บทที่ 3

แบบจำลองชลศาสตร์ และการดำเนินการศึกษา

3.1 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ใช้รางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular flume) ขนาดกว้าง 0.60 เมตร ยาว 18.0 เมตร สูง 0.75 เมตร ซึ่งมีผนังด้านข้าง (side walls) ทั้งสองข้างทำด้วยกระจกใสหนา 1.20 เซนติเมตร พื้นรางทำจากแผ่นเหล็กหนา 6 มิลลิเมตร และความลาดเอียงของรางน้ำ สามารถปรับได้โดยใช้แม่แรงยก (jacks) ซึ่งหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ดูรายละเอียดภาคผนวก ก.

ประตูระบายน้ำที่ปลายสุดของรางน้ำ (tail gate) และความลาดเอียงของท้องน้ำจะเป็นตัวควบคุมความลึกของการไหลในรางน้ำ เพื่อกำหนดให้สภาพการไหลเป็นการไหลต่ำกว่าวิกฤต (subcritical flow) คือ Froude number $(v/(gy)^{1/2})<1$ ดูรายละเอียดภาคผนวก ก.

ตะแกรง (screens) และตะแกรงลดคลื่น (wave suppressors) ติดตั้งบริเวณบ่อด้านเหนือน้ำ (head box) เพื่อลดขนาดของคลื่นและความปั่นป่วนหมุนวนของกระแสน้ำ ดังรูป ก.5 ภาคผนวก ก.

ถาดติดล้อซึ่งวิ่งไปตามรางขนาน (carriage) ใช้สำหรับติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูลต่าง ๆ เช่น เครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำ (current meter) เครื่องมือวัดความลึกน้ำ (point gauge) เป็นต้น ดังรูป ก.7 ภาคผนวก ก.

ฝายสามเหลี่ยมวัดน้ำสันคม (90° V-notch weir) จะถูกติดตั้งที่ด้านท้ายของรางน้ำ เพื่อใช้วัดอัตราการไหลของน้ำ โดยการอ่านค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย (H) แล้วนำไปคำนวณอัตราการไหลจากสูตร $Q=0.016H^{2.46}$ ดูรายละเอียดภาคผนวก ก. ผลการสอบเทียบ (calibration) ดูรายละเอียดภาคผนวก ข.

เครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำ แบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic) รุ่น ACM100-D ดังรูป ก.11 ภาคผนวก ก. ผลการสอบเทียบ ดูรายละเอียดภาคผนวก ข. เครื่องมือวัดความเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำ (sandy surface measuring) สามารถวัดระดับความลึกจากจุดอ้างอิงถึงระดับผิวน้ำ จากจุดอ้างอิงถึงระดับท้องน้ำ และจากระดับผิวน้ำถึงระดับท้องน้ำใช้ในการเก็บค่าความลึกน้ำ เพื่อนำไปหาค่าความลาดเอียงท้องน้ำ ความลาดเอียงผิวน้ำดูรายละเอียดภาคผนวก ก.

Point gauge ใช้สำหรับวัดความลึกของหลุมกัดเซาะ ดูรายละเอียดภาคผนวก ก. ดังรูป ก.13

เครื่องโรยทรายอัตโนมัติ (sand feeder) มีลักษณะเป็นถังเก็บทราย (hopper) ติดตั้งมอเตอร์เขย่า (vibration motor) ที่โรยทรายมีลักษณะเป็นลูกกลิ้ง (roller) หมุนโดยมอเตอร์ไฟฟ้าควบคุมอัตราการหมุนของมอเตอร์ เพื่อกำหนดอัตราการโรยทรายโดยเครื่องปรับกระแสไฟ (AC Inverter Drive) ใช้สำหรับโรยทรายในสภาวะเงื่อนไขการทดลองที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ดูรายละเอียดภาคผนวก ก. ผลการสอบเทียบ ดูรายละเอียดภาคผนวก ข.

ตะแกรงร่อนทราย (sand filter) ใช้สำหรับแยกขนาดทรายเพื่อให้ได้ช่วงขนาดที่กำหนดเพื่อนำมาเป็นวัสดุท้องน้ำ (bed material) นอกจากนั้นยังใช้เพื่อแยกขนาดทรายที่จะนำมาโรยในสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำอีกด้วย ดูรายละเอียดภาคผนวก ก.

