

การทดสอบประสิทธิภาพในการลดพลังงานคลื่นของเขื่อนสลายพลังงานคลื่น โดยใช้แบบจำลอง
ทางกายภาพ



นายอาศวิน อินทสุภา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

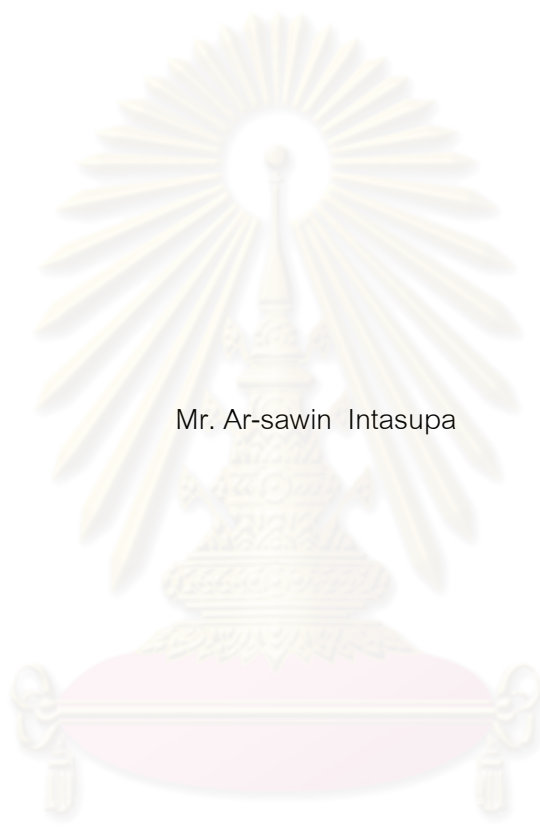
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE EFFICIENCY TEST ON WAVE ENERGY REDUCTION OF PILE BREAKWATER
USING PHYSICAL MODEL



Mr. Ar-sawin Intasupa

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Marine Science

Department of Marine Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การทดสอบประสิทธิภาพในการลดพลังงานคลื่นของเขื่อน
สลายพลังงานคลื่น โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ

โดย

นาย อาศวิน อินทสุภา

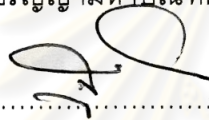
สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์ทางทะเล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ ไศจิตฺตกร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

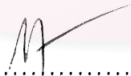


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

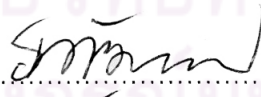
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เจริญ นิตีธรรมยง)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ ไศจิตฺตกร)



..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุล)



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พยอมน รัตน์มณี)

อาศวิน อินทสุภา : การทดสอบประสิทธิภาพในการลดพลังงานคลื่นของเขื่อนสลายพลังงานคลื่น โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ. (THE EFFICIENCY TEST ON WAVE ENERGY REDUCTION OF PILE BREAKWATER USING PHYSICAL MODEL)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. ปราโมทย์ โคจิศุกร , 80 หน้า.

ทำการหาประสิทธิภาพในการลดพลังงานคลื่นของเขื่อนสลายพลังงานคลื่นด้วยแบบจำลองทางกายภาพโดยย่อส่วนจากของจริงในอัตราส่วน 5:1 และกำหนดค่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการลดพลังงานของเขื่อนจำนวน 7 ตัวแปร คือ ความสูงคลื่น คาบคลื่น ความลึกน้ำ ระยะห่างระหว่างแถว ระยะห่างระหว่างเสาสามเหลี่ยม ทิศทางของคลื่นที่เข้าสู่แนวเขื่อน และมุมของเสาที่ทำกับแนวเขื่อน แต่ละตัวแปรใช้ค่าทดสอบ 3 ระดับคือต่ำ กลาง สูง ทดสอบเขื่อน 4 แบบ คือ แบบ 1 , 2 , 3 และ 4 แถวตามลำดับ ทำการทดสอบตัวแปรเดียวทุกกรณี และตัวแปรคู่ โดยเลือกมาจากตัวแปรเดียวที่ลดพลังงานคลื่นได้สูงสุด จากนั้นใช้หลักการทางสถิติวิเคราะห์รูปแบบการจัดวางตัวของเขื่อน จำนวนแถว และค่าตัวแปรที่ลดพลังงานคลื่นได้มากที่สุดซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพของเขื่อนสูงสุด

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเขื่อนด้วยตัวแปรเดียวและตัวแปรคู่พบว่าเขื่อนมีประสิทธิภาพการลดพลังงานคลื่นเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงคลื่น และจำนวนแถวเพิ่มขึ้นขณะที่ค่าคาบคลื่นและระยะห่างระหว่างเสาเข็มมีค่าลดลง โดยกรณีตัวแปรคู่ที่ลดพลังงานคลื่นได้สูงสุดคือเขื่อนแบบ 3 แถว ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดและมุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุดโดยมีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นสูงสุด 53.34 เปอร์เซ็นต์ และกรณีตัวแปรเดียวที่ลดพลังงานคลื่นได้สูงสุดคือ เขื่อนแบบ 3 แถว ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดโดยมีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นสูงสุด 40.51 เปอร์เซ็นต์

ผลการเปรียบเทียบต้นทุนกับประสิทธิภาพของเขื่อนพบว่าโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพและประหยัดงบประมาณการก่อสร้างมากที่สุดเป็นกรณีของชนิดเขื่อนแบบ 3 แถว และระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 1.5 เมตร

ภาควิชา.....วิทยาศาสตร์ทางทะเล.....

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์ทางทะเล.....

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา.....2552.....

4972581023 : MAJOR MARINE SCIENCE

KEYWORDS : Breakwaters / Wave Transmission / Energy Loss/ Slotted Barrier

AR-SAWIN INTASUPA : THE EFFICIENCY TEST ON WAVE ENERGY
REDUCTION OF PILE BREAKWATER USING PHYSICAL MODEL. THESIS
ADVISOR : ASSOC. PROF. PRAMOT SOJISUPORN, Ph.D., 80 pp.

Physical model was used to test the efficiency of wave energy reduction of pile breakwater. The model was scaled down from the prototype at the proportion of 5 to 1. Seven parameters; namely wave height, wave period, water depth, spacing between row, spacing between pile in the row, angle of incident wave and orientation of pile in the row, were tested. Each parameter has 3-steps values, namely low, medium and high value. The breakwater was composed of either one, two, three or four rows of pile. Using the medium values for each parameter as baseline case, each parameter was varied to low and high values one at a time. Using the information from varying one parameter at a time, varying pairs of parameter were chosen for further test. Statistical analyses were performed on the experimental results to evaluate the best breakwater arrangement that would best reduce the incoming wave energy.

The test results either varying one parameter or a pair of parameters showed that wave energy reduction was greater when using high wave height, more rows of pile, low wave period and less pile spacing in the same row. The highest wave energy reduction (53%) when varying a pair of parameters was achieved when using 3 rows of pile, short wave period and low angle of pile alignment with the breakwater. And the best result (40%) when varying just one parameter was achieved when using 3 rows of pile and short wave period.

When comparing capital investment of building the breakwater with its effectiveness in reducing the wave energy, the economy investment occurred when using 3 rows of pile with 1.5-m spacing between each pile in the row.

Department : MARINE SCIENCE

Student's Signature

Ar-sawin Intasupa

Field of Study : MARINE SCIENCE

Advisor's Signature

M

Academic Year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือของบุคคลหลาย ๆ ท่านที่ได้ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจในการทำงานดังนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ ไชยศิริภร ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการทำงาน ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ รวมถึงความเอาใจใส่ต่อศิษย์ทางด้านประสบการณ์การทำงานภาคสนามกับอาจารย์

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ธนวัฒน์ จารูพงษ์สกุล ที่ให้ความอนุเคราะห์ ศิษย์ด้วยความเมตตา ช่วยเหลือให้โอกาสในด้านหน้าที่การงานตลอดมา และสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งตรวจสอบแก้ไขจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เจริญ นิตินทรมยง ร่วมเป็นประธานการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ พยอม รัตนมณี ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ แก้ไขปัญหาวิทยานิพนธ์ และดูแลเอาใจใส่ความเป็นอยู่ระหว่างการทดลองภาคปฏิบัติที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วินัย อวยพระประเสริฐ ที่ให้คำแนะนำประสบการณ์ในการทำงานวิจัยในการวางแผนการทดสอบอย่างมีระบบ และมีประสิทธิภาพ

ขอขอบคุณนายปรณพงศ์ อุดมทอง สำหรับคำปรึกษา และช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา คุณอา และญาติ ที่ให้ความรักความเมตตา และแรงใจที่สนับสนุนตลอดมา ขอใจน้อมชาย นายธีรวัฒน์ อินทสุภา ที่ช่วยทำงานด้านข้อมูล สุดท้ายนี้ขอขอบใจ คินน้อยและตัวเล็ก ผู้เป็นเสมือนแก้วตาดวงใจที่ช่วยให้ฝ่าฟันอุปสรรคให้ผ่านพ้นไปได้ตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 กลศาสตร์ของคลื่น.....	6
2.2 การเปลี่ยนแปลงของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่เข้าหาฝั่ง.....	9
2.3 รูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	16
2.4 หลักการที่ใช้ในการจำลองแบบย่อส่วน.....	21
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	27
3.1 แบบจำลองเสาเข็ม (Model of Pile).....	27
3.2 รางน้ำสำหรับการทดสอบ (Flume).....	30
3.3 ข้อมูลทางสมุทรศาสตร์ และการกำหนดขอบเขตการทดสอบ.....	31
3.4 ขอบเขตค่าการทดสอบ.....	33
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	39
4.1 การเปรียบเทียบค่าของตัวแปรเดี่ยวในกรณีเพิ่มขึ้น และลดลงจากค่ากลาง.....	41

4.2 ผลการลดพลังงานคลื่นของตัวแปรคู่โดยการทดสอบและการคำนวณ.....	48
4.3 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นโดยการ จำแนกออกเป็น 7 กลุ่ม.....	50
4.4 การเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบตัวแปรคู่.....	63
4.5 การเปรียบเทียบงบประมาณกับประสิทธิภาพของเขื่อน.....	74
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	76
ข้อเสนอแนะ.....	77
รายการอ้างอิง.....	78
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	80



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	คุณสมบัติของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านความลึกต่าง ๆ.....	9
2-2	จำนวนสัมประสิทธิ์พหุนามอันดับที่สองสำหรับตัวแปรอิสระ n ตัว.....	20
2-3	อัตราส่วนความคล้ายคลึงชนิดต่าง ๆ แยกตามอัตราส่วนระหว่างแรงแต่ละชนิด	24
2-4	อัตราส่วนความคล้ายคลึงของ Froude และ Reynolds.....	25
3-1	ข้อมูลทางสมุทรศาสตร์บริเวณพื้นที่ศึกษา.....	31
3-2	อัตราส่วนของ Froude ระหว่างค่าตัวแปรของพื้นที่ศึกษากับห้องปฏิบัติการ.....	32
3-3	ตัวแปรและช่วงของการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	33
3-4	ขอบเขตของค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบสำหรับ 1 แถว.....	34
3-5	ขอบเขตของค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบสำหรับ 2,3 และ 4 แถว.....	34
3-6	ตารางการทดสอบประสิทธิภาพของเขื่อนสลายกำลังคลื่นสำหรับ 1 แถว.....	36
3-7	ตารางการทดสอบประสิทธิภาพของเขื่อนสลายกำลังคลื่นสำหรับ 2 , 3 และ 4 แถว.....	37
4-1	เปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นเฉลี่ยสำหรับตัวแปรเดียว.....	40
4-2	เปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นเฉลี่ยสำหรับตัวแปรคู่.....	48
4-3	เปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยเนื่องจากการจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าของคลื่นสูงสุด (Hu).....	50
4-4	เปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยเนื่องจากการจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด (TI).....	52
4-5	เปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยเนื่องจากการจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าความลึกน้ำมากที่สุด (Du).....	54
4-6	เปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยเนื่องจากการจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด (SRI).....	55
4-7	เปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยเนื่องจากการจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด (SCI).....	57
4-8	เปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยเนื่องจากการจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด (θ_{WI}).....	59

4-9	เปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยเนื่องจากการจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับ ตั้งค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด (θ_{PI}).....	61
4-10	เปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยกรณีที่ไม่มีค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถว (SR).....	64
4-11	ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยสำหรับทุกกรณีของแต่ละ กลุ่มจากตารางที่ 4-10.....	67
4-12	เปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยกรณีที่มีค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถว (SR).....	69
4-13	ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยสำหรับทุกกรณีของแต่ละ กลุ่มจากตารางที่ 4-12.....	72

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1-1	ขนาดหน้าตัดของเสาเข็มจำลองในอัตราส่วน 5:1.....	3
1-2	แบบจำลองเสาเข็มที่ใช้สำหรับทดสอบ.....	4
1-3	ร่างน้ำสำหรับทดสอบ.....	4
2-1	รูปแบบ และตัวแปรต่าง ๆ ของคลื่น.....	6
2-2	คุณสมบัติของคลื่นเมื่อเคลื่อนตัวเข้าสู่ชายฝั่ง.....	8
2-3	คลื่น 4 ประเภท ตามความสัมพันธ์ของความลาดชันของชายฝั่ง คาบ และ ความยาวคลื่น.....	10
2-4	การเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่นเมื่อเคลื่อนตัวจากน้ำลึกที่จุด d_1 ไปยังน้ำตื้นที่จุด d_2	12
2-5	การหักเหของคลื่น.....	14
3-1	ขนาดของเสาคอนกรีตต้นแบบ.....	27
3-2	เสาคอนกรีตที่ปักเป็นแนวเชื่อมบริเวณพื้นที่ศึกษา.....	28
3-3	แบบจำลองทางกายภาพจากเสาคอนกรีตต้นแบบในอัตราส่วน 5:1.....	29
3-4	แบบที่ใช้หล่อเสา แกนกลาง และแบบจำลองเสาเข็ม.....	29
3-5	มอเตอร์สำหรับสร้างคลื่นที่ปรับแขนได้เพื่อให้ได้ความสูงคลื่นที่ต้องการ.....	30
3-6	ระยะการติดตั้งตัวรับบริเวณหน้าและหลังเชื่อมในร่างน้ำ.....	31
3-7	ภาพวาดแสดงตำแหน่งการจัดวางแบบจำลองเสาเข็ม.....	38
3-8	แบบจำลองเสาเข็มในร่างน้ำสำหรับการทดสอบ.....	38
4-1	ตัวอย่างกราฟเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นสำหรับเชื่อมแบบ 2 แถว เมื่อใช้ค่าความสูงคลื่นต่ำสุด(H_{nml}) 0.05 เมตร ค่าความสูงคลื่นค่ากลาง (Share) 0.10 เมตร และค่าความสูงคลื่นสูงสุด(H_{nmu}) 0.15 เมตร.....	41
4-2	ตัวอย่างกราฟเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นสำหรับเชื่อมแบบ 4 แถว เมื่อใช้ค่าคาบคลื่นต่ำสุด(T_{nml}) 0.9 วินาที ค่าคาบคลื่นค่ากลาง(Share) 1.5 วินาทีและค่าคาบคลื่นสูงสุด(T_{nmu}) 2.1 วินาที.....	42
4-3	ตัวอย่างกราฟเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นสำหรับเชื่อมแบบ 2 แถว เมื่อใช้ค่าความลึกของน้ำน้อยที่สุด(D_{nml}) 0.2 เมตร ค่าความลึกของน้ำค่า กลาง(Share) 0.4 เมตร และค่าความลึกของน้ำมากที่สุด(D_{nmu}) 0.6 เมตร...	43

4-4	ตัวอย่างกราฟเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นสำหรับเขื่อนแบบ 4 แถว เมื่อใช้ค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด(SRnml) 0.2 เมตร ค่าระยะห่างระหว่างแถวค่ากลาง(Share) 0.3 เมตร และค่าระยะห่างระหว่างแถวมากที่สุด(SRnmu) 0.4 เมตร.....	44
4-5	ตัวอย่างกราฟเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นสำหรับเขื่อนแบบ 2 แถว เมื่อใช้ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCnml) 0.2 เมตร ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มค่ากลาง(Share) 0.3 เมตร และค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มมากที่สุด(SCnmu) 0.4 เมตร.....	45
4-6	ตัวอย่างกราฟเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นสำหรับเขื่อนแบบ 2 แถว เมื่อใช้ค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อน แคบที่สุด(θ Wnml) 0 องศา ค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนค่ากลาง(Share) 22.5 องศา และค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนกว้างที่สุด(θ Wnmu) 45 องศา.....	46
4-7	ตัวอย่างกราฟเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นสำหรับเขื่อนแบบ 4 แถว เมื่อใช้ค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(θ Pnml) 0 องศา ค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวค่ากลาง(Share) 22.5 องศา และค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวกว้างที่สุด(θ Pnmu) 45 องศา.....	47
4-8	การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นกับค่าคลื่นสูงสุด(Hu) 0.15 เมตร และค่ากลาง(Share) ของเขื่อนแต่ละแบบ.....	51
4-9	การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นกับค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด (TI) 0.9 วินาที และค่ากลาง(Share) ของเขื่อนแต่ละแบบ.....	53
4-10	การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นกับค่าความลึกน้ำมากที่สุด(Du) 0.6 เมตร และค่ากลาง(Share) เขื่อนแต่ละแบบ.....	54
4-11	การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นกับค่าความกว้างระหว่างแถวน้อยที่สุด (SRI) 0.2 เมตร และค่ากลาง(Share) ของเขื่อนแต่ละแบบ.....	56
4-12	การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นกับค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) 0.2 เมตร และค่ากลาง(Share) ของเขื่อนแต่ละแบบ.....	58
4-13	การเปรียบเทียบการลดลงของพลังงานคลื่นเมื่อจับคู่ค่าตัวแปรอื่น ๆ กับค่ามุมที่ทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด(θ WI) 0 องศา และค่ากลาง(Share) ของเขื่อนแต่ละแบบ.....	59

- 4-14 การเปรียบเทียบการลดลงของพลังงานคลื่นเมื่อจับคู่ค่าตัวแปรอื่น ๆ กับค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(θ_{PI}) 0 องศา และแคบที่สุด(θ_{PI}) 0 องศาของเขื่อนแต่ละแบบ..... 61



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ

Case A	การทดสอบประสิทธิภาพของเขื่อนสลายกำลังคลื่น 1 แถว
Case B	การทดสอบประสิทธิภาพของเขื่อนสลายกำลังคลื่น 2 แถว
Case C	การทดสอบประสิทธิภาพของเขื่อนสลายกำลังคลื่น 3 แถว
Case D	การทดสอบประสิทธิภาพของเขื่อนสลายกำลังคลื่น 4 แถว
Share	การทดสอบในกรณีตั้งค่าของตัวแปรทุกตัวเป็นค่ากลาง
Hu หรือ Hnmu	การทดสอบในกรณีตั้งค่าความสูงคลื่นสูงที่สุด
Hi หรือ Hnml	การทดสอบในกรณีตั้งค่าความสูงคลื่นต่ำที่สุด
Tu หรือ Tnmu	การทดสอบในกรณีตั้งค่าคาบคลื่นยาวที่สุด
Ti หรือ Tnml	การทดสอบในกรณีตั้งค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด
TIHu	การทดสอบในกรณีตั้งค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดและความสูงคลื่นสูงที่สุด
Du หรือ Dnmu	การทดสอบในกรณีตั้งค่าความลึกของน้ำมากที่สุด
DI หรือ Dnml	การทดสอบในกรณีตั้งค่าความลึกของน้ำน้อยที่สุด
DuHu	การทดสอบในกรณีตั้งค่าความลึกของน้ำมากที่สุดและความสูงคลื่นสูงที่สุด
DuTI	การทดสอบในกรณีตั้งค่าความลึกของน้ำมากที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด
SRu หรือ SRnmu	การทดสอบในกรณีตั้งค่าระยะห่างระหว่างแถวมากที่สุด
SRI หรือ SRnml	การทดสอบในกรณีตั้งค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด
SRuHu	การทดสอบในกรณีตั้งค่าระยะห่างระหว่างแถวมากที่สุดและความสูงคลื่นสูงที่สุด
SRITI	การทดสอบในกรณีตั้งค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด
SRIDu	การทดสอบในกรณีตั้งค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุดและความลึกของน้ำมากที่สุด
SCu หรือ SCnmu	การทดสอบในกรณีตั้งค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มมากที่สุด
SCI หรือ SCnml	การทดสอบในกรณีตั้งค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด
SCIHu	การทดสอบในกรณีตั้งค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุดและความสูงคลื่นสูงที่สุด

SCITI	การทดสอบในกรณีตั้งค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด
SCIDu	การทดสอบในกรณีตั้งค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุดและความลึกของน้ำมากที่สุด
SCISRI	การทดสอบในกรณีตั้งค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุดและระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด
θ Wu และ θ Wnmu	การทดสอบในกรณีตั้งค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนกว้างที่สุด
θ WI และ θ Wnml	การทดสอบในกรณีตั้งค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด
θ WIHu	การทดสอบในกรณีตั้งค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนและความสูงคลื่นสูงที่สุด
θ WITI	การทดสอบในกรณีตั้งค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด
θ WIDu	การทดสอบในกรณีตั้งค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุดและความลึกของน้ำมากที่สุด
θ WISRI	การทดสอบในกรณีตั้งค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุดและระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด
θ WISCI	การทดสอบในกรณีตั้งค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุดและระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด
θ Pu หรือ θ Pnmu	การทดสอบในกรณีตั้งค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวกว้างที่สุด
θ PI หรือ θ Pnml	การทดสอบในกรณีตั้งค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด
θ PIHu	การทดสอบในกรณีตั้งค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุดและความสูงคลื่นสูงที่สุด
θ PITI	การทดสอบในกรณีตั้งค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด
θ PuDu	การทดสอบในกรณีตั้งค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวกว้างที่สุดและความลึกของน้ำมากที่สุด
θ PISRu	การทดสอบในกรณีตั้งค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุดและระยะห่างระหว่างแถวมากที่สุด

θ PISCI	การทดสอบในกรณีตั้งค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็ม กับแนวของแกนแคบที่สุดและระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด
θ PIWI	การทดสอบในกรณีตั้งค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็ม กับแนวของแกนแคบที่สุดและมุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด
Sensor 1	ตัวรับสัญญาณตัวที่ 1 อยู่ด้านหน้า และห่างจากแนวเขื่อน ประมาณ 2.7 เมตร
Sensor 2	ตัวรับสัญญาณตัวที่ 2 อยู่ด้านหน้า และห่างจากแนวเขื่อน ประมาณ 0.7 เมตร
Sensor 5	ตัวรับสัญญาณตัวที่ 5 อยู่ด้านหลัง และห่างจากแนวเขื่อน ประมาณ 0.7 เมตร
Sensor 11	ตัวรับสัญญาณตัวที่ 11 อยู่ด้านหลัง และห่างจากแนวเขื่อน ประมาณ 1.75 เมตร
Sensor 12	ตัวรับสัญญาณตัวที่ 12 อยู่ด้านหลัง และห่างจากแนวเขื่อน ประมาณ 3.75 เมตร
A	พื้นที่ (Area)
E	พลังงาน (Energy)
J	หน่วยของพลังงาน เรียกว่า จูล (Joule)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ภูมิประเทศบริเวณปากแม่น้ำมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นเขตรอยต่อระหว่างแม่น้ำกับทะเล บริเวณปากแม่น้ำนอกจากประชาชนจะใช้เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยแล้วยังเป็นแหล่งทำการประมง หรือใช้พื้นที่สำหรับการเพาะเลี้ยงชายฝั่ง บางพื้นที่ยังมีป่าชายเลนที่เป็นแหล่งอนุบาลสัตว์น้ำวัยอ่อนอีกด้วย ดังนั้นหากสภาพภูมิประเทศบริเวณปากแม่น้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงจากอิทธิพลของคลื่น ก่อกำเนิดชายฝั่งมีอัตราการกัดเซาะมากกว่าอัตราการทับถมของตะกอนทำให้ชายฝั่งเกิดการถอยร่น สภาวะเช่นนี้ย่อมจะส่งผลกระทบต่อทางด้านเศรษฐกิจ สังคมและนิเวศวิทยาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

จังหวัดสมุทรปราการเป็นจังหวัดหนึ่งที่ตั้งอยู่บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยาในบริเวณอำเภอไทยดอนบนที่ประสบปัญหาชายฝั่งถูกคลื่นกัดเซาะอย่างรุนแรง ดังเช่นที่ตำบลแหลมฟ้าผ่า อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ ประชาชนที่อยู่อาศัยบริเวณแถบชายฝั่งต้องย้ายถิ่นที่อยู่อาศัยเนื่องจากพื้นที่ทำกินถูกน้ำทะเลเซาะหายไป ประมาณการได้ว่าพื้นที่ชายฝั่งพังทลายสูญหายนับพันตารางกิโลเมตร (หน่วยศึกษาพิบัติภัยและข้อสนเทศเชิงพื้นที่, 2550) นอกจากนี้คลื่นที่เป็นสาเหตุสำคัญของกากรัดเซาะแล้วทั้งนี้อาจมีปัจจัยเสริมที่เร่งการกัดเซาะได้แก่ การทรุดตัวของแผ่นดิน การสร้างเขื่อนเพื่อการชลประทานในแม่น้ำสายหลัก ทำให้ปริมาณน้ำท่าและตะกอนแขวนลอยที่จะมาทับถมบริเวณชายฝั่งทะเลลดลง การลดลงของป่าชายเลน(อจิวรา เทียงตรง, 2549) และการขุดลอกตะกอนบริเวณร่องน้ำเพื่อลดการตื้นเขิน(เจ้าท่า, 2539)

บริเวณบ้านขุนสมุทรจีนตั้งอยู่บริเวณทางทิศตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยาอยู่ในเขตอำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการมีลักษณะทางธรณีฐานชายฝั่งเป็นดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำเจ้าพระยา (delta) เนื่องจากตะกอนจากแม่น้ำเจ้าพระยาถูกพัดพามาสะสมชายฝั่งจึงมีสภาพภูมิประเทศเป็นที่ราบลุ่มน้ำขึ้นถึง (tidal flat) หรือที่ราบดินโคลน (mud flat) บางบริเวณปกคลุมด้วยป่าชายเลน ซึ่งชุมชนบ้านขุนสมุทรจีนเป็นพื้นที่หนึ่งที่ได้รับผลกระทบจากการกัดเซาะอย่างรุนแรง แต่เดิมมีชาวบ้านอาศัยอยู่มากกว่า 200 หลังคาเรือนปัจจุบันเหลือประมาณ 100 หลังคาเรือน และพื้นที่บริเวณวัดจาก 70 ไร่เหลือประมาณ 5 ไร่ หากไม่มีมาตรการการป้องกันที่ดีจะทำให้พื้นที่ชุมชนบริเวณนี้ และบริเวณข้างเคียงหายไปประมาณ 37,657 ไร่ ในอีก 20 ปีข้างหน้า(หน่วยศึกษาพิบัติภัยและข้อสนเทศเชิงพื้นที่, 2550) ที่ผ่านมามาตรการการป้องกันกากรัดเซาะของจังหวัดสมุทรปราการเน้นการสร้างโครงสร้างในการลดพลังงานคลื่นที่เหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศ เช่น การปักแนวไม้ไผ่รวก บริเวณหมู่ที่ 10 ต.แหลมฟ้าผ่า การวางไส้กรอกทรายกัน

คลื่น(Geo-tube) บริเวณ ต.คลองด่าน การปักเสาไฟฟ้าและสวมด้วยยางรถยนต์ บริเวณ ม.8 บ้านแหลมสิงห์ แต่ละมาตรการก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันคือ ไม้ไผ่รวกใช้ลดพลังงานคลื่นได้ดีแต่ต้องใช้ไม้จำนวนมากและมีอายุการใช้งานเพียง 2 – 3 ปี ใ้กรอกทรายกันคลื่นสามารถเป็นแนวกำบังชายหาดจากพายุได้ดีแต่งบประมาณการก่อสร้างสูงมากและยังมีปัญหาด้านเสถียรภาพของฐานรากโดยมักจะเกิดการทรุดตัวเมื่อวางบนดินอ่อน เสาไฟฟ้าที่สวมยางรถยนต์ช่วยสลายพลังงานคลื่นดีมากแต่ป้องกันได้เฉพาะคลื่นที่ต่ำกว่าระดับยางรถยนต์และอาจจะเกิดการกัดเซาะบริเวณฐานรากและบริเวณข้างเคียง ดังนั้นแนวทางการป้องกันการกัดเซาะบริเวณบ้านขุนสมุทรจีนจึงหาวิธีที่เหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศ และงบประมาณโดยเลือกใช้เชือกสลายกำลังคลื่นที่มีลักษณะเป็นเสาเข็มคอนกรีตหน้าตัดรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าปลายตัดหน้ากว้าง 0.50 เมตร ตอกสลับพื้นปลา 3 แถว มีระยะห่างภายในแถว และระหว่างแถว 1.50 เมตร ซึ่งสามารถลดพลังงานและความสูงของคลื่น โดยเฉพาะคลื่นในช่วงฤดูมรสุมที่คลื่นจากพายุมีขนาดใหญ่ ทำให้การกัดเซาะชายฝั่งชลอตัวหรือหยุดการกัดเซาะ และกระแสน้ำบริเวณหลังเขื่อนไหลช้าลงอาจจะช่วยให้ตะกอนที่ฟุ้งขึ้นมาจากท้องน้ำ หรือตะกอนที่แพร่เข้ามาบริเวณหลังเขื่อนตกตะกอน(อัปสรสุดา ศิริพงษ์, 2550) จึงช่วยเป็นการสะสมตัวของตะกอนบริเวณหลังเขื่อนให้มีปริมาณเพิ่มขึ้นอีกด้วย ซึ่งผลเสียอาจจะส่งผลกระทบต่อการใช้ประโยชน์จากชายฝั่งทะเล

เนื่องจากเชือกสลายกำลังคลื่น บ้านขุนสมุทรจีนเป็นโครงสร้างที่ออกแบบเพื่อสลายพลังงานคลื่น และช่วยลดการกัดเซาะชายฝั่งมาประยุกต์ใช้กับพื้นที่บ้านขุนสมุทรจีนเป็นแห่งแรก ดังนั้นการศึกษาวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงทำการทดสอบประสิทธิภาพของเชือกในห้องปฏิบัติการโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพที่ย่อส่วนในอัตราส่วน 5:1 เพื่อหารูปแบบการจัดวางตัวของเชือกที่ทำให้ประสิทธิภาพในการลดพลังงานคลื่นได้สูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์

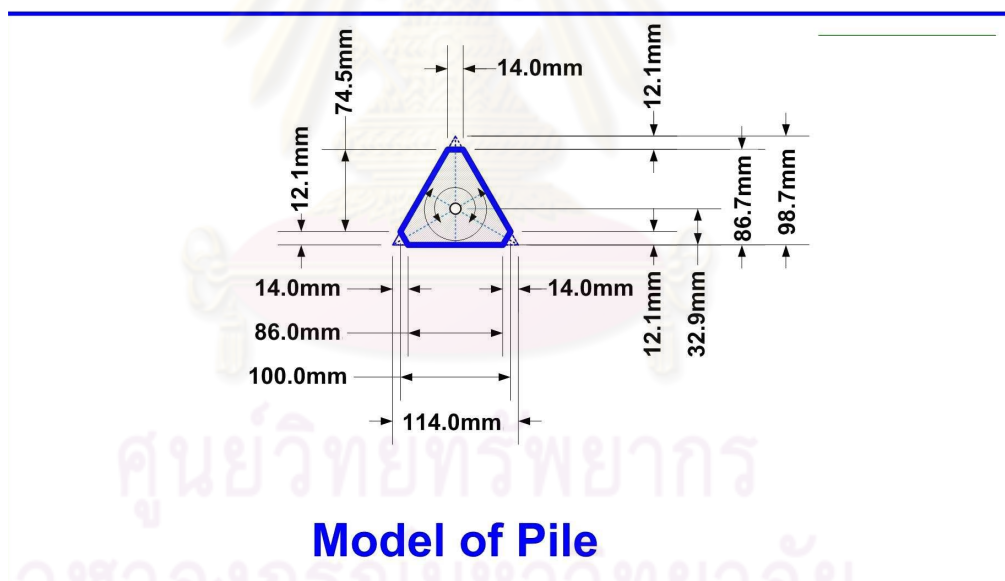
1. เพื่อเปรียบเทียบและหารูปแบบการจัดเรียงตัวของเชือกสลายกำลังคลื่นที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดพลังงานคลื่นของเชือกแบบ 1 , 2 , 3 และ 4 แถว โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ
2. เพื่อหาความคุ้มค่าของงบประมาณในการก่อสร้างเชือกที่ประหยัดที่สุด

