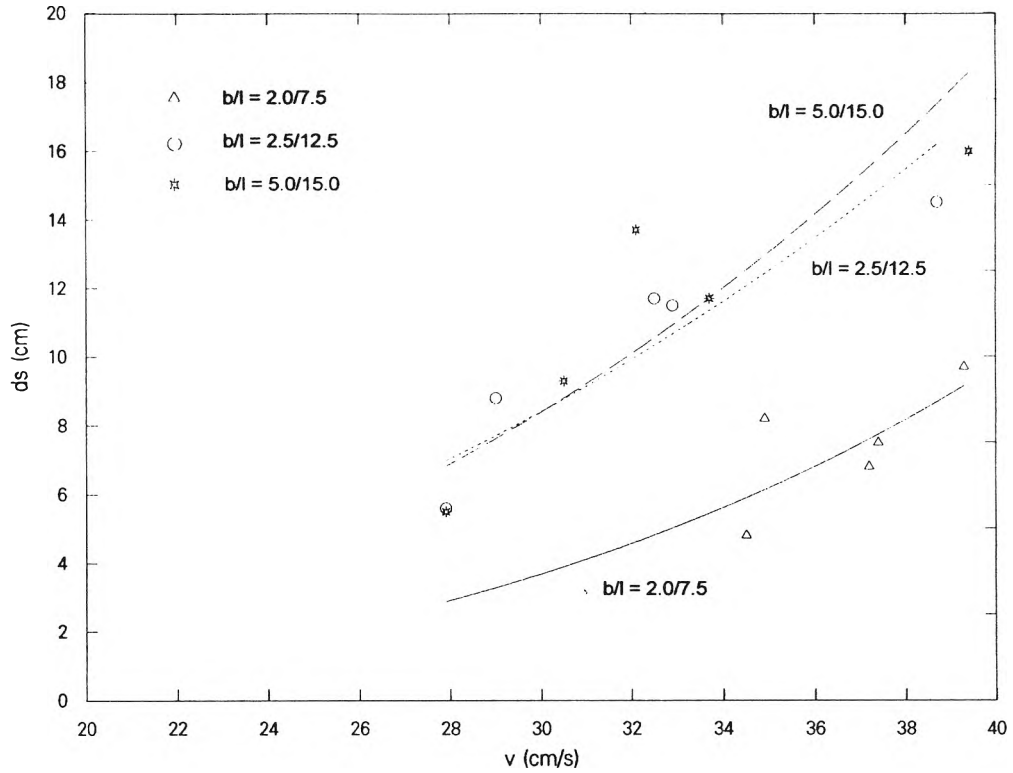


รูป 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความลึกกัตเซาะสมดุ
ของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 30 องศา

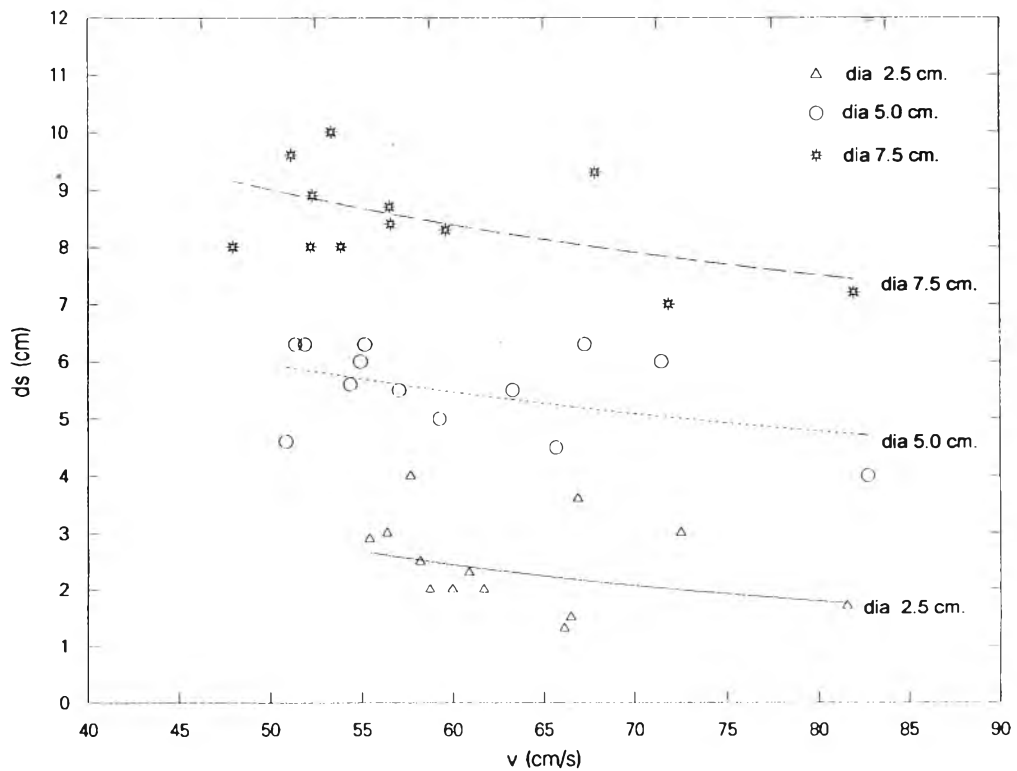
หรือความเร็วกัดเซาะ (eroded velocity, v_e) จึงทำให้เกิดการกัดเซาะ หรือแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริง (τ_0) มีค่ามากกว่าแรงเฉือนวิกฤต (critical shear หรือ tractive force, (τ_c)) ในสถานะเงื่อนไขการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ $v_r < v_e$ หรือ $\tau_0 < \tau_c$ แต่ที่บริเวณตอม่อสะพาน $v_r > v_e$ หรือ $\tau_0 > \tau_c$ จึงทำให้เกิดการกัดเซาะที่บริเวณรอบๆ ตอม่อสะพาน ดังนั้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ความลึกหลุมกัดเซาะจึงเพิ่มขึ้น

แต่ในสถานะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำตลอดลำน้ำ $v_r > v_e$ หรือ $\tau_0 > \tau_c$ อยู่แล้ว ความเร็วจึงไม่มีผลต่อความลึกหลุมกัดเซาะดังรูป 4.17 และจากรูป 4.17 จะพบว่าความกว้างของตอม่อมีอิทธิพลต่อขนาดความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลง่ายได้สถานะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ซึ่งตรงกับการศึกษาของ Laursen (1960 , 1962) มีใจความสำคัญว่าความกว้างของตอม่อและรูปทรงทางเรขาคณิตมีอิทธิพลต่อขนาดของหลุมกัดเซาะสูงสุด ของการกัดเซาะในสถานะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ จากความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลงับความลึกการไหล และความเร็วเฉลี่ยการไหล ที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดข้างต้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกัดเซาะสมดุลงับความลึกน้ำและความเร็วเฉลี่ยการไหล มาสัมพันธ์กันในรูปของความลึกกัดเซาะสมดุลงับ Froude number (Fr) และ Reynolds number (Re) เนื่องจาก Froude number และ Reynolds number เป็นฟังก์ชันของความเร็วเฉลี่ยการไหลและความลึกการไหล เพื่อหาความสัมพันธ์ที่ใช้ในการคาดคะเนความลึกการกัดเซาะของตอม่อรูปทรง ต่าง ๆ โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นโค้ง (multiple non-linear regression) ดังตาราง 4-1 และรูป4.18-4.22

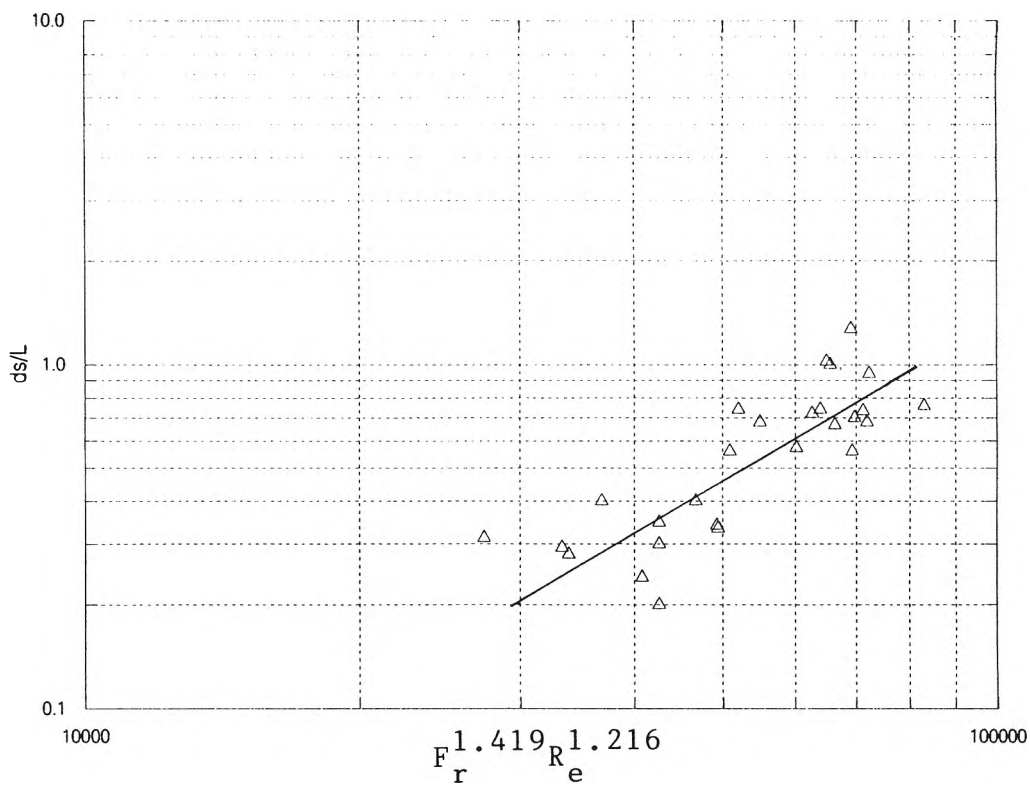
จากตาราง 4-1 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นโค้งและรูป 4.22 จะพบว่าความสัมพันธ์ในสถานะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลงับ Froude number และ Reynolds number ไม่มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งแสดงค่าความลึกหลุมกัดเซาะในสถานะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรการไหล



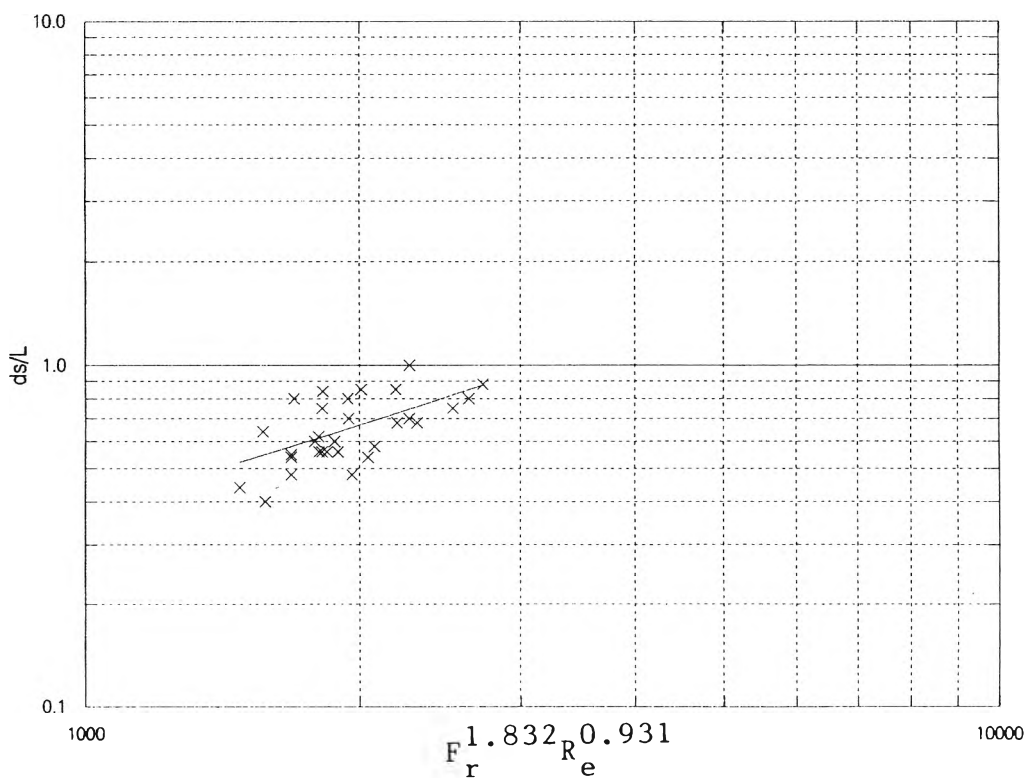
รูป 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความลึกก้นเซาะสมดุลของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 60 องศา



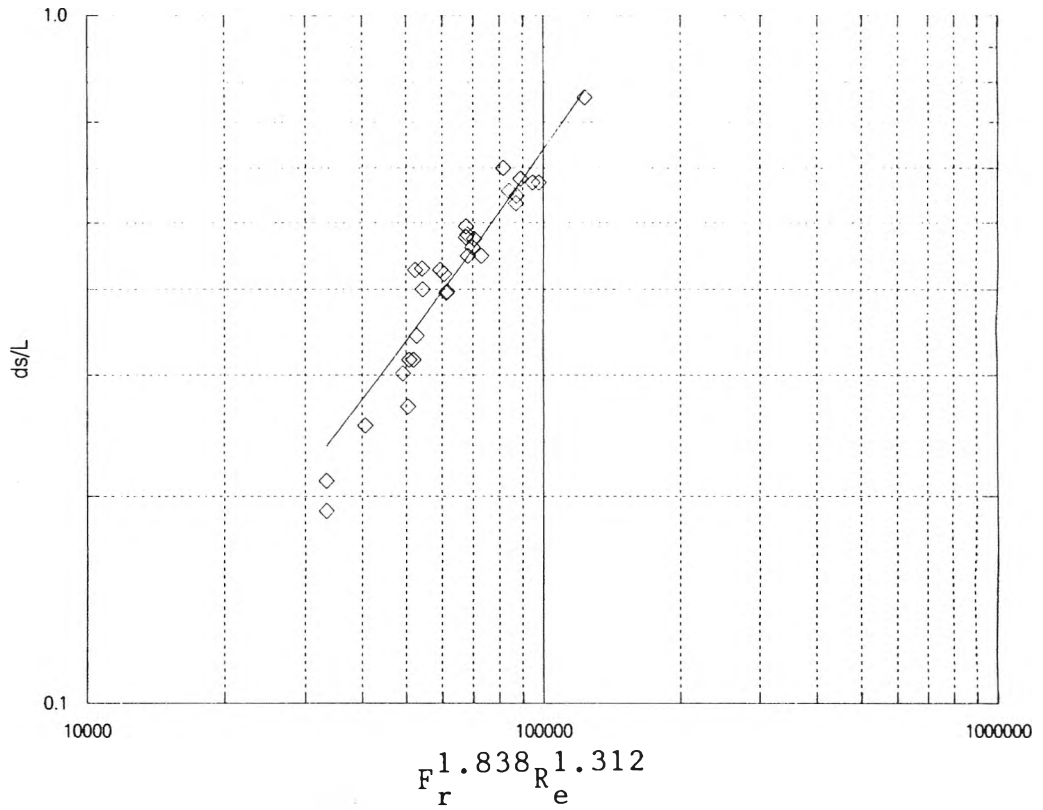
รูป 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความลึกก้นเซาะสมดุลของตอม่อรูปทรงกระบอกในสภาวะเงื่อนไขการก้นเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ



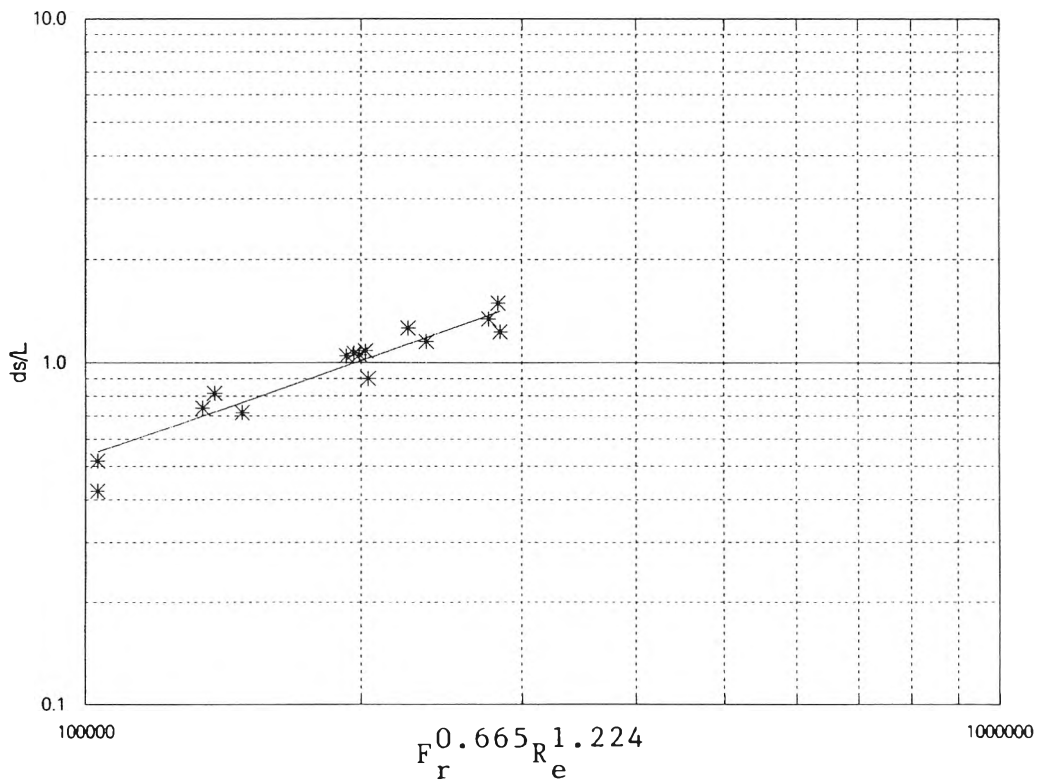
รูป 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลงกับตัวแปรการไหลของตอม่อรูปทรงกระบอก สภาวะเงื่อนไข Clear water scour



