

บทที่ 3

แบบจำลองชลศาสตร์และการทดลอง

ในการศึกษาทางด้านวิศวกรรมชายฝั่ง จำเป็นต้องมีเทคนิคหรือวิธีการที่ใช้ในการศึกษา เพื่อให้ทราบและเข้าใจถึงพฤติกรรมและกระบวนการทางชายฝั่งทะเลต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น โดยแนวทางที่ใช้ศึกษามี 3 แนวทางด้วยกันคือ

1. การวัดและการสังเกตการณ์ในภาคสนาม
2. การวัดและสังเกตการณ์ในห้องปฏิบัติการ
3. การวิเคราะห์ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์

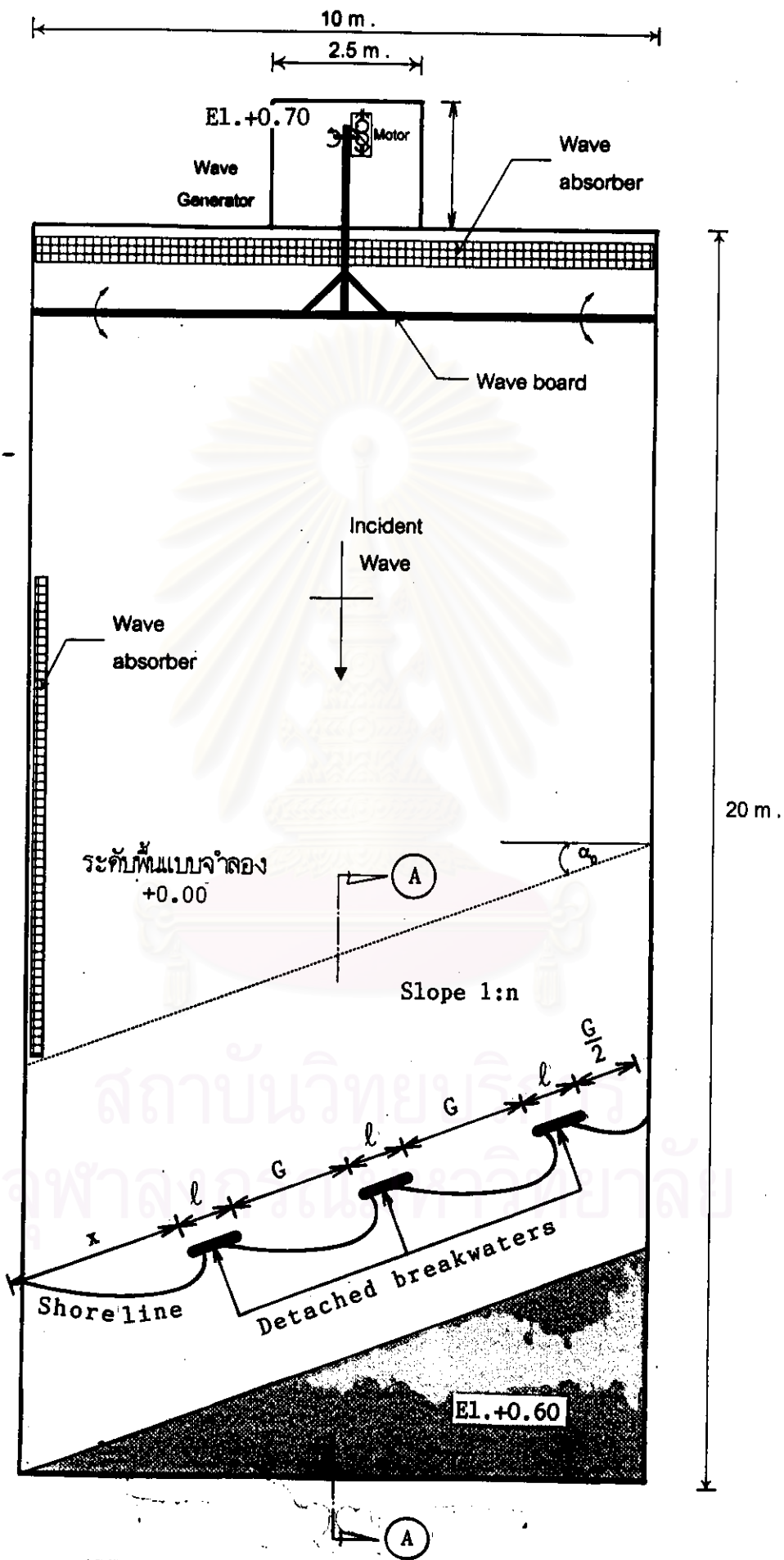
ซึ่งทั้ง 3 แนวทาง มีความเหมาะสมในการใช้ต่างกัน ดังนั้นวิศวกรผู้ศึกษาจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้ หรือนำผลที่ได้จากการศึกษาทั้ง 3 แนวทางนี้มาเปรียบเทียบกัน เนื่องจากพฤติกรรมและกระบวนการทางชายฝั่งทะเลมีความซับซ้อนมาก จึงเป็นการยากที่จะอธิบายพฤติกรรมเหล่านี้ได้อย่างถูกต้องและสมบูรณ์ได้ด้วยแนวทางศึกษาแบบใดแบบหนึ่ง สำหรับการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้การศึกษาแบบที่เป็นการวัดและการสังเกตการณ์ในห้องปฏิบัติการ หรือที่เราเรียกว่าการศึกษาแบบจำลองชลศาสตร์ (hydraulic model study) ซึ่งนับว่ามีความจำเป็นมากในการศึกษาป้องกันชายฝั่ง เนื่องจากแบบจำลองนั้นสามารถตรวจสอบและสังเกตถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนในสภาพทะเลต่าง ๆ กัน และผลที่ได้จากการศึกษานี้นำไปสรุปเป็นเกณฑ์การออกแบบเขื่อนกันคลื่นแยกในงานป้องกันชายฝั่ง ตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาครั้งนี้ต่อไป

3.1 แบบจำลองชลศาสตร์

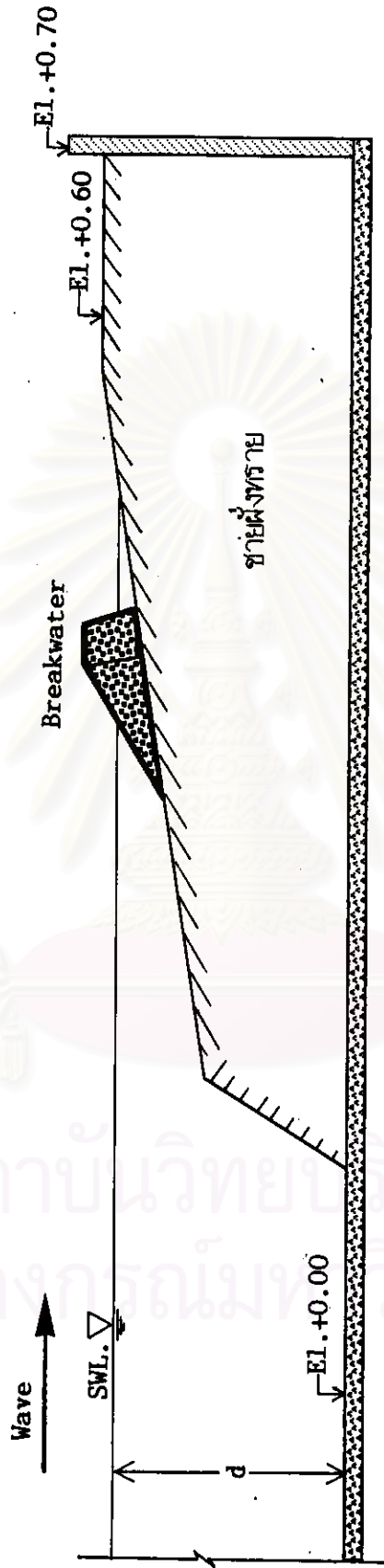
ในการศึกษาได้ใช้แบบจำลองชายฝั่งทะเลซึ่งติดตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล (Hydraulic and Coastal Model Lab.) ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังรูป 3-1 และรูป 3-2 โดยมีส่วนประกอบหลัก ๆ 4 ส่วน ดังนี้คือ

3.1.1 แบบจำลองเขื่อนกันคลื่นแยก

แบบจำลองเขื่อนกันคลื่นแยก (detached breakwater model) ที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นแบบจำลองที่มีได้จำลองเขื่อนกันคลื่นจากที่ใด ๆ ทั้งสิ้น แต่ได้จำลองจากความเหมาะสมและ



รูป 3-1 แบบจำลองอ่างคลื่นและแบบจำลองเขื่อนกันคลื่นแยก



รูป 3-2 รูปตัดแบบจำลองแอ่งคลื่นและแบบจำลองเขื่อนกันคลื่น A-A

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความเป็นไปได้ในการสร้าง โดยสร้างให้เป็นโครงสร้างแบบยอมให้น้ำซึมผ่านได้ (permeable) วัสดุที่ใช้ทำเป็นโครงสร้างของเขื่อนคือหิน โดยบรรจุไว้ในโครงตาข่ายขนาด 1×1 ซม. ภายในเป็นโครงทำด้วยไม้ดังแสดงในรูป 3-3 ปลายของเขื่อนทั้ง 2 ด้านมีลักษณะโค้ง และด้านหน้าของเขื่อนมีความลาดเท 2 : 1 เพื่อช่วยลดการสะท้อนของคลื่น แบบจำลองเขื่อนกันคลื่นแยกที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเท่ากันตลอดการทดลอง คือ ความกว้าง 0.25 ม. ยาว 1.00 ม. สูง 0.20 ม.

