

อิทธิพลของระดับคานขวางต่อหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพานแบบ Pile Bent



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2558  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effects of Bracing Elevation on Scour around Pile Bent Pier

Mr. Taradol Phetpraphai



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Water Resources Engineering

Department of Water Resources Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของระดับคานขวางต่อหลุมกัดเซาะรอบตอม่อ
	สะพานแบบ Pile Bent
โดย	นายธราดล เพชรประไพ
สาขาวิชา	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรยธา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รักรวิชัย)

ธราตล เพชรประไพ : อิทธิพลของระดับคานขวางต่อหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพานแบบ Pile Bent (Effects of Bracing Elevation on Scour around Pile Bent Pier) อ.ที่  
ปริญญาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์, 110 หน้า.

การศึกษานี้ใช้แบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์เป็นเครื่องมือในการทดลองเพื่อศึกษาการกัดเซาะรอบกลุ่มตอม่อของสะพานแบบ Pile Bent ตามแบบมาตรฐานงานสะพาน กรมทางหลวงชนบท (2556) โดยทำการจำลองตอม่อสะพานหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้าง 4.6 ซม. ปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างเสา 4 ระยะ มีค่าตั้งแต่ 2.2 - 4.6 เท่าของขนาดเสา และระดับคานขวาง 5 ระดับ ได้แก่ 1) ระดับที่ส่วนบนของคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำ 2) ระดับที่ส่วนล่างของคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำ 3) ระดับที่ส่วนบนของคานขวางเท่ากับ 0.2 ของความลึกน้ำ 4) ระดับที่ส่วนบนของคานขวางเท่ากับ 0.4 ของความลึกน้ำ และ 5) ระดับที่คานขวางอยู่สูงกว่าระดับน้ำ ทดลองด้วยอัตราการไหล 3 ค่า จำลองวัสดุท้องน้ำด้วยทรายสม่ำเสมอขนาดเฉลี่ย 1.20 มม. โดยมีสภาวะการไหลแบบสม่ำเสมอไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ทำการทดลองทั้งสิ้น 60 กรณี จำลองการไหลในรางน้ำเปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 0.6 ม. ลึก 0.75 ม. ณ ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการศึกษาพบว่า ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดของกลุ่มตอม่อเกิดขึ้นที่เสาต้นแรกด้านเหนือน้ำของกลุ่มซึ่งค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ ความกว้างเสา ระยะห่างระหว่างเสา และระดับคานขวาง โดยในการศึกษานี้ได้ทำการประยุกต์สมการ HEC-18 เพื่อใช้ในการคำนวณค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดโดยทำการเพิ่มตัวแปรระยะห่างระหว่างเสาและระดับคานขวางเข้าไปในสมการ ในขณะที่เมื่อพิจารณาความลึกหลุมกัดเซาะแต่ละหลุมตั้งแต่หลุมที่ 2 จากด้านเหนือน้ำของกลุ่มตอม่อ พบว่าระดับคานขวางเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความแตกต่างของความลึกหลุมกัดเซาะแต่ละหลุมในแต่ละกรณี โดยพบว่ากรณีที่ส่วนล่างของคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำเป็นกรณีที่ให้ความลึกหลุมกัดเซาะแต่ละหลุมมีค่าน้อยที่สุด ในขณะที่กรณีคานขวางอยู่สูงกว่าระดับน้ำเป็นกรณีที่ให้ความลึกหลุมกัดเซาะแต่ละหลุมมีค่ามากที่สุด ซึ่งสรุปได้ว่าระดับคานขวางส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลรอบตอม่อซึ่งเป็นต้นเหตุของกลไกการกัดเซาะ โดยเมื่อคานขวางวางอยู่บนท้องน้ำพอดีทำให้สามารถช่วยป้องกันท้องน้ำจากการกัดเซาะได้

ภาควิชา วิศวกรรมแหล่งน้ำ

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมแหล่งน้ำ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2558

# # 5670219621 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS: SCOUR / PILE BENT / BRACING ELEVATION / SQUARE PIER / PHYSICAL MODEL

TARADOL PHETPRAPHAI: Effects of Bracing Elevation on Scour around Pile Bent Pier. ADVISOR: ASST. PROF. ANURAK SRIARIYAWAT, Ph.D., 110 pp.

The effects of bracing elevation of pile bent bridge on scouring was studied by a physical model experiment. Bridge pier models were simulated with square piles  $4.6 \times 4.6$  cm., four pile spacings between 2.2 - 4.6 times of the size of the piles and five bracing elevations include: 1) the top of the bracing was at the bed level, 2) the bottom of the bracing was at the bed level, 3) the top of the bracing was at 0.2 of flow depth, 4) the top of the bracing was at 0.4 of flow depth and 5) the bracing was above the water. Three flow rates were used in a steady flow and clear-water condition. Total of 60 cases were tested in a rectangular flume,  $0.6 \times 0.75 \times 18$  m. at Hydraulics and Coastal Laboratory, Department of Water Resources Engineering, Chulalongkorn University.

It was found that the maximum scour hole occurred at the first upstream pile. As the results, the maximum scour hole was a function of Froude number, pile width, pile spacing and bracing elevation. The estimation equations were adopted from HEC-18 equation by adding pile spacing and bracing elevation terms. While considering the other scour holes, the bracing elevation affected the depth of the scour holes in each case. The minimum scour hole occurred in the case that the bottom of bracing was at the bed level, while the maximum scour occurred in the case that the bracing was above the water. It can be concluded that the scour hole was affected by the elevation of the bracing. Flow characteristics around the pier were different which triggered mechanisms. If the bracing was placed on the bed, it could reduce the scour.

Department: Water Resources                      Student's Signature .....

Engineering    Advisor's Signature .....

Field of Study: Water Resources  
Engineering

Academic Year: 2015

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรโยธา ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล กรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รักรวิชัย กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย สำหรับความกรุณาในการให้คำปรึกษา แนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรักษ์ ศรีอริวัฒน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้อบรมสั่งสอนถ่ายทอดประสบการณ์ทั้งในด้านหลักวิชาการและหลักการดำเนินชีวิต ให้ความเอาใจใส่ดูแล รวมทั้งผลักดันสนับสนุนในทุกๆ ด้าน จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำทุกท่านที่มอบวิชาความรู้และอบรมสั่งสอนตลอดระยะเวลาการศึกษา ขอขอบพระคุณ อาจารย์ บุศวรรณ บิตร สำหรับคำแนะนำในการเรียนต่อในภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญวัฒน์ โพธิศิริ สำหรับคำสอนในชั้นปริญญาตรี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำและบุคลากรทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนในด้านสถานที่และเครื่องมือในการทดลอง และความช่วยเหลือในการดำเนินการทดลองเป็นอย่างดีเสมอมา รวมทั้งขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการสนับสนุนเงินทุนในการดำเนินการวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดามารดาของข้าพเจ้า สำหรับความรักความอบอุ่น และความเหนื่อยยากเพื่อการสนับสนุนข้าพเจ้าทุกๆ อย่าง ข้าพเจ้าหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ในอนาคต

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 การดำเนินการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีและหลักการของการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน.....	5
2.1.1 ประเภทของการกัดเซาะ.....	5
2.1.2 ไดอะแกรมของชิลด์ (Shield's Diagram).....	6
2.1.3 กลไกการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน (scour mechanism at pier).....	7
2.2 การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา.....	8
2.3 กฎของความคล้ายคลึง (law of Similitude).....	14
บทที่ 3 การดำเนินการทดลองและข้อมูลที่ได้.....	15
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้การทดลอง.....	15
3.2 การสอบเทียบอุปกรณ์ทดลอง (calibration).....	17

3.3 การออกแบบการทดลอง .....	17
3.3.1 ค่าเริ่มต้นการไหล .....	17
3.3.2 แบบจำลองต่อม่อ .....	18
3.4 ขั้นตอนการทดลอง .....	22
3.5 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการพิจารณา.....	25
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	28
4.1 ผลการทดลอง.....	28
4.2 ผลการวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติ.....	34
4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด.....	35
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์กับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล .....	35
4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างเสาที่สัมพันธ์กับความลึกการไหลกับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล.....	36
4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างเสาที่สัมพันธ์กับความลึกการไหลกับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล.....	36
4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับผิวส่วนบนของคานขวางที่สัมพันธ์กับความลึกการไหลกับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล.....	39
4.4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติ.....	41
4.4.1 กรณีที่ระดับคานขวางสูงกว่าระดับน้ำ (Y5).....	42
4.4.2 กรณีที่ระดับคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำ (Y1).....	43
4.4.3 กรณีที่ระดับคานขวางมีค่าอยู่ในช่วงของความลึกน้ำโดยไม่มีช่องว่างระหว่างคานขวางกับท้องน้ำ (Y2 ทุกอัตราการไหล และ Y3 ในกรณีอัตราการไหล Q1).....	45
4.4.4 กรณีที่ระดับคานขวางมีค่าอยู่ในช่วงของความลึกน้ำโดยมีช่องว่างระหว่างคานขวางกับท้องน้ำ (Y3 ในกรณีอัตราการไหล Q2-3 และ Y4 ทุกอัตราการไหล).....	46



4.5 การวิเคราะห์อิทธิพลของระดับคานขวางต่อความถี่กลุ่มกั๊ดเซาะอื่นๆ ในกลุ่มตอม่อ .....	47
4.6 กลไกการกั๊ดเซาะจากอิทธิพลของระดับคานขวาง .....	53
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา .....	56
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	56
5.1.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ส่งผลต่อหลุมกั๊ดเซาะสูงสุด .....	56
5.1.2 สมการความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ส่งผลต่อความถี่กลุ่มกั๊ดเซาะสูงสุด .....	57
5.1.3 อิทธิพลของระดับคานขวางต่อหลุมกั๊ดเซาะของกลุ่มตอม่อ .....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	59
รายการอ้างอิง .....	61
ภาคผนวก.....	63
ภาคผนวก ก แบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์และอุปกรณ์การทดลอง .....	64
ภาคผนวก ข การหาค่าเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง .....	76
ภาคผนวก ค ภาพถ่ายผลการศึกษากกรณีต่างๆ .....	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	110

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 3-1	ค่าเริ่มต้นการไหลสำหรับใช้ในการทดลอง.....	18
ตารางที่ 3-2	กรณีการทดลองต่างๆ ที่ทำการศึกษา จำนวน 60 กรณี.....	19
ตารางที่ 3-3	ข้อมูลสรุปการออกแบบก่อสร้างแบบจำลองต่อมือ.....	21
ตารางที่ 3-4	ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ $K_1$ สำหรับรูปลักษณะของต่อมือ.....	26
ตารางที่ 3-5	ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ $K_2$ สำหรับมุมปะทะการไหลของกลุ่มต่อมือ.....	27
ตารางที่ 3-6	ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ $K_2$ สำหรับมุมปะทะการไหลของกลุ่มต่อมือ.....	27
ตารางที่ 4-1	รายละเอียดแบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์ .....	29
ตารางที่ 4-2	ระยะเวลาในการทดลองและผลความลึกหุ้มก้นตะเข้ของแต่ละต่อมือ.....	32
ตารางที่ 4-3	สรุปค่าตัวแปรสมการความสัมพันธ์.....	47
ตารางที่ 5-1	สรุปค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังของสมการความสัมพันธ์.....	58

## สารบัญรูป

รูปที่ 1-1 สะพานแบบ Pile Bent (สะพานข้ามห้วยลึก อ.แม่สอด จ.ตาก 22 ก.พ. 2557) .....	2
รูปที่ 2-1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการพัฒนาหลุมกัดเซาะกับความลึกหลุมกัดเซาะในสภาวะการไหลที่มีและไม่มีตะกอนปน (Arneson et al., 2012).....	6
รูปที่ 2-2 ไดอะแกรมของชิลด์ส์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $Re_*$ กับ $\psi$ (Shields, 1936) .....	7
รูปที่ 2-3 แผนภาพแสดงการกัดเซาะรอบตอม่อทรงกระบอกตันเดี่ยว (Arneson et al., 2012) .....	8
รูปที่ 2-4 รูปแบบตอม่อกลุ่มในการทดลองของ B. Ataie-Ashtiani and A. A. Beheshti (2006) .	11
รูปที่ 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $b/d_{50}$ กับ $d_s/b$ จากผลการทดลองของ Lee and Sturm (2009).....	11
รูปที่ 2-6 รูปแบบตอม่อในการศึกษาของ Ataie-Ashtiani et al. (2010) .....	11
รูปที่ 2-7 ผลการทดลองจากการศึกษาของ Ataie-Ashtiani et al. (2010).....	11
รูปที่ 2-8 รูปแบบตอม่อแบบซับซ้อน (complex pier) ตามการศึกษาของ Ferraro et al. (2013).....	12
รูปที่ 2-9 การจัดวางกลุ่มตอม่อในการทดลองของ Lança et al. (2013) .....	12
รูปที่ 2-10 รูปแบบตอม่อในการทดลองของ Moreno et al. (2015) .....	12
รูปที่ 3-1 รางจำลองการไหล.....	16
รูปที่ 3-2 ตัวอย่างแบบจำลองตอม่อที่ระยะระหว่างเสาต่างๆ.....	20
รูปที่ 3-3 ตัวอย่างแบบจำลองตอม่อที่ระดับคานขวางต่างๆ.....	20
รูปที่ 3-4 แผนผังสรุปขั้นตอนการทดลอง .....	23
รูปที่ 3-5 ตำแหน่งวัดค่าระดับท้องน้ำและระดับความลึกน้ำ .....	24
รูปที่ 3-6 รูปลักษณ์ตอม่อแบบต่างๆ.....	27
รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพัทธ์ กับ ฟรูดนัมเบอร์.....	35
รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพัทธ์ กับ ความกว้างเสาสัมพัทธ์ .....	36
รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพัทธ์ กับ ระยะห่างตอม่อสัมพัทธ์ ....	37

รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพันธ์ กับ ระยะห่างเสาสัมพันธ์ ในแต่ละกรณีของระดับคานขวาง.....	38
รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพันธ์ กับ ระดับคานขวางสัมพันธ์.....	39
รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพันธ์ กับ ระดับคานขวางสัมพันธ์ ในแต่ละกรณีของระยะห่างระหว่างเสา.....	40
รูปที่ 4-7 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพันธ์ จากการคำนวณและจากการทดลอง กรณีระดับคานขวางอยู่สูงกว่าระดับน้ำ.....	43
รูปที่ 4-8 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพันธ์ จากการคำนวณและจากการทดลอง กรณีระดับคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำ.....	44
รูปที่ 4-9 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพันธ์ จากการคำนวณและจากการทดลอง กรณีระดับคานขวางอยู่ติดท้องน้ำ.....	45
รูปที่ 4-10 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพันธ์ จากการคำนวณและจากการทดลอง กรณีระดับคานขวางอยู่กลางความลึกน้ำ.....	46
รูปที่ 4-11 รูปการเปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะที่ระดับคานขวางต่างๆ สำหรับกรณี ระยะห่าง A.....	49
รูปที่ 4-12 รูปการเปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะที่ระดับคานขวางต่างๆ สำหรับกรณี ระยะห่าง B.....	50
รูปที่ 4-13 รูปการเปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะที่ระดับคานขวางต่างๆ สำหรับกรณี ระยะห่าง C.....	51
รูปที่ 4-14 รูปการเปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะที่ระดับคานขวางต่างๆ สำหรับกรณี ระยะห่าง D.....	52

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างสะพานนั้นแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ โครงสร้างส่วนบน (super structure) คือ ส่วนที่ใช้สำหรับการจราจร ทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกจร และโครงสร้างส่วนล่าง (sub-structure) คือส่วนที่ใช้สำหรับรับน้ำหนักจากโครงสร้างส่วนบนและถ่ายลงสู่พื้นดิน ประกอบไปด้วยตอม่อและฐานราก ซึ่งลักษณะการก่อสร้างเสาตอม่อของสะพานจะก่อสร้างอยู่กลางลำน้ำ ทำให้เกิดการกีดขวาง (obstacle) และพฤติกรรมการไหลของน้ำเปลี่ยนไป ส่งผลต่อการนำพาตะกอนท้องน้ำรอบๆ ตอม่อ ออกจากตำแหน่งเดิม (migration) ที่เรียกว่า “การกัดเซาะ (scour)”

ผลกระทบเนื่องจากการกัดเซาะคือเสถียรภาพของสะพานลดลงอันเป็นสาเหตุของการวิบัติของสะพาน ดังผลการศึกษาของ Wardhana and Hadipriono (2003) ที่ได้ทำการรวบรวมข้อมูลของสะพานในประเทศสหรัฐอเมริกาว่า 500 สะพานที่เกิดการวิบัติในช่วงปี ค.ศ. 1989-2000 พบว่าสาเหตุของการวิบัติมีผลเนื่องจากการกัดเซาะถึง 15.51 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในประเทศไทยมีงานศึกษาของ สมรัักษ์ ต่อวงศ์ไพชยนต์ (2527) ทำการศึกษาการกัดเซาะของน้ำต่อโครงสร้างสะพานและพบว่าสาเหตุการวิบัติของโครงสร้างดังกล่าวมาจากการกัดเซาะท้องน้ำและตลิ่ง สืบเนื่องมาจากการขาดการพิจารณาวางแผนสำรวจและออกแบบด้านชลศาสตร์และอุทกศาสตร์ที่เพียงพอ

ที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยมากมายที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับกลไกและผลการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน รวมทั้งเพื่อทำการประเมินค่าความลึกหลุมกัดเซาะหรือหาแนวทางในการป้องกันและแก้ไขปัญหากัดเซาะรอบตอม่อ แต่รูปแบบของสะพานดังกล่าวมีรูปแบบแตกต่างกับสะพานส่วนใหญ่ในประเทศไทย โดยเฉพาะสะพานที่ก่อสร้างตามแบบมาตรฐานงานสะพาน กรมทางหลวงชนบท พ.ศ. 2556 โดยรูปแบบสะพานส่วนใหญ่ในประเทศไทยมีลักษณะตอม่อและเสาเข็มหน้าตดสี่เหลี่ยมจัตุรัสวางเรียงเป็นดับในแนวเดียวกับการไหลของน้ำ หรือที่เรียกว่าสะพานแบบ Pile Bent ดังแสดงในรูปที่ 1-1 ซึ่งอาจทำให้พฤติกรรมการกัดเซาะรอบตอม่อสำหรับสะพานดังกล่าวมีความแตกต่างกับผลการศึกษาที่ผ่านมา

สะพานแบบ Pile Bent มีส่วนโครงสร้างที่เรียกว่า คานขวาง (bracing) ทำหน้าที่ลดความชะลุดของเสาตอม่อ เนื่องจากคานขวางเป็นโครงสร้างที่วางตัวในแนวราบตามทิศทางการไหลของน้ำ คล้ายกับโครงสร้างครอบหัวเสาเข็ม (pile cap) แต่มีขนาดเล็กกว่า และจากการที่โครงสร้างทั้งสองชนิดนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้อ้างอิงถึงอิทธิพลของครอบหัวเสาเข็มต่อหลุมกัดเซาะเพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นในการศึกษา

ด้วยลักษณะเฉพาะของตอม่อและเสาเข็มที่มีอยู่ในประเทศไทย การศึกษานี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ของระดับคานขวาง ระยะห่างระหว่างเสา กับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดรอบตอม่อสะพานแบบ Pile Bent ด้วยแบบจำลองทางกายภาพ (physical model) เพื่อให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมดังกล่าวและสามารถใช้ประโยชน์ในการประเมินและป้องกันการกัดเซาะสะพานดังกล่าวในอนาคต



รูปที่ 1-1 สะพานแบบ Pile Bent (สะพานข้ามห้วยลึก อ.แม่สอด จ.ตาก 22 ก.พ. 2557)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) ศึกษาอิทธิพลของระดับคานขวางของสะพานแบบ Pile Bent ต่อความลึกหลุมกัดเซาะ
- 2) ศึกษาถึงอิทธิพลของระยะห่างของเสาในต้นเดียวกันของสะพานแบบ Pile Bent ต่อความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

การดำเนินการศึกษานี้ใช้แบบจำลองทางกายภาพเพื่อวิเคราะห์ปัญหาการกัดเซาะรอบตอม่อสะพานหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบเสาเรียงเป็นต้น (Pile Bent) ทำการทดลองในรางจำลองการไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular flume) ณ ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยลักษณะของแบบจำลองประกอบไปด้วยรายละเอียดและขอบข่ายการศึกษาดังต่อไปนี้

- 1) การศึกษานี้เป็นการศึกษาถึงความลึกสูงสุดของหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพานโดยไม่พิจารณาถึงเวลาในการพัฒนาความลึกกัดเซาะ ภายใต้สภาวะการไหลแบบไม่มีตะกอนปน (clear-water local scour) และการไหลเป็นแบบคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (steady flow) วัสดุท้องน้ำในแบบจำลองเป็นทรายขนาดสม่ำเสมอเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.20 มม.
- 2) รูปแบบของแบบจำลองตอม่อสะพานแบบ Pile Bent มีเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้าง 4.6 ซม. วางเรียงเป็นดับในแนวเดียวกับทิศทางการไหล โดย
  - แบบจำลองสะพานมีการปรับเปลี่ยนระดับหลังคานขวางเทียบกับระดับดินท้องน้ำที่แตกต่างกัน 5 ระดับ ได้แก่ 1) ระดับที่ส่วนบนของคานขวางเท่ากับระดับดินท้องน้ำ 2) ระดับที่ส่วนล่างของคานขวางเท่ากับระดับดินท้องน้ำ 3) ระดับที่ส่วนบนของคานขวางเท่ากับ 0.2 ความลึกน้ำ 4) ระดับที่ส่วนบนของคานขวางเท่ากับ 0.4 ความลึกน้ำ และ 5) ระดับที่คานขวางอยู่สูงกว่าระดับน้ำ
  - ระยะห่างระหว่างเสาที่สัมผัสกับขนาดเสา ( $s_p/b_p$ ) 4 ค่า (อ้างอิงจากแบบมาตรฐานงานสะพาน กรมทางหลวงชนบท 2556) ได้แก่ 4.6, 3.5, 2.7 และ 2.2
- 3) ทำการทดลองการกัดเซาะรอบตอม่อในแต่ละกรณี ด้วยอัตราการไหลในรางน้ำจำนวน 3 อัตราการไหล
- 4) การวัดขนาดหลุมกัดเซาะจะวัดทั้งในแนวราบและแนวตั้ง เพื่อทำการวิเคราะห์ความลึกที่มากที่สุด และเก็บค่าพิกัดขนาดของหลุม
- 5) การศึกษานี้ ต้องการหาความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่างๆ โดยการทำให้เป็นตัวแปรไร้มิติ (dimensionless)

#### 1.4 การดำเนินการศึกษา

การศึกษานี้ได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติ เพื่อให้ครอบคลุมขอบข่ายและวัตถุประสงค์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- 1) ศึกษาทฤษฎี หลักการ และสมมุติฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน เพื่อเป็นพื้นฐานและแนวทางในการศึกษา
- 2) รวบรวมข้อมูลการทดลองและรายงานการศึกษาวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการกัดเซาะรอบตอม่อสะพานเพื่อใช้วางแผนการดำเนินการศึกษานี้ จากนั้นศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองต่างๆ เพื่อให้รู้ถึงขีดจำกัดที่สามารถดำเนินการทดลองได้

ด้วยเครื่องมือที่มี รวมทั้งออกแบบแบบจำลอง โดยศึกษาจากทฤษฎีการสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรมศาสตร์

- 3) ออกแบบการทดลอง กำหนดเงื่อนไข ข้อมูลหรือตัวแปรที่เกี่ยวข้อง และวิธีการวัด บันทึกและวิเคราะห์ สำหรับการแก้ปัญหาดังกล่าวตามที่ได้ตั้งวัตถุประสงค์ไว้
- 4) ก่อสร้างแบบจำลอง ทำการสอบเทียบแบบจำลอง และดำเนินการทดลองด้วยแบบจำลองในกรณีต่างๆ ตั้งวัตถุประสงค์
- 5) ปรับปรุง พัฒนาการทดลอง การเก็บข้อมูล และเครื่องมือที่ใช้ให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น
- 6) เก็บและรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยการวัดขนาดหลุมกัดเซาะและด้วยการบันทึกภาพนิ่ง จากนั้นทำการวิเคราะห์ให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ
- 7) สรุปและวิจารณ์ผลการศึกษา เสนอแนะผลการศึกษาที่ได้
- 8) จัดทำรายงานวิทยานิพนธ์

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เพิ่มพูนความรู้และประสบการณ์ในกระบวนการทางศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์การกัดเซาะรอบต่อม่อสะพานที่มีเสาทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเรียงเป็นดับ โดยมีตัวแปรที่พิจารณาได้แก่ ระดับของคานขวาง และระยะห่างระหว่างเสา
- 2) ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการดำเนินการศึกษาในขั้นต่อไป และเป็นเงื่อนไขเพิ่มเติมสำหรับการออกแบบโครงสร้างสะพานที่มีความคล้ายคลึงกับสะพานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้
- 3) เพิ่มพูนประสบการณ์ในการดำเนินงานวิจัยโดยใช้แบบจำลองกายภาพทางศาสตร์ ทำให้สามารถวิเคราะห์และแก้ปัญหาได้อย่างเป็นระบบ อีกทั้งเป็นแนวทางแก่ผู้ที่สนใจทำการศึกษาต่อไป



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาการกัดเซาะรอบตอม่อสะพานได้รับการศึกษาและวิจัยมานานและแพร่หลาย โดยเริ่มแรกเป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะกับรูปร่างหน้าตัดขวางของลำน้ำ บริเวณสะพาน จากนั้นจึงเริ่มศึกษาถึงกลไกกระบวนการกัดเซาะด้วยการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของน้ำ การศึกษาหาอิทธิพลและความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ เช่น ขนาดตอม่อ ขนาดตะกอนท้องน้ำ รูปร่างและการจัดเรียงตอม่อ เป็นต้น ที่มีผลต่อหลุมกัดเซาะ ทำการพัฒนาความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองและประสบการณ์ (empirical formula) และเมื่อเริ่มเข้าใจกลไกมากขึ้น จึงเริ่มมีการศึกษาและออกแบบวิธีการป้องกันการกัดเซาะ เพื่อรักษาโครงสร้างสะพานที่ถูกก่อสร้างมานานแล้วหรือสะพานที่ถูกก่อสร้างโดยไม่ได้คำนึงถึงผลการกัดเซาะ โดยหลักการทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมามีที่เกี่ยวข้องกับการกัดเซาะมีดังต่อไปนี้

#### 2.1 ทฤษฎีและหลักการของการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน

การกัดเซาะ (scour) คือการที่วัสดุท้องน้ำหรือตลิ่งถูกการไหลของกระแสน้ำกัดกร่อน (erosion) ขุด (excavation) และพัดพาไป (carrying) จากแหล่งที่อยู่เดิม (Arneson et al., 2012)

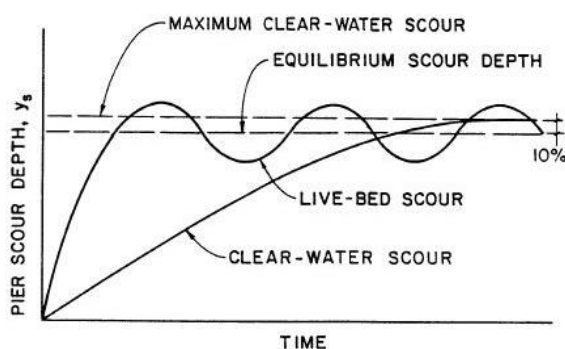
##### 2.1.1 ประเภทของการกัดเซาะ

สำหรับการกัดเซาะรอบตอม่อสะพานนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท (Parker et al., 1997 อ้างถึงใน Deng and Cai (2010)) ได้แก่

- 1) การกัดเซาะเฉพาะแห่ง (local scour) คือการกัดเซาะตะกอนที่อยู่รอบๆ ตอม่อ (pier) และตอม่อตัมบริม (abutment)
- 2) การกัดเซาะเนื่องจากการบีบตัวการไหล (contraction scour) คือการกัดเซาะตะกอนท้องน้ำและตลิ่งซึ่งอยู่ ณ ตำแหน่งช่องเปิดของสะพาน จากการที่ความเร็วการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นเนื่องจากบริเวณที่เป็นสะพานมีตอม่อทำให้หน้าตัดการไหลแคบกว่าหน้าตัดลำน้ำปกติ
- 3) การกัดเซาะพื้นท้องน้ำ (degradation scour) เป็นการกัดเซาะที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ แต่บริเวณที่เป็นสะพานอาจเกิดการกัดเซาะชนิดนี้ในอัตราที่สูงกว่าบริเวณที่ไม่มีสะพาน

นอกจากนั้น ประเภทของการกัดเซาะแต่ละประเภทยังสามารถแบ่งย่อยลงไปได้อีกคือ

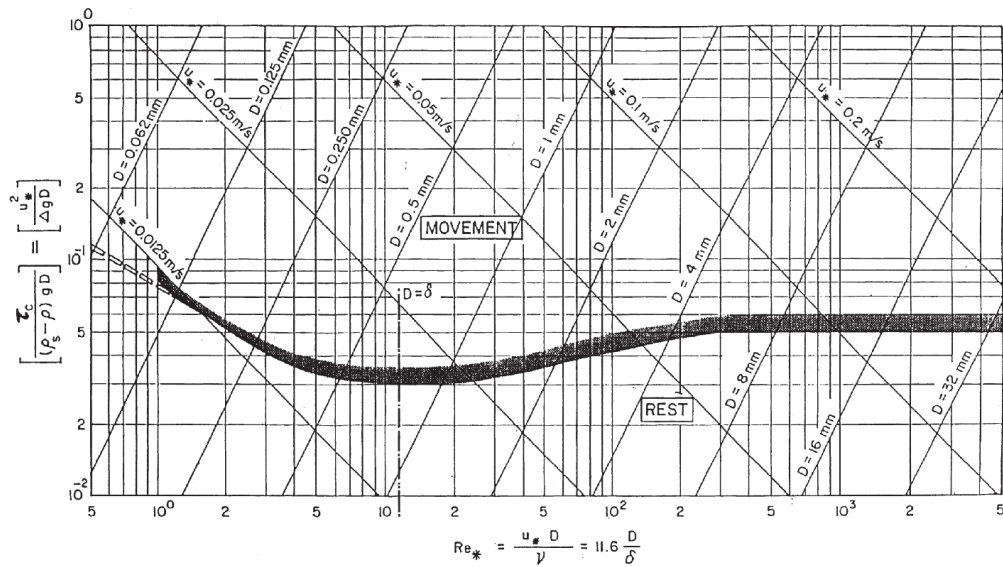
- 1) การกัดเซาะในสภาวะการไหลแบบไม่มีตะกอนปน (clear-water scour) เป็นการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนเข้าสู่หลุมกัดเซาะ ความลึกหลุมกัดเซาะที่เกิดจากการกัดเซาะลักษณะนี้จะค่อยๆ พัฒนาไปถึงความลึกสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 2-1
- 2) การกัดเซาะในสภาวะการไหลแบบมีตะกอนปน (live-bed scour) คือการกัดเซาะมีทั้งตะกอนเข้าและออกจากหลุมกัดเซาะ ความลึกสูงสุดของหลุมกัดเซาะชนิดนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการนำพาตะกอนเข้าและออกจากหลุมกัดเซาะมีค่าเท่ากัน เรียกว่า ความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล (equilibrium scour depth) แสดงดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการพัฒนาหลุมกัดเซาะกับความลึกหลุมกัดเซาะในสภาวะการไหลที่มีและไม่มีตะกอนปน (Arneson et al., 2012)

### 2.1.2 โดอะแกรมของชิลด์ (Shield's Diagram)

ความลึกการกัดเซาะรอบต่อม่อสะพานสูงสุดจะเกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของสภาวะการไหลที่ไม่มีการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำกับสภาวะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ หรือการที่ความเร็วเฉือนของการไหลที่บริเวณท้องน้ำใกล้หลุมกัดเซาะมีขนาดเท่ากับความเร็วเฉือนวิกฤติของการเริ่มเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ โดยเงื่อนไขการไหลดังกล่าวหาได้โดยความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ของอนุภาคตะกอน (particle Reynold number,  $Re_*$ ) กับ ค่าพารามิเตอร์การไหล (flow parameter,  $\mu$ ) ซึ่งได้ทำการศึกษาค้นคว้าโดย Shields (1936) แสดงอยู่ในรูปของกราฟ หรือที่เรียกว่า Shield's Diagram แสดงดังรูปที่ 2-2 โดยจากรูปจะเห็นได้ว่าการแบ่งการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำเป็น 3 ส่วน คือ 1) ส่วนที่อยู่เหนือเส้นทึบคือส่วนที่มีการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำ 2) ส่วนที่อยู่ใต้เส้นทึบคือส่วนที่ไม่มีการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำ และ 3) ส่วนที่อยู่ในเส้นทึบคือส่วนที่ตะกอนท้องน้ำกำลังจะเคลื่อนที่ (threshold of movement)



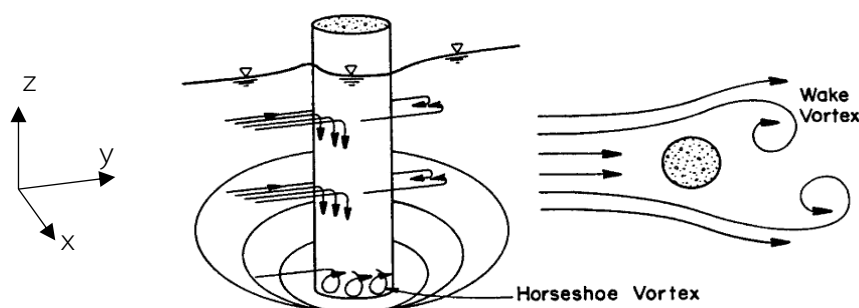
Lines of equal  $u_*$  and  $D$  based on  $\rho_s = 2,650 \text{ kg/m}^3$  and  $\nu = 1.25 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  ( $12^\circ\text{C}$ )

รูปที่ 2-2 ไดอะแกรมของชิลด์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re_*$  กับ  $\psi$  (Shields, 1936)

### 2.1.3 กลไกการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน (scour mechanism at pier)

การกัดเซาะรอบตอม่อสะพานเกิดขึ้นจากการที่สะพานกั้นขวางการไหลของน้ำ ทำให้น้ำมีพฤติกรรมการไหลเปลี่ยนไป โดยการเกิดน้ำวน (vortex) ซึ่งน้ำวนเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดการกัดเซาะเนื่องจากแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น

น้ำเมื่อไหลปะทะกับตอม่อ ด้วยเส้นชั้นความเร็วที่ไม่เท่ากันโดยความเร็วที่อยู่ติดกับขอบทางน้ำจะมีความเร็วต่ำกว่าเนื่องจากแรงฉุดระหว่างการไหลของน้ำกับขอบทางน้ำ (boundary layer) ดังนั้นน้ำที่ไหลปะทะซึ่งไม่มีทางให้ไหลไปทางอื่นจึงไปทางที่ความเร็วการไหลต่ำกว่า นั่นก็คือทิศทางลงด้านล่างตามแนวตอม่อ เรียกว่า กระแสไหลลง (downflow) จากนั้นเมื่อขนาดของความเร็วของ downflow มีค่าใกล้เคียงกับขนาดของความเร็วการไหลของน้ำที่มาปะทะกัน ก็จะเกิดกลไกการหมุนวนรอบแกนตั้งฉากกับทิศทางการไหลในแนวราบ หรือแกน x (horseshoe vortex) ซึ่งมีรูปคล้ายเกือกม้า และเนื่องจากการที่ตอม่อเป็นตัวขัดขวางการไหล กระแสน้ำด้านหลังตอม่อจึงเสมือนไม่มีความเร็วการไหล น้ำที่ไหลผ่านตอม่อถูกแรงฉุดของขอบตอม่อจึงไหลโอบรอบตอม่อ เกิดเป็นกระแสน้ำวนรอบแกนในแนวตั้ง หรือแกน z (wake vortex) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับพายุหมุนวงซาง การผสมกันระหว่างความเร็วทั้งสองทิศทางทำให้ความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น แรงเฉือนของน้ำมากกว่าความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของตะกอนท้องน้ำทำให้เกิดการกัดเซาะ และเมื่อหลุมกัดเซาะมีความลึกถึงระดับที่ downflow ลงไปไม่ถึง การกัดเซาะก็จะหยุดลง ดังแสดงกระแสการไหลรอบตอม่อในรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 แผนภาพแสดงการกัดเซาะรอบตอม่อทรงกระบอกต้นเดี่ยว (Arneson et al., 2012)

## 2.2 การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา

การทบทวนรายงานการศึกษาที่ผ่านมาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน เป็นส่วนหนึ่งของการสร้างเสริมพื้นฐานในการดำเนินการศึกษาครั้งนี้ โดยรายละเอียดการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมามีดังนี้

Ataie-Ashtiani and Beheshti (2006) ทดลองการกัดเซาะรอบกลุ่มตอม่อสะพาน 112 กรณี ด้วยกลุ่มตอม่อรูปแบบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2-4 ใช้ตะกอนท้องน้ำเป็นทรายขนาดสม่ำเสมอ 2 ขนาด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตอม่อ (D) 3 ขนาด และระยะห่างระหว่างตอม่อ (G) ตั้งแต่ 0D – 6D สภาพการไหลแบบสม่ำเสมอและไม่มีตะกอนปน จากผลการทดลองพบว่า การกัดเซาะรอบกลุ่มตอม่อแตกต่างกับการกัดเซาะรอบตอม่อเดี่ยว โดยความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดของกลุ่มตอม่อมีความลึกที่มากกว่า เนื่องจากการก้ำก๋ายกันของพฤติกรรมกัดเซาะ (interference effect) และจะลดลงเมื่อค่า  $G/D$  เพิ่มขึ้นจนความลึกหลุมมีค่าเท่ากับแบบตอม่อเดี่ยว และผลการก้ำก๋ายจะลดลงที่ค่า  $G/D > 2-4$  โดยขึ้นอยู่กับรูปแบบของกลุ่มตอม่อ

Lee and Sturm (2009) ศึกษาในห้องทดลองโดยจำลองสภาพท้องน้ำด้วยทรายขนาดสม่ำเสมอ 3 ขนาด ในสภาวะการไหลแบบสม่ำเสมอและไม่มีตะกอนปน โดยมีทั้งตอม่อหน้าตัดกลมและหน้าตัดสี่เหลี่ยม และยังออกแบบชุดการทดลองแบ่งเป็น 2 ชุด คือ ชุดแบบจำลองที่ออกแบบเป็นท้องลำน้ำเรียบ (flat bed model) ทดลองด้วยแบบจำลองตอม่อเดี่ยว และแบบจำลองเสมือนของแม่น้ำจริง (river model) ทดลองด้วยแบบจำลองตอม่อย่อยส่วนที่มีโครงสร้างเหมือนสะพานจริง จุดประสงค์การทดลองคือการหาความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนของความลึกหลุมกัดเซาะขนาดตอม่อ ( $d_s/b$ ) กับ อัตราส่วนของขนาดตอม่อต่อขนาดตะกอนท้องน้ำ ( $b/d_{50}$ ) จากนั้นนำผลการทดลองซึ่งเอาเฉพาะข้อมูลที่มีค่าเลขพหุน้อยกว่า 0.4 เนื่องจากเป็นค่าการไหลส่วนใหญ่ในธรรมชาติ รวมกับข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยในอดีตของ Ettema (1980), Sheppard (2003), Ting et.al. (2001) และข้อมูลจากหน่วยงาน USGS นำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี least-squares regression analysis พบว่าที่  $b/d_{50} \leq 25$  ค่าของ  $d_s/b$  จะมีการเพิ่มขึ้นแบบลอการิทึมเมื่อเทียบกับ  $b/d_{50}$  และจะลดลงเมื่อ