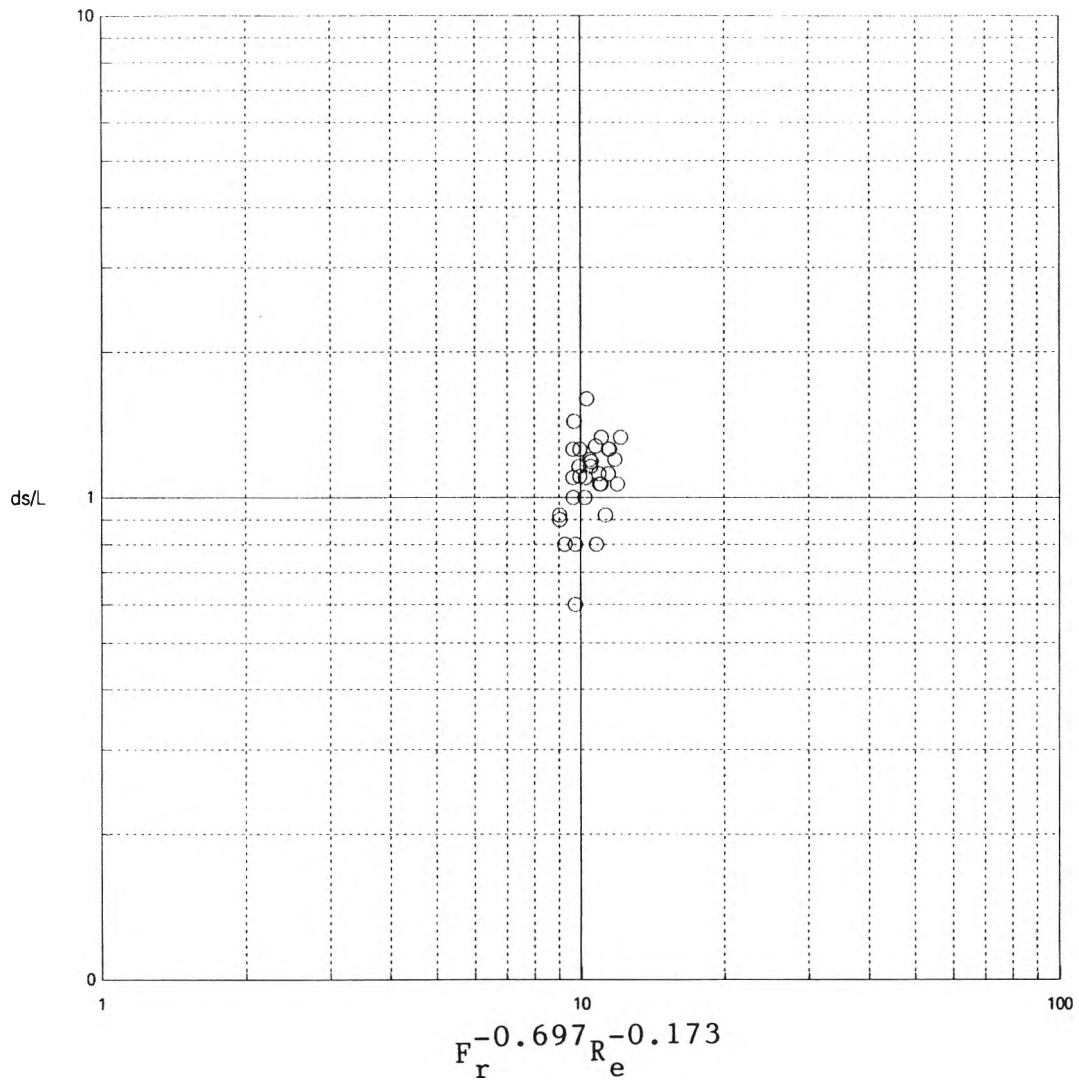
รูป 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลงกับตัวแปรการไหลของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 0 องศา



รูป 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุกับตัวแปรการไหลของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 30 องศา



รูป 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุกับตัวแปรการไหลของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 60 องศา



รูป 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลกับตัวแปรการไหลของตอม่อรูปทรงกระบอก สภาวะเงื่อนไข Live-bed scour

ตาราง 4-1 การวิเคราะห์การถดถอย พหุคูณเชิงเส้นโค้ง ใช้ประมาณหาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกสมดุหลุมกัดเซาะ กับตัวแปรการไหล (Multiple Non-Linear Regression Results of Relative Scour Depth)

$$\frac{d_s}{L} = C_0 F_r^{C_1} R_e^{C_2}$$

รูปร่าง ตอม่อ	สภาวะเงื่อนไข	มุม ปะทะ	C ₀	C ₁	C ₂	R ²	SEE
ทรงกระบอก	ไม่มีการเคลื่อนที่ ของตะกอนท้องน้ำ	-	1×10 ⁻⁵	1.419	1.216	0.80	0.16
สี่เหลี่ยมผืนผ้า ปลายมน	ไม่มีการเคลื่อนที่ ของตะกอนท้องน้ำ	0	3.26×10 ⁻⁴	1.832	0.931	0.90	0.07
สี่เหลี่ยมผืนผ้า ปลายมน	ไม่มีการเคลื่อนที่ ของตะกอนท้องน้ำ	30	6.59×10 ⁻⁶	1.838	1.312	0.99	0.04
สี่เหลี่ยมผืนผ้า ปลายมน	ไม่มีการเคลื่อนที่ ของตะกอนท้องน้ำ	60	5.05×10 ⁻⁶	0.665	1.224	0.92	0.03
ทรงกระบอก	มีการเคลื่อนที่ ของตะกอนท้องน้ำ	-	0.105	-0.697	-0.173	0.25	0.09

หมายเหตุ R² = สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์

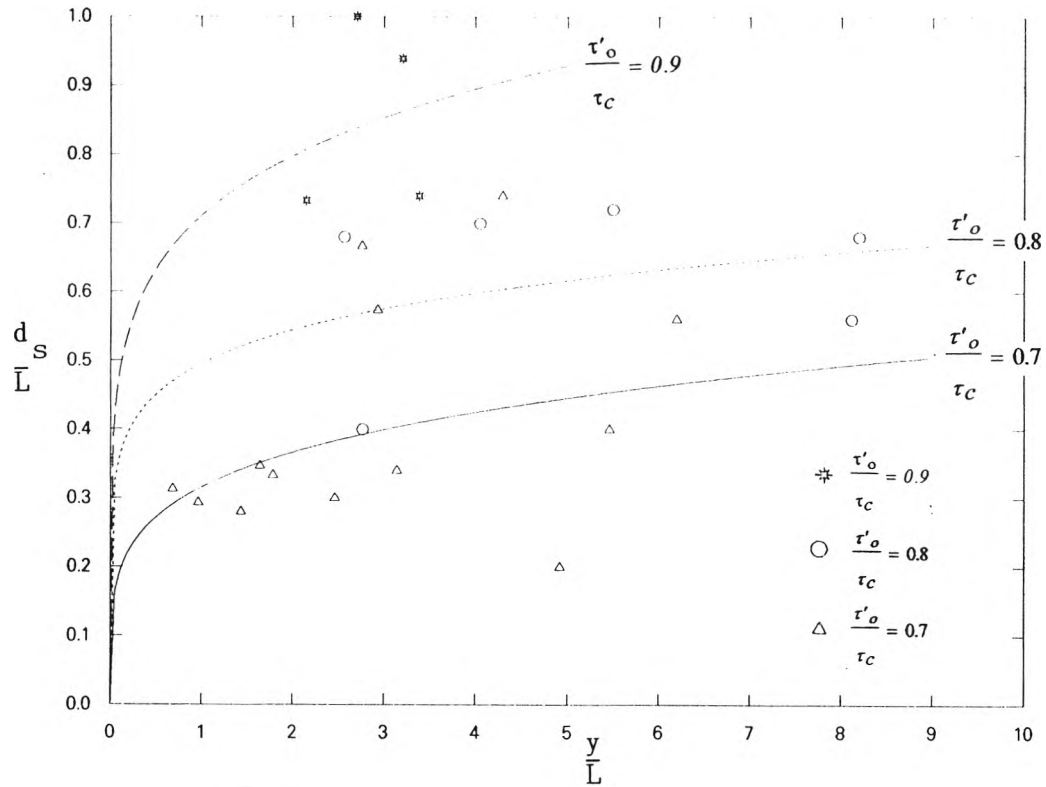
SEE = Standard error of estimate

นอกจากนั้น ยังสามารถหาความสัมพันธ์ของความลึกกัดเซาะสมดุหลุมกับฟังก์ชันของความ
เร็วในรูปของอัตราส่วนระหว่าง Particle shear (τ_0') สมการ 4.1 ซึ่งเป็นการศึกษาของ Laursen
(1958) เกี่ยวกับแรงที่กระทำกับวัสดุท้องน้ำโดยตรง (อ้างถึงใน Raudkivi : 206) กับ Critical
shear (τ_c) ในสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ดังรูป 4.23 - 4.26

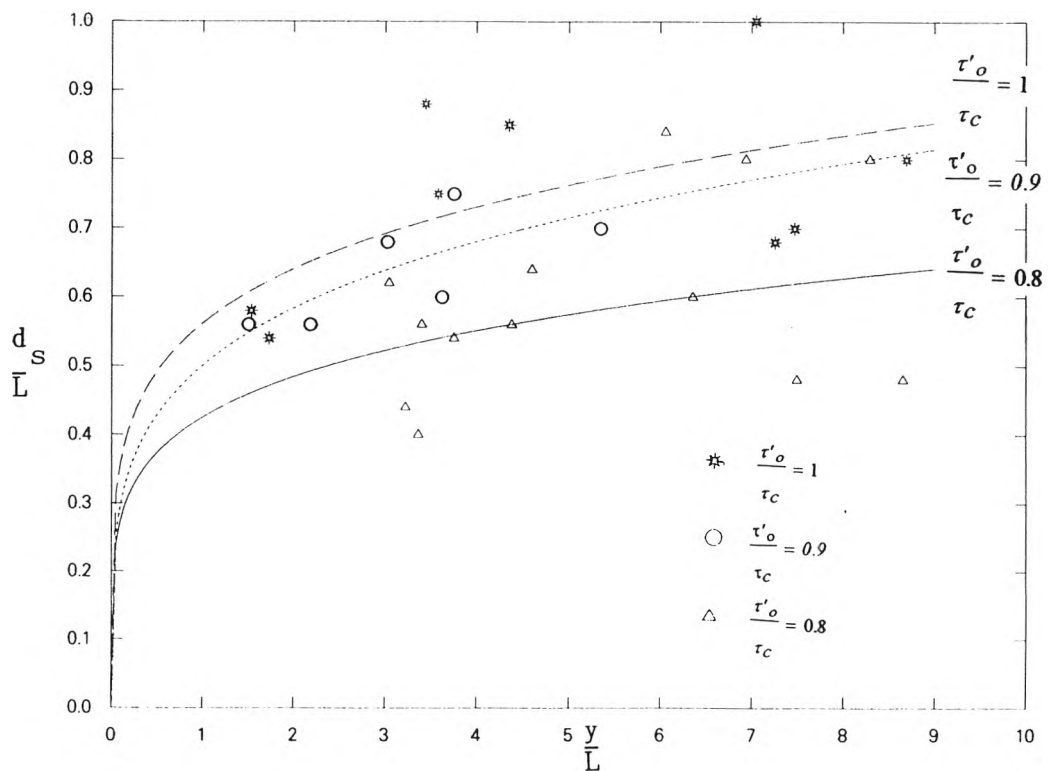
$$\tau_0' = \frac{V^2 D^{1/3}}{30y^{1/3}} \quad (4.1)$$