3.1.2 แบบจำลองอ่างคลื่น

แบบจำลองอ่างคลื่น (wave basin model) ที่ใช้ในการทดลองมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด กว้าง 10 ม. \times ยาว 20 ม. \times สูง 0.70 ม. พื้นและผนังโครงสร้างทำด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยที่ปลายด้านหนึ่งของแบบจำลองสร้างเป็นชายหาดที่ทำด้วยทรายละเอียดขนาดประมาณ 0.25 มม. และปลายอีกด้านหนึ่งติดตั้งเครื่องกำเนิดคลื่น ดังแสดงในรูป 3-4 (ดังรายละเอียดในภาคผนวก ก-1)

3.1.3 เครื่องกำเนิดคลื่น

เครื่องกำเนิดคลื่น (wave generator) ที่ติดตั้งในแบบจำลองอ่างคลื่นนี้มีโครงสร้างทั้งหมดทำด้วยเหล็กและกระดานสร้างคลื่น (wave board) ทำด้วยพลาสติก ปลายด้านล่างของกระดานสร้างคลื่นเป็นแบบ Hinge Connection ส่วนปลายด้านบนต่อเข้ากับส่วนขับเคลื่อนสามารถโยกกลับไปกลับมาได้ ดังแสดงในรูป 3-5 เครื่องกำเนิดคลื่นนี้สามารถสร้างคลื่นที่มีความสูงคลื่นและคาบเวลาที่แตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะช่วงชัก ความสูงของระดับน้ำในอ่างคลื่นและความเร็วของมอเตอร์ ดังรายละเอียดในภาคผนวก ก-2

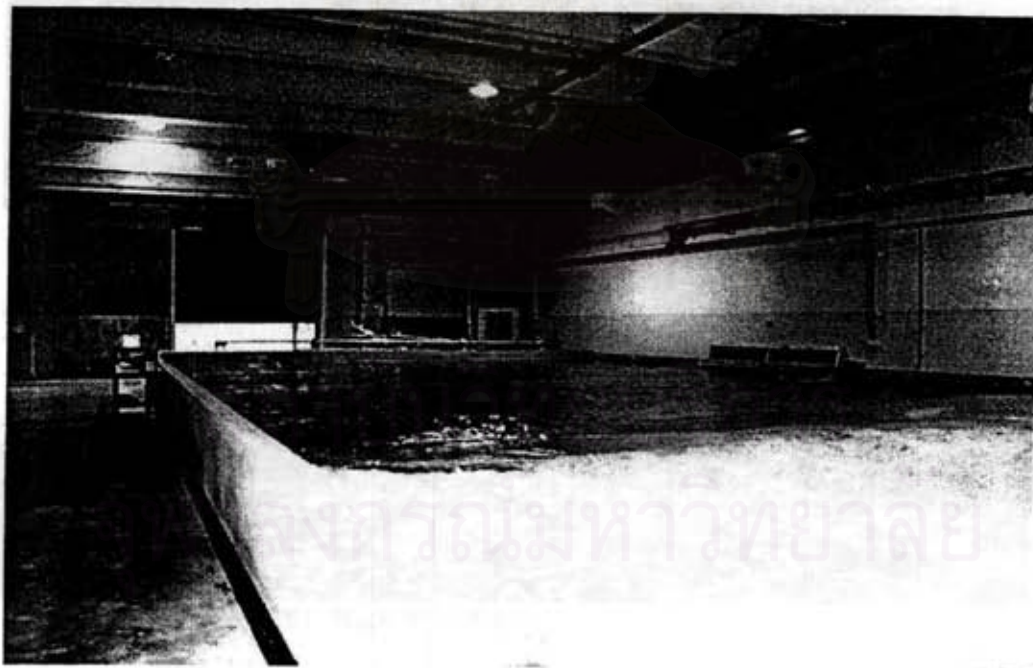
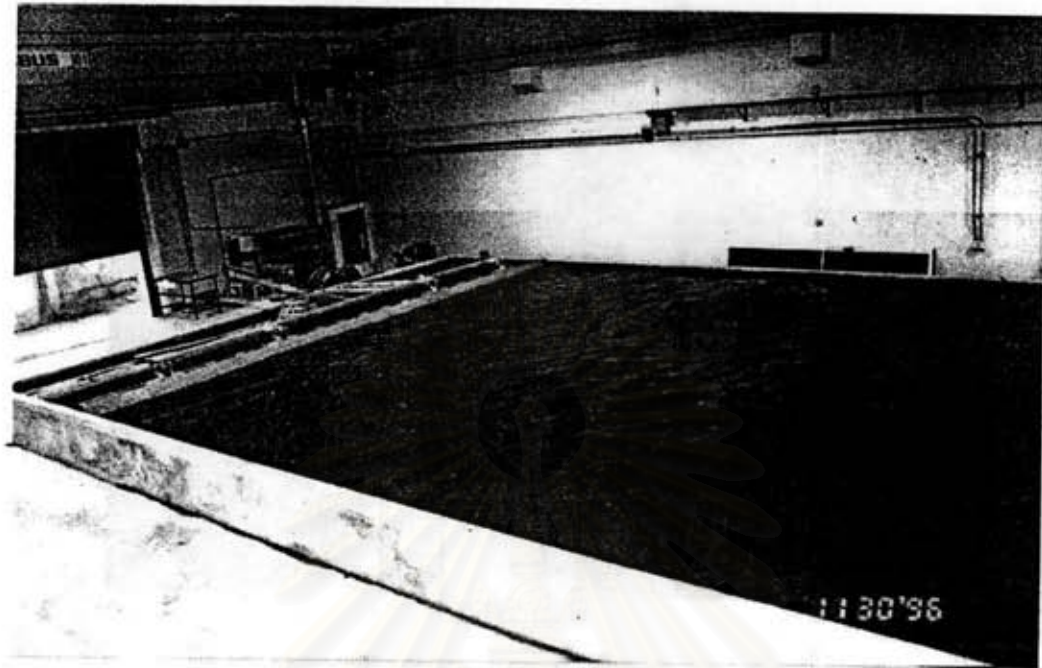
3.1.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) เครื่องมือวัดความสูงคลื่น

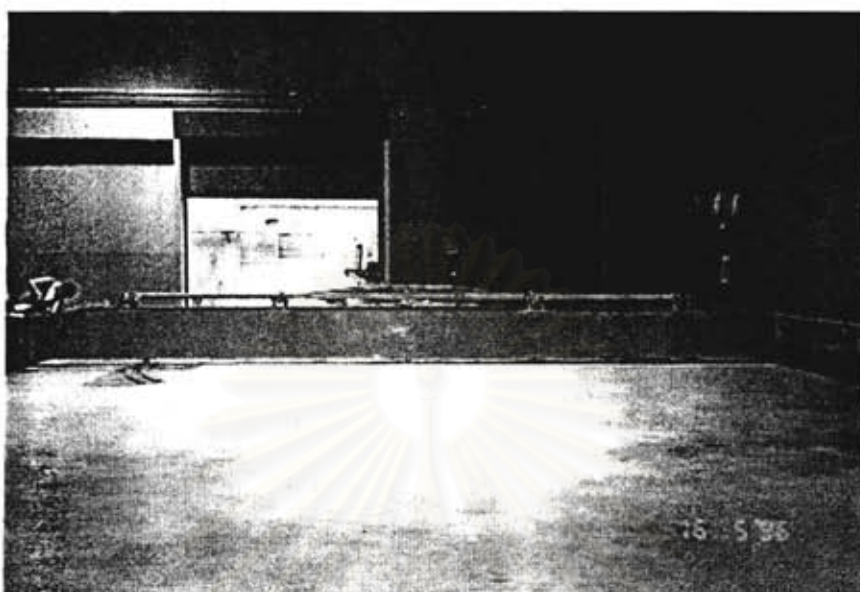
เครื่องมือวัดความสูงคลื่น (wave height meter) ดังรูป 3-6 ได้ติดตั้งลงในแบบจำลองอ่างคลื่น และในครั้งแรก ๆ ของการทดลองได้ติดตั้งเครื่องมือวัดความสูงคลื่นไว้ในอ่างคลื่นเป็นจำนวน 6 ตำแหน่ง เมื่อนำข้อมูลคลื่นที่วัดได้มาวิเคราะห์พบว่าทั้ง 6 ตำแหน่งให้คลื่นที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน ดังนั้นจึงลดจำนวนเครื่องมือวัดความสูงคลื่นในอ่างคลื่นเหลือเพียง 3 ตำแหน่งเท่านั้น โดยมีลักษณะในการติดตั้งเครื่องมือคือให้เครื่องมือนี้หันเส้นลวดทองแดงเข้าหาทิศทางของคลื่นที่มากระทำ และส่วนรับสัญญาณนี้ต้องแช่อยู่ในน้ำไม่ต่ำกว่า 1 ซม. ดังแสดงในรูป 3-7