$b/d_{50} > 25$  และหาก  $b/d_{50} > 400$  ค่าของ  $d_s/b$  จะมีค่าประมาณ 1.3 และค่าของ  $d_s/b$  จะมากที่สุดเมื่อ  $b/d_{50} \approx 25$  แสดงดังรูปที่ 2-5 ซึ่งสรุปได้ว่าเป็นผลเนื่องมาจากอัตราส่วนของขนาดต่อม่อต่อขนาดตะกอนท้องน้ำที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของกระแสน้ำวนรูปเกือกม้า (horseshoe vortex) โดยจะเกี่ยวข้องกับกระแสการไหลในแนวตั้งด้านหน้าของต่อม่อฝั่งต้นน้ำซึ่งเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดกระแสน้ำวนรูปเกือกม้า ซึ่งทำให้ผลต่อการตะกุก ยก และนำพาตะกอนท้องน้ำให้เคลื่อนที่ออกจากบริเวณรอบๆ เสาค่อม่อ

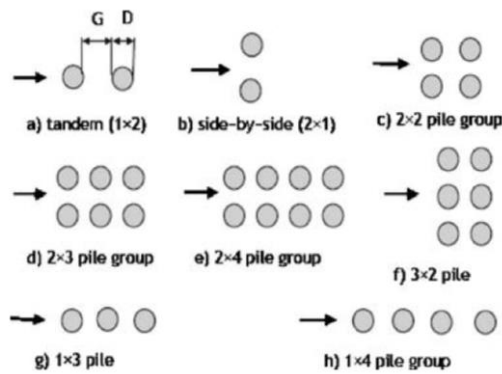
Ataie-Ashtiani et al. (2010) ศึกษาการกัดเซาะรอบต่อม่อสะพานที่มีรูปแบบซับซ้อน (complex pier) เพื่อหาอิทธิพลของระดับครอบหัวเสาเข็มที่อาจช่วยลดหรือเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะแบบจำลองต่อม่อแสดงดังรูปที่ 2-6 ในการศึกษาใช้แบบจำลอง 2 แบบ โดยปรับเปลี่ยนตัวแปรได้แก่ขนาดเสาค่อม่อ ( $b_c$ ) ความยาวครอบหัวเสาเข็ม ( $L_{pc}$ ) ระยะยื่นของครอบหัวเสาเข็มจากต่อม่อ ( $L_u, L_f$ ) ความหนาครอบหัวเสาเข็ม ( $T$ ) ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม ( $S_b, S_l$ ) และปรับเปลี่ยนระดับของครอบหัวเสาเข็ม ( $Y$ ) 7 ระดับ ทดลองในรางจำลองการไหลด้วยสภาพการไหลคงที่และไม่มีตะกอนปน จำลองพื้นที่ท้องน้ำด้วยทรายขนาดสม่ำเสมอ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2-7 อธิบายได้ว่า กรณีที่ (1) ถ้าระดับของครอบหัวเสาเข็มอยู่ลึกกว่าความลึกกัดเซาะสูงสุดจะได้ผลเหมือนการกัดเซาะรอบต่อม่อเดี่ยว กรณีที่ (2) ถ้าระดับครอบหัวเสาเข็มอยู่ตื้นจนหลุมกัดเซาะสามารถกัดไปถึงผิวส่วนบนของครอบหัวเสาเข็มจะสามารถต้านกระแสไหลลง (downflow) และกระแสปั่นป่วนได้ ทำให้หลุมกัดเซาะตื้นขึ้นโดยมีค่าเท่ากับระดับที่ครอบหัวเสาเข็มฝังลงในดิน กรณีนี้อาจเป็นกรณีที่ทำให้เกิดหลุมกัดเซาะตื้นที่สุด ทั้งนี้การที่จะหากระดับของครอบหัวเสาเข็มที่ทำให้เกิดหลุมกัดเซาะตื้นที่สุดนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรสำคัญๆ คือ ขนาดต่อม่อและระยะยื่นของครอบหัวเสาเข็ม กรณีที่ (3) และ (4) ถ้าครอบหัวเสาเข็มอยู่ตื้นเกิน การกัดเซาะจะเปลี่ยนจากการกัดเซาะรอบต่อม่อเป็นการกัดเซาะรอบครอบหัวเสาเข็มแทน ซึ่งจะทำให้ขนาดหลุมกัดเซาะมีค่ามากที่สุด เนื่องจากการกัดเซาะจะดำเนินไปจนกระทั่งลึกกว่าความหนาของครอบหัวเสาเข็มและกัดเซาะต่อไปถึงเสาเข็ม กรณีที่ (5) ถ้าครอบหัวเสาเข็มอยู่สูงกว่าระดับท้องน้ำ การกัดเซาะจะขึ้นอยู่กับระดับและความหนาของครอบหัวเสาเข็ม ขนาดและระยะห่างระหว่างเสาเข็ม และระยะยื่นของครอบหัวเสาเข็มที่ขยายออกจากขนาดต่อม่อ กรณีที่ (6) ถ้าระดับผิวส่วนบนของครอบหัวเสาเข็มเท่ากับระดับน้ำ การกัดเซาะจะคล้ายกับกรณีการกัดเซาะที่มีเศษขยะลอยอยู่ที่ผิวน้ำผสมกับการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่ม ซึ่งหลุมกัดเซาะจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกรณีการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มอย่างเดียวนกรณี (7)

Ferraro et al. (2013) ทำการศึกษาถึงผลกระทบของความหนาและระดับของครอบหัวเสาเข็มต่อขนาดความลึกหลุมกัดเซาะและการพัฒนาของความลึกหลุมกัดเซาะ โดยทดลองทั้งหมด 21 กรณี ใช้แบบจำลองที่มีความหนาครอบหัวเสาเข็มที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือแบบหนา ( $T = 5$  ซม.) และแบบบาง ( $T = 1$  ซม.) ทำการปรับเปลี่ยนระดับของครอบหัวเสาเข็ม ( $Y$ ) สำหรับความหนา 5 ซม. จำนวน 10 ระดับ และสำหรับความหนา 1 มม. จำนวน 11 ระดับ ทำการทดลองในอัตราการไหลคงที่

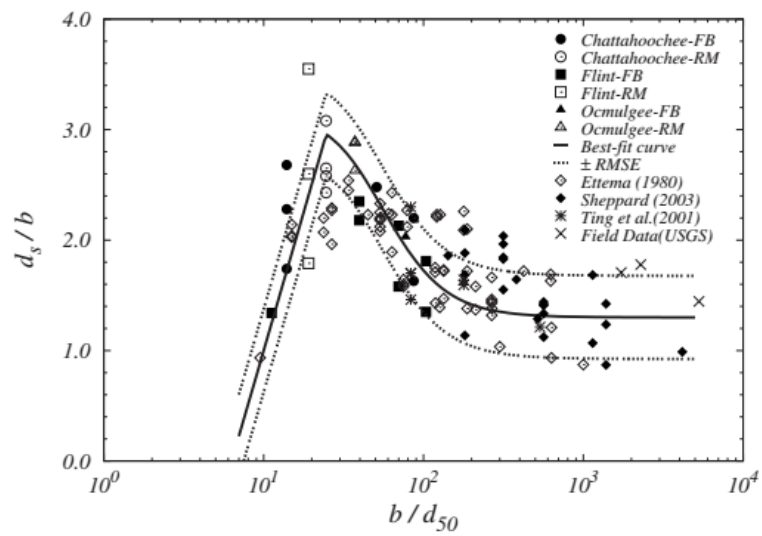
แบบจำลองต่อม่อแสดงดังรูปที่ 2-8 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ยิ่งครอบห้วเส้าเข็มมีความหนาขนาดหลุมกัดเซาะยิ่งลึกมาก แต่ก็ยังขึ้นอยู่กับระดับของครอบห้วเส้าเข็มเทียบกับระดับดินท้องน้ำเดิม เห็นได้จากกรณีของครอบห้วเส้าเข็มทั้งแบบหนาและแบบบางที่ฝังอยู่ใต้ตะกอนท้องน้ำในระดับที่ไม่ลึกไปกว่าความลึกหลุมกัดเซาะ จะช่วยลดขนาดความลึกหลุมกัดเซาะลงได้ ในขณะที่หากครอบห้วเส้าเข็มมีระดับอยู่เหนือระดับดินท้องน้ำ จะทำให้เกิดการกัดเซาะเนื่องจากการบีบตัวการไหลทำให้หลุมกัดเซาะมีความลึกเพิ่มขึ้น แต่สำหรับครอบห้วเส้าเข็มแบบบางนั้น จะมีระดับความสูงระดับหนึ่งซึ่งช่วยลดโอกาสการเกิดการกัดเซาะและทำให้หลุมกัดเซาะลดลง อย่างไรก็ตามการทดลองดังกล่าวยังต้องการข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับการสรุปผลที่ชัดเจน

Lança et al. (2013) ทำการศึกษาด้วยแบบจำลองทางกายภาพในรางน้ำจำลองการไหลเพื่อจำลองการกัดเซาะรอบกลุ่มต่อม่อสะพานที่มีหน้าตัดกลม การจัดวางแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 2-9 ทดลองในสภาวะการไหลคงที่และเป็นการไหลแบบไม่มีตะกอนปน ตะกอนท้องน้ำเป็นทรายขนาดสม่ำเสมอ ทำการทดลองจำนวน 75 กรณี เพื่อวิเคราะห์ผลของ ระยะห่างระหว่างเส้าต่อม่อแต่ละต้นในกลุ่มเดียวกัน มุมเอียงของแนวหลักต่อม่อกับทิศทางการไหลของน้ำ และจำนวนของต่อม่อในกลุ่มต่อความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ผลการทดลองพบว่า ในกรณีกลุ่มต่อม่อมีแถวเดียว ถ้าระยะห่างระหว่างเส้ามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 6 เท่าของขนาดต่อม่อ ผลการกัดเซาะรอบกลุ่มต่อม่อจะเสมือนเป็นการกัดเซาะรอบต่อม่อเดี่ยว ยกเว้นกรณีที่มุมเอียงของแถวกับทิศการไหลเท่ากับ 15 และ 30 องศา และความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นระบบในกรณีที่กลุ่มต่อม่อมี 2 หรือ 3 แถว

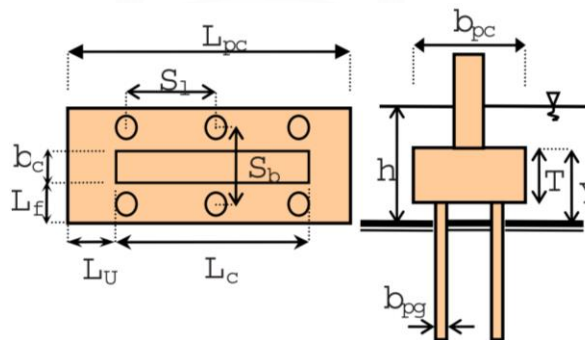
Moreno et al. (2015) ทำการทดลอง 25 กรณี เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง อัตราส่วนความกว้างเส้าต่อม่อกับครอบห้วเส้าเข็ม และระดับครอบห้วเส้าเข็มต่อความลึกน้ำ ทดสอบในอัตราการไหล ความลึกการไหล และขนาดตะกอนท้องน้ำที่เท่ากัน โดยใช้แบบจำลองต่อม่อที่มีขนาดเส้าต่อม่อแตกต่างกัน 3 ขนาด และระดับครอบห้วเส้าเข็มที่แตกต่างกัน 11 ระดับ จำแนกออกเป็นระดับที่ครอบห้วเส้าเข็มอยู่เหนือน้ำ จมอยู่ใต้น้ำ ฝังอยู่ในตะกอนท้องน้ำบางส่วน และฝังอยู่ในตะกอนท้องน้ำทั้งหมด สำหรับรูปแบบจำลองต่อม่อแสดงดังรูปที่ 2-10 ผลการทดลองพบว่า 1) การพัฒนาของความลึกหลุมกัดเซาะขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนของความกว้างเส้าต่อม่อกับครอบห้วเส้าเข็ม อัตราส่วนของระดับครอบห้วเส้าเข็มต่อความลึกน้ำ และยิ่งขึ้นอยู่กับจำนวนของโครงสร้าง (เส้าเข็ม ครอบห้วเส้าเข็ม ต่อม่อ) ที่อยู่ในหลุมกัดเซาะ 2) ความลึกหลุมกัดเซาะจะมากที่สุดกรณีที่ครอบห้วเส้าเข็มฝังอยู่ใต้ท้องน้ำบางส่วน และสำหรับในกรณีที่อัตราส่วนของความกว้างเส้าต่อม่อกับครอบห้วเส้าเข็มมีค่าน้อย ส่วนของครอบห้วเส้าเข็มที่ยื่นออกมาจากเส้าต่อม่อจะเป็นตัวที่ขัดขวางกระแสไหลลง (downflow) ที่ไหลมาตามเส้าต่อม่อ ทำให้กระแสน้ำวนมีความแรงลดลง ความลึกหลุมกัดเซาะลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดในกรณีที่ระดับครอบห้วเส้าเข็มเท่ากับระดับตะกอนท้องน้ำ



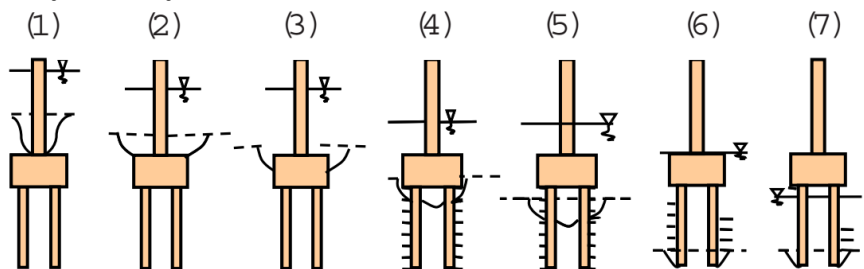
รูปที่ 2-4 รูปแบบตอม่อกลุ่มในการทดลองของ B. Ataie-Ashtiani and A. A. Beheshti (2006)



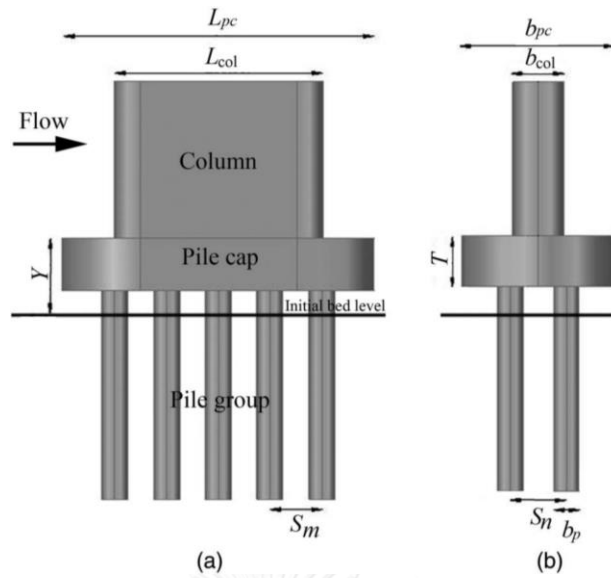
รูปที่ 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $b/d_{50}$  กับ  $d_s/b$  จากผลการทดลองของ Lee and Sturm (2009)



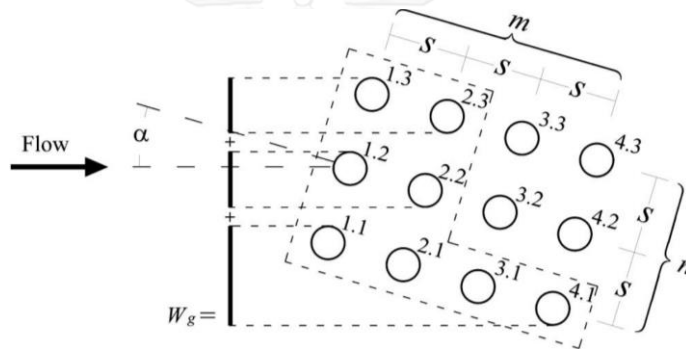
รูปที่ 2-6 รูปแบบตอม่อในการศึกษาของ Ataie-Ashtiani et al. (2010)



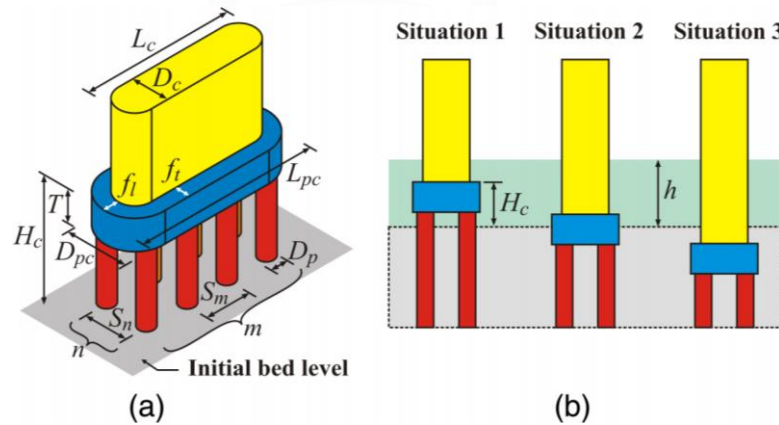
รูปที่ 2-7 ผลการทดลองจากการศึกษาของ Ataie-Ashtiani et al. (2010)



รูปที่ 2-8 รูปแบบตอม่อแบบซับซ้อน (complex pier) ตามการศึกษาของ Ferraro et al. (2013)



รูปที่ 2-9 การจัดวางกลุ่มตอม่อในการทดลองของ Lança et al. (2013)



รูปที่ 2-10 รูปแบบตอม่อในการทดลองของ Moreno et al. (2015)

พรมงคฺล ชิตชอบ (2540) ทำการศึษาการกััดเซาะรอบตอม่อสะพานในรางจำลองการไหล วัสดุท้องน้ำเป็นทรายธรรมชาติคละขนาด ทำการทดลองทั้งในสภาวะการไหลท้มีและไม่มีการเคลือ้นที่ ของตะกอนท้องน้ำ ใช้แบบจำลองตอม่อหน้าตัดกลม 3 ขนาด และตอม่อรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลาย



มนที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว 3 ค่า โดยมีมุมปะทะการไหล 3 ค่า จากผลการศึกษาพบว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความลึกหลุมกัดเซาะได้แก่ รูปร่างของตอม่อ ขนาดตอม่อ มุมปะทะการไหล และขนาดวัสดุท้องน้ำ

ธรรมวัฒน์ การุณธนกุล (2541) ทำการศึกษาการกัดเซาะรอบตอม่อสะพานที่เรียงเป็นดับ โดยใช้ทรายละเอียดขนาดจำนวน 3 ขนาด ทำการศึกษาในสภาวะการไหลทั้งที่มีและไม่มีตะกอนปน โดยใช้ตอม่อหน้าตัดกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 ซม. วางเรียงกัน 3 เส้า มีระยะห่างกันเท่ากับ 1 2 และ 3 เท่าของขนาดตอม่อ มีมุมปะทะการไหล  $0^{\circ}$   $20^{\circ}$  และ  $40^{\circ}$  จากการศึกษาพบว่า ความลึกหลุมกัดเซาะของตอม่อตัวแรกจะมากที่สุด ความลึกหลุมกัดเซาะตอม่อตัวที่ 2 และ 3 จะลดลงตามลำดับ และขนาดของวัสดุท้องน้ำมีผลต่อความลึกหลุมกัดเซาะ วัสดุท้องน้ำที่มีขนาดใหญ่จะให้ความลึกหลุมกัดเซาะน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุท้องน้ำที่มีขนาดเล็กสำหรับเงื่อนไขทางชลศาสตร์เดียวกัน

เอกนันท์ ตั้งธีระสุนันท์ (2544) ทำการศึกษาถึงผลของความขรุขระของผิวตอม่อสะพานต่อหลุมกัดเซาะ โดยมีตัวแปรที่สนใจได้แก่ อิทธิพลของค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ฟรูดนัมเบอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตอม่อ ความลึกการไหล และขนาดวัสดุท้องน้ำ โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพของตอม่อ 3 ขนาด และใช้ทรายขนาดสม่ำเสมอ 3 ขนาดเป็นวัสดุท้องน้ำ จำลองความขรุขระของตอม่อด้วยกระดาษทรายที่มีความขรุขระ 3 ขนาด ทำการทดลองภายใต้สภาพการไหลได้วิกฤติและไม่มีตะกอนปน จากผลการทดลองได้ว่า ความลึกหลุมกัดเซาะมีความสัมพันธ์กับความลึกการไหล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตอม่อ เรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ ฟรูดนัมเบอร์ และค่าความขรุขระของผิวตอม่อ และพบว่ายิ่งผิวตอม่อมีความขรุขระมากขึ้น ความลึกหลุมกัดเซาะยิ่งเพิ่มมากขึ้น

นัฐวุฒิ พัดไทสง (2549) ทำการศึกษาการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเสาเข็มภายใต้อิทธิพลร่วมกันของคลื่นและกระแสน้ำในสภาวะการไหลของน้ำที่ไม่มีตะกอนปน ขณะที่คลื่นเป็นคลื่นสม่ำเสมอเคลื่อนตัวไปในทิศทางเดียวกันกับกระแสน้ำ โดยผลการทดลองได้ว่า ความลึกหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราส่วนของความหนาของครอบหัวเสาเข็มต่อความลึกน้ำ และผลการกัดเซาะภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำร่วมกันจะให้ความลึกหลุมกัดเซาะมากกว่าความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้การกระทำของกระแสน้ำอย่างเดียวประมาณ 1.2 เท่า

พีระ ฉัตรจินตนาพร (2551) ทำการศึกษา เพื่อพิจารณาถึงผลการเอียงของเสาเข็มในกลุ่มเสาเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะ โดยทำการเอียงของเสาเข็มต้นหน้าของกลุ่มใน 3 ระนาบการเอียงคือ ระนาบตามทิศทางการไหล ระนาบทแยงกับทิศทางการไหล และระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ทดลองในการไหลต่ำกว่าวิกฤติและไม่มีตะกอนปน วัสดุท้องน้ำเป็นทรายละเอียดขนาดสม่ำเสมอเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) 0.27 มม. แบบจำลองตอม่อมีรูปแบบเป็นเสาเข็มกลุ่มแบบ 2 ต้น และ 3 ต้น จัดวางใน 2 ลักษณะ คือ กลุ่มเสาเข็ม 2 ต้น วางเรียงตามแนวการไหลต่อกัน และกลุ่มเสาเข็ม 3 ต้น มีการจัดวางเป็นลักษณะสามเหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งมีเสาเข็มต้นหน้าที่เอียงเป็นยอดสามเหลี่ยม มีระยะห่างระหว่างเสา

ที่เรียงตามแนวการไหลและตามแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลเป็น 2 เทา ของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม จากผลการทดลองพบว่าการเอียงเสาเข็มในระนาบการเอียงตามทิศทางการไหลมีแนวโน้มต่อการลดลงของความลึกหลุมกัดเซาะตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น และการเอียงของเสาเข็มในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหลแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความลึกหลุมกัดเซาะ ส่วนการเอียงของเสาเข็มในระนาบการเอียงทแยงกับทิศทางการไหลไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับขนาดความลึกของหลุมกัดเซาะกรณีเสาตั้งตรง

### 2.3 กฎของความคล้ายคลึง (law of Similitude)

ในการศึกษาด้วยแบบจำลองทางกายภาพนั้น การทำแบบจำลองจะต้องใช้กฎเกณฑ์ในการจำลองซึ่งเป็นหลักการที่สำคัญเพื่อให้ได้สภาพพฤติกรรมและกระบวนการทางชลศาสตร์ต่างๆ ใกล้เคียงกับสภาพต้นแบบจริงมากที่สุด กฎของความคล้ายคลึง (law of similitude) จึงถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองนี้ (เสรี จันทโรยธา)

- 1) ความคล้ายคลึงกันทางด้านเรขาคณิตหรือรูปทรง (geometric similarity) คือ การที่ขนาดด้านทุกด้านของต้นแบบกับแบบจำลองมีอัตราส่วนเชิงเส้นคงที่เท่ากันตลอด
- 2) ความคล้ายคลึงกันทางด้านจลศาสตร์หรือรูปแบบการเคลื่อนไหว (kinematics similarity) คือ การที่ระบบสองระบบมีการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่สัมพันธ์กัน ในตำแหน่งและเวลาที่สัมพันธ์กัน
- 3) ความคล้ายคลึงด้านพลศาสตร์หรือแรงที่เกิดขึ้น (dynamic similarity) คือ การที่ระบบสองระบบหรือของสองสิ่งที่มีลักษณะความคล้ายคลึงกันทางด้านพลศาสตร์ก็ต่อเมื่ออัตราส่วนของแรงที่สัมพันธ์กันที่กระทำต่อระบบทั้งสองมีค่าคงที่ ในการอธิบายว่าพฤติกรรมของของไหลในแบบจำลองและของจริงจะมีความคล้ายคลึงกันหรือไม่นั้น จะต้องพิจารณาว่าแรงอะไรเป็นแรงที่มีความสำคัญต่อพฤติกรรมของของไหลที่พิจารณา เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับเชิงสัดส่วนกับแรงเฉื่อย (inertia force) จะได้ค่าคงที่ที่ใช้ในการเปรียบเทียบความคล้ายคลึงทางชลศาสตร์ในการทำแบบจำลอง สำหรับในการศึกษาครั้งนี้ทำการทดลองการไหลในทางน้ำเปิด ซึ่งเป็นการไหลภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก (gravity flow or free surface flow) ดังนั้นจึงพิจารณาแรงที่มีอิทธิพลต่อการไหลในระบบ คือ แรงโน้มถ่วงของโลกกับแรงเฉื่อย ด้วยกฎของฟรูด (Froude law)

## บทที่ 3

### การดำเนินการทดลองและข้อมูลที่ได้

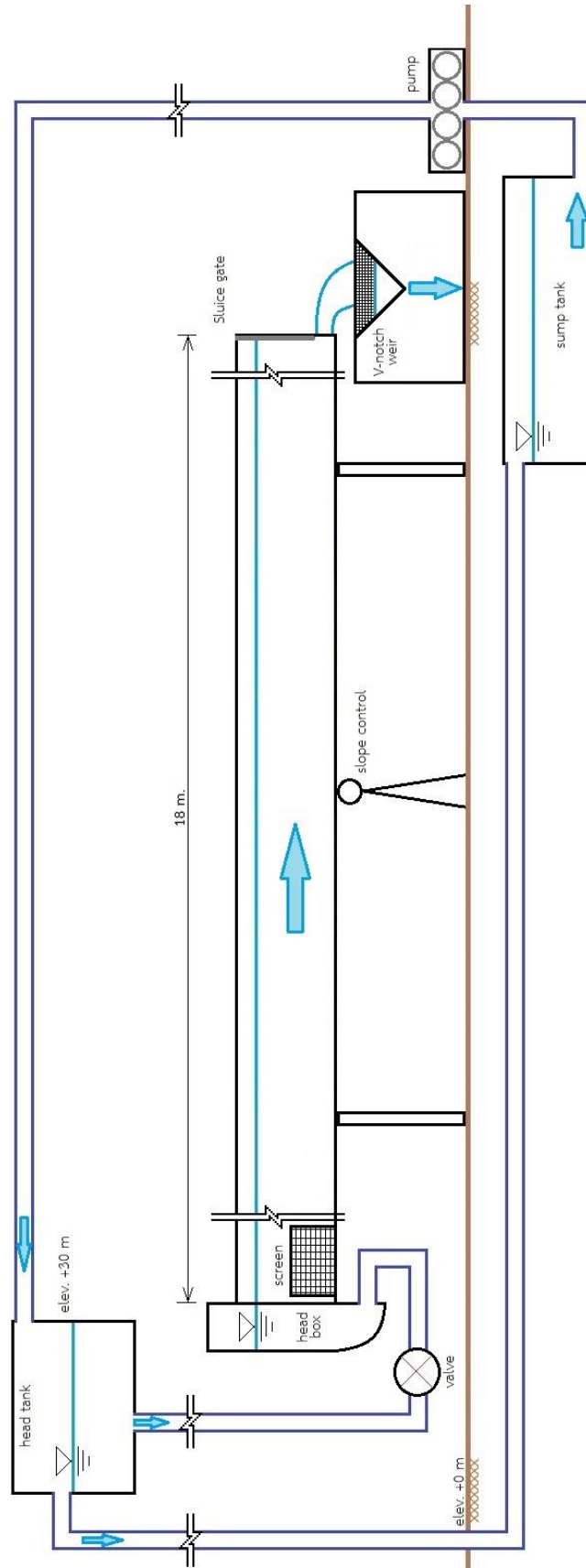
ในการศึกษาและทดลองการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ได้ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีรายละเอียดของการดำเนินการศึกษาดังนี้

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้การทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองสำหรับการศึกษาค้นคว้านี้ได้แก่

- 1) รางจำลองการไหล (rectangular flume) ในการศึกษาค้นคว้านี้ได้ทำการจำลองการไหลในรางน้ำเปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด  $0.60 \times 0.75 \times 18$  ม. ผนังทั้งสองด้านของรางเป็นกระจกใส พื้นรางเป็นเหล็ก ท้ายรางน้ำติดตั้งประตูน้ำแบบบานยก (sluice gate) เพื่อควบคุมความลึกการไหล น้ำจะไหลจากรางลงสู่ถังเก็บน้ำซึ่งใช้เป็นตัววัดอัตราการไหลแบบฝายสันคมรูปตัววี ( $90^\circ$  V-notch weir) รางน้ำสามารถปรับระดับความลาดเอียงได้ด้วยแม่แรงมอเตอร์ไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3-1
- 2) เข็มวัดระดับ (point gauge) ติดตั้งบนรางเลื่อนเหนือรางจำลองการไหล เพื่อให้เคลื่อนที่ได้ตลอดแนวตามยาวของรางน้ำเปิด สำหรับวัดระดับของท้องน้ำและผิวน้ำ
- 3) เครื่องมือวัดระดับน้ำและความเร็วการไหลด้วยคลื่นเสียง (Sontek Argonaut-SW) ติดตั้งไว้ด้านต้นน้ำของรางจำลองการไหล ใช้ดูระดับน้ำแบบ real-time เพื่อปรับระดับประตูน้ำให้ได้ระดับน้ำที่ต้องการ
- 4) กล้องบันทึกภาพ ใช้สำหรับบันทึกภาพผลการกัดเซาะและตกตะกอนรอบแบบจำลองตอม่อสะพาน
- 5) นาฬิกาจับเวลา เพื่อใช้ในการจับเวลาในการสอบเทียบอัตราการไหลและช่วงเวลาการทดลอง
- 6) เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer) ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิ

สำหรับรายละเอียดและภาพประกอบของอุปกรณ์วัดและบันทึกข้อมูล แสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ 3-1 รางกำจัดองการไหล

### 3.2 การสอบเทียบอุปกรณ์ทดลอง (calibration)

เมื่อได้ศึกษาวิธีการใช้อุปกรณ์ต่างๆ แล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการสอบเทียบอุปกรณ์ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญก่อนที่จะเริ่มการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของอุปกรณ์และกำจัดความผิดพลาดที่ไม่เป็นระบบทิ้งไป รวมทั้งเพื่อให้รู้ถึงขีดจำกัดของอุปกรณ์สำหรับการออกแบบการทดลอง ซึ่งการศึกษานี้ได้มีการสอบเทียบอุปกรณ์ดังนี้

- 1) การสอบเทียบความลาดเอียงท้องน้ำของรางจำลองการไหล โดยอ่านค่าความลาดเอียงของรางจำลองการไหลได้จากสเกลที่ติดอยู่ด้านข้างของราง
- 2) การสอบเทียบอัตราการไหลของระดับน้ำเหนือสันฝายสามเหลี่ยมสันคม รวมทั้งทำการบันทึกการเปิดวาล์วควบคุมเพื่อให้ง่ายในปล่อยน้ำเข้าสู่การทดลอง
- 3) การหาขนาดเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์การกระจายขนาดของทรายที่จะใช้เป็นวัสดุท้องน้ำ ซึ่งต้องใช้ผลดังกล่าวในการออกแบบการทดลองต่อไป

สำหรับรายละเอียดการสอบเทียบอุปกรณ์และผลการสอบเทียบแสดงในภาคผนวก ข

### 3.3 การออกแบบการทดลอง

หลังจากได้ข้อมูลของขนาดเฉลี่ยของทรายที่จะใช้เป็นวัสดุท้องน้ำ รวมทั้งข้อมูลที่ได้ทำการศึกษาในภาคทฤษฎี ขั้นตอนต่อมาคือการออกแบบการทดลองเพื่อให้การทดลองเป็นไปตามสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้นั้นคือ ระดับคานขวางของสะพานแบบ Pile Bent มีผลต่อความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดภายใต้สภาวะการไหลไม่มีตะกอนปน (clear-water) สภาพการไหลเป็นแบบคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา (steady flow) และเป็นารไหลต่ำกว่าวิกฤติ (sub-critical flow) ซึ่งต้องมีการออกแบบการทดลองดังนี้

#### 3.3.1 ค่าเริ่มต้นการไหล

การคำนวณหาค่าการไหลให้เป็นสภาวะการไหลที่ตะกอนท้องน้ำเกือบจะเคลื่อนที่ โดยใช้ไดอะแกรมของชิลด์ (Shield's Diagram) เป็นค่าเบื้องต้นสำหรับให้เกิดสภาวะการไหลดังกล่าว โดยพารามิเตอร์ที่ต้องการคือค่าความเร็วเฉือนวิกฤติของการไหล (critical shear stress,  $u_{*c}$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดตะกอนท้องน้ำ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความลึกการไหลและความลาดชันพลังงานการไหลในแต่ละอัตราการไหล สำหรับใช้ในการทำการทดลอง โดยค่าเริ่มต้นการไหลแสดงดังตารางที่ 3-1 รายละเอียดการคำนวณสภาวะเริ่มเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (initial condition) แสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 3-1 ค่าเริ่มต้นการไหลสำหรับใช้ในการทดลอง

อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)	ความลึกการไหล (ซม.)	ความลาดท้องน้ำ	ฟรูดนัมเบอร์
30	16	0.000471	0.25
45	25	0.000302	0.19
60	35	0.000215	0.15

### 3.3.2 แบบจำลองตอม่อ

รูปแบบตอม่อสะพานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีจำนวนกรณีศึกษาทั้งหมด 60 กรณีศึกษา ดังตารางที่ 3-2 จำลองมาจากแบบมาตรฐานงานสะพานของกรมทางหลวงชนบท โดยการย่อมาตราส่วน 1 : 8.7 เสาของแบบจำลองมีขนาด 4.6 ซม. ก่อสร้างโดยใช้ท่อเหล็กกลวงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตัดและเชื่อมต่อกัน ใช้แบบจำลองตอม่อ 36 ชุด โดยการปรับเปลี่ยนรูปแบบของตอม่อมีดังนี้

- กรณีที่ 1 กรณีที่หลังคานขวางมีระดับเท่ากับระดับตะกอนท้องน้ำ (Y1) สร้างแบบจำลองตอม่อ 4 ชุดที่มีระดับคานขวางเท่ากันโดยเปลี่ยนเฉพาะระยะห่างระหว่างเสา
- กรณีที่ 2 กรณีที่ท้องคานขวางมีระดับเท่ากับระดับตะกอนท้องน้ำ หรือหลังคานขวางอยู่สูงกว่าระดับดินท้องน้ำ 4.6 ซม. (Y2) สร้างแบบจำลองตอม่อ 4 ชุดที่มีระดับคานขวางเท่ากันโดยเปลี่ยนเฉพาะระยะห่างระหว่างเสา
- กรณีที่ 3 กรณีที่หลังคานขวางอยู่สูงกว่าระดับดินท้องน้ำเป็นระยะ 0.2 ของความลึกน้ำ (Y3) กรณีนี้ต้องสร้างแบบจำลองตอม่อ 12 ชุด โดยต้องปรับเปลี่ยนทั้งระดับของคานขวางตามค่าระดับน้ำ 3 ค่า และปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างเสา 4 ค่า
- กรณีที่ 4 กรณีที่หลังคานขวางอยู่สูงกว่าระดับดินท้องน้ำเป็นระยะ 0.4 ของความลึกน้ำ (Y4) กรณีนี้ต้องสร้างแบบจำลองตอม่อ 12 ชุด โดยต้องปรับเปลี่ยนทั้งระดับของคานขวางตามค่าระดับน้ำ 3 ค่า และปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างเสา 4 ค่า
- กรณีที่ 5 กรณีที่ระดับคานขวางอยู่สูงกว่าระดับน้ำ (Y5) สร้างแบบจำลองตอม่อ 4 ชุดที่มีระดับคานขวางเท่ากันโดยเปลี่ยนเฉพาะระยะห่างระหว่างเสา

สำหรับค่าระยะห่างระหว่างเสาทั้ง 4 ค่าข้างต้นได้แก่ ระยะห่าง A เท่ากับ 21.2 ซม., ระยะห่าง B เท่ากับ 16.1 ซม., ระยะห่าง C เท่ากับ 12.6 ซม. และระยะห่าง D เท่ากับ 10.3 ซม. ภาพตัวอย่างแบบจำลองตอม่อที่ระยะห่างระหว่างเสาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3-2 และตัวอย่างแบบจำลองตอม่อที่มีคานขวางระดับต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3-3 ส่วนรายละเอียดอัตราการไหล ระยะห่างระหว่างเสา และระดับคานขวาง ที่ออกแบบเพื่อทดลอง แสดงดังตารางที่ 3-2

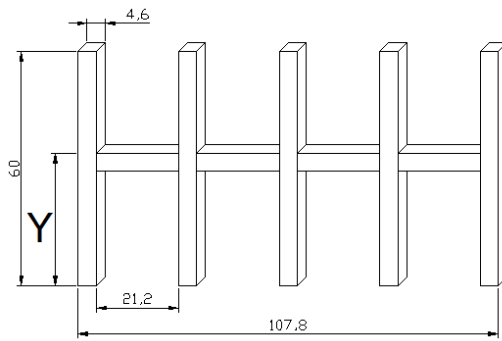
ตารางที่ 3-2 กรณีการทดลองต่างๆ ที่ทำการศึกษา จำนวน 60 กรณี

อัตราการไหล	ระยะห่างระหว่างเสา <sup>1</sup>	ระดับคานขวาง <sup>2</sup>				
		Y1	Y2	Y3	Y4	Y5
Q1	A	Q1AY1	Q1AY2	Q1AY3	Q1AY4	Q1AY5
	B	Q1BY1	Q1BY2	Q1BY3	Q1BY4	Q1BY5
	C	Q1CY1	Q1CY2	Q1CY3	Q1CY4	Q1CY5
	D	Q1DY1	Q1DY2	Q1DY3	Q1DY4	Q1DY5
Q2	A	Q2AY1	Q2AY2	Q2AY3	Q2AY4	Q2AY5
	B	Q2BY1	Q2BY2	Q2BY3	Q2BY4	Q2BY5
	C	Q2CY1	Q2CY2	Q2CY3	Q2CY4	Q2CY5
	D	Q2DY1	Q2DY2	Q2DY3	Q2DY4	Q2DY5
Q3	A	Q3AY1	Q3AY2	Q3AY3	Q3AY4	Q3AY5
	B	Q3BY1	Q3BY2	Q3BY3	Q3BY4	Q3BY5
	C	Q3CY1	Q3CY2	Q3CY3	Q3CY4	Q3CY5
	D	Q3DY1	Q3DY2	Q3DY3	Q3DY4	Q3DY5

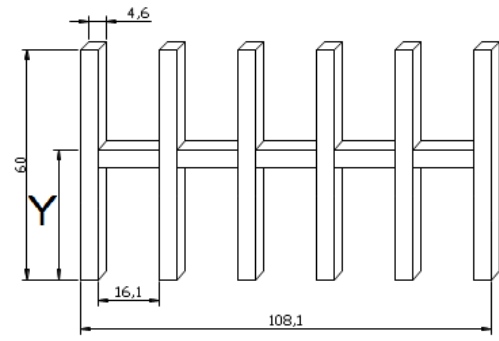
<sup>1</sup> A, B, C, D = ระยะห่างของตอม่อสะพานตามแบบมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท (2556)