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาการลดลงของความสูงคลื่นหลังจากผ่านแนวเชือกเพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมของเชือกสลายกำลังคลื่นบ้านขุนสมุทรจีนให้มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด 8 ตัวแปร คือ

1. ความสูงคลื่น (Wave Height)
2. คาบคลื่น (Wave Period)
3. ความลึกของน้ำ (Water Depth)
4. ระยะห่างระหว่างแถว (Space between Row)
5. ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (Space between Column)
6. มุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อน (Wave Angle)
7. ค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถว (Pile Angle)
8. จำนวนแถว (Number of Row) ที่ใช้ในการทดสอบคือ 1-4 แถว

ทำการทดสอบด้วยเสาสามเหลี่ยมในรางน้ำโดยกำหนดตัวแปรทางเรขาคณิตได้แก่ ความสูงคลื่น ความลึกของน้ำ ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม และ ระยะห่างระหว่างแถว ใช้มาตราส่วน 5:1 ในขณะที่คาบคลื่นซึ่งเป็นตัวแปรเวลาใช้มาตราส่วน $\sqrt{5}:1$



รูปที่ 1-1 ขนาดหน้าตัดของเสาเข็มจำลองในอัตราส่วน 5:1



รูปที่ 1-2 แบบจำลองเสาเข็มที่ใช้สำหรับทดสอบ



รูปที่ 1-3 รางน้ำสำหรับทดสอบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบถึงประสิทธิภาพของเขื่อนสลายกำลังคลื่นในการลดพลังงานคลื่น พร้อมกับรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ทำนายประสิทธิภาพของเขื่อน เพื่อใช้จัดรูปแบบการเรียงตัวของเสาเข็มได้อย่างประหยัดที่สุด และมีประสิทธิภาพการลดพลังงานคลื่นสูงสุด



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

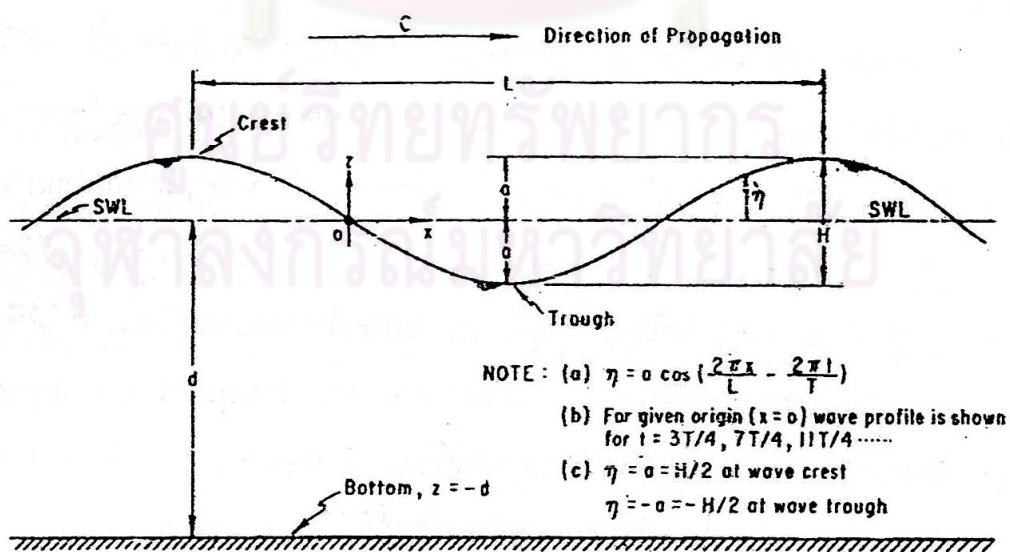
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปกติชายฝั่งจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทั้งในรูปแบบของการกัดเซาะ และการทับถม หากอัตราการกัดเซาะมากกว่าการทับถมก็จะทำให้พื้นที่ชายฝั่งเกิดการถอยร่นสูญหายไป การกัดเซาะก็เกิดมาจากอิทธิพลของคลื่นเป็นสาเหตุอันดับต้น ๆ ที่ทำให้บางบริเวณแถบชายฝั่งเปลี่ยนแปลงไปอย่างถาวรจนกลายเป็นปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในหลายพื้นที่ คลื่นที่เกิดจากพายุมีพลังงานสูงเมื่อเคลื่อนตัวสู่ชายฝั่งพลังงานจะถูกถ่ายเทไปยังวัตถุที่คลื่นกระทบ หากสันฐานวิทยาบริเวณชายฝั่งมีความอ่อนไหวเช่น ลักษณะเป็นหาดทราย (sand beach) หรือหาดเลน (mud flat) ตะกอนมักจะถูกพัดพาออกไปจากชายฝั่งกลายเป็นสภาพที่ถูกกัดเซาะ

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของคลื่นซึ่งประกอบไปด้วย กลศาสตร์ของคลื่น (wave mechanics) การเปลี่ยนแปลงของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่เข้าหาฝั่ง (wave transformation) รวมถึงรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และหลักการที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองย่อส่วน (similitude)

2.1 กลศาสตร์ของคลื่น

นอกจากชายฝั่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากคลื่นที่เกิดจากพายุดังกล่าวมาแล้ว ยังมีคลื่นชนิดอื่น ๆ อาจจะมีอิทธิพลทำให้ชายฝั่งมีการเปลี่ยนแปลง เช่น คลื่นที่เกิดจากเรือ (ship-generated wave) คลื่นลม (wind wave) คลื่นสึนามิ (tsunami) และ กระแสน้ำขึ้นน้ำลง (tidal current) เป็นต้น โดยคลื่นที่กล่าวมานี้จะมีลักษณะดังรูปที่ 2-1



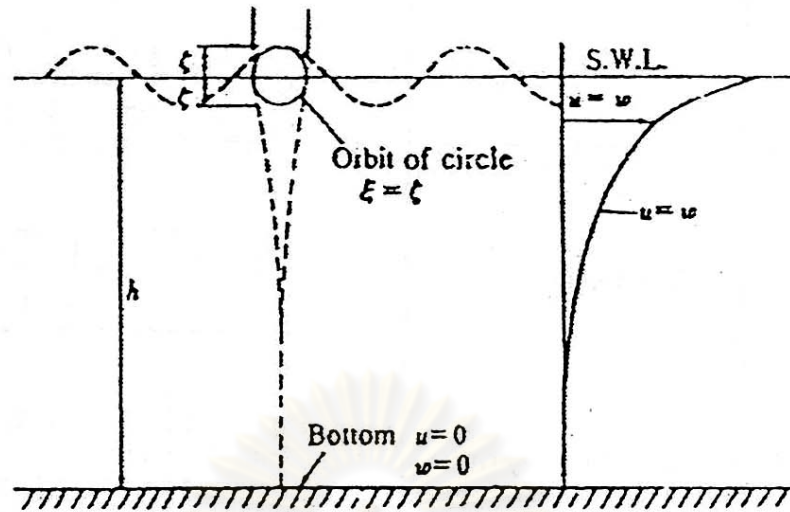
รูปที่ 2-1 รูปแบบ และตัวแปรต่าง ๆ ของคลื่น (ที่มา : U.S.CERC, 1984)

ในมหาสมุทรมากกว่า 90% จะเกิดมาจากอิทธิพลของลม เมื่อคลื่นได้เคลื่อนตัวออกจากจุดกำเนิดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะแบ่งเป็น 3 ช่วงคือ ลักษณะคลื่นเคลื่อนตัวในน้ำลึก ลักษณะคลื่นเคลื่อนตัวในน้ำลึกปานกลาง และลักษณะคลื่นเคลื่อนตัวในน้ำตื้น ซึ่งจำแนกโดยใช้ความลึกสัมพัทธ์ (relative depth, d/L) ช่วงแรกคลื่นเคลื่อนตัวในน้ำลึกสัมพัทธ์มากกว่า 0.5 ($d/L > 0.5$) ลักษณะของคลื่น เช่น ความสูงคลื่น (wave height, H) ความเร็วคลื่น (wave velocity, C) ความยาวคลื่น (wavelength, L) คาบคลื่น (wave period, T) ถือได้ว่ามีค่าคงที่ โดยลักษณะวงโคจรของอนุภาคน้ำ (trajectories) บริเวณผิวน้ำเป็นรูปวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ ความสูงคลื่น เมื่อลึกลงจากผิวน้ำเส้นผ่านศูนย์กลางจะลดลงตามกำลังฐาน e (exponentially) จนกระทั่งลึกถึงครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นถือว่าอนุภาคน้ำไม่มีการเคลื่อนที่

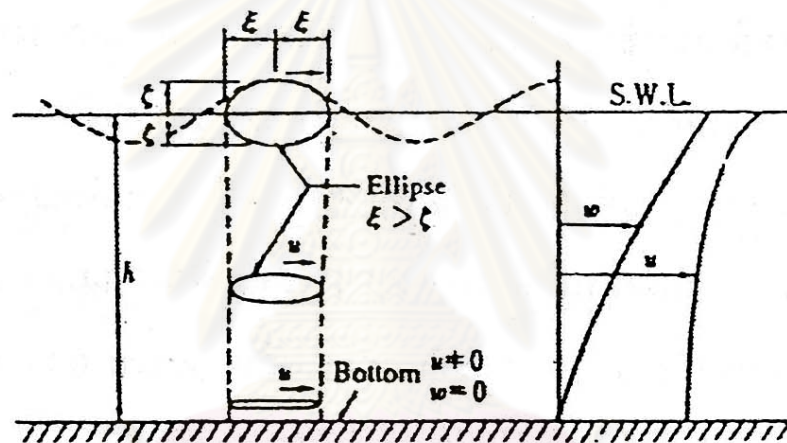
ช่วงสองเมื่อคลื่นเคลื่อนตัวในน้ำลึกปานกลาง ความลึกสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 0.04 – 0.5 ($0.04 < d/L < 0.5$) ความยาวคลื่นจะสั้นลง ทำให้ความสูงคลื่นเพิ่มขึ้น ความเร็วคลื่นลดลง โดยที่คาบคลื่นยังเท่าเดิม ลักษณะวงโคจรของอนุภาคน้ำจะเป็นวงรีรอบแกนหลัก (major axis) ที่ขนานกับท้องน้ำ และแกนรอง (minor axis) ที่ตั้งฉากกับท้องน้ำ เมื่อลึกลงจากผิวน้ำวงโคจรจะราบเรียบขึ้นเรื่อย ๆ กระทั่งคลื่นเคลื่อนตัวถึงช่วงที่สามคือบริเวณน้ำตื้น ($d/L < 0.04$) จะคล้ายกับช่วงที่สอง แต่ได้ท้องน้ำอนุภาคน้ำจะมีความเร็วมากขึ้น ดังรูป 2-2

การคำนวณคุณสมบัติต่าง ๆ ของคลื่นเมื่อเคลื่อนตัวผ่านความลึกที่แตกต่างกันมีหลายทฤษฎีแต่ทฤษฎีที่ใช้กันแพร่หลายในการคำนวณนั้นคือทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย (small amplitude wave theory or linear wave theory) ที่คิดโดย Airy, 1845 (US.CERC, 1984) สามารถอธิบายลักษณะและคุณสมบัติของคลื่นในน้ำลึกได้ดีแต่มีข้อจำกัดเมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณน้ำตื้นและใกล้แตกตัว (อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์, 2544) โดยสูตรการคำนวณคุณสมบัติของคลื่นแสดงดังตาราง 2-1

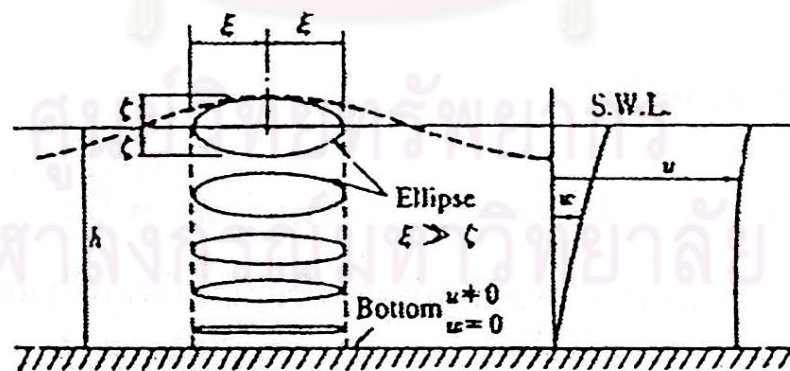
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a) Deepwater waves $\frac{h}{L} > \frac{1}{2}$



(b) Shallow water waves $\frac{1}{25} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2}$



(c) Very shallow water waves $\frac{h}{L} < \frac{1}{25}$

รูปที่ 2-2 คุณสมบัติของคลื่นเมื่อเคลื่อนตัวเข้าสู่ชายฝั่ง (ที่มา : Sawaragi,1995)

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านความลึกต่าง ๆ

คุณสมบัติของคลื่น	คลื่นในน้ำตื้น	คลื่นในน้ำลึกปานกลาง	คลื่นในน้ำลึก
ความเร็วคลื่น	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)}$	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$
ความยาวคลื่น	$L = CT = \sqrt{gd}$	$L = \sqrt{\frac{gLT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)}$	$L = \sqrt{\frac{gLT^2}{2\pi}}$
ความเร็วกลุ่มคลื่น	$C_g = C = \sqrt{gd}$	$C_g = nC = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)}\right) C$	$C_g = \frac{1}{2} C = \sqrt{\frac{gL}{8\pi}}$

นอกจากเรื่องคุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่จากน้ำลึกเข้าสู่บริเวณน้ำตื้นแล้ว สิ่งที่น่าสนใจประการหนึ่งคือ ลักษณะของชายฝั่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของคลื่นเป็นลักษณะที่แตกต่าง ๆ กันได้ 4 ประเภท อีกทั้งยังส่งผลถึงทิศทางการเคลื่อนที่ และพลังงานของคลื่นซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.2

2.2 การเปลี่ยนแปลงของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่เข้าหาฝั่ง

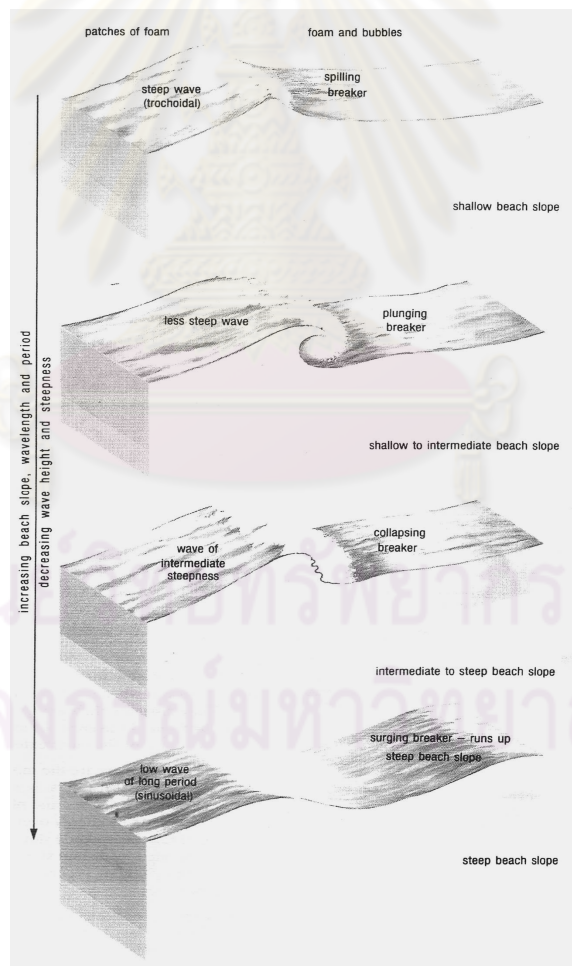
คลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านมวลน้ำที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เช่น ความหนาแน่น (density) หรือ ความลึกน้ำ (water depth) เป็นต้น มักจะส่งผลต่อความเร็วคลื่นและพลังงานของคลื่นจะลดลง กระทั่งคลื่นเคลื่อนตัวสู่ชายฝั่งที่ความลึกของน้ำมีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น คลื่นจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงกระทั่งแตกตัวเมื่อถึงฝั่ง ทั้งนี้การแตกตัวของคลื่นจะขึ้นอยู่กับชนิดของคลื่นและความลาดชันของหาดด้วยโดยแบ่งลักษณะหลัก ๆ ออกเป็น 4 ชนิดคือ

1 Spilling breakers มีลักษณะเป็นฟอง และมีความปั่นป่วนอยู่บนยอดคลื่น สาเหตุเพราะอนุภาคของน้ำบริเวณยอดคลื่นมีความเร็วมากกว่าบริเวณอื่น ๆ ของคลื่น ตัวคลื่นจะมีความชันและค่อนข้างสั้น พลังงานจะกระจายจากยอดคลื่นสู่หน้าคลื่น สามารถพบคลื่นประเภทนี้ในช่วงที่เกิดพายุได้

2 Plunging breakers คลื่นมีลักษณะโค้งโดยยอดคลื่นนูน และหน้าคลื่นเว้า คลื่นชนิดนี้ ยอดคลื่นจะม้วนตัวพุ่งลงมาอย่างรุนแรง การกระจายพลังงานจึงเกิดในระยะทางสั้น ๆ ถ้าพบคลื่นชนิดนี้ในชายหาดที่มีความชันน้อยมากมักจะเกี่ยวข้องกับคลื่นเกิดจากพายุที่มีความยาวคลื่นมาก แต่ในกรณีที่เกิดพายุใกล้กับบริเวณชายหาดมักจะไม่ทำให้เกิดคลื่นชนิดนี้ยกเว้นชายหาดบริเวณนี้มีความชันมาก

3 Collapsing breakers คล้ายกับคลื่นชนิดที่สอง แต่แทนที่ยอดคลื่นม้วนพุ่งลงมา ด้านหน้าคลื่นจะทรุดตัวลงมาแทน คลื่นชนิดนี้จะเกิดกับชายหาดที่มีความชันปานกลางและลมพัดแรงปานกลาง

4 Surging breakers คลื่นชนิดนี้จะพบในบริเวณชายหาดที่มีความชันมาก ๆ พัฒนามาจากคลื่นที่มีความยาวคลื่นมากและความสูงคลื่นต่ำ คลื่นจะคงสภาพเหมือนเดิมทุกประการเมื่อซัดเข้าสู่ฝั่ง



รูปที่ 2-3 คลื่น 4 ประเภท ตามความสัมพันธ์ของความลาดชันของชายฝั่ง คาบ และความยาวคลื่น (ที่มา : Brown et al., 1989)

จากการแตกตัวของคลื่นตามลักษณะความลาดชันของหาดเกิดขึ้นจากการถ่ายเทพลังงานของคลื่นสู่ชายฝั่ง ดังนั้นความรุนแรงที่จะสร้างความเสียหายให้กับชายฝั่ง และสิ่งก่อสร้างบริเวณใกล้เคียงจึงขึ้นอยู่กับว่าพลังงานของแต่ละลูกคลื่นที่เข้ามา มีพลังงานมากเพียงใด นอกจากนี้ ยังมีปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากคลื่นเปลี่ยนคุณสมบัติคือ การหักเหของคลื่น (wave refraction) การเลี้ยวเบนของคลื่น (wave diffraction) การสะท้อนของคลื่น (wave reflection) และการแตกตัวของคลื่น (wave breaking) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้มีหัวข้อที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 หลักการคือ หลักการเรื่องพลังงานของคลื่นซึ่งใช้เป็นแนวทางในการคำนวณเพื่อหาอัตราการสลายพลังงานคลื่นที่นำไปสู่การหาประสิทธิภาพของเขื่อน และหลักการในการหักเหของคลื่นซึ่งใช้เป็นแนวทางในการตัวกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับมุมของคลื่นที่เข้าสู่แนวเขื่อนดังนี้

2.2.1 พลังงานของคลื่น (Wave Energy)

เมื่อคลื่นเคลื่อนตัวออกจากแหล่งกำเนิด และไม่อยู่ภายใต้อิทธิพลของลมแล้ว (swell wave) ลักษณะของคลื่นจะเป็นระเบียบ และคาบคลื่นค่อนข้างสม่ำเสมอโดยการเคลื่อนที่ของคลื่นในน้ำลึกคลื่นแทบจะไม่สูญเสียพลังงานเลย ประการหนึ่ง จากการที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดแนวตั้งที่ขนานกับสันคลื่น (wave crest) ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น โดยปริมาณการไหลผ่านของพลังงานคลื่นต่อความกว้างของสันคลื่นหนึ่งหน่วยสามารถใช้คำนิยามลักษณะนี้ว่า กำลังของคลื่น (wave power, P) เขียนเป็นดังสมการที่ 2-1

$$P = E \cdot C_g = EnC \quad (2-1)$$

เมื่อ C_g คือ ความเร็วกลุ่มคลื่น (wave group velocity)

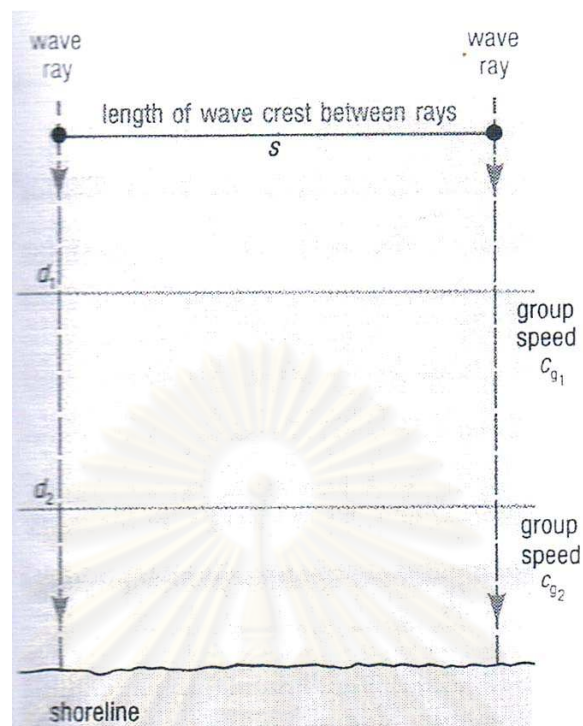
C คือ ความเร็วคลื่น (wave velocity)

$$n \text{ คือ } \frac{C_g}{C} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$$

k คือ จำนวนคลื่น (wave number) มีค่าเท่ากับ $\frac{2\pi}{L}$

E คือ พลังงานคลื่น (wave energy) มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{8} \rho g H^2$

เมื่อคลื่นเคลื่อนตัวจากน้ำลึกที่จุด d_1 ไปยังน้ำตื้นที่จุด d_2 ไม่มีการแตกตัวเนื่องจากแรงเสียดทานในกรณีที่น่ามีความลึกน้อยกว่า 1 ใน 20 ของความยาวคลื่น และความเร็วคลื่น C_1 ที่จุด d_1 มากกว่าความเร็วคลื่น C_2 ที่จุด d_2 โดยมีสมมติฐานว่าคลื่นไม่มีการสูญเสียพลังงานดังรูป 2-4



รูปที่ 2-4 การเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่นเมื่อเคลื่อนตัวจากน้ำลึกที่จุด d_1 ไปยังน้ำตื้นที่จุด d_2
(ที่มา : Brown *et al.*, 1989)

$$P_1 = P_2$$

$$E_1 \cdot C_1 = E_2 \cdot C_2 \quad (2-2)$$

$$\frac{1}{8} \rho g H_1^2 C_1 = \frac{1}{8} \rho g H_2^2 C_2$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} = K_s \quad (2-3)$$

$$K_s = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)}}} \quad (2-4)$$

เมื่อ K_s คือ สัมประสิทธิ์ความลึกท้องน้ำ (shoaling coefficient)

2.2.2 การหักเหของคลื่น (Wave Refraction)

เมื่อคลื่นเคลื่อนตัวเข้าสู่เขตน้ำตื้นในทิศที่ทำมุมกับชายฝั่งจะเปลี่ยนแปลงความเร็วของคลื่นโดยความเร็วคลื่นจะแปรผันตามความลึกของท้องน้ำดังสมการที่ 2-5

$$C = \sqrt{gd} \quad (2-5)$$

เมื่อ C คือ ความเร็วคลื่น

g คือ ความเร่งของโลก

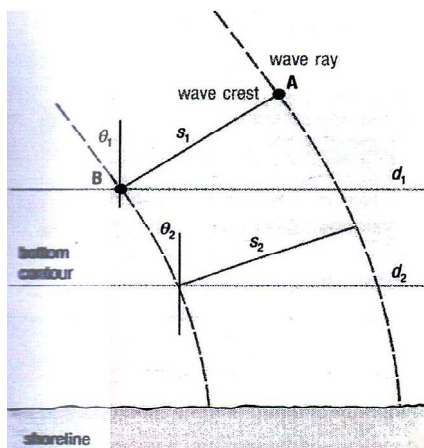
d คือ ความลึกท้องน้ำ

กล่าวคือ คลื่นที่มาถึงบริเวณน้ำตื้นก่อนที่จุด B ดังรูปที่ 2-5 ในขณะที่บริเวณจุด A คลื่นมีความเร็วมากกว่าจุด B ดังนั้นหน้าคลื่นจึงมีลักษณะหักเหเข้าสู่ชายฝั่ง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการหักเหของคลื่น (wave refraction)

การหักเหของคลื่นน้ำมีลักษณะคล้ายกับการหักเหของแสงเกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่ต่างกัน ซึ่งสามารถอธิบายด้วยกฎของสเนลล์ (Snell ' s law) เมื่อเขียนให้รังสีคลื่นตั้งฉากกับเส้นระดับความลึก d_1 ดังรูป ความสัมพันธ์ระหว่างมุม θ_1 และ θ_2 กับความเร็วคลื่นโดยใช้กฎของสเนลล์จะได้

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\sqrt{gd_1}}{\sqrt{gd_2}} = \frac{\sqrt{d_1}}{\sqrt{d_2}} \quad (2-6)$$

เมื่อ C_1 และ C_2 สัมพันธ์กับความลึกของน้ำที่ d_1 และ d_2 ตามลำดับ



รูปที่ 2-5 การหักเหของคลื่น
(ที่มา : Brown *et al.*, 1989)

จากหัวข้อเรื่องกลศาสตร์ และการเปลี่ยนแปลงของคลื่นเมื่อเข้าสู่ชายฝั่งทำให้สามารถเข้าใจคุณสมบัติของคลื่นและนำไปเป็นแนวทางในการออกแบบวางแผนการทดสอบ แต่การออกแบบการทดสอบจำเป็นต้องอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์มาเป็นตัวกำหนดรูปแบบของตารางการทดสอบเพื่อลดจำนวนครั้งของการทดสอบลง และได้คำตอบที่แม่นยำมากขึ้นดังแสดงในหัวข้อที่ 2.3 ที่กล่าวถึงรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการประยุกต์ใช้งาน

2.2.3 การแทรกสอดของคลื่น (Wave Interference)

เมื่อคลื่นสองขบวนเคลื่อนที่ซ้อนทับกันย่อมเกิดการเสริมกันและหักล้างกัน โดยจะเห็นได้ชัดถ้าคลื่นสองขบวนมีความถี่และเฟสเท่ากันจะปรากฏเป็นแนวมืดกับแนวสว่างสลับกันซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การแทรกสอดของคลื่น (Interference) ในการแทรกสอดของคลื่นส่วนที่เสริมกันแล้วทำให้สันคลื่นสูงมากกว่าเดิมหรือท้องคลื่นลึกลงมากกว่าเดิมจะเรียกบริเวณนั้นว่า ปฏิบัพ (Antinode) ในทางตรงกันข้ามหากบริเวณใดมีที่น้ำมีการกระเพื่อมหรือกระเพื่อมน้อยที่สุดจะเรียกบริเวณนั้นว่า บัพ (node) ซึ่งสามารถสรุปสมการการแทรกสอดของคลื่นที่ปล่อยจากแหล่งกำเนิดคลื่นดังนี้

1. ถ้าคลื่นที่ออกจากแหล่งกำเนิดทั้งสองมีเฟสตรงกัน

$$\text{แนวปฏิบัพ } d \sin \theta = n\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 0, 1, 2, \dots$$

$$\text{แนวบัพ } d \sin \theta = (n - \frac{1}{2})\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, \dots$$

2. ถ้าคลื่นที่ออกจากแหล่งกำเนิดทั้งสองมีเฟสตรงข้ามกัน

$$\text{แนวปฏิบัพ } d \sin \theta = (n - \frac{1}{2})\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\text{แนวบัพ } d \sin \theta = n\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 0, 1, 2, \dots$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างของจุดกำเนิด

2.2.4 การเลี้ยวเบนของคลื่น (Wave Diffraction)

เมื่อมีสิ่งกีดขวางกั้นทิศทางกันเคลื่อนที่ของคลื่น คลื่นจะเกิดการสะท้อน แต่ถ้าสิ่งกีดขวางกั้นคลื่นได้เพียงบางส่วน พบว่าจะมีคลื่นบางส่วนแผ่ออกจากขอบไปทางด้านหลังของสิ่งกีดขวางนั้นโดยคลื่นบางส่วนมีทิศทางการเคลื่อนที่แตกต่างไปจากทิศเดิมเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเลี้ยวเบนของคลื่น ลักษณะของคลื่นที่เลี้ยวเบนไปนั้นจะค่าความสูงคลื่นน้อยกว่าคลื่นที่เคลื่อนไปในทิศทางเดิมซึ่งบ่งบอกได้ว่าพลังงานของคลื่นที่เลี้ยวเบนไปนั้นจะมีค่าลดลง

การเลี้ยวเบนของคลื่นใช้หลักการของฮอยเกนส์ซึ่งกล่าวว่า แต่ละจุดบนหน้าคลื่นสามารถถือได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นใหม่ที่ให้กำเนิดคลื่น ซึ่งเคลื่อนที่ออกไปทุกทิศทางด้วยอัตราเร็วของคลื่นเดิมนั้น (http://en.wikipedia.org/wiki/Huygens%E2%80%93Fresnel_principle) โดยหลักการของฮอยเกนส์สามารถพิสูจน์ด้วยการเลี้ยวเบนของคลื่นเมื่อผ่าน สลิตเดี่ยว และสลิตคู่สรุปได้ดังนี้

1. สมการการแทรกสอดหลังจากคลื่นผ่านสลิตเดี่ยว

$$\text{แนวปฏิบัติ } d \sin \theta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\text{แนวปฏิบัติ } d \sin \theta = n\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, \dots$$

ถ้าช่องของสลิตเดี่ยวมีความกว้างน้อยกว่าหรือเท่ากับความยาวคลื่น ($d \leq \lambda$) จะไม่ปรากฏแนวปฏิบัติของการแทรกสอดให้เห็น

ถ้าช่องของสลิตเดี่ยวมีความกว้างมากกว่าความยาวคลื่น ($d > \lambda$) จะปรากฏแนวปฏิบัติของการแทรกสอดให้เห็น

2. สมการการแทรกสอดหลังจากคลื่นผ่านสลิตคู่

- 2.1 ถ้าสลิตคู่ให้คลื่นออกมาเฟสตรงกัน

$$\text{แนวปฏิบัติ } d \sin \theta = n\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 0, 1, 2, \dots$$

$$\text{แนวปฏิบัติ } d \sin \theta = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, \dots$$