เทอร์โมมิเตอร์ สำหรับวัดอุณหภูมิ เพื่อใช้พิจารณาหาคุณสมบัติของน้ำขณะทดลอง เช่น ความหนาแน่น (density) ความหนืดของน้ำ (viscosity)

นาฬิกาจับเวลาเพื่อบันทึกความลึกหลุมกัดเซาะกับเวลา

3.2 แบบจำลองตอม่อสะพาน

การทดลองการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ใช้แบบจำลองตอม่อ 2 ลักษณะ เพื่อใช้ศึกษาหลุมกัดเซาะอันเนื่องจากอิทธิพลของรูปทรงเรขาคณิตของตอม่อ ได้แก่

- ตอม่อรูปทรงกระบอก (cylindrical piers) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 5.0 และ 7.5 ซม.
- ตอม่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน (blunt-nosed piers) มีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (b/l) 2.0/7.5 2.5/12.5 และ 5.0/15.0 ซม./ซม.

แบบจำลองทั้งหมดทำจากไม้ทาด้วยสีขาว ด้านข้างติด Scale เพื่อใช้อ่านค่าความลึกหลุมกัดเซาะ ดูรายละเอียด ภาคผนวก ก.

3.3 วัสดุท้องน้ำ (bed material)

วัสดุท้องน้ำจำลองโดยใช้ทรายจากลำน้ำธรรมชาติ 3 ขนาด ได้แก่ ทรายหยาบ (coarse sand) D_{50} = 2.20 มม. ทรายปานกลาง (medium sand) D_{50} = 1.2 มม. และทรายละเอียด (fine sand) D_{50} = 0.36 มม. นำมาผสมกันในอัตราส่วน 1 : 1 : 1 โดยน้ำหนัก เพื่อให้ได้วัสดุ

ท้องน้ำ ที่มีลักษณะคละกัน (nonuniform sand) มีค่า D_{50} = 0.753 มม. σ_g = 2.75 ϕ = 30 องศา ดูรายละเอียดภาคผนวก ข. นอกจากนั้นทรายที่ได้แยกขนาดไว้แล้วยังนำไปผสมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อใช้ในการโรยทราย ในสภาวะเงื่อนไขที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ

3.4 การดำเนินการศึกษา

การทดลองการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ได้แบ่งเงื่อนไขสภาวะการกัดเซาะออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (clear water scour) และการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (live-bed scour) ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการศึกษา ดังนี้

3.4.1 การดำเนินการศึกษาการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน สภาพเงื่อนไขที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำใช้แบบจำลองตอม่อ 2 ลักษณะ คือ แบบจำลองตอม่อทรงกระบอก (cylindrical piers) และแบบจำลองตอม่อทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน (blunts-nosed piers) ในการทดลอง ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการศึกษา ดังนี้

3.4.1.1 ก่อนการทดลองเตรียมรางน้ำ อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลวัดวัสดุท้องน้ำที่ทำการผสมเรียบร้อยแล้ว และแบบจำลองตอม่อสะพาน พร้อมทั้งตรวจความเรียบร้อยของปั๊มน้ำ

3.4.1.2 ใส่ทรายลงในรางน้ำให้มีความสูงจากพื้นรางน้ำ 20 เซนติเมตร

3.4.1.3 ปรับระดับความลาดเอียงของรางน้ำ (S_0) เริ่มต้นโดยพิจารณาจากสมการ

$S_0 = U_*^2/(gy)$

$U_* = 0.9\text{-}0.95\ U_{*c}$

โดยที่ U_{*c} หาได้จาก Shield's diagram โดยกำหนดให้สภาพตะกอนท้องน้ำก่อนการทดลองเป็นแบบราบเรียบ (non-ripple)

3.4.1.4 คำนวณอัตราการไหลเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองจาก

$Q = vyB$

y = ความลึกน้ำ

B = ความลึกกว้างของ Flume

v = ความเร็วเฉลี่ยการไหล (approach mean velocity)

ซึ่งคำนวณได้จาก

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

n = สัมประสิทธิ์ความขุรขระ

= 0.015 (ดูรายละเอียดภาคผนวก ข.)

3.4.1.5 ค่อย ๆ ปล่อยน้ำเข้ามาในรางน้ำ ตามอัตราการไหลที่คำนวณไว้ โดยไม่ให้เกิดผลกระทบกับวัสดุท้องน้ำ และปรับระดับน้ำโดยใช้ Tail Gate ให้ได้ความลึกการไหล (y) ที่ต้องการและรักษาสภาพการไหลให้ ใกล้เคียงกับการไหลแบบ สม่ำเสมอ (uniform flow condition)

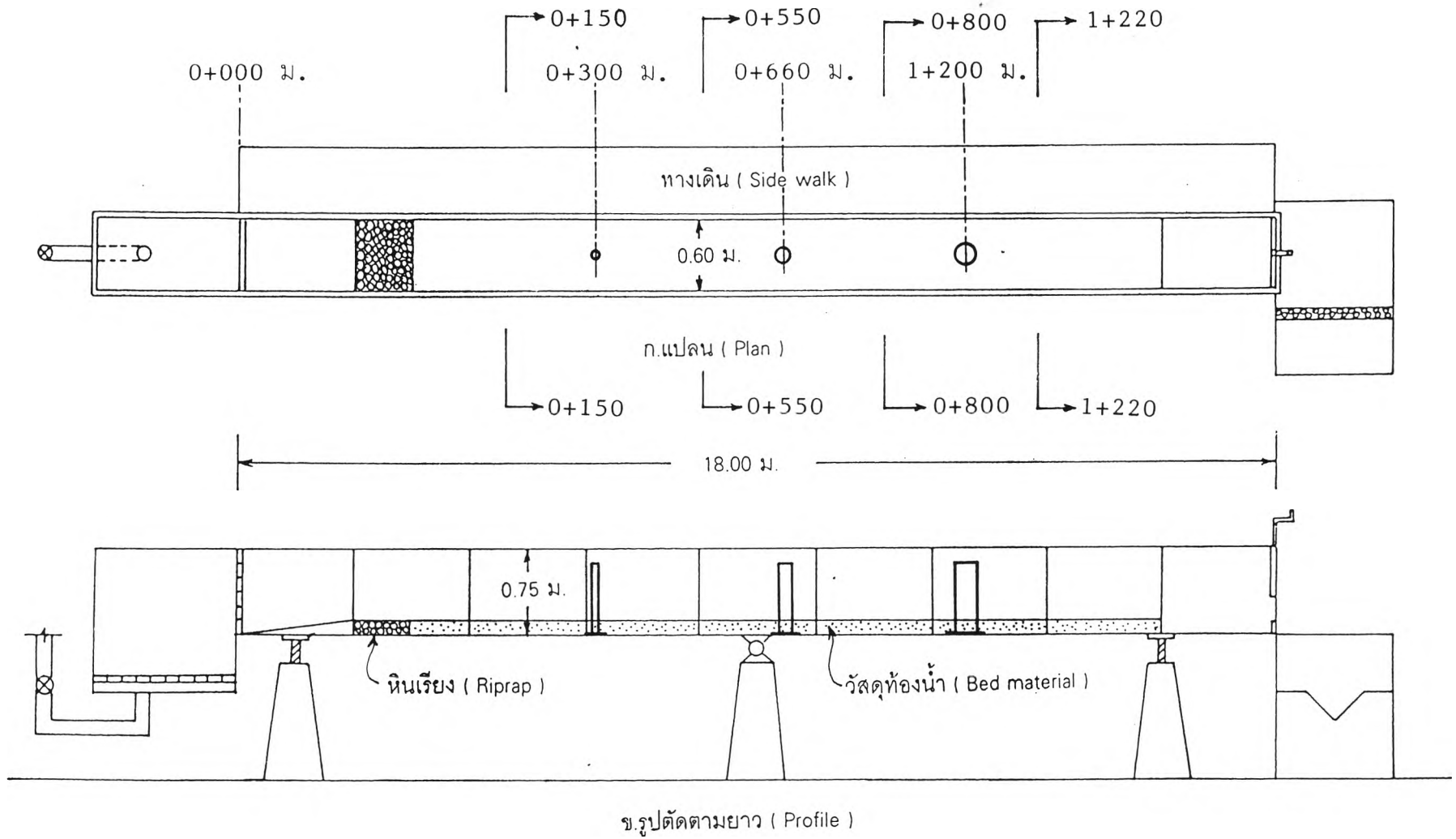
3.4.1.6 วางแบบจำลองตอม่อสะพานชนิดเดียวกัน แต่ขนาดแตกต่างกัน มุมปะทะมุมเดียวกันลงกลางรางน้ำที่ระยะ 3.0 เมตร 6.6 เมตร และ 10.20 เมตร โดยวัดจากต้นรางน้ำ ดังรูป 3.1 และ 3.2 เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อตอม่อทางด้านท้ายน้ำ

3.4.1.7 วัดอุณหภูมิของน้ำ ระดับน้ำในรางน้ำทุก ๆ 20 ซม. ตลอดรางน้ำ อ่านค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย 90° V-notch เพื่อใช้ในการคำนวณอัตราการไหลของน้ำ และหาความเร็วเฉลี่ย จดบันทึกความลึกของหลุมกัดเซาะทุก ๆ ครึ่งชั่วโมงในระยะเริ่มต้น หลังจากทำการทดลองผ่านไป 2-3 ชั่วโมง ให้จดบันทึกทุก ๆ 10 นาที จนกระทั่งขนาดของหลุมกัดเซาะไม่เปลี่ยนแปลง บันทึกเวลาสิ้นสุด จดบันทึกความเร็วในแต่ละหน้าตัด ในการทดลองนี้กำหนดหน้าตัดวัดความเร็วไว้ 4 หน้าตัด คือ ที่ Station 0+150 Station 0+550 Station 0+800 และ Station 1+220 จดบันทึกความเร็วรอบ ๆ ตอม่อสะพาน ตัวอย่างตารางบันทึกผลต่าง ๆ ดังตาราง 3-1 ถึง 3-3

3.4.1.8 ถ่ายน้ำออกจากรางน้ำ บันทึกภาพหลุมกัดเซาะ

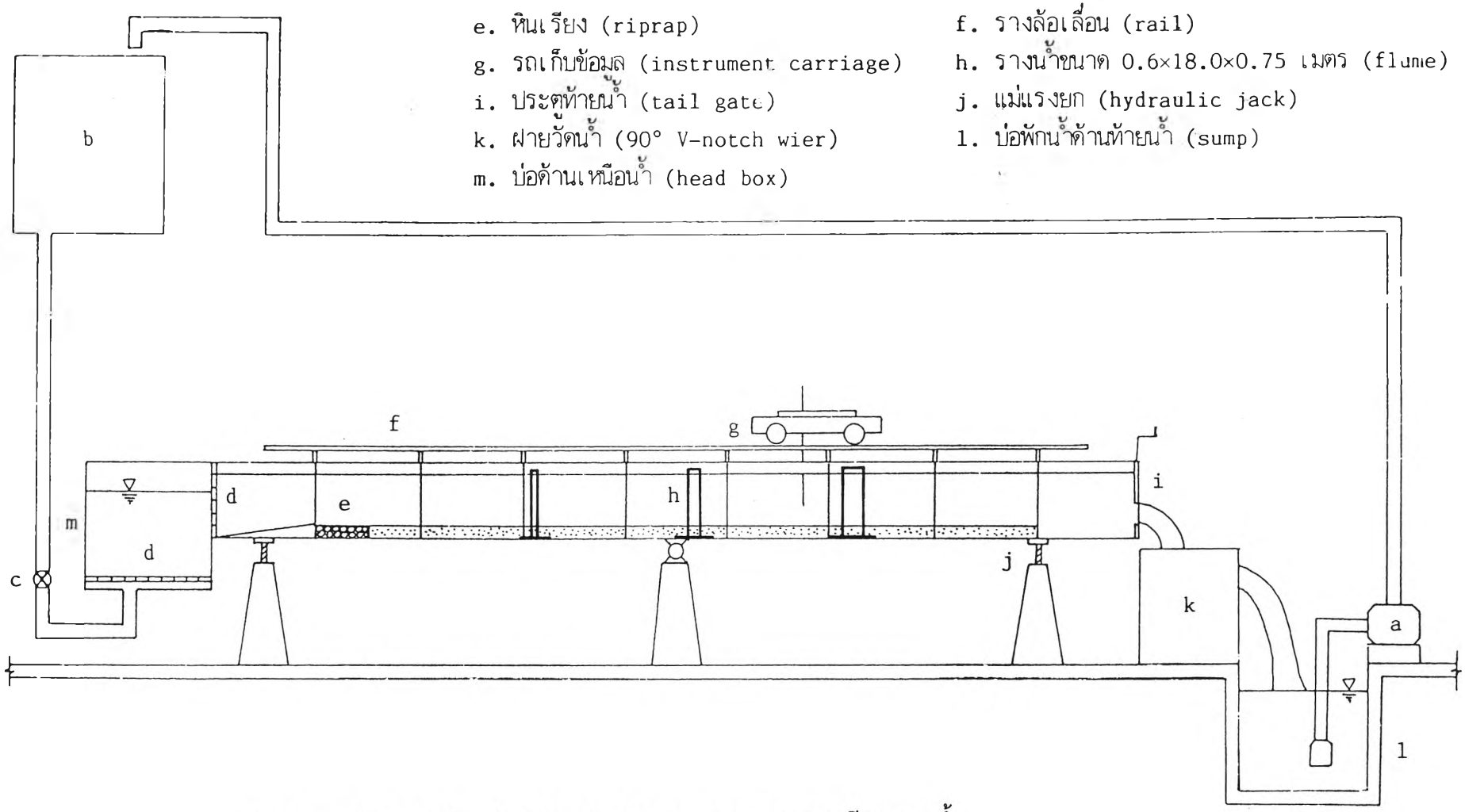
3.4.1.9 ปรับสภาพท้องน้ำให้เรียบทำการทดลองซ้ำข้างต้น แต่เปลี่ยนรูปทรงของแบบจำลองตอม่อสะพาน และมุมปะทะตามลำดับ แล้วนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ต่าง ๆ กับหลุม กัดเซาะ

3.4.2 การดำเนินการศึกษาการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน สภาพเงื่อนไขมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำใช้แบบจำลองตอม่อทรงกระบอก (cylindrical piers) ในการทดลองเพียงลักษณะเดียว โดยมีขั้นตอนการดำเนินการศึกษา ดังนี้



รูป 3.1 รางน้ำที่ใช้ในการทดลอง

a. เครื่องสูบน้ำ (pumping unit)
b. ถังเก็บน้ำ (head tank)
c. วาล์ว (valve)
d. แผงกรองคลื่น (screen)
e. หินเรียง (riprap)
f. รางล้อเลื่อน (rail)
g. รถเก็บข้อมูล (instrument carriage)
h. รางน้ำขนาด 0.6×18.0×0.75 เมตร (flume)
i. ประตูท้ายน้ำ (tail gate)
j. แม่แรงยก (hydraulic jack)
k. ฝายวัดน้ำ (90° V-notch wier)
l. บ่อพักน้ำด้านท้ายน้ำ (sump)
m. บ่อด้านเหนือน้ำ (head box)



รูป 3.2 แผนผังแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ และระบบการหมุนเวียนของน้ำ

ตาราง 3-1 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการวัดความเร็วหน้าดัด

RUN NO. = S10							
STATION = 0+550							
X / Y	5	10	20	30	40	50	55
3	69.0	59.6	64.6	61.7	63.5	67.7	62.9
5	78.1	74.5	70.1	69.3	78.3	87.2	77.9
10							
15							
y(cm)	12.6	14.30	13.65	13.40	15.50	14.15	15.40

ตาราง 3-2 ตัวอย่างตารางบันทึกความลึกหลุมกัดเซาะ

RUN NO.	=	S10	
รูปทรงตอม่อ	=	ทรงกระบอก	
H	=	25.9	cm.
Y	=	57.0, 56.5, 55.5	cm.
DIA	=	7.5, 5.0, 2.5	cm.
TEMP.	=	30.0	^{o}C

DIA 7.5 cm. DIA 5.0 cm. DIA 2.5 cm.

TIME (min)	d_s (cm.)	d_s (cm.)	d_s (cm.)
20	65.8	60.7	57.5
40	65.7	62.3	57.2
60	64.5	61.5	56.8
80	65.7	61.9	56.5
100	65.0	61.5	56.8
120	64.8	61.8	56.9
140	65.5	61.0	55.7
160			
180			
200			

ตารางที่ 3-3 ตัวอย่างตารางบันทึกความลาดเอียงท้องน้ำ หรือความลาดเอียงผิวน้ำ

DISTANCE (cm.)	Y (cm.)
0	16.40
20	16.65
40	15.50
60	15.75
80	15.65
100	15.50
120	15.55
140	15.25
160	15.05
180	14.20
200	14.25
220	14.20
.....	.....
.....	.....
.....	.....
.....	.....
.....	.....
.....	.....
.....	.....
.....	.....
.....	.....
.....	.....
1,260	10.30

3.4.2.1 คำนวณหาอัตราการพัดพาตะกอน (sediment discharge, Q_S) จากสูตรการคำนวณหลาย ๆ สูตร เช่น Einstein formula , Laursen formula , Yang sand formula เป็นต้น โดยตั้งสมมติฐานว่าวัสดุท้องน้ำมีลักษณะคละกัน ทำให้อัตราการเคลื่อนตัวของวัสดุท้องน้ำขนาดต่าง ๆ ไม่เท่ากัน จึงต้องหาอัตราการพัดพาตะกอนของวัสดุท้องน้ำแต่ละขนาด เพื่อนำไปผสมให้เป็นวัสดุที่จะนำมาโรย และกำหนดความเร็วการโรยทราย ตามอัตราการพัดพาตะกอนที่คำนวณได้ เพื่อสร้างสภาวะสมดุลของตะกอนที่เคลื่อนตัวอย่างต่อเนื่องในลำน้ำที่สอดคล้องกับสภาวะการไหลที่กำหนด ซึ่งการคำนวณที่ได้ถือเป็นเบื้องต้นในการเตรียมเครื่องมือ

3.4.2.2 นำผลการคำนวณที่ได้มาเตรียมอุปกรณ์ เช่น ผสมทรายแต่ละขนาดในอัตราส่วนที่คำนวณได้ ตัวอย่างผลการคำนวณของ Laursen formula ดังตาราง 3-4 ปรับความเร็วมอเตอร์เพื่อให้ได้อัตราการโรยทรายที่ต้องการปรับความลาดเอียงท้องน้ำ อัตราการไหลตามที่กำหนด

3.4.2.3 เริ่มทำการทดลองโดยยังไม่ใส่แบบจำลองตอม่อสะพาน เพื่อ Trial and error หาค่าอัตราการกัดเซาะที่ได้จากการคำนวณ กับการทดลอง โดยการเก็บตัวอย่างทรายที่เคลื่อนย้ายมาบริเวณที่ดักตะกอนด้านท้ายน้ำ (sand trap) นำไปตากแดดให้แห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับน้ำหนักทรายที่โรยไป

3.4.2.4 ปรับความเร็วมอเตอร์จนได้ปริมาณตะกอนที่ถูกกัดเซาะในรางน้ำและปริมาณตะกอนที่โรยจากเครื่องโรยทรายอัตโนมัติจนใกล้เคียงกัน เพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลของการเคลื่อนที่ของตะกอนในรางน้ำ กล่าวคือ ปริมาณตะกอนที่ใส่เข้าไปเท่ากับปริมาณตะกอนที่ออกมาทางด้านท้ายน้ำ ($Q_{Sin} = Q_{Sout}$)

3.4.2.5 เมื่อได้ค่าที่ต้องการแล้ว ปรับสภาพท้องน้ำใหม่ นำแบบจำลองตอม่อใส่ในรางน้ำ ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในสภาวะการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ จดบันทึกความลึกหลุมกัดเซาะทุก ๆ 20 นาที ตลอดการทดลองจนหลุมกัดเซาะเข้าสู่สภาวะสมดุล

3.4.2.6 วัดอุณหภูมิน้ำ ระดับน้ำ ความสูงน้ำเหนือสันฝาย 90° V-notch ความเร็วการไหลในแต่ละหน้าตัด เช่นเดียวกับการทดลองในสภาวะการกัดเซาะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ จนสิ้นสุดการทดลอง

3.4.2.7 ระบายน้ำออกจากรางน้ำ บันทึกภาพหลุมกัดเซาะ

3.4.2.8 ทำซ้ำขั้นตอนข้างต้น โดยการเปลี่ยนอัตราการไหล ความลาดเอียดท้องน้ำผสมทรายตามอัตราส่วนที่เปลี่ยนไป เนื่องจากอัตราการไหล และความเร็วน้ำที่เปลี่ยนไปจนครบ

3.4.2.9 นำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ต่าง ๆ กับหลุมกัดเซาะ

ตาราง 3-4 ตัวอย่างการคำนวณอัตราการพัดพาตะกอน

TABLE FALL VELOCITY, SHEAR/FALL VELOCITY AND LAURSEN FUNCTION

Percent Finer by Weight	Diameter of Sediment (mm)	Average Diameter (mm)	Fall Velocity (cm/s)	Shr/Fall Velocity	Laursen Function	
					Total Load	Bed Load
0.00	0.20					
		0.350	5.5241	0.952	14.64	10.83
32.63	0.50					
		0.700	11.3006	0.466	9.69	8.98
65.60	0.90					
		0.950	15.3062	0.344	8.49	8.29
100.00	1.00					

SEDIMENT MEAN DIAMETER (D_m)	=	.67 mm
MEDIAN SIZE (D_{50})	=	.71 mm
WATER DISCHARGE (Q)	=	48 liter/sec
FLOW VELOCITY (V_o)	=	62.7 cm./sec.
AVERAGE FLOW DEPTH (y_o)	=	12.7 cm.
PARTICLE SHEAR	=	0.025
CHANNEL SLOPE (S_o)	=	0.0022 Meter/Meter
MANNING COEFFICIENT (n)	=	.015

ตาราง 3-4 (ต่อ) ตัวอย่างการคำนวณอัตราการพัดพาตะกอน

TABLE COMPUTATION OF SEDIMENT LOAD USING LAURSEN FORMULA

Percent Finer by Weight	Sediment Size (mm)	Total Load Conc (%)	Bed Load Conc. (%)	Suspended Load Conc (%)	Total Load (Kgf/Day)	Bed Load (Kgf/Day)	Suspened Laod (Kgf/Day)
0.00	0.20						
		0.02183	0.01615	0.00568	905	670	235
32.63	0.50						
		0.01271	0.01177	0.00094	527	488	39
65.60	0.90						
		0.00969	0.00947	0.00023	402	393	9
100.00	1.00						
Total		0.04424	0.03739	0.00684	1834	1550	284

3.5 <u>ผลการทดลอง</u>

หลังจากการทดลองเสร็จสิ้นสมบูรณ์ ผลที่วัดได้ทั้งหมดเป็นตัวแปรพื้นฐาน ช่วงตัวแปรโดยประมาณมีดังนี้

อัตราการไหล (water discharge)	8 - 48	ลิตรต่อวินาที
ความลึกการไหล (water depth)	5.1 - 23.8	เซนติเมตร
ความเร็วการไหล (velocity)	23.2 - 74.8	เซนติเมตรต่อวินาที
อุณหภูมิของน้ำ (water temperature)	28.5 - 32.0	องศาเซลเซียส
ความลาดชันผิวน้ำ (water surface slope)	0.001 - 0.008	เมตร/เมตร
อัตราการพัดพาตะกอน (sediment discharge)*	0.36 - 10.38	กิโลกรัมต่อชั่วโมง

หมายเหตุ * อัตราการพัดพาตะกอน คำนวณเพื่อทดลองการกัดเซาะในสภาวะเงื่อนไขการกัดเซาะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