v = ความเร็วเฉลี่ยการไหล, ฟุตต่อวินาที

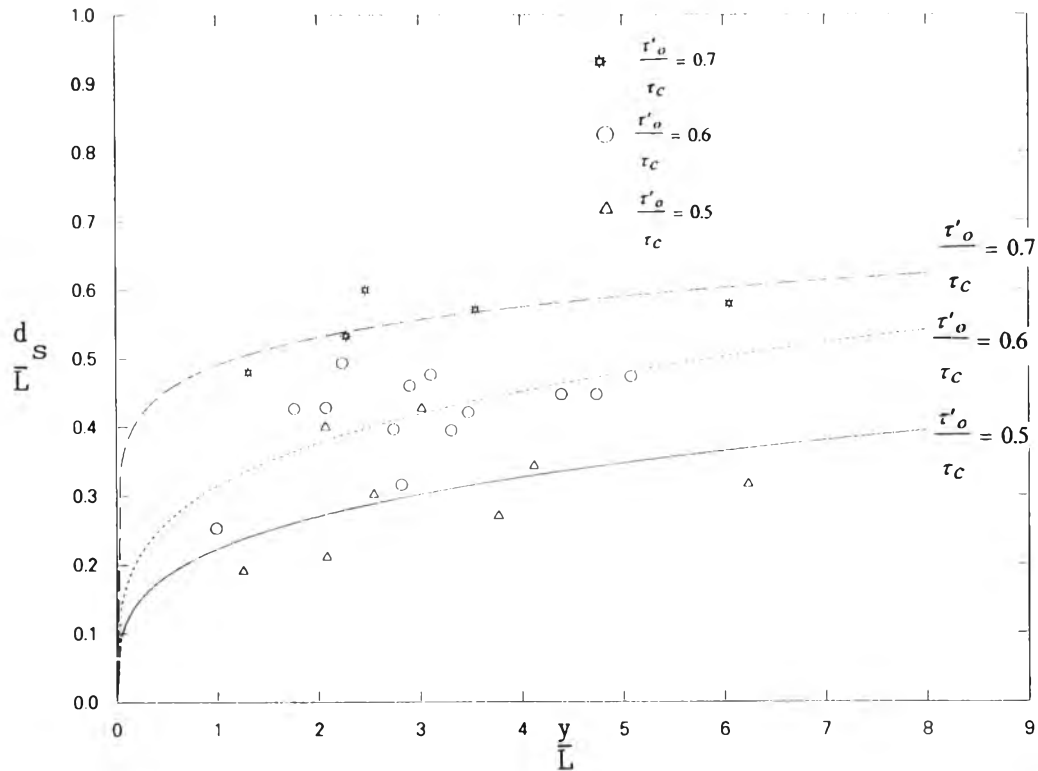
D = D₅₀ ของวัสดุท้องน้ำ, ฟุต



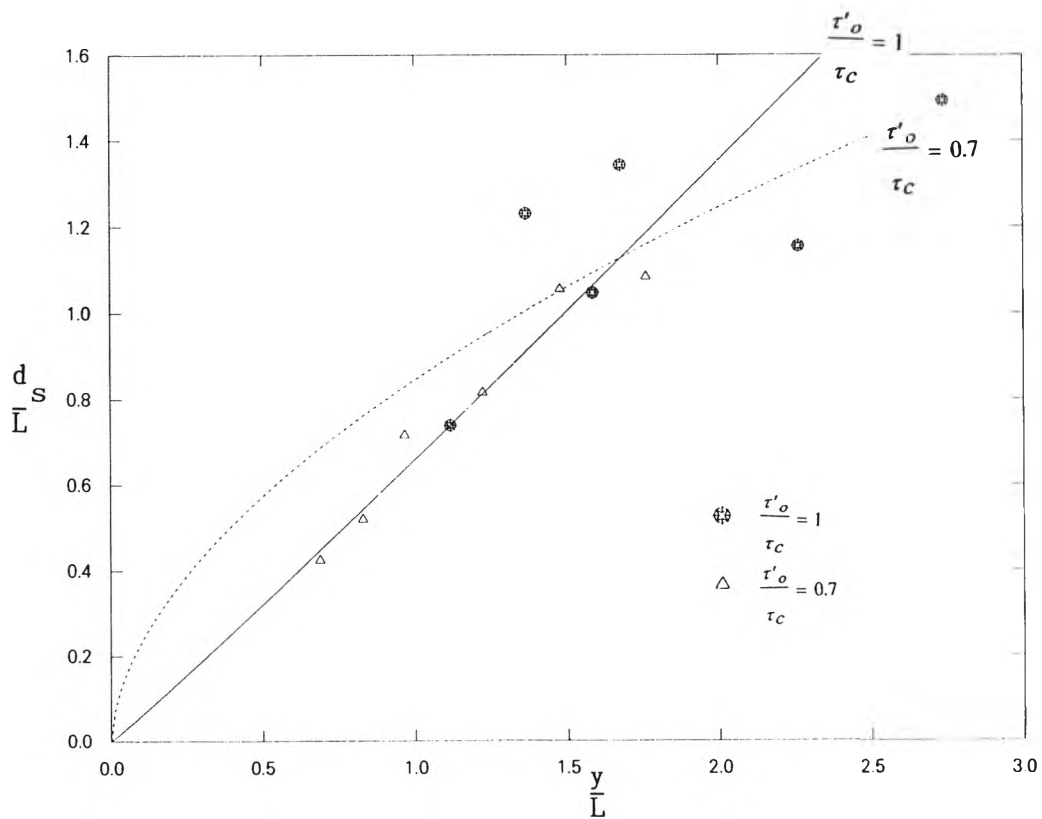
รูป 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล กับ Particle Shear (τ'_o) ของตอม่อรูปทรงกระบอก



รูป 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล กับ Particle Shear (τ'_o) ของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 0 องศา



รูป 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลง กับ Particle Shear (τ'_o) ของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 30 องศา



รูป 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลง กับ Particle Shear (τ'_o) ของตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 60 องศา

$$\begin{aligned}
 y &= \text{ความลึกน้ำ, ฟุต} \\
 \tau_c &= 4D \text{ สำหรับ } D_{50} = 0.44 \text{ มม.} \\
 &= 8D \text{ สำหรับ } D_{50} = 0.011 \text{ มม.} \\
 &= 16D \text{ สำหรับ } D_{50} > 0.1 \text{ มม.} \\
 &= 0.0004 + 4.97D \text{ สำหรับ } D_{50} < 0.1 \text{ มม.}
 \end{aligned}$$

จากรูป 4.23 ถึง 4.26 แสดงให้เห็นว่า เมื่อนำค่าความเร็วเฉลี่ยการไหลเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ชุดข้อมูลแยกออกเป็นกลุ่มใกล้เคียงกันมากกว่ารูป 4.8 ถึง 4.11

จากการทดลองโดยใช้ตอม่อรูปทรงกระบอก ได้ทดลองในสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และสภาวะเงื่อนไขที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ แล้วนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับ Froude number ดังสมการ 4.2 และรูป 4.27

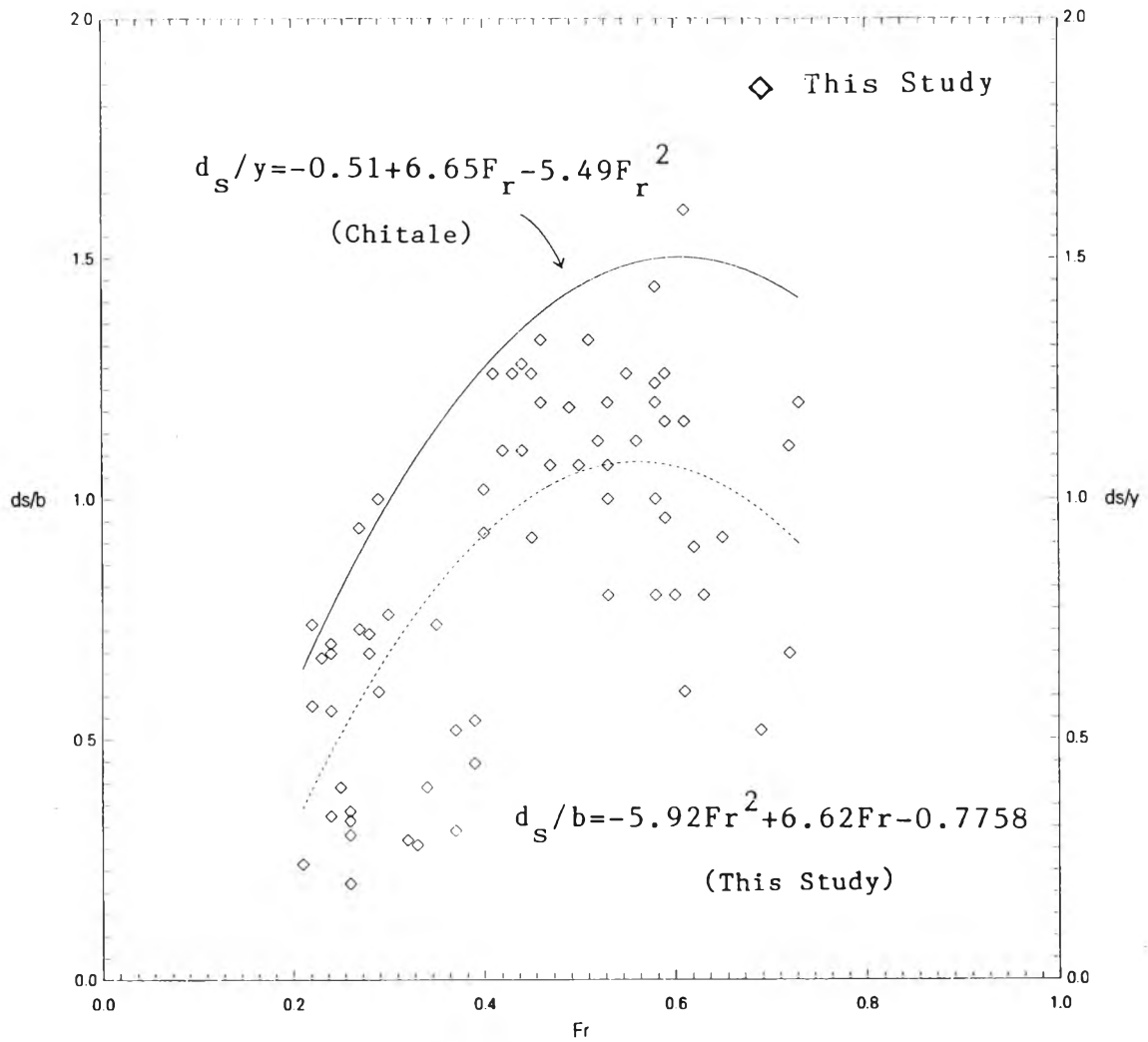
$$\frac{d_s}{b} = -5.9211Fr^2 + 6.6244Fr - 0.7758 \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned}
 d_s &= \text{ความลึกกัดเซาะสมมูล} \\
 b &= \text{เส้นผ่าศูนย์กลางของตอม่อ} \\
 Fr &= \text{Froude Number ของการไหลปกติด้านหน้าตอม่อสะพาน}
 \end{aligned}$$