- 2.2 ถ้าสลิตคู่ให้คลื่นออกมาเฟสตรงข้ามกัน

$$\text{แนวปฏิบัติ } d \sin \theta = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\text{แนวปฏิบัติ } d \sin \theta = n\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 0, 1, 2, \dots$$

ถ้าช่องของสลิตคู่มีความกว้างน้อยกว่าหรือเท่ากับความยาวคลื่น ($d \leq \lambda$) จะไม่ปรากฏแนวปฏิบัติของการแทรกสอดให้เห็น

ถ้าช่องของสลิตคู่มีความกว้างมากกว่าความยาวคลื่น ($d > \lambda$) จะปรากฏแนวบัพของการแทรกสอดให้เห็น

2.3 รูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (หน่วยศึกษาปฏิบัติการและข้อสนเทศเชิงพื้นที่, 2552)

เนื่องจากพลังงานคลื่นแปรผันตามกำลังสองของความสูงคลื่น ($E \propto H^2$) การคำนวณพลังงานคลื่นที่สลายไปจึงอาจจะไม่สามารถแทนได้ด้วยสมการเชิงเส้น (Linear Equation) นอกจากนี้ข้อมูลทางสมุทรศาสตร์ พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสลายพลังงานคลื่นยังขึ้นกับรูปแบบหน้าตัด และการจัดเรียงตัวของระบบเสาเข็มอีกด้วย (หน่วยศึกษาปฏิบัติการและข้อสนเทศเชิงพื้นที่, 2552) ดังนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงใช้การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่า (Unknown Coefficients) ของสมการไม่เชิงเส้น (Nonlinear Equation) และหาค่าฟังก์ชันซึ่งได้จากการทดลอง

การประมาณค่าฟังก์ชัน (Approximate Functions) ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ตัวสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าของสมการไม่เชิงเส้นที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ ฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial Functions) เนื่องจากฟังก์ชันพหุนามมีอนุกรมกำลังแบบอนันต์ซึ่งสามารถหาฟังก์ชันใด ๆ มาแทนได้ดีในช่วงแคบที่ทราบค่าฟังก์ชัน โดยการประมาณค่าฟังก์ชันแบ่งออกเป็นสองรูปแบบ คือ การวิเคราะห์ถดถอย (Regression Analysis) และการประมาณค่าภายในช่วง (Interpolation) ซึ่งทั้งสองรูปแบบการหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าในสมการจำเป็นต้องทราบจุดข้อมูลจำนวนอย่างน้อยมากกว่าหรือเท่ากับจำนวนสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่า ซึ่งข้อแตกต่างระหว่างสองวิธีนี้คือพหุนามประมาณค่าภายในช่วง (Interpolating Polynomial) จะต้องการจุดข้อมูลน้อยกว่า พหุนามรูปแบบที่ใช้การวิเคราะห์ถดถอย

การหาประสิทธิภาพการสลายพลังงานของเขื่อนสลายกำลังคลื่นนั้น การทดลอง 1 ครั้งจะได้จุดข้อมูลเพียงจุดเดียวซึ่งทำให้เสียเวลา และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายจำนวนมาก ดังนั้นจึงต้องมีการวางแผนการทดลองโดยการออกแบบการทดลองให้ต้องการจุดข้อมูลน้อยที่สุด ด้วยการสร้างพหุนามประมาณค่าภายในช่วงกรณีหลายตัวแปร เพื่อให้เหมาะสมกับระยะเวลาและงบประมาณที่ใช้ในการทดลองที่มีจำกัด และพหุนามที่นำมาใช้ก็คือ พหุนามประมาณค่าภายในช่วงอันดับที่สองสำหรับหลายตัวแปรแบบปรับตัวได้ (Adaptive 2nd-Order Interpolating Polynomial for n Variables) เนื่องจากสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าจำนวนต่ำสุดแปรผันโดยตรงกับจำนวนตัวแปรอิสระเท่านั้น ส่วนสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าอื่น ๆ สามารถหาได้โดยอิสระไม่ขึ้นแก่กัน และในขั้นตอนของการคำนวณพบว่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าตัวบางตัวนั้นไม่ค่อยจะมีผลต่อคำตอบจึงสามารถตัดออกได้

2.3.1 การกระจายฟังก์ชันในรูปอนุกรมกำลังสำหรับตัวแปรอิสระ 1 ตัว

โดยทั่วไปสามารถเขียนฟังก์ชัน $g(X)$ ได้ ๆ ด้วยอนุกรมกำลังแบบอนันต์ (Infinite Power Series) ของตัวแปรอิสระ X ดังนี้

$$g(X) = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2 + a_3 \cdot X^3 + \dots \quad (2-7)$$

ในทางปฏิบัติอาจประมาณ $g(X)$ ด้วยพหุนามประมาณค่าภายในช่วง (Interpolating Polynomial) โดยใช้พหุนามอันดับที่ m (m^{th} Order Polynomial) ดังสมการที่ 2-8

$$g(X) \approx P(X) = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2 + a_3 \cdot X^3 + \dots + a_m \cdot X^m \quad (2-8)$$

จะพบว่าจำนวนสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าจะมีค่าเท่ากับ $m+1$ ตัว และต้องใช้ฟังก์ชัน $m+1$ ฟังก์ชันเพื่อหาค่า เช่น การประมาณค่าพหุนามในช่วงอันดับที่ 2 จะมีตัวสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าจำนวน 3 ตัว และค่าฟังก์ชันที่จำเป็นต้องทราบต้องมีจำนวน 3 ค่า จึงจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้ได้

2.3.2 การกระจายฟังก์ชันในรูปอนุกรมกำลังสำหรับตัวแปรอิสระ n ตัว

การแทนฟังก์ชันสำหรับตัวแปรอิสระ n ตัวแบบ สูตรแบบผลคูณ (Product Formula) กับ สูตรแบบไม่ใช่ผลคูณ (Non-Product Formula)

2.3.2.1 สูตรแบบผลคูณ (Product Formula) หากฟังก์ชันประกอบด้วยตัวแปรอิสระ n ตัว เมื่อ X เป็นตัวแปรอิสระจำนวน n ตัว ของ X_1, X_2, \dots, X_n ฟังก์ชันอาจสามารถแทนในรูปของผลคูณดังสมการที่ 2-9

$$g(\underline{X}) \approx P(\underline{X}) = P_1(X_1) \cdot P_2(X_2) \cdots P_n(X_n) \quad (2-9)$$

เมื่อ $P_i(X_i)$ สามารถแทนด้วยพหุนามอันดับที่ m ค่าฟังก์ชันที่หาได้จะมีจำนวน $(m+1)^n$ ค่า เห็นได้ว่าค่าฟังก์ชันในรูปของผลคูณของพหุนามนั้นจำนวนสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่ามีค่า

เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในรูปของยกกำลังของจำนวนตัวแปรอิสระ ซึ่งทำให้ในการปฏิบัติการจริง เป็นไปได้ยาก

2.3.2.2 สูตรแบบไม่ใช่ผลคูณ (Non-Product Formula) สำหรับฟังก์ชันที่ขึ้นกับตัวแปรอิสระจำนวน n ตัวแปรใด ๆ อาจแทนด้วยอนุกรมอนันต์ของยกกำลัง (Infinite Power Series for n Variables) ดังสมการที่ 2-10

$$g(\underline{X}) = a_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n d_{ijk} X_i X_j X_k + \dots \quad (2-10)$$

เมื่อ a_0 , b_i , c_{ij} และ d_{ijk} เป็นสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าสำหรับการแทน ด้วยพหุนามประมาณค่าภายในช่วงอันดับที่ m จำนวนสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าจะอยู่ในรูปอนุกรมเรขาคณิตเท่ากับ $1 + n + n^2 + n^3 + \dots + n^m$ ค่า และค่าสัมประสิทธิ์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามจำนวนตัวแปรอิสระ และอันดับพหุนาม

2.3.2.3 พหุนามอันดับสอง

จากสมการที่ 2-7 สามารถประมาณด้วยพหุนามอันดับที่ 2 สำหรับตัวแปรอิสระ n ตัวในรูป $Q(\underline{X})$ (Second-Order Polynomial for n Variables) ในสมการที่ 2-11

$$g(\underline{X}) \approx Q(\underline{X}) = a_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} X_i X_j \quad (2-11)$$

สัมประสิทธิ์ไม่ทราบค่าในสมการ 2-11 มีจำนวนทั้งสิ้น $1 + n + n^2$ ตัว

2.3.2.4 พหุนามอันดับสองสำหรับตัวแปรแบบลดรูป

จากพหุนามอันดับที่ 2 ในสมการ 2-11 ตัวแปรอาจจะเปลี่ยน \underline{X} ให้อยู่ในรูปของตัวแปรลดรูป (Reduced Variables) \underline{Y} คือ

$$g(\underline{Y}) \approx Q(\underline{Y}) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i Y_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} Y_i Y_j \quad (2-12)$$

เมื่อ α_0 , β_i และ γ_{ii} เป็นสัมประสิทธิ์ของพหุนามอันดับที่สองจำนวนทั้งสิ้น $1 + n + n^2$ ตัว ซึ่งสมการนี้ยังสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน(Ouypomprasert,2002) คือ

$$Q(\underline{Y}) = Q_1(\underline{Y}) + Q_2(\underline{Y}) \quad (2-13)$$

$$Q_1(\underline{Y}) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i Y_i + \sum_{i=1}^n \gamma_{ii} Y_i^2 \quad (2-14)$$

$$Q_2(\underline{Y}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \gamma_{ij} Y_i Y_j \quad (2-15)$$

ในสมการที่ 2-14 $Q_1(\underline{Y})$ บนแกน Y_i แต่ละแกนเป็นอิสระจากกัน และสามารถหาได้แบบไม่คำนึงถึงลำดับก่อนหลัง เนื่องจากเมื่อให้ $Q_1(\underline{Y})$ กำหนดเป็นจุดกำเนิด (Origin) พหุนามอันดับที่สองบนแกนนั้น โดยที่ $Y_j; j \neq i$ จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าสำหรับ $Q_1(\underline{Y})$ จะมีจำนวนเท่ากับ $2n+1$ ค่า

ถ้าหาก $g(\underline{X})$ สามารถหาอนุพันธ์ได้ถึงอันดับที่สอง (Differentiable to Second Order) จะส่งผลให้อนุพันธ์อันดับที่สองแบบผสม $\frac{\partial^2 g}{\partial X_i \partial X_j} = \frac{\partial^2 g}{\partial X_j \partial X_i}$ และเนื่องจากสัมประสิทธิ์ γ_{ij} สำหรับพจน์ผสม จะเกี่ยวข้องกับอนุพันธ์อันดับที่สองแบบผสม ดังนั้น $Q_2(\underline{Y})$ ดังสมการที่ 2-15 จึงสามารถลดรูปเป็น

$$Q_2(\underline{Y}) = 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \gamma_{ij} Y_i Y_j \quad (2-16)$$

ทำให้สัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่า γ_{ij} สำหรับ $Q_2(\underline{Y})$ จะมีจำนวนเท่ากับ $\binom{n}{2} = \frac{n \cdot (n-1)}{2}$ ค่า ภายหลังจากทราบ $Q_1(\underline{Y})$ การหาค่า γ_{ij} สามารถหาได้โดยอิสระแยกจากกัน และไม่ต้องคำนึงถึงลำดับอีกด้วย โดยพิจารณาจากสมการที่ 2-17

$$\gamma_{ij} = \frac{g(\underline{y}) - Q_1(\underline{y})}{2y_i y_j} \quad (2-17)$$

ด้วยเหตุนี้ จำนวนสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบสำหรับ $Q(Y)$ ต่ำสุดจะเท่า $2n+1$ ตัว และมีจำนวนสูงสุดเท่ากับ $2n+1+\frac{n(n-1)}{2}$ ตัว หรือเท่ากับ $\frac{(n+2)(n+1)}{2}$ ตัว จำนวนสัมประสิทธิ์ต่ำสุดสำหรับพจน์ผสม และจำนวนสูงสุดสำหรับตัวแปรอิสระจำนวนต่าง ๆ กันดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 จำนวนสัมประสิทธิ์พหุนามอันดับที่สองสำหรับตัวแปรอิสระ n ตัว

จำนวนตัวแปรอิสระ	$Q_1(Y)$	$Q_2(Y)$	$Q_1(Y) + Q_2(Y)$
n	$2n+1$	$n(n-1)/2$	$(n+2)(n+1)/2$
2	5	1	6
3	7	3	10
4	9	6	15
5	11	10	21
6	13	15	28
7	15	21	36

2.3.3 การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การทดสอบ

จากหัวข้อเรื่องพหุนามอันดับสองสำหรับตัวแปรแบบลดรูป เมื่อนำหลักการทางคณิตศาสตร์ของสมการที่ 2-14, 2-15 และ 2-16 มาประยุกต์เข้ากับการทดสอบสามารถช่วยลดจำนวนของการทดสอบลดลงอย่างมากซึ่งมีวิธีการดังนี้

1. เมื่อทราบถึงจำนวนตัวแปรของการทดสอบ การใช้สมการพหุนามอันดับสองเพื่อหาคำตอบสำหรับค่าของตัวแปรในสมการมีความเหมาะสมกว่าวิธีอื่น ๆ แต่การหาค่าของตัวแปรต่าง ๆ จากสมการก็จะต้องรู้ค่าของสัมประสิทธิ์ซึ่งมีจำนวนเท่ากับจำนวนตัวแปรนั้น ๆ ดังนั้นเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรจึงนำจำนวนค่าของตัวแปรเหล่านั้นมาคำนวณตามตารางที่ 2-2 ทำให้ทราบถึงจำนวนครั้งการทดสอบ
2. ในการทดสอบจะหาคำตอบของสมการพหุนาม(ที่ไม่มีพจน์ผสม) เริ่มจากการหาจุดร่วมกันซึ่งจะเป็นค่ากลางของทุก ๆ ตัวแปร จากนั้นนำแต่ละตัวแปรมาจับเป็นคู่แล้วหาค่าที่จุดสูงสุดและจุดต่ำสุดเพื่อใช้เป็นขอบเขตสำหรับแต่ละตัวแปรของคู่นั้น ๆ ซึ่ง

ณ ตอนนั้นเมื่อเขียนกราฟจะพบว่ามีส่วนโค้ง(บรรยายด้วยสมการพหุนามอันดับสอง) ตัดกันที่จุดตรงกลางของกราฟซึ่งเป็นจุดที่ทุกตัวแปรที่มีค่าเท่ากัน

3. สำหรับการหาค่าของพจน์ผสมสามารถหาได้โดยจากการเขียนกราฟดังข้อที่ 2 แล้วดูแนวโน้มของกราฟที่มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดว่าจะตกอยู่ตรงช่วงใดของกราฟ (ทางด้านบวกหรือด้านลบ)สำหรับค่าของแต่ละตัวแปร ดังนั้นเมื่อมองภาพรวมของกราฟพจน์ผสมจะต้องอยู่ด้านใดของแกน X แกน Y เช่น ด้านบวก-บวก , ลบ-บวก , ลบ-ลบ , บวก-ลบ เป็นต้น

เมื่อใช้หลักการทางคณิตศาสตร์เป็นตัวกำหนดแนวทางการทำงาน หรือออกแบบผังการทดสอบแล้วสิ่งที่มีความสำคัญอีกประการหนึ่งในการทดสอบครั้งนี้คือการสร้างแบบจำลองย่อยส่วนให้มีความคล้ายคลึงกับต้นแบบมากที่สุดดังนั้นจึงต้องอาศัยหลักการที่ใช้ในการจำลองแบบย่อยส่วนดังหัวข้อที่ 2.4

2.4 หลักการที่ใช้ในการจำลองแบบย่อยส่วน

ปัญหาในหลาย ๆ ด้านในเรื่องของกลศาสตร์ของไหล (fluid mechanics) สามารถหาคำตอบได้โดยการใช้แบบจำลองทางทฤษฎี (theoretical models) หรือใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (numerical models) แต่บางครั้งหลาย ๆ ปัญหาต้องใช้ประสบการณ์ในการหาคำตอบจากข้อมูลการทดลอง ดังนั้นในการทดลองทางด้านวิศวกรรมชายฝั่งต้องการความรู้และเทคนิคในด้านการสร้างแบบจำลอง ประการแรกเพื่อหาคำอธิบาย และการนำไปใช้สำหรับผู้ศึกษาหรือสนใจที่จะศึกษา ประการที่สองวางแผน และปฏิบัติการดำเนินงานการทดลองในห้องทดลอง (Hughes, 1993)

การสร้างแบบจำลองคล้ายคลึง (similitude) ที่ดีลักษณะทางกายภาพควรมีสภาพเหมือนต้นแบบให้มากที่สุด และในห้องทดลองคุณสมบัติของของไหล เช่น ความเร็วของกระแส น้ำ ความแรงของกระแส น้ำ มวลน้ำ รวมถึงแรงกระทำกับแบบจำลอง ควรมีความคล้ายคลึงกับสภาพสิ่งแวดล้อมต้นแบบด้วย กล่าวคือในการทดลองจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยหลักทั้งหมดที่มีผลต่อปฏิกริยากับแบบจำลอง โดยที่สามารถตัดปัจจัยที่มีผลน้อยในกระบวนการทดลองออกไปได้

2.4.1 หลักการสร้างแบบจำลอง

ในการสร้างแบบจำลองต้องอยู่บนพื้นฐานเรื่องพลศาสตร์ (dynamical considerations) การวิเคราะห์มิติ (dimensional analysis) และสมการอนุพันธ์ (differential equations) ซึ่งทั้งสามข้อขึ้นอยู่กับ 2 หลักการ คือ เกณฑ์การสร้างแบบจำลองคล้ายคลึง (criteria of similitude)

หรือ เงื่อนไขของความคล้ายคลึง (condition of similarity) (Hughes, 1993) ซึ่งความแตกต่างของทั้งสองเงื่อนไขมีนัยยะสำคัญคือ

เกณฑ์การสร้างแบบจำลองคล้ายคลึง (criteria of similitude) ถูกกำหนดโดยความสัมพันธ์ทางกายภาพระหว่างตัวแปรแต่ละตัวแปร โดยใช้เงื่อนไขทางคณิตศาสตร์หาสัดส่วนระหว่างต้นแบบและแบบจำลองย่อยส่วนโดยใช้กฎของสัดส่วน (scale laws)

เงื่อนไขของความคล้ายคลึง (condition of similarity) ในทางกลับกันคือเป็นสภาวะหนึ่งที่นักทดลองเลือกออกแบบจำลองทางกายภาพเพื่อให้ผลเป็นที่น่าพอใจ สภาวะเหล่านี้อาจนำไปพิจารณารวมกับเงื่อนไขของเกณฑ์การสร้างแบบจำลองคล้ายคลึง (criteria of similitude) ที่ใช้การตัดสินใจด้วยการสังเกตหรือการรู้โดยใช้สัญชาตญาณ

2.4.2 สิ่งที่สำคัญในการสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองคล้ายคลึงจะแตกต่างกันไปตามปัญหาหรือหัวข้อที่กำลังศึกษา และความถูกต้องแม่นยำของการสร้างแบบจำลอง มักทำได้โดยการสร้างแบบจำลองออกมาให้มากพอแล้วค่อยคัดเลือกแบบที่มีความคล้ายคลึงกับต้นแบบมากที่สุดเพื่อนำมาใช้ทดลอง สิ่งสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้แบบจำลองมีความสมบูรณ์ที่สุด คือ การที่ค่าตัวแปรต่าง ๆ ในแบบจำลองต้องมีเหมือนกับต้นแบบ ซึ่งความคล้ายคลึงที่กล่าวมาทั้งหมดนี้แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ความคล้ายคลึงทางเรขาคณิต (geometrically similar) ความคล้ายคลึงทางจลศาสตร์ของแบบจำลอง (kinematically similar models) ความคล้ายคลึงทางแรงที่กระทำกับแบบจำลอง (dynamically similar models) (Hughes, 1993)

ความสัมพันธ์ระหว่างต้นแบบกับแบบจำลองสามารถเขียนให้อยู่ในรูปมาตราส่วน คือ

$$N_x = \frac{X_p}{X_m} \quad (2-18)$$

เมื่อ X_p คือ ปริมาณของ X ในต้นแบบ

X_m คือ ปริมาณของ X ในแบบจำลอง

ความคล้ายคลึงทางเรขาคณิต (geometrically similar) คือ มาตราส่วนของแบบจำลองของขนาดในแนวตั้งและแนวนอนเท่ากับต้นแบบในขนาดที่ย่อยส่วน

ความคล้ายคลึงทางจลศาสตร์ของแบบจำลอง (kinematically similar models) คือ มาตรฐานระหว่างเวกเตอร์แสดงการเคลื่อนที่ทั้งหมดของต้นแบบและแบบจำลองมีลักษณะเหมือนกัน

ความคล้ายคลึงทางแรงที่กระทำกับแบบจำลอง (dynamically similar models) คือ มาตรฐานระหว่างเวกเตอร์ของแรงที่กระทำทั้งหมดของต้นแบบและแบบจำลองเท่ากันซึ่งความหมายคือ มวลและแรงที่กระทำต่อระบบเท่ากัน โดยใช้กฎข้อที่ 2 นิวตันที่แสดงถึงผลรวมของเวกเตอร์แรงที่กระทำบนวัตถุเท่ากับปฏิกิริยาของมวลที่ถูกกระทำจากแรงนั้น ดังสมการที่

$$m \frac{dV}{dt} = \sum_n F_n \quad (2-19)$$

ซึ่งในของไหลจะประกอบด้วยผลรวมของแรงต่าง ๆ คือ

$$\hat{F}_i = \hat{F}_g + \hat{F}_\mu + \hat{F}_\sigma + \hat{F}_e + \hat{F}_{pr} \quad (2-20)$$

เมื่อ \hat{F}_i = แรงเฉื่อย (inertial force)

\hat{F}_g = แรงโน้มถ่วง (gravitational force)

\hat{F}_μ = แรงหนืดจากของเหลว (viscous force)

\hat{F}_σ = แรงตึงผิว (surface tension force)

\hat{F}_e = แรงกดแบบยืดหยุ่น (elastic compression force)

\hat{F}_{pr} = แรงดัน (pressure force)

เขียนเป็นอัตราส่วนระหว่างผลรวมของแรงที่กระทำบนต้นแบบกับผลรวมของแรงที่กระทำบนแบบจำลอง

$$\frac{(\hat{F}_i)_p}{(\hat{F}_i)_m} = \frac{(\hat{F}_g + \hat{F}_\mu + \hat{F}_\sigma + \hat{F}_e + \hat{F}_{pr})_p}{(\hat{F}_g + \hat{F}_\mu + \hat{F}_\sigma + \hat{F}_e + \hat{F}_{pr})_m} \quad (2-21)$$

การย่อส่วนแบบจำลองเสมือนที่สมบูรณ์แบบนอกจากจะสอดคล้องตามสมการที่ 2-21 แล้วจะต้องสอดคล้องกับอัตราส่วนของแต่ละแรงตามสมการที่ 2-22 ด้วย

$$\frac{(\hat{F}_i)_p}{(\hat{F}_i)_m} = \frac{(\hat{F}_g)_p}{(\hat{F}_g)_m} = \frac{(\hat{F}_\mu)_p}{(\hat{F}_\mu)_m} = \frac{(\hat{F}_\sigma)_p}{(\hat{F}_\sigma)_m} = \frac{(\hat{F}_e)_p}{(\hat{F}_e)_m} = \frac{(\hat{F}_{pr})_p}{(\hat{F}_{pr})_m} \quad (2-22)$$

หรือเขียนในอัตราส่วนตามสมการที่ 2-18

$$N_{\hat{F}_i} = N_{\hat{F}_g} = N_{\hat{F}_\mu} = N_{\hat{F}_\sigma} = N_{\hat{F}_e} = N_{\hat{F}_{pr}} \quad (2-23)$$

จากความสัมพันธ์ของแรงที่มากกระทำดังที่แสดงมานั้นสามารถเขียนให้อยู่ในอัตราส่วนระหว่างแรงเดียวกับแรงต่าง ๆ โดยขึ้นอยู่กับว่าแรงใดที่โดดเด่น หรือมีอิทธิพลต่อผลการทดลองก็จะนำแรงนั้นมาคำนวณเป็นอัตราส่วนความคล้ายคลึงดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 อัตราส่วนความคล้ายคลึงชนิดต่าง ๆ แยกตามอัตราส่วนระหว่างแรงแต่ละชนิด

อัตราส่วนความคล้ายคลึง	อัตราส่วนระหว่างแรง	อัตราส่วนของค่าต่าง ๆ
Froude Criterion	$\frac{\text{inertial force}}{\text{gravity force}}$	$\frac{\rho L^2 V^2}{\rho L^3 g} = \frac{V}{\sqrt{gL}}$
Reynolds Criterion	$\frac{\text{inertial force}}{\text{viscous force}}$	$\frac{\rho L^2 V^2}{\mu VL} = \frac{\rho LV}{\mu}$
Weber Criterion	$\frac{\text{inertial force}}{\text{surface tension force}}$	$\frac{\rho L^2 V^2}{\sigma L} = \frac{\rho LV^2}{\sigma}$
Cauchy Criterion	$\frac{\text{inertial force}}{\text{elastic force}}$	$\frac{\rho L^2 V^2}{EL^2} = \frac{\rho V^2}{E}$

ตารางที่ 2-3 อัตราส่วนความคล้ายคลึงชนิดต่าง ๆ แยกตามอัตราส่วนระหว่างแรงแต่ละชนิด(ต่อ)

Euler Criterion	$\frac{\text{pressure force}}{\text{inertial force}}$	$\frac{\rho L^2}{\rho L^2 V^2} = \frac{p}{\rho V^2}$
Strouhal Number	$\frac{\text{temporal inertial force}}{\text{convective inertial force}}$	$\frac{(pL^3)(V/t)}{(pL^3)(V^2/L)} = \frac{L}{Vt}$

ในด้านวิศวกรรมพบว่ามากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของปัญหาที่เกี่ยวข้องกับแรงตึงผิวและแรงกดแบบยืดหยุ่นสามารถตัดออกไปได้ (Steven, 1993 อ้างถึง Warnock, 1950) ดังนั้นแรงโน้มถ่วงหรือแรงหนืดจึงเป็นแรงหลักที่พบได้มากในธรรมชาติ กล่าวได้ว่าอัตราส่วนความคล้ายคลึงของ Froude และอัตราส่วนของ Reynolds ถูกนำมาใช้ทางวิศวกรรมชายฝั่งในการสร้างแบบจำลองกายภาพเพราะทั้งคู่ครอบคลุมถึงหลักการทางเรขาคณิตอันเป็นส่วนสำคัญมากที่ใช้ในการคำนวณ ดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 อัตราส่วนความคล้ายคลึงของ Froude และ Reynolds (Hughes, 1993)

Characteristic	Dimension	Froude	Reynolds
Geometric			
Length	[L]	N_L	N_L
Area	[L ²]	N_L^2	N_L^2
Volume	[L ³]	N_L^3	N_L^3
Kinematic			
Time	[T]	$N_L^{1/2} N_\rho^{1/2} N_\gamma^{-1/2}$	$N_L^2 N_\rho N_\mu^{-1}$
Velocity	[LT ⁻¹]	$N_L^{1/2} N_\rho^{-1/2} N_\gamma^{1/2}$	$N_L^{-1} N_\rho^{-1} N_\mu$
Acceleration	[LT ⁻²]	$N_\rho^{-1} N_\gamma$	$N_L^{-3} N_\rho^{-2} N_\mu^2$
Discharge	[L ³ T ⁻¹]	$N_L^{5/2} N_\rho^{-1/2} N_\gamma^{1/2}$	$N_L N_\rho^{-1} N_\mu$
Kinematic Viscosity	[L ² T ⁻¹]	$N_L^{3/2} N_\rho^{-1/2} N_\gamma^{1/2}$	$N_\rho^{-1} N_\mu$

ตารางที่ 2-4 อัตราส่วนความคล้ายคลึงของ Froude และ Reynolds (Hughes, 1993) (ต่อ)

Dynamic			
Mass	[M]	$N_L^3 N_\rho$	$N_L^3 N_\rho$
Force	[MLT ⁻²]	$N_L^3 N_\gamma$	$N_\rho^{-1} N_\mu^2$
Mass Density	[ML ⁻³]	N_ρ	N_ρ
Specific Weight	[ML ⁻² T ⁻²]	N_γ	$N_L^{-3} N_\rho^{-1} N_\mu^2$
Dynamic Viscosity	[ML ⁻¹ T ⁻¹]	$N_L^{3/2} N_\rho^{1/2} N_\gamma^{1/2}$	N_μ
Surface Tension	[MT ⁻²]	$N_L^2 N_\gamma$	$N_L^{-1} N_\rho^{-1} N_\mu^2$
Volume Elasticity	[ML ⁻¹ T ⁻²]	$N_L N_\gamma$	$N_L^{-2} N_\rho^{-1} N_\mu^2$
Pressure and Stress	[ML ⁻¹ T ⁻²]	$N_L N_\gamma$	$N_L^{-2} N_\rho^{-1} N_\mu^2$
Momentum, Impulse	[MLT ⁻¹]	$N_L^{7/2} N_\rho^{1/2} N_\gamma^{1/2}$	$N_L^2 N_\mu$
Energy, Work	[ML ² T ⁻²]	$N_L^4 N_\gamma$	$N_L N_\rho^{-1} N_\mu^2$
Power	[ML ⁻² T ⁻³]	$N_L^{7/2} N_\rho^{-1/2} N_\gamma^{3/2}$	$N_L^{-1} N_\rho^{-2} N_\mu^3$

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หน่วยศึกษาพิบัติภัยและข้อสนเทศเชิงพื้นที่ (2552) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเสาเหลี่ยมด้วยแบบจำลองกายภาพ โดยใช้ตัวแปรในการทดสอบ 8 ตัวแปร คือ ความสูงคลื่น (Wave Height) คาบคลื่น (Wave Period) ความลึกของน้ำ (Water Depth) ระยะห่างระหว่างแถว (Space between Row) ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (Space between Column) มุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อน (Wave Angle) ค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถว (Pile Angle) และจำนวนแถว (Number of Row) ที่ใช้ในการทดสอบคือ 1-4 แถว ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่า

1. จำนวนแถวเสาเข็มเพิ่มขึ้น 3 แถว เป็น 4 แถว แต่ประสิทธิภาพการลดกำลังคลื่นเพิ่มขึ้นน้อยมาก
2. ระยะห่างระหว่างเสาเข็มลดลงประสิทธิภาพการลดกำลังคลื่นเพิ่มขึ้น แต่คลื่นมีแนวโน้มม้วนตัวลงกัดเซาะเพิ่มขึ้น
3. กรณีคาบคลื่นสั้น ๆ บางกรณีเขื่อนมีประสิทธิภาพการลดกำลังคลื่นสูงกว่า 90%

บทที่ 3

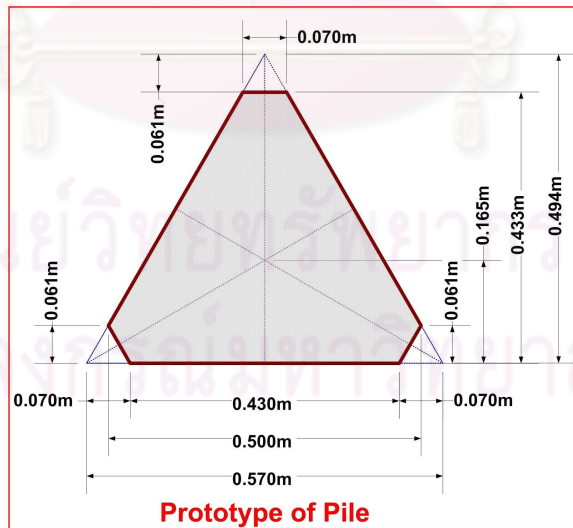
วิธีดำเนินการวิจัย

จากข้อมูลทางสมุทรศาสตร์บริเวณพื้นที่ศึกษาพบว่าคลื่นที่เกิดขึ้นในทะเล และอาจจะสามารถกัดเซาะชายฝั่งได้นั้นส่วนใหญ่มักจะเป็นคลื่นที่มีขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นในช่วงฤดูมรสุม ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของเขื่อนสลายกำลังคลื่น จึงจำเป็นต้องมีการสร้างแบบจำลองทางกายภาพที่ทำการทดสอบในรางน้ำที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการโดยมีการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ให้ครอบคลุมที่อาจเกิดขึ้นได้ในสถานีน่าวาง

