



บทที่ 3

การทดลองและผลการทดลอง

เพื่อให้การทดลองสามารถดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง จะต้องจัดเตรียมและตรวจสอบอุปกรณ์ที่ใช้เก็บวัดให้มีความพร้อม รวมทั้งออกแบบเงื่อนไขและขั้นตอนการดำเนินงานให้มีความเหมาะสมกับลักษณะของปัญหา เพื่อใช้เป็นแนวทางปฏิบัติงานอย่างมีระบบ นำมาซึ่งผลการทดลองที่ได้จากการใช้แบบจำลองชลศาสตร์ทางกายภาพ

3.1 อุปกรณ์วัดและเก็บบันทึกข้อมูลการทดลอง

1) เครื่องมือวัดระดับ (point gauge) ติดตั้งบนรางเลื่อนลูกล้อวิ่งบนรางน้ำเปิด เพื่อใช้วัดระดับท้องน้ำและผิวน้ำ ณ ตำแหน่งพื้นที่การทดลองที่ต้องการ

2) ฝ่ายสามเหลี่ยมสันคม (90° V-notch weir) ติดตั้งทางด้านท้ายน้ำของรางน้ำ เพื่อใช้วัดอัตราการไหลของน้ำ โดยการอ่านค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย (H) ผ่านทางมานอมิเตอร์ (manometer) และนำไปคำนวณอัตราการไหลจากสมการ $Q = 0.045H^{2.5}$ โดยที่ Q คือ อัตราการไหลในหน่วย ลิตรต่อวินาที และ H คือ ระดับน้ำเหนือสันฝายในหน่วย เซนติเมตร ซึ่งสอบเทียบค่า โดย นัฐวุฒิ พัดไทสง (2006) แสดงในภาคผนวก ข-3

3) อุปกรณ์เก็บและบันทึกภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหวเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมการไหล และกระบวนการกัดเซาะและตกตะกอนรอบแบบจำลองตอม่อสะพาน ติดตั้งที่ด้านข้างและด้านบนของรางน้ำเปิด ประกอบด้วย กล้องถ่ายภาพนิ่ง กล้องวิดีโอถ่ายภาพเคลื่อนไหว ชุดอุปกรณ์แปลงสัญญาณภาพและเสียง ชุดอุปกรณ์บันทึกและเก็บภาพและเสียง

3.2 การออกแบบการทดลอง

1) แบบจำลองต่อม่อสะพาน (pier model)

แบบจำลองต่อม่อที่ออกแบบไว้ใช้ในการศึกษามีรูปแบบที่เป็นเสาเข็มกลุ่ม ใช้ระยะห่างระหว่างเสาเข็มเป็น 2 เท่าของขนาดเสาเข็มทุกกรณีศึกษา มีการปรับเอียงของเสาเข็มต้นหน้า 3 ระนาบ คือ ปรับเอียงในระนาบเดียวกับแนวการไหล ($\alpha = 0^\circ$) ปรับเอียงในระนาบทแยงมุม 45° กับแนวการไหล ($\alpha = 45^\circ$) และปรับเอียงในระนาบตั้งฉากกับแนวการไหล ($\alpha = 90^\circ$) ในแต่ละระนาบมีการเอียงจากแนวตั้ง $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ และ 20° ดังกล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.4 ซึ่งขนาดและรายละเอียดต่างๆ ของแบบจำลองแสดงไว้ในภาคผนวก ก-2 รวมแบบจำลองที่จะใช้ทุกกรณีศึกษาดังตาราง 3-1

ตาราง 3-1 แบบจำลองที่จะใช้ทุกกรณีศึกษา จำนวน 15 ตัว

รูปแบบของแบบจำลอง	ชื่อเรียกแบบจำลอง	มุมเอียง	จำนวนอัตราการไหล
กรณีที่ 1 เสาเข็มเอียงในระนาบแนวเดียวกับทิศทางการไหล ($\alpha = 0^\circ$)	A1	0°	12
	B1	5°	12
	C1	10°	12
	D1	15°	8
	E1	20°	8
กรณีที่ 2 เสาเข็มเอียงในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล ($\alpha = 45^\circ$)	A2	0°	12
	B2	5°	12
	C2	10°	12
	D2	15°	12
	E2	20°	8
กรณีที่ 3 เสาเข็มเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล ($\alpha = 90^\circ$)	A3	0°	12
	B3	5°	12
	C3	10°	12
	D3	15°	12
	E3	20°	12

2) วัสดุท้องน้ำ

ทรายที่ใช้จำลองเป็นวัสดุท้องน้ำเป็นทรายละเอียดขนาดสม่ำเสมอเฉลี่ย (d_{50}) 0.27 มม. มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 และค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's roughness coefficient, n) เท่ากับ 0.012 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของเม็ดทรายในภาคผนวก ก-4

3) สภาพการไหลของน้ำ

ในการศึกษาถึงอิทธิพลของเสาเข็มเอียงต่อความลึกกักตื้นของเสาเข็มกลุ่ม ในแต่ละกรณีศึกษา จะเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลจำนวน 12 อัตราการไหล ยกเว้นกรณีศึกษา D1, E1 และ E2 จะเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลจำนวน 8 อัตราการไหล (เนื่องจากเสาเข็มต้นที่เอียงจะไปชนกับเสาเข็มต้นถัดไป ฉะนั้นเสาเข็มที่เอียงในกรณีศึกษาดังกล่าวจึงต้องมีขนาดสั้นกว่า ทำให้ไม่สามารถทดลองที่อัตราการไหลในค่าที่สูงกว่านั้นได้ เพราะจะทำให้แบบจำลองจมอยู่ใต้น้ำ) ค่าความลึกการไหล (y) และความลาดชันของรางน้ำ (S_o) แต่ละอัตราการไหลโดยประมาณ ได้จากการคำนวณเบื้องต้นภายใต้เงื่อนไขการไหลที่น้ำไม่มีตะกอนปน (clear-water, $U_c < U_{c0}$) โดยพิจารณาจากไดอะแกรมของชิลด์ (Shield's diagram) เป็นการไหลแบบไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา (steady flow) ในสภาวะการไหลต่ำกว่าวิกฤต (subcritical flow) และให้สอดคล้องกับค่าฟรูดนัมเบอร์ที่จะพยายามให้มีค่าคงที่ทุกการทดลอง เพื่อละอิทธิพลของค่าความเร็วการไหล โดยมีการแก้ระบบสมการ ดังนี้

$$1) \text{ สมการการไหลต่อเนื่อง} \quad Q = VA$$

$$2) \text{ สมการหาค่าฟรูดนัมเบอร์} \quad Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$$

$$3) \text{ สมการของแมนนิง} \quad V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2}$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหล, V คือ ความเร็วการไหลเฉลี่ย, A คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล, y คือ ความลึกการไหล, Fr คือ ค่าฟรูดนัมเบอร์, g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, n คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง, R คือ รัศมีชลศาสตร์ และ S_f คือ ความลาดเอียงเส้นพลังงาน

แสดงรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ข-1 และ ข-2

ดังนั้น จึงสามารถแบ่งการศึกษานี้ออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 : ใช้เสาเข็ม 2 ต้น เป็นแบบจำลองต่อม่อ โดยเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของเสาเข็มต้นหน้า 5 มุม ตั้งแต่ตั้งตรง จนถึง 20° ในทิศทางเดียวกับการไหล มีระยะห่างระหว่างเสาเข็ม $G = 2D$ เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม เปลี่ยนแปลงอัตราการไหล 12 อัตราการไหล ในกรณี A1, B1 และ C1 และเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล 8 อัตราการไหล ในกรณี D1 และ E1

ส่วนที่ 2 : ใช้เสาเข็ม 3 ต้น เป็นแบบจำลองต่อม่อ โดยเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของเสาเข็มต้นหน้า 5 มุม ตั้งแต่ตั้งตรง จนถึง 20° ในทิศทางทแยงมุมกับทิศทางการไหล มีระยะห่างระหว่างเสาเข็ม $G = 2D$ เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม เปลี่ยนแปลงอัตราการไหล 12 อัตราการไหลในกรณี A2, B2, C2 และ D2 และเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล 8 อัตราการไหล ในกรณี E2

ส่วนที่ 3 : ใช้เสาเข็ม 3 ต้น เป็นแบบจำลองต่อม่อ โดยเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของเสาเข็มต้นหน้า 5 มุม ตั้งแต่ตั้งตรงถึง 20° ในทิศทางตั้งฉากกับการไหล มีระยะห่างระหว่างเสาเข็ม $G = 2D$ เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม พร้อมทั้งเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล 12 อัตราการไหล

ดังนั้นในการศึกษานี้ทำการทดลองทั้งสิ้นจำนวน 168 การทดลอง ดังตาราง 3-2

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมการก่อนการทดลอง

1) เสริมระดับท้องรางน้ำเดิมให้สูงขึ้นเท่ากับระดับความหนาของทรายที่จะใช้เป็นวัสดุท้องน้ำ โดยใช้แผ่นอะคริลิกส์ ณ ตำแหน่งต้นน้ำและท้ายน้ำของรางน้ำ เว้นระยะประมาณ 3 เมตร เพื่อเติมทรายในตำแหน่งที่ใช้ทดลอง

2) เติมทรายขนาด d_{50} เท่ากับ 0.27 มม. ที่มีการจัดเตรียมไว้ก่อนแล้วในห้องปฏิบัติการ ลงในท้องรางน้ำที่เว้นไว้จากการยกกระดัดด้วยแผ่นอะคริลิกส์ และปรับผิวทรายให้เรียบแบบไม่บดอัด

3) ติดตั้งเครื่องมือวัดระดับ (point gauge) เข้ากับภาคติดล้อเลื่อน

4) ปรับค่าความลาดชันของท้องรางน้ำเปิดให้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณความลาดชันท้องน้ำในสถานะเงื่อนไขเริ่มต้นของสถานะสมดุล

5) เปิดวาล์วของรางน้ำเปิด ปล่อยให้รางน้ำเปิดอย่างช้าๆ จนได้อัตราการไหล (Q) ที่ต้องการตามการคำนวณเบื้องต้นในแต่ละการทดลอง โดยใช้ฝายสันคมรูปตัววีวัดอัตราการ

ไหลของน้ำ พร้อมทั้งปรับระดับยกบานประตูท้ายน้ำ ให้ได้ความลึกการไหลเข้าสู่แบบจำลอง (approach depth) ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ และบันทึกค่า

6) ติดตั้งกล้องวีดีโอเพื่อบันทึกข้อมูลการกัดเซาะและลักษณะการไหลของน้ำ

3.3.2 การดำเนินการทดลอง

1) ติดตั้งแบบจำลองตอม่อในตำแหน่งที่เตรียมไว้

2) ปรับค่าความลาดชันของท้องรางน้ำเปิด ให้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณความลาดชันท้องน้ำเบื้องต้น ในสภาวะเงื่อนไขเริ่มต้นของสภาวะสมดุล

3) เปิดวาล์วน้ำเข้ารางน้ำอย่างช้าๆ จนระดับน้ำสูงพอประมาณ จากนั้นปิดวาล์วน้ำและประตูระบายท้ายน้ำเพื่อขังน้ำไว้ แล้วปรับระดับท้องน้ำบริเวณแบบจำลองตอม่อใหม่ ให้ได้ระดับเดิมจากการทดลองหาสภาวะตะกอนเริ่มเคลื่อนที่ เนื่องจากถูกน้ำกัดเซาะตอนเริ่มต้นปล่อยน้ำเข้าราง

4) เปิดวาล์วน้ำเข้ารางน้ำอย่างช้าๆอีกครั้ง พร้อมทั้งเปิดบานประตูท้ายน้ำ เพื่อให้ได้ค่าอัตราการไหล และความลึกการไหลเข้าสู่แบบจำลอง (approach flow depth) ที่ต้องการ ในตำแหน่งการเปิดวาล์วและระดับยกบานประตูท้ายน้ำที่กำหนดไว้ในเบื้องต้นของแต่ละกรณีศึกษา