$$\left(Fr = \frac{v}{\sqrt{gy}} \right)$$

$$\begin{aligned}
 v &= \text{ความเร็วเฉลี่ยการไหลปกติด้านหน้าตอม่อสะพาน} \\
 y &= \text{ความลึกการไหล}
 \end{aligned}$$

จากรูป 4.27 จะพบว่าเมื่อ Froude number เพิ่มขึ้นความลึกหลุมกัดเซาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนถึง Froude number ช่วงหนึ่งค่าความลึกหลุมกัดเซาะมีแนวโน้มลดลง ซึ่งจากการทดลองสังเกตพบว่าช่วง Froude number ที่ทำให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะลดลง เป็นช่วงที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำโดยพื้นท้องน้ำ (bed form) เกิดเป็น Dune ขึ้น ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าลักษณะของพื้นท้องน้ำมีผลต่อความลึกหลุมกัดเซาะ ซึ่งเป็นสิ่งที่น่าศึกษาต่อไปในอนาคต นอกจากนั้น สมการที่ได้จากการทดลองยังมีลักษณะคล้ายคลึงกับสมการของ Chitale ดังแสดงในรูป 4.27 แต่ค่าความลึกหลุมกัดเซาะ ของ Chitale ที่ค่า Froude number เท่ากัน มีค่าสูงกว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่ได้จากการทดลอง เนื่องจากการกระจายตัวของวัสดุท้องน้ำในการศึกษาครั้งนี้มีมาก



รูป 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง F_r กับความลึกหลุมกัดเซาะ

ทำให้มีวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่าค่า D_{50} มีจำนวนมากทำให้เกิดปรากฏการณ์ Armoring ทำให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะมีค่าต่ำ

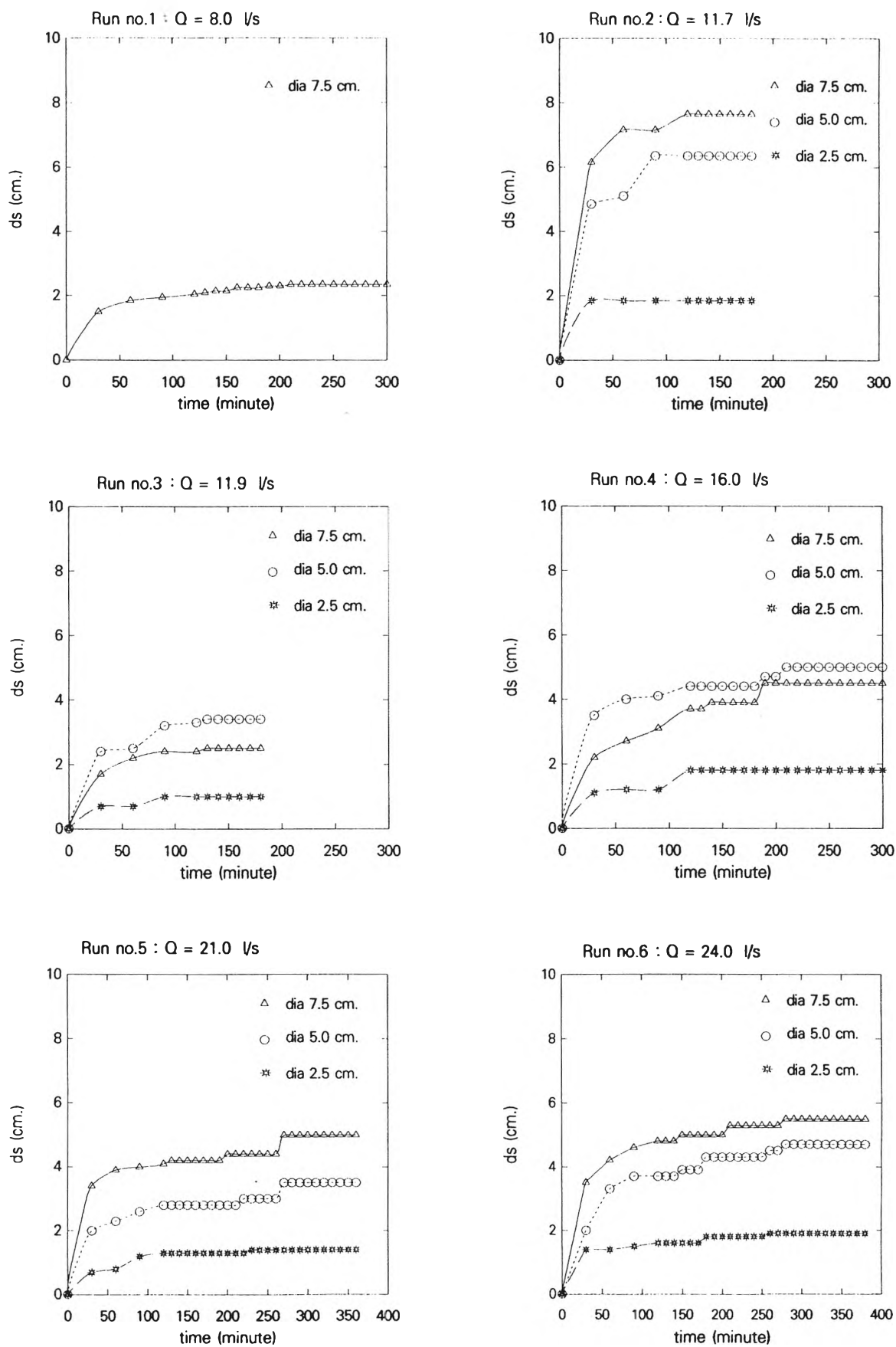
ปรากฏการณ์ Armoring คือ เมื่อวัสดุท้องน้ำมีลักษณะคละกัน เมื่อเริ่มขบวนการกัดเซาะวัสดุละเอียด (finer materials) จะถูกกัดเซาะด้วยอัตราการกัดเซาะที่มากกว่าวัสดุหยาบ (Coarser materials) จนวัสดุท้องน้ำเหลือแต่วัสดุหยาบ วัสดุหยาบนี้จะเป็นชั้นที่ปกคลุมวัสดุละเอียดที่อยู่ใต้ชั้นวัสดุหยาบทำให้การกัดเซาะลดลง จนเข้าสู่ภาวะสมดุล (อ้างถึงใน Chih : 35)

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของวัสดุท้องน้ำที่ถูกกัดเซาะกับหลุมกัดเซาะ