ในการสร้างแบบจำลองทางกายภาพ (Physical Model) ที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ จำเป็นต้องทราบเกี่ยวกับอุปกรณ์การทดลอง ความสามารถของรางน้ำ ขนาดของเสาและการจัดเรียงตัวของเขื่อนสลายกำลังคลื่นต้นแบบ (Prototype) และขอบเขตของข้อมูลทางสมุทรศาสตร์ที่เป็นไปได้ เพื่อใช้ในการกำหนดอัตราส่วนทางกายภาพที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองทางกายภาพโดยอาศัยหลักความคล้ายคลึง

3.1 แบบจำลองเสาเข็ม (Model of Pile)

เขื่อนสลายกำลังคลื่นต้นแบบมีลักษณะคือ หน้าตัดหัวท้ายเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าตัดปลายแหลม ตัวเสาเข็มหล่อจากคอนกรีตอัดแรงดังรูป 3-1



รูปที่ 3-1 ขนาดของเสาคอนกรีตต้นแบบ
(ที่มา : หน่วยศึกษาพิบัติภัยและข้อสนเทศเชิงพื้นที่, 2552)

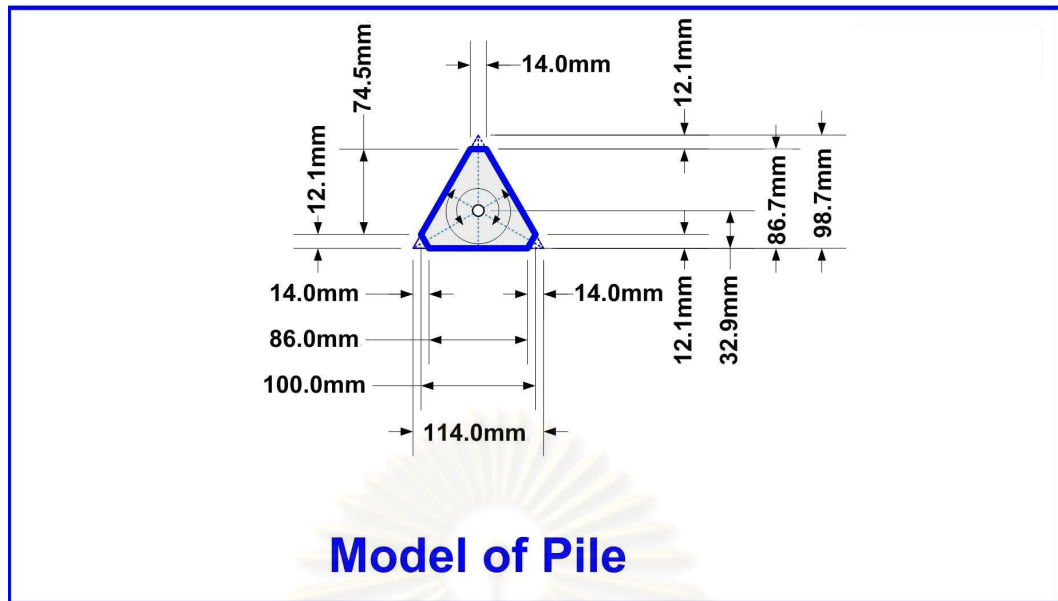
การใช้งานในพื้นที่ศึกษาเสาคอนกรีตแต่ละต้นจะถูกตอกลงไปในท้องน้ำให้ลึกพอที่จะรับแรงปะทะของกระแสน้ำและคลื่นได้ โดยลักษณะเสาเข็มที่ปักเป็นแนวเชื่อมลดหลั่นกันเป็น 3 ระดับ เรียงเป็น 3 แถวสลับฟันปลา ระยะห่างศูนย์กลางเสาเข็มระหว่างแถว และภายในแถว เท่ากับ 1.50 เมตรดังรูป 3-2



รูปที่ 3-2 เสาคอนกรีตที่ปักเป็นแนวเชื่อมบริเวณพื้นที่ศึกษา
(ที่มา : หน่วยศึกษาพิบัติภัยและข้อสนเทศเชิงพื้นที่, 2552)

เมื่อพิจารณาถึงขนาดของวางน้ำในท้องปฏิบัติการ ข้อมูลทางสมุทรศาสตร์ และขนาดของเขื่อนสลายกำลังคลื่นต้นแบบ สามารถคำนวณออกมาเป็นมาตราส่วนสำหรับแบบจำลองทางกายภาพเท่ากับ 5:1 ขนาดหน้าตัดเสาเข็มดังรูป 3-3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3-3 แบบจำลองทางกายภาพจากเสาคอนกรีตต้นแบบในอัตราส่วน 5:1

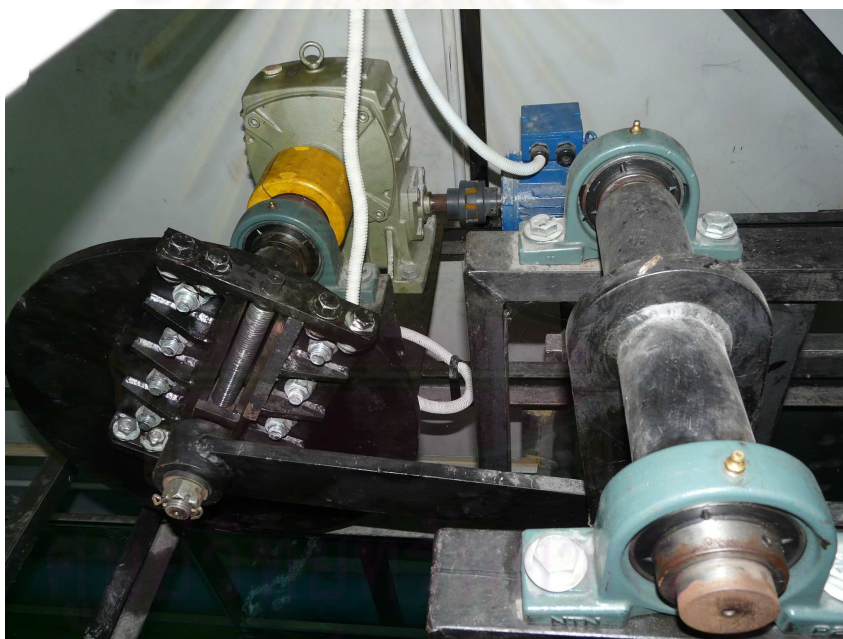
เพื่อความแข็งแรงของเสาเข็มจำลองและให้ลักษณะผิวคล้ายคลึงกับเสาเข็มต้นแบบ ในการหล่อจะใช้แบบหล่อทำจากเหล็ก และมีการเสริมเหล็กเป็นแกนกลาง เหล็กที่เสริมเป็นแกนกลางมีลักษณะกลมกลวงเชื่อมลวดหนวดกึ่งทุกทิศทางตลอดความยาวของเสาเข็ม 90 เซนติเมตร อีกทั้งสามารถให้เสาเข็มจำลองสามารถหมุนได้สะดวกรอบแกนด้วย ดังรูป 3-4



รูปที่ 3-4 แบบที่ใช้หล่อเสา แกนกลาง และแบบจำลองเสาเข็ม

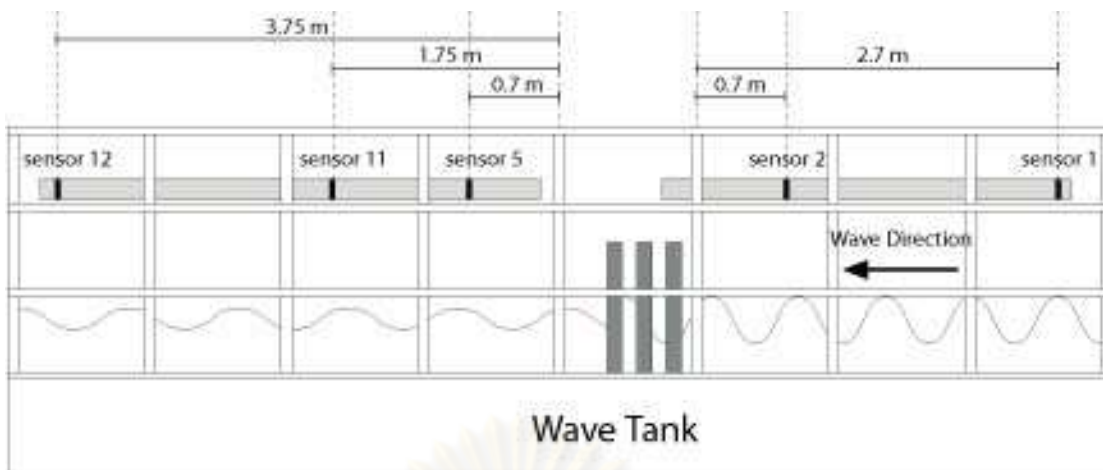
3.2 รางน้ำสำหรับการทดสอบ (Flume)

การทดสอบประสิทธิภาพของเขื่อนสลายกำลังคลื่นทำการทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ รางน้ำที่ใช้ทดสอบมีขนาดความยาว 30 เมตร หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 1.20 เมตร สามารถบรรจุน้ำได้สูงสุด 1.20 เมตร การสร้างคลื่นใช้มอเตอร์ขับขนาด 20 แรงม้า และการควบคุมความสูงคลื่นใช้แผ่นโลหะขนาดใหญ่ยึดกับแขนเหล็กต่อเข้ากับมอเตอร์สำหรับโยกไปมาดังรูป 3-5 ขณะที่ความถี่คลื่นควบคุมด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ การตรวจจกระดับน้ำใช้อุปกรณ์ตัวรับ (sensor) ตรวจจกระดับผิวน้ำด้วยความถี่ 20 ครั้งต่อวินาที และส่งข้อมูลเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล ซึ่งระยะที่ติดตั้งอุปกรณ์ตัวรับคือ ตัวรับที่ 1 อยู่หน้าแนวเขื่อน 2.7 เมตร ตัวรับที่ 2 อยู่หน้าแนวเขื่อน 0.7 เมตร ตัวรับที่ 5 อยู่หลังแนวเขื่อน 0.7 เมตร ตัวรับที่ 11 อยู่หลังแนวเขื่อน 1.75 เมตร ตัวรับที่ 12 อยู่หลังแนวเขื่อน 3.75 เมตร ดังรูป 3-6



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3-5 มอเตอร์สำหรับสร้างคลื่นที่ปรับแขนได้เพื่อให้ได้ความสูงคลื่นที่ต้องการ



รูปที่ 3-6 ระยะการติดตั้งตัวรับบริเวณหน้าและหลังเขื่อนในรางน้ำ

ก่อนที่จะทำการทดสอบประสิทธิภาพของเขื่อนสลายกำลังคลื่น มีการทดสอบความพร้อมของเครื่องมือและแบบจำลองโดยการใส่น้ำที่มีระดับสูงประมาณ 60 เซนติเมตร แล้วทำการเร่งเครื่องกำเนิดคลื่นให้ได้คลื่นสูงที่สุดเพื่อดูความทนทานของแบบจำลองเมื่อเกิดการชำรุดจึงทำการเปลี่ยนเสาต้นใหม่ลงไปแทนเสาต้นเก่า

3.3 ข้อมูลทางสมุทรศาสตร์ และการกำหนดขอบเขตการทดสอบ

แนวเขื่อนสลายกำลังคลื่น ณ บริเวณบ้านขุนสมุทรจีนมีลักษณะหันหน้าออกทะเลไปทางทิศใต้ซึ่งห่างจากชายฝั่งประมาณ 500 เมตร บางฤดูกาลเมื่อน้ำขึ้นหรือน้ำลงแนวเขื่อนจะจมอยู่ในน้ำทั้งหมดแต่ขณะที่บางฤดูกาลช่วงน้ำลงต่ำสุดตัวเขื่อนไม่ได้อยู่ในน้ำ หรือบางครั้งลมสงบไม่ค่อยมีคลื่นแต่เมื่อเข้าช่วงฤดูมรสุมมักจะเกิดคลื่นขนาดใหญ่เข้าปะทะกับแนวเขื่อน ซึ่งจากข้อมูลทางสถิติของสมุทรศาสตร์ที่เกิดขึ้นบริเวณบ้านขุนสมุทรจีนดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการกำหนดขอบเขตการทดสอบดังแสดงในตาราง 3-1

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลทางสมุทรศาสตร์บริเวณพื้นที่ศึกษา
(ที่มา : หน่วยศึกษาพิบัติภัยและข้อสนเทศเชิงพื้นที่,2552)

ปัจจัย	หน่วย	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด
ความลึกระดับน้ำ	เมตร	0	2.0	3.0
ความสูงคลื่น	เมตร	0	0.4	2.5
คาบคลื่น	วินาที	1	2	5

เมื่อทราบถึงขอบเขตทางสมุทรศาสตร์ของพื้นที่ศึกษา ซึ่งใช้เป็นเงื่อนไขในการทดสอบ เชื้อนสลากกำลังคลื่นให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นจึงมีการกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบซึ่งประกอบด้วย ความสูงคลื่น คาบคลื่น ความลึกของน้ำ ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม ระยะห่างระหว่างแถว มุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อน ค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถว และ จำนวนแถว โดยค่าตัวแปรเหล่านี้จะถูกนำมาคำนวณเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าต่าง ๆ ของตัวแปรของพื้นที่ศึกษากับค่าตัวแปรต่าง ๆ ของห้องปฏิบัติการด้วยการใช้อัตราส่วนความคลึงของ Froude ในตารางที่ 2-3 เขียนแสดงในตาราง 3-2

ตารางที่ 3-2 อัตราส่วนของ Froude ระหว่างค่าตัวแปรของพื้นที่ศึกษากับห้องปฏิบัติการ

ตัวแปร	มิติ	อัตราส่วนของ Froude
ความสูงคลื่น	L	N_L
คาบคลื่น	T	$N_L^{1/2} N_\rho^{1/2} N_\gamma^{-1/2}$
ความลึกของน้ำ	L	N_L
ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม	L	N_L
ระยะห่างระหว่างแถว	L	N_L
มุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อน	-	-
มุมระหว่างมุมยอดเสากับแถว	-	-
จำนวนแถว	-	-

ค่าของตัวแปรต่าง ๆ สำหรับการทดสอบ จะถูกกำหนดด้วยอัตราส่วนสำหรับแบบจำลองย่อส่วนคือ 5:1 โดยใช้ในการคำนวณจากอัตราส่วนของ Froude อย่างไรก็ตามค่าขอบเขตการทดลองในห้องปฏิบัติการได้ถูกกำหนดใหม่ตามข้อจำกัดจากเครื่องมือทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3-3 ประการหนึ่งในการทดสอบครั้งนี้ค่าคาบคลื่นจะสัมพันธ์กับความยาวคลื่น(λ) กล่าวคือค่าคาบคลื่นสั้นค่าความยาวคลื่นจะสั้นเมื่อเทียบกับค่าคาบคลื่นยาวค่าความยาวคลื่นจะยาวซึ่งเขียนเป็นข้อกำหนดได้ดังนี้

1. ค่าคาบคลื่น(T) 0.9 วินาที จะให้ค่าความยาวคลื่น(λ) ประมาณ 1.2 เมตร
2. ค่าคาบคลื่น(T) 1.5 วินาที จะให้ค่าความยาวคลื่น(λ) ประมาณ 2.5 เมตร
3. ค่าคาบคลื่น(T) 2.1 วินาที จะให้ค่าความยาวคลื่น(λ) ประมาณ 3.5 เมตร

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรและช่วงของการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตัวแปร	หน่วย	ช่วงการทดสอบ
ความสูงคลื่น	เมตร	0.05 - 0.15
คาบคลื่น	วินาที	0.90 - 2.10
ความลึกของน้ำ	เมตร	0.20 - 0.60
ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม	เมตร	0.20 - 0.40
ระยะห่างระหว่างแถว	เมตร	0.20 - 0.40
มุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อน	องศา	0.0 - 45.0
มุมระหว่างมุมยอดเสากับแถว	องศา	0.0 - 45.0
จำนวนแถว	-	1 - 4

หมายเหตุ การคำนวณอัตราส่วนสำหรับความหนาแน่น (N_p) และน้ำหนักจำเพาะ (N_γ) ระหว่างน้ำทะเลในพื้นที่ศึกษา กับน้ำในห้องปฏิบัติการมีค่าประมาณเป็น 1 คาบคลื่นเป็น $\sqrt{5}$:

3.4 ขอบเขตค่าการทดสอบ

การทดสอบประสิทธิภาพของเขื่อนสลายกำลังคลื่นให้ได้ถูกต้องแม่นยำ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จึงมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้น แต่เนื่องจากปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเขื่อนสลายกำลังคลื่นมีหลายปัจจัย การทดลองจึงจำเป็นต้องทำหลาย ๆ ครั้งเพื่อให้ได้ผลออกมา ดังตัวอย่างเช่น การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการกำลังสองแบบสูตรผลคูณ ดังหัวข้อที่ 2.2.3.1 สำหรับตัวแปรต่อเนื่อง 7 ตัว และตัวแปรไม่ต่อเนื่องจำนวน 1 ตัว (จำนวนแถวของเสาเข็ม) จำนวนการทดลองที่ต้องการคือ $3 \times 3^7 + 3^0 = 7,290$ หรือไม่น้อยกว่า 7,290 การทดลอง ซึ่งสิ้นเปลืองเวลาและงบประมาณจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น ภายในเวลา 1 วัน สามารถทำการทดลองได้เพียง 15 การทดลอง ระยะเวลาสำหรับการทดลองต้องใช้เวลาถึง 486 วัน หรือมากกว่าหนึ่งปี

หากการกำหนดค่าตัวแปรเป็นไปอย่างมีระบบจะทำให้จำนวนครั้งของการทดลองลดลงเป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น สำหรับตัวแปรต่อเนื่อง 7 ตัว และตัวแปรไม่ต่อเนื่องจำนวน 1 ตัว (จำนวนแถวของเสาเข็ม) การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากพหุนามกำลังสองสำหรับตัวแปรลดรูปแบบสูตรไม่ใช้ผลคูณ ดังหัวข้อที่ 2.3.2.4 หรือจากตารางที่ 2-2 จำนวนการทดลองที่ต้องการจะลดลงเหลือ $3 \times [(7+2)(7+1)/2] + [(6+2)(6+1)/2] = 136$ การทดลอง จากกรณีเดิมคือ ภายในเวลา 1 วัน สามารถทำการทดลองได้เพียง 15 การทดสอบ ระยะเวลาสำหรับการทดลองเพียง 10

วัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการหลังสามารถประหยัดเวลา และงบประมาณที่มีจำกัดได้มาก โดยค่าตัวแปรต่าง ๆ จะถูกกำหนดดังตาราง 3-4 และตาราง 3-5

ตารางที่ 3-4 ขอบเขตของค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบสำหรับ 1 แถว

ตัวแปร	ขอบเขตของค่าตัวแปรที่ใช้ทดลอง		
	ต่ำ (l)	กลาง (m)	สูง (u)
ความสูงคลื่น (H)	0.05 เมตร	0.10 เมตร	0.15 เมตร
คาบคลื่น (T)	0.9 วินาที	1.5 วินาที	2.1 วินาที
ความลึกของน้ำ (D)	0.2 เมตร	0.4 เมตร	0.6 เมตร
ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (SC)	0.2 เมตร	0.3 เมตร	0.4 เมตร
มุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อน (θW)	0 องศา	22.5 องศา	45 องศา
มุมระหว่างมุมยอดเสาเข็มกับแถว (θP)	0 องศา	22.5 องศา	45 องศา

ตารางที่ 3-5 ขอบเขตของค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบสำหรับ 2 , 3 และ 4 แถว

ตัวแปร	ขอบเขตของค่าตัวแปรที่ใช้ทดลอง		
	ต่ำ (l)	กลาง (m)	สูง (u)
ความสูงคลื่น (H)	0.05 เมตร	0.10 เมตร	0.15 เมตร
คาบคลื่น (T)	0.9 วินาที	1.5 วินาที	2.1 วินาที
ความลึกของน้ำ (D)	0.2 เมตร	0.4 เมตร	0.6 เมตร
ระยะห่างระหว่างแถว (SR)	0.2 เมตร	0.3 เมตร	0.4 เมตร
ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (SC)	0.2 เมตร	0.3 เมตร	0.4 เมตร
มุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อน (θW)	0 องศา	22.5 องศา	45 องศา
มุมระหว่างมุมยอดเสาเข็มกับแถว (θP)	0 องศา	22.5 องศา	45 องศา

เมื่อกำหนดขอบเขตของค่าตัวแปรต่าง ๆ แล้ว เพื่อความสะดวก รวดเร็ว และไม่ให้เกิดความสับสนระหว่างการทดสอบจึงมีการจัดทำเป็นตารางการทำงานสำหรับแต่ละแถวตั้งแต่แถวที่

1 จนถึงแถวที่ 4 ดังแสดงในตารางที่ 3-6 และ 3-7 ซึ่งตัวอย่างการจัดวางแนวเสาเข็มมีลักษณะดังรูปที่ 3-7 และ 3-8 โดยลำดับการทดสอบมีดังนี้

1. ในช่องสี่เหลี่ยมแนวทแยงมุมทำการทดสอบกรณีของ Share โดยตั้งค่าของตัวแปรทุกตัวให้เป็นค่ากลางแล้วทำการเก็บข้อมูลคลื่นประมาณ 3 นาที และทำซ้ำแบบเดิมกับแถวที่เหลือจนครบทั้ง 4 แถว
2. ในช่องสี่เหลี่ยมแนวทแยงมุมทำการทดสอบตัวแปรเดี่ยวโดยการเลือกตั้งค่าต่ำสุดหรือสูงสุดตามค่าตัวแปรนั้น ๆ ในขณะที่คงค่าของตัวแปรอื่น ๆ ยังคงไว้ที่ค่ากลาง ตัวอย่างเช่น การทดสอบในกรณีของ Hnml สำหรับจำนวนแถว 3 แถว ค่าความสูงคลื่นจะตั้งไว้ต่ำสุดที่ 0.05 เมตร ค่าคาบคลื่น 1.5 วินาที ค่าความลึกของน้ำ 0.4 เมตร ค่าระยะห่างเสาเข็มระหว่างแถว 0.3 เมตร ค่าระยะห่างเสาเข็มภายในแถว 0.3 เมตร ค่ามุมระหว่างหน้าคลื่นกับแนวเข็ม 22.5 องศา ค่ามุมระหว่างมุมยอดเสากับแนวเข็ม 22.5 องศา เป็นต้น จากนั้นจึงทำในกรณีอื่นอีกจนครบทุกแถวและแนวทแยงของตาราง
3. นำค่าที่ได้จากตัวรับ ตัวที่ 1 ตัวที่ 11 และ ตัวที่ 12 มาเขียนกราฟในโปรแกรม Excel นับความสูงคลื่น 50 ลูกคลื่น หาค่าความสูงคลื่นของแต่ละตัวรับ
4. นำค่าความสูงคลื่นของตัวรับที่ 11 กับ 12 มารวมกันแล้วหารด้วย 2 จากนั้นนำค่าความสูงคลื่นหน้าเขื่อน(ตัวรับที่ 1) กับความสูงคลื่นเฉลี่ยบริเวณหลังเขื่อน(ตัวรับที่ 11,12) มาคำนวณในสมการพลังงานคลื่นคือ $E = \frac{1}{8} \rho g h^2$ และคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นที่จุด สูง กลาง ต่ำ ของแต่ละกรณี
5. นำตัวแปรเดี่ยวมาจับคู่กันเช่น ตัวแปรความสูงคลื่นจับคู่กับตัวแปรคาบของคลื่น เป็นต้น จากนั้นสลับกันจับคู่จนครบทั้งหมด
6. ดูจุดสูงสุดของกราฟที่ผ่านจุด ต่ำ กลาง สูง ในข้อที่ 4 อยู่บริเวณด้านใดของแกน X แกน Y เช่น ด้านบวก-บวก , ลบ-บวก , ลบ-ลบ เป็นต้น จากนั้นจึงเลือกการทดสอบตัวแปรคู่ในแต่ละช่องสี่เหลี่ยมมา 1 คู่จาก 4 คู่ (ตัวอักษรขีดเส้นใต้สีแดง)
7. นำผลที่ได้จากข้อที่ 6 มาคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นของตัวแปรคู่ดังวิธีการในข้อ 3 และ 4 จนครบทุกคู่
8. นำค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นของตัวแปรคู่ของเขื่อนแบบ 1 แถวจนถึงแบบ 4 แถว มาเปรียบเทียบโดยแบ่งเป็น 7 กลุ่มแล้วทำการวิเคราะห์ผลด้วยหลักการทางสถิติเพื่อหาค่าและตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของเขื่อน รวมถึงเปรียบเทียบต้นทุนกับประสิทธิภาพของเขื่อน วิจัยณ์ผลการทดสอบ และ สรุปผล

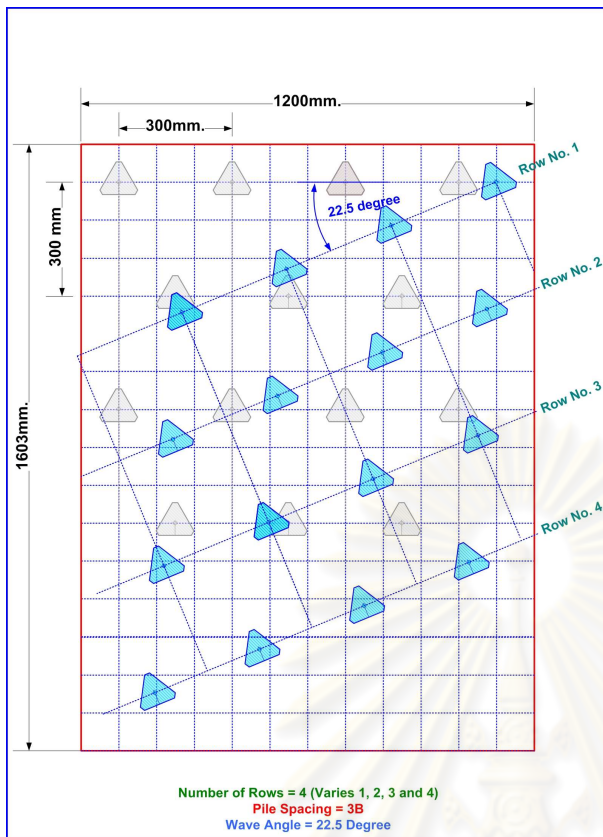
ตารางที่ 3-6 ตารางการทดสอบประสิทธิภาพของเขื่อนสลายกำลังคลื่นสำหรับ 1 แถว

Number of Rows = One	HI	Hm	Hu	TI	Tm	Tu	DI	Dm	Du	SCI	SCm	SCu	θWI	θWm	θWu	θPI	θPm	θPu
	0.05	0.10	0.15	0.9	1.5	2.1	0.2	0.4	0.6	0.2	0.3	0.4	0	22.5	45	0	22.5	45
HI	0.05	Hnml		<u>HITI</u>	Hnml	<u>HITu</u>	<u>HIDI</u>	Hnml	<u>HIDu</u>	<u>HISCI</u>	Hnml	<u>HISCu</u>	<u>HIθWI</u>	Hnml	<u>HIθWu</u>	<u>HIθPI</u>	Hnml	<u>HIθPu</u>
Hm	0.10	Share			Share			Share			Share			Share			Share	
Hu	0.15		Hnmu	<u>HuTI</u>	Hnmu	<u>HuTu</u>	<u>HuDI</u>	Hnmu	<u>HuD</u>	<u>HuSCI</u>	Hnmu	<u>HuSCu</u>	<u>HuθWI</u>	Hnmu	<u>HuθWu</u>	<u>HuθPI</u>	Hnmu	<u>HuθPu</u>
TI	0.9	<u>TIHI</u>	Tnml	<u>TIHu</u>	Tnml		<u>TIDI</u>	Tnml	<u>TIDu</u>	<u>TISCI</u>	Tnml	<u>TISCu</u>	<u>TIθWI</u>	Tnml	<u>TIθWu</u>	<u>TIθPI</u>	Tnml	<u>TIθPu</u>
Tm	1.5		Share		Share			Share			Share			Share			Share	
Tu	2.1	<u>TuHI</u>	Tnmu	<u>TuHu</u>		Tnmu	<u>TuDI</u>	Tnmu	<u>TuD</u>	<u>TuSCI</u>	Tnmu	<u>TuSCu</u>	<u>TuθWI</u>	Tnmu	<u>TuθWu</u>	<u>TuθPI</u>	Tnmu	<u>TuθPu</u>
DI	0.2	<u>DIHI</u>	Dnml	<u>DIHu</u>	<u>DITI</u>	Dnml	<u>DITu</u>	Dnml		<u>DISCI</u>	Dnml	<u>DISCu</u>	<u>DIθWI</u>	Dnml	<u>DIθWu</u>	<u>DIθPI</u>	Dnml	<u>DIθPu</u>
Dm	0.4		Share		Share			Share			Share			Share			Share	
Du	0.6	<u>DuHI</u>	Dnmu	<u>DuHu</u>	<u>DuTI</u>	Dnmu	<u>DuTu</u>		Dnmu	<u>DuSCI</u>	Dnmu	<u>DuSCu</u>	<u>DuθWI</u>	Dnmu	<u>DuθWu</u>	<u>DuθPI</u>	Dnmu	<u>DuθPu</u>
SCI	0.2	<u>SCIHI</u>	SCnml	<u>SCIHu</u>	<u>SCITI</u>	SCnml	<u>SCITu</u>	<u>SCIDI</u>	SCnml	<u>SCIDu</u>	SCnml		<u>SCIθWI</u>	SCnml	<u>SCIθWu</u>	<u>SCIθPI</u>	SCnml	<u>SCIθPu</u>
SCm	0.3		Share		Share			Share			Share			Share			Share	
SCu	0.4	<u>SCuHI</u>	SCnmu	<u>SCuHu</u>	<u>SCuTI</u>	SCnmu	<u>SCuTu</u>	<u>SCuDI</u>	SCnmu	<u>SCuD</u>		SCnmu	<u>SCuθWI</u>	SCnmu	<u>SCuθWu</u>	<u>SCuθPI</u>	SCnmu	<u>SCuθPu</u>
θWI	0	<u>θWIHI</u>	θWnml	<u>θWIHu</u>	<u>θWITI</u>	θWnml	<u>θWITu</u>	<u>θWIDI</u>	θWnml	<u>θWIDu</u>	<u>θWISCI</u>	θWnml	<u>θWISCu</u>	θWnml		<u>θWIθPI</u>	θWnml	<u>θWIθPu</u>
θWm	22.5		Share		Share			Share			Share			Share			Share	
θWu	45	<u>θWuHI</u>	θWnmu	<u>θWuHu</u>	<u>θWuTI</u>	θWnmu	<u>θWuTu</u>	<u>θWuDI</u>	θWnmu	<u>θWuD</u>	<u>θWuSCI</u>	θWnmu	<u>θWuSCu</u>		θWnmu	<u>θWuθPI</u>	θWnmu	<u>θWuθPu</u>
θPI	0	<u>θPIHI</u>	θPnml	<u>θPIHu</u>	<u>θPITI</u>	θPnml	<u>θPITu</u>	<u>θPIDI</u>	θPnml	<u>θPIDu</u>	<u>θPISCI</u>	θPnml	<u>θPISCu</u>	<u>θPIθW</u>	θPnml	<u>θPIθW</u>	θPnml	
θPm	22.5		Share		Share			Share			Share			Share			Share	
θPu	45	<u>θPuHI</u>	θPnmu	<u>θPuHu</u>	<u>θPuTI</u>	θPnmu	<u>θPuTu</u>	<u>θPuDI</u>	θPnmu	<u>θPuD</u>	<u>θPuSCI</u>	θPnmu	<u>θPuSCu</u>	<u>θPuθW</u>	θPnmu	<u>θPuθW</u>		θPnmu