5) ปล่อยให้เกิดการกัดเซาะและตกตะกอนบริเวณรอบตอม่อไปเรื่อยๆ จนเกิดความลึกของหลุมกัดเซาะสูงสุดหรือความลึกของหลุมกัดเซาะไม่เปลี่ยนแปลงอีกแล้ว หรือว่าภายใน 2 ชั่วโมง ค่าความลึกหลุมกัดเซาะมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1 มิลลิเมตร

6) บันทึกค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่อ่านได้จากสเกลที่ติดรอบแบบจำลองตอม่อ พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลผลการทดลองต่างๆ ที่กล่าวในข้างต้น ดังแสดงในตาราง 3-3

7) เปลี่ยนแปลงอัตราการไหล และความลึกการไหล ตามเงื่อนไขที่กำหนดในการทดลองจนครบ

8) ทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนทั้งหมดอีกครั้ง สำหรับมุมเอียงของเสาดำเนิน และระนาบการเอียงของเสาดำเนินจนครบตามที่กำหนด ดังแผนผังการทดลองที่แสดงไว้ในรูป 3-1

ตาราง 3-2 กรณีการทดลองที่ทำการศึกษา จำนวน 15 กรณี 168 การทดลอง

Discharge (Q)	Inclination Plane (α) [*]	Inclination Angle (β)				
		A 0°	B 5°	C 10°	D 15°	E 20°
Q1 (4.0 l/s)	0°	Q1A1	Q1B1	Q1C1	Q1D1	Q1E1
	45°	Q1A2	Q1B2	Q1C2	Q1D2	Q1E2
	90°	Q1A3	Q1B3	Q1C3	Q1D3	Q1E3
Q2 (7.0 l/s)	0°	Q2A1	Q2B1	Q2C1	Q2D1	Q2E1
	45°	Q2A2	Q2B2	Q2C2	Q2D2	Q2E2
	90°	Q2A3	Q2B3	Q2C3	Q2D3	Q2E3
Q3 (9.0 l/s)	0°	Q3A1	Q3B1	Q3C1	Q3D1	Q3E1
	45°	Q3A2	Q3B2	Q3C2	Q3D2	Q3E2
	90°	Q3A3	Q3B3	Q3C3	Q3D3	Q3E3
Q4 (11.0 l/s)	0°	Q4A1	Q4B1	Q4C1	Q4D1	Q4E1
	45°	Q4A2	Q4B2	Q4C2	Q4D2	Q4E2
	90°	Q4A3	Q4B3	Q4C3	Q4D3	Q4E3
Q5 (13.0 l/s)	0°	Q5A1	Q5B1	Q5C1	Q5D1	Q5E1
	45°	Q5A2	Q5B2	Q5C2	Q5D2	Q5E2
	90°	Q5A3	Q5B3	Q5C3	Q5D3	Q5E3
Q6 (15.0 l/s)	0°	Q6A1	Q6B1	Q6C1	Q6D1	Q6E1
	45°	Q6A2	Q6B2	Q6C2	Q6D2	Q6E2
	90°	Q6A3	Q6B3	Q6C3	Q6D3	Q6E3
Q7 (17.0 l/s)	0°	Q7A1	Q7B1	Q7C1	Q7D1	Q7E1
	45°	Q7A2	Q7B2	Q7C2	Q7D2	Q7E2
	90°	Q7A3	Q7B3	Q7C3	Q7D3	Q7E3
Q8 (20.0 l/s)	0°	Q8A1	Q8B1	Q8C1	Q8D1	Q8E1
	45°	Q8A2	Q8B2	Q8C2	Q8D2	Q8E2
	90°	Q8A3	Q8B3	Q8C3	Q8D3	Q8E3

ตาราง 3-2 (ต่อ) กรณีการทดลองที่ทำการศึกษา จำนวน 15 กรณี 168 การทดลอง

Discharge (Q)	Inclination Plane (α)*	Inclination Angle (β)				
		A 0°	B 5°	C 10°	D 15°	E 20°
Q9 (23.0 l/s)	0°	Q9A1	Q9B1	Q9C1	-	-
	45°	Q9A2	Q9B2	Q9C2	Q9D2	-
	90°	Q9A3	Q9B3	Q9C3	Q9D3	Q9E3
Q10 (25.0 l/s)	0°	Q10A1	Q10B1	Q10C1	-	-
	45°	Q10A2	Q10B2	Q10C2	Q10D2	-
	90°	Q10A3	Q10B3	Q10C3	Q10D3	Q10E3
Q11 (28.0 l/s)	0°	Q10A1	Q10B1	Q11C1	-	-
	45°	Q11A2	Q11B2	Q11C2	Q11D2	-
	90°	Q11A3	Q11B3	Q11C3	Q11D3	Q11E3
Q12 (30.0 l/s)	0°	Q12A1	Q12B1	Q12C1	-	-
	45°	Q12A2	Q12B2	Q12C2	Q12D2	-
	90°	Q12A3	Q12B3	Q12C3	Q12D3	Q12E3

*หมายเหตุ : มุม 0 องศา หมายถึง เสาดูเพิ่มเติมในระนาบเดียวกับแนวการไหล

มุม 45 องศา หมายถึง เสาดูเพิ่มเติมในระนาบที่เอียงกับทิศทางการไหล

มุม 90 องศา หมายถึง เสาดูเพิ่มเติมในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล

ตาราง 3-3 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง กรณี Q8A1

Test Conditions and Results of Scour Experiments		
Case Run : Q8A1	Date : 17/07/2007 to 18/072007	
	Time : 22:30 to 14:30 (16 hrs)	
Equi. Time = 960 min. Water Temp. = 30 C°, $v = \dots 8 \times 10^{-7} \dots$ m ² /sec. $d_{50} = \dots 0.27 \dots$ mm.	Flow Rate & Head on The V-90° Wier of Threshold Conditions	
	Estimated	Observed
	H = 18.23 cm.	H = 18.20 cm.
	Q = 20.00 l/sec.	Q = 19.92 l/sec.
Bed Elevation & Water Surface Elevation		
Distance from D/S (m)	Experiment Set up	
	Water Surface El. (cm)	Bed El. (cm)
2.00	26.62	9.76
3.00	26.65	9.40
4.00	26.68	8.90
5.00	26.71	9.33
6.00	26.76	9.20
6.20	26.77	9.30
(Pier)		
7.60	26.73	9.30
7.80	26.73	9.44
8.00	26.72	9.64
9.00	26.69	10.14
10.00	26.65	11.10
11.00	26.63	11.42

Bed & Energy Slopes of Threshold Conditions	
Estimated	Observed
Sf = 0.00007	Sf = 0.00007
So = 0.00007	So = 0.0001

Approach Flow Depth of Threshold Conditions	
Estimated	Observed
y = 17.14 cm.	y = 17.43 cm.

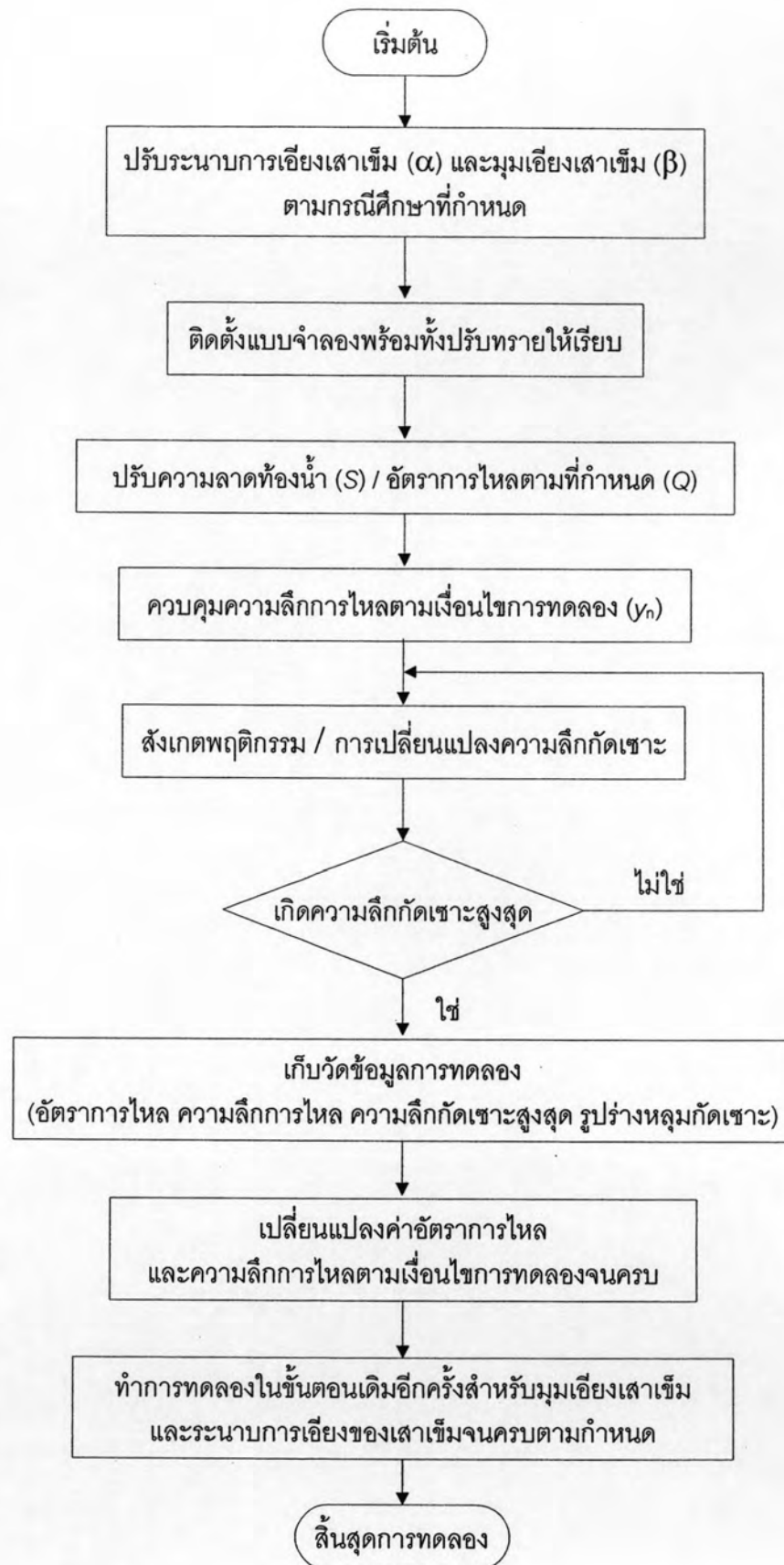
Scour Depth		
Pile No.	Pile Diameter D,(cm)	Maximum Scour Depth d_s (cm)
1	3.40	5.80
2	3.40	4.60
3	3.40	-

Experiments Set up	
1. tail gate opening =	2.50 cm (From scale bar)
2. valve opening =	2+115.8 (From scale bar)
3. Flume slope =	0.95 cm (From scale bar)

Definition Sketch of Test Condition	Plan View of Pile and Scour Hole

Remark : Estimated Threshold Conditions หมายถึง เงื่อนไขเริ่มต้นที่ประมาณค่ามาจากการคำนวณของสภาวะเริ่มต้นการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ

Observed Threshold Conditions หมายถึง เงื่อนไขเริ่มต้นที่ปรากฏจริงในการทดลองของสภาวะเริ่มต้นการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ



รูป 3-1 แผนผังขั้นตอนการทดลอง

3.4 ผลการทดลอง

การทดลองนี้ใช้แบบจำลองทางกายภาพของรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของเสาเข็มเอียงต่อความลึกกักเซาะของเสาเข็มกลุ่ม โดยทดลองทั้งสิ้น 168 การทดลอง ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง ลักษณะและรูปแบบของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และผลการทดลองที่ได้จากการใช้แบบจำลองชลศาสตร์ทางกายภาพ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) อัตราการไหล (discharge, Q)