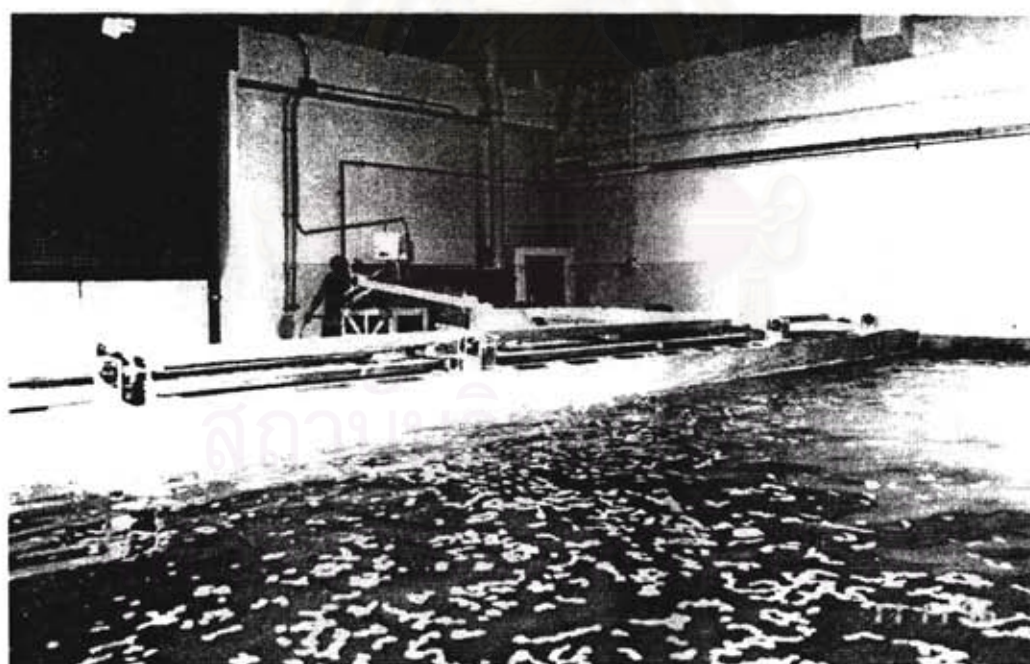
รูป 3-3 แบบจำลองเชื่อมกันคลื่นแยก



รูป 3-4 แบบจำลองแอ่งคัลลิน

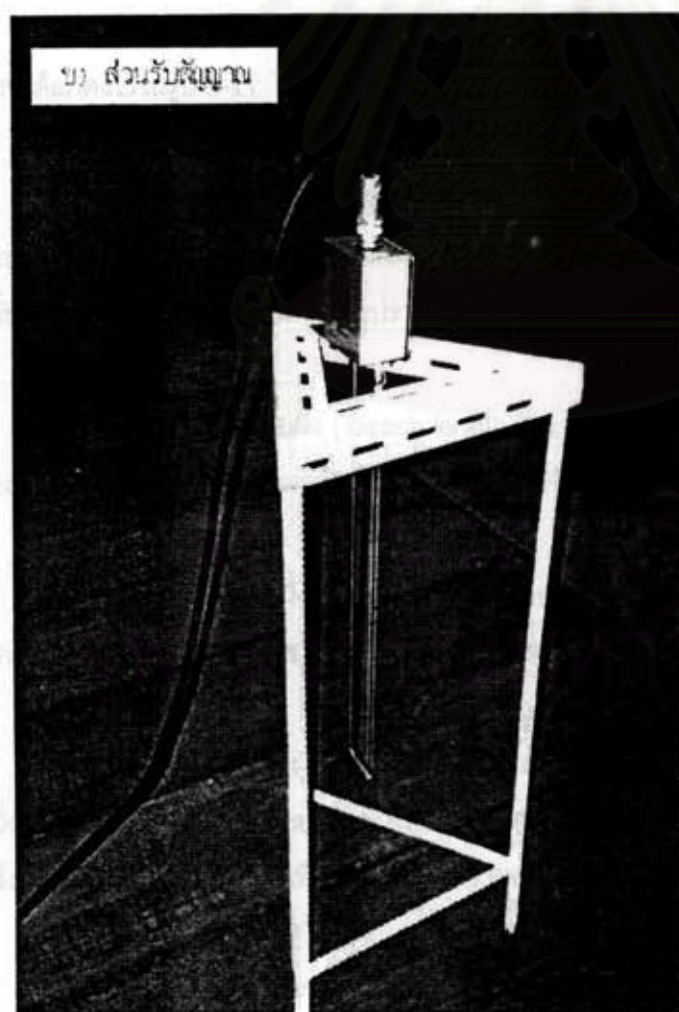
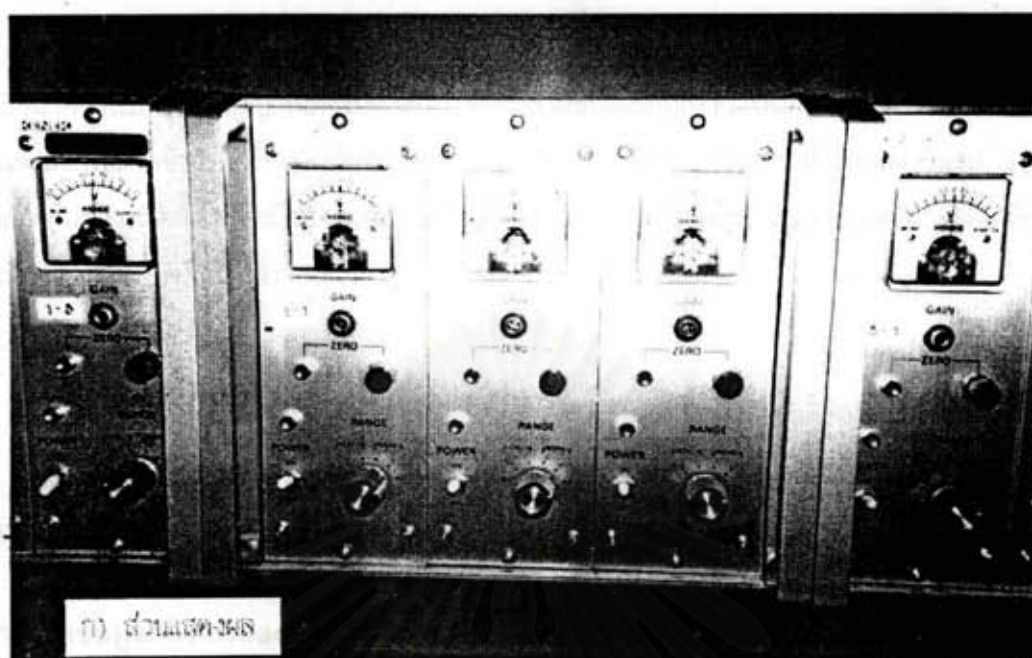


(ก) ก่อนทำการทดลอง



(ข) ขณะทำการทดลอง

รูป 3-5 เครื่องกำเนิดคลื่น



รูป 3-6 เครื่องมือวัดความสูงคลื่น

หลักการทํางานของอุปกรณ์ชนิดนี้ก็คือ เป็นการวัดความจุไฟฟ้าบนเส้นลวดที่เปลี่ยนแปลงตามระดับผิวนํ้าจากนั้นจะส่งสัญญาณต่อไปยังส่วนแสดงผลให้แปลงสัญญาณเป็นค่าความต่างศักย์ (volt) ซึ่งสามารถนำไปต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล หรือคอมพิวเตอร์เพื่อนําไปวิเคราะห์ ดังแสดงในรูป 3-8 และมีลักษณะการติดตั้งเครื่องมือวัดความสูงคลื่นดังรูป 3-9 (โดยมีรายละเอียดและการสอบเทียบเครื่องมือวัดความสูงคลื่นนี้ในภาคผนวก ก-3)

2) เครื่องมือวัดระดับ

เครื่องมือวัดระดับ (point gauge) ใช้สำหรับวัดระดับนํ้า และระดับห้องนํ้า มีความละเอียด 0.05 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูป 3-10

3.2 การวัดข้อมูลการทดลอง

หลังจากจบการทดลองในแต่ละชุดการทดลองได้วัดการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง ดังตัวแปรและนิยามที่ได้แสดงไว้ในรูป 3-11 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ คือ