ตารางที่ 3-7 ตารางทดสอบประสิทธิภาพของเขื่อนสลายกำลังคลื่นสำหรับ 2, 3 และ 4 แถว

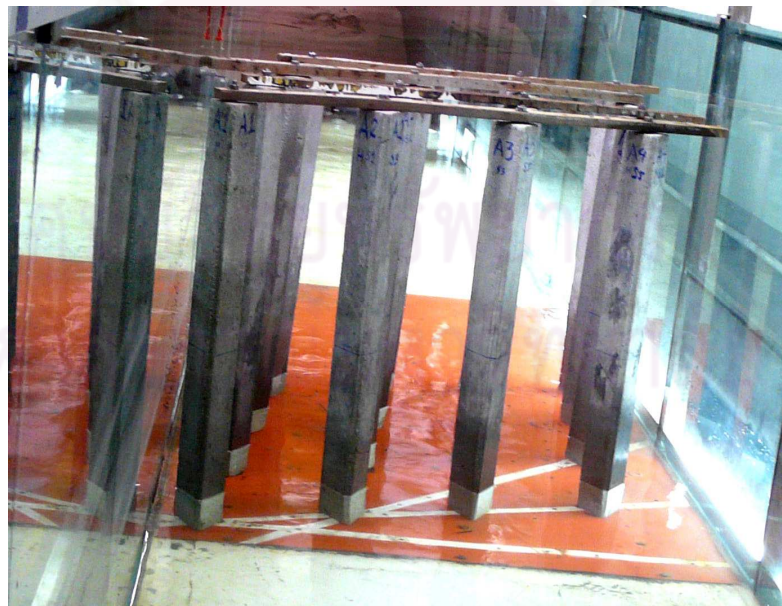
๕)

Number of Rows = One	HI 0.05	Hm 0.10	Hu 0.15	TI 0.9	Tm 1.5	Tu 2.1	DI 0.2	Dm 0.4	Du 0.6	SRI 0.2	SRm 0.3	SRu 0.4	SCI 0.2	SCm 0.3	SCu 0.4	BIW 0	BIWm 22.5	BIWu 45	BPI 0	BPI m 22.5	BPI u 45
HI 0.05	Hnml			<u>HITI</u>	Hnml	<u>HITu</u>	<u>HIDI</u>	Hnml	<u>HIDu</u>	<u>HISRI</u>	Hnml	<u>HISRu</u>	<u>HISCI</u>	Hnml	<u>HISCu</u>	<u>HI BWI</u>	Hnml	<u>HI BWu</u>	<u>HI BPI</u>	Hnml	<u>HI BPu</u>
Hm 0.10	Share				Share			Share			Share			Share			Share			Share	
Hu 0.15	Hnmu			<u>HuTI</u>	Hnmu	<u>HuTu</u>	<u>HuDI</u>	Hnmu	<u>HuDu</u>	<u>HuSRI</u>	Hnmu	<u>HuSRu</u>	<u>HuSCI</u>	Hnmu	<u>HuSCu</u>	<u>Hu BWI</u>	Hnmu	<u>Hu BWu</u>	<u>Hu BPI</u>	Hnmu	<u>Hu BPu</u>
TI 0.9	<u>TIHI</u>	Tnml	<u>TIHu</u>	Tnml			<u>TI DI</u>	Tnml	<u>TI Du</u>	<u>TISRi</u>	Tnml	<u>TISRu</u>	<u>TISCI</u>	Tnml	<u>TISCu</u>	<u>TI BWI</u>	Tnml	<u>TI BWu</u>	<u>TI BPI</u>	Tnml	<u>TI BPu</u>
Tm 1.5		Share			Share			Share			Share			Share			Share			Share	
Tu 2.1	<u>TuHI</u>	Tnmu	<u>TuHu</u>			Tnmu	<u>TuDI</u>	Tnmu	<u>TuDu</u>	<u>TuSRI</u>	Tnmu	<u>TuSRu</u>	<u>TuSCI</u>	Tnmu	<u>TuSCu</u>	<u>Tu BWI</u>	Tnmu	<u>Tu BWu</u>	<u>Tu BPI</u>	Tnmu	<u>Tu BPu</u>
DI 0.2	<u>DIHI</u>	Dnml	<u>DIHu</u>	<u>DITI</u>	Dnml	<u>DI Tu</u>	Dnml			<u>DISRI</u>	Dnml	<u>DISRu</u>	<u>DISCI</u>	Dnml	<u>DISCu</u>	<u>DI BWI</u>	Dnml	<u>DI BWu</u>	<u>DI BPI</u>	Dnml	<u>DI BPu</u>
Dm 0.4		Share			Share			Share			Share			Share			Share			Share	
Du 0.6	<u>DuHI</u>	Dnmu	<u>DuHu</u>	<u>DuTI</u>	Dnmu	<u>DuTu</u>			Dnmu	<u>DuSRI</u>	Dnmu	<u>DuSRu</u>	<u>DuSCI</u>	Dnmu	<u>DuSCu</u>	<u>Du BWI</u>	Dnmu	<u>Du BWu</u>	<u>Du BPI</u>	Dnmu	<u>Du BPu</u>
SRI 0.2	<u>SRIHI</u>	SRnml	<u>SRIHu</u>	<u>SRI TI</u>	SRnml	<u>SRI Tu</u>	<u>SRI DI</u>	SRnml	<u>SRI Du</u>	SRnml			<u>SRI SCI</u>	SRnml	<u>SRI SCu</u>	<u>SRI BWI</u>	SRnml	<u>SRI BWu</u>	<u>SRI BPI</u>	SRnml	<u>SRI BPu</u>
SRm 0.3		Share			Share			Share			Share			Share			Share			Share	
SRu 0.4	<u>SRuHI</u>	SRnmu	<u>SRuHu</u>	<u>SRu TI</u>	SRnmu	<u>SRu Tu</u>	<u>SRu DI</u>	SRnmu	<u>SRu Du</u>			SRnmu	<u>SRu SCI</u>	SRnmu	<u>SRu SCu</u>	<u>SRu BWI</u>	SRnmu	<u>SRu BWu</u>	<u>SRu BPI</u>	SRnmu	<u>SRu BPu</u>
SCI 0.2	<u>SCIHI</u>	SCnml	<u>SCIHu</u>	<u>SCITI</u>	SCnml	<u>SCITu</u>	<u>SCIDI</u>	SCnml	<u>SCIDu</u>	<u>SCISRI</u>	SCnml	<u>SCISRu</u>	SCnml			<u>SCI BWI</u>	SCnml	<u>SCI BWu</u>	<u>SCI BPI</u>	SCnml	<u>SCI BPu</u>
SCm 0.3		Share			Share			Share			Share			Share			Share			Share	
SCu 0.4	<u>SCuHI</u>	SCnmu	<u>SCuHu</u>	<u>SCu TI</u>	SCnmu	<u>SCu Tu</u>	<u>SCu DI</u>	SCnmu	<u>SCu Du</u>	<u>SCuSRI</u>	SCnmu	<u>SCuSRu</u>			SCnmu	<u>SCu BWI</u>	SCnmu	<u>SCu BWu</u>	<u>SCu BPI</u>	SCnmu	<u>SCu BPu</u>
BIW 0	<u>BIW HI</u>	BIWnml	<u>BIW Hu</u>	<u>BIW TI</u>	BIWnml	<u>BIW Tu</u>	<u>BIW DI</u>	BIWnml	<u>BIW Du</u>	<u>BIW SRI</u>	BIWnml	<u>BIW SRu</u>	<u>BIW SCI</u>	BIWnml	<u>BIW SCu</u>	BIWnml			<u>BIW BPI</u>	BIWnml	<u>BIW BPu</u>
BIWm 22.5		Share			Share			Share			Share			Share			Share			Share	
BIWu 45	<u>BIWu HI</u>	BIWnmu	<u>BIWu Hu</u>	<u>BIWu TI</u>	BIWnmu	<u>BIWu Tu</u>	<u>BIWu DI</u>	BIWnmu	<u>BIWu Du</u>	<u>BIWu SRI</u>	BIWnmu	<u>BIWu SRu</u>	<u>BIWu SCI</u>	BIWnmu	<u>BIWu SCu</u>			BIWnmu	<u>BIWu BPI</u>	BIWnmu	<u>BIWu BPu</u>
BPI 0	<u>BPI HI</u>	BPI nml	<u>BPI Hu</u>	<u>BPI TI</u>	BPI nml	<u>BPI Tu</u>	<u>BPI DI</u>	BPI nml	<u>BPI Du</u>	<u>BPI SRI</u>	BPI nml	<u>BPI SRu</u>	<u>BPI SCI</u>	BPI nml	<u>BPI SCu</u>	<u>BPI BWI</u>	BPI nml	<u>BPI BWu</u>	BPI nml		
BPI m 22.5		Share			Share			Share			Share			Share			Share			Share	
BPI u 45	<u>BPI u HI</u>	BPI nmu	<u>BPI u Hu</u>	<u>BPI u TI</u>	BPI nmu	<u>BPI u Tu</u>	<u>BPI u DI</u>	BPI nmu	<u>BPI u Du</u>	<u>BPI u SRI</u>	BPI nmu	<u>BPI u SRu</u>	<u>BPI u DI</u>	BPI nmu	<u>BPI u Du</u>	<u>BPI u BWI</u>	BPI nmu	<u>BPI u BWu</u>			BPI nmu



ภาพแสดงตำแหน่งแบบจำลอง
 เสาเข็มของ 1 แถวจนถึง 4 แถว มี
 ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม และ
 ระยะห่างระหว่างแถว 0.3 เมตร
 โดยมุมที่แถวทำกับคลื่นมีค่า 22.5
 องศา

รูปที่ 3-7 ภาพวาดแสดงตำแหน่งการจัดวางแบบจำลองเสาเข็ม



รูปที่ 3-8 แบบจำลองเสาเข็มในรางน้ำสำหรับการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การทดสอบประสิทธิภาพของเขื่อนสลายกำลังคลื่นเริ่มทำการทดสอบในกรณีที่เป็นจุดร่วมของทุกกรณีโดยค่าตัวแปรทั้งหมดถูกตั้งค่าไว้ที่ค่ากลาง หรือเรียกว่า Share จากนั้นจึงทำการทดสอบค่าสูงค่าต่ำในแต่ละกรณีดังแสดงในตารางที่ 3-6 และ 3-7 ตามลำดับ และเขียนกราฟเปอร์เซ็นต์ของการลดลงของพลังงานเมื่อผ่านแนวเขื่อนเพื่อดูแนวโน้มในการเลือกการทดสอบสำหรับพจน์ผสม เพื่อความแม่นยำ และความสะดวกรวดเร็วจึงเริ่มทำการทดสอบตั้งแต่ 1 แถวไปจนถึง 4 แถวในแต่ละกรณีโดยได้ผลการเปรียบเทียบระหว่างพลังงานของคลื่นก่อนเข้าสู่แนวเขื่อน (Incident Wave Energy) และหลังจากผ่านแนวเขื่อน (Transmission Wave Energy) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงาน

การคำนวณพลังงานของคลื่นเริ่มต้นจากคลื่นที่จะเข้าสู่แนวเขื่อนนับคลื่น 50 ลูกคลื่นของตัวรับที่ 1 (Sensor 1) และคลื่นที่ออกจากแนวเขื่อนจะคิดคำนวณดังนี้ คือ นำค่าความสูงคลื่น 50 ลูกคลื่นจากตัวรับที่ 11 (Sensor 11) และ ตัวรับที่ 12 (Sensor 12) ทุกตัวมาบวกกันแล้วหารด้วย 2 (ตัดค่าของตัวรับที่ 2 (Sensor 2) และ ตัวรับที่ 5 (Sensor 5) ออกจากไปเนื่องจากใกล้กับแนวเขื่อนมาก ซึ่งความปั่นป่วนของน้ำมีมากค่าที่วัดอาจจะคลาดเคลื่อนได้) ขั้นตอนต่อไปนำค่าความสูงคลื่นที่ได้ทั้งหมดมาคำนวณพลังงานศักย์ของคลื่นจากสมการ $E = \frac{1}{8} \rho g h^2$ นำค่าพลังงานของคลื่นก่อนเข้าแนวเขื่อนหักลบกับค่าพลังงานของคลื่นที่ออกจากแนวเขื่อนหารด้วยค่าพลังงานของคลื่นก่อนเข้าแนวเขื่อนแล้วคูณด้วย 100 คิดเป็นเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นขั้นตอนสุดท้ายจึงนำเปอร์เซ็นต์การลดลงของคลื่นทั้ง 50 ลูกคลื่นมาเฉลี่ย สำหรับข้อมูลที่ได้มาเกิดข้อผิดพลาดดังเช่นกรณีพลังงานคลื่นที่ออกจากแนวเขื่อนมีค่าสูงกว่าพลังงานที่จะเข้าสู่แนวเขื่อน ก่อนจะทำกรวิเคราะห์จะต้องทำการตัดข้อมูลคลื่นที่เกิดการผิดพลาดทิ้งไป ซึ่งถ้าหากกรณีใดจำนวนข้อมูลคลื่นไม่ถึง 30 ลูกคลื่น กรณีนั้นจะไม่ทำการนำมาวิเคราะห์ผล

ผลการลดลงของพลังงานคลื่นในแต่ละกรณีเรียงลำดับตามตารางที่ 3-6 และ 3-7 ซึ่งจะแสดงค่ากลาง ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดสำหรับทั้ง 4 แถว ของแต่ละกรณี โดยค่าที่แสดงในตารางที่ 4-1 จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของการลดลงของพลังงานคลื่นเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการคำนวณและจากการทดสอบ

ตารางที่ 4-1 เปอร์เซนต์การลดลงของพลังงานคลื่นเฉลี่ยสำหรับตัวแปรเดี่ยว

กรณี ชนิดเงื่อนไข	Share	Hu	HI	Tu	TI
1 แถว (Case A)	14.04 ± 8.92	18.59 ± 9.57	21.86±13.16	X	32.78 ± 9.46
2 แถว (Case B)	27.38 ± 8.05	35.15 ± 8.82	15.03 ± 6.24	11.60 ± 8.12	15.99 ± 8.93
3 แถว (Case C)	34.62 ± 7.43	34.38 ± 8.97	29.06 ± 9.54	14.82 ± 8.77	40.51 ± 9.89
4 แถว (Case D)	25.30 ± 6.72	38.56 ± 6.73	29.23 ± 9.19	17.31 ± 4.58	32.17 ± 9.70
กรณี ชนิดเงื่อนไข	Du	DI	SCu	SCI	⊖Wu
1 แถว (Case A)	15.96 ± 9.14	26.65 ± 8.87	21.99± 9.04	31.02 ± 7.26	14.77 ± 12.57
2 แถว (Case B)	26.51 ± 7.76	33.75 ± 9.79	26.40 ± 9.72	30.52 ± 8.60	15.13 ± 8.71
3 แถว (Case C)	24.43 ± 11.90	39.07 ± 9.47	21.56 ± 9.40	37.26 ± 9.42	24.35 ± 9.44
4 แถว (Case D)	21.67 ± 7.89	34.64 ± 8.94	32.50 ± 8.60	38.81 ± 9.40	26.81 ± 7.21
กรณี ชนิดเงื่อนไข	⊖WI	⊖Pu	⊖PI	SRu	SRI
1 แถว (Case A)	22.05 ± 9.51	26.53 ± 9.75	22.44 ± 10.22	X	X
2 แถว (Case B)	22.26 ± 7.34	29.63 ± 7.92	32.31 ± 6.98	21.69 ± 8.87	27.22 ± 7.96
3 แถว (Case C)	30.65 ± 9.20	25.26 ± 7.66	22.18 ± 6.85	X	25.13 ± 9.52
4 แถว (Case D)	28.84 ± 9.89	31.17 ± 7.68	29.31 ± 7.77	38.75 ± 8.41	20.34 ± 7.87

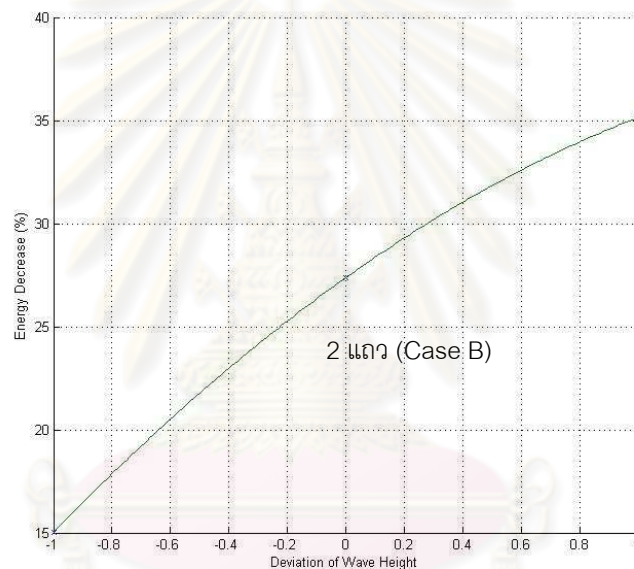
หมายเหตุ กรณีที่มีเครื่องหมาย X หมายถึงไม่ได้ทำการทดสอบ หรือค่าผิดพลาดจากการทดสอบ

จากตารางที่ 4-1 สามารถนำข้อมูลมาเขียนกราฟเพื่อให้ทราบถึงจุดที่เงื่อนไขสามารถลดพลังงานได้สูงสุด และนำข้อมูลที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับกรณีอื่น ๆ ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรซึ่งในหนึ่งกราฟจะแสดงเปอร์เซนต์การลดพลังงานคลื่นในกรณีค่าที่ลดลงจากค่ากลาง ค่าที่เพิ่มขึ้นจากค่ากลางของเงื่อนไขทั้ง 4 แบบ คือ แบบ 1 แถว(Case A) แบบ 2 แถว (CaseB) แบบ 3 แถว(CaseC) และแบบ 4 แถว(CaseD) ด้วยการกำหนดเป็นช่วงที่เท่ากัน โดยจะแสดงค่าจุดสูงสุดและสมการพหุนามของกราฟแต่ละแบบดังนี้

4.1 การเปรียบเทียบค่าของตัวแปรเดี่ยวในกรณี que เพิ่มขึ้น และลดลงจากค่ากลาง

เนื่องจากค่าและหน่วยของตัวแปรแต่ละตัวมีทั้งเหมือนกันและแตกต่างกันทำให้การวิเคราะห์ทำได้ยาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกและง่ายต่อการวิเคราะห์ข้อมูลจึงทำการปรับค่าของตัวแปรต้นที่กำหนดค่าจากการทดสอบ นำมาคำนวณด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปแบบที่ค่าของทุกตัวแปรที่มีค่าเท่ากัน คือ เริ่มต้นที่ค่าขอบเขตล่างเป็น -1 ค่ากลางเป็น 0 และค่าขอบเขตบนเป็น 1 โดยจะแสดงวิธีการแปลงค่าไว้ด้านล่างต่อจากกราฟ

4.1.1 การเปรียบเทียบค่าของตัวแปรจากการเปลี่ยนแปลงความสูงคลื่น (Wave Height H)

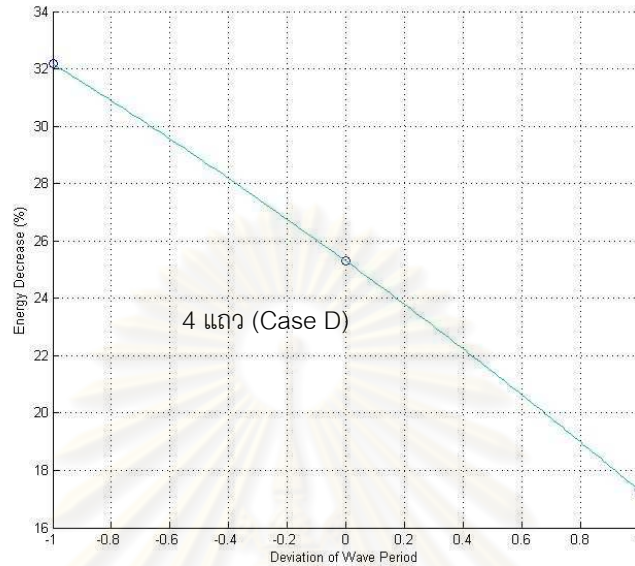


สมการในการแปลงค่าตัวแปรต้น คือ $[\text{ค่าทดสอบ} - 0.1] / 0.05 = \text{ค่าของตัวแปรใหม่}$

รูปที่ 4-1 ตัวอย่างกราฟเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นสำหรับเงื่อนไขแบบ 2 แถวเมื่อใช้ค่าความสูงคลื่นต่ำสุด(H_{nml}) 0.05 เมตร ค่าความสูงคลื่นค่ากลาง(H_{nmu}) 0.10 เมตร และค่าความสูงคลื่นสูงสุด(H_{nmu}) 0.15 เมตร

จากกราฟพบว่าจุดที่ลดพลังงานคลื่นได้มากที่สุดของประเภทเงื่อนไขแบบ 2 แถว ที่ความสูงคลื่น 0.15 เมตร ซึ่งอยู่ทางด้านบนของกราฟ หรือกล่าวได้ว่าเงื่อนไขสามารถลดพลังงานคลื่นได้มากขึ้นเมื่อความสูงคลื่นเพิ่มขึ้น โดยเงื่อนไขแบบ 3 และ 4 แถว มีแนวโน้มคล้ายกับแบบ 2 แถว

4.1.2 การเปรียบเทียบค่าของตัวแปรจากการเปลี่ยนแปลงคาบคลื่น (Wave Period T)



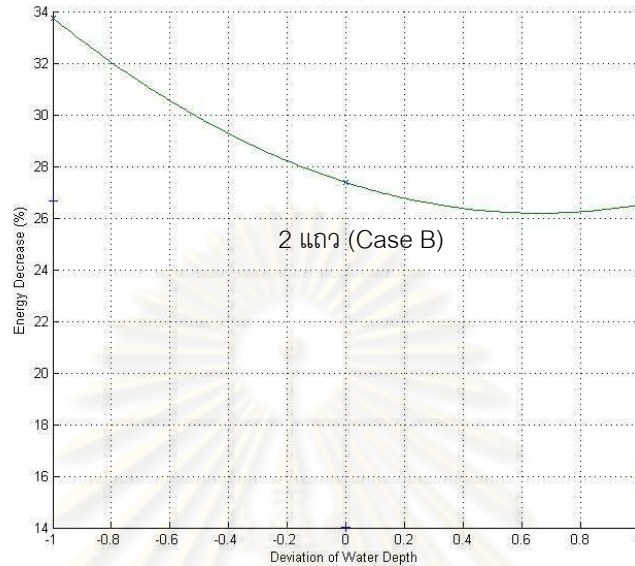
สมการในการแปลงค่าตัวแปรต้น คือ $[\text{ค่าทดสอบ} - 1.5] / 0.6 = \text{ค่าของตัวแปรใหม่}$

รูปที่ 4-2 ตัวอย่างกราฟเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นสำหรับเขื่อนแบบ 4 แถว เมื่อใช้ค่าคาบคลื่นต่ำสุด(T_{nml}) 0.9 วินาที ค่าคาบคลื่นค่ากลาง($Share$) 1.5 วินาที และค่าคาบคลื่นสูงสุด(T_{nmu}) 2.1 วินาที

จากกราฟพบว่าจุดที่ลดพลังงานคลื่นได้มากที่สุดของประเภทเขื่อนแบบ 4 แถว ที่ค่าคาบคลื่น 0.9 วินาที จะอยู่ทางด้านลบของกราฟหรือกล่าวได้ว่าเขื่อนสามารถลดพลังงานคลื่นได้มากเมื่อคาบคลื่นสั้นลง ซึ่งเขื่อนชนิด 1, 2 และ 3 แถว มีแนวโน้มเช่นเดียวกับเขื่อนแบบ 4 แถว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.3 การเปรียบเทียบค่าของตัวแปรจากการเปลี่ยนแปลงความลึกของน้ำ (Water Depth D)



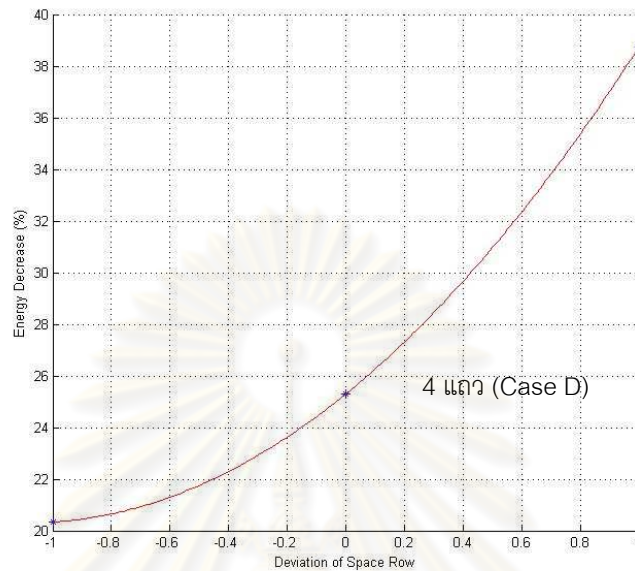
สมการในการแปลงค่าตัวแปรต้น คือ $[\text{ค่าทดสอบ} - 0.4] / 0.2 = \text{ค่าของตัวแปรใหม่}$

รูปที่ 4-3 ตัวอย่างกราฟเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นสำหรับเขื่อนแบบ 2 แถว เมื่อใช้ค่าความลึกของน้ำน้อยที่สุด (D_{nml}) 0.2 เมตร ค่าความลึกของน้ำค่ากลาง (Share) 0.4 เมตร และค่าความลึกของน้ำมากที่สุด (D_{nmu}) 0.6 เมตร

จากกราฟพบว่าจุดที่ลดพลังงานคลื่นได้มากที่สุดของประเภทเขื่อนแบบ 2 แถวจะอยู่ทางด้านลบของกราฟที่ค่าความลึกน้ำ 0.2 เมตร หรือกล่าวได้ว่าเขื่อนสามารถลดพลังงานคลื่นได้สูงสุดเมื่อค่าความลึกของน้ำน้อย โดยเขื่อนแบบ 1, 3 และ 4 แถว มีแนวโน้มคล้ายกับแบบ 2 แถว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.4 การเปรียบเทียบค่าของตัวแปรจากการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแถว (Space between Row SR)



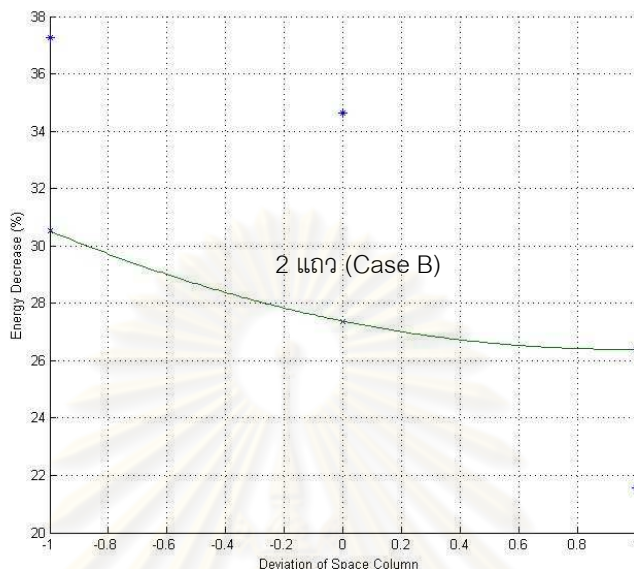
สมการในการแปลงค่าตัวแปรต้น คือ $[\text{ค่าทดสอบ} - 0.3] / 0.1 = \text{ค่าของตัวแปรใหม่}$

รูปที่ 4-4 ตัวอย่างกราฟเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นสำหรับเขื่อนแบบ 4 แถว เมื่อใช้ค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด (SRnml) 0.2 เมตร ค่าระยะห่างระหว่างแถวค่ากลาง (Share) 0.3 เมตร และค่าระยะห่างระหว่างแถวมากที่สุด (SRnmu) 0.4 เมตร

จากกราฟพบว่าจุดที่ลดพลังงานคลื่นได้มากที่สุดของประเภทเขื่อนแบบ 4 แถว จะอยู่ทางด้านบวกของกราฟที่ค่าระยะห่างระหว่างแถว 0.4 เมตร หรือกล่าวได้ว่าเขื่อนสามารถลดพลังงานคลื่นได้สูงสุดเมื่อค่าระยะห่างระหว่างแถวมากที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.5 การเปรียบเทียบค่าของตัวแปรจากการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (Space between Column SC)



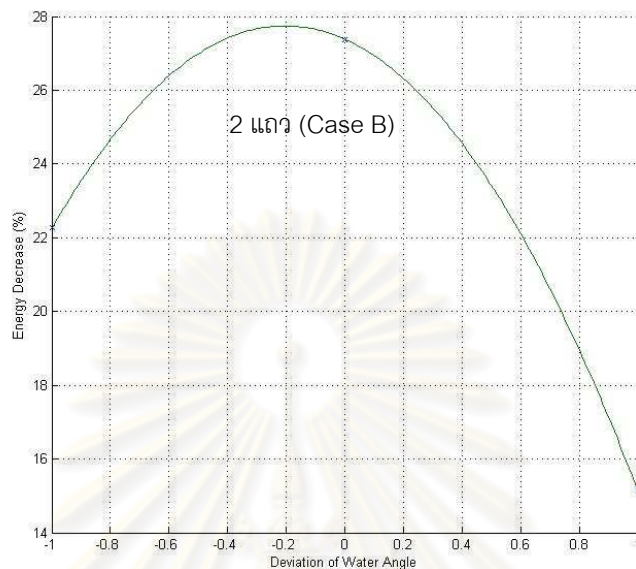
สมการในการแปลงค่าตัวแปรต้น คือ $[\text{ค่าทดสอบ} - 0.3] / 0.1 = \text{ค่าของตัวแปรใหม่}$

รูปที่ 4-5 ตัวอย่างกราฟเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นสำหรับเขื่อนแบบ 2 แถว เมื่อใช้ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด (SCnml) 0.2 เมตร ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มค่ากลาง (Share) 0.3 เมตร และค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มมากที่สุด (SCnmu) 0.4 เมตร

จากกราฟพบว่าจุดที่ลดพลังงานคลื่นได้มากที่สุดของประเภทเขื่อนแบบ 2 แถว จะอยู่ทางด้านลบของกราฟที่ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 0.2 เมตร หรือกล่าวได้ว่าเขื่อนสามารถลดพลังงานคลื่นได้สูงสุดเมื่อค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อย โดยกรณีเขื่อนแบบ 1, 3 และ 4 แถว มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับเขื่อนแบบ 2 แถว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.6 การเปรียบเทียบค่าของตัวแปรจากการเปลี่ยนแปลงค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อน (Wave Angle θW)

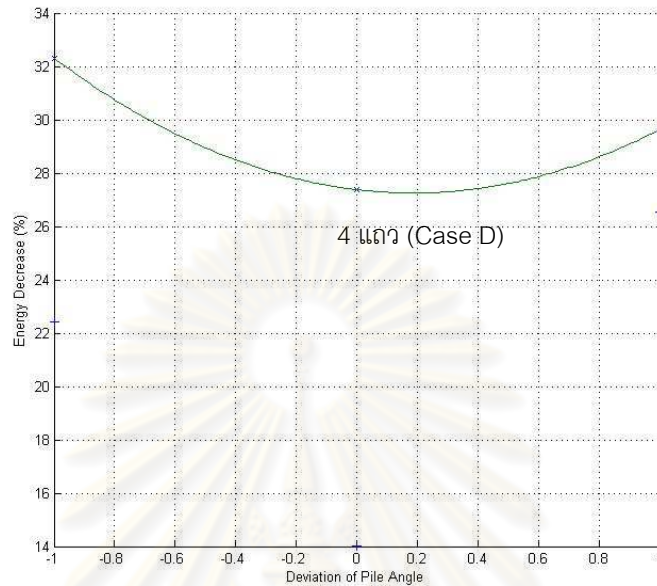


สมการในการแปลงค่าตัวแปรต้น คือ $[\text{ค่าทดสอบ} - 22.5] / 22.5 = \text{ค่าของตัวแปรใหม่}$