<sup>2</sup> สำหรับค่าระดับฐานราก ได้แก่

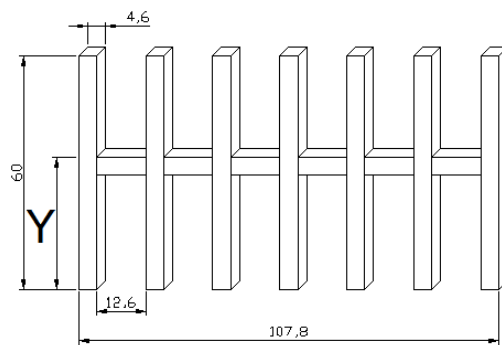
- Y1 คือระดับที่ส่วนบนของคานขวางเท่ากับระดับดินท้องน้ำ
- Y2 คือระดับที่ส่วนล่างของคานขวางเท่ากับระดับดินท้องน้ำ
- Y3 คือระดับที่ส่วนบนของคานขวางเท่ากับ 0.2 ความลึกน้ำ
- Y4 คือระดับที่ส่วนบนของคานขวางเท่ากับ 0.4 ความลึกน้ำ
- Y5 คือระดับที่คานขวางอยู่พ้นระดับน้ำ



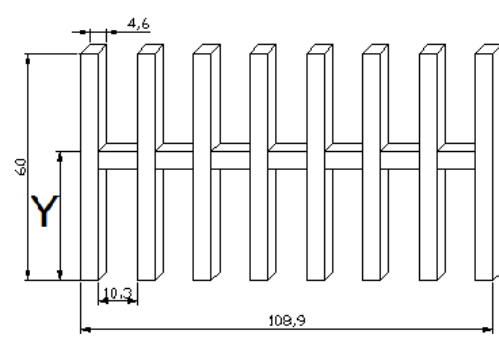
ระยะห่างเสาแบบ A



ระยะห่างเสาแบบ B

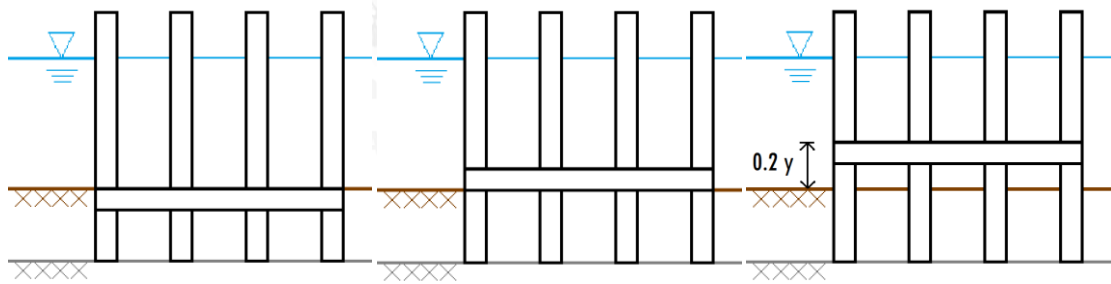


ระยะห่างเสาแบบ C



ระยะห่างเสาแบบ D

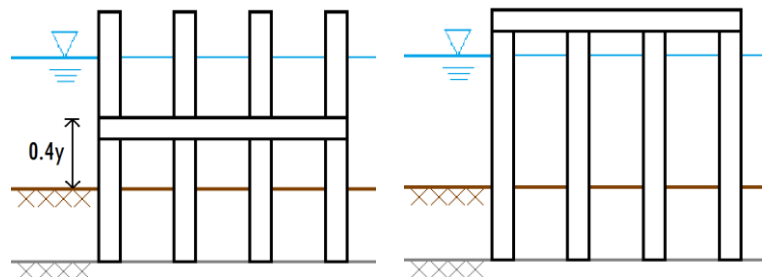
รูปที่ 3-2 ตัวอย่างแบบจำลองต่อม่อที่ระยะระหว่างเสาต่างๆ



ระดับคานขวาง Y1

ระดับคานขวาง Y2

ระดับคานขวาง Y3



ระดับคานขวาง Y4

ระดับคานขวาง Y5

รูปที่ 3-3 ตัวอย่างแบบจำลองต่อม่อที่ระดับคานขวางต่างๆ



ตารางที่ 3-3 ข้อมูลสรุปการออกแบบก่อสร้างแบบจำลองต่อม่อ

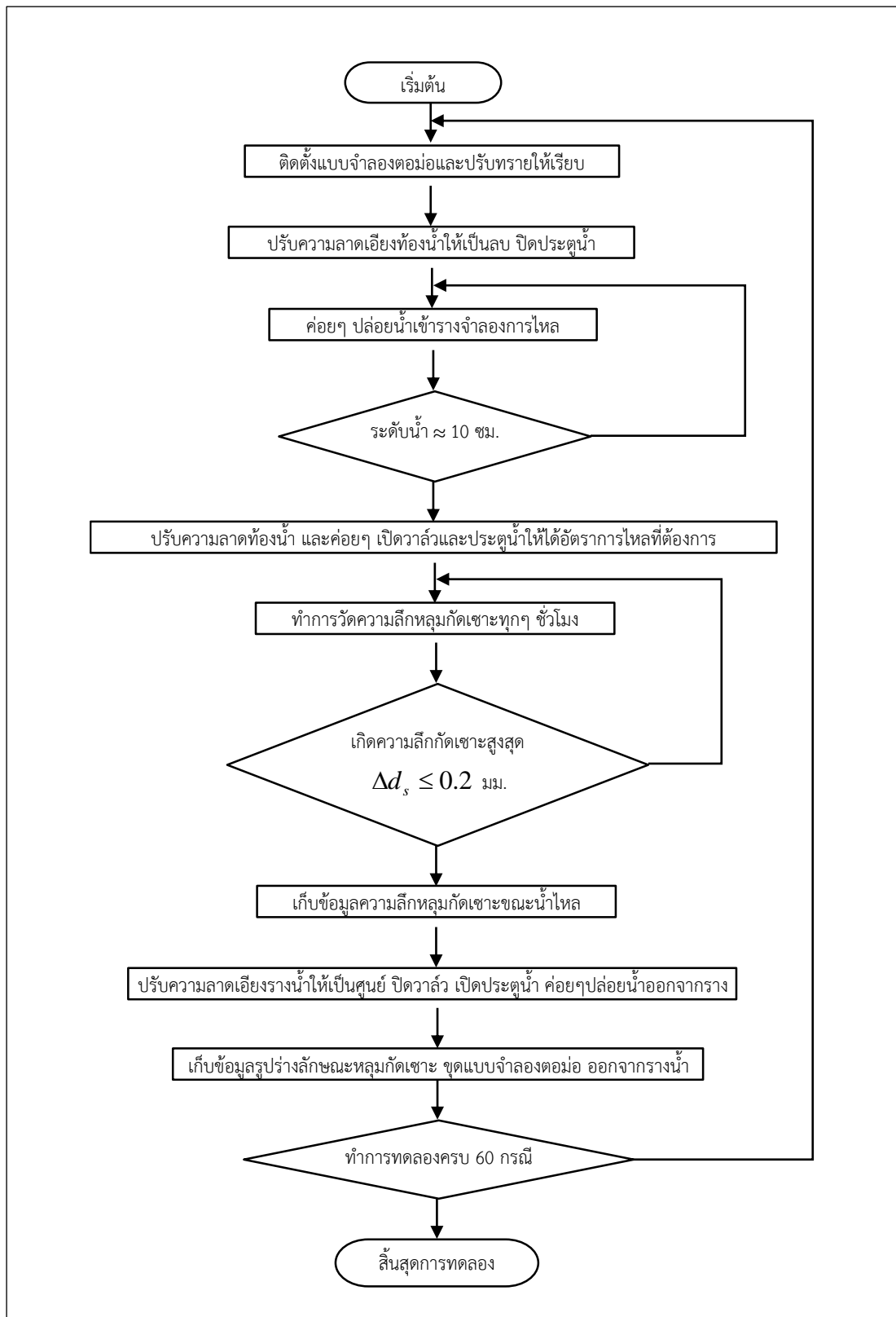
อัตราการใช้ (ลิตร/วินาที)	ระยะห่าง ระหว่างเสา (ชม.) [จำนวนเสา]	ระดับหลังคาของวัดจากท้องน้ำ (ชม.)				
		Y1	Y2	Y3	Y4	Y5
Q1 30	A 21.2 [5]	Q1AY1 0.0	Q1AY2 4.6	Q1AY3 3.2	Q1AY4 6.4	Q1AY5 40.0
	B 16.1 [6]	Q1BY1 0.0	Q1BY2 4.6	Q1BY3 3.2	Q1BY4 6.4	Q1BY5 40.0
	C 12.6 [7]	Q1CY1 0.0	Q1CY2 4.6	Q1CY3 3.2	Q1CY4 6.4	Q1CY5 40.0
	D 10.3 [8]	Q1DY1 0.0	Q1DY2 4.6	Q1DY3 3.2	Q1DY4 6.4	Q1DY5 40.0
Q2 45	A 21.2 [5]	Q2AY1 0.0	Q2AY2 4.6	Q2AY3 5.0	Q2AY4 10.0	Q2AY5 40.0
	B 16.1 [6]	Q2BY1 0.0	Q2BY2 4.6	Q2BY3 5.0	Q2BY4 10.0	Q2BY5 40.0
	C 12.6 [7]	Q2CY1 0.0	Q2CY2 4.6	Q2CY3 5.0	Q2CY4 10.0	Q2CY5 40.0
	D 10.3 [8]	Q2DY1 0.0	Q2DY2 4.6	Q2DY3 5.0	Q2DY4 10.0	Q2DY5 40.0
Q3 60	A 21.2 [5]	Q3AY1 0.0	Q3AY2 4.6	Q3AY3 7.0	Q3AY4 14.0	Q3AY5 40.0
	B 16.1 [6]	Q3BY1 0.0	Q3BY2 4.6	Q3BY3 7.0	Q3BY4 14.0	Q3BY5 40.0
	C 12.6 [7]	Q3CY1 0.0	Q3CY2 4.6	Q3CY3 7.0	Q3CY4 14.0	Q3CY5 40.0
	D 10.3 [8]	Q3DY1 0.0	Q3DY2 4.6	Q3DY3 7.0	Q3DY4 14.0	Q3DY5 40.0

### 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

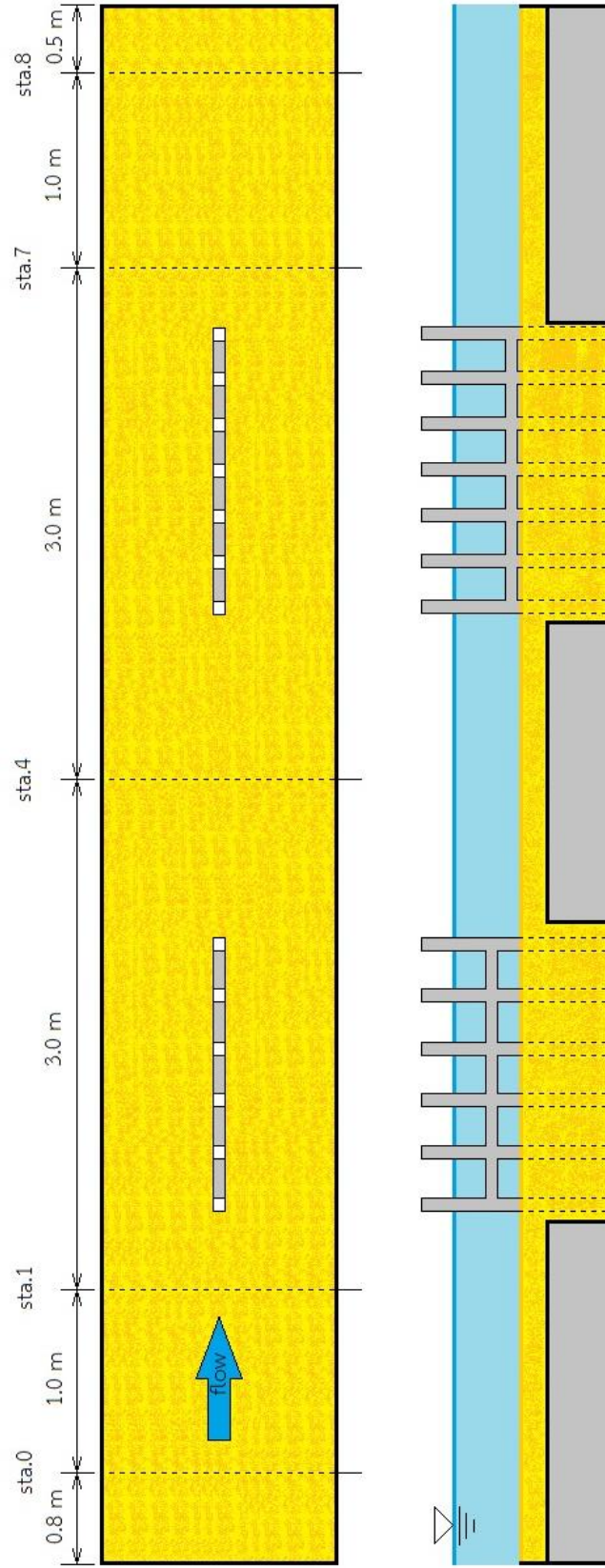
ในการศึกษาครั้งนี้ต้องการหาค่าตอบในมิติของขนาดหลุมกักเซาะสูงสุดโดยไม่คำนึงถึงมิติของระยะเวลา จึงกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของการไหลว่าท้องน้ำก่อนที่จะมีโครงสร้างตอม่อนั้นได้อยู่ในภาวะสมดุลที่ไม่เกิดการกัดเซาะหรือตกตะกอน นั่นคือกำหนดให้สภาพการไหลเป็นแบบไม่มีตะกอนปน (clear water) โดยขั้นตอนทดลองมีดังนี้

- 1) ติดตั้งแบบจำลองตอม่อในตำแหน่งที่เตรียมไว้ จากนั้นปรับระดับทรายให้เรียบ ทำการถ่ายภาพเพื่อใช้เปรียบเทียบก่อน-หลังการทดลอง
- 2) ปรับระดับความลาดเอียงท้องน้ำให้มีค่าติดลบมากที่สุดเท่าที่ทำได้ ปิดประตูน้ำที่ท้ายรางน้ำ เปิดปั้มน้ำ ค่อยๆ เปิดวาล์ว เพื่อให้ น้ำค่อยๆ ไหลเข้าสู่รางน้ำ
- 3) รอจนได้ความลึกน้ำประมาณ 10 ซม. จึงปรับระดับความลาดเอียงของรางน้ำให้ได้ระดับที่ต้องการ จากนั้นค่อยๆ เปิดวาล์วเพิ่มทีละน้อยเพื่อไม่ให้น้ำในรางไหลเร็วจนเกิดการนำพาตะกอนทรายท้องน้ำ จนได้อัตราการไหลที่ต้องการ สลับกับค่อยๆ ปิดประตูน้ำบานเลื่อนที่ท้ายรางน้ำจนได้ความลึกการไหลที่ต้องการ ทำการถ่ายภาพด้านข้างตอม่อในขณะที่มีน้ำไหล ตอนเริ่มการทดลอง
- 4) ปล่อยให้เกิดการกัดเซาะรอบแบบจำลองตอม่อจนเกิดการกัดเซาะสูงสุด โดยทำการวัดความลึกหลุมกักเซาะเป็นช่วงเวลาเพื่อหาค่าความลึกที่เปลี่ยนไปในแต่ละช่วงเพื่อเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาหยุดการทดลอง ซึ่งจะหยุดการทดลองก็ต่อเมื่อความลึกหลุมกักเซาะเปลี่ยนแปลงในอัตราที่น้อยกว่า 0.2 มม. ต่อชั่วโมง ของการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาก่อนหน้า บันทึกข้อมูลความลึกหลุมกักเซาะ อุณหภูมิน้ำ และถ่ายภาพด้านข้างตอม่อในขณะที่มีน้ำไหลตอนสิ้นสุดการทดลอง
- 5) หลังจากได้ค่าความลึกกัดเซาะสูงสุดและบันทึกข้อมูลเสร็จแล้ว ค่อยๆ ปรับระดับความลาดเอียงรางน้ำให้ไม่มีความลาดเอียง ค่อยๆ ปิดประตูน้ำและวาล์ว ปล่อยให้ น้ำค่อยๆ ไหลออกจากรางน้ำ
- 6) รอจนน้ำในรางแห้ง ทำการบันทึกความกว้างหลุมกักเซาะ และถ่ายภาพหลุมกักเซาะ
- 7) ขุดนำแบบตอม่อชุดที่ทำการทดลองเสร็จแล้วออก ติดตั้งแบบจำลองตอม่อที่จะทำการทดลองกรณีต่อไป และทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนแรกจนครบทุกกรณีศึกษา ตามตาราง 1-2

ขั้นตอนการทดลองสามารถสรุปได้ดังแผนผังรูปที่ 3-4 สำหรับตำแหน่งที่ทำการวัดค่าระดับท้องน้ำและระดับความลึกน้ำ แสดงดังรูปที่ 3-5 และตัวอย่างการบันทึกข้อมูลแสดงดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-4 แผนผังสรุปขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3-5 ตำแหน่งวัดค่าระดับที่องน้ำและระดับความลึกน้ำ

### 3.5 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการพิจารณา

การศึกษาด้วยแบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องมากมาย ทั้งตัวแปรที่ควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ ซึ่งทำให้เกิดความซับซ้อนทั้งในการวิเคราะห์ปัญหา การทดลอง และการเก็บวัดบันทึกข้อมูล เพื่อให้สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ได้ง่ายขึ้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้กำหนดเงื่อนไขให้เป็นการไหลแบบคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (steady flow) และสภาวะการไหลแบบไม่มีตะกอนปน (clear-water) ทำให้ประมาณการตัวแปรต่างๆ ที่อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับอิทธิพลการกัดเซาะได้แก่

- 1) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของของไหล (fluid properties) ได้แก่ ความหนาแน่นของน้ำ (density of water,  $\rho$ ) ความหนืดจลน์ของน้ำ (kinematic viscosity of water,  $\nu$ ) ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (acceleration due to gravity,  $g$ )
- 2) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของวัสดุท้องน้ำ (sediment characteristics) ได้แก่ ขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ (sediment size,  $d_{50}$ ) ความหนาแน่นของวัสดุท้องน้ำ (density of the sediment,  $\rho_s$ ) การกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ (size distribution,  $\sigma$ ) ลักษณะของวัสดุท้องน้ำ (grain form) แรงดึงดูดระหว่างวัสดุท้องน้ำ (cohesion of material)
- 3) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการไหล (variables characterizing the flow) ได้แก่ ความลึกการไหล (depth of approach flow,  $y$ ) ความเร็วการไหล (mean velocity of undisturbed flow,  $V$ ) ความขรุขระของวัสดุท้องน้ำ (roughness of approach flow) ความลาดเอียงของท้องน้ำ (bed slope,  $S_0$ ) ความลาดเอียงของเส้นพลังงาน (energy slope,  $S_f$ )
- 4) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของตอม่อ (variables characterizing the bridge pier) ได้แก่ รูปร่างเสา (pier shape) ความกว้างเสา (pile width,  $b_p$ ) ระยะห่างระหว่างเสา (pile spacing,  $s_p$ ) ระดับของคานขวาง (bracing elevation,  $Y$ )

จะเห็นได้ว่าตัวแปรข้างต้นเป็นตัวแปรที่สามารถวัดค่าได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม แต่เพื่อให้การทดลองและการวิเคราะห์ปัญหายั่งยืน และลดจำนวนตัวแปรลง จึงได้ตั้งสมมุติฐานและข้อจำกัดดังนี้

- ตัวแปรการไหล รางน้ำต้องมีความกว้างพอ เมื่อมีตอม่อขวางการไหลจะไม่ส่งผลให้เกิดการบีบตัวของรางน้ำ วัสดุท้องน้ำมีขนาดคละเดียวกันตลอดรางน้ำ การไหลเริ่มต้นอยู่ในสภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และเป็นการไหลต่ำกว่าวิกฤต (subcritical flow)

- วัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดสม่ำเสมอ (uniform sand)
- คุณลักษณะของตอม่อ กำหนดใช้รูปร่างเสาสี่เหลี่ยมจัตุรัส (rectangular pier) และมีผิวเรียบ ขนาดเดียวกันทุกการทดลอง แต่มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่าง และระดับคานขวาง

ดังนั้นจะเหลือตัวแปรที่ใช้ในการพิจารณาดังนี้

- ของไหล :  $g$
- การไหล :  $y, V$
- ตอม่อ :  $b_p, s_p, Y$

จะได้ว่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ( $d_s$ ) ขึ้นอยู่กับตัวแปรดังนี้

$$d_s = f(g, y, V, b_p, s_p, Y)$$

กลุ่มตัวแปรนี้จะใช้ในกระบวนการศึกษาครั้งนี้ ทั้งการออกแบบการทดลอง การวัดค่าและเก็บบันทึกผลการทดลอง และการวิเคราะห์สรุปผลการทดลอง สำหรับรูปแบบของสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ จะออกแบบให้มีรูปแบบคล้ายกับสมการ HEC-18 (Arneson et al., 2012) ดังแสดงในสมการที่ 3-1 โดยเพิ่มตัวแปรระยะห่างตอม่อและระดับคานขวางเข้าไปในสมการได้ดังสมการที่ 3-2

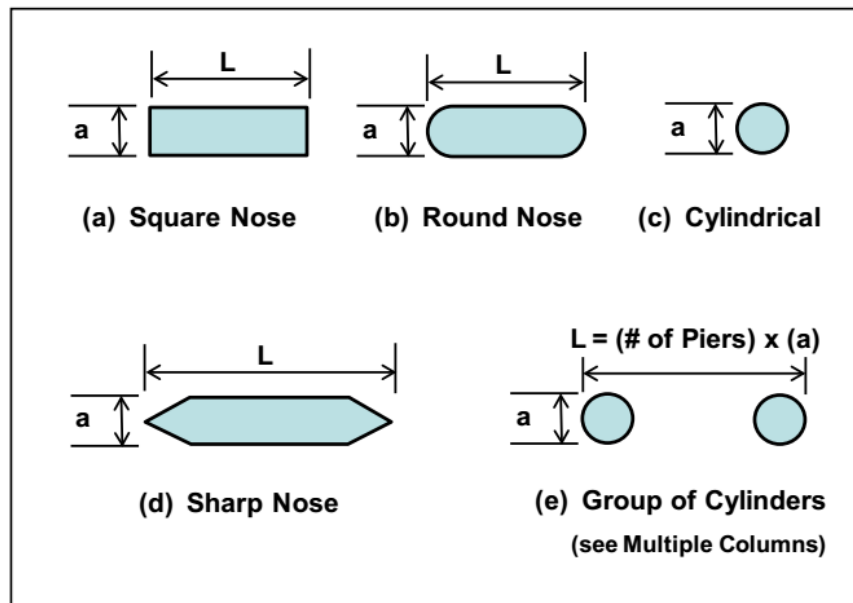
$$\frac{d_s}{y} = 2.0K_1K_2K_3\left(\frac{b_p}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (4-2)$$

$$\frac{d_s}{y} = 2.0K_1K_2K_3K_4\left(\frac{Y}{y}\right)^m\left(\frac{s_p}{y}\right)^n\left(\frac{b_p}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (4-3)$$

โดยค่า  $K_4$ ,  $m$  และ  $n$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการถดถอยแบบกำลังน้อยที่สุด (least square regression analysis) จากข้อมูลผลการทดลอง สำหรับค่าสัมประสิทธิ์  $K_1$ ,  $K_2$  และ  $K_3$  ของสมการ แสดงดังตารางที่ 3-4 ถึง 3-6 และรูปที่ 3-6

ตารางที่ 3-4 ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้  $K_1$  สำหรับรูปลักษณะของตอม่อ

รูปลักษณะของตอม่อ (shape of pier nose)	$K_1$
(a) ตอม่อสี่เหลี่ยม	1.1
(b) ตอม่อสี่เหลี่ยมหัวมน	1.0
(c) ตอม่อกลม	1.0
(d) ตอม่อหัวแหลม	0.9
(e) กลุ่มตอม่อกลม	1.0



รูปที่ 3-6 รูปลักษณะต่อม่อแบบต่างๆ

ตารางที่ 3-5 ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้  $K_2$  สำหรับมุมปะทะการไหลของกลุ่มต่อม่อ

มุม (องศา)	$L/a = 4$	$L/a = 8$	$L/a = 12$
0	1.0	1.0	1.0
15	1.5	2.0	2.5
30	2.0	2.75	3.5
45	2.3	3.3	4.3
90	2.5	3.9	5.0

หมายเหตุ:  $L$  คือความยาวของกลุ่มต่อม่อ,  $a$  คือความกว้างเสาต่อม่อ

ตารางที่ 3-6 ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้  $K_3$  สำหรับมุมปะทะการไหลของกลุ่มต่อม่อ

สภาวะตะกอนท้องน้ำ	ความสูงเนินทราย (H; ft.)	$K_3$
การไหลแบบไม่มีตะกอนปน	-	1.1
ท้องน้ำเรียบหรือทิศการไหลกับทิศคลื่นน้ำสวนทางกัน	-	1.1
ท้องน้ำเกิดเนินทรายขนาดเล็ก	$10 > H \geq 2$	1.1
ท้องน้ำเกิดเนินทรายขนาดกลาง	$30 > H \geq 10$	1.1 – 1.2
ท้องน้ำเกิดเนินทรายขนาดใหญ่	$H \geq 30$	1.3

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลอง

การศึกษานี้ใช้แบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์ เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของระดับคานขวางของตอม่อสะพานแบบ Pile Bent ต่อความลึกกักตื้น โดยมีการทดลอง 60 กรณี มีผลการทดลองจากแบบจำลองกายภาพดังแสดงในตารางที่ 4-1 และ 4-2 ซึ่งมีผลสรุปทั้ง 60 กรณีดังรายละเอียดต่อไปนี้

- 1) อัตราการไหล (discharge,  $Q$ ) วัดจากระดับน้ำเหนือสันฝายสามเหลี่ยมสันคม แล้วคำนวณจากสมการที่ได้จากการสอบเทียบตามภาคผนวก ข อัตราการไหลในการทดลองนี้มีค่าอยู่ในช่วง 28.2 – 59.9 ลิตร/วินาที
- 2) ความลึกการไหล (flow depth,  $y$ ) วัดด้วยเข็มวัดระดับ ณ ตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 3-5 โดยวัดระดับผิวน้ำเทียบกับระดับท้องน้ำ แต่สำหรับความลึกการไหลปะทะ (approach depth) จะวัดที่ sta.1 สำหรับแบบจำลองที่จัดวางไว้ต้นน้ำ กับ sta.4 สำหรับแบบจำลองที่จัดวางไว้ท้ายน้ำ ความลึกการไหลปะทะสำหรับการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 14.1 – 35.3 ซม.
- 3) ความลาดท้องน้ำ (bed slope,  $S_0$ ) ได้จากการอ่านสเกลที่ติดไว้ด้านข้างรางจำลองการไหล ดังแสดงรูปในภาคผนวก ก
- 4) ความเร็วการไหล (flow velocity,  $V$ ) ใช้ความเร็วการไหลปะทะ (approach velocity) ที่คำนวณจากสมการการไหลต่อเนื่อง (continuity equation) โดยแทนค่าตัวแปรความกว้างหน้าตัดการไหลด้วยขนาดความกว้างของรางจำลองการไหลเท่ากับ 0.6 ม. และใช้ค่าความลึกการไหลปะทะในการคำนวณ ในการทดลองมีความเร็วการไหลปะทะอยู่ในช่วง 0.278 – 0.347 ม./วินาที
- 5) ฟรูดนัมเบอร์ (Froude number,  $Fr$ ) การทดลองนี้ทำการทดลองในสภาวะการไหลใต้วิกฤติ (subcritical flow) ที่ค่าฟรูดนัมเบอร์น้อยกว่า 0.4 เนื่องจากเป็นค่าส่วนใหญ่ของลำน้ำธรรมชาติ ค่าคำนวณจากค่าความเร็วการไหลปะทะกับค่าความลึกการไหลปะทะตามสมการ  $Fr = V / \sqrt{gy}$  ฟรูดนัมเบอร์ของการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 0.15 – 0.30
- 6) อัตราส่วนระหว่าง ความเร็วเฉือนการไหล (shear velocity,  $u_*$ ) ซึ่งคำนวณจากสมการ  $u_* = \sqrt{gyS_0}$  ต่อความเร็วเฉือนวิกฤติการไหล (critical shear velocity,  $u_{*c}$ ) ซึ่งได้จาก



Shield's diagram แสดงการคำนวณในภาคผนวก ข สำหรับการทดลองนี้มีค่า  $u_* / u_{*c}$  อยู่ในช่วง 0.8 – 0.9

- 7) เวลาที่ใช้ในการทดลอง (duration, t) เริ่มการจับเวลาเมื่ออัตราการไหลและความลึกการไหลเป็นไปตามค่าที่ได้ออกแบบไว้ของแต่ละกรณี จนกว่าจะวัดได้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดจึงทำการหยุดเวลา สำหรับการทดลองนี้ใช้เวลาการทดลองในแต่ละกรณีอยู่ในช่วง 10 – 19 ชั่วโมง
- 8) ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด (maximum scour depth,  $d_s$ ) วัดด้วยเข็มวัดระดับ ทำการวัดทุกๆ ชั่วโมงจนกว่าค่าความลึกหลุมจะเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.2 มม./ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดจะเกิดขึ้นรอบๆ ตอม่อต้นแรกของกลุ่มตอม่อในทุกกรณี การศึกษา
- 9) ความลึกหลุมกัดเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น จะทำการวัดหลังจากที่ได้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดแล้ว โดยวัดด้านข้างของเสาตอม่อที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งกันหลุมที่สุดเนื่องจากคานขวางของแบบจำลองตอม่อขวางอยู่จึงไม่สามารถแทงเข็มวัดระดับลงไปยังตำแหน่งกันหลุมได้
- 10) ความกว้างหลุมกัดเซาะ ทำการวัดใน 3 ทิศทางคือ 1) ด้านหน้าเสาของแบบจำลองตอม่อ 2) ด้านข้างฝั่งขวาของเสาในแบบจำลองตอม่อโดยสมมุติให้หลุมกัดเซาะสมมาตรกันระหว่างฝั่งซ้ายกับขวาของแบบจำลองตอม่อ และ 3) ด้านหลังเสาของแบบจำลองตอม่อ ความกว้างหลุมจะทำการวัดเมื่อได้ปล่อยน้ำออกจากรางจำลองการไหลแล้ววัดด้วยไม้บรรทัด กำหนดให้มีค่าความละเอียดการวัดที่  $\pm 0.5$  ซม.

ตารางที่ 4-1 รายละเอียดแบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์

กรณี	Q (l/s)	y (cm)	V (m/s)	Fr	$u_* / u_{*c}$	$s_p$ (cm)	Y (cm)
Q1AY1	28.2	16.668	0.282	0.221	0.981	21.2	0.0
Q1BY1	28.5	15.948	0.298	0.238	0.959	16.1	0.0
Q1CY1	28.9	16.914	0.285	0.221	0.988	12.6	0.0
Q1DY1	28.9	16.708	0.288	0.225	0.982	10.3	0.0
Q2AY1	44.0	26.342	0.279	0.173	0.962	21.2	0.0
Q2BY1	43.6	25.894	0.280	0.176	0.954	16.1	0.0
Q2CY1	44.0	25.012	0.293	0.187	0.937	12.6	0.0
Q2DY1	44.0	25.778	0.285	0.179	0.952	10.3	0.0

ตารางที่ 4-1 รายละเอียดแบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์ (ต่อ)

กรณี	Q (l/s)	y (cm)	V (m/s)	Fr	$u^*/u^*_c$	$s_p$ (cm)	Y (cm)
Q3AY1	58.8	34.558	0.284	0.154	0.908	21.2	0.0
Q3BY1	59.4	34.996	0.283	0.153	0.914	16.1	0.0
Q3CY1	59.4	35.212	0.281	0.151	0.917	12.6	0.0
Q3DY1	58.8	35.308	0.278	0.149	0.918	10.3	0.0
Q1AY2	28.2	15.782	0.298	0.239	0.954	21.2	4.6
Q1BY2	28.5	15.310	0.311	0.254	0.940	16.1	4.6
Q1CY2	28.9	16.392	0.294	0.232	0.972	12.6	4.6
Q1DY2	28.9	16.086	0.299	0.238	0.963	10.3	4.6
Q2AY2	44.0	25.500	0.288	0.182	0.947	21.2	4.6
Q2BY2	43.6	25.168	0.289	0.184	0.940	16.1	4.6
Q2CY2	44.0	24.662	0.297	0.191	0.931	12.6	4.6
Q2DY2	44.0	25.310	0.290	0.184	0.943	10.3	4.6
Q3AY2	58.8	33.772	0.290	0.160	0.898	21.2	4.6
Q3BY2	59.4	34.302	0.289	0.157	0.905	16.1	4.6
Q3CY2	59.4	34.906	0.284	0.153	0.913	12.6	4.6
Q3DY2	58.8	34.592	0.284	0.154	0.909	10.3	4.6
Q1AY3	28.5	15.740	0.302	0.243	0.953	21.2	3.2
Q1BY3	28.5	16.014	0.297	0.237	0.961	16.1	3.2
Q1CY3	28.5	16.016	0.297	0.237	0.961	12.6	3.2
Q1DY3	28.5	16.362	0.291	0.229	0.971	10.3	3.2
Q2AY3	44.0	24.658	0.298	0.191	0.931	21.2	5.0
Q2BY3	44.0	24.858	0.295	0.189	0.935	16.1	5.0
Q2CY3	44.5	25.102	0.295	0.188	0.939	12.6	5.0
Q2DY3	44.5	25.348	0.292	0.185	0.944	10.3	5.0
Q3AY3	59.4	33.810	0.293	0.161	0.898	21.2	7.0
Q3BY3	59.4	34.166	0.290	0.158	0.903	16.1	7.0
Q3CY3	59.9	34.926	0.286	0.154	0.913	12.6	7.0
Q3DY3	59.9	35.252	0.283	0.152	0.917	10.3	7.0

ตารางที่ 4-1 รายละเอียดแบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์ (ต่อ)

กรณี	Q (l/s)	y (cm)	V (m/s)	Fr	$u^*/u_{*c}$	$s_p$ (cm)	Y (cm)
Q1AY4	29.9	15.460	0.323	0.262	0.944	21.2	6.4
Q1BY4	29.9	16.530	0.302	0.237	0.976	16.1	6.4
Q1CY4	29.9	16.122	0.310	0.246	0.964	12.6	6.4
Q1DY4	29.9	17.048	0.293	0.226	0.992	10.3	6.4
Q2AY4	43.6	25.046	0.290	0.185	0.938	21.2	10.0
Q2BY4	43.6	26.166	0.278	0.173	0.959	16.1	10.0
Q2CY4	43.6	24.382	0.298	0.193	0.926	12.6	10.0
Q2DY4	43.6	25.186	0.288	0.183	0.941	10.3	10.0
Q3AY4	58.8	34.216	0.287	0.156	0.904	21.2	14.0
Q3BY4	58.8	34.542	0.284	0.154	0.908	16.1	14.0
Q3CY4	58.8	33.572	0.292	0.161	0.895	12.6	14.0
Q3DY4	58.8	34.532	0.284	0.154	0.908	10.3	14.0
Q1AY5	29.6	15.974	0.309	0.247	0.960	21.2	40.0
Q1BY5	29.6	15.818	0.312	0.250	0.955	16.1	40.0
Q1CY5	29.2	14.056	0.347	0.295	0.900	12.6	40.0
Q1DY5	29.2	14.652	0.333	0.277	0.919	10.3	40.0
Q2AY5	44.5	24.320	0.305	0.197	0.924	21.2	40.0
Q2BY5	44.5	24.844	0.298	0.191	0.934	16.1	40.0
Q2CY5	44.5	24.388	0.304	0.196	0.926	12.6	40.0
Q2DY5	44.5	24.814	0.299	0.191	0.934	10.3	40.0
Q3AY5	58.8	34.252	0.286	0.156	0.904	21.2	40.0
Q3BY5	58.8	34.930	0.281	0.152	0.913	16.1	40.0
Q3CY5	58.3	30.998	0.313	0.180	0.860	12.6	40.0
Q3DY5	58.3	30.998	0.313	0.180	0.860	10.3	40.0

ตารางที่ 4-2 ระยะเวลาในการทดลองและผลความถี่กลุ่มกักเชื้อของแต่ละตอม่อ

กรณี	t (hr)	d <sub>s1</sub>	d <sub>s2</sub>	d <sub>s3</sub>	d <sub>s4</sub>	d <sub>s5</sub>	d <sub>s6</sub>	d <sub>s7</sub>	d <sub>s8</sub>
Q1AY1	17	3.875	2.763	3.597	3.667	3.131	-	-	-
Q1BY1	18	4.234	2.536	2.334	2.470	2.120	2.072	-	-
Q1CY1	11	4.741	2.523	1.973	1.879	1.843	1.725	1.769	-
Q1DY1	15	4.737	2.507	2.443	2.357	2.023	1.937	1.791	0.809
Q2AY1	14	4.341	2.419	2.043	2.737	2.817	-	-	-
Q2BY1	16	4.390	2.326	2.264	2.524	2.266	2.318	-	-
Q2CY1	15	5.409	2.863	2.579	2.487	2.619	1.921	1.599	-
Q2DY1	19	5.142	2.442	2.396	2.212	1.922	1.976	1.900	1.848
Q3AY1	17	4.689	2.651	3.001	2.651	2.873	-	-	-
Q3BY1	18	4.712	2.366	2.218	2.442	2.256	2.372	-	-
Q3CY1	15	5.107	2.855	2.271	2.159	2.373	2.319	2.121	-
Q3DY1	16	5.264	2.620	2.256	2.046	2.034	2.120	1.994	1.722
Q1AY2	17	6.431	-0.677	0.909	0.635	0.763	-	-	-
Q1BY2	18	6.530	-0.234	0.052	0.644	0.412	1.156	-	-
Q1CY2	11	5.757	-0.617	0.253	0.305	0.603	0.595	1.211	-
Q1DY2	15	5.487	-0.225	-0.131	0.145	0.231	0.271	0.309	0.323
Q2AY2	14	4.717	0.995	0.511	0.413	0.495	-	-	-
Q2BY2	16	4.440	-0.782	0.180	0.266	0.292	1.486	-	-
Q2CY2	15	5.549	-0.431	-0.519	0.539	0.443	0.751	2.265	-
Q2DY2	19	5.820	-0.682	-0.196	0.170	0.174	0.252	0.250	0.602
Q3AY2	17	4.941	-0.099	0.161	0.185	0.457	-	-	-
Q3BY2	18	5.304	-0.890	0.420	0.314	0.294	0.800	-	-
Q3CY2	15	5.159	-0.851	0.465	0.633	0.485	0.379	1.361	-
Q3DY2	16	5.142	-0.984	0.690	0.366	0.608	0.514	0.352	0.650
Q1AY3	16	5.945	0.533	0.865	0.761	1.001	-	-	-
Q1BY3	16	3.885	1.189	0.677	0.759	0.921	2.027	-	-
Q1CY3	16	5.867	-0.335	0.543	0.273	0.635	0.883	0.887	-
Q1DY3	16	4.357	-0.469	0.519	0.423	0.703	0.649	0.877	0.807

ตารางที่ 4-2 ระยะเวลาในการทดลองและผลความลึกหลุมกัดเซาะของแต่ละตอม่อ (ต่อ)

กรณี	t (hr)	d <sub>s1</sub>	d <sub>s2</sub>	d <sub>s3</sub>	d <sub>s4</sub>	d <sub>s5</sub>	d <sub>s6</sub>	d <sub>s7</sub>	d <sub>s8</sub>
Q2AY3	13	5.067	0.445	0.571	0.467	1.057	-	-	-
Q2BY3	13	4.645	-0.139	0.391	0.531	0.867	1.887	-	-
Q2CY3	10	5.121	-0.831	0.507	0.587	0.379	0.405	1.079	-
Q2DY3	10	4.501	-1.031	0.489	0.251	0.305	0.421	0.487	1.011
Q3AY3	16	5.476	0.780	2.918	2.880	3.826	-	-	-
Q3BY3	16	4.578	1.744	2.816	2.618	2.808	3.190	-	-
Q3CY3	13	6.175	2.749	1.261	1.987	2.719	2.357	2.945	-
Q3DY3	13	4.851	2.677	1.025	2.341	2.695	2.483	2.563	3.187
Q1AY4	18	6.402	0.732	2.326	1.910	3.076	-	-	-
Q1BY4	18	4.888	0.080	1.808	2.290	2.264	2.320	-	-
Q1CY4	19	6.199	3.803	-1.953	0.805	1.417	1.673	2.059	-
Q1DY4	19	4.133	1.239	0.941	0.957	0.675	0.179	0.229	0.019
Q2AY4	15	4.016	2.640	2.128	2.490	2.730	-	-	-
Q2BY4	15	4.018	3.126	1.738	2.128	2.454	2.732	-	-
Q2CY4	16	5.747	4.153	1.975	0.605	1.805	2.499	2.833	-
Q2DY4	16	5.739	3.043	1.191	1.281	1.779	2.555	2.637	2.649
Q3AY4	18	5.947	3.729	2.293	3.443	3.231	-	-	-
Q3BY4	18	4.629	3.061	1.929	2.141	2.857	3.335	-	-
Q3CY4	15	6.328	4.414	2.312	1.086	0.772	0.606	0.918	-
Q3DY4	15	6.460	4.462	2.160	1.238	1.012	0.832	1.890	2.106
Q1AY5	10	7.340	4.124	3.380	2.342	3.478	-	-	-
Q1BY5	10	5.762	3.870	4.078	4.410	4.048	3.522	-	-
Q1CY5	14	7.742	4.266	3.744	2.578	2.060	1.800	1.746	-
Q1DY5	14	10.228	7.354	6.058	4.722	3.460	2.130	1.482	0.858
Q2AY5	13	7.190	3.350	2.602	2.486	2.842	-	-	-
Q2BY5	13	6.432	3.326	2.302	2.204	1.800	2.628	-	-
Q2CY5	13	8.254	4.842	3.930	2.764	2.490	2.332	2.958	-
Q2DY5	13	8.222	5.162	4.908	2.150	1.250	1.704	3.080	2.586

ตารางที่ 4-2 ระยะเวลาในการทดลองและผลความลึกหลุมกัดเซาะของแต่ละตอม่อ (ต่อ)

กรณี	t (hr.)	d <sub>s1</sub>	d <sub>s2</sub>	d <sub>s3</sub>	d <sub>s4</sub>	d <sub>s5</sub>	d <sub>s6</sub>	d <sub>s7</sub>	d <sub>s8</sub>
Q3AY5	14	6.880	2.864	1.764	2.312	2.604	-	-	-
Q3BY5	14	5.300	2.586	2.666	3.036	3.046	3.256	-	-
Q3CY5	18	8.650	6.422	4.576	3.070	2.404	1.674	1.080	-
Q3DY5	18	8.800	7.026	5.242	3.048	1.344	0.420	0.352	0.210

หมายเหตุ: d<sub>si</sub> คือ ความลึกหลุมกัดเซาะรอบตอม่อต้นที่ i มีหน่วยเป็น ซม. โดยกรณีที่มีค่าติดลบ หมายถึงมีการทับถมจนเกิดเป็นเนินทรายรอบตอม่อ

## 4.2 ผลการวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติ

จากผลการทดลอง เพื่อให้สามารถนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ จากหัวข้อ 3.5 จึงได้ทำการวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติ (dimensionless analysis) สามารถสร้างฟังก์ชันตัวแปรที่สัมพันธ์กับความลึกหลุมกัดเซาะในรูปตัวแปรไร้มิติได้ดังสมการนี้

$$\frac{d_s}{y} = \phi \left( Fr, \frac{b_p}{y}, \frac{s_p}{y}, \frac{Y}{y} \right) \quad (4-1)$$

ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลการทดลองนี้ จะนำตัวแปรความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล (d<sub>s</sub>/y) มาวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระทั้ง 4 ตัวแปร ได้แก่ ค่าฟรูดนัมเบอร์ (Fr) ค่าขนาดความกว้างของเสาที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล (b<sub>p</sub>/y) ค่าระยะห่างระหว่างเสาที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล (s<sub>p</sub>/y) และค่าระดับผิวส่วนบนของคานขวางที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล (Y/y)

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า โดยส่วนใหญ่แล้วการคำนวณหาค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดจะใช้สมการ HEC-18 (Arneson et al., 2012) แสดงดังสมการที่ 4-2

$$\frac{d_s}{y} = 2.0K_1K_2K_3 \left( \frac{b_p}{y} \right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (4-2)$$

โดย K<sub>1</sub> = ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของรูปแบบของตอม่อ  
 K<sub>2</sub> = ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของมุมปะทะการไหล  
 K<sub>3</sub> = ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของเงื่อนไขท้องน้ำ

สำหรับค่า K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> และ K<sub>3</sub> ในการทดลองนี้มีค่า 1.1, 1.0 และ 1.1 ตามลำดับ

เพื่อให้สมการที่ได้จากการทดลองนี้มีความสมบูรณ์มากที่สุด จึงได้ทำการออกแบบรูปแบบสมการให้มีความคล้ายกับสมการ HEC-18 โดยเพิ่มตัวแปร Y/y และ s<sub>p</sub>/y เข้าไป ดังนี้

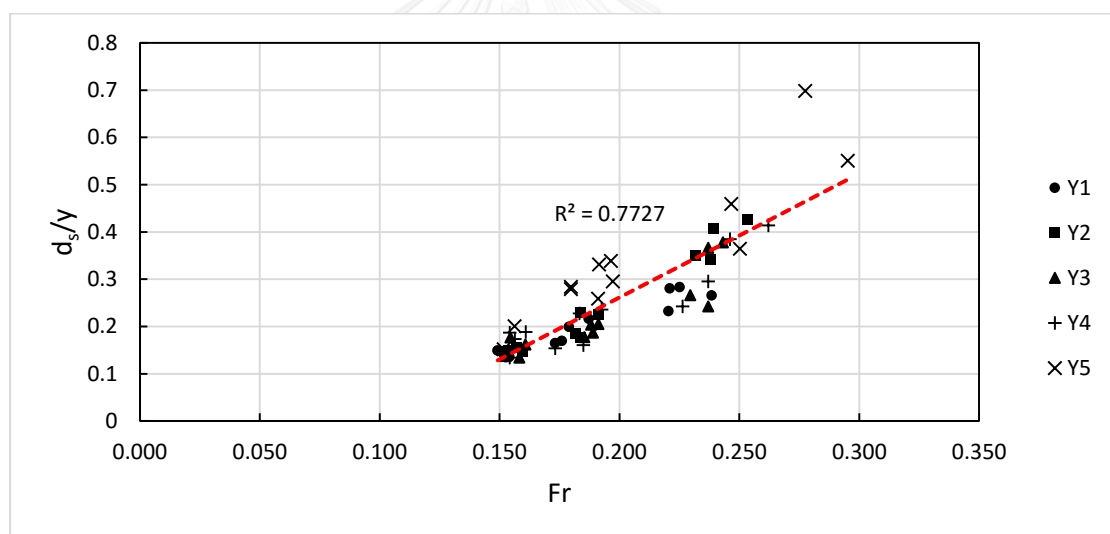
$$\frac{d_s}{y} = 2.0K_1K_2K_3K_4\left(\frac{Y}{y}\right)^m\left(\frac{s_p}{y}\right)^n\left(\frac{b_p}{y}\right)^{0.65}Fr^{0.43} \quad (4-3)$$

โดยค่า  $K_4$ ,  $m$  และ  $n$  เป็นค่าเลขยกกำลังที่ต้องการคำนวณด้วยวิธีการถดถอยแบบกำลังน้อยที่สุด (least square regression analysis) ในขั้นตอนต่อไป

#### 4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด

##### 4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างฟรูดนัมเบอร์กับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล

จากผลการทดลองพบว่า กรณีการทดลอง Q1 เป็นกรณีที่มีค่า  $Fr$  มากที่สุด รองลงมาคือกรณี Q2 และ Q3 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำค่า  $Fr$  ในแต่ละกรณี พล็อตกราฟเทียบกับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด แสดงดังรูปที่ 4-1

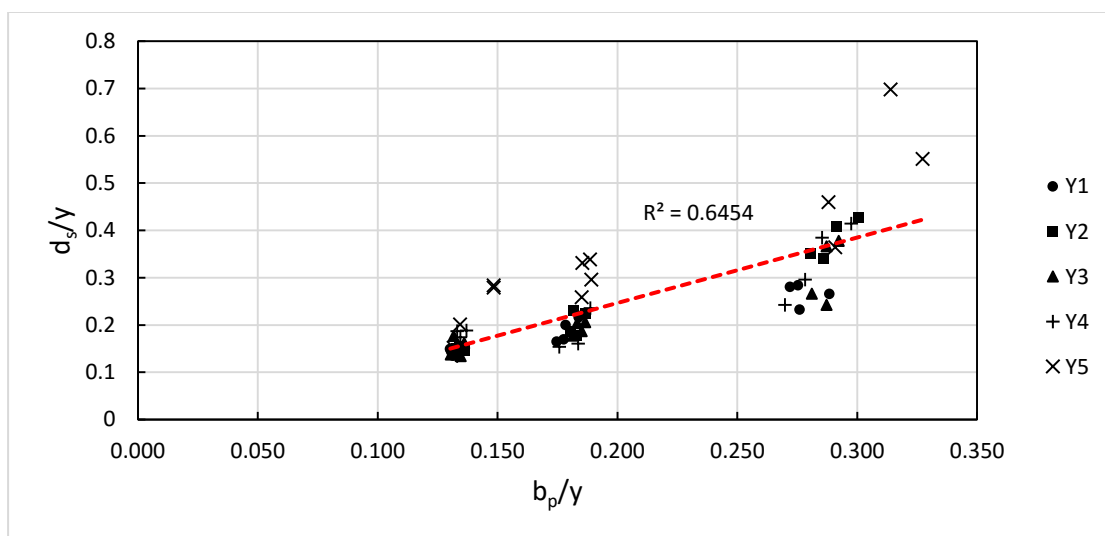


รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพันธ์ กับ ฟรูดนัมเบอร์

จากรูปที่ 4-1 จะเห็นได้ว่า เมื่อค่า  $Fr$  เพิ่มขึ้น  $d_s/y$  มีการเพิ่มขึ้นตามไปด้วย มีความสัมพันธ์กันตามที่ได้ทำการวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติในข้างต้น และสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมาซึ่งพบว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดแปรผันตามฟรูดนัมเบอร์ (Melville and Raudkivi, 1977, Jain and Fischer, 1979, Chiew and Melville, 1987)

#### 4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างเสาที่สัมพันธ์กับความลึกการไหลกับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล

ค่าของความกว้างเสาที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล เมื่อนำมาพล็อตกราฟเทียบกับ ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง แสดงได้ดังรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพันธ์ กับ ความกว้างเสาสัมพันธ์

จากรูปที่ 4-2 จะเห็นได้ว่า เมื่อค่า  $b_p/y$  เพิ่มขึ้น  $d_s/y$  มีการเพิ่มขึ้นตามไปด้วย มีความสัมพันธ์กันตามที่ได้ทำการวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติในช่วงต้น และสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมาซึ่งพบว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดแปรผันตามขนาดตอม่อ (Arneson et al., 2012)

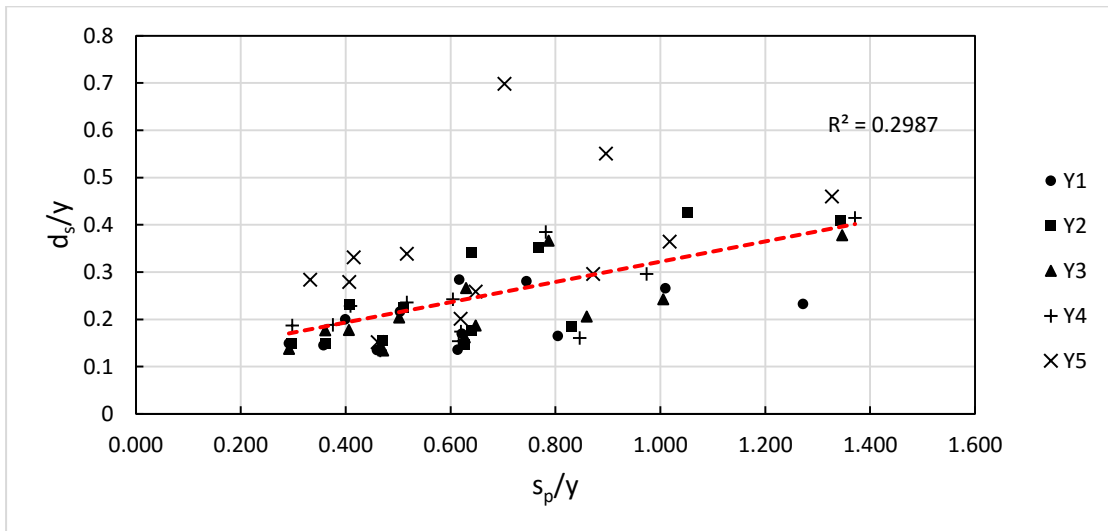
#### 4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างเสาที่สัมพันธ์กับความลึกการไหลกับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล

ค่าของระยะห่างระหว่างเสาที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล ( $s_p/y$ ) เมื่อนำมาพล็อตกราฟเทียบกับ ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล ( $d_s/y$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4-3

จากรูปที่ 4-3 จะเห็นได้ว่า เมื่อนำข้อมูลผลการทดลองในส่วนของระยะห่างระหว่างเสาทั้งหมดโดยไม่แบ่งแยกตามอัตราการไหลและระดับคานขวาง พบว่าเมื่อ  $s_p/y$  ที่ค่ามากเพิ่มขึ้น ค่าของ  $d_s/y$  เพิ่มขึ้นตาม แต่ยังไม่ชัดเจน และขัดแย้งกับผลการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา (Ataie-Ashtiani and Beheshti, 2006) และเนื่องจากค่า  $R^2$  มีค่าเท่ากับ 0.30 ซึ่งถือว่ามีค่าน้อย นั่นแสดงว่าความสัมพันธ์นี้ไม่สอดคล้องกับความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งอาจเป็นเพราะด้วยข้อมูลการทดลองทั้งหมดยังไม่สามารถ

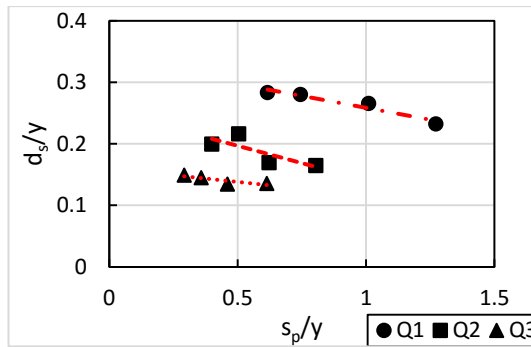


อธิบายได้ หรืออาจมีปัจจัยของพрудนัมเบอร์หรือระดับคานขวางเข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อให้เห็นผลที่ชัดเจนขึ้น จึงนำค่า  $s_p/y$  มาพล็อตกราฟเทียบกับ  $d_s/y$  โดยแยกตามระดับคานขวางในแต่ละกรณี แสดงดังรูปที่ 4-4

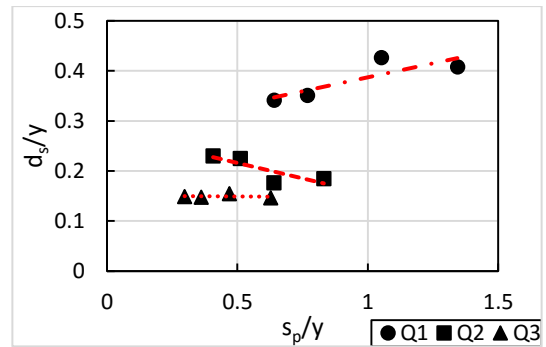


รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพันธ์ กับ ระยะห่างต่อม่อสัมพันธ์

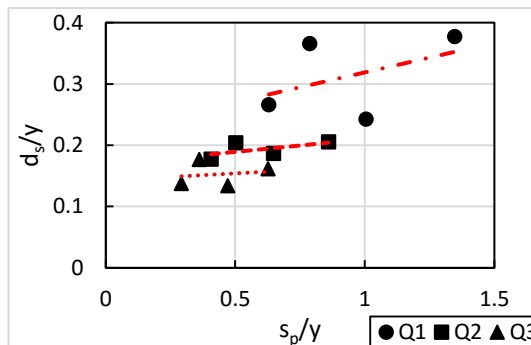
- กรณีระดับคานขวาง Y1 จากรูปที่ 4-4 (ก) จะเห็นได้ว่า ที่ระดับคานขวาง Y1 เมื่อระยะห่างระหว่างเสามีค่ามากขึ้น ความลึกหลุมกัดเซาะมีแนวโน้มค่อยๆ ลดลง ซึ่งมีความแตกต่างที่น้อยมาจนไม่มีนัยสำคัญ แต่จะเห็นความแตกต่างที่มากขึ้นเมื่ออัตราการไหลมีค่าน้อย ซึ่งอาจสรุปได้ว่า ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างเสาในกรณีที่ระดับผิวส่วนบนของคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำ
- กรณีระดับคานขวาง Y2 จากรูปที่ 4-4 (ข) จะเห็นได้ว่า เมื่อระยะห่างระหว่างเสาเพิ่มมากขึ้น ความลึกหลุมกัดเซาะมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่แน่นอน มีทั้งการเพิ่มขึ้นในกรณีอัตราการไหล Q1 และ Q3 และลดลงในกรณีอัตราการไหล Q2 จึงอาจสรุปได้ว่า ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดไม่มีความสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างเสาในกรณีที่ระดับผิวส่วนล่างของคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำ
- กรณีระดับคานขวาง Y3 จากรูปที่ 4-4 (ค) จะเห็นได้ว่า เมื่อระยะห่างระหว่างเสาเพิ่มขึ้น ความลึกหลุมกัดเซาะมีการเพิ่มขึ้นตามทั้ง 3 กรณีอัตราการไหล โดยที่อัตราการไหล Q1 มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด จึงอาจสรุปได้ว่า ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดแปรผันตามค่าระยะห่างระหว่างเสาในกรณีที่ระดับผิวส่วนบนของคานขวางเท่ากับ 0.2 ของระดับน้ำ



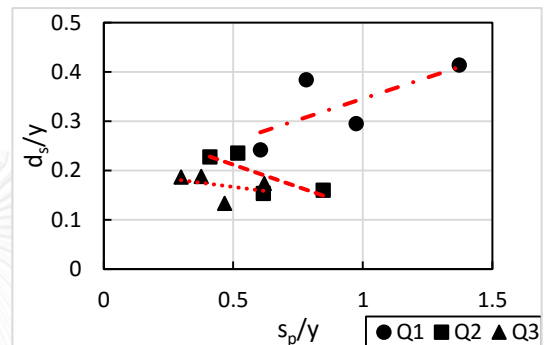
(ก) ระดับคานขวาง Y1



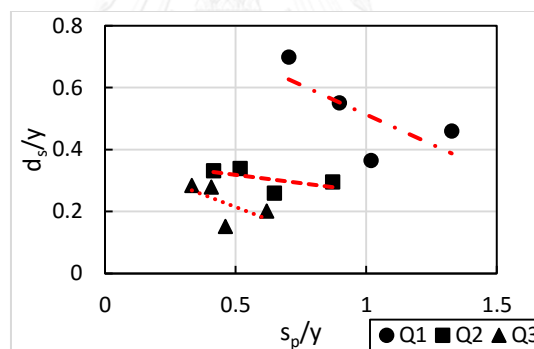
(ข) ระดับคานขวาง Y2



(ค) ระดับคานขวาง Y3



(ง) ระดับคานขวาง Y4



(จ) ระดับคานขวาง Y5

รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพัทธ์ กับ ระยะห่างเสาสัมพัทธ์ ในแต่ละกรณีของระดับคานขวาง

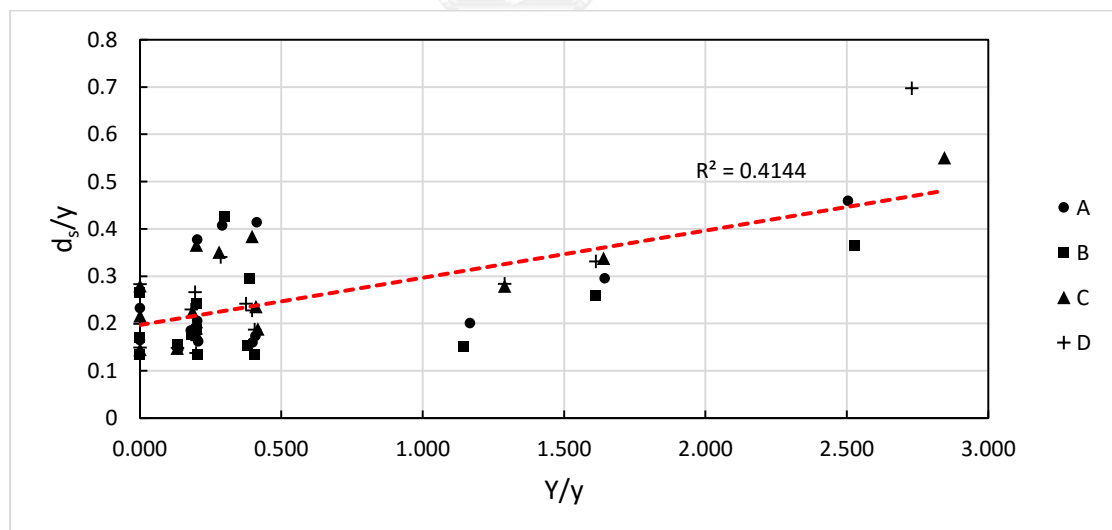
- กรณีระดับคานขวาง Y4 จากรูปที่ 4-4 (ง) จะเห็นได้ถึงความสัมพันธ์ที่เหมือนในกรณี Y2 นั่นคือ เมื่อระยะห่างระหว่างเสาเพิ่มขึ้น ความลึกหลุมกัดเซาะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งขึ้นและลง ซึ่งไม่สามารถหาความสัมพันธ์กันได้เนื่องจากไม่สามารถวิเคราะห์ได้ จึงอาจสรุปได้ว่า ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดไม่มีความสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างเสาในกรณีที่ระดับผิวส่วนบนของคานขวางเท่ากับ 0.4 ของระดับน้ำ

- กรณีระดับคานขวาง Y5 จากรูปที่ 4-4 (จ) จะเห็นได้ว่า ทุกกรณีอัตราการไหล เมื่อระยะห่างระหว่างเสาเพิ่มขึ้น ความลึกหลุมกัดเซาะมีค่าลดลง จึงอาจสรุปได้ว่า ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างเสาในกรณีที่ระดับคานขวางอยู่สูงกว่าระดับน้ำ

จากความสัมพันธ์ทั้ง 5 กรณีดังกล่าว จะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างเสากับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดมีความสัมพันธ์ที่ไม่แน่นอน ไม่สามารถหาความสัมพันธ์กันได้ ซึ่งอาจเป็นเพราะจำนวนและขอบเขตการทดลองยังไม่เพียงพอที่จะวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ จึงกำหนดให้เป็นขอบเขตของการศึกษาครั้งนี้ นั่นคือ ในกรณีการศึกษาถึงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างเสาของสะพานแบบ Pile Bent ที่มีอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเสาต่อความกว้างเสา ( $s_p/b_p$ ) เท่ากับ 4.6 3.5 2.7 และ 2.2 โดยมีอิทธิพลของระดับคานขวางและฟรุคตัมเบอร์ร่วมด้วย ยังสังเกตความสัมพันธ์จากการเปรียบเทียบไม่ได้

#### 4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับผิวส่วนบนของคานขวางที่สัมพันธ์กับความลึกการไหลกับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล

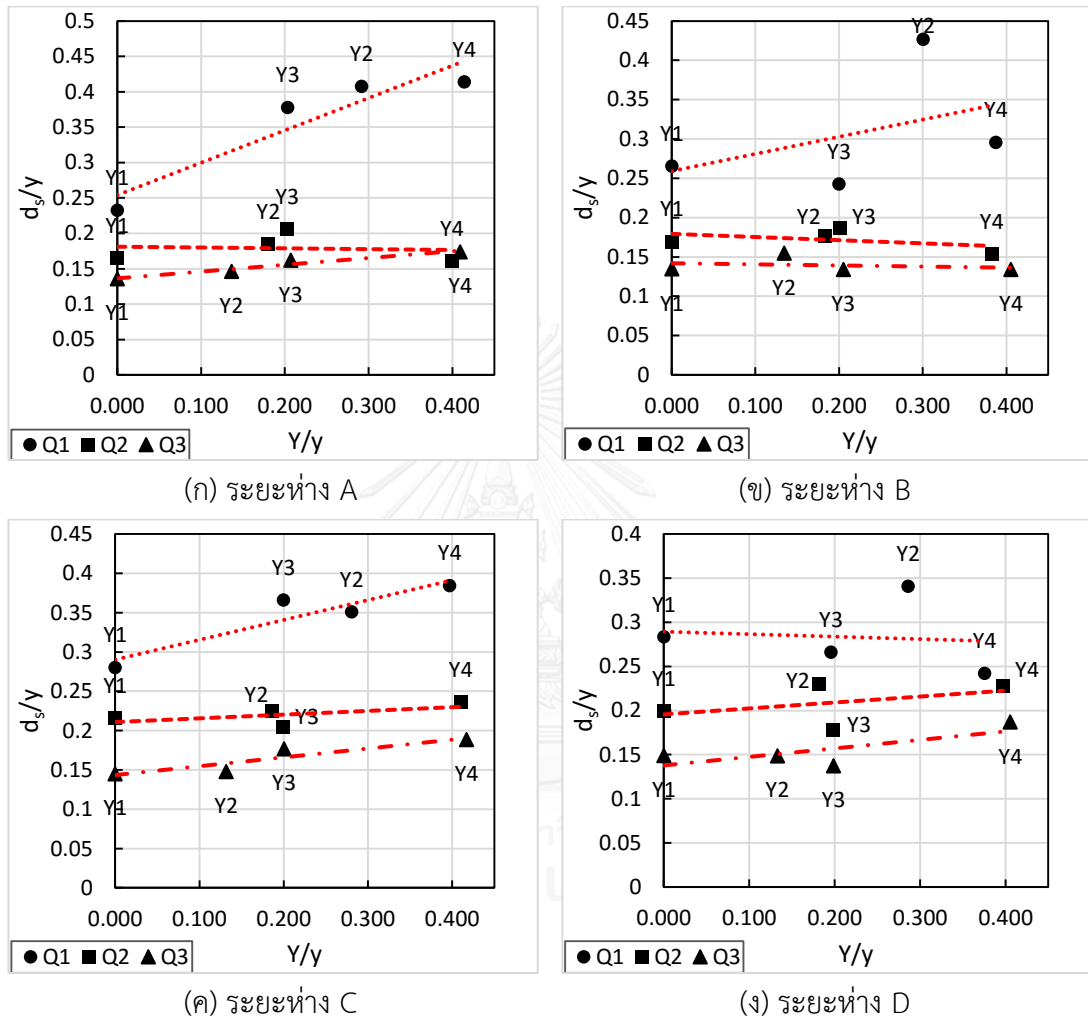
ค่าของระดับของผิวส่วนบนของคานขวางที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล เมื่อนำมาพล็อตกราฟเทียบกับ ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล แสดงได้ดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพันธ์ กับ ระดับคานขวางสัมพันธ์

จากรูปที่ 4-5 จะเห็นได้ว่า ค่าระดับคานขวางที่สัมพันธ์กับความลึกการไหลไม่มีความสัมพันธ์กับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล แต่ยังไม่สามารถบอกว่าการผลของระดับคานขวางนั้นส่งผลต่อความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดหรือไม่ เนื่องจากยังมีอิทธิพลของฟรุคตัมเบอร์และระยะห่างระหว่างเสาด้วยอยู่ ดังนั้นในเพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ที่ชัดเจนขึ้น จึงแยกวิเคราะห์ตาม

กลุ่มที่มีระยะห่างที่เท่ากัน โดยเลือกตัดผลการทดลองสำหรับกรณีในระดับคานขวางอยู่สูงกว่าระดับน้ำออก เพราะระดับคานขวางไม่มีส่วนในการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมกรรไกร โดยสามารถนำมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 4-6



รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพัทธ์ กับ ระดับคานขวางสัมพัทธ์ ในแต่ละกรณีของระยะห่างระหว่างเสา

- กรณีระยะห่าง A จากรูปที่ 4-6 (ก) จะเห็นได้ว่า ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของค่าระดับคานขวาง ถึงแม้ในกรณีอัตราการไหล Q1 ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อเทียบกันระหว่างกรณี Y1 กับ Y2 แต่เมื่อเทียบกันระหว่างกรณี Y2 Y3 และ Y4 ก็ จะเห็นได้ว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมี

นัยสำคัญเช่นกัน ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า ระดับของคานขวางไม่มีความสัมพันธ์กับค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดในกรณีระยะห่าง A

- กรณีระยะห่าง B จากรูปที่ 4-6 (ข) จะเห็นได้ว่า ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของค่าระดับคานขวาง ถึงแม้ในกรณีอัตราการไหล Q1 ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในกรณี Y3 ที่มีค่าสูงกว่าปกติเมื่อเทียบกับในกรณี Y1 Y2 และ Y4 ที่ไม่เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อกัน ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า ระดับของคานขวางไม่มีความสัมพันธ์กับค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดในกรณีระยะห่าง B
- กรณีระยะห่าง C จากรูปที่ 4-6 (ค) จะเห็นได้ว่า เมื่อค่าระดับคานขวาง  $Y/y$  เพิ่มขึ้น ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด  $d_s/y$  มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ยังไม่สามารถยืนยันได้ถึงความสัมพันธ์ เนื่องจากยังมีจุดที่กราฟมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นและลงที่ตำแหน่ง Y2 และ Y3 ในกรณีอัตราการไหล Q1 และ Q2 ในขณะที่กรณีอัตราการไหล Q3 ก็ไม่เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า ระดับของคานขวางไม่มีความสัมพันธ์กับค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดในกรณีระยะห่าง C
- กรณีระยะห่าง D จากรูปที่ 4-6 (ง) จะเห็นได้ว่า ค่าของความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด  $d_s/y$  มีการเปลี่ยนแปลงที่สับสนไม่แน่นอนเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของระดับคานขวาง  $Y/y$  ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า ระดับของคานขวางไม่มีความสัมพันธ์กับค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดในกรณีระยะห่าง D

จากความสัมพันธ์ทั้ง 4 กรณีดังกล่าว จะเห็นได้ว่าระดับคานขวางกับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดมีความสัมพันธ์ที่ไม่แน่นอน ไม่สามารถหาความสัมพันธ์กันได้ ซึ่งอาจเป็นเพราะจำนวนและขอบเขตการทดลองยังไม่เพียงพอที่จะวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ จึงกำหนดให้เป็นขอบเขตของการศึกษาครั้งนี้ นั่นคือ ในกรณีการศึกษาถึงอิทธิพลของระดับคานขวางของสะพานแบบ Pile Bent ที่มีอัตราส่วนระดับคานขวางต่อความลึกการไหลอยู่ในช่วง 0.0 – 0.4 โดยมีอิทธิพลของระยะห่างระหว่างตอม่อและพрудันัมเบอร์ร่วมด้วย ยังสังเกตความสัมพันธ์จากการเปรียบเทียบไม่ได้

#### 4.4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติ

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติในหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล ( $d_s/y$ ) มีความสัมพันธ์ที่ดีกับค่าพрудันัมเบอร์ ( $Fr$ ) และขนาดเสาที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล ( $b_p/y$ ) แต่ยังคงมีความสัมพันธ์ที่ไม่ชัดเจนกับระยะห่างเสาที่

สัมพันธ์กับความลึกการไหล ( $s_p/y$ ) และระดับคานขวางที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล ( $Y/y$ ) ดังนั้นการวิเคราะห์การถดถอยแบบกำลังน้อยที่สุด (least square regression analysis) ถูกนำมาในการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไว้มิติตามสมการที่ 4-1 เพื่อตรวจสอบและยืนยันความสัมพันธ์หรือไม่สัมพันธ์ของตัวแปร รวมทั้งใช้ในการออกแบบสมการสำหรับประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด

ในการทดลองนี้ต้องการหาอิทธิพลของระดับคานขวางที่มีต่อหลุมกัดเซาะ โดยสามารถแบ่งระดับของคานขวางเป็น 4 ระดับหลักๆ ได้แก่ 1) ระดับที่คานขวางอยู่สูงกว่าระดับน้ำซึ่งเป็นกรณีที่คานขวางไม่มีส่งผลต่อพฤติกรรมการไหล 2) ระดับที่คานขวางจมอยู่ใต้พื้นท้องน้ำ เป็นกรณีที่คานขวางไม่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการไหล แต่อาจมีผลต่อการลดหรือเพิ่มกลไกการกัดเซาะ 3) ระดับที่ไม่มีการไหลลอดใต้คานขวาง และ 4) ระดับคานขวางอยู่กลางความลึกน้ำโดยมีการไหลลอดคานขวาง ดังนั้นเพื่อให้เห็นอิทธิพลของความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในเชิงปริมาณที่ชัดเจนขึ้น จึงแบ่งการพิจารณาตามระดับคานขวางออกเป็น 4 กรณี ดังนี้

#### 4.4.1 กรณีที่ระดับคานขวางสูงกว่าระดับน้ำ ( $Y5$ )

ในกรณีที่ระดับคานขวางอยู่สูงกว่าระดับน้ำ ( $Y5$ ) เป็นกรณีที่ความลึกหลุมกัดเซาะมีอิทธิพลจากฟรูดนัมเบอร์ ขนาดเสา และระยะห่างระหว่างเสาเท่านั้น ดังนั้น จากสมการที่ 4-3 สามารถลดรูปสมการโดยตัดตัวแปรระดับคานขวาง  $Y/y$  แล้วนำมาวิเคราะห์การถดถอยด้วยข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จะได้

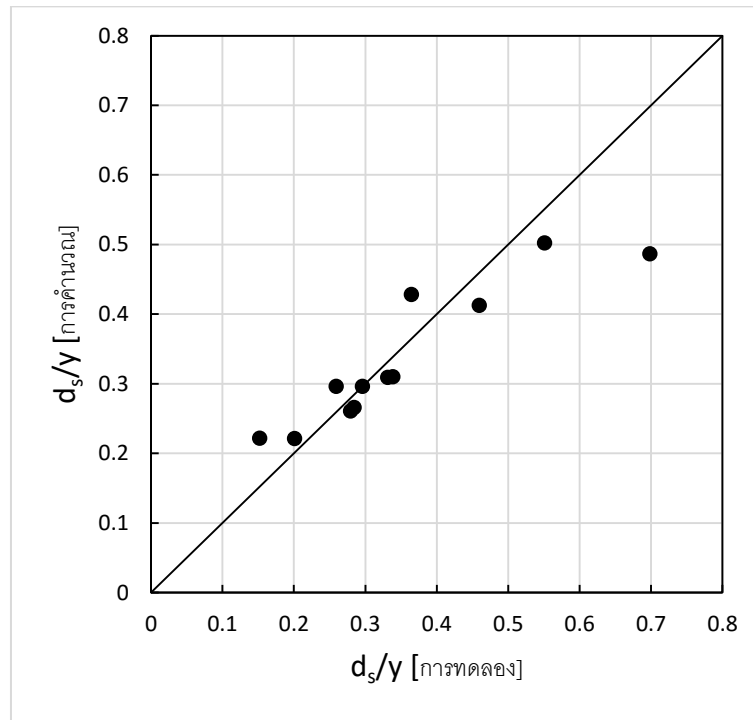
$$\frac{d_s}{y} = 1.74 \cdot \left( \frac{s_p}{y} \right)^{-0.09} \left( \frac{b_p}{y} \right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (4-4)$$

เมื่อ  $Y/y > 1$  และ  $2.2 \leq s_p/b_p \leq 4.6$

จากสมการที่ 4-4 จะได้ว่า ค่า  $K_4 = 0.72$  และ  $n = -0.09$  เมื่อพิจารณาเครื่องหมายของเลขยกกำลัง ( $n$ ) จะเห็นได้ว่ามีค่าเป็นลบซึ่งหมายถึงการแปรผกผันกันระหว่างระยะห่างเสากับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด แต่ค่าเลขยกกำลังมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ นั่นหมายถึงการมีความสัมพันธ์ที่ไม่ดีต่อกันระหว่างระยะห่างเสากับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด สอดคล้องกับผลการศึกษาในหัวข้อที่ 4.3.3

เมื่อนำค่า  $d_s/y$  ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4-4 แสดงดังรูปที่ 4-7 ผลจากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า ข้อมูลมีการเกาะตามแนวเส้น  $45^\circ$  ซึ่งเป็นเส้นที่แสดงถึงการเท่ากันระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ หรือมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination,  $R^2$ ) เท่ากับ 1 และผลจากการเปรียบเทียบพบว่า ข้อมูลมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.85 ซึ่งมีค่าสูงพอที่จะอนุมานได้ว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4-4 และค่าที่ได้จากการทดลอง มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงต่อกันสำหรับกรณี

คานขวางสูงกว่าระดับน้ำได้โดยที่ค่าระยะห่างระหว่างเสาที่สัมพันธ์กับขนาดเสามีค่าอยู่ระหว่าง 2.2 – 4.6 เนื่องจากการที่ยังไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดกับระยะห่างระหว่างเสาได้ จึงกำหนดให้ใช้ขอบเขตข้างต้นสำหรับสมการที่ 4-3



รูปที่ 4-7 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพันธ์ จากการคำนวณและจากการทดลอง กรณีระดับคานขวางอยู่สูงกว่าระดับน้ำ

#### 4.4.2 กรณีที่ระดับคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำ (Y1)

ในกรณีนี้ระดับส่วนบนของคานขวางมีค่าเท่ากับท้องน้ำ ทำให้ค่าระดับคานขวางที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล ( $Y/y$ ) เท่ากับ 0 ในทุกกรณีอัตราการไหล ในการวิเคราะห์การถดถอยจึงไม่นำค่า  $Y/y$  มาใช้ในการวิเคราะห์เพราะค่าดังกล่าวเป็นค่าคงที่ จึงตัดตัวแปรระดับคานขวางออก รูปแบบของสมการที่ได้จึงมีตัวแปรที่คล้ายกับสมการที่ 4-4 แต่เนื่องจากคานขวางจะสัมผัสกับน้ำเมื่อเกิดหลุมกัดเซาะขึ้น จึงมีความเป็นไปได้ที่อาจมีอิทธิพลต่อสภาพการไหลซึ่งส่งผลต่อกลไกการกัดเซาะ จึงแยกการวิเคราะห์ออกจากกรณีที่ระดับคานขวางสูงกว่าระดับน้ำ ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์การถดถอยด้วยข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จะได้

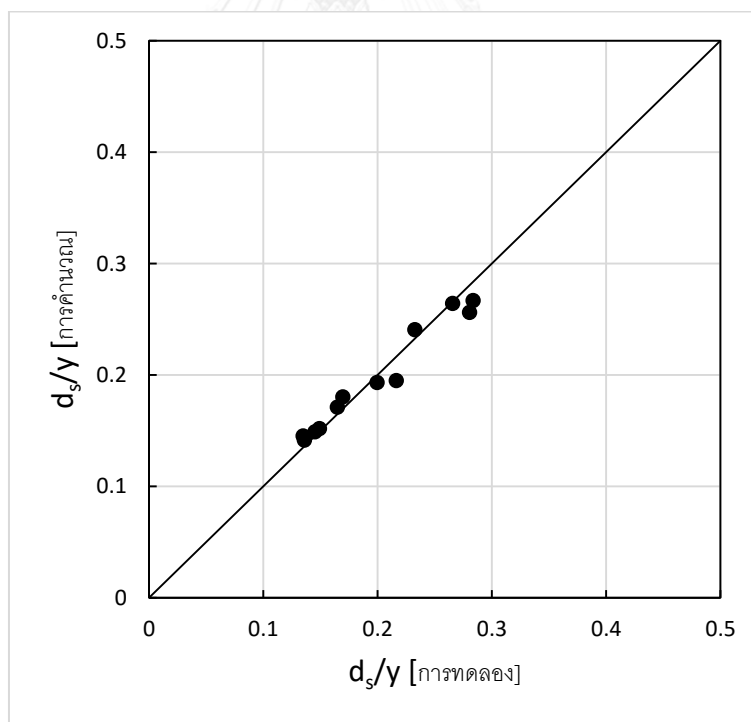
$$\frac{d_s}{y} = 1.09 \cdot \left( \frac{s_p}{y} \right)^{-0.13} \left( \frac{b_p}{y} \right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (4-5)$$