อัตราการไหลที่ไหลผ่านรางน้ำเปิดในการศึกษาครั้งนี้ จะวัดโดยใช้ฝายสามเหลี่ยมสันคม (90° V-notch weir) ที่ติดตั้งทางด้านท้ายน้ำของรางน้ำเปิด อ่านค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย (H) แล้วนำไปคำนวณค่าอัตราการไหลจากสมการ $Q = 0.045H^{2.5}$ ทำการสอบเทียบโดย นัฐวุฒิ พัดไธสง (2006) โดยที่ Q คือ อัตราการไหลในหน่วยลิตรต่อวินาที, H คือ ความสูงของน้ำเหนือสันฝายในหน่วยเซนติเมตร ในแต่ละมุมเอียงตามทิศทางการเอียงของเสาเข็ม อัตราการไหลจะขึ้นอยู่กับมุมเอียงของเสาเข็มว่าสามารถใช้อัตราการไหลสูงสุดของแต่ละมุมเอียงเสาเข็มได้เท่าใด ทำให้ในกรณีศึกษา D1, E1 และ E2 จะเปลี่ยนอัตราการไหลได้จำนวน 8 อัตราการไหล (ดูตาราง 3-2) เนื่องจากเสาเข็มต้นที่เอียงจะไปชนกับเสาเข็มต้นถัดไป ฉะนั้นเสาเข็มที่เอียงในกรณีศึกษาดังกล่าวจึงต้องมีขนาดสั้นกว่า ทำให้ไม่สามารถทดลองที่อัตราการไหลในค่าที่สูงกว่านั้นได้ เพราะจะทำให้แบบจำลองจมอยู่ใต้น้ำ ในส่วนกรณีศึกษาอื่นนอกเหนือจากที่กล่าว จะเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลจำนวน 12 อัตราการไหล ควบคุมอัตราการไหลที่ต้องการทดลองโดยหมุนวาล์วปิด-เปิดน้ำที่ทางต้นน้ำของรางน้ำ ในการทดลองนี้มีอัตราการไหลอยู่ในช่วงระหว่าง 8.5 ถึง 30.0 ลิตรต่อวินาที ทั้งนี้ขีดจำกัดของอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองขึ้นกับสภาพเงื่อนไขการไหลที่น้ำไม่มีตะกอนปน และอัตราการสูบน้ำของเครื่องสูบน้ำในระบบหมุนเวียน

2) ความลึกการไหล (depth of flow, y)

วัดความลึกการไหลโดยใช้เครื่องมือวัดระดับ (point gauge) ติดตั้งบนรางเลื่อนเหนือรางน้ำเปิด ทุกๆ 1.0 เมตร ใน 6.0 เมตรแรกจากบานประตูท้ายน้ำ หลังจากนั้นจะวัดทุกๆ 0.2 เมตร จนถึงสุดบริเวณที่ใช้ศึกษาการกักเซาะ โดยห่างจากบานประตูท้ายน้ำประมาณ 8.0 เมตร และจะวัดทุกๆ 1.0 เมตร ไปทางต้นน้ำจนถึงทางเข้าของรางน้ำ ส่วนความลึกการไหลก่อนที่จะเข้าปะทะเสาเข็ม (approach flow depth) จะวัดห่างจากเสาเข็มต้นแรกไปทางต้นน้ำประมาณ 0.6 เมตร ในการวัดจะทำการวัดระดับท้องน้ำและระดับผิวน้ำ ณ ตำแหน่งการวัดต่างๆ ดังกล่าว แล้วจึงนำมา

ห้กลับเพื่อให้ได้ค่าความลึกการไหล ณ ตำแหน่งนั้นๆ ซึ่งความลึกการไหลที่ใช้ในการทดลองนี้ จะต้องสัมพันธ์กับความลาดชันท้องน้ำ และอัตราการไหลเพื่อให้สภาพการไหลเป็นแบบน้ำไม่มีตะกอนปน โดยควบคุมระดับปิด-เปิดบานประตู ควบคู่กับการปรับความลาดชันของรางน้ำ ผลการทดลองที่ได้มีความลึกการไหลอยู่ระหว่าง 5 ถึง 25 เซนติเมตร และความลาดชันท้องน้ำอยู่ระหว่าง 1.1×10^{-4} ถึง 6×10^{-5}

3) ความเร็วเฉลี่ยการไหล (mean flow velocity, V)

ความเร็วเฉลี่ยการไหลหาได้จากอัตราการไหล ซึ่งวัดโดยฝายสามเหลี่ยมสันคม (90° V-notch weir) จากผลการทดลองที่ได้มีความเร็วเฉลี่ยการไหลอยู่ระหว่าง 13.2 ถึง 20.0 เซนติเมตร ต่อวินาที

4) อุณหภูมิของน้ำ (water temperature, T)

ระหว่างการทดลองได้วัดอุณหภูมิของน้ำ โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทในการวัดค่าอุณหภูมิของน้ำ ซึ่งสู่วัดค่าเป็นช่วงๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง เพื่อตรวจสอบว่าอุณหภูมิของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่ในขณะที่ทำการทดลองการกัดเซาะ เนื่องจากการทดลองใช้เวลาค่อนข้างนานครอบคลุมเวลาช่วงกลางวันและกลางคืน อุณหภูมิของน้ำอาจเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของอากาศในช่วงหนึ่งวัน เพื่อนำอุณหภูมิของน้ำไปใช้หาความหนืดจลน์ของน้ำ (kinematics viscosity, ν) โดยในการทดลองนี้พบว่าอุณหภูมิของน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ในระหว่างช่วงดำเนินการศึกษา ซึ่งมีอุณหภูมิของน้ำเฉลี่ยประมาณ 30°C และมีความหนืดจลน์ประมาณ 8×10^{-7} เมตร²/วินาที

5) เวลาที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองนี้พิจารณาค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ภายใต้สภาวะการไหลของน้ำที่ไม่มีตะกอนปน ดังนั้นค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะมีค่าสูงสุดก็ต่อเมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนออกจากหลุมกัดเซาะอีกแล้ว หรือภายใน 2 ชั่วโมง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะเกิน 0.1 เซนติเมตร ใช้เวลาในแต่ละการทดลองอยู่ระหว่าง 8 ถึง 30 ชั่วโมง ดังแสดงในตาราง 3-4

6) ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด (maximum scour depth, d_s)

ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะอ่านได้จากสเกลที่พันรอบเสาเข็มแต่ละต้น ในการทดลองนี้มีค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ที่ได้จากทุกกรณีศึกษามีค่าอยู่ระหว่าง 1.6 ถึง 8.5 เซนติเมตร

7) ฟรูดนัมเบอร์ของการไหล (Froude Number, Fr)

ฟรูดนัมเบอร์ ($Fr = V / \sqrt{gy}$) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงสภาวะการไหลของน้ำ โดยพิจารณาถึงอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง (gravity force) ในทางน้ำเปิดแบ่งเป็นสภาวะต่างๆ คือ การไหลต่ำกว่าวิกฤต (subcritical flow, $Fr < 1$) การไหลวิกฤต (critical flow, $Fr = 1$) และการไหลเหนือวิกฤต (supercritical flow, $Fr > 1$) การศึกษานี้ได้ทดลองในสภาวะการไหลต่ำกว่าวิกฤต และเพื่อละอิทธิพลของค่าความเร็วการไหลที่มีต่อความลึกหลุมกัดเซาะซึ่งอยู่ในรูปของค่าฟรูดนัมเบอร์ จึงพยายามควบคุมให้มี ค่าฟรูดนัมเบอร์มีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันในแต่ละการทดลอง โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.13 ถึง 0.19

8) เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number, Re)

เรย์โนลด์นัมเบอร์ของการไหล ($Re = VR/\nu$) คือ อัตราส่วนของแรงเฉื่อย (inertia force) ต่อแรงหนืด (viscous force) ของการไหล ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงผลของความหนืดของของไหลต่อการไหล สามารถแบ่งสภาวะการไหล คือ การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow, $Re \leq 500$) การไหลแบบผสม (transition flow, $500 \leq Re \leq 12,000$) และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow, $12,000 \leq Re$) การทดลองนี้มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์อยู่ในระหว่าง 8,390 ถึง 62,402

9) เรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ (Pier Reynolds Number, R_p)

เรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ ($R_p = VD/\nu$) เป็นค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ใช้ขนาดของตอม่อแทนรัศมีศาสตร์ ในการทดลองครั้งนี้มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่ออยู่ระหว่าง 5,486 ถึง 18,796

จากผลการทดลองที่กล่าวมาทั้งหมดในข้างต้น ได้แสดงผลการทดลองประกอบผลการศึกษาอิทธิพลของเสาเข็มเอียงต่อความลึกกัดเซาะของเสาเข็มกลุ่มในแต่ละกรณีศึกษาดังตาราง 3-5 ถึง 3-7

ตาราง 3-4 เวลาการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงการกัดเซาะสูงสุด ในแต่ละกรณีศึกษา

Discharge (Q)	Inclination Plane (α) [*]	Inclination Angle(β)				
		A 0°	B 5°	C 10°	D 15°	E 20°
Q1	0°	Q1A1 23 hr	Q1B1 23 hr	Q1C1 24 hr	Q1D1 30 hr	Q1E1 22 hr
	45°	Q1A2 24 hr	Q1B2 23 hr	Q1C2 22 hr	Q1D2 22 hr	Q1E2 22 hr
	90°	Q1A3 24 hr	Q1B3 22 hr	Q1C3 20 hr	Q1D3 20 hr	Q1E3 22 hr
Q2	0°	Q2A1 11 hr	Q2B1 8 hr	Q2C1 9 hr	Q2D1 10 hr	Q2E1 13 hr
	45°	Q2A2 12 hr	Q2B2 17 hr	Q2C2 20 hr	Q2D2 17 hr	Q2E2 20 hr
	90°	Q2A3 12 hr	Q2B3 16 hr	Q2C3 20 hr	Q2D3 23 hr	Q2E3 23 hr
Q3	0°	Q3A1 8 hr	Q3B1 13 hr	Q3C1 18 hr	Q3D1 22 hr	Q3E1 23 hr
	45°	Q3A2 21 hr	Q3B2 23 hr	Q3C2 22 hr	Q3D2 21 hr	Q3E2 20 hr
	90°	Q3A3 21 hr	Q3B3 22 hr	Q3C3 23 hr	Q3D3 20 hr	Q3E3 16 hr
Q4	0°	Q4A1 14 hr	Q4B1 22 hr	Q4C1 21 hr	Q4D1 21 hr	Q4E1 16 hr
	45°	Q4A2 21 hr	Q4B2 22 hr	Q4C2 22 hr	Q4D2 23 hr	Q4E2 16 hr
	90°	Q4A3 21 hr	Q4B3 20 hr	Q4C3 21 hr	Q4D3 22 hr	Q4E3 18 hr
Q5	0°	Q5A1 20 hr	Q5B1 20 hr	Q5C1 21 hr	Q5D1 21 hr	Q5E1 23 hr
	45°	Q5A2 13 hr	Q5B2 16 hr	Q5C2 15 hr	Q5D2 10 hr	Q5E2 17 hr
	90°	Q5A3 13 hr	Q5B3 14 hr	Q5C3 14 hr	Q5D3 16 hr	Q5E3 15 hr
Q6	0°	Q6A1 20 hr	Q6B1 12 hr	Q6C1 16 hr	Q6D1 14 hr	Q6E1 19 hr
	45°	Q6A2 16 hr	Q6B2 18 hr	Q6C2 16 hr	Q6D2 17 hr	Q6E2 14 hr
	90°	Q6A3 16 hr	Q6B3 16 hr	Q6C3 16 hr	Q6D3 16 hr	Q6E3 14 hr
Q7	0°	Q7A1 16 hr	Q7B1 18 hr	Q7C1 12 hr	Q7D1 15 hr	Q7E1 14 hr
	45°	Q7A2 15 hr	Q7B2 16 hr	Q7C2 16 hr	Q7D2 12 hr	Q7E2 15 hr
	90°	Q7A3 15 hr	Q7B3 16 hr	Q7C3 16 hr	Q7D3 16 hr	Q7E3 16 hr
Q8	0°	Q8A1 16 hr	Q8B1 18 hr	Q8C1 18 hr	Q8D1 19 hr	Q8E1 20 hr
	45°	Q8A2 14 hr	Q8B2 18 hr	Q8C2 14 hr	Q8D2 16 hr	Q8E2 15 hr
	90°	Q8A3 14 hr	Q8B3 16 hr	Q8C3 16 hr	Q8D3 15 hr	Q8E3 16 hr

ตาราง 3-4(ต่อ) เวลาการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงการกัดเซาะสูงสุด ในแต่ละกรณีศึกษา

Discharge (Q)	Inclination Plane (α)*	Inclination Angle(β)				
		A 0°	B 5°	C 10°	D 15°	E 20°
Q9	0°	Q9A1 19 hr	Q9B1 12 hr	Q9C1 18 hr	-	-
	45°	Q9A2 16 hr	Q9B2 15 hr	Q9C2 16 hr	Q9D2 16 hr	-
	90°	Q9A3 16 hr	Q9B3 15 hr	Q9C3 16 hr	Q9D3 16 hr	Q9E3 14 hr
Q10	0°	Q10A1 12 hr	Q10B1 16 hr	Q10C1 12 hr	-	-
	45°	Q10A2 19 hr	Q10B2 17 hr	Q10C2 17 hr	Q10D2 18 hr	-
	90°	Q10A3 19 hr	Q10B3 15 hr	Q10C3 16 hr	Q10D3 15 hr	Q10E3 17 hr
Q11	0°	Q11A1 14 hr	Q11B1 14 hr	Q11C1 16 hr	-	-
	45°	Q11A2 15 hr	Q11B2 15 hr	Q11C2 16 hr	Q11D2 16 hr	-
	90°	Q11A3 15 hr	Q11B3 14 hr	Q11C3 16 hr	Q11D3 14 hr	Q11E3 14 hr
Q12	0°	Q12A1 16 hr	Q12B1 16 hr	Q12C1 16 hr	-	-
	45°	Q12A2 17 hr	Q12B2 15 hr	Q12C2 15 hr	Q12D2 17 hr	-
	90°	Q12A3 17 hr	Q12B3 12 hr	Q12C3 14 hr	Q12D3 14 hr	Q12E3 14 hr

*หมายเหตุ : มุม 0 องศา หมายถึง เสาดำเนินเฉียงในระนาบเดียวกับแนวการไหล

มุม 45 องศา หมายถึง เสาดำเนินเฉียงในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล

มุม 90 องศา หมายถึง เสาดำเนินเฉียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล

ตาราง 3-5 เงื่อนไชและผลการทดลอง (กรณีเสาะเพิ่มเอียงในระนาบตามแนวการไหล, $\alpha = 0^\circ$)

Run No.	β ⁽¹⁾	Diameter (D, cm)	Dischage (Q, l/sec)	Flow Depth (y, cm)	Velocity (V, cm/s)	Fr	Rp	y/D	d _{s1} /D	d _{s2} /D	d _{s3} /D	Scour Depth (d _s , cm)		
												Pile no.1	Pile no.2	Pile no.3
Q1A1	0	3.4	4.03	5.20	12.91	0.18	5486	1.53	0.47	0.24	-	1.6	0.8	-
Q2A1	0	3.4	6.92	7.30	15.80	0.19	6715	2.15	0.59	0.26	-	2.0	0.9	-
Q3A1	0	3.4	9.05	9.62	15.68	0.16	6665	2.83	0.65	0.29	-	2.2	1.0	-
Q4A1	0	3.4	10.97	10.80	16.93	0.16	7197	3.18	0.88	0.59	-	3.0	2.0	-
Q5A1	0	3.4	13.27	12.28	18.02	0.16	7657	3.61	1.24	0.88	-	4.2	3.0	-
Q6A1	0	3.4	14.80	13.49	18.29	0.16	7774	3.97	1.44	1.06	-	4.9	3.6	-
Q7A1	0	3.4	17.05	15.40	18.45	0.15	7843	4.53	1.62	1.24	-	5.5	4.2	-
Q8A1	0	3.4	19.92	17.43	19.05	0.15	8097	5.13	1.71	1.35	-	5.8	4.6	-
Q9A1	0	3.4	23.03	19.63	19.55	0.14	8310	5.77	1.85	1.47	-	6.3	5.0	-
Q10A1	0	3.4	24.80	20.90	19.78	0.14	8405	6.15	1.88	1.53	-	6.4	5.2	-
Q11A1	0	3.4	28.00	23.78	19.62	0.13	8339	6.99	1.91	1.56	-	6.5	5.3	-
Q12A1	0	3.4	29.67	24.70	20.02	0.13	8508	7.26	2.00	1.56	-	6.8	5.3	-
Q1A1-1	0	7.6	4.03	5.12	13.11	0.18	12454	0.67	0.21	0.16	-	1.6	1.2	-
Q2A1-1	0	7.6	6.92	7.37	15.65	0.18	14868	0.97	0.28	0.18	-	2.1	1.4	-
Q3A1-1	0	7.6	13.09	12.25	17.81	0.16	16918	1.61	0.68	0.25	-	5.2	1.9	-
Q4A1-1	0	7.6	23.03	19.90	19.29	0.14	18323	2.62	1.22	0.95	-	9.3	7.2	-
Q1B1	5	3.4	4.03	5.20	12.91	0.18	5486	1.53	0.65	0.29	-	2.2	1.0	-
Q2B1	5	3.4	6.92	7.47	15.44	0.18	6562	2.20	0.68	0.29	-	2.3	1.0	-
Q3B1	5	3.4	9.05	9.30	16.22	0.17	6894	2.74	0.82	0.38	-	2.8	1.3	-
Q4B1	5	3.4	10.97	10.60	17.25	0.17	7333	3.12	1.15	0.82	-	3.9	2.8	-
Q5B1	5	3.4	13.27	12.30	17.99	0.16	7644	3.62	1.24	0.88	-	4.2	3.0	-
Q6B1	5	3.4	15.00	13.62	18.36	0.16	7802	4.01	1.38	1.00	-	4.7	3.4	-
Q7B1	5	3.4	17.05	15.34	18.53	0.15	7874	4.51	1.47	1.12	-	5.0	3.8	-
Q8B1	5	3.4	19.92	17.33	19.16	0.15	8143	5.10	1.62	1.24	-	5.5	4.2	-
Q9B1	5	3.4	23.03	19.88	19.31	0.14	8206	5.85	1.71	1.29	-	5.8	4.4	-
Q10B1	5	3.4	25.06	21.07	19.82	0.14	8424	6.20	1.76	1.44	-	6.0	4.9	-
Q11B1	5	3.4	28.00	23.74	19.65	0.13	8353	6.98	1.88	1.50	-	6.4	5.1	-
Q12B1	5	3.4	30.24	24.94	20.21	0.13	8588	7.34	1.91	1.53	-	6.5	5.2	-
Q1C1	10	3.4	4.03	5.10	13.16	0.19	5593	1.50	0.62	0.35	-	2.1	1.2	-
Q2C1	10	3.4	6.92	7.69	15.00	0.17	6375	2.26	0.68	0.35	-	2.3	1.2	-
Q3C1	10	3.4	9.05	9.30	16.22	0.17	6894	2.74	0.82	0.59	-	2.8	2.0	-
Q4C1	10	3.4	10.97	10.50	17.42	0.17	7402	3.09	1.03	0.85	-	3.5	2.9	-
Q5C1	10	3.4	12.91	12.36	17.40	0.16	7396	3.64	1.12	0.94	-	3.8	3.2	-
Q6C1	10	3.4	15.00	13.56	18.44	0.16	7837	3.99	1.32	1.12	-	4.5	3.8	-
Q7C1	10	3.4	17.05	15.60	18.22	0.15	7743	4.59	1.38	1.15	-	4.7	3.9	-
Q8C1	10	3.4	19.92	17.14	19.37	0.15	8234	5.04	1.56	1.32	-	5.3	4.5	-
Q9C1	10	3.4	23.03	19.70	19.48	0.14	8281	5.79	1.68	1.47	-	5.7	5.0	-
Q10C1	10	3.4	25.06	20.83	20.05	0.14	8521	6.13	1.74	1.56	-	5.9	5.3	-
Q11C1	10	3.4	28.00	23.69	19.70	0.13	8371	6.97	1.82	1.62	-	6.2	5.5	-
Q12C1	10	3.4	29.95	24.70	20.21	0.13	8590	7.26	1.82	1.71	-	6.2	5.8	-

หมายเหตุ : ¹มุมเอียงของเสาะเพิ่มจากแนวตั้งขนาดเฉลี่ยวัสดุท้องน้ำ (d₅₀) = 0.27 มม.

ตาราง 3-5 (ต่อ) เงื่อนไขและผลการทดลอง (กรณีเสาชิมเอียงในระนาบตามแนวการไหล, $\alpha = 0^\circ$)

Run No.	$\beta^{(1)}$	Diameter (D, cm)	Dischage (Q, lt/sec)	Flow Depth (y, cm)	Velocity (V, cm/s)	Fr	Rp	y/D	d _{s1} /D	d _{s2} /D	d _{s3} /D	Scour Depth (d _s , cm)		
												Pile no.1	Pile no.2	Pile no.3
Q1D1	15	3.4	4.03	5.09	13.19	0.19	5604	1.50	0.26	0.32	-	0.9	1.1	-
Q2D1	15	3.4	6.92	7.48	15.42	0.18	6553	2.20	0.31	0.35	-	1.1	1.2	-
Q3D1	15	3.4	9.20	9.26	16.57	0.17	7041	2.72	0.65	0.62	-	2.2	2.1	-
Q4D1	15	3.4	10.97	10.64	17.19	0.17	7305	3.13	0.85	0.82	-	2.9	2.8	-
Q5D1	15	3.4	12.91	12.34	17.43	0.16	7408	3.63	1.05	0.91	-	3.6	3.1	-
Q6D1	15	3.4	15.00	13.60	18.38	0.16	7813	4.00	1.19	1.09	-	4.1	3.7	-
Q7D1	15	3.4	17.05	15.40	18.45	0.15	7843	4.53	1.28	1.24	-	4.3	4.2	-
Q8D1	15	3.4	19.92	17.37	19.12	0.15	8125	5.11	1.45	1.41	-	4.9	4.8	-
Q1D1-1	15	7.6	3.93	5.10	12.84	0.18	12196	0.67	0.17	0.11	-	1.3	0.8	-
Q2D1-1	15	7.6	6.92	7.16	16.11	0.19	15304	0.94	0.21	0.14	-	1.6	1.1	-
Q3D1-1	15	7.6	13.09	12.64	17.26	0.15	16396	1.66	0.53	0.28	-	4.0	2.1	-
Q4D1-1	15	7.6	23.03	19.40	19.78	0.14	18796	2.55	1.14	0.92	-	8.7	7.0	-
Q1E1	20	3.4	4.03	5.16	13.01	0.18	5528	1.52	0.21	0.50	-	0.7	1.7	-
Q2E1	20	3.4	6.92	7.53	15.32	0.18	6510	2.21	0.24	0.24	-	0.8	0.8	-
Q3E1	20	3.4	9.05	9.14	16.51	0.17	7015	2.69	0.47	0.79	-	1.6	2.7	-
Q4E1	20	3.4	10.97	10.72	17.06	0.17	7251	3.15	0.68	0.76	-	2.3	2.6	-
Q5E1	20	3.4	12.91	12.55	17.14	0.15	7284	3.69	0.82	0.91	-	2.8	3.1	-
Q6E1	20	3.4	15.00	13.64	18.33	0.16	7791	4.01	1.06	1.06	-	3.6	3.6	-
Q7E1	20	3.4	17.26	15.50	18.56	0.15	7890	4.56	1.18	1.21	-	4.0	4.1	-
Q8E1	20	3.4	20.15	17.13	19.61	0.15	8334	5.04	1.35	1.35	-	4.6	4.6	-
Q1E1-1	20	7.6	9.36	9.35	16.68	0.17	15848	1.23	0.28	0.25	-	2.1	1.9	-
Q2E1-1	20	7.6	13.09	12.32	17.71	0.16	16822	1.62	0.51	0.37	-	3.9	2.8	-
Q3E1-1	20	7.6	19.92	17.33	19.16	0.15	18203	2.28	0.95	0.82	-	7.2	6.2	-

หมายเหตุ: ¹ มุมเอียงของเสาชิมจากแนวตั้งขนาดเฉลี่ยวัสดุท้องน้ำ (d₅₀) = 0.27 มม.