รูปที่ 4-6 ตัวอย่างกราฟเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นสำหรับเขื่อนแบบ 2 แถว เมื่อใช้ค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อน แคบที่สุด (θW_{nml}) 0 องศา ค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนค่ากลาง (Share) 22.5 องศา และค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนกว้างที่สุด (θW_{nmu}) 45 องศา

จากกราฟพบว่าจุดที่ลดพลังงานคลื่นได้มากที่สุดของประเภทเขื่อนแบบ 2 แถว จะอยู่ทางด้านลบของกราฟที่ค่าหรือกล่าวได้ว่าเขื่อนสามารถลดพลังงานคลื่นได้มากเมื่อมุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนค่อนข้างมาทางด้านกลาง ซึ่งคิดเป็นมุม 22.5 องศา

4.1.7 การเปรียบเทียบค่าของตัวแปรจากการเปลี่ยนแปลงค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถว (Pile Angle θ_P)



สมการในการแปลงค่าตัวแปรต้น คือ $[\text{ค่าทดสอบ} - 22.5] / 22.5 = \text{ค่าของตัวแปรใหม่}$

รูปที่ 4-7 ตัวอย่างกราฟเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นสำหรับเขื่อนแบบ 4 แถว เมื่อใช้ค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด (θ_{Pnml}) 0 องศา ค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวค่ากลาง (Share) 22.5 องศา และค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวกว้างที่สุด (θ_{Pnmu}) 45 องศา

จากกราฟพบว่าจุดที่ลดพลังงานคลื่นได้มากที่สุดของประเภทเขื่อนแบบ 2 แถว จะอยู่ทางด้านลบของกราฟในตำแหน่งที่ค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวมีค่า 22.5 องศา หรือกล่าวได้ว่าเขื่อนสามารถลดพลังงานคลื่นได้มากเมื่อมุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบลง

4.2 ผลการลดพลังงานคลื่นของตัวแปรคู่โดยการทดสอบและการคำนวณ

จากการหาแนวโน้มของกราฟดังหัวข้อ 4.1 ตำแหน่งหรือพิกัดจุดที่สามารถลดพลังงานคลื่นได้มากที่สุดตกอยู่บริเวณด้านใดของกราฟคือ ด้านขวามือ(ด้านบวก) และด้านซ้ายมือ(ด้านลบ) ค่านั้นจะถูกเลือกนำมาจับคู่กับตัวแปรอื่นที่มีค่าจากกราฟในลักษณะเดียวกัน ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3-6 และ 3-7 ในช่องสี่เหลี่ยมที่มีค่าของตัวแปรแต่ละตัวจับคู่กัน(ตัวอักษรที่ขีดเส้นใต้) โดยทำการเลือกการทดสอบในแต่ละช่องสี่เหลี่ยมมา 1 คู่จาก 4 คู่ ซึ่งค่าที่ได้จากกราฟสามารถจับเป็นคู่กันระหว่างตัวแปรทั้ง 7 ตัวแปร คือ ความสูงคลื่น(H) คาบคลื่น(T) ความลึกของน้ำ(D) ระยะห่างระหว่างแถว(SR) ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม(SC) มุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อน(θW) ค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถว (θP) โดยแสดงในตารางที่ 4-2 ดังนี้

ตารางที่ 4-2 เปอร์เซนต์การลดลงของพลังงานคลื่นเฉลี่ยสำหรับตัวแปรคู่

กรณี ชนิดเขื่อน	TIHu	DuHu	DuTI	SRuHu	SRITI
1 แถว (Case A)	45.14 ± 9.22	37.09 ± 6.49	27.61 ± 7.50	X	X
2 แถว (Case B)	36.32 ± 9.27	35.12 ± 6.84	36.14 ± 7.29	35.11 ± 7.84	26.09 ± 9.24
3 แถว (Case C)	48.16 ± 11.86	26.92 ± 10.47	34.80 ± 8.86	30.78 ± 7.96	18.38 ± 12.23
4 แถว (Case D)	43.55 ± 11.30	25.92 ± 5.94	36.43 ± 9.70	37.76 ± 9.27	41.11 ± 9.97

กรณี ชนิดเขื่อน	SRIDu	SCIHu	SCITI	SCIDu	SCISRI
1 แถว (Case A)	X	31.98 ± 9.88	27.94 ± 9.16	18.14 ± 9.63	X
2 แถว (Case B)	29.90 ± 8.46	31.80 ± 9.54	32.14 ± 8.81	28.49 ± 7.78	33.12 ± 8.46
3 แถว (Case C)	34.42 ± 8.67	31.14 ± 7.48	44.27 ± 9.39	28.53 ± 8.93	34.36 ± 10.89
4 แถว (Case D)	34.97 ± 9.00	53.27 ± 8.58	52.06 ± 8.90	34.25 ± 8.27	32.88 ± 7.99

ตารางที่ 4-2 เปอร์เซนต์การลดลงของพลังงานคลื่นเฉลี่ยสำหรับตัวแปรคู่ (ต่อ)

กรณี ชนิดเขื่อน	⊖WIHu	⊖WITI	⊖WIDu	⊖WISRI	⊖WISCI
1 แถว (Case A)	31.04 ± 9.35	32.06 ± 10.35	24.70 ± 10.71	X	29.78 ± 9.48
2 แถว (Case B)	37.99 ± 9.62	37.12 ± 9.03	20.82 ± 9.14	31.69 ± 9.36	36.50 ± 9.77
3 แถว (Case C)	36.64 ± 8.83	30.17 ± 9.39	26.09 ± 8.42	38.81 ± 8.73	31.01 ± 8.56
4 แถว (Case D)	20.17 ± 10.16	46.67 ± 9.79	31.88 ± 8.66	30.37 ± 8.92	35.45 ± 9.68

กรณี ชนิดเขื่อน	⊖PIHu	⊖PITI	⊖PuDu	⊖PISRu	⊖PISCI
1 แถว (Case A)	31.04 ± 9.35	37.84 ± 8.59	11.97 ± 9.59	X	26.21 ± 12.78
2 แถว (Case B)	33.79 ± 9.19	33.81 ± 7.80	27.24 ± 6.33	21.44 ± 12.65	27.69 ± 12.52
3 แถว (Case C)	34.37 ± 7.81	53.34 ± 9.06	24.14 ± 9.13	32.72 ± 8.72	27.05 ± 11.78
4 แถว (Case D)	37.86 ± 9.33	37.37 ± 9.94	27.10 ± 9.61	47.90 ± 10.77	22.38 ± 8.22

กรณี ชนิดเขื่อน	⊖PI⊖WI
1 แถว (Case A)	21.50 ± 8.94
2 แถว (Case B)	31.05 ± 10.71
3 แถว (Case C)	26.45 ± 7.43
4 แถว (Case D)	34.33 ± 8.87

หมายเหตุ กรณีที่มีเครื่องหมาย X หมายถึงไม่ได้ทำการทดสอบ หรือค่าผิดพลาดจากการทดสอบ

การวิเคราะห์ผลการทดสอบแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 แนวทางคือ แนวทางแรกใช้การเปรียบเทียบเปอร์เซนต์การลดลงของพลังงานคลื่นเมื่อผ่านแนวเขื่อนออกมาสำหรับทั้ง 4 แบบ โดยจำแนกเป็น 7 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ใช้การจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าของคลื่นสูงสุด(Hu) กลุ่มที่ 2 ใช้การจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด(TI) กลุ่มที่ 3 ใช้การจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าความลึกน้ำมากที่สุด(Du) กลุ่มที่ 4 ใช้การจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับตั้งค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด(SRI) กลุ่มที่ 5 ใช้การจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับตั้งค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) กลุ่มที่ 6 ใช้การจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับมุมที่คลื่นทำกับแนว

เชื่อมแคบที่สุด (θ_{WI}) และ กลุ่มที่ 7 ใช้การจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด (θ_{PI}) หลังจากนั้นจะใช้หลักการทางสถิติดูความแตกต่างระหว่างค่าของตัวแปรในแต่ละกลุ่มโดยจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ไม่รวมค่าการลดพลังงานคลื่นในกรณีที่มีค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถว (SR) กับ กลุ่มที่รวมค่าการลดพลังงานคลื่นในกรณีที่มีค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถว (SR) ซึ่งในท้ายที่สุดของแต่ละกลุ่มจะหาค่าของคู่ตัวแปรที่จับคู่กับเชื่อมชนิดใดให้ผลการลดพลังงานคลื่นที่สูงที่สุด แนวทางที่ 2 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อใช้เป็นพื้นฐานการตัดสินใจสร้างเชื่อมให้เหมาะสมกับการใช้งานและประหยัดงบประมาณในการก่อสร้าง โดยการเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นของเชื่อมแต่ละแบบกับงบประมาณที่ใช้ในการก่อสร้าง

4.3 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดลงของพลังงานคลื่นโดยการจำแนกออกเป็น 7 กลุ่ม

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ผลการทดสอบค่าจากตัวแปรต่าง ๆ ในตารางที่ 4-2 นำมาจัดเป็นกลุ่มซึ่งแบ่ง 7 กลุ่ม ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2 โดยผลการทดสอบจะแสดงเป็นตารางและลักษณะเปรียบเทียบด้วยกราฟแท่งดังนี้

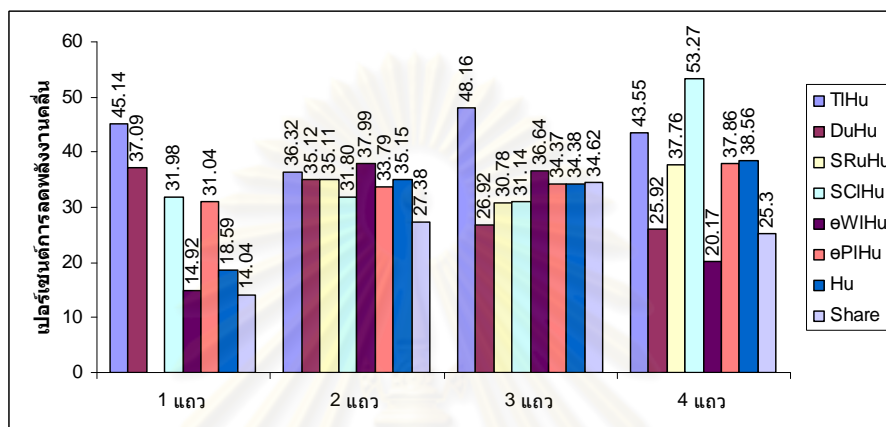
4.3.1 การจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าของคลื่นสูงที่สุด (Hu)

ตารางที่ 4-3 เปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยเนื่องจากการจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าของคลื่นสูงที่สุด (Hu)

กรณี ชนิดเชื่อม	TIHu	DuHu	SRuHu	SCIHu	θ_{WI} Hu	θ_{PI} Hu
1 แถว	45.14 ± 9.22	37.09 ± 6.49	X	31.98 ± 9.88	14.92 ± 6.16	31.04 ± 9.35
2 แถว	36.32 ± 9.27	35.12 ± 6.84	35.11 ± 7.84	31.80 ± 9.54	37.99 ± 9.62	33.79 ± 9.19
3 แถว	48.16 ± 11.86	26.92 ± 10.47	30.78 ± 7.96	31.14 ± 7.48	36.64 ± 8.83	34.37 ± 7.81
4 แถว	43.55 ± 11.30	25.92 ± 5.94	37.76 ± 9.27	53.27 ± 8.58	20.17 ± 10.16	37.86 ± 9.33

หมายเหตุ กรณีที่มีเครื่องหมาย X หมายถึงไม่ได้ทำการทดสอบ หรือค่าผิดพลาดจากการทดสอบ

ค่าที่ได้จากตาราง 4-3 สามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยการเขียนข้อมูลเปรียบเทียบในลักษณะของกราฟแท่งโดยแบ่งเป็น 4 กลุ่ม แยกตามจำนวนแถวตั้งแต่ 1 แถว ถึง 4 แถว และในแต่ละแถวจะแบ่งเป็นกรณีต่าง ๆ โดยเทียบกับค่าคลื่นสูงสุด(Hu) 0.15 เมตร และค่ากลาง(Share) ของทุกตัวแปร ดังนี้



รูปที่ 4-8 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นกับค่าคลื่นสูงสุด(Hu) 0.15 เมตร และค่ากลาง(Share) ของเขื่อนแต่ละแบบ

ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นของเขื่อนทั้ง 4 แบบ สำหรับการเปลี่ยนแปลงเมื่อให้ความสูงคลื่นสูงสุด(Hu) พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานของเขื่อนแต่ละแบบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่ากลาง(Share) ยกเว้นกรณีแบบ 3 แถว(Case C) ที่มีค่าเกือบจะเท่ากับค่ากลาง และเมื่อเพิ่มตัวแปรโดยนำมาจับคู่กับความสูงคลื่นสูงสุด เขื่อนแต่ละแบบกลับให้ค่าการตอบสนองต่อค่าที่เปลี่ยนแปลงไปได้มากน้อยแตกต่างกันกล่าวคือ แบบ 4 แถว (Case D) ค่าความสูงคลื่นสูงสุด(Hu) มีค่าเพิ่มขึ้นจากค่ากลาง(Share) โดยค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCIHu) เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลมากกว่าตัวแปรในกรณีอื่นขณะที่กรณีค่าความลึกน้ำมากที่สุด(DuHu) และกรณีค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด(θ WIHu) เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลน้อยเนื่องจากให้ค่าลดลงมากกว่าเดิมเมื่อเทียบกับค่าความสูงคลื่นสูงสุด(Hu) ในตอนแรก แบบ 3 แถว (Case C) ค่าความสูงคลื่นสูงสุด(Hu) และค่าตัวแปรอื่น ๆ ใกล้เคียงกับค่ากลาง(Share) ยกเว้นตัวแปรค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด(TIHu) ที่มีอิทธิพลมากกว่าตัวแปรอื่นเพราะสามารถให้ค่าเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานได้สูงที่สุดขณะที่กรณีอื่นค่าใกล้เคียงกับค่าความสูงคลื่นสูงสุด(Hu) แบบ 2 แถว (Case B) ถึงแม้ค่าความสูงคลื่นสูงสุด(Hu) จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่ากลาง(Share) แต่เมื่อพิจารณาตัวแปรอื่น ๆ กลับให้ค่าที่ใกล้เคียงค่าความสูงคลื่นสูงสุด(Hu) แสดงว่าตัวแปรอื่นมีอิทธิพล

น้อยต่อการลดพลังงานคลื่น แบบ 1 แถว (Case A) ค่าความสูงคลื่นสูงสุด(Hu) มีค่ามากกว่าค่ากลาง(Share) เพียงเล็กน้อยแต่เมื่อจับคู่กับตัวแปรอื่น ๆ กลับให้ค่าที่สูงกว่าค่าเดิมมากโดยแตกต่างจากแบบอื่น ๆ ซึ่งอาจจะตั้งเป็นข้อสังเกตคือ ตัวรับไปอยู่ ณ บริเวณที่เกิดปฏิบัติจากปรากฏการณ์การสั่นพ้องของคลื่น ทำให้ผลการวัดความสูงคลื่นอาจมีความคลื่อนได้

4.3.2 การจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด (TI)

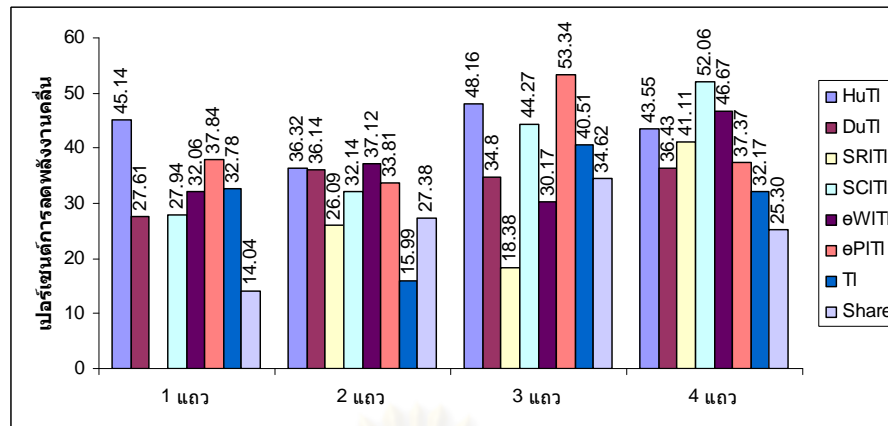
ตารางที่ 4-4 เปรียบเทียบการลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยเนื่องจากการจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด (TI)

กรณี ชนิดคลื่น	HuTI	DuTI	SRITI	SCITI	EWITI	EPITI
1 แถว	45.14 ± 9.22	27.61 ± 7.50	X	27.94 ± 9.16	32.06 ± 10.35	37.84 ± 8.59
2 แถว	36.32 ± 9.27	36.14 ± 7.29	26.09 ± 9.24	32.14 ± 8.81	37.12 ± 9.03	33.81 ± 7.80
3 แถว	48.16 ± 11.86	34.80 ± 8.86	18.38 ± 12.23	44.27 ± 9.39	30.17 ± 9.39	53.34 ± 9.06
4 แถว	43.55 ± 11.30	36.43 ± 9.70	41.11 ± 9.97	52.06 ± 8.90	46.67 ± 9.79	37.37 ± 9.94

หมายเหตุ กรณีที่มีเครื่องหมาย X หมายถึงไม่ได้ทำการทดสอบ หรือค่าผิดพลาดจากการทดสอบ

ค่าที่ได้จากตาราง 4-4 สามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยการเขียนข้อมูลเปรียบเทียบในลักษณะของกราฟแท่งโดยแบ่งเป็น 4 กลุ่ม แยกตามจำนวนแถวตั้งแต่ 1 แถว ถึง 4 แถว และในแต่ละแถวจะแบ่งเป็นกรณีต่าง ๆ โดยเทียบกับค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด (TI) 0.9 วินาที และค่ากลาง(Share) ของทุกตัวแปร ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-9 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลืนกับค่าคาบคลืนสั้นที่สุด (TI) 0.9 วินาที และค่ากลาง(Share) ของเขื่อนแต่ละแบบ

ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลืนทั้ง 4 แบบ สำหรับการเปลี่ยนแปลงเมื่อให้ค่าคาบคลืนสั้นที่สุด(TI) พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานของเขื่อนแต่ละแบบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่ากลาง(Share) ยกเว้นกรณีแบบ 2 แถว(Case B) ที่ค่าลดลง และเมื่อเพิ่มตัวแปรโดยนำมาจับคู่กับคาบคลืนสั้นที่สุด เขื่อนแต่ละแบบกลับให้ค่าการตอบสนองต่อค่าที่เปลี่ยนแปลงไปได้มากขึ้นแตกต่างกันกล่าวคือ แบบ 4 แถว (Case D) ทุกกรณีให้ค่ามากกว่าค่าเดิมทั้งหมด แตกต่างเพียงค่าเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานน้อยแตกต่างกันเช่น กรณีค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCITI) มีอิทธิพลมากที่สุดเนื่องจากค่าการลดพลังงานเพิ่มขึ้นเดิมเกือบ 20 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น แบบ 3 แถว (Case C) ค่าคาบคลืนสั้นที่สุด(TI) มีค่าเพิ่มขึ้นจากค่ากลาง(Share) เพียงเล็กน้อย แต่เมื่อจับคู่กับกรณีค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(θ PITI) ค่าความสูงคลืนสูงสุด(HuTI) และค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCITI) ทำให้ประสิทธิภาพของเขื่อนเพิ่มขึ้น แบบ 2 แถว (Case B) ค่าคาบคลืนสั้นที่สุด(TI) มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากลาง(Share) เมื่อจับคู่กับตัวแปรอื่น ๆ กลับให้ค่ามากกว่าค่าเดิมซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเขื่อนมีความสามารถรองรับคลืนเพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของตัวแปรอื่นมากกว่าค่าตัวแปรคาบคลืนสั้นเพียงตัวเดียว แบบ 1 แถว (Case A) ค่าคาบคลืนสั้นที่สุด(TI) มีค่าเพิ่มขึ้นจากค่ากลาง(Share) ถึง 18.74 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจับคู่กับกรณีค่าความสูงคลืนสูงสุด(HuTI) และค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(θ PITI) เปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลืนของเขื่อนมีค่าเพิ่มขึ้นกล่าวได้ว่าทั้งสองตัวแปรมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของเขื่อน

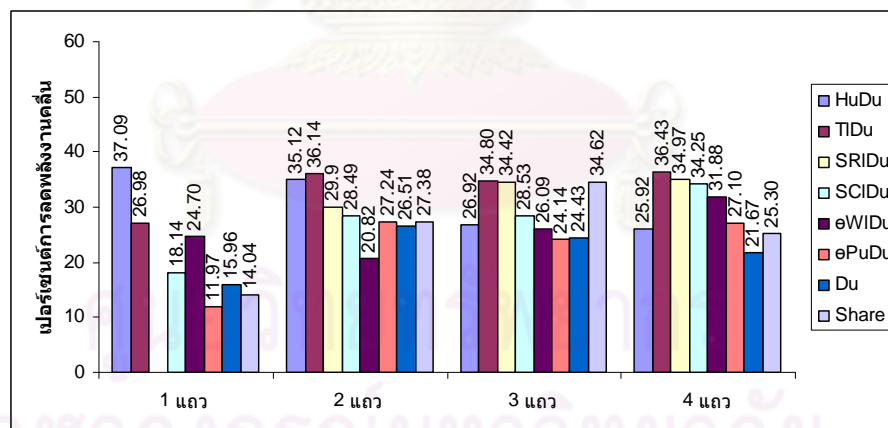
4.3.3 การจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าความลึกน้ำมากที่สุด (Du)

ตารางที่ 4-5 เปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยเนื่องจากการจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าความลึกน้ำมากที่สุด (Du)

กรณี ชนิดเขื่อน	HuDu	TIDu	SRIDu	SCIDu	eWIDu	ePuDu
1 แถว	37.09 ± 6.49	26.98 ± 6.74	X	18.14 ± 9.63	24.70 ± 10.71	11.97 ± 9.59
2 แถว	35.12 ± 6.84	36.14 ± 7.29	29.90 ± 8.46	28.49 ± 7.78	20.82 ± 9.14	27.24 ± 6.33
3 แถว	26.92 ± 10.47	34.80 ± 8.86	34.42 ± 8.67	28.53 ± 8.93	26.09 ± 8.42	24.14 ± 9.13
4 แถว	25.92 ± 5.94	36.43 ± 9.70	34.97 ± 9.00	34.25 ± 8.27	31.88 ± 8.66	27.10 ± 9.61

หมายเหตุ กรณีที่มีเครื่องหมาย X หมายถึงไม่ได้ทำการทดสอบ หรือค่าผิดพลาดจากการทดสอบ

ค่าที่ได้จากตาราง 4-5 สามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยการเขียนข้อมูลเปรียบเทียบในลักษณะของกราฟแท่งโดยแบ่งเป็น 4 กลุ่ม แยกตามจำนวนแถวตั้งแต่ 1 แถว ถึง 4 แถว และในแต่ละแถวจะแบ่งเป็นกรณีต่าง ๆ โดยเทียบกับค่าความลึกน้ำมากที่สุด (Du) 0.6 เมตร และค่ากลาง(Share) ของทุกตัวแปร ดังนี้



รูปที่ 4-10 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นกับค่าความลึกน้ำมากที่สุด (Du) 0.6 เมตร และค่ากลาง(Share) เขื่อนแต่ละแบบ

ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นทั้ง 4 แบบ สำหรับการเปลี่ยนแปลงเมื่อให้ความลึกน้ำมากที่สุด(Du) พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานของเขื่อน 1 แบบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่ากลาง(Share) คือ แบบ 1 แถว อีก 3 แบบมีค่าลดลง คือ แบบ 2 , 3 และ 4 แถว เมื่อ

เพิ่มตัวแปรโดยนำมาจับคู่กับความลึกน้ำมากที่สุด เชื้อนแต่ละแบบกลับให้ค่าการตอบสนองต่อค่าที่เปลี่ยนแปลงไปได้มากน้อยแตกต่างกันกล่าวคือ แบบ 4 แถว (Case D) ค่าความลึกน้ำมากที่สุด(Du) มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากลาง(Share) เมื่อจับคู่กับตัวแปรอื่น ๆ กลับให้ค่ามากกว่าค่าเดิมซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเชื้อนมีความสามารถทรงคลื่นเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากอิทธิพลของตัวแปรอื่นมากกว่าค่าตัวแปรค่าความลึกน้ำเพียงตัวเดียว แบบ 3 แถว (Case C) มีแนวโน้มเหมือนกับแบบ 4 แถว ต่างกันที่ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด(TIDu) และค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด(SRIDu) กับค่ากลาง(Share) อาจกล่าวได้ว่าตัวแปรอื่น ๆ ในกรณีนี้ตอบสนองได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับกรณีค่ากลาง(Share) แบบ 2 แถว (Case B) แนวโน้มคล้ายแบบ 4 แถว ต่างกันที่ค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเชื่อนแคบที่สุด(θ WIDu) ลดลงจากค่าความลึกน้ำมากที่สุด(Du) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าตัวแปรนี้อาจจะมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของเชื่อนน้อย แบบ 1 แถว (Case A) ค่าความสูงคลื่นสูงที่สุด(HuDu) มีอิทธิพลต่อการลดพลังงานของเชื่อนมากเพราะมีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นมากที่สุด รองลงมาเป็นค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด(TIDu) และ ค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด(SRIDu)

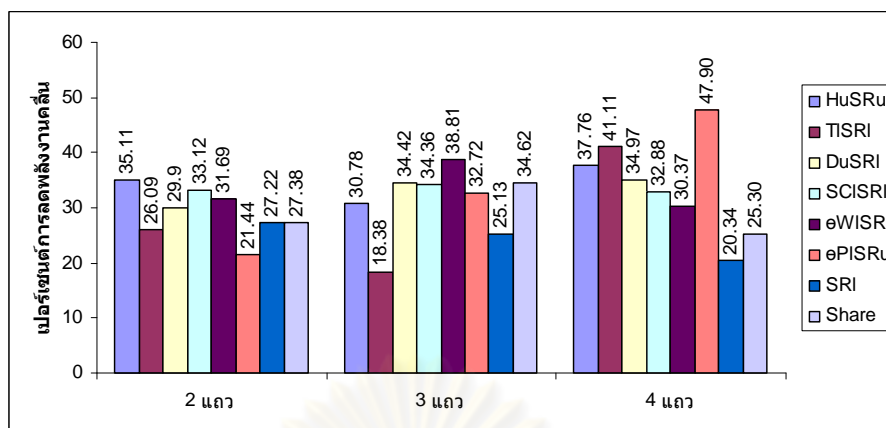
4.3.4 การจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด (SRI)

ตารางที่ 4-6 เปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยเนื่องจากการจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด (SRI)

กรณี ชนิดเชื่อน	HuSRu	TISRI	DuSRI	SCISRI	θ WISRI	θ PISRu
1 แถว	X	X	X	X	X	X
2 แถว	35.11 ± 7.84	26.09 ± 9.24	29.90 ± 8.46	33.12 ± 8.46	31.69 ± 9.36	21.44 ± 12.65
3 แถว	30.78 ± 7.96	18.38 ± 12.23	34.42 ± 8.67	34.36 ± 10.89	38.81 ± 8.73	32.72 ± 8.72
4 แถว	37.76 ± 9.27	41.11 ± 9.97	34.97 ± 9.00	32.88 ± 7.99	30.37 ± 8.92	47.90 ± 10.77

หมายเหตุ กรณีที่มีเครื่องหมาย X หมายถึงไม่ได้ทำการทดสอบ หรือค่าผิดพลาดจากการทดสอบ

ค่าที่ได้จากตาราง 4-6 สามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยการเขียนข้อมูลเปรียบเทียบในลักษณะของกราฟแท่งโดยแบ่งเป็น 4 กลุ่ม แยกตามจำนวนแถวตั้งแต่ 1 แถว ถึง 4 แถว และในแต่ละแถวจะแบ่งเป็นกรณีต่าง ๆ โดยเทียบกับค่าความกว้างระหว่างแถวน้อยที่สุด (SRI) 0.2 เมตร และค่ากลาง(Share) ของทุกตัวแปร ดังนี้



รูปที่ 4-11 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลืนกับค่าความกว้างระหว่างแถว น้อยที่สุด (SRI) 0.2 เมตร และค่ากลาง(Share) ของเขื่อนแต่ละแบบ

ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลืนทั้ง 3 แบบ สำหรับการเปลี่ยนแปลงเมื่อให้ค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด(SRI) พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานของเขื่อนทั้ง 3 แบบมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่ากลาง(Share) และเมื่อเพิ่มตัวแปรโดยนำมาจับคู่กับระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด เขื่อนแต่ละแบบกลับให้ค่าการตอบสนองต่อค่าที่เปลี่ยนแปลงไปได้มากน้อยแตกต่างกันกล่าวคือ แบบ 4 แถว(Case D) ทุกกรณีกลับให้ค่ามากกว่าค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด(SRI) โดยมีค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุดและระยะห่างระหว่างแถวมากที่สุด(θ PISRu) มีค่าสูงสุดอาจกล่าวได้ว่าตัวแปรอื่น ๆ ที่มาจับคู่จะมีอิทธิพลต่อการลดพลังงานคลืนมากกว่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด(SRI) เพียงตัวแปรเดียว แบบ 3 แถว (Case C) ค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด(SRI) ลดลงจากค่ากลาง(Share) คล้ายแบบ 4 แถว(Case D) ที่ตัวแปรอื่น ๆ มีอิทธิพลมากกว่า แต่ต่างกันตรงที่ค่ากลาง(Share) ให้ค่าสูงใกล้เคียงกับกรณีอื่น ๆ ยกเว้นกรณีค่ามุมที่คลืนทำมุมกับแนวเขื่อนแคบที่สุด(θ WISRI) ที่ค่ามากกว่าเล็กน้อย ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าปัจจัยที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกรณีต่าง ๆ ที่จับคู่กับค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด(SRI) มีผลต่อการลดพลังของเขื่อนได้น้อย แบบ 2 แถว (Case B) มีเพียง 2 กรณีที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานลดลงจากค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด(SRI) คือ ค่าคาบคลืนสั้นที่สุด(TISRI) และค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุดและระยะห่างระหว่างแถวมากที่สุด(θ PISRu) ซึ่งกรณีที่เหลือมีค่าใกล้เคียงกับค่ากลางจึงอาจจะกลายเป็นข้อสังเกตคล้ายกับแบบ 3 แถว

4.3.5 การจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด (SCI)

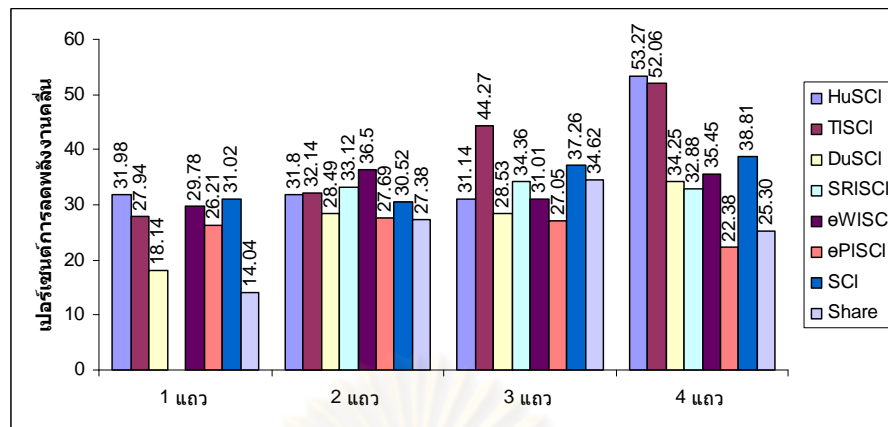
ตารางที่ 4-7 เปอร์เซนต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยเนื่องจากการจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด (SCI)