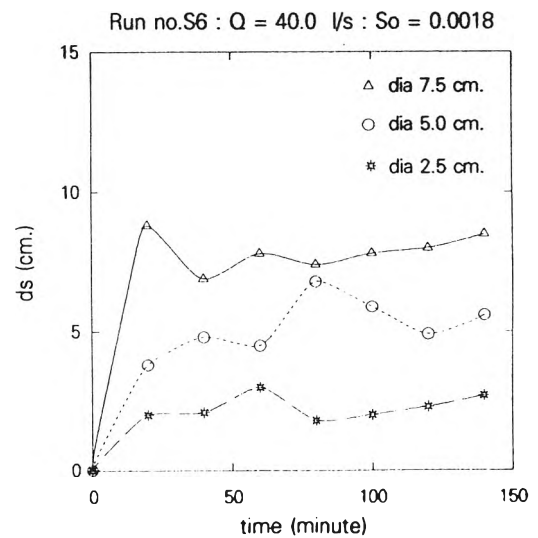
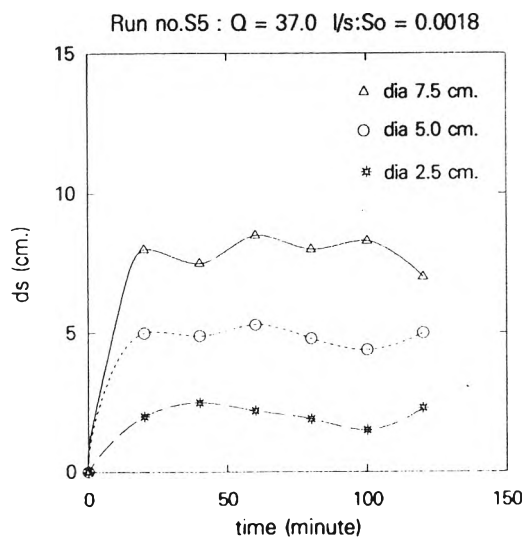
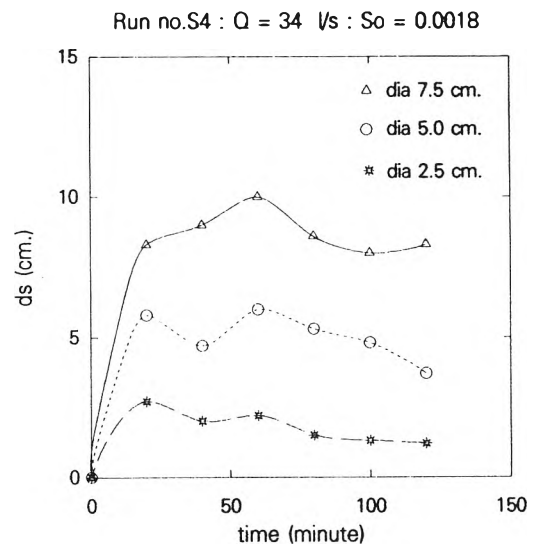
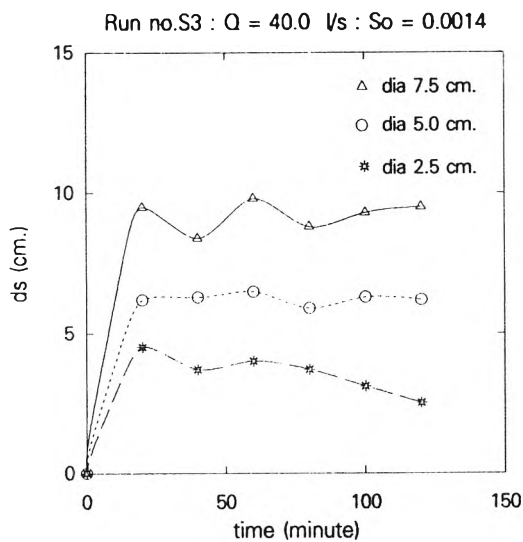
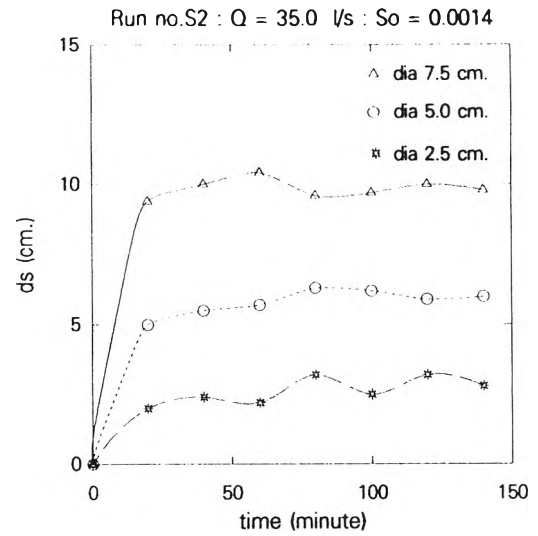
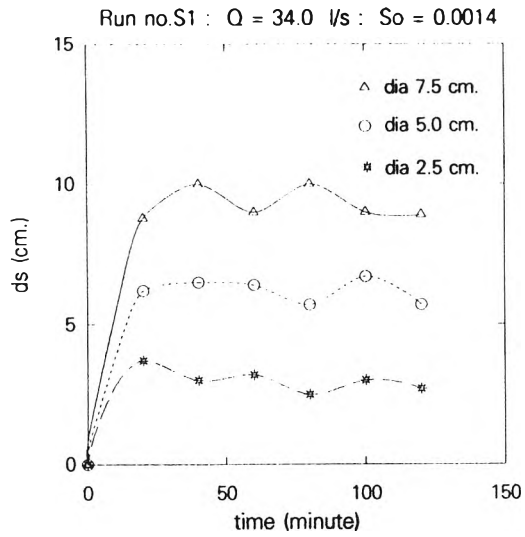
สำหรับวัสดุท้องน้ำประเภทที่ไม่มีแรงเชื่อมแน่น (Cohesionless) ประกอบด้วย อนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งเคลื่อนที่ภายใต้แรงเนื่องจากของไหล ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ขนาด (Size) ความลาดเอียง (Slope) เป็นต้น สำหรับวัสดุท้องน้ำประเภทที่ไม่มีแรงเชื่อมแน่น (Cohesionless) ในการทดลองนี้ จำลองโดยใช้ทรายจากแม่น้ำธรรมชาติ มีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาดมาผสมกัน ดูรายละเอียดภาคผนวก ข จากการทดลอง พบว่า เมื่อวัสดุท้องน้ำรอบตอม่อเริ่มเคลื่อนที่ ในสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ วัสดุที่มีขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ก่อน เวลาผ่านไปหลุมกัดเซาะใหญ่ขึ้นจนถึงจุดใกล้สมดุล ความลึกกัดเซาะเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ จนความเร็วบริเวณรอบตอม่อลดลงจนน้อยกว่าความเร็ววิกฤต ความลึกหลุมกัดเซาะจะคงที่ หรืออยู่ในสภาวะสมดุล ซึ่งจะพบว่า เวลาที่หลุมกัดเซาะเกิดความลึกกัดเซาะสมดุลประมาณ 2-5 ชั่วโมง ดังรูป 4.28 และ 4.29 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของท่านอื่น ๆ พบว่าเมื่อค่า D_{50} เพิ่มขึ้น เวลาที่หลุมกัดเซาะเกิดความลึกกัดเซาะสมดุลลดลง นอกจากนั้น ยังพบว่า D_{50} เพิ่มขึ้น ความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลลดลง ในขณะที่ตัวแปรอื่น ๆ เหมือนกันซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับ Shen (1969) Chitale (1949) และท่านอื่น ๆ ดังรูป 4.30 (อ้างถึงใน FHWA : 40) จากรูปพบว่าเส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลกับความลึกน้ำที่ได้จากการทดลอง เมื่อนำมาวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นโค้งจะได้สมการ 4.3

$$\frac{d_s}{b} = 0.461 \left(\frac{y}{b} \right)^{0.132} \quad (4.3)$$

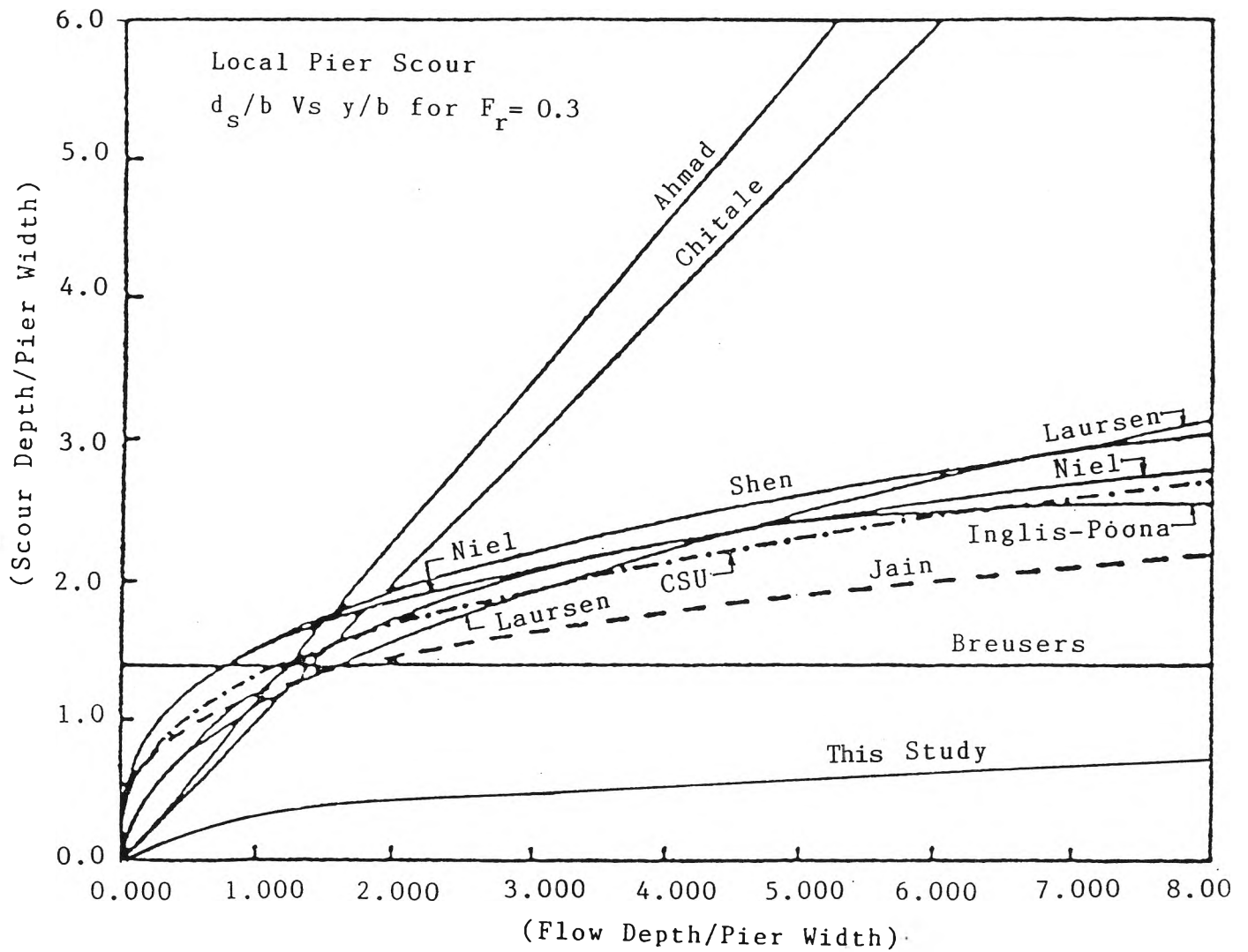
จากรูปพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับความลึกน้ำจากการทดลองมีค่าต่ำกว่าผู้ศึกษาท่านอื่นมาก สูตรในการคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะของผู้ศึกษาท่านอื่น ดูรายละเอียดในภาคผนวก ง. ทั้งนี้เนื่องจากขนาด D_{50} ของวัสดุท้องน้ำที่ใช้ในการทดลอง



รูป 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความลึกหลุมกัดเซาะของดอม่อรูปทรงกระบอก ในสถานะเงื่อนไขการกัดเซาะ Clear water



รูป 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความลึกหลุมกักตะกอน
ของตอม่อรูปทรงกระบอกในสภาวะเงื่อนไข Live-bed



รูป 4.30 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะสมดุ จากการทดลอง
 กับสูตรการคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะอื่น ๆ
 (Jones (1983) จากอ้างอิง FHWA, 1988)

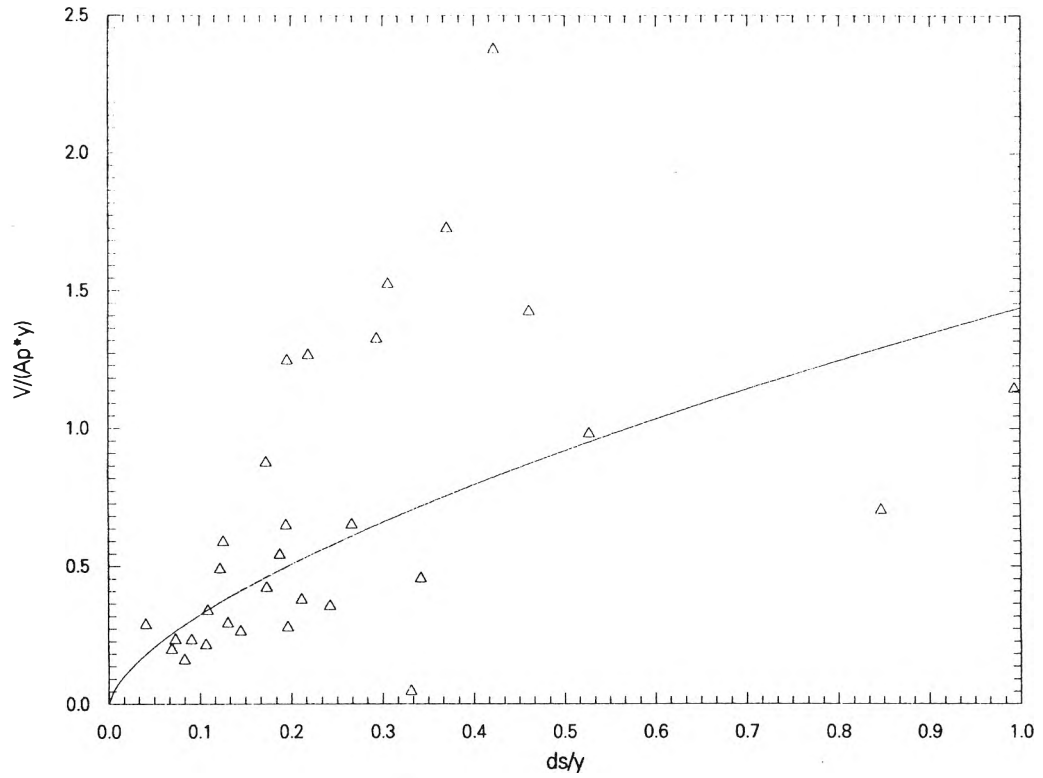
ขนาดใหญ่ และมีการกระจายตัวมาก ทำให้ความลึกหลุมกัดเซาะสมดุคมีค่าน้อย นอกจากนั้นการกระจายตัวของวัสดุท้องน้ำมากทำให้เกิดปรากฏการณ์ Armoring ทำให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสมดุคมีค่าน้อยลงไปอีก

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ความลึกกัดเซาะสมดุค เป็นฟังก์ชันกับขนาดของวัสดุท้องน้ำ (D_{50}) แต่จะกล่าวเพียง D_{50} อย่างเดียวไม่ได้ ความลึกกัดเซาะสมดุคยังเป็นฟังก์ชันของการกระจายตัวของวัสดุท้องน้ำ จากการทดลองพบว่า วัสดุที่ใช้ในการทดลองมีการกระจายตัวมาก ในขณะที่วัสดุท้องน้ำอื่นมีค่า D_{50} เท่ากัน ตัวแปรอื่นถูกควบคุมให้เหมือนกัน แต่การกระจายตัวมาก ทำให้มีวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่า D_{50} มาก ดังนั้น เมื่อความเร็วกัดเซาะลดลงวัสดุท้องน้ำที่มีขนาดใหญ่จะไม่เคลื่อนที่ ทำให้หลุมกัดเซาะเกิดความลึกหลุมกัดเซาะสมดุค ซึ่งพบว่าจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และความลึกหลุมกัดเซาะสมดุคที่ได้จากการคาดคะเนจากสูตรบางค่า จะมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ปรากฏการณ์ที่วัสดุท้องน้ำขนาดใหญ่ไม่เคลื่อนที่นี้เรียกว่า Armoring มีผลทำให้ค่าความลึกกัดเซาะสมดุคลดลง ปรากฏการณ์ดังกล่าว อาจเป็นประโยชน์ในแง่ของการป้องกันการกัดเซาะได้

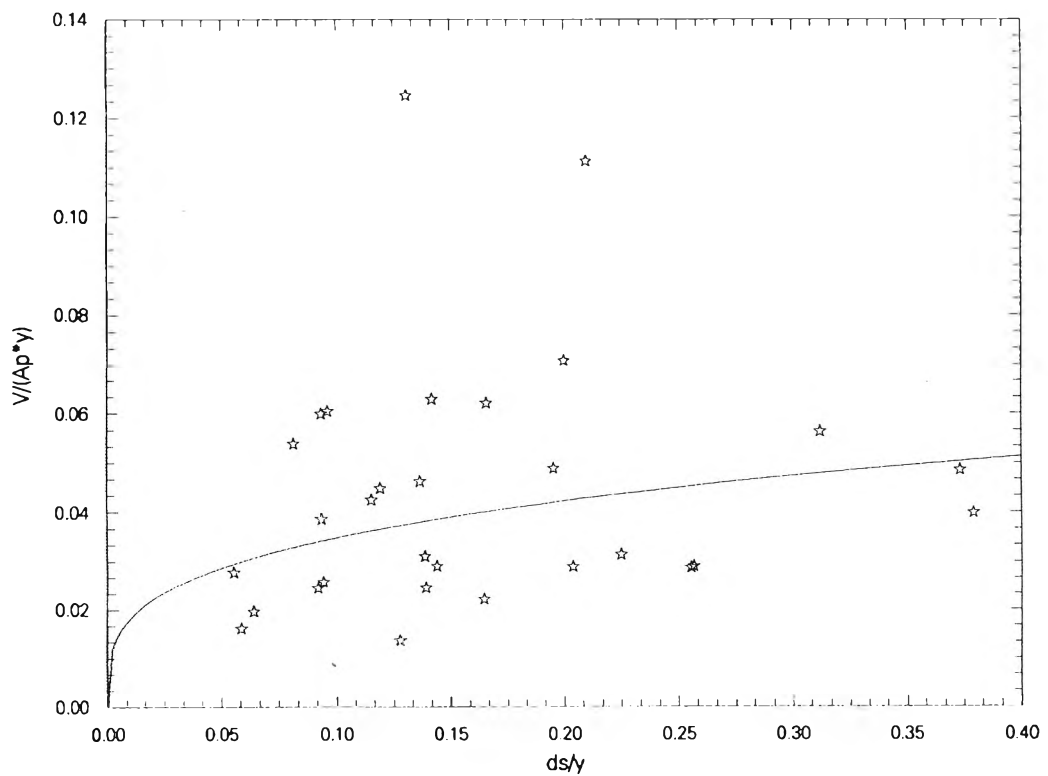
นอกจากนั้น จากรูป 4.13 ถึง 4.16 พบว่า ความเร็วเฉลี่ยการไหลในช่วงที่ทำให้เริ่มเกิดการกัดเซาะรอบตอม่อมีค่าสูง กล่าวคือมีค่าเริ่มต้นตั้งแต่ 23 ซม./วินาทีขึ้นไป เนื่องจากขนาดของวัสดุ (D_{50}) ของวัสดุท้องน้ำที่มีขนาดใหญ่นั้นเอง

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่หลุมกัดเซาะกับความลึกหลุมกัดเซาะ

หลังจากการทดลองได้สิ้นสุด ได้ทำการวัดระดับความลึกบริเวณหลุมกัดเซาะ และบริเวณรอบแบบจำลองตอม่อ เพื่อนำมาเขียนเส้นชั้นความลึก ดูรายละเอียดภาคผนวก ค. พบว่า รูปร่างของหลุมกัดเซาะ มีความคล้ายคลึงกับครึ่งวงกลมที่ด้านหน้าของตอม่อ และมีลักษณะครึ่งวงรีที่ด้านท้ายของตอม่อ ด้านหน้าหลุมกัดเซาะมีมุมในแนวราบใกล้เคียงกัน และมีค่าประมาณมุมเสถียรภาพที่อิมตัวและหยุดนิ่ง (ϕ) ของวัสดุท้องน้ำที่เปียก ตำแหน่งที่ลึกที่สุดของการกัดเซาะจะเกิดขึ้นที่สันตอม่อ จากเส้นชั้นความลึกสามารถหาปริมาตรหลุมกัดเซาะ ของการกัดเซาะรอบตอม่อสะพานที่สภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ดูรายละเอียดภาคผนวก ค. จากปริมาตรหลุมกัดเซาะที่คำนวณได้จากเส้นชั้นความลึก พบว่า ในกรณีที่ตอม่อไม่มีมุมปะทะกับทิศทางการไหล ของตอม่อรูปทรงกระบอกและตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน ปริมาตรหลุมกัดเซาะขึ้นอยู่กับความลึกหลุมกัดเซาะ กล่าวคือ เมื่อความลึกหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้น ปริมาตรหลุมกัดเซาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูป 4.31 และ 4.32



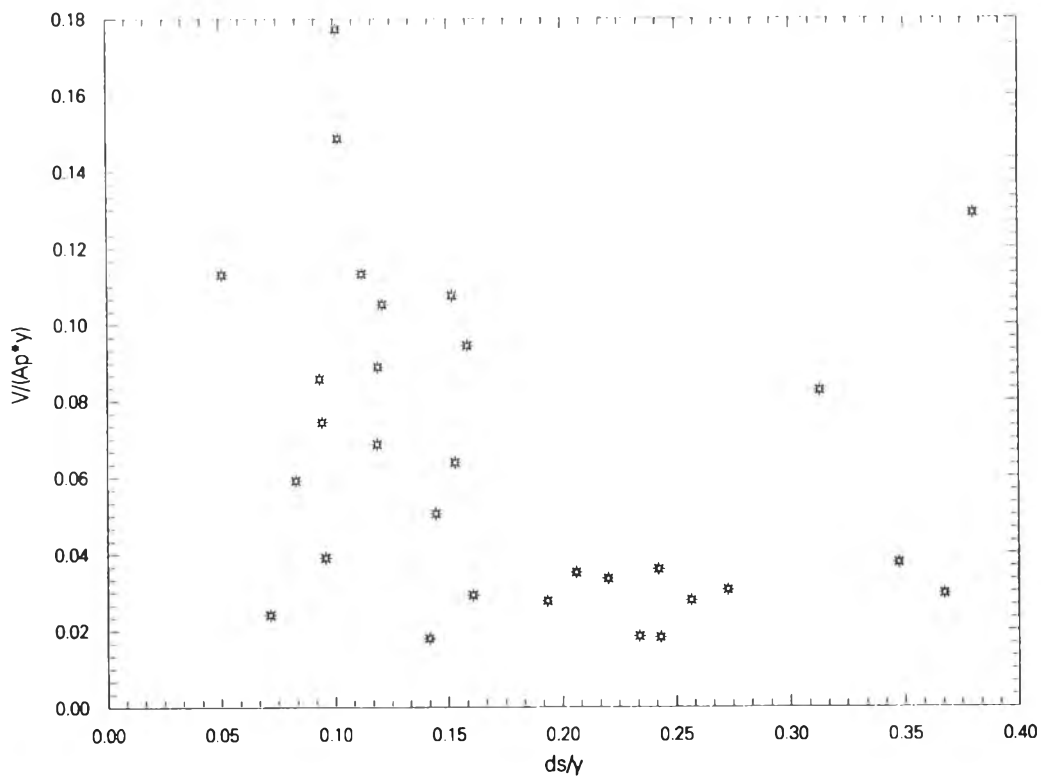
รูป 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะ
กับปริมาตรหลุมกัดเซาะต่อม่อรูปทรงกระบอก



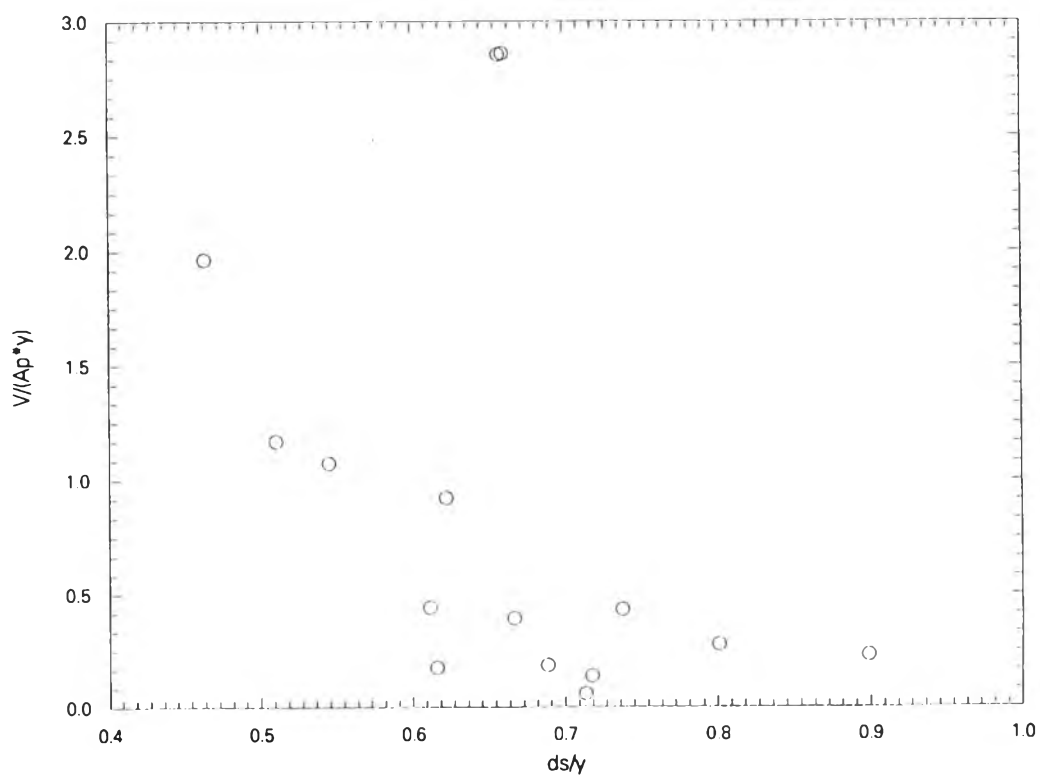
รูป 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับปริมาตรหลุมกัดเซาะต่อม่อ
รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 0 องศา

แต่ในกรณีที่ต่อม่อมมีมุมปะทะกับทิศทางการไหล ปริมาตรหลุมกัดเซาะไม่ขึ้นกับความลึกหลุมกัดเซาะกล่าวคือ เมื่อความลึกหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้น ปริมาตรหลุมกัดเซาะไม่ได้เพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังรูป 4.33 และ 4.34 จากการทดลองพบว่า เมื่อต่อม่อมมีมุมปะทะกับทิศทางการไหล ปริมาตรหลุมกัดเซาะขึ้นอยู่กับความเร็ว และมุมปะทะของต่อม่อมกับทิศทางการไหล ที่ความลึกหลุมกัดเซาะใกล้เคียงกัน มุมปะทะของต่อม่อมกับทิศทางการไหลมากขึ้น ปริมาตรหลุมกัดเซาะก็มากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจาก Projected length ของต่อม่อมเพิ่มขึ้น มีผลทำให้เกิดการกัดเซาะแบบ Skewed ทำให้หลุมกัดเซาะแผ่ขยายออกไป และปริมาตรหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีผลต่อความลึกหลุมกัดเซาะ

จากการศึกษาในสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ เนื่องจากมีปริมาณตะกอนเข้าและออกจากหลุมอยู่ตลอดเวลา เมื่อหยุดการทดลองทำให้การหาค่าปริมาตรของหลุมกัดเซาะไม่แน่นอน จึงไม่นำสภาวะเงื่อนไขนี้มาพิจารณาหาความสัมพันธ์ นอกจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ปริมาตรหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่าง ๆ โดยการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นโค้ง เพื่อหาความสัมพันธ์ที่ใช้ในการคาดคะเนปริมาตรความลึกหลุมกัดเซาะดังตาราง 4-2



รูป 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับปริมาตรหลุมกัดเซาะต่อม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 30 องศา



รูป 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับปริมาตรหลุมกัดเซาะต่อม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน มุมปะทะ 60 องศา

ตาราง 4-2 การวิเคราะห์การถดถอย พหุคูณเชิงเส้นโค้งใช้ประมาณหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่าง ๆ (Multiple Non-Linear Regression Results of Relative Volume Scour Depth)

$$\frac{V}{A_p y} = C_0 \left(\frac{d_s}{L} \right)^{C_1} \left(\frac{y}{L} \right)^{C_2} (R_e)^{C_3} (F_r)^{C_4}$$

รูปร่าง ตอม่อ	สภาวะเงื่อนไข	มุม ปะทะ	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	R ²	SEE
ทรงกระบอก	ไม่มีการเคลื่อนที่ ของตะกอนท้องน้ำ	-	1.34x10 ⁵	0.700	-0.306	-1.128	0	0.64	0.30
สี่เหลี่ยมผืน ผ้าปลายมน	ไม่มีการเคลื่อนที่ ของตะกอนท้องน้ำ	0	2.80x10 ²	0.236	0.526	-0.908	0	0.90	0.21
สี่เหลี่ยมผืน ผ้าปลายมน	ไม่มีการเคลื่อนที่ ของตะกอนท้องน้ำ	30	1.97x10 ⁸	0	1.654	-1.961	2.157	0.98	0.19
สี่เหลี่ยมผืน ผ้าปลายมน	ไม่มีการเคลื่อนที่ ของตะกอนท้องน้ำ	60	2.82x10 ¹⁷	0	2.772	-3.478	4.070	0.91	0.20

- หมายเหตุ V = ปริมาตรหลุมกัดเซาะ
A_p = พื้นที่หน้าตัดของตอม่อ
R² = สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์
SEE = Standard Error of Estimate