เมื่อ  $Y/y = 0$  และ  $2.2 \leq s_p/b_p \leq 4.6$

จากสมการที่ 4-5 จะได้ว่า ค่า  $K_d = 0.45$  และ  $n = -0.13$  จะเห็นได้ว่า ค่าเลขยกกำลัง ( $n$ ) มีค่าใกล้เคียงกันกับสมการที่ 4-4 แต่ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ ( $K_d$ ) มีค่าน้อยลง สอดคล้องกับค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่ลดลงจากกรณีที่ระดับคานขวางอยู่สูงกว่าระดับน้ำ ซึ่งอาจเกิดจากอิทธิพลของระดับคานขวางเป็นตัวลดกลไกการกัดเซาะ

อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่า ค่าเลขยกกำลังมีค่าน้อยมาก ซึ่งหมายถึงการมีความสัมพันธ์ที่ไม่ดีต่อกันระหว่างระยะห่างเสากับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด สอดคล้องกับผลการศึกษาในหัวข้อที่ 4.3.4

เมื่อนำค่า  $d_s/y$  ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4-5 แสดงดังรูปที่ 4-8 ผลจากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า ข้อมูลเกาะอยู่ตามแนวเส้น  $45^\circ$  โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.96 ซึ่งมีค่าสูงพอที่จะอนุมานได้ว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4-4 และค่าที่ได้จากการทดลอง มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงต่อกันสำหรับกรณีในส่วนบนของคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำได้โดยที่ค่าระยะห่างระหว่างเสาที่สัมพันธ์กับขนาดเสามีค่าอยู่ระหว่าง 2.2 – 4.6 เนื่องจากการที่ยังไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดกับระยะห่างระหว่างเสาได้ จึงกำหนดให้ใช้ขอบเขตข้างต้นสำหรับสมการที่ 4-5



รูปที่ 4-8 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพันธ์ จากการคำนวณและจากการทดลอง กรณีระดับคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำ



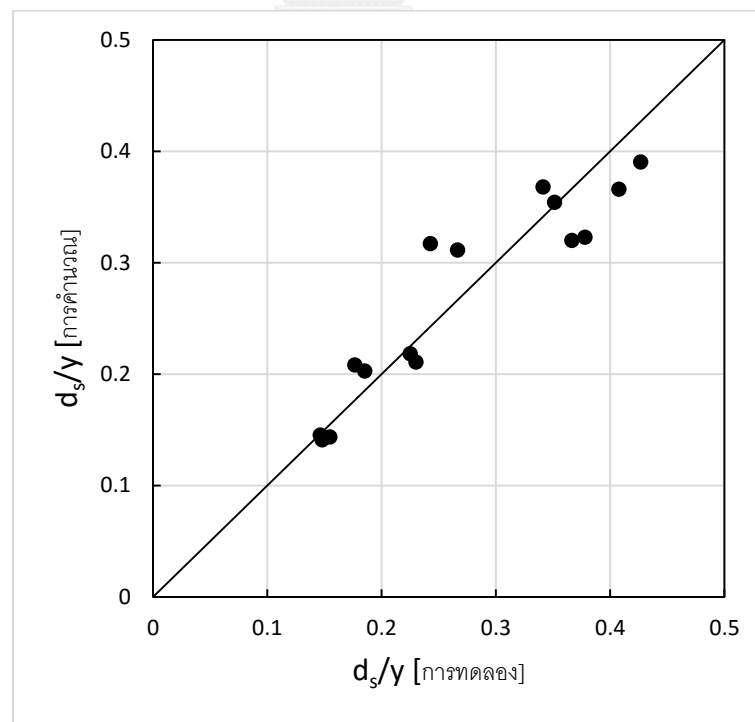
#### 4.4.3 กรณีที่ระดับคานขวางมีค่าอยู่ในช่วงของความลึกน้ำโดยไม่มีช่องว่างระหว่างคานขวางกับท้องน้ำ (Y2 ทุกอัตราการไหล และ Y3 ในกรณีอัตราการไหล Q1)

ในกรณีนี้เป็นกรณีที่คานขวางอยู่ในน้ำโดยวางอยู่บนท้องน้ำหรือฝังอยู่ในดินท้องน้ำบางส่วน โดยเป็นกรณีที่ไม่มีกรไหลลอดใต้คานขวางจึงทำการแยกประเด็นในการพิจารณาเกี่ยวกับกรณีที่คานขวางลอยอยู่ในน้ำเหนือพื้นท้องน้ำ และจะได้ว่าตัวแปรทุกตัวจากสมการที่ 4-3 ส่งผลต่อสภาพการไหล ดังนั้นจึงนำข้อมูลของตัวแปรทุกตัว มาวิเคราะห์การถดถอย ได้ผลดังสมการที่ 4-6

$$\frac{d_s}{y} = 2.42 \cdot \left(\frac{Y}{y}\right)^{0.37} \left(\frac{s_p}{y}\right)^{-0.04} \left(\frac{b_p}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (4-6)$$

เมื่อ  $0 < Y/y \leq 0.2$  โดยไม่มีช่องว่างระหว่างใต้คานขวางกับท้องน้ำ และ  $2.2 \leq s_p/b_p \leq 4.6$  จากสมการที่ 4-6 จะได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการ  $K_4 = 1.0$  และมีค่าเลขยกกำลัง  $m = 0.37$  และ  $n = -0.04$

เมื่อนำค่า  $d_s/y$  ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4-6 แสดงดังรูปที่ 4-9 ผลจากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า ข้อมูลเกาะกลุ่มอยู่ตามแนวเส้น  $45^\circ$  โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.88 ซึ่งมีค่าสูงพอที่จะอนุมานว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่ได้จากการคำนวณและการทดลองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง



รูปที่ 4-9 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพันธ์ จากการคำนวณและจากการทดลอง กรณีระดับคานขวางอยู่ติดท้องน้ำ

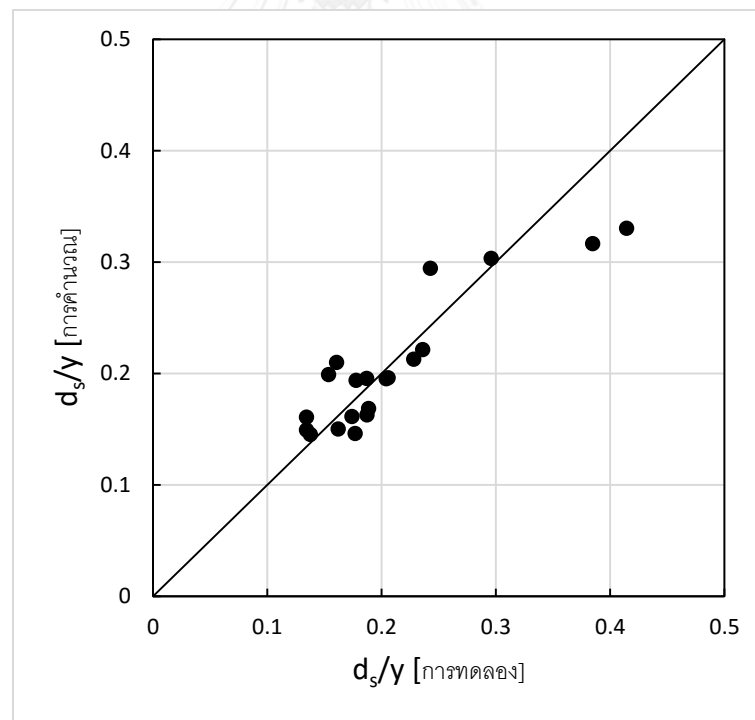
#### 4.4.4 กรณีที่ระดับคานขวางมีค่าอยู่ในช่วงของความลึกน้ำโดยมีช่องว่างระหว่างคานขวางกับท้องน้ำ (Y3 ในกรณีอัตราการไหล Q2-3 และ Y4 ทุกอัตราการไหล)

กรณีนี้เป็นกรณีที่คานขวางอยู่ในน้ำโดยมีการไหลลอดใต้คานขวาง สามารถวิเคราะห์การถดถอย ได้ผลดังสมการที่ 4-7

$$\frac{d_s}{y} = 1.48 \cdot \left(\frac{Y}{y}\right)^{0.14} \left(\frac{s_p}{y}\right)^{-0.03} \left(\frac{b_p}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (4-7)$$

เมื่อ  $0.2 \leq Y/y \leq 0.4$  โดยมีช่องว่างระหว่างใต้คานขวางกับท้องน้ำ และ  $2.2 \leq s_p/b_p \leq 4.6$  จากสมการที่ 4-7 จะได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการ  $K_4 = 0.61$  และมีค่าเลขยกกำลัง  $m = 0.14$  และ  $n = -0.03$

เมื่อนำค่า  $d_s/y$  ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4-7 แสดงดังรูปที่ 4-10 ผลจากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า ข้อมูลเกาะกลุ่มอยู่ตามแนวเส้น  $45^\circ$  โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.81 ซึ่งมีค่าสูงพอที่จะอนุมานว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่ได้จากการคำนวณและการทดลองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง



รูปที่ 4-10 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสัมพัทธ์ จากการคำนวณและจากการทดลอง กรณีระดับคานขวางอยู่กลางความลึกน้ำ

จากประเด็นที่พิจารณาข้างต้นทั้ง 4 หัวข้อที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่า ค่าเลขยกกำลัง  $m$  ของตัวแปรระดับคานขวางมีค่าเป็นบวก หมายถึงความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดมีการแปรผันตามระดับคานขวาง และค่าเลขยกกำลัง  $n$  ของตัวแปรระยะห่างระหว่างเสามีค่าเป็นลบ หมายถึงความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างเสา

แต่ค่าทั้ง 2 มีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ ซึ่งทำให้ผลการคำนวณหลังจากการยกกำลังมีค่าเข้าใกล้ 1 (ยกเว้นในกรณีระดับคานขวางมีค่าอยู่ในช่วงของความลึกน้ำโดยไม่มีช่องว่างระหว่างคานขวางกับท้องน้ำ) จึงสามารถอธิบายได้ว่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์และความกว้างเสาเป็นหลัก โดยตัวแปรของระยะห่างระหว่างเสาและระดับคานขวางส่งผลค่อนข้างน้อย

สำหรับค่าตัวแปรต่างๆ ในสมการที่ 4-3 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 สรุปค่าตัวแปรสมการความสัมพันธ์

กรณี	$K_4$	$m$	$n$	$R^2$
Y5	0.72	-	-0.09	0.85
Y1	0.45	-	-0.13	0.96
Y2 และ Q1Y3	1.0	0.37	-0.04	0.88
Q2Y3, Q3Y3 และ Y4	0.61	0.14	-0.03	0.81

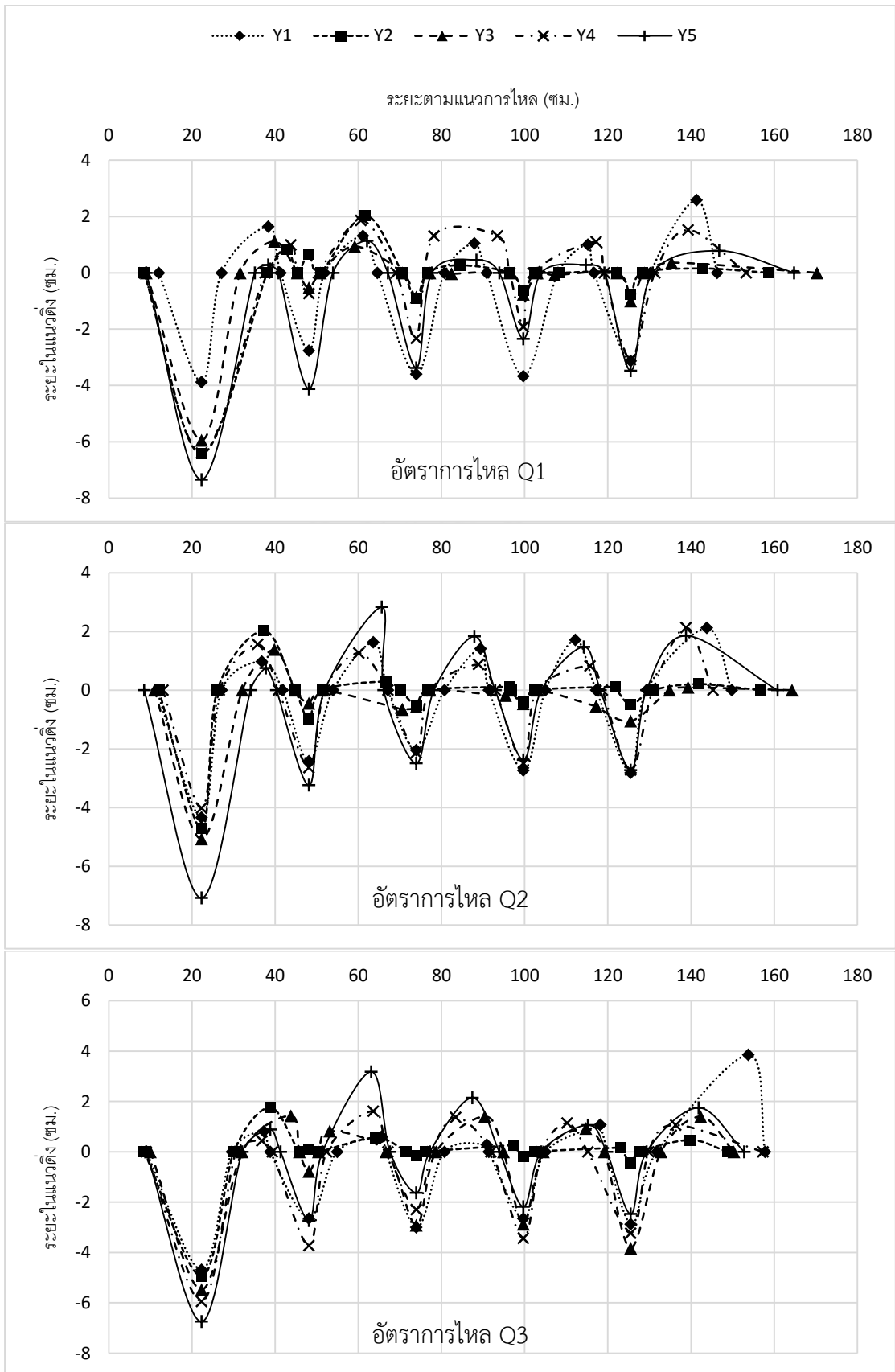
#### 4.5 การวิเคราะห์อิทธิพลของระดับคานขวางต่อความลึกหลุมกัดเซาะอื่นๆ ในกลุ่มตอม่อ

จากผลการทดลองของการศึกษาครั้งนี้พบว่า อิทธิพลของระดับคานขวางส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความลึกหลุมกัดเซาะรอบตอม่อต้นถัดจากตอม่อต้นแรกอย่างเห็นได้ชัด เพื่อให้สามารถเห็นถึงอิทธิพลของระดับคานขวางรวมทั้งระยะห่างระหว่างเสาที่มีต่อความลึกหลุมกัดเซาะหลุมอื่นๆ จึงได้นำผลการทดลอง มาสร้างรูปภาพเพื่อให้ได้เห็นอย่างชัดเจนในการแสดงว่าอิทธิพลของระดับคานขวางต่อหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพานแบบ Pile Bent นั้นมีอยู่จริง ซึ่งจะพิจารณาแบ่งกลุ่มตามอัตราการไหลและระยะห่างระหว่างเสา เพื่อให้สามารถมองภาพได้ง่ายขึ้น

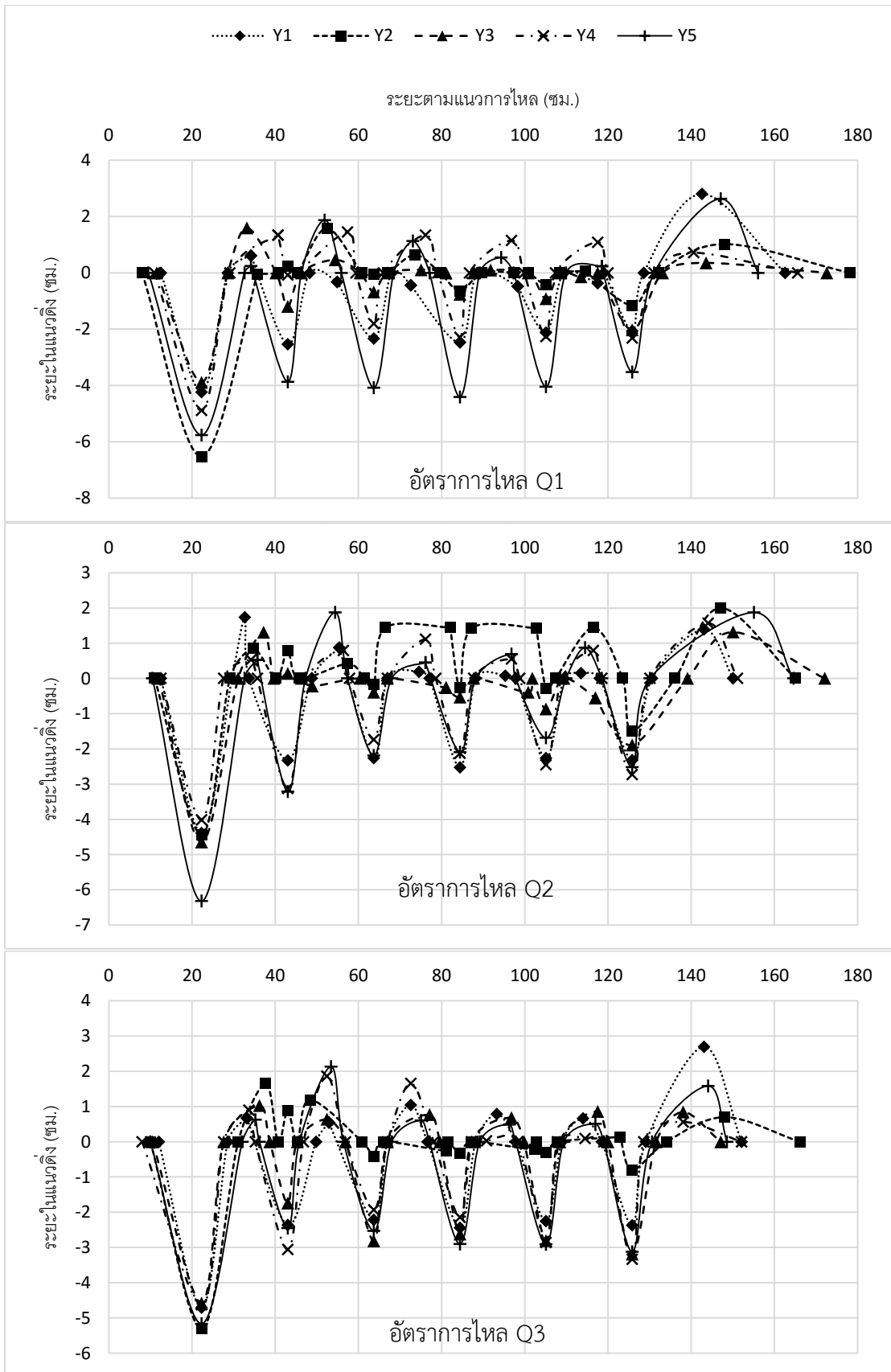
ในการบันทึกผลการทดลองได้มีขั้นตอนของการเก็บบันทึกความลึกหลุมกัดเซาะทุกหลุมและขนาดของหลุมแต่ละหลุมโดยเก็บค่าเป็นพิคัดใน 3 แกน คือ แนวราบตามแนวการไหล แนวราบตั้งฉากแนวการไหล และแนวตั้ง นอกจากนั้นในบางกรณียังพบว่ามีการทรายเป็นเนินขึ้นเนื่องจากการทับถมตกตะกอนของทรายที่ถูกขุดขึ้นมาจากหลุมกัดเซาะด้านเหนือน้ำก็ได้ทำการวัดพิคัดขนาดมาเช่นกัน จากนั้นนำมาสร้างเป็นรูปภาพของหลุมกัดเซาะในแต่ละกรณี โดยสร้างเป็นภาพตัดตามแนวแกนในแนวตั้ง ใช้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะและระยะในแนวราบตามแนวการไหลในการสร้างภาพหลุมกัดเซาะ

เพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน โดยทำการแยกตามกลุ่มของอัตราการไหลและระยะห่างระหว่างตอม่อในแต่ละกรณีเพื่อให้เห็นผลที่เกิดจากคานขวางได้ชัดเจนขึ้น แสดงดังรูปที่ 4-11 ถึง 4-14 และสามารถอธิบายได้ดังนี้

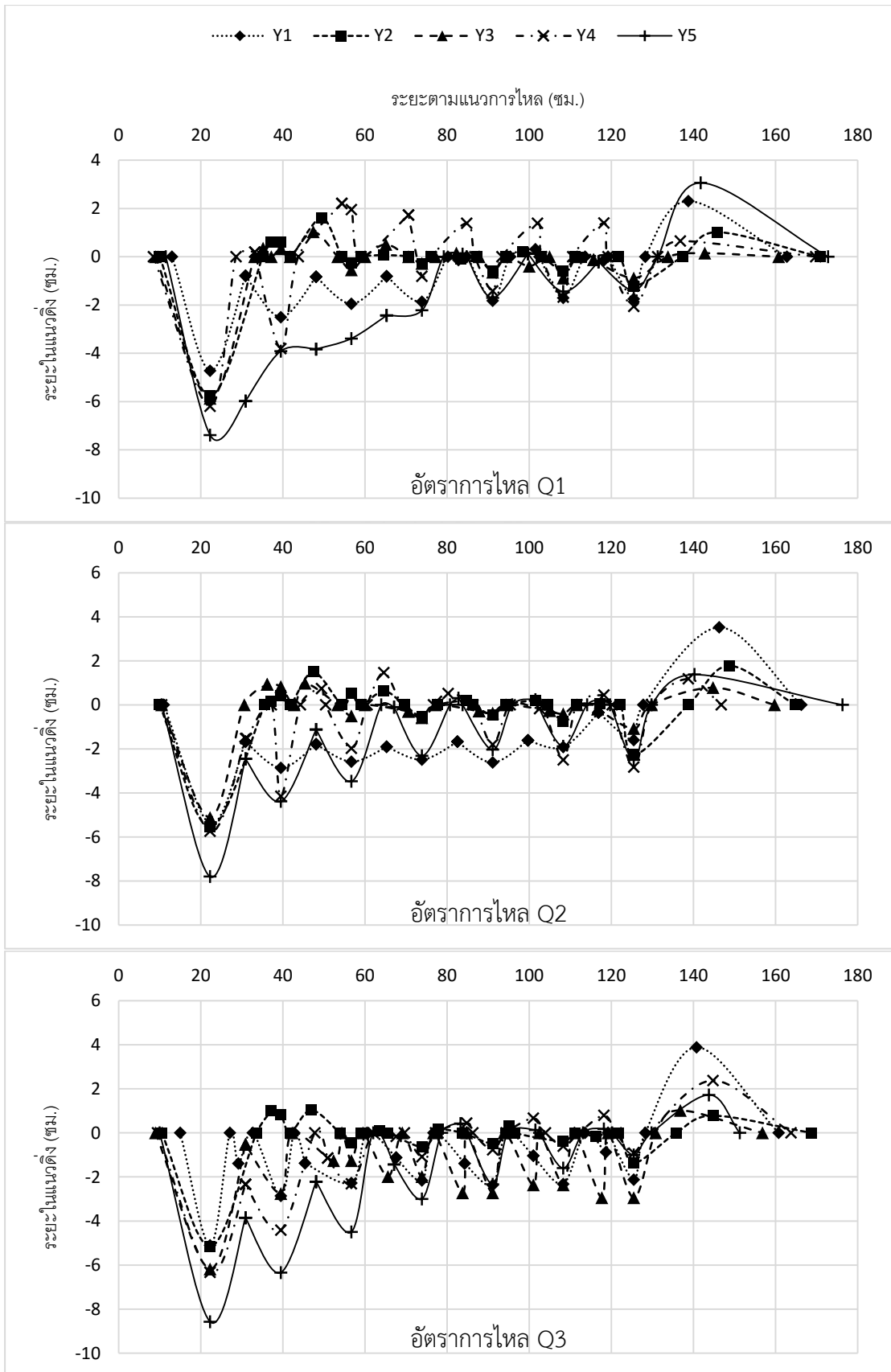
- กรณีที่ระดับส่วนบนของคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำ (Y1) สำหรับระยะห่างระหว่างเสาเท่ากับ C และ D ซึ่งระยะห่างระหว่างเสามีค่าน้อย พบว่าหลุมกัดเซาะมีการทับซ้อนกันซึ่งเป็นผลจากอิทธิพลของตอม่อต้นข้างเคียงส่งผลให้เกิดการก้าวร้าวกันและกันของกระแสน้ำวนระหว่างตอม่อ และจากการที่ระดับคานขวางนั้นอยู่ต่ำเกินไปจึงไม่สามารถป้องกันท้องน้ำหรือลดความรุนแรงและผลกระทบจากกระแสน้ำวนได้
- กรณีระดับส่วนล่างของคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำ (Y2) เป็นกรณีเห็นประสิทธิผลได้ดีที่สุดเนื่องจากระดับดังกล่าวทำให้คานขวางมีความสามารถในการป้องกันพื้นท้องน้ำได้ดีที่สุดด้วยการที่มีระดับผิวส่วนบนของคานขวางสูงกว่าพื้นท้องน้ำมากที่สุดโดยไม่เกิดช่องว่างข้างใต้ระหว่างคานขวางกับท้องน้ำจึงไม่เกิดการกัดเซาะใต้คานขวาง เมื่อผิวส่วนบนของคานขวางมีระดับสูงกว่าพื้นท้องน้ำ ก็เป็นตัวกันไม่ให้กระแสน้ำไหลลงและกระแสน้ำวนปะทะท้องน้ำ และยังทำให้ความรุนแรงของกระแสน้ำวนที่เกิดจากตอม่อต้นก่อนหน้าลดความเร็วลงจนเกิดการทับถมขึ้น
- กรณีที่ระดับส่วนบนของคานขวางเท่ากับ 0.2 ของความลึกน้ำ (Y3) สำหรับอัตราการไหล Q1 ของทุกกรณีระยะห่างระหว่างเสา ในกรณีนี้ระดับผิวส่วนบนของคานขวางจากการออกแบบนั้นอยู่ที่ 0.2 ของความลึกน้ำ ซึ่งความลึกน้ำเท่ากับ 16 ซม. จึงทำให้ระดับผิวส่วนบนของคานขวางมีระดับสูงกว่าท้องน้ำ 3.2 ซม. นั่นคือมีส่วนของคานขวางฝังอยู่ในท้องน้ำบางส่วน แต่ส่วนที่น้ำจะทำให้เกิดการลดความลึกหลุมกัดเซาะส่วนที่อยู่สูงกว่าระดับท้องน้ำ เมื่อเทียบกับกรณีระดับคานขวาง Y1 ก็จะเห็นได้ว่าน่าจะเป็นไปเช่นนั้น คือระดับคานขวางที่สูงขึ้นมาจากท้องน้ำเป็นตัวช่วยในการลดการกัดเซาะได้
- กรณีระดับส่วนบนของคานขวางเท่ากับ 0.4 ของความลึกน้ำ (Y4) ในกรณีนี้จะเห็นได้ว่าหลุมกัดเซาะนั้นมีความคล้ายกับกรณีที่ระดับคานขวาง Y5 แต่ความลึกหลุมน้อยกว่า ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่ระดับคานขวางดังกล่าวอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางความลึกน้ำ เป็นตัวตัดทอนกระแสน้ำลงซึ่งเป็นตัวที่ทำให้เกิดกระแสน้ำวนและนำไปสู่กลไกการกัดเซาะ เมื่อกระแสน้ำลงลดความรุนแรงลง ผลรวมของเวกเตอร์ความเร็วของกระแสน้ำปกติและกระแสน้ำลงก็ลดลง กระแสน้ำวนจึงมีความสามารถในการนำพาตะกอนลดลง ส่งผลให้หลุมกัดเซาะตื้นขึ้น
- กรณีที่ระดับคานขวางอยู่สูงกว่าระดับน้ำ (Y5) จะพบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างเสาเท่ากับ A และ B หลุมกัดเซาะยังไม่เกิดการรวมกันอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกรณีระยะห่างระหว่างเสา C และ D ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการก้าวร้าวกันของพฤติกรรมกัดเซาะ (interference effect) เมื่อระยะห่างระหว่างเสามีค่าน้อยๆ



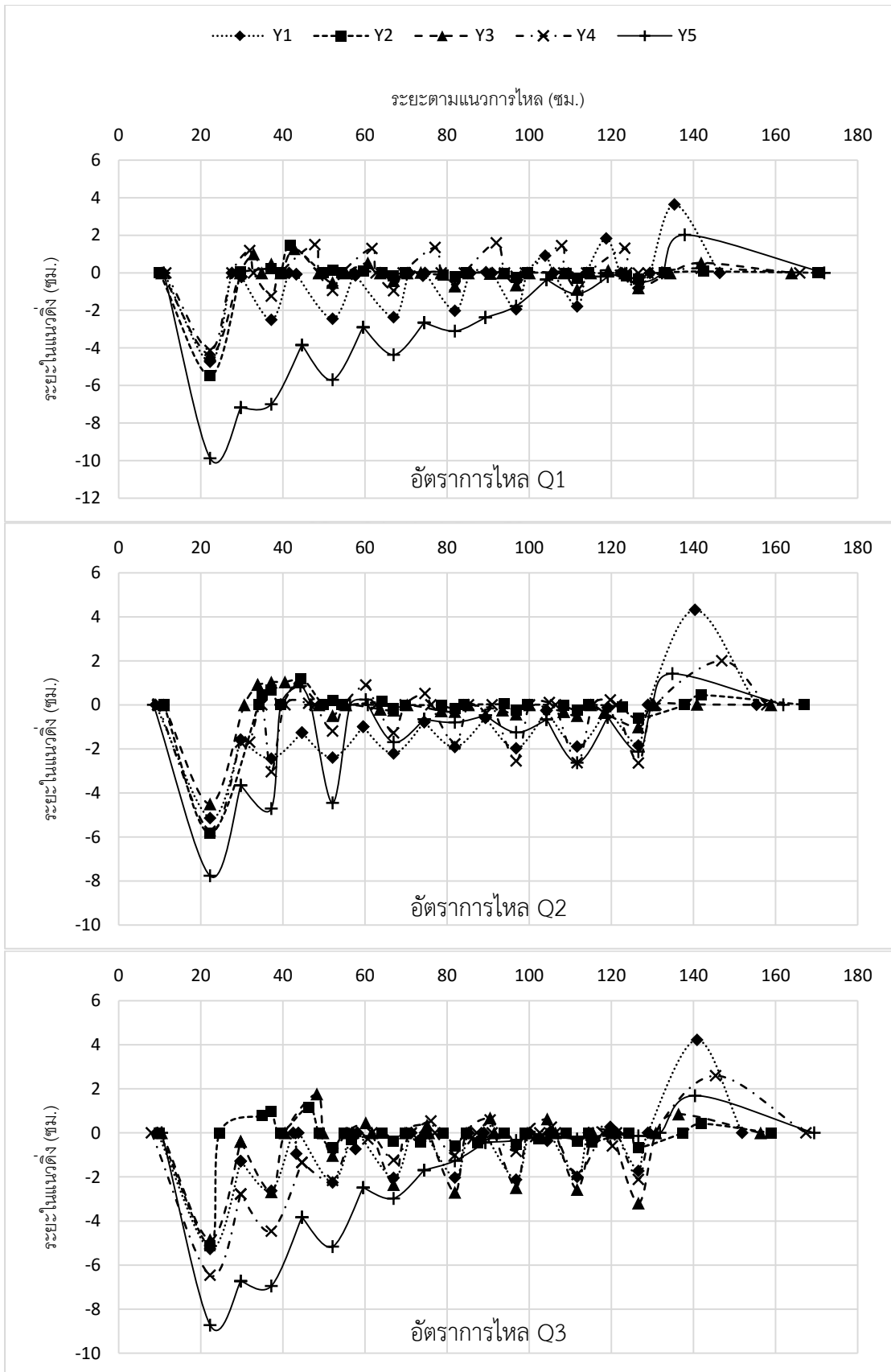
รูปที่ 4-11 รูปการเปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะที่ระดับคานขวางต่างๆ สำหรับกรณีระยะห่าง A



รูปที่ 4-12 รูปการเปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะที่ระดับคานขวางต่างๆ สำหรับกรณีระยะห่าง B



รูปที่ 4-13 รูปการเปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะที่ระดับคานขวางต่างๆ สำหรับกรณีระยะห่าง C



รูปที่ 4-14 รูปการเปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะที่ระดับคานขวางต่างๆ สำหรับกรณีระยะห่าง D



#### 4.6 กลไกการกัดเซาะจากอิทธิพลของระดับคานขวาง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาต้นแรกด้านเหนือน้ำนั้นไม่เห็นถึงผลกระทบที่ชัดเจนของอิทธิพลของระดับคานขวาง เนื่องจากไม่เห็นถึงความสัมพันธ์ที่มีระหว่าง  $Y/y$  กับ  $d_s/y$  หากจะมีความแตกต่างกันน่าจะเกิดจากผลของค่าพารามิเตอร์และขนาดเสาสัมพันธ์มากกว่า แต่เมื่อพิจารณาหลุมกัดเซาะรอบเสาต้นที่สองเป็นต้นไปจะเห็นได้ว่า ในแต่ละกรณีของระดับคานขวางนั้นมีความแตกต่างของความลึกหลุมอย่างชัดเจน ดังเช่นในกรณีที่ระดับที่ผิวส่วนล่างของคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำซึ่งส่งผลต่อการลดความลึกหลุมกัดเซาะได้อย่างเห็นได้ชัด สาเหตุหลักๆ น่าจะมาจากการมีอยู่ของคานขวางในระดับดังกล่าวเป็นตัวขัดขวางกลไกการเกิดของกระแสน้ำวนรวมทั้งอาจเป็นตัวที่ทำหน้าที่เหมือนเกราะป้องกันกระแสไหลลง (downflow) ก่อนที่จะปะทะกับท้องน้ำ

ตามที่ได้นำเสนอกลไกการกัดเซาะในบทที่ 2 จะเห็นได้ว่ากลไกการกัดเซาะนั้นเกิดจากกระแสน้ำวน 2 ทิศทาง ได้แก่ 1) กระแสน้ำวนรอบแกนราบที่ลักษณะคล้ายเกือกม้า (horseshoe vortex) เกิดจากการไหลของน้ำปะทะเสาแล้วเกิดกระแสไหลลง จากนั้นจึงมีวนตัวจากการรวมกันของเวกเตอร์ความเร็ว กลายเป็นกระแสน้ำวน และ 2) กระแสน้ำวนรอบแกนตั้ง (wake vortices) เกิดจากการที่เสาขัดขวางการไหลทำให้ด้านท้ายน้ำของเสาเป็นจุดที่ไม่มีการไหล น้ำไหลจึงอ้อมเสา เกิดเป็นกระแสน้ำวนขึ้น

หากพิจารณากลไกการเกิด horseshoe vortex ซึ่งเกิดจากกระแสไหลลงแล้ว จะพบว่า ในกรณีที่การที่มีคานขวางอยู่บนท้องน้ำพอดีนั้นจะเป็นตัวที่ขัดขวางกระแสไหลลง เมื่อกระแสไหลลงถูกขัดขวาง กระแสน้ำวนก็จะไม่ไปเกิดที่บริเวณใกล้ท้องน้ำ และคานขวางยังเป็นตัวกั้นกระแสน้ำวนไม่ให้ไปตะกุกท้องน้ำอีกด้วย หรือในกรณีที่คานขวางอยู่กลางความลึกน้ำ กระแสไหลลงที่เกิดด้านล่างของคานขวางก็มีความแรงน้อยลง กระแสน้ำวนที่เกิดขึ้นก็มีความรุนแรงที่น้อยลงตามไปด้วย

เมื่อพิจารณากลไกการเกิดของ wake vortices จะพบว่ากระแสน้ำวนดังกล่าวเริ่มก่อตัวขึ้นบริเวณมุมทั้งสองของด้านหน้าเสาต้นแรกที่ปะทะน้ำจากนั้นกระแสน้ำวนจะไหลตามทิศทางการไหลของน้ำไปตามด้านข้างของเสาและอ้อมไปทางด้านหลังเสา .ในกรณีที่คานขวางมีระดับสูงกว่าท้องน้ำ น่าจะช่วยป้องกันกระแสน้ำวนที่ไหลอ้อมไปด้านหลังไม่ให้ไปขุดตะกุกท้องน้ำด้านหลังเสา รวมทั้งป้องกันตะกอนด้านหน้าของเสาต้นถัดไปจากกระแสน้ำวนด้วย

สำหรับกลไกการกัดเซาะในแต่ละกรณีของระดับคานขวางสามารถอธิบายได้ดังนี้

- ในกรณีที่ผิวส่วนบนของคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำ ( $Y1$ ) คานขวางถูกฝังอยู่ในท้องน้ำพอดี กระแส downflow เมื่อไหลลงมาตามเสาก็จะปะทะกับท้องน้ำและคานขวางพร้อมกัน เกิดเป็น horseshoe vortex ขึ้นที่บริเวณท้องน้ำ ท้องน้ำจึงถูกกัดเซาะ นอกจากนั้น wake

vortices ที่เกิดขึ้นด้านข้างเสาก็กัดเซาะตะกอนด้านข้างของคานขวางเช่นกัน หลุมกัดเซาะที่เกิดขึ้นจึงมีความลึกน้อยกว่ากรณีที่คานขวางอยู่เหนือน้ำ เนื่องจากคานขวางป้องกันท้องน้ำในตำแหน่งที่ความรุนแรงของกระแสน้ำวนมีค่ามากที่สุดนั่นคือตำแหน่งด้านหน้าและหลังเสาพอดี

- กรณีที่ท้องคานขวางมีระดับเท่ากับท้องน้ำ (Y2) คานขวางถูกวางอยู่บนพื้นท้องน้ำพอดี เป็นระดับคานขวางที่สูงที่สุดโดยไม่ทำให้เกิดช่องว่างใต้คานขวางกับท้องน้ำซึ่งอาจทำให้เกิดการกัดเซาะได้ เมื่อระดับผิวส่วนบนของคานขวางอยู่สูงกว่าท้องน้ำ จึงเป็นตัวช่วยในการป้องกันท้องน้ำจากกระแสน้ำวน โดยเมื่อกระแส downflow ไหลลงมาตามเสา จะปะทะกับคานขวางก่อน เมื่อปะทะแล้วก็จะเกิดเป็น horseshoe vortex ซึ่งก็จะถูกคานขวางกั้นไว้ไม่ให้ไปกัดเซาะท้องน้ำ หรืออาจมีรัศมีของกระแสน้ำวนที่หมุนวนไปจนกัดเซาะถึงท้องน้ำบ้างแต่ไม่รุนแรง เช่นเดียวกันกับการป้องกัน wake vortices เนื่องจากกลไกการเกิดของ wake vortices จะเกิดจากการไหลอ้อมเสา เมื่อมีคานขวางเชื่อมต่อระหว่างเสาที่ด้านล่างของเสา กระแสน้ำด้านล่างก็ไหลอ้อมเสาไม่ได้ จึงไม่เกิด wake vortices ขึ้นที่บริเวณด้านล่างท้องน้ำ ถึงแม้จะเกิดกระแสน้ำวนที่ด้านบนของคานขวางแต่ความรุนแรงก็น้อยลง และทิศการไหลของกระแสน้ำวนนี้จะไหลอ้อมจากด้านข้างเสาไปยังด้านหลังเสาซึ่งเป็นที่มีคานขวางอยู่ จึงถูกคานขวางป้องกันหรือลดความรุนแรงในการไปขุดพื้นท้องน้ำ
- กรณีที่ผิวส่วนบนของคานขวางเท่ากับ 0.2 ของความลึกการไหล (Y3) เป็นกรณีที่ต้องทำการแบ่งพิจารณา 2 ประเด็น เนื่องจากกรณีดังกล่าวออกแบบให้ผิวส่วนบนของคานขวางอยู่ที่ 0.2 ของความลึกน้ำ ซึ่งในการทดลองมีความลึกน้ำ 3 ค่า ตามอัตราการไหล ได้แก่ 16 25 และ 35 ซม. ดังนั้นระดับคานขวางจึงมีระดับของผิวส่วนบนสูงกว่าท้องน้ำเป็นระยะ 3.2 5 และ 7 ซม. ประเด็นที่ต้องทำการพิจารณาคือ 1) ประเด็นที่คานขวางมีส่วนที่ถูกฝังอยู่ในดินท้องน้ำหรือกรณีที่มีอัตราการไหล Q1 กับระดับคานขวาง Y3 กรณีนี้จะคล้ายกันกับกรณีที่คานขวางมีระดับ Y2 แต่ผิวส่วนบนของคานขวางนั้นอยู่ต่ำกว่า ซึ่งจากภาพผลการทดลองในหัวข้อ 4.5 ก็จะเห็นถึงผลการทดลองที่ใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากกลไกการกัดเซาะน่าจะเกิดขึ้นเหมือนกันนั่นเอง และ 2) ประเด็นที่คานขวางลอยพ้นเหนือดินท้องน้ำ สำหรับกรณีนี้จะอธิบายในกรณีคานขวาง Y4
- กรณีที่ผิวส่วนบนของคานขวางเท่ากับ 0.4 ของความลึกการไหล (Y4) เป็นกรณีที่ระดับคานขวางอยู่กลางความลึกน้ำ กรณีนี้จะเห็นผลได้ชัดเจนถึงการลดลงของความลึกหลุมกัดเซาะ

เมื่อเทียบกับกรณี Y5 ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่มีอิทธิพลของระดับคานขวางมาเกี่ยวข้อง การที่ระดับคานขวางอยู่ที่กึ่งกลางลำน้ำสามารถลดความลึกของหลุมกัดเซาะได้นั้นน่าจะมาจากการที่คานขวางเป็นตัวลดกระแสไหลลง downflow ทำให้กระแส downflow ที่อยู่ด้านบนของคานขวางไม่สามารถไหลลงมาปะทะท้องน้ำได้ และกระแส downflow ที่เกิดขึ้นใต้คานขวางก็จะมีความเร็วที่น้อยลง เพราะว่ากระแส downflow น่าจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วการไหล ซึ่งความเร็วการไหลนั้นไม่ได้เท่ากันทั้งหมดทั้งหน้าตัดในแนวตั้งตามทฤษฎีการไหลในทางน้ำเปิด ดังนั้นกระแส downflow ที่เกิดใต้คานขวางจึงมีความเร็วต่ำกว่ากรณี Y5 horseshoe vortex จึงมีความรุนแรงน้อยกว่า เช่นเดียวกับ wake vortices น่าจะถูกตัดตอนโดยคานขวางด้วยกลไกเดียวกัน ดังรูปที่ 4-15

- กรณีคานขวาง Y5 เป็นกรณีที่หลุมกัดเซาะไม่ได้รับอิทธิพลของระดับคานขวางเนื่องจากคานขวางอยู่สูงกว่าผิวน้ำ กลไกการกัดเซาะจึงเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1.3

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อหาอิทธิพลที่มีต่อหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพานเนื่องจากระดับความสูงของสะพานแบบ Pile Bent ตามแบบมาตรฐานงานสะพาน กรมทางหลวงชนบท พ.ศ. 2556 โดยใช้แบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์ในการศึกษา เพื่อประยุกต์ใช้ผลการศึกษาในการพิจารณาออกแบบก่อสร้างสะพานต่อไปในอนาคต และยังช่วยเสริมสร้างประสบการณ์และทฤษฎีองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการศึกษาต่อยอดในภายหน้า

ในการศึกษานี้ทำการทดลองในรางจำลองการไหลขนาดกว้าง 0.6 ม. สูง 0.75 ม. ยาว 18 ม. จำลองวัสดุท้องน้ำด้วยทรายขนาดสม่ำเสมอมีขนาดเฉลี่ย 1.20 มม. ทดลองในอัตราการไหล 3 ค่า ได้แก่ 30 45 และ 60 ลิตร/วินาที ทำการออกแบบแบบจำลองโดยทำการย่อด้วยมาตราส่วน 1:87 ใช้ท่อเหล็กกลวงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 4.6 ซม. ในการก่อสร้างแบบจำลองตอม่อ ทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างเสา 4 ค่า ได้แก่ 21.2 16.1 12.6 และ 10.3 ซม. และปรับเปลี่ยนระดับความสูง 5 ระดับ ได้แก่ 1) ระดับที่ผิวส่วนบนของคานขวางมีค่าเท่ากับระดับท้องน้ำ 2) ระดับที่ผิวส่วนล่างของคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำ 3) ระดับที่ผิวส่วนบนของคานขวางอยู่สูงกว่าท้องน้ำเท่ากับ 0.2 ของความลึกน้ำ 4) ระดับที่ผิวส่วนบนของคานขวางอยู่สูงกว่าท้องน้ำเท่ากับ 0.4 ของความลึกน้ำ และ 5) ระดับที่คานขวางอยู่สูงกว่าระดับน้ำ จากการวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถสรุปได้ 3 ประเด็น ดังนี้

#### 5.1.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ส่งผลต่อหลุมกัดเซาะสูงสุด

ในการวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติ ทำให้ได้ฟังก์ชันความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล เป็นฟังก์ชันของฟรูดนัมเบอร์ ขนาดความกว้างเสาที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล ระยะห่างระหว่างเสาที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล และระดับผิวส่วนบนของคานขวางที่สัมพันธ์กับความลึกการไหล โดยดัดแปลงจากสมการ HEC-18 ได้ดังสมการนี้

$$\frac{d_s}{y} = 2.0K_1K_2K_3K_4\left(\frac{Y}{y}\right)^m\left(\frac{s_p}{y}\right)^n\left(\frac{b_p}{y}\right)^{0.65}Fr^{0.43} \quad (5-1)$$

โดยเมื่อนำข้อมูลของตัวแปรดังสมการมาเปรียบเทียบความสัมพันธ์กันโดยแยกตัวแปรอิสระแต่ละตัวเทียบกับตัวแปรความลึกกัดเซาะสูงสุดสัมพันธ์ พบว่า

- 1) ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดกับฟรูดนัมเบอร์และขนาดเสามีการแปรผันตามกัน

- 2) ความสัมพันธ์ของความลึกกัดเซาะสูงสุดกับระยะห่างระหว่างเสายังไม่สามารถสรุปได้ในการศึกษาี้ เพราะผลการทดลองที่ยังไม่เพียงพอเนื่องจากการที่เลือกใช้ระยะห่างระหว่างเสาในการทดลองยังมีช่วงของขอบเขตระยะห่างที่ไม่เห็นถึงความแตกต่างที่เด่นชัดจนสามารถสร้างความสัมพันธ์และคาดคะเนแนวโน้มได้
- 3) ความสัมพันธ์ระหว่างระดับคานขวางกับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดนั้นยังไม่อาจสรุปได้เช่นกันเนื่องจากขอบเขตข้อมูลการทดลองยังไม่เพียงพอ

### 5.1.2 สมการความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ส่งผลต่อความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด

จากการนำข้อมูลผลการทดลองของตัวแปรในสมการที่ 5-1 มาทำการวิเคราะห์แบบถดถอยกำลังน้อยที่สุด (least-square regression analysis) โดยทำการแบ่งกรณีการวิเคราะห์ตามระดับคานขวาง ดังนี้

- 1) กรณีระดับคานขวางอยู่สูงกว่าระดับน้ำ (Y5) ซึ่งเป็นกรณีที่ระดับคานขวางไม่มีอิทธิพลต่อความลึกหลุมกัดเซาะ ได้ตั้งสมการที่ 5-2 โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.85

$$\frac{d_s}{y} = 1.74 \cdot \left(\frac{s_p}{y}\right)^{-0.09} \left(\frac{b_p}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (5-2)$$

เมื่อ  $Y/y > 1$  และ  $2.2 \leq s_p/b_p \leq 4.6$

- 2) กรณีที่ส่วนบนของระดับคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำ (Y1) เป็นกรณีที่อัตราส่วนของระดับคานขวางต่อความลึกการไหลมีค่าคงที่เท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงไม่ตัวแปรของระดับคานขวางมาใช้ในการวิเคราะห์ ได้ผลตั้งสมการที่ 5-3 โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.96

$$\frac{d_s}{y} = 1.09 \cdot \left(\frac{s_p}{y}\right)^{-0.13} \left(\frac{b_p}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (5-3)$$

เมื่อ  $Y/y = 0$  และ  $2.2 \leq s_p/b_p \leq 4.6$

- 3) กรณีที่ระดับคานขวางมีค่าอยู่ในช่วงของความลึกน้ำโดยไม่มีช่องว่างระหว่างคานขวางกับท้องน้ำ (Y2 ทุกอัตราการไหล และ Y3 ในกรณีอัตราการไหล Q1) เป็นกรณีที่สามารถนำตัวแปรของระดับคานขวางมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ ผลตั้งสมการที่ 5-4 และมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.88

$$\frac{d_s}{y} = 2.42 \cdot \left(\frac{Y}{y}\right)^{0.37} \left(\frac{s_p}{y}\right)^{-0.04} \left(\frac{b_p}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (5-4)$$

เมื่อ  $0 < Y/y \leq 0.2$  โดยไม่มีช่องว่างระหว่างคานขวางกับท้องน้ำ และ  $2.2 \leq s_p/b_p \leq 4.6$

- 4) กรณีที่ระดับคานขวางมีค่าอยู่ในช่วงของความลึกน้ำโดยมีช่องว่างระหว่างคานขวางกับท้องน้ำ (Y2 ในกรณีอัตรการไหล Q2-3 และ Y4 ทุกอัตรการไหล) กรณีนี้เป็นกรณีที่คานขวางอยู่ในน้ำโดยมีการไหลลอดใต้คานขวาง ตัวแปรอิสระทุกตัวสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ตั้งสมการที่ 5-5 และมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.81

$$\frac{d_s}{y} = 1.48 \cdot \left(\frac{Y}{y}\right)^{0.14} \left(\frac{s_p}{y}\right)^{-0.03} \left(\frac{b_p}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (5-5)$$

เมื่อ  $0.2 \leq Y/y \leq 0.4$  โดยมีช่องว่างใต้คานขวางกับท้องน้ำ และ  $2.2 \leq s_p/b_p \leq 4.6$

จากสมการที่ 5-2 ถึง 5-5 จะเห็นได้ว่า ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดแปรผันตามระดับคานขวางและแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างเสา แต่ค่าเลขยกกำลังของตัวแปรระดับคานขวางและระยะห่างระหว่างเสามีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งเมื่อคำนวณแล้วทำให้ได้ค่าใกล้เคียง 1 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าในการศึกษานี้ ระดับคานขวางและระยะห่างเสามีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดน้อยมาก

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์  $K_1, K_2, K_3$  และ  $K_4$  และค่ายกกำลัง  $m$  และ  $n$  แสดงดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 สรุปค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังของสมการความสัมพันธ์

สมการ	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$m$	$n$	$R^2$
5-2	1.1	1.0	1.1	0.72	-	-0.09	0.85
5-3	1.1	1.0	1.1	0.45	-	-0.13	0.96
5-4	1.1	1.0	1.1	1.0	0.37	-0.04	0.88
5-5	1.1	1.0	1.1	0.61	0.14	-0.03	0.81

### 5.1.3 อิทธิพลของระดับคานขวางต่อหลุมกัดเซาะของกลุ่มตอม่อ

จากการพิจารณาข้อมูลจากผลการทดลองพบว่า หลุมกัดเซาะรอบเสาต้นเดียวกันในกรณีที่ระดับคานขวางต่างกันนั้นมีค่าไม่เท่ากันและมีแนวโน้มของการเพิ่มหรือลดที่เห็นได้ชัดเจน จึงสามารถสรุปได้ว่าระดับคานขวางส่งผลต่อหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพานแบบ Pile Bent โดย

- 1) ระดับคานขวางที่ดีที่สุดที่ทำให้สามารถลดความลึกหลุมกัดเซาะได้คือกรณีที่ส่วนล่างของคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำ (Y2) ลองลงมาคือกรณีที่ระดับส่วนบนของคานขวางเท่ากับ 0.2 ของความลึกน้ำ (Y3) กรณีที่ระดับส่วนบนของคานขวางเท่ากับ 0.4 ของความลึกน้ำ (Y4)

และ กรณีที่ระดับส่วนบนของคานขวางเท่ากับท้องน้ำ (Y1) ตามลำดับ สำหรับกรณีที่ระดับคานขวางอยู่สูงกว่าระดับน้ำ (Y5) เป็นกรณีที่ไม่มีอิทธิพลของคานขวาง และได้แสดงให้เห็นว่าเป็นกรณีที่มีความลึกหลุมกัดเซาะที่มากที่สุด

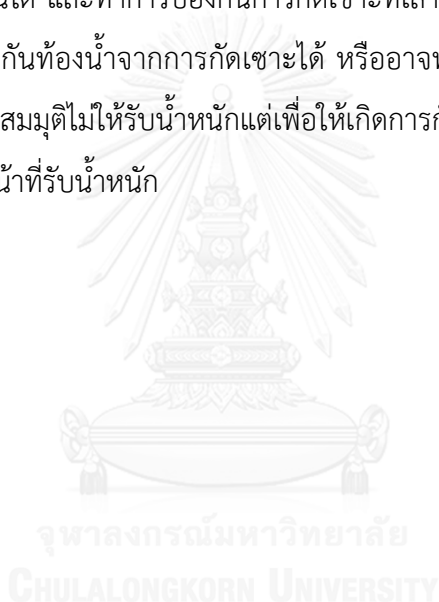
- 2) ระดับของคานขวางส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของน้ำรอบตอม่อเมื่อเทียบกับกรณีที่ระดับคานขวางอยู่สูงกว่าระดับน้ำ (Y5) ดังนี้
  - เมื่อระดับผิวส่วนบนของคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำ (Y1) จะไม่สามารถป้องกันท้องน้ำจากกระแสที่วนได้ แต่จะช่วยลดแรงที่เกิดจากกระแสที่วนและทำให้ความลึกหลุมกัดเซาะลดลง
  - กรณีที่ส่วนล่างของคานขวางอยู่ติดท้องน้ำหรือฝังอยู่ในท้องน้ำ เป็นกรณีที่คานขวางมีอิทธิพลต่อความลึกหลุมกัดเซาะมากที่สุด เนื่องจากคานขวางที่อยู่สูงกว่าท้องน้ำช่วยป้องกันกระแสน้ำวนไม่ให้กัดเซาะท้องน้ำและเมื่อคานขวางอยู่ติดกับท้องน้ำทำให้ไม่เกิดการกัดเซาะใต้คานขวางอีกด้วย
  - กรณีที่คานขวางมีระดับอยู่ในช่วงความลึกน้ำโดยไม่วางติดกับท้องน้ำ พบว่าคานขวางมีส่วนช่วยในการลดความลึกหลุมกัดเซาะซึ่งเป็นผลมาจากการที่คานขวางเป็นอุปสรรคสำหรับกระแสที่ไหลลง (downflow) ที่จะไหลลงปะทะท้องน้ำ ทำให้ความรุนแรงของการกัดเซาะลดลง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) เพื่อให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดกับระยะห่างระหว่างเสาได้ชัดเจนขึ้น การศึกษาในอนาคตจึงควรปรับเปลี่ยนระดับน้ำและระยะห่างให้มีจำนวนกรณีศึกษาที่มากขึ้น เช่นกันกับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดกับระดับคานขวางที่ควรปรับเปลี่ยนระดับน้ำและระดับคานขวางให้มีจำนวนกรณีศึกษาที่มากขึ้น เพื่อให้แนวโน้มของผลการทดลองที่ชัดเจนขึ้น และการศึกษาในอนาคตควรใช้ขนาดแบบจำลองตอม่อที่ใหญ่ขึ้นหรือวัสดุท้องน้ำขนาดเล็กลง เพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนค่าความลึกน้ำได้มากขึ้น และนอกจากนั้นเพื่อให้การศึกษาแน่ชัดขึ้นยังสามารถพิจารณาอิทธิพลของการไหลลอดใต้คานขวางต่อหลุมกัดเซาะได้อีกด้วย
- 2) จากผลการทดลองพบว่าระดับของคานขวางของสะพานแบบ Pile Bent นั้นมีอิทธิพลต่อหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพานอย่างเห็นได้ชัด เพียงแต่กลไกจะเป็นไปตามที่ได้คาดการณ์

หรือไม่ยังต้องอาศัยเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นเพื่อใช้ในการสังเกตและบันทึกพฤติกรรมการกัดเซาะ เช่น การใช้กล้องวิดีโอความเร็วสูงในการจับภาพการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำเพื่อวิเคราะห์ทิศทางและขนาดของกระแสน้ำวนทั้งสอง เป็นต้น

- 3) สำหรับการประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างจริง เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า กรณีที่ส่วนล่างของคานขวางมีระดับเท่ากับท้องน้ำ ซึ่งเป็นกรณีที่หลุมกัดเซาะเกิดขึ้นรอบๆ เสาดันแรกด้านเหนือน้ำเท่านั้น โดยเกือบจะไม่เกิดหลุมกัดเซาะรอบเสาดันหลังๆ ดังนั้นในการก่อสร้างจึงควรออกแบบให้ตอม่อสะพานแบบ Pile Bent มีระดับคานขวางอยู่บนท้องน้ำพอดี หรือขยายความลึกของคานขวางให้ฝังลงในดินท้องน้ำเล็กน้อยเพื่อป้องกันการกัดเซาะใต้คานขวางที่อาจเกิดขึ้นได้ และทำการป้องกันการกัดเซาะที่เสาดันแรกซึ่งจะทำให้ลดค่าก่อสร้างในส่วนของการป้องกันท้องน้ำจากการกัดเซาะได้ หรืออาจทำการออกแบบเพิ่มเสาดันแรกเข้าไปอีกหนึ่งต้นโดยสมมุติไม่ให้น้ำหนักแต่เพื่อให้เกิดการกัดเซาะแทนเสาดันหลังที่อยู่ท้ายน้ำ ซึ่งเป็นเสาที่ทำหน้าที่รับน้ำหนัก





## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- เสรี จันทโรยธา 2553. ชลศาสตร์, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เอกนันท์ ตั้งธีระสุนันท์. 2544. ผลของความขรุขระของผิวตอม่อสะพานต่อหลุมกัดเซาะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กรมทางหลวงชนบท 2556. แบบมาตรฐานงานสะพาน, สำนักสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวงชนบท.
- ธรรมวัฒน์ การุณธนกุล. 2541. การกัดเซาะรอบตอม่อสะพานที่เรียงเป็นตับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นัฐวุฒิ พัดไทสง. 2549. การกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเสาเข็มภายใต้คลื่นและกระแสน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรมงคล ชิดชอบ. 2540. การกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พีระ ฉัตรจินตนาพร. 2551. อิทธิพลของเสาเข็มเอียงต่อความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มกลุ่ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมรัักษ์ ต่อวงศ์ไพชยนต์. 2527. การกัดเซาะของน้ำต่อโครงสร้างสะพานและท่อ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

### ภาษาอังกฤษ

- Arneson, L., Zevenbergen, L., Lagasse, P. & Clopper, P. 2012. Evaluating scour at bridges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138, 1033-1041.
- Ataie-Ashtiani, B., Baratian-Ghorghi, Z. & Beheshti, A. 2010. Experimental investigation of clear-water local scour of compound piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136, 343-351.
- Ataie-Ashtiani, B. & Beheshti, A. A. 2006. Experimental Investigation of Clear-Water Local Scour at Pile Groups. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132, 1100-1104.

- Chiew, Y. & Melville, B. 1987. Local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 25, 15-26.
- Deng, L. & Cai, C. S. 2010. Bridge Scour: Prediction, Modeling, Monitoring, and Countermeasures—Review. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 15, 125-134.
- Ferraro, D., Tafarjnoruz, A., Gaudio, R. & Cardoso, A. H. 2013. Effects of Pile Cap Thickness on the Maximum Scour Depth at a Complex Pier. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139, 482-491.
- Jain, S. C. & Fischer, E. E. 1979. Scour around circular bridge piers at high Froude numbers.
- Lança, R., Fael, C., Maia, R., Pêgo, J. P. & Cardoso, A. H. 2013. Clear-water scour at pile groups. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139, 1089-1098.
- Lee, S. O. & Sturm, T. W. 2009. Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135, 793-802.
- Melville, B. W. & Raudkivi, A. J. 1977. Flow characteristics in local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 15, 373-380.
- Moreno, M., Maia, R. & Couto, L. 2015. Effects of Relative Column Width and Pile-Cap Elevation on Local Scour Depth around Complex Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142, 04015051.
- Shields, A. 1936. Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. Soil Conservation Service.
- Wardhana, K. & Hadipriono, F. C. 2003. Analysis of recent bridge failures in the United States. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 17, 144-150.

## ภาคผนวก

ภาคผนวก ก แบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์และอุปกรณ์การทดลอง

ภาคผนวก ข การหาค่าเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

ภาคผนวก ค ภาพถ่ายผลการศึกษากิจกรรมต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ภาคผนวก ก

### แบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์และอุปกรณ์การทดลอง

การศึกษาการกัตเซาะรอบสะพานที่มีตอม่อแบบ Pile Bent ด้วยแบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์ ได้ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล อาคารอนุสาสน์ยันตรกรรม ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบบจำลองและอุปกรณ์ต่างๆ มีดังนี้

#### ก-1 รางจำลองการไหล

รางจำลองการไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยม (rectangular flume) ใช้สำหรับจำลองการไหลในทางน้ำเปิด มีขนาดกว้าง 0.6 ม. สูง 0.75 ม. ยาว 18 ม. ผนังทั้ง 2 ข้างเป็นกระจกใสหนา 1.2 ซม. ผนังรางเป็นแผ่นเหล็กหนา 6 มม. สามารถปรับความลาดเอียงของท้องรางน้ำด้วยแม่แรงยกซึ่งหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า โดยส่วนประกอบของรางจำลองการไหลโดยเรียงตามลำดับของระบบการหมุนเวียนน้ำ มีดังนี้

- 1) เครื่องสูบน้ำ (pump) มีจำนวน 4 เครื่อง มีอัตราการสูบน้ำต่อเครื่องประมาณ 25 ลิตร/วินาที
- 2) บ่อเก็บน้ำ (head tank) ติดตั้งอยู่บนชั้นดาดฟ้าของอาคารสูงกว่าระดับรางน้ำประมาณ 30 ม. มีความจุ 30 ลบ.ม. รับน้ำจากเครื่องสูบน้ำผ่านท่อเหล็กกลม
- 3) วาล์วควบคุม (control valve) ใช้สำหรับควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้าสู่รางจำลองการไหล ติดตั้งคั่นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้วที่เชื่อมจากบ่อเก็บน้ำกับถังพักน้ำเข้ารางจำลองการไหล
- 4) ถังพักน้ำก่อนเข้ารางจำลองการไหล (head box) น้ำจะเข้าสู่ถังโดยท่อที่อยู่กันถังที่อยู่ต่ำกว่าระดับพื้นราง แล้วน้ำจึงค่อยๆ เอ่อจนล้นเข้าสู่รางจำลองการไหล ทำให้ความเร็วตลอดแนวความกว้างรางเท่ากัน
- 5) ตะแกรง (screen) ติดตั้งอยู่ที่ด้านต้นน้ำของรางจำลองการไหล เพื่อให้เป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow)
- 6) รางจำลองการไหล เนื่องจากปริมาณทรายที่มีไม่เพียงพอต่อการถมทรายตลอดแนวความยาวของรางจำลองการไหลให้หนา 20 ซม. ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแต่งพื้นรางน้ำโดยยกพื้นให้สูงกว่าเดิม 15 ซม. แต่เว้นช่องไว้ 2 ช่องที่กึ่งกลางของรางสำหรับติดตั้งแบบจำลองตอม่อ โดยคั่นช่องทั้งสองให้มีระยะห่างกันประมาณ 1.5 ม.

- 7) ประตูน้ำแบบบานยก (sluice gate) ติดตั้งอยู่ที่ด้านท้ายน้ำของราง ใช้สำหรับควบคุมความลึกการไหล
- 8) ฝายสามเหลี่ยมสันคม (90° V-notch weir) น้ำจะไหลตกลงมาจากรางจำลองการไหลสู่ถังสลายพลังงานซึ่งติดตั้งตะแกรงและใส่เศษหินก้อนใหญ่ๆ ลงไปเป็นแนวกำแพงที่กลางถัง น้ำที่ไหลผ่านออกมาจะมีระดับน้ำที่ค่อนข้างนิ่ง และไหลผ่านฝายสามเหลี่ยมสันคมลงสู่บ่อพักน้ำ ระดับน้ำที่สูงกว่าสันฝายจะถูกวัดด้วยமானอมิเตอร์ (manometer) เพื่อใช้ในการคำนวณอัตราการไหล
- 9) บ่อพักน้ำ (sump tank) ใช้เก็บรวบรวมน้ำสำหรับสูบน้ำและวนใหม่

## ก-2 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์การทดลองมีดังนี้

- 1) เข็มวัดระดับ (point gauge) ติดตั้งบนรางล้อเลื่อนซึ่งขยับได้ตลอดแนวความยาวของรางจำลองการไหล ใช้สำหรับวัดระดับท้องน้ำและผิวน้ำ
- 2) เครื่องมือวัดระดับน้ำและความเร็วการไหลด้วยคลื่นเสียง (Sontek Argonaut-SW) แสดงดังรูปที่ ติดตั้งไว้ด้านต้นน้ำของรางจำลองการไหล ใช้ดูระดับน้ำแบบ real-time ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อปรับระดับประตูน้ำให้ได้ระดับน้ำที่ต้องการ
- 3) กล้องบันทึกภาพ ใช้สำหรับบันทึกภาพผลการกัดเซาะและตกตะกอนรอบแบบจำลองต่อม่อสะพาน
- 4) นาฬิกาจับเวลา เพื่อใช้ในการจับเวลาในการสอบเทียบอัตราการไหลและช่วงเวลาการทดลอง
- 5) เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer) ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำขณะทำการทดลอง

## ก-3 วัสดุท้องน้ำ

การจำลองสภาพท้องน้ำได้ใช้วัสดุท้องน้ำเป็นทรายซึ่งมีผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของทรายเป็นดังนี้

- $d_{50}$  ของทรายเท่ากับ 1.20 มม.
- $d_{84}$  ของทรายเท่ากับ 1.40 มม. และ  $d_{16}$  ของทรายเท่ากับ 0.73 มม.
- geometric standard deviation of the distribution ( $\sigma_g$ ) ซึ่งเป็นค่าที่บอกว่าเป็นทรายละเอียดขนาด ( $\sigma_g \geq 1.5$ ) หรือทรายขนาดสม่ำเสมอ ( $\sigma_g < 1.5$ ) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\sigma_g &= \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \\ &= \sqrt{\frac{1.40}{0.73}} \\ &= 1.38\end{aligned}$$

- ค่า  $\sigma_g < 1.5$  แสดงว่าทรายที่ใช้เป็นวัสดุท้องน้ำในการทดลองครั้งนี้เป็นทรายที่มีขนาดสม่ำเสมอ สำหรับการวิเคราะห์การกระจายขนาดของทราย (sieve analysis) แสดงดังตารางที่ ก-1 และรูปที่ ก-7

#### ก-4 แบบจำลองต่อม่อสะพาน

การศึกษาครั้งนี้ได้นำเอารูปแบบต่อม่อที่อยู่ในแบบมาตรฐานงานสะพาน พ.ศ. 2556 กรมทางหลวงชนบท มาทำการย่อส่วน ซึ่งในแบบมาตรฐานดังกล่าวก็ได้มีการกำหนดรูปแบบของสะพานตามความยาวช่วงสะพาน การรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็ม (allowable load) และมุมเอียงของแนวระดับต่อม่อต่อทิศทางการไหลของน้ำ ซึ่งจะส่งผลต่อการเพิ่มหรือลดระยะห่างระหว่างเสาและจำนวนเสาในตบ สำหรับการทดลองนี้ได้เลือกระยะห่างระหว่างเสาน้อยที่สุดแต่ไม่น้อยกว่า 2.0 เท่าของขนาดหน้าตัดเสา เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ที่ระยะห่าง 2-4 เป็นระยะที่เสาแต่ละต้นยังส่งผลถึงกันอยู่ ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ในเบื้องต้น และมีข้อสันนิษฐานว่าอิทธิพลของระยะห่างเมื่อเพิ่มอิทธิพลของคานขวางเข้าไปแล้วอาจทำให้ความลึกหลุมกัดเซาะเปลี่ยนไป อาจมากขึ้นหรือน้อยลง ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้เลือกแบบต่อม่อที่มีช่วงสะพานตั้งแต่ 5 – 15 เมตร น้ำหนักบรรทุกปลอดภัย 60 ตันต่อต้น และมุมเอียง 0° เป็นตัวต้นแบบเพื่อการย่อส่วน

ขั้นตอนก่อนที่จะกำหนดอัตราส่วนที่ถูกย่อ ต้องเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ทำแบบทดลองให้หาง่ายและทำงานง่ายด้วยงบที่น้อยที่สุด สุดท้ายจึงได้เลือกใช้ท่อเหล็กสี่เหลี่ยมกลวง หรือ แป๊บโปรง โดยเลือกขนาดที่ใหญ่ที่สุดที่เป็นไปได้เนื่องจากขนาดของวัสดุท้องน้ำที่ค่อนข้างใหญ่ แต่ต้องไม่ใหญ่จนทำให้เกิดการกัดเซาะเนื่องจากการบีบของลำน้ำในระหว่างต่อม่อกับผนังรางจำลองการไหล (contraction scour) ให้เป็นการกัดเซาะเฉพาะรอบๆ บริเวณต่อม่อเท่านั้น (local scour)

จึงได้ข้อสรุปว่าใช้แป๊บโปรงขนาด 2” x 2” หนา 1.5 มม. ซึ่งวัดจริงได้ขนาดหน้าตัดกว้าง 4.6 ซม. เป็นวัสดุใช้สร้างแบบจำลอง ทำการประกอบยึดโดยการเชื่อม ซึ่งรูปแบบและการเปลี่ยนแปลงของแบบจำลองในแต่ละกรณีมีดังนี้

- เปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างเสาและจำนวนเสาในตบ ตั้งแต่ระยะห่าง 21.2, 16.1, 12.6, และ 10.3 ซึ่งทำให้ได้อัตราส่วนระยะห่างต่อขนาดเสา ( $s_p/b_p$ ) ได้แก่ 4.6, 3.5, 2.7

และ 2.2 ตามลำดับ จำนวนเสา 5, 6, 7 และ 8 ต้น หรือแบบตอม่อ A, B, C และ D ตามลำดับ

- เปลี่ยนแปลงระดับคานขวาง โดยมีทั้งหมด 5 ระดับ ได้แก่ ระดับที่หลังคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำ (Y1), ระดับที่ท้องคานขวางเท่ากับระดับท้องน้ำ (Y2), ระดับที่หลังคานขวางเท่ากับ 0.2 ของความลึกน้ำ (Y3), ระดับที่หลังคานขวางเท่ากับ 0.4 ของความลึกน้ำ (Y4) และ ระดับที่คานขวางอยู่สูงกว่าระดับน้ำ (Y5)

ในการทดลองครั้งนี้ มีกรณีศึกษาทั้งหมด 60 กรณี ใช้แบบจำลองทั้งสิ้น 36 แบบ โดยแบบจำลองทั้งหมดแสดงดังรูปที่ ก-8 ถึง ก-16



รูปที่ ก-1 เครื่องสูบน้ำ



มองจากต้นน้ำ



มองจากท้ายน้ำ



ประตูบานยกท้ายราง

รูปที่ ก-2 รางจำลองการไหลในมุมต่างๆ



รูปที่ ก-3 ฝายสามเหลี่ยมสันคม

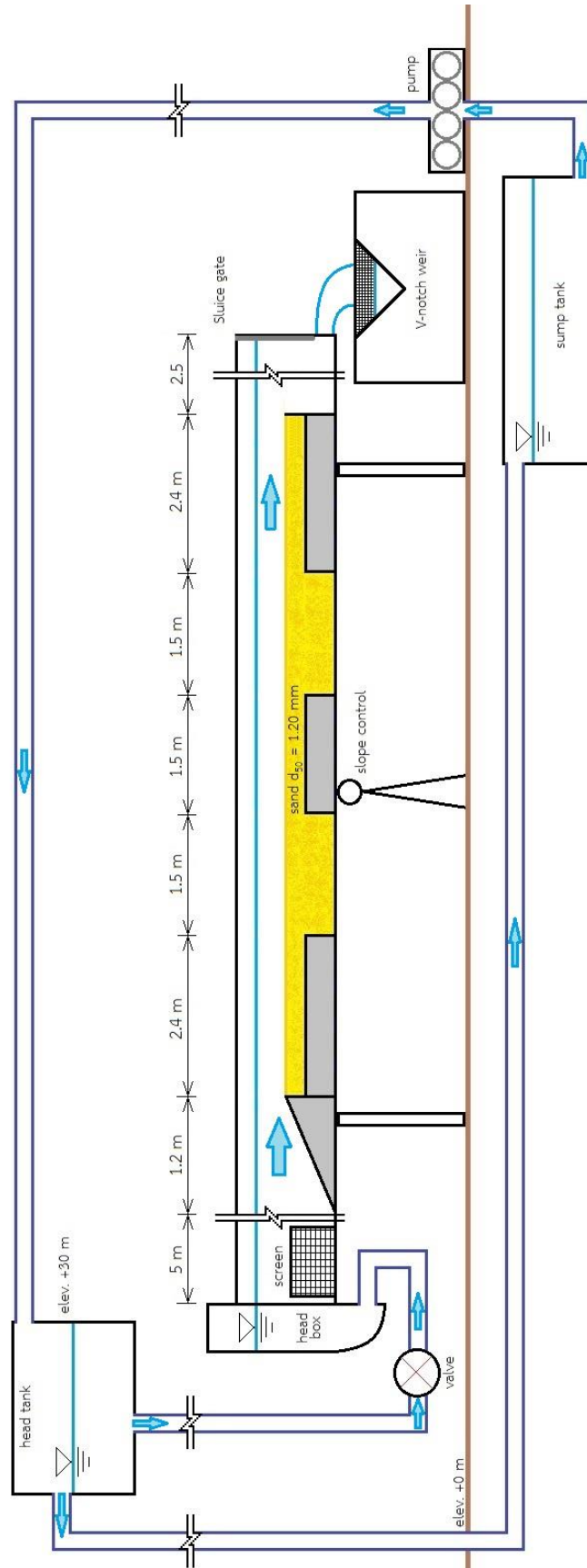


รูปที่ ก-4 สเกลวัดความลาดเอียงท้องน้ำ



รูปที่ ก-5 เข็มวัดระดับ (point gauge)

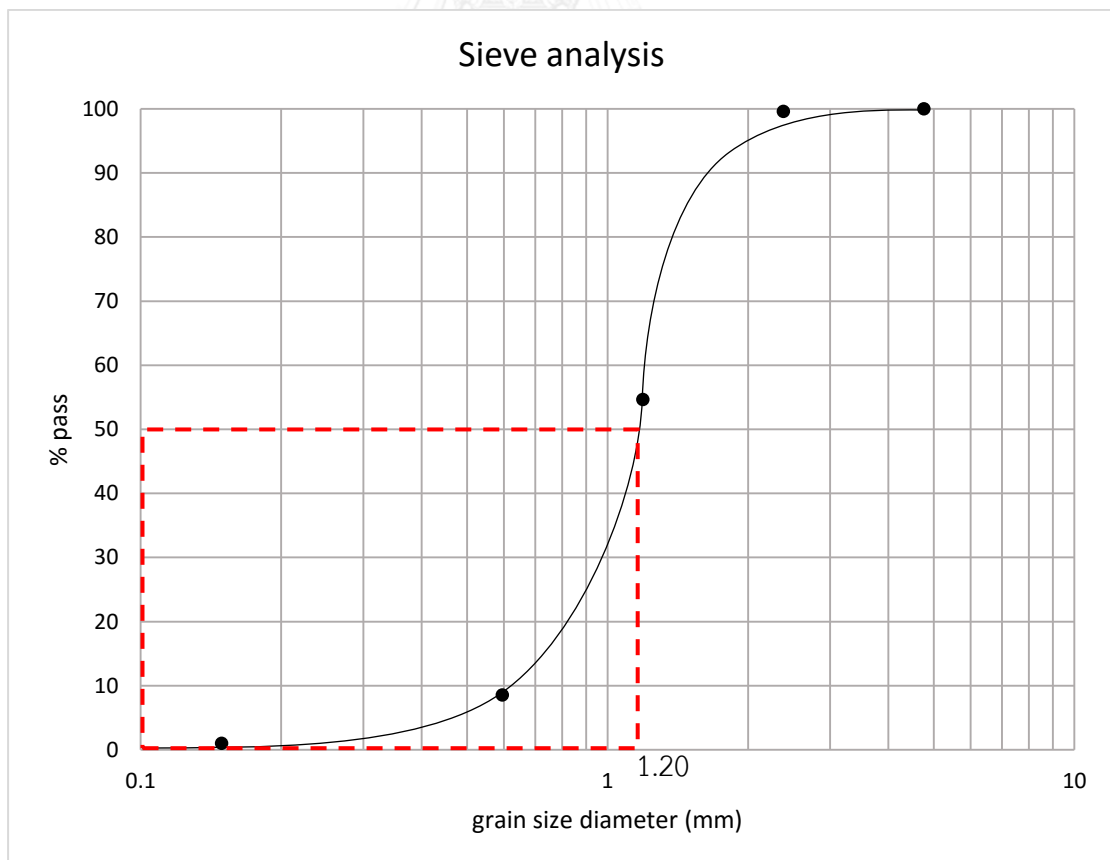




รูปที่ ก-6 ร่างจำลองการไหล

ตารางที่ ก-1 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของทราย (sieve analysis)

Screen no.	Screen size (mm)	Sample 1 : Total sand weight 494.5 g		
		Weight retained	Percent retained	
			Individual	Cumulative
4	4.76	0	0	0
8	2.38	2	0.40	0.40
16	1.19	222.4	44.97	45.37
30	0.595	227.9	46.08	91.46
50	0.297	0.4	0.08	91.54
100	0.149	36.9	7.46	99.00
Pan	0	4.9	0.99	100



รูปที่ ก-7 โค้งการกระจายขนาดของทราย (grain size distribution curve)



กรณี Q1AY1, Q2AY1 และ Q3AY1



กรณี Q1BY1, Q2BY1 และ Q3BY1



กรณี Q1CY1, Q2CY1 และ Q3CY1



กรณี Q1DY1, Q2DY1 และ Q3DY1

รูปที่ ก-8 แบบจำลองต่อม่อในกรณีระดับคานขวาง Y1



กรณี Q1AY2, Q2AY2 และ Q3AY2



กรณี Q1BY2, Q2BY2 และ Q3BY2



กรณี Q1CY2, Q2CY2 และ Q3CY2



กรณี Q1DY2, Q2DY2 และ Q3DY2

รูปที่ ก-9 แบบจำลองต่อม่อในกรณีระดับคานขวาง Y2



กรณี Q1AY3



กรณี Q1BY3



กรณี Q1CY3



กรณี Q1DY3

รูปที่ ก-10 แบบจำลองต่อม่อในกรณีอัตราการใช้ Q1 ระดับคานขวาง Y3



กรณี Q2AY3



กรณี Q2BY3



กรณี Q2CY3



กรณี Q2DY3

รูปที่ ก-11 แบบจำลองต่อม่อในกรณีอัตราการใช้ Q2 ระดับคานขวาง Y3



กรณี Q3AY3



กรณี Q3BY3



กรณี Q3CY3



กรณี Q3DY3

รูปที่ ก-12 แบบจำลองต่อม่อในกรณีอัตราการใช้ Q3 ระดับคานขวาง Y3



กรณี Q1AY4



กรณี Q1BY4

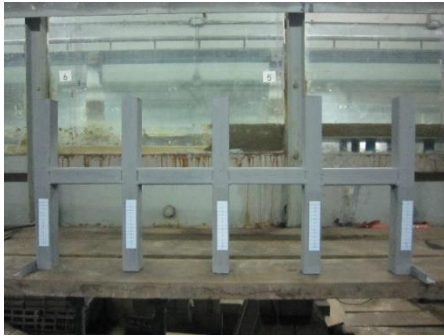


กรณี Q1CY4



กรณี Q1DY4

รูปที่ ก-13 แบบจำลองต่อม่อในกรณีอัตราการใช้ Q1 ระดับคานขวาง Y4



กรณี Q2AY4



กรณี Q2BY4



กรณี Q2CY4



กรณี Q2DY4

รูปที่ ก-14 แบบจำลองต่อม่อในกรณีอัตราการใช้ Q2 ระดับคานขวาง Y4



กรณี Q3AY4



กรณี Q3BY4



กรณี Q3CY4



กรณี Q3DY4

รูปที่ ก-15 แบบจำลองต่อม่อในกรณีอัตราการใช้ Q3 ระดับคานขวาง Y4



กรณี Q1AY5, Q2AY5 และ Q3AY5



กรณี Q1BY5, Q2BY5 และ Q3BY5



กรณี Q1CY5, Q2CY5 และ Q3CY5



กรณี Q1DY5, Q2DY5 และ Q3DY5

รูปที่ ก-16 แบบจำลองต่อม่อในกรณีระดับคานขวาง Y5

## ภาคผนวก ข

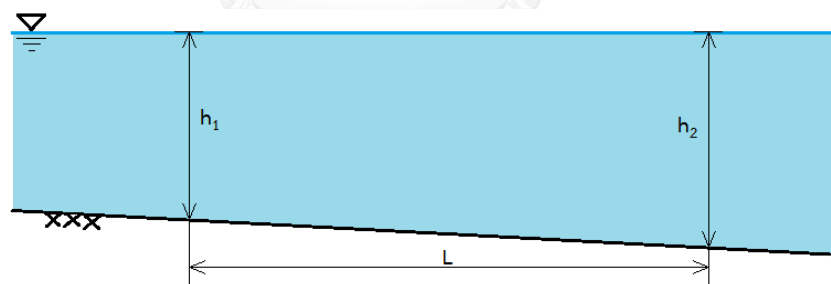
### การหาค่าเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

ขั้นตอนก่อนที่จะเริ่มทำการทดลองจำเป็นต้องทราบถึงขีดความสามารถของเครื่องมืออุปกรณ์ทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อออกแบบให้การทดลองสามารถทดสอบได้ด้วยอุปกรณ์ที่มีและได้ผลตามที่ต้องการ เช่น การออกแบบอัตราการไหล ก็ต้องรู้อัตราการสูบลูกสูงสุดของเครื่องสูบน้ำ หรือการออกแบบความลึกน้ำ ก็จำเป็นต้องรู้ระดับน้ำที่สูงที่สุดที่รางจำลองการไหลสามารถรับได้ เป็นต้น ซึ่งการทดสอบขีดความสามารถของอุปกรณ์จะอยู่ในขั้นตอนการสอบเทียบอุปกรณ์

#### ข-1 การสอบเทียบความลาดท้องน้ำ

รางจำลองการไหลสามารถปรับความลาดเอียงของท้องรางน้ำได้ด้วยแม่แรงยกซึ่งหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า และสามารถอ่านค่าความลาดเอียงจากเข็มชี้ระดับที่ชี้แม่บรรทัดมาตรเมตริกทั่วไปตั้งรูปภาคผนวกที่ ก-4 ซึ่งไม่ใช่ค่าความลาดท้องน้ำที่นำไปใช้ได้ทันที ต้องมีการสอบเทียบความลาดท้องน้ำระหว่างมาตรวัดที่มีกับความลาดชันจริงก่อน โดยทำการขังน้ำในรางจำลองการไหลเพื่อวัดระดับผิวน้ำเทียบกับระดับท้องน้ำ ซึ่งค่าที่ได้คือค่าความลึกน้ำ โดยทำการวัดทั้งหมด 10 สถานี ห่างสถานีละ 1.2 ม. จากนั้นคำนวณความลาดท้องน้ำจากสมการ

$$S_0 = \frac{h_2 - h_1}{L}$$



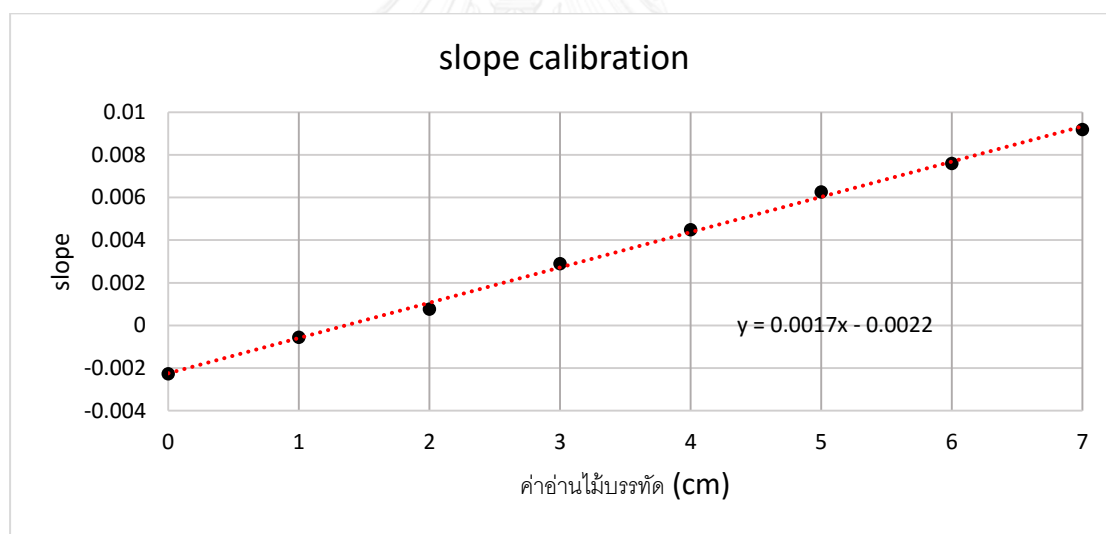
รูปที่ ข-1 ภาพประกอบสมการคำนวณความลาดท้องน้ำ

ข้อมูลและผลการสอบเทียบความลาดท้องน้ำแสดงดังตาราง ข-1 และรูปที่ ข-2



ตารางที่ ข-1 ข้อมูลการทดลองสอบเทียบความลาดท้องน้ำ

ค่าอ่านจาก ไม้บรรทัด	h										slope
	sta.1	sta.2	sta.3	sta.4	sta.5	sta.6	sta.7	sta.8	sta.9	sta.10	
0	35.0	35.0	34.9	33.2	33.2	33.4	33.5	33.3	33.0	32.6	-0.002269
1	31.9	31.7	31.3	30.8	31.1	31.4	37.7	31.7	31.6	31.4	-0.000565
2	30.0	29.8	29.7	29.3	29.7	30.2	30.8	30.9	30.9	30.8	0.000767
3	27.6	28.9	28.1	27.9	28.6	29.4	30.0	30.4	30.6	30.7	0.002901
4	35.8	36.2	36.4	36.5	37.4	38.3	39.2	39.8	40.3	40.6	0.004481
5	34.4	35.4	36.0	36.2	37.2	38.3	39.2	40.1	40.6	41.1	0.006266
6	33.7	34.6	35.2	35.6	36.8	38.1	39.4	40.4	41.1	41.8	0.007594
7	32.7	33.7	34.4	35.2	36.5	38.1	39.5	40.7	41.8	42.6	0.009190



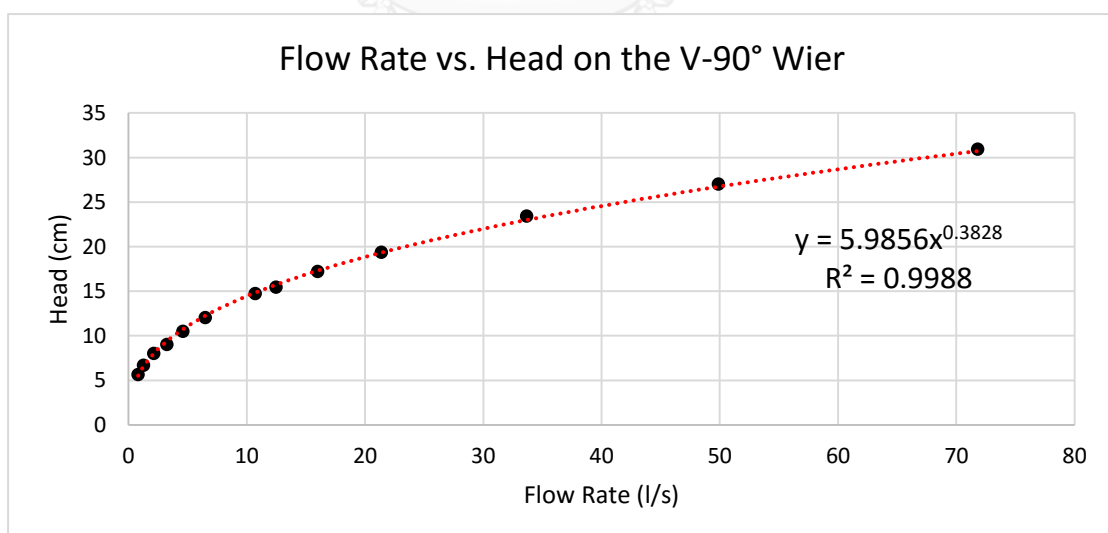
รูปที่ ข-2 ผลการสอบเทียบความลาดท้องน้ำ

## ข-2 การสอบเทียบอัตราการไหล

การสอบเทียบอัตราการไหลคือการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (Q) กับระดับน้ำเหนือสันฝายสามเหลี่ยมสันคม (H) การสอบเทียบอัตราการไหลทำได้โดย การหาค่าอัตราการไหลทำได้โดยการชั่งน้ำหนักของน้ำต่อเวลา ทำการชั่งและจับเวลาอย่างน้อย 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย ข้อมูลระดับน้ำกับอัตราการไหลที่สอบเทียบสรุปดังตารางที่ ข-2 และกราฟรูปที่ ข-3

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบอัตราการไหล

ระดับน้ำเหนือ สันฝายเฉลี่ย (ซม.)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	อัตราการไหลเฉลี่ย (ลิตร/วินาที)
5.7	20.0	24.78	0.81
6.7	20.0	15.72	1.27
8.0	20.0	9.40	2.13
9.0	20.0	6.18	3.24
10.5	20.0	4.35	4.60
12.1	50.0	7.73	6.47
14.8	50.0	4.67	10.70
15.5	50.0	4.01	12.46
17.2	100.0	6.26	15.98
19.4	100.0	4.68	21.37
23.4	200.0	5.94	33.67
27.0	200.0	4.01	49.88
31.0	200.0	2.80	71.81

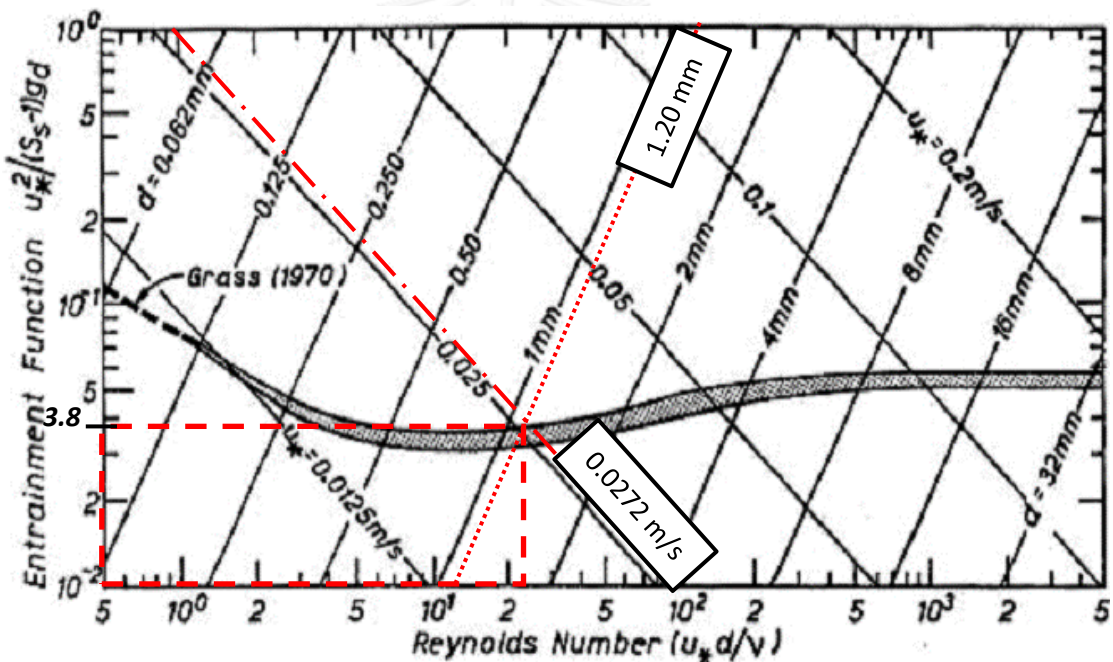


รูปที่ ข-3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระดับน้ำเหนือสันฝายที่ได้จากการสอบเทียบอัตราการไหล

### ข-3 การหาค่าการไหลที่ทำให้ตะกอนท้องน้ำเริ่มเคลื่อนที่ (initial condition)

การศึกษานี้ตั้งข้อกำหนดไว้ให้เป็นการทดลองในสภาพจะการไหลแบบไม่มีตะกอนปน (clear-water scour) แต่การที่จะเกิดความลึกลุมกัดเซาะสูงสุดได้ก็ต้องการไหลที่รุนแรง นั่นหมายถึงน้ำต้องไหลด้วยความเร็วที่สูงจนสามารถพัดพาเอาตะกอนไปกับน้ำได้ ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบให้น้ำไหลด้วยความเร็วที่มากที่สุดโดยไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ซึ่งหลักการออกแบบได้ใช้ Shield's Diagram ในการพิจารณาคำนวณ

Shield's Diagram เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉือนของการไหล ( $u_*$ ) กับขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ ( $d_{50}$ ) แสดงดังรูปที่ ข-4 จากภาพจะเห็นว่ามีเส้นโค้งแรงที่บซึ่งเป็นการศึกษาของ Shield (1916) เป็นเส้นแบ่งระหว่างการเคลื่อนหรือไม่เคลื่อนที่ของตะกอน (threshold movement) ในการทดลองนี้ก็จะใช้เส้นดังกล่าวในการพิจารณาออกแบบแบบจำลอง โดยมีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้



รูปที่ ข-4 ไดอะแกรมของชิลด์ (Shield' diagram)

- วัสดุท้องน้ำเป็นทรายมีขนาดทรายเฉลี่ย 1.20 มม. นำค่าดังกล่าวลากลงเส้นตรงขนานกับเส้นขนาดตะกอน ได้เส้นจุดในรูปที่ ข-4
- จากจุดตัดระหว่างเส้นจุดกับเส้นการทดลองของ Shield (เส้นแรงที่บ) ทำการลากเส้นขนานแกนอนตัดแกนตั้ง จะได้ค่า Entrainment Function ( $\Psi$ ) = 0.038 หรือ

$$\frac{\tau_*}{(\rho_s - \rho_w)gd} = 0.038$$

- เมื่อ  $\rho_s$  = ความหนาแน่นของวัสดุท้องน้ำเท่ากับ 2650 kg/m<sup>3</sup>  
 $\rho_w$  = ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1000 kg/m<sup>3</sup>  
 $g$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเท่ากับ 9.81 m/s<sup>2</sup>  
 $d$  = ขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำเท่ากับ 0.27 mm

- ดังนั้น จะได้หน่วยแรงเฉือนวิกฤติ ( $\tau_*$ ) = 0.188 N/m<sup>2</sup>
- คำนวณค่าความเร็วเฉือนวิกฤติของการไหลได้จาก  $u_{*c} = \sqrt{\frac{\tau_*}{\rho_w}}$
- จะได้  $u_{*c} = 0.0272$  m/s ซึ่งเมื่อลองลากเส้นดังกล่าวลงในกราฟรูปที่ ข-4 โดยลากขนานเส้นความเร็วเฉือนของการไหล ได้เส้นประจุด และจะเห็นได้ว่าเส้นจุดกับเส้นประจุดตัดกันที่จุดบนเส้นผลการทดลองของ Shield พอดี
- ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's roughness coefficient,  $n$ ) สามารถคำนวณได้จากการทดสอบก่อนเริ่มการทดลอง พบว่า  $n = 0.015$  ซึ่งใกล้เคียงกับผลการศึกษางานที่ผ่านมาของ ธรรมวัฒน์ การุณธนกุล (2541) พบว่าที่ขนาดทรายเดียวกัน ค่า  $n = 0.014$  แต่เนื่องจากรางจำลองการไหลถูกใช้งานมานาน ค่าความขรุขระของผนังรางเพิ่มขึ้น ในการทดลองนี้จึงใช้ค่า  $n = 0.015$
- ทำการปรับเปลี่ยนค่าความลึกน้ำ ( $y$ ) เพื่อ
  - (1) คำนวณค่าความลาดท้องน้ำ ( $S_0$ ) จากสมการ  $u_* = \sqrt{gyS_0}$
  - (2) คำนวณค่าอัตราการไหลด้วยสมการของแมนนิง  $V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_0^{1/2}$
  - (3) คำนวณค่าฟรูดนัมเบอร์  $Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$
- โดยจากตารางที่ได้ เลือกเอาที่ผลการคำนวณได้ค่าความเร็วการไหลประมาณ 16, 25 และ 35 ซม. นำมาใช้เป็นค่าอัตราการไหลสำหรับการทดลอง ซึ่งค่าการไหลสำหรับการทดลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ ข-3

ตารางที่ ข-3 สรุปผลการคำนวณค่าเริ่มต้นการไหล

Q (l/s)	y (m)	$u_*$ (m/s)	$S_0$ (m/m)	V (m/s)	Fr
30.7	0.16	0.0272	0.000471	0.32	0.25
46.0	0.25	0.0272	0.000302	0.30	0.19
60.9	0.35	0.0272	0.000215	0.29	0.15

ภาคผนวก ค  
 ภาพถ่ายผลการศึกษาระณีต่างๆ

- กรณี O1AY1

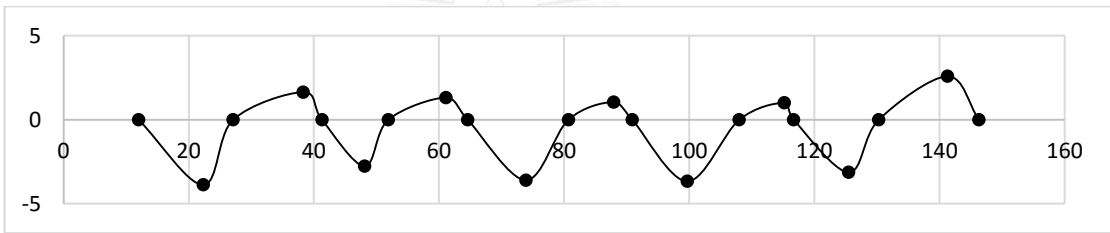


มุมหน้าฝั่งซ้าย

มุมหน้าฝั่งขวา

มุมหลังฝั่งซ้าย

มุมหลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเศษรอบต่อม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี O1AY2

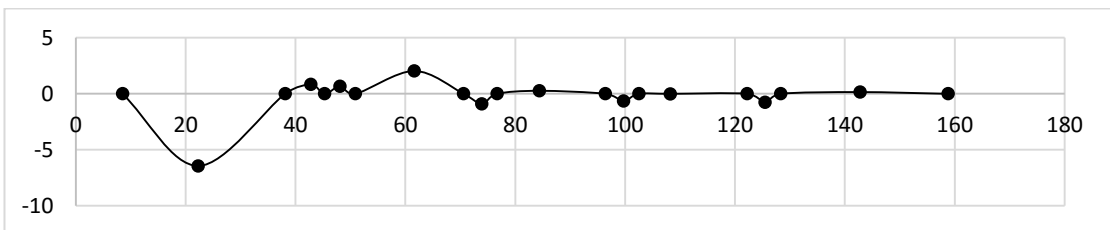


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเศษรอบต่อม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

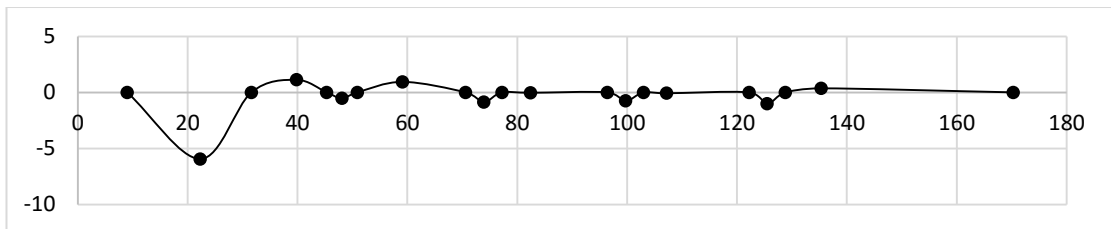
- กรณี Q1AY3

หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเศษรอบต่อม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

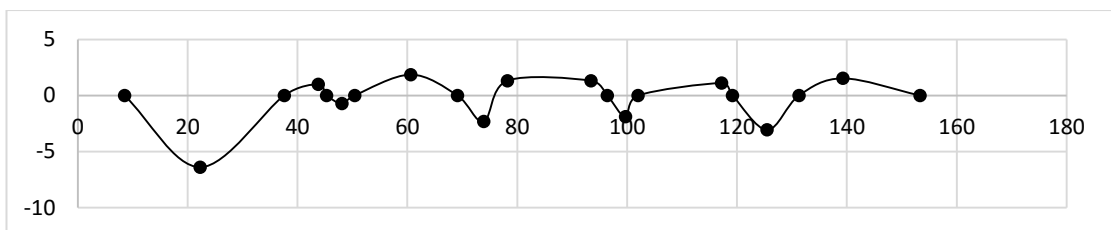
- กรณี Q1AY4

หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเศษรอบต่อม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q1BY1

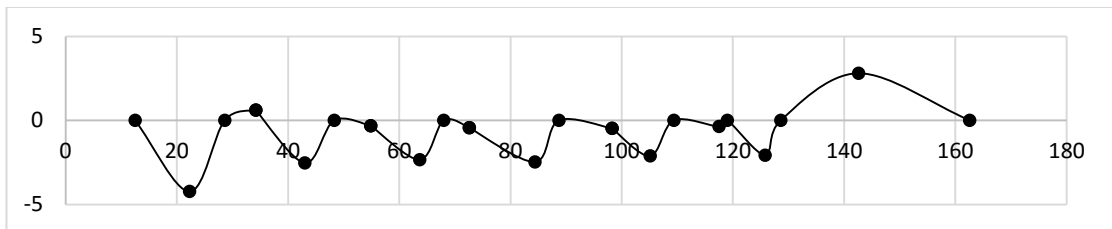


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเชื้อรอบต่อม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q1BY2

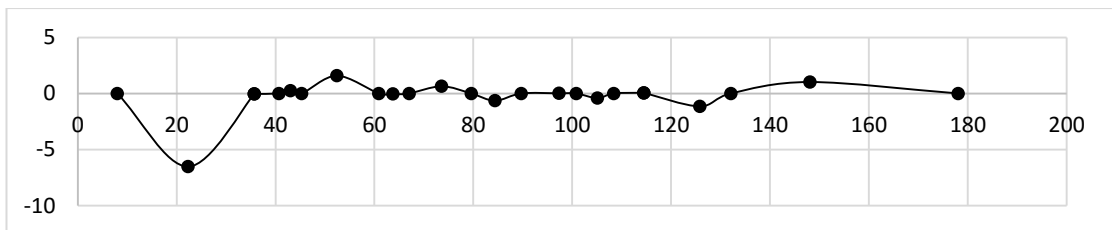


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเชื้อรอบต่อม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q1BY3

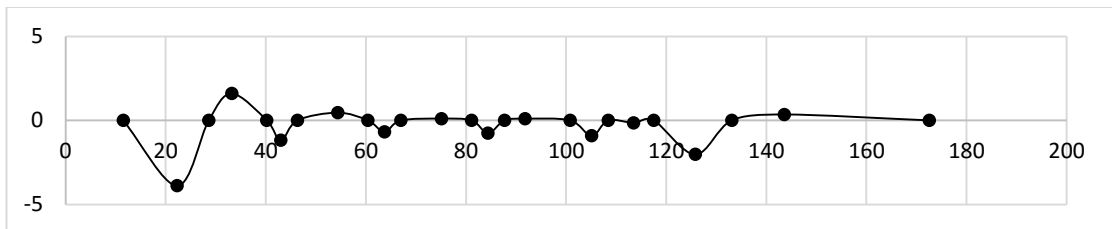


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลัง

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q1BY4

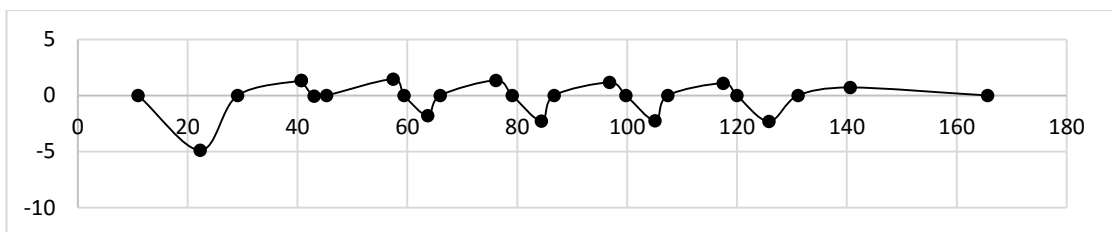


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)



- กรณี Q1CY1

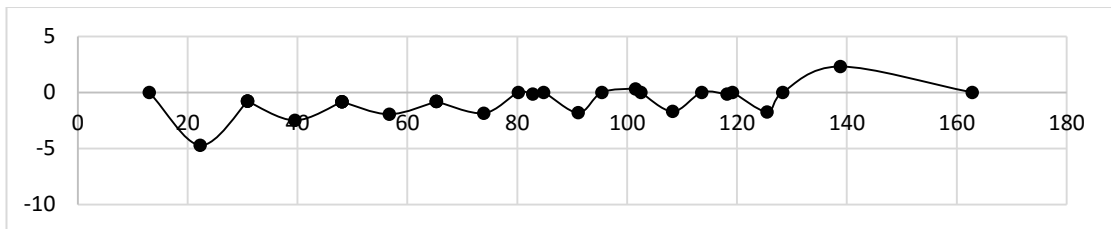


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q1CY2

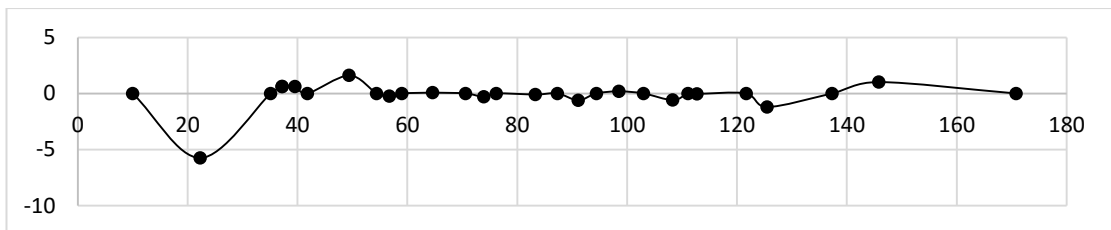


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q1CY3

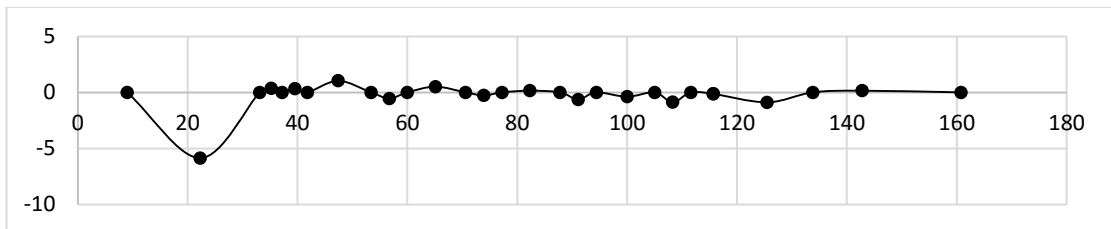


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเชื้อรอบต่อม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q1CY4

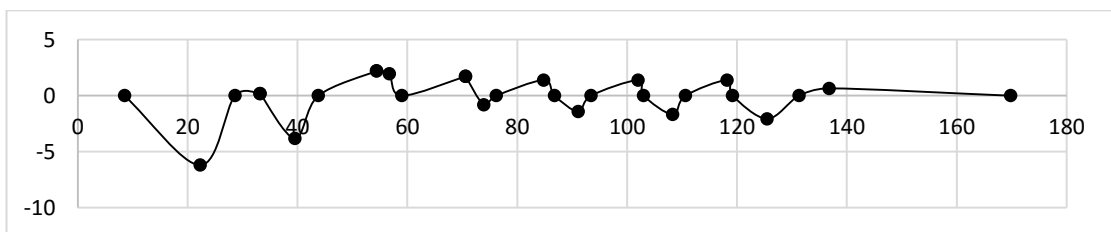


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเชื้อรอบต่อม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q1CY5

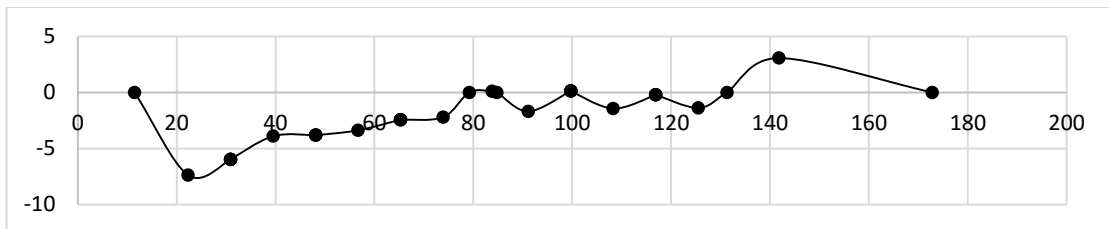


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หน้าฝั่งซ้าย

หลัง



ภาพตัดหลุมกักเศษรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q1DY1

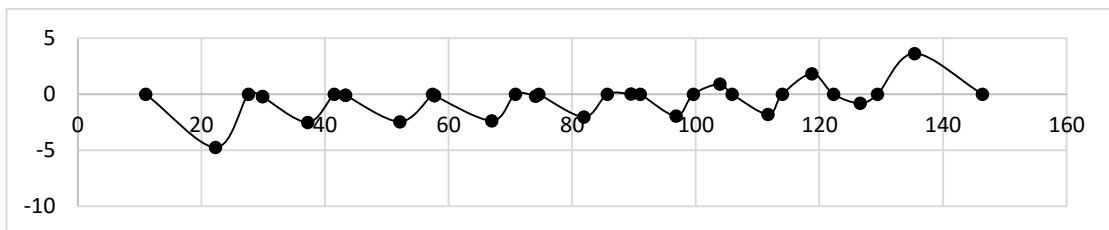


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเศษรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q1DY2

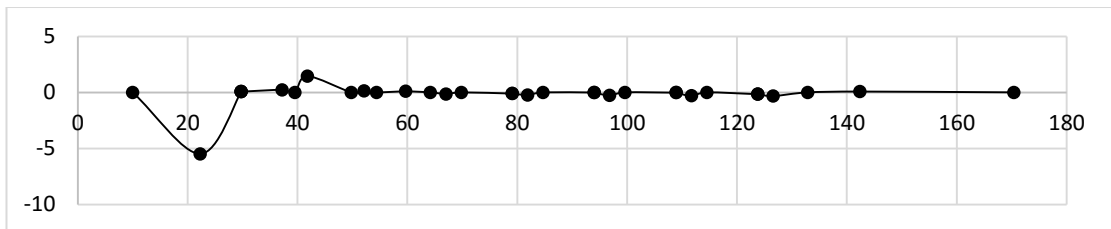


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q1DY3

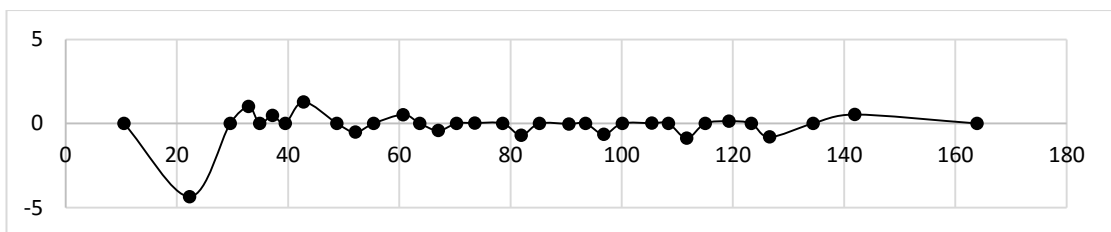


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q1DY4

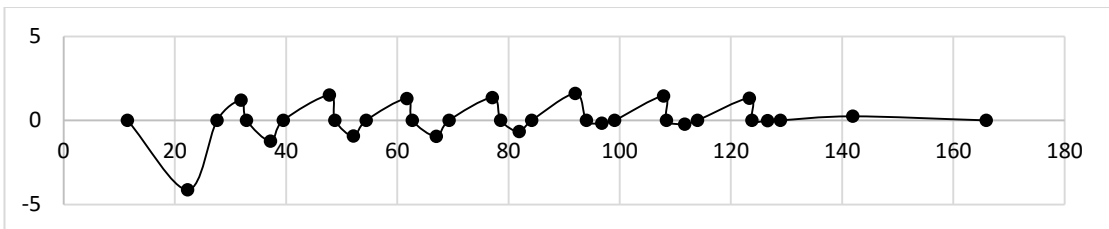


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

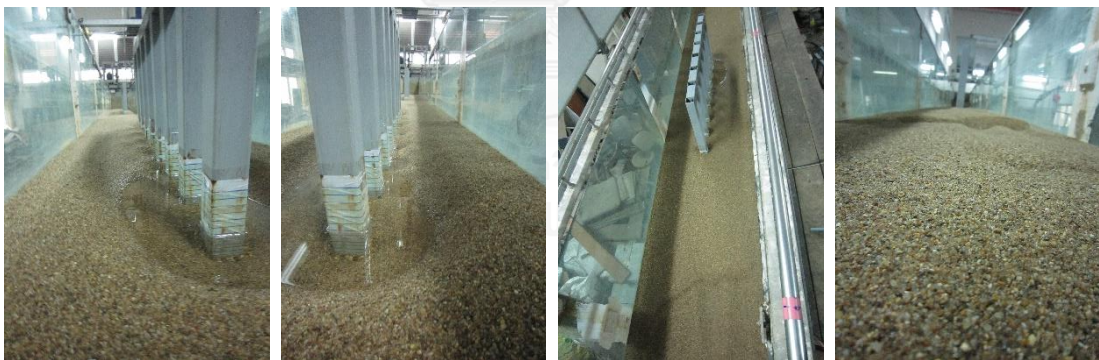
หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเชื้อรอบต่อม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q1DY5

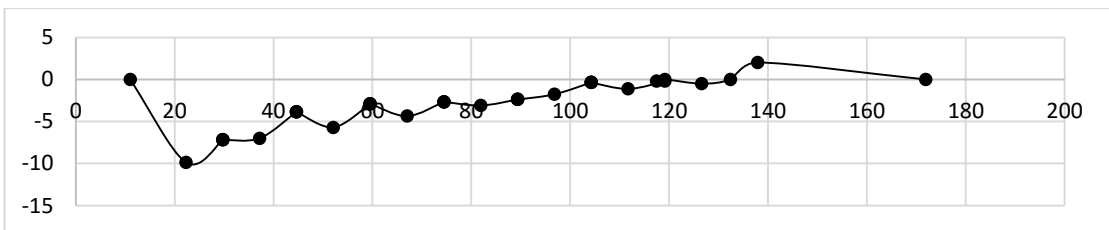


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลัง

หลัง



ภาพตัดหลุมกักเชื้อรอบต่อม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q2AY1

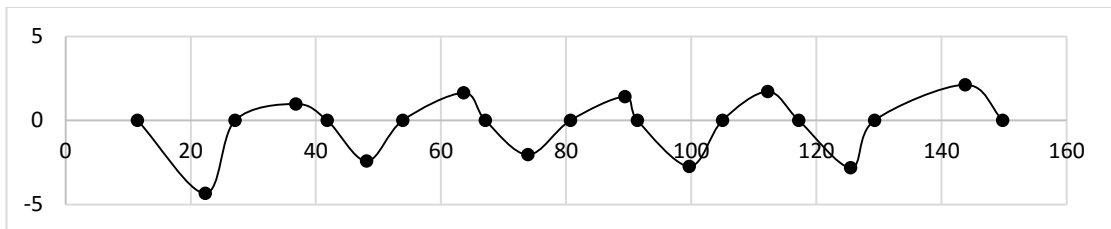


หน้าฝั่งซ้าย

หลังฝั่งซ้าย

หลัง

หลัง



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q2AY2

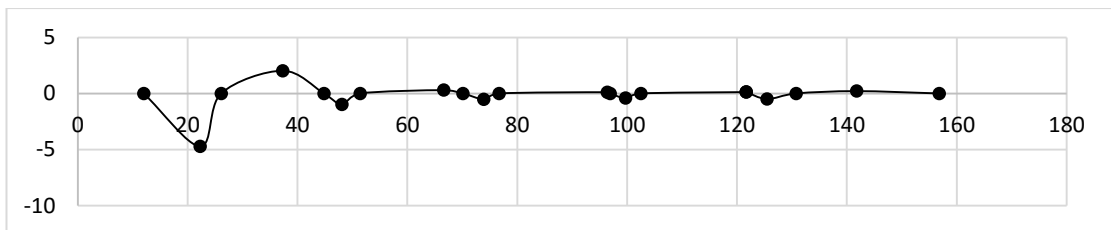


หน้าฝั่งซ้าย

หลัง

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q2AY3

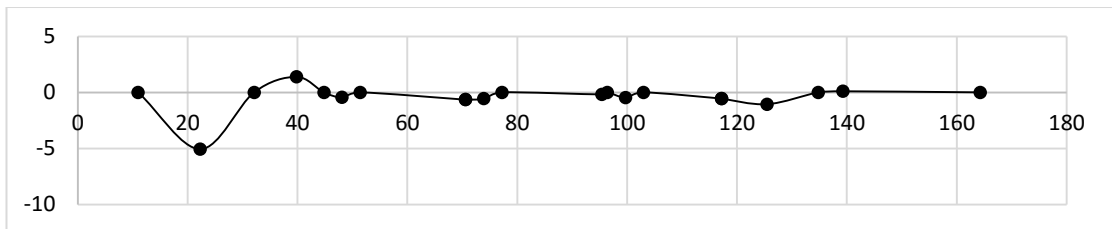


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

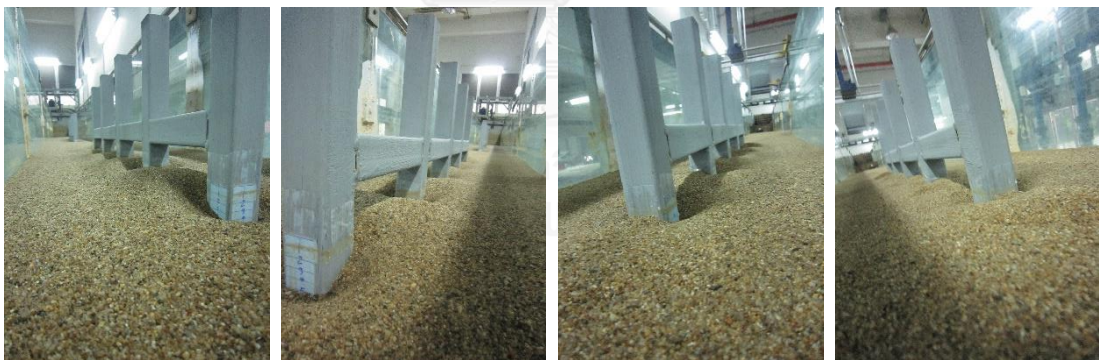
หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเศษรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q2AY4

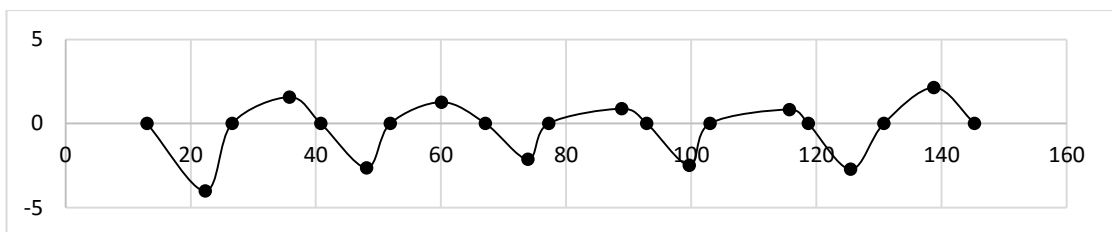


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเศษรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q2AY5

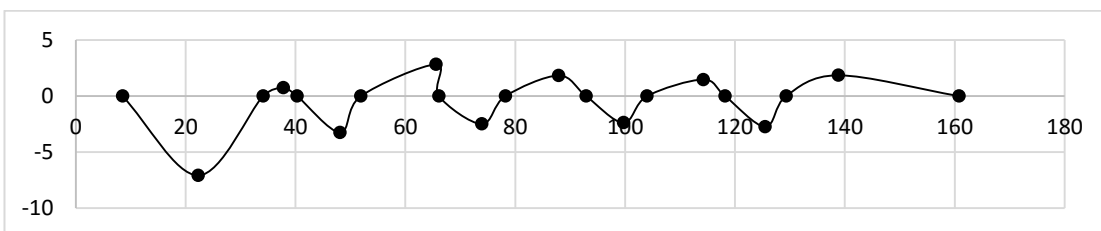


ตำแหน่งกล้องวิดีโอ

หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย



ภาพตัดหลุมกักตะกาศรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q2BY1

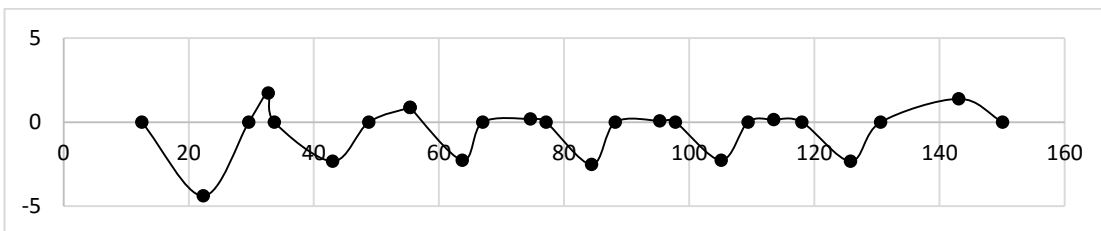


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักตะกาศรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)



- กรณี Q2BY2

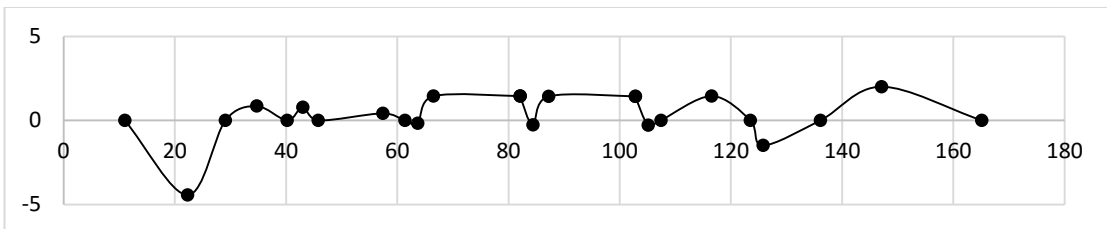


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบต่อม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q2BY3

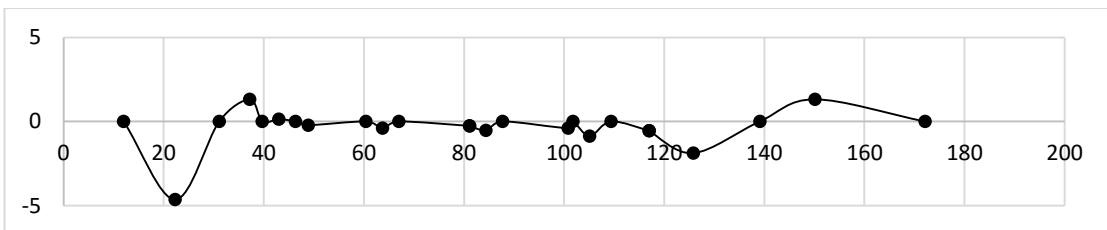


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบต่อม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q2BY4

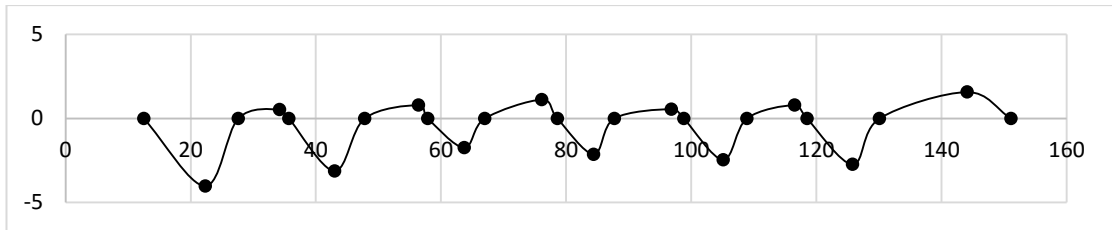


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลัง

หลัง



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q2BY5

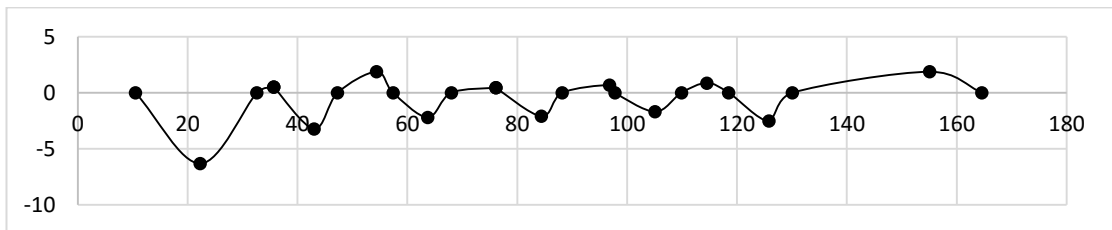


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

ข้างฝั่งซ้าย

ข้างฝั่งซ้าย



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q2CY1

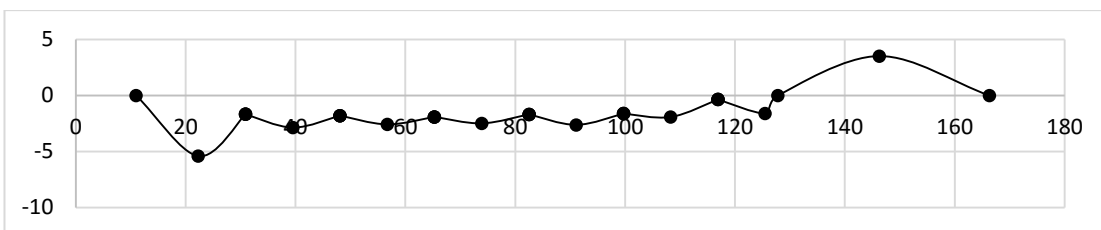


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลัง

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q2CY2

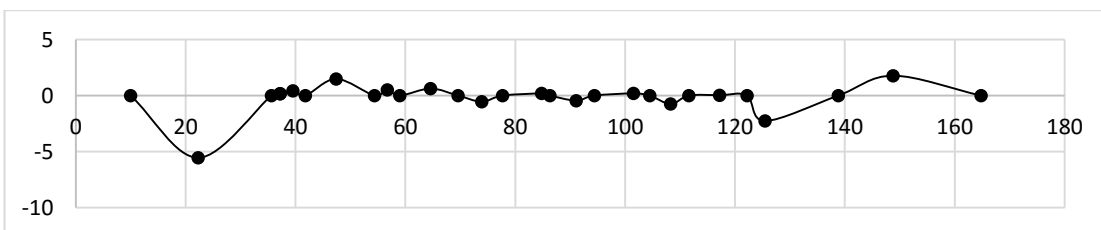


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q2CY3

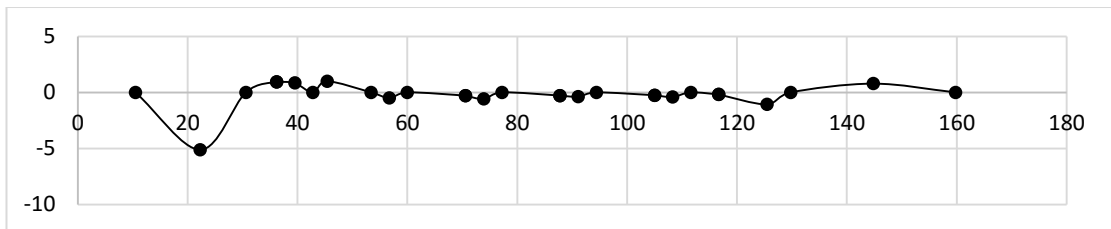


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเศษรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q2CY4

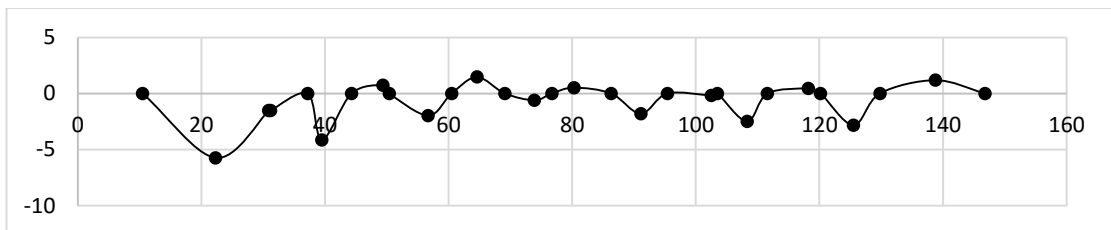


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หน้าฝั่งขวา

หน้าฝั่งซ้าย



ภาพตัดหลุมกักเศษรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q2DY1

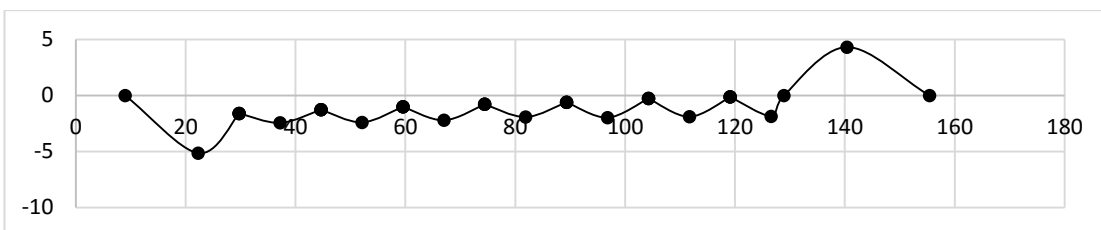


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

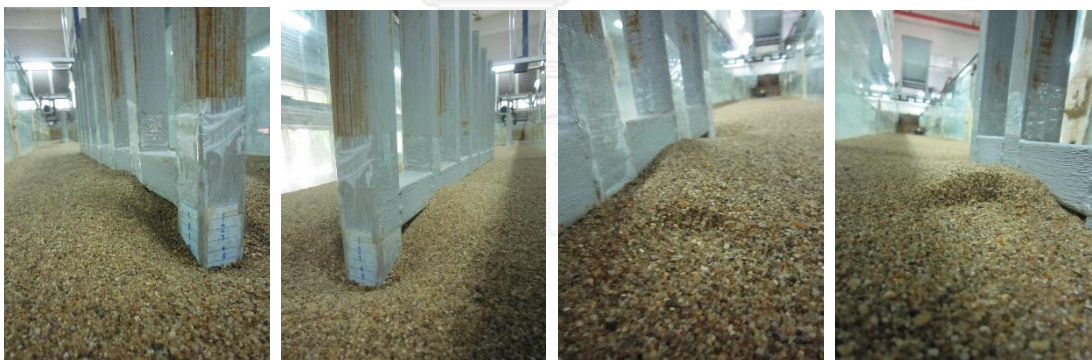
หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเชื้อรอบต่อม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q2DY2

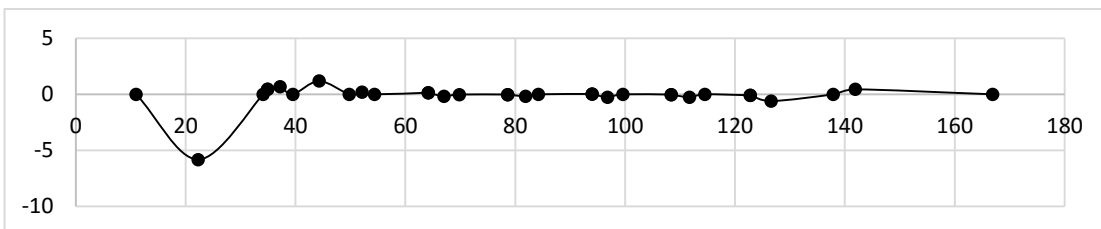


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเชื้อรอบต่อม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q2DY3

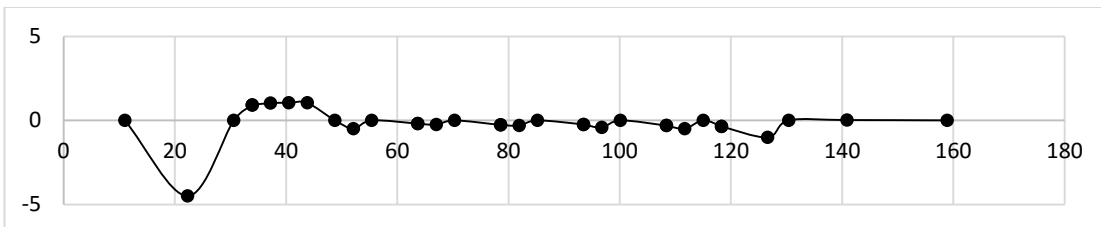


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q2DY4

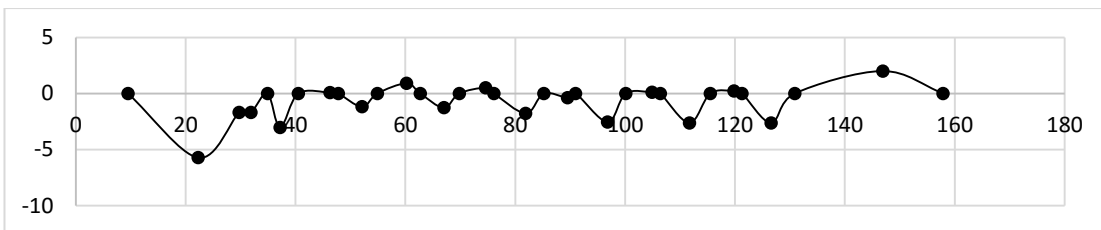


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลัง

หลัง



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q3AY1

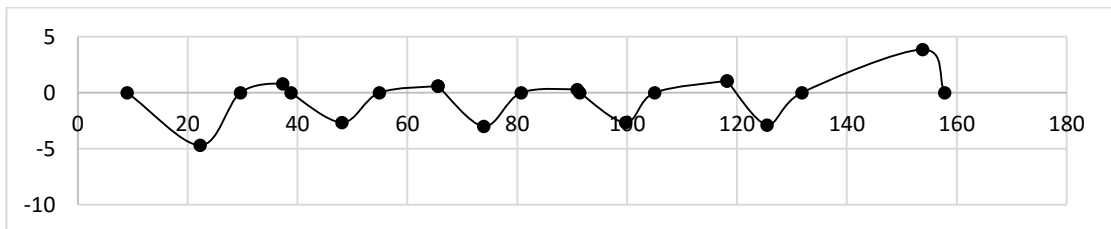


หน้าฝั่งซ้าย

หน้า

หลัง

หลัง



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q3AY2

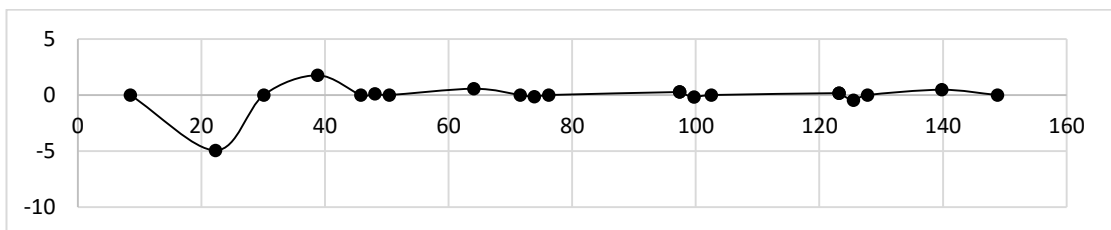


บน

หน้าฝั่งซ้าย

หน้า

หลังฝั่งซ้าย



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q3AY3

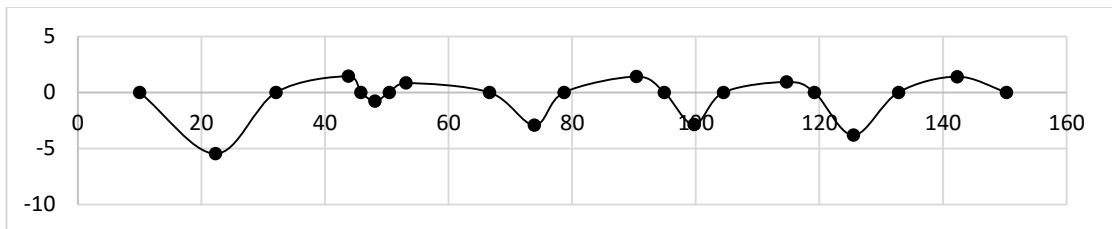


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งขวา

หลัง



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q3AY4

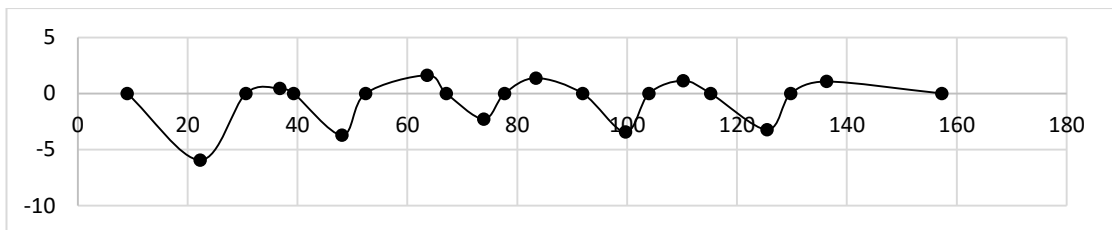


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)



- กรณี Q3AY5

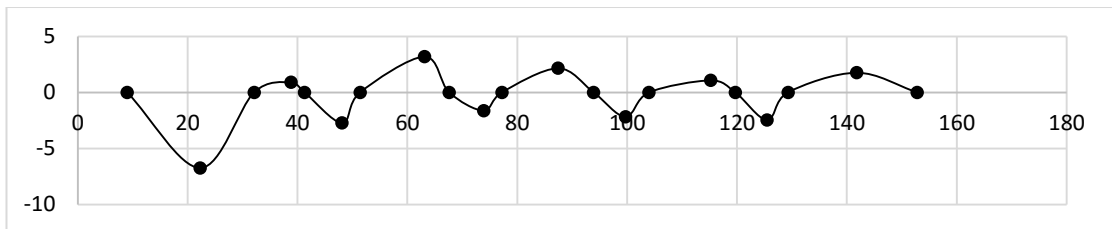


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลัง

หลัง



ภาพตัดหลุมกักเศษรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q3BY1

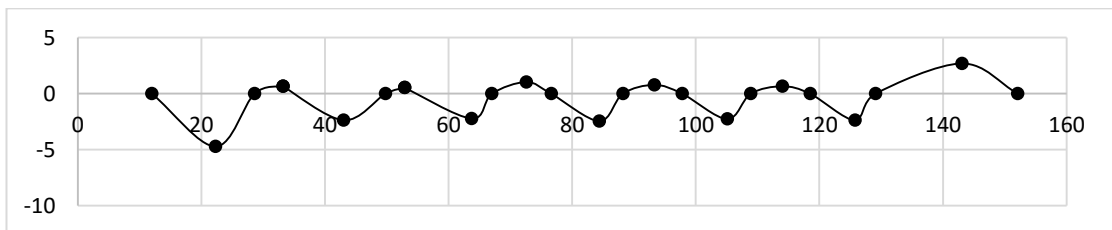


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเศษรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q3BY2

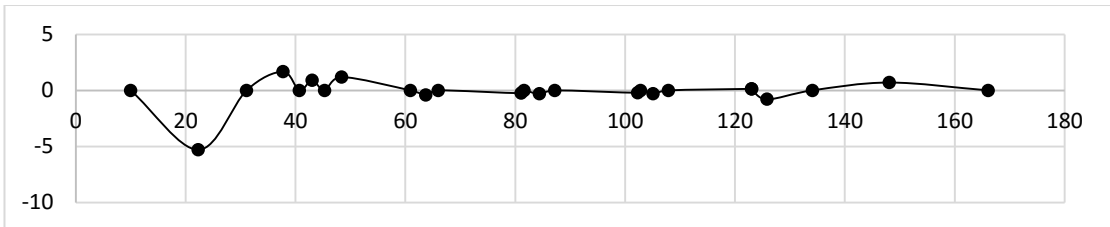


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเศษรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q3BY3

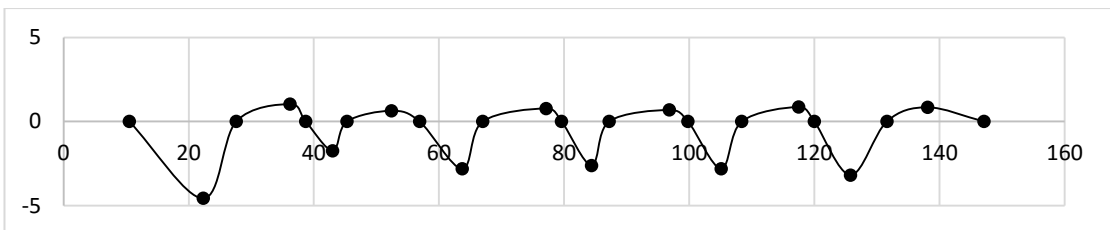


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเศษรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q3BY4

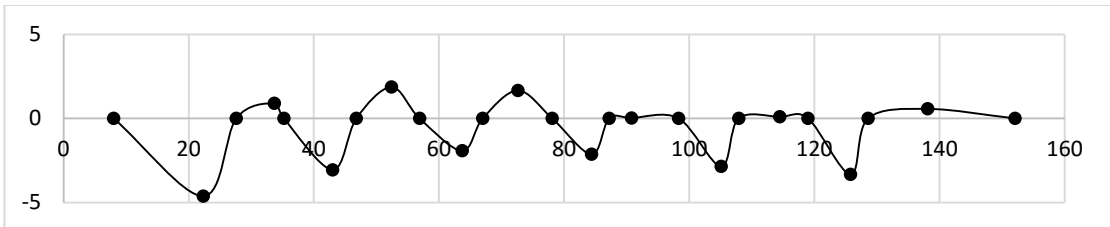


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q3BY5

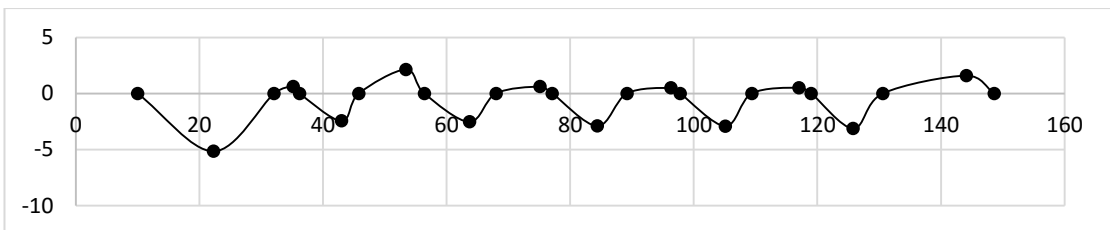


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลัง

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี O3CY1

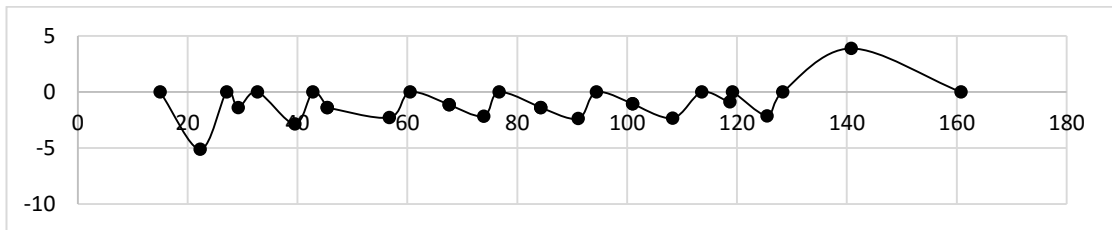


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเศษรอบต่อม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี O3CY2

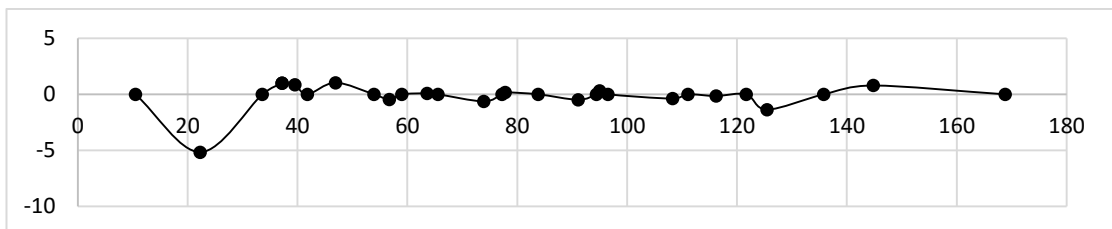


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเศษรอบต่อม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q3CY3

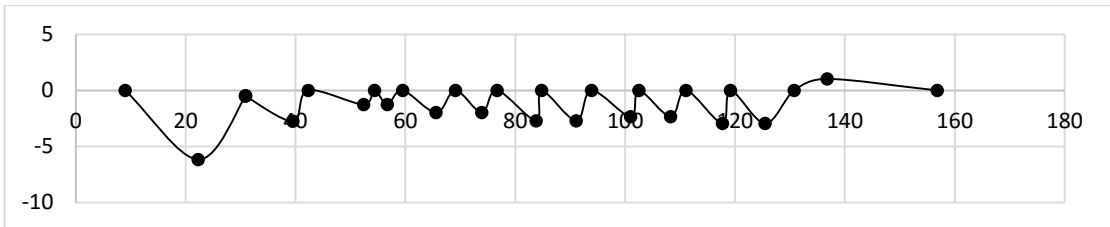


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเศษรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q3CY4

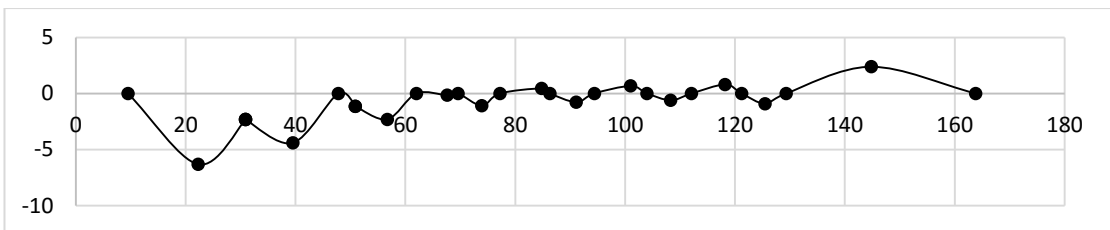


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

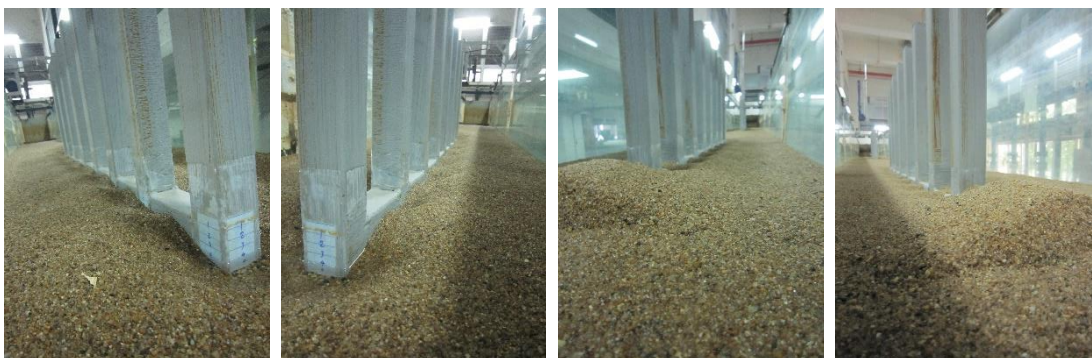
หลังฝั่งซ้าย

หลัง



ภาพตัดหลุมกักเศษรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q3DY1

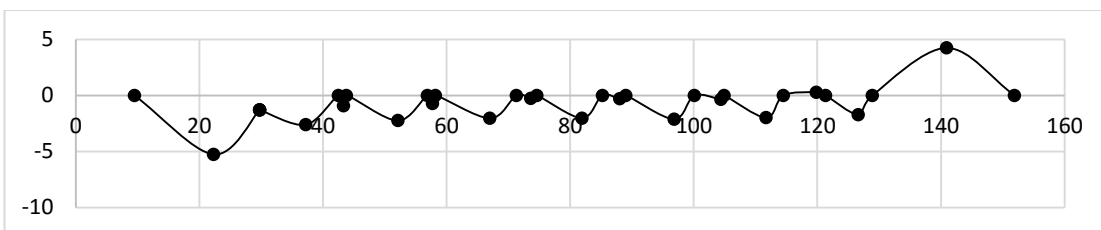


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเชื้อรอบต่อม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q3DY2

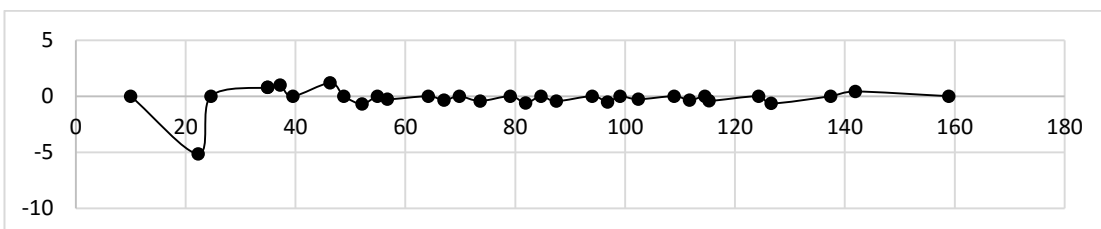


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเชื้อรอบต่อม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q3DY3

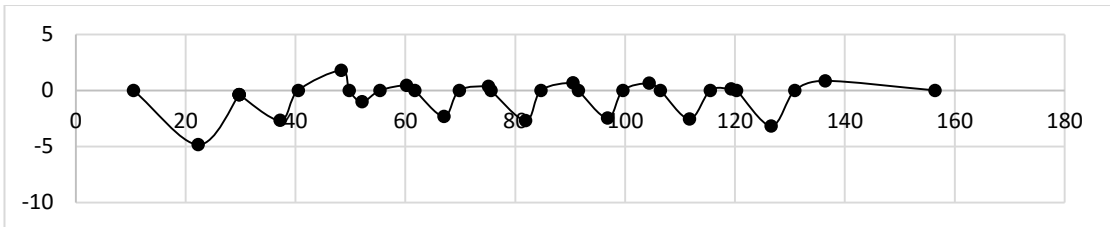


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q3DY4

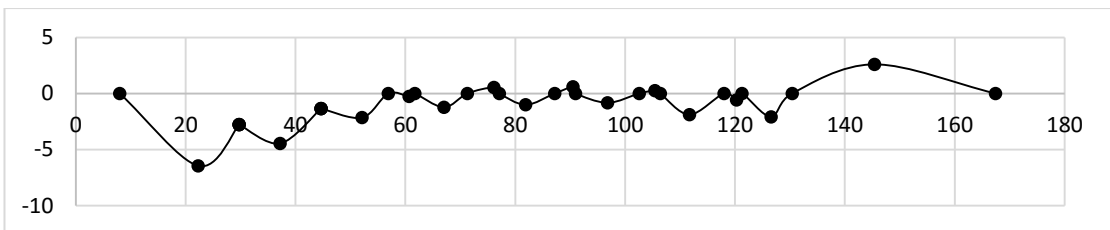


หน้าฝั่งซ้าย

หน้าฝั่งขวา

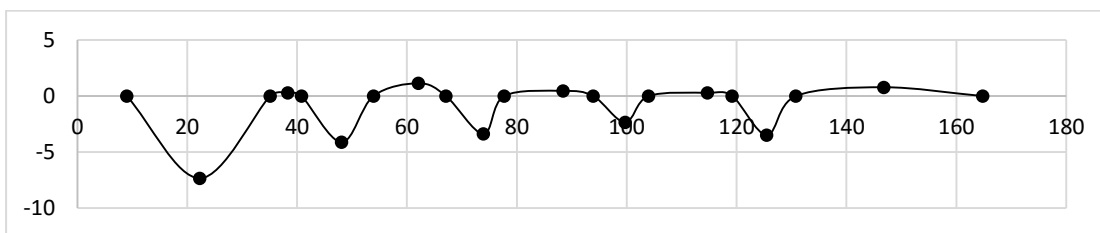
หลังฝั่งซ้าย

หลังฝั่งขวา



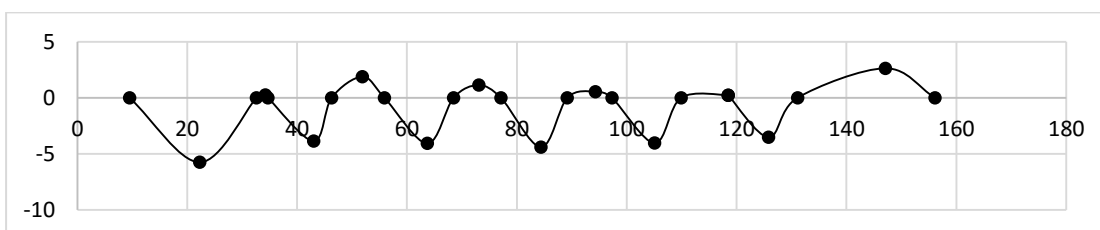
ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.)

- กรณี Q1AY5 ไม่ได้ทำการบันทึกภาพผลการทดลอง



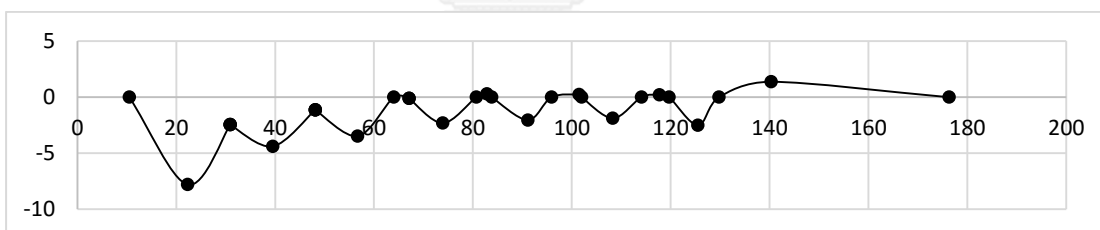
ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.) กรณี Q1AY5

- กรณี Q1BY5 ไม่ได้ทำการบันทึกภาพผลการทดลอง



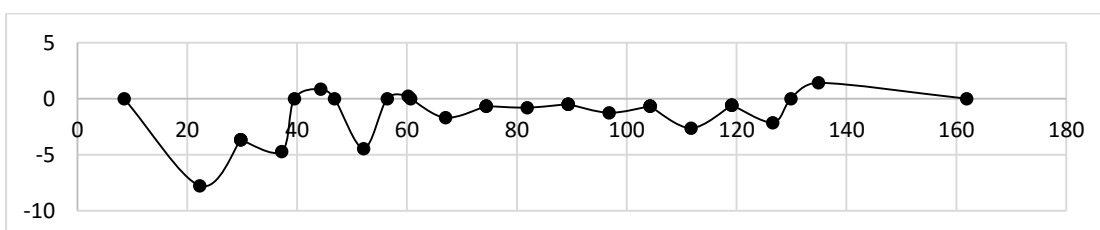
ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.) กรณี Q1BY5

- กรณี Q2CY5 ไม่ได้ทำการบันทึกภาพผลการทดลอง



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.) กรณี Q2CY5

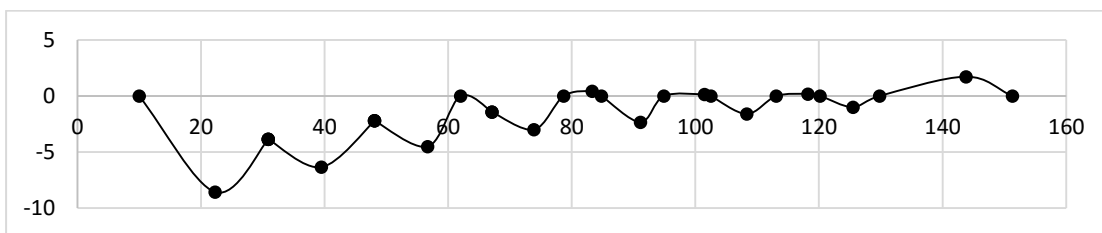
- กรณี Q2DY5 ไม่ได้ทำการบันทึกภาพผลการทดลอง



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.) กรณี Q2DY5

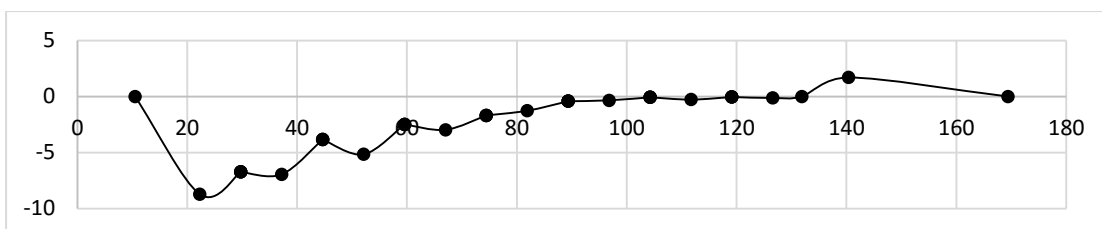


- กรณี Q3CY5 ไม่ได้ทำการบันทึกภาพผลการทดลอง



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.) กรณี Q3CY5

- กรณี Q3DY5 ไม่ได้ทำการบันทึกภาพผลการทดลอง



ภาพตัดหลุมกักเซาะรอบตอม่อแต่ละต้น (หน่วย: ซม.) กรณี Q3DY5

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธราดล เพชรประไพ เกิด 24 กรกฎาคม 2533 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ. โยธา) ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2556 และเข้าศึกษาต่อปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