กรณี ชนิดเขื่อน	HuSCI	TISCI	DuSCI	SRISCI	EWISCI	EPISCI
1 แถว	31.98 ± 9.88	27.94 ± 9.16	18.14 ± 9.63	X	29.78 ± 9.48	26.21 ± 12.78
2 แถว	31.80 ± 9.54	32.14 ± 8.81	28.49 ± 7.78	33.12 ± 8.46	36.50 ± 9.77	27.69 ± 12.52
3 แถว	31.14 ± 7.48	44.27 ± 9.39	28.53 ± 8.93	34.36 ± 10.89	31.01 ± 8.56	27.05 ± 11.78
4 แถว	53.27 ± 8.58	52.06 ± 8.90	34.25 ± 8.27	32.88 ± 7.99	35.45 ± 9.68	22.38 ± 8.22

หมายเหตุ กรณีที่มีเครื่องหมาย X หมายถึงไม่ได้ทำการทดสอบ หรือค่าผิดพลาดจากการทดสอบ

ค่าที่ได้จากตาราง 4-7 สามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยการเขียนข้อมูลเปรียบเทียบในลักษณะของกราฟแท่งโดยแบ่งเป็น 4 กลุ่ม แยกตามจำนวนแถวตั้งแต่ 1 แถว ถึง 4 แถว และในแต่ละแถวจะแบ่งเป็นกรณีต่าง ๆ โดยเทียบกับค่าความกว้างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) 0.2 เมตร และค่ากลาง(Share) ของทุกตัวแปร ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-12 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นกับค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) 0.2 เมตร และค่ากลาง(Share) ของเขื่อนแต่ละแบบ

ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นทั้ง 4 แบบ สำหรับการเปลี่ยนแปลงเมื่อให้ระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานของเขื่อนทั้ง 4 แบบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่ากลาง(Share) และเมื่อเพิ่มตัวแปรโดยนำมาจับคู่กับค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด เขื่อนแต่ละแบบกลับให้ค่าการตอบสนองต่อค่าที่เปลี่ยนแปลงไปได้มากน้อยแตกต่างกันกล่าวคือ แบบ 4 แถว(Case D) ค่าความกว้างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) มีค่ามากกว่าค่ากลาง(Share) ถึง 13.51 เปอร์เซ็นต์ และมากกว่าทุกกรณี ยกเว้นกรณีค่าความสูงคลื่นสูงสุด(HuSCI) และค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด(TISCI) ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าข้างต้น 14.46 และ 13.25 เปอร์เซ็นต์ กล่าวได้ว่าตัวแปรทั้ง 2 กรณีข้างต้นมีอิทธิพลต่อการลดพลังงานของเขื่อนได้ดีกว่ากรณีอื่น ๆ แบบ 3 แถว (Case C) ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากค่ากลาง(Share) ซึ่งกรณีค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด(TISCI) มีอิทธิพลต่อการลดพลังงานของเขื่อนได้มากกว่ากรณีอื่น ๆ เพราะค่าเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นจากตัวแปรต่าง ๆ กลับลดลงต่ำกว่าค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) ทั้งหมด แบบ 2 แถว (Case B) ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) เพิ่มขึ้นจากค่ากลาง(Share) เล็กน้อย และกรณีอื่น ๆ มีค่าใกล้เคียงกับค่าข้างต้นอาจกล่าวได้ว่าตัวแปรต่าง ๆ มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของเขื่อนไม่ค่อนมาก แบบ 1 แถว (Case A) ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) ให้ค่ามากกว่าค่ากลาง(Share) ถึง 16.98 เปอร์เซ็นต์ แต่ภาพรวมค่าจากตัวแปรต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกับค่าข้างต้นซึ่งอาจกล่าวได้ว่าตัวแปรต่าง ๆ มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของเขื่อนน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI)

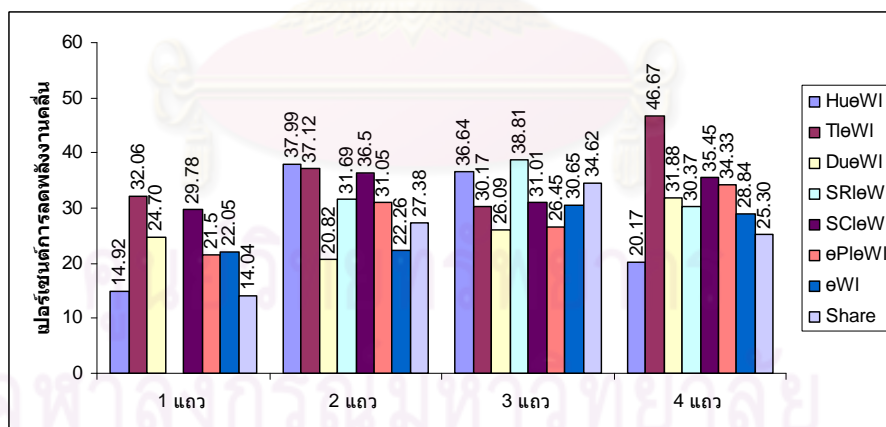
4.3.6 การจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด (θ_{WI})

ตารางที่ 4-8 เปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยเนื่องจากการจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด (θ_{WI})

กรณี ชนิดเขื่อน	HueWI	TleWI	DueWI	SRIeWI	SCleWI	ePIeWI
1 แถว	14.92 ± 6.16	32.06 ± 10.35	24.70 ± 10.71	X	29.78 ± 9.48	21.50 ± 8.94
2 แถว	37.99 ± 9.62	37.12 ± 9.03	20.82 ± 9.14	31.69 ± 9.36	36.50 ± 9.77	31.05 ± 10.71
3 แถว	36.64 ± 8.83	30.17 ± 9.39	26.09 ± 8.42	38.81 ± 8.73	31.01 ± 8.56	26.45 ± 7.43
4 แถว	20.17 ± 10.16	46.67 ± 9.79	31.88 ± 8.66	30.37 ± 8.92	35.45 ± 9.68	34.33 ± 8.87

หมายเหตุ กรณีที่มีเครื่องหมาย X หมายถึงไม่ได้ทำการทดสอบ หรือค่าผิดพลาดจากการทดสอบ

ค่าที่ได้จากตาราง 4-8 สามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยการเขียนข้อมูลเปรียบเทียบในลักษณะของกราฟแท่งโดยแบ่งเป็น 4 กลุ่ม แยกตามจำนวนแถวตั้งแต่ 1 แถว ถึง 4 แถว และในแต่ละแถวจะแบ่งเป็นกรณีต่าง ๆ โดยเทียบกับค่ามุมที่ทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด (θ_{WI}) 0 องศา และค่ากลาง (Share) ของทุกตัวแปร ดังนี้



รูปที่ 4-13 การเปรียบเทียบการลดลงของพลังงานคลื่นเมื่อจับคู่ค่าตัวแปรอื่น ๆ กับค่ามุมที่ทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด (θ_{WI}) 0 องศา และค่ากลาง (Share) ของเขื่อนแต่ละแบบ

ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นทั้ง 4 แบบ สำหรับการเปลี่ยนแปลงเมื่อให้ค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด(θ_{WI}) พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานของเขื่อน 2 แบบ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่ากลาง(Share) คือ แบบ 1 แถวและ 4 แถว อีก 2 แบบมีค่าลดลง คือ แบบ 2 แถว และ 3 แถว และเมื่อเพิ่มตัวแปรโดยนำมาจับคู่กับทิศทางของน้ำที่เข้าสู่แนวเขื่อนแคบที่สุด เขื่อนแต่ละแบบกลับให้ค่าการตอบสนองต่อค่าที่เปลี่ยนแปลงไปได้มากน้อยแตกต่างกัน กล่าวคือ แบบ 4 แถว (Case D) ค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด(θ_{WI}) มีค่าเพิ่มขึ้นจากค่ากลาง(Share) เล็กน้อย โดยเกือบทุกกรณีมีค่าเพิ่มขึ้นยกเว้นกรณีค่าความสูงคลื่นสูงสุด($Hu_{\theta_{WI}}$) กลับให้ค่าที่ลดลง และกรณีค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด($Tl_{\theta_{WI}}$) มีค่าเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานมากที่สุด เพิ่มขึ้นจากค่าเดิมถึง 17.83 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งกล่าวได้ว่าค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด($Tl_{\theta_{WI}}$) มีอิทธิพลต่อการลดพลังงานคลื่นของเขื่อนมากที่สุด แบบ 3 แถว (Case C) ค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด(θ_{WI}) ลดลงจากค่ากลาง(Share) เล็กน้อย ซึ่งค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด($SRI_{\theta_{WI}}$) และ ค่าความสูงคลื่นสูงสุด($Hu_{\theta_{WI}}$) มีค่าสูงกว่าค่าข้างต้นแต่ไม่มากจึงอาจกล่าวได้ว่าค่าของตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงไปมีอิทธิพลต่อการลดพลังงานคลื่นน้อย แบบ 2 แถว (Case B) มีเพียงกรณีเดียวที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานลดลงจากค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด(θ_{WI}) คือ ค่าความลึกน้ำมากที่สุด($Du_{\theta_{WI}}$) เท่านั้น กรณีที่เหลือมีค่าสูงกว่าค่าเดิมและสูงกว่าค่ากลาง(Share) โดยค่าความสูงคลื่นสูงสุด($Hu_{\theta_{WI}}$) มีค่าการลดพลังงานสูงสุด แบบ 1 แถว (Case A) ค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด(θ_{WI}) มีค่าสูงกว่าค่ากลาง โดยกรณีอื่น ๆ มีค่าใกล้เคียงกับค่าข้างต้นยกเว้นกรณีค่าความสูงคลื่นสูงสุด($Hu_{\theta_{WI}}$) ที่ค่าลดลงกว่าเดิมซึ่งใกล้เคียงกับค่ากลาง และมีค่าความยาวคลื่นสั้นที่สุด($Tl_{\theta_{WI}}$) มีอิทธิพลต่อการลดพลังงานคลื่นสูงสุด

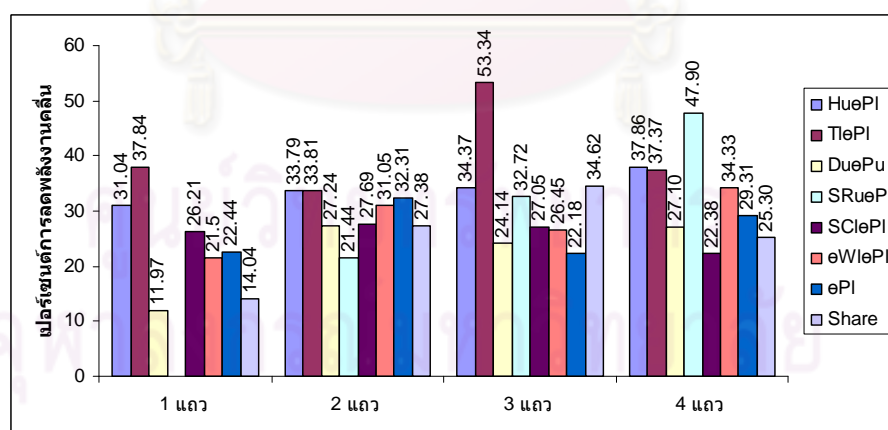
4.3.7 การจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(θ PI)

ตารางที่ 4-9 เปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยเนื่องจากการจับคู่ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับตั้งค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(θ PI)

กรณีชนิดเขื่อน	Hu θ PI	Tl θ PI	Du θ Pu	SRu θ PI	SCl θ PI	eWl θ PI
1 แถว	31.04 \pm 9.35	37.84 \pm 8.59	11.97 \pm 9.59	X	26.21 \pm 12.78	21.50 \pm 8.94
2 แถว	33.79 \pm 9.19	33.81 \pm 7.80	27.24 \pm 6.33	21.44 \pm 12.65	27.69 \pm 12.52	31.05 \pm 10.71
3 แถว	34.37 \pm 7.81	53.34 \pm 9.06	24.14 \pm 9.13	32.72 \pm 8.72	27.05 \pm 11.78	26.45 \pm 7.43
4 แถว	37.86 \pm 9.33	37.37 \pm 9.94	27.10 \pm 9.61	47.90 \pm 10.77	22.38 \pm 8.22	34.33 \pm 8.87

หมายเหตุ กรณีที่มีเครื่องหมาย X หมายถึงไม่ได้ทำการทดสอบ หรือค่าผิดพลาดจากการทดสอบ

ค่าที่ได้จากตาราง 4-9 สามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยการเขียนข้อมูลเปรียบเทียบในลักษณะของกราฟแท่งโดยแบ่งเป็น 4 กลุ่ม แยกตามจำนวนแถวตั้งแต่ 1 แถว ถึง 4 แถว และในแต่ละแถวจะแบ่งเป็นกรณีต่าง ๆ โดยเทียบกับค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(θ PI) 0 องศา และค่ากลาง(Share) ของทุกตัวแปร ดังนี้



รูปที่ 4-14 การเปรียบเทียบการลดลงของพลังงานคลื่นเมื่อจับคู่ค่าตัวแปรอื่น ๆ กับค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(θ PI) 0 องศา และแคบที่สุด(θ PI) 0 องศาของเขื่อนแต่ละแบบ

ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นทั้ง 4 แบบ สำหรับการเปลี่ยนแปลงเมื่อให้ค่าระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด (θ PI) พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานของเขื่อนแต่ละแบบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่ากลาง(Share) ยกเว้นกรณีแบบ 3 แถว(Case C) ที่มีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มตัวแปรโดยนำมาจับคู่กับมุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด เขื่อนแต่ละแบบกลับให้ค่าการตอบสนองต่อค่าที่เปลี่ยนแปลงไปได้มากน้อยแตกต่างกัน กล่าวคือ แบบ 4 แถว (Case D) กรณีค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด (θ PI) มีค่าเพิ่มขึ้นจากค่ากลาง(Share) เล็กน้อย โดยเกือบทุกกรณีมีค่าเพิ่มขึ้นยกเว้นกรณีค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI θ PI) และค่าความลึกน้ำมากที่สุด(Du θ Pu) ที่มีค่าลดลง สำหรับกรณีค่าระยะห่างระหว่างแถวมากที่สุด(SRu θ PI) เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงเพราะมีค่าเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานสูงที่สุด แบบ 3 แถว (Case C) กรณีค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด (θ PI) มีค่าลดลงจากค่ากลาง(Share) ถึง 12.44 เปอร์เซ็นต์ ถึงแม้กรณีอื่น ๆ ที่มีค่าสูงกว่าค่าข้างต้น แต่เกือบทุกกรณียังให้ค่าได้ต่ำกว่าค่ากลางซึ่งอาจกล่าวได้ว่าค่าตัวแปรในกรณีอื่น ๆ มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของเขื่อนในการลดพลังงานคลื่นมากกว่าตัวแปรค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(θ Pnml) แต่ยังไม่น้อยกว่าค่ากลาง ยกเว้นกรณีค่าความยาวคลื่นสั้นที่สุด(TI θ PI) ที่เขื่อนตอบสนองต่อกรณีนี้ได้ดีที่สุด ซึ่งค่าที่ได้มากกว่าค่ากลาง(Share) และให้ค่าสูงที่สุด แบบ 2 แถว (Case B) มีเพียง 2 กรณีที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานเพิ่มขึ้นจากค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(θ PI) คือ ค่าความยาวคลื่นสั้นที่สุด(TI θ PI) และค่าความสูงคลื่นสูงสุด(Hu θ PI) เท่านั้นซึ่งก็ใกล้เคียงกัน อาจกล่าวได้ว่าตัวแปรอื่น ๆ นอกจากสองตัวแปรนี้มีอิทธิพลน้อยกว่าตัวแปรข้างต้น แบบ 1 แถว (Case A) ค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(θ PI) มีค่ามากกว่าค่ากลาง(Share) ซึ่งมีเพียงกรณีค่าความลึกน้ำมากที่สุด(Du θ Pu) ที่ให้ค่าต่ำกว่าค่าเดิมมาก ขณะที่กรณีอื่น ๆ กลับมีค่าใกล้เคียงหรือมากขึ้นโดยเฉพาะค่าความยาวคลื่นสั้นที่สุด(TI θ PI) เป็นค่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของเขื่อนในการลดพลังงานคลื่นเพราะให้ค่าการลดพลังงานสูงที่สุด

ข้อสังเกตผลการทดสอบสำหรับ 1 แถว ในบางกราฟเช่น กราฟที่ 4.8 , 4.9 , 4.10 , 4.12 และ 4.14 ค่าเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นสูงมากเมื่อเทียบกับค่ากลาง ดังเช่นกรณีที่ค่าความสูงคลื่นสูงสุด(Hu) ในกราฟที่ 4.8 มีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานมากกว่ากรณีต่าง ๆ ของ 2 และ 4 แถว หรือกรณีค่าความยาวคลื่นสั้นที่สุด(TI) มีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานมากกว่า 3 และ 4 แถวเป็นต้น ทั้งนี้ อาจะเกิดมาจากการแทรกสอดของคลื่นสะท้อนกระทำทำให้เกิดคลื่นที่เรียกปรากฏการณ์ว่า การสั่นพ้องของคลื่น(Resonance) และตัวรับไปอยู่ยังบริเวณที่การขึ้นลงของยอดคลื่นน้อย ๆ หรือที่เรียกว่า บริเวณที่เป็นปฏิบัพ(Antinodes) ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้การหาค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของคลื่นจากทดสอบคลาดเคลื่อนได้

4.4 การเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบตัวแปรคู่

หลังจากวิเคราะห์ด้วยการเขียนข้อมูลเปรียบเทียบในลักษณะของกราฟแท่งโดยแบ่งเป็น 4 กลุ่ม แยกตามจำนวนแถวตั้งแต่ 1 แถว ถึง 4 แถว โดยแต่ละแถวจะแบ่งเป็นกรณีต่าง ๆ ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบจำเป็นต้องอาศัยหลักการทางสถิติแบบการออกแบบสุ่มสมบูรณ์(Complete Randomized Design หรือ CRD) มาเป็นเครื่องมือในการแจกแจงผลโดยการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นที่ได้จากตัวแปรต่าง ๆ ของเขื่อนแต่ละแบบที่อยู่ในกลุ่มของตัวหลักทั้ง 7 กลุ่มตัวแปร คือ กลุ่มของค่าคลื่นสูงสุด(Hu) กลุ่มค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด(TI) กลุ่มค่าความลึกน้ำมากที่สุด(Du) กลุ่มค่าความกว้างระหว่างแถวน้อยที่สุด(SRI) กลุ่มค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) กลุ่มค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด(θ WI) และกลุ่มค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(θ PI)

การเปรียบเทียบค่าจะแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดแรกจะเปรียบเทียบค่าด้วยหลักการทางสถิติของเขื่อนทั้ง 4 แบบโดยไม่รวมค่าการลดพลังงานคลื่นในกรณีที่มีค่าตัวแปรความกว้างระหว่างแถว(SR) ชุดที่สองจะเปรียบเทียบด้วยหลักการทางสถิติของเขื่อน 3 แบบ คือ 2, 3 และ 4 แถว โดยรวมค่าการลดพลังงานคลื่นในกรณีที่มีค่าตัวแปรความกว้างระหว่างแถว(SR) จากนั้นจะเลือกตัวแปรที่มีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นสูงสุด 7 ตัวแปร นำมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาค่าสูงสุดทั้งนี้ที่เลือกเพียง 7 ตัวแปร เนื่องจากโปรแกรมสามารถคำนวณการเปรียบเทียบตัวอย่างได้เพียงครั้งละ 50 ตัวอย่าง ขั้นตอนถัดมาจะนำตัวแปรทั้ง 7 ตัวแปรของแต่ละกลุ่มมาเปรียบเทียบกันอีกครั้งเพื่อหาชนิดของเขื่อนแบบใดที่จับคู่กับตัวแปรชนิดใดที่มีอิทธิพลต่อการลดพลังงานคลื่นมากที่สุด ซึ่งแสดงเป็นหัวข้อดังนี้

4.4.1 การเปรียบเทียบค่าของเขื่อนทั้ง 4 แบบโดยไม่รวมค่าการลดพลังงานคลื่นในกรณีที่มีค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถว(SR)

ผลจากการเปรียบเทียบข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติซึ่งแสดงเป็นตารางสำหรับตัวแปรทั้ง 6 กลุ่ม และค่าการลดพลังงานที่ได้จะคัดเลือกมาจากค่าที่มากที่สุด 7 อันดับแสดงในตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 เปอร์เซนต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยกรณีที่ไม่มีค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถว(SR)

ลำดับ	Hu		TI		Du	
	กรณี	เปอร์เซ็นต์	กรณี	เปอร์เซ็นต์	กรณี	เปอร์เซ็นต์
1	D_SCIHu ⁱ	53.27 ± 8.58	C_θPITH ^h	53.34 ± 9.06	A_HuDu ^h	37.09 ± 6.49
2	C_TIHu ^{hi}	48.16 ± 11.86	D_SCITh ^{gh}	52.06 ± 8.90	D_TIDu ^h	36.43 ± 9.70
3	A_TIHu ^{gh}	45.14 ± 9.22	C_HuTh ^{fgh}	48.16 ± 11.86	B_TIDu ^h	36.14 ± 7.29
4	D_TIHu ^{fgh}	43.55 ± 11.30	D_θWITh ^{fgh}	46.67 ± 9.79	B_HuDu ^{gh}	35.12 ± 6.84
5	B_θWIHu ^{efg}	37.99 ± 9.62	A_TIHu ^{efgh}	45.14 ± 9.22	C_TIDu ^{gh}	34.80 ± 8.86
6	D_θPIHu ^{efg}	37.86 ± 9.33	C_SCITh ^{defg}	44.27 ± 9.39	D_SCIDu ^{fgh}	34.25 ± 8.27
7	A_DuHu ^{ef}	37.09 ± 6.49	D_HuTh ^{def}	43.55 ± 11.30	D_θWIDu ^{efgh}	31.88 ± 8.66

ตารางที่ 4-10 เปอร์เซนต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยกรณีที่ไม่มีค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถว(SR) (ต่อ)

ลำดับ	SCI		θWI		θPI	
	กรณี	เปอร์เซ็นต์	กรณี	เปอร์เซ็นต์	กรณี	เปอร์เซ็นต์
1	D_HuSCI ⁱ	53.27 ± 8.58	D_TIθWh ^h	46.67 ± 9.79	C_TIθPI ^g	53.34 ± 9.06
2	D_TISCI ^{hi}	52.06 ± 8.90	B_HuθWgh ^{gh}	37.99 ± 9.62	D_HuθPI ^f	37.86 ± 9.33
3	C_TISCI ^{gh}	44.27 ± 9.39	B_TIθWg ^g	37.12 ± 9.03	A_TIθPI ^f	37.84 ± 8.59
4	B_θWISCI ^{fg}	36.50 ± 9.77	C_HuθWfg ^{fg}	36.64 ± 8.83	D_TIθPI ^f	37.37 ± 9.94
5	D_θWISCI ^{ef}	35.45 ± 9.68	B_SCIθWfg ^{fg}	36.50 ± 9.77	C_HuθPI ^{ef}	34.37 ± 7.81
6	D_DuSCI ^{def}	34.25 ± 8.27	D_SCIθWfg ^{fg}	35.45 ± 9.68	D_θWlθPI ^{ef}	34.33 ± 8.87
7	B_TISCI ^{cdef}	32.14 ± 8.81	D_θPIθWefg ^{efg}	34.33 ± 8.87	B_TIθPI ^{def}	33.81 ± 7.80

ผลจากตารางที่ 4-10 จะแยกวิเคราะห์ออกไปตามกลุ่มตัวแปรหลัก ซึ่งจะดูค่ามากที่สุดของแต่ละกลุ่มโดยผลการวิเคราะห์มีดังนี้

ในกลุ่มของค่าคลื่นสูงที่สุด(Hu) ค่าที่มากที่สุดคือ กรณีเขื่อนแบบ 4 แถว ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุดและความสูงคลื่นสูงที่สุด(D_SCIHu) มีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นสูงที่สุด 53.27 ± 8.58 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าข้างต้นแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับกรณีในลำดับที่ 3 , 4 , 5 , 6 , 7 แต่ไม่แตกต่างกับลำดับที่ 2 กรณีเขื่อนแบบ 3 แถว ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดและความสูงคลื่นสูงที่สุด(C_TIHu) ลดพลังงานได้ 48.16 ± 11.86 เปอร์เซ็นต์

ในกลุ่มของค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด(TI) ค่าที่มากที่สุดคือ กรณีเขื่อนแบบ 3 แถว ค่ามุมระหว่างมูมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด(C_θPITI) มีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นสูงที่สุด 53.34 ± 9.06 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าข้างต้นแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับกรณีในลำดับที่ 6 , 7 แต่ไม่แตกต่างกับลำดับที่ 2 , 3 , 4 , 5 กรณีเขื่อนแบบ 4 แถว ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด(D_SCITI) เขื่อนแบบ 3 แถว ค่าความสูงคลื่นสูงที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด(C_HuTI) เขื่อนแบบ 4 แถว ค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด(D_θWITI) เขื่อนแบบ 1 แถว ค่าความสูงคลื่นสูงที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด(A_HuTI) ลดพลังงานได้ 52.06 ± 8.90 48.16 ± 11.86 46.67 ± 9.79 และ 45.14 ± 9.22 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ในกลุ่มของค่าความลึกน้ำมากที่สุด(Du) ค่าที่มากที่สุดคือ กรณีเขื่อนแบบ 1 แถว ค่าความสูงคลื่นสูงที่สุดและความลึกของน้ำมากที่สุด(A_HuDu) มีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นสูงที่สุด 37.09 ± 6.49 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่แตกต่างกับลำดับที่ 2 , 3 , 4 , 5 , 6 , 7 กรณีเขื่อนแบบ 4 แถว ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดและค่าความลึกของน้ำมากที่สุด(D_TIDu) กรณีเขื่อนแบบ 2 แถว ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดและค่าความลึกของน้ำมากที่สุด(B_TIDu) กรณีเขื่อนแบบ 2 แถว ค่าความสูงคลื่นสูงที่สุดและความลึกของน้ำมากที่สุด(B_HuDu) กรณีเขื่อนแบบ 3 แถว ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดและค่าความลึกของน้ำมากที่สุด(C_TIDu) กรณีเขื่อนแบบ 4 แถว ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุดและความลึกของน้ำมากที่สุด(D_SCIDu) กรณีเขื่อนแบบ 4 แถว ค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุดและความลึกของน้ำมากที่สุด(D_θWIDu) ลดพลังงานได้ 36.43 ± 9.70 36.14 ± 7.29 35.12 ± 6.84 34.80 ± 8.86 34.25 ± 8.27 และ 31.88 ± 8.66 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ในกลุ่มของค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) ค่าที่มากที่สุดคือ กรณีเขื่อนแบบ 4 แถว ค่าความสูงคลื่นสูงที่สุดและระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(D_HuSCI) มีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นสูงที่สุด 53.27 ± 8.58 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าข้างต้นแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับกรณีในลำดับที่ 3 , 4 , 5 , 6 , 7

แต่ไม่แตกต่างกับลำดับที่ 2 กรณี เชื้อแบบ 4 แถว ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด และคาบคลื่นสั้นที่สุด(D_TISCI) ลดพลังงานได้ 52.06 ± 8.90 เปอร์เซ็นต์

ในกลุ่มของค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด(θ WI) ค่าที่มากที่สุดคือ กรณี เชื้อแบบ 4 แถว ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดและมุมสำหรับทิศทางของน้ำที่เข้าสู่แนวเขื่อนแคบที่สุด(D_TI θ WI) มีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นสูงที่สุด 46.67 ± 9.79 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าข้างต้นแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับกรณีในลำดับที่ 3 , 4 , 5 , 6 , 7 แต่ไม่แตกต่างกับลำดับที่ 2 กรณี เชื้อแบบ 2 แถว ค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุดและความสูงคลื่นสูงที่สุด(B_Hu θ WI) ลดพลังงานได้ 37.99 ± 9.62 เปอร์เซ็นต์

ในกลุ่มของค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(θ PI) ค่าที่มากที่สุดคือ กรณีเชื้อแบบ 3 แถว ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดและมุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(C_TI θ PI) มีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นสูงที่สุด 53.34 ± 9.06 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าข้างต้นแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับกรณีในลำดับที่ 2 , 3 , 4 , 5 , 6 , 7

จากตารางที่ 4-10 เมื่อนำทุกกรณีของแต่ละกลุ่มมาเปรียบเทียบกันจะทำให้ทราบผลว่าเชื้อแบบใดที่จับคู่กับตัวแปรคู่ใดที่ให้ผลในการลดพลังงานคลื่นมากที่สุดซึ่งแสดงในตาราง 4-11 ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-11 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยสำหรับทุกกรณีของ
แต่ละกลุ่มจากตารางที่ 4-10

ลำดับ	กรณี	เปอร์เซ็นต์	ลำดับ	กรณี	เปอร์เซ็นต์
1	C_θPITl ^h	53.34 ± 9.06	15	C_HuθWl ^{abc}	36.64 ± 8.83
2	D_SCIHu ^{gh}	53.27 ± 8.58	16	B_θWISCI ^{abc}	36.50 ± 9.77
3	D_SCITl ^{fgh}	52.06 ± 8.90	17	D_TIDu ^{abc}	36.43 ± 9.70
4	C_HuTl ^{efgh}	48.16 ± 11.86	18	B_TIDu ^{abc}	36.14 ± 7.29
5	D_θWITl ^{efgh}	46.67 ± 9.79	19	D_θWISCI ^{ab}	35.45 ± 9.68
6	A_HuTl ^{defg}	45.14 ± 9.22	20	B_HuDu ^a	35.12 ± 6.84
7	C_SCITl ^{cdef}	44.27 ± 9.39	21	C_TIDu ^a	34.80 ± 8.86
8	D_HuTl ^{bcde}	43.55 ± 11.30	22	C_HuθPI ^a	34.37 ± 7.81
9	B_θWlHu ^{abcd}	37.99 ± 9.62	23	D_θWlθPI ^a	34.33 ± 8.87
10	D_θPIHu ^{abcd}	37.86 ± 9.33	24	D_DuSCI ^a	34.25 ± 8.27
11	A_TlθPI ^{abcd}	37.84 ± 8.59	25	B_TlθPI ^a	33.81 ± 7.80
12	D_TlθPI ^{abcd}	37.37 ± 9.94	26	B_TISCI ^a	32.14 ± 8.81
13	B_TlθWl ^{abcd}	37.12 ± 9.03	27	D_θWIDu ^a	31.88 ± 8.66
14	A_DuHu ^{abcd}	37.09 ± 6.49			

หมายเหตุ กรณีที่เหมือนกันเช่น C_θPITl กับ C_TlθPI จะนับรวมเป็นกรณีเดียว

ผลจากตารางที่ 4-11 ค่าที่ลดพลังงานมากที่สุดคือ กรณีเขื่อนแบบ 3 แถว ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดและมุมระหว่างมูมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(C_TlθPI) มีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นสูงที่สุด 53.34 ± 9.06 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าข้างต้นแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) กับกรณีตั้งแต่ลำดับที่ 6 ถึงลำดับที่ 27 แต่ไม่แตกต่างกับลำดับที่ 2 , 3 , 4 และ 5 คือกรณีเขื่อนแบบ 4 แถว ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุดและความสูงคลื่นสูงที่สุด(D_SCIHu) เขื่อนแบบ 4 แถว ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด(D_SCITl) เขื่อนแบบ 3 แถว ค่าความสูงคลื่นสูงที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด(C_HuTl) เขื่อนแบบ 4 แถว ค่ามุมที่คลื่นทำมุมกับแนวเขื่อนแคบที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด(D_θWITl) ลดพลังงานได้ 53.27 ± 8.58 52.06 ± 8.90 48.16 ± 11.86 และ 46.67 ± 9.79 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