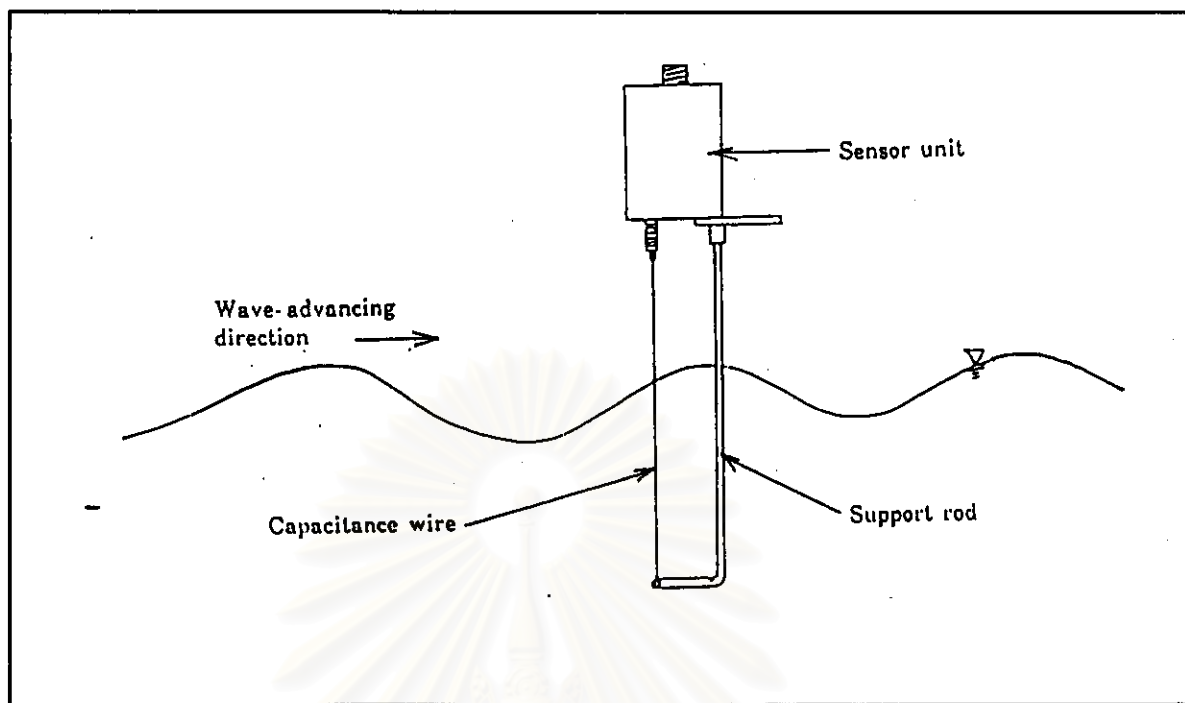
1) รูปร่างของชายฝั่ง (shoreline shape) สามารถวัดได้โดยการแบ่งกริดขนาด 5 ซม. x 5 ซม. ในแบบจำลองแอ่งคลื่น โดยการวัดตำแหน่งของแนวชายฝั่งที่ระดับนํ้านิ่ง (shoreline at still water level) จากนั้นนำค่าที่บันทึกได้มาพล็อตจะได้รูปร่างของชายฝั่งที่เปลี่ยนแปลง ดังตัวอย่างในรูป 3-12

2) ความยาวของชายฝั่ง (beach length, P) ได้จากการวัดรูปร่างของชายฝั่งดังข้อ 1) เมื่อนํ้าตำแหน่งของแนวชายฝั่งที่ได้มาคำนวณเป็นระยะทาง จะได้ความยาวแนวชายฝั่ง

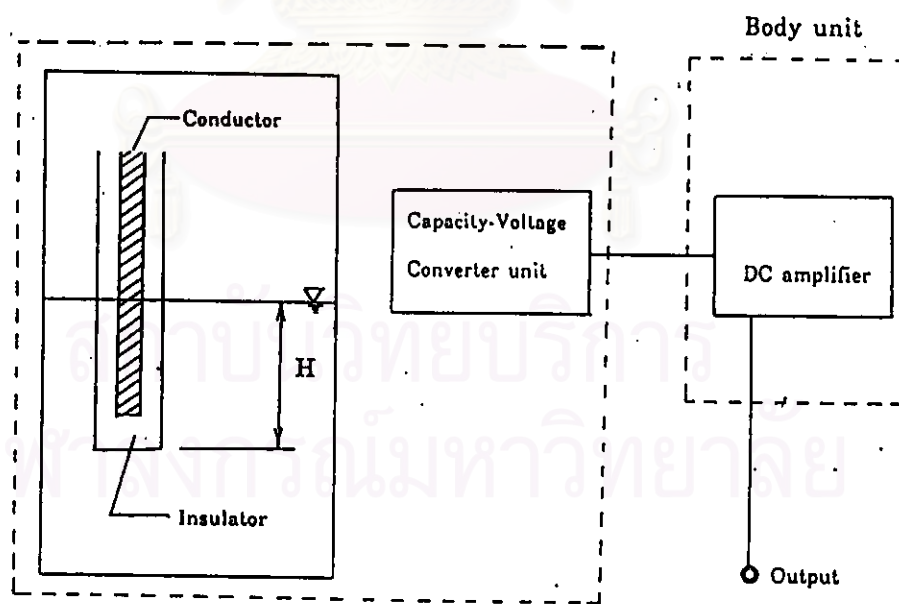
3) ระยะเวลาของชายฝั่ง (bay depth, S) คือระยะที่วัดจากแนวเขื่อนกันคลื่นถึงแนวชายฝั่งที่ระดับนํ้านิ่งในตำแหน่งที่ถูกกัดเซาะที่มากที่สุดในแต่ละอ่าว โดยวัดตั้งฉากจากแนวเขื่อนกันคลื่น

4) ความลาดชันชายฝั่ง (beach slope, 1 : n) วัดได้โดยแบ่งชายฝั่งระหว่างเขื่อนกันคลื่นแบ่งชายฝั่งออกเป็น 3 หน้าตัด โดยแต่ละหน้าตัดจะตั้งฉากกับเส้นสัมผัสแนวชายฝั่ง มีระยะทางเท่าๆ กัน แล้วจึงวัดระดับนํ้าในแต่ละแนวเพื่อคำนวณหาความลาดชันชายฝั่ง

5) ความลึกของนํ้าบริเวณคลื่นแตกตัว (breaking depth, d'_b) และระยะจากแนวชายฝั่งที่ระดับนํ้านิ่งถึงตำแหน่งที่คลื่นแตกตัว (a)



รูป 3-7 การติดตั้งเครื่องมือวัดความสูงคลื่น



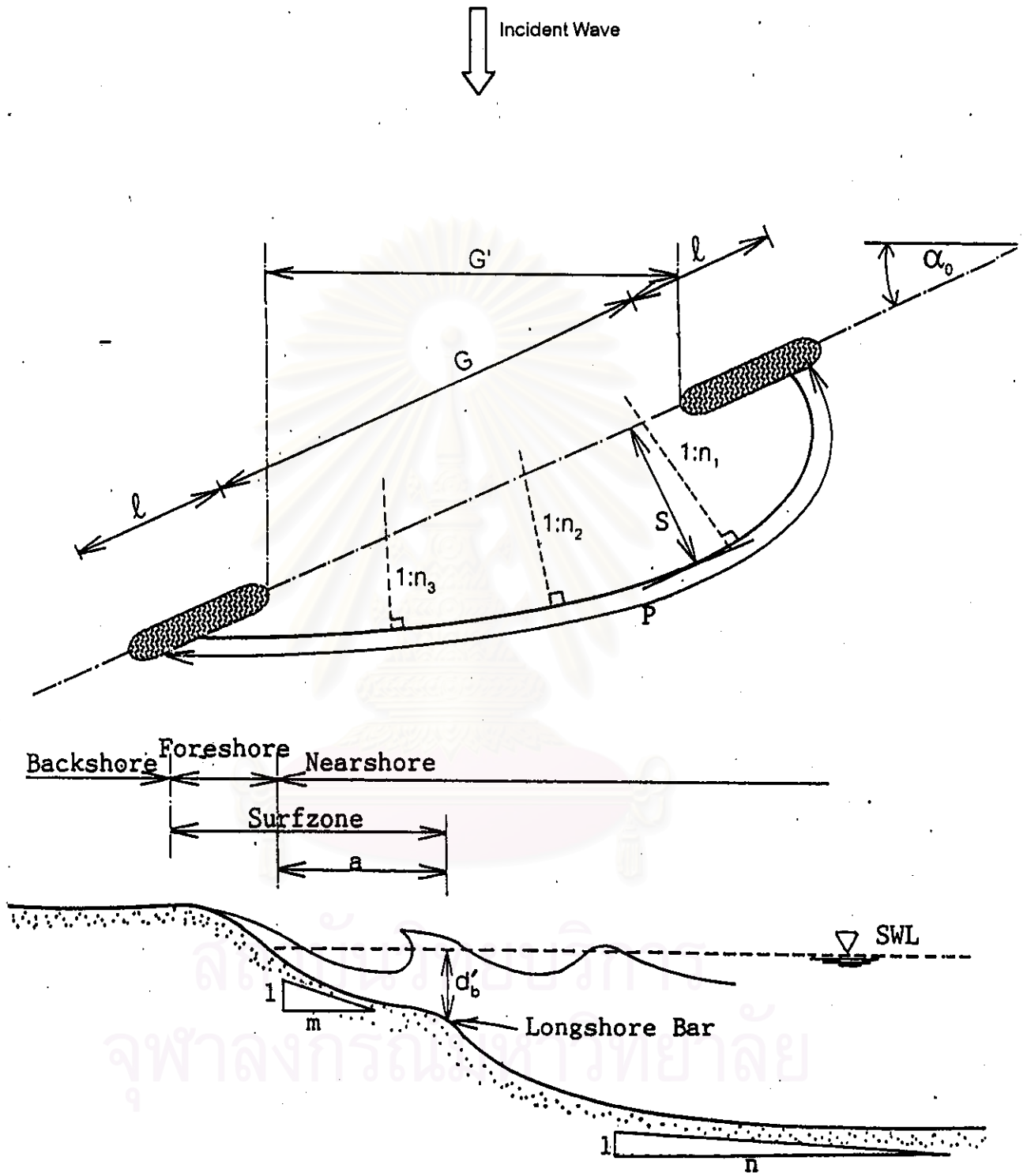
รูป 3-8 หลักการทำงานของเครื่องมือวัดความสูงคลื่น



รูป 3-9 ลักษณะการติดตั้งเครื่องมือวัดความสูงคลื่นในแบบจำลองแอ่งคลื่น



รูป 3-10 เครื่องมือวัดระดับ



รูป 3-11 นิยามและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นในการทดลอง

จากการบันทึกข้อมูลคลื่นที่ได้จากการสร้างคลื่นด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นในแบบจำลองแอ่งคลื่น โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ "Labtech NOTEBOOKpro" ควบคุมการวัดและการบันทึกข้อมูลคลื่น จากเครื่องมือวัดความสูงคลื่นจำนวน 3 เครื่อง ข้อมูลคลื่นที่ได้นั้นประกอบไปด้วยเวลา และระดับความสูงคลื่นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่บันทึก โดยมีระยะเวลาในการเก็บข้อมูลในแต่ละครั้ง 1,800 วินาที และกำหนดให้บันทึกด้วยความถี่ 100 Hz หรือ 100 ข้อมูลต่อวินาที ดังนั้นจึงได้ข้อมูลคลื่น 180,000 ข้อมูล จำนวน 3 ชุด จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ลักษณะของคลื่นด้วยการคำนวณทางสถิติ (statistic analysis) และวิเคราะห์ความถี่ของข้อมูล (spectral analysis) ดังแสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ข

3.4 ลักษณะและวิธีการทดลอง

ในการศึกษาแบบจำลองเรื่อง เกณฑ์การออกแบบเขื่อนกันคลื่นแยกในงานป้องกันชายฝั่งนั้น ได้ออกแบบการทดลอง โดยจำลองสภาพชายฝั่งทะเลและเขื่อนกันคลื่นในแอ่งคลื่น สร้างคลื่นจากเครื่องกำเนิดคลื่น ให้คลื่นกระทบชายฝั่ง โดยไม่มีการเติมทรายที่ชายฝั่งด้านเหนือน้ำ ส่วนตะกอนทรายทรายที่ถูกกัดเซาะและเคลื่อนที่มาทับถมอยู่บริเวณชายฝั่งด้านท้ายน้ำหรือท้ายแบบจำลองจะถูกตักออกไป การติดตั้งแบบจำลองเขื่อนกันคลื่นแยกจะติดตั้งไว้บนชายฝั่งทรายให้มีแนวขนานกับแนวชายฝั่งที่ทำมุมกับทิศทางของคลื่น ดังรูป 3-1 ในการออกแบบการทดลองมีตัวแปรที่ใช้เป็นเงื่อนไขในการทดลอง 2 ประเภท คือ

1) ตัวแปรออกแบบ แบ่งออกเป็น

- 1.1) ความยาวของเขื่อนกันคลื่น (L) แบบจำลองเขื่อนกันคลื่นในการทดลองมีความยาว 1 เมตร
- 1.2) ระยะห่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น (G) แบ่งระยะห่างระหว่างเขื่อนเป็น 1 ม. 2 ม. 3 ม. และ 4 ม.

2) ตัวแปรกำหนดสภาวะการรบกวนออกแบบ แบ่งออกเป็น

- 2.1) คลื่น โดยผันแปรทั้งขนาดความสูงของคลื่นและคาบเวลาของคลื่น ให้มีความชันคลื่นอยู่ในช่วง 0.006–0.055 โดยปรับความเร็วรอบของมอเตอร์และปรับช่วงชัก ดังแสดงในตาราง 3-1
- 2.2) มุมของคลื่นที่กระทำกับแนวชายฝั่ง (α_0) แบ่งการทดลองเป็น 3 มุม คือ 15° 25° และ 35°

ในการศึกษาทดลองนี้ได้จัดรูปแบบของการทดลองด้วยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยมีวิธีการทดลองคือ

- 1) ปรับแนวชายฝั่งให้ทำมุมกับทิศทางของคลื่น 15°
- 2) ติดตั้งแบบจำลองเขื่อนกันคลื่นแยกขนาด 1.00 เมตร โดยตั้งห่างกัน 1.00 เมตร ขนานกับแนวชายฝั่งที่ทำมุมกับทิศทางของคลื่น ดังแสดงในรูป 3-12
- 3) แบบจำลองเขื่อนกันคลื่นแยกตัวแรกที่ติดตั้งอยู่บริเวณชายฝั่งด้านเหนือน้ำติดตั้งให้มีระยะห่างจากผนังแบบจำลองแฉ่งคลื่นเท่ากับกึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น
- 4) เปิดเครื่องกำเนิดคลื่นให้สร้างคลื่น
- 5) เมื่อสังเกตพบว่าชายฝั่งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอีกต่อไปหรือชายฝั่งเข้าสู่สภาพสมดุลแล้ว จึงหยุดการทดลอง
- 6) วัดการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งและบันทึกผล
- 7) เปลี่ยนขนาดความชันคลื่นอีกจำนวน 4 ชุดและทำซ้ำขั้นตอนที่ 5 และ 6 โดยมีความชันคลื่นประมาณ 0.016 0.028 0.042 และ 0.050
- 8) ติดตั้งแบบจำลองเขื่อนกันคลื่นแยกขนาด 1.00 เมตร โดยตั้งห่างกัน 2.00 เมตร ขนานกับแนวชายฝั่งที่ทำมุมกับทิศทางของคลื่นและทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 ถึง 7 จากนั้นเปลี่ยนระยะห่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นเป็น 3.00 และ 4.00 เมตร
- 9) ปรับแนวชายฝั่งให้ทำมุมกับทิศทางของคลื่น 25° และ 35° ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง 8

ซึ่งแต่ละชุดการทดลองมีลักษณะการทดลองดังตารางที่ 3-2

ตาราง 3-1 การปรับขนาดของคลื่นโดยประมาณด้วยเครื่องกำเนิดคลื่น

ความเร็วรอบของมอเตอร์ (Hz)	ปรับช่วงชัก (ซม.)	คาบเวลาของคลื่น (วินาที)	ความสูงคลื่น (ม.)	ความชันคลื่น
12.90	3.5	1.55	≈ 0.024	0.006 – 0.008
13.53	3.3	1.30	≈ 0.037	0.014 – 0.017
20.00	3.3	1.00	≈ 0.042	0.023 – 0.028
23.53	3.1	0.85	≈ 0.045	0.037 – 0.042
≈ 25.00	2.9	0.80	≈ 0.052	0.048 – 0.053

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 3-12 การติดตั้งแบบจำลองเขื่อนกันคลื่นแยกขนานกับแนวชายฝั่งที่ทำมุมกับทิศทางของคลื่น

ตาราง 3-2 ลักษณะการทดลอง

ชุดการทดลอง	มุมของคลื่น ที่กระทำกับแนวชายฝั่ง (α° , degree)	ขนาดของคลื่น		การติดตั้งเชื่อมกันคลื่นแยก	
		ความชันคลื่น ในน้ำลึก	คาบเวลาของคลื่น (วินาที)	ความยาวของ เชื่อมกันคลื่นแยก (ม.)	ระยะห่างระหว่าง เชื่อมกันคลื่นแยก (ม.)
A1	15°	0.006	1.80	1.0	1.0
A2	15°	0.017	1.30	1.0	1.0
A3	15°	0.028	1.00	1.0	1.0
A4	15°	0.039	0.85	1.0	1.0
A5	15°	0.048	0.80	1.0	1.0
B1	15°	0.008	1.55	1.0	2.0
B2	15°	0.015	1.30	1.0	2.0
B3	15°	0.027	1.00	1.0	2.0
B4	15°	0.039	0.85	1.0	2.0
B5	15°	0.051	0.80	1.0	2.0
C1	15°	0.007	1.55	1.0	3.0
C2	15°	0.002	1.30	1.0	3.0
C3	15°	0.028	1.00	1.0	3.0
C4	15°	0.038	0.85	1.0	3.0
C5	15°	0.053	0.80	1.0	3.0
D1	15°	0.008	1.55	1.0	4.0
D2	15°	0.016	1.30	1.0	4.0
D3	15°	0.026	1.00	1.0	4.0
D4	15°	0.042	0.85	1.0	4.0
D5	15°	0.051	0.80	1.0	4.0
E1	25°	0.008	1.55	1.0	1.0
E2	25°	0.014	1.30	1.0	1.0
E3	25°	0.026	1.00	1.0	1.0
E4	25°	0.037	0.85	1.0	1.0
E5	25°	0.049	0.80	1.0	1.0
F1	25°	0.008	1.55	1.0	2.0
F2	25°	0.014	1.30	1.0	2.0
F3	25°	0.023	1.00	1.0	2.0
F4	25°	0.041	0.85	1.0	2.0
F5	25°	0.049	0.80	1.0	2.0
G1	25°	0.010	1.55	1.0	3.0
G2	25°	0.014	1.30	1.0	3.0
G3	25°	0.026	1.00	1.0	3.0
G4	25°	0.038	0.85	1.0	3.0
G5	25°	0.052	0.80	1.0	3.0
H1	25°	0.007	1.55	1.0	4.0
H2	25°	0.014	1.30	1.0	4.0
H3	25°	0.026	1.00	1.0	4.0
H4	25°	0.038	0.85	1.0	4.0
H5	25°	0.052	0.80	1.0	4.0
I1	35°	0.005	1.55	1.0	1.0
I2	35°	0.014	1.30	1.0	1.0
I3	35°	0.027	1.00	1.0	1.0
I4	35°	0.043	0.85	1.0	1.0
I5	35°	0.054	0.80	1.0	1.0
J1	35°	0.007	1.55	1.0	2.0
J2	35°	0.014	1.30	1.0	2.0
J3	35°	0.027	1.00	1.0	2.0
J4	35°	0.040	0.85	1.0	2.0
J5	35°	0.046	0.80	1.0	2.0
K1	35°	0.008	1.55	1.0	3.0
K2	35°	0.013	1.30	1.0	3.0
K3	35°	0.023	1.00	1.0	3.0
K4	35°	0.036	0.85	1.0	3.0
K5	35°	0.051	0.80	1.0	3.0
L1	35°	0.008	1.55	1.0	4.0
L2	35°	0.015	1.30	1.0	4.0
L3	35°	0.026	1.00	1.0	4.0
L4	35°	0.038	0.85	1.0	4.0
L5	35°	0.053	0.80	1.0	4.0

3.5 ผลการทดลอง

จากการศึกษาทดลองในลักษณะต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา ผลการทดลองที่ได้นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ

- 1) ตารางสรุปผลการทดลอง (ดังตาราง 3-3 รายละเอียดสำหรับตารางสรุปผลการทดลอง)
- 2) ลักษณะของคลื่นจากการบันทึก
- 3) พลังงานคลื่นจากการวิเคราะห์ความถี่ข้อมูล
- 4) การเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง

โดยมีตัวอย่างผลการทดลองของการศึกษากรณีคลื่นท่ามูมกับชายฝั่ง 35° และมีระยะห่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น 4.00 เมตร ดังตาราง 3-4 และ รูป 3-13 (ก) (ข) และ (ค) ส่วนผลการศึกษาสำหรับกรณีศึกษาท่ามูมของคลื่นเท่ากับ 15° 25° และ 35° จัดไว้ในภาคผนวก ค ง และ จ ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 3-3 รายละเอียดสำหรับตารางสรุปผลการทดลอง

	ข้อมูลจากการบันทึกและการคำนวณ	การกำหนดค่าตัวแปร (หน่วย)	
การติดตั้งเขื่อนกันคลื่น	<ul style="list-style-type: none"> - ความลึกน้ำในแอ่งคลื่น - จำนวนเขื่อนกันคลื่น - ความยาวเขื่อนกันคลื่น - ระยะห่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น - มุมของคลื่นที่กระทำกับแนวชายฝั่ง 	d	m.
		-	-
		l	m.
		G, G'	m.
		a	degree
ข้อมูลคลื่น	<ul style="list-style-type: none"> - เวลาในการบันทึก - จำนวนข้อมูลคลื่น 	-	sec
		-	-
ลักษณะคลื่นในแอ่งคลื่น (จากการวัดและการคำนวณ)	<ul style="list-style-type: none"> - ความสูงคลื่น - ความยาวคลื่น - คาบเวลาคลื่น - ความถี่คลื่น - ความเร็วคลื่น - ความชันคลื่น - พลังงานคลื่น - กำลังคลื่น 	H_{rms}, H_s, H_{mo}	m.
		L_d	m.
		T	sec
		f	Hz
		Cd	m.
		Hrms/L	-
		E	N-m/m ²
		P	N-m/s/m
ลักษณะคลื่นในน้ำลึก (ได้จากการคำนวณ)	<ul style="list-style-type: none"> - ความสูงคลื่นในน้ำลึก - ความยาวคลื่นในน้ำลึก - ความชันคลื่นในน้ำลึก 	H_o	m.
		L_o	m.
		H_o/L_o	-
ลักษณะคลื่นบริเวณแนวเขื่อนกันคลื่น (ได้จากการคำนวณ)	<ul style="list-style-type: none"> - สัมประสิทธิ์การหักเหของคลื่น - สัมประสิทธิ์การกระจายของคลื่น - ความสูงคลื่น - ความยาวคลื่น - ความเร็วคลื่น - พลังงานคลื่น - กำลังคลื่น - พลังงานคลื่นที่ผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนเข้ามากระทบชายฝั่ง 	-	-
		-	-
		H_{ent}	m.
		L_{ent}	m.
		C_{ent}	m/s
		E_{ent}	N-m/m ²
		P_{ent}	N-m/s/m
		T_{gap}	N-m/s
การแตกตัวของคลื่น	<ul style="list-style-type: none"> - ดัชนีความสูงคลื่นแตกตัว - ความสูงคลื่นแตกตัว - ความลึกน้ำบริเวณคลื่นแตกตัว 	H_b/H_o	-
		H_b	m.
		d_b	m.
การเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง (ได้จากการวัดการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งเมื่อชายฝั่งมีสภาพสมดุล)	<ul style="list-style-type: none"> - ความยาวชายฝั่ง - ระยะเว้าของชายฝั่ง - ความลาดชันชายฝั่ง - ความลึกน้ำบริเวณคลื่นแตกตัว - ระยะจากแนวชายฝั่งที่ระดับน้ำนิ่งถึงบริเวณคลื่นแตกตัว - พลังงานคลื่นต่อความยาวชายฝั่ง 	P	m.
		S	m.
		1:n	-
		d'_b	m.
		a.	m.
		E_{beach}	N-m/s/m

ตาราง 3-4 ตัวอย่างตารางสรุปผลการทดลอง

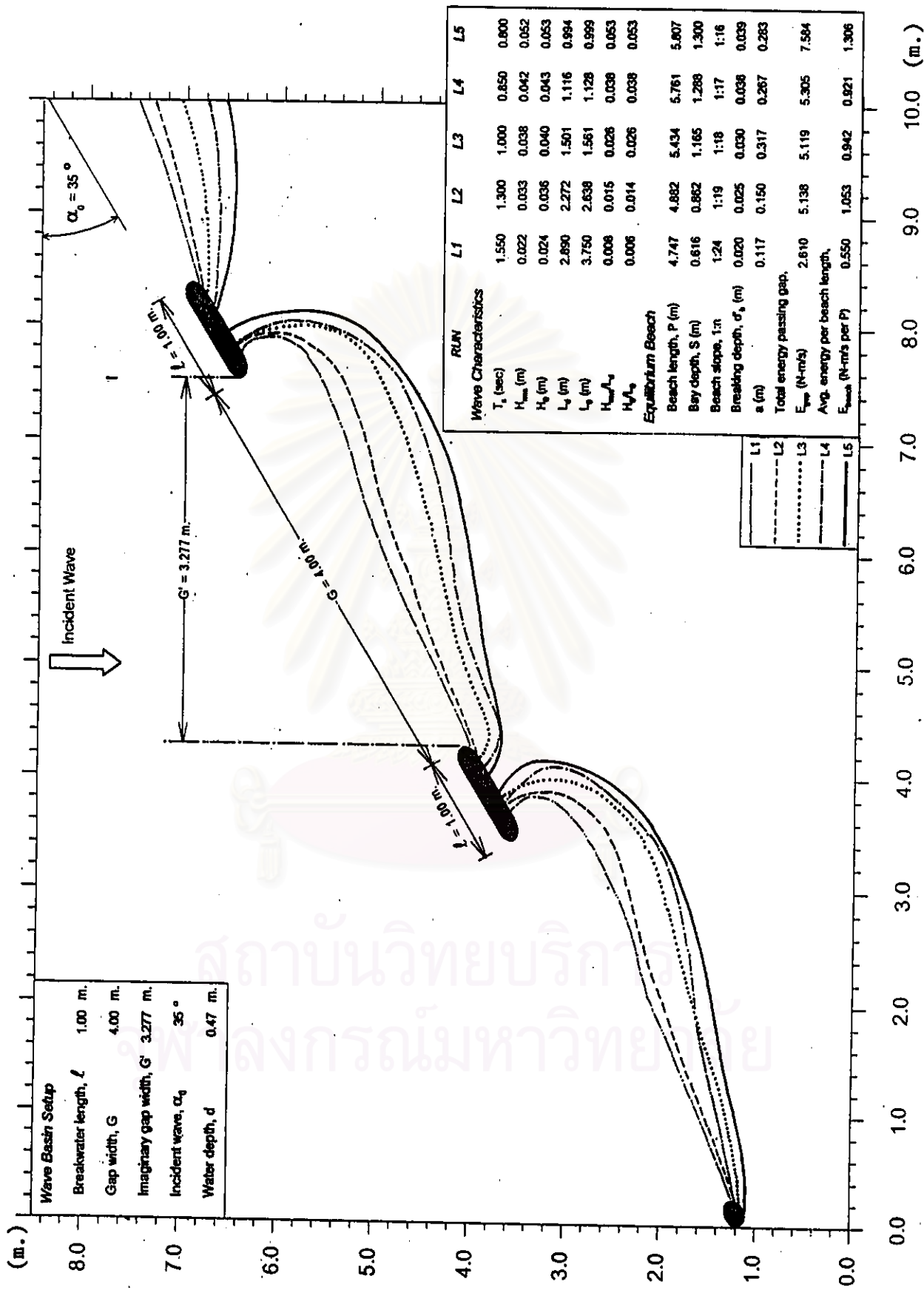
Run No.	L1	L2	L3	L4	L5	Remark
Setup Condition						
Breakwater Setup						
Water depth in wave basin, d (m)	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	
Numbers of breakwaters	3	3	3	3	3	
Breakwater length, l (m)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
Gap width, G (m)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	
Imaginary gap width, G' (m)	3.277	3.277	3.277	3.277	3.277	
Incident wave angle, α_0	35°	35°	35°	35°	35°	
Wave Characteristics						
Transitional Water at Mid Basin (recorder, d = 0.47 m.)						
Time of the record (sec)	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	
Numbers of wave data	1,000	1,360	1,800	2,110	2,250	
Statistic Analysis. (Time Domain)						
Root mean square wave height, H_{rms} (m)	0.022	0.033	0.038	0.042	0.052	$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum H^2}$
Significant wave period, T_s (sec)	1.55	1.30	1.00	0.85	0.80	= avg. period between zero upward crossing
Wave length, L_d (m)	2.890	2.272	1.501	1.118	0.994	$L_s = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left\{\frac{2\pi d}{L_s}\right\}$
Wave celerity, C_d (m/s)	1.865	1.748	1.501	1.313	1.243	$C_s = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left\{\frac{2\pi d}{L_s}\right\} = \frac{L_s}{T}$
Wave steepness, H_{rms}/L_d	0.008	0.015	0.026	0.038	0.053	
Wave energy, \bar{E}_d (N-m/m ²)	0.593	1.359	1.798	2.193	3.340	= total avg. wave energy per unit surface area, $\bar{E}_d = \frac{\rho g H_{rms}^2}{16}$
Energy flux, \bar{P}_d (N-m/s per m. of wave crest)	0.553	1.188	1.349	1.440	2.075	= rate of energy per unit crest width, $\bar{P}_d = \bar{E}_d C_s = \frac{1}{2} \bar{E}_d C_s^2$
Spectral Analysis (Frequency Domain)						
Spectral energy density at f_p , $S(f)$ ($\times 10^{-4}$ m ² -s)	3.95	11.11	14.17	17.14	28.09	$S(f) \Delta f = \sum \frac{a_n^2}{2}$
Spectral variance, σ^2 ($\times 10^{-4}$ m ²)	8.84	23.44	29.50	38.50	58.19	$\sigma^2 = \int_0^T S(f) df = m_0$
Zeroth-moment wave height, H_{m0} (m)	0.012	0.019	0.022	0.025	0.031	$H_{m0} = 4\sigma$
Peak spectra period, T_p (sec)	1.55	1.30	1.00	0.85	0.80	= proportional to the reciprocal of peak frequency, $(1/f_p)$
Peak frequency, f_p (Hz)	0.65	0.77	1.00	1.18	1.25	= frequency associated with max. of spectral energy density
Wave energy, $E(f)$ (N-m/m ²)	0.085	0.230	0.289	0.378	0.571	$\bar{E}(f) = \rho g \sigma^2 = \rho g \int_0^T S(f) df = \rho g \frac{H_{m0}^2}{16}$
Deep Water (calculated)						
Wave period, T (sec)	1.55	1.30	1.00	0.85	0.80	= T_s at depth (d = 0.50 m.)
Wave length, L_0 (m.)	3.750	2.638	1.561	1.128	0.999	$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$
Wave height, H_0 (m.)	0.024	0.036	0.040	0.043	0.053	= calculated by Shallowing Coefficient, K_s
Wave steepness, H_0/L_0	0.006	0.014	0.026	0.038	0.053	

ตาราง 3-4 (ต่อ) ตัวอย่างตารางสรุปผลการทดลอง

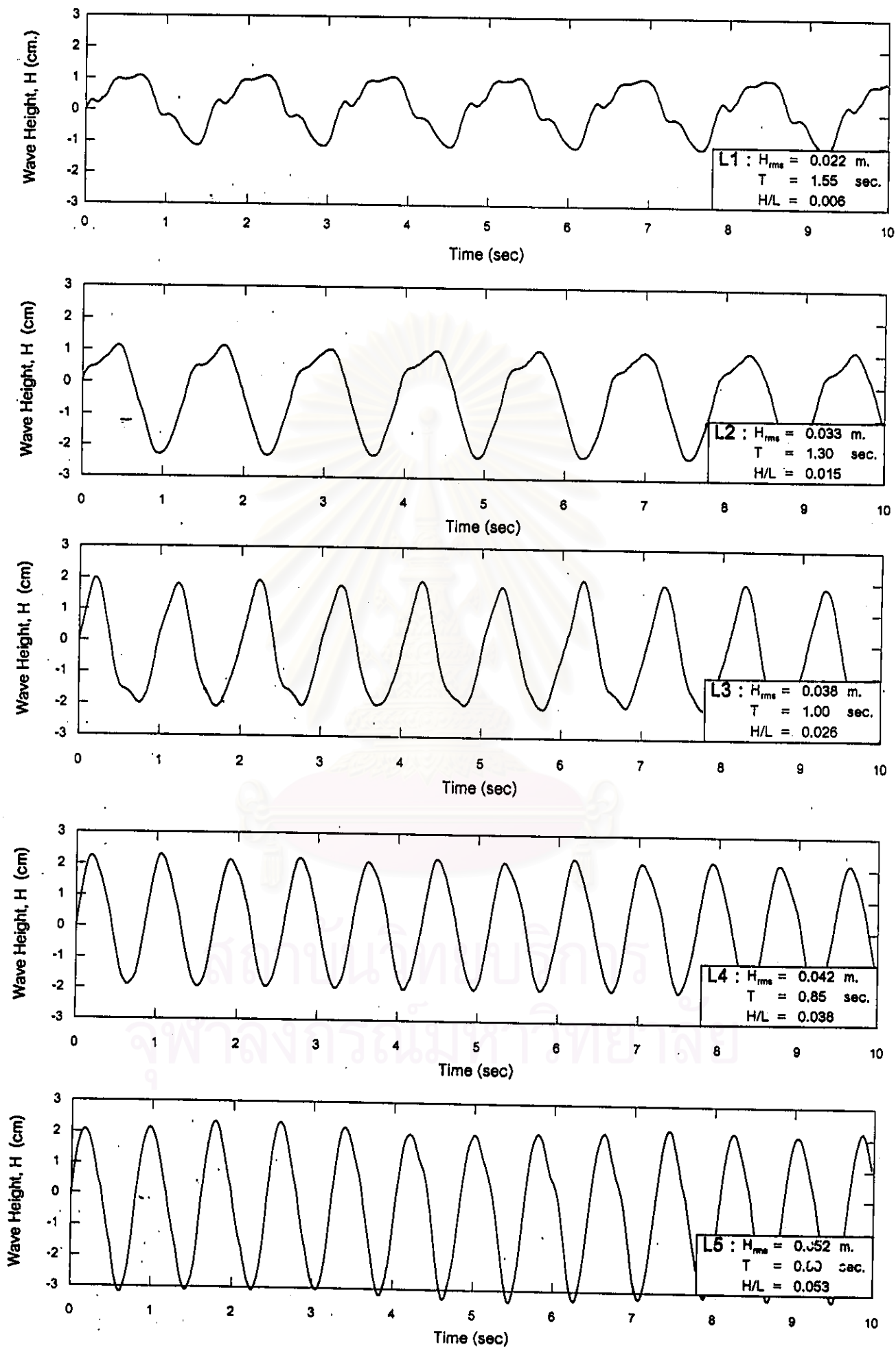
Run No.	L1	L2	L3	L4	L5	Remark
Wave Characteristics (cont.)						
At Entrance						
Avg. water depth, d_{ent} (m.)	0.054	0.055	0.089	0.080	0.078	= avg. value at entrance
Max. water depth, d_{max} (m.)	0.082	0.081	0.102	0.092	0.118	= maximum value at entrance
Wave length, L_{ent} (m.)	1.111	0.932	0.784	0.695	0.638	$L_{ent} = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L_{ent}}\right)$
Wave celerity, C_{ent} (m/s)	0.717	0.717	0.784	0.818	0.795	$C_{ent} = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L_{ent}}\right)$
Shoaling coef., K_s^*	1.319	1.216	1.045	0.970	0.980	
$\alpha = \sin^{-1}(C/C_0) \sin \alpha_0$	4.460	5.353	7.799	9.850	10.243	
Refraction coef., K_r^{**}	0.953	0.954	0.956	0.959	0.960	
Wave height, H_{ent} (m.)	0.030	0.042	0.040	0.040	0.049	$H_{ent} = H_0 K_r K_s$
Wave energy, E_{ent} (N-m / m ² of surface area)	1.112	2.188	1.994	1.980	2.910	$E_{ent} = \frac{\rho g H_{ent}^2}{8}$
Energy flux, P_{ent} (N-m/s per m. of wave crest) (rate of energy per unit crest width)	0.797	1.588	1.562	1.619	2.314	$\bar{P}_{ent} = \bar{E}_{ent} C_{ent}$
* Total energy passing gap, T_{gap} (N-m/s)	2.610	5.138	5.119	5.305	7.584	$T_{gap} = \bar{P}_{ent} \times G$
At Breaking						
Breaker height index, H_b/H_0	1.633	1.283	1.025	0.899	0.807	$\frac{H_b}{H_0} = \frac{1}{3.3(H_0/L_0)^{1/3}}$
Breaking height, H_b (m.)	0.039	0.046	0.041	0.039	0.043	
Breaking depth, d_b (m.)	0.050	0.059	0.053	0.050	0.055	$\frac{d_b}{H_0} = 1.28$
Beach Formation						
Equilibrium Bays						
Beach length, P (m.)	4.747	4.882	5.434	5.761	5.807	
Bay depth, S (m.)	0.876	0.982	1.165	1.288	1.300	
Beach slope, 1: n_1	1:34	1:21	1:18	1:17	1:36	
Beach slope, 1: n_2	1:17	1:17	1:13	1:12	1:10	
Beach slope, 1: n_3	1:27	1:21	1:24	1:24	1:15	
Avg. beach slope, 1: n	1:24	1:19	1:18	1:17	1:16	
Breaking depth, d_p' (m)	0.020	0.026	0.030	0.036	0.039	
a (m)	0.117	0.150	0.317	0.267	0.283	
Total energy passing gap, T_{gap} (N-m/s)	2.610	5.138	5.119	5.305	7.584	$T_{gap} = \bar{P}_{ent} \times G$
Avg. energy per beach lengths, T_{gap}/P (N-m/s per m. of beach lengths)	0.550	1.063	0.942	0.921	1.306	

* Shoaling Coefficient, $K_s = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(4\pi d/L)^2}{\sinh(4\pi d/L)}}} \tanh \frac{2\pi d}{L}$

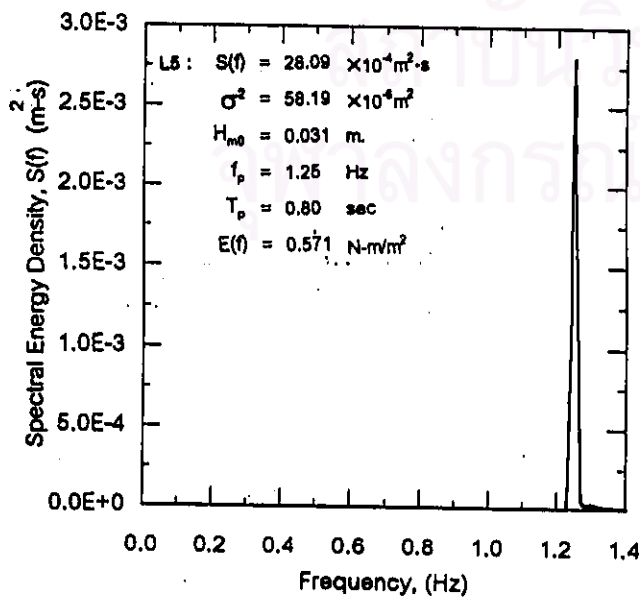
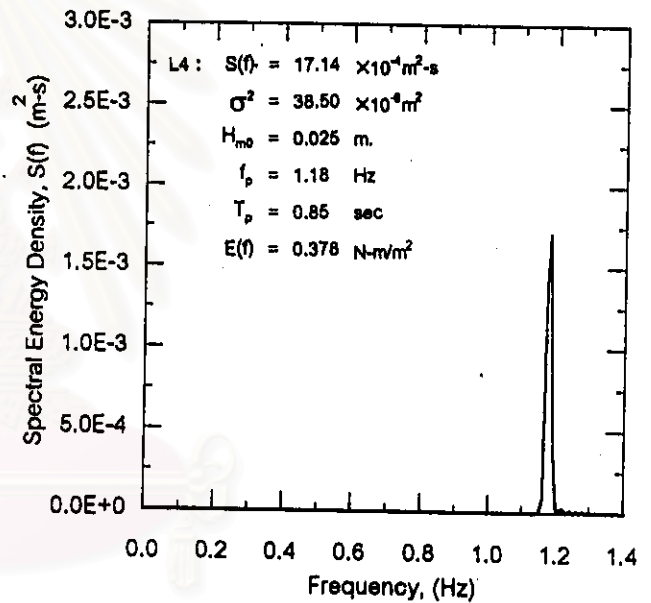
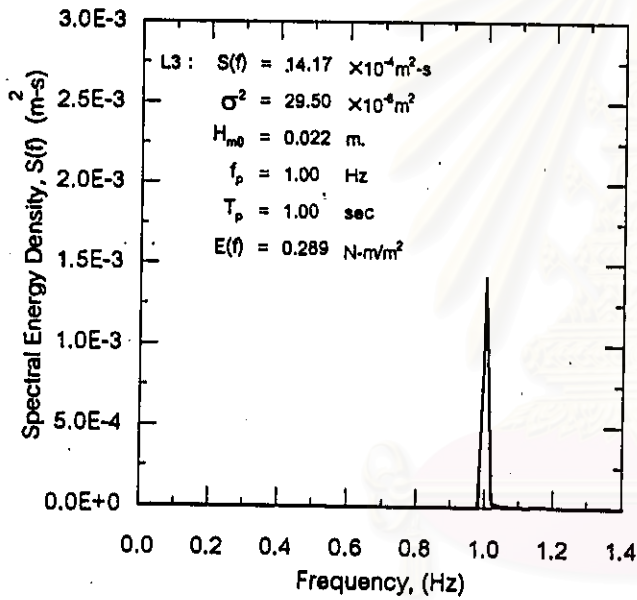
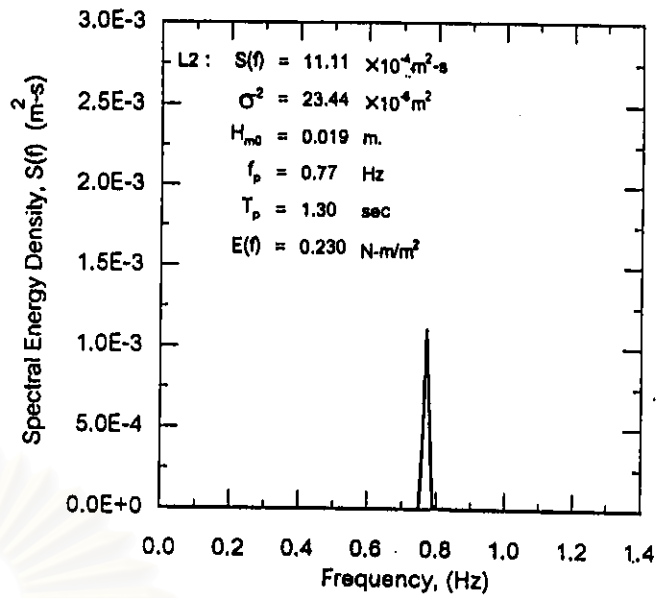
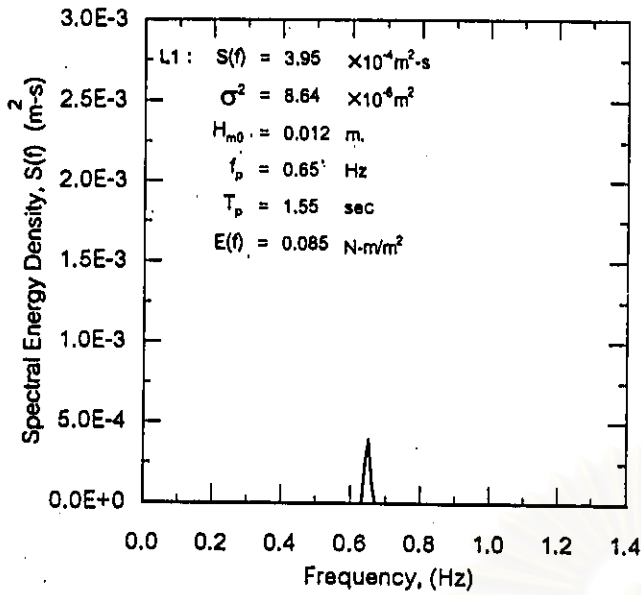
**Refraction Coefficient, $K_r = \left[\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha} \right]^{1/2}$



รูป 3-13 (ก) ตัวอย่างผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง



รูป 3-13 (ข) ตัวอย่างผลการทดลองคลื่นจากการบันทึก



Wave Basin Setup

Breakwater length, l	1.00 m.
Gap width, G	4.00 m.
Incident wave angle, α_t	35 °
Water depth, d	0.47 m.

	L1	L2	L3	L4	L5
H_{m0} (cm.)	0.022	0.033	0.038	0.042	0.052
T (sec)	1.55	1.30	1.00	0.85	0.80
H/L	0.008	0.015	0.026	0.038	0.053

รูป 3-13 (ค) ตัวอย่างผลการทดลองพลังงานคลื่นจากการวิเคราะห์ความถี่