ตาราง 3-6 เงื่อนไขและผลการทดลอง (กรณีเสาเข็มเอียงในระนาบขนานกับทิศทางกรไหล, $\alpha = 45^\circ$)

Run No.	β ⁽¹⁾	Diameter (D, cm)	Dischage (Q, l/sec)	Flow Depth (y, cm)	Velocity (V, cm/s)	Fr	Rp	y/D	d _{s1} /D	d _{s2} /D	d _{s3} /D	Scour Depth (d _s , cm)		
												Pile no.1	Pile no.2	Pile no.3
Q1A2	0	3.4	4.03	5.10	13.16	0.19	5593	1.50	0.65	0.32	0.62	2.2	1.1	2.1
Q2A2	0	3.4	6.92	7.40	15.59	0.18	6624	2.18	0.74	0.41	0.65	2.5	1.4	2.2
Q3A2	0	3.4	9.05	9.21	16.38	0.17	6961	2.71	1.06	0.71	0.85	3.6	2.4	2.9
Q4A2	0	3.4	11.14	10.77	17.24	0.17	7328	3.17	1.26	0.97	1.06	4.3	3.3	3.6
Q5A2	0	3.4	12.91	12.32	17.46	0.16	7420	3.62	1.35	1.03	1.26	4.6	3.5	4.3
Q6A2	0	3.4	15.00	13.63	18.34	0.16	7796	4.01	1.50	1.09	1.50	5.1	3.7	5.1
Q7A2	0	3.4	17.05	15.36	18.50	0.15	7864	4.52	1.59	1.21	1.59	5.4	4.1	5.4
Q8A2	0	3.4	19.92	17.33	19.16	0.15	8143	5.10	1.71	1.38	1.71	5.8	4.7	5.8
Q9A2	0	3.4	23.03	19.70	19.48	0.14	8281	5.79	1.82	1.47	1.82	6.2	5.0	6.2
Q10A2	0	3.4	25.06	21.00	19.89	0.14	8452	6.18	1.97	1.59	2.00	6.7	5.4	6.8
Q11A2	0	3.4	28.00	23.67	19.71	0.13	8378	6.96	2.06	1.74	2.09	7.0	5.9	7.1
Q12A2	0	3.4	29.95	24.71	20.20	0.13	8586	7.27	2.18	1.82	2.21	7.4	6.2	7.5
Q1B2	5	3.4	3.93	5.10	12.84	0.18	5456	1.50	0.26	0.50	0.47	0.9	1.7	1.6
Q2B2	5	3.4	6.92	7.45	15.48	0.18	6580	2.19	0.41	0.41	0.53	1.4	1.4	1.8
Q3B2	5	3.4	9.05	9.28	16.26	0.17	6909	2.73	0.79	0.53	0.65	2.7	1.8	2.2
Q4B2	5	3.4	10.97	10.57	17.30	0.17	7353	3.11	1.18	0.94	1.18	4.0	3.2	4.0
Q5B2	5	3.4	12.91	12.30	17.49	0.16	7432	3.62	1.26	1.06	1.32	4.3	3.6	4.5
Q6B2	5	3.4	15.00	13.85	18.05	0.15	7672	4.07	1.44	1.15	1.50	4.9	3.9	5.1
Q7B2	5	3.4	17.05	15.53	18.30	0.15	7778	4.57	1.56	1.29	1.62	5.3	4.4	5.5
Q8B2	5	3.4	19.92	16.96	19.58	0.15	8321	4.99	1.71	1.41	1.82	5.8	4.8	6.2
Q9B2	5	3.4	23.03	19.61	19.57	0.14	8319	5.77	1.88	1.56	1.97	6.4	5.3	6.7
Q10B2	5	3.4	25.06	20.86	20.02	0.14	8509	6.14	2.03	1.71	2.18	6.9	5.8	7.4
Q11B2	5	3.4	28.00	23.53	19.83	0.13	8427	6.92	2.12	1.79	2.26	7.2	6.1	7.7
Q12B2	5	3.4	29.95	24.71	20.20	0.13	8586	7.27	2.21	1.88	2.41	7.5	6.4	8.2
Q1B2-1	5	4.8	6.92	7.50	15.38	0.18	9227	1.56	0.54	0.31	0.42	2.6	1.5	2.0
Q2B2-1	5	4.8	10.97	10.70	17.09	0.17	10255	2.23	1.13	0.92	1.17	5.4	4.4	5.6
Q3B2-1	5	4.8	15.00	13.55	18.45	0.16	11072	2.82	1.38	1.23	1.50	6.6	5.9	7.2

หมายเหตุ: ¹มุมเอียงของเสาเข็มจากแนวดิ่งขนาดเฉลี่ยวัสดุท้องน้ำ (d₅₀) = 0.27 มม.

ตาราง 3-6 (ต่อ) เงื่อนไขและผลการทดลอง (กรณีเสาเข็มเอียงในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล, $\alpha = 45^\circ$)

Run No.	$\beta^{(1)}$	Diameter (D, cm)	Discharge (Q, l/sec)	Flow Depth (y, cm)	Velocity (V, cm/s)	Fr	Rp	y/D	d _{s1} /D	d _{s2} /D	d _{s3} /D	Scour Depth (d _s , cm)		
												Pile no.1	Pile no.2	Pile no.3
Q1C2	10	3.4	4.03	5.23	12.83	0.18	5454	1.54	0.26	0.50	0.50	0.9	1.7	1.7
Q2C2	10	3.4	7.05	7.70	15.27	0.18	6488	2.26	0.35	0.50	0.56	1.2	1.7	1.9
Q3C2	10	3.4	9.05	9.28	16.26	0.17	6909	2.73	0.85	0.76	1.00	2.9	2.6	3.4
Q4C2	10	3.4	11.14	10.63	17.47	0.17	7424	3.13	1.15	1.15	1.26	3.9	3.9	4.3
Q5C2	10	3.4	12.91	12.66	16.99	0.15	7220	3.72	1.24	1.21	1.38	4.2	4.1	4.7
Q6C2	10	3.4	15.00	13.38	18.69	0.16	7942	3.94	1.41	1.32	1.65	4.8	4.5	5.6
Q7C2	10	3.4	17.05	15.25	18.64	0.15	7920	4.49	1.53	1.44	1.74	5.2	4.9	5.9
Q8C2	10	3.4	19.92	17.17	19.34	0.15	8219	5.05	1.65	1.62	1.85	5.6	5.5	6.3
Q9C2	10	3.4	23.03	19.50	19.68	0.14	8365	5.74	1.79	1.76	2.00	6.1	6.0	6.8
Q10C2	10	3.4	25.06	20.58	20.29	0.14	8625	6.05	1.94	1.88	2.21	6.6	6.4	7.5
Q11C2	10	3.4	28.00	23.44	19.91	0.13	8460	6.89	2.03	2.00	2.32	6.9	6.8	7.9
Q12C2	10	3.4	29.95	25.00	19.97	0.13	8487	7.35	2.12	2.09	2.35	7.2	7.1	8.0
Q1C2-1	10	4.8	6.92	7.30	15.80	0.19	9480	1.52	0.46	0.42	0.54	2.2	2.0	2.6
Q2C2-1	10	4.8	10.97	11.07	16.52	0.16	9912	2.31	1.06	1.02	1.29	5.1	4.9	6.2
Q3C2-1	10	4.8	15.00	13.60	18.38	0.16	11031	2.83	1.33	1.33	1.60	6.4	6.4	7.7
Q1D2	15	3.4	4.03	5.44	12.34	0.17	5244	1.60	0.21	0.65	0.76	0.7	2.2	2.6
Q2D2	15	3.4	6.92	7.65	15.08	0.17	6408	2.25	0.29	0.71	0.91	1.0	2.4	3.1
Q3D2	15	3.4	8.90	9.36	15.85	0.17	6735	2.75	0.71	0.88	1.12	2.4	3.0	3.8
Q4D2	15	3.4	10.97	10.67	17.14	0.17	7284	3.14	1.15	1.26	1.38	3.9	4.3	4.7
Q5D2	15	3.4	12.91	12.38	17.37	0.16	7384	3.64	1.24	1.32	1.47	4.2	4.5	5.0
Q6D2	15	3.4	15.00	13.48	18.55	0.16	7883	3.96	1.41	1.47	1.76	4.8	5.0	6.0
Q7D2	15	3.4	17.05	15.60	18.22	0.15	7743	4.59	1.50	1.62	1.85	5.1	5.5	6.3
Q8D2	15	3.4	19.92	17.10	19.42	0.15	8253	5.03	1.65	1.76	1.97	5.6	6.0	6.7
Q9D2	15	3.4	23.03	19.70	19.48	0.14	8281	5.79	1.76	1.91	2.06	6.0	6.5	7.0
Q10D2	15	3.4	25.06	21.05	19.84	0.14	8432	6.19	1.94	2.09	2.32	6.6	7.1	7.9
Q11D2	15	3.4	27.72	23.70	19.49	0.13	8285	6.97	2.00	2.21	2.50	6.8	7.5	8.5
Q12D2	15	3.4	29.67	24.75	19.98	0.13	8491	7.28	2.09	2.26	2.50	7.1	7.7	8.5
Q1D2-1	15	4.8	6.92	7.34	15.71	0.19	9428	1.53	0.31	0.58	0.52	1.5	2.8	2.5
Q2D2-1	15	4.8	10.97	11.50	15.90	0.15	9542	2.40	0.92	0.94	1.23	4.4	4.5	5.9
Q3D2-1	15	4.8	15.00	13.43	18.62	0.16	11170	2.80	1.15	1.25	1.48	5.5	6.0	7.1
Q1E2	20	3.4	4.03	5.58	12.03	0.16	5112	1.64	0.15	0.79	0.59	0.5	2.7	2.0
Q2E2	20	3.4	7.05	7.53	15.61	0.18	6635	2.21	0.35	0.94	1.03	1.2	3.2	3.5
Q3E2	20	3.4	9.05	9.46	15.95	0.17	6778	2.78	0.74	1.12	1.21	2.5	3.8	4.1
Q4E2	20	3.4	10.97	10.30	17.76	0.18	7546	3.03	1.12	1.44	1.47	3.8	4.9	5.0
Q5E2	20	3.4	12.91	11.40	18.87	0.18	8019	3.35	1.32	1.62	1.74	4.5	5.5	5.9
Q6E2	20	3.4	15.00	13.50	18.52	0.16	7871	3.97	1.44	1.65	1.97	4.9	5.6	6.7
Q7E2	20	3.4	17.05	15.37	18.49	0.15	7858	4.52	1.53	1.71	2.09	5.2	5.8	7.1
Q8E2	20	3.4	19.92	17.25	19.25	0.15	8181	5.07	1.68	1.79	2.32	5.7	6.1	7.9
Q1E2-1	20	4.8	6.92	7.50	15.38	0.18	9227	1.56	0.27	0.77	0.50	1.3	3.7	2.4
Q2E2-1	20	4.8	10.97	10.50	17.42	0.17	10450	2.19	0.75	1.04	1.10	3.6	5.0	5.3
Q3E2-1	20	4.8	15.00	13.50	18.52	0.16	11113	2.81	0.98	1.44	1.44	4.7	6.9	6.9

หมายเหตุ : ¹มุมเอียงของเสาเข็มจากแนวตั้งขนาดเฉลี่ยวัสดุท้องน้ำ (d₅₀) = 0.27 มม.

ตาราง 3-7 เงื่อนไขและผลการทดลอง (กรณีเสาชิมเอียงตั้งฉากกับทิศทางกรไหล, $\alpha = 90^\circ$)

Run No.	β ⁽¹⁾	Dischage (Q, l/sec)	Flow Depth (y, cm)	Velocity (V, cm/s)	Fr	Rp	y/D ⁽²⁾	d _{s1} /D	d _{s2} /D	d _{s3} /D	Scour Depth (d _s , cm)		
											Pile no.1	Pile no.2	Pile no.3
Q1A3	0	4.03	5.10	13.16	0.19	5593	1.50	0.65	0.32	0.62	2.2	1.1	2.1
Q2A3	0	6.92	7.40	15.59	0.18	6624	2.18	0.74	0.41	0.65	2.5	1.4	2.2
Q3A3	0	9.05	9.21	16.38	0.17	6961	2.71	1.06	0.71	0.85	3.6	2.4	2.9
Q4A3	0	11.14	10.77	17.24	0.17	7328	3.17	1.26	0.97	1.06	4.3	3.3	3.6
Q5A3	0	12.91	12.32	17.46	0.16	7420	3.62	1.35	1.03	1.26	4.6	3.5	4.3
Q6A3	0	15.00	13.63	18.34	0.16	7796	4.01	1.50	1.09	1.50	5.1	3.7	5.1
Q7A3	0	17.05	15.36	18.50	0.15	7864	4.52	1.59	1.21	1.59	5.4	4.1	5.4
Q8A3	0	19.92	17.33	19.16	0.15	8143	5.10	1.71	1.38	1.71	5.8	4.7	5.8
Q9A3	0	23.03	19.70	19.48	0.14	8281	5.79	1.82	1.47	1.82	6.2	5.0	6.2
Q10A3	0	25.06	21.00	19.89	0.14	8452	6.18	1.97	1.59	2.00	6.7	5.4	6.8
Q11A3	0	28.00	23.67	19.71	0.13	8378	6.96	2.06	1.74	2.09	7.0	5.9	7.1
Q12A3	0	29.95	24.71	20.20	0.13	8586	7.27	2.18	1.82	2.21	7.4	6.2	7.5
Q1B3	5	4.03	5.46	12.29	0.17	5224	1.61	0.53	0.41	0.59	1.8	1.4	2.0
Q2B3	5	6.92	7.65	15.08	0.17	6408	2.25	0.68	0.50	0.74	2.3	1.7	2.5
Q3B3	5	8.90	9.26	16.02	0.17	6808	2.72	1.09	0.85	1.15	3.7	2.9	3.9
Q4B3	5	10.97	10.63	17.20	0.17	7312	3.13	1.38	1.12	1.41	4.7	3.8	4.8
Q5B3	5	12.91	12.40	17.35	0.16	7372	3.65	1.47	1.21	1.56	5.0	4.1	5.3
Q6B3	5	15.00	13.35	18.73	0.16	7960	3.93	1.62	1.32	1.68	5.5	4.5	5.7
Q7B3	5	16.84	15.06	18.64	0.15	7921	4.43	1.76	1.41	1.82	6.0	4.8	6.2
Q8B3	5	19.92	17.00	19.53	0.15	8301	5.00	1.97	1.74	2.06	6.7	5.9	7.0
Q9B3	5	23.03	19.90	19.29	0.14	8197	5.85	2.09	1.82	2.24	7.1	6.2	7.6
Q10B3	5	25.06	21.13	19.77	0.14	8400	6.21	2.21	1.97	2.41	7.5	6.7	8.2
Q11B3	5	28.00	23.70	19.69	0.13	8367	6.97	2.32	2.09	2.53	7.9	7.1	8.6
Q12B3	5	29.67	24.65	20.06	0.13	8526	7.25	2.35	2.15	2.62	8.0	7.3	8.9
Q1C3	10	4.03	5.50	12.20	0.17	5186	1.62	0.50	0.44	0.59	1.7	1.5	2.0
Q2C3	10	7.05	7.55	15.57	0.18	6617	2.22	0.65	0.44	0.91	2.2	1.5	3.1
Q3C3	10	8.90	9.20	16.12	0.17	6852	2.71	1.03	0.82	1.18	3.5	2.8	4.0
Q4C3	10	11.14	10.58	17.55	0.17	7460	3.11	1.38	1.15	1.47	4.7	3.9	5.0
Q5C3	10	12.91	12.33	17.44	0.16	7414	3.63	1.44	1.21	1.59	4.9	4.1	5.4
Q6C3	10	15.00	13.60	18.38	0.16	7813	4.00	1.56	1.29	1.74	5.3	4.4	5.9
Q7C3	10	17.05	15.28	18.60	0.15	7905	4.49	1.68	1.41	1.85	5.7	4.8	6.3
Q8C3	10	20.15	16.85	19.93	0.16	8472	4.96	1.88	1.62	2.12	6.4	5.5	7.2
Q9C3	10	23.03	19.80	19.39	0.14	8239	5.82	2.03	1.76	2.32	6.9	6.0	7.9
Q10C3	10	25.06	20.72	20.16	0.14	8566	6.09	2.21	1.97	2.44	7.5	6.7	8.3
Q11C3	10	28.00	23.60	19.77	0.13	8402	6.94	2.29	2.15	2.53	7.8	7.3	8.6
Q12C3	10	29.67	24.83	19.91	0.13	8464	7.30	2.38	2.21	2.65	8.1	7.5	9.0

หมายเหตุ : ¹มุมเอียงของเสาชิมจากแนวตั้ง

²ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาชิม (D) = 3.4 ซม.

ขนาดเฉลี่ยวัสดุท้องน้ำ (d₅₀) = 0.27 มม.

ตาราง 3-7 (ต่อ) เงื่อนไขและผลการทดลอง (กรณีเสาเข็มเอียงตั้งฉากกับทิศทางการไหล, $\alpha = 90^\circ$)

Run No.	β ⁽¹⁾	Dischage (Q, l/sec)	Flow Depth (y, cm)	Velocity (V, cm/s)	Fr	Rp	y/D ⁽²⁾	d _{s1} /D	d _{s2} /D	d _{s3} /D	Scour Depth (d _s , cm)		
											Pile no.1	Pile no.2	Pile no.3
Q1D3	15	4.03	5.40	12.43	0.17	5282	1.59	0.44	0.44	0.94	1.5	1.5	3.2
Q2D3	15	6.92	7.42	15.54	0.18	6606	2.18	0.76	0.59	1.12	2.6	2.0	3.8
Q3D3	15	8.90	9.28	15.98	0.17	6793	2.73	1.03	0.85	1.21	3.5	2.9	4.1
Q4D3	15	11.14	10.64	17.45	0.17	7417	3.13	1.29	1.12	1.38	4.4	3.8	4.7
Q5D3	15	13.09	12.27	17.78	0.16	7556	3.61	1.41	1.24	1.50	4.8	4.2	5.1
Q6D3	15	15.20	13.40	18.91	0.16	8035	3.94	1.59	1.38	1.74	5.4	4.7	5.9
Q7D3	15	17.05	15.17	18.73	0.15	7962	4.46	1.68	1.47	1.88	5.7	5.0	6.4
Q8D3	15	20.15	17.34	19.37	0.15	8233	5.10	1.79	1.59	2.00	6.1	5.4	6.8
Q9D3	15	23.03	19.44	19.74	0.14	8391	5.72	1.97	1.79	2.24	6.7	6.1	7.6
Q10D3	15	24.80	21.00	19.68	0.14	8365	6.18	2.06	1.88	2.35	7.0	6.4	8.0
Q11D3	15	28.00	23.50	19.85	0.13	8438	6.91	2.12	2.00	2.44	7.2	6.8	8.3
Q12D3	15	29.95	24.90	20.05	0.13	8521	7.32	2.15	2.06	2.50	7.3	7.0	8.5
Q1E3	20	4.03	5.37	12.50	0.17	5312	1.58	0.32	0.62	0.79	1.1	2.1	2.7
Q2E3	20	6.92	7.62	15.14	0.18	6433	2.24	0.53	0.68	0.94	1.8	2.3	3.2
Q3E3	20	8.90	9.22	16.09	0.17	6838	2.71	0.88	0.85	1.21	3.0	2.9	4.1
Q4E3	20	10.97	10.65	17.17	0.17	7298	3.13	1.21	1.12	1.32	4.1	3.8	4.5
Q5E3	20	13.09	12.15	17.95	0.16	7631	3.57	1.38	1.24	1.44	4.7	4.2	4.9
Q6E3	20	15.00	13.46	18.58	0.16	7895	3.96	1.56	1.35	1.56	5.3	4.6	5.3
Q7E3	20	17.05	14.96	19.00	0.16	8074	4.40	1.74	1.47	1.74	5.9	5.0	5.9
Q8E3	20	20.15	16.76	20.04	0.16	8518	4.93	1.88	1.65	2.00	6.4	5.6	6.8
Q9E3	20	23.03	19.55	19.63	0.14	8344	5.75	2.03	1.74	2.12	6.9	5.9	7.2
Q10E3	20	24.80	20.92	19.76	0.14	8397	6.15	2.18	1.88	2.35	7.4	6.4	8.0
Q11E3	20	28.00	23.62	19.75	0.13	8395	6.95	2.26	1.94	2.41	7.7	6.6	8.2
Q12E3	20	29.67	24.62	20.08	0.13	8536	7.24	2.32	1.97	2.50	7.9	6.7	8.5

หมายเหตุ : ¹มุมเอียงของเสาเข็มจากแนวดิ่ง

²ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (D) = 3.4 ซม.

ขนาดเฉลี่ยวัสดุท้องน้ำ (d₅₀) = 0.27 มม.

3.5 พฤติกรรมและกลไกการกัดเซาะ

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงพฤติกรรมและกลไกการกัดเซาะที่เกิดขึ้นในการศึกษานี้ โดยการเฝ้าสังเกตผ่านกล้องถ่ายภาพนิ่งและกล้องวีดีโอ โดยจะแยกพิจารณาออกเป็น 3 ส่วนตามระนาบการเอียงของเสาเข็ม ดังนี้

3.5.1 พฤติกรรมและกลไกการกัดเซาะรอบเสาเข็มที่เอียงในระนาบแนวการไหล

การกัดเซาะมีกลไกหลักมาจากการไหลม้วนวน (vortex system) 2 รูปแบบ คือ การไหลม้วนวนรูปเกือกม้า (horseshoe vortex) เป็นผลมาจากกระแสที่ไหลเข้าปะทะกับเสาเข็มทำให้เกิดทิศทางการไหลพุ่งลงด้านล่าง (downflow) ซึ่งเป็นการกระทำอย่างแรกที่ทำให้เกิดการกัดเซาะ เมื่อกระทบกับวัสดุท้องน้ำแล้วจะเกิดทิศทางวนกลับในแนวตั้ง มีลักษณะเป็นรูปเกือกม้า การไหลหมุนวนนี้จะเคลื่อนตัวไปทางด้านท้ายน้ำเนื่องจากกระแสที่ไหลมาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้วัสดุท้องน้ำเกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะม้วนกลิ้งวนรอบเสาเข็มจนเกิดความลึกลับบริเวณผิวด้านต้นน้ำและด้านข้างของเสาเข็ม

ส่วนการไหลหมุนวนอีกรูปแบบหนึ่งเกิดจากการไหลม้วนกลิ้งวนรอบเสาเข็ม (surface roller) ทำให้เกิดการแยกตัวของเส้นกระแส (streamline) และเนื่องจากการไหลมีลักษณะแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ทำให้การแยกตัวของเส้นกระแสหลังจากผ่านเสาเข็มไปแล้วเกิดการม้วนวนตามแนวการไหล (wake vortex) ขึ้นทางด้านท้ายน้ำของเสาเข็ม ทำให้เกิดน้ำวนบริเวณอับกระแสจากการบดบังของเสาเข็ม วัสดุท้องน้ำจะถูกกววขึ้นให้พุ่งกระจายทางผิวด้านท้ายน้ำของเสาเข็ม และเคลื่อนตัวไปทางด้านท้ายน้ำตามทิศทางการไหล มีลักษณะคล้ายกับพายุหมุนลูกเล็กๆ หอบเอาวัสดุท้องน้ำไปทางท้ายน้ำ ซึ่งการหมุนวนตามแนวการไหลนี้จะมีกำลังลดลงตามระยะทางด้านท้ายน้ำของเสาเข็มที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการตกตะกอนและทับถมทางด้านท้ายน้ำของเสาเข็ม

กรณีที่เสาเข็มตั้งตรงทั้ง 2 ต้น ในเสาเข็มต้นแรกซึ่งอยู่ทางด้านต้นน้ำ กำลังของการไหลม้วนวนรูปเกือกม้าจะมีมาก สังเกตได้จากการพุ่งกระจายของวัสดุท้องน้ำในลักษณะกลิ้งม้วนวนภายในหลุมมีมาก เนื่องด้วยผิวเสาเข็มได้รับการปะทะจากกระแสโดยตรง แต่ช่วยบดบังกระแสที่ไหลเข้ามาปะทะกับผิวเสาเข็มต้นที่ 2 ทำให้กำลังของการไหลพุ่งลงด้านล่างลดลงกว่าเสาเข็มต้นแรก ยังผลให้ความรุนแรงการม้วนวนรูปเกือกม้าน้อยลง ส่วนกระแสที่ไหลม้วนวนรอบเสาเข็มต้นแรกจนเกิดการม้วนวนตามแนวการไหลด้านหลังต่อม่อขึ้น จะหอบเอาวัสดุท้องน้ำที่ถูกกววขึ้นทางผิวด้านท้ายน้ำของเสาเข็มต้นแรกบางส่วนเข้าสู่หลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2

และอีกบางส่วนจะถูกพัดพาตามกระแสน้ำไปรวมกับวัสดุท้องน้ำที่ถูกพัดพาจากการม้วนวนตามแนวการไหลที่เกิดจากเสาเข็มต้นที่ 2 ไปตกตะกอนและทับถมทางด้านท้ายน้ำของเสาเข็ม

ในส่วนกรณีที่เสาเข็มต้นแรกเอียงไปทางท้ายน้ำ ที่มุมเอียง 5° ถึง 20° กำลังของการไหลม้วนวนรูปเกือกม้ามีกำลังอ่อนลงตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตจากการฟุ้งกระจายของวัสดุท้องน้ำที่เกิดขึ้นน้อย เนื่องจากผิวเสาเข็มทางด้านต้นน้ำของเสาเข็มต้นแรก มีความลาดตามมุมเอียงจึงช่วยลดกำลังของการไหลพุ่งลงด้านล่างเนื่องจากกระแสที่ไหลเข้ามาปะทะกับผิวเสาเข็ม ส่วนการม้วนวนตามแนวการไหลเมื่อผ่านเสาเข็มต้นแรกที่มีมุมเอียงแล้ว จะไปทับซ้อนกับการม้วนวนตามแนวการไหลที่เกิดจากเสาเข็มต้นที่ 2 ทำให้เกิดความปั่นป่วนบริเวณระยะห่างระหว่างเสาเข็ม และยังเสาเข็มต้นแรกเอียงเข้าหาเสาเข็มต้นที่ 2 มากขึ้น ยิ่งทำให้ระยะห่างระหว่างเสาเข็มในแนวตั้งยิ่งลดลง ทำให้ความปั่นป่วนในบริเวณดังกล่าวมีมากขึ้น รูป 3-2(ก) แสดงภาพร่างที่ได้จากการเฝ้าสังเกตพฤติกรรมและกลไกการกัดเซาะที่เกิดขึ้นในกรณีเสาเข็มมีทิศทางเอียงตามแนวการไหล

ลักษณะของหลุมกัดเซาะจะมีลักษณะคล้ายกับหลุมกัดเซาะรอบตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน (blunt-nosed pier) กล่าวคือ หลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 จะเชื่อมติดกับหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 จนมีลักษณะเป็นหลุมเรียวยาว แต่ยังมีขอบสันขึ้นมาทั้งแบ่งระหว่างหลุมกัดเซาะ 2 หลุม โดยที่ลักษณะของหลุมกัดเซาะเมื่อมีมุมเอียงเปลี่ยนแปลงจะมีลักษณะที่ไม่แตกต่างกัน

3.5.2 พฤติกรรมและกลไกการกัดเซาะรอบเสาเข็มที่เอียงในระนาบทแยงกับแนวการไหล

เนื่องจากกรณีเสาเข็มเอียงทแยงกับทิศทางการไหล ทำให้จำนวนของเสาเข็มที่คาดว่าจะได้รับอิทธิพลเนื่องจากการเอียงของเสาเข็มแตกต่างไปจากกรณีเสาเข็มที่มีการเอียงไปทางด้านท้ายน้ำ ซึ่งในกรณีนี้ใช้เสาเข็มข้างเคียงจำนวน 2 ต้น พฤติกรรมการกัดเซาะที่เกิดขึ้น เมื่อเสาเข็มตั้งตรงทั้ง 3 ต้น จะอาศัยกลไกของการไหลม้วนวนรูปเกือกม้า และการไหลม้วนวนตามแนวการไหลเป็นหลัก ดังแสดงในรูป 3-2(ข) โดยเฉพาะเสาเข็มต้นที่ 1 และเสาเข็มต้นที่ 3 ซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายของเสาเข็มต้นที่ 2 จะได้รับการปะทะของกระแสโดยตรงทำให้กำลังของการไหลม้วนวนรูปเกือกม้ามีมาก ในส่วนของเสาเข็มต้นที่ 2 จะถูกบดบังกระแสน้ำจากเสาเข็มต้นแรก ทำให้กำลังของการไหลม้วนวนรูปเกือกม้ามีน้อยกว่า และเมื่อกระแสน้ำไหลผ่านเสาเข็มต้นแรกไปแล้วจะเกิดการม้วนวนตามแนวการไหลขึ้นทางท้ายน้ำ เช่นเดียวกับเสาเข็มต้นที่ 3 พร้อมทั้งพัดพาวัสดุท้องน้ำที่

ถูกกัดเซาะจากหลุมของเสาเข็มต้นแรกเข้าสู่หลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 และเมื่อผ่านเสาเข็มต้นที่ 2 ไปแล้ววัสดุท้องน้ำที่ถูกกัดเซาะจะไปตกตะกอนและทับถมทางด้านท้ายน้ำของกลุ่มเสาเข็ม

เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทแยงกับทิศทางการไหลของน้ำ ที่มีมุมเอียง 5° ถึง 20° โดยจะเอียงเข้าหาเสาเข็มต้นที่ 3 พร้อมทั้งเผยให้เห็นผิวเสาเข็มต้นที่ 2 ซึ่งหมายความว่า เมื่อเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุมกับแนวตั้งมากก็จะเอียงเข้าหาเสาเข็มต้นที่ 3 มาก ทำให้ระยะห่างระหว่างเสาเข็มในแนวตั้งยิ่งลดลง โดยจะไม่ไปบดบังผิวของเสาเข็มต้นที่ 3 ที่จะรับการปะทะของกระแสน้ำ แต่จะไปเบี่ยงเบนการม้วนวนตามแนวการไหลที่เกิดจากเส้นกระแสน้ำที่แยกตัวจากการไหลเมื่อผ่านเสาเข็มต้นที่ 1 ให้เข้าใกล้และทับซ้อนกับเสาเข็มต้นที่ 3 มากขึ้น ส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนรอบเสาเข็มต้นที่ 3 มากกว่ากรณีเสาเข็มต้นที่ 1 ตั้งตรง ส่วนเสาเข็มต้นที่ 2 จะถูกเผยให้เห็นผิวทางด้านต้นน้ำมากขึ้นเมื่อมุมเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 เพิ่มขึ้น กระแสน้ำบางส่วนจะไม่ถูกบดบังจากเสาเข็มต้นที่ 1 ทำให้สามารถไหลเข้าปะทะกับผิวเสาเข็มต้นที่ 2 ได้โดยตรง ยังผลให้การไหลม้วนวนรูปเกือกม้ามีกำลังมากขึ้น

หลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 1 จะกินบริเวณกว้างกว่าหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่ 2 และต้นที่ 3 เนื่องจากเสาเข็มต้นที่ 1 อยู่ทางด้านต้นน้ำมากกว่าเสาเข็มต้นที่ 2 และต้นที่ 3 หลุมกัดเซาะทั้ง 3 หลุมจะเชื่อมติดกันจนคล้ายกับเป็นหลุมกัดเซาะขนาดใหญ่ แต่ยังมีสันขอบของแต่ละหลุมที่มีด้านติดกันแบ่งหลุมกัดเซาะแต่ละหลุมออกจากกัน โดยที่ลักษณะของหลุมกัดเซาะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงจะมีลักษณะที่ไม่แตกต่างกัน

3.5.3 พฤติกรรมและกลไกการกัดเซาะรอบเสาเข็มที่เอียงในระนาบตั้งฉากกับแนวการไหล

พฤติกรรมและกลไกการกัดเซาะที่เกิดขึ้นกับเสาเข็มตั้งตรง 3 ต้น ในกรณีนี้จะมีลักษณะเดียวกันกับเสาเข็มตั้งตรง 3 ต้น ของกรณีเสาเข็มเอียงทแยงกับทิศทางการไหล เนื่องจากใช้จำนวนเสาเข็มเท่ากัน และมีรูปแบบการจัดวางแบบเดียวกัน

ในกรณีเสาเข็มต้นที่ 1 เอียงทำมุม 5° ถึง 20° ในทิศทางตั้งฉากกับแนวการไหล ยังคงซึ่งกลไกของการไหลม้วนวนรูปเกือกม้า และการไหลม้วนวนตามแนวการไหลเป็นหลัก ดังแสดงในรูป 3-2(ค) แต่ที่มีมุมเอียง 5° เสาเข็มยังเอียงจากแนวตั้งไม่มากนัก กระแสน้ำที่ไหลเข้าปะทะกับเสาเข็มทำให้เกิดการไหลพุ่งลงด้านล่างสู่ท้องน้ำจนเกิดการไหลม้วนวนรูปเกือกม้าได้ดีกว่าเสาเข็มที่มีมุมเอียง 10° , 15° และ 20° เนื่องจากเสาเข็มที่มีมุมเอียงดังกล่าวมีระยะเอียงจากฐานมากขึ้นตามลำดับ จึงทำให้การไหลพุ่งลงด้านล่างส่งอิทธิพลที่ทำให้เกิดการม้วนวนรูปเกือกม้ารอบฐาน

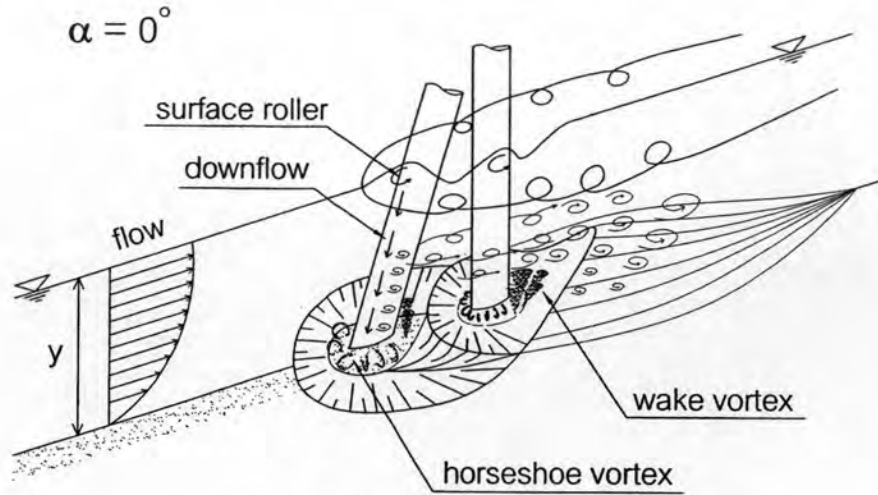
เสาเข็มเกิดขึ้นน้อย แต่การเอียงของเสาเข็มที่มากขึ้น ยังผลให้ความกว้างของหลุมกัดเซาะมีมากขึ้นจากการที่เสาเข็มมีระนาบในแนวตั้งที่รับภาระเข้าปะทะของกระแสน้ำกว้างเพิ่มขึ้นตามมุมเอียง

ในส่วนของเสาเข็มต้นที่ 2 และต้นที่ 3 จะได้รับอิทธิพลจากการเอียงของเสาเข็มต้นที่ 1 โดยผิวทางด้านต้นน้ำของเสาเข็มต้นที่ 2 บางส่วนจะไม่ถูกบดบังจากเสาเข็มต้นที่ 1 ซึ่งความกว้างของผิวเสาเข็มต้นที่ 2 จะมีมากขึ้นตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น จึงสามารถรับกระแสน้ำที่ไหลเข้ามาปะทะได้โดยตรง ส่วนเสาเข็มต้นที่ 3 จะได้รับผลจากการม้วนวนตามแนวการไหลจากเสาเข็มต้นที่ 1 เนื่องจากมุมเอียงจะเบี่ยงเบนการไหลของกระแสน้ำที่ไหลผ่านเสาเข็มให้เข้าใกล้เสาเข็มต้นที่ 3 มากขึ้นตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น ประกอบกับมีกระแสน้ำที่ไหลเข้ามาปะทะกับผิวของเสาเข็มต้นที่ 3 ได้โดยตรง ส่งผลให้เกิดการทับซ้อนกันระหว่างกระแสน้ำกับการม้วนวนตามแนวการไหลในเสาเข็มต้นที่ 3

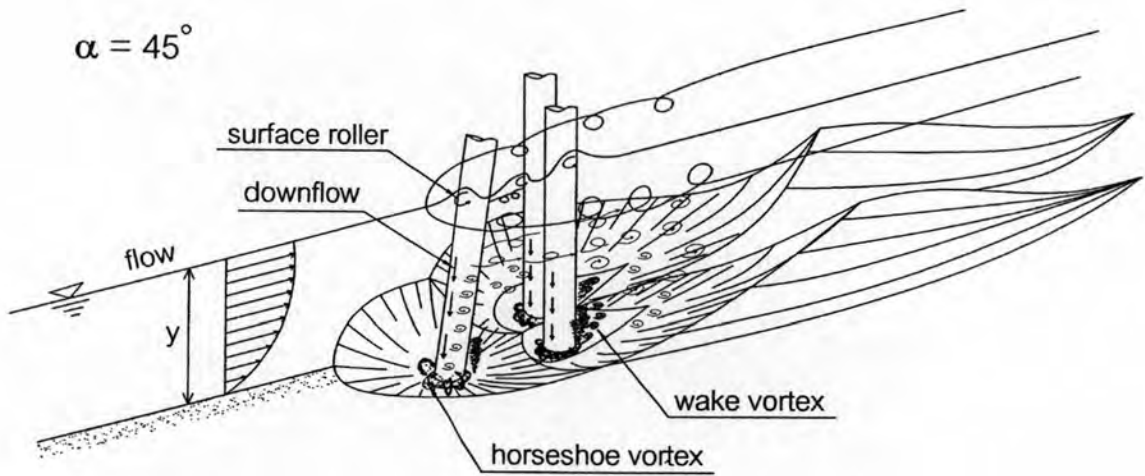
3.6 ผลการเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มเอียง

ในเบื้องต้นเพื่อให้เห็นถึงผลการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นหน้าที่เกิดจากการปรับเอียงทำมุมกับแนวตั้ง (inclination angle, β) 4 มุม คือ 5° , 10° , 15° และ 20° ในระนาบการเอียงต่างๆ (horizontal inclination plane, α) คือ ระนาบเอียงตามทิศทางการไหล ($\alpha = 0^\circ$) ระนาบการเอียงทแยงกับทิศทางการไหล ($\alpha = 45^\circ$) และระนาบการเอียงตั้งฉากกับทิศทางการไหล ($\alpha = 90^\circ$) โดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่เอียงต่อความลึกการไหล (d_{s1}/y) กับการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงจากแนวตั้ง แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง ดังรูป 3-3 พบว่า ค่าความลึกหลุมกัดเซาะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเสาเข็มเอียงทำมุมกับแนวตั้งในระนาบการเอียงต่างๆ ที่แตกต่างกัน โดยที่ ระนาบการเอียงตามทิศทางการไหล แนวโน้มของค่าความลึกหลุมกัดเซาะมีแนวโน้มลดลงตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น ส่วนในระนาบการเอียงทแยงกับทิศทางการไหลมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้นในช่วงมุมเอียง 5° จนถึง 15° และกลับมีค่าเพิ่มขึ้นที่มุมเอียง 20° และในระนาบการเอียงตั้งฉากกับทิศทางการไหล ค่าความลึกหลุมกัดเซาะมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของเสาเข็ม แต่ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง

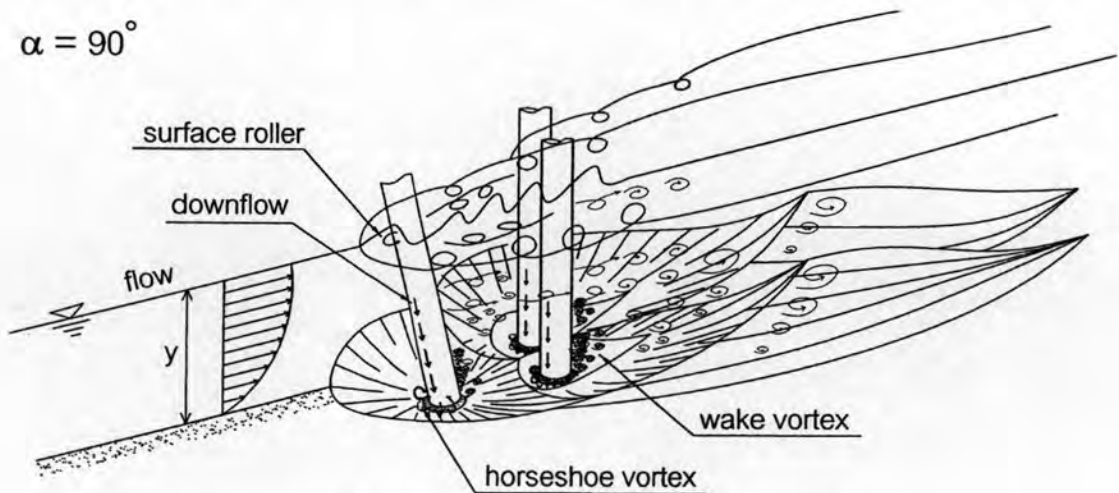
พิจารณาการเปลี่ยนแปลงระนาบการเอียงของเสาเข็ม (α) ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกหลุมกัดเซาะ แสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่เอียงต่อความลึกการไหล (d_{s1}/y) กับระนาบการเอียงของเสาเข็มในทิศทางต่างๆ ดังรูป 3-4 ซึ่งให้เห็นว่าในภาพรวมว่าค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากระนาบ



ก) เสาค้ำต้นที่ 1 เอียงในระนาบตามทิศทางการไหล



ข) เสาค้ำต้นที่ 1 เอียงในระนาบทแยงกับทิศทางการไหล

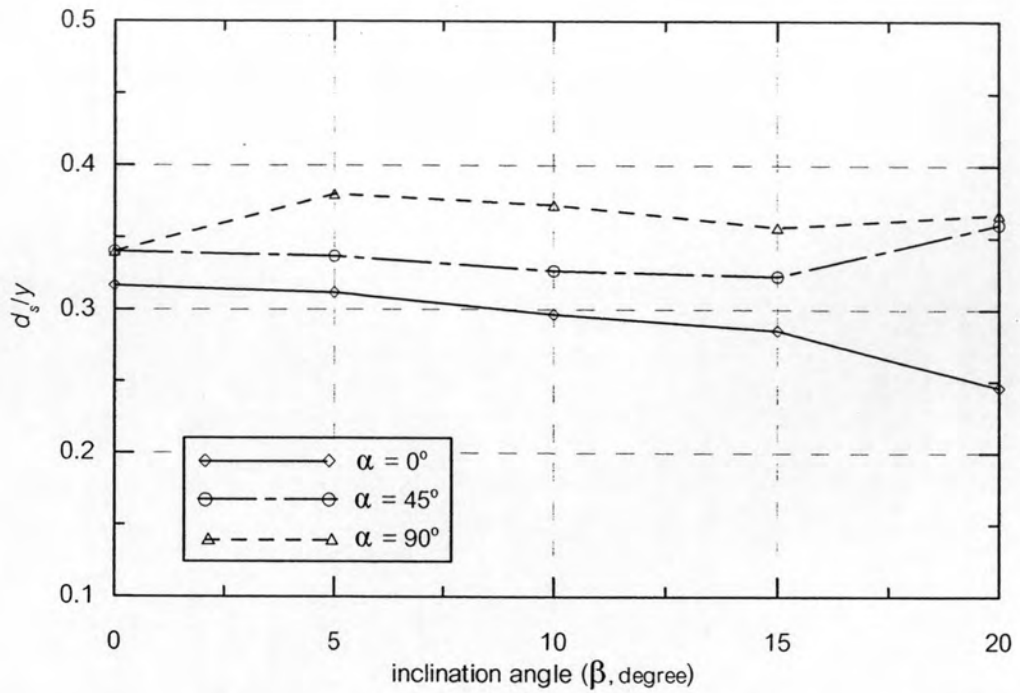


ค) เสาค้ำต้นที่ 1 เอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหล

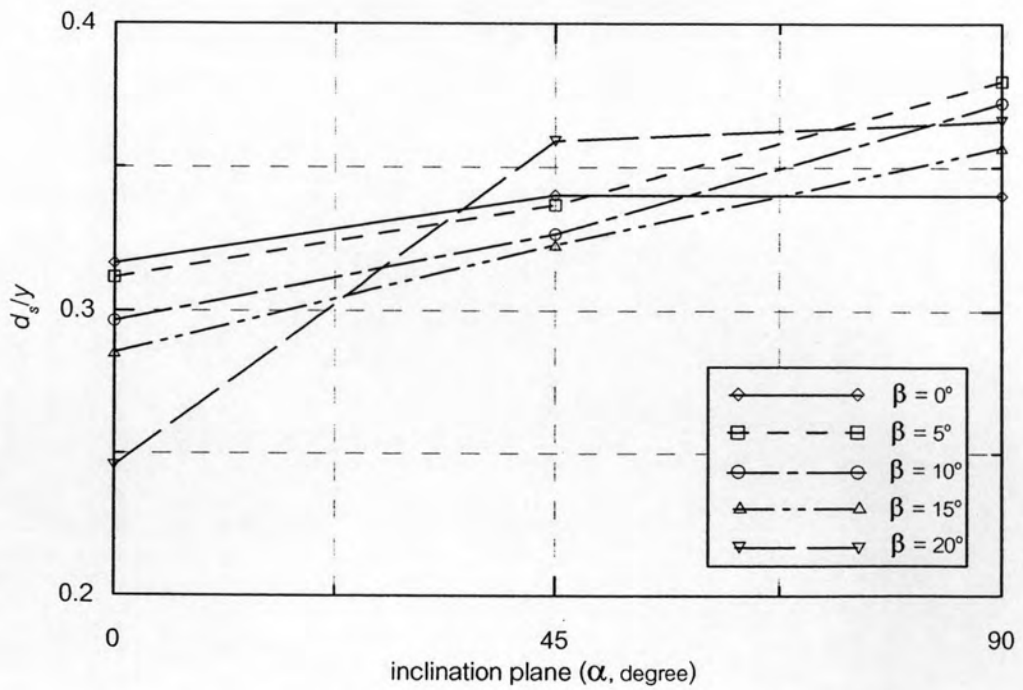
รูป 3-2 กลไกการกัดเซาะเนื่องจากมุมเอียงของเสาค้ำในระนาบการเอียงต่างๆ

การเอียงแนวเดียวกับทิศทางการไหล ($\alpha = 0^\circ$) เมื่อมีการเปลี่ยนการเอียงให้อยู่ในระนาบที่แย้งกับทิศทางการไหล ($\alpha = 45^\circ$) และระนาบการเอียงตั้งฉากกับทิศทางการไหล ($\alpha = 90^\circ$) กล่าวคือ การเอียงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางการไหลจะให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะมากกว่าระนาบการเอียงที่แย้งมุม 45° กับทิศทางการไหล และระนาบการเอียงแนวเดียวกับทิศทางการไหล ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่มุมเอียงจากแนวตั้ง (β) มุมเดียวกัน

จากลักษณะแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะดังกล่าว จะใช้เป็นแนวทางในการกำหนดการวิเคราะห์ผลที่เกิดจากการปรับเอียงของเสาเข็มต้นหน้า ในระนาบการเอียงต่างๆ โดยจะแยกวิเคราะห์ในแต่ละระนาบการเอียงของเสาเข็มเพื่อดูผลที่เกิดขึ้น และพิจารณารวมผลของการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงในระนาบการเอียงทั้งหมด เพื่อที่จะใช้อธิบายถึงผลการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงในระนาบการเอียงต่างๆ ที่มีต่อความลึกหลุมกัดเซาะ



รูป 3-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่เอียงต่อความลึกการไหล กับ มุมเอียงของเสาเข็ม



รูป 3-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มต้นที่เอียงต่อความลึกการไหล กับ ระนาบการเอียงของเสาเข็ม