เชื่อนแบบ 3 และ 4 แถว จะมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยกว่ากันขึ้นอยู่กับรูปแบบการจัดวางตัวและค่าของตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ นอกจากนั้นการจับคู่ของตัวแปรยังเป็นปัจจัยเสริมให้ผลที่ได้จากการทดสอบมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้นดังตารางที่ 4-11 ซึ่งตั้งเป็นข้อสังเกตได้ว่าในกลุ่มที่ให้ค่าการลดพลังงานสูงที่สุดส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยกรณีค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด(TI) ถึง 4 กรณีรองลงมาคือ กรณีค่าคลื่นสูงที่สุด(Hu) และค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) 2 กรณี สำหรับค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด(θ WI) และ ค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(θ PI) มีเพียงกรณีเดียว อาจกล่าวได้ว่าค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด(TI) จะเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเขื่อน และการลดพลังงานของเขื่อนจะมากขึ้นเมื่อนำไปจับคู่กับตัวแปรค่าคลื่นสูงที่สุด(Hu) ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) ค่ามุมสำหรับทิศทางของน้ำที่เข้าสู่แนวเขื่อนแคบที่สุด(θ WI) และ ค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(θ PI) ประการหนึ่งเขื่อนแบบ 3 และ 4 แถว สำหรับ 5 กรณีนี้ประสิทธิภาพมีความใกล้เคียงกันเพียงแต่เขื่อนแบบ 4 แถวจะครอบคลุมในกรณีต่าง ๆ ได้มากกว่า 3 แถว

4.4.2 การเปรียบเทียบค่าของเขื่อนทั้ง 3 แบบโดยรวมค่าการลดพลังงานคลื่นในกรณีที่มีค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถว(SR)

ผลจากการเปรียบเทียบข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติซึ่งแสดงเป็นตารางสำหรับตัวแปรทั้ง 7 กลุ่ม โดยไม่นับกรณีของเขื่อนแบบ 1 แถวออกไป และสำหรับเขื่อนแบบ 2 , 3 และ 4 แถวจะนับกรณีระยะห่างระหว่างแถว(SR) รวมอยู่ด้วย ซึ่งค่าการลดพลังงานที่ได้จะคัดเลือกมาจากค่าที่มากที่สุด 7 อันดับแสดงในตารางที่ 4-13

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-12 เปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยกรณีที่มีค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถว(SR)

กลุ่ม	Hu		TI		Du	
	กรณี	%	กรณี	%	กรณี	%
1	D_SCIHu ^g	53.27 ± 8.58	C_θPITh ^h	53.34 ± 9.06	D_TIDu ^e	36.43 ± 9.70
2	C_TIHu ^{fg}	48.16 ± 11.86	D_SCITh ^{gh}	52.06 ± 8.90	B_TIDu ^e	36.14 ± 7.29
3	D_TIHu ^{ef}	43.55 ± 11.30	C_HuTI ^{fgh}	48.16 ± 11.86	B_HuDu ^{de}	35.12 ± 6.84
4	B_θWIHu ^{de}	37.99 ± 9.62	D_θWITh ^{fgh}	46.67 ± 9.79	D_SRIDu ^{de}	34.97 ± 9.00
5	D_θPIHu ^{de}	37.86 ± 9.33	C_SCITh ^{efg}	44.27 ± 9.39	C_TIDu ^{de}	34.80 ± 8.86
6	D_SRuHu ^{de}	37.76 ± 9.27	D_HuTI ^{efg}	43.55 ± 11.30	C_SRIDu ^{de}	34.42 ± 8.67
7	C_θWIHu ^{de}	36.64 ± 8.83	D_SRITh ^{def}	41.11 ± 9.97	D_SCIDu ^{de}	34.25 ± 8.27

กลุ่ม	SCI		θWI		θPI	
	กรณี	%	กรณี	%	กรณี	%
1	D_HuSCI ^f	53.27 ± 8.58	D_TIθW ^f	46.67 ± 9.79	C_TIθPI ^f	53.34 ± 9.06
2	D_TISCI ^f	52.06 ± 8.90	C_SRIθW ^{ef}	38.81 ± 8.73	D_SRuθPI ^f	47.90 ± 10.77
3	C_TISCI ^e	44.27 ± 9.39	B_HuθW ^{def}	37.99 ± 9.62	D_HuθPI ^e	37.86 ± 9.33
4	B_θWISCI ^d	36.50 ± 9.77	B_TIθW ^{de}	37.12 ± 9.03	D_TIθPI ^e	37.37 ± 9.94
5	D_θWISCI ^{cd}	35.45 ± 9.68	C_HuθW ^{cde}	36.64 ± 8.83	C_HuθPI ^{de}	34.37 ± 7.81
6	C_SRISCI ^{bcd}	34.36 ± 10.89	B_SCIθW ^{cde}	36.50 ± 9.77	D_θWIθPI ^{de}	34.33 ± 8.87
7	D_DuSCI ^{bcd}	34.25 ± 8.27	D_SCIθW ^{cde}	35.45 ± 9.68	B_TIθPI ^{cde}	33.81 ± 7.80

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-12 เปอร์เซนต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยกรณีที่มีค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถว(SR)
(ต่อ)

ลำดับ	กลุ่ม SRI และ SRu	
	กรณี	%
1	D_θPISRu ^g	47.90 ± 10.77
2	D_TISRI ^{fg}	41.11 ± 9.97
3	C_θWISRI ^{ef}	38.81 ± 8.73
4	D_HuSRu ^{def}	37.76 ± 9.27
5	B_HuSRu ^{cdef}	35.11 ± 7.84
6	D_DuSRI ^{cdef}	34.97 ± 9.00
7	C_DuSRI ^{cdef}	34.42 ± 8.67

ผลจากตารางที่ 4-12 จะแยกวิเคราะห์หรือออกไปตามกลุ่มตัวแปรหลัก ซึ่งจะดูค่ามากที่สุดของแต่ละกลุ่มโดยผลการวิเคราะห์มีดังนี้

ในกลุ่มของค่าคลื่นสูงที่สุด(Hu) ค่าที่มากที่สุดคือ กรณีเงื่อนไขแบบ 4 แถว ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุดและความสูงคลื่นสูงที่สุด(D_SCIHu) มีเปอร์เซนต์การลดพลังงานคลื่นสูงที่สุด 53.27 ± 8.58 เปอร์เซนต์ ซึ่งค่าข้างต้นแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) กับกรณีในลำดับที่ 3 , 4 , 5 , 6 , 7 แต่ไม่แตกต่างกับลำดับที่ 2 กรณีเงื่อนไขแบบ 3 แถว ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดและความสูงคลื่นสูงที่สุด(C_TIHu) ลดพลังงานได้ 48.16 ± 11.86 เปอร์เซนต์

ในกลุ่มของค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด(TI) ค่าที่มากที่สุดคือ กรณีเงื่อนไขแบบ 3 แถว ค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด(C_θPITI) มีเปอร์เซนต์การลดพลังงานคลื่นสูงที่สุด 53.34 ± 9.06 เปอร์เซนต์ ซึ่งค่าข้างต้นแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) กับกรณีในลำดับที่ 5 , 6 , 7 แต่ไม่แตกต่างกับลำดับที่ 2 , 3 , 4 กรณีเงื่อนไขแบบ 4 แถว ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด(D_SCI TI) เงื่อนไขแบบ 3 แถว ค่าความสูงคลื่นสูงที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด(C_HuTI) เงื่อนไขแบบ 4 แถว ค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเงื่อนไขแคบที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด(D_θWITI) ลดพลังงานได้ 52.06 ± 8.90 48.16 ± 11.86 และ 46.67 ± 9.79 เปอร์เซนต์ตามลำดับ

ในกลุ่มของค่าความลึกน้ำมากที่สุด(Du) ค่าที่มากที่สุดคือ กรณีเงื่อนไขแบบ 4 แถว ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดและค่าความลึกของน้ำมากที่สุด(D_TIDu) มีเปอร์เซนต์การลด

พลังงานคลื่นสูงสุด 36.43 ± 9.70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่แตกต่างกับลำดับที่ 2, 3, 4, 5, 6, 7 กรณีเงื่อนไขแบบ 2 แถว ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดและค่าความลึกของน้ำมากที่สุด(B_TIDu) กรณีเงื่อนไขแบบ 2 แถว ค่าความสูงคลื่นสูงสุดและความลึกของน้ำมากที่สุด(B_HuDu) กรณีเงื่อนไขแบบ 4 แถว ค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุดและค่าความลึกของน้ำมากที่สุด(D_SRIDu) กรณีเงื่อนไขแบบ 3 แถว ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดและค่าความลึกของน้ำมากที่สุด(C_TIDu) กรณีเงื่อนไขแบบ 3 แถว ค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุดและค่าความลึกของน้ำมากที่สุด(C_SRIDu) กรณีเงื่อนไขแบบ 4 แถว ค่าระยะห่างระหว่างแถวเสริมน้อยที่สุดและค่าความลึกของน้ำมากที่สุด(D_SCIDu) ลดพลังงานได้ 36.14 ± 7.29 35.12 ± 6.84 34.97 ± 9.00 34.80 ± 8.86 34.42 ± 8.67 และ 34.25 ± 8.27 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ในกลุ่มของค่าระยะห่างระหว่างแถวเสริมน้อยที่สุด(SCI) ค่าที่มากที่สุดคือ กรณีเงื่อนไขแบบ 4 แถว ค่าความสูงคลื่นสูงสุดและระยะห่างระหว่างแถวเสริมน้อยที่สุด(D_HuSCI) มีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นสูงสุด 53.27 ± 8.58 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าข้างต้นแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับกรณีในลำดับที่ 3, 4, 5, 6, 7 แต่ไม่แตกต่างกับลำดับที่ 2 กรณีเงื่อนไขแบบ 4 แถว ค่าระยะห่างระหว่างแถวเสริมน้อยที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด(D_TISCI) ลดพลังงานได้ 52.06 ± 8.90 เปอร์เซ็นต์

ในกลุ่มของค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด(θ WI) ค่าที่มากที่สุดคือ กรณีเงื่อนไขแบบ 4 แถว ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดและค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด(D_TI θ WI) มีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นสูงสุด 46.67 ± 9.79 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าข้างต้นแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับกรณีในลำดับที่ 4, 5, 6, 7 แต่ไม่แตกต่างกับลำดับที่ 2 และ 3 กรณีเงื่อนไขแบบ 3 แถว ค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุดและค่ามุมสำหรับทิศทางของน้ำที่เข้าสู่แนวเขื่อนแคบที่สุด(C_SRI θ WI) กรณีเงื่อนไขแบบ 2 แถว ค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุดและความสูงคลื่นสูงสุด(B_Hu θ WI) ลดพลังงานได้ 38.81 ± 8.73 และ 37.99 ± 9.62 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ในกลุ่มของค่ามุมระหว่างมุมยอดของแถวเสริมกับแนวของแถวแคบที่สุด(θ PI) ค่าที่มากที่สุดคือ กรณีเงื่อนไขแบบ 3 แถว ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดและมุมระหว่างมุมยอดของแถวเสริมกับแนวของแถวแคบที่สุด(C_TI θ PI) มีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นสูงสุด 53.34 ± 9.06 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าข้างต้นแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับกรณีในลำดับที่ 3, 4, 5, 6, 7 แต่ไม่แตกต่างกับลำดับที่ 2 กรณีเงื่อนไขแบบ 3 แถว ค่าระยะห่างระหว่างแถวมากที่สุดและค่ามุมระหว่างมุมยอดของแถวเสริมกับแนวของแถวแคบที่สุด(C_SRu θ PI) ลดพลังงานได้ 47.90 ± 10.77 เปอร์เซ็นต์

ในกลุ่มค่าระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด(SRI) และค่าความกว้างระหว่างแถวมากที่สุด(SRu) ค่าที่มากที่สุดคือ กรณีเขื่อนแบบ 4 แถวค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุดและค่าระยะห่างระหว่างแถวมากที่สุด(D_θPISRu) มีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นสูงที่สุด 47.90 ±10.77 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าข้างต้นแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) กับกรณีในลำดับที่ 3 , 4 , 5 , 6 , 7 แต่ไม่แตกต่างกับลำดับที่ 2 เขื่อนแบบ 4 แถว ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดและระยะห่างระหว่างแถวน้อยที่สุด(D_TISRI) ลดพลังงานได้ 41.11 ± 9.97 เปอร์เซ็นต์

จากตารางที่ 4-12 เมื่อนำทุกกรณีของแต่ละกลุ่มมาเปรียบเทียบกันจะทำให้ทราบผลว่าเขื่อนแบบใดที่จับคู่กับตัวแปรคู่ใดที่ให้ผลในการลดพลังงานคลื่นมากที่สุดซึ่งแสดงในตารางที่ 4-13 ดังนี้

ตารางที่ 4-13 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นเฉลี่ยสำหรับทุกกรณีของแต่ละกลุ่มจากตารางที่ 4-12

ลำดับ	กรณี	เปอร์เซ็นต์	ลำดับ	กรณี	เปอร์เซ็นต์
1	C_θPIT ^g	53.34 ± 9.06	16	C_θWIHu ^{abc}	36.64 ± 8.83
2	D_SCIHu ^g	53.27 ± 8.58	17	B_SCIθWI ^{abc}	36.50 ± 9.77
3	D_SCIT ^{fg}	52.06 ± 8.90	18	D_TIDu ^{abc}	36.43 ± 9.70
4	C_HuTI ^{efg}	48.16 ±11.86	19	B_TIDu ^{abc}	36.14 ± 7.29
5	D_SRuθPI ^{efg}	47.90 ±10.77	20	D_SCIθWI ^{ab}	35.45 ± 9.68
6	D_θWITI ^{defg}	46.67 ± 9.79	21	B_HuDu ^a	35.12 ± 6.84
7	C_SCIT ^{cdef}	44.27 ± 9.39	22	B_HuSRu ^a	35.11 ± 7.84
8	D_HuTI ^{bcde}	43.55 ±11.30	23	D_SRIDu ^a	34.97 ± 9.00
9	D_SRIT ^{abcde}	41.11 ± 9.97	24	C_TIDu ^a	34.80 ± 8.86
10	C_SRIθWI ^{abcd}	38.81 ± 8.73	25	C_SRIDu ^a	34.42 ± 8.67

ตารางที่ 4-13 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานเฉลี่ยคลื่นสำหรับทุกกรณีของ แต่ละกลุ่มจากตารางที่ 4-12 (ต่อ)

11	$B_{\theta}WIHu^{abc}$	37.99 ± 9.62	26	$C_{Hu}\theta PI^a$	34.37 ± 7.81
12	$D_{\theta}PIHu^{abc}$	37.86 ± 9.33	27	$C_{SR}ISCI^a$	34.36 ± 10.89
13	$D_{Hu}SRu^{abc}$	37.76 ± 9.27	28	$D_{\theta}WI\theta PI^a$	34.33 ± 8.87
14	$D_{TI}\theta PI^{abc}$	37.37 ± 9.94	29	$D_{SC}IDu^a$	34.25 ± 8.27
15	$B_{TI}\theta WI^{abc}$	37.12 ± 9.03	30	$B_{TI}\theta PI^a$	33.81 ± 7.80

หมายเหตุ กรณีที่เหมือนกันเช่น $C\theta PITI$ กับ $CTI\theta PI$ จะนับรวมเป็นกรณีเดียว

ผลจากตารางที่ 4-14 ค่าที่ลดพลังงานมากที่สุดคือ กรณีเขื่อนแบบ 3 แถว ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดและมุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด($C_{TI}\theta PI$) มีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นสูงที่สุด 53.34 ± 9.06 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าข้างต้นแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับกรณีตั้งแต่ลำดับที่ 7 ถึงลำดับที่ 30 แต่ไม่แตกต่างกับลำดับที่ 2, 3, 4, 5 และ 6 คือ กรณีเขื่อนแบบ 4 แถว ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุดและความสูงคลื่นสูงที่สุด($D_{SC}IHu$) เขื่อนแบบ 4 แถว ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด($D_{SC}ITI$) เขื่อนแบบ 3 แถว ค่าความสูงคลื่นสูงที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด($C_{Hu}TI$) เขื่อนแบบ 4 แถว ค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุดและค่าระยะห่างระหว่างแถวมากที่สุด($D_{\theta}PISRu$) เขื่อนแบบ 4 แถว ค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุดและคาบคลื่นสั้นที่สุด($D_{\theta}WITI$) ลดพลังงานได้ 53.27 ± 8.58 52.06 ± 8.90 48.16 ± 11.86 47.90 ± 10.77 และ 46.67 ± 9.79 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ผลการทดสอบที่ได้สำหรับเขื่อนแบบ 3 และ 4 แถวในกรณีนี้มีความคล้ายคลึงกับกรณีที่ไม่นับรวมค่าระยะระหว่างแถว(SR) กล่าวคือเขื่อนจะมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยกว่ากันขึ้นอยู่กับรูปแบบการจัดวางตัวและค่าของตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ นอกจากนั้นการจับคู่ของตัวแปรยังจะเป็นปัจจัยเสริมให้ผลที่ได้จากการทดสอบมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้นดังตารางที่ 4-14 ซึ่งตั้งเป็นข้อสังเกตได้ว่าในกลุ่มที่ให้ค่าการลดพลังงานสูงที่สุดส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยกรณีค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด(TI) ถึง 4 กรณีรองลงมาคือ กรณีค่าคลื่นสูงที่สุด(Hu) ค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(θPI) และค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) 2 กรณี สำหรับค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อนแคบที่สุด(θWI) มี 1 กรณี โดยที่มีตัวแปรเพิ่มขึ้นอีก 1 ตัวแปรคือ ค่าระยะห่างระหว่างแถวมากที่สุด(SRu) อาจกล่าวได้ว่าค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด(TI) จะเป็นตัวแปรหลักที่

ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเขื่อน และการลดพลังงานของเขื่อนจะมากขึ้นเมื่อนำไปจับคู่กับตัวแปร ค่าคลื่นสูงสุด(Hu) ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) ค่ามุมที่คลื่นทำกับแนวเขื่อน แคบที่สุด(θ WI) และ ค่ามุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด(θ PI) ประการ หนึ่งเขื่อนแบบ 3 และ 4 แถว สำหรับ 7 กรณีนี้ประสิทธิภาพของเขื่อนทั้งสองมีความใกล้เคียงกัน เพียงแต่เขื่อนแบบ 4 แถวจะครอบคลุมในกรณีต่าง ๆ ได้มากกว่า 3 แถว ซึ่งสังเกตได้จากเขื่อน แบบ 4 แถวมีถึง 4 กรณี และเขื่อนแบบ 3 แถวมีเพียง 2 กรณี

กล่าวได้ว่าค่าการลดพลังงานคลื่นจากตัวแปรเดี่ยวและตัวแปรคู่มีความคล้ายคลึงกันคือ ตัวแปรคาบคลื่นสั้นที่สุด(TI) มีอิทธิพลต่อการลดพลังงานคลื่นได้สูงสุด และเป็นเขื่อนแบบ 3 แถว เหมือนกันทั้ง 2 กรณี ทั้งนี้พบว่าจากค่าคาบคลื่นสั้นที่สุด(TI) 0.9 วินาที ความยาวคลื่น(λ) 1.2 เมตร มีค่าใกล้เคียงกับความกว้างของตัวเขื่อนแบบ 3 แถว ระยะจากแถวแรกถึงแถวที่สาม จะทำให้คลื่นมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพ และเกิดการสูญเสียพลังงานในบริเวณเขื่อนมากตาม หลักการของ Huygens-Fresnel (http://en.wikipedia.org/wiki/Huygens%E2%80%93Fresnel_principle) ผลคือพลังงานคลื่นจะลดลงมาเมื่อผ่านแนวเขื่อนออกมา นอกจากนั้นตัวแปร คู่กรณีที่มีค่าตัวแปรอื่น ๆ จับคู่อยู่ด้วยโดยมีอิทธิพลต่อการลดพลังงานคลื่น คือ ค่าคลื่นสูงสุด (Hu) และค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) อธิบายได้ว่าค่าคลื่นสูงสุด(Hu) 0.15 เมตร ความไม่เสถียรของคลื่นจะมากกว่าความสูงคลื่นต่ำดั่งนั้นเมื่อเจอแนวเขื่อนขวางอยู่พลังงานจาก คลื่นสูงจะถูกถ่ายเทให้กับตัวเขื่อนได้มากกว่าทำให้เขื่อนลดพลังงานจากคลื่นสูงได้ดี สำหรับกรณีค่า ระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) 0.2 เมตร แรงเสียดทานในแนวเขื่อนที่มากจะกระจาย พลังงานของคลื่นได้มากตามจำนวนแถวที่เพิ่มขึ้น (Isaacson et al.,1999) ทำให้เขื่อนที่ระยะห่าง ระหว่างเสาเข็มน้อยจะลดพลังงานคลื่นที่เข้าสู่แนวเขื่อนได้ดี

4.5 การเปรียบเทียบงบประมาณกับประสิทธิภาพของเขื่อน

ผลจากการทดสอบประสิทธิภาพในการลดพลังงานคลื่นของเขื่อนแต่ละแบบทำให้ทราบว่า ไม่เพียงจำนวนแถวของเขื่อนที่มากขึ้นแล้วจะทำให้ผลการลดพลังงานจะเพิ่มขึ้น แต่ยังขึ้นอยู่กับ ลักษณะการจัดวางตัวของเขื่อนและลักษณะทางกายภาพของคลื่นด้วย โดยจากการวิเคราะห์ผล พบว่าเขื่อนแบบ 3 แถว และ 4 แถว มีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นที่สูงกว่าเขื่อนแบบ 1 แถว และ 2 แถว

จากข้อมูลทางกายภาพของแนวเขื่อนในพื้นที่ศึกษาเป็นเขื่อน 3 แถว ความยาวของแนว เขื่อนยาวประมาณ 250 เมตร และเสาแต่ละต้นเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่ากว้างประมาณ 0.5 เมตรมี ระยะห่างระหว่างเสาเข็มประมาณ 1.5 เมตร แต่การคำนวณจะกำหนดให้ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม ประมาณ 1 เมตร สาเหตุที่ใช้ระยะห่างน้อยที่สุดเพราะในกลุ่มที่เปอร์เซ็นต์การลดพลังงานมาก

ที่สุดมีกรณีค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยที่สุด(SCI) รวมอยู่ด้วยทั้งเงื่อนไขแบบ 3 แถว และ 4 แถว ซึ่งการเปรียบเทียบจะนำรูปแบบเงื่อนไขในพื้นที่ศึกษามาเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดขึ้นซึ่งจะเป็นเงื่อนไขแบบ 4 แถว มีค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 1 เมตร เพื่อหารูปแบบเงื่อนไขที่ประหยัดงบประมาณมากที่สุด ทั้งนี้ในกรณีอื่น ๆ ที่ไม่ได้นำมาเปรียบเทียบสาเหตุเพราะเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นสูงสุดมีค่าน้อยกว่าทั้ง 2 กรณีข้างต้นอยู่พอสมควร

ผลการเปรียบเทียบพบว่าเงื่อนไขแบบ 3 แถวระยะห่าง 1.5 เมตร สามารถลดพลังงานคลื่นได้สูงสุด 53.34 ± 9.06 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเงื่อนไขแบบ 4 แถวระยะห่าง 1 เมตร สามารถลดพลังงานคลื่นได้สูงสุด 53.27 ± 8.58 เปอร์เซ็นต์ แต่จำนวนเสาเข็มของเงื่อนไขแบบ 4 แถว มีจำนวนมากกว่าเสาเข็มของเงื่อนไขแบบ 3 แถว มาก เมื่อพิจารณาความแตกต่างทางด้านงบประมาณทำให้ความคุ้มค่าต่องบประมาณในการก่อสร้างจึงเป็นกรณีของเงื่อนไขแบบ 3 แถว ระยะห่าง 1.5 เมตร หรือลักษณะคล้ายกับรูปแบบการจัดวางเงื่อนไขของจริงในพื้นที่ศึกษา



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบประสิทธิภาพของเขื่อนสลายกำลังคลื่นด้วยแบบจำลองทางกายภาพ พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนแถวเสาเข็มประสิทธิภาพของเขื่อนสลายกำลังคลื่นจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าตัวแปรที่มีอิทธิพลมากกว่าตัวแปรอื่น ๆ ได้แก่ ความสูงคลื่นที่เพิ่มขึ้น คาบคลื่นที่สั้นลง และระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่ลดลง สำหรับรูปแบบที่สามารถลดพลังงานคลื่นได้สูงสุดเป็นกรณีเขื่อนแบบ 3 แถว ค่าคาบคลื่นสั้นที่สุดและมุมระหว่างมุมยอดของเสาเข็มกับแนวของแถวแคบที่สุด ($C_{TI} \theta_{PI}$) มีเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นสูงสุด 53.34 ± 9.06 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าตัวแปรต่าง ๆ สอดคล้องกับการศึกษาของหน่วยศึกษาพิบัติภัยและข้อสนเทศเชิงพื้นที่ (2552) แต่ต่างกันในเรื่องของเปอร์เซ็นต์การลดพลังงานคลื่นของเขื่อนแบบ 3 แถว ที่สามารถลดพลังงานคลื่นสูงสุดได้ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ เนื่องมาจากการคำนวณพลังงานของงานวิจัยชิ้นนี้ได้คิดคำนวณเพียงแค่พลังงานศักย์ของคลื่นเท่านั้น ในขณะที่การศึกษาของหน่วยศึกษาพิบัติภัยและข้อสนเทศเชิงพื้นที่ (2552) ได้คิดรวมพลังงานจลน์เข้าไปด้วย

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับงบประมาณในการก่อสร้างสำหรับเขื่อนพบว่าเขื่อนแบบ 3 แถว ระยะห่าง 1.5 เมตร ลดพลังงานคลื่นได้สูงสุด 53.34 ± 9.06 เปอร์เซ็นต์ เมื่อคำนวณจำนวนเสาเข็มที่ใช้ก่อสร้างสามารถประหยัดงบประมาณได้มากที่สุดซึ่งลักษณะการวางตัวของเขื่อนคล้ายกับรูปแบบการจัดวางเขื่อนของจริงในพื้นที่ศึกษา ทั้งนี้การคำนวณในหัวข้อนี้มิได้นำปัจจัยด้านอื่นที่อาจจะมีผลต่อการตัดสินใจในการก่อสร้างมาพิจารณา เช่น การกัดเซาะของฐานราก หรือการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อให้การเก็บข้อมูลคลื่นมีความแม่นยำมากขึ้นควรใช้ตัวรับประเภทอื่นที่สามารถวัดความสูงคลื่นได้โดยตรง ตัวอย่างเช่น Wave Probe เป็นต้น สาเหตุเพราะผิวหน้าคลื่นที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดไม่เรียบมีลักษณะขรุขระ ดังนั้นการใช้ตัวรับที่รังสีสะท้อนของเลเซอร์ที่ยิงออกไปทำให้ข้อมูลที่ได้มีค่าผิดพลาดพอสมควร อีกทั้งเมื่อใช้ไปสักระยะหนึ่งเกิดความร้อนขึ้นที่ตัวรับมักจะเกิดอาการค้างทำให้ได้ข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่องหรือข้อมูลเสียหายได้
2. ควรเพิ่มจำนวนตัวรับบริเวณหน้าเขื่อนและให้มีระยะตามที่ Neelamani (2000) อ้างถึง DHI Manual (1994) โดยสามารถนำผลมาคำนวณหาค่าพลังงานของคลื่นที่สะท้อน และคลื่นที่ผ่านออกมาจากหลังแบบเขื่อนจำลอง ทั้งนี้อาจใช้โปรแกรมวิเคราะห์หาความสูงคลื่นเพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการคำนวณหาจุดที่ประสิทธิภาพเขื่อนสูงสุดได้อย่างแม่นยำ
3. ควรหาวิธีการลดแรงสะท้อนจากคลื่นที่กระทบปลายรางน้ำสาเหตุเพราะคลื่นที่สะท้อนจะเกิดกลับมาจะทำให้เกิดการแทรกสอดเกิดของคลื่น หากตัวรับไปอยู่บริเวณนั้นจะทำให้การวัดความสูงคลื่นด้านหลังแบบเขื่อนจำลองมีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร ซึ่งวิธีการเลียงอาจจะใช้วิธีการแบบระบบน้ำวน หรือทดสอบหาระยะเวลาที่จะเกิดคลื่นสะท้อนแล้วจึงเก็บข้อมูลในช่วงก่อนหน้านั้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เจ้าท่า, กรม. 2539. รายงานศึกษาความเหมาะสมด้านเศรษฐกิจ วิศวกรรม และสิ่งแวดล้อม และ
การออกแบบเบื้องต้นเพื่อแก้ไขปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งอ่าวไทยตอนบน. กรมเจ้าท่า
กระทรวงคมนาคม.

หน่วยศึกษาพิบัติภัยและข้อสนเทศเชิงพื้นที่. 2550. รายงานการศึกษาครั้งที่ 1 โครงการศึกษา
บูรณาการเชิงพื้นที่เพื่อการแก้ปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งทะเลจังหวัดสมุทรปราการ:
กรณีศึกษานำร่องเพื่อการออกแบบ ณ บ้านขุนสมุทรจีน ต.แหลมฟ้าผ่า อ.พระสมุทรเจดีย์
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

หน่วยศึกษาพิบัติภัยและข้อสนเทศเชิงพื้นที่. 2552. รายงานการศึกษาครั้งที่ 2 โครงการศึกษา
บูรณาการเชิงพื้นที่เพื่อการแก้ปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งทะเลจังหวัดสมุทรปราการ:
กรณีศึกษานำร่องเพื่อการออกแบบ ณ บ้านขุนสมุทรจีน ต.แหลมฟ้าผ่า อ.พระสมุทรเจดีย์
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อจิวา เทียงตรง. 2549. การใช้รีโมตเซนซิงเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงในบริเวณชายฝั่งบ้าน
แหลมสิงห์ จังหวัดสมุทรปราการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์
ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อนรรักษ์ ศรีอรียวัฒน์. 2544. แบบจำลองคณิตศาสตร์ของชายฝั่งสมดุระหว่างเขื่อนกันคลื่นแยก
วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อัปสรสุดา ศิริพงษ์ สนใจ หะวานนท์ ปราโมทย์ ไชยศิริกรและนวิยา นันทพานิช. 2550. รายงาน
การศึกษาครั้งที่ 1 โครงการ ประสิทธิภาพการทำเขื่อนดักตะกอนและความเจริญเติบโต
ของพันธุ์ไม้ป่าชายเลน. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Brown, J., Colling, A., Park, D.,Phillips, J., Rothery, D., Wright, J. 1989. Waves, Tides
and Shallow-Water Processes. Oxford : The Open University Walton Hall, Milton
Keynes, MK7 6AA, England.

Hughes, A.S. 1993. Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering.
Singapore : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

- Isaacson, M., Baldwin, J., Premasiri, S., Yang, G. 1999. Wave interactions with double slotted barriers. Applied Ocean Research 21 : 81-91.
- Neelamani, S., Gayathri, T. 2004. Wave interaction with twin plate wave barrier. Ocean Engineering. 33 (2006) : 495-516.
- Neelamani, S., Rajendran, R. 2000. Wave interaction with T-type breakwaters. Ocean Engineering. 29 : 151-175.
- Ouypornprasert, W. 2002. An Efficient Adaptive Scheme to Determine N-D Quadratic Functions for Structural Reliability Analyses. Computational Mathematics and Modeling The East-West Journal of Mathematics ISSN 1513-489X : 117-126.
- Sawaragi, T. 1995. Coastal Engineering-Waves, Beaches, Wave-Structure Interactions. Development in Geotechnical Engineering. 78. Japan : Department of Civil Engineering, Osaka University.
- US. Coastal Engineering Research Center. 1984. Shore protection Manual. Vol.1.2nd ed. Washington DC : Department of the US. Army Corps of Engineers.
- US. Coastal Engineering Research Center. 1984. Shore protection Manual. Vol.2.2nd ed. Washington DC : Department of the US. Army Corps of Engineers.
- Wikipedia, the free encyclopedia. Huygens–Fresnel principle[online]. Available from : http://en.wikipedia.org/wiki/Huygens%E2%80%93Fresnel_principle [2009,February 10]

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอาศวิน อินทสุภา เกิดเมื่อวันที่ 7 ตุลาคม 2524 ที่จังหวัดชุมพร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดลในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย