

การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Wave Reflection and Transmission of Partial Breakwater



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

Department of Water Resources Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่ เต็มส่วน
โดย	นายนันทวุฒิ อินทรีย์งค์
สาขาวิชา	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรยธา)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รักริภัย)	

นันทวุฒิ อินทริยงค์ : การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน. (Wave Reflection and Transmission of Partial Breakwater) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.อนุรักษ์ ศรี อริยวัฒน์

ปัญหาหาดเขาชายฝั่งในประเทศไทยมีความรุนแรงอย่างมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณอ่าวไทยตอนบน ที่ซึ่งมีลักษณะเป็นหาดโคลน มีเพียงโครงสร้างที่สามารถส่งถ่ายน้ำหนักและแรงลงสู่ชั้นดินที่ลึกลงไปเท่านั้นที่สามารถสร้างในพื้นที่โคลนนี้ได้ การใช้โครงสร้างเสาเข็มปักลงในดินและมีชิ้นส่วนลักษณะคล้ายกำแพงในบริเวณผิวน้ำ โดยขออนุญาตว่า “เขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน” อาจเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมในการป้องกันพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นฐานรากอ่อน อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการทำงานของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนยังไม่ได้รับการพิสูจน์ จึงเป็นเหตุให้การศึกษาที่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติคลื่นและลักษณะทางกายภาพของโครงสร้าง กับความสามารถในการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น แบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติถูกพัฒนาในอ่างจำลองคลื่น ภายใต้เงื่อนไขคลื่นสม่ำเสมอที่ถูกรังจากเครื่องกำเนิดคลื่นด้วยความชันคลื่น (H/L) ในช่วง 0.010 – 0.025 แบบจำลองเขื่อนกันคลื่นถูกสร้างจากเหล็กกล่องด้วยการเปลี่ยนแปลงความลึกการจมจาก 0.075 – 0.300 เมตร และช่องว่างระหว่างเสาเปลี่ยนแปลงจาก 0.5 – 1.5 เมตร ระดับน้ำนิ่งและความหนาของเขื่อนกันคลื่นที่ค่าคงที่เท่ากับ 0.45 และ 0.0375 เมตร ตามลำดับ การทดลอง 120 กรณีถูกดำเนินการโดยมีวัตถุประสงค์ของคลื่นด้านหน้าและหลังโครงสร้าง แล้วคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นมีความสัมพันธ์กับความหนาโครงสร้างสัมพันธ์ (b/L), ความลึกโครงสร้างสัมพันธ์ (D/d), ปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น, ความลึกสัมพันธ์ (d/L), ความสูงคลื่นสัมพันธ์ (H/d) และความชันคลื่น (H/L) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นมีค่าลดลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อ b/L , d/L , H/d หรือ H/L เพิ่มขึ้น แต่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ D/d เพิ่มขึ้น ทั้งในกรณีที่คลื่นล้นและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง อีกทั้งเมื่อคลื่นล้นข้ามโครงสร้างจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นลดลง สำหรับผลลัพธ์ของการส่งผ่านคลื่นพบว่าการส่งผ่านคลื่นมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อ b/L , d/L , H/d หรือ H/L เพิ่มขึ้น แต่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่นเพิ่มขึ้น ทั้งในกรณีที่คลื่นล้นและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง อีกทั้งค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านยังเพิ่มขึ้นเมื่อคลื่นสามารถล้นข้ามโครงสร้างได้ นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงช่องว่างระหว่างเสาไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น ในการศึกษานี้ได้พัฒนาสมการของสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นด้วยวิธีการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงซ้อน เพื่อสนับสนุนการออกแบบโครงสร้างในการบรรเทาปัญหาหาดเขาชายฝั่งสำหรับพื้นที่แบบหาดโคลนในอนาคต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมแหล่งน้ำ
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6070231821 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEYWORD: COASTAL EROSION, MUD BEACH, PARTIAL BREAKWATER, PHYSICAL MODEL, SOFT SHORE
PROTECTION, WAVE BASIN, WAVE REFLECTION, WAVE TRANSMISSION

Nantawoot Inseeyong : Wave Reflection and Transmission of Partial Breakwater. Advisor: Asst. Prof. ANURAK SRIARIYAWAT, Ph.D.

Coastal erosion in Thailand becomes more critical nowadays, especially in the Upper Gulf of Thailand, where is the mud beach. Only the construction that transfers its weight and forces directly into the deeper ground layers can be used in this muddy coast. Using some piles with partial wall at the water surface, as called “partial breakwater”, may be an appropriate alternative for using in the soft foundation. However, the effectiveness of the partial breakwater has not been proved yet. Therefore, this study aimed to investigate the relationship between some physical attributes of waves and structure with reflection and transmission abilities. A two-dimension physical model was developed in the wave basin under the regular wave conditions generated by the wave generator with the wave steepness (H/L) ranged from 0.010 - 0.025. The prototype of the breakwater was created from steel tubes with the submerged depths (D) varied from 0.075 - 0.300 meters, and the clear spacing of pile rows (B) varied from 0.5 - 1.5 meters. The still water level (d) and the thickness of breakwater (b) were fixed at 0.45 and 0.0375 meters, respectively. 120 experiments were conducted by measuring wave heights in front and behind the structure, and then the wave reflection and transmission coefficients were calculated.

The results showed that the coefficients of wave reflection and transmission had some relationships with relative thickness (b/L), relative submerged depth (D/d), partial breakwater factor, relative depth (d/L), relative wave height (H/d) and wave steepness (H/L). The reflection coefficients exponentially decreased as b/L , d/L , H/d , or H/L increased, whereas they increased as D/d increased in both overflow and non-overflow structures. Moreover, the reflection coefficients reduced when the wave could overflow the structure’s crest. For the transmission result, it showed an exponentially decreased tendency in the coefficients as b/L , d/L , H/d , or H/L increased, but they increased as partial breakwater factor increased in both overflow and non-overflow structures. Additionally, the transmission coefficients increased when the wave could overflow the structure. Furthermore, it can be found that changing the clear spacing of pile rows had no significant difference in the wave reflection and transmission coefficients. Finally, this study also developed the equations of the reflection and transmission coefficients by using the multiple regression analysis for supporting the design of structures to mitigate the erosion problem of the muddy coast in the future.

Field of Study: Water Resources Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลต่าง ๆ ทั้งการแนะนำให้คำปรึกษา ช่วยติดตั้งอุปกรณ์ร่วมกับการดำเนินการทดลอง แก่ไขรายละเอียดหรือข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ และกำลังใจในการทำงาน ในการนี้ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนทุนการศึกษาในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้และคำปรึกษา แนะนำ สนับสนุน ตลอดจนการตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ได้กรุณาสั่งสอนปรัชญาในการดำรงชีวิตและการทำงาน และให้โอกาสในการเข้าร่วมโครงการวิจัย อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล ประธานกรรมการ, รองศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรยธา, และรองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รักรวิชัย ผู้ซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำ และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ ร่วมด้วยกับ ศาสตราจารย์พิเศษ ดร.สาคร สุขศรีวงศ์ ที่ได้ให้ความรู้และแนวทางในการทำงานและดำเนินชีวิตแก่ข้าพเจ้า เสมอมา ตลอดจนคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ และวิศวกรรมโยธา ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาของการศึกษาในสถาบันอันทรงเกียรติแห่งนี้

ขอขอบคุณ นายพงษ์สิทธิ์ ผลสมบูรณ์, นายธีรภัทร ล้อมลาย, นายเจษฎายุทธ ไกรนรา ตลอดจนรุ่นพี่ เพื่อน รุ่นน้อง และบุคลากรทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ สำหรับมิตรภาพ ประสบการณ์ทำงาน กำลังใจ และความช่วยเหลือขณะทำวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ยังขอขอบคุณบุคคลที่รู้จักทุกคน ทั้งจากภายใน และภายนอกจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตลอดจนเพื่อนร่วมงานในบริษัท แทคซ์ โซเชียล คอนซัลติง จำกัด ที่ให้ความเข้าใจและกำลังใจอย่างดีเสมอมา

ขอขอบคุณ นางสาวธัญชนก เกษตรสาสิทธิ์ สำหรับความห่วงใย กำลังใจ และความช่วยเหลือขณะทำวิทยานิพนธ์ สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนแล้วเสร็จ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวอันอบอุ่นของข้าพเจ้า ซึ่งเป็นผู้ที่อยู่เบื้องหลังของความสำเร็จ คอยให้โอกาส ให้กำลังใจ และการสนับสนุนการศึกษาของข้าพเจ้ามาด้วยดีโดยตลอด ประโยชน์อันใดที่เกิดแก่ข้าพเจ้าจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอมอบอุทิศให้แก่ พ่อ แม่ อาจารย์ และผู้มีพระคุณต่อข้าพเจ้าทั้งหลายทุกคน

นนทวุฒิ อินทริยงค์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ	จ
สารบัญ.....ฉ	ฉ
สารบัญตาราง.....ฉ	ฉ
สารบัญรูป.....ฉ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์..... 3	3
1.3 ขอบข่ายการศึกษา..... 4	4
1.4 การดำเนินการศึกษา..... 5	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 5	5
บทที่ 2 หลักการและการศึกษาที่ผ่านมา..... 6	6
2.1 กลศาสตร์ของคลื่น (wave mechanics)..... 6	6
2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของคลื่น..... 7	7
2.1.2 ลักษณะของคลื่นในเชิงคณิตศาสตร์..... 10	10
2.2 การเปลี่ยนแปลงของคลื่น (wave transformation)..... 13	13
2.2.1 การเคลื่อนที่ของคลื่นเข้าสู่หน้าตั้ง..... 13	13
2.2.2 การหักเหของคลื่น (wave refraction)..... 14	14
2.2.3 การสะท้อนของคลื่น (wave reflection)..... 15	15
2.2.4 การกระจายของคลื่น (wave diffraction)..... 17	17

2.2.5 การแตกตัวของคลื่น (wave breaking).....	18
2.2.6 การส่งผ่านคลื่น (wave transmission).....	18
2.3 พลังงานของคลื่น (wave energy).....	19
2.4 เขื่อนกันคลื่น (breakwater).....	20
2.4.1 เขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม (pile breakwater)	22
2.4.2 ทุ่นลอยกันคลื่น (floating breakwater).....	23
2.4.3 เขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน (partial breakwater).....	24
2.5 การศึกษาที่ผ่านมา	27
2.5.1 การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับแบบจำลองทางกายภาพ	27
2.5.2 การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับพฤติกรรมของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่น	29
บทที่ 3 การดำเนินงานศึกษา.....	36
3.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย	37
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.2.1 อ่างจำลองคลื่นและระบบเครื่องกำเนิดคลื่น	38
3.2.2 เครื่องมือเก็บข้อมูลคลื่นและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.3 การสอบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	42
3.4 แบบจำลองเขื่อนกันคลื่น.....	42
3.4.1 ข้อมูลการออกแบบเขื่อนกันคลื่น.....	42
3.4.2 ข้อมูลตัวแปรลักษณะคุณสมบัติคลื่น	43
3.5 การออกแบบการทดลองและกระบวนการเก็บข้อมูลแบบจำลอง	44
3.5.1 การออกแบบการทดลอง	44
3.5.2 การเก็บข้อมูลคลื่นในแบบจำลองทางกายภาพ.....	45
3.6 วิธีการดำเนินการทดลอง.....	48
3.6.1 การเตรียมการก่อนดำเนินการทดลอง.....	48

3.6.2 การดำเนินการทดลอง	48
บทที่ 4 พฤติกรรมการสะท้อนของคลื่น	50
4.1 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่น	50
4.1.1 วิธีการหาความสูงคลื่นนัยสำคัญ คาบคลื่น และความยาวคลื่น	50
4.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น	52
4.2 การแยกคลื่นจากชุดข้อมูลคลื่นบริเวณด้านหน้าโครงสร้าง	52
4.3 อิทธิพลของการยอมให้คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง	56
4.4 การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร	57
4.5 การวิเคราะห์พฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นจากโครงสร้าง	60
4.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับระยะห่างระหว่างเสา โครงสร้างสัมพัทธ์	60
4.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับความหนาโครงสร้าง สัมพัทธ์	63
4.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์	66
4.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับความลึกสัมพัทธ์	68
4.5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับความสูงคลื่นสัมพัทธ์	70
4.5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับความชันคลื่น	72
4.6 การวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับตัวแปรไร้ หน่วย	74
4.6.1 สมการความสัมพันธ์ในกรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง	76
4.6.2 สมการความสัมพันธ์ในกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง	78
บทที่ 5 พฤติกรรมการส่งผ่านคลื่น	81
5.1 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่น	81
5.1.1 วิธีการหาความสูงคลื่นนัยสำคัญ คาบคลื่น และความยาวคลื่น	81

5.1.2	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น	82
5.2	ผลการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่น	82
5.3	อิทธิพลของการยอมให้คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง	84
5.4	พฤติกรรมคลื่นด้านหลังโครงสร้าง.....	86
5.5	การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร.....	90
5.6	การวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นผ่านโครงสร้าง.....	91
5.6.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์..	91
5.6.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อน กันคลื่น.....	94
5.6.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับความลึกสัมพัทธ์	96
5.6.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกับความสูงคลื่นสัมพัทธ์.....	98
5.6.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับความชันคลื่น	101
5.7	การวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับตัวแปรไร้มิติ	103
5.7.1	สมการความสัมพันธ์ในกรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง	104
5.7.2	สมการความสัมพันธ์ในกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง	106
5.8	การเปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมา.....	109
บทที่ 6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	113
6.1	สรุปผลการศึกษา	113
6.1.1	พฤติกรรมกระแสน้ำของคลื่นจากเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน	114
6.1.2	พฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน	116
6.2	ข้อเสนอแนะ	119
บรรณานุกรม	122
ภาคผนวก	130

ภาคผนวก ก การศึกษาที่ผ่านมาที่ใช้แบบจำลองทางกายภาพ.....	131
ภาคผนวก ข การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับพฤติกรรมของคลื่นเนื่องจากเขื่อนกันคลื่น	142
ภาคผนวก ค แบบจำลองทางกายภาพ	170
ภาคผนวก ง การสอบเทียบเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้และการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่น	179
ภาคผนวก จ การพิจารณากฎความคล้ายคลึงหรือความเหมือน (laws of similarity).....	190
ภาคผนวก ฉ ผลการทดลองของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น	197
ภาคผนวก ช การวิเคราะห์ความถดถอย.....	206
ภาคผนวก ซ ผลการทดลองของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น.....	235
ภาคผนวก ฌ สรุปสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา.....	275
ประวัติผู้เขียน	280



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติของคลื่นในช่วงความถี่ต่าง ๆ (U.S. CERC., 1984)	12
ตารางที่ 2-2 ประเภทของทุ่นลอยกันคลื่น (McCartney, 1985).....	25
ตารางที่ 2-3 สรุปผลการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการศึกษาด้วยอ่างจำลองคลื่น	28
ตารางที่ 2-4 สรุปผลการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับพฤติกรรมคลื่นเนื่องจากเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม.....	31
ตารางที่ 2-5 สรุปผลการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับพฤติกรรมคลื่นเนื่องจากทุ่นลอยกันคลื่น	33
ตารางที่ 2-6 สรุปผลการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับพฤติกรรมคลื่นของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน ...	34
ตารางที่ 3-1 การเปลี่ยนแปลงค่าความชันคลื่นในการศึกษา.....	45
ตารางที่ 3-2 ตัวอย่างรายชื่อเงื่อนไขการศึกษา	46
ตารางที่ 4-1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น จำแนกด้วยความชันคลื่น	60
ตารางที่ 5-1 พฤติกรรมคลื่นด้านหลังโครงสร้าง.....	90
ตารางที่ 5-2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น จำแนกด้วยความชันคลื่น	93
ตารางที่ 6-1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นเนื่องจากเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน	114
ตารางที่ 6-2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเนื่องจากเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน.....	116

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1-1 เชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน บริเวณอ่าวไทยตอนบน.....	3
รูปที่ 2-1 นิยามพารามิเตอร์ของคลื่น (U.S. CERC., 1984).....	7
รูปที่ 2-2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำภายใต้คลื่น (Sawaragi, 1995).....	10
รูปที่ 2-3 การเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำภายใต้คลื่น (U.S. CERC., 1984).....	14
รูปที่ 2-4 การหักเหของคลื่นตามกฎของสเนลล์ (Snell's Law) (Sorensen, 1991).....	15
รูปที่ 2-5 การบิดแนวของคลื่นเข้าสู่ชายฝั่ง (Sorensen, 1991).....	15
รูปที่ 2-6 การสะท้อนของคลื่น (U.S. CERC., 1984).....	16
รูปที่ 2-7 การกระจายของคลื่น (wave diffraction) (Sorensen, 1991).....	17
รูปที่ 2-8 การพิจารณาพลังงานศักย์ของคลื่น (Ippen, 1966).....	19
รูปที่ 2-9 การพิจารณาพลังงานจลน์ของคลื่น (Ippen, 1966).....	19
รูปที่ 2-10 การทำงานของเชื่อมกันคลื่น (U.S. CERC., 1984).....	21
รูปที่ 2-11 ลักษณะการเกิดการทับถมของตะกอนจากอิทธิพลของเชื่อมกันคลื่น (U.S. CERC., 1984)	21
รูปที่ 2-12 การทำงานของเชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็ม.....	22
รูปที่ 2-13 เชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็มที่ชายฝั่งบ้านขุนสมุทรจีน.....	23
รูปที่ 2-14 ประเภทของทุ่นลอยกันคลื่น (McCartney, 1985).....	26
รูปที่ 3-1 ผังงานการดำเนินงานวิจัย.....	37
รูปที่ 3-2 แบบร่างอ่างจำลองคลื่น.....	39
รูปที่ 3-3 อ่างจำลองคลื่น (wave basin).....	40
รูปที่ 3-4 อุปกรณ์ประกอบอ่างจำลองคลื่น.....	40
รูปที่ 3-5 ภาพตัดขวางของเชื่อมกันคลื่นที่ใช้ในการศึกษา กรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง.....	41

รูปที่ 3-6 ภาพตัดขวางของเขื่อนกันคลื่นที่ใช้ในการศึกษา กรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง.....	41
รูปที่ 3-7 ตำแหน่งการเก็บข้อมูลคลื่น	47
รูปที่ 4-1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ความถี่ของข้อมูลคลื่น.....	51
รูปที่ 4-2 ลักษณะการวิเคราะห์คลื่นของ Goda and Suzuki (1976).....	54
รูปที่ 4-3 ตัวอย่างการวิเคราะห์การกระจายแบบอนุกรมฟูเรียร์.....	55
รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นระหว่างกรณีที่คลื่นล้นข้ามกับไม่ล้นข้ามโครงสร้าง.....	57
รูปที่ 4-5 ตัวแปรระบุลักษณะของโครงสร้าง.....	59
รูปที่ 4-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้างสัมพัทธ์ (H _r /B) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง	61
รูปที่ 4-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้างสัมพัทธ์ (H _r /B) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง	62
รูปที่ 4-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับค่าความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์ (b/L) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง	64
รูปที่ 4-9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับค่าความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์ (b/L) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง	65
รูปที่ 4-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง.....	67
รูปที่ 4-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง.....	67
รูปที่ 4-12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับค่าความลึกสัมพัทธ์ (d/L) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง.....	69
รูปที่ 4-13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับค่าความลึกสัมพัทธ์ (d/L) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง.....	69
รูปที่ 4-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับค่าความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (H _r /d) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง.....	70

รูปที่ 4-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับค่าความสูงคลื่นสัมพันธ์ (H _r /d) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง.....	71
รูปที่ 4-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับความชันคลื่น (H _r /L) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง.....	72
รูปที่ 4-17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับความชันคลื่น (H _r /L) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง.....	73
รูปที่ 4-18 กราฟบรรยายสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง.....	77
รูปที่ 4-19 กราฟการกระจายของข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น กรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง.....	78
รูปที่ 4-20 กราฟบรรยายสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง.....	79
รูปที่ 4-21 กราฟการกระจายของข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น กรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง.....	80
รูปที่ 5-1 ตัวอย่างแผนภูมิเส้นระดับชั้นของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านด้านหลังโครงสร้าง กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และความชันคลื่นอยู่ในช่วง 0.010 – 0.013 ระยะห่างระหว่างเสาเท่ากับ 1 เมตร ...	83
รูปที่ 5-2 ตัวอย่างแผนภูมิเส้นระดับชั้นของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านด้านหลังโครงสร้าง กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง และความชันคลื่นอยู่ในช่วง 0.010 – 0.013 ระยะห่างระหว่างเสาเท่ากับ 1 เมตร	84
รูปที่ 5-3 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นระหว่างกรณีที่คลื่นล้นข้ามกับไม่ล้นข้ามโครงสร้าง.....	85
รูปที่ 5-4 ตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากโครงสร้างต่อความยาวคลื่น และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง ระยะห่างระหว่างเสาเท่ากับ 1 เมตร	87
รูปที่ 5-5 ตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากโครงสร้างต่อความยาวคลื่น และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง ระยะห่างระหว่างเสาเท่ากับ 1 เมตร	88
รูปที่ 5-6 พื้นที่หน้าตัดที่บ้น้ำ.....	90

รูปที่ 5-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับค่าความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์ (b/L) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง.....	92
รูปที่ 5-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับค่าความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์ (b/L) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง.....	92
รูปที่ 5-9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (partial breakwater factor, Φ) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง.....	95
รูปที่ 5-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (partial breakwater factor, Φ) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง.....	95
รูปที่ 5-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับค่าความลึกสัมพัทธ์ (d/L) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง.....	97
รูปที่ 5-12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับค่าความลึกสัมพัทธ์ (d/L) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง.....	97
รูปที่ 5-13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับค่าความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (H _s /d) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง.....	99
รูปที่ 5-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับค่าความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (H _s /d) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง.....	100
รูปที่ 5-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับความชันคลื่น (H _s /L) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง.....	101
รูปที่ 5-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับความชันคลื่น (H _s /L) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง.....	102
รูปที่ 5-17 กราฟบรรยายสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง.....	105
รูปที่ 5-18 กราฟการกระจายของข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง.....	106
รูปที่ 5-19 กราฟบรรยายสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง.....	108

รูปที่ 5-20 กราฟการกระจายของข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กรณีที่คลื่นไม่ล้นข้าม
โครงสร้าง..... 108

รูปที่ 5-21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมการที่สร้างขึ้นกับสมการของศึกษาก่อนหน้า 110



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยมีพื้นที่ชายฝั่งทะเลยาวกว่า 2,600 กิโลเมตร จากการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ทำให้พื้นที่ชายฝั่งทะเลเป็นทั้งแหล่งที่อยู่อาศัย, แหล่งท่องเที่ยว และแหล่งอุตสาหกรรมที่สำคัญ พื้นที่ดังกล่าวมักประสบปัญหาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งอันเนื่องมาจากการกัดเซาะชายฝั่ง และการพังทลายของสิ่งปลูกสร้างบริเวณชายฝั่ง (พยอม รัตนมณี และคณะ, 2551) สำหรับปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งในประเทศไทยโดยเฉพาะในพื้นที่ชายฝั่งอ่าวไทยตอนบนหรืออ่าวไทยรูปตัว “ก” เป็นปัญหาที่มีความรุนแรงมากในปัจจุบัน (การไฟฟ้านครหลวง, 2555) ทั้งนี้มีการตระหนักถึงปัญหาดังกล่าวทั้งจากประชาชนในพื้นที่ที่เกิดปัญหาการกัดเซาะชายฝั่ง รวมถึงจากภาครัฐ และเอกชนภายนอกพื้นที่ ก่อให้เกิดความพยายามในการแก้ไขปัญหาการกัดเซาะดังกล่าวในหลากหลายวิธีการ ทั้งการใช้ภูมิปัญญาชาวบ้าน และการใช้โครงสร้างทางวิศวกรรม (บุศวรรณ บิตร และคณะ, 2561) อย่างไรก็ตามการกระทำดังกล่าวทำได้เพียงแค่บรรเทาปัญหาแต่ยังไม่แก้ไขปัญหาได้มากนัก

ปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งที่เกิดขึ้นส่วนมากเกิดมาจากคลื่นที่มีความรุนแรงที่มีพลังงานสูง เคลื่อนที่เข้ากระทบชายฝั่ง ดังนั้นการป้องกันการกัดเซาะแนวชายฝั่งทะเล อาจจำเป็นต้องใช้โครงสร้างทางวิศวกรรมเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น (Charles, 2013) โดยเชื่อมกันคลื่นเป็นโครงสร้างประเภทหนึ่งที่ใช้เพื่อป้องกันหรือบรรเทาปัญหาการกัดเซาะชายฝั่ง เชื่อมกันคลื่นมีมากมายหลายชนิด เช่น เชื่อมกันคลื่นแบบหินทิ้ง, เชื่อมกันคลื่นแบบคอนกรีต, เชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็ม และทุ่นลอยกันคลื่น เป็นต้น (Herbich, 2000) โดยเชื่อมกันคลื่นจะทำหน้าที่ลดและกระจายพลังงานของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะบริเวณด้านหน้าโครงสร้าง ก่อให้เกิดการแตกตัวของคลื่น อีกทั้งก่อให้เกิดการเสียดทานของคลื่นที่เคลื่อนผ่านช่องว่างของวัสดุก่อสร้าง และเกิดการไหลแบบปั่นป่วน (Adrian et al., 2012) ทำให้คลื่นที่เข้าปะทะเชื่อมกันคลื่นนั้นมีพลังงานลดน้อยลง และลดความรุนแรงก่อนเข้าปะทะชายฝั่ง ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งหรือการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งได้

ทั้งนี้จากการศึกษาลักษณะของชายฝั่งอ่าวไทยตอนบนพบว่า ส่วนใหญ่เป็นชายฝั่งปากแม่น้ำ ส่งผลให้ชายฝั่งมีลักษณะเป็นหาดโคลน (mudflat) ตะกอนจากแม่น้ำจำนวนมากไหลออกสู่ทะเลและตกตะกอนที่ตำแหน่งบริเวณปากแม่น้ำ จากนั้นคลื่นตัวตามทิศทางของคลื่นและกระแสน้ำไปตามแนวชายฝั่งจึงก่อให้เกิดเป็นหาดโคลน (Xeidakis and Delimani, 2003) หาดโคลนดังกล่าวนี้ไม่เหมาะสมในการสร้างเชื่อมกันคลื่นที่ต้องวางบนท้องน้ำ เช่น เชื่อมกันคลื่นแบบหินทิ้ง (rubble

mound breakwater) เป็นต้น เนื่องจากดินโคลนบริเวณท้องน้ำที่มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำ ทำให้ไม่สามารถรองรับน้ำหนักของเขื่อนกันคลื่นได้ ซึ่งอาจก่อให้เกิดการทรุดตัวของเขื่อนกันคลื่น เมื่อเขื่อนกันคลื่นดังกล่าวทรุดตัวลงแล้ว ประสิทธิภาพของเขื่อนกันคลื่นจะลดลง และไม่สามารถสลายพลังงานของคลื่นได้ตามที่ออกแบบไว้เบื้องต้น (Cihan and Yuksel, 2011) ดังนั้นพื้นที่ลักษณะดังกล่าวจึงสามารถสร้างเขื่อนกันคลื่นได้เพียงไม่มากชนิดเท่านั้น อันได้แก่ เขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม (pile breakwater) และทุ่นลอยกันคลื่น (floating breakwater)

เขื่อนกันคลื่นรูปแบบใหม่จึงอาจเป็นทางเลือกในการแก้ไขปัญหาบริเวณหาดโคลน โดยพิจารณาถึงลักษณะที่เป็นข้อดีของเขื่อนกันคลื่นทั้งสองประเภทร่วมกัน ได้แก่ เขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม และทุ่นลอยกันคลื่น ข้อดีของเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มคือ มีการถ่ายเทน้ำหนักด้วยแรงเสียดทานจากเสาเข็ม (friction pile) ทำให้อัตราการทรุดตัวต่ำ ส่งผลให้โครงสร้างมีความแข็งแรงและทนทาน สามารถใช้งานได้เป็นระยะเวลานาน มีประสิทธิภาพในการทำงานที่คงที่ แต่มีข้อเสียคือใช้เสาเข็มจำนวนมาก ทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างสูง (Hayashi et al., 1968) ส่วนลักษณะของทุ่นลอยกันคลื่นคือ มีพื้นที่ว่างด้านใต้โครงสร้าง ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม แต่มีข้อเสียคือต้องดำเนินการยึดโครงสร้างกับท้องน้ำ และอาจมีการเสื่อมสภาพของโครงสร้างได้ง่ายเนื่องจากส่งถ่ายแรงด้วยระบบผูกยึดเท่านั้น (McCartney, 1985) ทั้งนี้เขื่อนกันคลื่นรูปแบบใหม่จะมีลักษณะเป็นเสาเข็มปักลงลึกในท้องน้ำคล้ายเสา และมีโครงสร้างเพื่อสลายพลังงานคลื่นที่บริเวณผิวน้ำติดอยู่ในลักษณะคงที่ กล่าวคือ เมื่อคลื่นเข้ากระทบกับโครงสร้างบริเวณผิวน้ำแล้ว โครงสร้างจะรับแรงจากคลื่นและส่งต่อเข้าเสาทั้งสองฝั่งของโครงสร้าง จากนั้นแรงจะถูกส่งต่อไปยังชั้นดินใต้ท้องน้ำ ทำให้โครงสร้างดังกล่าวมีความแข็งแรงเหมือนเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม แต่ใช้วัสดุในการก่อสร้างที่น้อยกว่า และสามารถสลายพลังงานคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่งได้ด้วยโครงสร้างบริเวณผิวน้ำในลักษณะเดียวกับทุ่นลอยกันคลื่น (Biesheuvel, 2013) ซึ่งจะช่วยในการลดปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งในพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นหาดโคลนที่มีอยู่เป็นจำนวนมากของชายฝั่งทะเลประเทศไทย นอกจากนี้โครงสร้างยังมีช่องว่างด้านล่างเพื่อเป็นการลดผลกระทบต่อระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อมเช่นเดียวกับทุ่นลอยกันคลื่น ในที่การศึกษาี้ผู้ศึกษาขอเรียกเขื่อนกันคลื่นลักษณะดังกล่าวว่า เขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน (partial breakwater) เขื่อนกันคลื่นลักษณะดังกล่าวนี้มีใช้แล้วในประเทศไทยในบริเวณอ่าวไทยตอนบน (การไฟฟ้านครหลวง, 2555) โดยก่อสร้างจากเสาไฟฟ้าที่เหลือใช้ดังแสดงในรูปที่ 1-1 ทั้งนี้ การก่อสร้างเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนในพื้นที่ดังกล่าวนี้ ได้กระทำโดยปราศจากการออกแบบ

ทางวิศวกรรม เนื่องจากยังไม่มีการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการใช้งานเพื่อการออกแบบที่เหมาะสม ซึ่งการก่อสร้างในปัจจุบันนั้นเป็นไปตามประสบการณ์ของผู้ควบคุมงานเท่านั้น



รูปที่ 1-1 เขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน บริเวณอ่าวไทยตอนบน

งานวิจัยครั้งนี้จึงมีจุดมุ่งหมาย เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่น และพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่น เนื่องจากอิทธิพลของโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน ในรูปของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น ตามลำดับ ด้วยแบบจำลองทางกายภาพแบบ 2 มิติ โดยตัวแปรที่สนใจของการศึกษา ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพของโครงสร้าง และคุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปเป็นแนวทางในการออกแบบเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน หรือประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมเพื่อการแก้ไขปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งในพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นหาดโคลนอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาพฤติกรรมการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น เนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน (partial breakwater)
- 2) พัฒนาสมการความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น ร่วมกับตัวแปรคุณสมบัติคลื่นและลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน (partial breakwater)

1.3 ขอบข่ายการศึกษา

การศึกษาดังกล่าวนี้ใช้แบบจำลองทางกายภาพ (physical model) โดยมีลักษณะเป็นอ่างจำลองคลื่นที่มีขนาดความกว้าง 10 เมตร ยาว 20 เมตร และลึก 0.70 เมตร ณ ห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล อาคารอนุสาสน์ยันตรกรรม ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีรายละเอียดและขอบเขตการศึกษา ดังนี้

- 1) คลื่นที่ใช้ในการทดลองเป็นคลื่นสม่ำเสมอ (regular wave) ที่สร้างด้วยเครื่องกำเนิดคลื่น (wave generator) และมีทิศทางตั้งฉากกับโครงสร้าง ลักษณะคุณสมบัติคลื่น (ความสูงคลื่น และคาบเวลาคลื่น) จะแปรผันเป็นช่วงตามข้อจำกัดทางความสามารถของเครื่องกำเนิดคลื่น โดยหากพิจารณาเป็นค่าความชันคลื่นจะอยู่ในช่วงประมาณ 0.010 – 0.025
- 2) ระดับน้ำนิ่ง (still water level) ในอ่างจำลองคลื่นมีความลึกเพียงระดับเดียว โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.45 เมตร
- 3) เชื่อกันคลื่น ใช้โครงสร้างเหล็กกล่องรูปพรรณที่มีความทึบน้ำที่ตำแหน่งบริเวณผิวน้ำ โดยมีเสาเหล็กเพื่อรองรับน้ำหนักของโครงสร้างและแรงจากการกระทำของคลื่นที่รวมถึงเพื่อลดการแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักโครงสร้าง ความหนาของโครงสร้างคงที่ คือ 0.0375 เมตร รวมถึงความยาวของโครงสร้างเต็มความกว้างของอ่างจำลองคลื่น หรือเป็นการทดลองแบบ 2 มิติ
- 4) ตัวแปรที่สนใจ พิจารณาเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ประกอบด้วย
 - 4.1) คุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง ได้แก่ ความสูงคลื่นและคาบคลื่น เพื่อนำตัวแปรทั้งสองมาคำนวณความชันคลื่นในแต่ละกรณี
 - 4.2) ลักษณะการใช้งานของโครงสร้าง ได้แก่ ความลึกการจมโครงสร้าง การยอมให้คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง
- 5) การศึกษาครั้งนี้มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทั้งสิ้น 4 ตัวแปร ดังต่อไปนี้
 - 5.1) ตัวแปรความชันคลื่น มีค่าระหว่าง 5 ช่วง คือ 0.010-0.013, 0.013-0.016, 0.016-0.019, 0.019-0.022 และ 0.022-0.025 ตามลำดับ
 - 5.2) ตัวแปรความลึกการจมโครงสร้างจากผิวน้ำ มีค่า 4 ช่วง คือ 0.075, 0.150, 0.225 และ 0.300 เมตร ตามลำดับ
 - 5.3) ตัวแปรการยอมและไม่ยอมให้คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง โดยทำการเพิ่มความสูงของโครงสร้างให้อยู่เหนือผิวน้ำนิ่ง 0.150 เมตร ในกรณีที่ไมยอมให้คลื่นล้นข้าม

- 5.4) ตัวแปรระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น มีค่า 3 ช่วง คือ 0.5, 1.0 และ 1.5 เมตร ตามลำดับ

1.4 การดำเนินการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินการตามขั้นตอนการศึกษา เพื่อให้ครอบคลุมขอบเขตและวัตถุประสงค์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- 1) ศึกษาและรวบรวมเอกสารทางวิชาการและหลักการทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ทั้งจากสิ่งตีพิมพ์, งานวิจัย และหนังสือ เพื่อใช้เป็นแนวทางการศึกษาและออกแบบการทดลอง
- 2) ศึกษาเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในแบบจำลองทางกายภาพ ตรวจสอบและปรับปรุงเครื่องมือและอุปกรณ์ให้มีความเตรียมพร้อมในการศึกษาทดลอง
- 3) เปรียบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในแบบจำลองทางกายภาพ
- 4) ออกแบบแบบจำลองทางกายภาพ และสร้างแบบจำลองเชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน
- 5) ทำการทดลองกรณีต่าง ๆ ของการจำลองด้วยแบบจำลองทางกายภาพ ทำการเก็บข้อมูลจากอุปกรณ์วัดข้อมูลคลื่น สังเกตพฤติกรรมของลักษณะคลื่นที่เกิดขึ้นจริงขณะทำการทดลอง
- 6) ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองจากแบบจำลองทางกายภาพ ได้แก่ พฤติกรรมการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น เนื่องจากอิทธิพลของเชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน
- 7) จัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงพฤติกรรมการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น เนื่องจากอิทธิพลของเชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน
- 2) สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างกับลักษณะทางกายภาพของเชื่อมกันคลื่น เช่น ความถี่การจมนของเชื่อมกันคลื่น ระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง การยอมให้คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง เป็นต้น ที่มีผลต่อพฤติกรรมการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น และสรุปเป็นสมการความสัมพันธ์ได้
- 3) เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมเพื่อป้องกันปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งในพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นหาดโคลน และเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยอื่น ๆ ต่อไป

บทที่ 2

หลักการและการศึกษาที่ผ่านมา

ในการศึกษาครั้งนี้ เพื่อให้สามารถดำเนินงานวิจัย วิเคราะห์ผล และสรุปผลการวิจัยได้นั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาทบทวนถึงหลักการทฤษฎีและการศึกษาที่ผ่านมาอันเกี่ยวข้องกับหัวข้องานวิจัย เพื่อให้สามารถอธิบายถึงกลศาสตร์ของคลื่น (wave mechanics), พฤติกรรมของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง และการเปลี่ยนแปลงของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่ง (wave transformation) ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงการทบทวนทฤษฎีและหลักการ รวมไปถึงการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับพฤติกรรมของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง ซึ่งจะนำมาสู่แนวทางในการดำเนินงานการศึกษานี้ต่อไป

2.1 กลศาสตร์ของคลื่น (wave mechanics)

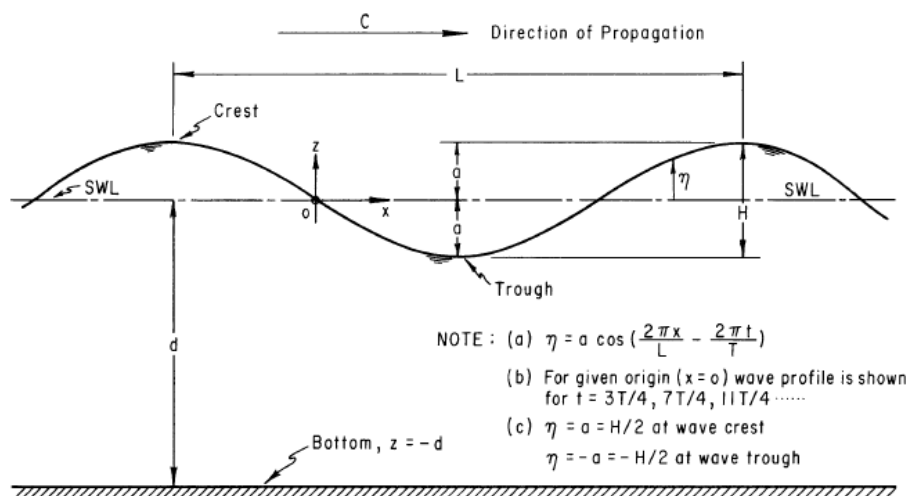
การออกแบบโครงสร้างเพื่อป้องกันแนวชายฝั่งนั้น จำเป็นต้องทราบถึงลักษณะรูปแบบต่าง ๆ ของคลื่นที่กระทำต่อชายฝั่ง ซึ่งมีความหลากหลายอย่างมาก เช่น คลื่นลม (wind wave), คลื่นที่เกิดจากเรือ (ship-generated wave), คลื่นที่เกิดจากแผ่นดินไหว (tsunami) และกระแสน้ำขึ้น-น้ำลง (tide current) เป็นต้น (Chen et al., 2002) เนื่องจากปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนั้นมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กันในหลาย ๆ ด้าน ยกตัวอย่างเช่น เมื่อคลื่นที่เกิดจากลมในน้ำลึกเคลื่อนที่เข้าใกล้ชายฝั่ง โดยทำมุมกับชายฝั่งจะทำให้เกิดการหักเหของคลื่น (refraction) หรืออาจเกิดปรากฏการณ์คลื่นแตกตัว (wave breaking) ณ บริเวณใกล้ชายฝั่ง เป็นต้น (Sorensen, 1991) ดังนั้นในการศึกษาเกี่ยวกับคลื่นจำเป็นต้องเข้าใจหลักการกลศาสตร์ของคลื่น ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่จะอธิบายความสัมพันธ์และพฤติกรรมต่าง ๆ ของคลื่น ตั้งแต่คุณสมบัติทางกายภาพตลอดจนพฤติกรรมของคลื่นที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเขื่อนกันคลื่นอันจะเป็นประเด็นหลักของการศึกษาในครั้งนี้

ลักษณะของคลื่นน้ำนั้น จะเป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำที่ผิวน้ำภายใต้อิทธิพลของแรงดึงดูดของโลก ทั้งนี้หากพิจารณาเฉพาะอนุภาคของน้ำได้คลื่นจะพบว่า อนุภาคของน้ำไม่ได้มีการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียว แต่จะเคลื่อนที่ในลักษณะที่วนอยู่กับที่ มีทั้งที่เดินทางไปด้านหน้าและกลับหลัง ซึ่งผลลัพธ์สุดท้ายแล้วอนุภาคของน้ำจะวนกลับมาอยู่ที่ตำแหน่งเดิม แต่ที่เห็นการเคลื่อนที่ของคลื่นนั้น จะเป็นการเคลื่อนที่ของพลังงานคลื่น โดยแหล่งพลังงานนั้นมีหลากหลาย เช่น คลื่นที่เกิดจากลม, คลื่นที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของวัสดุบนผิวน้ำ และคลื่นที่เกิดจากแผ่นดินไหว เป็นต้น (Silvester, 1974) ซึ่งการเคลื่อนที่ของคลื่น ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกันย่อมมีผลต่อลักษณะทางกลศาสตร์ของคลื่น นอกจากนี้ยังมีอีกหลายปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของคลื่น

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของคลื่น

คลื่นน้ำเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับผิวน้ำขึ้นลงในแต่ละช่วงเวลาและตำแหน่ง โดยมีลักษณะเป็นคลื่นฮาร์มอนิก (harmonic function) ดังแสดงในรูปที่ 2-1 ซึ่งแสดงนิยามของตัวแปรหลักของคลื่น (U.S. CERC., 1984) ดังต่อไปนี้

- 1) ความสูงคลื่น (wave height, H) คือ ระยะจากท้องคลื่น (wave trough) ถึงสันคลื่น (wave crest) ในแนวตั้ง
- 2) คาบคลื่น (period, T) คือ ระยะเวลาที่อนุภาคของน้ำบนผิวน้ำ ณ จุดใดจุดหนึ่งเคลื่อนที่ขึ้นลงครบ 1 รอบ
- 3) ความยาวคลื่น (wave length, L) คือ ระยะทางจากสันคลื่นลูกที่หนึ่งถึงสันคลื่นอีกลูกหนึ่งที่อยู่ถัดไป
- 4) ความเร็วคลื่น (wave celerity, C) คือ ความเร็วที่สันคลื่นเคลื่อนที่ โดย $C = L/T$
- 5) ระดับน้ำนิ่ง (still water level, SWL) คือ เส้นที่สมมติให้เป็นระดับน้ำนิ่ง
- 6) ความลึกน้ำ (water depth, d) คือ ระยะจากระดับน้ำนิ่งจนถึงท้องน้ำ
- 7) ระดับผิวน้ำอิสระ (free surface elevation, η) คือ ระยะที่ระดับน้ำเคลื่อนที่ขึ้นลงจากระดับน้ำนิ่งของคลื่น
- 8) ความชันคลื่น (wave steepness) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นต่อความยาวคลื่น หรือ wave steepness = H/L



รูปที่ 2-1 นิยามพารามิเตอร์ของคลื่น (U.S. CERC., 1984)

คลื่นที่เกิดขึ้นในธรรมชาติล้วนแล้วแต่เกิดขึ้นภายใต้แรงดึงดูดของโลกซึ่งจะมีความแปรปรวนสูงมาก ความแปรปรวนดังกล่าวนี้มีความซับซ้อนและยากที่จะอธิบายในเชิงคณิตศาสตร์ให้ถูกต้องและสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของคลื่น ดังนั้นเพื่อให้สามารถใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายลักษณะทางกายภาพของคลื่นได้อย่างถูกต้องนั้น จึงได้มีการใช้สมมติฐานกับการอธิบายเงื่อนไขให้ใกล้เคียงกับคลื่นในธรรมชาติมากที่สุด โดยมีการแบ่งคลื่นตามลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคของน้ำ (water particle movement) ออกเป็น 2 ประเภท (Sorensen, 1991) ได้แก่

- 1) คลื่นที่การเคลื่อนที่ของของเหลวสุทธิเป็นศูนย์ (oscillatory wave) ซึ่งคล้ายกับการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เกิดขึ้นจากการแกว่งเชือกที่มีปลายหนึ่งคงที่ การเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำจะวนเวียนอยู่กับที่โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ในตำแหน่งที่คงที่ เนื่องจากไม่รับอิทธิพลจากแรงเสียดทานของท้องน้ำ คลื่นในลักษณะดังกล่าว สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะได้แก่ คลื่นนิ่ง (standing wave) คือ ลูกคลื่นที่ตัวคลื่นมีลักษณะหยุดนิ่ง และคลื่นเคลื่อนที่ (progressive wave) คือ ลูกคลื่นที่ตัวคลื่นมีการเคลื่อนที่
- 2) คลื่นที่มีการแทนที่ของอนุภาคน้ำอย่างถาวร (translator wave) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ อนุภาคน้ำจะมีการเคลื่อนที่ตามทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากความฝืดของท้องน้ำ หากความเร็วของอนุภาคน้ำมีค่ามากกว่าความเร็วเฉือนวิกฤตของตะกอนท้องน้ำ จะทำให้น้ำพัดพาตะกอนท้องน้ำไปด้วย

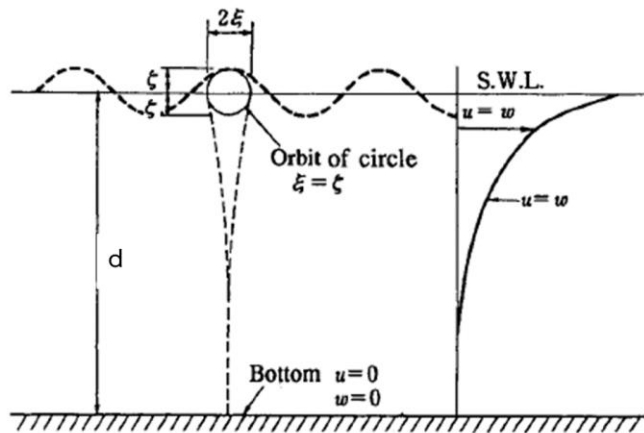
คลื่นในมหาสมุทรส่วนมากเกิดจากลม จึงเรียกว่าคลื่นลม (wind wave) เมื่อคลื่นเคลื่อนตัวออกจากพื้นที่กำเนิดโดยพิจารณาตำแหน่งเกิดคลื่นเริ่มจากตำแหน่งที่ไกลจากชายฝั่งมาก ๆ กำหนดบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณน้ำลึก (deep water) ซึ่งจำแนกโดยใช้ความลึกสัมพัทธ์ (relative depth, d/L) มากกว่า 0.5 ($d/L > 0.5$) โดยคลื่นเคลื่อนตัวเนื่องจากลักษณะวงโคจรของอนุภาคน้ำเป็นรูปร่างกลม โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของวงที่ผิวน้ำอิสระ (orbit) เท่ากับความสูงคลื่น และเส้นผ่านศูนย์กลางของวงโคจรจะลดลงตามกำลังฐานธรรมชาติ (e) จนถึงความลึกประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น หลังจากความลึกดังกล่าวนี้ให้ถือว่าไม่มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำ ในบริเวณน้ำลึกนี้ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำเป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคสุทธิ (net mass transport) เป็นศูนย์ กล่าวคือ อนุภาคของน้ำจะเคลื่อนที่ไปมารอบจุดตำแหน่งเฉลี่ยเท่านั้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าคลื่นน้ำลึกมีพฤติกรรมเป็นคลื่นที่การเคลื่อนที่ของของเหลวสุทธิเป็นศูนย์ (Sorensen, 1991)

เมื่อคลื่นจากบริเวณน้ำลึกเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณน้ำลึกปานกลาง (intermediate depth, $0.04 < d/L < 0.5$) ลักษณะทางกายภาพของคลื่นจะเปลี่ยนไป ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของน้ำตื้น

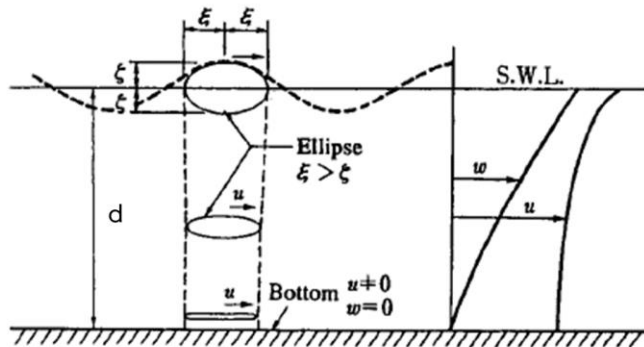
(shoaling effect) คลื่นที่อยู่ในบริเวณดังกล่าวจะมีความยาวคลื่นสั้นลง ความสูงคลื่นสูงขึ้น ความเร็วคลื่นลดลง แต่คาบเวลา (wave period, T) คงที่ไม่เปลี่ยนแปลง อนุภาคน้ำจะถูกอิทธิพลของน้ำตื้นทำให้วงโคจรมีลักษณะเป็นรูปวงรี (ellipse) แต่โคจรรอบ ๆ จุดตำแหน่งเฉลี่ยเช่นเดิม โดยมีแกนหลัก (major axis) อยู่ในแนวขนานกับท้องน้ำ และแกนรอง (minor axis) อยู่ในแนวตั้ง ซึ่งเป็นลักษณะของคลื่นที่มีสันคลื่นสูงแหลมและสั้นกว่าช่วงท้องคลื่น อันเกิดขึ้นเนื่องจากความเร็วของอนุภาคในตำแหน่งต่าง ๆ ของวงโคจรไม่เท่ากัน ลักษณะวงโคจรของอนุภาคน้ำจะลดลงตามความลึกจนกระทั่งเป็นเส้นตรงที่บริเวณท้องน้ำ อันนำไปสู่การเคลื่อนที่ของตะกอนบริเวณท้องน้ำ ลักษณะของวงรีดังกล่าวนี้จะแบนลงเรื่อย ๆ และความเร็วที่ท้องน้ำจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อคลื่นเคลื่อนตัวเข้าสู่บริเวณน้ำตื้น (shallow water, $d/L < 0.04$) (Sorensen, 1991) รูปที่ 2-2 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำภายใต้คลื่น ณ บริเวณน้ำลึก น้ำลึกปานกลาง และน้ำตื้น ตามลำดับ

เมื่อคลื่นเคลื่อนตัวมาถึงตำแหน่งความลึกหนึ่ง ซึ่งที่ความลึกดังกล่าวนี้ไม่เพียงพอในการส่งถ่ายพลังงานคลื่น จะทำให้เกิดการล้มตัวหรือการแตกตัวของคลื่น (wave breaking) จากนั้นคลื่นจะเริ่มจัดรูปร่างขึ้นมาใหม่ซึ่งเป็นคลื่นชุดใหม่ที่มีพลังงานน้อยกว่า และเคลื่อนตัวเข้าหาชายฝั่งต่อไปจนกระทั่งถึงบริเวณที่ความลึกไม่เพียงพออีกครั้งและแตกตัวอีกรอบ และเป็นเช่นนี้เรื่อยไปจนกว่าจะถึงชายฝั่ง บริเวณที่คลื่นแตกตัวนั้นจะเกิดการปั่นป่วน (turbulence) มาก เนื่องจากการถ่ายทอดพลังงานของคลื่นทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของตะกอนทรายท้องน้ำ ตะกอนขนาดเล็กจะถูกยกตัวขึ้นและถูกคลื่นและกระแสน้ำพัดพาในสภาพสารแขวนลอย (suspension) อันเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการทางชายฝั่ง (coastal processes) (Silvester, 1979)

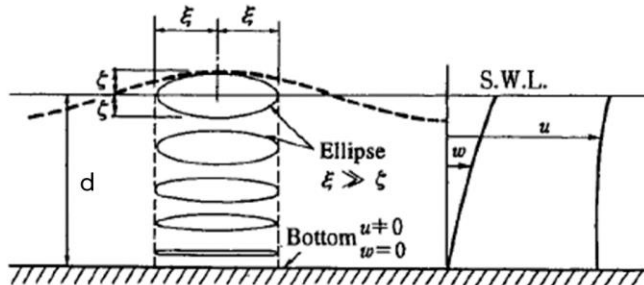
นอกจากนั้นเมื่อคลื่นเคลื่อนตัวเข้าสู่ น้ำลึกปานกลางหรือน้ำตื้น ยังเกิดปรากฏการณ์หนึ่ง คือ การหักเหของคลื่น (wave refraction) โดยเมื่อทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นทำมุมกับเส้นระดับท้องน้ำ ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนตัวจะแปรผันตามความลึกของท้องน้ำ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่เคลื่อนตัวผ่าน ดังนั้นในขณะที่คลื่นเคลื่อนตัว ความเร็วของคลื่นจึงไม่เท่ากัน แนวสันคลื่น (wave crest) ที่เคลื่อนตัวผ่านตำแหน่งที่ลึกกว่าจะเคลื่อนตัวด้วยความเร็วที่สูงกว่าตำแหน่งที่ตื้น อันก่อให้เกิดการบิดแนวหรือที่เรียกว่าการหักเหนั่นเอง นอกจากนี้ ยังมีปรากฏการณ์อื่นอีก ได้แก่ การสะท้อนของคลื่น (wave reflection) โดยจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเข้าปะทะหาดหรือโครงสร้างบริเวณชายฝั่งที่มีความลาดชันสูง รวมถึงการกระจายของคลื่น (wave diffraction) โดยจะเกิดเมื่อคลื่นเคลื่อนตัวผ่านช่องว่างระหว่างโครงสร้างที่ขวางทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (Sorensen, 1991)



ก) บริเวณน้ำลึก ($d/L > 0.5$)



ข) บริเวณน้ำลึกปานกลาง ($0.04 < d/L < 0.5$)



ค) บริเวณตื้น ($0.04 < d/L$)

รูปที่ 2-2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำภายใต้คลื่น (Sawaragi, 1995)

2.1.2 ลักษณะของคลื่นในเชิงคณิตศาสตร์

คลื่นในธรรมชาติส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากลม ซึ่งลมมีความแปรปรวนสูง ดังนั้นคลื่นจึงมีความแปรปรวนสูงตามไปด้วย ลักษณะทางกายภาพของผิวน้ำที่ตำแหน่งสันคลื่นและท้องคลื่นค่อนข้างที่จะมีความซับซ้อนและมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จากที่กล่าวไปข้างต้นว่าคลื่นเคลื่อนที่ด้วยการ

ส่งผ่านพลังงานจากลมสู่ผิวน้ำ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้เกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอและไม่คงที่บนผิวน้ำ อันนำไปสู่การไม่คงที่ของขนาดและทิศทางในการเคลื่อนที่ของคลื่น (Sorensen, 1991)

เมื่อคลื่นเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการถ่ายพลังงานจากลมสู่ผิวน้ำ คลื่นจะเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดโดยจะมีลักษณะเป็นระเบียบและสม่ำเสมอมากขึ้นตามระยะทาง สันคลื่นและท้องคลื่นเริ่มปรากฏเด่นชัดเจขึ้น พลังงานของคลื่นจะเริ่มลดลงไปอย่างต่อเนื่องตามระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากการสูญเสียพลังงานภายใน เช่น ความเสียดทานของผิวน้ำและอากาศ, ความเสียดทานของพื้นท้องทะเลในน้ำตื้น และความปั่นป่วนจากการแตกตัวและการกระจายของคลื่น เป็นต้น (Silvester, 1974)

ด้วยเหตุผลทั้งหมดที่กล่าวมาส่งผลให้การบรรยายลักษณะของคลื่นในเชิงคณิตศาสตร์เป็นไปได้ยาก ความแปรปรวนที่สูงและความซับซ้อนของรูปแบบคลื่นทำให้การบรรยายในเชิงคณิตศาสตร์ไม่สามารถทำได้อย่างถูกต้องตลอดการเคลื่อนที่ของคลื่น นอกจากนี้รูปแบบของการเคลื่อนตัวของคลื่นที่มีลักษณะความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (non-linear wave) ส่งผลให้ตลอดการเคลื่อนที่มีรูปแบบที่ซับซ้อน (Silvester, 1979) ดังนั้นในการบรรยายรูปแบบของคลื่นในเชิงคณิตศาสตร์จึงทำได้เพียงการประมาณ ภายใต้สมมติฐานบางอย่างเพื่อให้สามารถบรรยายคลื่นได้ ส่งผลให้ค่าที่ได้ออกมาจากการคำนวณเป็นเพียงการประมาณเท่านั้น ไม่อาจให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำถูกต้องตามจริงได้ ทั้งนี้ในปัจจุบันมีนักวิทยาศาสตร์มากมายได้ทำการศึกษาและพยายามทำความเข้าใจปรากฏการณ์คลื่นในธรรมชาติที่เกิดขึ้น อันนำมาสู่หลายทฤษฎีที่ใช้อธิบายลักษณะต่าง ๆ ของคลื่น

ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย (small amplitude wave theory) คิดค้นโดย Airy, 1845 (U.S. CERC., 1984) เป็นทฤษฎีที่มีแนวความคิดมาจากการไหลแบบอุดมคติของของเหลวในสองมิติ โดยพัฒนามาจากสมการเชิงเส้นที่มีการกำหนดสภาวะขอบเขตผิวน้ำอิสระ (free surface condition) โดยไม่คำนึงถึงผลจากแรงหนืดหรือแรงตึงผิว ทฤษฎีดังกล่าวบรรยายลักษณะของคลื่นเป็นลักษณะเป็นคลื่นฮาร์โมนิก (harmonic wave) ที่เคลื่อนที่อย่างง่ายโดยรูปแบบฟังก์ชันคลื่นรูปไซน์ (sine function) ที่มีการอธิบายการเคลื่อนที่ของคลื่นเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นจะเกิดขึ้นเฉพาะในคลื่นน้ำลึก เนื่องจากมีความเป็นระเบียบและสม่ำเสมอ ส่งผลให้ในการบรรยายคลื่นน้ำลึกโดยใช้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อยจะมีความถูกต้องสูง ในทางตรงข้ามคลื่นน้ำตื้นจะมีลักษณะแตกต่างกันไปเนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างอื่น ๆ เข้ามาเกี่ยวข้อง

ทฤษฎีคลื่นความสูงมาก (finite amplitude wave theory) จะบรรยายลักษณะของคลื่นที่เคลื่อนที่ในลักษณะไม่เชิงเส้น โดยมีการบรรยายอยู่หลากหลายทฤษฎีและมีขอบเขตที่แตกต่างกัน

การบรรยายลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นในน้ำตื้นด้วยทฤษฎีคลื่นความสูงมากจะให้ผลที่ดีกว่าการบรรยายด้วยทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย ซึ่งในแต่ละทฤษฎีนั้นจะมีสมมติฐาน, ข้อจำกัด และขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณที่แตกต่างกันไป (U.S. CERC., 1984) ทฤษฎีคลื่นความสูงมากที่สำคัญ ได้แก่ ทฤษฎีคลื่นของสโตกส์ (Stoke's wave theory), ทฤษฎีคลื่นชื่อยอด (Cnoidal wave theory) และทฤษฎีคลื่นโดดเดี่ยว (Solitary wave theory) เป็นต้น (Sorensen, 1991)

การศึกษาในครั้งนี้ได้พิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นภายใต้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย เนื่องจากสะดวกต่อการคำนวณรูปแบบการเคลื่อนที่ของคลื่น ประกอบกับทฤษฎีคลื่นความสูงมากนั้นมีความซับซ้อนในการคำนวณ ในการศึกษาได้อาศัยทฤษฎีคลื่นความสูงน้อยในการกำหนดคุณสมบัติของคลื่นที่ใช้เปรียบเทียบ, สอดเทียบ และคำนวณลักษณะของคลื่นที่จะใช้ในการศึกษา ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อยนี้จะจำแนกคลื่นตามความลึกน้ำประกอบด้วย คลื่นในน้ำลึก, คลื่นในความลึกเปลี่ยนแปลง และคลื่นน้ำตื้น เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ในน้ำลึก คุณสมบัติต่าง ๆ ของคลื่นมีลักษณะคงที่ ได้แก่ ความเร็ว, ความยาวคลื่น และคาบคลื่น เป็นต้น แต่เมื่อคลื่นเริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่ น้ำตื้น คลื่นจะมีคุณสมบัติต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากกระบวนการต่าง ๆ เช่น การเคลื่อนที่เข้าสู่ น้ำตื้น (wave shoaling), การหักเหของคลื่น (wave refraction), การสะท้อนของคลื่น (wave reflection), การกระจายของคลื่น (wave diffraction) และการแตกตัวของคลื่น (wave breaking) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวทำให้ความเร็วคลื่น และความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงไป เว้นแต่คาบคลื่นที่มีขนาดเท่าเดิม โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นและความเร็วของคลื่นในช่วงความลึกต่าง ๆ ตามทฤษฎีคลื่นความสูงน้อยดังตารางที่ 2-1 (U.S. CERC., 1984)

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติของคลื่นในช่วงความลึกต่าง ๆ (U.S. CERC., 1984)

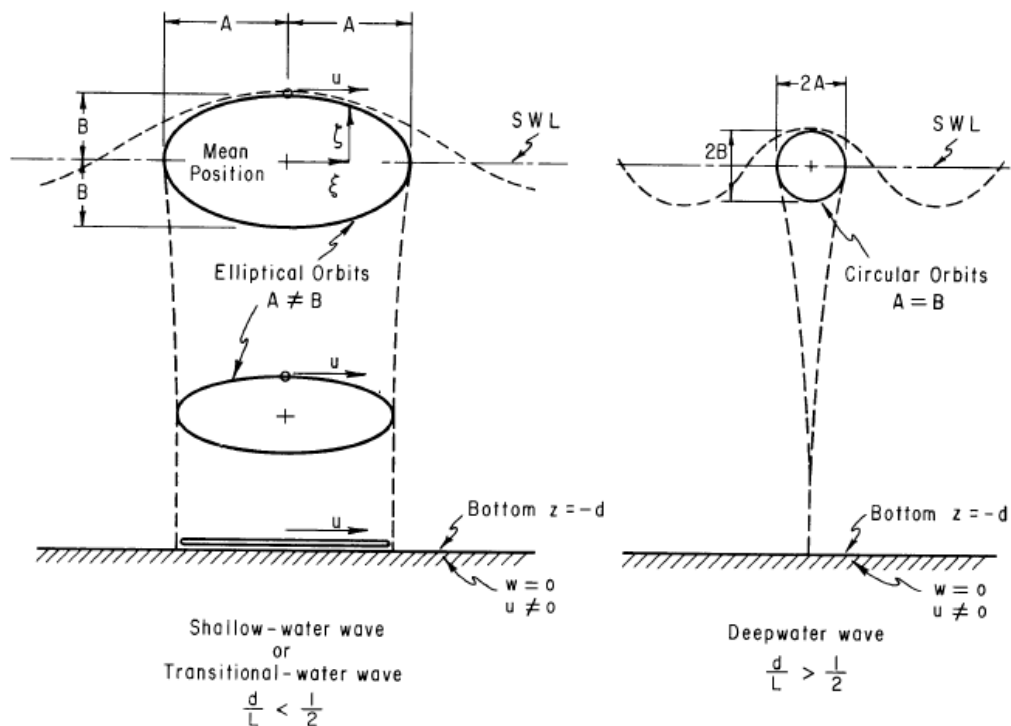
คุณสมบัติคลื่น	คลื่นในน้ำตื้น ($\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$)	คลื่นในความลึกเปลี่ยนแปลง ($\frac{1}{25} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$)	คลื่นในน้ำลึก ($\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$)
ความยาวคลื่น	$L = T\sqrt{gd}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi}$
ความเร็วคลื่น	$C = \sqrt{gd}$	$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}$	$C = \frac{gT}{2\pi} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$
ความเร็วกลุ่ม	$C_g = C = \sqrt{gd}$	$C_g = nC = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh 4\pi d/L} \right] C$	$C_g = \frac{1}{2} C = \frac{gT}{4\pi}$

2.2 การเปลี่ยนแปลงของคลื่น (wave transformation)

เมื่อน้ำได้รับพลังงานจากแหล่งกำเนิดและก่อเกิดเป็นคลื่น หากพิจารณาให้จุดเกิดคลื่นอยู่ในบริเวณน้ำลึก คลื่นจะเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดอย่างเป็นระเบียบและสม่ำเสมอตามระยะทาง จนกระทั่งคลื่นเริ่มเคลื่อนเข้าสู่น้ำตื้น อิทธิพลของน้ำตื้นจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคลื่น (wave transformation) ระดับความลึกน้ำที่ลดลงส่งผลให้ความเสียดทานกับท้องน้ำมีอิทธิพลต่อคลื่น จากทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย ความยาวคลื่นจะลดลง แต่ความสูงคลื่นจะเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่จากน้ำลึกเข้าสู่น้ำตื้น จะส่งผลให้ความชันคลื่น (wave steepness, H/L) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความสูงคลื่นที่ (wave height, H) ต่อความยาวคลื่น (wave length, L) เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่าความชันสูงสุดที่คลื่นนั้นไม่สามารถที่จะทรงตัวอยู่ได้ จึงเกิดปรากฏการณ์แตกตัวของคลื่น (wave breaking) และกลายเป็นคลื่นลูกใหม่ที่เคลื่อนที่ตามกันไปจนถึงชายฝั่ง (U.S. CERC., 1984) นอกจากนี้เมื่อคลื่นเคลื่อนตัวผ่านลักษณะทางกายภาพของทะเลที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น ความลึกหรือความลาดที่เปลี่ยนไป, ความหนาแน่นของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป หรือการมีโครงสร้างกั้นขวาง เป็นต้น ลักษณะพฤติกรรมของคลื่นจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย กระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่จากน้ำลึกสู่น้ำตื้นทั้งหมดได้กล่าวถึงโดยสังเขปแล้วในหัวข้อ 2.1 และจะอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อย่อยถัดไป

2.2.1 การเคลื่อนที่ของคลื่นเข้าสู่น้ำตื้น

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ออกจากบริเวณที่เป็นแหล่งกำเนิด ซึ่งในที่นี้จะขอพิจารณาให้เป็นบริเวณน้ำลึกและอยู่นอกอิทธิพลจากการกระทำของกระแสลม (swell wave) เนื่องจากแรงเสียดทานจากพื้นผิวทะเลไม่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลื่นน้ำลึก ดังนั้นคลื่นจะเคลื่อนที่อย่างมีระเบียบและสม่ำเสมอมากขึ้นตามระยะทางการเคลื่อนที่ สันคลื่นและท้องคลื่นจะเริ่มปรากฏอย่างชัดเจน อนุภาคของน้ำที่ผิวน้ำจะเคลื่อนที่เป็นวงกลมโดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดใดจุดหนึ่งและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ ความสูงคลื่น (Sawaragi, 1995) เมื่อคลื่นดังกล่าวเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณน้ำตื้น อนุภาคของน้ำที่ผิวน้ำจะเปลี่ยนแปลงลักษณะการเคลื่อนที่เป็นวงรี เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากความเสียดทานของท้องน้ำในบริเวณน้ำตื้น และมีความสูงคลื่นที่มากขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือการมีความชันคลื่นที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะมีผลในการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ตามระยะทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (U.S. CERC., 1984) แสดงดังแสดงในรูปที่ 2-3



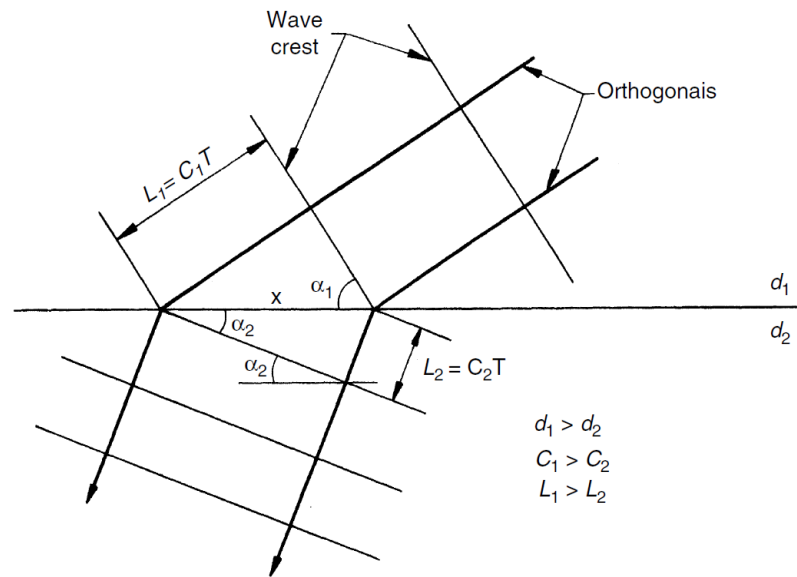
รูปที่ 2-3 การเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำภายใต้คลื่น (U.S. CERC., 1984)

เนื่องจากในการศึกษานี้มีตำแหน่งของเขื่อนกั้นคลื่น ตั้งอยู่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของอ่างจำลองคลื่น ซึ่งมีระดับของความลึกน้ำที่เท่ากันตั้งแต่เครื่องกำเนิดคลื่นจนถึงเขื่อนกั้นคลื่น และเท่ากันจนถึงท้ายอ่างจำลอง ดังนั้นจึงไม่พิจารณาผลจากการเคลื่อนที่เข้าสู่น้ำตื้น

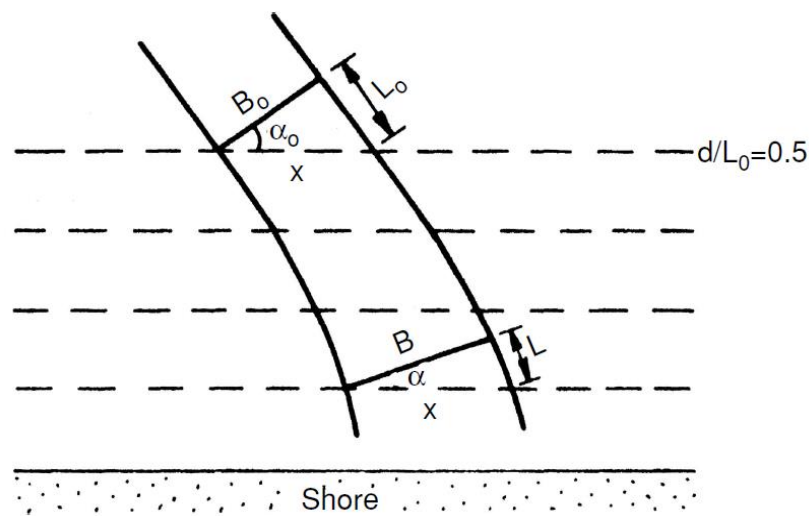
2.2.2 การหักเหของคลื่น (wave refraction) มหาวิทยาลัย

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่จากบริเวณน้ำลึกเข้าสู่น้ำตื้น ภายใต้สมมติฐานที่มีระดับท้องน้ำไม่สม่ำเสมอ ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่งจะแตกต่างกันในแต่ละระดับความลึกน้ำ โดยที่ความเร็วคลื่นจะมีค่ามากเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านน้ำลึก และจะมีค่าน้อยเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านน้ำตื้น นอกจากนี้ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ทำมุมกับแนวชายฝั่งหรือเส้นชั้นระดับท้องน้ำ จะส่งผลให้แนวสันคลื่นเกิดการบิดแนวอันก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของทิศทางการเคลื่อนที่ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การหักเหของคลื่น (wave refraction) (Sorensen, 1991)

การหักเหของคลื่นนั้น จะมีความสัมพันธ์ระหว่างความลึกน้ำกับความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่น โดยมีความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกันการหักเหของแสงที่สามารถอธิบายได้ตามกฎของสเนลล์ (Snell's Law) (U.S. CERC., 1984) ดังแสดงในรูปที่ 2-4 สำหรับรูปที่ 2-5 แสดงการบิดแนวของคลื่นจากน้ำลึกเข้าสู่ชายฝั่ง



รูปที่ 2-4 การหักเหของคลื่นตามกฎของสเนลล์ (Snell's Law) (Sorensen, 1991)



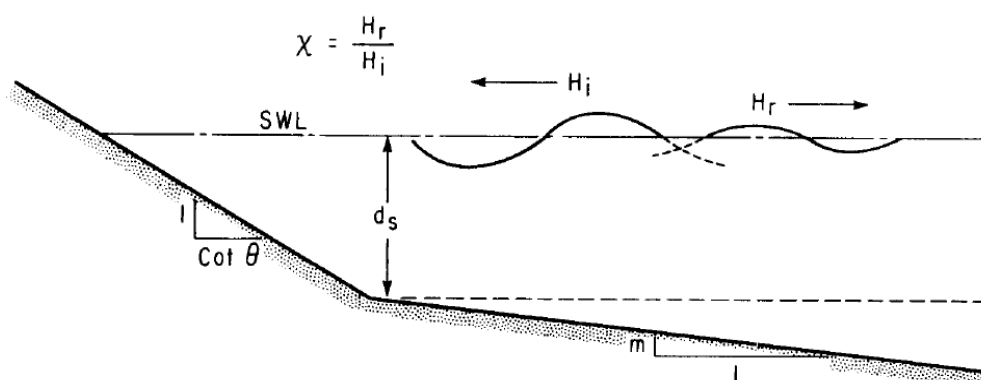
รูปที่ 2-5 การบิดแนวของคลื่นเข้าสู่ชายฝั่ง (Sorensen, 1991)

ทั้งนี้ในการศึกษาครั้งนี้ ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นตั้งฉากกับโครงสร้างและแนวชายฝั่ง อีกทั้งพื้นที่ของอ่างจำลองคลื่นมีระดับเดียวกันทั้งหมด เป็นเหตุให้มีความลึกน้ำเท่ากันตลอดทั้งอ่างจำลองคลื่น ดังนั้นจึงไม่พิจารณาผลเนื่องจากการหักเหของคลื่น

2.2.3 การสะท้อนของคลื่น (wave reflection)

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะกับระดับท้องน้ำที่มีความลาดชันของท้องน้ำมากขึ้น หรือโครงสร้างทางชายฝั่งที่มีความชัน เช่น เขื่อนกันคลื่น และท่าเรือ เป็นต้น รวมถึงตัวชายฝั่งทะเลเอง ซึ่ง

จากที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นเป็นรอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ตัวกลาง คลื่นจะเกิดการสะท้อนกลับในตัวกลางเดิมที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโดยจะมีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้น ปรากฏการณ์ในลักษณะดังกล่าวเรียกว่า การสะท้อนของคลื่น (wave reflection) คลื่นบางส่วนที่เกิดจากการสะท้อนกลับจะส่งผลให้ความสูงคลื่นในตำแหน่งที่คลื่นเสริมกันสูงขึ้น และความสูงคลื่นจะลดลงในตำแหน่งที่คลื่นหักล้างกันระหว่างคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าหาโครงสร้างและสะท้อนจากโครงสร้าง (U.S. CERC., 1984) รูปที่ 2-6 แสดงลักษณะการสะท้อนของคลื่นเมื่อเจอท้องน้ำที่มีความลาดชันมาก



รูปที่ 2-6 การสะท้อนของคลื่น (U.S. CERC., 1984)

ทั้งนี้การศึกษาการสะท้อนของคลื่นจากโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นนั้นพบว่า ผลของการสะท้อนของคลื่นนั้นปรากฏอยู่บริเวณด้านหน้าเขื่อนกันคลื่น เนื่องจากโครงสร้างมีลักษณะที่บ้น้ำและทำมุมตั้งฉากกับทิศทางของคลื่น ซึ่งจะส่งอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง เป็นเหตุให้ต้องทำการพิจารณาถึงการสะท้อนของคลื่นจากโครงสร้างกลับสู่ทิศทางกำเนิดคลื่น เพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นเนื่องจากเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน ซึ่งในการศึกษาการสะท้อนของคลื่นในการศึกษานี้ จะเปรียบเทียบความสูงคลื่นที่สะท้อนจากเขื่อนกันคลื่น (reflected wave height, H_r) และความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่เขื่อนกันคลื่น (incident wave height, H_i) เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น (reflection coefficient, K_r) ดังแสดงในสมการที่ 2-1

$$K_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (2-1)$$

เมื่อ K_r คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น (reflection coefficient)

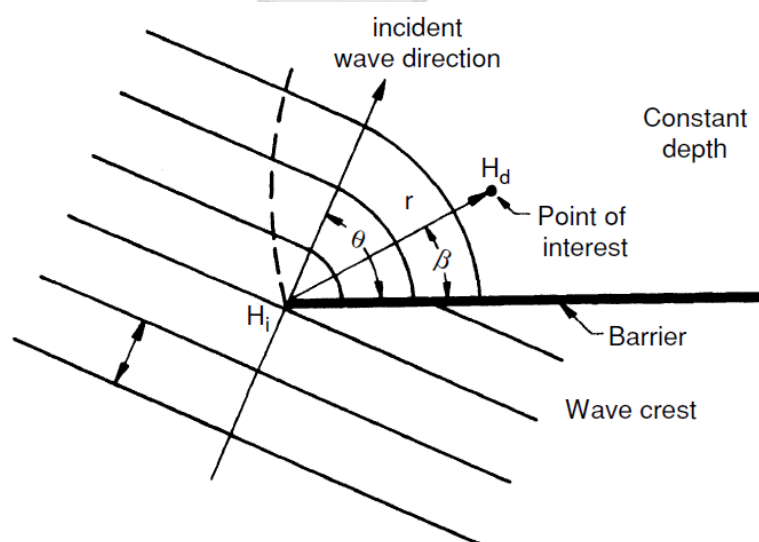
H_r คือ ความสูงคลื่นที่สะท้อนจากเขื่อนกันคลื่น (reflected wave height)

H_i คือ ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่เขื่อนกันคลื่น (incident wave height)

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น จะมีความสัมพันธ์กับลักษณะของเขื่อนกันคลื่น ถ้าโครงสร้างมีความตื้นน้ำมาก หรือมีความชันมากในบริเวณที่คลื่นเข้าปะทะ จะเกิดการสะท้อนกลับมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่กรณีที่มีลักษณะพรุน จะทำให้ความสามารถในการสะท้อนน้อย และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นก็จะน้อยลงตามไปด้วย (Silvester, 1974) ทั้งนี้บริเวณชายหาดสลายพลังงานด้านหลังอ่างจำลองคลื่นในการศึกษานี้ อาจเกิดการสะท้อนขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจส่งผลต่อตำแหน่งในการวัดคลื่นบริเวณด้านหลังโครงสร้าง

2.2.4 การกระจายของคลื่น (wave diffraction)

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่ง มักจะมีการเคลื่อนที่เข้าปะทะกับสิ่งกีดขวาง เช่น โครงสร้างเขื่อนกันคลื่น ท่าเรือ หรือเกาะเล็ก ๆ เป็นต้น คลื่นจะเกิดการกระจายเป็นรัศมีเข้าสู่บริเวณอับคลื่น (shadow area) โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ปลายของสิ่งกีดขวางที่คลื่นนั้นไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้ ทำให้เกิดการส่งผ่านพลังงานคลื่นออกด้านข้างตามความยาวของแนวสันคลื่นเข้าสู่บริเวณหลังสิ่งกีดขวาง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การกระจายตัวของคลื่น (wave diffraction) (Sorensen, 1991) เมื่อวิเคราะห์ถึงลักษณะการกระจายตัวของคลื่นโดยละเอียดนั้น จะสามารถอธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของแนวสันคลื่นเข้าสู่ด้านหลังของบริเวณอับคลื่น ดังรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7 การกระจายของคลื่น (wave diffraction) (Sorensen, 1991)

ในการศึกษานี้ได้สร้างแบบจำลองของเขื่อนกันคลื่นโดยมีความยาวตลอดทั้งความกว้างของอ่างจำลองคลื่น ซึ่งเสมือนกับการจำลองคลื่นในระบบ 2 มิติ ดังนั้นจึงไม่พิจารณาผลอันเกิดเนื่องจากการกระจายของคลื่น

2.2.5 การแตกตัวของคลื่น (wave breaking)

การแตกตัวของคลื่น (wave breaking) เป็นปัจจัยที่สำคัญของการลดพลังงานคลื่น โดยการแตกตัวของคลื่นจะเกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ การแตกตัวของคลื่นในน้ำลึก และน้ำตื้น

การแตกตัวของคลื่นสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดตามลักษณะการแตกตัว ได้แก่ spilling breaker, plunging breaker, surging breaker และ collapsing breaker (Sorensen, 1991) โดยที่ชนิดของการแตกตัวนี้สามารถคำนวณได้จากคุณสมบัติบางประการของคลื่น ได้แก่ ความชันคลื่นในน้ำลึก และความลาดชันของท้องน้ำ (Sawaragi, 1995) เมื่อคลื่นเกิดการแตกตัวแล้ว จะเกิดการสลายพลังงานขึ้น ณ บริเวณนั้นและเป็นจุดเริ่มต้นของการเคลื่อนตัวของตะกอนชายฝั่ง อันนำไปสู่กระบวนการกัดเซาะและทับถมหรือการเปลี่ยนแปลงทางชายฝั่ง (Horikawa, 1988)

ในการศึกษานี้ไม่ได้มีการพิจารณาเกี่ยวกับการแตกตัวของคลื่น เนื่องจากอ่างจำลองคลื่นมีลักษณะทางกายภาพที่คงที่ ทำให้คลื่นมีลักษณะคงที่และไปเกิดการแตกตัวบริเวณชายฝั่งจำลองที่ใช้สลายพลังงานคลื่นที่จะสะท้อนกลับเข้ามาในระบบ ซึ่งอยู่นอกเหนือขอบเขตการศึกษา

2.2.6 การส่งผ่านคลื่น (wave transmission)

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางหรือตัวกลางที่มีลักษณะไม่ทึบน้ำทั้งหมด จะเกิดพฤติกรรมของการสะท้อนของคลื่นบางส่วน และการสูญเสียพลังงานจากตัวเชื่อมกันคลื่นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วนของอนุภาคน้ำและความเสียดทานจากสิ่งกีดขวาง (Adrian et al., 2012) ส่งผลให้ความสูงของคลื่นที่ผ่านโครงสร้างไปได้ มีขนาดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าหาโครงสร้าง ซึ่งในการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นในการศึกษานี้ จะเปรียบเทียบความสูงคลื่นหลังผ่านเชื่อมกันคลื่น (transmitted wave height, H_t) และความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่เชื่อมกันคลื่น (incident wave height, H_i) เรียกว่า สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (transmission coefficient, K_t) ดังแสดงในสมการ 2-2

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (2-2)$$

เมื่อ K_t คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (transmission coefficient)

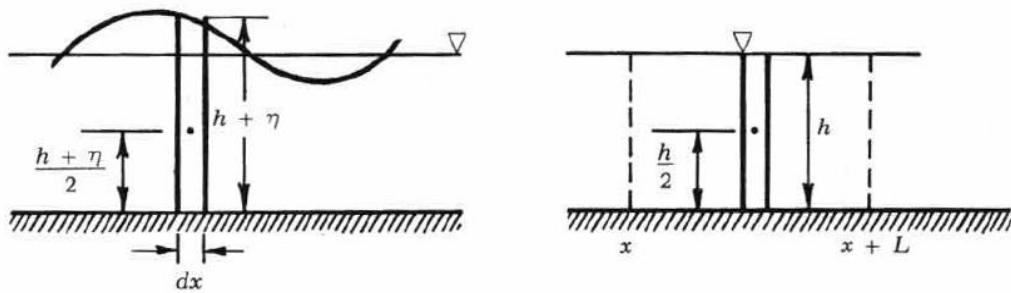
H_t คือ ความสูงคลื่นหลังผ่านเชื่อมกันคลื่น (transmitted wave height)

H_i คือ ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่เชื่อมกันคลื่น (incident wave height)

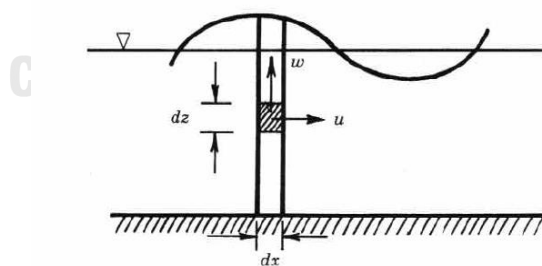
ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของเขื่อนกันคลื่น ถ้าหากมีความตึบน้ำมาก ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะน้อย แต่กรณีที่มีลักษณะที่มีความพรุนหรือความสามารถในการยอมให้น้ำผ่านได้มาก ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

2.3 พลังงานของคลื่น (wave energy)

พลังงานของคลื่นเป็นผลรวมของพลังงานที่เกิดจากพลังงานจลน์ (kinetic energy, E_k) และพลังงานศักย์ (potential energy, E_p) (Ippen, 1966) โดยที่พลังงานศักย์นั้น เกิดจากมวลน้ำที่อยู่เหนือตำแหน่งที่พิจารณา (ระดับน้ำนิ่ง) โดยไม่คำนึงถึงแรงตึงผิวของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2-8 และพลังงานจลน์เกิดจากความเร็วน้ำที่เคลื่อนที่ แสดงดังรูปที่ 2-9 โดยจะเห็นได้ว่าพลังงานศักย์ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ สามารถพิจารณาได้จากอิทธิพลของความสูงคลื่น และพลังงานจลน์สามารถพิจารณาได้จากอิทธิพลของความเร็วน้ำที่อยู่นอกใต้คลื่น



รูปที่ 2-8 การพิจารณาพลังงานศักย์ของคลื่น (Ippen, 1966)



รูปที่ 2-9 การพิจารณาพลังงานจลน์ของคลื่น (Ippen, 1966)

อย่างไรก็ตามจากทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย (U.S. CERC., 1984) ซึ่งเป็นสมมติฐานเบื้องต้นสำหรับการศึกษานี้ได้กล่าวว่า เมื่อคำนวณพลังงานศักย์จากระดับน้ำนิ่ง (still water level, SWL) และตั้งสมมติฐานให้คลื่นทั้งหมดเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน พลังงานศักย์และพลังงานจลน์นั้นจะมีค่าเท่ากัน และพลังงานคลื่นรวมในหนึ่งความยาวคลื่นต่อความกว้างของสันคลื่นหนึ่งหน่วย สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2-3

$$E = E_p + E_k = \frac{\rho g H^2 L}{16} + \frac{\rho g H^2 L}{16} = \frac{\rho g H^2 L}{8} \quad (2-3)$$

เมื่อ	E	คือ พลังงานรวมของคลื่น ต่อ 1 หน่วยความกว้างของสันคลื่น
	E_p	คือ พลังงานศักย์รวมของคลื่นต่อหนึ่งหน่วยความกว้างสันคลื่น
	E_k	คือ พลังงานจลน์รวมของคลื่นต่อหนึ่งความกว้างสันคลื่น
	ρ	คือ ความหนาแน่นของน้ำ
	g	คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก
	L	คือ ความยาวคลื่น
	H	คือ ความสูงคลื่น

เมื่อพิจารณาพลังงานของคลื่นเฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (total average wave energy per unit area, \bar{E}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2-4

$$\bar{E} = \frac{E}{L} = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (2-4)$$

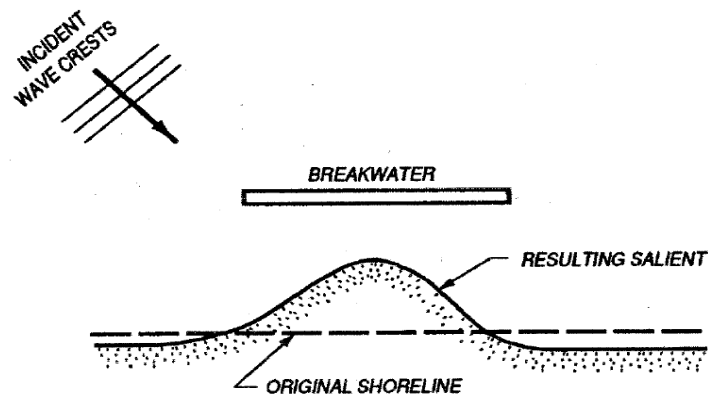
เมื่อ \bar{E} คือ พลังงานของคลื่นเฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

จะเห็นได้ว่าขนาดของพลังงานคลื่น ณ ตำแหน่งและเวลาต่าง ๆ สามารถพิจารณาได้จากตัวแปรความสูงคลื่น อ้างอิงจากสมมติฐานของทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย ดังปรากฏในการศึกษาที่ผ่านมาของ Muttray M. et al. (1992), Makris and Memos (2007), Hsiao et al. (2008), Zidan et al. (2012), Hur et al. (2014), El.serafy et al. (2016), He et al. (2016), Hajivalie (2017) และ Hajivalie and Mahmoudof (2018) รายละเอียดของการศึกษาเหล่านี้สามารถดูได้ในภาคผนวก ก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงขนาดของความสูงคลื่น ซึ่งแสดงพฤติกรรมของการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น เนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนที่เกิดขึ้นในการศึกษานี้ จึงสามารถอนุมานให้เสมือนแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของพลังงานคลื่นในตำแหน่งต่าง ๆ เนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนได้ด้วยเช่นกัน

2.4 เขื่อนกันคลื่น (breakwater)

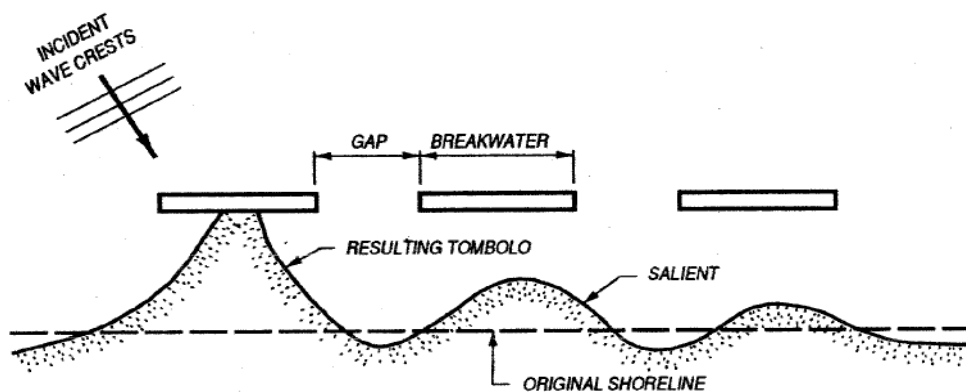
เขื่อนกันคลื่นนอกชายฝั่ง หรือเขื่อนกันคลื่น (breakwater) เป็นโครงสร้างที่ตั้งอยู่บริเวณใกล้ชายฝั่ง ถูกออกแบบเพื่อลดทอนพลังงานคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่ง โดยจะทำหน้าที่ลดและกระจายพลังงานของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะบริเวณด้านหน้าโครงสร้าง ก่อให้เกิดการแตกตัวของคลื่น อีกทั้งก่อให้เกิดการเสียดทานของคลื่นที่เคลื่อนผ่านช่องว่างของวัสดุก่อสร้าง และเกิดการไหลแบบปั่นป่วน

(Adrian et al., 2012) ทำให้คลื่นที่เข้าปะทะเชื่อมกันคลื่นนั้นมีพลังงานลดน้อยลงและลดความรุนแรงก่อนเข้าปะทะชายฝั่ง ผลของการลดทอนคลื่นนี้ช่วยให้เกิดพื้นที่อับคลื่น หรือพื้นที่คลื่นสงบด้านหลังโครงสร้าง ทำให้ตะกอนที่เคลื่อนตัวมาตามกระแสน้ำชายฝั่งเกิดการตกตะกอน ส่งผลให้เกิดการทับถมของตะกอนด้านหลังโครงสร้าง (Soomere and Quak, 2013) โดยปกติแล้วโครงสร้างชนิดนี้จะวางตัวในแนวขนานกับชายฝั่ง ดังแสดงในรูปที่ 2-10



รูปที่ 2-10 การทำงานของเชื่อมกันคลื่น (U.S. CERC., 1984)

ปริมาณการทับถมของตะกอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการมีอยู่ของเชื่อมกันคลื่นจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับารออกแบบเชื่อมกันคลื่น ทั้งเรื่องของลักษณะโครงสร้าง, ช่องว่าง และตำแหน่งที่วางของเชื่อมกันคลื่น โดยหากมีตะกอนทับถมมากจนแนวชายฝั่งงอกไปชนโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นจะเรียกว่า tombolo แต่หากแนวชายฝั่งงอกไปไม่ถึงจะเรียกว่า salient ในเชิงทฤษฎีแล้วการออกแบบเชื่อมกันคลื่นให้เกิดการทับถมแบบ salient จะดีกว่าแบบ tombolo เนื่องจากตะกอนจะสามารถไหลตามแนวขนานชายฝั่งเนื่องจากอิทธิพลของกระแสน้ำได้ทิศทางตามแนวชายฝั่งได้ ทำให้สมดุลของตะกอนไม่เปลี่ยนแปลง และไม่ส่งกระทบให้เกิดการกัดเซาะชายฝั่งในพื้นที่ข้างเคียง (U.S. CERC., 1984) รูปที่ 2-11 แสดงลักษณะการเกิดการทับถมของตะกอนจากอิทธิพลของเชื่อมกันคลื่น

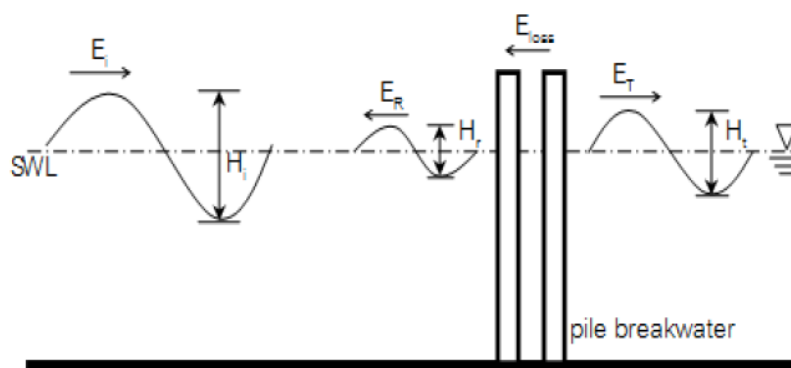


รูปที่ 2-11 ลักษณะการเกิดการทับถมของตะกอนจากอิทธิพลของเชื่อมกันคลื่น (U.S. CERC., 1984)

เขื่อนกันคลื่นมีมากมายหลายชนิด อาทิเช่น เขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้ง, เขื่อนกันคลื่นแบบคอนกรีต, เขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม, และทุ่นลอยกันคลื่น เป็นต้น โดยแต่ละชนิดจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไปขึ้นกับลักษณะการใช้งานและพื้นที่ที่ใช้งาน เนื่องจากการศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการทำงานของเขื่อนกันคลื่นชนิดใหม่ที่มีลักษณะผสมระหว่างเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม และทุ่นลอยกันคลื่น ดังนั้นจะกล่าวถึงรายละเอียดของเขื่อนกันคลื่น 2 ชนิดนี้เท่านั้น และกล่าวถึงลักษณะของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนพอสังเขป โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1 เขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม (pile breakwater)

เขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม (pile breakwater) หรือแนวกันคลื่นที่ใช้เสาเข็ม เป็นโครงสร้างทางวิศวกรรมชายฝั่งที่ทำหน้าที่สลายพลังงานและลดความรุนแรงของคลื่น โดยการสลายพลังงานคลื่นนั้นเกิดจากการสะท้อนและการสูญเสียพลังงานเมื่อคลื่นเคลื่อนตัวผ่านเขื่อนกันคลื่น ที่มีลักษณะเป็นเสาเข็มจัดเรียงเป็นแถวเดี่ยวหรือหลายแถวติดต่อกัน โครงสร้างจะมีลักษณะพื้นฐาน คือ เสาเข็มที่ถูกปักลงในท้องน้ำให้ลึกเพียงพอต่อการรับแรงคลื่น แรงที่เกิดขึ้นจากการสลายพลังงานจะถูกถ่ายลงสู่ชั้นดินในท้องน้ำในลักษณะคานยื่น ดังแสดงในรูปที่ 2-12 นอกจากนี้เขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มจะช่วยลดความรุนแรงของคลื่นที่เข้าสู่ชายฝั่งแล้ว ยังส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของการตกตะกอนในบริเวณชายฝั่งอันนำไปสู่การสูงขึ้นของระดับท้องทะเลหรือการรอกของแผ่นดินได้ (Hayashi et al., 1968)



รูปที่ 2-12 การทำงานของเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม

ทั้งนี้เขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มใช้หลักการถ่ายแรงลงสู่ชั้นท้องน้ำชั้นที่ลึก จึงทำให้เหมาะกับท้องน้ำที่ไม่สามารถรับกำลังอัดได้เยอะ ได้แก่ หาดโคลน ซึ่งเป็นลักษณะของชายฝั่งที่พบได้มากตามปากแม่น้ำขนาดใหญ่ ในประเทศไทยมักพบหาดลักษณะดังกล่าวบริเวณอ่าวไทยตอนบน หรืออ่าวไทยรูปตัว “ก” และมีการใช้งานเขื่อนกันคลื่นประเภทดังกล่าวในบางพื้นที่ เช่น การใช้เขื่อนกันคลื่นเสาเข็มคอนกรีตรูปสามเหลี่ยมในการป้องกันการกัดเซาะชายฝั่งที่บ้านขุนสมุทรจีน อ.พระสมุทรเจดีย์

จ.สมุทรปราการ (ธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุลและคณะ, 2551) รูปที่ 2-13 เป็นตัวอย่างของเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มที่ชายฝั่งบ้านขุนสมุทรจีน



รูปที่ 2-13 เขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มที่ชายฝั่งบ้านขุนสมุทรจีน

ประสิทธิภาพของเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทั้งชนิดของวัสดุที่ใช้ ลักษณะรูปร่างของเสาเข็ม, ระยะห่างระหว่างต้นเสาเข็ม, จำนวนแถว, และการจัดเรียงตัวเสาเข็ม ทั้งนี้ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการทำงานของเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มอยู่บ้าง และมีการใช้งานเขื่อนกันคลื่นลักษณะดังกล่าวในบางพื้นที่เท่านั้น

2.4.2 ทุ่นลอยกันคลื่น (floating breakwater)

ทุ่นลอยกันคลื่น (floating breakwater) เป็นโครงสร้างที่มีความหนาแน่นโดยรวมน้อยกว่าน้ำ ทำให้สามารถลอยอยู่บริเวณผิวน้ำได้ ดังนั้นตัวโครงสร้างของทุ่นลอยกันคลื่นจึงอยู่เฉพาะบริเวณผิวน้ำหรือกั้นขวางเพียงแค่ว่าส่วนของหน้าตัดความลึกบริเวณผิวน้ำ กล่าวคือ มีช่องว่างให้น้ำผ่านได้ในบริเวณด้านใต้ของโครงสร้างทุ่นลอยกันคลื่น โครงสร้างมีระบบผูกยึด (mooring system) เพื่อให้ตัวโครงสร้างลอยอยู่ตำแหน่งเดิมที่ผิวน้ำด้วยเชือกถวด หรือโครงสร้างอื่น ๆ โดยยึดกับท้องน้ำหรือโครงสร้างข้างเคียง (McCartney, 1985)

การลดพลังงานคลื่นของทุ่นลอยกันคลื่นจะใช้หลักการสะท้อนของคลื่น และการสลายพลังงานจลน์ของคลื่น คลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างจะเกิดการปั่นป่วน ณ ตำแหน่งโครงสร้างบริเวณ

ผิวน้ำ หากมีการล้นข้ามโครงสร้างของตัวคลื่นจะเกิดการแตกตัวของคลื่นที่ตำแหน่งโครงสร้าง (Sorensen, 1991) ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นการสลายพลังงานคลื่น ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการสลายพลังงานคลื่นของทุ่นลอยกันคลื่นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะและขนาดของโครงสร้าง รวมถึงความแข็งแรงการยึดของโครงสร้าง เป็นต้น

ข้อดีของทุ่นลอยกันคลื่น คือ สามารถใช้งานได้ในลักษณะชายฝั่งที่ไม่สามารถรับกำลังอัดได้มาก ได้แก่ หาดโคลน ซึ่งเป็นชายหาดส่วนใหญ่ที่พบในอ่าวไทยตอนบนที่เป็นทางออกของปากแม่น้ำขนาดใหญ่ มีความคุ้มค่าในการลงทุนในบริเวณน้ำลึก เนื่องจากคลื่นน้ำลึกจะเกิดพลังงานคลื่นเฉพาะบริเวณผิวน้ำเท่านั้น อีกทั้งยังไม่รบกวนการเคลื่อนตัวของตะกอนชายฝั่งและระบบนิเวศทางทะเล เพราะตัวโครงสร้างอยู่บริเวณผิวน้ำเท่านั้น สามารถใช้ได้กับสภาพที่ผันผวนของระดับน้ำได้ดี เนื่องจากโครงสร้างจะลอยขึ้นลงตามระดับน้ำ เคลื่อนย้ายได้ง่าย และสามารถปรับแต่งให้ตัวโครงสร้างใช้ในงานอื่น ๆ ได้ เช่น ทางเดินท่าเรือขนาดเล็ก เป็นต้น (Tsinker, 2004) อย่างไรก็ตาม สำหรับข้อเสียของทุ่นลอยกันคลื่น คือ มีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานคลื่นต่ำเมื่อคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ามาเป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นมาก เนื่องจากคลื่นยาวจะมีพลังงานคลื่นลงไปถึงระดับลึก แต่ทุ่นลอยกันคลื่นสามารถสลายพลังงานได้เพียงที่บริเวณผิวน้ำเท่านั้น ส่งผลให้พลังงานคลื่นสามารถลอดผ่านช่องว่างใต้โครงสร้างได้ ทั้งนี้เนื่องจากมีการเคลื่อนที่ของโครงสร้างไปตามแรงคลื่นตลอดเวลา ทำให้ระบบผูกยึดอาจมีความล้มเหลวเกิดขึ้นได้เร็วกว่าเชื่อมกันคลื่นแบบยึดนิ่ง และต้องใช้งบประมาณในการซ่อมแซมที่สูงมาก (Biesheuvel, 2013)

ทุ่นลอยกันคลื่นสามารถแบ่งได้หลายประเภทตามลักษณะทางกายภาพของโครงสร้าง และลักษณะการติดตั้งและใช้งานโครงสร้าง อันประกอบด้วย pontoon, sloping-float, scrap-tire, a-frame arrangement, tethered-float, porous-walled, pneumatic and hydraulic, flexible-membrane, turbulence-generator, peak energy dispersion และ reservoir application (Hales, 1981) เนื่องจากบางประเภทตามการจัดหมวดหมู่ของ Hales (1981) มีลักษณะทางกายภาพและการทำงานที่คล้ายคลึงกัน จึงได้มีการจัดหมวดหมู่ประเภทของทุ่นลอยกันคลื่นใหม่โดย McCartney (1985) โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2-2 และรูปที่ 2-14



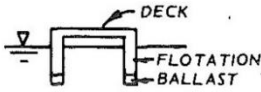
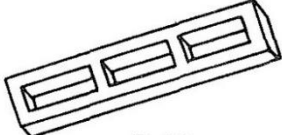
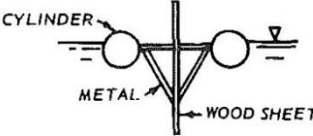
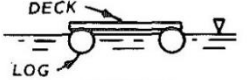
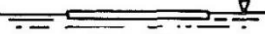

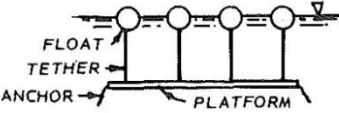
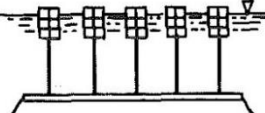
2.4.3 เชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน (partial breakwater)

เชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน (partial breakwater) ถูกใช้เรียกเป็นตัวแทนชนิดของเชื่อมกันคลื่นที่มีลักษณะเดียวกับที่ใช้ในการศึกษานี้ เชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนนั้นมีลักษณะก้ำกึ่งระหว่างเชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็ม และทุ่นลอยกันคลื่น โดยมีลักษณะเป็นเสาเข็มปักลงลึกในท้องน้ำ

คล้ายเสา และมีโครงสร้างเพื่อสลายพลังงานคลื่นบริเวณผิวน้ำที่ติดอยู่ในลักษณะคงที่ กล่าวคือ เมื่อคลื่นเข้ากระทบกับโครงสร้างบริเวณผิวน้ำแล้ว โครงสร้างจะได้รับแรงจากคลื่นและส่งต่อเข้าเสาของโครงสร้าง จากนั้นแรงจะถูกส่งต่อลงไปยังชั้นดินใต้ท้องน้ำที่ลึกลงไป ทั้งนี้หากพิจารณาให้เชื่อมกันคลื่นลักษณะดังกล่าวเป็นเชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็มแล้ว จะมีความคล้ายคลึงกับเชื่อมกันคลื่นที่เรียกว่าเชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็มผสม (Suh et al., 2007) แต่หากพิจารณาให้เป็นท่อนลอยกันคลื่นจะคล้ายกับเชื่อมกันคลื่นที่เรียกว่า ท่อนลอยกันคลื่นแบบโครงสร้างยึดแน่น (Biesheuvel, 2013) เชื่อมกันคลื่นดังกล่าวจึงเป็นการรวมข้อดีของเชื่อมกันคลื่นทั้งสองแบบเข้าด้วยกัน

ตารางที่ 2-2 ประเภทของท่อนลอยกันคลื่น (McCartney, 1985)

ประเภท	ลักษณะ	ข้อดี	ข้อเสีย
box	มีลักษณะเหมือนกล่องที่เป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ที่ลอยอยู่บริเวณผิวน้ำ มีทั้งที่สร้างจากเหล็กและคอนกรีต มีระบบผูกยึดกับโครงสร้างที่แข็งแรง	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถรองรับคลื่นขนาดใหญ่ได้ถึง return period 50 ปี - สามารถสร้างโครงสร้างหรือใช้พื้นที่ด้านบนให้เกิดประโยชน์ได้มาก - ราคาที่ใช้ในการบำรุงรักษาต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> - มีขนาดใหญ่ ต้องใช้พื้นที่มาก - ต้นทุนในการก่อสร้างสูง - การออกแบบให้โครงสร้างเชื่อมต่อกันทำได้ยาก
pontoon	มีลักษณะเป็นแผ่นโครงสร้างอยู่บนผิวน้ำ ยึดโยงด้วยระบบยึดกับท้องน้ำ มีทั้งที่เป็นแบบเดี่ยวและแบบคู่	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาในการก่อสร้างต่ำกว่าเมื่อเทียบกับแบบ box - มีขนาดไม่ใหญ่มากและมักออกแบบให้สามารถเชื่อมกันได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่สามารถรับคลื่นขนาดใหญ่ได้มาก เมื่อเทียบกับแบบ box
mat	มีลักษณะเป็นโครงสร้างที่มีวัสดุยึดติดกันเป็นกลุ่ม และทำระบบยึดให้ลอยอยู่เหนือผิวน้ำ วัสดุที่นิยมใช้มาก คือยางรถยนต์	<ul style="list-style-type: none"> - ต้นทุนในการก่อสร้างต่ำมาก - วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างหาง่าย - คนงานก่อสร้างไม่จำเป็นต้องมีประสบการณ์สูง 	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุที่ใช้มีน้ำหนักเบา ทำให้สลายพลังงานคลื่นได้ไม่ดี
tethered float	เป็นลักษณะพิเศษคือ มีตัวท่อนลอยอยู่ด้านบนและผูกให้โครงสร้างแขวนอยู่ใต้น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถลดพลังงานของคลื่นที่มีความยาวสูงได้ดีกว่าท่อนลอยกันคลื่นชนิดอื่น 	<ul style="list-style-type: none"> - ขั้นตอนการก่อสร้างยากและต้นทุนสูง - ต้องใช้อุปกรณ์ก่อสร้างเฉพาะอย่างและช่างที่มีประสบการณ์

TYPE	VIEW	REMARKS
<u>BOX</u> SOLID RECTANGLE		REINFORCED CONCRETE UNITS ARE THE MOST COMMON TYPE.
BARGE	 <p style="text-align: center;">SECTION</p>	STANDARD BARGE SIZES ON INLAND WATERWAYS ARE 195' X 35' X 12' AND 175' X 26' X 11'. INCLINED BARGES (ONE END SUBMERGED) HAVE BEEN TESTED.
<u>PONTOON</u> TWIN PONTOON	 <p style="text-align: center;">SECTION</p>	CATAMARAN SHAPE
OPEN COMPARTMENT	 <p style="text-align: center;">PLAN</p>	ALSO CALLED ALASKA TYPE
A FRAME	 <p style="text-align: center;">SECTION</p>	
TWIN LOG	 <p style="text-align: center;">SECTION</p>	DECK IS OPEN WOOD FRAME.
<u>MAT</u> TIRE MAT	 <p style="text-align: center;">SECTION</p>	SCRAP TIRES STRUNG ON POLE FRAMEWORK OR BOUND TOGETHER WITH CHAIN OR BELTING. FOAM FLOTATION IS USUALLY NEEDED.
LOG MAT	 <p style="text-align: center;">PLAN</p>	LOG RAFT CHAINED OR CABLED TOGETHER.
<u>TETHERED FLOAT</u> SPHERE	 <p style="text-align: center;">SECTION</p>	FLOATS PLACED IN ROWS.
TIRE	 <p style="text-align: center;">SECTION</p>	ARRANGEMENT SIMILAR TO SPHERES. STEEL DRUMS WITH BALLASTS CAN BE USED IN LIEU OF TIRES.

รูปที่ 2-14 ประเภทของทุ่นลอยกันคลื่น (McCartney, 1985)

ข้อดีที่สำคัญของเชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน คือ มีน้ำหนักเบาและมีการถ่ายเทน้ำหนักด้วยแรงเสียดทานจากเสาเข็ม (friction pile) ซึ่งทำให้อัตราการทรุดตัวต่ำ ส่งผลให้โครงสร้างมีความแข็งแรงและทนทาน สามารถใช้งานได้เป็นระยะเวลานาน มีประสิทธิภาพในการทำงานที่คงที่ ซึ่งเป็นข้อดีส่วนหนึ่งของเชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็ม อีกทั้งยังมีพื้นที่ว่างด้านใต้โครงสร้าง ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นข้อดีส่วนหนึ่งของทุ่นลอยกันคลื่น เมื่อนำมารวมกันแล้วยังเป็นการลดข้อเสียบางส่วนของการเชื่อมกันคลื่นทั้งสองประเภท คือ ใช้ปริมาณเสาเข็มเยอะ และจำเป็นต้องมีระบบผูกยึด ได้อีกด้วย ด้วยเหตุที่กล่าวมาเบื้องต้นส่งผลให้เชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนมีความเหมาะสมในการใช้ลดพลังงานคลื่นในบริเวณที่มีลักษณะท้องน้ำเป็นโคลนที่มีความสามารถในการรับกำลังอัดต่ำ เช่น ชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตอนบน เป็นต้น

สำหรับเชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนนั้น มีใช้จริงแล้วในประเทศไทยในบริเวณชายฝั่งที่บ้านขุนสมุทรจีน อ.พระสมุทรเจดีย์ จ.สมุทรปราการ โดยก่อสร้างจากเสาไฟฟ้าที่เหลือใช้ดังแสดงในรูปที่ 1-1 ทั้งนี้การก่อสร้างเชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนในพื้นที่ดังกล่าวนี้ ได้กระทำโดยปราศจากการออกแบบทางวิศวกรรมเพียงอย่างเดียว เนื่องจากยังไม่มีการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการใช้งานเพื่อการออกแบบที่เหมาะสม การก่อสร้างเป็นไปตามประสบการณ์ของผู้ควบคุมงานเท่านั้น

2.5 การศึกษาที่ผ่านมา

การศึกษานี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของลักษณะโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นที่มีต่อการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่น โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ (physical model) ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ การศึกษาที่ผ่านมาที่มีการใช้แบบจำลองทางกายภาพใกล้เคียงกัน และพฤติกรรมการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นในเชื่อมกันคลื่นชนิดที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับแบบจำลองทางกายภาพ

ปัญหาด้านวิศวกรรมชายฝั่งในหลาย ๆ ปัญหานั้นมีความซับซ้อนและยากที่จะแก้ไขได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เพียงอย่างเดียว โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างทางชายฝั่งที่มีลักษณะแปลกใหม่ ดังนั้นแบบจำลองทางกายภาพจึงอาจเป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหาในลักษณะดังกล่าว การศึกษาอิทธิพลของคลื่นและโครงสร้างที่มีต่อการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นด้วยแบบจำลองทางกายภาพนั้นสามารถทำได้โดยทดลองในรางน้ำจำลองหรืออ่างจำลองคลื่น โดยมีเงื่อนไขที่ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษา

การศึกษาเกี่ยวกับเชื่อมกันคลื่นโดยเฉพาะในเรื่องของการพิจารณาการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเชื่อมกันคลื่นนั้น สามารถศึกษาด้วยแบบจำลอง 2 มิติ ซึ่งเป็น

ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของคลื่นและโครงสร้าง โดยพิจารณาเกี่ยวกับการยอมให้คลื่นผ่านได้ (transmission), การสะท้อนของคลื่น (reflection) และการล้นข้ามของโครงสร้าง (overtopping) เป็นหลัก การจะพิจารณาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการกระจายคลื่น (diffraction) จะต้องศึกษาเพิ่มเติมด้วยแบบจำลอง 3 มิติ โดยใช้อ่างจำลองคลื่น ทั้งนี้การศึกษานี้จะทำการทดลองในอ่างจำลองคลื่นซึ่งเคยมีการศึกษาด้วยเครื่องมือลักษณะเดียวกันนี้แล้วดังปรากฏในการศึกษาของ Nagai (1966), เมธาฤทธิ์ แนมสัย (2552), วันวิสา มะมา (2553), สุวีร์ ศรียี่สุน (2554) และธีรนนท์ ปันใจลือ (2558) โดยมีรายละเอียดบางส่วนที่สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-3 โดยจะเห็นได้ว่าชุดอุปกรณ์ลักษณะเดียวกันกับที่ใช้ในการศึกษานี้ มีศักยภาพในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะพฤติกรรมของคลื่นเนื่องจากการมีโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นในหลายประเภท และมีการศึกษาถึงพฤติกรรมการล้นข้ามโครงสร้าง

ตารางที่ 2-3 สรุปผลการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการศึกษาด้วยอ่างจำลองคลื่น

ผู้ศึกษา	ตัวแปรที่สนใจ	ผลการศึกษา
Nagai (1966)	<ul style="list-style-type: none"> - ความสูงคลื่น - คาบคลื่น - การล้นข้ามโครงสร้าง 	<ul style="list-style-type: none"> - ความสูงคลื่นเพิ่ม K_t ลดลง - คาบคลื่นยาวขึ้น K_t เพิ่มขึ้น - การล้นข้ามโครงสร้าง K_t เพิ่มขึ้น
เมธาฤทธิ์ แนมสัย (2552)	<ul style="list-style-type: none"> - ความชันคลื่น - ช่องว่างระหว่างแถวต่อขนาดเสาเข็ม 	<ul style="list-style-type: none"> - ความชันคลื่นเพิ่ม K_t ลดลง - ช่องว่างระหว่างแถวเพิ่มขึ้น ทำให้ K_t เพิ่มขึ้น
วันวิสา มะมา (2553)	<ul style="list-style-type: none"> - ความชันคลื่น - ช่องว่างระหว่างเสาเข็มต่อขนาดเสาเข็ม 	<ul style="list-style-type: none"> - ความชันคลื่นเพิ่ม K_t ลดลง - ช่องว่างระหว่างเสาเข็มเพิ่มขึ้น ทำให้ K_t เพิ่มขึ้น
สุวีร์ ศรียี่สุน (2554)	<ul style="list-style-type: none"> - ความชันคลื่น - ความลึกน้ำต่อความสูงโครงสร้าง (d/h_s) - ความลึกน้ำเหนือโครงสร้างต่อความสูงคลื่น (R_c/H_t) 	<ul style="list-style-type: none"> - ความชันคลื่นเพิ่ม K_t ลดลง - d/h_s ลดลงทำให้ K_t ลดลง - ความสูงคลื่นเพิ่ม K_t ลดลง
ธีรนนท์ ปันใจลือ (2558)	<ul style="list-style-type: none"> - ความชันคลื่น - ระยะห่างโครงสร้างกับความยาวคลื่น (B/L) - ความลึกน้ำเหนือโครงสร้างต่อความสูงคลื่น (R_c/H_t) 	<p><u>เชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำ</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - K_t แปรผันตรงกับ B/L - K_t แปรผกผันกับความชันคลื่น และ R_c/H_t <p><u>เชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - K_t แปรผันตรงกับ ความชันคลื่น และ R_c/H_t - K_t แปรผกผันกับ B/L

การศึกษาที่กล่าวไปโดยสรุปข้างต้น เป็นเพียงแค่ส่วนหนึ่งของงานศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการใช้แบบจำลองทางกายภาพ โดยสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก

นอกจากนั้น Goda and Suzuki (1976) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นด้วยแบบจำลองทางกายภาพ และทำการเก็บข้อมูลคลื่นทั้งบริเวณด้านหน้าและด้านหลังของโครงสร้าง คลื่นที่เคลื่อนที่ออกจากเครื่องกำเนิดคลื่น จะเคลื่อนที่ไปกระทบโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น และมีพลังงานบางส่วนที่ถูกสะท้อนกลับมายังด้านหน้าโครงสร้างในรูปของคลื่นสะท้อน คลื่นที่สะท้อนกลับมามีคลื่นที่มารวมกับคลื่นที่กำเนิดมาจากเครื่องกำเนิดคลื่น ทำให้คลื่นที่เก็บได้ด้านหน้าโครงสร้างได้รับอิทธิพลของคลื่นจากสองทิศทางที่เคลื่อนที่เข้าหากัน ดังนั้นข้อมูลคลื่นด้านหน้าโครงสร้างจึงไม่สามารถใช้เป็นตัวแทนของคลื่นจากเครื่องกำเนิดคลื่นได้ทันที

Goda and Suzuki (1976) จึงได้ตั้งสมมติฐานให้คลื่นที่เก็บได้บริเวณด้านหน้าโครงสร้าง มีลักษณะการกระจายของข้อมูลแบบอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) เพื่อใช้วิเคราะห์การแยกความสูงคลื่นสะท้อนและความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง จากข้อมูลชุดคลื่นที่เก็บได้บริเวณด้านหน้าโครงสร้างจำนวน 2 ตำแหน่ง ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ตำแหน่งของข้อมูลที่น้อยที่สุดที่เคยมีการศึกษามาในอดีต และมีผู้ศึกษาที่ตรวจสอบความแม่นยำในการแยกขนาดคลื่นที่ให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าเชื่อถือ ดังแสดงในการศึกษาของ Capitao and Carvalho (1997) และ Draycott et al. (2018) ดังนั้นการศึกษานี้จึงพิจารณาแยกคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าและสะท้อนออกจากกัน จากข้อมูลคลื่นที่เก็บได้จากทั้งสองตำแหน่ง โดยใช้แนวคิดและวิธีการจากการศึกษาของ Goda and Suzuki (1976)

2.5.2 การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับพฤติกรรมของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่น

ในการออกแบบเขื่อนกันคลื่นจำเป็นต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงคลื่นหลังจากที่คลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง ผลของการเปลี่ยนแปลงคลื่นนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากหลายสาเหตุดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 2.2 ซึ่งจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (transmission coefficient, K_t) และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น (reflection coefficient, K_r) โดยหากพิจารณาเกี่ยวกับเขื่อนกันคลื่น จะสามารถคำนวณค่าทั้งสองได้จากอัตราส่วนของความสูงคลื่นด้านหลังโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น (transmitted wave height, H_t) และความสูงคลื่นที่สะท้อนจากเขื่อนกันคลื่น (reflected wave height, H_r) ตามลำดับ ต่อความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง (incident wave height, H_i) ดังแสดงในรูปที่ 2-12

เขื่อนกันคลื่นในการศึกษานี้มีลักษณะเป็นโครงสร้างที่บ้น้ำที่บริเวณผิวน้ำ และโปร่งโล่งบริเวณด้านล่าง มีการถ่ายแรงที่รับจากคลื่นทั้งหมดลงสู่ท้องน้ำด้วยเสาเข็ม โดยเรียกเขื่อนกันคลื่น

ลักษณะดังกล่าวว่าเชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน ซึ่งหากพิจารณาให้เป็นเชื่อมกันคลื่นแบบเสาสวมจะคล้ายกับเชื่อมกันคลื่นที่เรียกว่า เชื่อมกันคลื่นแบบเสาสวมผสม (Suh et al., 2007) แต่หากพิจารณาให้เป็นท่อนลอยกันคลื่นจะคล้ายกับเชื่อมกันคลื่นที่เรียกว่า ท่อนลอยกันคลื่นแบบโครงสร้างยึดแน่น (Biesheuvel, 2013) ดังนั้นจึงกล่าวรายละเอียดของการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับเชื่อมกันคลื่นทั้ง 2 ประเภท เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการศึกษานี้ต่อไป โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.2.1 พฤติกรรมของคลื่นเนื่องจากเชื่อมกันคลื่นแบบเสาสวม

ในเบื้องต้นได้มีการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะคลื่นจากผลของการจัดเรียงเชื่อมกันคลื่นแบบเสาสวมที่มีแฉกเดียว โดยพิจารณาการส่งผ่านคลื่นและการสะท้อนของคลื่น สำหรับการส่งผ่านคลื่นนั้นทำการศึกษาโดยเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความสูงคลื่นหลังผ่านเชื่อมกันคลื่น กับความสูงก่อนผ่านเชื่อมกันคลื่น เรียกว่า สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (transmission coefficient, K_t) รวมถึงการสะท้อนของคลื่นที่ได้ศึกษาในลักษณะเดียวกัน คือการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความสูงคลื่นสะท้อน กับความสูงคลื่นที่เข้าปะทะเชื่อมกันคลื่น เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น (reflection coefficient, K_r) ดังปรากฏอยู่ในงานศึกษาของ Hayashi et al. (1966), Nagai (1966), Hayashi et al. (1968), Grune and Kohlhase (1974), Hutchinson and Raudkivi (1984) และ Truitt and Herbich (1986)

จากนั้นได้มีผู้ศึกษาในกรณีการจัดเรียงเชื่อมกันคลื่นแบบเสาสวมให้มีจำนวนแฉกมากขึ้น ดังปรากฏในการศึกษาของ Weele and Herbich (1984), Herbich and Douglas (1988), Rao et al. (1999), Rao et al. (2002) และ Huang (2007) รวมทั้งการศึกษาเสาสวมแบบแขวนลอยในน้ำของ Mani and Jayakumar (1995) จากการศึกษาเสาสวมแขวนลอยในน้ำนี้เอง ทำให้เข้าใจถึงกระบวนการในการเปลี่ยนแปลงลักษณะของคลื่นที่บริเวณใกล้ ๆ ผิวหน้า โดยพบว่าการเปลี่ยนแปลงลักษณะของคลื่นจะพบมากบริเวณผิวหน้า ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Yagci et al. (2006) สำหรับในหัวข้อนี้ จึงขอกกล่าวรายละเอียดของการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับเชื่อมกันคลื่นแบบเสาสวมโดยมีรายละเอียดบางส่วนที่สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-4 จะเห็นได้ว่าการศึกษาที่ผ่านมาพิจารณาคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างด้วยตัวแปรความชันคลื่น และความสูงคลื่นเป็นส่วนมาก ดังนั้นในการศึกษานี้จึงจะทำการเปลี่ยนแปลงความชันคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง และกำหนดกลุ่มตัวแปรซ้ำในการวิเคราะห์ตัวแปรไร้นหน่วยเป็นความสูงคลื่นที่เข้าปะทะโครงสร้าง เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของคลื่นที่มีต่อความสามารถในการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของโครงสร้าง

ตารางที่ 2-4 สรุปผลการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับพฤติกรรมคลื่นเนื่องจากเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม

ผู้ศึกษา	ตัวแปรที่สนใจ	ผลการศึกษา
Hayashi et al. (1966)	- ช่องว่างระหว่างเสาเข็ม - ความสูงคลื่น	- ช่องว่างเพิ่มขึ้น K_t เพิ่มขึ้น K_r ลดลง - ความสูงคลื่นเพิ่ม K_t ลดลง K_r เพิ่มขึ้น
Weele and Herbich (1984)	- ความชันคลื่น - ช่องว่างระหว่างเสาเข็ม - ช่องว่างระหว่างแถว	- ความชันคลื่นสูงขึ้น K_t ลดลง K_r เพิ่มขึ้น - ช่องว่างระหว่างต้นมากขึ้น K_t เพิ่มขึ้น K_r ลดลง - ช่องว่างระหว่างแถวไม่สามารถระบุได้
Rao et al. (1999)	- ความชันคลื่น - ช่องว่างระหว่างเสาเข็ม - ช่องว่างระหว่างแถว	- ความชันคลื่นสูงขึ้น K_t ลดลง - ช่องว่างระหว่างต้นมากขึ้น K_t เพิ่มขึ้น - ช่องว่างระหว่างแถวมากขึ้น K_t เพิ่มขึ้น
Yagci et al. (2006)	- ความสูงคลื่น - คาบคลื่น	- คาบคลื่นยาวขึ้น K_t เพิ่มขึ้น - ความเร็วของน้ำใต้คลื่นลดลงมากกว่าท้องน้ำ
ธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุลและคณะ (2551)	- ความสูงคลื่นจากข้อมูลภาคสนาม	- ความสูงคลื่นลดลงประมาณ 22 เปอร์เซ็นต์

การศึกษาที่กล่าวไปโดยสรุปข้างต้น เป็นเพียงแค่ส่วนหนึ่งของงานศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม โดยสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ข-1

2.5.2.2 พฤติกรรมของคลื่นเนื่องจากทุ่นลอยกันคลื่น

เนื่องจากทุ่นลอยกันคลื่นมีมากมายหลายประเภทขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและลักษณะทางกายภาพดังที่ปรากฏในการศึกษาของ Hales (1981) ทั้งนี้ด้วยชนิดของทุ่นลอยกันคลื่นที่มีมากทำให้ McCartney (1985) ได้จัดหมวดหมู่ประเภทของทุ่นลอยกันคลื่นใหม่ให้มีความง่ายและสะดวกต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้น ต่อมาได้มีการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะคลื่นจากผลของการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของทุ่นลอยกันคลื่นในรูปแบบต่าง โดยทำการศึกษาเพื่อวิเคราะห์การส่งผ่านคลื่น (wave transmission) และการสะท้อนของคลื่น (wave reflection) โดยพิจารณาเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน และสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น เนื่องจากทุ่นลอยกันคลื่นมีประเภทและลักษณะที่หลากหลาย ทำให้มีผู้สนใจที่จะออกแบบทุ่นลอยแบบใหม่ ๆ และศึกษาทุ่นลอยกันคลื่นแบบเดิม โดยพิจารณาถึงการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นที่เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะ

ทางกายภาพของคลื่นและทึนลอยกันคลื่น ดังปรากฏในงานศึกษาของ Jamieson et al. (1995) และ Dong et al. (2008)

จากนั้นมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องการสลายพลังงานอันเนื่องจากอิทธิพลของทึนลอยกันคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ ประกอบกับการเปลี่ยนแปลงลักษณะของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่เขื่อนกันคลื่น ดังปรากฏในงานศึกษาของ E. Koutandos et al. (2005) ต่อมามีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของแรงที่กระทำกับโครงสร้างอันเนื่องจากอิทธิพลของคลื่นที่กระทำกับโครงสร้างและการเคลื่อนที่ของโครงสร้างอันเนื่องจากแรงที่กระทำ ดังปรากฏในงานศึกษาของ Cox and Beach (2006), Cox et al. (2009) และ Ji et al. (2015) การศึกษาในเรื่องดังกล่าวมีการศึกษาด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ ดังปรากฏในการศึกษาของ Isaacson et al. (1988) และ E. V. Koutandos et al. (2004) ภายหลังมีความต้องการที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางกายภาพของคลื่นและทึนลอยกันคลื่นกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน จึงได้มีการศึกษาสมการความสัมพันธ์เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ดังปรากฏในงานศึกษาของ Alizadeh et al. (2014) และ ชัยยุทธ ชินณะราศรี และคมสัน วิริยกิจจา (2560) รายละเอียดของการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับทึนลอยกันคลื่นที่กล่าวข้างต้น มีรายละเอียดบางส่วนที่สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-5 จะเห็นได้ว่าการศึกษาที่ผ่านมาได้ทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของโครงสร้าง โดยทำการเปลี่ยนแปลงความลึกการจมของโครงสร้าง เป็นส่วนหลัก ประกอบกับเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนใช้โครงสร้างบริเวณผิวน้ำในการสลายพลังงานเช่นเดียวกับทึนลอยกันคลื่น ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเปลี่ยนแปลงความลึกการจม เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างที่มีต่อความสามารถในการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่น

การศึกษาที่กล่าวไปโดยสรุปข้างต้น เป็นเพียงแค่ส่วนหนึ่งของงานศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นของทึนลอยกันคลื่น โดยสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ข-2

จากหัวข้อ 2.5.2.1 และ 2.5.2.2 จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของคลื่นเนื่องจากการมีโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นนั้น จะทำการศึกษาจากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น โดยคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างความสูงคลื่นหลังผ่านโครงสร้างต่อความสูงคลื่นก่อนผ่านโครงสร้าง และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนโดยการคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างความสูงคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้างต่อความสูงคลื่นก่อนปะทะโครงสร้าง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงจะยึดรูปแบบการวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นด้วยกระบวนการเดียวกันกับที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ 2.5.2

ตารางที่ 2-5 สรุปผลการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับพฤติกรรมคลื่นเนื่องจากหุ่นลอยกันคลื่น

ผู้ศึกษา	ตัวแปรที่สนใจ	ผลการศึกษา
Jamieson et al. (1995)	<ul style="list-style-type: none"> - ความกว้างของโครงสร้าง - ความลาดของโครงสร้าง - ความลึกการจมโครงสร้าง 	<ul style="list-style-type: none"> - ความกว้างโครงสร้างเพิ่มขึ้น K_t ลดลง - การมีความลาดทำให้ K_t เพิ่มขึ้น - ความลึกการจมโครงสร้างเพิ่มขึ้น K_t ลดลง
E. Koutandos et al. (2005)	<ul style="list-style-type: none"> - ความกว้างของโครงสร้าง - ความลึกการจมโครงสร้าง - การยึดโครงสร้าง 	<ul style="list-style-type: none"> - ความกว้างโครงสร้างเพิ่มขึ้น K_t ลดลง - ความลึกการจมโครงสร้างเพิ่มขึ้น K_t ลดลง - การยึดโครงสร้างให้แน่นทำให้ K_t ลดลง
Cox and Beach (2006)	<ul style="list-style-type: none"> - ลักษณะโครงสร้าง - คาบคลื่น 	<ul style="list-style-type: none"> - หุ่นลอยแบบคู้ให้ค่า K_t ต่ำสุด - คาบคลื่นยาวขึ้น K_t เพิ่มขึ้น K_t ลดลง
Ji et al. (2015)	<ul style="list-style-type: none"> - ความลึกการจมโครงสร้าง - ความพูนของโครงสร้าง 	<ul style="list-style-type: none"> - ความลึกการจมโครงสร้างเพิ่มขึ้น K_t ลดลง - โครงสร้างที่ทึบทำให้ K_t ลดลง
ชัยยุทธ ชินณะราศรี และ คมสัน วิริยกิจจา (2560)	<ul style="list-style-type: none"> - ความลึกน้ำ - ความกว้างของโครงสร้าง - ความชันคลื่น - ความลึกการจมโครงสร้าง 	<ul style="list-style-type: none"> - ความลึกน้ำเพิ่มขึ้น K_t ลดลง - ความกว้างโครงสร้างเพิ่มขึ้น K_t ลดลง - ความชันคลื่นเพิ่มขึ้น K_t ลดลง - ความลึกการจมโครงสร้างเพิ่มขึ้น K_t ลดลง

2.5.2.3 พฤติกรรมของคลื่นเนื่องจากเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน

จากการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 2.5.2.1 ที่พบว่าความเร็วของอนุภาคน้ำใต้คลื่นจะลดลงมากที่บริเวณใกล้ผิวหน้า (Yagci et al., 2006) จึงก่อให้เกิดการศึกษาเกี่ยวกับเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มผสม โดยส่วนที่อยู่ใกล้ผิวหน้าจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างที่บ้น้ำ แต่ส่วนด้านล่างของเขื่อนกันคลื่นจะถูกรองรับด้วยเสาเข็ม ดังปรากฏในการศึกษาของ Suh et al. (2006), Laju et al. (2007), Suh et al. (2007) และ Mani (2008) ซึ่งเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มผสมนี้มีการศึกษาไม่มากนัก แต่ส่วนมากจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคลื่นที่ขึ้นอยู่กับส่วนที่บ้น้ำด้านบน การจัดเรียงเสาเข็มด้านล่างจะมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

สำหรับหุ่นลอยกันคลื่นแบบโครงสร้างยึดแน่นได้ถูกนิยามโดย Biesheuvel (2013) โดยมีความหมายว่าโครงสร้างที่ยึดแน่น ไม่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์เมื่อเทียบกับท้องน้ำหรือมีน้อยมากจนสามารถละการพิจารณาได้ โดยมีความแข็งแรงและไม่มีการยุบหรือหดตัวของโครงสร้าง พบว่าพฤติกรรมของการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นล้วนเกิดเนื่องจากอิทธิพลของลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างบริเวณผิวหน้าทั้งสิ้น ต่อมาเมื่อผู้ให้ความสนใจและมีความต้องการที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางกายภาพของคลื่นและหุ่นลอยกันคลื่นแบบโครงสร้างยึดแน่นกับค่าสัมประสิทธิ์

การส่งผ่าน จึงได้มีการศึกษาหาสมการความสัมพันธ์เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ภายใต้สมมติฐานที่ว่า โครงสร้างมีความแข็งเกร็ง (rigid) และยึดติดแน่นไม่เคลื่อนที่ คลื่นมีขนาดเล็กและอยู่ภายใต้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย (small amplitude wave theory) มีการสะท้อนของคลื่นกลับโดยไม่เสียพลังงานคลื่น และไม่มีการล้นข้ามโครงสร้าง โดยใช้ประกอบกับอนุกรม Bessel function ซึ่งเป็นอนุกรมที่สามารถแก้ได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง (second order ordinary differential equation) ดังปรากฏในงานศึกษาของ Ursell and Dean (1946) จากนั้น Macagno (1954) พบว่าอนุกรม Bessel function มีความซับซ้อนในการคำนวณ จึงได้ประดิษฐ์สมการขึ้นมาใหม่ โดยศึกษาตัวแปรเพิ่มเติม ต่อมา Wiegel (1959) ได้ศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้แนวคิดเรื่องของกำลังที่คลื่นส่งผ่านโครงสร้างไปได้ (wave power transmission) ภายใต้สมมติฐานเดียวกับ Macagno (1954) เพื่อพัฒนาสมการความสัมพันธ์ต่อไป

จากนั้น Kriebel and Bollmann (1996) ได้พัฒนาทฤษฎีการส่งผ่านกำลังปรับแก้ (Modified Power Transmission Theory) โดยพัฒนาต่อยอดจากการศึกษาของ Wiegel (1959) เนื่องจากพบว่าทฤษฎีของ Wiegel (1959) ให้ค่าพยากรณ์ที่สูงเกินกว่าที่เกิดขึ้นจริงโดยเฉพาะในบริเวณน้ำตื้น โดยรายละเอียดของการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับเขื่อนกันคลื่นที่มีลักษณะคล้ายเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 สรุปผลการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับพฤติกรรมคลื่นของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน

ผู้ศึกษา	ตัวแปรที่สนใจ	ผลการศึกษา
Macagno (1954)	<ul style="list-style-type: none"> - สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (K_t) - จำนวนคลื่น (wave number, k_i) - ความลึกการจมโครงสร้าง (D) - ความลึกน้ำ (d) - ความหนาของโครงสร้าง (b) 	$K_t = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{k_i b \sinh(k_i d)}{2 \cosh(k_i d - k_i D)} \right]^2}}$
Wiegel (1959)	<ul style="list-style-type: none"> - สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (K_t) - จำนวนคลื่น (wave number, k_i) - ความลึกการจมโครงสร้าง (D) - ความลึกน้ำ (d) 	$K_t = \sqrt{\frac{2k_i(d-D) + \sinh(2k_i(d-D))}{\sinh(2k_i d) + 2k_i d}}$
Kriebel and Bollmann (1996)	<ul style="list-style-type: none"> - สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (K_t) - สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของ Wiegel (1959) ($K_{t,Wiegel}$) 	$K_t = \frac{2K_{t,Wiegel}}{1 + K_{t,Wiegel}}$

ทั้งนี้ยังมีสมการของผู้ศึกษาอีกหลายคน เช่น Eigen function solution theory เป็นต้น โดยเมื่อนำผลของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ได้จากความสัมพันธ์ของ Wiegel (1959) และที่ได้จากการปรับแก้โดย modified power transmission theory แล้ว มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการศึกษาแบบจำลองทางกายภาพจะพบว่า ค่าที่ได้จากการปรับแก้แล้วจะมีความใกล้เคียงกับผลจากการทดลองด้วยแบบจำลองทางกายภาพมากกว่าที่ยังไม่ได้ปรับแก้ รายละเอียดของการศึกษาต่าง ๆ ที่กล่าวมาทั้งหมดเกี่ยวข้องกับเชื่อมกันคลื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกับเชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ข-3

จากที่กล่าวมาถึงการศึกษานี้เชื่อมกันคลื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกันจะพบว่า มีการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางกายภาพของโครงสร้าง, ลักษณะของคลื่น และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในการศึกษาก่อนหน้า โดยมีตัวแปรทั้งที่เกี่ยวกับคุณสมบัติคลื่นและลักษณะของโครงสร้างประกอบอยู่ร่วมกัน ดังนั้นในการศึกษานี้จึงจะทำการวิเคราะห์เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น เพื่อวิเคราะห์ถึงแนวโน้มความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ และนำสมการสัมพันธ์ที่สร้างได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับสมการของผู้ศึกษาก่อนหน้า

บทที่ 3

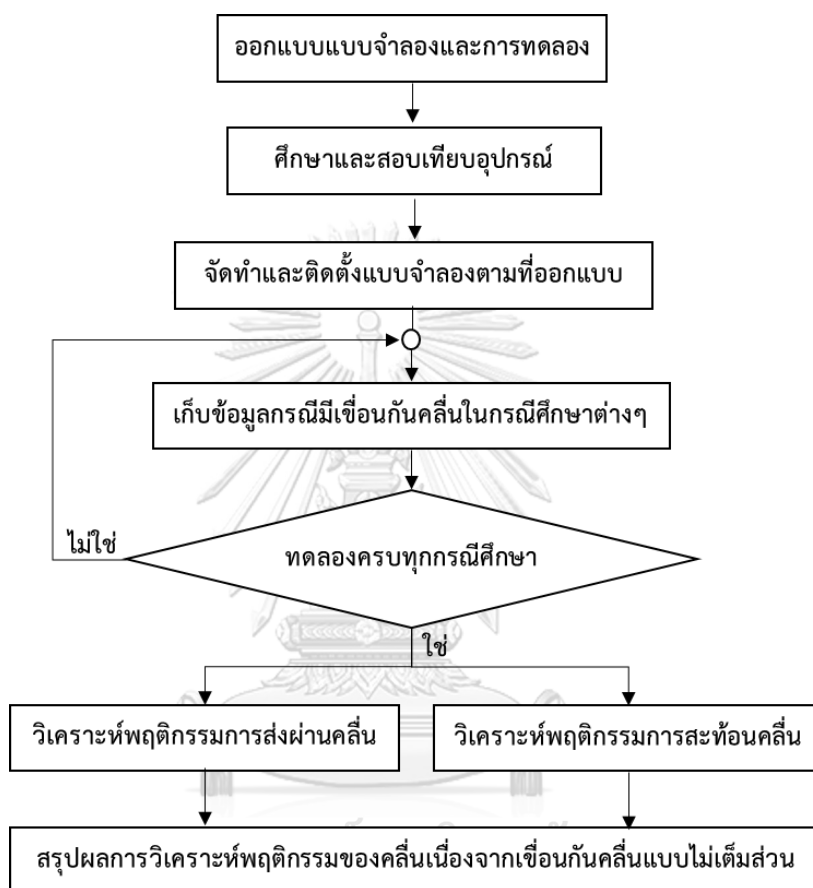
การดำเนินงานศึกษา

การศึกษาด้านวิศวกรรมชายฝั่ง มีจุดมุ่งหมายในการศึกษาเพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมและกระบวนการทางชายฝั่งทะเลที่เกิดขึ้น โดยแบ่งประเภทของการศึกษาออกเป็น 3 แนวทางด้วยกัน ประกอบด้วย การสังเกตและเก็บข้อมูลในพื้นที่จริง, การสังเกตและเก็บข้อมูลในแบบจำลองกายภาพ (physical model) และการคำนวณวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) แต่ละแนวทางนั้นมีทั้งข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่เกิดขึ้น และการนำแนวทางไปใช้แก้ไขปัญหา (เมธาฤทธิ์ แนนสัย, 2552) ดังนั้นการพิจารณาเลือกใช้แนวทางใดนั้นย่อมขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการแก้ปัญหาานั้น ๆ ในบางปัญหาอาจมีความเหมาะสมในการใช้เพียงแนวทางเดียวในการแก้ปัญหา ในขณะที่บางปัญหาอาจมีความจำเป็นต้องใช้หลาย ๆ แนวทางในการแก้ปัญหาร่วมกัน

ปัจจุบันมีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการแก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากความสะดวกรวดเร็ว, ความประหยัด และความสามารถในการประยุกต์ใช้กับการศึกษาพื้นที่ต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง แต่ในทางวิศวกรรมชายฝั่งยังคงมีปัญหาอีกมากมายที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์อันเนื่องมาจากความซับซ้อนของปัญหาที่เกิดขึ้น จึงมีความจำเป็นต้องเลือกใช้แนวทางอื่น ๆ สำหรับการสังเกตและจัดเก็บข้อมูลในพื้นที่จริงซึ่งน่าจะเป็นวิธีการศึกษาที่ให้ความถูกต้องสูงที่สุดนั้น จะมีค่าใช้จ่ายสูงมาก รวมทั้งข้อมูลที่เก็บได้จากธรรมชาตินั้นเกิดจากความสัมพันธ์กันระหว่างหลายตัวแปรซึ่งขาดความเป็นเอกภาพซึ่งกันและกัน จึงยากต่อการแปลความหมายและวิเคราะห์ข้อมูล ดังนั้นสำหรับปัญหาทางด้านวิศวกรรมชายฝั่งที่มีความซับซ้อนยากที่จะอธิบายด้วยสมการคณิตศาสตร์ จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้แนวทางการศึกษาโดยใช้แบบจำลองกายภาพ อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าการออกภาคสนามและ สามารถควบคุมตัวแปรที่ต้องการศึกษาได้อย่างเป็นระบบ ทำให้การแปลความหมายของข้อมูลง่ายกว่าการศึกษาในภาคสนาม (Dalrymple, 1985) จากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นการศึกษานี้จึงเลือกใช้แบบจำลองกายภาพศึกษาผลของลักษณะเขื่อนกันคลื่นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะคลื่นที่สะท้อนและเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างไปได้

3.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

สำหรับการดำเนินการศึกษานี้ ได้มุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงปัจจัยสำคัญทางกายภาพที่มีผลต่อพฤติกรรมของคลื่นและประสิทธิภาพในการทำงานของเขื่อนกันคลื่น โดยมีแนวทางประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังผังงาน (flow chart) ในรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 ผังงานการดำเนินงานวิจัย

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การศึกษานี้ทำการจำลองการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นจากเขื่อนกันคลื่น ในอ่างจำลองคลื่น (wave basin) ณ ห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล อาคารอนุสาสน์ยันตรกรรม ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นการจำลองแบบจำลองทางกายภาพแบบ 2 มิติ อ่างจำลองคลื่นจะสร้างคลื่นจากเครื่องกำเนิดคลื่นโดยสามารถจำลองคลื่นที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ ด้วยการปรับระยะคันชักและความเร็วรอบในการหมุนของมอเตอร์ เครื่องกำเนิดคลื่นจะทำให้ระดับผิวน้ำ (water surface) มีการเปลี่ยนแปลงและเกิดเป็นคลื่นที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน

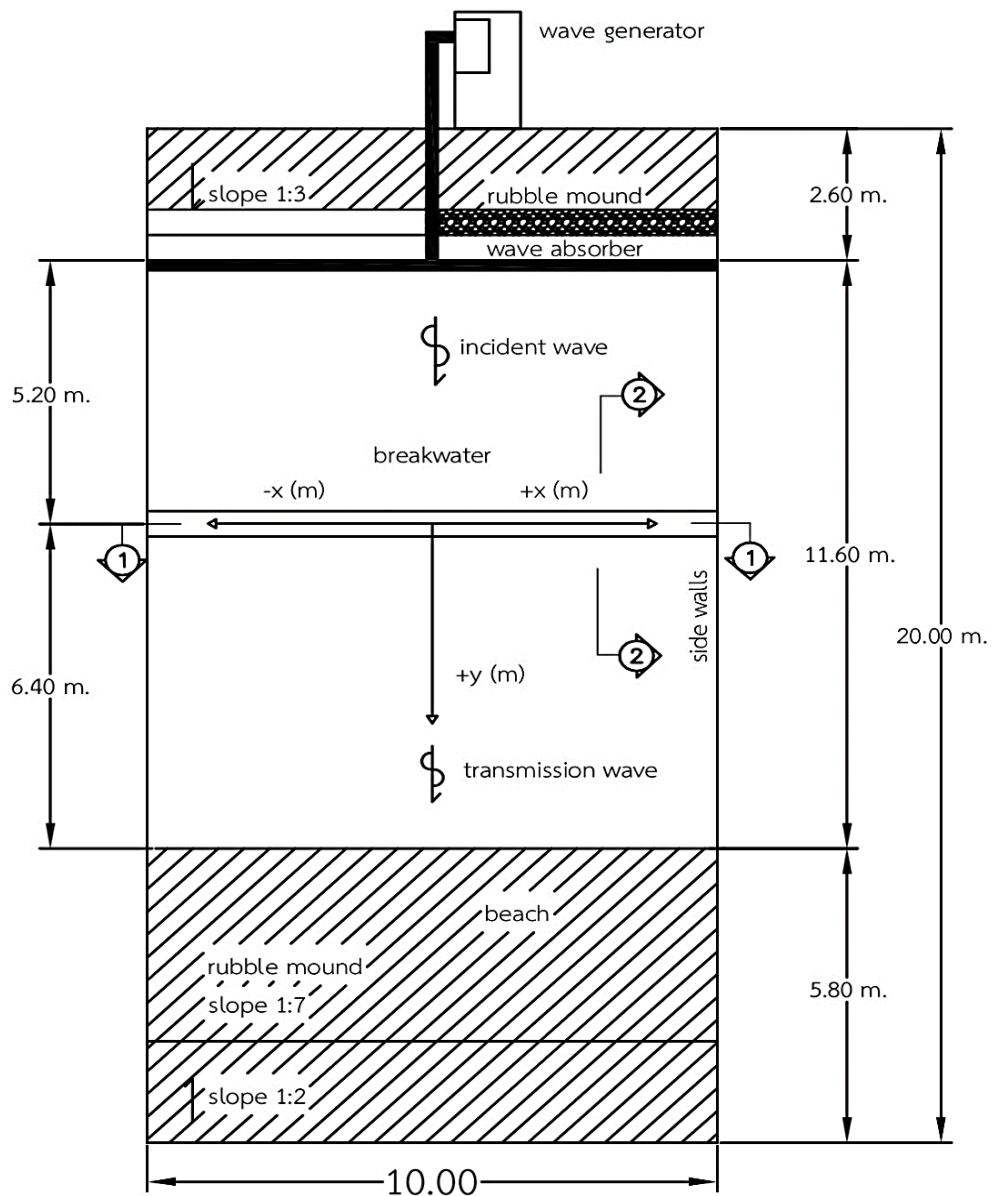
การศึกษานี้จะทำการเก็บข้อมูลของคลื่นที่จำลองโดยใช้เครื่องมือวัดคลื่น (wave gauge) โดยเครื่องมือจะเก็บข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าในแต่ละระดับผิวน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาต่าง ๆ และนำมาคำนวณแปลงเป็นความสูงคลื่น (wave height) และคาบคลื่น (wave period) โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้มีดังต่อไปนี้

3.2.1 อ่างจำลองคลื่นและระบบเครื่องกำเนิดคลื่น

- 1) อ่างจำลองคลื่น (wave basin) ที่ใช้ในการศึกษามีลักษณะเป็นอ่างคอนกรีตรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาดความกว้าง 10 เมตร ยาว 20 เมตร และสูง 0.70 เมตร พื้นและผนังทำด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กและมีความราบเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 3-2 และรูปที่ 3-3 ในการศึกษานี้ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อช่วยในการสลายพลังงานคลื่นในบริเวณต้นอ่างและท้ายอ่างจำลองคลื่น โดยตัวสลายพลังงานคลื่นที่ใช้เป็นหินก่อสร้างเบอร์ #1 เทเป็นแนวลาดเอียง ยาวตลอดด้านต้นและท้ายอ่างจำลองคลื่นเพื่อลดการสะท้อนกลับของคลื่น ทำให้คลื่นภายในอ่างมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3-4 สำหรับแบบจำลองเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนจะจำลองด้วยเหล็กรูปพรรณหน้าตัด 1.5×3 นิ้ว (0.0375×0.075 เมตร) และมีลักษณะดังรูปที่ 3-5 และรูปที่ 3-6
- 2) ระบบเครื่องกำเนิดคลื่น (wave generator) มีลักษณะเป็นชนิดปลายยึดหมุน (hinge connection) กล่าวคือ เป็นเครื่องจักรกลขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ติดกับแขนกลที่มีแผ่นเหล็กในอ่างจำลองคลื่น เมื่อมอเตอร์ทำงานจะขับเคลื่อนแขนกล ทำให้แผ่นเหล็กในอ่างจำลองคลื่นสามารถเคลื่อนที่ไปกลับได้ น้ำในอ่างจำลองคลื่นจะเปลี่ยนแปลงระดับทำให้เกิดคลื่นขึ้น ระบบแขนกลสามารถปรับระดับคันชักให้ระยะการเคลื่อนที่ของแผ่นเหล็กมีค่าแตกต่างกัน และสามารถควบคุมความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ได้ ส่งผลให้คลื่นที่เกิดขึ้นจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป ระบบเครื่องกำเนิดคลื่นมีข้อจำกัดที่สำคัญคือชุดมอเตอร์สามารถปรับความเร็วรอบการหมุนได้อยู่ที่ 5 - 25 เฮิร์ต และระยะแขนกลสามารถปรับความยาวได้อยู่ที่ 0 - 25 เซนติเมตร

3.2.2 เครื่องมือเก็บข้อมูลคลื่นและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

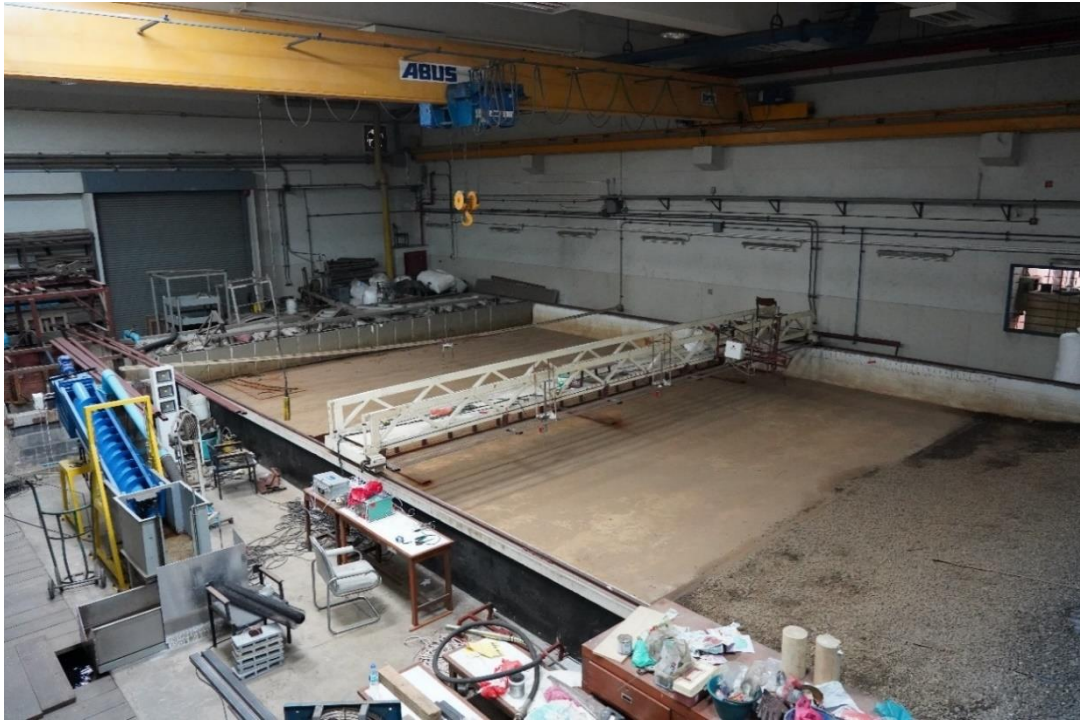
- 1) เครื่องมือวัดคลื่น (wave gage) เป็นเครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงระดับผิวน้ำตามเวลาเพื่อนำมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของความสูงคลื่น ตามตำแหน่งการเก็บข้อมูลคลื่น การศึกษานี้ใช้อุปกรณ์แบบ CH-403A & CHT4-40 ของบริษัท Kennek ช่วงข้อมูลที่เครื่องทำการประมวลผลที่ 5 โวลต์ ความคาดเคลื่อน 0.02 มิลลิเมตร



Overview of the wave basin
(dimension in meter)

รูปที่ 3-2 แบบร่างอ่างจำลองคลื่น

- 2) แผงวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (A/D converter) ข้อมูลคลื่นที่ได้จากเครื่องมือวัดความสูงคลื่น จะส่งข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์กับเวลาสู่แผงวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล และอาศัยการแสดงผลจากคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม LabVIEW ของบริษัท National Instruments เพื่อทำการจัดเก็บข้อมูลเป็นดิจิทัลต่อไป



รูปที่ 3-3 อ่างจำลองคลื่น (wave basin)



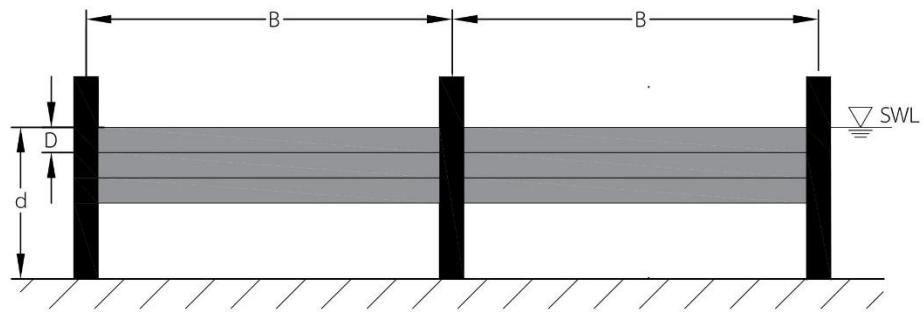
ก) ทาดหินสลายพลังงาน



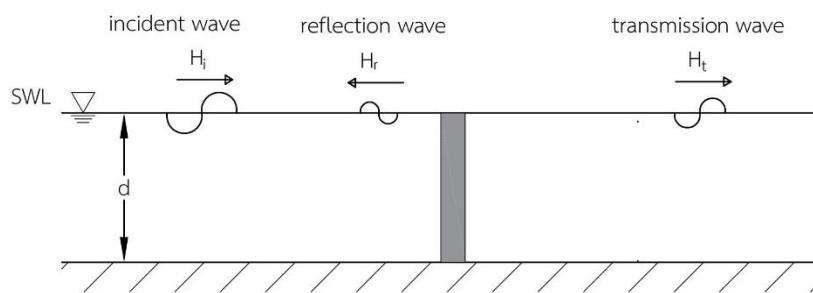
ข) สะพานเหล็ก

รูปที่ 3-4 อุปกรณ์ประกอบอ่างจำลองคลื่น

- 3) เครื่องมือวัดระดับน้ำ (point gauge) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวัดระดับความลึกน้ำนิ่ง ก่อนและหลังการทดลอง มีความละเอียด 0.5 มิลลิเมตร
- 4) กล้องถ่ายวิดีโอและกล้องถ่ายรูป บันทึกภาพพฤติกรรมขณะทดลอง เช่น การเคลื่อนที่ของคลื่นเข้าปะทะโครงสร้าง เป็นต้น
- 5) คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก ใช้เก็บข้อมูลจากเครื่องวัดความสูงคลื่น

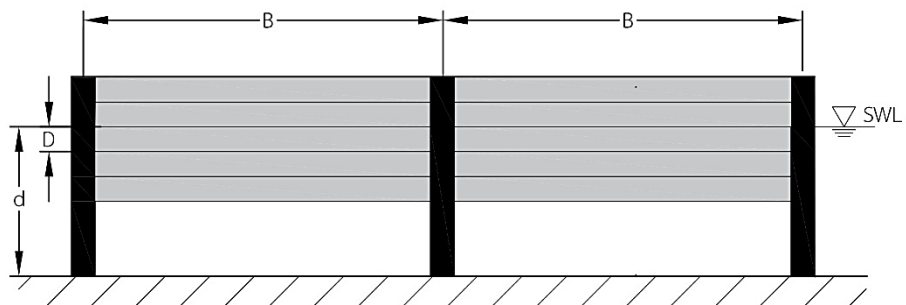


ก) หน้าตัด 1 - 1

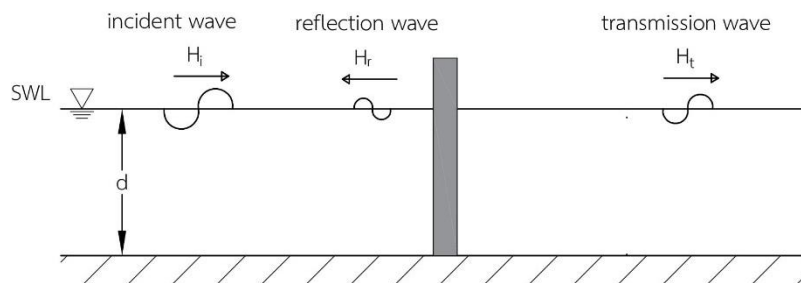


ข) หน้าตัด 2 - 2

รูปที่ 3-5 ภาพตัดขวางของเขื่อนกันคลื่นที่ใช้ในการศึกษา กรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



ก) หน้าตัด 1 - 1



ข) หน้าตัด 2 - 2

รูปที่ 3-6 ภาพตัดขวางของเขื่อนกันคลื่นที่ใช้ในการศึกษา กรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

สำหรับรายละเอียดเครื่องมือที่ได้กล่าวไปโดยสรุปข้างต้น มีรายละเอียดการใช้งานและภาพการใช้งานเครื่องมือแสดงดังภาคผนวก ค

3.3 การสอบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การศึกษานี้จำเป็นต้องมีการสอบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เครื่องมือวัดความสูงคลื่น และเครื่องกำเนิดคลื่น เนื่องจากเครื่องวัดความสูงคลื่นจะวัดข้อมูลเป็นความต่างศักย์ จึงจำเป็นที่จะต้องปรับเทียบข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดกับข้อมูลจริงที่เกิดขึ้น โดยใช้การสอบเทียบแบบสถิตยศาสตร์ (static calibration) กล่าวคือ ใช้ข้อมูลจริงจากความสูงระดับน้ำที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดระดับน้ำ (point gauge) มาเปรียบเทียบกับข้อมูลความต่างศักย์ที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดความสูงคลื่น และสร้างสมการปรับแก้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกัน จากนั้นทำการสอบวัดหรือตรวจสอบความแม่นยำของสมการด้วยวิธีพลศาสตร์ (dynamic validation) โดยใช้ข้อมูลตรวจสอบจากกล้องวิดีโอบันทึกที่ระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปในอ่างจำลองคลื่น ในส่วนของการสอบเทียบเครื่องกำเนิดคลื่นนั้นทำเพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดคุณสมบัติคลื่นที่จะทำการจำลองได้ โดยอาศัยการปรับระยะคันชักของแขนกลกับความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ สำหรับการสอบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์นั้นแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ง

3.4 แบบจำลองเขื่อนกันคลื่น

การศึกษานี้จะพิจารณาตัวแปร 2 ส่วนด้วยกัน ตัวแปรส่วนแรกคือ คุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างและสะท้อนจากโครงสร้าง ได้แก่ ความลึกน้ำ, ความสูงคลื่น, คาบคลื่น, ความยาวคลื่น และความชันคลื่น ตัวแปรส่วนที่สองเป็นตัวแปรที่เกี่ยวกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น ได้แก่ ความลึกการจมโครงสร้าง, ระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง และการยอมให้คลื่นข้ามโครงสร้างของคลื่น โดยจะทำการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรคุณสมบัติของคลื่นกับตัวแปรที่เกี่ยวกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น ที่มีต่อพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นและการสะท้อนของคลื่น ทั้งนี้จะกำหนดคุณสมบัติคลื่นและรูปแบบของเขื่อนกันคลื่นที่จะศึกษาดังต่อไปนี้

3.4.1 ข้อมูลการออกแบบเขื่อนกันคลื่น

การศึกษานี้สนใจเขื่อนกันคลื่นรูปแบบใหม่ที่มีลักษณะทางกายภาพคล้ายคลึงกับความหมายที่นิยามไว้ในเขื่อนกันคลื่น 2 ประเภท ได้แก่ เขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม และท่อนลอยกันคลื่น เขื่อนกันคลื่นในการศึกษานี้มีลักษณะรูปแบบเป็นแผ่นโครงสร้างวางตัวอยู่ในบริเวณผิวน้ำที่มีความแข็งเกร็ง (rigid) ไม่มีการเคลื่อนที่สัมผัสเมื่อเทียบกับท้องน้ำ หรือมีน้อยจนสามารถละการพิจารณาได้

และมีเสาเข็มรองรับโครงสร้างที่เป็นแฉ่นดังกล่าวอยู่ทั้งสองฝั่ง แฉ่นโครงสร้างจะรับพลังงานจากคลื่น ก่อให้เกิดแรงขึ้นกับโครงสร้าง แรงจะถูกถ่ายลงสู่เสาเข็มที่รองรับด้านล่าง และลงสู่ชั้นดินใต้ท้องน้ำ ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3-5 และรูปที่ 3-6

จากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ในการออกแบบแบบจำลองทางกายภาพในการศึกษานี้มีข้อจำกัดหลายอย่าง โดยโครงสร้างต้องมีลักษณะที่มีความแข็งแรง เมื่อคลื่นที่ถูกสร้างขึ้นเข้ากระทบจะต้องไม่มีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับท้องน้ำ เนื่องจากอ่างจำลองคลื่นที่ใช้ศึกษาไม่สามารถเจาะเสาออกไปเพื่อถ่ายแรงลงด้านล่างได้ จึงมีความจำเป็นต้องใช้โครงสร้างอื่นที่ไม่ใช่เสาเข็ม แต่เป็นเพียงการวางลงบนพื้นอ่างจำลองและสามารถยึดติดกับพื้นได้ อีกทั้งต้องสามารถทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพได้ง่าย ดังนั้นวัสดุที่เป็นเหล็กรูปพรรณจึงเป็นตัวเลือกที่ถูกนำมาใช้ในงานศึกษานี้ โดยใช้โครงสร้างเหล็กกล่องรูปพรรณขนาดหน้าตัด 1.5×3 นิ้ว ในการออกแบบโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น อย่างไรก็ตามการใช้ชนิดของวัสดุที่แตกต่างกันย่อมส่งผลกระทบต่อการสลายพลังงานของคลื่น ดังนั้นการศึกษานี้จึงพิจารณาให้ผลจากความแตกต่างของผิวโครงสร้างไม่อยู่ในขอบเขตการศึกษานี้

การใช้แบบจำลองทางกายภาพเพื่อการศึกษาเกี่ยวกับวิศวกรรมชายฝั่งนั้น จำเป็นต้องพิจารณาเกี่ยวกับกฎความคล้ายคลึงหรือความเหมือน โดยจะทำการพิจารณาถึงความคล้ายคลึงทางเรขาคณิต (geometric similarity) และความคล้ายคลึงด้านพลศาสตร์ (dynamic similarity) เพื่อเป็นการพิจารณาถึงลักษณะทางกายภาพที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติเมื่อเทียบกับลักษณะที่เกิดขึ้นในแบบจำลองทางกายภาพที่มีขนาดย่อลง สำหรับการออกแบบแบบจำลองทางกายภาพ และคุณสมบัติของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องโดยพิจารณาภายใต้ขอบเขตข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษานั้น พบว่าสามารถย่อขนาดของโครงสร้างลงได้ประมาณ 4 เท่า โดยใช้หลักความคล้ายคลึงทางเรขาคณิต และความคล้ายคลึงด้านพลศาสตร์ รายละเอียดการคำนวณเกี่ยวกับความคล้ายคลึงสามารถรายละเอียดได้ในภาคผนวก จ

3.4.2 ข้อมูลตัวแปรลักษณะคุณสมบัติคลื่น

การศึกษานี้สนใจตัวแปรคุณสมบัติคลื่น คือ ความลึกน้ำ, ความสูงคลื่น, คาบคลื่น, ความยาวคลื่น และความชันคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง สำหรับความลึกน้ำ, ความสูงคลื่น, คาบคลื่น และความยาวคลื่นนั้น จะต้องทำการย่อขนาดตามหลักการความคล้ายคลึงของแบบจำลอง เนื่องจากขนาดของโครงสร้างถูกย่อขนาดลงตามความคล้ายคลึงทางเรขาคณิตด้วยอัตราส่วน 4 เท่า ดังนั้นความลึกน้ำ และความสูงคลื่น จึงถูกย่อขนาดลง 4 เท่าเช่นกัน และเนื่องจากการศึกษานี้ใช้แบบจำลองที่ไม่มีการบิดเบี้ยวทางเรขาคณิต (undistorted model) ส่งผลให้คาบคลื่นจึงถูกย่อขนาด

ลง 2 เท่า ซึ่งขนาดของตัวแปรต่าง ๆ เมื่อถูกย่อลงด้วยกฎของความคล้ายคลึงแล้วนั้น ยังคงอยู่ในขอบเขตของความสามารถในการจำลองของแบบจำลองทางกายภาพสำหรับการศึกษานี้ โดยรายละเอียดการคำนวณเกี่ยวกับความคล้ายคลึงสามารถดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก จ

สำหรับตัวแปรความชันคลื่น เนื่องจากเป็นตัวแปรไร้หน่วยที่สามารถบ่งบอกถึงพลังงานที่คลื่นสามารถทำลายโครงสร้างทางชายฝั่งหรือก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งได้ อีกทั้งยังเป็นความสัมพันธ์ของความสูงคลื่นต่อความยาวคลื่นอีกด้วย ทั้งนี้โครงการ IMPAC-T Project (2012) ได้ทำการเก็บข้อมูลคลื่นบริเวณอ่าวไทยตอนบนพบว่า ความชันคลื่นเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.010-0.025 ประกอบกับการที่แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบจำลองที่ไม่มีการบิดเบี้ยว (undistorted model) หากจะพิจารณาถึงความคล้ายคลึงและจะได้ผลลัพธ์ของอัตราส่วนเป็น 1 เท่า หรือมีขนาดเท่ากับความชันคลื่นจริงที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ดังนั้นการศึกษานี้จึงกำหนดตัวแปรคุณสมบัติคลื่นโดยจะพิจารณาความชันคลื่น 5 ช่วงความชันคลื่น ภายในช่วง 0.010-0.025

3.5 การออกแบบการทดลองและกระบวนการเก็บข้อมูลแบบจำลอง

3.5.1 การออกแบบการทดลอง

ในการพิจารณาออกแบบการทดลอง จะพิจารณาตัวแปรที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลง 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ คุณสมบัติคลื่น และตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง สำหรับคุณสมบัติคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างและสะท้อนจากโครงสร้างในการศึกษานี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ ความลึกน้ำ, ความสูงคลื่น และความยาวคลื่น ในส่วนของความลึกน้ำนั้นจะพิจารณาความลึกน้ำคงที่ค่าเดียวเท่ากับ 0.45 เมตร เท่านั้น ส่วนความสูงคลื่นและความยาวคลื่น จะพิจารณาร่วมกันเป็นตัวแปรความชันคลื่น (wave steepness) เนื่องจากเป็นตัวแปรไร้หน่วยที่มีศักยภาพในการวิเคราะห์อิทธิพลที่มีต่อพฤติกรรมของคลื่นที่เกิดขึ้น (Horikawa, 1978) โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด 5 ระดับ โดยจะอยู่ในช่วงระหว่าง 0.010-0.025 ตามสภาพที่เกิดขึ้นในพื้นที่ที่มีความเหมาะสมในการใช้เขื่อนกันคลื่นลักษณะดังกล่าวซึ่งอยู่ในบริเวณอ่าวไทยตอนบน ตารางที่ 3-1 แสดงรายละเอียดของการเปลี่ยนแปลงค่าความชันคลื่นในการศึกษานี้

สำหรับตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างนั้น จะทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกการจมโครงสร้าง เนื่องจากการศึกษานี้ใช้เหล็กกล่องรูปพรรณขนาด 1.5×3 นิ้ว ดังนั้นการเพิ่มความลึกการจม 1 ค่าคือการใส่เหล็กกล่องเพิ่ม 1 ชั้น กล่าวคือเพิ่มความลึกครั้งละ 3 นิ้วหรือ 0.075 เมตร หรือ 16.67% ของความลึกน้ำทั้งหมดเป็นจำนวน 4 ชั้นความลึก คือ 0.075, 0.150, 0.225 และ 0.300 เมตร และยังมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้างโดยทำการเปลี่ยนแปลงระยะตาม

ลักษณะที่สามารถก่อสร้างในพื้นที่จริงได้ โดยเมื่อย่อขนาดแล้วจะเหลือระยะห่างเท่ากับ 0.5, 1 และ 1.5 เมตร นอกจากนั้นยังมีกรณีพิเศษเพิ่มเติมคือการเสริมความสูงของโครงสร้างให้สูงขึ้นเหนือผิวน้ำ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดคลื่นข้ามโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 3-6 สำหรับการพิจารณาความคล้ายคลึง แสดงรายละเอียดในภาคผนวก จ

ตารางที่ 3-1 การเปลี่ยนแปลงค่าความชันคลื่นในการศึกษา

ขนาดคลื่น	ระยะช่วงชัก (เซนติเมตร)	ความถี่มอเตอร์ (เฮิรต)	ความชันคลื่น
W1	7	12	0.010 - 0.013
W2	7	14	0.013 - 0.016
W3	6	16	0.016 - 0.019
W4	7	16	0.019 - 0.022
W5	8	16	0.022 - 0.025

สรุปการออกแบบการทดลองในการศึกษานี้ โดยมีตัวแปรที่สนใจทั้งสิ้น 4 ตัวแปร คือ ความชันคลื่น, ความลึกการจมโครงสร้าง, การยอมให้คลื่นผ่านโครงสร้าง และระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง ซึ่งจะมีกรณีศึกษาทั้งสิ้น 120 กรณีศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 3-2

3.5.2 การเก็บข้อมูลคลื่นในแบบจำลองทางกายภาพ

การศึกษาในครั้งนี้จะทำการเก็บข้อมูลของความสูงคลื่นทั้งบริเวณก่อนโครงสร้างและหลังผ่านจากโครงสร้างไปแล้ว เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของคลื่นที่เกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่น การเก็บข้อมูลต่าง ๆ จะมีการนำไปวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน โดยจะใช้อุปกรณ์วัดคลื่นแบบ CH-403A & CHT4-40 ของบริษัท Kennek โดยการเก็บข้อมูลคลื่นในแนวระนาบจะแบ่งแกนพิกัดออกเป็นสองแกน โดยกำหนดแนวแกน x เป็นแกนขนานกับแนวชายฝั่ง (along shore) แนวแกน y เป็นแกนตั้งฉากกับแนวชายฝั่ง (cross shore) มีตำแหน่งศูนย์กลางการวัด ($x=0, y=0$) อยู่ที่กึ่งกลางของสันเขื่อนกันคลื่น โดยที่พิกัดแกน x มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 5.00 เมตร และพิกัดแกน y มากที่สุดเท่ากับ 6.00 เมตร ให้ทิศทางของแนวแกนเป็นดังรูปที่ 3-2 การศึกษาจะดำเนินภายใต้สมมติฐานที่คลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัด สำหรับตำแหน่งการเก็บข้อมูลคลื่นด้านหน้าโครงสร้างนั้นจะอนุमानให้คลื่นเคลื่อนที่เข้ามาเป็นระนาบเดียวกัน และทำการเก็บข้อมูล 2 ตำแหน่งด้วยกัน คือ ที่กึ่งกลางเขื่อนกันคลื่น และห่างออกไปด้านหน้าเป็นระยะ 2.0 และ 2.6 เมตร ตามลำดับ เครื่องมือวัดความสูงคลื่นที่ด้านหน้าโครงสร้างจะตั้งห่างกันเป็นระยะ 0.60 เมตร ตาม

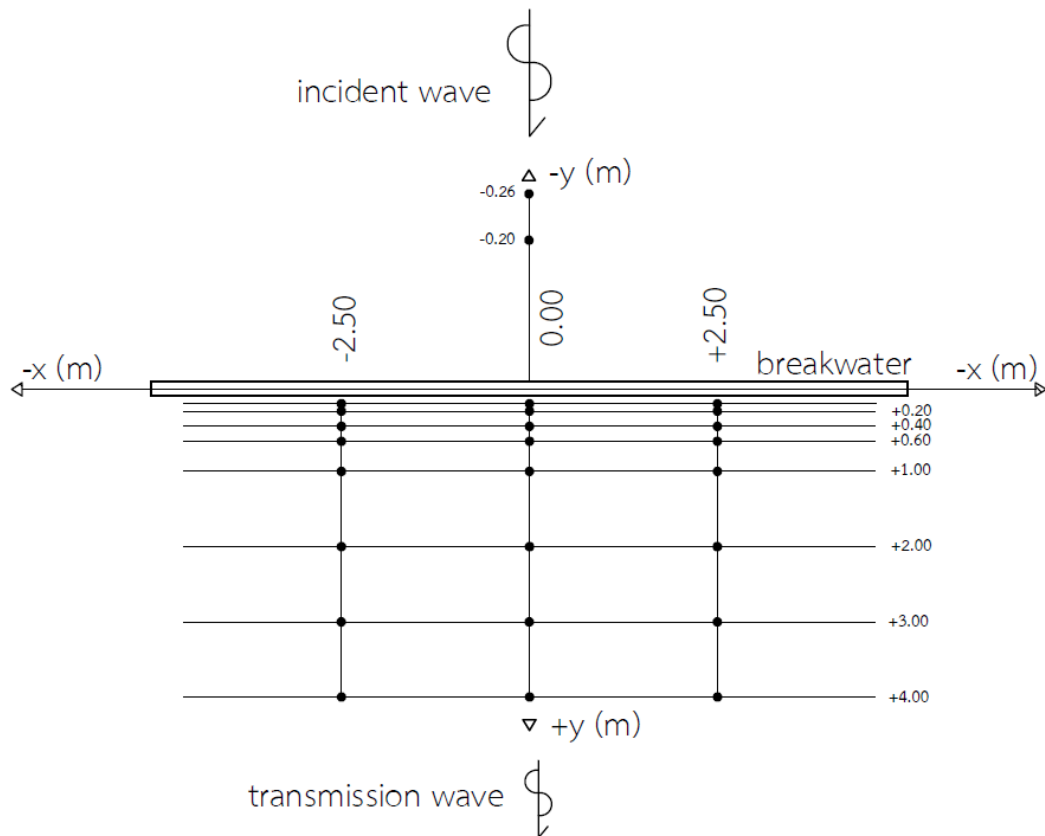
ข้อกำหนดในการศึกษาของ Goda and Suzuki (1976) เพื่อพิจารณาแยกคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าและสะท้อนออกจากกัน จากข้อมูลคลื่นที่เก็บได้จากทั้งสองตำแหน่ง โดยใช้สมการจากการศึกษาของ Goda and Suzuki (1976) และทำการปรับแก้ค่าด้วยตัวแปรปรับแก้จากแอมพลิจูดที่เกิดขึ้นจริงและที่คำนวณได้ของแต่ละเครื่องวัด โดยจะกล่าวรายละเอียดของการคำนวณในหัวข้อ 4.2

ตารางที่ 3-2 ตัวอย่างรายชื่อเงื่อนไขการศึกษา

เงื่อนไขการศึกษา			ความชันคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง (H/L)				
			0.010 - 0.013 (W1)	0.013 - 0.016 (W2)	0.016 - 0.019 (W3)	0.019 - 0.022 (W4)	0.022 - 0.025 (W4)
ยอมให้คลื่นผ่านโครงสร้าง (A)	0.5 เมตร (B1)	1 layer (D1)	AB1D1W1	AB1D1W2	AB1D1W3	AB1D1W4	AB1D1W5
		2 layers (D2)	AB1D2W1	AB1D2W2	AB1D2W3	AB1D2W4	AB1D2W5
		3 layers (D3)	AB1D3W1	AB1D3W2	AB1D3W3	AB1D3W4	AB1D3W5
		4 layers (D4)	AB1D4W1	AB1D4W2	AB1D4W3	AB1D4W4	AB1D4W5
	1 เมตร (B2)	1 layer (D1)	AB2D1W1	AB2D1W2	AB2D1W3	AB2D1W4	AB2D1W5
		2 layers (D2)	AB2D2W1	AB2D2W2	AB2D2W3	AB2D2W4	AB2D2W5
		3 layers (D3)	AB2D3W1	AB2D3W2	AB2D3W3	AB2D3W4	AB2D3W5
		4 layers (D4)	AB2D4W1	AB2D4W2	AB2D4W3	AB2D4W4	AB2D4W5
	1.5 เมตร (B3)	1 layer (D1)	AB3D1W1	AB3D1W2	AB3D1W3	AB3D1W4	AB3D1W5
		2 layers (D2)	AB3D2W1	AB3D2W2	AB3D2W3	AB3D2W4	AB3D2W5
		3 layers (D3)	AB3D3W1	AB3D3W2	AB3D3W3	AB3D3W4	AB3D3W5
		4 layers (D4)	AB3D4W1	AB3D4W2	AB3D4W3	AB3D4W4	AB3D4W5
ไม่ยอมให้คลื่นผ่านโครงสร้าง (O)	0.5 เมตร (B1)	1 layer (D1)	OB1D1W1	OB1D1W2	OB1D1W3	OB1D1W4	OB1D1W5
		2 layers (D2)	OB1D2W1	OB1D2W2	OB1D2W3	OB1D2W4	OB1D2W5
		3 layers (D3)	OB1D3W1	OB1D3W2	OB1D3W3	OB1D3W4	OB1D3W5
		4 layers (D4)	OB1D4W1	OB1D4W2	OB1D4W3	OB1D4W4	OB1D4W5
	1 เมตร (B2)	1 layer (D1)	OB2D1W1	OB2D1W2	OB2D1W3	OB2D1W4	OB2D1W5
		2 layers (D2)	OB2D2W1	OB2D2W2	OB2D2W3	OB2D2W4	OB2D2W5
		3 layers (D3)	OB2D3W1	OB2D3W2	OB2D3W3	OB2D3W4	OB2D3W5
		4 layers (D4)	OB2D4W1	OB2D4W2	OB2D4W3	OB2D4W4	OB2D4W5
	1.5 เมตร (B3)	1 layer (D1)	OB3D1W1	OB3D1W2	OB3D1W3	OB3D1W4	OB3D1W5
		2 layers (D2)	OB3D2W1	OB3D2W2	OB3D2W3	OB3D2W4	OB3D2W5
		3 layers (D3)	OB3D3W1	OB3D3W2	OB3D3W3	OB3D3W4	OB3D3W5
		4 layers (D4)	OB3D4W1	OB3D4W2	OB3D4W3	OB3D4W4	OB3D4W5

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของคลื่นด้านหลังเขื่อนกันคลื่นจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงมาก โดยเฉพาะพื้นที่ติดกับโครงสร้างด้านหลังของเขื่อนกันคลื่น ทำให้จำเป็นต้องเก็บข้อมูลในบริเวณนั้นอย่างละเอียด การศึกษานี้มีส่วนที่พิจารณาถึงผลของการส่งผ่านคลื่นเมื่อมีโครงสร้าง และตั้งสมมติฐานว่าคลื่นจะถูกส่งผ่านโครงสร้างในลักษณะเดียวกันทั้งระนาบ ส่งผลให้ทำการวัดในแนวแกน x เพียงแค่ 3 ตำแหน่งเท่านั้น ในขณะที่ตำแหน่งวัดในแนวแกน y มี 8 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3-7 โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) ตำแหน่งในแนวแกน x ขนานกับชายฝั่ง (along shore) จะมีตำแหน่งการเก็บข้อมูลในตำแหน่ง 0.00 และ ± 2.50 เมตร
- 2) ตำแหน่งในแนวแกน y ตั้งฉากกับชายฝั่ง (cross shore) จะมีตำแหน่งการเก็บข้อมูลในตำแหน่ง +0.10, +0.20, +0.40, +0.60, +1.00, +2.00, +3.00 และ +4.00 เมตร



รูปที่ 3-7 ตำแหน่งการเก็บข้อมูลคลื่น

3.6 วิธีการดำเนินการทดลอง

3.6.1 การเตรียมการก่อนดำเนินการทดลอง

- 1) ติดตั้งแบบจำลองเชื่อมกันคลื่นในอ่างจำลองคลื่นตามตำแหน่งที่ได้ออกแบบไว้ พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานคลื่น (wave absorber) ในอ่างจำลองคลื่น เพื่อลดคลื่นที่สะท้อนจากอ่างจำลองคลื่น
- 2) ติดตั้งเครื่องวัดระดับน้ำภายในอ่างจำลองคลื่น เพื่อใช้วัดระดับน้ำนิ่ง (still water level, SWL)
- 3) ติดตั้งเครื่องมือวัดคลื่นที่ได้ทำการสอบเทียบและสอบวัดเรียบร้อยแล้วในแต่ละตำแหน่งวัด
- 4) เปิดเครื่องสูบน้ำเพื่อเติมน้ำเข้าสู่อ่างจำลองคลื่น จนได้ระดับน้ำนิ่งที่วัดได้จากเครื่องมือวัดระดับน้ำเป็นไปตามค่าที่ออกแบบไว้

3.6.2 การดำเนินการทดลอง

- 1) บันทึกระดับน้ำนิ่งจากเครื่องมือวัดระดับน้ำก่อนการทดลอง
- 2) ปรับและเปิดเครื่องกำเนิดคลื่นให้สร้างคลื่นตามเงื่อนไขที่ออกแบบไว้ โดยต้องเปิดเครื่องกำเนิดคลื่นทิ้งไว้จนกระทั่งคลื่นมีลักษณะการเคลื่อนที่คงที่
- 3) ทำการวัดและเก็บข้อมูลคลื่น ตามตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ก่อนหน้า
- 4) บันทึกระดับน้ำนิ่งจากเครื่องมือวัดระดับน้ำหลังการทดลอง
- 5) ทำขั้นตอน 1 ถึง 4 ซ้ำ โดยการเปลี่ยนค่าความชันคลื่นจนครบทั้ง 5 ช่วงความชันคลื่น
- 6) ทำการเปลี่ยนเงื่อนไขความถี่การจมนของเชื่อมกันคลื่นใหม่ตามที่ได้ออกแบบไว้ และทำขั้นตอน 1 ถึง 5 ซ้ำ จนครบ 4 ช่วงของเงื่อนไขการจมนของโครงสร้าง
- 7) ทำการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้างให้ได้ตามที่ได้ออกแบบไว้ และทำขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 ซ้ำ โดยทำการเพิ่มระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้างจนครบทั้ง 3 ระยะ
- 8) เพิ่มเงื่อนไขโดยการเสริมความสูงของโครงสร้าง เพื่อไม่ยอมให้คลื่นล้นผ่านโครงสร้างได้ และทำขั้นตอน 1 ถึง 7 ซ้ำ

เมื่อได้ทำการวัดข้อมูลการเปลี่ยนแปลงระดับผิวน้ำตามเวลาและตำแหน่งต่าง ๆ ในอ่างจำลองคลื่นแล้วเสร็จ ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัด ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดจะเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วงเวลาต่าง ๆ ในแต่ละตำแหน่ง เมื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีสเปกตรัมเพื่อคำนวณหาคาบคลื่น และนำคาบคลื่นมาวิเคราะห์ความสูงคลื่นในช่วงเวลาต่าง ๆ จากนั้นเปรียบเทียบกับสมการที่ได้จากการสอบเทียบเครื่องมือ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นขนาดความสูงคลื่น

ที่เกิดขึ้นจริง สำหรับคาบคลื่นจะนำมาวิเคราะห์หาความยาวคลื่นเพิ่มเติมภายใต้สมมติฐานที่คลื่นในการศึกษาอยู่ภายใต้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย ซึ่งความสูงคลื่นและความยาวคลื่นจะเป็นตัวแทนของข้อมูลในตำแหน่งต่าง ๆ ในกรณีศึกษาต่าง ๆ

เมื่อทราบพฤติกรรมของคลื่นในแต่ละกรณีศึกษาแล้ว จะนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับตัวแปรที่สนใจ คือ ความชันคลื่น, ความลึกการจมโครงสร้าง, การยอมให้คลื่นล้นสันโครงสร้าง และระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง เป็นต้น จากนั้นสรุปผลการทดลองในแบบจำลองทางกายภาพ อาทิเช่น อิทธิพลของความชันคลื่น, ความลึกการจมโครงสร้าง, การยอมให้คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง ที่มีต่อพฤติกรรมการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่น โดยรายละเอียดจะกล่าวถึงในบทต่อไป



บทที่ 4

พฤติกรรมการสะท้อนของคลื่น

ในการศึกษานี้ จะทำการวิเคราะห์ถึงลักษณะพฤติกรรมการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นของโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน (partial breakwater) เนื่องจากอิทธิพลของตัวแปรคุณสมบัติคลื่น และลักษณะทางกายภาพของโครงสร้าง สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นเป็นหลัก โดยอาจมีรายละเอียดของการวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นบ้างเล็กน้อย เพื่อลดความซ้ำซ้อนของเนื้อหา ดังแสดงรายละเอียดแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

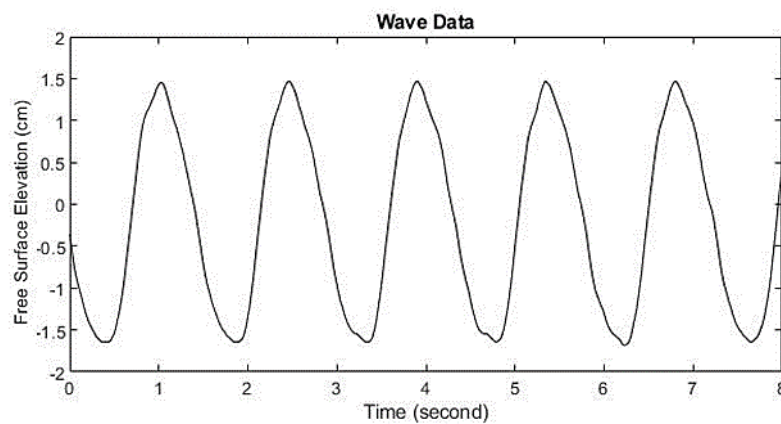
4.1 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่น

สำหรับการศึกษานี้ ได้ทำการเก็บข้อมูลคลื่นที่จำลองโดยใช้เครื่องมือวัดความสูงคลื่น ซึ่งเครื่องมือจะทำการเก็บข้อมูลระดับผิวน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาตัวแปรคุณสมบัติคลื่น (wave characteristic) ได้แก่ ความสูงคลื่น (wave height), คาบคลื่น (wave period) และความยาวคลื่น (wave length) ด้วยวิธีการทางสถิติ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของคุณสมบัติคลื่นที่เป็นตัวแทนของคลื่นในแต่ละตำแหน่ง โดยตำแหน่งของการเก็บข้อมูลคลื่นจะแบ่งเป็นสองกลุ่ม ได้แก่ บริเวณด้านหน้าโครงสร้างที่เป็นข้อมูลคลื่นรวมระหว่างคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่และสะท้อนจากโครงสร้าง และบริเวณด้านหลังโครงสร้างที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านไป ซึ่งทั้งสองบริเวณจะเก็บในช่วงเวลาเดียวกัน เพื่อนำคุณสมบัติคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างไปพิจารณาร่วมกับคุณสมบัติคลื่นที่ส่งผ่านไปด้านหลังโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (transmission coefficient, K_t) และพิจารณาร่วมกับคุณสมบัติคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้างในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น (reflection coefficient, K_r)

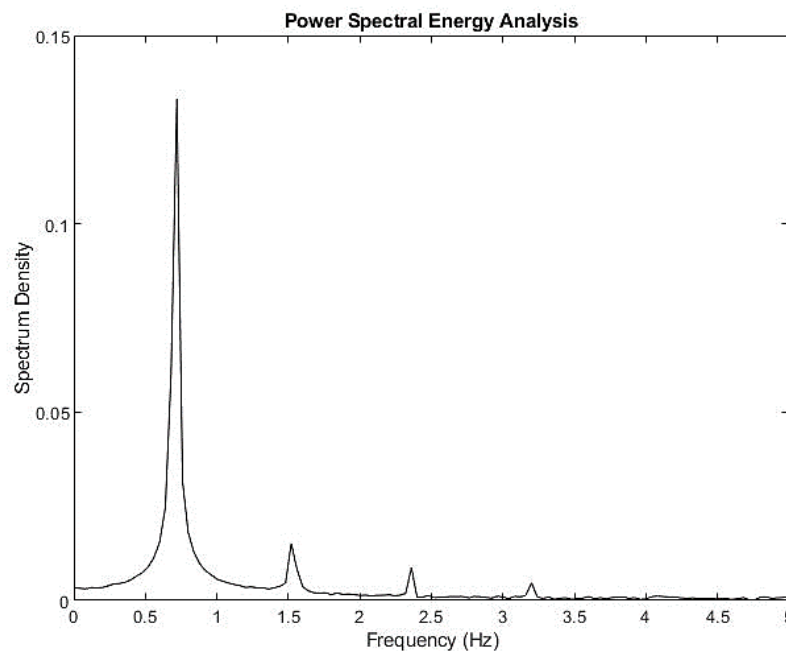
4.1.1 วิธีการหาความสูงคลื่นนัยสำคัญ คาบคลื่น และความยาวคลื่น

การเก็บข้อมูลคลื่นในแต่ละตำแหน่งนั้น จะใช้เครื่องมือวัดคลื่นที่ทำงานโดยการวัดระดับผิวน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลที่บันทึกได้เป็นข้อมูลต่อเนื่องที่มีลักษณะเป็นลูกคลื่นหลายลูกต่อกัน เพื่อให้สามารถพิจารณาลักษณะของคลื่นแต่ละลูกและใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ได้นั้น จำเป็นต้องตัดข้อมูลออกเป็นช่วง ๆ ตามขนาดของคาบคลื่น สำหรับการหาคาบคลื่น จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความถี่ (frequency analysis) โดยการแปลงข้อมูลที่อยู่ในอาณาจักรของเวลา (time domain) เป็นข้อมูลที่อยู่ในอาณาจักรของความถี่ (frequency domain) เพื่อหาคาบคลื่นที่เป็นตัวแทนของชุดข้อมูล และใช้คาบคลื่นนี้ในการวิเคราะห์หาความสูงคลื่นและความยาวคลื่นต่อไป

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้วิธีวิเคราะห์ความถี่ด้วยวิธี power spectral energy (PSE) เพื่อแปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปอาณาจักรเวลาให้อยู่ในรูปอาณาจักรความถี่ โดยในการแปลงข้อมูลจะใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพลังงานกับความถี่ ซึ่งในกรณีของการศึกษาที่เป็นคลื่นแบบสม่ำเสมอ (regular wave) กราฟดังกล่าวจึงมีเพียงยอดสูงสุดที่ความถี่เดียว และส่วนกลับของความถี่สูงสุดนี้มีค่าเท่ากับคาบคลื่น ตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นแสดงดังรูปที่ 4-1



ก) ลักษณะข้อมูลคลื่นที่เก็บได้ในการศึกษา



ข) การวิเคราะห์ความถี่ด้วยวิธี power spectral energy

รูปที่ 4-1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ความถี่ของข้อมูลคลื่น

เมื่อทราบคาบคลื่นที่ได้จากการวิเคราะห์ความถี่แล้ว จะนำคาบคลื่นดังกล่าวไปตัดข้อมูลค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่บันทึกอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ทราบถึงความสูงคลื่นย่อย ๆ ในแต่ละคาบคลื่น หลังจากนั้นนำความสูงคลื่นของคลื่นแต่ละลูกมาวิเคราะห์ทางสถิติ (statistical analysis) เพื่อหาตัวแทนความสูงคลื่น ที่เรียกว่า ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (significant wave height) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญเพื่อใช้ในการศึกษาทางวิศวกรรมชายฝั่งทะเล (U.S. CERC., 1984)

การวิเคราะห์หาความยาวคลื่นจะวิเคราะห์จากการคำนวณภายใต้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อยดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1 สำหรับทุกกรณีศึกษาในการศึกษานี้ คลื่นจะถูกจำแนกเป็นคลื่นในความลึกเปลี่ยนแปลง และอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและคาบคลื่นด้วยสมการในตารางที่ 2-1

4.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น (reflection coefficient, K_r) คือ อัตราส่วนระหว่างความสูงคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น ต่อความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น ดังสมการที่ 4-1 โดยการศึกษาจะพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น เพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปบริเวณด้านหน้าโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา และเปรียบเทียบถึงการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่น

$$K_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (4-1)$$

เมื่อ K_r คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น (reflection coefficient)

H_r คือ ความสูงคลื่นที่สะท้อนจากเขื่อนกันคลื่น (reflected wave height)

H_i คือ ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่เขื่อนกันคลื่น (incident wave height)

4.2 การแยกคลื่นจากชุดข้อมูลคลื่นบริเวณด้านหน้าโครงสร้าง

การศึกษานี้มีสมมติฐานที่คลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างเป็นระนาบเดียวกันตลอดทั้งหน้าตัด โดยตำแหน่งการเก็บข้อมูลคลื่นด้านหน้าโครงสร้างนั้นจะทำการเก็บข้อมูล 2 ตำแหน่งที่กึ่งกลางเขื่อนกันคลื่น โดยห่างออกไปด้านหน้าเป็นระยะ 2.0 และ 2.6 เมตร ตามลำดับ สำหรับความสูงคลื่นสะท้อนและความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างนั้น จะพิจารณาแยกจากคลื่นที่ได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนที่เข้าและการสะท้อนกลับมารวมกัน ซึ่งเก็บได้จากเครื่องวัดความสูงคลื่นทั้งสองตำแหน่งที่กล่าวถึงก่อนหน้า โดยใช้แนวคิดและวิธีการตามการศึกษาของ Goda and Suzuki (1976)

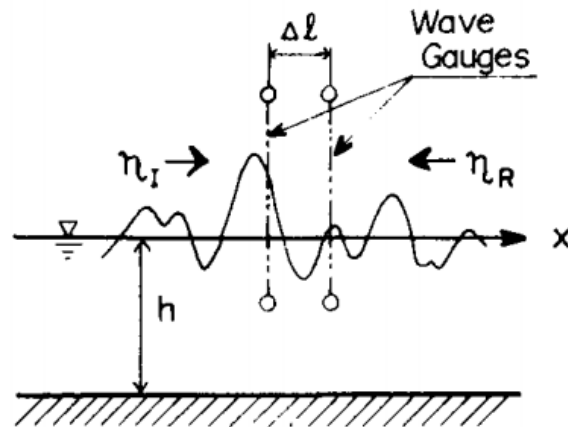
คลื่นที่เกิดจากเครื่องกำเนิดคลื่นในการศึกษานี้ จะเคลื่อนที่เข้ากระทบโครงสร้างและเกิดการสะท้อนกลับเนื่องจากความทึบของโครงสร้าง (Sorensen, 1991) ส่งผลให้คุณสมบัติและลักษณะคลื่นบริเวณด้านหน้าโครงสร้าง เป็นผลรวมเนื่องจากของอิทธิพลจากคลื่นทั้งสองทิศทาง ทั้งนี้ได้กำหนดให้คลื่นที่ถูกสร้างจากเครื่องกำเนิดคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง และคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้าง มีลักษณะเป็นคลื่นฮาร์โมนิกที่มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4-2 และสมการที่ 4-3 ตามลำดับ และมีการเคลื่อนที่เข้าหากันดังแสดงในรูปที่ 4-2 (Goda and Suzuki, 1976) การวิเคราะห์เพื่อแยกความสูงคลื่นสะท้อนและความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างนั้น จำเป็นต้องมีชุดข้อมูลคลื่นจากด้านหน้าโครงสร้างจำนวนสองตำแหน่ง โดยมีระยะห่างระหว่างเครื่องมือวัดความสูงคลื่นเท่ากับ Δl ดังแสดงในรูปที่ 4-2 ในการศึกษานี้มีระยะ Δl เท่ากับ 0.6 เมตร โดยกำหนดระยะตามข้อเสนอแนะของ Goda and Suzuki (1976)

$$\eta_I = a_I \cos(kx - \omega t + \epsilon_I) \quad (4-2)$$

$$\eta_R = a_R \cos(kx - \omega t + \epsilon_R) \quad (4-3)$$

เมื่อ	η_I	คือ ระดับผิวน้ำอิสระของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง
	η_R	คือ ระดับผิวน้ำอิสระของคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้าง
	a_I	คือ แอมพลิจูดของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง
	a_R	คือ แอมพลิจูดของคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้าง
	x	คือ ระยะทางจากตำแหน่งอ้างอิง
	t	คือ ระยะเวลาจากเวลาอ้างอิง
	k	คือ จำนวนลูกคลื่น (wave number) คำนวณได้จาก $k = 2\pi/L$
	ω	คือ ความถี่เชิงมุม (angular frequency) คำนวณได้จาก $\omega = 2\pi/T$
	ϵ_I	คือ ความต่างเฟสของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง
	ϵ_R	คือ ความต่างเฟสของคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้าง

จากนั้นได้กำหนดสมมติฐานเพิ่มเติมให้ชุดข้อมูลคลื่นที่เก็บได้บริเวณด้านหน้าโครงสร้างทั้งสองตำแหน่ง มีลักษณะการกระจายของข้อมูลแบบอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) ที่อยู่ในรูปของอาณาจักรของเวลา (time domain) ซึ่งมีความสัมพันธ์ของแต่ละตำแหน่งข้อมูลดังสมการที่ 4-4 และสมการที่ 4-5 โดยกำหนดให้ $x_2 = x_1 + \Delta l$



รูปที่ 4-2 ลักษณะการวิเคราะห์คลื่นของ Goda and Suzuki (1976)

$$\eta_1 = (\eta_I + \eta_R)_{x=x_1} = A_1 \cos \omega t + B_1 \sin \omega t \quad (4-4)$$

$$\eta_2 = (\eta_I + \eta_R)_{x=x_2} = A_2 \cos \omega t + B_2 \sin \omega t \quad (4-5)$$

เมื่อ η_1 คือ ระดับผิวน้ำอิสระของคลื่นที่ตำแหน่ง x_1

η_2 คือ ระดับผิวน้ำอิสระของคลื่นที่ตำแหน่ง x_2

A_1, B_1, A_2 และ B_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูเรียร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$A_1 = a_I \cos \varphi_I + a_R \cos \varphi_R \quad (4-6)$$

$$B_1 = a_I \sin \varphi_I + a_R \sin \varphi_R \quad (4-7)$$

$$A_2 = a_I \cos (k\Delta l + \varphi_I) + a_R \cos (k\Delta l + \varphi_R) \quad (4-8)$$

$$B_2 = a_I \sin (k\Delta l + \varphi_I) + a_R \sin (k\Delta l + \varphi_R) \quad (4-9)$$

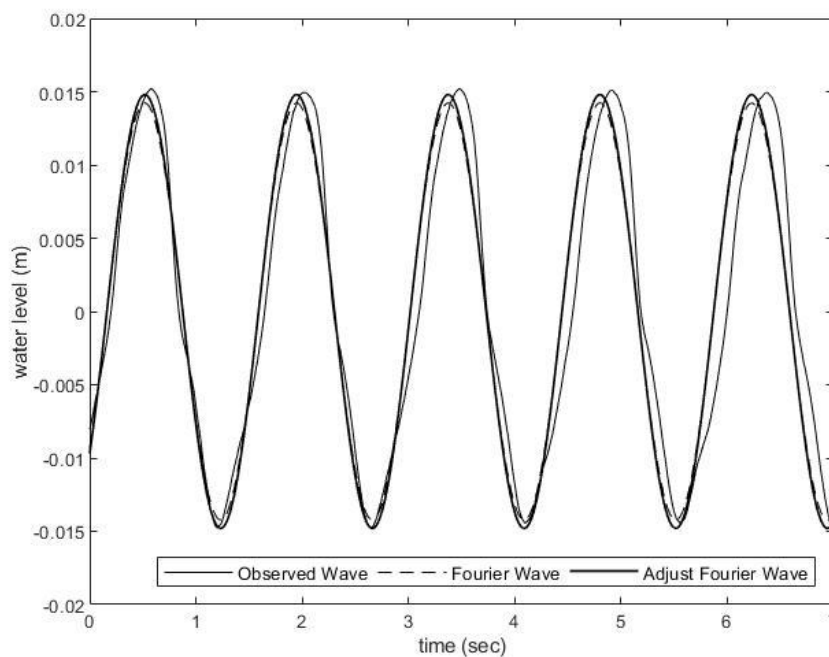
เมื่อ φ_I คือ ความต่างเฟสรวมของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง

φ_R คือ ความต่างเฟสรวมของคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้าง สามารถคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\varphi_I = kx_1 + \varepsilon_I \quad (4-10)$$

$$\varphi_R = kx_1 + \varepsilon_R \quad (4-11)$$

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ จะเริ่มจากการสร้างเส้นโค้งที่เหมาะสมที่สุด (curve fitting) เพื่อเป็นตัวแทนของข้อมูลคลื่นที่เก็บได้จากเครื่องวัดความสูงคลื่นในแต่ละตำแหน่งด้านหน้าโครงสร้าง ภายใต้สมมติฐานการกระจายของข้อมูลแบบอนุกรมฟูเรียร์ เส้นโค้งดังกล่าวนี้สามารถใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูเรียร์ (A_1 , B_1 , A_2 และ B_2) ของแต่ละชุดข้อมูลได้ (Kreyszig, 2006) ทั้งนี้การสร้างเส้นโค้งที่มีความเหมาะสมที่สุดได้พิจารณาถึงขนาดและการกระจายตัวของข้อมูลร่วมกัน จึงส่งผลให้เส้นโค้งที่ถูกสร้างขึ้น มีขนาดของความสูงคลื่นที่คลาดเคลื่อนจากข้อมูลคลื่นที่เก็บได้จริง ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูเรียร์ที่คำนวณได้จึงต้องถูกปรับแก้ให้เส้นโค้งมีขนาดของความสูงคลื่นเท่ากับข้อมูลคลื่นจริงก่อนนำไปใช้วิเคราะห์ในกระบวนการถัดไป โดยตัวแปรปรับแก้คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างความสูงคลื่นของชุดข้อมูลจริงต่อความสูงคลื่นจากเส้นโค้งที่มีความเหมาะสมที่สุด ตัวอย่างของการปรับแก้แสดงดังรูปที่ 4-3



รูปที่ 4-3 ตัวอย่างการวิเคราะห์การกระจายแบบอนุกรมฟูเรียร์

จากรูปที่ 4-3 จะเห็นได้ว่า เส้นโค้งที่มีความเหมาะสมที่สุด (เส้นประ) ที่สร้างขึ้นจากชุดข้อมูลคลื่นที่เก็บได้ (เส้นทึบ) จะมีขนาดของความสูงคลื่นที่แตกต่างจากขนาดของความสูงคลื่นของชุดข้อมูลที่เก็บได้จริงเล็กน้อย ดังนั้นจึงต้องทำการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูเรียร์ด้วยตัวแปรปรับแก้ที่นิยามไว้ก่อนหน้า และได้ผลลัพธ์เป็นเส้นโค้งที่ถูกปรับแก้แล้วดังแสดงด้วยเส้นหนา ค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูเรียร์ที่ถูกปรับแก้แล้วจะถูกใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาขนาดของแอมพลิจูดของคลื่นต่าง ๆ

ต่อไป โดยจากสมการที่ 4-6 ถึงสมการที่ 4-11 สามารถแก้สมการให้อยู่ในรูปอย่างง่าย เพื่อใช้ประมาณค่าของแอมพลิจูดของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง และคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้าง ดังแสดงผลลัพธ์ในสมการที่ 4-12 และสมการที่ 4-13 ตามลำดับ

$$a_1 = \frac{1}{2|\sin k\Delta l|} \sqrt{(A_2 - A_1 \cos k\Delta l - B_1 \sin k\Delta l)^2 + (B_2 + A_1 \sin k\Delta l - B_1 \cos k\Delta l)^2} \quad (4-12)$$

$$a_R = \frac{1}{2|\sin k\Delta l|} \sqrt{(A_2 - A_1 \cos k\Delta l + B_1 \sin k\Delta l)^2 + (B_2 - A_1 \sin k\Delta l - B_1 \cos k\Delta l)^2} \quad (4-13)$$

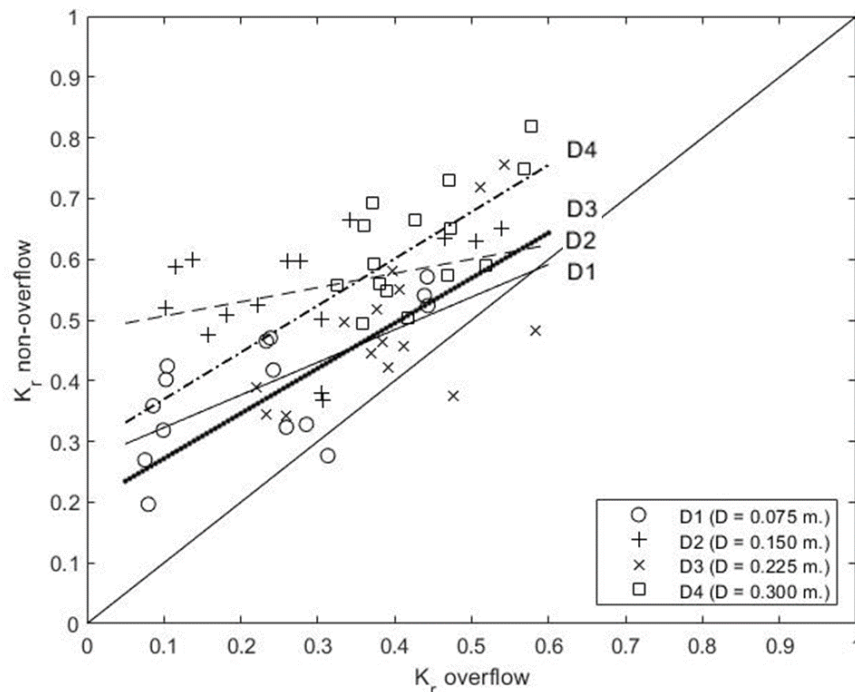
ขนาดของแอมพลิจูดของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง และคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้าง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-12 และสมการที่ 4-13 ซึ่งขนาดของความสูงคลื่นที่ใช้เป็นตัวแทนของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง และคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้าง จะมีขนาดเป็นสองเท่าของขนาดแอมพลิจูดที่คำนวณได้จากสมการที่ 4-12 และสมการที่ 4-13 ตามลำดับ ตามทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย (Dean and Dalrymple, 1993)

สำหรับความสูงคลื่นสะท้อนและคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างแสดงในภาคผนวก ฉ-1 เมื่อได้ขนาดของความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง และคลื่นที่สะท้อนออกจากโครงสร้างในแต่ละกรณีศึกษาแล้ว จะนำไปผลที่ได้ไปวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนต่อไป

4.3 อิทธิพลของการยอมให้คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

สำหรับการศึกษาในกรณีศึกษาต่าง ๆ นั้น ได้มีการกำหนดรูปแบบของโครงสร้างเพื่อให้คลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างมีลักษณะที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญอยู่ 2 รูปแบบ คือ การยอมให้คลื่นล้นข้ามได้ (overflow) และการไม่ยอมให้คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง (non-overflow) เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นมาพล็อตเทียบกันระหว่างทั้งสองกรณีศึกษา โดยเทียบเคียงกันจากคุณสมบัติคลื่นที่ใกล้เคียงกัน และลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างที่เหมือนกัน จะสามารถเห็นลักษณะของพฤติกรรมได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4-4 จากกราฟพบว่าแนวโน้มส่วนใหญ่ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่เก็บข้อมูลได้ในกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้าม จะมีค่าที่สูงกว่ากรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้างเกือบทั้งหมด ดังเห็นได้จากจุดในแต่ละคู่กรณีศึกษาที่อยู่เหนือเส้นตรง 45 องศา และแนวโน้มโดยรวมของทุกความลึกการจมโครงสร้าง (D) สาเหตุที่เกิดพฤติกรรมในลักษณะดังกล่าวนี้ เนื่องจาก การที่โครงสร้างไม่ยอมให้คลื่นล้นข้ามได้นั้น เป็นการเพิ่มขึ้นส่วนของโครงสร้างบริเวณด้านบนเหนือผิวน้ำ ทำให้ผิวสัมผัสของหน้าคลื่นกับโครงสร้างเพิ่มขึ้น และสามารถสะท้อนพลังงาน

คลื่นกลับสู่ด้านหน้าโครงสร้างได้มากขึ้นตามไปด้วย (Nagai, 1966) ดังแสดงให้เห็นในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นระหว่างกรณีที่คลื่นล้นข้ามกับไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

4.4 การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

ในกระบวนการทางวิศวกรรมมักจัดกลุ่มตัวแปรต่าง ๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกันเข้าด้วยกัน โดยสามารถจัดให้อยู่ได้ในรูปของตัวแปรไม่มีมิติวัด หรือตัวแปรไร้หน่วย (dimensionless parameter) เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ผลและต่อยอดในการออกแบบต่อไป (Dalrymple, 1985) ซึ่งการวิเคราะห์เพื่อจัดกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยดังกล่าวนี้มีความจำเป็นต้องพิจารณาตัวแปรทั้งหมดที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่น โดยมีรายละเอียดดังนี้

ในการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเขื่อนกันคลื่นต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะพฤติกรรมของคลื่น โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพนั้น มีตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะคลื่นดังต่อไปนี้

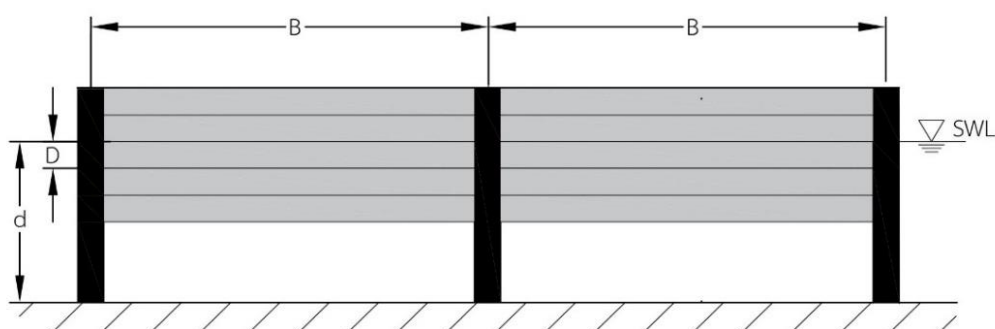
- 1) ตัวแปรพิจารณาที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของของไหลประกอบด้วย ความหนาแน่นของของไหล (density of fluid, ρ), ความหนืดจลน์ของของไหล (kinematics viscosity, ν) และความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (acceleration due to gravity, g)
- 2) ตัวแปรพิจารณาที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของวัสดุท้องน้ำประกอบด้วย ขนาดวัสดุท้องน้ำ (sediment size, d_{50}), ความหนาแน่นของวัสดุท้องน้ำ (density of the sediment, ρ_s), การกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ (size distribution), ลักษณะของวัสดุท้องน้ำ (grain form) และแรงดึงดูดระหว่างวัสดุท้องน้ำ (cohesion of material)
- 3) ตัวแปรพิจารณาที่เกี่ยวข้องกับคลื่นประกอบด้วย ความสูงคลื่น (wave height, H), คาบคลื่น (wave period, T), ความยาวคลื่น (wave length, L), ทิศทางของคลื่น (wave direction, α_0), ความลึกน้ำ (depth of water, d) และความลาดเอียงของท้องน้ำ (bed slope, S_0)
- 4) ตัวแปรพิจารณาที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของเขื่อนกันคลื่นประกอบด้วย รูปร่างของโครงสร้าง, ความพรุนของโครงสร้าง, มุมลาดเอียงของโครงสร้าง, ช่องว่างระหว่างโครงสร้าง, ความยาวของเขื่อนกันคลื่น, ความกว้างของเขื่อนกันคลื่น, ความหนาของเขื่อนกันคลื่น (b), ระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง (B), การยอมให้น้ำล้นข้ามโครงสร้าง และความถี่การจมของโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น (D)

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์เป็นจำนวนมาก หากจะพิจารณาตัวแปรทั้งหมดอาจจะก่อให้เกิดความยุ่งยากทั้งการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ เพื่อเป็นการง่ายต่อการวิเคราะห์ตัวแปรดังกล่าว อีกทั้งเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา จึงได้ตั้งสมมติฐานและข้อจำกัดดังนี้

- 1) น้ำที่ใช้เป็นน้ำจืด และมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous) ตลอดแบบจำลอง
- 2) วัสดุท้องน้ำเป็นคอนกรีตแบบไม่เปลี่ยนแปลง และไม่มี ความลาดเอียงของท้องน้ำ
- 3) ทิศทางของคลื่นมีทิศทางเดียวและตั้งฉากกับโครงสร้าง และเป็นคลื่นขนาดสม่ำเสมอ
- 4) ลักษณะของเขื่อนกันคลื่นใช้เหล็กกล่องเรียบทรงสี่เหลี่ยม ความยาวของเขื่อนกันคลื่นเต็ม ความกว้างของอ่างจำลองคลื่นในทุกกรณีศึกษา และมีความหนาเท่ากันตลอดการศึกษา

ดังนั้นเมื่อพิจารณาทดลองด้วยเขื่อนกันคลื่นที่มีขนาดความยาวเต็มความกว้างของอ่างจำลอง คลื่นในทุกการทดลอง แต่ทำการเปลี่ยนแปลงระดับของโครงสร้างที่จมน้ำและพื้นน้ำ รวมถึงระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง จะเหลือตัวแปรที่นำมาพิจารณาความสัมพันธ์ดังนี้

- คลื่น : ความลึกน้ำ (d), คาบคลื่น (T), ความสูงคลื่น (H) และความยาวคลื่น (L)
- เขื่อนกันคลื่น : ความลึกโครงสร้างที่อยู่ใต้น้ำ (D), การยอมให้น้ำล้นข้ามโครงสร้าง, ความหนาของโครงสร้าง (b) และระยะห่างระหว่างเสา (B) ดังแสดงในรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 ตัวแปรระบุลักษณะของโครงสร้าง

สำหรับการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับการสะท้อนของคลื่นจากโครงสร้างนั้น จากสมมติฐานที่ถูกตั้งขึ้นเนื่องจากข้อจำกัดของแบบจำลองทางกายภาพ ทำให้เบื้องต้นคาดว่าอิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อตัวแปรความสูงคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้าง (H_r) นั้น ประกอบด้วย ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง (H_i), ความลึกน้ำ (d), ความหนาของโครงสร้าง (b), ความยาวคลื่น (L), ความลึกโครงสร้างที่อยู่ใต้น้ำ (D) และระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง (B) ดังสมการที่ 4-14

$$H_r = f(H_i, d, L, D, b, B) \quad (4-14)$$

โดยการพิจารณาตัวแปรเกี่ยวกับการสะท้อนของคลื่นจากโครงสร้างนั้น พบว่าสามารถเขียนความสัมพันธ์ของความสูงคลื่นที่สะท้อนบริเวณด้านหน้าโครงสร้างในรูปตัวแปรไร้มิติ (dimensionless parameter) ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมทางกายภาพของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน ได้ดังสมการที่ 4-15

$$K_r = \frac{H_r}{H_i} = f\left(\frac{H_i}{B}, \frac{H_i}{L}, \frac{H_i}{d}, \frac{D}{d}, \frac{d}{L}, \frac{b}{L}\right) \quad (4-15)$$

เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรไร้หน่วยต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นรวม ทำให้ต้องทำการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นรวมกับตัวแปรไร้หน่วยในแต่ละกลุ่ม โดยการวิเคราะห์และอภิปรายผลจะกล่าวถึงโดยละเอียดในหัวข้อ 4.5

4.5 การวิเคราะห์พฤติกรรมของการสะท้อนของคลื่นจากโครงสร้าง

สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพฤติกรรมของการสะท้อนของคลื่นจากโครงสร้างเนื่องจากอิทธิพลของตัวแปรไร้หน่วยต่าง ๆ ซึ่งเป็นทั้งกลุ่มของตัวแปรคุณสมบัติคลื่น และตัวแปรเกี่ยวกับโครงสร้าง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

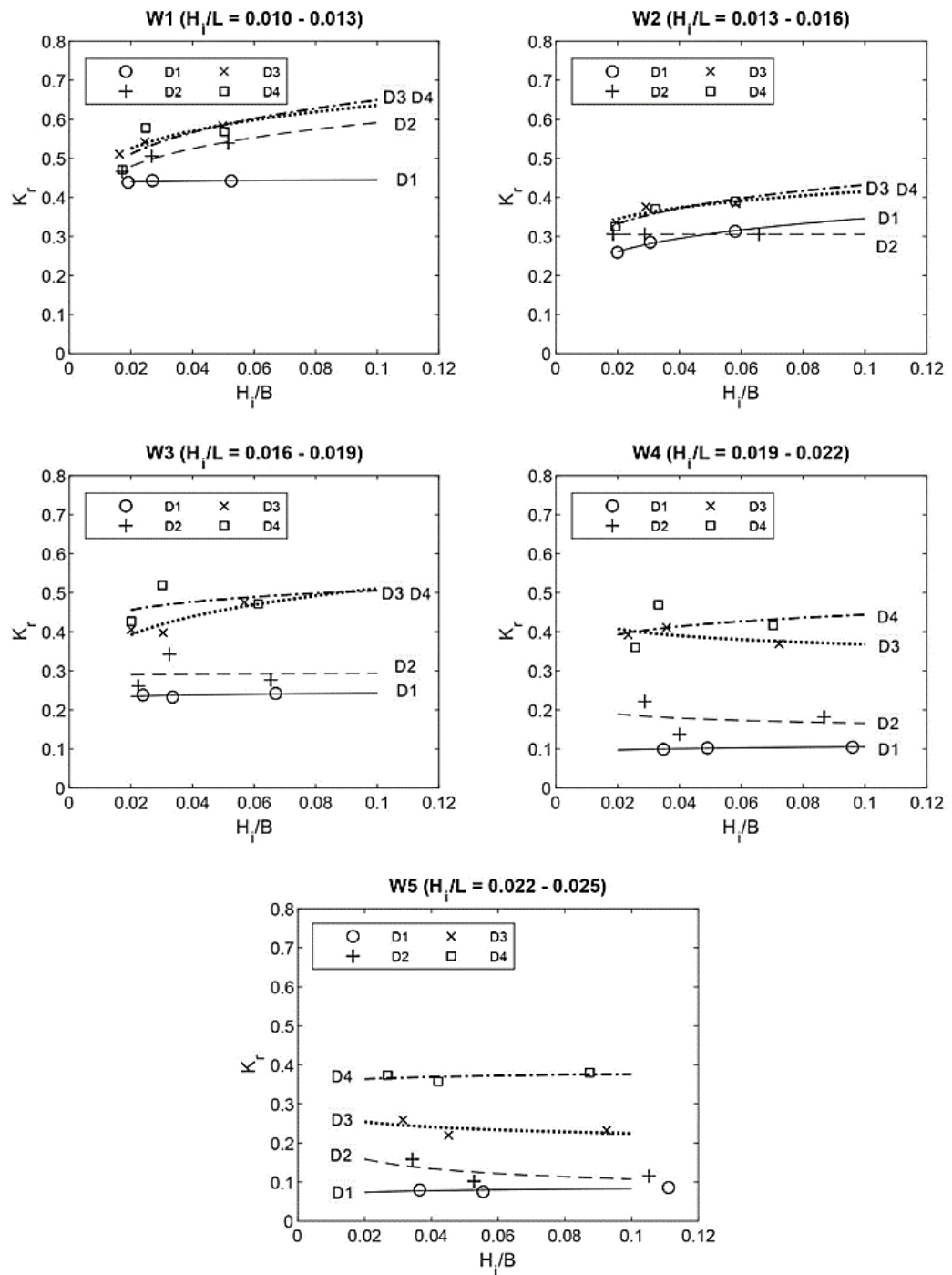
4.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้างสัมพันธ์

การศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของการสะท้อนของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของตัวแปรไร้หน่วยกลุ่มโครงสร้างตัวแรก คือ ระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้างสัมพันธ์ โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างต่อระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง (H/B)

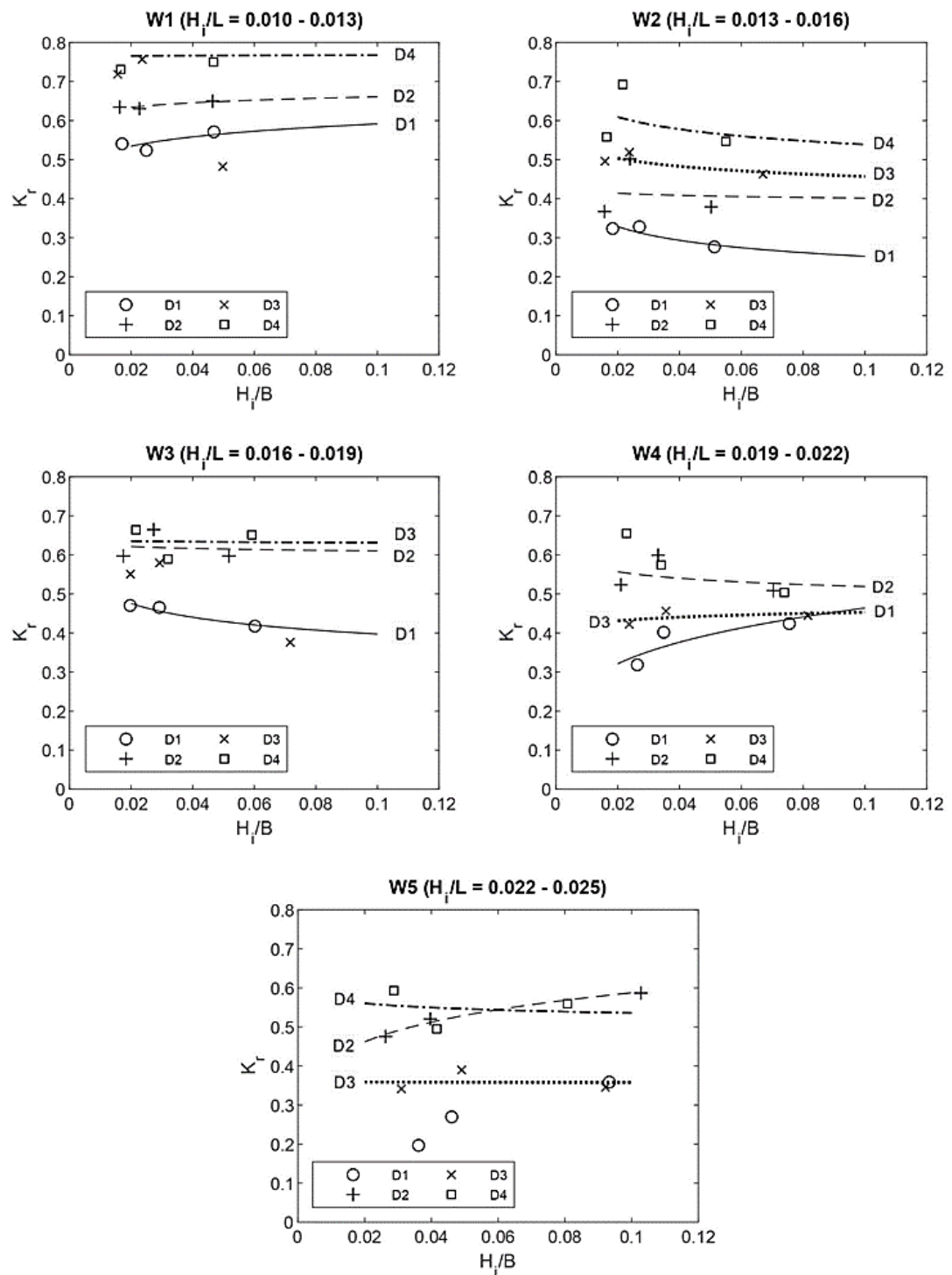
สำหรับการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของการสะท้อนของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของกลุ่มตัวแปรระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้างสัมพันธ์ (H/B) โดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้างในกรณีศึกษาต่าง ๆ 3 ค่าด้วยกัน ได้แก่ 0.5, 1 และ 1.5 เมตร ตามลำดับ โดยพบว่าขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นมีค่าในช่วงต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4-1 และมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมดังแสดงในรูปที่ 4-6 และรูปที่ 4-7

ตารางที่ 4-1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น จำแนกด้วยความชันคลื่น

กรณีศึกษา	ความชันคลื่น	ช่วงสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น (K_r)
คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง	0.010 – 0.013 (W1)	0.44 – 0.58
	0.013 – 0.016 (W2)	0.26 – 0.39
	0.016 – 0.019 (W3)	0.23 – 0.52
	0.019 – 0.022 (W4)	0.10 – 0.57
	0.022 – 0.025 (W5)	0.08 – 0.38
คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง	0.010 – 0.013 (W1)	0.48 – 0.82
	0.013 – 0.016 (W2)	0.28 – 0.69
	0.016 – 0.019 (W3)	0.38 – 0.67
	0.019 – 0.022 (W4)	0.32 – 0.66
	0.022 – 0.025 (W5)	0.20 – 0.59



รูปที่ 4-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับระยะห่างระหว่างเสา
โครงสร้างสัมพัทธ์ (H_i/B) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ 4-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับระยะห่างระหว่างเสา
โครงสร้างสัมพัทธ์ (H_1/B) กรณีคลื่นไม่ล้ำข้ามโครงสร้าง

จากรูปที่ 4-6 และรูปที่ 4-7 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างเสา โครงสร้างสัมพันธ์ (H_r/B) กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นนั้นค่อนข้างคงที่ แสดงให้เห็นว่า ระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้างสัมพันธ์นั้น ไม่ได้ส่งอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของการสะท้อนของคลื่น สาเหตุเนื่องจากเสาของโครงสร้างอยู่ห่างกันมาก ทำให้พฤติกรรมของการสลายพลังงานของคลื่น เชื่อมกันคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มมีน้อยมาก หากต้องการให้ระยะห่างของเสาโครงสร้างมี อิทธิพลต่อพฤติกรรมของการสลายพลังงานคลื่น จะต้องกำหนดให้ระยะห่างน้อยมาก จนมีลักษณะเหมือน เชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็ม ดังการศึกษาของเมธาฤทธิ์ แนนสัย (2552) และวันวิสา มะมา (2553)

อย่างไรก็ตามพบว่าในบางกรณีศึกษาที่คลื่นไม่ล้ำข้ามโครงสร้าง ได้แก่ กรณีความลึกการจม เท่ากับ 0.075 เมตร (D1) สำหรับความชันคลื่นในช่วง 0.022 - 0.025 (W5), กรณีความลึกการจม เท่ากับ 0.225 เมตร (D3) สำหรับความชันคลื่นในช่วง 0.010 - 0.013 (W1) และกรณีความลึกการจม เท่ากับ 0.300 เมตร (D4) สำหรับความชันคลื่นในช่วง 0.016 - 0.019 (W3) และ 0.019 - 0.022 (W4) มีผลลัพธ์ของการกระจายข้อมูลที่แตกต่างจากกรณีอื่น ๆ และมีแนวโน้มที่ไม่สอดคล้องกับ กรณีศึกษาอื่น ๆ จึงไม่แสดงเส้นแนวโน้มของกรณีดังกล่าว เพื่อไม่ให้เกิดความสับสนในการวิเคราะห์ ทั้งนี้ความสัมพันธ์โดยรวมนั้นเป็นแบบคงที่ จึงสรุปว่าระยะห่างระหว่างเสาของโครงสร้างของ ไม่มีผล ต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของคลื่นเนื่องจากเชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน และจะวิเคราะห์ พฤติกรรมของคลื่นกับตัวแปรไร้นิยามกลุ่มต่อไปโดยไม่พิจารณาผลของระยะห่างระหว่างเสาของ โครงสร้าง

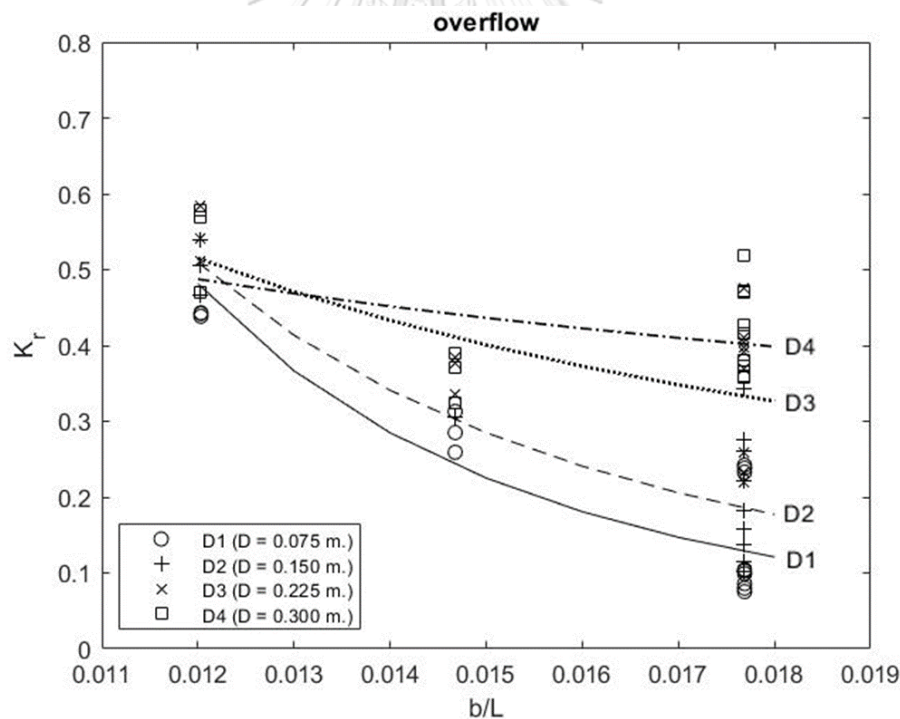
4.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับความหนาโครงสร้างสัมพันธ์

สำหรับการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของการสะท้อนของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของตัวแปรไร้นิยามกลุ่มโครงสร้างตัวต่อมา คือ ความหนาโครงสร้างสัมพันธ์ (relative thickness) โดยเป็น อัตราส่วนระหว่างความหนาของโครงสร้างที่มีค่าคงที่เป็น 0.0375 เมตร ต่อความยาวคลื่นที่เคลื่อนที่ เข้าปะทะโครงสร้าง (b/L) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับค่าความ หนาโครงสร้างสัมพันธ์ (b/L) แสดงในรูปที่ 4-8 สำหรับกรณีที่คลื่นล้ำข้ามโครงสร้าง และรูปที่ 4-9 สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้ำข้ามโครงสร้าง ซึ่งพบความสัมพันธ์ คือ เมื่อความหนาโครงสร้างสัมพันธ์เพิ่ม มากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจะมีค่าลดลง

สาเหตุของความสัมพันธ์ในลักษณะดังกล่าวเนื่องจาก การที่ค่าความหนาโครงสร้างสัมพันธ์ มากนั้น หมายถึง ความหนาของโครงสร้างต่อขนาดความกว้างของตัวลูกคลื่นที่มาก ทั้งนี้ ณ ตำแหน่ง ที่ลูกคลื่นเคลื่อนที่ทับซ้อนกับความหนาของโครงสร้างจะเกิดการสลายพลังงานที่มากเกิดขึ้น ดังนั้นค่า

b/L ที่มากจึงก่อให้เกิดการสลายพลังงานที่มาก และมีพลังงานที่เหลือสะท้อนกลับสู่ด้านหน้าที่น้อย (Dong et al., 2008) นอกจากนั้นค่า b/L ที่มากยังสื่อถึงความยาวคลื่นที่น้อย ซึ่งบ่งบอกถึงความถี่การกระจายของพลังงานคลื่นที่น้อย (Sorensen, 1991) ส่งผลให้หน้าตัดสัมผัสของโครงสร้างกับพลังงานคลื่นลดน้อยลง และเกิดการสะท้อนกลับที่น้อยลงตามไปด้วย ดังแสดงให้เห็นด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่ลดลง เมื่อความหนาโครงสร้างสัมผัสเพิ่มขึ้น

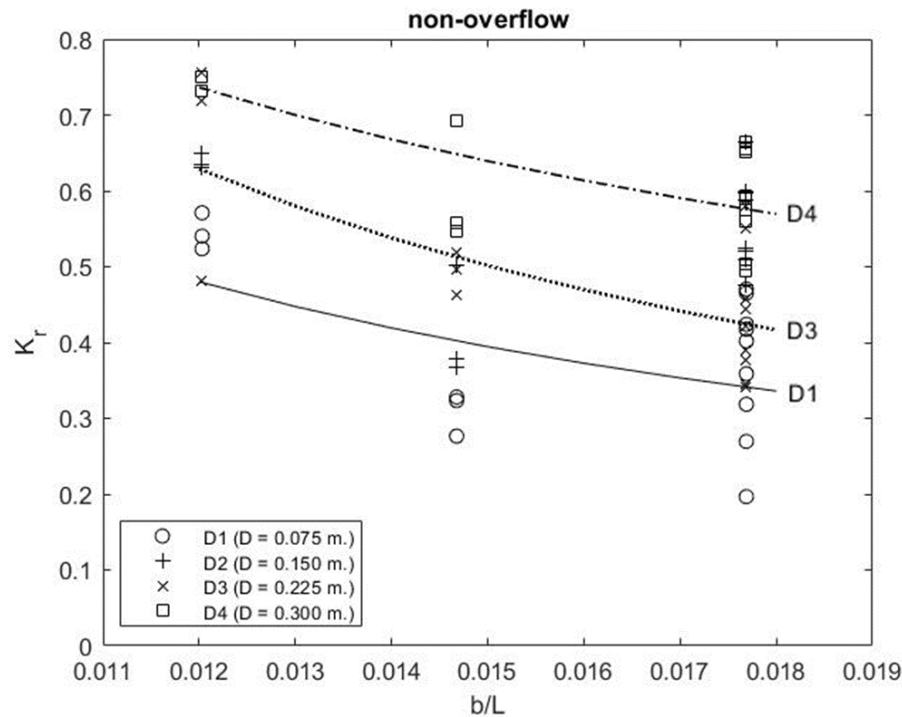
เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมาของ Suh et al. (2007), Mani (2008) และ Ji et al. (2015) ได้กล่าวไว้ว่า พฤติกรรมการสะท้อนและส่งผ่านคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นจะมีการกระจายตัวเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อตัวแปรคุณสมบัติคลื่นหรือลักษณะทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป ประกอบกับการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการสัมพันธ์กับพฤติกรรมคลื่นตามวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ จึงกำหนดให้ความสัมพันธ์ในกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยต่าง ๆ มีการกระจายตัวไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจึงมีสมมติฐานว่าพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นมีความสัมพันธ์กับชุดตัวแปรไร้หน่วยตามการกระจายตัวแบบสมการกำลัง (power distribution) ดังสมการที่ 4-16



รูปที่ 4-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับค่าความหนาโครงสร้างสัมผัส (b/L) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น,
$$K_r = \alpha \left(\frac{b}{L}\right)^\beta \quad (4-16)$$

เมื่อ α และ β คือค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ และค่าเลขยกกำลัง สำหรับค่า α และ β ใช้วิธีการวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่าย (simple regression analysis) สำหรับรายละเอียดและผลการวิเคราะห์สมการความถดถอยของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและความหนาโครงสร้างสัมพันธ์ (b/L) ในแต่ละกรณีศึกษาแสดงในภาคผนวก ฉ-2



รูปที่ 4-9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับค่าความหนาโครงสร้างสัมพันธ์ (b/L) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

ทั้งนี้ยังพบว่า เมื่อพิจารณาตัวแปรความลึกการจมโครงสร้าง (D) ร่วมด้วยแล้ว จะเห็นความสัมพันธ์อย่างชัดเจน โดยที่ค่าความลึกการจมโครงสร้างน้อยจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่น้อยตามไปด้วย และมีแนวโน้มของการเรียงลำดับอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ร่วมกันของทั้งสองกลุ่มตัวแปรต่อพฤติกรรมการณ์การสะท้อนของคลื่น อย่างไรก็ตามในกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง และความลึกการจมโครงสร้างเป็น 0.15 เมตร ($D2$) ได้มีผลลัพธ์ของการกระจายข้อมูลที่แตกต่างจากกรณีอื่น ๆ และมีแนวโน้มที่ไม่สอดคล้องกับกรณีศึกษาอื่น ๆ จึงไม่แสดงเส้นแนวโน้ม $D2$ เพื่อไม่ให้เกิดความสับสนในการวิเคราะห์ อีกทั้งในการวิเคราะห์ตัวแปรไร้หน่วยตัวต่อไป ผู้ศึกษาจะไม่แสดงเส้นแนวโน้ม $D2$ ในกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

4.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์

การศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของการสะท้อนของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของตัวแปรไร้หน่วยกลุ่มโครงสร้างตัวสุดท้าย คือ ความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (relative submerged depth) โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างความลึกการจมโครงสร้างต่อความลึกน้ำ (D/d) ทั้งนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกการจมโครงสร้างสำหรับคุณสมบัติคลื่นในกรณีศึกษาต่าง ๆ 4 ความลึก ด้วยกัน ได้แก่ 0.075, 0.150, 0.225 และ 0.300 เมตร ตามลำดับ และกำหนดให้ความลึกน้ำเป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.45 เมตร จากข้อมูลสามารถสร้างเส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 4-10 สำหรับกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และรูปที่ 4-11 สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง ซึ่งพบความสัมพันธ์ คือ เมื่อความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

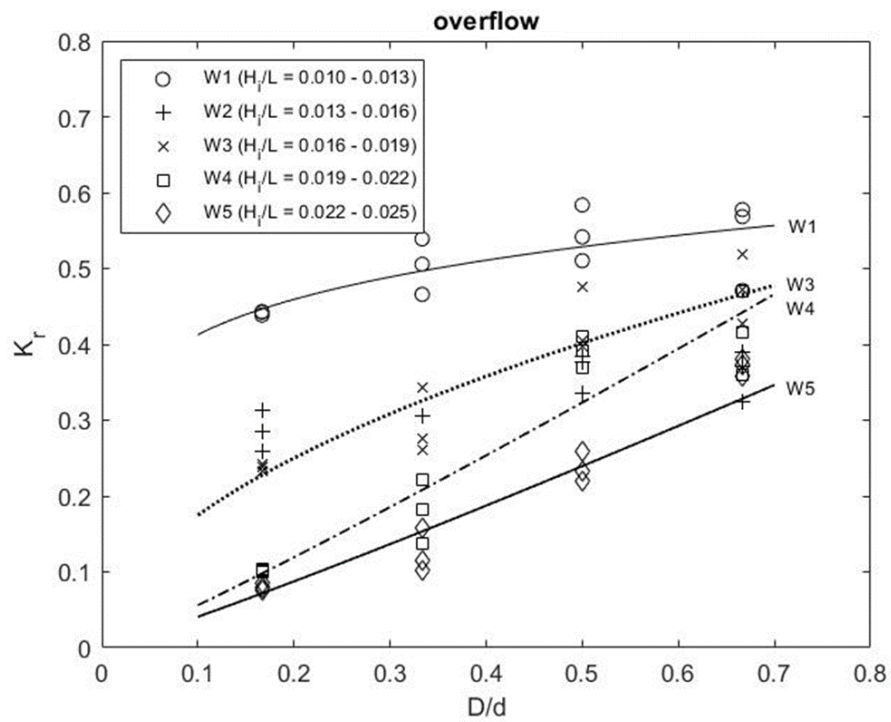
สาเหตุของความสัมพันธ์ในลักษณะดังกล่าวเนื่องจาก ค่าความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์สามารถอธิบายได้ถึงความทึบของหน้าตัดหนึ่ง ๆ หาก D/d มีค่ามากหรือมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงถึงความทึบของหน้าตัดที่มาก ซึ่งก่อให้เกิดผิวสัมผัสของพลังงานคลื่นกับโครงสร้างที่มาก นำไปสู่พฤติกรรมของการสะท้อนที่มากขึ้นตามไปด้วย (Alizadeh et al., 2014) ดังเห็นได้จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อค่าความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้น

ทั้งนี้จากข้อมูลพฤติกรรมของการสะท้อนของคลื่นจะพบว่า ขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นนั้นจะมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้กราฟในรูปที่ 4-10 และรูปที่ 4-11 นั้นมีลักษณะของการลู่อู่เข้าสู่ค่าคงที่ที่ชัดเจน และสามารถกำหนดให้อยู่ในรูปของสมการที่ 4-17

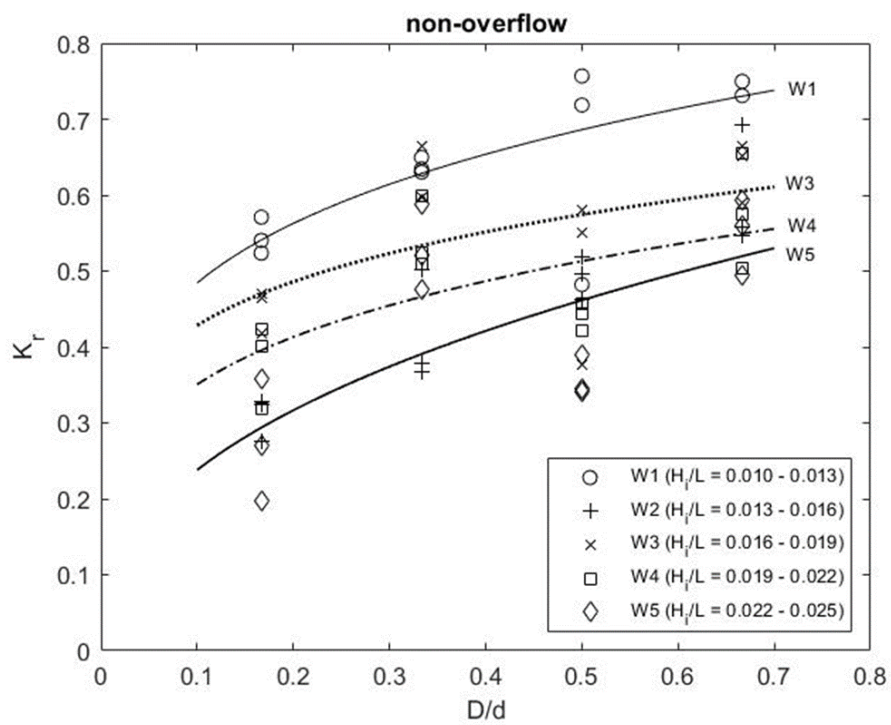
$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น, } K_r = \alpha \left(\frac{D}{d} \right)^\beta \quad (4-17)$$

สำหรับรายละเอียดและผลการวิเคราะห์ของสมการความถดถอยของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นและความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) แสดงในภาคผนวก ฉ-2

ทั้งนี้ยังพบว่า เมื่อพิจารณาตัวแปรคุณสมบัติคลื่น (W) รวมด้วยแล้ว จะเห็นความสัมพันธ์อย่างชัดเจน โดยที่ค่าความชันคลื่นน้อยจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่มาก และมีแนวโน้มของการเรียงลำดับอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของทั้งสองกลุ่มตัวแปรต่อพฤติกรรมของการสะท้อนของคลื่น อย่างไรก็ตามทั้งในกรณีที่คลื่นล้นและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง กรณีที่ความชันคลื่นอยู่ระหว่าง 0.013 – 0.016 (W_2) ได้ให้ผลลัพธ์ของการกระจายข้อมูลที่แตกต่าง และมีแนวโน้มที่ไม่สอดคล้องกับกรณีศึกษาอื่น ๆ จึงไม่แสดงเส้นแนวโน้ม W_2 เพื่อไม่ให้เกิดความสับสนในการวิเคราะห์



รูปที่ 4-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับความลึกโครงสร้างสัมพันธ์ (D/d) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ 4-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับความลึกโครงสร้างสัมพันธ์ (D/d) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

4.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับความลึกสัมพัทธ์

การศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของการสะท้อนของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของตัวแปรไร้หน่วยกลุ่มคุณสมบัติคลื่นตัวแรก คือ ความลึกสัมพัทธ์ (relative depth) โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างความลึกน้ำซึ่งกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.45 เมตร ต่อความยาวคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง (d/L) (U.S. CERC., 1984) จากข้อมูลสามารถสร้างเส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 4-12 สำหรับกรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และรูปที่ 4-13 สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง ซึ่งพบความสัมพันธ์ คือ เมื่อความลึกสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจะมีค่าลดน้อยลง

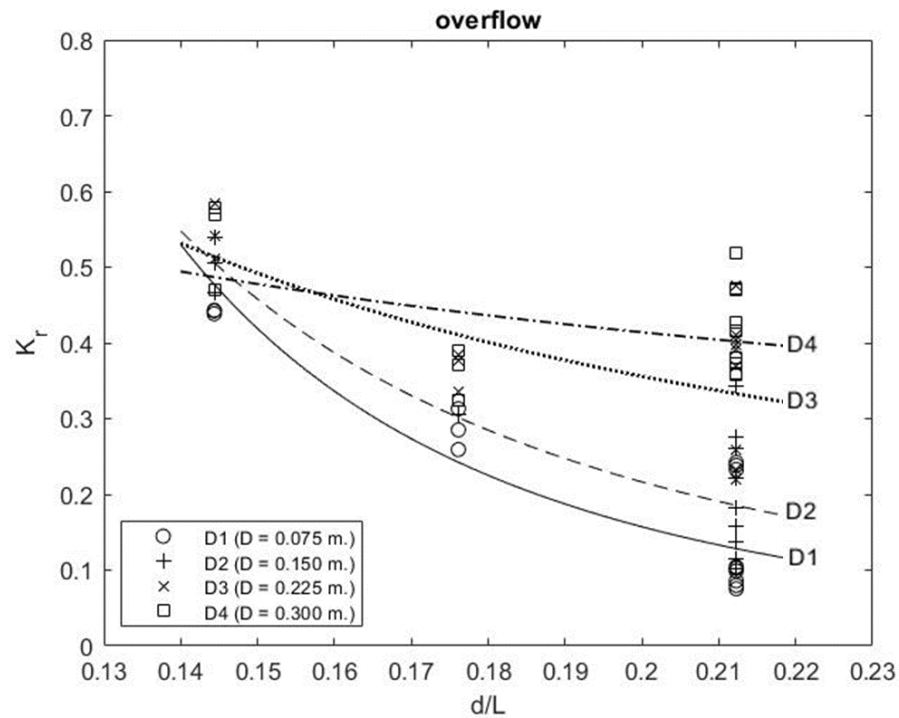
สาเหตุของความสัมพันธ์ในลักษณะดังกล่าวเนื่องจาก ค่าความลึกสัมพัทธ์สามารถอธิบายถึงการกระจายความลึกของพลังงานคลื่นในหน้าตัดนั้น ๆ การที่ d/L มีค่ามาก แสดงถึงความยาวคลื่นที่น้อย อันนำไปสู่ความลึกการกระจายพลังงานคลื่นที่น้อย (U.S. CERC., 1984) ส่งผลให้หน้าตัดสัมผัสของโครงสร้างกับพลังงานคลื่นลดน้อยลง และเกิดการสะท้อนกลับที่น้อยลงตามไปด้วย ดังแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ลดลง เมื่อค่าความลึกสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้น

ทั้งนี้จากข้อมูลพฤติกรรมของการสะท้อนของคลื่นจะพบว่า ขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นนั้นจะมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อความลึกสัมพัทธ์ (d/L) มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้กราฟในรูปที่ 4-12 และรูปที่ 4-13 นั้นมีลักษณะของการลู่เข้าสู่ค่าคงที่ที่ชัดเจน และสามารถกำหนดให้อยู่ในรูปของสมการที่ 4-18

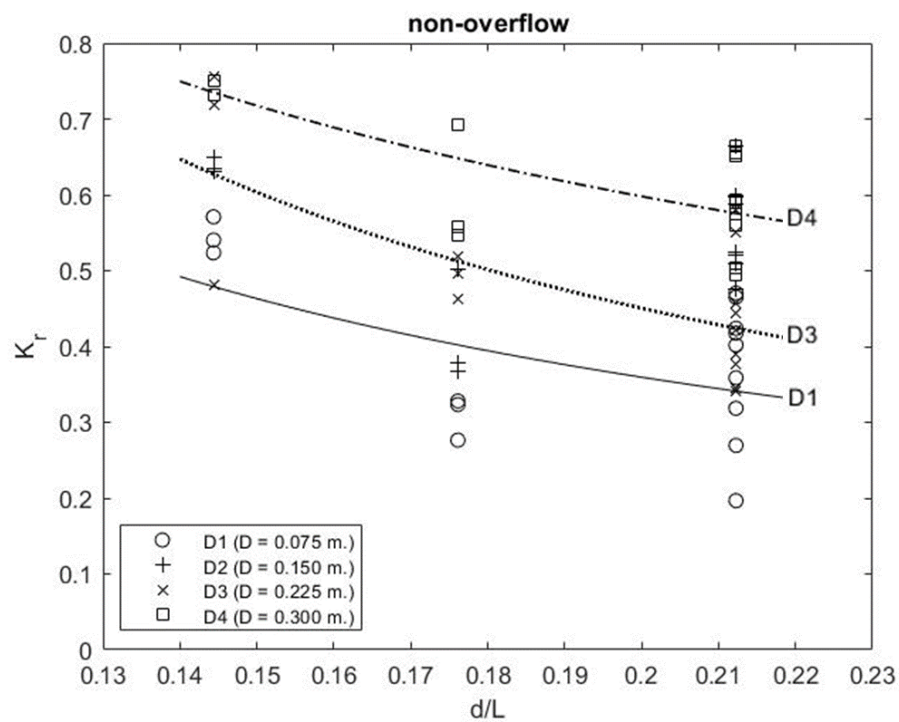
$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น, } K_r = \alpha \left(\frac{d}{L} \right)^\beta \quad (4-18)$$

สำหรับรายละเอียดและผลการวิเคราะห์ของสมการความถดถอยของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นและความลึกสัมพัทธ์ (d/L) แสดงในภาคผนวก ฉ-2

ทั้งนี้ยังพบว่า เมื่อพิจารณาตัวแปรความลึกการจมโครงสร้าง (D) ร่วมด้วยแล้ว จะเห็นความสัมพันธ์อย่างชัดเจน โดยที่ค่าความลึกการจมโครงสร้างน้อยจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่น้อยตามไปด้วย และมีแนวโน้มของการเรียงลำดับอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของทั้งสองกลุ่มตัวแปรต่อพฤติกรรมของการสะท้อนของคลื่น สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง และความลึกการจมโครงสร้างเป็น 0.15 เมตร (D2) พบผลลัพธ์ของการกระจายข้อมูลที่แตกต่าง และมีแนวโน้มที่ไม่สอดคล้องกับกรณีศึกษาอื่น ๆ ดังนั้นจึงไม่แสดงเส้นแนวโน้ม D2 เพื่อไม่ให้เกิดความสับสนในการวิเคราะห์



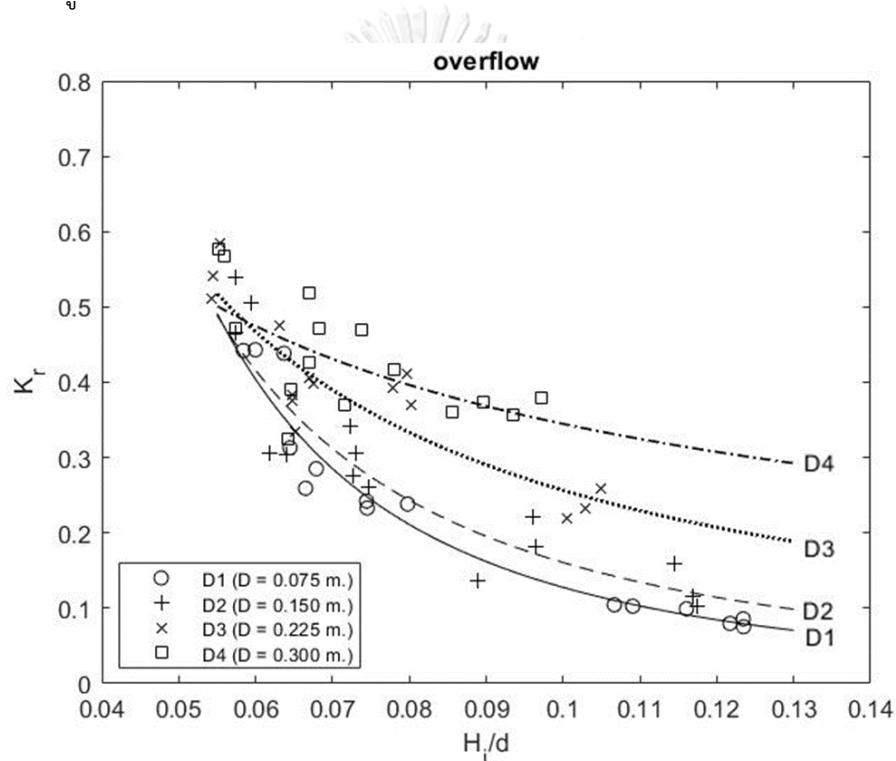
รูปที่ 4-12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับค่าความลึกสัมพัทธ์ (d/L) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ 4-13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับค่าความลึกสัมพัทธ์ (d/L) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

4.5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับความสูงคลื่นสัมพัทธ์

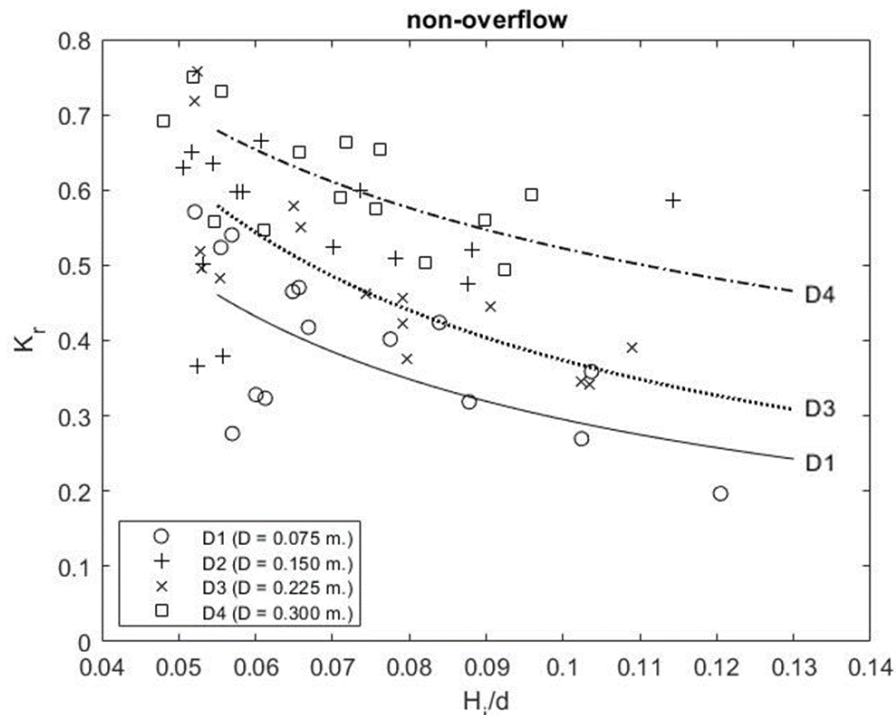
สำหรับการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของการสะท้อนของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของตัวแปรไร้มิติกลุ่มคุณสมบัติคลื่นตัวต่อมา คือ ความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (relative wave height) โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างต่อความลึกน้ำ (H_i/d) โดยการศึกษาที่กำหนดให้ความลึกน้ำมีค่าคงที่เท่ากับ 0.45 เมตร จากข้อมูลสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับค่าความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (H_i/d) ดังแสดงในรูปที่ 4-14 สำหรับกรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และรูปที่ 4-15 สำหรับกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง ซึ่งพบความสัมพันธ์คือ เมื่อความสูงคลื่นสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจะมีค่าน้อยลง



รูปที่ 4-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับค่าความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (H_i/d) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

สาเหตุของความสัมพันธ์ในลักษณะดังกล่าวเนื่องจาก ความสูงคลื่นสัมพัทธ์สามารถอธิบายได้ถึงตำแหน่งบริเวณที่เกิดคลื่น ณ หน้าตัดความลึกนั้น ๆ การที่ H_i/d มีค่ามาก หมายถึงการเกิดคลื่นบริเวณผิวน้ำที่มีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับหน้าตัดความลึกน้ำ ซึ่งคลื่นที่มีความสูงมากนี้จะสามารถลอดผ่านช่องว่างระหว่างโครงสร้าง (ช่องว่างระหว่างรอยต่อของแผ่นโครงสร้าง) และเกิดการสลายพลังงานภายในโครงสร้างได้ดีกว่า (Biesheuvel, 2013) ส่งผลให้พลังงานที่เหลือสะท้อนกลับมา

ด้านหน้ามีปริมาณน้อย ดังแสดงให้เห็นด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่น้อยลง เมื่อความสูงคลื่นสัมพัทธ์มากขึ้น



รูปที่ 4-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับค่าความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (H_i/d) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

จากข้อมูลพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นจะพบว่า ขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นนั้นจะมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (H_i/d) มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้กราฟในรูปที่ 4-14 และรูปที่ 4-15 นั้นมีลักษณะของการเข้าสู่ค่าคงที่ที่ชัดเจน และสามารถกำหนดให้อยู่ในรูปของสมการที่ 4-19

$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น, } K_r = \alpha \left(\frac{H_i}{d} \right)^\beta \quad (4-19)$$

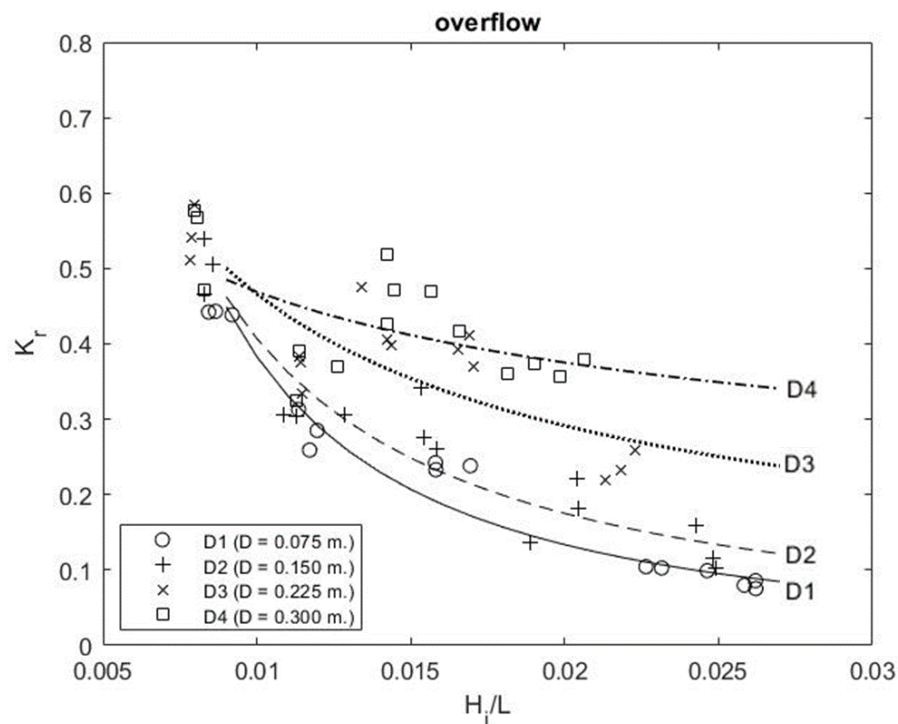
สำหรับรายละเอียดและผลการวิเคราะห์ของสมการความถดถอยของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นและความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (H_i/d) แสดงในภาคผนวก ฉ-2

ทั้งนี้ยังพบว่า เมื่อพิจารณาตัวแปรความลึกการจมโครงสร้าง (D) ร่วมด้วยแล้ว จะเห็นความสัมพันธ์อย่างชัดเจน โดยที่ค่าความลึกการจมโครงสร้างน้อยจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่น้อยตามไปด้วย และมีแนวโน้มของการเรียงลำดับอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์

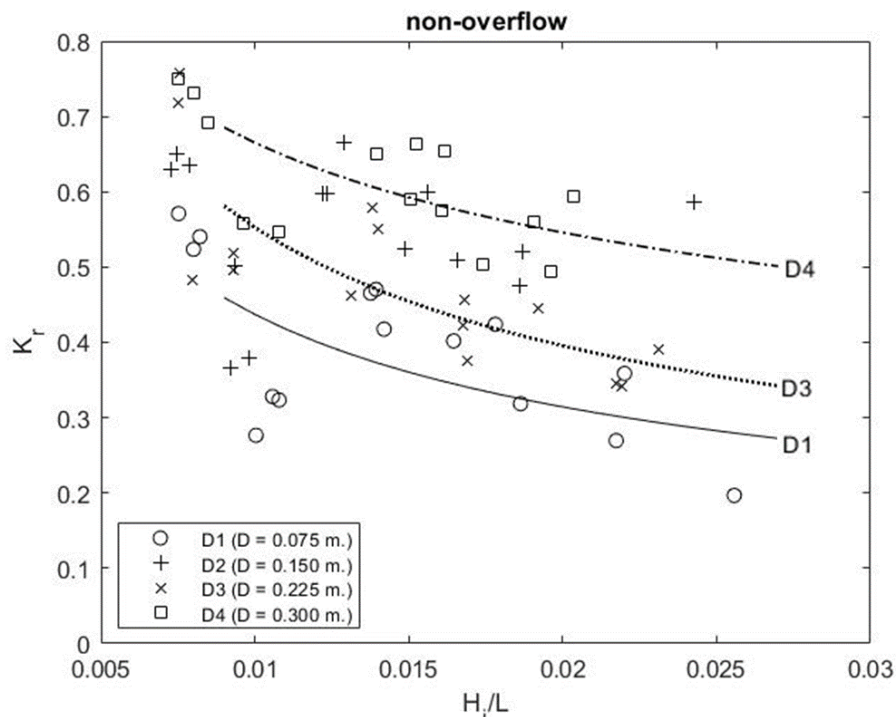
ของทั้งสองกลุ่มตัวแปรต่อพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่น สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง และ ความลึกการจมโครงสร้างเป็น 0.15 เมตร (D2) พบผลลัพธ์ของการกระจายข้อมูลที่แตกต่าง และมี แนวโน้มที่ไม่สอดคล้องกับกรณีศึกษาอื่น ๆ ดังนั้นจึงไม่แสดงเส้นแนวโน้ม D2 เพื่อไม่ให้เกิดความ สับสนในการวิเคราะห์

4.5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับความชันคลื่น

สำหรับการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของตัว แปรไร้หน่วยกลุ่มคุณสมบัติคลื่นตัวสุดท้าย คือ ความชันคลื่น (wave steepness) โดยเป็นอัตราส่วน ระหว่างความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างต่อความยาวคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง (H_i/L) โดยในการศึกษานี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความชันคลื่น 5 ค่าด้วยกัน โดยอยู่ในช่วงระหว่าง 0.010-0.013, 0.013-0.016, 0.016-0.019, 0.019-0.022 และ 0.022-0.025 ตามลำดับ จากข้อมูล สามารถสร้างเส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 4-16 สำหรับกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และรูปที่ 4-17 สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง ซึ่งพบความสัมพันธ์ คือ เมื่อความชันคลื่นเพิ่ม มากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจะมีค่าน้อยลง



รูปที่ 4-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับความชันคลื่น (H_i/L) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ 4-17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับความชันคลื่น (H/L) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

สาเหตุของความสัมพันธ์ในลักษณะดังกล่าวเนื่องจาก การที่คลื่นมีความชันคลื่นมากนั้น แสดงถึงการที่คลื่นมีความสูงมากและความยาวน้อย ซึ่งเอื้อต่อการแตกตัวอันนำไปสู่การสลายพลังงาน โดยโครงสร้าง (Sawaragi, 1995) ดังนั้นคลื่นที่มีความชันมากเมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างแล้ว จึงอาจเกิดการสลายพลังงานได้ง่ายและมากกว่าคลื่นที่มีความชันน้อย ส่งผลให้พลังงานที่เหลือและสะท้อนกลับมาในรูปของความสูงคลื่นสะท้อนจึงมีน้อยลงตามไปด้วย หรืออาจมีอิทธิพลเพิ่มเติมเนื่องจากหน้าตัดที่พลังงานคลื่นกระทบกับโครงสร้าง โดยคลื่นที่มีความชันคลื่นมากนั้น เป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นน้อย และมีระยะความลึกของการกระจายพลังงานคลื่นตื้นกว่าคลื่นที่มีความยาวคลื่นมาก หรือกล่าวอีกนัยว่า คลื่นยังมีความยาวคลื่นมาก พลังงานคลื่นยังกระจายลงไปได้ลึกมากขึ้นตามไปด้วยตามหลักทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย (U.S. CERC., 1984) ดังนั้นการที่ความชันคลื่นเพิ่มขึ้นนั้น หมายถึงความยาวคลื่นที่ลดลงเมื่อเทียบกับความสูงคลื่น ส่งผลให้พลังงานคลื่นกระจายลงไปได้ในความลึกไม่มาก ทำให้หน้าตัดสัมผัสของพลังงานคลื่นและโครงสร้างมีน้อยลง ส่งผลให้การสะท้อนของคลื่นลดน้อยลงตามไปด้วย ดังแสดงให้เห็นด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่ลดลง เมื่อความชันคลื่นเพิ่มมากขึ้น

จากข้อมูลพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นจะพบว่า ขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นนั้นจะมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าที่ค่าหนึ่ง เมื่อความชันคลื่น (H_i/L) มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้กราฟในรูปที่ 4-16 และรูปที่ 4-17 นั้นมีลักษณะของการเข้าสู่ค่าคงที่ที่ชัดเจน และสามารถกำหนดให้อยู่ในรูปของสมการที่ 4-20

$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น, } K_r = \alpha \left(\frac{H_i}{L} \right)^\beta \quad (4-20)$$

สำหรับรายละเอียดและผลการวิเคราะห์ของสมการความถดถอยของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นและความชันคลื่น (H_i/L) แสดงในภาคผนวก ฉ-2

ทั้งนี้ยังพบว่า เมื่อพิจารณาตัวแปรความลึกการจมโครงสร้าง (D) ร่วมด้วยแล้ว จะเห็นความสัมพันธ์อย่างชัดเจน โดยที่ค่าความลึกการจมโครงสร้างน้อยจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่น้อยตามไปด้วย และมีแนวโน้มของการเรียงลำดับอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ร่วมกันของทั้งสองกลุ่มตัวแปรต่อพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่น สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้ำข้ามโครงสร้าง และความลึกการจมโครงสร้างเป็น 0.15 เมตร (D_2) พบผลลัพธ์ของการกระจายข้อมูลที่แตกต่าง และมีแนวโน้มที่ไม่สอดคล้องกับกรณีศึกษาอื่น ๆ ดังนั้นจึงไม่แสดงเส้นแนวโน้ม D_2 เพื่อไม่ให้เกิดความสับสนในการวิเคราะห์

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นและความชันคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนที่วิเคราะห์ได้ มีลักษณะการแปรผันที่ตรงข้ามกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเนื่องจากเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม แต่สำหรับหุ่นลอยกันคลื่นบางรูปแบบพบว่า แนวโน้มของการสะท้อนมีความสัมพันธ์กับตัวแปรคาบคลื่นด้วย โดยมีทั้งการลดลงและเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ในช่วงคาบคลื่นที่แตกต่างกัน (Cox and Beach, 2006) แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนนี้ มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับหุ่นลอยกันคลื่นบางชนิด และในช่วงของคาบคลื่น ซึ่งเป็นประเด็นที่ควรศึกษาต่อไปในอนาคต

4.6 การวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับตัวแปรไร้หน่วย

จากผลการศึกษาที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 4.5 ซึ่งกล่าวถึงความสัมพันธ์แบบเอกภาพระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยแต่ละตัวกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน โดยแสดงออกมาในรูปของเส้นแนวโน้มและสมการกำลังที่ได้จากการวิเคราะห์ความถดถอย อย่างไรก็ตามสมการความสัมพันธ์ที่ได้เป็นผลลัพธ์จากหัวข้อ 4.5 เป็นเพียง

ความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยตัวใดตัวหนึ่งเท่านั้น อันประกอบด้วยกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง คือ ความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์ (b/L) และความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) และกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยที่มีเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติคลื่น คือ ความลึกสัมพัทธ์ (d/L), ความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (H_f/d), และความชันคลื่น (H_f/L) ทั้งนี้ได้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยร่วมกันระหว่างกลุ่มตัวแปรโครงสร้างและกลุ่มตัวแปรคุณสมบัติคลื่น กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น ซึ่งอาจสามารถสรุปในรูปสมการความสัมพันธ์ได้

จากสมมติฐานที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 4.5 ว่าพฤติกรรมการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเงื่อนไขคลื่นจะมีการกระจายตัวเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อตัวแปรคุณสมบัติคลื่นและลักษณะทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป ดังการศึกษาที่ผ่านมาของ Hayashi et al. (1966), Suh et al. (2007), Mani (2008), Alizadeh et al. (2014) และ Ji et al. (2015) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้กำหนดให้ความสัมพันธ์ของตัวแปรกลุ่มต่าง ๆ มีการกระจายอยู่ในรูปของสมการกำลัง (power distribution) และทำการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ร่วมกับตัวแปรไร้หน่วยต่าง ๆ กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นรวม ทั้งในกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้างและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงซ้อน (multiple regression analysis) และได้ผลของสมการความสัมพันธ์ในรูปของสมการที่ 4-21

$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น, } K_r = \alpha \left(\frac{b}{L}\right)^{\beta_1} \left(\frac{D}{d}\right)^{\beta_2} \left(\frac{d}{L}\right)^{\beta_3} \left(\frac{H_f}{d}\right)^{\beta_4} \left(\frac{H_f}{L}\right)^{\beta_5} \quad (4-21)$$

โดยที่ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของสมการ

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ และ β_5 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ชี้กำลังในแต่ละกลุ่มตัวแปร

จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เพื่อทดสอบความแตกต่างของข้อมูลที่ได้รับปัจจัยที่แตกต่างกัน โดยเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว หรือ 1-Way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เพื่อทดสอบว่ากลุ่มตัวแปรที่ศึกษาตัวใดตัวหนึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นหรือไม่ โดยในขั้นต้นจะต้องพิจารณาถึงอิทธิพลของตัวแปรที่ศึกษาต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น ผ่านการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วน (coefficient of partial correlation) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับตัวแปรศึกษาตัวใดตัวหนึ่งโดยกำหนดให้ตัวแปรอื่น ๆ มีค่าคงที่ เพื่อพิจารณาเฉพาะกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยที่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่น (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2561) สำหรับการวิเคราะห์ความถดถอยและการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ดังกล่าวนี้จะดำเนินการด้วยโปรแกรม SPSS โดยมีแนวคิดของการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่าง ๆ แสดงในภาคผนวก ข-2 และผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

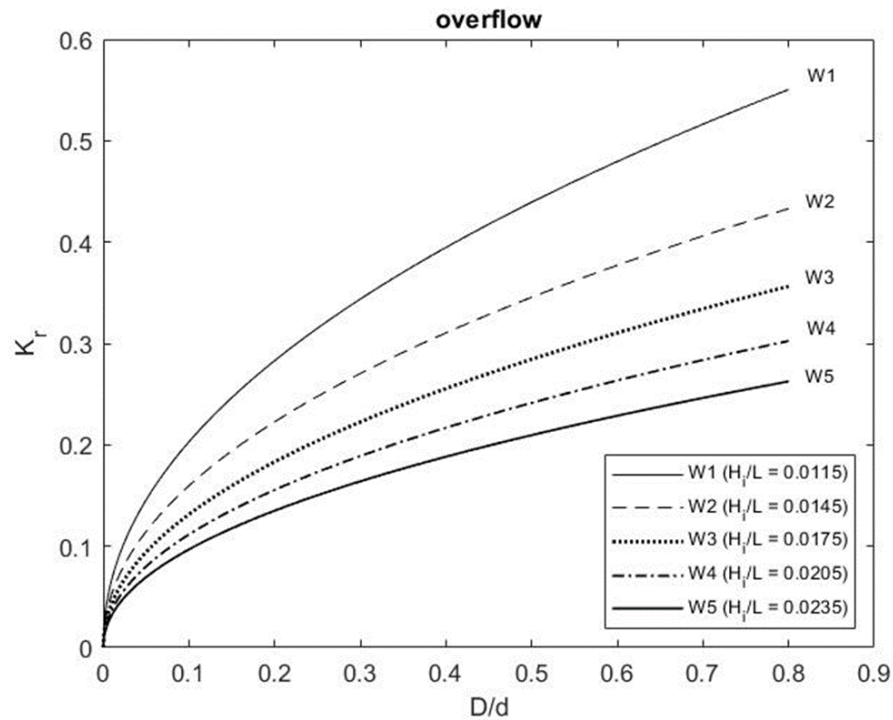
4.6.1 สมการความสัมพันธ์ในกรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

สำหรับการพิจารณาเพื่อวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยต่าง ๆ สำหรับกรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้างนั้น จะทำการทดสอบว่าตัวแปรที่ศึกษาตัวใดตัวหนึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นหรือไม่ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว หรือ 1-Way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้ค่าแสดงนัยสำคัญของการตรวจสอบสมมติฐาน (α) เท่ากับ 0.05

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ในหัวข้อ 4.5 สามารถสรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นในกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง มีความสัมพันธ์กับตัวแปรไร้หน่วย ความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) และความชันคลื่น (H_i/L) โดยเห็นได้จากแนวโน้มของข้อมูลที่กระจายตัวแบบสมการกำลังและมีการเรียงลำดับของเส้นกราฟอย่างชัดเจน ประกอบกับสมการความสัมพันธ์ที่วิเคราะห์ได้จากเส้นแนวโน้มของแต่ละตัวแปรกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น ได้ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจโดยรวมที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยอื่น ๆ อย่างไรก็ตามกรณีศึกษาที่มีความชันคลื่นอยู่ในช่วง 0.013 – 0.016 ($W2$) นั้น ไม่มีความสัมพันธ์อย่างชัดเจนกับพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นในกรณีดังกล่าว ดังนั้นผู้ศึกษาจึงไม่นำเข้าข้อมูลที่เก็บได้จากกรณีศึกษา $W2$ สู่กระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนให้ผลลัพธ์ของสมการความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 4-22 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 0.82 สำหรับรายละเอียดในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงเพิ่มเติมในภาคผนวก ข-2

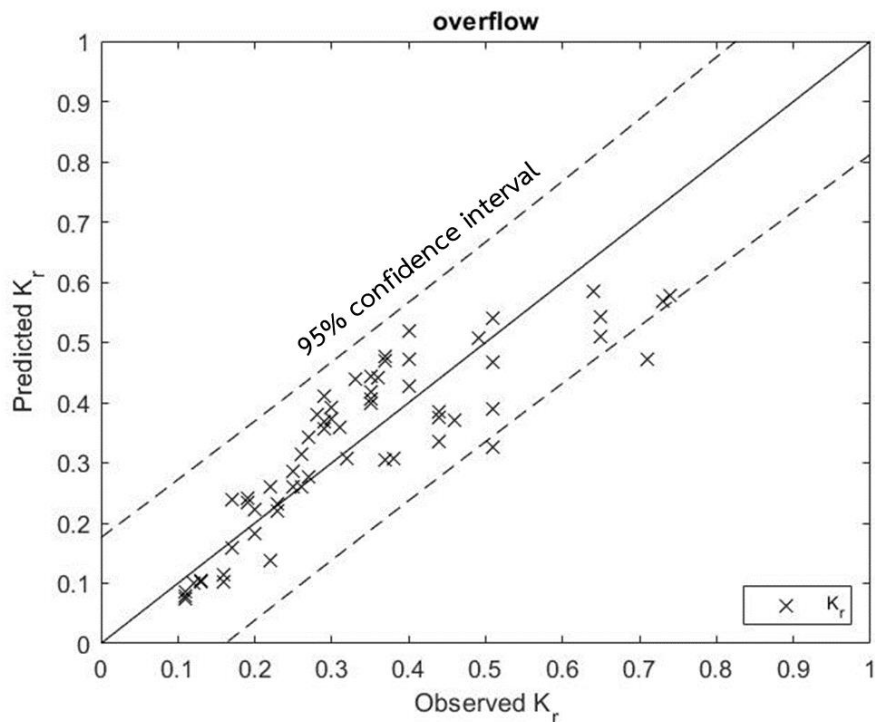
$$K_r = 0.006 \left(\frac{H_i}{L} \right)^{-1.036} \left(\frac{D}{d} \right)^{0.480} \quad (4-22)$$

สมการที่ 4-22 เป็นสมการที่วิเคราะห์จากช่วงข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองที่มีเงื่อนไขจำกัด ส่งผลให้สามารถบรรยายค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นตามลักษณะทางกายภาพได้เฉพาะในช่วงที่คลื่นมีความชันคลื่น (H_i/L) มากกว่า 0.01 และค่าความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) น้อยกว่า 0.80 เท่านั้น โดยสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4-18



รูปที่ 4-18 กราฟบรรยายสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น
กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

เมื่อวิเคราะห์สมการได้แล้ว จึงนำสมการที่ได้มาทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจากกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยในแต่ละกรณีศึกษา และนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่วัดได้จากการทดลองในแต่ละกรณีศึกษา พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์มีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากชุดข้อมูลที่วัดจริงจากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4-19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่คำนวณจากสมการความสัมพันธ์และที่วิเคราะห์ได้จากข้อมูลที่เก็บจริงมีความสอดคล้องกับเส้น 45 องศา และกระจายตัวภายในเส้นระดับความเชื่อมั่น (confidence interval) ที่ 95% แสดงให้เห็นว่ากลุ่มตัวแปรไร้หน่วยความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) และความชันคลื่น (H/L) มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น และมีความน่าเชื่อถือที่จะใช้สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น สำหรับกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ 4-19 กราฟการกระจายของข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น
กรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

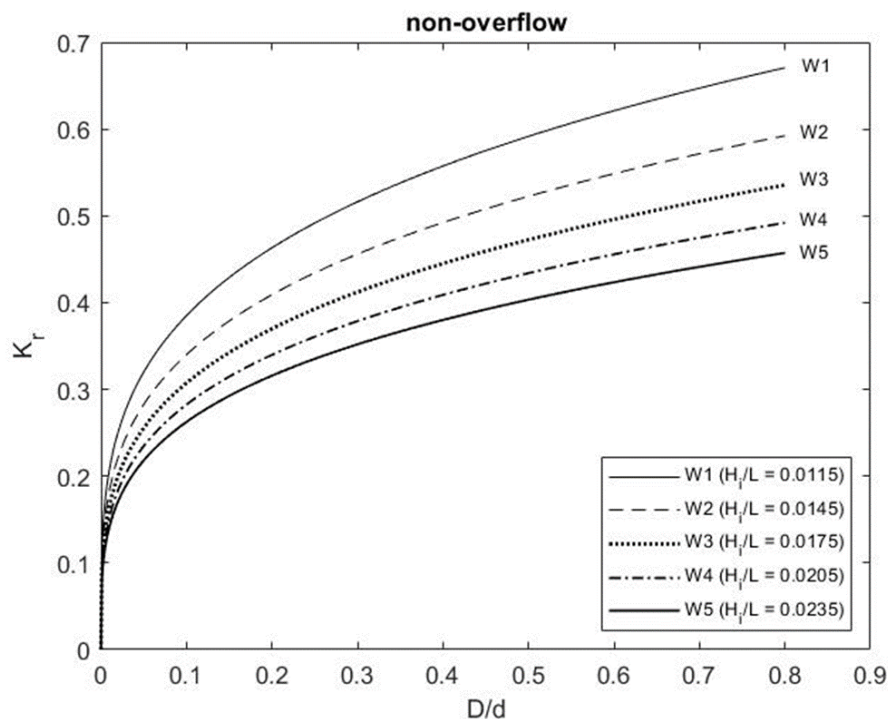
4.6.2 สมการความสัมพันธ์ในกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

สำหรับกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้างนั้น จะต้องทำการทดสอบว่าตัวแปรที่ศึกษาตัวใดตัวหนึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นหรือไม่เช่นกัน จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ในหัวข้อ 4.5 สามารถสรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นในกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง มีความสัมพันธ์กับตัวแปรไร้หน่วยความลึกโครงสร้างสัมพันธ์ (D/d) และความชันคลื่น (H/L) เช่นเดียวกัน โดยเห็นได้จากแนวโน้มของข้อมูลที่กระจายตัวแบบสมการกำลังและมีการเรียงลำดับของเส้นกราฟอย่างชัดเจน ประกอบกับสมการความสัมพันธ์ที่วิเคราะห์ได้จากเส้นแนวโน้มของแต่ละตัวแปรกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น ได้ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจโดยรวมที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยอื่น ๆ อย่างไรก็ตามกรณีศึกษาที่มีความชันคลื่นอยู่ในช่วง 0.013 – 0.016 ($W2$) และกรณีที่ความลึกการจมโครงสร้างเป็น 0.15 เมตร ($D2$) นั้น ไม่มีความสัมพันธ์อย่างชัดเจนกับพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นในกรณีดังกล่าว ดังนั้นผู้ศึกษาจึงไม่นำเข้าข้อมูลที่เก็บได้จากกรณีศึกษา $W2$ และ $D2$ สู่กระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนให้ผลลัพธ์ของสมการความสัมพันธ์ดังแสดงใน

สมการที่ 4-23 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 0.74 สำหรับรายละเอียดในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงเพิ่มเติมในภาคผนวก ข-2

$$K_r = 0.065 \left(\frac{H_i}{L} \right)^{-0.536} \left(\frac{D}{d} \right)^{0.267} \quad (4-23)$$

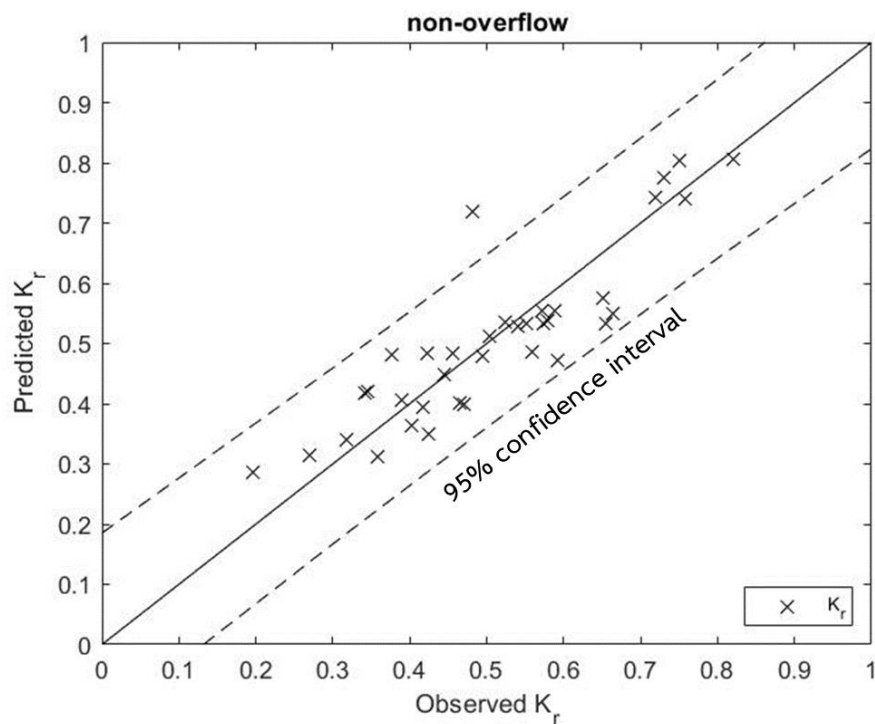
สมการที่ 4-23 เป็นสมการที่วิเคราะห์จากช่วงข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองที่มีเงื่อนไขจำกัด ส่งผลให้สามารถบรรยายค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นตามลักษณะทางกายภาพได้เฉพาะในช่วงที่คลื่นมีความชันคลื่น (H_i/L) มากกว่า 0.01 และค่าความลึกโครงสร้างสัมพันธ์ (D/d) น้อยกว่า 0.80 เท่านั้น โดยสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4-20



รูปที่ 4-20 กราฟบรรยายสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

เมื่อวิเคราะห์สมการได้แล้ว จึงนำสมการที่ได้มาทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจากกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยในแต่ละกรณีศึกษา และนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่วัดได้จากการทดลองในแต่ละกรณีศึกษา พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์มีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากชุดข้อมูลที่วัดจริงจากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่คำนวณจาก

สมการความสัมพันธ์และที่วิเคราะห์ได้จากข้อมูลที่เก็บจริงมีความสอดคล้องกับเส้น 45 องศา และกระจายตัวภายในเส้นระดับความเชื่อมั่น (confidence interval) ที่ 95% แสดงให้เห็นว่ากลุ่มตัวแปรไร้หน่วยความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) และความชันคลื่น (H_i/L) มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น และมีความน่าเชื่อถือที่จะใช้สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ 4-21 กราฟการกระจายของข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น
กรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

จากสมการทั้ง 2 กรณีพบว่า กลุ่มตัวแปรไร้หน่วยที่มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นทั้งกรณีคลื่นล้นและไม่ล้นข้ามโครงสร้างคือ ความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) และความชันคลื่น (H_i/L) แสดงให้เห็นได้ว่าคุณสมบัติของคลื่นที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นจากเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน คือความสูงคลื่นและความยาวคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง และลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างที่มีอิทธิพลสูงสุดคือความลึกการจมโครงสร้าง ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.5 ดังนั้นสมการทั้งสองนี้จึงมีความน่าเชื่อถือในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น เนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน

บทที่ 5

พฤติกรรมการส่งผ่านคลื่น

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นเนื่องจากเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน (partial breakwater) เป็นหลัก โดยจะวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ทั้งตัวแปรคุณสมบัติคลื่น (wave characteristic) และลักษณะทางกายภาพของโครงสร้าง ที่มีผลต่อพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่น สำหรับกระบวนการวิเคราะห์ที่ใช้รูปแบบเดียวกับการวิเคราะห์พฤติกรรมของการสะท้อน ซึ่งอาจต้องมีการอ้างอิงถึงในบางหัวข้อ โดยมีรายละเอียดแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

5.1 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่น

สำหรับการเก็บข้อมูลด้านหลังโครงสร้างนั้น ได้ทำการเก็บข้อมูลในหลายตำแหน่ง เนื่องจากต้องการทราบถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างไปได้ และเก็บข้อมูลคลื่นด้านหลังโครงสร้างด้วยเครื่องมือวัดความสูงคลื่น ซึ่งทำการเก็บข้อมูลระดับผิวน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาต่าง ๆ เช่นเดียวกันกับในบริเวณด้านหน้าโครงสร้าง เพื่อนำมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติของคลื่น (wave characteristic) ได้แก่ ความสูงคลื่น (wave height), คาบคลื่น (wave period) และความยาวคลื่น (wave length) ด้วยวิธีการทางสถิติ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของคุณสมบัติคลื่นที่เป็นตัวแทนของคลื่นในแต่ละตำแหน่ง โดยมีกระบวนการดังต่อไปนี้

5.1.1 วิธีการหาความสูงคลื่นนัยสำคัญ คาบคลื่น และความยาวคลื่น

การเก็บข้อมูลคลื่นในแต่ละตำแหน่งด้านหลังโครงสร้างนั้น จะใช้เครื่องมือวัดคลื่นที่ทำงานโดยการวัดระดับผิวน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับในบริเวณด้านหน้า ข้อมูลที่บันทึกได้เป็นข้อมูลต่อเนื่องที่มีลักษณะเป็นลูกคลื่นหลายลูกต่อกัน เพื่อให้สามารถพิจารณาคูณลักษณะของคลื่นแต่ละลูกและใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ได้นั้น จำเป็นต้องตัดข้อมูลออกเป็นช่วง ๆ ตามขนาดของคาบคลื่น โดยใช้วิธีวิเคราะห์ความถี่ด้วยวิธี power spectral energy (PSE) และทำการแปลงข้อมูลด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพลังงานกับความถี่ การที่คลื่นมีลักษณะสม่ำเสมอ (regular wave) ส่งผลให้กราฟดังกล่าวมียอดสูงสุดเพียงความถี่เดียว และส่วนกลับของความถี่สูงสุดนี้มีค่าเท่ากับคาบคลื่น จากนั้นนำคาบที่ได้มาทำการตัดคลื่นเพื่อคำนวณความสูงคลื่นนัยสำคัญ (significant wave height) ซึ่งใช้กระบวนการเดียวกับที่ทำการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นในบริเวณด้านหน้าโครงสร้าง ดังกล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1.1

5.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (transmission coefficient, K_t) คือ อัตราส่วนระหว่างความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นและได้รับอิทธิพลของทั้งการซึมผ่าน, การล้นข้ามโครงสร้าง และการกระจายตัวผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น ต่อความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น ดังสมการที่ 5-1 โดยการศึกษานี้จะพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา และเปรียบเทียบถึงการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมคลื่น

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (5-1)$$

เมื่อ K_t คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (transmission coefficient)

H_t คือ ความสูงคลื่นหลังส่งผ่านเขื่อนกันคลื่น (transmitted wave height)

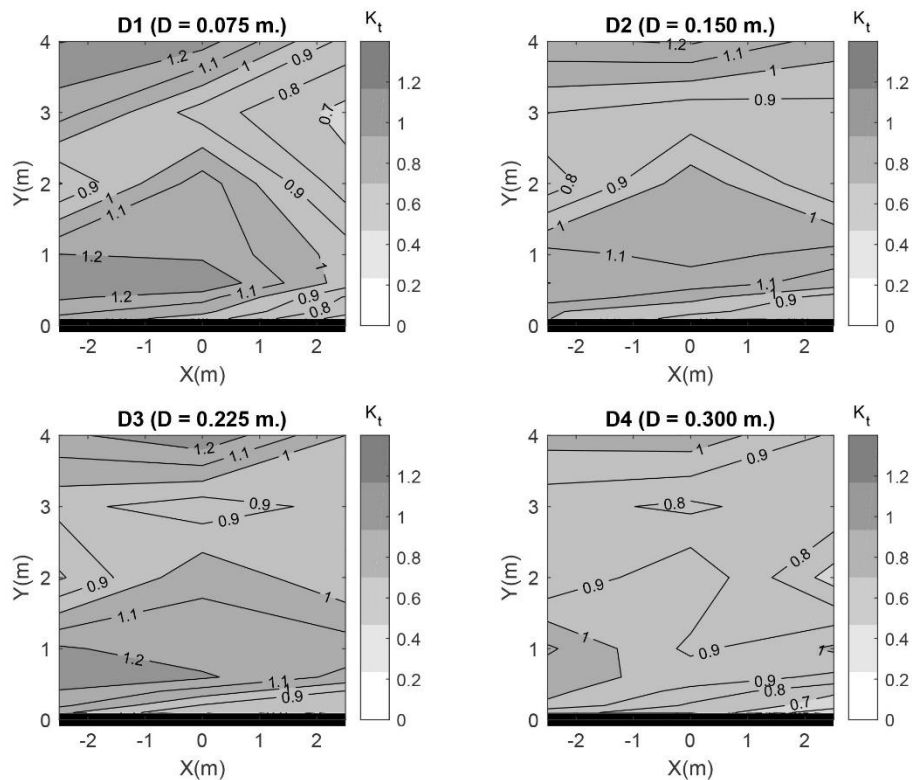
H_i คือ ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่เขื่อนกันคลื่น (incident wave height)

สำหรับค่าของความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่เขื่อนกันคลื่น (incident wave height) นั้น จะพิจารณาจากค่าที่แยกได้จากข้อมูลคลื่นบริเวณด้านหน้าโครงสร้างในแต่ละกรณีศึกษา ด้วยแนวคิดและวิธีการของ Goda and Suzuki (1976) ภายใต้สมมติฐานที่คลื่นเคลื่อนที่เข้ามาเป็นระนาบเดียวกัน และเป็นคลื่นแบบสม่ำเสมอ ดังที่กล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 4.2

5.2 ผลการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่น

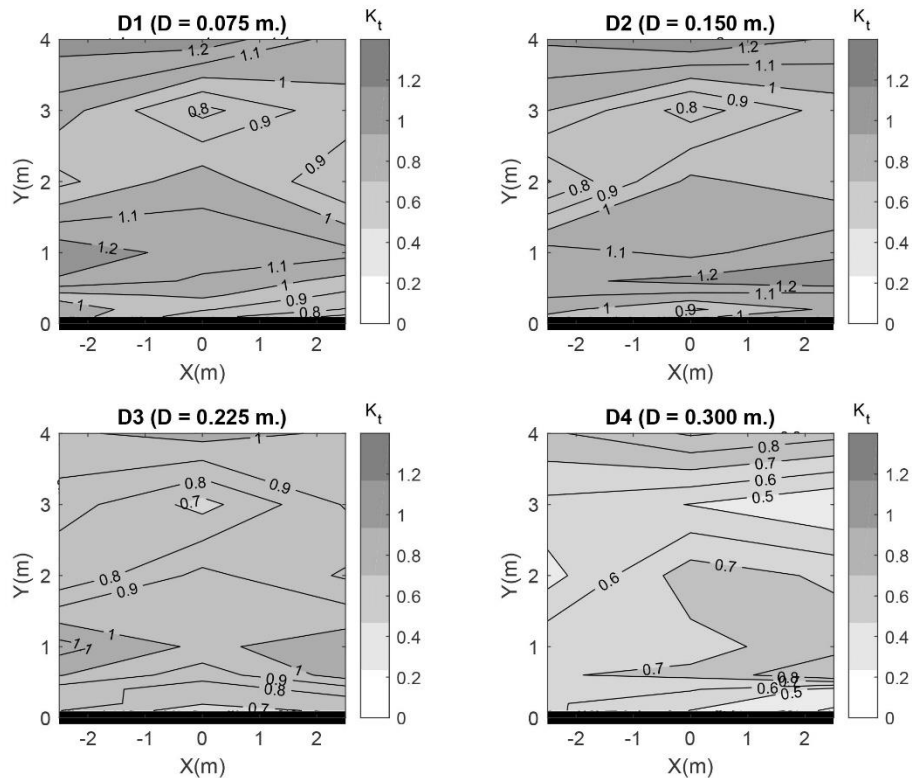
จากข้อมูลความสูงคลื่นที่เก็บได้ในแต่ละตำแหน่งด้านหลังโครงสร้างของแต่ละกรณีศึกษา พบว่า ขนาดของความสูงคลื่นที่ส่งผ่านมาในแต่ละตำแหน่งเก็บมีความแตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่วิเคราะห์ได้ในแต่ละตำแหน่งเก็บมีความแตกต่างกันตามไปด้วย ทั้งนี้ในการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นนั้น จำเป็นต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เป็นตัวแทนของแต่ละกรณีศึกษา จึงได้นำข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่วิเคราะห์ได้มาสร้างเส้นชั้นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในบริเวณด้านหลังโครงสร้าง เพื่อแสดงลักษณะการกระจายตัวของพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณี โดยกำหนดให้จุด $(x=0, y=0)$ เป็นตำแหน่งกึ่งกลางของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน โดยแกน y เป็นค่าของระยะทางตามแนวตั้งฉากโครงสร้าง (เมตร) แกน x เป็นค่าของระยะทางแนวขนานโครงสร้าง (เมตร) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะถูกแบ่งระดับในช่วง 0.00 – 1.40 ตามระดับชั้นสี เรียงจากสีขาวถึงสีดำตามลำดับ รูปที่ 5-1 แสดง

ตัวอย่างของลักษณะการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในบริเวณด้านหลังโครงสร้างในกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และรูปที่ 5-2 สำหรับในกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง โดยชื่อกราฟแสดงถึงรายชื่อเงื่อนไขของแต่ละกรณีศึกษา ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้จากตารางที่ 3-2 สำหรับรายละเอียดของทุกกรณีศึกษาแสดงในภาคผนวก ซ-1



รูปที่ 5-1 ตัวอย่างแผนภูมิเส้นระดับชั้นของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านด้านหลังโครงสร้าง กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และความชันคลื่นอยู่ในช่วง 0.010 – 0.013 ระยะห่างระหว่างเสาเท่ากับ 1 เมตร

จากผลการศึกษาที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในบริเวณด้านหลังโครงสร้างพบว่า ในบางตำแหน่งมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมากเกิน 1 โดยสาเหตุของความคลาดเคลื่อนนี้อาจเกิดเนื่องจากคลื่นในแบบจำลองมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นจริงในธรรมชาติ ทำให้อิทธิพลของความหนืดระหว่างของเหลวกับโครงสร้างในชั้นขอบการไหล (boundary layer) ส่งอิทธิพลต่อความสูงคลื่นบริเวณถัดจากโครงสร้างที่มีความปั่นป่วน (Crowe et al., 2009) และบริเวณด้านหลังอ่างจำลองคลื่นที่ได้รับอิทธิพลจากการสะท้อนของหาดสลายพลังงานด้านหลังอ่างจำลองคลื่น ดังแสดงด้วยบริเวณที่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่มากกว่า 1 ในบริเวณทั้ง 2 ตำแหน่งในรูปที่ 5-1 และรูปที่ 5-2



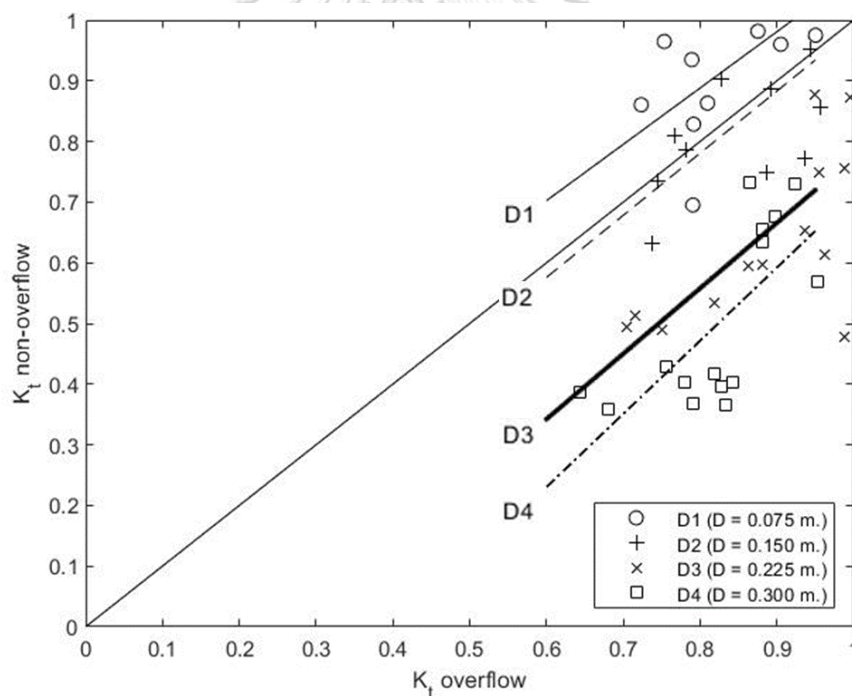
รูปที่ 5-2 ตัวอย่างแผนภูมิเส้นระดับชั้นของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านด้านหลังโครงสร้าง กรณีคลื่นไม่
 ล้นข้ามโครงสร้าง และความชันคลื่นอยู่ในช่วง 0.010 – 0.013 ระยะห่างระหว่างเสาเท่ากับ 1 เมตร

จากรูปที่ 5-1 และรูปที่ 5-2 รวมถึงภาคผนวก ข-1 พบว่าข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน
 บริเวณด้านหลังโครงสร้างมีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งเก็บ ทั้งในแนวนอนและตั้งฉากกับ
 โครงสร้าง ทั้งนี้เพื่อการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่น กับคุณสมบัติคลื่น
 และลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างในแต่ละกรณีศึกษา จึงมีความจำเป็นต้องใช้ข้อมูลค่า
 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เป็นตัวแทนของแต่ละกรณีศึกษา ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากความ
 หืดที่และการสะท้อนของหาดสลายพลังงานกล่าวถึงก่อนหน้า ผู้ศึกษาจึงจะใช้ค่าเฉลี่ยของ
 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นทุกตำแหน่งในบริเวณที่ห่างจากโครงสร้างไปทางด้านหลัง ตั้งแต่ระยะ 1 –
 4 เมตร เพื่อใช้เป็นตัวแทนของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา

5.3 อิทธิพลของการยอมให้คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

สำหรับการศึกษาในกรณีศึกษาต่าง ๆ นั้น ได้มีการกำหนดรูปแบบของโครงสร้างเพื่อให้คลื่นที่
 เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญอยู่ 2 รูปแบบ คือ การยอมให้คลื่นล้น
 ข้ามได้ (overflow) และการไม่ยอมให้คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง (non-overflow) เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์

การส่งผ่านคลื่นมาพล็อตเทียบกันระหว่างทั้งสองกรณีศึกษา โดยเทียบเคียงกันจากคุณสมบัติคลื่นที่ใกล้เคียงกัน และลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างที่เหมือนกัน จะสามารถเห็นลักษณะของพฤติกรรมได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 5-3 จากกราฟพบว่า โครงสร้างที่มีความลึกมากกว่า 0.15 เมตร (D2, D3 และ D4) มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในกรณีที่คลื่นล้นข้าม จะมีค่าที่สูงกว่ากรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง ดังเห็นได้จากจุดในแต่ละคู่กรณีศึกษาที่อยู่ใต้เส้นตรง 45 องศา สาเหตุที่เกิดพฤติกรรมในลักษณะดังกล่าว เนื่องจากการที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้างนั้น เป็นการที่คลื่นบางส่วนจะไม่ได้รับการสลายพลังงานจากโครงสร้าง ทำให้พลังงานสามารถส่งผ่านไปได้มากขึ้น (Nagai, 1966) ประกอบกับคลื่นที่ล้นข้ามไปได้จะมีพฤติกรรมคล้ายน้ำตกลงสู่ผิวน้ำบริเวณด้านหลังโครงสร้าง ซึ่งก่อให้เกิดคลื่นขนาดเล็กเพิ่มเติมจากคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างมาได้ ส่งผลให้คลื่นด้านหลังโครงสร้างมีการแปรปรวนมากยิ่งขึ้น ดังแสดงให้เห็นด้วยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เพิ่มขึ้นเมื่อคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ 5-3 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นระหว่างกรณีที่คลื่นล้นข้ามกับไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

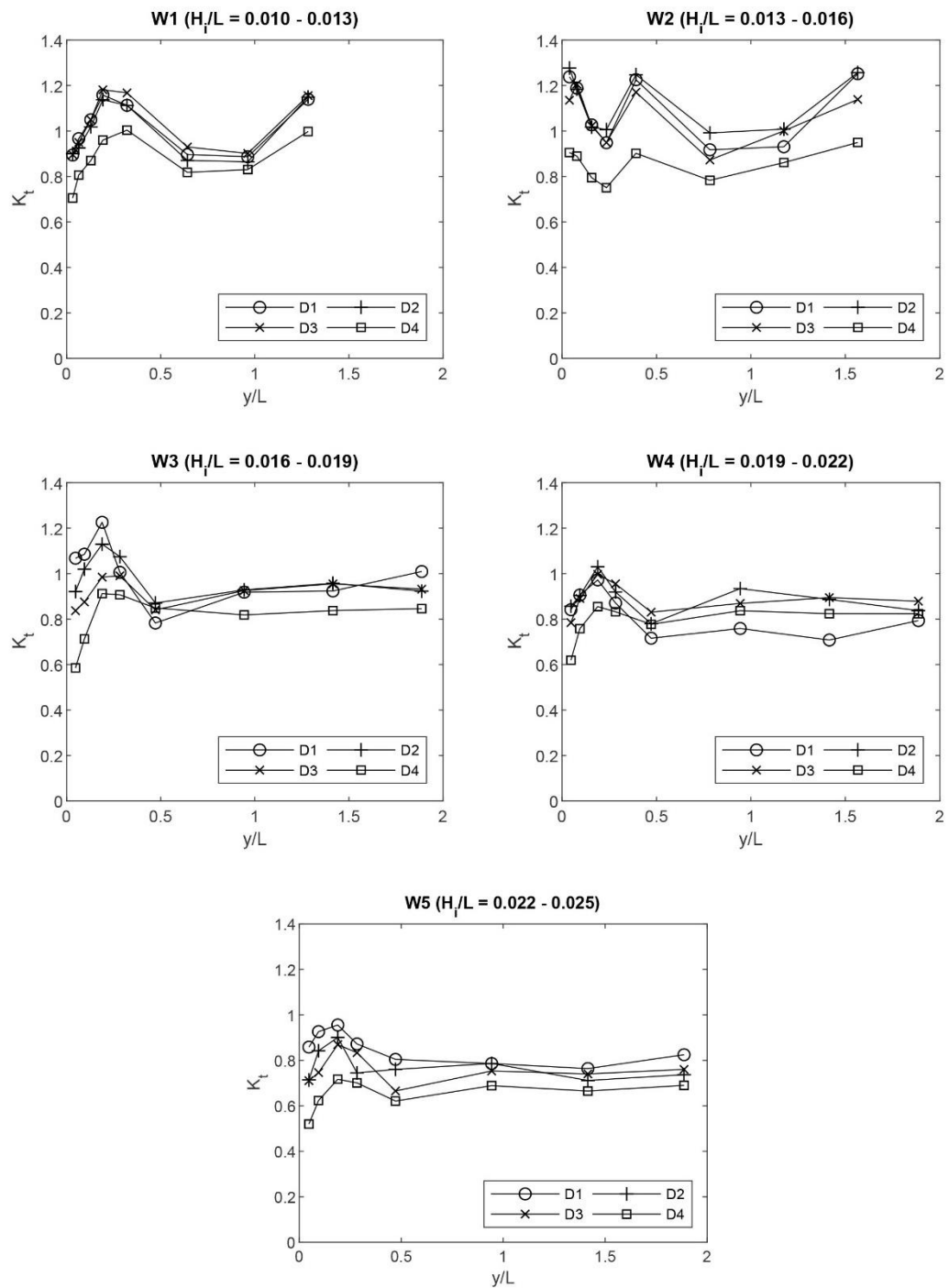
อย่างไรก็ตาม ได้พบแนวโน้มที่แตกต่างในกรณีที่โครงสร้างมีความลึกน้อย (D1) โดยพบแนวโน้มที่ตรงข้าม คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีค่าลดลงเมื่อคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง ซึ่งเกิดจากการที่โครงสร้างจมอยู่เพียงบริเวณผิวน้ำ ในขณะที่พลังงานของคลื่นสามารถกระจายลงไปได้ลึก ส่งผล

ให้พลังงานสามารถลอดใต้โครงสร้างได้มาก พฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นจึงได้รับอิทธิพลหลักจากการลอดใต้โครงสร้าง มากกว่าการล้นข้าม ดังนั้นการปิดโครงสร้างให้คลื่นไม่สามารถล้นข้ามได้จึงอาจไม่มีอิทธิพลเพียงพอต่อพฤติกรรมการส่งผ่านรวม โดยขณะทำการทดลองในกรณีดังกล่าวได้เห็นพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านโครงสร้างที่แตกต่างกัน ระดับน้ำของลูกคลื่นส่วนที่มีความสูงเหนือระดับน้ำนิ่ง (still water level) ถึงสันคลื่น (wave crest) จะเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างโครงสร้าง และได้รับการสลายพลังงาน ในขณะที่ระดับน้ำส่วนที่อยู่ใต้ระดับน้ำนิ่งถึงท้องคลื่น (wave trough) จะลอดผ่านช่องว่างใต้โครงสร้าง (ช่องว่างระหว่างแผ่นโครงสร้างในแบบจำลองกับท้องน้ำ) และไม่ได้รับการสลายพลังงาน ก่อให้เกิดพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปจากกรณีศึกษาอื่น และอาจส่งผลให้ความสูงคลื่นเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งเป็นประเด็นที่ควรศึกษาต่อไปในอนาคต

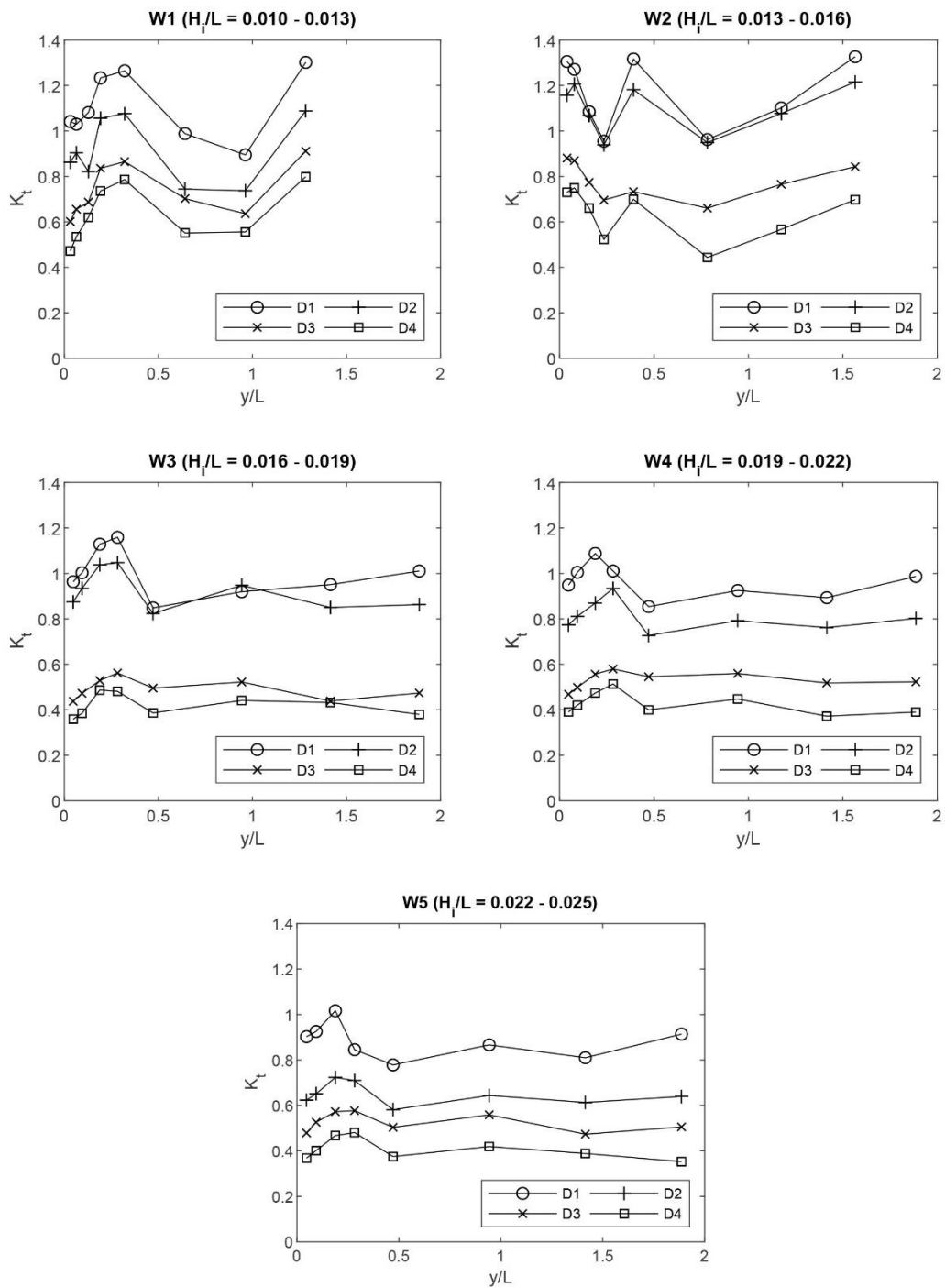
5.4 พฤติกรรมคลื่นด้านหลังโครงสร้าง

คลื่นที่ถูกสร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดคลื่นจะเคลื่อนที่เข้าสู่เขื่อนกันคลื่นและถูกสลายพลังงานผ่านการเสียดสีในช่องว่างระหว่างโครงสร้าง (ช่องว่างระหว่างแผ่นเหล็กโครงสร้าง) ส่งผลให้พลังงานคลื่นที่ส่งผ่านโครงสร้างไปได้ลดน้อยลง ดังแสดงผลในรูปของขนาดความสูงคลื่นด้านหลังโครงสร้างที่ลดลง ทั้งนี้เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างจะเกิดการปั่นป่วนของคลื่นเป็นระยะหนึ่งด้านหลังโครงสร้าง ก่อนที่พฤติกรรมของคลื่นจะเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ (Bricio et al., 2008) ส่งผลให้ต้องมีการพิจารณาระยะที่คลื่นเกิดความแปรปรวนเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระยะห่างของเขื่อนกันคลื่นกับแนวชายฝั่งที่ต้องการป้องกัน

ในการนี้ ได้พิจารณาโดยใช้กราฟที่แกน x เป็นระยะห่างจากโครงสร้างในด้านหลังต่อความยาวคลื่น (y/L) ตามการศึกษาที่ผ่านมาของ Johnson (1951) เพื่อให้ผลการวิเคราะห์สามารถอธิบายระยะการแปรปรวนในรูปจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่โครงสร้าง และให้แกน y เป็นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 5-4 สำหรับกรณีศึกษาที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และรูปที่ 5-5 สำหรับกรณีศึกษาที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง รายละเอียดในกรณีศึกษาอื่น ๆ แสดงในภาคผนวก ซ-2 สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่เป็นตัวแทนของแต่ละระยะห่างจากโครงสร้างต่อความยาวคลื่น (y/L) คำนวณได้จากการเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแนวนอนโครงสร้างทั้ง 3 ตำแหน่งเก็บ ได้แก่ -2.5, 0 และ 2.5 เมตร



รูปที่ 5-4 ตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากโครงสร้างต่อความยาวคลื่น และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กรณีคลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง ระยะห่างระหว่างเสาเท่ากับ 1 เมตร



รูปที่ 5-5 ตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากโครงสร้างต่อความยาวคลื่น และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กรณีคลื่นไม่ล้ำข้ามโครงสร้าง ระยะห่างระหว่างเสาเท่ากับ 1 เมตร

จากรูปที่ 5-4 ถึงรูปที่ 5-5 และภาคผนวก ข-2 พบว่า เมื่อพิจารณาที่ขนาดความชันคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างเดียวกัน ลักษณะของพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นบริเวณด้านหลังโครงสร้างจะมีลักษณะการกระจายตัวใกล้เคียงกันในทุก ๆ ความลึกการจมโครงสร้าง โดยสำหรับกรณีที่มีความชันคลื่นอยู่ในช่วง 0.010 – 0.013 นั้นพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะมีลักษณะของความแปรปรวนในช่วงหลังโครงสร้างถึงระยะประมาณ 0.65 เท่าของความยาวคลื่น แต่สำหรับกรณีที่ความชันคลื่นอยู่ในช่วง 0.013 – 0.016 จะมีความแปรปรวนจากหลังโครงสร้างถึงระยะประมาณ 0.6 เท่าของความยาวคลื่น ในขณะที่ช่วงความชันคลื่นที่เหลือ ได้แก่ 0.016 – 0.019, 0.019 – 0.022 และ 0.022 – 0.025 จะมีความแปรปรวนจากหลังโครงสร้างจนถึงระยะประมาณ 0.5 เท่าของความยาวคลื่น สาเหตุของการแปรปรวนของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านดังกล่าวนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก คลื่นถูกเสียดสี ทำให้เกิดการแตกตัวและปั่นป่วน เมื่อเคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง (Dong et al., 2008) อีกทั้งยังเกิดจากการลอดใต้โครงสร้าง รวมถึงการล้นข้ามของคลื่นในกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้างอีกด้วย

ทั้งนี้ยังมีข้อสังเกตเพิ่มเติมอีกว่าที่ความชันคลื่น 0.016 – 0.019, 0.019 – 0.022 และ 0.022 – 0.025 ซึ่งมีความยาวคลื่นที่เท่ากัน จะให้ผลลัพธ์ของระยะการแปรปรวนที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นความยาวคลื่นจึงอาจมีอิทธิพลต่อระยะการปั่นป่วนของพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นในบริเวณด้านหลังโครงสร้างมากกว่าตัวแปรความชันคลื่น สาเหตุที่ที่ตั้งสมมติฐานดังกล่าวนี้เนื่องจาก ความยาวคลื่นเป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงระดับความลึกที่คลื่นกระจายพลังงานได้ (Sorensen, 1991) ซึ่งเป็นตัวกำหนดถึงปริมาณพลังงานที่ลอดผ่านช่องว่างใต้โครงสร้างไปได้ พลังงานที่ลอดผ่านช่องว่างใต้โครงสร้างได้มากย่อมทำให้เกิดการแปรปรวนของคลื่นด้านหลังโครงสร้างที่มาก และมีระยะใกล้เคียงกันตามไปด้วย (Dong et al., 2008) นอกจากนี้ยังพบอีกว่าลักษณะการแปรปรวนในช่วงดังกล่าว มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ที่มีจุดยอดอยู่ในช่วงระยะประมาณครึ่งหนึ่งของระยะแปรปรวน หรือ 0.25 – 0.3 เท่าของความยาวคลื่น โดยอาจเกิดเนื่องจากอิทธิพลของการลอดใต้โครงสร้างของพลังงานคลื่น ดังนั้นในการออกแบบจึงควรหลีกเลี่ยงระยะห่างจากโครงสร้างถึงชายฝั่งในช่วงดังกล่าว

เมื่อพิจารณาจากทุกระยะในแนวตั้งฉากโครงสร้างพบว่า ในระยะที่ไกลจนเกินกว่าช่วงของระยะแปรปรวน ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีศึกษาที่มีความชันคลื่นอยู่ในช่วง 0.010 – 0.013 และ 0.013 – 0.016 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น อาจเกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการสะท้อนจากชายหาดสลายพลังงานบริเวณท้ายอ่างจำลองคลื่น จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ระยะของการแปรปรวนของพฤติกรรม

การส่งผ่านคลื่นในบริเวณด้านหลังโครงสร้าง มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น โดยสรุปรายละเอียดได้ดังตารางที่ 5-1

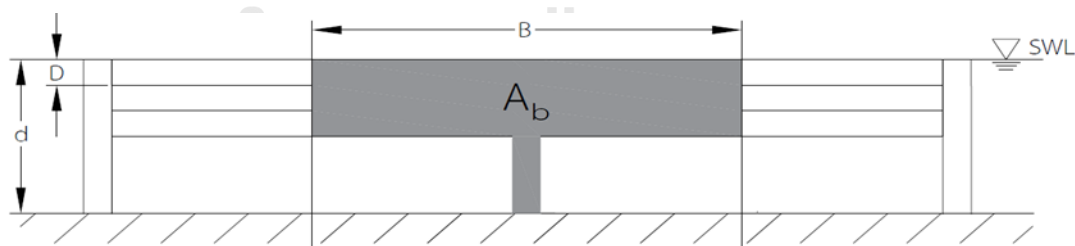
ตารางที่ 5-1 พฤติกรรมคลื่นด้านหลังโครงสร้าง

parameter	wave				
	W1	W2	W3	W4	W5
ความชันคลื่น	0.010-0.013	0.013-0.016	0.016-0.019	0.019-0.022	0.022-0.025
ความยาวคลื่น (m)	3.117	2.555	2.120	2.120	2.120
ระยะการปั่นป่วน (y/L)	0.65	0.60	0.50	0.50	0.50

5.5 การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

เนื่องจากการศึกษาก่อนหน้าพบว่า พฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นจะมีความแปรผันตามลักษณะความโปร่งของโครงสร้าง ดังนั้นในการพิจารณาตัวแปรไร้มิติสำหรับการส่งผ่านคลื่น จะขอปรับเปลี่ยนตัวแปรบางส่วนเพื่อให้ได้รูปสมการที่สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพและง่ายต่อการอธิบาย ดังนั้นจะสามารถระบุตัวแปรที่ส่งอิทธิพลหรือมีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงความสูงคลื่นด้านหลังโครงสร้าง (H_t) ซึ่งประกอบด้วย ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง (H_i), ความลึกน้ำ (d), ความหนาของโครงสร้าง (b), ความยาวคลื่น (L), พื้นที่หน้าตัดที่บ้น้ำ (A_b) และระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง (B) ดังสมการที่ 5-2 โดยพื้นที่หน้าตัดที่บ้น้ำแสดงดังรูปที่ 5-6

$$H_t = f(H_i, d, L, B, b, A_b) \quad (5-2)$$



รูปที่ 5-6 พื้นที่หน้าตัดที่บ้น้ำ

โดยการพิจารณาตัวแปรเกี่ยวกับการส่งผ่านคลื่นผ่านโครงสร้างนั้น พบว่าสามารถเขียนความสัมพันธ์ของความสูงคลื่นที่ส่งผ่านบริเวณด้านหลังโครงสร้างในรูปตัวแปรไร้มิติ (dimensionless parameter) ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมทางกายภาพของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน ได้ดังสมการที่ 5-3

$$K_t = \frac{H_r}{H_i} = f\left(\frac{H_i}{B}, \frac{H_i}{L}, \frac{H_i}{d}, \Phi, \frac{d}{L}, \frac{b}{L}\right) \quad (5-3)$$

โดยที่ Φ คือ ปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (partial breakwater factor)

$$\text{สามารถคำนวณได้จาก } \Phi = 1 - \frac{A_b}{Bd}$$

เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรไร้หน่วยต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น ทำให้ต้องทำการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กับตัวแปรไร้หน่วยในแต่ละกลุ่ม โดยการวิเคราะห์และอภิปรายผลจะกล่าวถึงโดยละเอียดในหัวข้อ 5.6

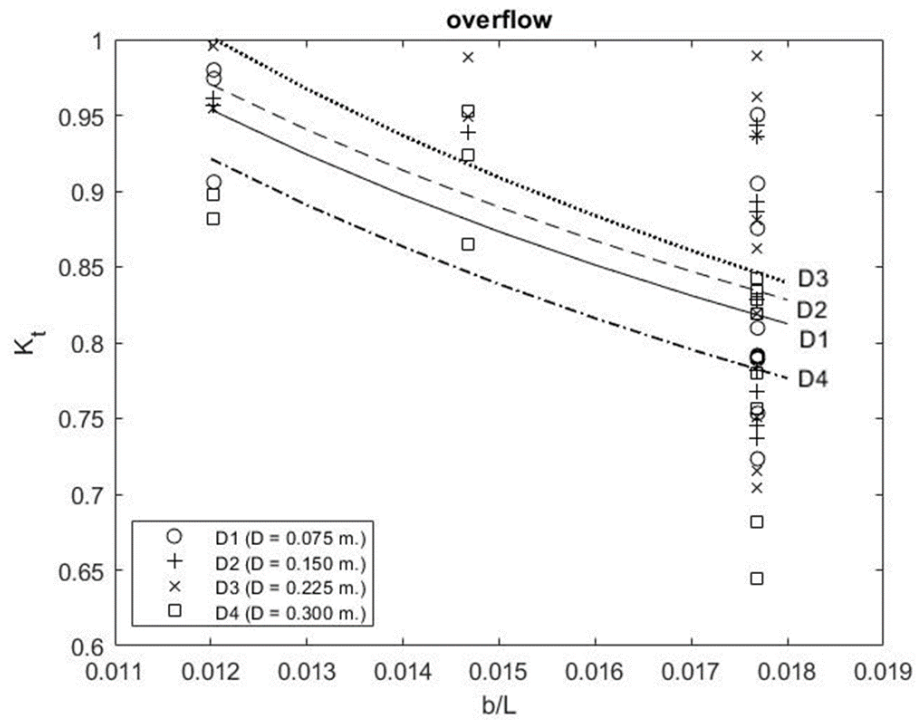
5.6 การวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นผ่านโครงสร้าง

สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นผ่านโครงสร้างเนื่องจากอิทธิพลของตัวแปรไร้หน่วยต่าง ๆ ซึ่งเป็นทั้งกลุ่มของตัวแปรคุณสมบัติคลื่น และตัวแปรเกี่ยวกับโครงสร้าง อย่างไรก็ตามพบว่าในบางกรณีศึกษาได้ให้ผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเกิน 1 ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากความคลาดเคลื่อนดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 5.2 ดังนั้นในการวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นผ่านโครงสร้างเนื่องจากอิทธิพลของตัวแปรไร้หน่วยในหัวข้อนี้จะไม่พิจารณากรณีศึกษาที่มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเกิน 1 มาเข้าร่วม เพื่อให้สามารถอธิบายพฤติกรรมทางกายภาพได้อย่างถูกต้อง

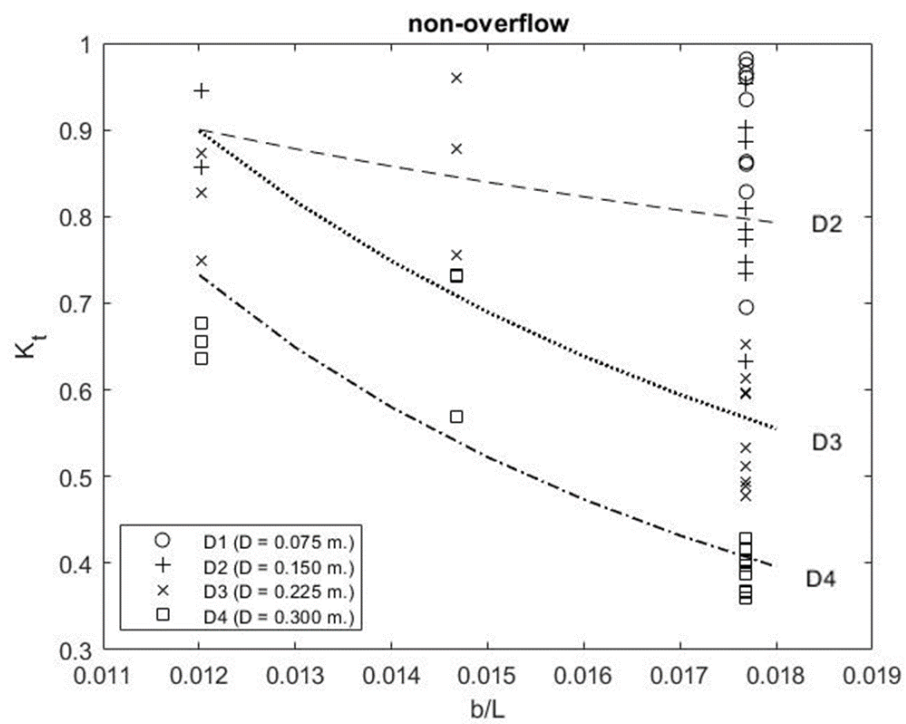
ทั้งนี้จากหัวข้อที่ 4.5 พบว่าระยะห่างระหว่างเสาของโครงสร้าง (B) ไม่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของคลื่น ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงจะพิจารณาตัวแปรระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้างสัมพัทธ์ (H_i/B) และจะวิเคราะห์พฤติกรรมของคลื่นกับตัวแปรไร้หน่วยกลุ่มอื่น ๆ โดยไม่พิจารณาผลของระยะห่างระหว่างเสาของโครงสร้าง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์

การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของตัวแปรไร้หน่วยกลุ่มโครงสร้างตัวแรก คือ ความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์ (relative thickness) โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างความหนาของโครงสร้างที่มีค่าคงที่เป็น 0.0375 เมตร ต่อความยาวคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง (b/L) โดยพบว่าขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีค่าเป็นช่วงดังแสดงในตารางที่ 5-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับค่าความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์ (b/L) แสดงในรูปที่ 5-7 สำหรับกรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และรูปที่ 5-8 สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ 5-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับค่าความหนาโครงสร้างสัมพันธ์ (b/L) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ 5-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับค่าความหนาโครงสร้างสัมพันธ์ (b/L) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

ตารางที่ 5-2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น จำแนกด้วยความชันคลื่น

กรณีศึกษา	ความชันคลื่น	ช่วงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (K_t)
คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง	0.010 – 0.013 (W1)	0.88 – 0.99
	0.013 – 0.016 (W2)	0.86 – 0.99
	0.016 – 0.019 (W3)	0.82 – 0.99
	0.019 – 0.022 (W4)	0.72 – 0.89
	0.022 – 0.025 (W5)	0.64 – 0.81
คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง	0.010 – 0.013 (W1)	0.63 – 0.96
	0.013 – 0.016 (W2)	0.57 – 0.96
	0.016 – 0.019 (W3)	0.36 – 0.97
	0.019 – 0.022 (W4)	0.39 – 0.94
	0.022 – 0.025 (W5)	0.36 – 0.84

จากแนวโน้มในรูปที่ 5-7 และรูปที่ 5-8 พบความสัมพันธ์โดยรวมคือ เมื่อความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์ (b/L) เพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะมีค่าลดลง สาเหตุของความสัมพันธ์ในลักษณะดังกล่าวเนื่องจาก การที่ค่าความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์มากขึ้น หมายถึง ความหนาของโครงสร้างต่อขนาดความกว้างของตัวลูกคลื่นที่มาก ซึ่งจะก่อให้เกิดการสลายพลังงานที่มากขึ้น ดังนั้นค่า b/L ที่มากจึงก่อให้เกิดการสลายพลังงานที่มาก และมีพลังงานที่ส่งผ่านไปด้านหลังโครงสร้างน้อย (Dong et al., 2008) ดังแสดงให้เห็นด้วยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่ลดลง เมื่อความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น

เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมาของ Suh et al. (2007), Mani (2008) และ Ji et al. (2015) ได้กล่าวไว้ว่า พฤติกรรมของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นจะมีการกระจายตัวเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อตัวแปรคุณสมบัติคลื่นหรือลักษณะทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป ประกอบกับการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการสัมพันธ์กับพฤติกรรมคลื่นตามวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ จึงกำหนดให้ความสัมพันธ์ในกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยต่าง ๆ มีการกระจายตัวไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจึงมีสมมติฐานว่าพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นมีความสัมพันธ์กับชุดตัวแปรไร้หน่วยตามการกระจายตัวแบบสมการกำลัง (power distribution) ดังสมการที่ 5-4

$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น, } K_t = \alpha \left(\frac{b}{L}\right)^\beta \quad (5-4)$$

เมื่อ α และ β คือค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ และค่าเลขยกกำลัง สำหรับค่า α และ β ใช้วิธีการวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่าย (simple regression analysis) สำหรับรายละเอียดและผลการวิเคราะห์สมการความถดถอยของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์ (b/L) ในแต่ละกรณีศึกษาแสดงในภาคผนวก ซ-3

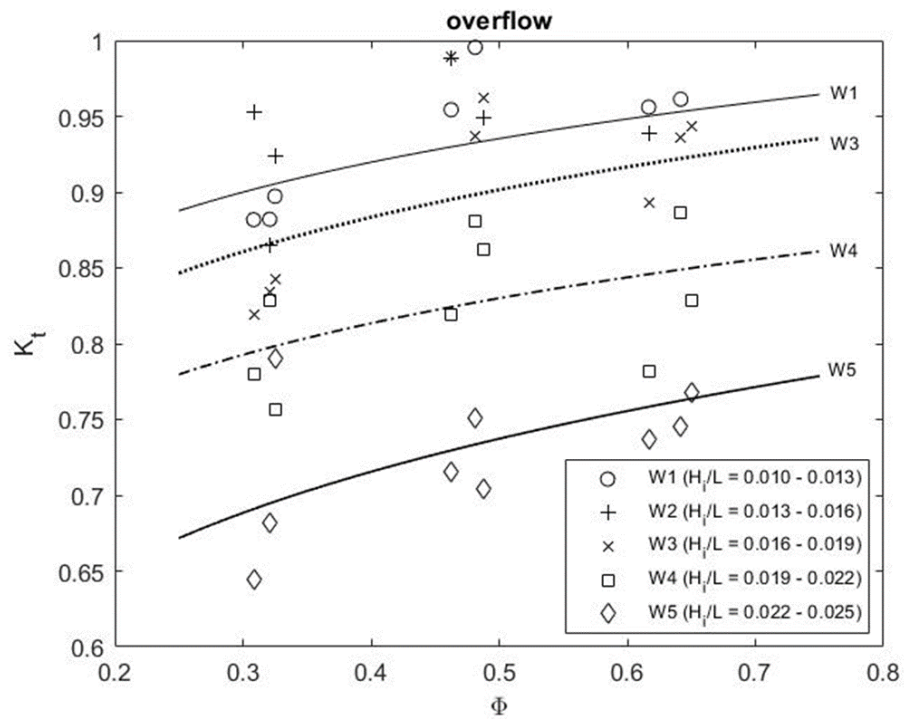
ทั้งนี้เมื่อพิจารณาตัวแปรความลึกการจมโครงสร้าง (D) ร่วมด้วยแล้ว พบว่าในกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้างไม่มีความสัมพันธ์ของความลึกการจมโครงสร้างร่วมด้วย โดยเห็นได้จากเส้นกราฟที่ค่อนข้างเกาะกลุ่มกัน และไม่เรียงลำดับอย่างชัดเจน จึงสรุปว่าทั้งสองตัวแปรไม่มีความสัมพันธ์ร่วมกัน สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้างพบความสัมพันธ์อย่างชัดเจน โดยที่ค่าความลึกการจมโครงสร้างน้อยจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมาก และมีแนวโน้มของการเรียงลำดับอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ร่วมกันของทั้งสองกลุ่มตัวแปรต่อพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่น อย่างไรก็ตามในกรณีที่ความลึกการจมโครงสร้างเป็น 0.075 เมตร (D1) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในกรณีที่ b/L มีค่าน้อย 2 ค่าแรก มีค่ามากกว่า 1 จึงไม่นำมาพิจารณาประกอบการสร้างเส้นแนวโน้ม ส่งผลให้กรณี D1 เหลือข้อมูลเฉพาะกรณีที่ b/L มากเพียงตำแหน่งเดียว จึงไม่สามารถเขียนเส้นแนวโน้มของกรณี D1 ได้

5.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น

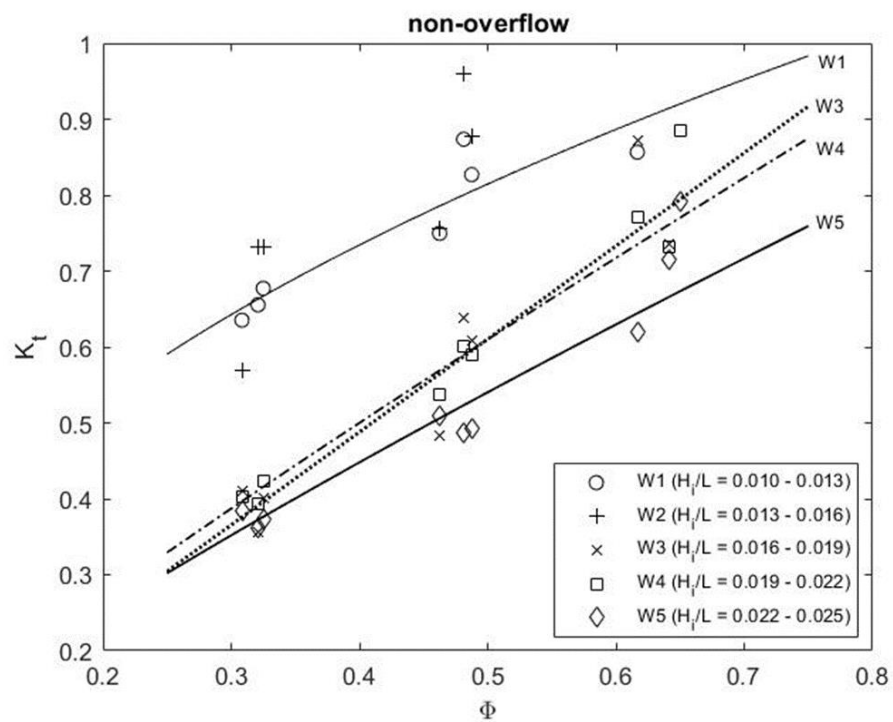
การศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของตัวแปรไร่หน่วยกลุ่มโครงสร้างตัวต่อมา คือ ปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (partial breakwater factor, Φ) โดยคำนวณได้จากสมการที่ 5-5 โดย B คือ ระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง, d คือ ความลึกน้ำ และ A_b คือ พื้นที่หน้าตัดที่บ้น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 5-6 ในการศึกษานี้ได้กำหนดให้ความลึกน้ำ (d) มีค่าคงที่เท่ากับ 0.45 เมตร และทำการเปลี่ยนแปลงความลึกการจมในกรณีศึกษาต่าง ๆ 4 ความลึกด้วยกัน ได้แก่ 0.075, 0.150, 0.225 และ 0.300 เมตร

$$\Phi = 1 - \frac{A_b}{Bd} \quad (5-5)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับค่าปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (partial breakwater factor, Φ) ดังรูปที่ 5-9 สำหรับกรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และรูปที่ 5-10 สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง พบความสัมพันธ์ คือ เมื่อปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่นเพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 5-9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (partial breakwater factor, Φ) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ 5-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (partial breakwater factor, Φ) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

สาเหตุของความสัมพันธ์ในลักษณะดังกล่าวเนื่องจาก ปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่นสามารถอธิบายได้ถึงความโปร่งของหน้าตัดหนึ่ง ๆ หาก Φ มีค่ามากหรือมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงถึงความโปร่งของหน้าตัดที่มาก ซึ่งส่งผลให้การสลายพลังงานโดยโครงสร้างเกิดขึ้นน้อย นำไปสู่พฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นที่มากขึ้นตามมา (Alizadeh et al., 2014) ดังเห็นได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่นมีค่าเพิ่มมากขึ้น

ทั้งนี้ได้กำหนดให้ขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น มีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) มีค่าเพิ่มมากขึ้น และกำหนดให้อยู่ในรูปของสมการที่ 5-6

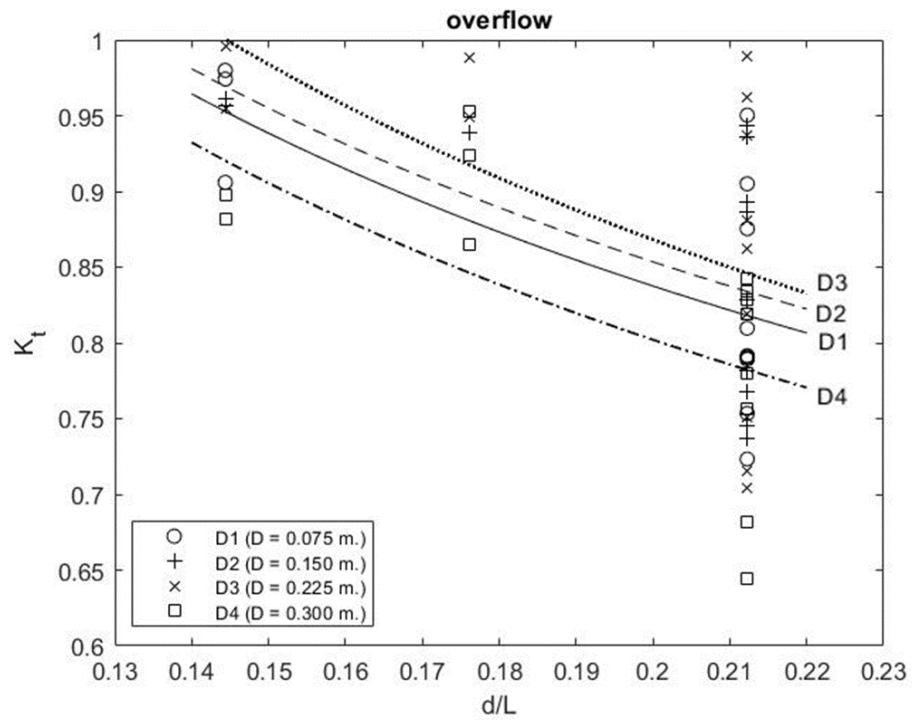
$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น, } K_t = \alpha(\Phi)^\beta \quad (5-6)$$

สำหรับรายละเอียดและผลการวิเคราะห์ของสมการความถดถอยของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นและปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) แสดงในภาคผนวก ข-3

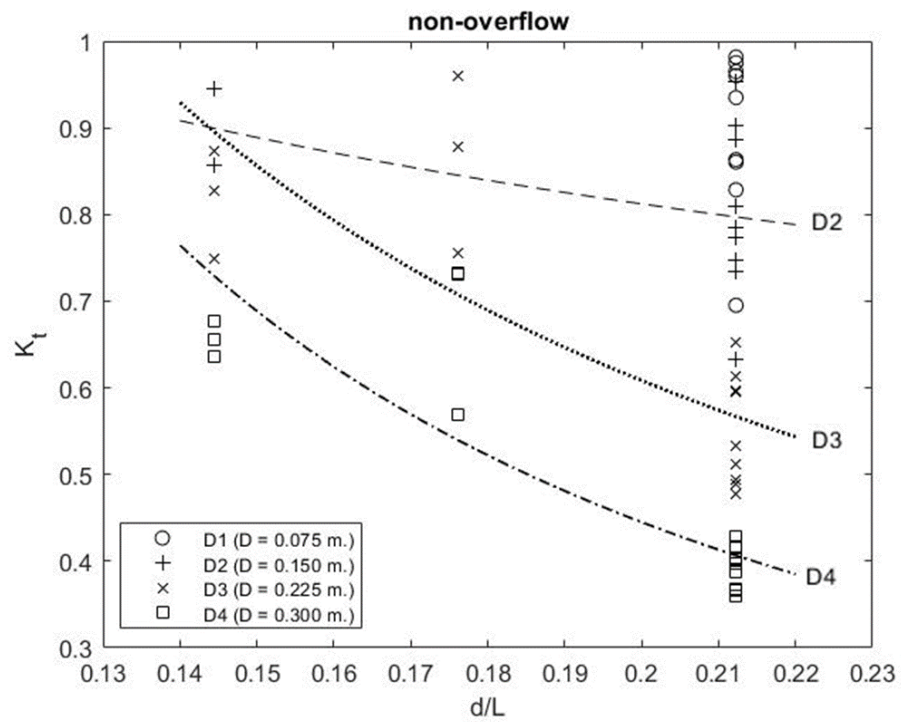
ทั้งนี้ยังพบว่า เมื่อพิจารณาตัวแปรคุณสมบัติคลื่น (W) ร่วมด้วยแล้ว จะเห็นความสัมพันธ์อย่างชัดเจน โดยที่ค่าความชันคลื่นน้อยจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่มาก และมีแนวโน้มของการเรียงลำดับอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของทั้งสองกลุ่มตัวแปรต่อพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่น อย่างไรก็ตามทั้งในกรณีที่คลื่นสั้นและไม่สั้นข้ามโครงสร้าง กรณีที่ความชันคลื่นอยู่ระหว่าง 0.013 – 0.016 (W_2) ได้ให้ผลลัพธ์ของการกระจายข้อมูลที่มาก และมีแนวโน้มที่ไม่สอดคล้องกับกรณีศึกษาอื่น ๆ ดังนั้นจึงไม่แสดงเส้นแนวโน้ม W_2 เพื่อไม่ให้เกิดความสับสนในการวิเคราะห์

5.6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับความลึกสัมพัทธ์

การศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของตัวแปรไร้หน่วยกลุ่มคุณสมบัติคลื่นตัวแรก คือ ความลึกสัมพัทธ์ (relative submerged depth) โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างความลึกน้ำซึ่งกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.45 เมตร ต่อความยาวคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง (d/L) (U.S. CERC., 1984) จากข้อมูลสามารถสร้างเส้นแนวโน้มของความสัมพัทธ์แสดงดังรูปที่ 5-11 สำหรับกรณีคลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง และรูปที่ 5-12 สำหรับกรณีที่คลื่นไม่สั้นข้ามโครงสร้าง ซึ่งพบความสัมพันธ์ คือ เมื่อความลึกสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะมีค่าน้อยลง



รูปที่ 5-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับค่าความลึกสัมพัทธ์ (d/L)
กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ 5-12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับค่าความลึกสัมพัทธ์ (d/L)
กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

สาเหตุของความสัมพันธ์ในลักษณะดังกล่าวเนื่องจาก ค่าความลึกสัมพัทธ์สามารถอธิบายถึงการกระจายความลึกของพลังงานคลื่นในหน้าตานั้น ๆ การที่ d/L มีค่ามาก แสดงถึงความยาวคลื่นที่น้อย อันนำไปสู่ความลึกการกระจายพลังงานคลื่นที่น้อย (U.S. CERC., 1984) ส่งผลพลังงานคลื่นถูกสลายอย่างมากโดยโครงสร้าง หรือกล่าวอีกนัยคือ พลังงานงานกระจายตัวลงได้ไม่ลึกพอที่จะลอดผ่านช่องว่างใต้โครงสร้าง ส่งผลให้พลังงานถูกสลายไปโดยโครงสร้างได้มาก และสามารถส่งผ่านไปได้น้อย ดังแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่ลดลง เมื่อค่าความลึกสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้น

ทั้งนี้จากข้อมูลพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นจะพบว่า ขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นนั้นจะมีแนวโน้มลู่เข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อความลึกสัมพัทธ์ (d/L) มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้กราฟในรูปที่ 5-11 และรูปที่ 5-12 นั้นมีลักษณะของการลู่เข้าสู่ค่าคงที่ที่ชัดเจน และสามารถกำหนดให้อยู่ในรูปของสมการที่ 5-7

$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น, } K_t = \alpha \left(\frac{d}{L}\right)^\beta \quad (5-7)$$

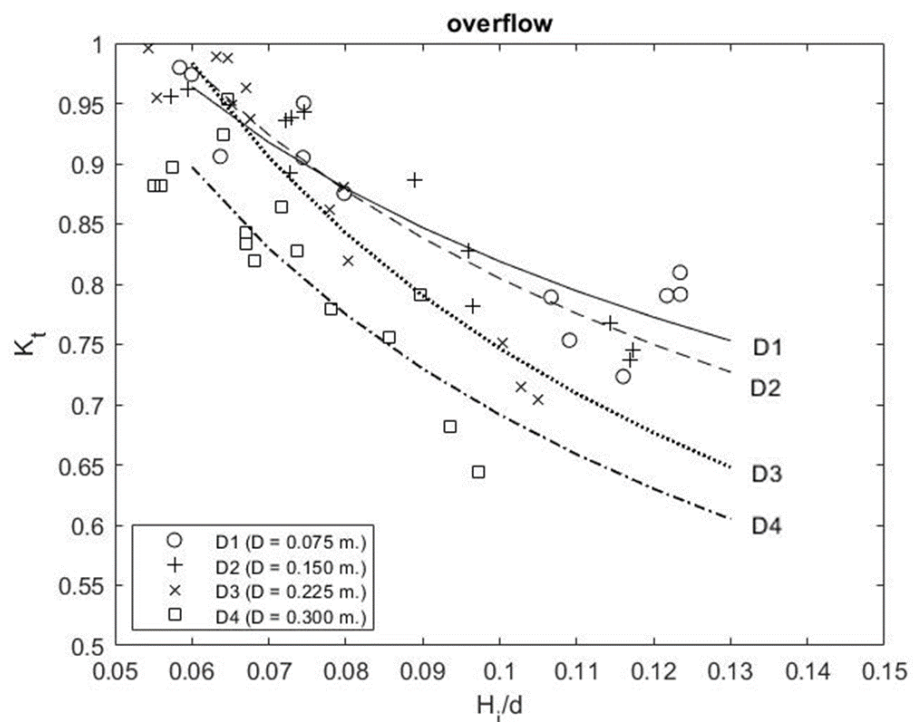
สำหรับรายละเอียดและผลการวิเคราะห์ของสมการความถดถอยของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นและความลึกสัมพัทธ์ (d/L) แสดงในภาคผนวก ซ-3

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาตัวแปรความลึกการจมโครงสร้าง (D) ร่วมด้วยแล้ว พบว่าในกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้างไม่มีความสัมพันธ์ของความลึกการจมโครงสร้างร่วมด้วย โดยเห็นได้จากเส้นกราฟที่ค่อนข้างเกาะกลุ่มกัน และไม่เรียงลำดับอย่างชัดเจน จึงสรุปว่าทั้งสองตัวแปรไม่มีความสัมพันธ์ร่วมกัน สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้างพบความสัมพันธ์อย่างชัดเจน โดยที่ค่าความลึกการจมโครงสร้างน้อยจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมาก และมีแนวโน้มของการเรียงลำดับอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ร่วมกันของทั้งสองกลุ่มตัวแปรต่อพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่น อย่างไรก็ตามในกรณีที่ความลึกการจมโครงสร้างเป็น 0.075 เมตร ($D1$) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในกรณีที่ d/L มีค่าน้อย 2 ค่าแรก มีค่ามากกว่า 1 จึงไม่นำมาพิจารณาประกอบการสร้างเส้นแนวโน้ม ส่งผลให้กรณี $D1$ เหลือข้อมูลเฉพาะกรณีที่ d/L มากเพียงตำแหน่งเดียว จึงไม่สามารถเขียนเส้นแนวโน้มของกรณี $D1$ ได้

5.6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกับความสูงคลื่นสัมพัทธ์

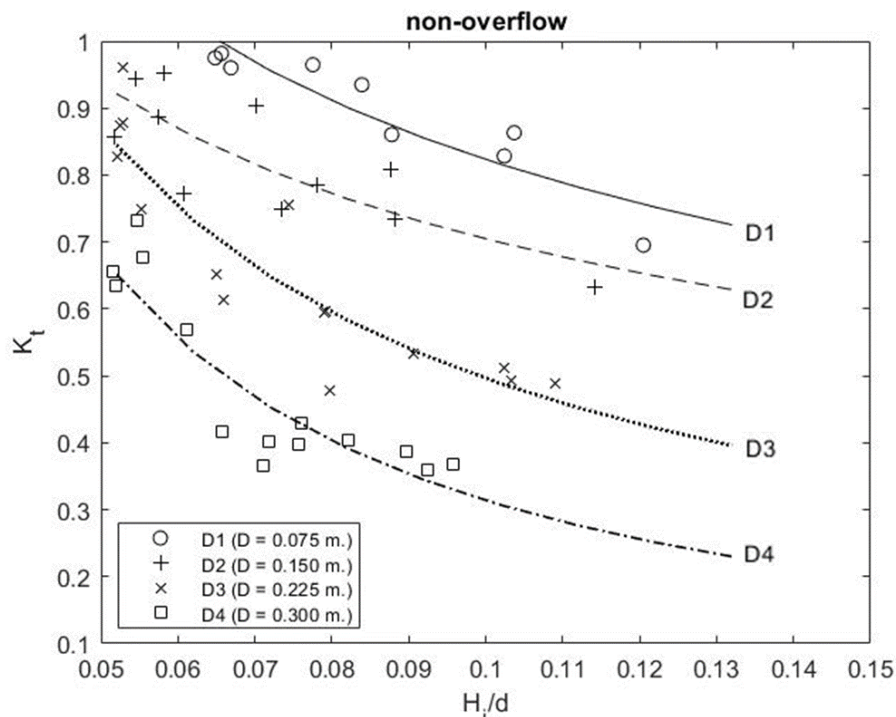
สำหรับการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของตัวแปรไร้หน่วยกลุ่มคุณสมบัติคลื่นตัวต่อมา คือ ความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (relative wave height) โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างต่อความลึกน้ำ (H/d) โดยในการศึกษา

นี้กำหนดให้ความลึกน้ำมีค่าคงที่เท่ากับ 0.45 เมตร จากข้อมูลสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับค่าความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (H_i/d) ดังแสดงในรูปที่ 5-13 สำหรับกรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และรูปที่ 5-14 สำหรับกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง ซึ่งพบความสัมพันธ์ คือ เมื่อความสูงคลื่นสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะมีค่าลดน้อยลง



รูปที่ 5-13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับค่าความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (H_i/d) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

สาเหตุของความสัมพันธ์ในลักษณะดังกล่าวเนื่องจาก ค่าความสูงคลื่นสัมพัทธ์สามารถอธิบายได้ถึงตำแหน่งบริเวณที่เกิดคลื่น ณ หน้าตัดความลึกนั้น ๆ การที่ H_i/d มีค่ามาก หมายถึงการเกิดคลื่นบริเวณผิวน้ำที่มีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับหน้าตัดความลึกน้ำ ซึ่งคลื่นที่มีความสูงมากนี้จะสามารถลอดผ่านช่องว่างระหว่างโครงสร้าง (ช่องว่างระหว่างรอยต่อของแผ่นโครงสร้าง) และเกิดการสลายพลังงานภายในโครงสร้างได้ดีกว่า (Biesheuvel, 2013) ส่งผลเกิดการส่งผ่านพลังงานสู่ด้านหน้าหลังโครงสร้างน้อย ดังแสดงให้เห็นด้วยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่น้อยลง เมื่อความสูงคลื่นสัมพัทธ์มากขึ้น



รูปที่ 5-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลิ่นกับค่าความสูงคลิ่นสัมพัทธ์ (H_t/d) กรณีคลิ่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

จากข้อมูลพฤติกรรมการส่งผ่านคลิ่นจะพบว่า ขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลิ่นนั้นจะมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อความสูงคลิ่นสัมพัทธ์ (H_t/d) มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้กราฟในรูปที่ 5-13 และรูปที่ 5-14 นั้นมีลักษณะของการเข้าสู่ค่าคงที่ที่ชัดเจน และสามารถกำหนดให้อยู่ในรูปของสมการที่ 5-8

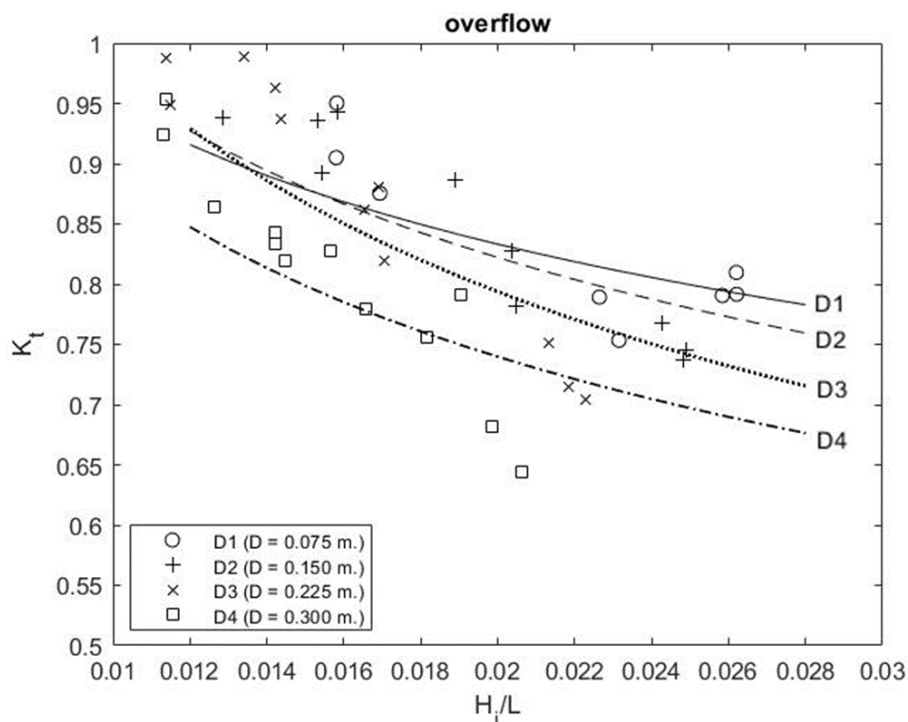
$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลิ่น, } K_t = \alpha \left(\frac{H_t}{d} \right)^\beta \quad (5-8)$$

สำหรับรายละเอียดและผลการวิเคราะห์ของสมการความถดถอยของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลิ่นและความสูงคลิ่นสัมพัทธ์ (H_t/d) แสดงในภาคผนวก ข-3

ทั้งนี้ยังพบว่า เมื่อพิจารณาตัวแปรความลึกการจมโครงสร้าง (D) ร่วมด้วยแล้ว จะเห็นความสัมพันธ์อย่างชัดเจน โดยที่ค่าความลึกการจมโครงสร้างน้อยจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลิ่นที่มาก และมีแนวโน้มของการเรียงลำดับอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของทั้งสองกลุ่มตัวแปรต่อพฤติกรรมการส่งผ่านคลิ่น

5.6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับความชันคลื่น

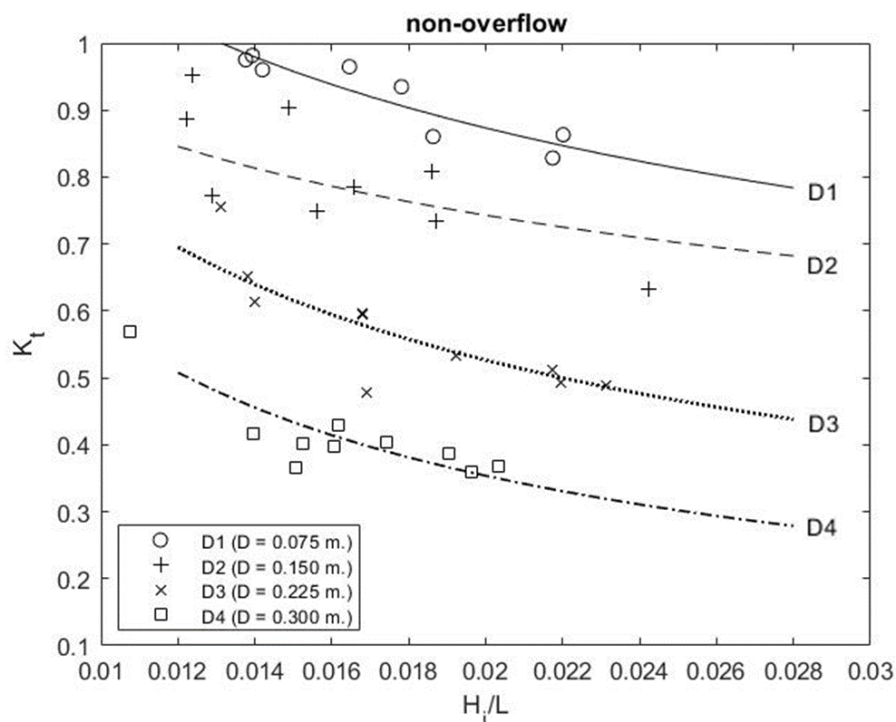
สำหรับการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของการส่งผ่านคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของตัวแปรไร้นิติกลุ่มคุณสมบัติคลื่นตัวสุดท้าย คือ ความชันคลื่น (wave steepness) โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างต่อความยาวคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง (H/L) โดยในการศึกษานี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความชันคลื่น 5 ค่าด้วยกัน โดยอยู่ในช่วงระหว่าง 0.010-0.013, 0.013-0.016, 0.016-0.019, 0.019-0.022 และ 0.022-0.025 ตามลำดับ จากข้อมูลสามารถสร้างเส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 5-15 สำหรับกรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และรูปที่ 5-16 สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง ซึ่งพบความสัมพันธ์ คือ เมื่อความชันคลื่นเพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะมีค่าลดน้อยลง



รูปที่ 5-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับความชันคลื่น (H/L) กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

สาเหตุของความสัมพันธ์ในลักษณะดังกล่าวเนื่องจาก การที่คลื่นมีความชันคลื่นมากนั้น อธิบายได้ถึงคลื่นที่มีความสูงมาก ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสลายพลังงานโดยโครงสร้างได้มาก (Biesheuvel, 2013) ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.6.4 หรือสามารถอธิบายได้ถึงคลื่นที่มีความยาวคลื่นน้อย ที่มีการกระจายคลื่นลงไปได้ในระดับไม่ลึก และเกิดการส่งผ่านคลื่นผ่านโครงสร้างได้น้อย (U.S.

CERC., 1984) ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.6.3 ด้วยเหตุผลโดยรวมเป็นเหตุให้พลังงานที่ส่งผ่านโครงสร้างไปได้ลดน้อยลง เมื่อความชันคลื่นเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังสามารถให้เหตุผลอื่นได้ว่า คลื่นมีความชันคลื่นมากนั้น แสดงถึงการที่คลื่นมีความสูงมากและความยาวนาน ซึ่งเอื้อต่อการแตกตัวอันนำไปสู่การสลายพลังงานโดยโครงสร้าง (Sawaragi, 1995) ดังนั้นคลื่นที่มีความชันมากเมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างแล้ว จึงอาจเกิดการสลายพลังงานได้ง่ายและมากกว่าคลื่นที่มีความชันน้อย ส่งผลให้พลังงานเหลือส่งผ่านไปได้น้อย ดังแสดงให้เห็นด้วยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่น้อยลง เมื่อความชันคลื่นที่เคลื่อนที่สู่โครงสร้างมีค่ามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาของ Biesheuvel (2013) สำหรับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับความชันคลื่น (H_1/L) กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

จากข้อมูลพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นจะพบว่า ขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นนั้นจะมีแนวโน้มลู่เข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อความชันคลื่น (H_1/L) มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้กราฟในรูปที่ 5-15 และรูปที่ 5-16 นั้นมีลักษณะของการลู่เข้าสู่ค่าคงที่ที่ชัดเจน และสามารถกำหนดให้อยู่ในรูปของสมการที่ 5-9

$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น, } K_t = \alpha \left(\frac{H_i}{L} \right)^\beta \quad (5-9)$$

สำหรับรายละเอียดและผลการวิเคราะห์ของสมการความถดถอยของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นและความชันคลื่น (H_i/L) แสดงในภาคผนวก ข-3

ทั้งนี้ยังพบว่า เมื่อพิจารณาตัวแปรความลึกการจมโครงสร้าง (D) ร่วมด้วยแล้ว จะเห็นความสัมพันธ์อย่างชัดเจน โดยที่ค่าความลึกการจมโครงสร้างน้อยจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่มาก และมีแนวโน้มของการเรียงลำดับอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ร่วมกันของทั้งสองกลุ่มตัวแปรต่อพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่น

5.7 การวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับตัวแปรไร้หน่วย

จากผลการศึกษาที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 5.6 ซึ่งกล่าวถึงความสัมพันธ์แบบเอกภาพระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยแต่ละตัวกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน โดยแสดงออกมาในรูปของเส้นแนวโน้มและสมการกำลังที่ได้จากการวิเคราะห์ความถดถอยของความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยตัวใดตัวหนึ่งเท่านั้น อันประกอบด้วยกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยที่เกี่ยวกับโครงสร้าง คือ ความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์ (b/L) และปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) และกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยที่มีเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติคลื่น คือ ความลึกสัมพัทธ์ (d/L), ความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (H_i/d), และความชันคลื่น (H_i/L) ทั้งนี้ได้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยร่วมกันระหว่างกลุ่มตัวแปรโครงสร้างและกลุ่มตัวแปรคุณสมบัติคลื่น กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น ซึ่งอาจสามารถสรุปในรูปสมการความสัมพันธ์ได้

สำหรับการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ร่วมกับตัวแปรไร้หน่วยที่มีการเปลี่ยนแปลงอื่น ๆ และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น ทั้งในกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้างและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงซ้อน (multiple regression analysis) จะมีแนวคิดและหลักการในการวิเคราะห์เหมือนกับในกรณีของพฤติกรรมการสะท้อน ดังที่กล่าวไปในหัวข้อ 4.6 และได้ผลของสมการความสัมพันธ์ในรูปของสมการที่ 5-10

$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น, } K_t = \alpha \left(\frac{b}{L} \right)^{\beta_1} (\Phi)^{\beta_2} \left(\frac{d}{L} \right)^{\beta_3} \left(\frac{H_i}{d} \right)^{\beta_4} \left(\frac{H_i}{L} \right)^{\beta_5} \quad (5-10)$$

โดยที่ α

คือ ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของสมการ

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ และ β_5

คือ ค่าสัมประสิทธิ์ชี้กำลังในแต่ละกลุ่มตัวแปร

จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เพื่อทดสอบความแตกต่างของข้อมูลที่ได้รับปัจจัยที่แตกต่างกัน โดยเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว หรือ 1-Way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เพื่อทดสอบว่ากลุ่มตัวแปรที่ศึกษาตัวใดตัวหนึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นหรือไม่ โดยในขั้นต้นจะต้องพิจารณาถึงอิทธิพลของตัวแปรที่ศึกษาต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น ผ่านการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วน (coefficient of partial correlation) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับตัวแปรศึกษาตัวใดตัวหนึ่งโดยกำหนดให้ตัวแปรอื่น ๆ มีค่าคงที่ เพื่อพิจารณาเฉพาะกลุ่มตัวแปรใดหน่วยที่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่น (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2561) สำหรับการวิเคราะห์ความถดถอยและการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังกล่าวนี้จะดำเนินการด้วยโปรแกรม SPSS โดยมีแนวคิดของการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่าง ๆ แสดงในภาคผนวก ข-2 และผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.7.1 สมการความสัมพันธ์ในกรณีคลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง

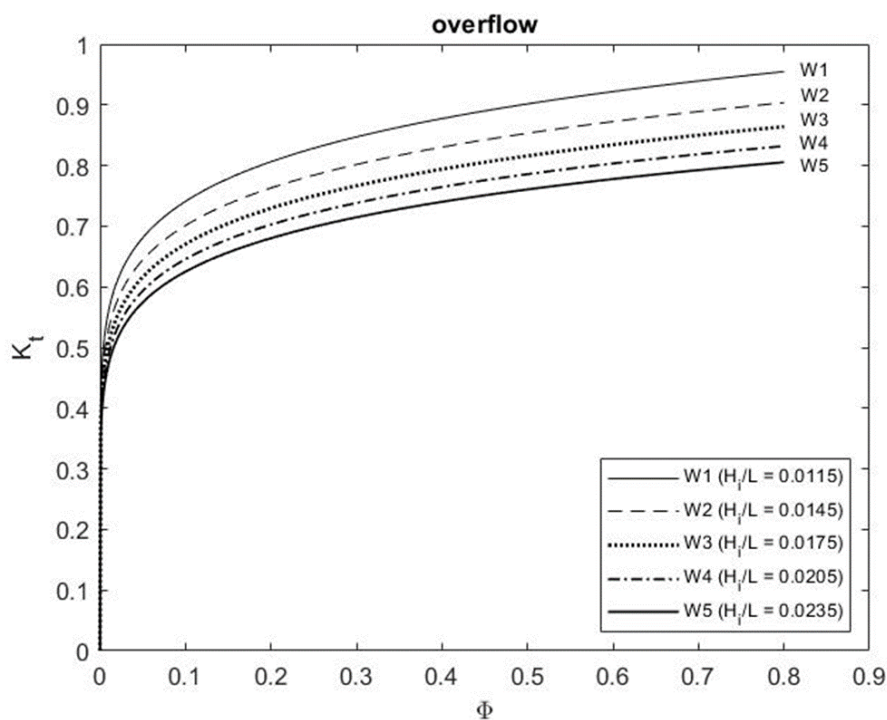
สำหรับการพิจารณาเพื่อวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับกลุ่มตัวแปรใดหน่วยต่าง ๆ สำหรับกรณีคลื่นสั้นข้ามโครงสร้างนั้น จะทำการทดสอบว่าตัวแปรที่ศึกษาตัวใดตัวหนึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นหรือไม่ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว หรือ 1-Way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้ค่าแสดงนัยสำคัญของการตรวจสอบสมมติฐาน (α) เท่ากับ 0.05

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ในหัวข้อ 5.6 สามารถสรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในกรณีคลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง มีความสัมพันธ์กับตัวแปรใดหน่วยปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) และความชันคลื่น (H/L) โดยเห็นได้จากแนวโน้มของข้อมูลที่กระจายตัวแบบสมการกำลังและมีการเรียงลำดับของเส้นกราฟอย่างชัดเจน ประกอบกับสมการความสัมพันธ์ที่วิเคราะห์ได้จากเส้นแนวโน้มของแต่ละตัวแปรกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น ได้ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจโดยรวมที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มตัวแปรใดหน่วยอื่น ๆ อย่างไรก็ตามกรณีศึกษาที่มีความชันคลื่นอยู่ในช่วง 0.013 – 0.016 (W_2) นั้น ไม่มีความสัมพันธ์อย่างชัดเจนกับพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นในกรณีดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีบางกรณีศึกษาที่ข้อมูลให้ผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมากกว่า 1 ซึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 5.2 ดังนั้นผู้ศึกษาจึงไม่นำเข้าข้อมูลที่เก็บได้จากกรณีศึกษา W_2 และกรณีศึกษาที่มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมากกว่า 1 สู่วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์

ความแปรปรวนให้ผลลัพธ์ของสมการความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 5-11 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 0.68 สำหรับรายละเอียดในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงเพิ่มเติมในภาคผนวก ข-2

$$K_t = 0.339 \left(\frac{H_i}{L} \right)^{-0.238} (\Phi)^{0.122} \quad (5-11)$$

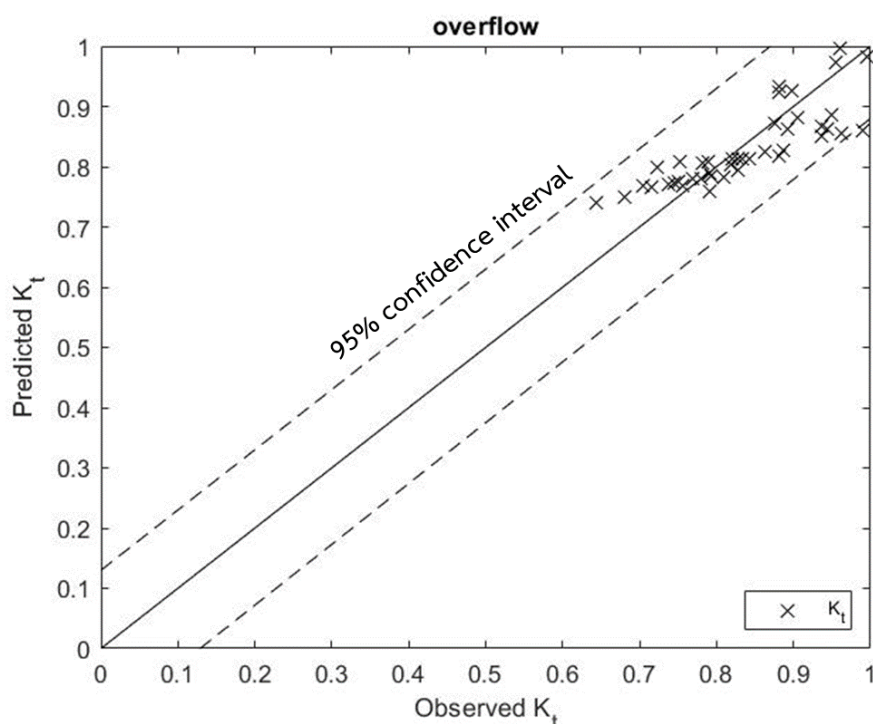
สมการที่ 5-11 เป็นสมการที่วิเคราะห์จากช่วงข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองที่มีเงื่อนไขจำกัด ส่งผลให้สามารถบรรยายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นตามลักษณะทางกายภาพได้เฉพาะในช่วงที่คลื่นมีความชันคลื่น (H_i/L) มากกว่า 0.01 และค่าปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) น้อยกว่า 0.80 เท่านั้น โดยสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5-17



รูปที่ 5-17 กราฟบรรยายสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น
กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

เมื่อวิเคราะห์สมการได้แล้ว จึงนำสมการที่ได้มาทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจากกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยในแต่ละกรณีศึกษา และนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่วัดได้จากการทดลองในแต่ละกรณีศึกษา พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์มีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากชุดข้อมูลที่วัดจริงจากการทดลอง ดัง

แสดงในรูปที่ 5-18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่คำนวณจากสมการความสัมพันธ์และที่วิเคราะห์ได้จากข้อมูลที่เก็บจริงมีความสอดคล้องกับเส้น 45 องศา และกระจายตัวภายในเส้นระดับความเชื่อมั่น (confidence interval) ที่ 95% แสดงให้เห็นว่ากลุ่มตัวแปรไร้หน่วยปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) และความชันคลื่น (H/L) มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น และมีความน่าเชื่อถือที่จะใช้สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น สำหรับกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ 5-18 กราฟการกระจายของข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น
กรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

5.7.2 สมการความสัมพันธ์ในกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

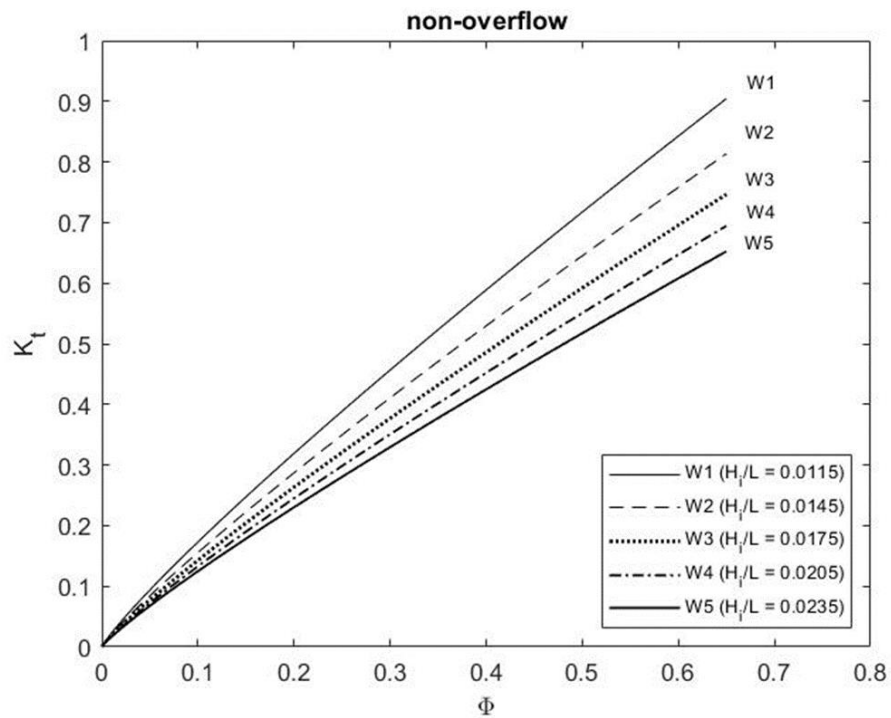
สำหรับกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้างนั้น จะต้องทำการทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ศึกษาตัวใดตัวหนึ่งกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นก่อน โดยพบว่าตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นอย่างมีนัยสำคัญสำหรับกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง ได้แก่ ตัวแปรไร้หน่วยปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) และความชันคลื่น (H/L) เช่นเดียวกัน โดยเห็นได้จากแนวโน้มของข้อมูลที่กระจายตัวแบบสมการกำลังและมีการเรียงลำดับของเส้นกราฟอย่างชัดเจน ประกอบกับสมการความสัมพันธ์ที่วิเคราะห์ได้จากเส้นแนวโน้มของแต่ละตัวแปรกับค่าสัมประสิทธิ์

การส่งผ่านคลื่น ได้ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจโดยรวมที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยอื่น ๆ อย่างไรก็ตามกรณีศึกษาที่มีความชันคลื่นอยู่ในช่วง 0.013 – 0.016 (W2) นั้น ไม่มีความสัมพันธ์อย่างชัดเจนกับพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นในกรณีดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีบางกรณีศึกษาที่ข้อมูลให้ผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมากกว่า 1 ซึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 5.2 ดังนั้นผู้ศึกษาจึงไม่นำเข้าข้อมูลที่เก็บได้จากกรณีศึกษา W2 และกรณีศึกษาที่มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมากกว่า 1 สู่กระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับผลลัพธ์ของสมการความถดถอยที่วิเคราะห์ได้นั้นแสดงดังสมการที่ 5-12 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) ที่มากที่สุดเท่ากับ 0.94 สำหรับรายละเอียดในการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถแสดงเพิ่มเติมในภาคผนวก ข-2

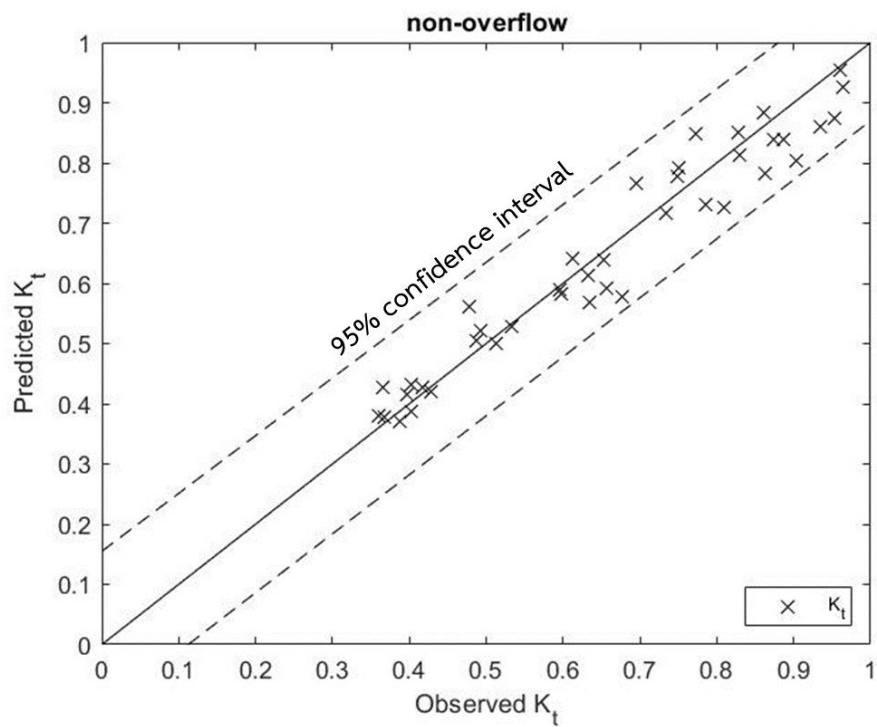
$$K_t = 0.172 \left(\frac{H_i}{L} \right)^{-0.457} (\Phi)^{0.884} \quad (5-12)$$

สมการที่ 5-12 เป็นสมการที่วิเคราะห์จากช่วงข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองที่มีเงื่อนไขจำกัดส่งผลให้สามารถบรรยายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นตามลักษณะทางกายภาพได้เฉพาะในช่วงที่คลื่นมีความชันคลื่น (H_i/L) มากกว่า 0.01 และค่าปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) น้อยกว่า 0.65 เท่านั้น โดยสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5-19

เมื่อวิเคราะห์สมการได้แล้ว จึงนำสมการที่ได้มาทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจากกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยในแต่ละกรณีศึกษา และนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่วัดได้จากการทดลองในแต่ละกรณีศึกษา พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์มีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากชุดข้อมูลที่วัดจริงจากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 5-20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่คำนวณจากสมการความสัมพันธ์และที่วิเคราะห์ได้จากข้อมูลที่เก็บจริงมีความสอดคล้องกับเส้น 45 องศา และกระจายตัวภายในเส้นระดับความเชื่อมั่น (confidence interval) ที่ 95% แสดงให้เห็นว่ากลุ่มตัวแปรไร้หน่วยปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) และความชันคลื่น (H_i/L) มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น และมีความน่าเชื่อถือที่จะใช้สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ 5-19 กราฟบรรยายสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น
กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง



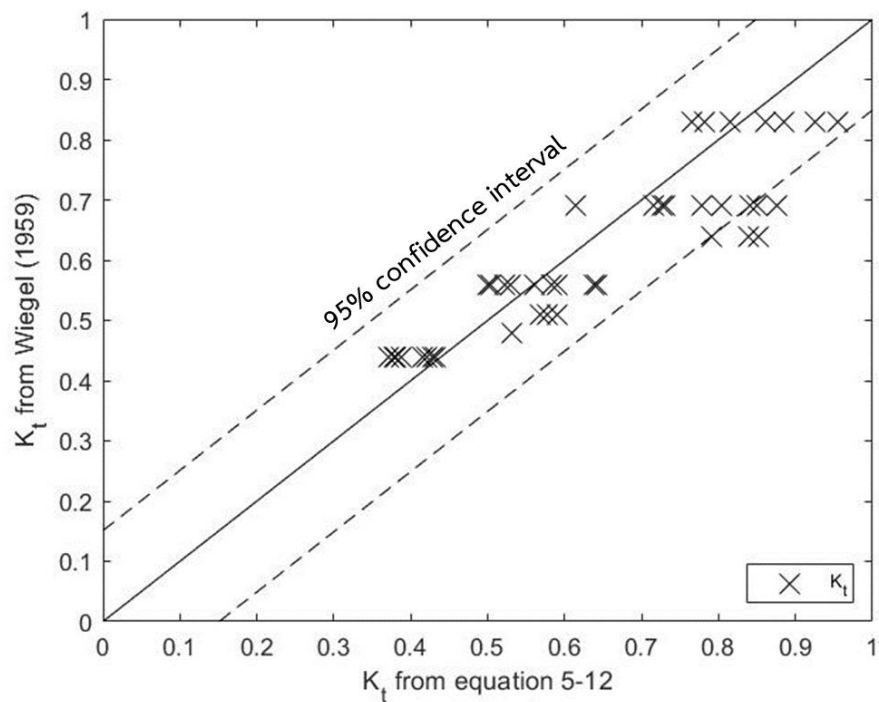
รูปที่ 5-20 กราฟการกระจายของข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น
กรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

จากสมการทั้ง 2 กรณีศึกษาจะพบว่า กลุ่มตัวแปรไร้นหน่วยที่มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของทั้งกรณีทีคลื่นล้นข้ามโครงสร้างและไม่ล้นข้ามโครงสร้างนั้น ได้แก่ ปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) และความชันคลื่น (H/L) แสดงให้เห็นได้ว่าคุณสมบัติของคลื่นที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการส่งผ่านคลื่นจากเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน คือความสูงคลื่นและความยาวคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง และลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างที่มีอิทธิพลสูงสุดคือพื้นที่หน้าตัดที่ตื้นน้ำ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 5.6 ดังนั้นสมการทั้งสองนี้จึงมีความน่าเชื่อถือที่จะใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น เนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน

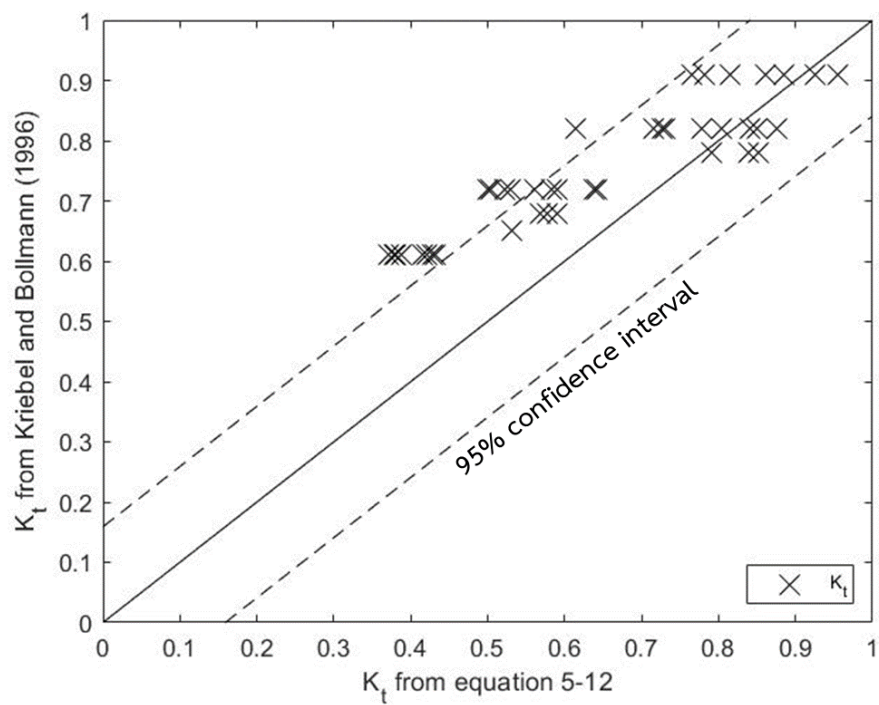
5.8 การเปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมา

จากหัวข้อ 5.7 ได้ผลลัพธ์เป็นสมการความสัมพันธ์ที่ใช้ในการคำนวณพฤติกรรมของการส่งผ่านคลื่นเนื่องจากตัวแปรไร้นหน่วยที่มีความเกี่ยวข้องกับเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน ทั้งนี้ Wiegel (1959) ได้ศึกษาสมการความสัมพันธ์ในเขื่อนกันคลื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่พิจารณาเฉพาะส่วนของโครงสร้างด้านบนที่ไม่มีเสารองรับ โดยใช้หลักการของทูลอยกันคลื่นแบบโครงสร้างยึดแน่น ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 2.5.2 จากนั้น Kriebel and Bollmann (1996) ได้ทำการศึกษาสมการของ Wiegel (1959) เพิ่มเติม โดยใช้หลักการเดียวกันแต่มีการปรับแก้ค่าในบางตัวแปร ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5.2 สมการของผู้ศึกษาทั้งสองได้ถูกวิเคราะห์ด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ และได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย ในการศึกษาต่อยอดและใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาออกแบบด้านพฤติกรรมของการส่งผ่านคลื่นผ่านทูลอยกันคลื่นและเขื่อนกันคลื่นชนิดใกล้เคียง อย่างไรก็ตามสมการของ Wiegel (1959) และ Kriebel and Bollmann (1996) ดังแสดงในตารางที่ 2-6 นั้น ได้บรรยายพฤติกรรมของการส่งผ่านคลื่นเฉพาะในกรณีทีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้างเท่านั้น และไม่พบผู้ศึกษาสมการความสัมพันธ์ในกรณีทีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง อีกทั้งยังพิจารณาเฉพาะตัวแปรความยาวคลื่น (L), ความลึกการจมโครงสร้าง (D) และความลึกน้ำ (d) เท่านั้น

หัวข้อนี้ได้้นำค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ที่สร้างได้ของกรณีทีคลื่นไม่ล้นข้ามในหัวข้อ 5.7.2 มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่คำนวณได้จากสมการของผู้ศึกษาก่อนหน้านี้คือ Wiegel (1959) และ Kriebel and Bollmann (1996) ที่วิเคราะห์จากเขื่อนกันคลื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่คำนวณจากสมการที่ 5-12 กับค่าที่คำนวณได้จากสมการของผู้ศึกษาก่อนหน้านี้ เพื่อพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อนจากกันของสมการทั้งสอง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5-21



ก) เปรียบเทียบกับ Wiegel (1959)



ข) เปรียบเทียบกับ Kriebel and Bollmann (1996)

รูปที่ 5-21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมการที่สร้างขึ้นกับสมการของศึกษาก่อนหน้า

จากการเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 5-21(ก) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์มีความสอดคล้องกับค่าที่คำนวณได้จากสมการของ Wiegel (1959) โดยเห็นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่คำนวณจากสมการความสัมพันธ์และที่คำนวณได้จากสมการของ Wiegel (1959) มีความสอดคล้องกับเส้น 45 องศา และกระจายตัวภายในเส้นระดับความเชื่อมั่น (confidence interval) ที่ 95% จึงเป็นเครื่องพิสูจน์ให้เห็นว่าสมการที่ 5-12 มีความสอดคล้องกับสมการของ Wiegel (1959) ซึ่งถูกใช้อ้างอิงอย่างมากมาในอดีต สำหรับการศึกษารุ่นลอยกันคลื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกับเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน ในกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

สำหรับการเปรียบเทียบกับสมการของ Kriebel and Bollmann (1996) ที่แสดงในรูปที่ 5-21(ข) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่คำนวณได้จากสมการของ Kriebel and Bollmann (1996) ได้ให้ค่าที่สูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่คำนวณได้จากสมการที่ 5-12 เล็กน้อย โดยเฉพาะในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีค่าประมาณ 0.4 – 0.6 โดยเห็นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่คำนวณจากสมการความสัมพันธ์และที่คำนวณได้จากสมการของ Kriebel and Bollmann (1996) มีตำแหน่งอยู่เหนือเส้น 45 องศาเล็กน้อย และกระจายตัวสูงเกินกว่าเส้นระดับความเชื่อมั่น (confidence interval) ที่ 95% อย่างไรก็ตามในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีค่ามากขึ้น สมการทั้งสองได้ให้ผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่มีความสอดคล้องกันเพิ่มมากขึ้น

ทั้งนี้สมการของ Wiegel (1959) และสมการของ Kriebel and Bollmann (1996) ล้วนเป็นสมการที่วิเคราะห์จากพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของรุ่นลอยกันคลื่นแบบยึดแน่น ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน ด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ภายใต้สมมติฐานที่จำกัด และพิจารณาเพียงเฉพาะตัวแปรความยาวคลื่น (L), ความลึกการจมโครงสร้าง (D) และความลึกน้ำ (d) เท่านั้น ดังนั้นสมการที่ 5-12 ซึ่งพิจารณาความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างตัวแปรคุณสมบัติคลื่นถึง 2 ตัวแปร ด้วยตัวแปรความชันคลื่น (H/L) และลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน โดยวิเคราะห์จากข้อมูลที่เก็บจริงในแบบจำลองทางกายภาพ อีกทั้งยังให้ผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับสมการของผู้ศึกษาก่อนหน้า จึงมีความน่าเชื่อถือในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น เนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน ในกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

สำหรับกรณีที่คลื่นล้มข้ามโครงสร้าง และสมการความสัมพันธ์จากพฤติกรรมการสะท้อนนั้น ไม่พบผู้ศึกษาก่อนหน้าที่ศึกษาพฤติกรรมในลักษณะดังกล่าว และให้ผลลัพธ์ของสมการความสัมพันธ์ที่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้ อย่างไรก็ตามสมการที่ถูกสร้างขึ้นในการศึกษานี้ทั้งหมด มีแนวคิดหลักการและหลักการเดียวกับการวิเคราะห์สมการที่ 5-12 ดังนั้นสมการทุกสมการจึงมีความน่าเชื่อถือในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน และการสะท้อนของคลื่น เนื่องจากอิทธิพลของเงื่อนไขคลื่นแบบไม่เต็มส่วนเหมือนกัน



บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ทำการจำลองพฤติกรรมของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน (partial breakwater) ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นโครงสร้างที่วางตัวอยู่ในบริเวณผิวน้ำ มีความแข็งเกร็ง (rigid) ไม่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์เมื่อเทียบกับท้องน้ำ หรือมีน้อยมากจนสามารถละการพิจารณาได้ และมีเสาเข็มรองรับแผ่นโครงสร้างอยู่ทั้งสองฝั่ง การศึกษากระทำด้วยแบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ ในอ่างจำลองคลื่นขนาดความกว้าง 10 เมตร ยาว 20 เมตร และสูง 0.70 เมตร เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของการส่งผ่านคลื่น และการสะท้อนของคลื่น เนื่องจากอิทธิพลของคุณสมบัติคลื่น และลักษณะทางกายภาพของโครงสร้าง ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นและสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น ตามลำดับ โดยตัวแปรที่ทำการเปลี่ยนแปลง ได้แก่ ความลึกการจมโครงสร้าง (D), ระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง (B), การยอมให้คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และคุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น คือ ความชันคลื่น (H/L) ทั้งนี้โครงสร้างเขื่อนกันคลื่นได้ถูกย่อขนาดจากขนาดที่มีใช้อยู่จริงบนชายฝั่งทะเล บริเวณหน้าวัดขุนสมุทราวาส ชุมชนบ้านขุนสมุทรวิน จังหวัดสมุทรปราการ ด้วยกฎความคล้ายคลึง (laws of similarity) โดยย่อขนาดทางเรขาคณิตลง 4 เท่า และย่อขนาดทางพลศาสตร์ลง 2 เท่า แบบจำลองเขื่อนกันคลื่นใช้เหล็กกล่องรูปพรรณในการจำลองโดยผลจากลักษณะผิวสัมผัสของโครงสร้าง

การศึกษาได้กำหนดขอบเขตโดยให้ระดับน้ำ (d) คงที่เท่ากับ 0.45 เมตร และความหนาของโครงสร้าง (b) คงที่เท่ากับ 0.0375 เมตร ศึกษาโดยทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่ศึกษา 3 ตัวแปร ได้แก่ ความชันคลื่น 5 ค่าในช่วงระหว่าง 0.010-0.013, 0.013-0.016, 0.016-0.019, 0.019-0.022 และ 0.022-0.025 ค่าความลึกการจมโครงสร้าง 4 ค่า คือ 0.075, 0.150, 0.225 และ 0.300 เมตร ค่าระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง 3 ค่า คือ 0.5, 1.0 และ 1.5 เมตร นอกจากนั้นยังมีกรณีของพฤติกรรมเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านโครงสร้างที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน คือ การยอมให้คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และไม่ยอมให้คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง จึงสามารถสรุปจำนวนการทดลองได้ทั้งสิ้น 120 การทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลความถี่ด้วยวิธี power spectral energy (PSE) ภายใต้สมมติฐานของทฤษฎีคลื่นความสูงน้อยที่มีความลึกน้ำปานกลาง และจำแนกด้วยคลื่นบริเวณด้านหน้าโครงสร้างด้วยวิธีของ Goda and Suzuki (1976)

การศึกษาในกรณีต่าง ๆ สามารถวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมการส่งผ่าน และพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่น เนื่องจากอิทธิพลของคุณสมบัติคลื่นและลักษณะทางกายภาพของเชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน โดยสามารถสรุปรายละเอียดที่มีสาระสำคัญของผลการศึกษาดังต่อไปนี้

6.1.1 พฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นจากเชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนในการศึกษานี้ จะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น (reflection coefficient, K_r) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความสูงคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น ต่อความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น โดยพบว่าขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นมีค่าในช่วงต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 6-1 ในภาพรวมของความสัมพันธ์ยังพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจะมีค่าลดลงเมื่อคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

ตารางที่ 6-1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นเนื่องจากเชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน

กรณีศึกษา	ความชันคลื่น	ช่วงสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น (K_r)
คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง	0.010 – 0.013	0.44 – 0.58
	0.013 – 0.016	0.26 – 0.39
	0.016 – 0.019	0.23 – 0.52
	0.019 – 0.022	0.10 – 0.57
	0.022 – 0.025	0.08 – 0.38
คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง	0.010 – 0.013	0.48 – 0.82
	0.013 – 0.016	0.28 – 0.69
	0.016 – 0.019	0.38 – 0.67
	0.019 – 0.022	0.32 – 0.66
	0.022 – 0.025	0.20 – 0.59

จากผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นร่วมกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นมีความสัมพันธ์กับตัวแปรไร้หน่วยเกี่ยวกับโครงสร้าง ได้แก่ ความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์ (b/L) และความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) และตัวแปรไร้หน่วยเกี่ยวกับคุณสมบัติคลื่น คือ ความลึกสัมพัทธ์ (d/L), ความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (H_i/d) และความชันคลื่น (H_i/L) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) จากการพิจารณาพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นร่วมกับความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์ (b/L) พบความสัมพันธ์ คือ เมื่อความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจะมีค่าลดลง ทั้งในกรณีที่คลื่นล้นข้ามและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง
- 2) จากการพิจารณาพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นร่วมกับความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) พบความสัมพันธ์ คือ เมื่อความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ทั้งในกรณีที่คลื่นล้นข้ามและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง
- 3) จากการพิจารณาพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นร่วมกับความลึกสัมพัทธ์ (d/L) พบความสัมพันธ์ คือ เมื่อความลึกสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจะมีค่าลดน้อยลง ทั้งในกรณีที่คลื่นล้นข้ามและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง
- 4) จากการพิจารณาพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นร่วมกับความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (H/d) พบความสัมพันธ์ คือ เมื่อความสูงคลื่นสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจะมีค่าลดน้อยลง ทั้งในกรณีที่คลื่นล้นข้ามและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง
- 5) จากการพิจารณาพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นร่วมกับความชันคลื่น (H/L) พบความสัมพันธ์ คือ เมื่อความชันคลื่นเพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจะมีค่าลดน้อยลง ทั้งในกรณีที่คลื่นล้นข้ามและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

จากการนำข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่ได้จากการทดลองทั้งหมด มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ร่วมกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยต่าง ๆ เพื่อสร้างเป็นสมการความถดถอยที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นเนื่องจากเชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน พบว่าพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นนั้นมีความสัมพันธ์กับตัวแปรไร้หน่วยอย่างมีนัยสำคัญเพียงแค่ 2 กลุ่มตัวแปรเท่านั้น คือ กลุ่มตัวแปรไร้หน่วยเกี่ยวกับโครงสร้าง ได้แก่ ความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) และตัวแปรไร้หน่วยเกี่ยวกับคุณสมบัติคลื่น คือ ความชันคลื่น (H/L) เท่านั้น ทั้งในกรณีที่คลื่นล้นข้ามและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง โดยได้สมการความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\text{กรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง} \quad K_r = 0.006 \left(\frac{H_i}{L} \right)^{-1.036} \left(\frac{D}{d} \right)^{0.480} \quad (6-1)$$

$$\text{กรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง} \quad K_r = 0.065 \left(\frac{H_i}{L} \right)^{-0.536} \left(\frac{D}{d} \right)^{0.267} \quad (6-2)$$

สมการที่ 6-1 และสมการที่ 6-2 เป็นสมการที่วิเคราะห์จากช่วงข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลอง ที่มีเงื่อนไขจำกัด ส่งผลให้สามารถบรรยายค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นตามลักษณะทางกายภาพได้เฉพาะในช่วงที่คลื่นมีความชันคลื่น (H/L) มากกว่า 0.01 และค่าความลึกโครงสร้างสัมพันธ์ (D/d) น้อยกว่า 0.80 เท่านั้น โดยให้ค่าของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลอง ทั้งในกรณีที่คลื่นล้นข้ามและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

6.1.2 พฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนในการศึกษานี้ ได้พิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (transmission coefficient, K_t) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความสูงคลื่นที่สามารถส่งผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นไปได้ ต่อความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น โดยพบว่าขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีค่าในช่วงต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 6-2 ในภาพรวมของความสัมพันธ์ยังพบว่า ในกรณีที่โครงสร้างมีความลึกการจมมาก ๆ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง แต่จะให้ผลที่ตรงกันข้ามเมื่อโครงสร้างมีความลึกการจมน้อย ๆ

ตารางที่ 6-2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเนื่องจากเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน

กรณีศึกษา	ความชันคลื่น	ช่วงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (K_t)
คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง	0.010 – 0.013	0.88 – 0.99
	0.013 – 0.016	0.86 – 0.99
	0.016 – 0.019	0.82 – 0.99
	0.019 – 0.022	0.72 – 0.89
	0.022 – 0.025	0.64 – 0.81
คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง	0.010 – 0.013	0.63 – 0.96
	0.013 – 0.016	0.57 – 0.96
	0.016 – 0.019	0.36 – 0.97
	0.019 – 0.022	0.39 – 0.94
	0.022 – 0.025	0.36 – 0.84

จากการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นในแนวตั้งฉากโครงสร้างเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมคลื่นด้านหลังโครงสร้าง โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับระยะตามแนวตั้งฉากโครงสร้างต่อความยาวคลื่นในเงื่อนไขต่าง ๆ (y/L) ตามการศึกษาของ Johnson (1951) สามารถอธิบายได้ว่า ที่บริเวณด้านหลังโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น จะเกิดการแปรปรวนของค่า

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น โดยพบว่า ที่ความชันคลื่นในช่วง 0.010 – 0.013, 0.013 – 0.016 และ 0.016 – 0.025 จะมีระยะของความแปรปรวนจากโครงสร้างถึงประมาณ 0.65, 0.60 และ 0.50 เท่าของความยาวคลื่น ตามลำดับ และมีจุดสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านอยู่ที่กึ่งกลางของระยะการแปรปรวน

จากการศึกษาท่อนำถึงพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นพบว่า พฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นมีความผันแปรตามลักษณะความโปร่งของโครงสร้าง ดังนั้นเพื่อให้ได้รูปสมการที่สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพและง่ายต่อการอธิบาย ร่วมกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย จึงได้มีการปรับเปลี่ยนตัวแปรบางส่วน โดยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีความสัมพันธ์กับตัวแปรไร้หน่วยเกี่ยวกับโครงสร้าง ได้แก่ ความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์ (b/L) และปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) และตัวแปรไร้หน่วยเกี่ยวกับคุณสมบัติคลื่น คือ ความลึกสัมพัทธ์ (d/L), ความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (H/d) และความชันคลื่น (H/L) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) จากการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นร่วมกับความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์ (b/L) พบความสัมพันธ์ คือ เมื่อความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะมีค่าลดลงทั้งในกรณีที่คลื่นล้นข้ามและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง
- 2) จากการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นร่วมกับปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) พบความสัมพันธ์ คือ เมื่อปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่นเพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ทั้งในกรณีที่คลื่นล้นข้ามและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง
- 3) จากการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นร่วมกับความลึกสัมพัทธ์ (d/L) พบความสัมพันธ์ คือ เมื่อความลึกสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะมีค่าลดน้อยลง ทั้งในกรณีที่คลื่นล้นข้ามและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง
- 4) จากการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นร่วมกับความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (H/d) พบความสัมพันธ์ คือ เมื่อความสูงคลื่นสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะมีค่าลดน้อยลง ทั้งในกรณีที่คลื่นล้นข้ามและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง
- 5) จากการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นร่วมกับความชันคลื่น (H/L) พบความสัมพันธ์ คือ เมื่อความชันคลื่นเพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะมีค่าลดน้อยลง ทั้งในกรณีที่คลื่นล้นข้ามและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

จากการนำข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่ได้จากการทดลองทั้งหมด มาวิเคราะห์ ความแปรปรวนร่วมกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยต่าง ๆ เพื่อสร้างเป็นสมการความถดถอยที่ใช้ในการ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเนื่องจากเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนพบว่า พฤติกรรมการ ส่งผ่านคลื่นมีความสัมพันธ์กับตัวแปรไร้หน่วยอย่างมีนัยสำคัญเพียงแค่ 2 กลุ่มตัวแปรเท่านั้น คือ กลุ่ม ตัวแปรไร้หน่วยเกี่ยวกับโครงสร้าง ได้แก่ ปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) และตัวแปรไร้ หน่วยเกี่ยวกับคุณสมบัติคลื่น คือ ความชันคลื่น (H_i/L) เท่านั้น ทั้งในกรณีที่คลื่นล้นข้ามและไม่ล้นข้าม โครงสร้าง โดยได้สมการความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\text{กรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง} \quad K_t = 0.339 \left(\frac{H_i}{L}\right)^{-0.238} (\Phi)^{0.122} \quad (6-3)$$

$$\text{กรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง} \quad K_t = 0.172 \left(\frac{H_i}{L}\right)^{-0.457} (\Phi)^{0.884} \quad (6-4)$$

สมการที่ 6-3 และสมการที่ 6-4 เป็นสมการที่วิเคราะห์จากช่วงข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลอง ที่มีเงื่อนไขจำกัด ส่งผลให้สามารถบรรยายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นตามลักษณะทางกายภาพได้ เฉพาะในช่วงที่คลื่นมีความชันคลื่น (H_i/L) มากกว่า 0.01 และค่าความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) น้อยกว่า 0.80 และ 0.65 สำหรับกรณีคลื่นล้นและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง ตามลำดับ โดยให้ค่าของ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลอง ทั้งในกรณีที่คลื่นล้น ข้ามและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

จากการนำสมการที่ 6-4 มาพิจารณาเปรียบเทียบกับสมการจากผลการศึกษาที่ผ่านมาในทูล อยกันคลื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกันของ Wiegel (1959) และ Kriebel and Bollmann (1996) ซึ่ง เป็นสมการที่วิเคราะห์จากกระบวนการทางคณิตศาสตร์ภายใต้สมมติฐานที่จำกัด และพิจารณาเพียง เฉพาะตัวแปรความยาวคลื่น (L), ความลึกการจมโครงสร้าง (D) และความลึกน้ำ (d) เท่านั้น ผลลัพธ์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่คำนวณได้จากสมการที่ 6-4 ซึ่งวิเคราะห์จากข้อมูลที่เก็บจริงใน แบบจำลองกายภาพ มีความสอดคล้องกับค่าที่คำนวณได้จากสมการของ Wiegel (1959) แต่ให้ค่าที่ น้อยกว่าค่าที่ได้จากสมการของ Kriebel and Bollmann (1996) เล็กน้อย อย่างไรก็ตามสมการที่ 6-4 ย่อมมีความน่าเชื่อถือเนื่องจากวิเคราะห์จากข้อมูลที่เก็บได้จริงในแบบจำลอง ทั้งนี้สำหรับกรณี ที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และสมการความสัมพันธ์จากพฤติกรรมการสะท้อนนั้น ไม่พบผู้ศึกษาก่อน หน้าที่ทำการศึกษาให้ผลลัพธ์ของสมการความสัมพันธ์ที่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) การศึกษานี้ได้ทำการเก็บข้อมูลเป็นระยะห่างจากโครงสร้างไปด้านหลังเพียง 4 เมตร เนื่องด้วยข้อจำกัดของขนาดอ่างจำลองคลื่น ประกอบกับได้ใช้คลื่นที่มีความยาวคลื่นมากในการศึกษา ส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างระยะห่างจากโครงสร้างต่อความยาวคลื่น (y/L) มีค่าน้อย ซึ่งในการออกแบบจริงนั้น ผู้ออกแบบต้องการทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในตำแหน่งที่ไกลจากโครงสร้างหรือใกล้ชายฝั่ง กล่าวคือในตำแหน่งที่ค่า y/L มาก เพื่อทราบถึงพฤติกรรมการป้องกันชายฝั่งที่แท้จริง ดังนั้นจึงควรออกแบบการทดลองให้ได้ข้อมูลในช่วงที่ค่า y/L มาก ๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลในการวิเคราะห์เพิ่มเติมที่สอดคล้องกับการออกแบบเพื่อใช้งานจริง
- 2) จากข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เก็บได้พบว่ามีบางตำแหน่ง ของบางกรณีศึกษาที่มีค่ามากกว่า 1 ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากอิทธิพลของความหนืดของน้ำ โดยเมื่อจำลองแบบจำลองจากโครงสร้างจริงแล้ว จะทำให้แบบจำลองมีขนาดเล็กลง จนชั้นขอบการไหล (boundary layer) ส่งอิทธิพลให้เกิดความคลาดเคลื่อนอย่างมีนัยสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของคลื่นที่มีขนาดเล็กมาก (Crowe et al., 2009) ดังนั้นจึงควรทำการทดลองด้วยความสูงคลื่นที่ไม่เล็กเกินไป เพื่อลดความคลาดเคลื่อนดังกล่าว
- 3) สมการที่วิเคราะห์ได้ในพฤติกรรมกระแสน้ำและการส่งผ่านนั้น สามารถบรรยายพฤติกรรมของคลื่นได้เพียงแคในช่วงของตัวแปรที่จำกัด เนื่องจากจำนวนข้อมูลนำเข้าที่น้อย ดังนั้นเพื่อสร้างสมการที่สามารถบรรยายพฤติกรรมคลื่นได้ในทุกช่วงของตัวแปร จึงควรเก็บข้อมูลเพื่อนำเข้าสู่การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่มากขึ้น
- 4) การศึกษานี้ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมกระแสน้ำและการส่งผ่านคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน โดยจำกัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวแปรที่สนใจตามข้อจำกัดของการศึกษาเท่านั้น ยังคงมีตัวแปรอื่น ๆ ที่สามารถอธิบายถึงลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างได้อีกหลายตัวแปร เช่น ความกว้างของโครงสร้าง, จำนวนชั้นของโครงสร้าง, รูปแบบการจัดเรียงชั้นของโครงสร้าง, ผิวสัมผัสของโครงสร้าง และความพรุนของโครงสร้าง เป็นต้น ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการศึกษาต่อไป นอกจากนี้จากผลการศึกษายังพบว่า พฤติกรรมคลื่นของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน อาจมีความสัมพันธ์บางอย่างกับตัวแปรความยาวคลื่น ประกอบกับการศึกษาก่อนหน้านี้เกี่ยวกับทึนลอยกันคลื่นได้กล่าวว่า ความยาวคลื่นเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการ

เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมคลื่น ดังนั้นจึงเห็นควรให้ศึกษาถึงอิทธิพลจากตัวแปรความยาวคลื่นโดยละเอียดเพิ่มเติมในชุดเครื่องมือที่มีความพร้อมต่อไป

- 5) จากการทดลองพบว่าโครงสร้างมีการโยกเนื่องจากแรงจากคลื่น ประกอบกับจุดเด่นของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนคือ สามารถส่งถ่ายแรงที่เกิดเนื่องจากคลื่นลงสู่ชั้นดินที่ลึกลงไป ดังนั้นพฤติกรรมของแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของคลื่นและลักษณะของโครงสร้างจึงควรเป็นอีกพฤติกรรมหนึ่งที่ควรศึกษาเพิ่มเติม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบความลึกของการปักเสาของโครงสร้าง และการออกแบบโครงสร้างอื่น ๆ ต่อไป
- 6) การพิจารณาแยกคลื่นบริเวณด้านหน้าโครงสร้างที่อ้างอิงด้วยวิธีการตามการศึกษาของ Goda and Suzuki (1976) เป็นการใช้อ้อมมูลคลื่นบริเวณด้านหน้าเพียง 2 ตำแหน่งเท่านั้น ตามข้อจำกัดของจำนวนเครื่องมือวัดที่มี อย่างไรก็ตามได้พบความคลาดเคลื่อนของข้อมูลจนเป็นเหตุให้ต้องใช้ตัวแปรปรับแก้ก่อนนำข้อมูลไปใช้งานจริง หากผู้ศึกษาสามารถจัดหาเครื่องมือได้มากกว่า 2 เครื่อง ผู้ศึกษาสามารถใช้วิธีการอื่นในการแยกได้ ซึ่งอาจเป็นวิธีการที่มีความทันสมัย และอาจให้ความแม่นยำมากกว่า
- 7) การศึกษานี้ได้ดำเนินการทดลองภายใต้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย ในเงื่อนไขของคลื่นในช่วงน้ำลึกปานกลางเท่านั้น ลักษณะของคลื่นในช่วงความลึกน้ำที่แตกต่าง อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสลายพลังงานของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในช่วงความลึกอื่น ๆ
- 8) คลื่นที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นคลื่นที่มีขนาดสม่ำเสมอ (regular wave), มีทิศทางตั้งฉากกับเขื่อนกันคลื่น และมีความชันคลื่นในช่วง 0.010 – 0.025 เท่านั้น ทั้งนี้คลื่นที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติมีลักษณะเป็นคลื่นไม่สม่ำเสมอ (irregular wave), เข้ากระทบกับโครงสร้างในหลายทิศทาง และมีช่วงความชันคลื่นที่หลากหลาย ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงคลื่นในรูปแบบอื่น ๆ รวมถึงเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางของคลื่น
- 9) การศึกษานี้ได้ศึกษาเพียงพฤติกรรมของการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นเท่านั้น เพื่อให้สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมในการสลายพลังงานของเขื่อนกันคลื่นได้มากยิ่งขึ้น จึงเห็นควรให้มีการศึกษาพฤติกรรมของความเร็วของอนุภาคน้ำใต้คลื่นทั้งในบริเวณด้านหน้าและด้านหลังของเขื่อนกันคลื่น เพื่อพิจารณาถึงพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นในระบบ และสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงพลังงานโดยรวมเนื่องจากเขื่อนกันคลื่น

- 10) การศึกษานี้ได้พิจารณาวิเคราะห์ข้อมูลที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองทางกายภาพ ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบอย่างหนึ่งทางด้านวิศวกรรมชายฝั่งทะเล แต่แบบจำลองดังกล่าวยังคงอยู่บนพื้นฐานตามขีดจำกัดของเครื่องมือที่จัดหาได้ ซึ่งไม่สามารถจำลองพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติที่มีลักษณะของความไม่แน่นอนได้ทุกประการ ดังนั้นจึงควรพึงระลึกไว้เสมอว่าข้อมูลจากแบบจำลองทางกายภาพนี้ ได้ให้คำตอบของปัญหาตามขอบเขตและข้อกำหนดในการจำลองเท่านั้น



บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- กรมอุทกศาสตร์. (2538). รายงานการวิเคราะห์ข้อมูลสมุทรศาสตร์เขตกกลางอ่าวไทย 2525-2536. กองสมุทรศาสตร์ กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ.
- กัลยา วานิชย์บัญชา. (2561). สถิติสำหรับงานวิจัย : หลักการเลือกใช้เทคนิคทางสถิติในงานวิจัย พร้อมทั้งอธิบายผลลัพธ์ที่ได้จาก SPSS: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กัลยา วานิชย์บัญชา และฐิตา วานิชย์บัญชา. (2561). การใช้ SPSS for Windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- การไฟฟ้านครหลวง. (2555). โครงการศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมเบื้องต้น การทำแนวป้องกันกักตเซาะชายฝั่งป้อมพระจุลจอมเกล้า. Retrieved from สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย:
- ชัยยุทธ ชินณะราศรี และคมสัน วิริยกิจจา. (2560). การตรวจสอบการส่งผ่านคลื่นของทุ่นลอยกันคลื่น. the วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 40.
- ณัฐ ฮุนพงษ์สิมานนท์. (2557). ผลของมาตราส่วนของแบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์ต่อการเลือกหินทิ้งในทางน้ำเปิด. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- ธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุลและคณะ. (2551). ขุนสมุทรจีน 49A2 ต้นแบบการแก้ไขปัญหาน้ำทะเลกัดเซาะหาดโคลน. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- ธีรนนท์ ปันใจลือ. (2558). ความสูงคลื่นที่ผ่านช่องว่างระหว่างโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นได้น้ำ. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- บุศวรรณ บิตร และคณะ. (2561). บทบาทของวิศวกรรมในการฟื้นฟูชุมชนที่ตั้งอยู่ในพื้นที่กัดเซาะรุนแรงของประเทศไทย. the การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23, นครนายก.
- ปราโมทย์ เตชะอำไพ และนิพลธ์ วรรณโสภาคย์. (2557). ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พงษ์สิทธิ์ ผลสมบุรณ์. (2561). การจำลองการรั่วไหลน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- พยอม รัตน์มณี และคณะ. (2551). การป้องกันแก้ไขปัญหากัดเซาะชายฝั่งแบบบูรณาการ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6, 38-44.
- เมธาฤทธิ์ แนมสัย. (2552). ผลของการจัดเรียงแนวเชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็มต่อลักษณะคลื่น.

- (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- วันวิสา มะมา. (2553). ลักษณะคลื่นของเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มที่จัดเรียงระยะห่างของเสาเข็มไม่เท่ากัน. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- สุวิร์ ศรียี่สุน. (2554). การส่งผ่านและการกระจายคลื่นของโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้งพร้อมด้วยรูปแบบกระแสน้ำ. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- เสวี จันทโรยธา. (2553). ชลศาสตร์. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อาทิตยา เกศมาริช. (2540). เภณฑ์การออกแบบเขื่อนกันคลื่นแยกในการป้องกันชายฝั่ง. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.

ภาษาอังกฤษ

- Adrian, S., Margarita, S., Gheorghe, V. U., Veselin, P., Atanas, P., Hristo, S., and Florin, D. (2012). Types and Impacts of Maritime Hydraulic Structures on the Romanian-Bulgarian Black Sea Coast: Setting-up a Common Catalogue for GIS-Based Coastline Classification. *Geo-Eco-Marina*.
- Alizadeh, M. J., Kolahdoozan, M., Tahershamsi, A., and Abdolali, A. (2014). Experimental Study of the Performance of Floating Breakwaters with Heave Motion. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 47(1), 59-70.
- Biesheuvel, A. C. (2013). *Effectiveness of Floating Breakwaters : Wave attenuating floating structures*. (Master). Delft University of Technology, The Netherlands.
- Bouwmeester, E. C., and van der Breggen, H. M. (1984). *Floating breakwaters*. Retrieved from Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, Hydraulic Engineering Group:
- Bricio, L., Negro, V., and Diez, J. J. (2008). Geometric Detached Breakwater Indicators on the Spanish Northeast Coastline. *Journal of Coastal Research*, 5(24), 1289-1303. doi:10.2112/07-0838
- Capitao, R., and Carvalho, M. M. (1997). Separation of Incident and Reflected Spectra in Wave Flumes. *Transactions on the Built Environment*, 27, 293-302.
- Charles, W. F. (2013). *Coastal Hazards*. United States of America: Springer.
- Chen, J., Eisma, D., Hotta, K., and Walker, H. J. (2002). *Engineered Coasts*. United States of America: Kluwer Academic Publishers.

- Cihan, K., and Yuksel, Y. (2011). Deformation of Rubble-Mound Breakwaters under Cyclic Loads. *Coastal Engineering*, 58(6), 528-539.
- Cox, R., and Beach, D. (2006). *Floating Breakwater Performance -Wave Transmission and Reflection, Energy Dissipation, Motions and Restraining Forces*. the Proceedings of the First International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection.
- Cox, R., Coghlan, I., and Kerry, C. (2009). *Floating Breakwater Performance in Irregular Waves with Particular Emphasis on Wave Transmission and Reflection, Energy Dissipation, Motions and Restraining Forces*. the 5th Coastal Structures International Conference.
- Crowe, C. T., Elger, D. F., Williams, B. C., and Roberson, J. A. (2009). *Engineering Fluid Mechanics* (9th ed.). United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Dalrymple, R. A. (1985). *Physical Modelling in coastal engineering*: University of Delaware, Newark, United States of America.
- Dean, R. G., and Dalrymple, R. A. (1993). *Water Wave Mechanics for Engineering and Scientists* (3 ed. Vol. 2): World Scientific.
- Dong, G. H., Zheng, Y. N., Li, Y. C., Teng, B., Guan, C. T., and Lin, D. F. (2008). Experiments on wave transmission coefficients of floating breakwaters. *Ocean Engineering*, 35(2008), 931-938.
- Draycott, S., Steynor, J., Davey, T., and T & Ingram, D. (2018). Isolating Incident and Reflected Wave Spectra in the Presence of Current. *Coastal Engineering Journal*.
- Elserafy, S. y., Mostafa, Y. E., Saie, Y. M. E., and Gad, C. F. (2016). Reducing Wave Energy by Using of Perforated Piles Breakwaters. *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, Volume 13(Issue 6 Ver. VI), 1-9. doi:10.9790/1684-1306070109
- Eva L., and Demos C.A. (2005). Performance of Moored Floating Breakwater. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 15(4), 264-273.
- Goda, Y., and Suzuki, Y. (1976). *Estimate of Incident and Reflected Waves in Random Wave Experiment*. the Preceeding of the 15th Coastal Engineering Conference, Hawaii, United States of America.
- Grune, J., and Kohlhase, S. (1974). *Wave Transmission through Vertical Slotted Walls*.

- Paper presented at the Preceding of 14th Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark.
- Hajivalie, F. (2017). *The Effect of Submerged Breakwater Shape and Size on Wave Energy Dissipation*. the Proceedings of the 37th IAHR World Congress, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Hajivalie, F., and Mahmoudof, S. M. (2018). *Experimental Study of Energy Dissipation at Rectangular Submerged Breakwater*. the Proceedings of the 8th International Conference on Fluid Mechanics (ICFM8), Tohoku University, Sendai, Japan.
- Hales, L. Z. (1981). *Floating Breakwater : State-of-the-Art, Literature Review*: U.S. Army, Coastal Engineering Research Center.
- Hayashi, T., Hattori, M., Kano, T., and Shirai, M. (1966). Hydraulic Research on the Closely Spaced Pile Breakwater. *Engineering in Japan*, 9, 108-117.
- Hayashi, T., Hattori, M., and Shirai, M. (1968). Closely Spaced Pile Breakwater as a Protection Structure against Beach Erosion. *Engineering in Japan*, 11, 149-160.
- He, F., Li, M., and Huang, Z. (2016). An Experimental Study of Pile-Supported OWC-Type Breakwaters: Energy Extraction and Vortex-Induced Energy Loss. *Energies*, 9(7), 540. doi:10.3390/en9070540
- Herbich, J. B. (2000). *Handbook of Coastal Engineering*: McGraw-Hill.
- Herbich, J. B., and Douglas, B. (1988). *Wave Transmission through a Double-Row Pile Breakwater*. the Proceedings of 21st Coastal Engineering Conference, Coata del Sol-Malaga, Spain.
- Horikawa, K. (1978). *Coastal Engineering an Introduction of Ocean Engineering*: University of Tokyo, Japan.
- Horikawa, K. (1988). *Nearshore Dynamics and Coastal Processes*: University of Tokyo, Japan.
- Hsiao, S.-S., Fang, H.-M., Chang, C.-M., and Lee, T.-s. (2008). *Experimental Study of the Wave Energy Dissipation Due to the Porous-Piled Structure*. the Proceedings of the Eighteenth (2008) International Offshore and Polar Engineering Conference, Vancouver, BC, Canada.
- Huang, Z. (2007). Wave Interaction with One or Two Rows of Closely Spaced Rectangular Cylinders. *Ocean Engineering*, 34(11-12), 1584-1591.

- Hur, D.-S., Lee, K.-H., and Choi, D.-S. (2014). Effect of the Slope Gradient of Submerged Breakwaters on Wave Energy Dissipation. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 5(1), 83-98.
- Hutchinson, P. S., and Raudkivi, A. J. (1984). *Case History of a Spaced Pile Breakwater at Half Moon Bay Marina Auckland, New Zealand*. the Preceeding of 19th Coastal Engineering, Houston, Texas, U.S.A.
- IMPAC-T Project. (2012). *Oceanographic Data Observation Survey*. Department of Water Resources Engineering: Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.
- Inseepong, N., and Sriariyawat, A. (2019). *Effectiveness of Wave Transmissibility on Partial Breakwater by Physical Model*. the The 24th National Convention on Civil Engineering, Udonthani, Thailand.
- Ippen, A. T. (1966). *Estuary and Coastline Hydrodynamics*. New York: McGraw - Hill Book.
- Isaacson, M., M.ASCE, and Byres, R. (1988). Floating Breakwater Response to Wave Action. *Coastal Engineering*.
- Jamieson, W. W., Mogridge, G. R., and Boudrias, P. (1995). Improving the efficiency of rectangular caisson floating breakwater. *Transactions on the Built Environment*, 8.
- Ji, C.-Y., Chen, X., Cui, J., Yuan, Z.-M., and Incecik, A. (2015). Experimental study of a new type of floating breakwater. *Ocean Engineering*, 105.
- Johnson, J. W. (1951). *Generalized Wave Diffraction Diagrams*. the Coastal Engineering Proceedings.
- Kinsman, B. (1965). *Wind Waves (their generation and propagation on the ocean surface)*. New Jersey, United States of America: Department of Oceanography, The Johns Hopkins University.
- Koutandos, E., Prinos, P., and Gironella, X. (2005). Floating breakwaters under regular and irregular wave forcing: reflection and transmission characteristics. *Journal of Hydraulic Research*, 43 No.2, 174-188.
- Koutandos, E. V., Karambas, T. V., and Koutitas, C. G. (2004). Floating Breakwater Response to Waves Action Using a Boussinesq Model Coupled with a 2DV Elliptic Solver. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*,

130(5), 243-255. doi:10.1061/(asce)0733-950x(2004)130:5(243)

- Kreyszig, E. (2006). *Advanced Engineering Mathematics*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Kriebel, D. L., and Bollmann, C. A. (1996). *Wave Transmission Past Vertical Wave Barriers*. the Coastal Engineering Conference.
- Kudumula S.R., and Mutukura M.R.G. (2013). Experimental Studies on Low crested Rubble Mound, Semicircular Breakwaters and Vertical wall System. *International Journal of Ocean and Climate Systems*, 4(3), 213-226.
- Laju, K., Sundar, V., and Sundaravadivelu, R. (2007). Studies on Pile Supported Double Skirt Breakwater Models. *The Journal of Ocean Technology*, 2, 32-53.
- Macagno, E. (1954). Wave action in a flume containing a submerged culvert. *La Houille Blanche*.
- Makris, C. V., and Memos, C. D. (2007). *Wave Transmission over Submerged Breakwaters: Performance of Formulae and Models*. the Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Lisbon, Portugal.
- Mani, J. S. (2008). Experimental and Numerical Investigations on Zigzag Porous Screen Breakwater. *Nat Hazards*.
- Mani, J. S., and Jayakumar, S. (1995). Wave Transmission by Suspended Pipe Breakwater. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 335-338.
- Mansard E.P.D., and Funke E.R. (1980). The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a Least Squares Method.
- McCartney, B. L. (1985). Floating Breakwater Design. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering*.
- Muttray M., Oumeraci X., Zimmermann C., and Partencky H.W. (1992). Wave Energy Dissipation on and in Rubble Mound Structures. *Coastal Engineering*, 1434-1447.
- Nagai, S. (1966). *Researches on Steel-Pipe Breakwater*. the Proceedings of 10th Coastal Engineering Conference, Tokyo, Japan.
- Rageh O. S., and Koraim A.S. (2009). *The Use of Vertical Walls with Horizontal Slots as Breakwaters*. Paper presented at the Thirteenth International Water Technology Conference, Hurghada, Egypt.

- Rao, S., Rao, N. B. S., and Sathyanarayana, V. S. (1999). Laboratory Investigation on Wave Transmission through Two Rows of Perforated Hollow Piles. *Ocean Engineering*.
- Rao, S., Shirlal, K. G., and Rao, N. B. S. (2002). Wave Transmission and Wave Reflection for Two Rows of Perforated Hollow Piles. *Indian Journal of Marine Sciences*, 31(4), 283-289.
- Sawaragi, T. (1995). *Coastal Engineering - Waves, Beaches, Wave-Structure Interactions* (D. i. G. Engineering Ed. 78 ed.). Japan: Department of Civil Engineering, Osaka University
- Silvester, R. (1974). *Coastal Engineering 1* (Vol. 4A). The Netherlands. Elsevier Scientific: Developments in geology engineering.
- Silvester, R. (1979). *Coastal Engineering 2 - sediment, estuary, tides, effluents and modeling* (Vol. 4B). Amsterdam Oxford, New York: Elsevier Scientific: Development in geotechnical Engineering.
- Soomere, T., and Quak, E. (2013). *Preventive Methods for Coastal Protection (towards the use of ocean dynamics for pollution control)*. Switzerland: Springer.
- Sorensen, R. M. (1991). *Basic Coastal Engineering*. Singapore: John Wiley & Sons.
- Suh, K.-D., Jung, H. Y., and Pyun, C. K. (2007). Wave Reflection and Transmission by Curtainwall–Pile Breakwaters using Circular Piles. *Ocean Engineering*, 34(14-15), 2100-2106. doi:10.1016/j.oceaneng.2007.02.007
- Suh, K.-D., Shin, S., and Cox, D. T. (2006). Hydrodynamic Characteristics of Pile-Supported Vertical Wall Breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 83-96.
- Truitt, C. L., and Herbich, J. B. (1986). *Transmission of Random Wave Through Pile Breakwaters*. the Preceeding of 20th Coastal Engineering, Taipei, Taiwan.
- Tsinker, G. P. (2004). *Port Engineering : planing, construction, maintenance and security*. Hoboken, New Jersey, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- U.S. CERC. (1984). *Shore Protection Manual*. Washington DC: Department of the U.S. Army Corps. of Engineers.
- Ursell, F., and Dean, W. R. (1946). *The Effect of a Fixed Vertical Barrier on Surface Waves in Deep Water*. the Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society.

- Weele, V. J., and Herbich, J. B. (1984). *Wave Reflection and Wave Transmission For Pile Arrays*. the Proceedings of 13th Coastal Engineering Conference, Vancouver, Canada.
- Wiegel, R. L. (1959). *Rigid Vertical Thin Barrier*. Retrieved from California:
- Xeidakis, G. S., and Delimani, P. (2003). *Coastal Erosion Problems along the Northern Argean Coastline: The Case of the Nestos River Delta and the Adlacent Coastlines*. the Soft Shore Protection, Greece.
- Yagci, O., Kirca, V. S. O., Kabdasli, M. S., Celik, A. O., Unal, N. E., and Aydingakko, A. (2006). An Experimental Model Application of Wavescreen : Dynamic Pressure, Water Partical Velocity and Wave Measurements. *Ocean Engineering*, 33, 1299-1321.
- Zidan, A. R., Rageh, O. S., Sarhan, T. E., and M.Esmail. (2012). Effective of Breakwaters on Wave Dissioation (Case Study: RAS EL-BAR Beach, Egypt). *International Water Techniloy Journal*, Vol.2-N0.4, 268-283.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การศึกษาที่ผ่านมาที่ใช้แบบจำลองทางกายภาพ

สำหรับปัญหาด้านวิศวกรรมชายฝั่งนั้นมักมีความซับซ้อน และยากที่จะแก้ไขได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เพียงเครื่องมือเดียว โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างทางชายฝั่งที่มีลักษณะแปลกใหม่และไม่เคยมีการศึกษามาก่อนหน้า ดังนั้นแบบจำลองทางกายภาพจึงอาจเป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาในลักษณะดังกล่าว สำหรับการศึกษอิทธิพลของคลื่นและโครงสร้างที่มีต่อการส่งผ่านและสะท้อนของคลื่นด้วยแบบจำลองทางกายภาพนั้นสามารถทำได้โดยการทดลองภายในรางน้ำจำลองหรืออ่างจำลองคลื่นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษา

การศึกษากฎธรรมชาติของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของคลื่นและลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างนั้น สามารถศึกษาด้วยแบบจำลองทางกายภาพ 1 หรือ 2 มิติ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของคลื่นและลักษณะโครงสร้าง โดยพิจารณาเกี่ยวกับการยอมให้คลื่นผ่านได้ (transmission) และการล้นข้ามของโครงสร้าง (overtopping) เป็นหลัก โดยสามารถใช้ได้ทั้งรางน้ำจำลองและอ่างจำลองคลื่น หากต้องการพิจารณาเพิ่มเติมถึงการกระจายคลื่น (diffraction) จะต้องศึกษาเพิ่มเติมด้วยแบบจำลอง 3 มิติ โดยใช้อ่างจำลองคลื่นจะเป็นการสะดวกในการศึกษา

สำหรับการศึกษานี้จะใช้การทดลองในอ่างจำลองคลื่นซึ่งเคยมีการศึกษาด้วยเครื่องมือที่มีลักษณะเดียวกันนี้ในอดีต ดังปรากฏในการศึกษาของ Nagai (1966), เมธาฤทธิ์ นามสัย (2552), วันวิสา มะมา (2553), สุวีร์ ศรียี่สุน (2554) และธีรนนท์ ปันใจลือ (2558) โดยในภาคผนวก ก นี้ได้สรุปการศึกษาที่ผ่านมาที่มีการใช้อ่างจำลองคลื่นในลักษณะเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ ก-1 และพบว่าชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษานี้มีศักยภาพในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะของคลื่นเนื่องจากการมีโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นในหลายประเภท ซึ่งส่วนมากเป็นการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น

พฤติกรรมของการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนที่แสดงออกมาในรูปของการเปลี่ยนแปลงขนาดของความสูงคลื่น สามารถพิจารณาเสมือนเป็นแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของพลังงานคลื่นได้ ดังการศึกษาที่ผ่านมาของ Muttray M. et al. (1992), Makris and Memos (2007), Hsiao et al. (2008), Zidan et al. (2012), Hur et al. (2014), El.serafy et al. (2016), He et al. (2016), Hajivalie (2017) และ Hajivalie and Mahmoudof (2018) รายละเอียดของแต่ละการศึกษาแสดงในตารางที่ ก-2

ตารางที่ ก-1 การศึกษาที่ผ่านมาที่ใช้แบบจำลองทางกายภาพ

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Nagai (1966)	Researches on Steel-Pipe Breakwater	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ ในอ่างทดสอบคลื่นภายใต้สภาวะคลื่นปกติ โดยเป็นการจำลองการทำงานของการเชื่อมกันคลื่นแบบทอเหล็กและแบบแผ่นเหล็กที่มีแค่แถวเดียว จำลองจากพื้นที่จริงคือชายฝั่งของเมืองโอซาก้า ประเทศญี่ปุ่น ทดสอบเพื่อศึกษา 2 ตัวแปรด้วยกัน คือ ความดัน และ การเคลื่อนที่ผ่านได้ของคลื่น ทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงความสูงคลื่นและคาบคลื่น ไซช่องว่างระหว่างเสาเข็มเป็น 0.05 เท่าของขนาดเสาเข็ม ($b/d = 0.05$)	ความดันบริเวณหน้าโครงสร้างหรือที่คลื่นเข้ากระทบแบบตั้งฉากจะมีค่ามากที่สุดและลดลงไปด้านข้างเนื่องจากพลังงานที่ลดลงของคลื่น ผลการทดลองได้ค่าที่ใกล้เคียงกับทฤษฎีแต่มีแนวโน้มที่สูงกว่า เมื่อโครงสร้างสามารถเคลื่อนที่บริเวณด้านบนหรือยอดได้ ความดันที่เกิดขึ้นจะลดลงเมื่อเทียบกับกรณียึดแน่น การมีหินวางรอบ ๆ โครงสร้างไม่ได้มีผลต่อความดันที่เกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนสัมประสิทธิ์การส่งผ่านได้ของคลื่นมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาก่อนหน้า แต่ได้ค่าที่สูงกว่าเล็กน้อย โดยได้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (K) ที่เกิดเนื่องจากช่องว่างระหว่างเสาเข็มน้อยมาก โดยอยู่ในช่วง 0.28 ถึง 0.42 เมื่อน้ำล้นข้ามโครงสร้างจะสามารถลดคลื่นได้ลดลง รวมถึงการเคลื่อนที่ของยอดโครงสร้างก็ยิ่งทำให้โครงสร้างลดประสิทธิภาพลงด้วย
เมธาฤทธิ์ นามเสี่ย (2552)	ผลของการจัดเรียงแนวเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มต่อลักษณะคลื่น	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ ในอ่างทดสอบคลื่นเพื่อศึกษาผลของการจัดเรียงเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มรูปทรงกระบอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของคลื่น และการสลายพลังงานคลื่นบริเวณหลังเขื่อนกันคลื่น มีรูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มรูปทรงกระบอกที่มีความยาวเท่ากัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.85 ซม. จำนวน 38 ต้น ได้ทำการจัดเรียงแบบ 2 แถว ทั้งแบบตรงกัน	การลดลงของความสูงคลื่นและการสลายพลังงานคลื่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในลักษณะกราฟเอ็กซ์โพเนนเชียล เมื่อความชันคลื่นเพิ่มสูงขึ้น ผลจะแสดงให้เห็นแนวโน้มของการลดลงของความสูงคลื่นและการสลายพลังงานคลื่นที่มีลักษณะเอ็กซ์โพเนนเชียล เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของช่องว่างระหว่างแถวในกรณีของการจัดเรียงแบบ 2 แถวสลับฟันปลา ในกรณีการจัดเรียงแบบ 2 แถวตรงกันพบว่า เมื่อช่องว่างระหว่างแถวเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 0.5 เท่า

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
วันวิสา มะมา (2553)	ลักษณะคลื่นของเขื่อนกันคลื่น แบบเสาเข็มที่จัดเรียงระยะห่างของเสาเข็มไม่เท่ากัน	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ ในอ่างทดสอบคลื่นเพื่อศึกษาผลของการจัดเรียงเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มรูปทรงกระบอกที่จัดเรียงระยะห่างระหว่างเสาเข็มไม่เท่ากัน ต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะคลื่นบริเวณพื้นที่หลังเขื่อนกันคลื่น โดยมีรูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.85 ซม. จำนวน 22 ต้น โดยให้ระยะห่างระหว่างแถวเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม เปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างต้นไม่เท่ากัน โดยกำหนดให้อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันอนุกรมทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย โดยแถวที่ 2 จัดเรียงเหมือนแถวที่ 1 แต่สลับตำแหน่งจากหัวไปท้ายเขื่อนกันคลื่น การทดลองทำในความถี่คลื่นอยู่ในช่วง 0.001 ถึง 0.008	ของขนาดเสาเข็ม การลดลงของความสูงคลื่นและการสลายพลังงานคลื่นเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเมื่อช่องว่างระหว่างแถวเพิ่มขึ้นมากกว่า 0.5 เท่าของขนาดเสาเข็ม การลดลงของความสูงคลื่นและการสลายพลังงานคลื่นมีแนวโน้มลดลงในลักษณะเอ็กซ์โพเนนเชียล การจัดเรียงแบบ 2 แถวสลับฟันปลาไม่ส่งผลต่อการลดลงของความสูงคลื่นและการสลายพลังงานคลื่น แต่กต่างจากการจัดเรียงแบบ 2 แถวตรงกันย่อมมีนัยสำคัญ โดยการจัดเรียงทั้ง 2 รูปแบบทำให้ความสูงคลื่นและพลังงานคลื่นลดลงประมาณ 6.5 และ 13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
สุวีร์ ศรียี่สุน (2554)	การส่งผ่านและการกระจายคลื่นของโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำแบบทึบทั้งพร้อมด้วยรูปแบบกระแสใต้น้ำ	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ ในอ่างทดสอบคลื่นเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของการส่งผ่านคลื่นกับผลของการกระจายคลื่น รวมถึงการถ่ายเทพลังงานเมื่อคลื่นเชื่อมที่ผ่านโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นแบบใต้น้ำ โดยพิจารณาถึงตัวแปรสภาพคลื่นและโครงสร้าง ได้แก่ ความลึกน้ำ ความชันคลื่น และความสูงโครงสร้าง การทดลองทำภายใต้สมมติฐานที่พื้นอ่างจำลองคลื่นราบคงที่ และคลื่นจากเครื่องกำเนิดคลื่นเป็นคลื่นสม่ำเสมอ ทดลองในความชันคลื่นในช่วง $0.018 - 0.035$ ความลึกน้ำคงที่เท่ากับ 0.40 เมตร	ไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้อย่างชัดเจนกับความชันคลื่น และรูปแบบการจัดเรียงเชื่อมกันคลื่น คำสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีความสัมพันธ์กับความลึกน้ำ สัมพัทธ์, ความชันคลื่น และความสูงคลื่นสัมพัทธ์ โดยการลดลงของความลึกน้ำสัมพัทธ์เป็นส่วนสำคัญที่มีผลต่อการลดลงของการส่งผ่านคลื่น ความชันที่น้อยลงส่งผลให้คลื่นเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างได้ง่ายกว่าความชันคลื่นที่มาก เนื่องจากความชันคลื่นที่มากจะมีการแตกตัวของคลื่นบนสันโครงสร้างที่มากกว่า ทำให้สูญเสียพลังงานของคลื่นมากกว่า นอกจากนี้จากการศึกษาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจากแบบจำลอง 3 มิติ จะให้ค่ามากกว่าแบบจำลอง 2 มิติ แสดงให้เห็นว่าการกระจายของคลื่นมีผลต่อการส่งผ่านคลื่นในแบบจำลอง 3 มิติ เป็นอย่างมาก รูปแบบการหมุนวนของกระแสใต้น้ำบริเวณหลังเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำมีพฤติกรรมแตกต่างกับเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำ เนื่องจากผลของความลาดชันของความสูงคลื่น โดยเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำมีรูปแบบการหมุนวนของกระแสใต้น้ำจากพื้นที่ข้อคลื่นออกนอกของเขตที่ไม่ได้ปกป้อง และตรงข้ามกับเชื่อมกันคลื่นแบบพื้นน้ำ
ธีรนนท์ ปิ่นใจเสือ (2558)	ความสูงคลื่นที่ผ่านช่องว่างระหว่างโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ ในอ่างทดสอบคลื่นเพื่อศึกษาพฤติกรรมคลื่นที่ผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำและเชื่อมเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ ทำการจำลองด้วยคลื่นสม่ำเสมอที่มีทิศทางคลื่นตั้งฉากกับเชื่อมกันคลื่น	คำสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีความสัมพันธ์กับความชันคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะ (H/L), อัตราส่วนระหว่างระยะห่างช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นกับความยาวคลื่น (B/L) และอัตราส่วนระหว่างความลึกน้ำเพื่อสัมพันธ์กับความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้า

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
		<p>และทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรคุณสมบัติคลื่นและลักษณะโครงสร้าง ตัวแปรศึกษา ได้แก่ ระดับน้ำนิ่ง, ความชื้นคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง และการวัดความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง การวัดความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างทำคลื่นที่ผ่านโครงสร้างไปได้ ทำการหาความสูงคลื่นนัยสำคัญด้วยวิธีการทางสถิติ นำความสูงคลื่นมาสร้างเส้นชั้นของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรวมในพื้นที่ด้านหลังเชื่อมกันคลื่นเพื่อพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่น</p>	<p>ประทะ (R_c/H) ในกรณีเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะแปรผันตรงตามค่า B/L แต่จะแปรผกผันกับค่า H/L และ R_c/H โดยมีความสัมพันธ์เหมือนกันในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นและพื้นที่ข้อคลื่น สำหรับการกระจายตัวในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่นพบว่าคลื่นจะส่งผ่านและกระจายตัวจากพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นเข้าสู่พื้นที่ข้อคลื่น ในกรณีเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะแปรผันตรงตามค่า H/L และ R_c/H แต่จะแปรผกผันกับค่า B/L ส่วนในพื้นที่ข้อคลื่นมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นจะแปรผันตรงกับตัวแปรที่ศึกษาทั้ง 3 ตัวแปร สำหรับกระจายตัวในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่น พบว่าคลื่นจะส่งผ่านและกระจายตัวจากพื้นที่ข้อคลื่นเข้าสู่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น</p>

ตารางที่ ก-2 การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับพฤติกรรมพลังงานของคลื่นเนื่องจากเชื่อมกันคลื่น

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Ippen (1966)	Estuary and Coastline Hydrodynamics	ศึกษาความหมายและนิยามของพลังงาน และพิสูจน์สมการเพื่อใช้วิเคราะห์พลังงานในรูปแบบต่าง ๆ	ระบุนิยามของพลังงานว่างแบ่งออกเป็นพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ โดยพลังงานศักย์วิเคราะห์จากระดับน้ำเหนือระดับน้ำนิ่ง และพลังงานจลน์คิดจากความเร็วอนุภาคน้ำ
M.Muttray et al. (1992)	Wave Energy Dissipation on and in Rubble Mound	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ (physical model) เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของพลังงาน เนื่องจากมีการมีเชื่อมกันคลื่นแบบหินทิ้ง โดยพิจารณาพลังงานด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน, สัมประสิทธิ์การสลายพลังงาน และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน โดยพิจารณาภายใต้สมมติฐานว่าการศึกษาอยู่ภายใต้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย ทำให้สามารถอนุมานพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่เป็นการเปรียบเทียบระหว่างคลื่นก่อนเข้าสู่โครงสร้าง และหลังจากโครงสร้าง กล่าวคือ พลังงานที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง ต้องมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานที่สะท้อน พลังงานที่ผ่านไปได้ และพลังงานที่ถูกสลายไป	เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบระหว่างพฤติกรรมของพลังงานในส่วนต่าง ๆ ประกอบด้วย พลังงานที่สะท้อนออกมาจากโครงสร้าง พลังงานงานที่ส่งผ่านโครงสร้างไปได้ และพลังงานที่ถูกสลายนั้น กับตัวแปรคาบคลื่น พบว่าพลังงานที่สะท้อนออกมาจากโครงสร้าง และพลังงานที่สามารถส่งผ่านโครงสร้างไปได้มีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อคาบคลื่นยาวขึ้น การสลายพลังงานบริเวณผิวโครงสร้างและแกนกลางโครงสร้างมีปริมาณที่แตกต่างกัน โดยการสลายพลังงานเกิดขึ้นมากในบริเวณผิวของโครงสร้าง ในขณะที่บริเวณแกนกลางมีการสลายพลังงานเพียงเล็กน้อย การมีโครงสร้างหลายชั้นทำให้การสลายพลังงานดีขึ้น
Makris and Memos (2007)	Wave Transmission over Submerged Breakwaters: Performance of Formulae and Models	ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการส่งผ่านคลื่นผ่านเชื่อมกันคลื่นแบบจมน้ำ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการวิเคราะห์และปรับปรุงสภาพของเชื่อมกันคลื่นที่ใช้งานอยู่จริง ในการศึกษาได้พิจารณาถึงพฤติกรรม	การส่งผ่านคลื่นผ่านโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นมีความซับซ้อน และยากที่จะอธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ อย่างไรก็ตามพบว่าการส่งผ่านคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอิทธิพลของควมกว้างของสันเชื่อม การแตกตัวของคลื่น ชนิดของเชื่อมกันคลื่น

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Hsiao et al. (2008)	Experimental Study of the Wave Energy Dissipation Due to the Porous-Piled Structure	<p>ของพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากเขื่อนกันคลื่น โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเป็นตัวแทนของพฤติกรรมการสลายพลังงาน นอกจากนี้ยังมีการใช้สมการในการคำนวณพลังงานที่เกิดขึ้น โดยตั้งสมมติฐานให้การศึกษาอยู่ภายใต้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย ทำให้สมการดังกล่าว สามารถคำนวณพลังงานได้จากความสูงคลื่น</p>	<p>และขนาดของหินที่ใช้ในการก่อสร้างบริเวณผิว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแตกตัวของคลื่นบริเวณโครงสร้างที่ส่งอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการแตกตัวของคลื่นการสลายพลังงานคลื่นเนื่องจากโครงสร้าง ทำให้พลังงานที่เหลือผ่านโครงสร้างไปมีลดลง สิ่งสำคัญอีกสิ่งหนึ่งคือลักษณะการซึมผ่านโครงสร้างของคลื่นที่ควรเป็นตัวแปรพิจารณาอย่างยิ่ง เนื่องจากการซึมผ่านย่อมเกิดการเสียดสีระหว่างวัสดุหินโครงสร้าง ทำให้เกิดการสลายพลังงานคลื่น อันนำไปสู่การลดลงของพลังงานที่สามารถส่งผ่านโครงสร้างไปได้</p>
		<p>ใช้แบบจำลองกายภาพ (physical model) เพื่อศึกษาการส่งผ่านคลื่น การสะท้อนของคลื่น และการสลายพลังงาน เนื่องจากเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มโปร่ง โดยมึลักษณะเป็นเขื่อนกันคลื่นแน่น และมีช่องว่างสลัไปเรื่อย ๆ การพิจารณาการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นพิจารณาจากความสูงคลื่น ส่วนการสลายพลังงานพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน และสัมประสิทธิ์การสลายพลังงาน โดยพิจารณาภายใต้สมมติฐานว่าการที่ศึกษาอยู่ภายใต้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย ทำให้สามารถอนุมานพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่เป็นการเปรียบเทียบระหว่างคลื่นก่อนเข้าสู่และหลังออกจาก</p>	<p>ผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงของว่างระหว่างเสาของโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มมีผลต่อการส่งผ่านคลื่น การสะท้อนของคลื่น และการสลายพลังงานของเขื่อนกันคลื่น โดยพบว่า สำหรับเสาเข็ม 2 ชั้นนั้น การสะท้อนจะมีความมากเมื่อช่องว่างระหว่างโครงสร้างลดน้อยลง สำหรับเสาเข็มยึดแน่นก็ได้ผลลัพธ์ในทิศทางเดียวกันและยังพบว่าเมื่อช่องว่างเพิ่มขึ้น คลื่นสามารถส่งผ่านไปได้มากขึ้นแต่เกิดการสลายพลังงานลดลง โดยแสดงออกมาในรูปแบบประสิทธิภาพการส่งผ่านคลื่นที่เพิ่มขึ้น และสัมประสิทธิ์การสลายพลังงานที่ลดลง</p>

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Zidan et al. (2012)	Effect of Breakwaters on Wave Energy Dissipation (Case Study: Ras El-Bar Beach, Egypt)	<p>โครงสร้าง กล่าวคือ พลังงานที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างต้องมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานที่สะท้อน พลังงานที่ผ่านไป และพลังงานที่ถูกสลายไป</p> <p>ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชื่อ CGWAVE ในการวิเคราะห์อิทธิพลของโครงสร้างทางชายฝั่งทะเลต่อการเปลี่ยนแปลงความสูงคลื่นในพื้นที่ศึกษา Ras El-Bar Beach, Egypt เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างทางชายฝั่งทะเลที่จะช่วยบรรเทาปัญหาที่เกาะชายฝั่งในพื้นที่ โดยโครงสร้างที่ผู้ศึกษาได้นำมาศึกษานั้นจะประกอบด้วย detached breakwaters, submerged breakwaters, groins, seawalls และ shore-connected breakwaters สำหรับการคำนวณพลังงานที่เกิดขึ้นนั้น วิเคราะห์ภายใต้สมมติฐานที่คลื่นอยู่ภายใต้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย ทำให้ผู้ศึกษาสามารถคำนวณพลังงานคลื่นเพียงจากการเปลี่ยนแปลงความสูงคลื่นเพียงตัวแปรเดียว</p>	<p>ผลการศึกษาพบว่า</p> <ul style="list-style-type: none"> - groins ไม่มีผลต่อการสลายพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ แต่ส่งอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของตะกอนขนานชายฝั่ง - seawall มีความสำคัญต่อการสลายพลังงานคลื่นอย่างมาก และเป็นเครื่องมือสำคัญในการบรรเทาปัญหา โดยสามารถใช้ร่วมกับ submerged breakwater เพื่อลดต้นทุนในการก่อสร้าง seawall - detached breakwaters สามารถลดพลังงานคลื่นได้มาก จนอาจก่อให้เกิดการรอกของแผ่นดินจนมีลักษณะชนกับโครงสร้าง หรือ salient - connected breakwaters ต้องออกแบบและสร้างควบคู่กับโครงสร้างอื่น ๆ เพื่อให้เกิดการรอกของแผ่นดินตามรูปแบบที่ต้องการ <p>เมื่อความชันคลื่นเพิ่มขึ้น การสลายพลังงานเพิ่มขึ้นด้วย</p> <p>- การศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเพียงชนิดเดียวอาจไม่คุ้มทุนต่อการก่อสร้าง ควรใช้โครงสร้างหลายชนิดร่วมกันเพื่อป้องกันการกัดเซาะอย่างมีประสิทธิภาพและมีต้นทุนต่ำที่สุด</p>

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Hur et al. (2014)	Effect of The Slope Gradient of Submerged Breakwaters on Wave Energy Dissipation	ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของพลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชันของโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นแบบจมน้ำ และตำแหน่งการแตกตัวของคลื่นบนโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นแบบจมน้ำ โดยพิจารณาภายใต้สมมติฐานว่าการศึกษายู่ภายใต้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย ทำให้สามารถอนุมานพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่เป็นการเปรียบเทียบระหว่างคลื่นก่อนเข้าสู่โครงสร้าง และหลังออกจากโครงสร้าง กล่าวคือ พลังงานที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างต้องมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานที่สะท้อน พลังงานที่ผ่านไปได้ และพลังงานที่ถูกสลายไป	ผลการศึกษาพบว่า การสะท้อนของคลื่นเนื่องจากโครงสร้างและการส่งผ่านคลื่นผ่านโครงสร้างมีปริมาณลดน้อยลงเมื่อโครงสร้างมีความชันที่ลดน้อยลง ในกรณีที่โครงสร้างมีความสมมาตร การเปลี่ยนแปลงของความชันบริเวณด้านหน้าที่ได้รับคลื่นจะมีผลต่อพฤติกรรมของพลังงานมากกว่าด้านหลัง นอกจากนี้ยังพบว่าตำแหน่งการแตกตัวของคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงไปโดยเลือกออกไปทาง offshore และมีความสูงคลื่นก่อนแตกตัวที่สูงขึ้น เมื่อความชันของโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดกระแสน้ำวนในทิศทางเชื่อมกันบริเวณด้านหลังโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นแบบจมน้ำ ซึ่งกระแสน้ำวนนี้มีเองจะเป็นเหตุให้โครงสร้างมีความชันที่เพิ่มมากขึ้นด้วย
El.serafy et al. (2016)	Reducing Wave Energy by Using of Perforated Piles Breakwaters	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ (physical model) เพื่อศึกษาการลดพลังงานคลื่นอันเนื่องจากอิทธิพลของเชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็มที่มีรูพรุน ทำการทดสอบในรางน้ำก่าชนิดคลื่น และพิจารณาตัวแปรความสูงคลื่น คาบคลื่น ความชันคลื่น และลักษณะทางกายภาพของเสาเข็ม โดยการคำนวณพลังงานที่เกิดขึ้นนั้น วิเคราะห์ภายใต้สมมติฐานที่คลื่นอยู่ภายใต้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย ทำให้ผู้ศึกษาสามารถคำนวณพลังงานคลื่นเพียงจากการเปลี่ยนแปลงความสูงคลื่นเพียงตัวแปรเดียว	ผลการศึกษาพบว่า - ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มที่เล็กที่สุดในการทดลอง ให้ประสิทธิภาพการสลายพลังงานคลื่นได้ดีที่สุด - สำหรับเสาเข็มขนาด 5 เซนติเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแปรผกผันกับความชันคลื่น และมีพลังงานผ่านไปได้เพียง 20 ถึง 50% - สำหรับเสาเข็มขนาด 5 เซนติเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแปรผันตรงกับความชันคลื่น และมีพลังงานสะท้อนประมาณ 15 ถึง 45%

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Hajivalie (2017)	The Effect of Submerged Breakwater Shape and Size on Wave Energy Dissipation	ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของพลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงความชันของโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นแบบจมน้ำ โดยใช้พื้นฐานของสมการ Navier-Stokes ใช้ลักษณะของเชื่อมกันคลื่น 2 รูปร่าง คือ สี่เหลี่ยมผืนผ้า และคางหมู และทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างในแต่ละกรณี โดยพิจารณาภายใต้สมมติฐานว่าการศึกษายู่ภายใต้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย ทำให้สามารถอนุมานพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่เป็นการเปรียบเทียบระหว่างคลื่นก่อนเข้าสู่โครงสร้าง และหลังออกจากโครงสร้าง กล่าวคือ พลังงานที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง ต้องมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานที่สะท้อน พลังงานที่ผ่านไปได้ และพลังงานที่ถูกสลายไป	<p>- สำหรับเสาเข็มขนาด 5 เซนติเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การสลายพลังงานแปรผันตรงกับความชันคลื่น และมีพลังงานที่ถูกสลายไปประมาณ 15 ถึง 55%</p> <p>ผลการศึกษาพบว่า</p> <p>เชื่อมกันคลื่นรูปรางสี่เหลี่ยมผืนผ้า</p> <p>- การเพิ่มความกว้างของโครงสร้างสามารถลดการส่งผ่านคลื่นผ่านโครงสร้างได้ เมื่อความกว้างกว่า 0.3 เท่าของความยาวคลื่น</p> <p>เชื่อมกันคลื่นรูปรางสี่เหลี่ยมคางหมู</p> <p>- การเพิ่มความกว้างของยอดโครงสร้างไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณการส่งผ่านคลื่นอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีผลต่อตำแหน่งและความสูงคลื่นในขณะที่คลื่นแตกตัวบนโครงสร้าง</p> <p>- เมื่อเปรียบเทียบกันอาจมองว่าสี่เหลี่ยมผืนผ้าสามารถสลายพลังงานได้ดีกว่า แต่หากความกว้างโครงสร้างน้อยกว่า 0.5 เท่าของความยาวคลื่น จะมีบางกรณีที่ดีสี่เหลี่ยมคางหมูสามารถสลายพลังงานได้ดีกว่า</p>
Hajivalie and Mahmoudof (2018)	Experimental Study of Energy Dissipation at Rectangular Submerged Breakwater	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ (physical model) ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของพลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชันของโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นแบบจมน้ำรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และทำการ	<p>ผลการศึกษาพบว่า</p> <p>- ในทุกกรณีพบว่าความสูงคลื่นที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านลดลง แต่การสลายพลังงานเนื่องจากการสร้างเพิ่มมากขึ้น</p>

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
		<p>เปลี่ยนแปลงความกว้างในแต่ละกรณี โดยพิจารณาภายใต้สมมติฐานว่าการศึกษายู่ภายใต้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย ทำให้สามารถอนุมานพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่เป็นการเปรียบเทียบระหว่างคลื่นก่อนเข้าสู่โครงสร้าง และหลังออกจากโครงสร้าง กล่าวคือ พลังงานที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง ต้องมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานที่สะท้อน พลังงานที่ผ่านไป และพลังงานที่ถูกสลายไป</p>	<p>ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ</p> <ul style="list-style-type: none"> - การเพิ่มขึ้นของความกว้างโครงสร้างส่งผลให้การสลายพลังงานเพิ่มมากขึ้นและการส่งผ่านคลื่นลดลง อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของความลึกน้ำทำให้อิทธิพลเนื่องจากความกว้างลดลง ทั้งการสลายพลังงานและการส่งผ่านคลื่น - การเพิ่มขึ้นของความลึกน้ำทำให้การส่งผ่านคลื่นมีค่ามากขึ้น

ภาคผนวก ข

การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับพฤติกรรมของคลื่นเนื่องจากเขื่อนกันคลื่น

เขื่อนกันคลื่นนอกชายฝั่ง หรือเขื่อนกันคลื่น (breakwater) เป็นโครงสร้างที่ตั้งอยู่บริเวณใกล้ชายฝั่งในลักษณะขนานชายฝั่ง ถูกออกแบบเพื่อลดทอนพลังงานคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่ง โดยทำหน้าที่ลดและกระจายพลังงานของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะบริเวณด้านหน้าโครงสร้าง ก่อให้เกิดการแตกตัวของคลื่น อีกทั้งก่อให้เกิดการเสียดทานของอนุภาคน้ำภายในคลื่นที่เคลื่อนผ่านช่องว่างของวัสดุก่อสร้าง ก่อให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน ส่งผลให้คลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะเขื่อนกันคลื่นมีพลังงานลดน้อยลงและลดความรุนแรงก่อนเข้าปะทะชายฝั่ง ผลของการลดทอนคลื่นนี้ช่วยทำให้เกิดพื้นที่อัปเดตคลื่นหรือพื้นที่คลื่นสงบด้านหลังโครงสร้าง ทำให้ตะกอนที่เคลื่อนตัวมาตามกระแสน้ำชายฝั่งเกิดการตกตะกอนได้ ส่งผลให้เกิดการทับถมของตะกอนด้านหลังโครงสร้าง เขื่อนกันคลื่นมีมากมายหลายชนิด เช่น เขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้ง, เขื่อนกันคลื่นแบบคอนกรีต, เขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม, ทุ่นลอยกันคลื่น เป็นต้น โดยแต่ละชนิดจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไปขึ้นกับลักษณะการใช้งานและพื้นที่ที่ใช้งาน

สำหรับงานศึกษานี้ จะพิจารณาเกี่ยวกับพฤติกรรมของคลื่นโดยพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (transmission coefficient, K_t) ที่เกิดเนื่องจากเขื่อนกันคลื่น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของความสูงคลื่นด้านหลังโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น (transmitted wave height, H_t) ต่อความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง (incident wave height, H_i) และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น (reflection coefficient, K_r) จากอัตราส่วนของความสูงคลื่นที่สะท้อนจากเขื่อนกันคลื่น (reflected wave height, H_r) ต่อความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง (incident wave height, H_i) เขื่อนกันคลื่นในการศึกษานี้มีลักษณะเป็นโครงสร้างที่บิบน้ำที่บริเวณผิวน้ำ และโปร่งโล่งบริเวณด้านล่าง มีการถ่ายแรงที่รับจากคลื่นทั้งหมดลงสู่ท้องน้ำด้วยเสาเข็ม ซึ่งเขื่อนกันคลื่นในลักษณะนี้เป็นเขื่อนกันคลื่นชนิดใหม่ที่มีลักษณะผสมระหว่างเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มและทุ่นลอยกันคลื่น หากพิจารณาเป็นเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มจะเรียกว่า เขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มผสม แต่หากพิจารณาเป็นทุ่นลอยกันคลื่นจะเรียกว่า ทุ่นกันคลื่นแบบโครงสร้างยึดแน่น

โดยในภาคผนวก ข นี้ได้ทำการสรุปการศึกษาที่ผ่านมาในหัวข้อเรื่องพฤติกรรมของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม, ทุ่นลอยกันคลื่น และเขื่อนกันคลื่นที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อย่อย ดังต่อไปนี้

ข-1 การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับพฤติกรรมของคลื่นเนื่องจากเชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็ม

เชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็ม (pile breakwater) หรือแนวกันคลื่นที่ใช้เสาเข็ม เป็นโครงสร้างทางวิศวกรรมชายฝั่งที่ทำหน้าที่สลายพลังงานและลดความรุนแรงของคลื่น โดยการสลายพลังงานคลื่นเกิดจากการสะท้อนและการสูญเสียพลังงานเมื่อคลื่นเคลื่อนตัวผ่านเชื่อมกันคลื่น มีลักษณะเป็นเสาเข็มจัดเรียงเป็นแถวเดี่ยวหรือหลายแถว โครงสร้างจะมีลักษณะพื้นฐาน คือ เสาเข็มที่ปักลงไปในห้องน้ำให้เพียงพอต่อการรับแรงคลื่น แรงที่เกิดขึ้นจากการสลายพลังงานจะถูกถ่ายลงสู่ชั้นดินในห้องน้ำในลักษณะคานยื่น นอกจากนี้เชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็มจะช่วยลดความรุนแรงของคลื่นที่เข้าสู่ชายฝั่งแล้ว ยังส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของการตกตะกอนในบริเวณชายฝั่งอันนำไปสู่การสูงขึ้นของระดับท้องทะเลหรือการงอกของแผ่นดินได้

เนื่องจากเชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็มใช้การส่งถ่ายแรงลงสู่ชั้นท้องน้ำที่ลึก จึงทำให้เหมาะกับท้องน้ำที่ไม่สามารถรับกำลังอัดได้เยอะ ได้แก่ หาดโคลน ซึ่งเป็นลักษณะของชายฝั่งที่พบมากตามปากแม่น้ำขนาดใหญ่ ในประเทศไทยมักพบหาดลักษณะดังกล่าวบริเวณอ่าวไทยตอนบน หรืออ่าวไทยรูปตัว “ก” ซึ่งเป็นพื้นที่ที่สามารถใช้เชื่อมกันคลื่นได้เพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้น

ประสิทธิภาพในการสลายพลังงานคลื่นผ่านเชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทั้งชนิดของวัสดุที่ใช้, ลักษณะรูปร่างของเสาเข็ม, ระยะห่างระหว่างต้นเสาเข็ม, จำนวนแถวและการจัดเรียงตัวเสาเข็ม เป็นต้น ในเบื้องต้นได้มีการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะคลื่นจากผลของการจัดเรียงเชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็มที่มีแถวเดี่ยว โดยพิจารณาการส่งผ่านคลื่นและการสะท้อนของคลื่น ดังปรากฏอยู่ในงานศึกษาของ Hayashi et al. (1966), Hayashi et al. (1968), Grune and Kohlhasse (1974), Hutchinson and Raudkivi (1984) และ Truitt and Herbich (1986)

จากนั้นได้มีผู้ศึกษาในกรณีการจัดเรียงเชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็มให้มีจำนวนแถวมากขึ้น ดังปรากฏในการศึกษาของ Weele and Herbich (1984), Herbich and Douglas (1988), Rao et al. (1999), Rao et al. (2002) และ Huang (2007) รวมทั้งการศึกษาเสาเข็มแบบแขวนลอยในน้ำของ Mani and Jayakumar (1995) จากการศึกษาเสาเข็มแขวนลอยในน้ำนี้ ทำให้สามารถทราบถึงกระบวนการในการเปลี่ยนแปลงลักษณะของคลื่นที่บริเวณใกล้ ๆ ผิวหน้า โดยพบว่าการเปลี่ยนแปลงลักษณะของคลื่นจะพบมากบริเวณผิวหน้า ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Yagci et al. (2006) สำหรับในหัวข้อนี้ได้สรุปรายละเอียดของการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับเชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็มโดยมีรายละเอียดที่สามารถสรุปได้ดังตารางที่ ข-1 และสามารถสรุปประเด็นสำคัญที่แต่ละการศึกษาพิจารณาและได้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกัน เป็นข้อ ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) เมื่อช่องว่างระหว่างต้นของเสาเข็มเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (K_f) เพิ่มขึ้น และสัมประสิทธิ์การสะท้อน (K_r) ลดลง
- 2) เมื่อความชันคลื่นเพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (K_f) ลดลง และสัมประสิทธิ์การสะท้อน (K_r) เพิ่มขึ้น
- 3) เมื่อน้ำล้นข้ามโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น ประสิทธิภาพในการลดพลังงานคลื่นของเชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็มจะลดลง
- 4) การเคลื่อนที่ของยอดโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นทำให้โครงสร้างมีประสิทธิภาพลดลง
- 5) การจัดเรียงแบบสลับฟันปลา มีผลต่อสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเพียงเล็กน้อย
- 6) ความลึกที่ถูกลัดเขาส่งสูงสุดที่ฐานมีค่าประมาณได้กับสัดส่วนของความเร็วการไหลต่อความเร็วการตกของวัสดุท้องน้ำ

จะเห็นได้ว่าการศึกษาที่ผ่านมาพิจารณาคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างด้วยตัวแปรความชันคลื่น และความสูงคลื่นเป็นส่วนมาก ดังนั้นในการศึกษานี้จึงใช้การเปลี่ยนแปลงความชันคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง และกำหนดกลุ่มตัวแปรซ้ำในการวิเคราะห์ตัวแปรไร้หน่วยเป็นความสูงคลื่นที่เข้าปะทะโครงสร้าง เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของคลื่นที่มีต่อความสามารถในการส่งผ่านและสะท้อนของคลื่นจากโครงสร้าง ทั้งนี้ระยะห่างของเสาเข็มอาจเป็นตัวแปรที่น่าสนใจ หากพิจารณาการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นจากอิทธิพลของเชื่อมกันคลื่นแบบเสาเข็ม แต่สำหรับเชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนนั้น เสาเข็มเป็นเพียงโครงสร้างที่ใช้ส่งถ่ายแรงจากคลื่นเท่านั้น อย่างไรก็ตามในการก่อสร้างจริง ระยะห่างระหว่างเสาของเชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนสามารถมีได้หลากหลายระยะตามหลักวิศวกรรม เป็นเหตุให้ในการศึกษาด้วยแบบจำลองทางกายภาพนั้นต้องพิจารณาระยะห่างของเสาประกอบด้วย ดังนั้นผลสืบเนื่องที่ได้ตามมาคืออิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างเสาต่อการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่น

ตารางที่ ข-1 การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของคลื่นบนเสาเข็ม

ผู้ศึกษา, ปีการศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Hayashi et al. (1966)	Hydraulic Research on the Closely Spaced Pile Breakwater	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ (physical model) ในโรงทดสอบคลื่นภายใต้สภาวะคลื่นปกติ โดยเป็นการจำลองการทำงานของเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มและการใส่แผ่นโครงสร้าง โดยมีการจัดเรียงเพียงแถวเดียว ทดลองโดยเปลี่ยนแปลงของว่างระหว่างต้นของเสาเข็มตั้งแต่ 0 ถึง 0.22 เท่าของขนาดเสาเข็ม (b/d ตั้งแต่ 0 ถึง 0.22) ทำการเปลี่ยนแปลงความสูงคลื่นแต่ใช้คาบคลื่นคงที่ ตัวแปรที่สนใจประกอบด้วยสัมประสิทธิ์การผ่านได้และการสะท้อนของคลื่น การกระจายโมเมนตัมที่กระทำกับโครงสร้าง	มีการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อระบุตัวแปรและสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ และตั้งเป็นสมการของงานศึกษาที่จากนั้นทดสอบผลลัพธ์ด้วยแบบจำลองกายภาพเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกับสมการในกรณีที่มีสัมประสิทธิ์ปรับแก้เท่ากับ 0.9 ส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีผลลัพธ์ที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อช่องว่างระหว่างต้นของเสาเข็มเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (K_t) เพิ่มขึ้นและสัมประสิทธิ์การสะท้อน (K_r) ลดลง และเมื่อความสูงคลื่นเพิ่มขึ้นจะให้ผลลัพธ์ที่ตรงข้าม โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะอยู่ในช่วง 0.22 ถึง 0.7 และสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.6 ส่วนการกระจายโมเมนตัมให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับสมการความสัมพันธ์เช่นกัน ดังนั้นสมการที่พัฒนาขึ้นจะมีความมั่นใจในการใช้งานได้มากขึ้น
Hayashi et al. (1968)	Closely Spaced Pile Breakwater as a Protection Structure against Beach Erosion	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ ในโรงทดสอบคลื่นภายใต้สภาวะคลื่นปกติ โดยเป็นการจำลองการทำงานของเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม โดยมีการจัดเรียงเพียงแถวเดียว ทดลองโดยเปลี่ยนแปลงของว่างระหว่างต้นของเสาเข็มตั้งแต่ 0.04 ถึง 0.2 เท่าของขนาดเสาเข็ม (b/d ตั้งแต่ 0.04 ถึง 0.2) ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย	มีการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อระบุตัวแปรและสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ และตั้งเป็นสมการของงานศึกษาที่จากนั้นทดสอบผลลัพธ์ด้วยแบบจำลองกายภาพเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนมีผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกับสมการที่สร้างไว้ โดยสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเพิ่มขึ้นและการสะท้อนลดลงเมื่อช่องว่างระหว่างเสาเข็ม

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
		<p>สัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นความถี่ของน้ำที่เกิดเนื่องจากระยะบีบตัวของเสาเข็มที่อยู่ติดกัน การกักตุนน้ำที่ฐานของเสาเข็ม</p>	<p>เพิ่มขึ้น เมื่อความถี่คลื่นเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะลดลง และการสะท้อนจะเพิ่มขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.6 และสัมประสิทธิ์การสะท้อนอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.6 น้ำที่ไหลเข้าช่องว่างระหว่างเสาเข็มในทิศเข้าหาชายฝั่งมีความเร็วกว่าทิศออก ความลึกที่ถูกต้องที่สุดที่ฐานมีค่าประมาณได้กับสัดส่วนของความเร็วกว่าที่ไหลต่อความเร็วการตกของวัสดุที่อยู่น้ำ โดยส่วนใหญ่มีค่าอยู่ที่ประมาณ 1.5 - 2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม</p>
Grune and Kohlhase (1974)	Wave Transmission through Vertical Slotted Walls	<p>ใช้แบบจำลองทางกายภาพ (physical model) ในรางทดสอบคลื่นภายใต้สภาวะคลื่นปกติ โดยเป็นการจำลองการทำงานของเขื่อนกันคลื่นแบบ slotted wall ซึ่งมีลักษณะเชิงชลศาสตร์คล้ายกับเสาเข็มที่เรียงตัวแนวเดียว ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น ซึ่งจะพิจารณาเพื่อหาสมการแสดงความสัมพันธ์กับตัวแปรลักษณะทางกายภาพอื่น ๆ เช่น ลักษณะเขื่อนกันคลื่น ลักษณะของคลื่น เป็นต้น</p>	<p>มีการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อระบุตัวแปรและสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ออกมาและตั้งเป็นสมการของงานศึกษานี้ จากนั้นทดสอบผลลัพธ์ด้วยแบบจำลองกายภาพเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการ ผลที่ได้พบว่าเมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างในทิศทางกับโครงสร้าง ความลึกสัมพัทธ์และความหนาโครงสร้างจะมีผลต่อค่า K_t น้อยกว่าเมื่อเทียบกับความถี่คลื่นและรูปร่างของโครงสร้าง แต่เมื่อมีคลื่นเข้ามาไม่เป็นแนวตั้งฉากจะพบว่า รูปร่างของโครงสร้างจะมีความสำคัญมากขึ้นอีกและมากกว่ามุมที่ต่างออกไป หากมุมที่คลื่นเคลื่อนที่เข้าไม่ตั้งฉากกับโครงสร้างและยังไม่มากจนขนานกับโครงสร้าง จะได้ความสัมพันธ์ของ K_t ดังสมการต่อไปนี้</p>

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Hutchinson and Raudkivi (1984)	Case History of a Spaced Pile Breakwater at Half Moon Bay Marina Auckland, New Zealand	ดำเนินการออกแบบและก่อสร้าง โดยการศึกษาพิจารณา เชื่อกันกันคลื่นทุกรูปแบบและพบว่าไม่มีความเหมาะสมในการใช้งาน มีเพียงเชื่อกันกันคลื่นแบบเสาเข็มเท่านั้น จึงดำเนินการออกแบบและก่อสร้าง	$K_t = 0.5\sqrt{1-w^2}(1+(\cos \beta)^a)$ <p>เมื่อ w คือ wall-element ratio β คือ มุมของคลื่น a คือ shape coefficient</p> <p>การออกแบบและก่อสร้างแล้วเสร็จที่ Half moon bay marina ที่ Auckland ซึ่งเป็นเมืองท่าขนาดใหญ่ของประเทศนิวซีแลนด์ ตัวโครงสร้างตั้งติดกับท่าเรือขนส่งที่มีเรือเข้าออกถึง 485 ลำ ผลการทดสอบพบว่าเชื่อกันกันคลื่นที่สร้างขึ้นสามารถลดพลังงานคลื่นลงได้ ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์</p>
Weele and Herbich (1984)	Wave Reflection and Wave Transmission for Pile Arrays	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ (physical model) เพื่อศึกษาถึงการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของกลุ่มเสาเข็มทรงกระบอกขนาด 4 x 4 ต้น โดยทดสอบในรางน้ำ เปลี่ยนแปลงความชันคลื่น 3 ขนาด แบ่งการทดลองออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 เปลี่ยนช่องว่างระหว่างต้นตั้งแต่ 1 ถึง 4 เท่าของขนาดเสาเข็มและใช้ช่องว่างระหว่างแถวคอกที่เป็น 2 เท่าของขนาดเสาเข็ม กรณีที่ 2 ช่องว่างระหว่างต้นเท่าของขนาดเสาเข็ม กรณีที่ 3 ช่องว่างระหว่างต้นคอกที่เป็น 2 เท่าของขนาดเสาเข็ม แต่เปลี่ยนแปลงช่องว่างระหว่างแถวเป็นตั้งแต่ 1 ถึง 4 เท่าของขนาดเสาเข็ม และกรณีที่ 3 เป็นการจัดเรียงแบบสลับฟัน	<p>เมื่อความชันคลื่นสูงขึ้น สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (K_t) จะลดลง และสัมประสิทธิ์การสะท้อน (K_r) จะเพิ่มขึ้น เมื่อช่องว่างระหว่างต้นของเสาเข็มเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะเพิ่มขึ้นและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะลดลง ส่วนการจัดเรียงแบบสลับฟันปลานั้นไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน แต่จะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การส่งผ่านลดลงเล็กน้อย โดยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นอยู่ในช่วง 0.81 ถึง 0.95 และสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นอยู่ที่ 0.07 ถึง 0.1</p>

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Truitt and Herbich (1986)	Transmission of Random Wave Through Pile Breakwaters	ปลาที่มีช่องว่างระหว่างต้นและช่องว่างระหว่างแถว เป็น 2 เท่าของขนาดเสาเข็ม ใช้แบบจำลองทางกายภาพ ในรางทดสอบคลื่นภายในได้ สภาวะคลื่นปกติ โดยเป็นการจำลองการทำงานของ เซียนกันคลื่นแบบเสาเข็ม โดยมีการจัดเรียงเพียงแถว เดียว เปลี่ยนแปลงของว่างระหว่างเสาเข็ม 3 ขนาด ตั้งแต่ 0.05 ถึง 0.2 เท่าของขนาดเสาเข็ม และ เปลี่ยนแปลงความลึกน้ำ และลักษณะคลื่น ตัวแปรที่ พิจารณาวิเคราะห์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น ซึ่งจะพิจารณาเพื่อหาสมการแสดงความสัมพันธ์กับตัว แปรลักษณะทางกายภาพอื่น ๆ เช่น ลักษณะเขื่อนกัน คลื่น ลักษณะของคลื่น เป็นต้น	ดำเนินการศึกษาต่อยอดจากสมการการศึกษาของ Hayashi et al. (1966) จากนั้นทดสอบผลลัพธ์ด้วยแบบจำลองกายภาพเพื่อ ตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่พัฒนาต่อยอด ผลที่ได้พบว่าค่า K_r ที่ได้จากการเก็บข้อมูลและนำมาวิเคราะห์เป็น H_{rms} , \bar{H} , H_s จาก การทดลองมีค่าที่ใกล้เคียงกับสมการที่พัฒนาขึ้น ความลึกสัมพัทธ์ ของคลื่นและความชันคลื่นมีผลต่อการสลายพลังงานคลื่น แต่ขนาด ช่องว่างระหว่างเสาเข็มมีผลต่อการสลายคลื่นมากกว่า โดย สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเพิ่มขึ้นเมื่อช่องว่างระหว่างต้นของ เสาเข็มเพิ่มขึ้น โดยอยู่ในช่วง 0.27 ถึง 0.88
Herbich and Douglas (1988)	Wave Transmission through a Double-Row Pile Breakwater	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ เพื่อศึกษาถึงการส่งผ่าน คลื่นอันเนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม รูปร่างเป็นทรงกระบอกที่มี 2 แถวและจัดเรียงแบบ สลับฟันปลา ทำการทดลองในรางน้ำและใช้คลื่นแบบ ไม่สม่ำเสมอ โดยมีช่องว่างระหว่างแถวเป็น 1 เท่าของ ขนาดเสาเข็ม และเปลี่ยนแปลงของว่างระหว่างต้นใน แถวเดียวกัน 2 ขนาด คือ 0.1 และ 0.2 เท่าของขนาด เสาเข็ม	ช่องว่างระหว่างต้นที่แคบกว่าจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน คลื่นลดลง และการจัดเรียงเสาเข็ม 2 แถวสลับฟันปลาช่วยให้การ ส่งผ่านคลื่นลดลงถึง 10 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่าการส่งผ่าน คลื่นลดลงเมื่อความสูงคลื่นมากขึ้น คาบคลื่นลดลง และความชัน คลื่นมากขึ้น

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Mani and Jayakumar (1995)	Wave Transmission by Suspended Pipe Breakwater	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ เพื่อศึกษาดังกล่าวผ่านการคลื่นอันเนื่องมาจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มรูปร่างเป็นทรงกระบอกที่สามารถลอยอยู่ ณ โกลีตัวน้ำได้ โดยการยึดกับโครงสร้างที่แข็งแรง ทำการทดลองที่ช่องว่างระหว่างต้นตอเป็น 0.22 เท่าของความลึกน้ำ และ ความการจมลึกน้ำเท่ากับ 0.46 เท่าของขนาดเสาเข็ม ทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น	เขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มแบบลอยมีความคุ้มค่าสูงในเชิงเศรษฐศาสตร์ ที่ตำแหน่งช่องว่างระหว่างต้นตอเป็น 0.22 เท่าของขนาดเสาเข็ม และความการจมลึกน้ำเท่ากับ 0.46 เท่าของความลึกน้ำ เป็นต้นตำแหน่งที่เขื่อนกันคลื่นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยสามารถลดคลื่นได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงที่ความชันคลื่นมากกว่า 0.008 แต่เมื่อความชันคลื่นลดลงต่ำกว่า 0.005 ประสิทธิภาพการทำงานของเขื่อนกันคลื่นจะลดลงเหลือ 40 เปอร์เซ็นต์
Rao et al. (1999)	Laboratory Investigation on Wave Transmission through Two Rows of Perforated Hollow Piles	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ (physical model) เพื่อศึกษาการส่งผ่านคลื่นเนื่องมาจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มรูปร่างทรงกระบอกที่มี 2 แถวที่มีการเจาะรู ทดลองในรางน้ำโดยทำการเปลี่ยนความลึกน้ำ และขนาดของความชันคลื่น การจัดเรียงนั้นได้ทำการเปลี่ยนแปลงช่องว่างระหว่างต้นตอของเสาเข็มตั้งแต่ 0.5 ถึง 1 เท่าของขนาดเสาเข็ม และช่องว่างระหว่างแถวตั้งแต่ 0.5 ถึง 2 เท่าของขนาดเสาเข็ม	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะลดลงเมื่อ ความชันคลื่นเพิ่มมากขึ้น ช่องว่างระหว่างต้นตอของเสาเข็มลดลง หรือช่องว่างระหว่างแถวลดลง การจัดเรียงแบบสลับฟันปลาจะมีผลต่อสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 0.9
Rao et al. (2002)	Wave Transmission and Wave Reflection for Two Rows of Perforated Hollow Piles	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ เพื่อศึกษาการส่งผ่านคลื่นเนื่องมาจากอิทธิพลของเสาเข็มกันคลื่นรูปทรงกระบอกที่มี 2 แถวที่มีการเจาะรูที่เสาเข็ม การจัดเรียงได้เปลี่ยนแปลงช่องว่างระหว่างต้นตอของเสาเข็มตั้งแต่ 0.5	เมื่อความชันของคลื่นมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านลดลงแต่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นเพิ่มขึ้น ช่องว่างระหว่างต้นตอของเสาเข็มลดลงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านลดลงแต่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเพิ่มขึ้น การจัดเรียงแบบ 2 แถวทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การ

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
		ถึง 1 เท่าของขนาดเสาเข็ม และช่องว่างระหว่างแถว ตั้งแต่ 0.5 ถึง 2 เท่าของขนาดเสาเข็ม ศึกษาในรางน้ำ โดยเปลี่ยนแปลงความลึกน้ำและขนาดความชันคลื่น	ส่งผ่านลดลงต่างกันเล็กน้อยกับกรณีแถวเดียว แต่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเพิ่มขึ้นและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนลดลงเมื่อช่องว่างระหว่างแถวมากขึ้น และการจัดเรียงแบบพินปาลามีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเพียงเล็กน้อย โดยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 0.9 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.3
Yagci et al. (2006)	An Experimental Model Application of Wavescreen: Dynamic Pressure, Water Partical Velocity and Wave Measurements	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ เพื่อศึกษาถึงถึงการส่งผ่านคลื่น และความเร็วของอนุภาคน้ำภายใต้คลื่นบริเวณแนวเสาเข็มรูปทรงกระบอกที่มีแถวเดียว ศึกษาในรางน้ำโดยเปลี่ยนแปลงความสูงคลื่นและคาบคลื่น จัดเรียงช่องว่างระหว่างต้นของเสาเข็มเท่ากับ 0.17 เท่าของขนาดเสาเข็ม	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเพิ่มขึ้นเมื่อคาบคลื่นเพิ่มขึ้น โดยสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นอยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 0.75 นอกจากนี้ยังพบว่าความเร็วของอนุภาคน้ำใต้คลื่นลดลงมากบริเวณใกล้ผิวหน้า แต่ลดลงเพียงเล็กน้อยในบริเวณใกล้ท้องน้ำ
Huang (2007)	Wave Interaction with One or Two Rows of Closely Spaced Rectangular Cylinders	ใช้แบบจำลองทางกายภาพในการเก็บข้อมูลคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มที่มีการวางแนวทั้งชั้นเดียวและ 2 ชั้น โดยนำข้อมูลไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น เพื่อนำไปปรับเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น การจำลองคลื่นใช้คลื่นปกติ ในรางน้ำจำลองคลื่น	ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองจากแบบจำลองทางกายภาพที่คำนวณออกมาในรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น มีความใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จึงไม่มีความจำเป็นต้องปรับแก้ข้อมูลมากนัก แสดงให้เห็นว่าการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความเหมาะสมอยู่ก่อนแล้ว แต่พบว่าเสาเข็มแบบเดียวกันจะมีประสิทธิภาพดีเฉพาะในคลื่นที่ไม่แรงเท่านั้น หากคลื่นมีกำลังและความสูงมากขึ้น ควรใช้เสาเข็มสองแนวจะมีประสิทธิภาพมากกว่า

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
ธนวัฒน์ จารุพงษ์ สกุลและคณะ (2551)	ขุนสมุทรจีน 49A2 ต้นแบบ การแก้ไขปัญหาน้ำทะเลกัด เซาะหาดโคลน	ศึกษาการส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มที่ใช้เสาสามเหลี่ยมด้านเท่าขนาด 0.5 เมตร ทำการจัดเรียงแบบ 3 แถวสลับฟันปลา ช่องว่างระหว่างต้นและระหว่างแถวเท่ากับ 2 เท่าของขนาดเสาเข็ม ศึกษาโดยการวัดข้อมูลภาคสนาม ณ ชายฝั่งทะเลบ้านขุนสมุทรจีน ภายในจังหวัดสมุทรปราการ	ความสูงคลื่นลดลงประมาณ 22 เปอร์เซ็นต์

ข-2 การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับพฤติกรรมของคลื่นเนื่องจากทุ่นลอยกันคลื่น

ทุ่นลอยกันคลื่น (floating breakwater) เป็นโครงสร้างที่มีความหนาแน่นโดยรวมน้อยกว่าน้ำ ทำให้สามารถลอยอยู่บริเวณผิวน้ำได้ ดังนั้นโครงสร้างของทุ่นลอยกันคลื่นจึงอยู่เฉพาะบริเวณผิวน้ำหรือปิดกันเพียงบางส่วนของหน้าตัดความลึกบริเวณผิวน้ำ กล่าวคือ มีช่องว่างให้น้ำผ่านได้ในบริเวณด้านใต้ของทุ่นลอยกันคลื่น โครงสร้างมีการยึดเพื่อให้ตัวโครงสร้างลอยอยู่ตำแหน่งผิวน้ำด้วยเชือกลวด หรือโครงสร้างอื่น ๆ โดยยึดกับท้องน้ำหรือโครงสร้างข้างเคียง (McCartney, 1985)

ข้อดีของทุ่นลอยกันคลื่น คือ สามารถใช้งานได้ในลักษณะชายฝั่งที่ไม่สามารถรับกำลังอัดได้มาก ได้แก่ หาดโคลน ซึ่งเป็นชายหาดส่วนใหญ่ที่พบในอ่าวไทยตอนบน มีความคุ้มค่าในการลงทุนในน้ำลึกเนื่องจากคลื่นน้ำลึกจะเกิดเฉพาะบริเวณผิวน้ำเท่านั้น ไม่รบกวนการเคลื่อนตัวของตะกอนชายฝั่งและระบบนิเวศทางทะเล เพราะตัวโครงสร้างอยู่บริเวณผิวน้ำเท่านั้น สามารถใช้ได้กับสภาวะที่ผันผวนของระดับน้ำได้ดีเนื่องจากโครงสร้างจะลอยขึ้นลงตามระดับน้ำ เคลื่อนย้ายได้ง่าย และสามารถปรับแต่งให้ตัวโครงสร้างใช้ในงานอื่น ๆ ได้ เช่น ทางเดินท่าเรือขนาดเล็ก เป็นต้น อย่างไรก็ตาม สำหรับข้อเสียของทุ่นลอยกันคลื่น คือ มีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานคลื่นต่ำเมื่อคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ามาเป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นมาก เนื่องจากคลื่นยาวจะกระจายพลังงานคลื่นลงไปถึงระดับลึก แต่ทุ่นลอยกันคลื่นสามารถสลายพลังงานได้เพียงที่บริเวณผิวน้ำเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโครงสร้างไปตามแรงคลื่นตลอดเวลา ทำให้ระบบผูกยึดอาจมีความล้าเกิดขึ้นได้เร็วกว่าเชือกกันคลื่นแบบยัดนิ่ง และต้องใช้งบประมาณในการซ่อมแซมที่สูงมาก (Biesheuvel, 2013)

เนื่องจากทุ่นลอยกันคลื่นมีมากมายหลายประเภทขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและลักษณะทางกายภาพดังที่ปรากฏในการศึกษาของ Hales (1981) ทั้งนี้ด้วยชนิดของทุ่นลอยกันคลื่นที่มีมากทำให้ McCartney (1985) ได้จัดหมวดหมู่ประเภทของทุ่นลอยกันคลื่นใหม่ให้มีความง่ายและสะดวกต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้น ต่อมาได้มีการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะคลื่นจากผลของการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของทุ่นลอยกันคลื่นในรูปแบบต่าง โดยทำการศึกษาเพื่อวิเคราะห์การส่งผ่านคลื่น (wave transmission) และการสะท้อนของคลื่น (wave reflection) โดยพิจารณาเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน และสัมประสิทธิ์การสะท้อน เนื่องจากทุ่นลอยกันคลื่นมีประเภทและลักษณะที่หลากหลาย ทำให้มีผู้สนใจที่จะออกแบบทุ่นลอยลักษณะใหม่ ๆ และศึกษาทุ่นลอยกันคลื่นแบบเดิมเพิ่มเติม โดยพิจารณาถึงพฤติกรรมของการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นที่เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของคลื่นและทุ่นลอยกันคลื่น ดังปรากฏในงานศึกษาของ Jamieson et al. (1995) และ Dong et al. (2008)

จากนั้นมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของการสลายพลังงานอันเนื่องจากอิทธิพลของหุ่นลอยกันเคลื่อนที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ ประกอบกับการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเคลื่อนที่เคลื่อนที่เข้าสู่เขื่อนกันคลื่น ดังปรากฏในงานศึกษาของ E. Koutandos et al. (2005) ต่อมา มีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของแรงที่กระทำกับโครงสร้างอันเนื่องจากอิทธิพลของเคลื่อนที่กระทำกับโครงสร้างและการเคลื่อนที่ของโครงสร้างอันเนื่องจากแรงที่กระทำ ดังปรากฏในงานศึกษาของ Cox and Beach (2006), Cox et al. (2009) และ Ji et al. (2015) การศึกษาในเรื่องดังกล่าวมีการศึกษาด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ ดังปรากฏในการศึกษาของ Isaacson et al. (1988) และ E. V. Koutandos et al. (2004) ภายหลังมีความต้องการที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางกายภาพของเคลื่อนที่และหุ่นลอยกันเคลื่อนที่กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน จึงได้มีการศึกษาสร้างสมการความสัมพันธ์เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ดังปรากฏในงานศึกษาของ Alizadeh et al. (2014) และ ชัยยุทธ ชินณะราศรี และคมสัน วิริยกิจจา (2560)

สำหรับในหัวข้อนี้ จะสรุปรายละเอียดของการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับหุ่นลอยกันเคลื่อนที่โดยมีรายละเอียดที่สามารถสรุปได้ดังตารางที่ ข-2 และสามารถสรุปประเด็นสำคัญที่แต่ละการศึกษาพิจารณาและได้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกัน เป็นข้อ ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) หุ่นลอยกันเคลื่อนที่ทำงานได้มีประสิทธิภาพดีในเคลื่อนที่มีคาบคลื่นสั้น โดยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเคลื่อนที่มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีแนวโน้มลดลง เมื่อคาบคลื่นเพิ่มมากขึ้น
- 2) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านลดลงเมื่อค่าความลึกน้ำเพิ่มขึ้น
- 3) ความกว้างที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างหุ่นลอยกันเคลื่อนที่มีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านลดลง
- 4) ความยืดหยุ่นของโครงสร้างมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (K_T) ลดลงแต่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเพิ่มขึ้น (K_r)
- 5) ความลึกที่เพิ่มขึ้นของหุ่นลอยกันเคลื่อนที่มีผลทำให้การสะท้อนกลับของเคลื่อนที่และปริมาณการสลายพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะลดลง
- 6) หากเคลื่อนที่เคลื่อนที่เข้ามากระทบหุ่นลอยกันเคลื่อนที่มีความชันมาก การสะท้อนกลับของเคลื่อนที่และปริมาณการสลายพลังงานมีค่ามาก และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านน้อย

ลักษณะของหุ่นลอยกันเคลื่อนที่นั้นลอยอยู่บริเวณผิวน้ำ ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับโครงสร้างที่ใช้สลายพลังงานเคลื่อนที่ของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน ดังนั้นตัวแปรลักษณะของโครงสร้างหุ่นลอยกันเคลื่อนที่ เช่น ความลึกการจม เป็นต้น จึงเป็นตัวแปรที่อาจมีผลต่อการศึกษา

ตารางที่ ข-2 การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับพฤติกรรมการช้อปปิ้งออนไลน์

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Hales (1981)	Floating Breakwater: State-of-the-Art Literature Review	ทำการรวบรวมผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับเพื่อนช้อปปิ้งออนไลน์ และสรุปเป็นข้อมูลเชิงวิชาการเพื่อใช้ในการออกแบบ และคำนวณเกี่ยวกับเพื่อนช้อปปิ้งออนไลน์	อธิบายลักษณะและประเภทของเพื่อนช้อปปิ้งออนไลน์ โดยอาศัยผลลัพธ์จากงานวิจัยต่าง ๆ และสรุปเป็นกระบวนการที่ใช้ในการออกแบบและคำนวณเกี่ยวกับเพื่อนช้อปปิ้งออนไลน์ โดยมีลักษณะคล้ายกับคู่มือการออกแบบเพื่อนช้อปปิ้งออนไลน์ ซึ่งต่อมาถูกพัฒนาต่อยอดโดย U.S. Army
McCartney (1985)	Floating Breakwater Design	ทำการรวบรวมผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับเพื่อนช้อปปิ้งออนไลน์ จากแหล่งต่าง ๆ และสรุปเป็นข้อมูลเชิงวิชาการในเรื่องเพื่อนช้อปปิ้งออนไลน์ อันประกอบด้วย ประเภทของเพื่อนช้อปปิ้งออนไลน์ ข้อดีข้อเสีย วิธีการผูกมัด รวมถึงกระบวนการขั้นตอนในการออกแบบเพื่อนช้อปปิ้งออนไลน์	เพื่อนช้อปปิ้งออนไลน์แบ่งออกเป็น 4 ประเภท 1. box breakwater 2. pontoon breakwater 3. mat breakwater 4. tethered breakwater โดยแต่ละประเภทมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตามพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านลดลงเมื่อค่าความลึกน้ำเพิ่มขึ้น ความกว้างสัมพันธ์ของเพื่อนช้อปปิ้งออนไลน์ และระยะจมน้ำสัมพันธ์มากขึ้น นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงการผูกมัดเพื่อนช้อปปิ้งออนไลน์ ลักษณะแนวการวางเพื่อนช้อปปิ้งออนไลน์ ข้อจำกัดแต่ละประเภทของเพื่อนช้อปปิ้งออนไลน์ และกระบวนการขั้นตอนในการออกแบบเพื่อนช้อปปิ้งออนไลน์
Isaacson et al. (1988)	Floating Breakwater Response to Wave Action	ทำการศึกษาโดยการศึกษาค้นคว้าข้อมูลในพื้นที่ที่มีการใช้งาน โครงสร้างเพื่อนช้อปปิ้งออนไลน์จริง ศึกษาข้อมูลต่าง ๆ ประกอบด้วย ลักษณะทางกายภาพของคลื่น ลักษณะทางกายภาพของเพื่อนช้อปปิ้งออนไลน์ และนำข้อมูลมา	ผลการศึกษพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกิดขึ้นเนื่องจาก การศึกษาข้อมูลจากภาคสนามถูกปรับเทียบให้มีความถูกต้องมากขึ้น ด้วยข้อมูลจากการศึกษาด้วยแบบจำลองทางกายภาพ

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Jamieson et al. (1995)	Improving the Efficiency of Rectangular Caisson Floating Breakwater	ใช้แบบจำลองกายภาพ (physical models) ทดลองในรางทดสอบคลื่น 2 มิติ ภายใต้สภาวะคลื่นปกติ (regular waves) ทำการทดสอบกับโครงสร้างทุ่นลอยกันคลื่น 4 แบบด้วยกัน ได้แก่ 1. กล่องกว้าง 3 เมตร 2. กล่องกว้าง 3 เมตร ที่มีความลาด 3. กล่องกว้าง 6 เมตร 4. กล่องกว้าง 6 เมตร ที่มีแผ่นโปร่งน้ำด้านล่าง ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กับขนาดของทุ่นลอยกันคลื่น, ความลาดด้านต้นน้ำของทุ่นกันคลื่น และผลของการติดตั้งแผ่นโปร่งน้ำด้านล่างทุ่นลอยกันคลื่น	จากการทดลองพบว่าทุ่นลอยน้ำที่มีประสิทธิภาพในการลดคลื่นสูงที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นต่ำที่สุดในทุ่นลอยกันคลื่นทั้ง 4 รูปแบบ คือ แบบกล่องกว้าง 6 เมตร ที่มีแผ่นโปร่งน้ำด้านล่างทุ่นลอยกันคลื่น โดยมีค่า K_r เพียง 0.05 ในคาบคลื่น 1.5 วินาที และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อคาบคลื่นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความกว้างที่เพิ่มขึ้นของทุ่นลอยกันคลื่นยังส่งผลให้ค่า K_r ลดลงอีกด้วย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มแผ่นโปร่งน้ำด้านล่างช่วยให้ทุ่นลอยกันคลื่นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยสามารถลดความสูงลงได้ถึง 25% - 82% ขึ้นกับคาบคลื่นตกระยะทุ่น นอกจากลดค่า K_r ลงแล้ว ยังไม่เพิ่มขนาดของแรงที่กระทำต่อตัวโครงสร้างอีกด้วย โดยสามารถตรวจสอบได้จากค่าของแรงดึงการยึดทุ่นลอยที่ไม่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ
E. V. Koutandos et al. (2004)	Floating Breakwater Response to Waves Action Using a Boussinesq Model	ศึกษาลักษณะพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของโครงสร้างทุ่นลอยกันคลื่น ทั้งรูปแบบที่ทุ่นลอยกันคลื่นยึดอยู่กับ และการเคลื่อนที่ได้ โดยพิจารณาว่าร่วมกันกับสมการของ Boussinesq สร้างออกมาเป็นแบบจำลองทาง	สามารถวิเคราะห์ผลการศึกษาได้ดังนี้ 1. ค่า B/L และ dr/h เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อศักยภาพในการทำงานของทุ่นลอยกันคลื่น ทุ่นลอยกันคลื่นจะทำงานไม่ได้มีประสิทธิภาพดีเมื่อคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้น

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
	Coupled with a 2DV Elliptic Solver	คณิตศาสตร์ จากนั้นทำการสอบเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์ด้วยข้อมูลจากแบบจำลองทางกายภาพ ตัวแปรที่สนใจ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น, ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น, แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากคลื่น และการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง	<p>2. การเคลื่อนที่ของโครงสร้างมีความสัมพันธ์กับมุมเฟสของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง โดยในคลื่นยาวโครงสร้างจะมีการเคลื่อนที่ในแนวตั้งมากกว่าในคลื่นสั้น การเคลื่อนที่ที่ตั้งกล่าวจะส่งผลต่อการสลายพลังงานของคลื่น</p> <p>3. ปฏิกิริยาที่เรียกว่าการสั่นพ้อง (resonance) เกิดขึ้นเมื่อการเคลื่อนที่ของโครงสร้างมีคาบการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกับคาบของคลื่น</p> <p>4. กลไกการทำงานของทุ่นลอยกันคลื่นมีความเกี่ยวข้องกับภาระสะท้อนของคลื่น โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่ามากกว่า 0.9 ในน้ำลึกปานกลาง</p> <p>5. เปรียบแบบพ่นลอยกันคลื่น 2 แบบ คือ fixed และ restrained พบว่ามีการเคลื่อนที่ในช่วงเดียวกัน แต่จะมีความผันผวนมากกว่าในแบบ fixed</p>
E. Koutandos et al. (2005)	Floating Breakwaters under Regular and Irregular Wave Forcing: Reflection and Transmission Characteristics	ใช้แบบจำลองกายภาพ (physical models) ทดลองในรางทดสอบคลื่นภายใต้สภาวะคลื่นปกติ (regular waves) และสภาวะคลื่นที่ไม่ปกติ (irregular waves) ในคลื่นความถี่ระดับปานกลางและตื้น การทดลองทำโดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของคลื่นและพ่นลอยกันคลื่นชนิดต่าง ๆ โดยประกอบด้วย <ol style="list-style-type: none"> 1. พ่นลอยกันคลื่นแบบยึดเดี่ยว (single fixed) 2. พ่นลอยกันคลื่นแบบผูกยึด (heave motion) 3. พ่นลอยกันคลื่นแบบยึดเดี่ยวและเพิ่มแผ่นบริเวณ 	<p>สามารถวิเคราะห์ผลการศึกษาได้ดังนี้</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. สำหรับพ่นลอยกันคลื่นแบบยึดเดี่ยว (single fixed) ให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่สูง โดยมีค่าระหว่าง 0.4 ในคลื่นยาว และ 0.9 ในคลื่นสั้น 2. การลดทอนพลังงานเกิดจากการปั่นป่วนและหมุนของอนุภาคน้ำบริเวณด้านหน้าของโครงสร้าง 3. สำหรับพ่นลอยแบบผูกยึด (heave motion) ให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่น้อยกว่าแบบเดี่ยว แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ใกล้เคียงกัน

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Cox and Beach (2006)	Floating Breakwater Performance -Wave Transmission and Reflection, Energy Dissipation, Motions and Restraining Forces	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ (physical models) ในรางทดสอบคลื่น 2 มิติ ภายใต้สภาวะคลื่นปกติ (regular waves) โดยทำการศึกษากันลอยกันคลื่น 3 รูปแบบด้วยกัน คือ 1. single breakwater 2. catamaran 3. double breakwater ทำการทดสอบและหาความสัมพันธ์ของลักษณะทางกายภาพของคลื่นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน, สัมประสิทธิ์การสะท้อน, การสูญเสียพลังงาน, การเคลื่อนที่ของทุ่นลอยกันคลื่น และแรงที่กระทำต่อทุ่นลอยกันคลื่น	4. แผ่นที่ติดด้านหน้าของโครงสร้างสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของทุ่นลอยกันคลื่นได้ แต่ไม่มีผลต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างแผ่นแบบกับน้ำกับโปร่งน้ำ 5. ทุ่นลอยกันคลื่นแบบคู่ (double fixed) ให้ประสิทธิภาพในการใช้งานสูงสุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเพียงแค่ว่า 0.12 เท่านั้น 6. อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบเรื่องต้นทุนในการดำเนินการก่อสร้างแล้ว การใช้ทุ่นลอยกันคลื่นแบบยึดเดี่ยวและเพิ่มแผ่นบริเวณด้านหน้าโครงสร้างจะให้ความคุ้มค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับโครงสร้างลักษณะอื่น ๆ การทดลองได้ผลลัพธ์และสามารถสรุปได้เป็น 3 หัวข้อย่อยดังต่อไปนี้ <u>Transmission และ Reflection</u> จากการทดลองพบว่าแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อคาบคลื่นเกิน 3 วินาที ในทุ่นลอยกันคลื่นทั้ง 3 รูปแบบ และมีค่าน้อยที่สุดในทุ่นลอยกันคลื่นแบบ double breakwater สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความสูงคลื่นเมื่อคาบคลื่นน้อยกว่า 3.5 วินาที แต่ลดลงเมื่อคาบคลื่นเพิ่มขึ้น <u>Wave energy losses</u> เมื่อคาบคลื่นสูงขึ้น ทุ่นลอยกันคลื่นจะสามารถลดพลังงานคลื่นได้ลดลง หรือมีพลังงานที่ผ่านตัวทุ่นลอยน้ำไปเพิ่มมากขึ้น <u>Breakwater motions and Restraining forces</u> ทุ่นลอยกันคลื่นแบบ single มีการเคลื่อนตัวสูงที่สุด ตามมาด้วยทุ่น

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Dong et al. (2008)	Experiments on Wave Transmission Coefficients of Floating Breakwaters	<p>ใช้แบบจำลองทางกายภาพ (physical models) ในร่างทดสอบคลื่น 2 มิติ โดยทำการศึกษาคลื่นลอยกันคลื่น 3 รูปแบบด้วยกัน คือ</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. กล่องเดี่ยว (single box) 2. กล่องคู่ (double box) 3. แผ่นตาข่าย (board net) <p>ทำการทดสอบและหาความสัมพันธ์ของลักษณะทางกายภาพของคลื่นลอยกันคลื่นต่อสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจุดประสงค์ของการศึกษาหลักเพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบกระชังเลี้ยงปลาให้เป็นคลื่นลอยกันคลื่น</p>	<p>ลอยกันคลื่นแบบคู่ และ catamaran ตามลำดับ สำหรับแรงที่กระทำกับตัวโครงสร้างที่ลอยกันคลื่นไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับคาบคลื่น และมีความมากกว่าในคลื่นลอยกันคลื่นแบบ catamaran</p> <p>การทดลองได้ผลลัพธ์และสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ความสั้นยาวของเส้นเชื่อมมีผลต่อการยึดโครงสร้างที่ลอยกันคลื่น หากความยาวสั้นลง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีค่าลดลงในคลื่นลอยกันคลื่นแบบกล่องเดี่ยว (single box) 2. คลื่นลอยกันคลื่นแบบกล่องคู่ (double box) ให้ประสิทธิภาพในการลดคลื่นได้ดีกว่าแบบกล่องเดี่ยว (single box) 3. ความกว้างที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างที่ลอยกันคลื่นมีผลให้สัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีค่าลดลงในคลื่นลอยกันคลื่นแบบแผ่น (board net) 4. ความลึกของตาข่ายไม่มีผลต่อการลดคลื่นอย่างมีนัยสำคัญในคลื่นลอยกันคลื่นแบบแผ่นตาข่าย (board net) 5. ความกว้างที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างที่ลอยกันคลื่นไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น อย่างไรก็ตามมีนัยสำคัญในคลื่นลอยกันคลื่นแบบแผ่นตาข่าย (board net) 6. ความยืดหยุ่นของโครงสร้างมีผลให้ค่าการส่งผ่านมีค่าลดลงในคลื่นลอยกันคลื่นแบบแผ่นตาข่าย (board net) 7. คลื่นลอยกันคลื่นสามารถลดความเร็วกระแสได้ประมาณ 20% 8. ความเร็วกระแสในทิศทางเดียวกับคลื่นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Cox et al. (2009)	Floating Breakwater Performance in Irregular Waves with Particular Emphasis on Wave Transmission and Reflection, Energy Dissipation, Motions and Restraining Forces	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ (physical models) ในรางทดสอบคลื่น 2 มิติ ภายใต้สภาวะคลื่นปกติ (regular waves) และสภาวะคลื่นไม่ปกติ (irregular waves) ทำการทดสอบและหาค่าความสัมพันธ์ของลักษณะทางกายภาพของคลื่นกับสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน, สัมประสิทธิ์การสะท้อน, การสูญเสียพลังงาน, การเคลื่อนที่ของทุ่นลอยกันคลื่น และแรงที่กระทำต่อทุ่นลอยกันคลื่น	<p>การส่งผ่านคลื่นมีค่าที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ความเร็วของการกระแสน้ำในทิศสวนกับคลื่นให้ผลลัพธ์ที่ตรงกันข้าม</p> <p>การทดลองได้ผลลัพธ์และสามารถสรุปได้เป็น 3 หัวข้อหลักดังต่อไปนี้</p> <p>Transmission และ Reflection</p> <p>ในการทดลองโดยใช้คลื่นในสภาวะไม่ปกติ (irregular waves) แนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีแนวโน้มลดลง เมื่อคาบคลื่นเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การเคลื่อนที่ในสภาวะปกติ (regular waves) ได้ผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มเดียวกันแต่มีค่า K_t เพิ่มขึ้น และ K_r ลดลงเล็กน้อย</p> <p>Wave energy losses</p> <p>การเคลื่อนที่ในสภาวะไม่ปกติ (irregular waves) ส่งผลให้พลังงานสามารถผ่านโครงสร้างทุ่นลอยกันคลื่นไปได้ลดลง และมีพลังงานสะท้อนกลับมาเพิ่มมากขึ้น</p> <p>Movements</p> <p>การเคลื่อนที่ของโครงสร้างทุ่นลอยกันคลื่นเพิ่มขึ้นเมื่อใช้คลื่นในสภาวะไม่ปกติ (irregular waves)</p> <p>Forces</p> <p>ไม่มีแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของคลื่นต่อแรงที่กระทำต่อโครงสร้างทุ่นลอยกันคลื่นอย่างมีนัยสำคัญ</p>

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Alizadeh et al. (2014)	Experimental Study of the Performance of Floating Breakwaters with Heave Motion	<p>ใช้แบบจำลองทางกายภาพ (physical models) ในรางทดสอบคลื่น 2 มิติ ภายใต้สภาวะคลื่นปกติ (regular waves) ทำการทดสอบกับทุ่นลอยกันคลื่น 3 แบบด้วยกัน ได้แก่</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Pontoon breakwater 2. T shape breakwater 3. Π shape breakwater <p>ทำการทดสอบและพิจารณาหาค่าความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น, สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และสัมประสิทธิ์การสลายพลังงานของคลื่น กับลักษณะทางกายภาพของทุ่นลอยกันคลื่น และตัวคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ทุ่นลอยกันคลื่น ก่อนดำเนินการทดลอง มีการตรวจสอบขนาดของระยะห่างของเครื่องวัดคลื่นและตำแหน่งของเครื่องวัดคลื่น ทำการวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ ในรูปตัวแปรไร้หน่วย</p>	<p>การทดลองได้ผลลัพธ์และสามารถสรุปได้เป็น 4 หัวข้อหลักดังต่อไปนี้</p> <p><u>Floating breakwater Freedom</u></p> <p>โครงสร้างทุ่นลอยกันคลื่นที่มีลักษณะการผูกยึดแน่น ไม่สามารถขยับได้ จะมีปริมาณการสะท้อนกลับของคลื่นที่สูงกว่าทุ่นที่ขยับได้ อย่างไรก็ตาม ทุ่นลอยกันคลื่นที่สามารถขยับได้ นั้นมีความสามารถในการสลายพลังงานได้มากกว่าที่ไม่สามารถขยับได้ ในภาพรวมนั้นทุ่นลอยกันคลื่นจะมีประสิทธิภาพดีเมื่อคลื่นที่เข้ากระทบมีความชันคลื่นสูง ๆ</p> <p><u>Width</u></p> <p>ความกว้างที่เพิ่มขึ้นของทุ่นลอยกันคลื่นมีผลทำให้การสะท้อนกลับของคลื่นและปริมาณการสลายพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในทางตรงกันข้าม ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะลดลงซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของทุ่นลอยกันคลื่น</p> <p><u>Floating breakwater configuration and draft depth</u></p> <p>ความลึกที่เพิ่มขึ้นของทุ่นลอยกันคลื่นมีผลทำให้การสะท้อนกลับของคลื่นและปริมาณการสลายพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในทางตรงกันข้าม ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะลดลงอย่างมาก ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของทุ่นลอยกันคลื่น</p> <p><u>Incident wave height</u></p> <p>เมื่อคลื่นที่เข้ามากระทบทุ่นลอยกันคลื่นมีความสูงมากขึ้น การสะท้อนกลับของคลื่นและปริมาณการสลายพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ในทางตรงกันข้าม ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะมีค่าลดลง ซึ่งแสดงถึง</p>

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Ji et al. (2015)	Experimental Study of a New Type of Floating Breakwater	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ (physical models) ในร่างทดสอบคลื่น 2 มิติ ที่ใช้ทรายในการสลายพลังงานคลื่นที่กระทบผนัง การทดลองเป็นการออกแบบทุ่นลอยกันคลื่นใหม่ที่มีลักษณะเป็นทุ่นลอยรูปทรงกระบอก 2 ชั้นและมีตะแกรงเหล็กยื่นลงไปใต้น้ำ และสามารถใส่ลูกบอลลงไปในตะแกรงเพื่อช่วยในการสลายพลังงานคลื่นได้ การทดลองต้องการเปรียบเทียบตัวแปรสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmission coefficient), ลักษณะการเคลื่อนตัวของทุ่นลอยกันคลื่น (motion responses) และแรงดึงในเส้นเชือกลาก (mooring forces) โดยแบ่งประเภทของทุ่นลอยกันคลื่นเป็น 4 แบบ ดังนี้	<p>ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของทุ่นลอยกันคลื่น เมื่อนำผลการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์เชิงตัวเลข จะสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านต่อตัวแปรต่าง ๆ ได้ดังนี้</p> $K_t = 0.0256 \left(\frac{H_i}{L}\right)^{0.2} \left(\frac{W}{L}\right)^{-0.1283} \left(\frac{dr}{L}\right)^{-1.091} + 0.4637 \left(\frac{dp}{dr}\right)^{0.0213}$ <p>เมื่อ $T = 3 \text{ s}$</p> $K_t = 0.00031 \left(\frac{H_i}{L}\right)^{-0.199} \left(\frac{W}{L}\right)^{-1.119} \left(\frac{dr}{L}\right)^{-2.558} + 0.605 \left(\frac{dp}{dr}\right)^{0.0175}$ <p>เมื่อ $T = 2.5 \text{ s}$</p> <p>สามารถวิเคราะห์ผลการศึกษาได้ดังนี้</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ทุ่นลอยกันคลื่นแบบใหม่ที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกและเพิ่มตะแกรงเหล็กที่ใส่ลูกบอล มีความสามารถสูงสุดเมื่อเทียบกับทุ่นลอยน้ำแบบอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคลื่นที่มีความยาวคลื่นมากกว่าและคลื่นน้ำลึก 2. เมื่อใส่ลูกบอลลงไปในตะแกรงจะส่งผลให้ตัวโครงสร้างทุ่นลอยน้ำลดการยกตัว (heave) และการบิด (roll) เมื่อมีคลื่นมากระทบ แต่ในทางกลับกันจะส่งผลให้เกิดการส่าย (sway) ของโครงสร้างมากขึ้นเนื่องจากแรงคลื่นที่กระทบตัวโครงสร้าง 3. การที่มีตะแกรงเหล็กและลูกบอลในโครงสร้างทุ่นลอยกันคลื่นจะทำให้แรงดึงเชือกมีค่าเพิ่มขึ้น โดยหากเป็นในกรณีของคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้นพบว่าแรงดึงเชือกในทุ่นแบบใหม่สูงกว่าทุ่น

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
ชัยยุทธ ชินณะราศรี และคมสัน วิริยกิจจา (2560)	การตรวจสอบการส่งผ่านคลื่นของหุ่นลอยกันคลื่น	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ (physical model) ในโรงทดสอบคลื่นภายใต้สภาวะคลื่นปกติ โดยใช้เครื่องมือทางเลือกหรือวิธีที่ไม่ล่วงล้ำในการวัดระดับค่าผิวน้ำ ได้แก่ การประมวลผลภาพถ่ายกับวิธีมาตรฐานวัดคลื่นแบบดั้งเดิม การทดลองจะทำการจำลองตัวแปรต่าง ๆ ประกอบด้วย ความลึกน้ำ (water depth), ความยาวคลื่น (wave length), ความกว้างของหุ่นลอยกันคลื่น, ความสูงคลื่นเข้ากระทบหุ่นลอยกันน้ำ (incident wave height) และความลึกการจมของหุ่นลอยกันคลื่น	แบบจำลองปกติ แต่ในกรณีคลื่นที่มีความยาวคลื่นมากกว่า ความแตกต่างของแรงดึงเชือกระหว่างหุ่นสองแบบมีไม่มาก 4. ความแตกต่างของประสิทธิภาพระหว่างหุ่นที่มีตะแกรงเหล็กก้อยอย่างเดียวและหุ่นที่มีลูกบอลด้วยนั้น ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยลูกบอลจะช่วยในการสลายพลังงานทำให้มีประสิทธิภาพมากกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตามจากการทดลองไม่เห็นผลต่างเรื่องของการเคลื่อนตัวและแรงดึงเชือกอย่างมีนัยสำคัญ
			การลดทอนคลื่นจากหุ่นลอยกันคลื่น มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านลดลงเมื่อค่าความลึกน้ำเพิ่มขึ้น ความกว้างสัมพันธ์ของหุ่นลอยกันคลื่น และระยะจมน้ำสัมพันธ์มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าหุ่นลอยกันคลื่นแบบเดี่ยวและแบบคู่ มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านประมาณ 0.50 ถึง 95 และ 0.40 ถึง 90 ตามลำดับ จากนั้นทำการวิเคราะห์เชิงเส้นของผลลัพธ์ที่ได้และได้สมการแสดงความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้ $K_t = 1.116 - 0.162\left(\frac{d}{L}\right) - 0.469\left(\frac{B}{L}\right) - 1.653\left(\frac{H}{L}\right) - 0.255\left(\frac{D}{d}\right)$ โดยสมการดังกล่าวมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 0.72

ข-3 การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับพฤติกรรมของคลื่นเนื่องจากเขื่อนกันคลื่นที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน

เขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน (partial breakwater) ถูกใช้เรียกเป็นตัวแทนชนิดของเขื่อนกันคลื่นที่มีลักษณะเดียวกับที่ใช้ในการศึกษานี้ เขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนนั้นมีลักษณะผสมระหว่างเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม และทุ่นลอยกันคลื่น โดยมีลักษณะเป็นเสาเข็มปักลึกลงในท้องน้ำคล้ายเสา และมีโครงสร้างเพื่อสลายพลังงานคลื่นบริเวณผิวน้ำติดอยู่ในลักษณะคองที่ กล่าวคือ เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้ากระทบกับโครงสร้างบริเวณผิวน้ำแล้ว โครงสร้างจะได้รับแรงจากคลื่นและส่งต่อเข้าเสาของโครงสร้าง จากนั้นแรงจะถูกส่งต่อไปยังชั้นดินใต้ท้องน้ำที่ลึกลงไป หากพิจารณาให้เขื่อนกันคลื่นลักษณะดังกล่าวเป็นเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม จะมีความคล้ายคลึงกับเขื่อนกันคลื่นที่เรียกว่า เขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มผสม แต่หากพิจารณาให้เป็นทุ่นลอยกันคลื่นจะคล้ายกับเขื่อนกันคลื่นที่เรียกว่า ทุ่นลอยกันคลื่นแบบโครงสร้างยึดแน่น (Biesheuvel, 2013) เขื่อนกันคลื่นดังกล่าวจึงเป็นการรวมข้อดีของเขื่อนกันคลื่นทั้งสองแบบเข้าด้วยกัน

ข้อดีที่สำคัญของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน คือ มีน้ำหนักเบาและมีการถ่ายเทน้ำหนักด้วยแรงเสียดทานจากเสาเข็ม (friction pile) ซึ่งทำให้อัตราการทรุดตัวต่ำ ส่งผลให้โครงสร้างมีความแข็งแรงและทนทาน สามารถใช้งานได้เป็นระยะเวลาอันยาวนาน มีประสิทธิภาพในการทำงานที่คงที่ ซึ่งเป็นข้อดีของเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม อีกทั้งยังมีพื้นที่ว่างด้านใต้โครงสร้าง ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นข้อดีของทุ่นลอยกันคลื่น อีกทั้งยังเป็นการแก้ไขข้อเสียของเขื่อนกันคลื่นทั้งสองประเภท คือ การใช้ปริมาณเสาเข็มเยอะ และจำเป็นต้องมีระบบผูกยึด ได้อีกด้วย ด้วยเหตุที่กล่าวมาเบื้องต้นส่งผลให้เขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วนมีความเหมาะสมในการใช้ลดพลังงานคลื่นในบริเวณที่มีลักษณะท้องน้ำเป็นโคลนที่มีความสามารถในการรับกำลังอัดต่ำ เช่น อ่าวไทยตอนบน เป็นต้น

จากการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็ม ที่พบว่าความเร็วของอนุภาคน้ำใต้คลื่นจะลดลงมากที่บริเวณใกล้ผิวน้ำ (Yagci et al., 2006) จึงก่อให้เกิดการศึกษาเกี่ยวกับเขื่อนกันคลื่นแบบเสาเข็มผสม โดยส่วนที่อยู่ใกล้ผิวน้ำจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างที่บ้น้ำ แต่ส่วนด้านล่างของเขื่อนกันคลื่นจะถูกรองรับด้วยเสาเข็ม ดังปรากฏในการศึกษาของ Laju et al. (2007), Suh et al. (2007) และ Mani (2008) ซึ่งเขื่อนกันคลื่นแบบผสมนี้จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคลื่นที่ขึ้นอยู่กับส่วนที่บ้น้ำด้านบน การจัดเรียงเสาเข็มด้านล่างจะมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

สำหรับทุ่นลอยกันคลื่นแบบโครงสร้างยึดแน่นได้ถูกนิยามโดย Biesheuvel (2013) มีความหมายว่าโครงสร้างที่ยึดแน่น ไม่มีการเคลื่อนที่สัมผัสเมื่อเทียบกับท้องน้ำหรือมีน้อยมากจน

สามารถละการพิจารณาได้ มีความแข็งแรงและไม่มีการยุบหรือหดตัวของโครงสร้าง ต่อมาเมื่อผู้ให้ความสนใจและมีความต้องการที่จะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติคลื่นและลักษณะทางกายภาพของเชือกกันคลื่นกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน จึงได้มีการศึกษาหาสมการความสัมพันธ์เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ดังปรากฏในงานศึกษาของ Ursell and Dean (1946), Macagno (1954), Wiegel (1959) และ Kriebel and Bollmann (1996)

สำหรับในหัวข้อนี้ จะขอสรุปรายละเอียดของการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านคลื่นผ่านเชือกกันคลื่นที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับเชือกกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน โดยมีรายละเอียดที่สามารถสรุปได้ดังตารางที่ ข-3 และสามารถสรุปประเด็นสำคัญที่แต่ละการศึกษาพิจารณาและได้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกัน เป็นข้อ ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) มีการพัฒนาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและคุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ากระทบโครงสร้าง อย่างต่อเนื่อง
- 2) ความลึกของโครงสร้างมีผลต่อการลดการส่งผ่านคลื่น โดยความลึกการจมมาก จะทำให้การส่งผ่านลดลงแต่การสะท้อนมากขึ้น
- 3) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะลดลงแต่ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อโครงสร้างมีความพูนเพิ่มขึ้น

ตารางที่ ข-3 การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับพฤติกรรมของคลื่นเนื่องจากการเชื่อมกันคลื่นที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันเชื่อมกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Ursell and Dean (1946)	The effect of a fixed vertical barrier on surface waves in deep water	ทำการศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ และ ทฤษฎีของคลื่น เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง ลักษณะทางกายภาพของคลื่น เช่น ความลึกน้ำ ความสูงคลื่น ความยาวคลื่น เป็นต้น และการใช้งาน ของท่อนลอยกันคลื่นแบบยืดหยุ่นบริเวณผิวน้ำ เช่น ความลึกการจมสัมพันธ์ เป็นต้น กับค่าสัมประสิทธิ์ การส่งผ่านคลื่นผ่านโครงสร้าง โดยพิจารณาการรวมกับ การสะท้อนของคลื่นที่เกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้าง พิสูจน์และจัดรูปสมการให้มีรูปที่สะดวกกับการใช้งานมากที่สุด	<p>การพัฒนาสมการภายใต้สมมติฐานที่ว่า โครงสร้างมีความแข็งเกร็ง (rigid) และยึดติดแน่นไม่เคลื่อนที่ คลื่นมีขนาดเล็กและอยู่ภายใต้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย (small amplitude wave theory) มีการสะท้อนของคลื่นกลับโดยไม่เสียพลังงานคลื่น และไม่มีการสิ้น ขามโครงสร้าง ความสัมพันธ์แสดงดังสมการต่อไปนี้</p> $K_L = \frac{K_1 \frac{2\pi D}{L_1}}{\sqrt{\pi^2 \frac{2\pi D}{L_1} - K_1^2 \frac{2\pi D}{L_1}}}$ <p>โดย $I_1(\frac{2\pi D}{L_1})$ คือ ค่าการปรับอันดับที่หนึ่งของ Bessel function แบบที่ 1</p> <p>$K_1(\frac{2\pi D}{L_1})$ คือ ค่าการปรับอันดับที่หนึ่งของ Bessel function แบบที่ 2</p> <p>D คือ ความลึกการจมของโครงสร้าง (เมตร)</p> <p>L_1 คือ ความยาวคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าโครงสร้าง (เมตร)</p> <p>อนุกรม Bessel function เป็นอนุกรมที่แก้ได้ด้วยสมการเชิง อนุพันธ์อันดับสอง (second order ODE)</p>
Macagno (1954)	Wave Action in a Flume Containing a Submerged Culvert	ทำการศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ และ ทฤษฎีของคลื่น เพื่อพัฒนาสมการที่อธิบาย ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น	<p>การพัฒนาสมการภายใต้สมมติฐานที่ว่า โครงสร้างมีความแข็งเกร็ง (rigid) และยึดติดแน่นไม่เคลื่อนที่ มีความกว้างที่สามารถระบุ ได้ อยู่ในน้ำลึกที่สามารถประมาณโดยใช้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย</p>

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
		(transmission coefficient) กับคุณสมบัติของคลื่น ในที่นี้คือ คาบคลื่น, ความยาวคลื่น และความถี่ต่าง ๆ	<p>(small amplitude wave theory) ได้อย่างถูกต้อง การสะท้อนไม่สามารถระบุได้ และไม่มีการล้นข้ามโครงสร้าง ความสัมพันธ์สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้</p> $K_t = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{k_1 B \sinh(k_1 d)}{2 \cosh(k_1 d - k_1 D)} \right]^2}}$ <p>โดย k_1 คือ wave number D คือ ความลึกที่จมของโครงสร้าง d คือ ความลึกน้ำ B คือ ความกว้างของโครงสร้าง</p>
Wiegel (1959)	Rigid Vertical Thin Barrier	ทำการศึกษาจากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ และทฤษฎีของคลื่น เพื่อพัฒนาสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (transmission coefficient) กับคุณสมบัติของคลื่น โดยใช้แนวคิดเรื่องกำลังที่คลื่นสามารถส่งผ่านโครงสร้างได้ (wave power transmission)	<p>การพัฒนาสมการอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่า โครงสร้างมีความแข็งเกร็ง (rigid) และยึดติดแน่นไม่เคลื่อนที่ อยู่ในน้ำลึกที่สามารถใช้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย (small amplitude wave theory) ได้ อย่างไรก็ตาม ไม่มีการสะท้อนและการล้นข้ามโครงสร้าง ความสัมพันธ์สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้</p> $K_t = \frac{2k_1(d-D) + \sinh(2k_1(d-D))}{\sinh(2k_1 d) + 2k_1 d}$ <p>โดย k_1 คือ wave number D คือ ความลึกที่จมของโครงสร้าง d คือ ความลึกน้ำ</p>

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Bouwmeester and van der Breggen (1984)	Floating breakwaters	นำเสนอการความสัมพันธ์ที่ได้จาก Ursell and Dean (1946) และ Wiegel (1959) มาเปรียบเทียบกันในการณที่อัตราส่วนของความลึกน้ำต่อความยาวคลื่นเป็น 0.5	ที่อัตราส่วนของความลึกการจมโครงสร้างต่อความยาวคลื่นน้อยกว่า 0.15 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ได้จาก Ursell and Dean (1946) จะมีค่าสูงกว่าที่ได้จาก Wiegel (1959) แต่เมื่ออัตราส่วนของความลึกการจมโครงสร้างต่อความยาวคลื่นมากกว่า 0.15 จะให้ผลลัพธ์ตรงข้าม
Kriebel and Bollmann (1996)	Wave Transmission Past Vertical Wave Barriers	ทำการศึกษาจากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับทฤษฎีของคลื่น และทฤษฎีของ Wiegel (1959) เพื่อพัฒนาทฤษฎีการส่งผ่านกำลังที่มีการปรับแก้ค่าของการส่งกำลัง (Modified Power Transmission Theory) โดยใช้การพัฒนาต่อ ยอดจากการศึกษาของ Wiegel (1959) เนื่องจากพบว่าทฤษฎีของ Wiegel (1959) ให้ค่าที่สูงเกินกว่าที่เกิดขึ้นจริงโดยเฉพาะในบริเวณน้ำตื้น เนื่องจากไม่ได้พิจารณาเกี่ยวกับการสะท้อนและการสลายพลังงานของคลื่น	พัฒนาสมการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ได้จากความสัมพันธ์ของ Wiegel (1959) โดยมีสมการดังนี้ $K_t = \frac{2K_{t,Wiegel}}{1+K_{t,Wiegel}}$ โดย $K_{t,Wiegel}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากความสัมพันธ์ของ Wiegel (1959) จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อเปรียบเทียบการการศึกษาอื่น ๆ ก่อนหน้า
Laju et al. (2007)	Studies on Pile Supported Double Skirt Breakwater Models	ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ Eigen function expansion theory เป็นพื้นฐาน จากนั้นทำการทดลองด้วยแบบจำลองทางกายภาพ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาปรับแก้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ดำเนินการไว้ข้างต้น	ผลการดำเนินการพบว่าสามารถปรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลองด้วยแบบจำลองทางกายภาพ โดยพบว่าเขื่อนกันคลื่นต้องการให้ระยะจมน้ำประมาณหนึ่งในสามของความยาวคลื่น เพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (K_t) ลดลงไม่น้อยกว่า 50% ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าความลึกของโครงสร้างมีผลต่อการลดการส่งผ่านคลื่น นอกจากนั้นการสะท้อนยัง

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
			ขึ้นอยู่กับความถี่การรวมเช่นกัน และยังได้รับอิทธิพลเนื่องจากความพหุนามของโครงสร้างอีกด้วย หากโครงสร้างมีความพหุนาม ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะลดลงแต่ในขณะที่ยังค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย
Suh et al. (2007)	Wave Reflection and Transmission by Curtainwall-Pile Breakwaters using Circular Piles	ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ภายใต้สมมติฐานของ small amplitude wave theory เป็นพื้นฐาน ทำการวิเคราะห์เชื่อมกันคลื่นเส้าเสริมรูปทรงกระบอกที่มีกำแพงติดตั้งอยู่บริเวณผิวน้ำ จากนั้นทำการทดลองด้วยแบบจำลองทางกายภาพ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาปรับแก้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ดำเนินการไว้ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า ความถี่การรวมโครงสร้าง ระยะห่างเส้าเสริม ความสูงคลื่น และคาบคลื่น	ผลการดำเนินการพบว่าสามารถปรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลองด้วยแบบจำลองทางกายภาพ แต่มีค่าที่เกินจริงอยู่เล็กน้อย โดยพบว่า ระยะรวมที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างหรือการลดลงของช่องว่างระหว่างเส้าเสริม มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านลดลง และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเป็นคลื่นที่มีความสั้น ผลที่เกิดจากระยะห่างระหว่างเส้าเสริมจะหมดไป
Mani (2008)	Experimental and Numerical Investigations on Zigzag Porous Screen Breakwater	ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และทำการวิเคราะห์ที่เชื่อมกันคลื่นแบบ zigzag จากนั้นทำการทดลองด้วยแบบจำลองทางกายภาพเพื่อ นำข้อมูลที่ได้มาปรับแก้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ดำเนินการไว้ข้างต้น โดยพิจารณาว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การสะท้อน แรงที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของคลื่นและเชื่อมกันคลื่น	ผลการศึกษาพบว่า ที่ความชันคลื่นมากกว่า 0.008 สำหรับการรวมของโครงสร้างประมาณ 50% ของความลึกน้ำ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านประมาณ 0.5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนอยู่ที่ประมาณ 0.2 เมื่อการสะท้อนลดลงจะทำให้แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากคลื่นลดลงด้วย โดยในกรณีซึ่งต้นลดลงไปถึง 50% ซึ่งการลดลงของแรงที่กระทำกับโครงสร้างนั้นจะช่วยประหยัดต้นทุนในการก่อสร้างด้วย

ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา	เรื่องที่ศึกษา	รูปแบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ
Inseeyong and Sriariyawat (2019)	Effectiveness of Wave Transmissibility on Partial Breakwater by Physical Model	ใช้แบบจำลองทางกายภาพ ในอ่างทดสอบคลื่นเพื่อศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นโดยจำลองด้วยเหล็กกล่องรูปพรรณากำหนดให้ระดับน้ำนิ่งเท่ากับ 0.45 เมตร ความลึกการจมโครงสร้าง 0.225 เมตร ทำการเปลี่ยนแปลงความชันคลื่น 5 ค่า ในช่วงระหว่าง 0.01 – 0.03 วัดลักษณะของคลื่นทั้งหมด 8 ระยะจากโครงสร้างเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการไหลแต่ละระยะ	<p>ผลการศึกษาพบว่า</p> <ul style="list-style-type: none"> - การพิจารณาแต่ละระยะห่างจากโครงสร้างให้ผลลัพธ์ความสัมพัทธ์แบบแปรผกผันคือ ความชันคลื่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านลดลงในทุกระยะห่างจากโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น - หากพิจารณาในภาพรวมทั้งหมดพบว่า มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันเช่นกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในช่วง 0.55 – 0.80

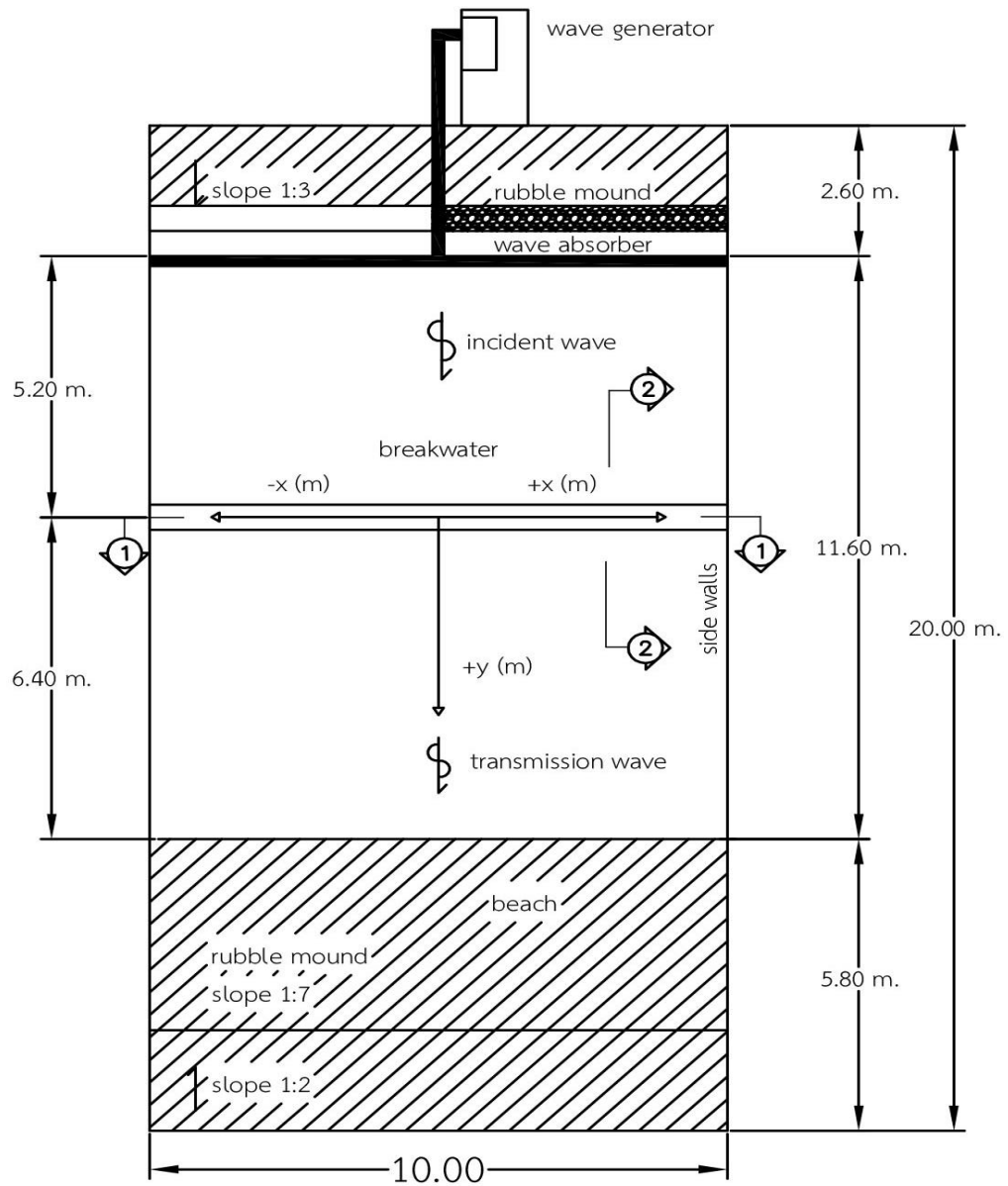
ภาคผนวก ค

แบบจำลองทางกายภาพ

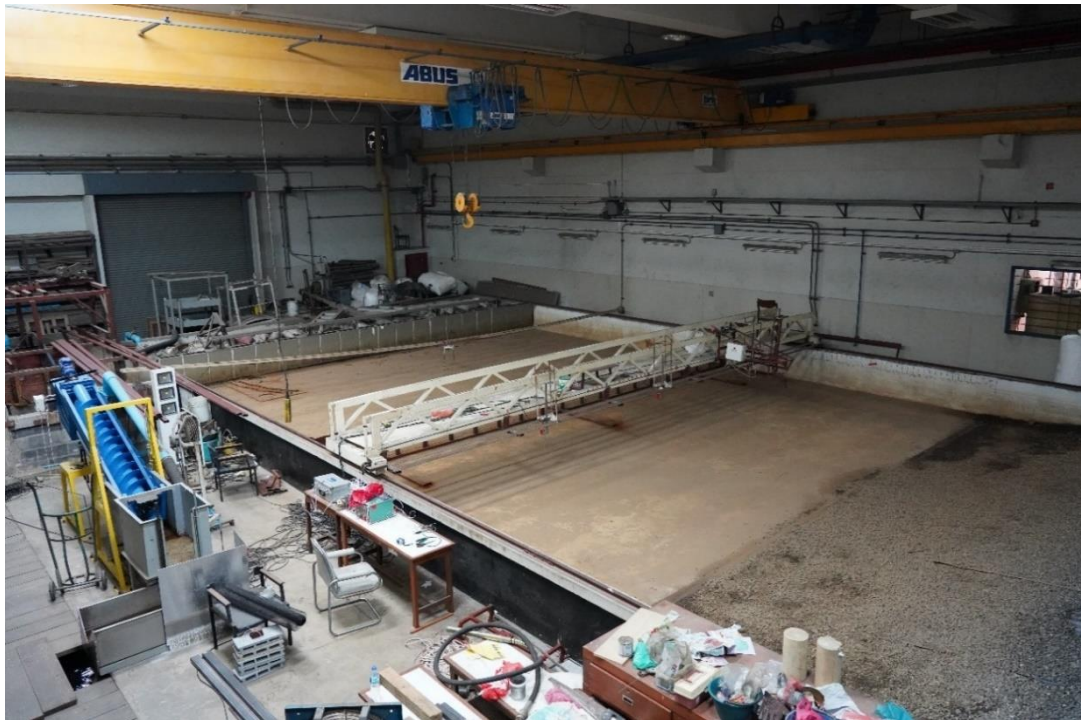
ค-1 อ่างจำลองคลื่น

การศึกษานี้ทำการจำลองการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่น ภายในอ่างจำลองคลื่น (wave basin) ณ ห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล อาคารอนุสาสน์ยันตรกรรม ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยอ่างจำลองคลื่นที่มีลักษณะเป็นอ่างคอนกรีตรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความกว้าง 10 เมตร ยาว 20 เมตร และสูง 0.70 เมตร พื้นและผนังทำด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังรูปที่ ค-1 ถึง รูปที่ ค-2 โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ผนังด้านข้างมีลักษณะเป็นคอนกรีตผิวเรียบ เพื่อให้ไม่ส่งผลกระทบต่อเคลื่อนที่ของคลื่นภายในอ่างจำลองคลื่น
- 2) บริเวณปลายอ่างจำลองคลื่น มีหินสลายพลังงานเพื่อช่วยลดการสะท้อนของคลื่นในอ่างจำลองคลื่น ดังแสดงในรูปที่ ค-3(ก) หากไม่มีหินสลายพลังงานในบริเวณปลายอ่างจำลองคลื่น คลื่นที่สร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดคลื่นจะเคลื่อนที่เข้าสู่ผนังด้านตรงข้ามและสะท้อนกลับเข้ามาในอ่างจำลองคลื่น ส่งผลให้คลื่นที่วัดได้มีลักษณะเหมือนคลื่นนิ่ง ดังนั้นจึงต้องทำการสร้างหินสลายพลังงานทั้งสองด้านของอ่างจำลองคลื่น การศึกษาในครั้งนี้ใช้หินก่อสร้างเบอร์#1 เทพบริเวณต้นอ่างจำลองคลื่นเป็นแนวลาด 1:3 และบริเวณปลายอ่างโดยมีแนวลาด 2 ช่วง ได้แก่ แนวลาด 1:2 และ 1:7 ตามลำดับ
- 3) ระบบการหมุนเวียนน้ำมีการออกแบบให้มีการหมุนเวียนน้ำในอ่างจำลองคลื่นกับบ่อพักน้ำด้านข้าง สำหรับการเติมน้ำเข้าอ่างจำลองคลื่นนั้น สามารถทำการสูบน้ำได้จากบ่อพักน้ำโดยใช้เครื่องสูบน้ำแบบขนาดกำลัง 1.5 แรงม้า ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า 220V การสูบน้ำเข้าอ่างจำลองคลื่นให้มีระดับสูงขึ้น 20 เซนติเมตร ใช้เวลา 1 ชั่วโมง และระบายออกทางรูระบายน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ที่บริเวณปลายอ่างจำลองคลื่นหรือใช้เครื่องสูบน้ำกลับสู่อ่างพักน้ำบริเวณด้านข้างอ่างจำลองคลื่น
- 4) มีสะพานเหล็กที่สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยระบบราง เพื่อใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดคุณสมบัติของคลื่น ดังแสดงในรูปที่ ค-3(ข)



รูปที่ ค-1 แบบรูปร่างอ่างจำลองคลื่น (wave basin)



รูปที่ ค-2 อ่างจำลองคลื่น (wave basin)



ก) หาดหินสลายพลังงาน



ข) สะพานเหล็ก

รูปที่ ค-3 อุปกรณ์ประกอบอ่างจำลองคลื่น

ค-2 เครื่องกำเนิดคลื่น

เครื่องกำเนิดคลื่น (wave generator) ติดตั้งบริเวณปลายด้านหนึ่งของอ่างจำลองคลื่น เป็นเครื่องจักรกลขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ติดกับแกนกลที่มีแผ่นเหล็กในอ่างจำลองคลื่น เมื่อมอเตอร์ทำงานจะขับเคลื่อนแกนกลทำให้แผ่นเหล็กในอ่างจำลองคลื่นสามารถเคลื่อนที่ไปกลับได้ น้ำในอ่างจำลองคลื่นจะเปลี่ยนแปลงระดับทำให้เกิดคลื่นขึ้น เครื่องกำเนิดคลื่นมีหน้าที่สร้างคลื่นที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับการตั้งความเร็วมอเตอร์และระยะช่วงชัก ระบบเครื่องกำเนิดคลื่นมีข้อจำกัดที่สำคัญคือ ชุดมอเตอร์สามารถปรับความเร็วรอบการหมุนได้อยู่ที่ 5 - 25 เฮิร์ต และระยะแกนกลสามารถปรับความยาวได้อยู่ที่ 0 - 25 เซนติเมตร โดยส่วนประกอบการทำงานมีรายละเอียดดังนี้

- 1) ชุดหม้อแปลงไฟฟ้า มีหน้าที่ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าให้มีความสม่ำเสมอ ประกอบด้วยตัวเก็บประจุเรียงต่อกันหลายตัว เพื่อเก็บประจุไฟฟ้าและจ่ายไฟเข้าสู่ระบบ
- 2) ชุดปรับความเร็วมอเตอร์ มีหน้าที่ปรับระดับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าก่อนจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่เครื่องมอเตอร์ ซึ่งเป็นการควบคุมรอบการหมุนมอเตอร์ การศึกษาในครั้งนี้ใช้เครื่องที่ผลิตจากบริษัท Mitsubishi รุ่น FR-A700 (220V) ใช้กำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ความต่างศักย์ 240 โวลต์ สามารถปรับการทำงานให้รอบการหมุนเป็นทั้งแบบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ
- 3) ชุดส่งกำลังเป็นมอเตอร์ มีหน้าที่ส่งแรงขับสู่เพลลา ซึ่งต่อกับก้านยกกระดานคลื่นที่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ตามการปรับช่วงชัก (stroke) ตัวมอเตอร์ผลิตจากบริษัท Mitsubishi รุ่น 4MD05 ซึ่งใช้ไฟฟ้าแบบ 3 เฟส กำลัง 37 กิโลวัตต์ 4 โพล แบบรุ่น SF-JR โดยต่อกับไฟฟ้าขนาดความต่างศักย์ 200 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 14.6 แอมแปร์ และทำความเร็วรอบได้สูงสุดที่ 1420 รอบต่อวินาที
- 4) ชุดปรับช่วงชักเป็นก้านที่ต่อมาจากเพลลา ปรับระยะได้ตามต้องการ สำหรับก้านที่ใช้งานมีความยาวแกนสูงสุด 0.40 เมตร
- 5) กระดานสร้างคลื่น เป็นชนิดปลายยึดหมุน (hinge connection) ยึดติดกับห้องอ่างจำลองคลื่น สามารถหมุนไปมาได้ วัสดุที่ใช้ทำจากเป็นแผ่นเหล็กที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า



ก) กระดานสร้างคลีน



ข) ก้านโยกกระดานสร้างคลีน



ค) ชุดปรับช่วงชัก



ง) มอเตอร์



จ) ชุดปรับความเร็วมอเตอร์

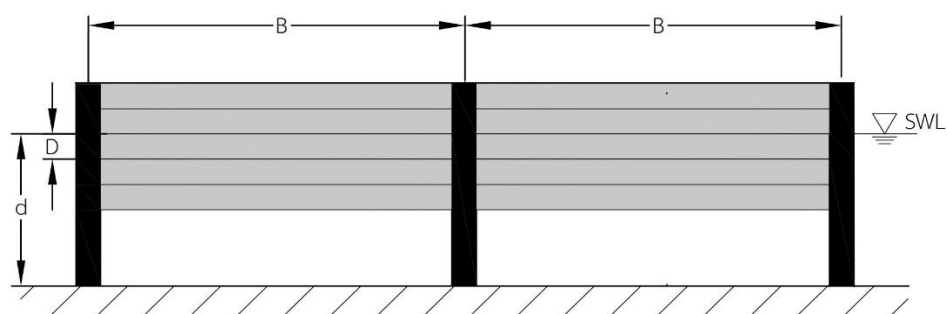


ฉ) หม้อแปลงควบคุม

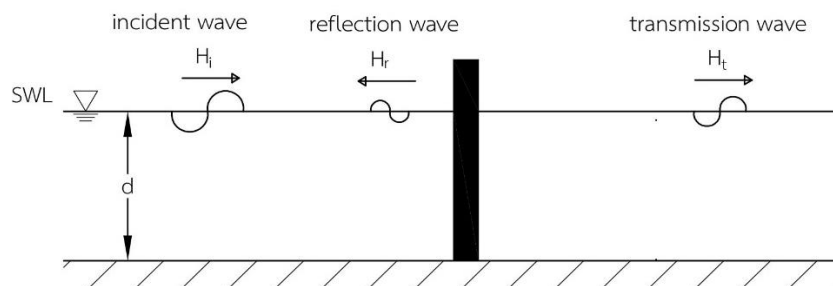
รูปที่ ค-4 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดคลีน

ค-3 แบบจำลองเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน

เขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน (partial breakwater) ที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นเขื่อนกันคลื่นที่มีลักษณะเป็นแผ่นโครงสร้างวางตัวอยู่ในบริเวณผิวน้ำที่มีความแข็งเกร็ง (rigid) ไม่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์เมื่อเทียบกับท้องน้ำ หรือมีน้อยมากจนสามารถละการพิจารณาได้ และมีเสาเข็มรองรับโครงสร้างแผ่นอยู่ทั้งสองฝั่ง แผ่นโครงสร้างจะรับพลังงานจากคลื่นก่อให้เกิดแรงขึ้นกับโครงสร้าง แรงจะถูกถ่ายลงสู่เสาเข็มที่รองรับด้านล่าง และลงสู่ชั้นดินใต้ท้องน้ำต่อไป ดังแสดงลักษณะในรูปที่ ค-5



a) Section 1 - 1



b) Section 2 - 2

รูปที่ ค-5 ภาพตัดขวางของเขื่อนกันคลื่นที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับการศึกษานี้ได้ใช้วัสดุเหล็กกล่องรูปพรรณขนาดหน้าตัด 1.5×3 นิ้ว ในการออกแบบเขื่อนกันคลื่นเพื่อความสะดวกและความเป็นไปได้ในการดำเนินการศึกษาและได้ทำการสร้างแบบจำลองของเขื่อนกันคลื่นดังแสดงในรูปที่ ค-6 อย่างไรก็ตามการใช้ชนิดของวัสดุที่แตกต่างกันย่อมส่งผลกระทบต่อผลของการสลายพลังงานของคลื่น ดังนั้นการศึกษานี้จึงพิจารณาให้ผลจากความแตกต่างของผิวโครงสร้างอยู่นอกเหนือขอบเขตการศึกษานี้



ก) ตัวอย่างแบบจำลองเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน



ข) การใช้วัสดุเหล็กกล่องในการจำลองโครงสร้าง

รูปที่ ค-6 แบบจำลองเขื่อนกันคลื่นแบบไม่เต็มส่วน

ค-4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการทดลองในการศึกษานี้ ประกอบด้วย

- 1) เครื่องมือวัดระดับน้ำ (point gauge) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวัดระดับความลึกน้ำนิ่งก่อนและหลังการทดลอง มีความละเอียด 0.5 มิลลิเมตร
- 2) เครื่องมือวัดคลื่น (wave gage) เป็นเครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงระดับผิวน้ำตามเวลาเพื่อนำมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของความสูงคลื่น ตามตำแหน่งการเก็บข้อมูลคลื่น การศึกษาครั้งนี้ใช้อุปกรณ์แบบ CH-403A & CHT4-40 ของบริษัท Kennek ช่วงข้อมูลที่เครื่องทำการประมวลผลที่ 5 โวลต์ ความคาดเคลื่อน 0.02 มิลลิเมตร ดังรูปที่ ค-7 โดยรายละเอียดการใช้เครื่องมือสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากอาทิตยา เกศมาริช (2540)
- 3) แผงวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (A/D converter) ข้อมูลคลื่นที่ได้จากเครื่องมือวัดความสูงคลื่น จะส่งข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์กับเวลาสู่แผงวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล และอาศัยการแสดงผลจากคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม LabVIEW ของบริษัท National Instruments เพื่อทำการจัดเก็บข้อมูลเป็นดิจิตอลต่อไป ดังรูปที่ ค-8
- 4) กล้องถ่ายวิดีโอและกล้องถ่ายรูป บันทึกภาพพฤติกรรมขณะทดลอง เช่น การเคลื่อนที่ของคลื่นเข้าปะทะโครงสร้าง การแตกตัวของคลื่น การกระจายของคลื่นบริเวณด้านหลังโครงสร้าง การกระจายของคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างโครงสร้าง การเคลื่อนตัวของคลื่นเมื่อถึงแนวชายฝั่ง เป็นต้น
- 5) คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก ใช้เก็บข้อมูลจากเครื่องวัดความสูงคลื่น
- 6) เทอร์โมมิเตอร์ ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำขณะทำการทดลอง
- 7) นาฬิกาจับเวลา ใช้จับเวลาในการทดลอง



ก) เครื่องวัดความสูงคลื่น (wave gauge)



ข) อุปกรณ์รับสัญญาณเครื่องวัดความสูงคลื่น

รูปที่ ค-7 ชุดเครื่องมือวัดความสูงคลื่น



รูปที่ ค-8 อุปกรณ์แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล

ภาคผนวก ง

การสอบเทียบเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้และการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่น

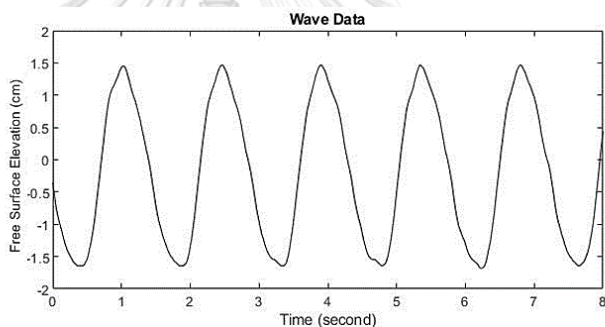
ง-1 การสอบเทียบเครื่องมือวัดความสูงเครื่อง

เครื่องวัดความสูงคลื่น (wave height meter) ใช้วัดความสูงคลื่น โดยหลักการทำงานของเครื่องมือดังกล่าว คือ การวัดความจุไฟฟ้าบนเส้นลวดที่เปลี่ยนแปลงตามระยะที่จมน้ำ โดยเครื่องจะส่งกระแสไฟฟ้าลงไปตามเส้นลวด เมื่อไฟฟ้าเดินทางถึงระดับผิวน้ำจะเกิดการลัดวงจรย้อนกลับไปยังเส้นลวดนำไฟฟ้าอีกเส้น ทำให้เมื่อระดับน้ำมีการเปลี่ยนแปลงจึงสามารถวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปได้ การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำดังกล่าวนี้คือลักษณะของการเกิดคลื่นนั่นเอง โดยในการศึกษาทดลองครั้งนี้ใช้เครื่องวัดความสูงคลื่นแบบ CH-403A & CHT4-40 ของบริษัท Kennek จำนวน 5 ตัว คือ WP1, WP2, WP3, WP4 และ WP5 ซึ่งการสอบเทียบเครื่องมือวัดความสูงคลื่นมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

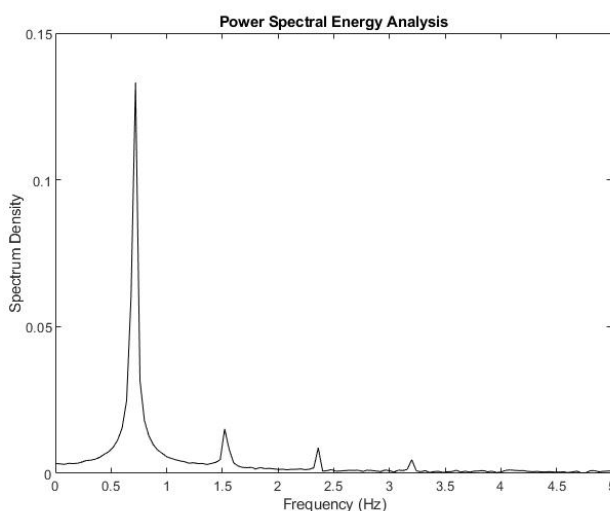
- 1) ติดตั้งเครื่องมือวัดความสูงคลื่นในถังทดสอบที่สามารถขังน้ำให้นิ่งได้
- 2) ใส่น้ำจนถึงระดับหนึ่งและกำหนดระดับน้ำนั้นให้มีค่าศักย์ไฟฟ้าจากเครื่องวัดเป็นศูนย์
- 3) ทำการเติมน้ำจนระดับเพิ่มขึ้นครึ่งละ 1 เซนติเมตร เก็บข้อมูลที่อ่านได้ต่อเนื่อง 1-2 นาที จนระดับน้ำเพิ่มขึ้นถึงระดับ 10 เซนติเมตร
- 4) ปล่อน้ำออกครึ่งละ 1 เซนติเมตร เก็บข้อมูลที่อ่านได้ต่อเนื่อง 1-2 นาที จนระดับน้ำลดลงถึงระดับ -10 เซนติเมตร
- 5) เติมน้ำจนระดับเพิ่มขึ้นครึ่งละ 1 เซนติเมตร เก็บข้อมูลที่อ่านได้ต่อเนื่อง 1-2 นาที จนระดับน้ำกลับมามีค่าศูนย์
- 6) คำนวณหาสมการปรับแก้ความสูงคลื่นของแต่ละตัวรับสัญญาณจากความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำที่อ่านได้จากเครื่องวัดระดับน้ำกับค่านัยสำคัญของผลต่างศักย์ไฟฟ้า
- 7) ใช้สมการที่คำนวณได้ในการสอบวัดกับข้อมูลจากการสอบวัดแบบพลศาสตร์ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของสมการปรับเทียบ โดยในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลจากการเคลื่อนที่ของคลื่นในอ่างจำลองคลื่นสำหรับการสอบวัด

โดยการคำนวณหาค่านัยสำคัญของผลต่างระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากที่สุดกับน้อยที่สุด มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) วิเคราะห์ความถี่ (frequency analysis) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาคาบคลื่น โดยใช้วิธี power spectral density (PSE) จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าตามเวลาต่าง ๆ แล้วสร้างกราฟ density spectral histogram คลื่นแบบสม่ำเสมอจะมีจุดยอดของความถี่พลังงานคลื่นเพียงจุดเดียวเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ ง-1 โดยมีส่วนกลับของความถี่ดังกล่าวเป็นคาบคลื่น
- 2) วิเคราะห์ทางสถิติ (statistical analysis) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสูงคลื่น โดยการนำคาบคลื่นที่ได้จากการวิเคราะห์ความถี่จากการแบ่งข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าตามเวลาออกเป็นช่วง ๆ พิจารณาผลต่างของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากที่สุดกับน้อยที่สุดจะได้ความสูงคลื่นแต่ละลูก
- 3) คำนวณค่านัยสำคัญของผลต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากที่สุดกับน้อยที่สุด ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยหนึ่งในสามเมื่อเรียงลำดับจากผลต่างของผลต่างศักย์ไฟฟ้าจากมากถึงน้อยตามลำดับ



ก) ลักษณะข้อมูลคลื่นที่เก็บได้ในการศึกษา



ข) การวิเคราะห์ความถี่ด้วยวิธี power spectral energy

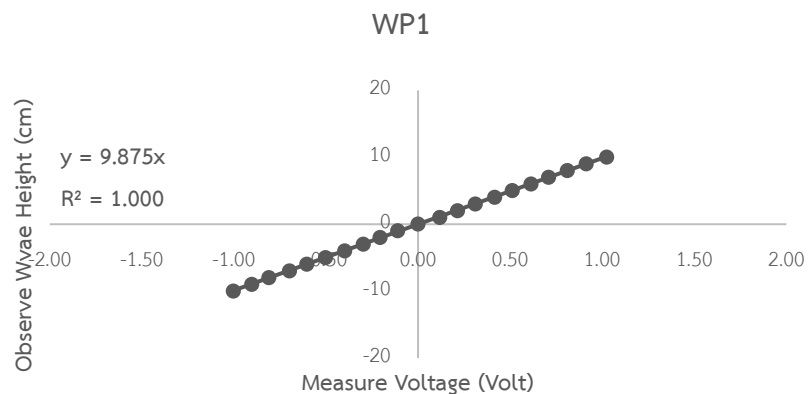
รูปที่ ง-1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ความถี่ของข้อมูลคลื่น

ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดความสูงคลื่น แสดงดังตารางที่ ง-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นที่อ่านได้จากเครื่องวัดระดับน้ำกับค่านัยสำคัญของความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งใช้ประกอบในการคำนวณสมการปรับเทียบ (calibrate) ของเครื่องมือชุดต่าง ๆ แสดงในรูปที่ ง-2

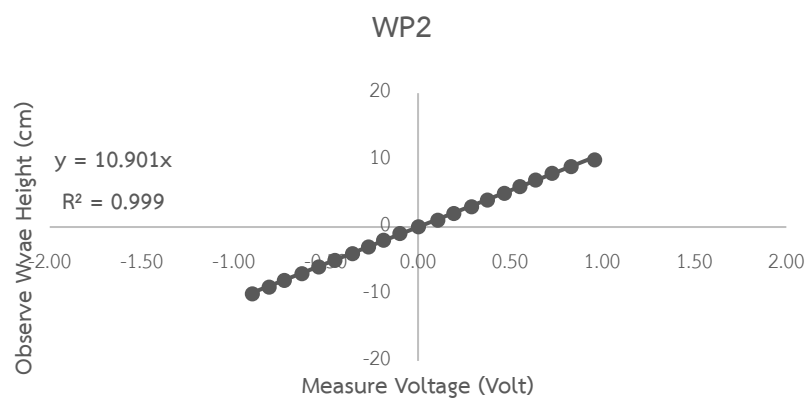
ตารางที่ ง-1 ผลการปรับเทียบเครื่องมือวัดความสูงคลื่น

ระดับน้ำจากเครื่องวัดระดับน้ำ (เซนติเมตร)	ค่านัยสำคัญของผลต่างความต่างศักย์ (โวลต์)				
	WP1	WP2	WP3	WP4	WP5
-10	-1.00	-0.90	-0.99	-1.28	-1.74
-9	-0.90	-0.81	-0.89	-1.15	-1.56
-8	-0.81	-0.73	-0.80	-1.03	-1.39
-7	-0.70	-0.63	-0.69	-0.89	-1.20
-6	-0.60	-0.54	-0.60	-0.77	-1.04
-5	-0.50	-0.45	-0.49	-0.64	-0.87
-4	-0.40	-0.35	-0.39	-0.51	-0.68
-3	-0.30	-0.27	-0.29	-0.38	-0.51
-2	-0.21	-0.19	-0.20	-0.26	-0.35
-1	-0.11	-0.10	-0.10	-0.14	-0.17
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
1	0.12	0.11	0.11	0.15	0.21
2	0.22	0.19	0.22	0.28	0.38
3	0.31	0.29	0.32	0.41	0.56
4	0.42	0.38	0.42	0.55	0.73
5	0.51	0.47	0.52	0.67	0.91
6	0.61	0.55	0.62	0.79	1.09
7	0.71	0.64	0.71	0.91	1.25
8	0.81	0.73	0.81	1.05	1.42
9	0.91	0.83	0.93	1.20	1.61
10	1.02	0.96	1.04	1.31	1.79

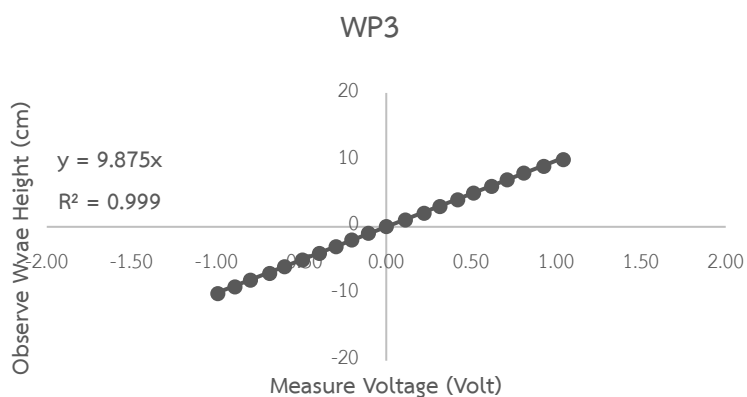
เมื่อกำหนดสมการสอบเทียบแล้ว จะต้องนำสมการดังกล่าวไปทำการตรวจสอบความแม่นยำหรือการสอบวัด (validate) กับข้อมูลชุดใหม่ โดยในที่การศึกษานี้ใช้การสอบวัดแบบพลศาสตร์เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้เครื่องมือจริงระหว่างการทดลอง โดยใช้ข้อมูลจากคลื่นจริงที่วัดในอ่างจำลองคลื่นที่เกิดจากเครื่องกำเนิดคลื่นที่มีคุณสมบัติคลื่นที่แตกต่างกันไป



ก) เครื่องวัดความสูงคลื่น WP1

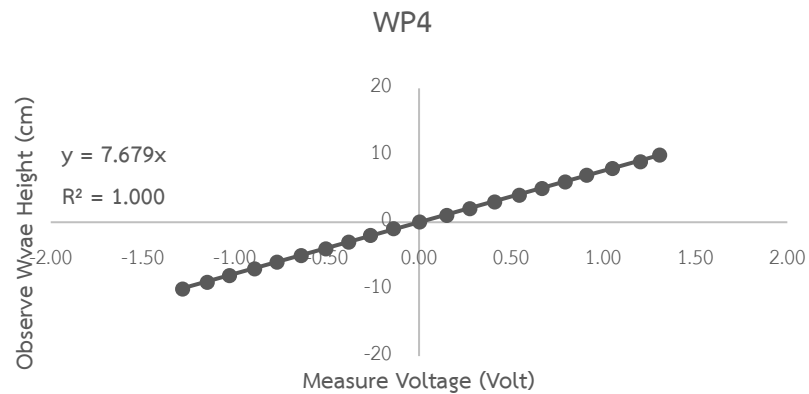


ข) เครื่องวัดความสูงคลื่น WP2

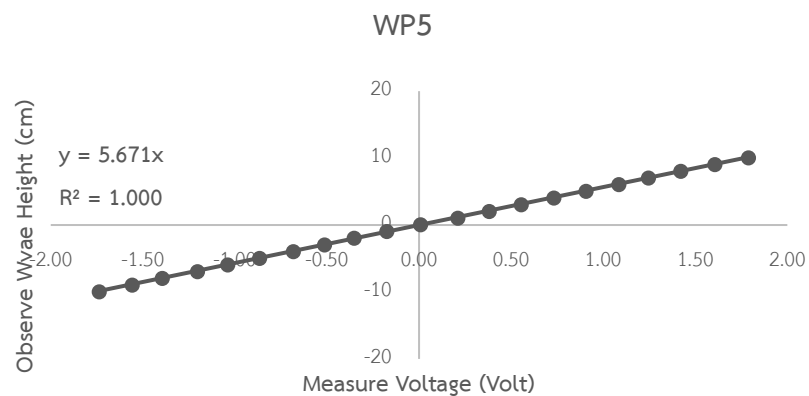


ค) เครื่องวัดความสูงคลื่น WP3

รูปที่ ง-2 การสอบเทียบ (calibration) ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นที่อ่านได้จากเครื่องวัดระดับน้ำกับค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากเครื่องมือ



ง) เครื่องวัดความสูงคลื่น WP4



จ) เครื่องวัดความสูงคลื่น WP5

รูปที่ ง-2(ต่อ) การสอบเทียบ (calibration) ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นที่อ่านได้จากเครื่องวัดระดับน้ำกับค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากเครื่องมือ

โดยขั้นตอนการสอบวัดสมการความสัมพันธ์จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

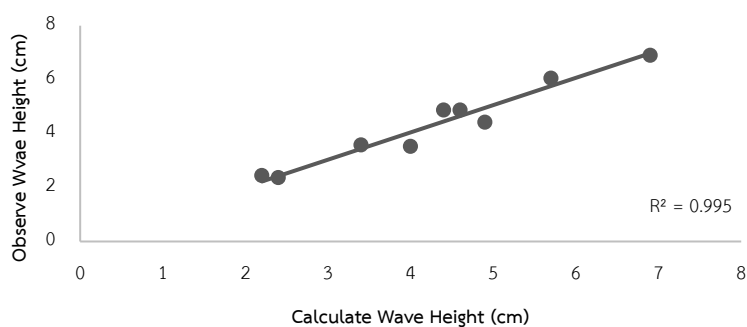
- 1) ติดตั้งเครื่องมือวัดความสูงคลื่นในอ่างจำลองคลื่นในบริเวณใกล้เคียงกัน
- 2) ติดตั้งกล้องถ่ายวิดีโอ เพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงระดับของผิวน้ำที่ขึ้นลงตามเวลา ประกอบกับพิจารณาความสูงคลื่นที่วัดได้จริงจากภาพที่บันทึกได้
- 3) เปิดเครื่องกำเนิดคลื่น เพื่อสร้างคลื่นในอ่างจำลองคลื่นให้เข้าปะทะตัวรับสัญญาณ ทำการเก็บข้อมูลต่อเนื่อง 1-2 นาที
- 4) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 2-3 โดยทำการเปลี่ยนแปลงความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะตัวรับสัญญาณจากการปรับเครื่องกำเนิดคลื่น

- 5) นำข้อมูลที่เก็บได้จากเครื่องวัดความสูงคลื่นมาแปลงเป็นความสูงคลื่นด้วยสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการสอบเทียบ และมาพิจารณาความสอดคล้องกับข้อมูลความสูงคลื่นที่อ่านได้จากกล้องวิดีโอ ด้วยวิธีการสถิติ
- 6) พิจารณาความแม่นยำของสมการความสัมพันธ์เพื่อไปใช้งานต่อไปในการทดลอง

ผลการสอบวัดเครื่องมือแสดงในตารางที่ ง-2 และสามารถวิเคราะห์ความแม่นยำของสมการด้วยวิธีการทางสถิติดังแสดงผลในตารางที่ ง-3 จะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมืออยู่ในช่วง 2.5 – 3.5 มิลลิเมตร กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นที่อ่านได้จากกล้องวิดีโอกับค่าที่คำนวณได้จากสมการปรับเทียบของเครื่องมือชุดต่าง ๆ แสดงในรูปที่ ง-3

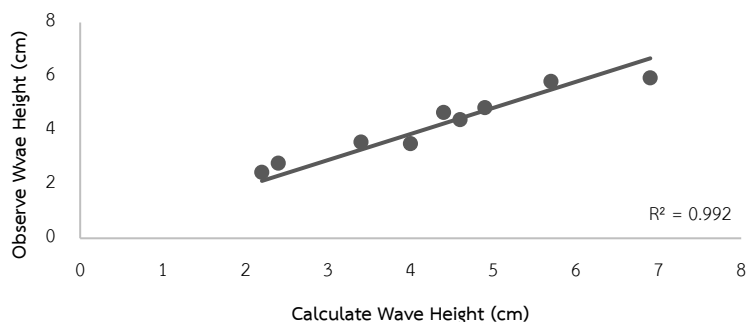


WP1



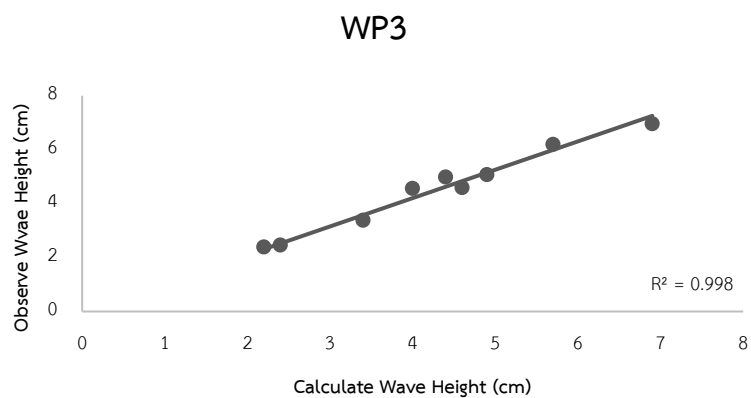
ก) เครื่องวัดความสูงคลื่น WP1

WP2

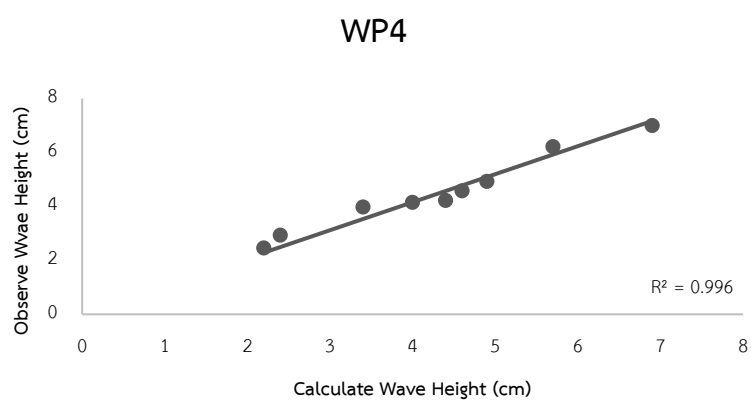


ข) เครื่องวัดความสูงคลื่น WP2

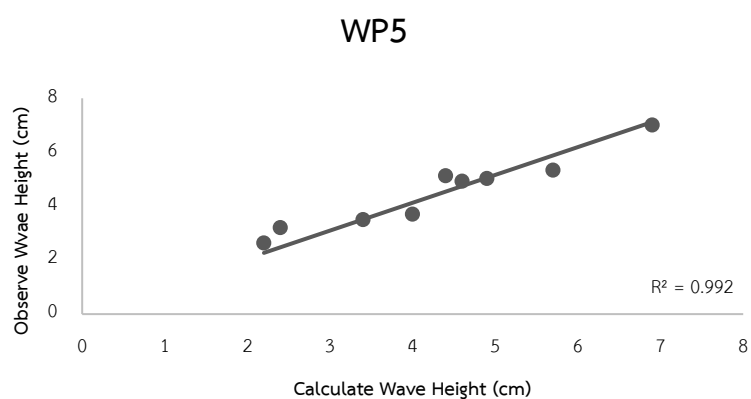
รูปที่ ง-3 การสอบเทียบ (validation) สมการปรับเทียบโดยใช้ข้อมูลความสูงคลื่นที่อ่านได้จากกล้องวิดีโอ



ค) เครื่องวัดความสูงคลื่น WP3



ง) เครื่องวัดความสูงคลื่น WP4



จ) เครื่องวัดความสูงคลื่น WP5

รูปที่ ง-3(ต่อ) การสอบเทียบ (validation) สมการปรับเทียบโดยใช้ข้อมูลความสูงคลื่นที่อ่านได้จากกล้องวิดีโอ

ตารางที่ ง-2 ผลการสอบวัดสมการปรับเทียบเครื่องวัดความสูงคลื่น

ระดับน้ำจากกล้องวิดีโอ (เซนติเมตร)	ความสูงคลื่นที่คำนวณได้จากสมการสอบเทียบ (ซม.)				
	WP1	WP2	WP3	WP4	WP5
2.2	2.44	2.44	2.39	2.45	2.63
2.4	2.37	2.78	2.46	2.93	3.20
3.4	3.57	3.56	3.38	3.97	3.50
4.6	4.87	4.39	4.59	4.57	4.92
4.9	4.42	4.84	5.07	4.93	5.02
4.4	4.87	4.66	4.98	4.22	5.13
4.0	3.52	3.51	4.56	4.15	3.70
5.7	6.05	5.81	6.19	6.21	5.33
6.9	6.90	5.94	6.96	6.99	7.00

ตารางที่ ง-3 การวิเคราะห์ความแม่นยำด้วยวิธีการทางสถิติ

ระดับน้ำจากกล้องวิดีโอ (เซนติเมตร)	MAE (เซนติเมตร)				
	WP1	WP2	WP3	WP4	WP5
2.2	0.24	0.24	0.19	0.25	0.43
2.4	0.03	0.38	0.06	0.53	0.80
3.4	0.17	0.16	0.02	0.57	0.10
4.6	0.27	0.21	0.01	0.03	0.32
4.9	0.48	0.06	0.17	0.03	0.12
4.4	0.47	0.26	0.58	0.18	0.73
4.0	0.48	0.49	0.56	0.15	0.30
5.7	0.35	0.11	0.49	0.51	0.37
6.9	0.00	0.96	0.06	0.09	0.10
average	0.28	0.32	0.24	0.26	0.36

จากการสอบวัดเพื่อตรวจสอบสมการปรับเทียบพบว่าเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติแล้ว ค่าความคลาดเคลื่อนของของมือนี้อยู่ในช่วงประมาณ 2.5 – 3.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ ประกอบกับค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R^2) มีค่าเข้าใกล้ 1 จึงสามารถสรุปสัมประสิทธิ์ปรับแก้ของเครื่องมือวัดความสูงคลื่นชุดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ ง-4

ตารางที่ ง-4 ตัวคูณปรับความสูงคลื่นของตัวรับสัญญาณ

ตัวรับสัญญาณ	ตัวคูณปรับความสูงของตัวรับสัญญาณ (เซนติเมตรต่อโวลต์)
WP1	9.875
WP2	10.901
WP3	9.875
WP4	7.679
WP5	5.671

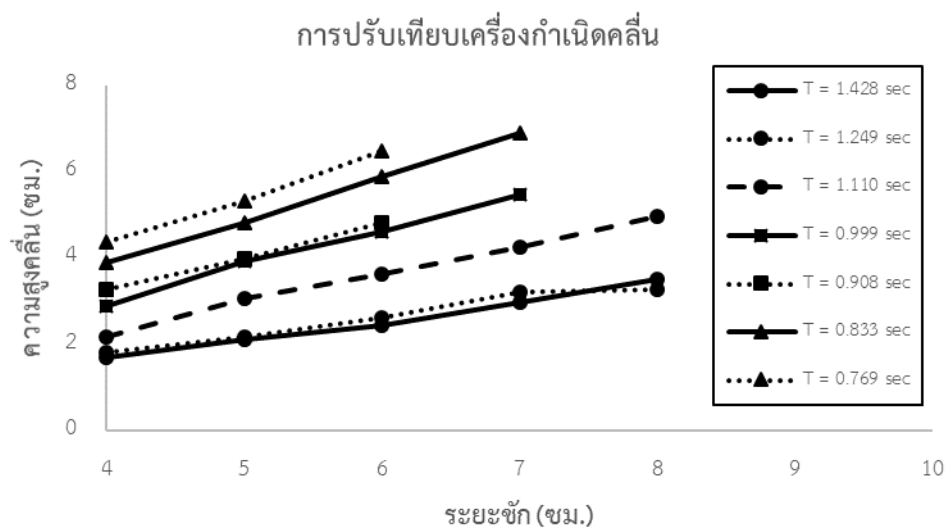


ง-2 การปรับเทียบเครื่องกำเนิดคลื่น

เครื่องกำเนิดคลื่น (wave generator) ในการทดลองนี้ มีโครงสร้างหลักที่ทำด้วยเหล็ก เว้นเพียงแต่กระดานสร้างคลื่น (wave board) ที่ทำด้วยพลาสติก ด้านล่างของกระดานสร้างคลื่นเป็นแบบ hinge connection ด้านบนต่อเข้ากับส่วนขับเคลื่อนสามารถโยกไป-มาได้ เครื่องกำเนิดคลื่นนี้สามารถสร้างคลื่นที่มีความสูงและคาบเวลาตามต้องการ โดยคาบเวลาจะขึ้นอยู่กับความเร็วของมอเตอร์ ส่วนความสูงคลื่นนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับความเร็วของมอเตอร์แล้วยังขึ้นอยู่กับระยะช่วงชักและความลึกน้ำด้วย ดังนั้นในการทดลองจึงปรับเทียบเครื่องกำเนิดคลื่นเพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นในการกำหนดเงื่อนไขของคลื่นที่ใช้ในการทดลอง ความลึกของน้ำบริเวณติดตั้งเชื่อมกันคลื่นซึ่งมีความลึกน้ำ 45 เซนติเมตร ทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์และระยะช่วงชัก วัดการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำตามเวลาด้วยเครื่องมือวัดความสูงคลื่น ณ ตำแหน่งติดตั้งเชื่อมกันคลื่น คำนวณความสูงคลื่นและคาบคลื่นและได้ผลของลักษณะคลื่นจากการปรับเทียบเครื่องกำเนิดคลื่น ดังตารางที่ ง-5 และกราฟในรูปที่ ง-4 และทำการปรับลักษณะของเครื่องกำเนิดคลื่นตามลักษณะของคลื่นที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ ง-6

ตารางที่ ง-5 ลักษณะคลื่นจากการปรับเทียบเครื่องกำเนิดคลื่นที่ความลึกน้ำ 45 เซนติเมตร

ระยะช่วงชัก (เซนติเมตร)	ความเร็วรอบมอเตอร์ (เฮิร์ต)						
	12	14	16	18	20	22	24
	ความชันคลื่น						
4	0.007	0.009	0.012	0.019	0.026	0.036	0.048
5	0.008	0.010	0.017	0.026	0.032	0.045	0.058
6	0.010	0.012	0.020	0.031	0.038	0.055	0.070
7	0.012	0.015	0.024	0.037	0.043	0.064	0.076
8	0.014	0.015	0.028	0.038	0.053	0.071	0.091
10	0.018	0.018	0.032	0.042	-	-	-
12	0.022	0.024	0.033	0.056	-	-	-
14	0.020	0.032	0.040	0.054	-	-	-
16	0.021	0.030	0.043	0.056	-	-	-
18	0.018	0.033	0.042	-	-	-	-
20	0.019	0.028	-	-	-	-	-



รูปที่ ง-4 การเปรียบเทียบเครื่องกำเนิดคลื่น

ตารางที่ ง-6 ลักษณะการปรับเครื่องกำเนิดคลื่นตามขนาดคลื่นที่ใช้ในการทดลอง

ขนาดคลื่น	ระยะช่วงชัก (เซนติเมตร)	ความถี่มอเตอร์ (เฮิรต)	ความชันคลื่น
W1	7	12	0.010 - 0.013
W2	7	14	0.013 - 0.016
W3	6	16	0.016 - 0.019
W4	7	16	0.019 - 0.022
W5	8	16	0.022 - 0.025

หมายเหตุ : การสอบเทียบเครื่องกำเนิดคลื่นกระทำขณะที่อ่างจำลองคลื่นไม่มีโครงสร้างเขื่อนกั้นคลื่น
ช่วงความชันคลื่นที่เป็นผลลัพธ์จึงอาจไม่สอดคล้องกับการเลือกคุณสมบัติคลื่นขณะทดลอง

ภาคผนวก จ

การพิจารณากฎความคล้ายคลึงหรือความเหมือน (laws of similarity)

การศึกษาในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางกายภาพ (physical model) นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องนำกฎเกณฑ์ต่าง ๆ ที่มีความสัมพันธ์กันระหว่างแบบจำลอง (model) และต้นแบบของจริง (prototype) มาพิจารณาใช้ กฎเกณฑ์ดังกล่าวได้มาจากความสัมพันธ์ขั้นมูลฐานในชลศาสตร์ และเรียกว่ากฎความคล้ายคลึงหรือความเหมือน (laws of similarity)

จ-1 ความคล้ายคลึงกันทางด้านเรขาคณิต (geometric similarity)

ระบบ 2 ระบบ จะมีความคล้ายคลึงกันทางด้านเรขาคณิตก็ต่อเมื่ออัตราส่วนความยาวของด้านที่สัมพันธ์กัน มีค่าคงที่เท่ากันตลอด หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ระบบ 2 ระบบ จะมีรูปร่างที่เหมือนกัน เพียงแต่มีขนาดไม่เท่ากัน (เสรี จันทโรยธา, 2553) ค่าคงที่ของสัดส่วนของด้านต่อด้านของแบบจำลอง และต้นแบบของจริง คือ อัตราส่วนความยาว หรือมาตราส่วน (length ratio or scale ratio)

$$\begin{aligned} \text{ถ้ากำหนดให้ } L_m &= \text{มิติความยาวของแบบจำลอง (model)} \\ L_p &= \text{มิติความยาวของต้นแบบจริง (prototype)} \\ n &= \text{มาตราส่วนหรืออัตราส่วนของมิติความยาว (scale ratio)} \end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราส่วนของความยาว (length ratio) จะสามารถคำนวณได้จากสมการ จ-1

$$n = \frac{L_m}{L_p} \quad (\text{จ-1})$$

สำหรับการพิจารณาความคล้ายคลึงทางเรขาคณิตนั้น สามารถทำได้ทั้ง 3 แกนด้วยกัน คือ แนวระนาบ 2 แกน และแนวตั้ง (Dalrymple, 1985) โดยในการศึกษานี้เป็นการพิจารณาการส่งผ่านและสะท้อนของคลื่นคลื่นเพียง 2 มิติเท่านั้น ดังนั้นการพิจารณาจึงเหลือเพียงแค่แนวระนาบที่ขนานกับแนวโครงสร้าง และในแนวตั้ง โดยกำหนดให้

$$\begin{aligned} n_h &= \text{อัตราส่วนของมิติความยาวในแนวระนาบ (horizontal length ratio)} \\ n_v &= \text{อัตราส่วนของมิติความยาวในแนวตั้ง (vertical length ratio)} \end{aligned}$$

ในกรณีของการศึกษานี้ได้จำลองตัวอย่างโครงสร้างที่ใช้อยู่จริงในพื้นที่อ่าวไทยตอนบน ในบริเวณหน้าวัดขุนสมุทราวาส หมู่บ้านขุนสมุทรวิน อ.พระสมุทรวเจียร จ.สมุทรปราการ ดังแสดงในรูปที่ จ-1 จากการสืบค้นข้อมูลเบื้องต้นจากกรมอุทกศาสตร์ (2538) พบว่าระดับน้ำในบริเวณดังกล่าว มี

ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 1.8 เมตร และได้กำหนดให้แบบจำลองทางกายภาพมีค่าความลึกน้ำเท่ากับ 0.45 เมตร เพื่อให้สามารถคำนวณค่าอัตราส่วนมิติความยาวในแนวตั้งได้ดังนี้

$$n_l = \frac{0.45}{1.8} = \frac{1}{4}$$



รูปที่ จ-1 เชื้อนก้นคลื่นแบบไม่เต็มส่วน บริเวณบ้านขุนสมุทรจีน อ.พระสมุทรเจดีย์ จ.สมุทรปราการ

จากการสำรวจเบื้องต้นพบว่าโครงสร้างดังกล่าวสร้างจากเสาไฟฟ้าเหลือใช้ที่มีขนาดความกว้างประมาณ 0.3 เมตร จากค่าอัตราส่วนมิติความยาวในแนวตั้ง (n_d) เท่ากับ $1/4$ ดังนั้นจะสามารถคำนวณขนาดของเสาที่ต้องใช้ในแบบจำลองทางกายภาพได้ดังต่อไปนี้

$$n_d = \frac{L_m}{L_p}$$

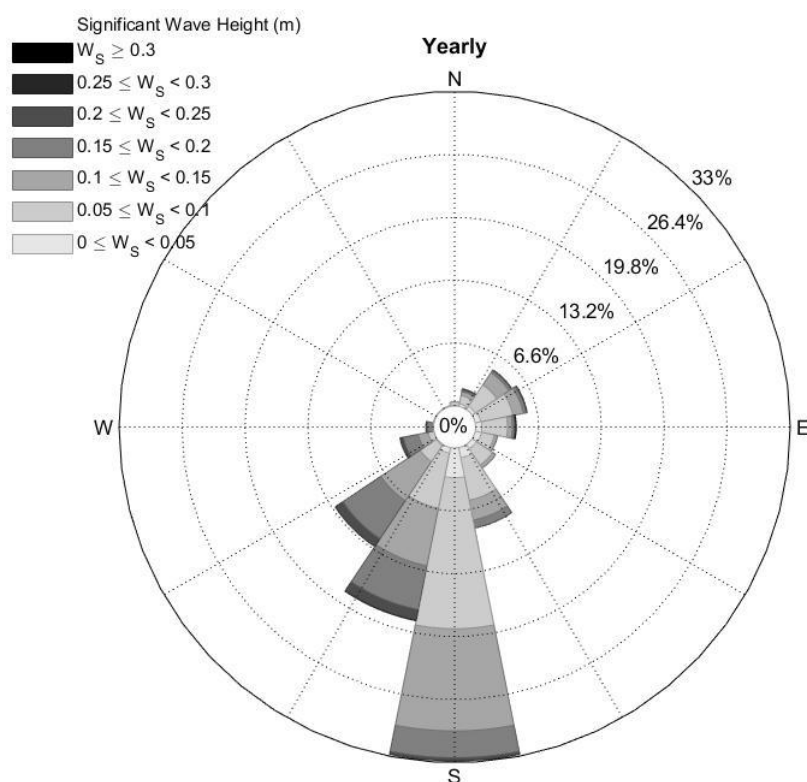
$$\frac{1}{4} = \frac{L_m}{0.3}$$

จะได้ ความยาวของแบบจำลอง (L_m) เท่ากับ 0.075 เมตร จึงเลือกใช้เหล็กกล่องรูปพรรณที่มีความกว้าง 3 นิ้วเป็นตัวแทนของเสาไฟฟ้าในโครงสร้างจริง 1 ต้น

นอกจากนั้นจากการสำรวจระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้างพบว่า มีระยะอยู่ที่ประมาณ 4 เมตร หากพิจารณาให้แบบจำลองไม่มีการบิดเบี้ยว (undistort) หรืออีกนัยหนึ่งคือ อัตราส่วนของมิติความยาวในแนวระนาบและแนวตั้งจะมีค่าเท่ากัน ในที่นี้คือเท่ากับ 0.25 ดังนั้นในกรณีของระยะห่างระหว่างโครงสร้างที่งานศึกษามีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่าง 0.5, 1 และ 1.5 เมตร จะให้ค่า

ระยะห่างของเสาของต้นแบบจริงระหว่าง 2, 4 และ 6 เมตร ซึ่งสอดคล้องกับระยะที่ใช้อยู่จริงในพื้นที่ และที่ควรจะเป็นตามหลักการของวิศวกรรมโครงสร้าง

สำหรับตัวแปรความสูงคลื่นนั้น ในพื้นที่ที่ใช้โครงสร้างจริงมีความสูงคลื่นเฉลี่ยประมาณ 0.10 ถึง 0.20 เมตร โดยวิเคราะห์จากข้อมูลจากการคำนวณด้วยแบบจำลอง SWAN ในการศึกษาของพงษ์สิทธิ์ ผลสมบูรณ์ (2561) ดังแสดงดังผังข้อมูลคลื่นในรูปที่ จ-2



รูปที่ จ-2 ผังข้อมูลความสูงคลื่นเฉลี่ยบริเวณบ้านขุนสมุทรจีน อ.พระสมุทรเจดีย์ จ.สมุทรปราการ

จากค่าอัตราส่วนมิติความยาวในแนวตั้ง (n_d) ที่มีค่าเท่ากับ 0.25 ดังนั้นความสูงคลื่นที่สร้างขึ้นในแบบจำลองทางกายภาพต้องมีขนาดลดลงประมาณ 4 เท่า คือประมาณ 0.025 ถึง 0.05 เมตร ซึ่งสอดคล้องกับคลื่นที่สามารถสร้างได้ในอ่างจำลองคลื่นที่ใช้ศึกษา

จ-2 ความคล้ายคลึงด้านพลศาสตร์ (dynamic similarity)

ระบบ 2 ระบบจะมีลักษณะความคล้ายคลึงด้านพลศาสตร์ก็ต่อเมื่ออัตราส่วนของแรงที่สัมพันธ์กันที่กระทำต่อระบบทั้งสองมีค่าคงที่ (เสรี จันทโรยธา, 2553) สำหรับแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อของไหลที่เคลื่อนที่ประกอบด้วยแรงต่าง ๆ ที่สำคัญดังนี้

F_g	=	แรงซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดของโลก (gravity force)
F_p	=	แรงซึ่งเกิดจากความดันของของเหลว (pressure force)
F_v	=	แรงเฉือนซึ่งเกิดจากความหนืด (viscous force)
F_t	=	แรงซึ่งเกิดจากแรงตึงผิว (surface tension force)
F_e	=	แรงซึ่งเกิดจากการอัดตัวของของเหลว (elastic compression force)

ผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อชิ้นของไหลในกรณีที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ขึ้นของไหลภายใต้แรงกระทำดังกล่าวจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งขนาดหนึ่ง เป็นไปตามกฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) และผลรวมของแรงทั้งหมดมีค่าเท่ากับแรงเฉื่อย (inertia force, F_i)

ดังนั้นระบบ 2 ระบบที่มีความคล้ายคลึงทางด้านพลศาสตร์อย่างสมบูรณ์ อัตราส่วนของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อมวลของไหลหรือชิ้นของไหลใน 2 ระบบระหว่างแบบจำลอง (model) และต้นแบบของจริง (prototype) จะต้องเป็นค่าคงที่หรือมีค่าเท่ากัน (เสรี จันทโรยธา, 2553) นั่นคือ

$$\frac{(F_i)_m}{(F_i)_p} = \frac{(F_p + F_g + F_v + F_t + F_e)_m}{(F_p + F_g + F_v + F_t + F_e)_p} \quad (จ-2)$$

หรือ

$$\frac{(F_i)_m}{(F_i)_p} = \frac{(F_p)_m}{(F_p)_p} = \frac{(F_g)_m}{(F_g)_p} = \frac{(F_v)_m}{(F_v)_p} = \frac{(F_t)_m}{(F_t)_p} = \frac{(F_e)_m}{(F_e)_p} \quad (จ-3)$$

สำหรับงานศึกษานี้เป็นงานศึกษาทางด้านวิศวกรรมชายฝั่งทะเล โดยพิจารณาเกี่ยวกับกลศาสตร์ของคลื่นเป็นหลัก ในส่วนของแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกนั้นจะถูกพิจารณาเป็นหลัก เนื่องจากเกี่ยวข้องกับขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปของโครงสร้างและคุณสมบัติคลื่นโดยตรง สำหรับแรงที่เกิดขึ้นจากความดันนั้น ลักษณะของคลื่นมีการสัมผัสบรรยากาศเหมือนกันทั้งแบบจำลองและของจริง จึงผลที่เกิดเนื่องจากความดันออกไป สำหรับความหนืดเนื่องจากผิวของท่อน้ำนั้นไม่มีอิทธิพลน้อยต่อลักษณะคลื่น เนื่องจากคลื่นไม่ได้มีลักษณะเป็นคลื่นน้ำตื้น จึงสามารถละผลเนื่องจากความเสียดทานได้ ส่วนผลจากแรงตึงผิวนั้นพิจารณาภายใต้สมมติฐานที่ความหนาแน่นของน้ำใกล้เคียงกัน จึงสามารถละผลจากแรงตึงผิวได้ สำหรับผลจากการอัดตัวของของเหลวพบว่า น้ำที่ใช้ล้วนเป็น

ของเหลวที่ไม่เกิดการอัดตัวจึงสามารถผลจากการอัดตัวได้เช่นกัน ดังนั้นในงานศึกษานี้จึงพิจารณาความคล้ายคลึงทางด้านพลศาสตร์เพียงจากผลของแรงดึงดูดของโลก (Dalrymple, 1985)

เมื่อแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity force) โดดเด่นหรือมีความสำคัญ ให้นำแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกและแรงเนื่องจากแรงเฉื่อยมาพิจารณา นั่นคือ อัตราส่วนของแรงเนื่องจากแรงเฉื่อยต่อแรงดึงดูดของโลก จะได้ว่า

$$\frac{F_i}{F_g} = \frac{\rho L^2 v^2}{\rho L^3 g} = \frac{v^2}{gL} \quad \text{คือ ฟรูดนัมเบอร์ (Froude number, Fr)}$$

ซึ่งมักนิยมเขียนในรูปของกลุ่มตัวแปรที่มีค่า v เป็นค่ายกกำลังหนึ่ง นั่นคือ

$$\frac{v}{\sqrt{gL}} = \text{ฟรูดนัมเบอร์ (Froude number, Fr)} \quad (\text{จ-4})$$

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ฟรูดนัมเบอร์ (Froude number, Fr) ในแบบจำลองจะต้องเท่ากับในต้นแบบจริง เรียกว่า กฎของฟรูด (Froude Law) สำหรับงานศึกษาด้านวิศวกรรมชายฝั่งทะเลที่มีความเกี่ยวข้องกับกลศาสตร์ของคลื่นน้ำนั้น Dalrymple (1985) ได้กล่าวไว้ว่าการพิจารณาความเร็วในกฎของฟรูดนั้น ให้พิจารณาเทียบเท่ากับความเร็วของคลื่นน้ำ และพิจารณาให้เวลาเป็นคาบของคลื่นน้ำที่เคลื่อนที่

นอกจากนั้น Dalrymple (1985) ยังได้กล่าวอีกว่าในกรณีที่แบบจำลองไม่มีการบิดเบี้ยว (undistorted model) นั้น สามารถที่จะพิจารณาอัตราส่วนของความเร็ว (n_v) และอัตราส่วนของเวลา (n_t) ได้จากอัตราส่วนมิติความยาว (n_l)

$$\begin{aligned} \text{ถ้ากำหนดให้ } v_m &= \text{ความเร็วคลื่นของแบบจำลอง (model)} \\ v_p &= \text{ความเร็วคลื่นของต้นแบบจริง (prototype)} \\ n_v &= \text{มาตราส่วนหรืออัตราส่วนของความเร็ว (velocity ratio)} \end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราส่วนของความเร็ว (velocity ratio) จะสามารถคำนวณได้จากสมการ จ-5

$$n_v = \frac{v_m}{v_p} \quad (\text{จ-5})$$

จากกฎของฟรูด (Froude Law) โดยกำหนดให้ความเร็วเป็นความเร็วคลื่น

จะได้
$$\frac{C_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{C_p}{\sqrt{gL_p}} \quad (\text{จ-6})$$

จากการที่แบบจำลองไม่มีความบิดเบี้ยว เป็นเหตุให้อัตราส่วนของมิติความยาวในแนวระนาบ และแนวตั้งจะมีค่าเท่ากัน

ดังนั้นจะได้
$$n_v = \frac{C_m}{C_p} = \sqrt{\frac{L_m}{L_p}} = \sqrt{\frac{1}{4}} = \frac{1}{2}$$

สามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนของความเร็วคลื่น (velocity ratio, n_v) ในที่นี้จึงมีค่าเท่ากับ 0.5

จากสมการความเร็วคลื่นที่ว่า $C = L/T$ เมื่อนำมาพิจารณาเป็นอัตราส่วนระหว่างแบบจำลอง และต้นแบบจริง จะได้ดังนี้

$$\frac{L_m}{L_p} = \frac{C_m}{C_p} \times \frac{T_m}{T_p} \quad (\text{จ-7})$$

แทนค่า จะได้อัตราส่วนมิติความยาวและเวลา จะได้

$$\frac{1}{4} = \frac{1}{2} \times \frac{T_m}{T_p}$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{T_m}{T_p} = \frac{1}{2}$$

ถ้ากำหนดให้ T_m = คาบคลื่นของแบบจำลอง (model)

T_p = คาบคลื่นของต้นแบบจริง (prototype)

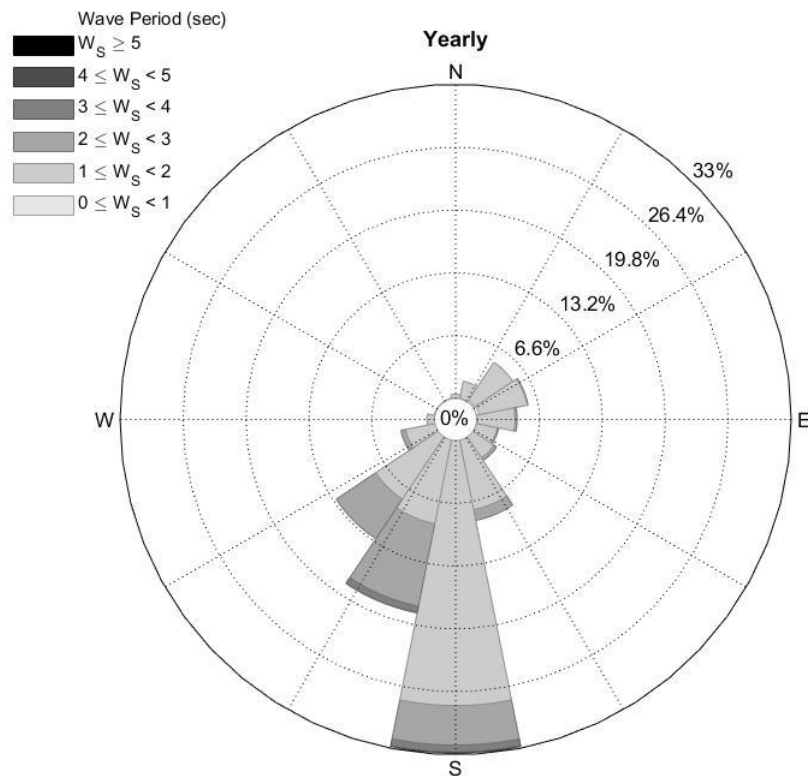
n_t = มาตรการส่วนหรืออัตราส่วนของคาบคลื่น (time ratio)

ดังนั้น อัตราส่วนของเวลาหรือคาบคลื่น (time ratio) จะสามารถคำนวณได้จากสมการ จ-8

$$n_t = \frac{T_m}{T_p} \quad (\text{จ-8})$$

จะสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนของเวลาหรือคาบคลื่น (time ratio, n_t) ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 0.5 เช่นเดียวกับอัตราส่วนของความเร็ว (velocity ratio, n_v)

ดังนั้นอัตราส่วนของคาบคลื่นที่ใช้ในแบบจำลองและต้นแบบของจริงจึงมีค่าต่างกันเป็นอัตราส่วนของเวลาเท่ากับ 0.5 โดยสำหรับตัวแปรคาบของคลื่นนั้น ในพื้นที่ที่ใช้โครงสร้างจริงมีคาบคลื่นเฉลี่ยประมาณ 1 ถึง 4 วินาที โดยวิเคราะห์จากข้อมูลจากการคำนวณด้วยแบบจำลอง SWAN ในการศึกษาของพงษ์สิทธิ์ ผลสมบูรณ์ (2561) ดังแสดงดังผังข้อมูลคลื่นในรูปที่ จ-3



รูปที่ จ- 3 ผังข้อมูลคาบคลื่นเฉลี่ยบริเวณบ้านขุนสมุทรจีน อ.พระสมุทรเจดีย์ จ.สมุทรปราการ

จากค่าอัตราส่วนเวลา (n_t) ที่มีค่าเท่ากับ 0.5 ดังนั้นคาบของคลื่นที่สร้างขึ้นในแบบจำลองทางกายภาพต้องมีขนาดลดลงประมาณ 2 เท่า คือประมาณ 0.5 ถึง 2 วินาที ซึ่งสอดคล้องกับคลื่นที่สามารถสร้างได้ในอ่างจำลองคลื่นที่ใช้ศึกษา

ภาคผนวก ฉ

ผลการทดลองของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น

ฉ-1 ข้อมูลคลื่นบริเวณด้านหน้าโครงสร้างและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น

ในการศึกษานี้ การวัดข้อมูลคลื่นจะกระทำด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงระดับผิวน้ำตามเวลา และตำแหน่งต่าง ๆ ในอ่างจำลองคลื่น โดยข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดคลื่นจะมีลักษณะเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วงเวลาต่าง ๆ ในแต่ละตำแหน่ง จากนั้นนำข้อมูลเหล่านี้ไปทำการปรับแก้ด้วยข้อมูลที่ได้จากการปรับเทียบเครื่องมือ เพื่อให้ได้ข้อมูลความสูงคลื่น (wave height), คาบคลื่น (wave period) และนำไปวิเคราะห์ความยาวคลื่น (wave length) ภายใต้สมมติฐานของทฤษฎีคลื่นความสูงน้อยต่อไป โดยตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวแทนของข้อมูลในตำแหน่งต่าง ๆ อันนำไปสู่การวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่น

สำหรับการหาคาบคลื่นนั้น จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความถี่ (frequency analysis) โดยการแปลงข้อมูลที่อยู่ในอาณาจักรของเวลา (time domain) เป็นข้อมูลที่อยู่ในอาณาจักรของความถี่ (frequency domain) เพื่อวิเคราะห์คาบคลื่นที่เป็นตัวแทนของชุดข้อมูล จากนั้นนำคาบคลื่นดังกล่าวมาตัดข้อมูลค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเพื่อให้ทราบถึงความสูงคลื่นย่อย ๆ ในแต่ละคาบคลื่น และนำความสูงคลื่นของคลื่นแต่ละลูกมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ (statistical analysis) เพื่อหาตัวแทนความสูงคลื่น ที่เรียกว่า ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (significant wave height)

สำหรับการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เป็นตัวแทนของความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง และคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้างนั้น จะดำเนินการภายใต้สมมติฐานที่คลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างเป็นระนาบเดียวกันตลอดทั้งหน้าตัด ในขั้นต้นได้นำข้อมูลที่เก็บได้จากแต่ละตำแหน่งด้านหน้าโครงสร้าง มาสร้างเส้นโค้งที่เหมาะสมที่สุด (curve fitting) เพื่อเป็นตัวแทนของข้อมูลคลื่นที่เก็บได้จากเครื่องวัดความสูงคลื่นในแต่ละตำแหน่งด้านหน้าโครงสร้าง ภายใต้สมมติฐานการกระจายของข้อมูลแบบอนุกรมฟูเรียร์ ทั้งนี้การสร้างเส้นโค้งที่มีความเหมาะสมที่สุดได้พิจารณาถึงขนาดและการกระจายตัวของข้อมูลร่วมกัน จึงส่งผลให้เส้นโค้งที่ถูกสร้างขึ้น ให้ขนาดของความสูงคลื่นที่คลาดเคลื่อนจากข้อมูลคลื่นที่เก็บได้จริง ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูเรียร์ที่คำนวณได้จึงต้องถูกปรับแก้ให้เส้นโค้งมีขนาดของความสูงคลื่นเท่ากับข้อมูลคลื่นจริงก่อนนำไปใช้วิเคราะห์ โดยนำค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูเรียร์ที่ปรับแก้แล้วไปคำนวณแอมพลิจูดและความสูงของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง และคลื่นที่สะท้อนออกจากโครงสร้าง จากสมการความสัมพันธ์ของ Goda and Suzuki (1976) และได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ ฉ-1 และ ตารางที่ ฉ-2

ตารางที่ ฉ-1 รายละเอียดตัวแปรในกรณีศึกษาต่าง ๆ กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

Case	B(m)	D(m)	W	Code	H _i (cm)	H _r (cm)	T (sec)	L (m)	H _r /L	K _r
ยอมให้คลื่นล้นผ่านโครงสร้าง (A)	0.5	0.075	0.010 - 0.013	AB1D1W1	2.628	1.162	1.666	3.12	0.008	0.44
			0.013 - 0.016	AB1D1W2	2.902	0.908	1.428	2.56	0.011	0.31
			0.016 - 0.019	AB1D1W3	3.350	0.811	1.249	2.12	0.016	0.24
			0.019 - 0.022	AB1D1W4	4.800	0.501	1.249	2.12	0.023	0.10
			0.022 - 0.025	AB1D1W5	5.555	0.477	1.249	2.12	0.026	0.09
		0.150	0.010 - 0.013	AB1D2W1	2.579	1.390	1.666	3.12	0.008	0.54
			0.013 - 0.016	AB1D2W2	3.285	1.004	1.428	2.56	0.013	0.31
			0.016 - 0.019	AB1D2W3	3.271	0.905	1.249	2.12	0.015	0.28
			0.019 - 0.022	AB1D2W4	4.339	0.789	1.249	2.12	0.020	0.18
			0.022 - 0.025	AB1D2W5	5.262	0.606	1.249	2.12	0.025	0.12
		0.225	0.010 - 0.013	AB1D3W1	2.491	1.454	1.666	3.12	0.008	0.58
			0.013 - 0.016	AB1D3W2	2.911	1.118	1.428	2.56	0.011	0.38
			0.016 - 0.019	AB1D3W3	2.841	1.351	1.249	2.12	0.013	0.48
			0.019 - 0.022	AB1D3W4	3.613	1.334	1.249	2.12	0.017	0.37
			0.022 - 0.025	AB1D3W5	4.628	1.075	1.249	2.12	0.022	0.23
	0.300	0.010 - 0.013	AB1D4W1	2.517	1.431	1.666	3.12	0.008	0.57	
		0.013 - 0.016	AB1D4W2	2.905	1.133	1.428	2.56	0.011	0.39	
		0.016 - 0.019	AB1D4W3	3.069	1.448	1.249	2.12	0.014	0.47	
		0.019 - 0.022	AB1D4W4	3.515	1.465	1.249	2.12	0.017	0.42	
		0.022 - 0.025	AB1D4W5	4.372	1.662	1.249	2.12	0.021	0.38	
	1.0	0.075	0.010 - 0.013	AB2D1W1	2.699	1.196	1.666	3.12	0.009	0.44
			0.013 - 0.016	AB2D1W2	3.055	0.871	1.428	2.56	0.012	0.29
			0.016 - 0.019	AB2D1W3	3.353	0.781	1.249	2.12	0.016	0.23
			0.019 - 0.022	AB2D1W4	4.908	0.504	1.249	2.12	0.023	0.10
			0.022 - 0.025	AB2D1W5	5.557	0.419	1.249	2.12	0.026	0.08
0.150		0.010 - 0.013	AB2D2W1	2.674	1.352	1.666	3.12	0.009	0.51	
		0.013 - 0.016	AB2D2W2	2.879	0.878	1.428	2.56	0.011	0.30	
		0.016 - 0.019	AB2D2W3	3.252	1.113	1.249	2.12	0.015	0.34	
		0.019 - 0.022	AB2D2W4	4.002	0.549	1.249	2.12	0.019	0.14	
		0.022 - 0.025	AB2D2W5	5.281	0.539	1.249	2.12	0.025	0.10	

ตารางที่ ฉ-1(ต่อ) รายละเอียดตัวแปรในกรณีศึกษาต่าง ๆ กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

Case	B(m)	D(m)	W	Code	H _i (cm)	H _r (cm)	T (sec)	L (m)	H _i /L	K _r
ยอมให้คลื่นล้นผ่านโครงสร้าง (A)	1.0	0.225	0.010 - 0.013	AB2D3W1	2.449	1.326	1.666	3.12	0.008	0.54
			0.013 - 0.016	AB2D3W2	2.918	1.097	1.428	2.56	0.011	0.38
			0.016 - 0.019	AB2D3W3	3.042	1.210	1.249	2.12	0.014	0.40
			0.019 - 0.022	AB2D3W4	3.587	1.474	1.249	2.12	0.017	0.41
			0.022 - 0.025	AB2D3W5	4.519	0.993	1.249	2.12	0.021	0.22
		0.300	0.010 - 0.013	AB2D4W1	2.482	1.434	1.666	3.12	0.008	0.58
			0.013 - 0.016	AB2D4W2	3.224	1.194	1.428	2.56	0.013	0.37
			0.016 - 0.019	AB2D4W3	3.015	1.566	1.249	2.12	0.014	0.52
			0.019 - 0.022	AB2D4W4	3.317	1.557	1.249	2.12	0.016	0.47
			0.022 - 0.025	AB2D4W5	4.206	1.503	1.249	2.12	0.020	0.36
	1.5	0.075	0.010 - 0.013	AB3D1W1	2.866	1.257	1.666	3.12	0.009	0.44
			0.013 - 0.016	AB3D1W2	2.993	0.776	1.428	2.56	0.012	0.26
			0.016 - 0.019	AB3D1W3	3.590	0.855	1.249	2.12	0.017	0.24
			0.019 - 0.022	AB3D1W4	5.222	0.518	1.249	2.12	0.025	0.10
			0.022 - 0.025	AB3D1W5	5.477	0.437	1.249	2.12	0.026	0.08
		0.150	0.010 - 0.013	AB3D2W1	2.580	1.202	1.666	3.12	0.008	0.47
			0.013 - 0.016	AB3D2W2	2.778	0.850	1.428	2.56	0.011	0.31
			0.016 - 0.019	AB3D2W3	3.359	0.877	1.249	2.12	0.016	0.26
			0.019 - 0.022	AB3D2W4	4.321	0.957	1.249	2.12	0.020	0.22
			0.022 - 0.025	AB3D2W5	5.148	0.815	1.249	2.12	0.024	0.16
		0.225	0.010 - 0.013	AB3D3W1	2.445	1.248	1.666	3.12	0.008	0.51
			0.013 - 0.016	AB3D3W2	2.934	0.983	1.428	2.56	0.011	0.33
			0.016 - 0.019	AB3D3W3	3.016	1.222	1.249	2.12	0.014	0.41
			0.019 - 0.022	AB3D3W4	3.506	1.375	1.249	2.12	0.017	0.39
			0.022 - 0.025	AB3D3W5	4.725	1.225	1.249	2.12	0.022	0.26
0.300	0.010 - 0.013	AB3D4W1	2.582	1.216	1.666	3.12	0.008	0.47		
	0.013 - 0.016	AB3D4W2	2.887	0.939	1.428	2.56	0.011	0.33		
	0.016 - 0.019	AB3D4W3	3.015	1.287	1.249	2.12	0.014	0.43		
	0.019 - 0.022	AB3D4W4	3.850	1.387	1.249	2.12	0.018	0.36		
	0.022 - 0.025	AB3D4W5	4.035	1.507	1.249	2.12	0.019	0.37		

ตารางที่ จ-2 รายละเอียดตัวแปรในกรณีศึกษาต่าง ๆ กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

Case	B(m)	D(m)	W	Code	H _i (cm)	H _r (cm)	T (sec)	L (m)	H _r /L	K _r
ไม่ยอมให้คลื่นล้นผ่านโครงสร้าง (O)	0.5	0.075	0.010 - 0.013	OB1D1W1	2.345	1.339	1.666	3.12	0.008	0.57
			0.013 - 0.016	OB1D1W2	2.564	0.709	1.428	2.56	0.010	0.28
			0.016 - 0.019	OB1D1W3	3.010	1.257	1.249	2.12	0.014	0.42
			0.019 - 0.022	OB1D1W4	3.776	1.601	1.249	2.12	0.018	0.42
			0.022 - 0.025	OB1D1W5	4.666	1.674	1.249	2.12	0.022	0.36
		0.150	0.010 - 0.013	OB1D2W1	2.325	1.510	1.666	3.12	0.007	0.65
			0.013 - 0.016	OB1D2W2	2.511	0.951	1.428	2.56	0.010	0.38
			0.016 - 0.019	OB1D2W3	2.589	1.546	1.249	2.12	0.012	0.60
			0.019 - 0.022	OB1D2W4	3.517	1.789	1.249	2.12	0.017	0.51
			0.022 - 0.025	OB1D2W5	5.140	3.017	1.249	2.12	0.024	0.59
	0.225	0.010 - 0.013	OB1D3W1	2.490	1.201	1.666	3.12	0.008	0.48	
		0.013 - 0.016	OB1D3W2	3.349	1.550	1.428	2.56	0.013	0.46	
		0.016 - 0.019	OB1D3W3	3.585	1.348	1.249	2.12	0.017	0.38	
		0.019 - 0.022	OB1D3W4	4.076	1.811	1.249	2.12	0.019	0.44	
		0.022 - 0.025	OB1D3W5	4.608	1.592	1.249	2.12	0.022	0.35	
	0.300	0.010 - 0.013	OB1D4W1	2.338	1.753	1.666	3.12	0.007	0.75	
		0.013 - 0.016	OB1D4W2	2.750	1.504	1.428	2.56	0.011	0.55	
		0.016 - 0.019	OB1D4W3	2.960	1.927	1.249	2.12	0.014	0.65	
		0.019 - 0.022	OB1D4W4	3.695	1.862	1.249	2.12	0.017	0.50	
		0.022 - 0.025	OB1D4W5	4.039	2.260	1.249	2.12	0.019	0.56	
1.0	0.075	0.010 - 0.013	OB2D1W1	2.496	1.307	1.666	3.12	0.008	0.52	
		0.013 - 0.016	OB2D1W2	2.702	0.886	1.428	2.56	0.011	0.33	
		0.016 - 0.019	OB2D1W3	2.918	1.358	1.249	2.12	0.014	0.47	
		0.019 - 0.022	OB2D1W4	3.489	1.402	1.249	2.12	0.016	0.40	
		0.022 - 0.025	OB2D1W5	4.609	1.242	1.249	2.12	0.022	0.27	
	0.150	0.010 - 0.013	OB2D2W1	2.273	1.433	1.666	3.12	0.007	0.63	
		0.013 - 0.016	OB2D2W2	2.395	1.202	1.428	2.56	0.009	0.50	
		0.016 - 0.019	OB2D2W3	2.733	1.816	1.249	2.12	0.013	0.66	
		0.019 - 0.022	OB2D2W4	3.308	1.983	1.249	2.12	0.016	0.60	
		0.022 - 0.025	OB2D2W5	3.967	2.064	1.249	2.12	0.019	0.52	

ตารางที่ จ-2(ต่อ) รายละเอียดตัวแปรในกรณีศึกษาต่าง ๆ กรณีคลื่นไม่ล้ำข้ามโครงสร้าง

Case	B(m)	D(m)	W	Code	H _i (cm)	H _r (cm)	T (sec)	L (m)	H _r /L	K _r
ไม่ยอมให้คลื่นล้ำผ่านโครงสร้าง (O)	1.0	0.225	0.010 - 0.013	OB2D3W1	2.361	1.787	1.666	3.12	0.008	0.76
			0.013 - 0.016	OB2D3W2	2.378	1.233	1.428	2.56	0.009	0.52
			0.016 - 0.019	OB2D3W3	2.925	1.695	1.249	2.12	0.014	0.58
			0.019 - 0.022	OB2D3W4	3.560	1.625	1.249	2.12	0.017	0.46
			0.022 - 0.025	OB2D3W5	4.905	1.912	1.249	2.12	0.023	0.39
		0.300	0.010 - 0.013	OB2D4W1	2.324	1.905	1.666	3.12	0.007	0.82
			0.013 - 0.016	OB2D4W2	2.161	1.497	1.428	2.56	0.008	0.69
			0.016 - 0.019	OB2D4W3	3.196	1.883	1.249	2.12	0.015	0.59
			0.019 - 0.022	OB2D4W4	3.406	1.956	1.249	2.12	0.016	0.57
			0.022 - 0.025	OB2D4W5	4.159	2.058	1.249	2.12	0.020	0.49
	1.5	0.075	0.010 - 0.013	OB3D1W1	2.561	1.384	1.666	3.12	0.008	0.54
			0.013 - 0.016	OB3D1W2	2.756	0.891	1.428	2.56	0.011	0.32
			0.016 - 0.019	OB3D1W3	2.954	1.390	1.249	2.12	0.014	0.47
			0.019 - 0.022	OB3D1W4	3.950	1.258	1.249	2.12	0.019	0.32
			0.022 - 0.025	OB3D1W5	5.422	1.066	1.249	2.12	0.026	0.20
		0.150	0.010 - 0.013	OB3D2W1	2.450	1.555	1.666	3.12	0.008	0.63
			0.013 - 0.016	OB3D2W2	2.358	0.865	1.428	2.56	0.009	0.37
			0.016 - 0.019	OB3D2W3	2.622	1.565	1.249	2.12	0.012	0.60
			0.019 - 0.022	OB3D2W4	3.153	1.651	1.249	2.12	0.015	0.52
			0.022 - 0.025	OB3D2W5	3.941	1.874	1.249	2.12	0.019	0.48
		0.225	0.010 - 0.013	OB3D3W1	2.345	1.686	1.666	3.12	0.008	0.72
			0.013 - 0.016	OB3D3W2	2.381	1.181	1.428	2.56	0.009	0.50
			0.016 - 0.019	OB3D3W3	2.967	1.634	1.249	2.12	0.014	0.55
			0.019 - 0.022	OB3D3W4	3.557	1.502	1.249	2.12	0.017	0.42
			0.022 - 0.025	OB3D3W5	4.652	1.588	1.249	2.12	0.022	0.34
0.300		0.010 - 0.013	OB3D4W1	2.497	1.825	1.666	3.12	0.008	0.73	
		0.013 - 0.016	OB3D4W2	2.461	1.373	1.428	2.56	0.010	0.56	
		0.016 - 0.019	OB3D4W3	3.234	2.148	1.249	2.12	0.015	0.66	
		0.019 - 0.022	OB3D4W4	3.426	2.244	1.249	2.12	0.016	0.65	
		0.022 - 0.025	OB3D4W5	4.313	2.558	1.249	2.12	0.020	0.59	

ฉ-2 สมการแนวโน้มของการวิเคราะห์กลุ่มตัวแปรไร้หน่วยกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น

เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมาของ Suh et al. (2007), Mani (2008) และ Ji et al. (2015) ได้กล่าวไว้ว่า พฤติกรรมการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นส่วนมาก จะมีการกระจายตัวเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อมีตัวแปรคุณสมบัติคลื่นและลักษณะทางกายภาพ เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงกำหนดให้ความสัมพันธ์ในกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยต่าง ๆ มีการกระจายตัวไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจึงมีสมมติฐานว่าพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นมีความสัมพันธ์กับชุดตัวแปรไร้หน่วยตามการกระจายตัวแบบสมการกำลัง (power distribution) และสามารถสรุปสมการของกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยกลุ่มต่าง ๆ กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น ได้ดังสมการที่ ฉ-1 ถึงสมการที่ ฉ-5

$$\text{ความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์} \quad K_r = \alpha \left(\frac{b}{L} \right)^\beta \quad (\text{ฉ-1})$$

$$\text{ความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์} \quad K_r = \alpha \left(\frac{D}{d} \right)^\beta \quad (\text{ฉ-2})$$

$$\text{ความลึกสัมพัทธ์} \quad K_r = \alpha \left(\frac{d}{L} \right)^\beta \quad (\text{ฉ-3})$$

$$\text{ความสูงคลื่นสัมพัทธ์} \quad K_r = \alpha \left(\frac{H_i}{d} \right)^\beta \quad (\text{ฉ-4})$$

$$\text{ความชันคลื่น} \quad K_r = \alpha \left(\frac{H_i}{L} \right)^\beta \quad (\text{ฉ-5})$$

เมื่อ α และ β คือค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ และค่าเลขยกกำลัง สำหรับการวิเคราะห์ค่า α และ β ใช้วิธีการวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่าย (simple regression analysis) และมีรายละเอียดของสมการถดถอยต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ ฉ-3 ถึงตารางที่ ฉ-7

จากตารางที่ ฉ-3 ถึงตารางที่ ฉ-7 แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (α) และค่าเลขยกกำลัง (β) ของแต่ละกรณีศึกษานั้นมีค่าแตกต่างกัน นอกจากนั้นยังพบว่า ค่าจากสมการกับชุดข้อมูลของบางรูปแบบในบางกรณีศึกษา มีความสัมพันธ์กันน้อย โดยเห็นได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ที่ต่ำ อาจเนื่องมาจากจำนวนการเก็บข้อมูลที่น้อย ส่งผลให้อาจได้ข้อมูลที่ยังไม่ครบถ้วนและแม่นยำ หรือเกิดเนื่องจากไม่มีความสัมพันธ์กันของกลุ่มตัวแปรนั้น ๆ กับพฤติกรรมการสะท้อนของโครงสร้าง

ตารางที่ ฉ-3 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ และค่าคงที่ในสมการที่ ฉ-1 ที่ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด

Case	ความลึกการจม (D)	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณและค่าคงที่		
		α	β	R^2
กรณีคลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง (A)	0.075 เมตร	0.0001	-3.406	0.66
	0.150 เมตร	0.0001	-2.604	0.63
	0.225 เมตร	0.0036	-1.125	0.38
	0.300 เมตร	0.0540	-0.497	0.20
กรณีคลื่นสั้นไม่ข้ามโครงสร้าง (O)	0.075 เมตร	0.0098	-0.881	0.22
	0.150 เมตร	-	-	-
	0.225 เมตร	0.0070	-1.016	0.47
	0.300 เมตร	0.0446	-0.634	0.47

ตารางที่ ฉ-4 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ และค่าคงที่ในสมการที่ ฉ-2 ที่ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด

Case	ความชันคลื่น (W)	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณและค่าคงที่		
		α	β	R^2
กรณีคลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง (A)	0.01 - 0.013	0.588	0.154	0.60
	0.013 - 0.016	-	-	-
	0.016 - 0.019	0.575	0.517	0.87
	0.019 - 0.022	0.687	1.088	0.91
	0.022 - 0.025	0.513	1.098	0.92
กรณีคลื่นสั้นไม่ข้ามโครงสร้าง (O)	0.01 - 0.013	0.797	0.217	0.50
	0.013 - 0.016	-	-	-
	0.016 - 0.019	0.652	0.182	0.28
	0.019 - 0.022	0.605	0.237	0.42
	0.022 - 0.025	0.614	0.411	0.43

ตารางที่ ฉ-5 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ และค่าคงที่ในสมการที่ ฉ-3 ที่ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด

Case	ความลึกการจม (D)	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณและค่าคงที่		
		α	β	R^2
กรณีคลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง (A)	0.075 เมตร	0.0007	-3.406	0.66
	0.150 เมตร	0.0033	-2.604	0.63
	0.225 เมตร	0.0582	-1.125	0.38
	0.300 เมตร	0.1860	-0.497	0.20
กรณีคลื่นสั้นไม่ข้ามโครงสร้าง (O)	0.075 เมตร	0.0871	-0.881	0.22
	0.150 เมตร	-	-	-
	0.225 เมตร	0.0878	-1.016	0.47
	0.300 เมตร	0.2155	-0.634	0.47

ตารางที่ ฉ-6 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ และค่าคงที่ในสมการที่ ฉ-4 ที่ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด

Case	ความลึกการจม (D)	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณและค่าคงที่		
		α	β	R^2
กรณีคลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง (A)	0.075 เมตร	0.0007	-2.255	0.98
	0.150 เมตร	0.0022	-1.861	0.87
	0.225 เมตร	0.0172	-1.173	0.82
	0.300 เมตร	0.0815	-0.626	0.42
กรณีคลื่นสั้นไม่ข้ามโครงสร้าง (O)	0.075 เมตร	0.053	-0.746	0.43
	0.150 เมตร	-	-	-
	0.225 เมตร	0.069	-0.733	0.68
	0.300 เมตร	0.190	-0.439	0.46

ตารางที่ ฉ-7 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ และค่าคงที่ในสมการที่ ฉ-5 ที่ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด

Case	ความลึกการจม (D)	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณและค่าคงที่		
		α	β	R^2
กรณีคลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง (A)	0.075 เมตร	0.0004	-1.519	0.95
	0.150 เมตร	0.0015	-1.217	0.97
	0.225 เมตร	0.0206	-0.678	0.71
	0.300 เมตร	0.1065	-0.322	0.35
กรณีคลื่นสั้นไม่ข้ามโครงสร้าง (O)	0.075 เมตร	0.0489	-0.476	0.39
	0.150 เมตร	-	-	-
	0.225 เมตร	0.0599	-0.482	0.67
	0.300 เมตร	0.1789	-0.285	0.51

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ความถดถอย

ข-1 การวิเคราะห์ความถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด

ข้อมูลต่าง ๆ สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์นั้น ส่วนใหญ่เป็นข้อมูลที่ได้มาจากการเก็บข้อมูลทั้งจากพื้นที่จริงและการทดลอง บ่อยครั้งที่ข้อมูลที่เก็บได้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน ดังนั้นข้อมูลที่เก็บได้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องดำเนินการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการทางสถิติเพื่อที่จะก่อให้เกิดผลลัพธ์ซึ่งสามารถใช้เป็นมาตรฐานสำหรับข้อมูลที่เก็บมาได้ในช่วงนั้น ๆ ในหัวข้อนี้จึงจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความถดถอย (regression analysis) เพื่อใช้ประดิษฐ์เส้นหรือสมการที่ใช้เป็นมาตรฐานสำหรับชุดข้อมูลในแต่ละกรณีศึกษาของการศึกษานี้

การวิเคราะห์ความถดถอย (regression analysis) เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไป เพื่อประมาณหรือพยากรณ์ค่าของตัวแปรตัวหนึ่งจากตัวแปรอื่น ๆ ที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรที่ต้องการประมาณ ซึ่งมีการกำหนดหรือทราบค่าตัวแปรอื่น ๆ ล่วงหน้า การวิเคราะห์ความถดถอยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเดียว (simple regression analysis) และการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงซ้อน (multiple regression analysis)

การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเดียว (simple regression analysis) เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว โดยที่ทราบค่าหรือกำหนดค่าของตัวแปรหนึ่งไว้ล่วงหน้า ตัวแปรที่ทราบค่าไว้ล่วงหน้าคือตัวแปรอิสระ (independent variable) มักใช้สัญลักษณ์ x ในขณะที่ตัวแปรที่ต้องการทราบค่าคือตัวแปรตาม (dependent variable) มักใช้ตัวแปร y

การหารูปแบบของความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่าง 2 ตัวแปร มักจัดให้อยู่ในรูปเชิงเส้นตรงที่สามารถสังเกตได้ในแผนภาพการกระจาย (scatter diagram) โดยมีคัมพันธ์สมการที่ ข-1

$$y = mx + c \quad (\text{ข-1})$$

โดย m คือ ความชัน (slope) ของกราฟเส้นตรง

c คือ จุดตัดแกน y (y -interception) หรือค่าของ y เมื่อ x มีค่าเป็น 0

การคำนวณค่า m และ c ของสมการประจำชุดข้อมูล x และ y ในแต่ละกรณีซึ่งมีจำนวน n ข้อมูลนั้น จะใช้แนวคิดที่ความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าต่ำที่สุด กล่าวคือ ระยะห่างจากจุดที่เป็นข้อมูลดิบกับเส้นตรงที่เกิดจากการพยากรณ์นั้นต้องมีระยะห่างตามแนวแกน y สะสมรวมกันน้อย

ที่สุด โดยทั่วไปจะใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) ซึ่งมีแนวคิดคือ ให้ผลบวกของค่าคลาดเคลื่อนยกกำลังสองมีค่าน้อยที่สุดและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 หากมีค่ามากเข้าใกล้ 1 แสดงถึงพฤติกรรมที่ x สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลง y ได้ดี

การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงซ้อน (multiple regression analysis) เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 3 ตัวขึ้นไป โดยที่ยังต้องทราบค่าตัวแปรอิสระต่าง ๆ (x_i) ทุกตัวล่วงหน้าเช่นกัน รูปแบบความสัมพันธ์เชิงซ้อนของตัวแปรอิสระจำนวน k ตัวแปร มักจัดเป็นรูปของสมการที่ ซ-2

$$y = m_1x_1 + m_2x_2 + \dots + m_kx_k + c \quad (\text{ซ-2})$$

โดย m_i คือ สัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงส่วน (partial regression coefficient)

c คือ จุดตัดแกน y (y -interception) หรือค่าของ y เมื่อ x มีค่าเป็น 0

การคำนวณค่า m และ c ของสมการประจำชุดข้อมูล x_i และ y ในแต่ละกรณีซึ่งมีจำนวน n ข้อมูลนั้น สามารถสรุปเป็นสมการย่อย ๆ และเขียนรวมในรูปของเมทริกซ์ได้

การวิเคราะห์ความถดถอยในหัวข้อนี้ เป็นการสร้างสมการที่เป็นมาตรฐานในการเป็นตัวแทนในการพยากรณ์ข้อมูลตัวแปรตามที่ต้องการทราบจากข้อมูลตัวแปรตั้งต้นที่ทราบค่า โดยใช้ข้อมูลที่เก็บได้ทั้งหมดในการวิเคราะห์ ซึ่งจะพิจารณาภายใต้สมมติฐานที่ตัวแปรตามทุกตัวส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้น ทั้งนี้เพื่อความแม่นยำของสมการพยากรณ์ดังกล่าวจึงควรทดสอบสมมติฐานดังกล่าวด้วยกระบวนการทางสถิติก่อนเพื่อความถูกต้องและแม่นยำของสมการสัมพันธ์ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดดังกล่าวในภาคผนวก ซ-2

ข-2 การทดสอบความเหมาะสมของสมการความถดถอยเชิงเส้น

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามซึ่งเป็นเชิงปริมาณ ส่วนตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรเชิงกลุ่มหรือเชิงคุณภาพ โดยจุดประสงค์ของการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้นเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวว่ามีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามหรือไม่ การทดสอบจะเป็นการทดสอบสมมติฐาน คือ

$$H_0 : \beta_1 = 0 \quad \text{หรือ } H_0 : y \text{ ไม่มีความสัมพันธ์กับ } x \text{ ในรูปเชิงเส้น}$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0 \quad \text{หรือ } H_1 : y \text{ มีความสัมพันธ์กับ } x \text{ ในรูปเชิงเส้น}$$

สำหรับในกรณีที่ตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรเชิงกลุ่มที่มีระดับกลุ่มย่อยตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป จะใช้สถิติทดสอบ F ของการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (1-Way ANOVA) โดยจะมีการแยกความผันแปรของ y เป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. ความผันแปรของ y ที่เกิดจากอิทธิพลของตัวแปร x (regression sum square)
2. ความผันแปรของ y ที่เกิดจากอิทธิพลปัจจัย (ตัวแปร) อื่น ๆ ที่สัมพันธ์กับตัวแปร y (residual sum square หรือ error sum square)

โดย total sum square (SST) มีค่าเท่ากับ regression sum square (SSR) รวมกับ residual sum square (SSE) และมีวิธีการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ ข-1

ตารางที่ ข-1 ANOVA สำหรับการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2561)

แหล่งแปรปรวน	องศาอิสระ (Df)	ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square, SS)	ผลบวกกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square, MS)	F
ความถดถอย (regression)	k	SSReg	MSReg = SSR/k	MSReg/MSE
ความคลาดเคลื่อน (error หรือ residual)	n-k-1	SSE	MSE = SSE/(n-k-1)	
ผลรวม (total)	n-1	SST		

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ SST} &= \text{ผลบวกของผลต่างระหว่าง } y_i \text{ กับ } \bar{y} \text{ ยกกำลังสอง} \\ &= \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \end{aligned} \quad (\text{ซ-3})$$

$$\begin{aligned} \text{SSReg} &= \text{ค่าแปรปรวนของ } y \text{ เนื่องจากอิทธิพลของ } x_i \\ &= \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \end{aligned} \quad (\text{ซ-4})$$

$$\text{SST} = \text{SSReg} + \text{SSE} \quad (\text{ซ-5})$$

$$\begin{aligned} \text{SSE} &= \text{ค่าแปรปรวนของ } y \text{ เนื่องจากอิทธิพลอื่น ๆ หรือค่าแปรปรวนอย่างสุ่ม} \\ &= \text{SST} - \text{SSreg} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \end{aligned} \quad (\text{ซ-6})$$

$$k = \text{จำนวนตัวแปรอิสระ}$$

$$n = \text{จำนวนข้อมูลในแต่ละตัวแปร}$$

สำหรับการตรวจสอบสมมติฐานในการศึกษานี้ จะมีหลักการดังนี้

1. จะสรุปว่าปฏิเสธ H_0 ถ้า $F > F_{1-\alpha}$ ที่องศาอิสระ k และ $n-k-1$ ตามลำดับ โดยค่า α เป็นค่าแสดงนัยสำคัญของการตรวจสอบสมมติฐาน ในที่นี้ใช้ค่า $\alpha = 0.05$
2. หากใช้โปรแกรม SPSS จะสามารถสรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 ถ้า Sig. ของสถิติทดสอบ F ในตาราง ANOVA มีค่าน้อยกว่า α (กัลยา วานิชย์บัญชา และฐิตา วานิชย์บัญชา, 2561)

จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการวิเคราะห์ถึงความแปรปรวน เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวว่ามีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามหรือไม่จากข้อมูลที่ได้เก็บมาทั้งหมด ทั้งนี้ก่อนจะมีการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังกล่าวนี้ได้ นั้น จะต้องทำการเลือกตัวแปรอิสระต่าง ๆ เข้าในสมการความถดถอยก่อน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งมีวิธีการนำเข้าสู่ข้อมูลที่หลากหลาย โดยการศึกษาเลือกข้อมูลนำเข้าสู่ด้วยวิธีการ stepwise โดยเป็นวิธีที่เลือกตัวแปรอิสระตัวแรกเข้าสมการด้วยวิธี forward หากพบว่าไม่มีตัวแปรอิสระใดผ่านเกณฑ์จะหยุด และถือว่าไม่มีตัวแปรอิสระใดมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม แต่เมื่อมีตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามจะดำเนินการต่อไป เมื่อได้ตัวแปรอิสระตัวแรก จากนั้นจะพิจารณาเลือกตัวแปรอิสระเข้าสมการ โดยใช้เกณฑ์ entry ในขณะที่เดียวกันจะพิจารณาตัวแปรอิสระที่อยู่ในสมการออกจากสมการ โดยใช้เกณฑ์ remove ที่กำหนด กระทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งไม่มีตัวแปรอิสระตัวใดเข้าหรือออกจากสมการอีก สมการที่เหลือจึงเป็นสมการความถดถอยที่เหมาะสม

การวิเคราะห์เพื่อหาสมการความถดถอยในการศึกษานี้ นั้นได้แบ่งออกเป็น 2 พหุติกรรม คือ การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น โดนแต่ละกรณีจะสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 ส่วนตามลักษณะการ

เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างของคลื่น ได้แก่ กรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง ซึ่งมีลักษณะของการวิเคราะห์ที่เหมือนกัน โดยกลุ่มตัวแปรอิสระในที่นี้เป็นกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง คือ ความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์ (b/L), ปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) และความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) และกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยคุณสมบัติคลื่น คือ ความลึกสัมพัทธ์ (d/L), ความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (H_i/d), และความชันคลื่น (H_i/L)

การวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ร่วมกับตัวแปรไร้หน่วยต่าง ๆ กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น ตามลำดับ ทั้งในกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้างและไม่ล้นข้ามโครงสร้างกระทำด้วยวิธีการวิเคราะห์ความถดถอย (regression analysis) ซึ่งจะได้ผลของสมการความสัมพันธ์ในรูปของสมการที่ ข-7 และสมการที่ ข-8 ตามลำดับ

$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น, } K_r = \alpha \left(\frac{b}{L}\right)^{\beta_1} \left(\frac{D}{d}\right)^{\beta_2} \left(\frac{d}{L}\right)^{\beta_3} \left(\frac{H_i}{d}\right)^{\beta_4} \left(\frac{H_i}{L}\right)^{\beta_5} \quad (\text{ข-7})$$

$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น, } K_t = \alpha \left(\frac{b}{L}\right)^{\beta_1} (\Phi)^{\beta_2} \left(\frac{d}{L}\right)^{\beta_3} \left(\frac{H_i}{d}\right)^{\beta_4} \left(\frac{H_i}{L}\right)^{\beta_5} \quad (\text{ข-8})$$

โดยที่ α

คือ ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของสมการ

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ และ β_5 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งกำลังในแต่ละกลุ่มตัวแปร

จากสมการที่ ข-7 และสมการที่ ข-8 ซึ่งเป็นสมการกำลังนั้น แต่สามารถประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นกับข้อมูลที่กระจายในลักษณะดังกล่าวได้เช่นกัน โดยการแปลงให้สมการกำลังให้อยู่ในรูปสมการลอการิทึม ดังสมการที่ ข-9 และสมการที่ ข-10

$$\log K_r = \log \alpha + \beta_1 \log \left(\frac{b}{L}\right) + \beta_2 \log \left(\frac{D}{d}\right) + \beta_3 \log \left(\frac{d}{L}\right) + \beta_4 \log \left(\frac{H_i}{d}\right) + \beta_5 \log \left(\frac{H_i}{L}\right) \quad (\text{ข-9})$$

$$\log K_t = \log \alpha + \beta_1 \log \left(\frac{b}{L}\right) + \beta_2 \log (\Phi) + \beta_3 \log \left(\frac{d}{L}\right) + \beta_4 \log \left(\frac{H_i}{d}\right) + \beta_5 \log \left(\frac{H_i}{L}\right) \quad (\text{ข-10})$$

จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เพื่อทดสอบความแตกต่างของข้อมูลที่ได้รับปัจจัยที่แตกต่างกัน โดยเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว หรือ 1-Way ANOVA ทดสอบสมมติฐานด้วยสถิติทดสอบ F และพิจารณาเลือกตัวแปรอิสระในสมการความถดถอยด้วยวิธี stepwise เพื่อพิจารณาเฉพาะตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมคลื่นอย่างมีนัยสำคัญเท่านั้น การวิเคราะห์กระทำบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SPSS โดยมีรายละเอียดของแต่ละกรณีศึกษาดังนี้

การวิเคราะห์สมการพยากรณ์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน กรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

สำหรับการวิเคราะห์สมการพยากรณ์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน กรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้างนั้น เมื่อนำเข้าข้อมูลจากกรณีศึกษาต่าง ๆ ที่เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ได้ตั้งแสดงข้อมูลในตารางที่ ข-2 และวิเคราะห์บนโปรแกรม SPSS จะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ ข-3 ถึงตารางที่ ข-6

จากตารางที่ ข-3 ซึ่งแสดงถึงการเลือกตัวแปรเข้าและออกจากสมการนั้น จะเห็นได้ว่าตัวแปรความชันคลื่น (H_i/L) นั้น เป็นตัวแปรแรกที่ถูกเลือกเข้ามาในสมการความถดถอย ตามมาด้วยตัวแปรความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) โดยไม่มีตัวแปรใดที่เมื่อถูกเลือกเข้ามาในสมการแล้วถูกนำออกจากสมการ สำหรับตารางที่ ข-4 แสดงถึงระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระในการเลือกเข้าสู่สมการในลำดับต่าง ๆ โดยพบว่าเมื่อตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามถูกเลือกเข้ามาในสมการทั้งหมดแล้วจะมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.813

สำหรับตารางที่ ข-5 แสดงถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการเลือกตัวแปรอิสระต่าง ๆ เข้าสู่สมการ โดยพบว่าค่า Sig. ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม SPSS มีค่าน้อยกว่า 0.05 ทำให้สามารถที่จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 หรือสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรความชันคลื่น (H_i/L) และความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) ล้วนมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น ในขณะที่ตัวแปรไร้นัยอื่น ๆ ไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญ โดยสัมประสิทธิ์ประจำพจน์ต่าง ๆ ของสมการ ข-9 สามารถพิจารณาได้จากตารางที่ ข-6 และสรุปได้ตั้งสมการที่ ข-11

$$\log K_r = -2.228 - 1.036 \log \left(\frac{H_i}{L} \right) + 0.480 \log \left(\frac{D}{d} \right) \quad (\text{ข-11})$$

โดยสามารถแปลงกลับให้มาอยู่ในรูปสมการกำลัง ดังสมการที่ ข-12

$$K_r = 0.006 \left(\frac{H_i}{L} \right)^{-1.036} \left(\frac{D}{d} \right)^{0.480} \quad (\text{ข-12})$$

สมการที่ ข-12 เป็นสมการที่วิเคราะห์จากช่วงข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองที่มีเงื่อนไขจำกัด ส่งผลให้สามารถบรรยายค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นตามลักษณะทางกายภาพได้เฉพาะในช่วงที่คลื่นมีความชันคลื่น (H_i/L) มากกว่า 0.01 และค่าความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) น้อยกว่า 0.80 เท่านั้น โดยสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ ข-1

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลนำเข้า SPSS สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น กรณีคลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง

Case	B(m)	D(m)	W	K_r	H_i / L	H_i / d	d/L	b/H_i	D/d
ยอมให้คลื่นสั้นผ่านโครงสร้าง (A)	0.50	0.075	0.010 - 0.013	0.442	0.008	0.058	0.144	0.012	0.167
			0.013 - 0.016	<u>0.313</u>	<u>0.011</u>	<u>0.064</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.167</u>
			0.016 - 0.019	0.242	0.016	0.074	0.212	0.018	0.167
			0.019 - 0.022	0.104	0.023	0.107	0.212	0.018	0.167
			0.022 - 0.025	0.086	0.026	0.123	0.212	0.018	0.167
		0.150	0.010 - 0.013	0.539	0.008	0.057	0.144	0.012	0.333
			0.013 - 0.016	<u>0.306</u>	<u>0.013</u>	<u>0.073</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.333</u>
			0.016 - 0.019	0.277	0.015	0.073	0.212	0.018	0.333
			0.019 - 0.022	0.182	0.020	0.096	0.212	0.018	0.333
			0.022 - 0.025	0.115	0.025	0.117	0.212	0.018	0.333
	0.225	0.010 - 0.013	0.584	0.008	0.055	0.144	0.012	0.500	
		0.013 - 0.016	<u>0.384</u>	<u>0.011</u>	<u>0.065</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.500</u>	
		0.016 - 0.019	0.476	0.013	0.063	0.212	0.018	0.500	
		0.019 - 0.022	0.369	0.017	0.080	0.212	0.018	0.500	
		0.022 - 0.025	0.232	0.022	0.103	0.212	0.018	0.500	
	0.300	0.010 - 0.013	0.568	0.008	0.056	0.144	0.012	0.667	
		0.013 - 0.016	<u>0.390</u>	<u>0.011</u>	<u>0.065</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.667</u>	
		0.016 - 0.019	0.472	0.014	0.068	0.212	0.018	0.667	
		0.019 - 0.022	0.417	0.017	0.078	0.212	0.018	0.667	
		0.022 - 0.025	0.380	0.021	0.097	0.212	0.018	0.667	
1.00	0.075	0.010 - 0.013	0.443	0.009	0.060	0.144	0.012	0.167	
		0.013 - 0.016	<u>0.285</u>	<u>0.012</u>	<u>0.068</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.167</u>	
		0.016 - 0.019	0.233	0.016	0.075	0.212	0.018	0.167	
		0.019 - 0.022	0.103	0.023	0.109	0.212	0.018	0.167	
		0.022 - 0.025	0.075	0.026	0.123	0.212	0.018	0.167	
	0.150	0.010 - 0.013	0.506	0.009	0.059	0.144	0.012	0.333	
		0.013 - 0.016	<u>0.305</u>	<u>0.011</u>	<u>0.064</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.333</u>	
		0.016 - 0.019	0.342	0.015	0.072	0.212	0.018	0.333	
		0.019 - 0.022	0.137	0.019	0.089	0.212	0.018	0.333	
		0.022 - 0.025	0.102	0.025	0.117	0.212	0.018	0.333	

หมายเหตุ : ข้อมูลที่ขีดเส้นใต้ไว้จะไม่ถูกนำเข้าการวิเคราะห์ เนื่องจากไม่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมคลื่น

ตารางที่ ข-2(ต่อ) ข้อมูลนำเข้า SPSS สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

Case	B(m)	D(m)	W	K_r	H_i / L	H_i / d	d/L	b/H_i	D/d
ยอมให้คลื่นล้นผ่านโครงสร้าง (A)	1.00	0.225	0.010 - 0.013	0.542	0.008	0.054	0.144	0.012	0.500
			0.013 - 0.016	<u>0.376</u>	<u>0.011</u>	<u>0.065</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.500</u>
			0.016 - 0.019	0.398	0.014	0.068	0.212	0.018	0.500
			0.019 - 0.022	0.411	0.017	0.080	0.212	0.018	0.500
			0.022 - 0.025	0.220	0.021	0.100	0.212	0.018	0.500
		0.300	0.010 - 0.013	0.578	0.008	0.055	0.144	0.012	0.667
			0.013 - 0.016	<u>0.370</u>	<u>0.013</u>	<u>0.072</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.667</u>
			0.016 - 0.019	0.519	0.014	0.067	0.212	0.018	0.667
			0.019 - 0.022	0.469	0.016	0.074	0.212	0.018	0.667
			0.022 - 0.025	0.357	0.020	0.093	0.212	0.018	0.667
	1.50	0.075	0.010 - 0.013	0.439	0.009	0.064	0.144	0.012	0.167
			0.013 - 0.016	<u>0.259</u>	<u>0.012</u>	<u>0.067</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.167</u>
			0.016 - 0.019	0.238	0.017	0.080	0.212	0.018	0.167
			0.019 - 0.022	0.099	0.025	0.116	0.212	0.018	0.167
			0.022 - 0.025	0.080	0.026	0.122	0.212	0.018	0.167
		0.150	0.010 - 0.013	0.466	0.008	0.057	0.144	0.012	0.333
			0.013 - 0.016	<u>0.306</u>	<u>0.011</u>	<u>0.062</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.333</u>
			0.016 - 0.019	0.261	0.016	0.075	0.212	0.018	0.333
			0.019 - 0.022	0.222	0.020	0.096	0.212	0.018	0.333
			0.022 - 0.025	0.158	0.024	0.114	0.212	0.018	0.333
0.225	0.010 - 0.013	0.510	0.008	0.054	0.144	0.012	0.500		
	0.013 - 0.016	<u>0.335</u>	<u>0.011</u>	<u>0.065</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.500</u>		
	0.016 - 0.019	0.405	0.014	0.067	0.212	0.018	0.500		
	0.019 - 0.022	0.392	0.017	0.078	0.212	0.018	0.500		
	0.022 - 0.025	0.259	0.022	0.105	0.212	0.018	0.500		
0.300	0.010 - 0.013	0.471	0.008	0.057	0.144	0.012	0.667		
	0.013 - 0.016	<u>0.325</u>	<u>0.011</u>	<u>0.064</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.667</u>		
	0.016 - 0.019	0.427	0.014	0.067	0.212	0.018	0.667		
	0.019 - 0.022	0.360	0.018	0.086	0.212	0.018	0.667		
	0.022 - 0.025	0.374	0.019	0.090	0.212	0.018	0.667		

หมายเหตุ : ข้อมูลที่ขีดเส้นใต้ไว้จะไม่ถูกนำเข้าการวิเคราะห์ เนื่องจากไม่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมคลื่น

ตารางที่ ข-3 การเลือกข้อมูลเข้าและออกด้วยวิธี stepwise ในกรณีคลื่นล้มข้ามโครงสร้าง

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	H _r /L	.	Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).
2	D/d	.	Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).

a. Dependent Variable: K_r

ตารางที่ ข-4 ระดับความสัมพันธ์ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R²) ในกรณีคลื่นล้มข้ามโครงสร้าง

Model Summary^c

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.786 ^a	.617	.611	.14922
2	.905 ^b	.820	.813	.10329

a. Predictors: (Constant), H_r/L

b. Predictors: (Constant), H_r/L, D/d

c. Dependent Variable: K_r

ตารางที่ ข-5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในกรณีคลื่นล้มข้ามโครงสร้าง

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	2.082	1	2.082	93.509	.000 ^b
	Residual	1.292	58	.022		
	Total	3.374	59			
2	Regression	2.766	2	1.383	129.623	.000 ^c
	Residual	.608	57	.011		
	Total	3.374	59			

a. Dependent Variable: K_r

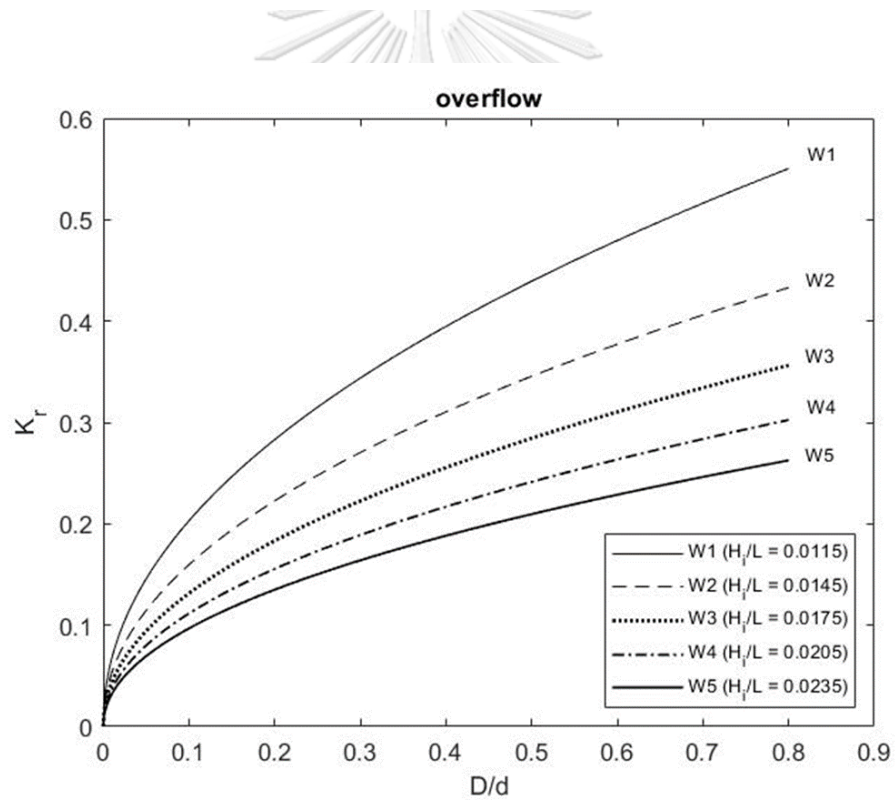
b. Predictors: (Constant), H_r/L

c. Predictors: (Constant), H_r/L, D/d

ตารางที่ ข-6 สัมประสิทธิ์ของสมการในกรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

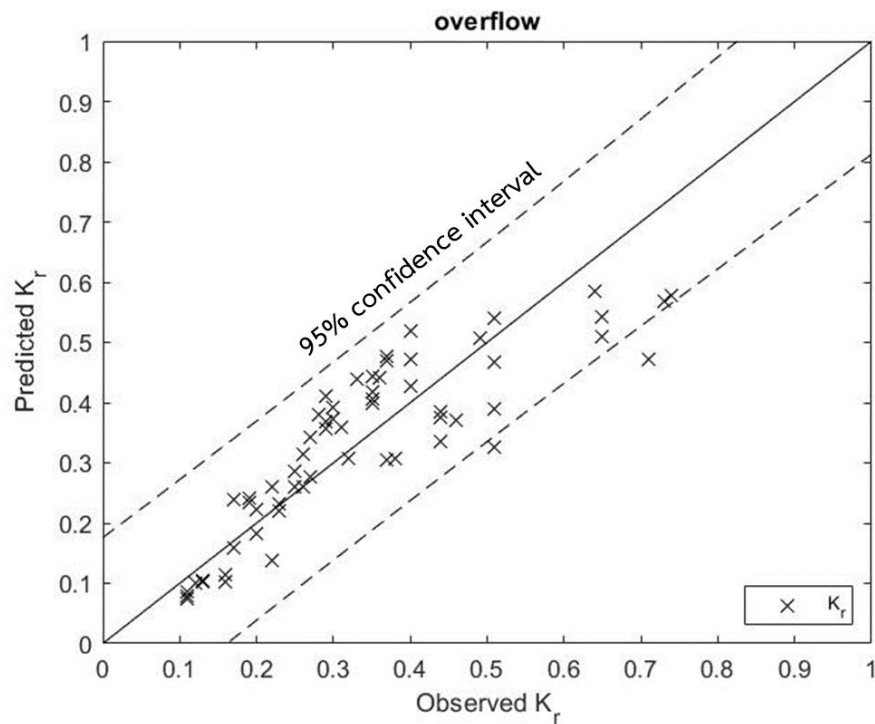
Coefficients ^a							
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1 (Constant)	-2.653	.220		-12.034	.000		
H _r /L	-1.154	.119	-.786	-9.670	.000	1.000	1.000
2 (Constant)	-2.228	.162		-13.788	.000		
H _r /L	-1.036	.084	-.705	-12.343	.000	.969	1.032
D/d	.480	.060	.457	8.004	.000	.969	1.032

a. Dependent Variable: K_r



รูปที่ ข-1 กราฟบรรยายสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

เมื่อวิเคราะห์สมการได้แล้ว จึงนำสมการที่ได้มาทำการพยากรณ์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจากกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยในแต่ละกรณีศึกษา และนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่วัดได้จากการทดลองในแต่ละกรณีศึกษา พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์มีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากชุดข้อมูลที่วัดจริงจากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ ช-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่คำนวณจากสมการความสัมพันธ์และที่วิเคราะห์ได้จากข้อมูลที่เก็บจริงมีความสอดคล้องกับเส้น 45 องศา และกระจายตัวภายในเส้นระดับความเชื่อมั่น (confidence interval) ที่ 95% แสดงให้เห็นว่ากลุ่มตัวแปรไร้หน่วยความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) และความชันคลื่น (H/L) มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น และมีความน่าเชื่อถือที่จะใช้สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น สำหรับกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ ช-2 กราฟการกระจายของข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น
กรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

การวิเคราะห์สมการพยากรณ์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน กรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

สำหรับการวิเคราะห์สมการพยากรณ์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ในกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้างนั้น เมื่อนำเข้าข้อมูลจากกรณีศึกษาต่าง ๆ ที่เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ได้ตั้งแสดงข้อมูลในตารางที่ ข-7 และวิเคราะห์กับโปรแกรม SPSS จะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ ข-8 ถึงตารางที่ ข-11

จากตารางที่ ข-8 ซึ่งแสดงถึงการเลือกตัวแปรเข้าและออกจากสมการนั้น จะเห็นได้ว่าตัวแปรความชันคลื่น (H/L) นั้น เป็นตัวแปรแรกที่ถูกเลือกเข้ามาในสมการความถดถอย ตามมาด้วยตัวแปรความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) โดยไม่มีตัวแปรใดที่เมื่อถูกเลือกเข้ามาในสมการแล้วถูกนำออกจากสมการ สำหรับตารางที่ ข-9 แสดงถึงระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระในการเลือกเข้าสู่สมการในลำดับต่าง ๆ โดยพบว่าเมื่อตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามถูกเลือกเข้ามาในสมการทั้งหมดแล้วจะมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.744

สำหรับตารางที่ ข-10 แสดงถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการเลือกตัวแปรอิสระต่าง ๆ เข้าสู่สมการ โดยพบว่าค่า Sig. ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม SPSS ล้วนมีค่าน้อยกว่า 0.05 ทำให้สามารถที่จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 หรือสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรความชันคลื่น (H/L) และความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) ล้วนมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น ในขณะที่ตัวแปรไร้หน่วยอื่นไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีความสอดคล้องกับกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง โดยสัมประสิทธิ์ประจำพจน์ต่าง ๆ ของสมการ ข-9 สามารถพิจารณาได้จากตารางที่ ข-11 และสรุปได้ตั้งสมการที่ ข-13

$$\log K_r = -1.187 - 0.536 \log \left(\frac{H_i}{L} \right) + 0.267 \log \left(\frac{D}{d_i} \right) \quad (\text{ข-13})$$

โดยสามารถแปลงกลับให้มาอยู่ในรูปสมการกำลัง ดังสมการที่ ข-14

$$K_r = 0.065 \left(\frac{H_i}{L} \right)^{-0.536} \left(\frac{D}{d} \right)^{0.267} \quad (\text{ข-14})$$

สมการที่ ข-14 เป็นสมการที่วิเคราะห์จากช่วงข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองที่มีเงื่อนไขจำกัด ส่งผลให้สามารถบรรยายค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นตามลักษณะทางกายภาพได้เฉพาะในช่วงที่คลื่นมีความชันคลื่น (H/L) มากกว่า 0.01 และค่าความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) น้อยกว่า 0.80 เท่านั้น โดยสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ ข-3

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลนำเข้า SPSS สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น กรณีคลื่นไม่ผ่านข้ามโครงสร้าง

Case	B(m)	D(m)	W	K_r	H_i / L	H_i / d	d/L	b/H_i	D/d
ไม่ยอมให้คลื่นผ่านโครงสร้าง (O)	0.50	0.075	0.010 - 0.013	0.571	0.008	0.052	0.144	0.012	0.167
			0.013 - 0.016	<u>0.277</u>	<u>0.010</u>	<u>0.057</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.167</u>
			0.016 - 0.019	0.418	0.014	0.067	0.212	0.018	0.167
			0.019 - 0.022	0.424	0.018	0.084	0.212	0.018	0.167
			0.022 - 0.025	0.359	0.022	0.104	0.212	0.018	0.167
		0.150	0.010 - 0.013	<u>0.650</u>	<u>0.007</u>	<u>0.052</u>	<u>0.144</u>	<u>0.012</u>	<u>0.333</u>
			0.013 - 0.016	<u>0.379</u>	<u>0.010</u>	<u>0.056</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.333</u>
			0.016 - 0.019	<u>0.597</u>	<u>0.012</u>	<u>0.058</u>	<u>0.212</u>	<u>0.018</u>	<u>0.333</u>
			0.019 - 0.022	<u>0.509</u>	<u>0.017</u>	<u>0.078</u>	<u>0.212</u>	<u>0.018</u>	<u>0.333</u>
			0.022 - 0.025	<u>0.587</u>	<u>0.024</u>	<u>0.114</u>	<u>0.212</u>	<u>0.018</u>	<u>0.333</u>
	0.225	0.010 - 0.013	0.482	0.008	0.055	0.144	0.012	0.500	
		0.013 - 0.016	<u>0.463</u>	<u>0.013</u>	<u>0.074</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.500</u>	
		0.016 - 0.019	0.376	0.017	0.080	0.212	0.018	0.500	
		0.019 - 0.022	0.444	0.019	0.091	0.212	0.018	0.500	
		0.022 - 0.025	0.345	0.022	0.102	0.212	0.018	0.500	
	0.300	0.010 - 0.013	0.750	0.008	0.052	0.144	0.012	0.667	
		0.013 - 0.016	<u>0.547</u>	<u>0.011</u>	<u>0.061</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.667</u>	
		0.016 - 0.019	0.651	0.014	0.066	0.212	0.018	0.667	
		0.019 - 0.022	0.504	0.017	0.082	0.212	0.018	0.667	
		0.022 - 0.025	0.559	0.019	0.090	0.212	0.018	0.667	
1.00	0.075	0.010 - 0.013	0.524	0.008	0.055	0.144	0.012	0.167	
		0.013 - 0.016	<u>0.328</u>	<u>0.011</u>	<u>0.060</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.167</u>	
		0.016 - 0.019	0.465	0.014	0.065	0.212	0.018	0.167	
		0.019 - 0.022	0.402	0.016	0.078	0.212	0.018	0.167	
		0.022 - 0.025	0.270	0.022	0.102	0.212	0.018	0.167	
	0.150	0.010 - 0.013	<u>0.630</u>	<u>0.007</u>	<u>0.051</u>	<u>0.144</u>	<u>0.012</u>	<u>0.333</u>	
		0.013 - 0.016	<u>0.502</u>	<u>0.009</u>	<u>0.053</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.333</u>	
		0.016 - 0.019	<u>0.665</u>	<u>0.013</u>	<u>0.061</u>	<u>0.212</u>	<u>0.018</u>	<u>0.333</u>	
		0.019 - 0.022	<u>0.599</u>	<u>0.016</u>	<u>0.074</u>	<u>0.212</u>	<u>0.018</u>	<u>0.333</u>	
		0.022 - 0.025	<u>0.520</u>	<u>0.019</u>	<u>0.088</u>	<u>0.212</u>	<u>0.018</u>	<u>0.333</u>	

หมายเหตุ : ข้อมูลที่ขีดเส้นใต้ไว้จะไม่ถูกนำเข้าการวิเคราะห์ เนื่องจากมีไม่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมคลื่น

ตารางที่ ข-7(ต่อ) ข้อมูลนำเข้า SPSS สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกรณีคลื่นไม่ล้ำข้ามโครงสร้าง

Case	B(m)	D(m)	W	K_r	H_i / L	H_i / d	d/L	b/ H_i	D/d
ไม่ยอมให้คลื่นล้นผ่านโครงสร้าง (O)	1.00	0.225	0.010 - 0.013	0.757	0.008	0.052	0.144	0.012	0.500
			0.013 - 0.016	<u>0.519</u>	<u>0.009</u>	<u>0.053</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.500</u>
			0.016 - 0.019	0.580	0.014	0.065	0.212	0.018	0.500
			0.019 - 0.022	0.456	0.017	0.079	0.212	0.018	0.500
			0.022 - 0.025	0.390	0.023	0.109	0.212	0.018	0.500
		0.300	0.010 - 0.013	0.820	0.007	0.052	0.144	0.012	0.667
			0.013 - 0.016	<u>0.692</u>	<u>0.008</u>	<u>0.048</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.667</u>
			0.016 - 0.019	0.589	0.015	0.071	0.212	0.018	0.667
			0.019 - 0.022	0.574	0.016	0.076	0.212	0.018	0.667
			0.022 - 0.025	0.495	0.020	0.092	0.212	0.018	0.667
	1.50	0.075	0.010 - 0.013	0.540	0.008	0.057	0.144	0.012	0.167
			0.013 - 0.016	<u>0.323</u>	<u>0.011</u>	<u>0.061</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.167</u>
			0.016 - 0.019	0.470	0.014	0.066	0.212	0.018	0.167
			0.019 - 0.022	0.318	0.019	0.088	0.212	0.018	0.167
			0.022 - 0.025	0.197	0.026	0.120	0.212	0.018	0.167
		0.150	0.010 - 0.013	<u>0.634</u>	<u>0.008</u>	<u>0.054</u>	<u>0.144</u>	<u>0.012</u>	<u>0.333</u>
			0.013 - 0.016	<u>0.367</u>	<u>0.009</u>	<u>0.052</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.333</u>
			0.016 - 0.019	0.597	0.012	0.058	0.212	0.018	0.333
			0.019 - 0.022	<u>0.523</u>	<u>0.015</u>	<u>0.070</u>	<u>0.212</u>	<u>0.018</u>	<u>0.333</u>
			0.022 - 0.025	<u>0.476</u>	<u>0.019</u>	<u>0.088</u>	<u>0.212</u>	<u>0.018</u>	<u>0.333</u>
		0.225	0.010 - 0.013	0.719	0.008	0.052	0.144	0.012	0.500
			0.013 - 0.016	<u>0.496</u>	<u>0.009</u>	<u>0.053</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.500</u>
			0.016 - 0.019	0.551	0.014	0.066	0.212	0.018	0.500
			0.019 - 0.022	0.422	0.017	0.079	0.212	0.018	0.500
0.022 - 0.025	0.341		0.022	0.103	0.212	0.018	0.500		
0.300	0.010 - 0.013	0.731	0.008	0.055	0.144	0.012	0.667		
	0.013 - 0.016	<u>0.558</u>	<u>0.010</u>	<u>0.055</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.667</u>		
	0.016 - 0.019	0.664	0.015	0.072	0.212	0.018	0.667		
	0.019 - 0.022	0.655	0.016	0.076	0.212	0.018	0.667		
	0.022 - 0.025	0.593	0.020	0.096	0.212	0.018	0.667		

หมายเหตุ : ข้อมูลที่ขีดเส้นใต้ไว้จะไม่ถูกนำเข้าการวิเคราะห์ เนื่องจากไม่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมคลื่น

ตารางที่ ข-8 การเลือกข้อมูลเข้าและออกด้วยวิธี stepwise ในกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	H _r /L	.	Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).
2	D/d	.	Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).

a. Dependent Variable: K_r

ตารางที่ ข-9 ระดับความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R²) ในกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

Model Summary^c

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.698 ^a	.487	.472	.09789
2	.871 ^b	.759	.744	.06818

a. Predictors: (Constant), H_r/L

b. Predictors: (Constant), H_r/L, D/d

c. Dependent Variable: K_r

ตารางที่ ข-10 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.309	1	.309	32.298	.000 ^b
	Residual	.326	34	.010		
	Total	.635	35			
2	Regression	.482	2	.241	51.836	.000 ^c
	Residual	.153	33	.005		
	Total	.635	35			

a. Dependent Variable: K_r

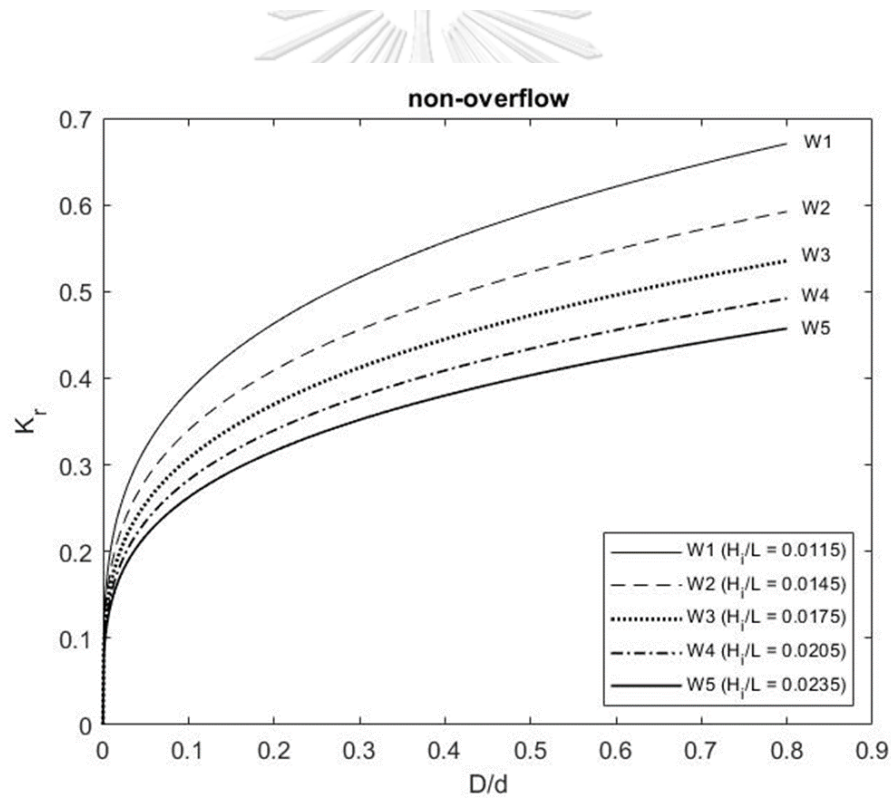
b. Predictors: (Constant), H_r/L

c. Predictors: (Constant), H_r/L, D/d

ตารางที่ ข-11 สัมประสิทธิ์ของสมการในกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

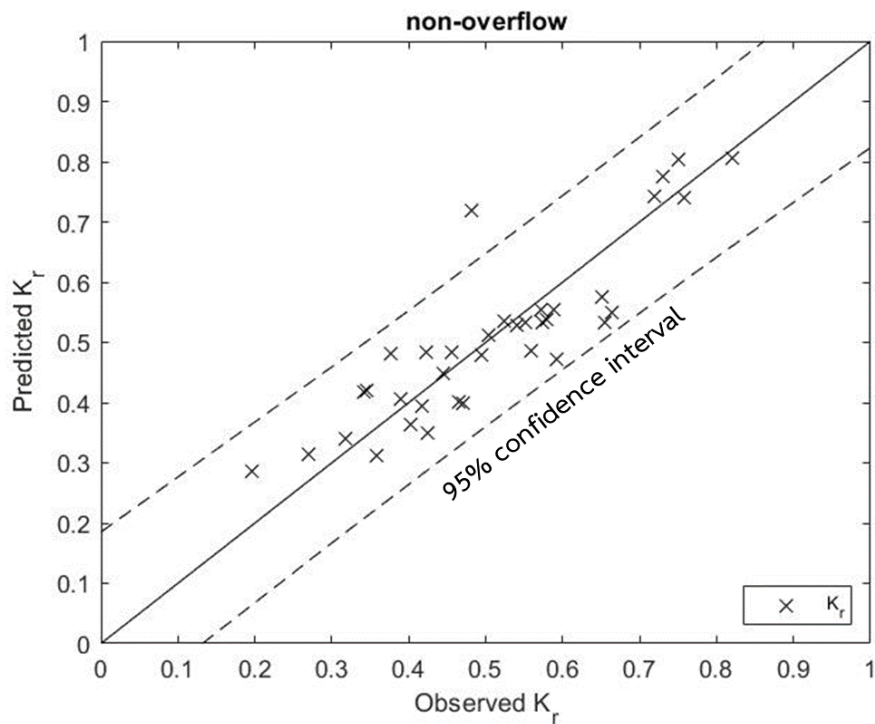
Coefficients ^a							
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1 (Constant)	-1.330	.180		-7.382	.000		
H _r /L	-.553	.097	-.698	-5.683	.000	1.000	1.000
2 (Constant)	-1.187	.128		-9.301	.000		
H _r /L	-.536	.068	-.677	-7.905	.000	.998	1.002
D/d	.267	.044	.521	6.090	.000	.998	1.002

a. Dependent Variable: K_r



รูปที่ ข-3 กราฟบรรยายสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

เมื่อวิเคราะห์สมการได้แล้ว จึงนำสมการที่ได้มาทำการพยากรณ์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจากกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยในแต่ละกรณีศึกษา และนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่วัดได้จากการทดลองในแต่ละกรณีศึกษา พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์มีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากชุดข้อมูลที่วัดจริงจากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ ช-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่คำนวณจากสมการความสัมพันธ์และที่วิเคราะห์ได้จากข้อมูลที่เก็บจริงมีความสอดคล้องกับเส้น 45 องศา และกระจายตัวภายในเส้นระดับความเชื่อมั่น (confidence interval) ที่ 95% แสดงให้เห็นว่ากลุ่มตัวแปรไร้หน่วยความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (D/d) และความชันคลื่น (H/L) มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น และมีความน่าเชื่อถือที่จะใช้สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ ช-4 กราฟการกระจายของข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น
กรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

การวิเคราะห์สมการพยากรณ์ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน กรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

สำหรับการวิเคราะห์สมการพยากรณ์ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน กรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง นั้น เมื่อนำเข้าข้อมูลจากกรณีศึกษาต่าง ๆ ที่เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ที่ได้ตั้งแสดงข้อมูลในตารางที่ ช-12 และวิเคราะห์บนโปรแกรม SPSS จะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ ช-13 ถึงตารางที่ ช-16

จากตารางที่ ช-13 ซึ่งแสดงถึงการเลือกตัวแปรเข้าและออกจากสมการนั้น จะเห็นได้ว่าตัวแปรความชันคลื่น (H/L) นั้น เป็นตัวแปรแรกที่ถูกเลือกเข้ามาในสมการความถดถอย ตามมาด้วยตัวแปรปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) โดยไม่มีตัวแปรใดที่เมื่อถูกเลือกเข้ามาในสมการแล้วถูกนำออกจากสมการ สำหรับตารางที่ ช-14 แสดงถึงระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระในการเลือกเข้าสู่สมการในลำดับต่าง ๆ โดยพบว่าเมื่อตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามถูกเลือกเข้ามาในสมการทั้งหมดแล้วจะมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.678

สำหรับตารางที่ ช-15 แสดงถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการเลือกตัวแปรอิสระต่าง ๆ เข้าสู่สมการ โดยพบว่าค่า Sig. ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม SPSS มีค่าน้อยกว่า 0.05 ทำให้สามารถที่จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 หรือสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรความชันคลื่น (H/L) และปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) ล้วนมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น ในขณะที่ตัวแปรไร่น้อยอื่น ๆ ไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญ โดยสัมประสิทธิ์ประจำพจน์ต่าง ๆ ของสมการ ช-10 สามารถพิจารณาได้จากตารางที่ ช-6 และสรุปได้ตั้งสมการที่ ช-15

$$\log K_t = -0.470 - 0.238 \log \left(\frac{H_t}{L} \right) + 0.122 \log(\Phi) \quad (\text{ช-15})$$

โดยสามารถแปลงกลับให้มาอยู่ในรูปสมการกำลัง ดังสมการที่ ช-16

$$K_t = 0.339 \left(\frac{H_t}{L} \right)^{-0.238} (\Phi)^{0.122} \quad (\text{ช-16})$$

สมการที่ ช-16 เป็นสมการที่วิเคราะห์จากช่วงข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองที่มีเงื่อนไขจำกัด ส่งผลให้สามารถบรรยายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นตามลักษณะทางกายภาพได้เฉพาะในช่วงที่คลื่นมีความชันคลื่น (H/L) มากกว่า 0.01 และค่าปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) น้อยกว่า 0.80 เท่านั้น โดยสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ ช-5

ตารางที่ ข-12 ข้อมูลนำเข้า SPSS สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

Case	B(m)	D(m)	W	K_t	H_i / L	H_i / d	d/L	b/ H_i	ϕ
ยอมให้คลื่นล้นผ่านโครงสร้าง (A)	0.50	0.075	0.010 - 0.013	0.980	0.008	0.058	0.144	0.012	0.771
			0.013 - 0.016	<u>1.046</u>	<u>0.011</u>	<u>0.064</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.771</u>
			0.016 - 0.019	0.905	0.016	0.074	0.212	0.018	0.771
			0.019 - 0.022	0.789	0.023	0.107	0.212	0.018	0.771
			0.022 - 0.025	0.810	0.026	0.123	0.212	0.018	0.771
		0.150	0.010 - 0.013	0.956	0.008	0.057	0.144	0.012	0.617
			0.013 - 0.016	<u>0.939</u>	<u>0.013</u>	<u>0.073</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.617</u>
			0.016 - 0.019	0.893	0.015	0.073	0.212	0.018	0.617
			0.019 - 0.022	0.782	0.020	0.096	0.212	0.018	0.617
			0.022 - 0.025	0.737	0.025	0.117	0.212	0.018	0.617
	0.225	0.010 - 0.013	0.954	0.008	0.055	0.144	0.012	0.463	
		0.013 - 0.016	<u>0.988</u>	<u>0.011</u>	<u>0.065</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.463</u>	
		0.016 - 0.019	0.989	0.013	0.063	0.212	0.018	0.463	
		0.019 - 0.022	0.820	0.017	0.080	0.212	0.018	0.463	
		0.022 - 0.025	0.715	0.022	0.103	0.212	0.018	0.463	
	0.300	0.010 - 0.013	0.882	0.008	0.056	0.144	0.012	0.308	
		0.013 - 0.016	<u>0.953</u>	<u>0.011</u>	<u>0.065</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.308</u>	
		0.016 - 0.019	0.819	0.014	0.068	0.212	0.018	0.308	
		0.019 - 0.022	0.780	0.017	0.078	0.212	0.018	0.308	
		0.022 - 0.025	0.644	0.021	0.097	0.212	0.018	0.308	
1.00	0.075	0.010 - 0.013	0.974	0.009	0.060	0.144	0.012	0.802	
		0.013 - 0.016	<u>1.033</u>	<u>0.012</u>	<u>0.068</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.802</u>	
		0.016 - 0.019	0.950	0.016	0.075	0.212	0.018	0.802	
		0.019 - 0.022	0.753	0.023	0.109	0.212	0.018	0.802	
		0.022 - 0.025	0.792	0.026	0.123	0.212	0.018	0.802	
	0.150	0.010 - 0.013	0.961	0.009	0.059	0.144	0.012	0.642	
		0.013 - 0.016	<u>1.086</u>	<u>0.011</u>	<u>0.064</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.642</u>	
		0.016 - 0.019	0.936	0.015	0.072	0.212	0.018	0.642	
		0.019 - 0.022	0.886	0.019	0.089	0.212	0.018	0.642	
		0.022 - 0.025	0.745	0.025	0.117	0.212	0.018	0.642	

หมายเหตุ : ข้อมูลที่ขีดเส้นใต้ไว้จะไม่ถูกนำเข้าการวิเคราะห์ เนื่องจากมีไม่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมคลื่น

ตารางที่ ข-12(ต่อ) ข้อมูลนำเข้า SPSS สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

Case	B(m)	D(m)	W	K_t	H_i/L	H_i/d	d/L	b/H_i	ϕ
ยอมให้คลื่นล้นผ่านโครงสร้าง (A)	1.00	0.225	0.010 - 0.013	0.996	0.008	0.054	0.144	0.012	0.481
			0.013 - 0.016	<u>1.004</u>	<u>0.011</u>	<u>0.065</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.481</u>
			0.016 - 0.019	0.937	0.014	0.068	0.212	0.018	0.481
			0.019 - 0.022	0.881	0.017	0.080	0.212	0.018	0.481
			0.022 - 0.025	0.751	0.021	0.100	0.212	0.018	0.481
		0.300	0.010 - 0.013	0.882	0.008	0.055	0.144	0.012	0.321
			0.013 - 0.016	<u>0.865</u>	<u>0.013</u>	<u>0.072</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.321</u>
			0.016 - 0.019	0.834	0.014	0.067	0.212	0.018	0.321
			0.019 - 0.022	0.828	0.016	0.074	0.212	0.018	0.321
			0.022 - 0.025	0.681	0.020	0.093	0.212	0.018	0.321
	1.50	0.075	0.010 - 0.013	0.906	0.009	0.064	0.144	0.012	0.813
			0.013 - 0.016	<u>1.040</u>	<u>0.012</u>	<u>0.067</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.813</u>
			0.016 - 0.019	0.875	0.017	0.080	0.212	0.018	0.813
			0.019 - 0.022	0.723	0.025	0.116	0.212	0.018	0.813
			0.022 - 0.025	0.791	0.026	0.122	0.212	0.018	0.813
		0.150	0.010 - 0.013	<u>1.010</u>	<u>0.008</u>	<u>0.057</u>	<u>0.144</u>	<u>0.012</u>	<u>0.650</u>
			0.013 - 0.016	<u>1.089</u>	<u>0.011</u>	<u>0.062</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.650</u>
			0.016 - 0.019	0.943	0.016	0.075	0.212	0.018	0.650
			0.019 - 0.022	0.828	0.020	0.096	0.212	0.018	0.650
			0.022 - 0.025	0.768	0.024	0.114	0.212	0.018	0.650
		0.225	0.010 - 0.013	1.007	0.008	0.054	0.144	0.012	0.488
			0.013 - 0.016	<u>0.949</u>	<u>0.011</u>	<u>0.065</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.488</u>
			0.016 - 0.019	0.963	0.014	0.067	0.212	0.018	0.488
			0.019 - 0.022	0.862	0.017	0.078	0.212	0.018	0.488
			0.022 - 0.025	0.704	0.022	0.105	0.212	0.018	0.488
0.300		0.010 - 0.013	0.897	0.008	0.057	0.144	0.012	0.325	
		0.013 - 0.016	<u>0.924</u>	<u>0.011</u>	<u>0.064</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.325</u>	
		0.016 - 0.019	0.842	0.014	0.067	0.212	0.018	0.325	
		0.019 - 0.022	0.756	0.018	0.086	0.212	0.018	0.325	
		0.022 - 0.025	0.791	0.019	0.090	0.212	0.018	0.325	

หมายเหตุ : ข้อมูลที่ขีดเส้นใต้ไว้จะไม่ถูกนำเข้าการวิเคราะห์ เนื่องจากไม่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมคลื่น

ตารางที่ ข-13 การเลือกข้อมูลเข้าและออกด้วยวิธี stepwise ในกรณีคลื่นล้มข้ามโครงสร้าง

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	H _r /L	.	Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).
2	Φ	.	Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).

a. Dependent Variable: K_t

ตารางที่ ข-14 ระดับความสัมพันธ์ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R²) ในกรณีคลื่นล้มข้ามโครงสร้าง

Model Summary^c

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.741 ^a	.549	.538	.03271
2	.832 ^b	.692	.678	.02733

a. Predictors: (Constant), H_r/L

b. Predictors: (Constant), H_r/L, Φ

c. Dependent Variable: K_t

ตารางที่ ข-15 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในกรณีคลื่นล้มข้ามโครงสร้าง

ANOVA^a

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	.057	1	.057	53.469	.000 ^b
Residual	.047	44	.001		
Total	.104	45			
2 Regression	.072	2	.036	48.338	.000 ^c
Residual	.032	43	.001		
Total	.104	45			

a. Dependent Variable: K_t

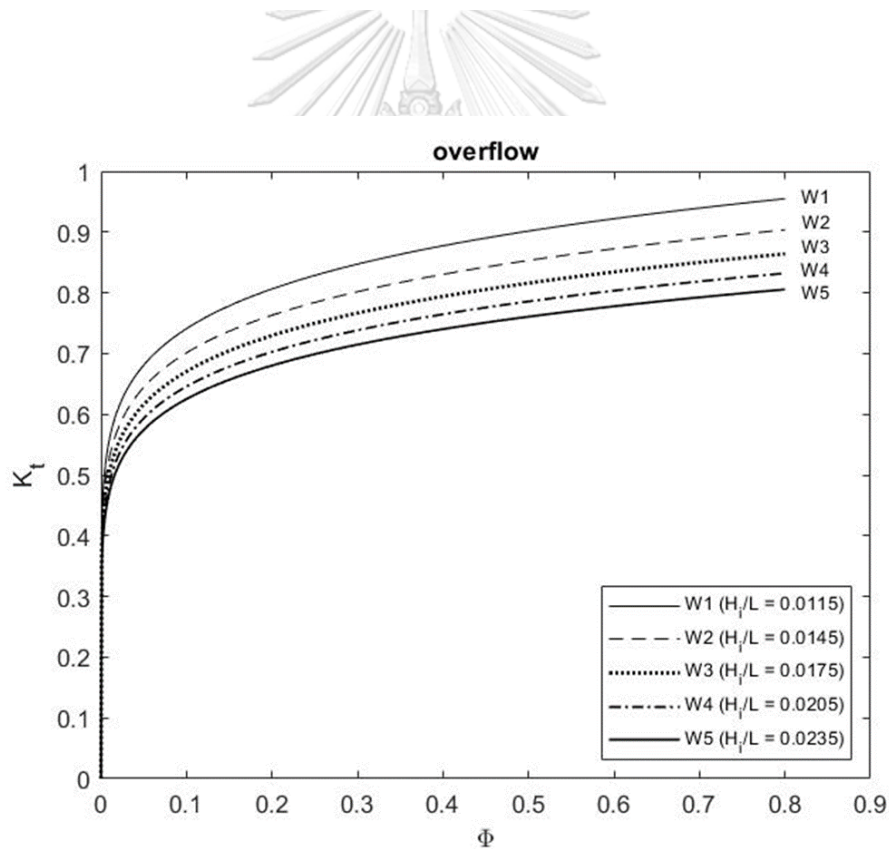
b. Predictors: (Constant), H_r/L

c. Predictors: (Constant), H_r/L, Φ

ตารางที่ ข-16 สัมประสิทธิ์ของสมการในกรณีคลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง

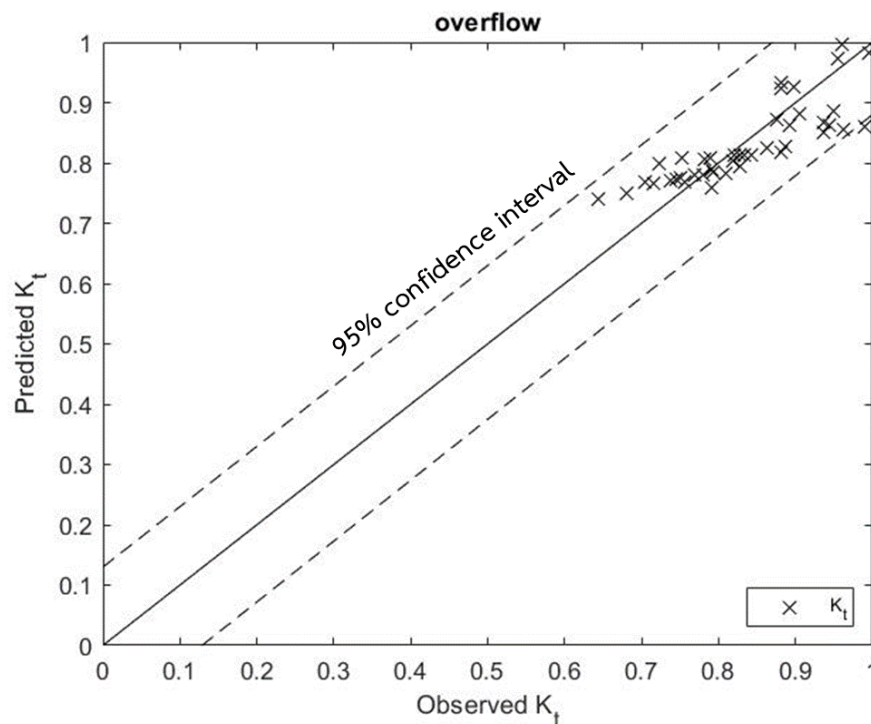
Coefficients ^a							
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1 (Constant)	-0.459	.053		-8.712	.000		
H _r /L	-0.213	.029	-.741	-7.312	.000	1.000	1.000
2 (Constant)	-0.470	.044		-10.654	.000		
H _r /L	-0.238	.025	-.827	-9.530	.000	.951	1.052
Phi	.122	.027	.389	4.478	.000	.951	1.052

a. Dependent Variable: K_t



รูปที่ ข-5 กราฟบรรยายสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น
กรณีคลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง

เมื่อวิเคราะห์สมการได้แล้ว จึงนำสมการที่ได้มาทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น จากกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยในแต่ละกรณีศึกษา และนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น ที่วัดได้จากการทดลองในแต่ละกรณีศึกษา พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่คำนวณได้จาก สมการความสัมพันธ์มีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากชุดข้อมูลที่วัดจริงจากการทดลอง ดัง แสดงในรูปที่ ข-6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่คำนวณจากสมการความสัมพันธ์ และที่วิเคราะห์ได้จากข้อมูลที่เก็บจริงมีความสอดคล้องกับเส้น 45 องศา และกระจายตัวภายใน เส้นระดับความเชื่อมั่น (confidence interval) ที่ 95% แสดงให้เห็นว่ากลุ่มตัวแปรไร้หน่วยปัจจัย ความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) และความชันคลื่น (H/L) มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น และมีความน่าเชื่อถือที่จะใช้สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ในการ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น สำหรับกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ ข-6 กราฟการกระจายของข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น
กรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

การวิเคราะห์สมการพยากรณ์ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน กรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

สำหรับการวิเคราะห์สมการพยากรณ์ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ในกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้างนั้น เมื่อนำเข้าข้อมูลจากกรณีศึกษาต่าง ๆ ที่เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ได้ตั้งแสดงข้อมูลในตารางที่ ข-17 และวิเคราะห์บนโปรแกรม SPSS จะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ ข-18 ถึงตารางที่ ข-21

จากตารางที่ ข-18 ซึ่งแสดงถึงการเลือกตัวแปรเข้าและออกจากสมการนั้น จะเห็นได้ว่าตัวแปรปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) นั้น เป็นตัวแปรแรกที่ถูกเลือกเข้ามาในสมการความถดถอย ตามมาด้วยตัวแปรความชันคลื่น (H_i/L) โดยไม่มีตัวแปรใดที่เมื่อถูกเลือกเข้ามาในสมการแล้วถูกนำออกจากสมการ สำหรับตารางที่ ข-19 แสดงถึงระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระในการเลือกเข้าสู่สมการในลำดับต่าง ๆ โดยพบว่าเมื่อตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามถูกเลือกเข้ามาในสมการทั้งหมดแล้วจะมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.939

สำหรับตารางที่ ข-20 แสดงถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการเลือกตัวแปรอิสระต่าง ๆ เข้าสู่สมการ โดยพบว่าค่า Sig. ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม SPSS ล้วนมีค่าน้อยกว่า 0.05 ทำให้สามารถที่จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 หรือสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรความชันคลื่น (H_i/L) และปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) ล้วนมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น ในขณะที่ตัวแปรไร้หน่วยอื่นไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีความสอดคล้องกับกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง โดยสัมประสิทธิ์ประจำพจน์ต่าง ๆ ของสมการ ข-10 สามารถพิจารณาได้จากตารางที่ ข-21 และสรุปได้ตั้งสมการที่ ข-17

$$\log K_t = -0.765 - 0.457 \log \left(\frac{H_i}{L} \right) + 0.884 \log(\Phi) \quad (\text{ข-17})$$

โดยสามารถแปลงกลับให้มาอยู่ในรูปสมการกำลัง ดังสมการที่ ข-18

$$K_t = 0.172 \left(\frac{H_i}{L} \right)^{-0.457} (\Phi)^{0.884} \quad (\text{ข-18})$$

สมการที่ ข-18 เป็นสมการที่วิเคราะห์จากช่วงข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองที่มีเงื่อนไขจำกัด ส่งผลให้สามารถบรรยายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นตามลักษณะทางกายภาพได้เฉพาะในช่วงที่คลื่นมีความชันคลื่น (H_i/L) มากกว่า 0.01 และค่าปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) น้อยกว่า 0.65 เท่านั้น โดยสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ ข-7

ตารางที่ ข-17 ข้อมูลนำเข้า SPSS สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กรณีคลื่นไม่ล้ำข้ามโครงสร้าง

Case	B(m)	D(m)	W	K_t	H_i / L	H_i / d	d/L	b/ H_i	ϕ
ไม่ยอมให้คลื่นล้นผ่านโครงสร้าง (O)	0.50	0.075	0.010 - 0.013	<u>1.062</u>	<u>0.008</u>	<u>0.052</u>	<u>0.144</u>	<u>0.012</u>	<u>0.771</u>
			0.013 - 0.016	<u>1.130</u>	<u>0.010</u>	<u>0.057</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.771</u>
			0.016 - 0.019	0.960	0.014	0.067	0.212	0.018	0.771
			0.019 - 0.022	0.935	0.018	0.084	0.212	0.018	0.771
			0.022 - 0.025	0.863	0.022	0.104	0.212	0.018	0.771
		0.150	0.010 - 0.013	0.857	0.007	0.052	0.144	0.012	0.617
			0.013 - 0.016	<u>1.080</u>	<u>0.010</u>	<u>0.056</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.617</u>
			0.016 - 0.019	0.887	0.012	0.058	0.212	0.018	0.617
			0.019 - 0.022	0.785	0.017	0.078	0.212	0.018	0.617
			0.022 - 0.025	0.632	0.024	0.114	0.212	0.018	0.617
	0.225	0.010 - 0.013	0.750	0.008	0.055	0.144	0.012	0.463	
		0.013 - 0.016	<u>0.756</u>	<u>0.013</u>	<u>0.074</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.463</u>	
		0.016 - 0.019	0.478	0.017	0.080	0.212	0.018	0.463	
		0.019 - 0.022	0.534	0.019	0.091	0.212	0.018	0.463	
		0.022 - 0.025	0.512	0.022	0.102	0.212	0.018	0.463	
	0.300	0.010 - 0.013	0.635	0.008	0.052	0.144	0.012	0.308	
		0.013 - 0.016	<u>0.570</u>	<u>0.011</u>	<u>0.061</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.308</u>	
		0.016 - 0.019	0.418	0.014	0.066	0.212	0.018	0.308	
		0.019 - 0.022	0.403	0.017	0.082	0.212	0.018	0.308	
		0.022 - 0.025	0.387	0.019	0.090	0.212	0.018	0.308	
1.00	0.075	0.010 - 0.013	<u>1.010</u>	<u>0.008</u>	<u>0.055</u>	<u>0.144</u>	<u>0.012</u>	<u>0.802</u>	
		0.013 - 0.016	<u>1.141</u>	<u>0.011</u>	<u>0.060</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.802</u>	
		0.016 - 0.019	0.975	0.014	0.065	0.212	0.018	0.802	
		0.019 - 0.022	0.965	0.016	0.078	0.212	0.018	0.802	
		0.022 - 0.025	0.829	0.022	0.102	0.212	0.018	0.802	
	0.150	0.010 - 0.013	<u>1.006</u>	<u>0.007</u>	<u>0.051</u>	<u>0.144</u>	<u>0.012</u>	<u>0.642</u>	
		0.013 - 0.016	<u>1.009</u>	<u>0.009</u>	<u>0.053</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.642</u>	
		0.016 - 0.019	0.773	0.013	0.061	0.212	0.018	0.642	
		0.019 - 0.022	0.748	0.016	0.074	0.212	0.018	0.642	
		0.022 - 0.025	0.734	0.019	0.088	0.212	0.018	0.642	

หมายเหตุ : ข้อมูลที่ขีดเส้นใต้ไว้จะไม่ถูกนำเข้าการวิเคราะห์ เนื่องจากมีไม่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมคลื่น

ตารางที่ ข-17(ต่อ) ข้อมูลนำเข้า SPSS สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกรณีคลื่นไม่ล้ำข้ามโครงสร้าง

Case	B(m)	D(m)	W	K_t	H_i / L	H_i / d	d/L	b/ H_i	ϕ
ไม่ยอมให้คลื่นล้นผ่านโครงสร้าง (O)	1.00	0.225	0.010 - 0.013	0.874	0.008	0.052	0.144	0.012	0.481
			0.013 - 0.016	<u>0.960</u>	<u>0.009</u>	<u>0.053</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.481</u>
			0.016 - 0.019	0.652	0.014	0.065	0.212	0.018	0.481
			0.019 - 0.022	0.597	0.017	0.079	0.212	0.018	0.481
			0.022 - 0.025	0.488	0.023	0.109	0.212	0.018	0.481
		0.300	0.010 - 0.013	0.656	0.007	0.052	0.144	0.012	0.321
			0.013 - 0.016	<u>0.732</u>	<u>0.008</u>	<u>0.048</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.321</u>
			0.016 - 0.019	0.366	0.015	0.071	0.212	0.018	0.321
			0.019 - 0.022	0.397	0.016	0.076	0.212	0.018	0.321
			0.022 - 0.025	0.360	0.020	0.092	0.212	0.018	0.321
	1.50	0.075	0.010 - 0.013	<u>1.064</u>	<u>0.008</u>	<u>0.057</u>	<u>0.144</u>	<u>0.012</u>	<u>0.813</u>
			0.013 - 0.016	<u>1.119</u>	<u>0.011</u>	<u>0.061</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.813</u>
			0.016 - 0.019	0.982	0.014	0.066	0.212	0.018	0.813
			0.019 - 0.022	0.861	0.019	0.088	0.212	0.018	0.813
			0.022 - 0.025	0.695	0.026	0.120	0.212	0.018	0.813
		0.150	0.010 - 0.013	0.945	0.008	0.054	0.144	0.012	0.650
			0.013 - 0.016	<u>1.185</u>	<u>0.009</u>	<u>0.052</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.650</u>
			0.016 - 0.019	0.953	0.012	0.058	0.212	0.018	0.650
			0.019 - 0.022	0.903	0.015	0.070	0.212	0.018	0.650
			0.022 - 0.025	0.809	0.019	0.088	0.212	0.018	0.650
0.225	0.010 - 0.013	0.827	0.008	0.052	0.144	0.012	0.488		
	0.013 - 0.016	<u>0.878</u>	<u>0.009</u>	<u>0.053</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.488</u>		
	0.016 - 0.019	0.613	0.014	0.066	0.212	0.018	0.488		
	0.019 - 0.022	0.595	0.017	0.079	0.212	0.018	0.488		
	0.022 - 0.025	0.493	0.022	0.103	0.212	0.018	0.488		
0.300	0.010 - 0.013	0.677	0.008	0.055	0.144	0.012	0.325		
	0.013 - 0.016	<u>0.731</u>	<u>0.010</u>	<u>0.055</u>	<u>0.176</u>	<u>0.015</u>	<u>0.325</u>		
	0.016 - 0.019	0.402	0.015	0.072	0.212	0.018	0.325		
	0.019 - 0.022	0.428	0.016	0.076	0.212	0.018	0.325		
	0.022 - 0.025	0.368	0.020	0.096	0.212	0.018	0.325		

หมายเหตุ : ข้อมูลที่ขีดเส้นใต้ไว้จะไม่ถูกนำเข้าการวิเคราะห์ เนื่องจากมีไม่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมคลื่น

ตารางที่ ข-18 การเลือกข้อมูลเข้าและออกด้วยวิธี stepwise ในกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Φ	.	Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter \leq .050, Probability-of-F-to-remove \geq .100).
2	H/L	.	Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter \leq .050, Probability-of-F-to-remove \geq .100).

a. Dependent Variable: K_t

ตารางที่ ข-19 ระดับความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ในกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

Model Summary^c

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.835 ^a	.698	.691	.07895
2	.970 ^b	.942	.939	.03514

a. Predictors: (Constant), Φ

b. Predictors: (Constant), Φ , H/L

c. Dependent Variable: K_t

ตารางที่ ข-20 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.604	1	.604	96.973	.000 ^b
	Residual	.262	42	.006		
	Total	.866	43			
2	Regression	.816	2	.408	330.285	.000 ^c
	Residual	.051	41	.001		
	Total	.866	43			

a. Dependent Variable: K_t

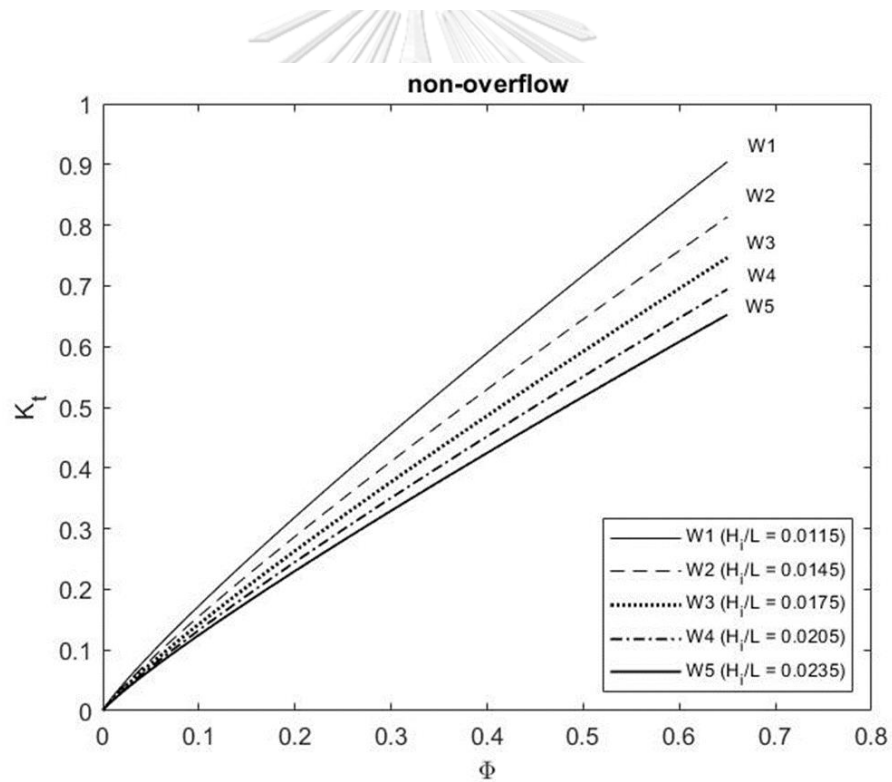
b. Predictors: (Constant), Φ

c. Predictors: (Constant), Φ , H/L

ตารางที่ ข-21 สัมประสิทธิ์ของสมการในกรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

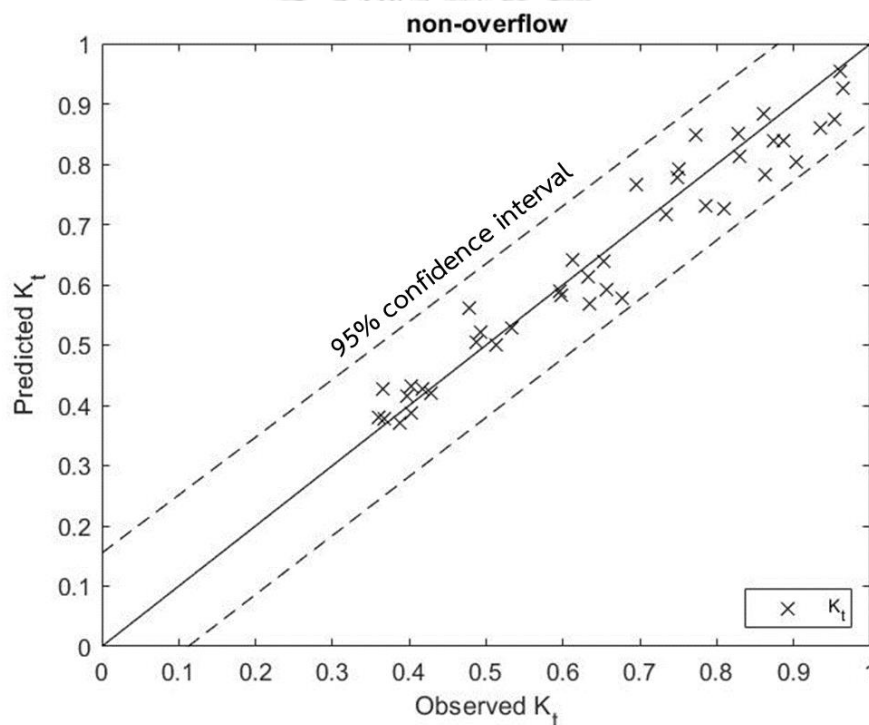
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1 (Constant)	.046	.027		1.717	.093		
ϕ	.796	.081	.835	9.847	.000	1.000	1.000
2 (Constant)	-.765	.063		-12.125	.000		
ϕ	.884	.037	.928	24.155	.000	.966	1.035
H_i/L	-.457	.035	-.502	-13.078	.000	.966	1.035

a. Dependent Variable: K_t



รูปที่ ข-7 กราฟบรรยายสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น
กรณีคลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

เมื่อวิเคราะห์สมการได้แล้ว จึงนำสมการที่ได้มาทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น จากกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยในแต่ละกรณีศึกษา และนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น ที่วัดได้จากการทดลองในแต่ละกรณีศึกษา พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่คำนวณได้จาก สมการความสัมพันธ์มีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากชุดข้อมูลที่วัดจริงจากการทดลอง ดัง แสดงในรูปที่ ข-8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่คำนวณจากสมการความสัมพันธ์ และที่วิเคราะห์ได้จากข้อมูลที่เก็บจริงมีความสอดคล้องกับเส้น 45 องศา และกระจายตัวภายใน เส้นระดับความเชื่อมั่น (confidence interval) ที่ 95% แสดงให้เห็นว่ากลุ่มตัวแปรไร้หน่วยปัจจัย ความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (Φ) และความชันคลื่น (H_r/L) มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น และมีความน่าเชื่อถือที่จะใช้สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ในการ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ ข-8 กราฟการกระจายของข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น
กรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

ภาคผนวก ข

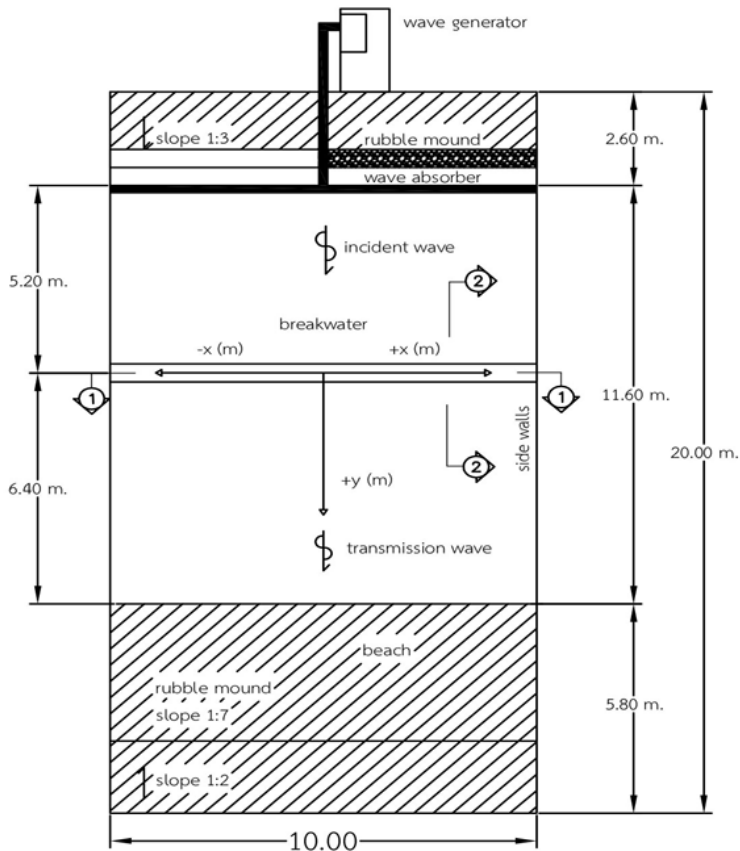
ผลการทดลองของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น

ข-1 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นด้านหลังโครงสร้าง

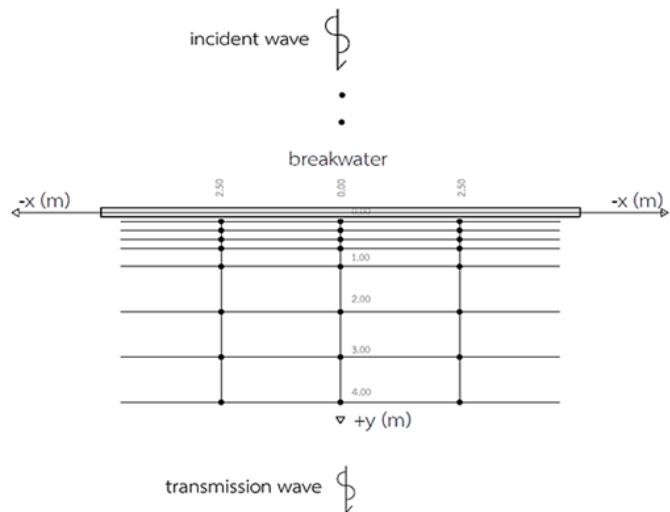
สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการแสดงผลการทดลองของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในบริเวณด้านหลังโครงสร้าง จากกรณีศึกษาทั้งหมด 120 กรณี โดยมีตัวแปรที่สนใจ ได้แก่ ความลึกการจมโครงสร้าง, ระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง, การยอมให้คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และคุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น กำหนดระดับน้ำนิ่งที่ 0.45 เมตร และความหนาของโครงสร้างที่ 0.0375 เมตร มีการเปลี่ยนแปลงความลึกการจมทั้งสิ้น 4 ระดับ คือ 0.075(D1), 0.150(D2), 0.225(D3) และ 0.300(D4) เมตร ตามลำดับ เปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง 3 ระยะ คือ 0.5(B1), 1(B2) และ 1.5(B3) เมตร ตามลำดับ ค่าความชันคลื่นแตกต่างกัน 5 ค่า คืออยู่ในช่วงระหว่าง 0.010-0.013(W1), 0.013-0.016(W2), 0.016-0.019(W3), 0.019-0.022(W4) และ 0.022-0.025(W5) ตามลำดับ มีกรณีหลักที่แตกต่างกัน คือ การยอมให้คลื่นล้นข้ามได้(A) และการไม่ยอมให้คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง(O) สำหรับรายละเอียดคุณสมบัติคลื่นด้านหน้าที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างของแต่ละกรณีศึกษาสามารถดูรายละเอียดในตารางที่ ฉ-1 และตารางที่ ฉ-2 ในภาคผนวก ฉ

ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นอัตราส่วนระหว่างความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นในแต่ละตำแหน่งต่อความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง โดยกำหนดให้ค่าพิกัด (0,0) อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางเชื่อมกันคลื่น ดังแสดงในรูปที่ ข-1 สำหรับข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละพิกัดแกน x และแกน y จะแสดงรายละเอียดในตารางที่ ข-1 และตารางที่ ข-2 สำหรับกรณีที่คลื่นล้นและไม่ล้นข้ามโครงสร้าง ตามลำดับ

นอกจากนั้นเพื่อการพิจารณาและเปรียบเทียบพฤติกรรมคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงได้นำค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่ได้มาสร้างเส้นชั้นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในบริเวณพื้นที่ด้านหลังโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น เพื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละกรณีศึกษา ดังแสดงในรูปที่ ข-2 และ ข-3 สำหรับกรณีที่คลื่นล้นและไม่ล้นข้ามโครงสร้างตามลำดับ



Overview of the wave basin (dimension in meter)



รูปที่ ๗-1 แกนพิกัดการเก็บข้อมูลความสูงคลื่นด้านหลังโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น

ตารางที่ ซ-1 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในกรณีศึกษาต่าง ๆ ที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

Y-axis	X-axis											
	AB1D1W1			AB1D2W1			AB1D3W1			AB1D4W1		
	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5
0.1	1.12	0.88	0.62	0.91	0.76	0.72	0.90	0.74	0.64	0.78	0.69	0.61
0.2	1.06	1.00	0.70	0.99	0.90	0.78	0.95	0.88	0.70	0.93	0.86	0.68
0.4	1.17	0.96	0.64	1.06	1.12	0.85	1.10	1.03	0.77	1.11	0.95	0.82
0.6	1.28	1.17	1.08	1.29	1.13	0.97	1.20	1.19	0.99	1.13	1.01	0.98
1.0	1.30	1.01	1.18	1.23	0.96	1.09	1.18	1.02	1.12	1.13	0.89	1.03
2.0	0.86	1.08	0.62	0.78	1.02	0.83	0.77	0.96	0.71	0.74	0.91	0.65
3.0	1.04	0.77	0.94	0.88	0.76	0.92	0.91	0.79	1.06	0.86	0.71	0.77
4.0	1.25	1.19	1.07	1.13	1.28	1.01	1.08	1.25	1.05	1.01	1.32	0.98
	AB1D1W2			AB1D2W2			AB1D3W2			AB1D4W2		
0.1	1.32	1.31	1.42	1.04	1.09	1.15	1.00	1.14	1.11	0.98	1.09	1.12
0.2	1.30	1.26	1.24	1.11	1.07	1.10	1.11	1.15	1.20	1.04	1.03	1.01
0.4	1.10	1.11	1.04	1.10	0.98	0.92	1.03	1.01	0.97	0.99	0.94	0.75
0.6	1.03	1.13	0.79	1.07	0.90	0.84	1.04	1.04	0.84	1.00	0.99	0.79
1.0	1.19	1.35	1.04	1.03	1.13	1.11	1.07	1.18	1.10	1.03	1.06	0.97
2.0	1.17	0.98	0.73	0.96	0.78	0.77	1.04	0.83	0.68	1.02	0.85	0.58
3.0	1.18	0.91	0.89	0.95	0.80	1.02	1.09	0.84	0.99	0.99	0.85	0.95
4.0	1.15	1.39	1.02	1.06	1.02	1.09	1.08	1.14	1.20	1.08	1.18	1.07
	AB1D1W3			AB1D2W3			AB1D3W3			AB1D4W3		
0.1	0.99	1.11	1.03	0.92	0.94	0.71	0.88	0.81	0.53	0.73	0.80	0.42
0.2	1.04	1.12	1.00	1.01	1.07	0.88	1.01	1.07	0.62	0.84	1.00	0.49
0.4	1.12	1.20	1.31	1.01	1.12	0.99	1.03	1.20	0.84	0.92	1.07	0.69
0.6	1.06	1.04	1.19	1.03	1.16	1.10	1.11	1.23	0.98	0.96	1.01	0.94
1.0	1.09	0.74	0.79	1.16	0.68	0.83	1.17	0.76	0.61	0.98	0.79	0.64
2.0	1.16	0.91	0.67	1.05	0.87	0.80	1.17	0.98	0.81	1.00	1.00	0.63
3.0	0.97	0.89	0.88	0.89	0.94	0.84	1.00	1.07	0.85	0.82	0.82	0.68
4.0	0.99	1.00	0.67	0.79	0.99	0.88	0.98	1.11	0.92	0.76	0.91	0.76

ตารางที่ ข-1(ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในกรณีศึกษาต่าง ๆ ที่คลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง

Y-axis	X-axis											
	AB1D1W4			AB1D2W4			AB1D3W4			AB1D4W4		
	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5
0.1	0.76	0.86	0.82	0.74	0.83	0.70	0.78	0.67	0.58	0.70	0.70	0.35
0.2	0.83	0.98	1.02	0.82	0.98	0.73	0.87	0.82	0.64	0.79	0.86	0.60
0.4	0.93	0.91	1.14	0.88	0.93	0.96	0.86	1.02	0.90	0.83	1.00	0.75
0.6	0.86	0.77	1.12	0.87	0.85	1.06	0.87	0.97	0.89	0.90	0.90	0.90
1.0	0.84	0.70	0.74	0.88	0.67	0.76	1.08	0.66	0.59	0.93	0.73	0.58
2.0	0.84	0.80	0.81	0.88	0.79	0.73	1.00	0.90	0.61	0.88	1.04	0.48
3.0	0.78	0.64	0.80	0.85	0.81	0.73	0.78	0.81	0.73	0.83	0.80	0.73
4.0	0.75	0.83	0.86	0.63	0.77	0.84	0.68	0.99	0.87	0.64	0.92	0.70
	AB1D1W5			AB1D2W5			AB1D3W5			AB1D4W5		
0.1	0.72	0.85	0.97	0.62	0.66	0.74	0.49	0.56	0.57	0.58	0.58	0.45
0.2	0.82	0.92	1.07	0.71	0.84	0.94	0.66	0.71	0.64	0.72	0.86	0.60
0.4	0.89	0.88	1.17	0.84	0.77	0.93	0.85	0.78	0.76	0.77	0.92	0.64
0.6	0.87	0.71	1.03	0.80	0.65	0.87	0.81	0.77	0.76	0.74	0.72	0.75
1.0	0.75	0.82	0.86	0.81	0.73	0.72	0.86	0.58	0.58	0.75	0.61	0.54
2.0	0.86	0.84	0.72	0.78	0.77	0.75	0.88	0.87	0.58	0.73	0.74	0.46
3.0	0.86	0.80	0.79	0.70	0.67	0.77	0.69	0.67	0.63	0.65	0.62	0.69
4.0	0.72	0.78	0.91	0.62	0.73	0.85	0.58	0.77	0.77	0.56	0.78	0.58
	AB2D1W1			AB2D2W1			AB2D3W1			AB2D4W1		
0.1	1.07	0.96	0.65	1.00	0.87	0.83	1.02	0.81	0.86	0.81	0.78	0.53
0.2	1.13	1.03	0.74	1.01	0.92	0.85	1.12	0.89	0.84	0.98	0.78	0.66
0.4	1.22	1.14	0.79	1.16	1.04	0.86	1.19	1.06	0.89	1.03	0.87	0.72
0.6	1.23	1.29	0.96	1.20	1.15	1.06	1.25	1.22	1.07	1.04	0.96	0.88
1.0	1.20	1.18	0.96	1.14	1.06	1.14	1.22	1.13	1.16	1.12	0.88	1.02
2.0	0.79	1.16	0.74	0.74	1.06	0.82	0.79	1.09	0.92	0.81	0.99	0.66
3.0	1.15	0.85	0.67	0.90	0.83	0.86	0.93	0.84	0.93	0.83	0.78	0.88
4.0	1.30	1.25	0.87	1.18	1.22	1.05	1.18	1.29	1.00	1.04	1.07	0.88

ตารางที่ ซ-1(ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในกรณีศึกษาต่าง ๆ ที่คลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง

Y-axis	X-axis											
	AB2D1W2			AB2D2W2			AB2D3W2			AB2D4W2		
	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5
0.1	1.27	1.15	1.29	1.25	1.30	1.28	1.01	1.17	1.23	0.82	0.95	0.94
0.2	1.23	1.17	1.17	1.23	1.20	1.12	1.13	1.21	1.28	0.94	0.87	0.86
0.4	1.15	0.96	0.97	1.16	1.02	0.87	1.10	1.02	0.95	0.92	0.83	0.63
0.6	0.99	1.06	0.79	1.09	1.09	0.85	1.05	1.04	0.76	0.84	0.84	0.58
1.0	1.07	1.27	1.34	1.21	1.31	1.22	1.11	1.18	1.22	0.91	0.94	0.85
2.0	1.16	0.94	0.66	1.11	1.05	0.82	1.03	0.95	0.63	0.92	0.84	0.58
3.0	1.01	0.81	0.97	1.19	0.81	1.02	1.04	0.96	1.00	1.00	0.77	0.81
4.0	1.13	1.32	1.31	1.18	1.38	1.21	1.09	1.20	1.12	0.88	1.01	0.96
	AB2D1W3			AB2D2W3			AB2D3W3			AB2D4W3		
0.1	1.04	1.21	0.95	0.95	0.99	0.82	0.96	1.01	0.55	0.76	0.64	0.35
0.2	1.10	1.20	0.96	1.08	1.09	0.89	1.07	0.95	0.61	0.85	0.78	0.51
0.4	1.12	1.29	1.27	1.07	1.29	1.04	1.00	1.19	0.77	0.89	1.10	0.75
0.6	1.02	1.04	0.96	1.02	1.13	1.07	1.01	1.05	0.91	0.88	0.98	0.86
1.0	1.14	0.66	0.55	1.13	0.71	0.77	1.17	0.74	0.62	1.09	0.87	0.59
2.0	1.19	0.90	0.66	1.02	0.93	0.83	1.15	0.96	0.67	0.96	0.94	0.55
3.0	0.93	0.94	0.91	0.88	1.03	0.96	0.95	0.95	0.97	0.83	0.95	0.73
4.0	0.92	1.11	1.00	0.80	1.00	0.97	0.85	1.05	0.90	0.78	1.08	0.67
	AB2D1W4			AB2D2W4			AB2D3W4			AB2D4W4		
0.1	0.79	0.83	0.90	0.75	0.91	0.91	0.76	0.91	0.69	0.79	0.69	0.37
0.2	0.86	0.93	0.93	0.82	0.91	0.97	0.92	0.93	0.82	0.85	0.91	0.52
0.4	0.94	0.92	1.07	0.95	1.09	1.05	0.93	1.13	0.92	0.81	1.09	0.67
0.6	0.87	0.66	1.08	0.86	0.90	0.99	0.88	1.04	0.94	0.84	0.96	0.70
1.0	0.84	0.64	0.67	0.99	0.62	0.73	1.13	0.70	0.66	0.99	0.80	0.54
2.0	0.83	0.73	0.72	1.04	0.87	0.89	1.08	0.87	0.66	0.95	1.04	0.52
3.0	0.81	0.60	0.72	0.94	0.84	0.88	0.81	0.90	0.97	0.75	1.01	0.70
4.0	0.75	0.84	0.80	0.82	0.87	0.82	0.78	0.89	0.97	0.81	1.02	0.64

ตารางที่ ซ-1(ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในกรณีศึกษาต่าง ๆ ที่คลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง

Y-axis	X-axis											
	AB2D1W5			AB2D2W5			AB2D3W5			AB2D4W5		
	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5
0.1	0.74	0.89	0.95	0.57	0.72	0.84	0.73	0.78	0.63	0.61	0.57	0.38
0.2	0.78	0.96	1.04	0.72	0.76	1.05	0.73	0.79	0.72	0.68	0.77	0.43
0.4	0.84	0.91	1.12	0.83	0.89	0.98	0.82	0.93	0.86	0.74	0.87	0.54
0.6	0.89	0.76	0.96	0.77	0.65	0.82	0.78	0.83	0.89	0.70	0.76	0.64
1.0	0.87	0.81	0.73	0.95	0.61	0.72	0.82	0.57	0.60	0.78	0.60	0.49
2.0	0.85	0.74	0.77	0.80	0.78	0.78	0.78	0.87	0.61	0.82	0.79	0.45
3.0	0.83	0.78	0.68	0.66	0.64	0.84	0.60	0.74	0.88	0.70	0.71	0.58
4.0	0.81	0.81	0.86	0.61	0.79	0.81	0.54	0.87	0.87	0.66	0.74	0.68
	AB3D1W1			AB3D2W1			AB3D3W1			AB3D4W1		
0.1	1.06	0.96	0.66	0.98	0.93	0.59	1.01	0.95	0.83	0.81	0.88	0.71
0.2	1.08	1.02	0.79	0.97	0.82	0.62	1.08	0.86	0.78	0.96	0.86	0.71
0.4	1.12	1.12	0.72	1.16	1.02	0.77	1.21	1.03	0.86	1.04	0.86	0.83
0.6	1.13	1.14	0.91	1.23	1.07	1.11	1.27	1.10	1.03	1.09	1.10	0.91
1.0	1.22	1.06	0.89	1.29	1.04	1.20	1.21	1.13	1.09	1.08	0.89	0.95
2.0	0.75	1.11	0.74	0.78	1.05	0.82	0.84	1.12	0.79	0.70	0.96	0.68
3.0	1.08	0.72	0.50	0.95	0.83	0.93	1.05	0.81	0.94	0.86	0.77	0.94
4.0	1.24	1.14	0.87	1.10	1.36	1.27	1.12	1.34	1.04	1.02	1.17	0.97
	AB3D1W2			AB3D2W2			AB3D3W2			AB3D4W2		
0.1	1.24	1.19	1.41	1.29	1.35	1.21	1.08	1.18	1.16	1.05	0.98	0.98
0.2	1.24	1.12	1.18	1.29	1.27	1.21	1.11	1.11	1.13	1.09	0.96	1.05
0.4	1.07	0.96	0.83	1.24	1.00	0.81	1.10	0.94	0.84	1.07	0.88	0.73
0.6	0.94	1.12	0.92	1.07	1.10	0.86	1.04	1.08	0.63	0.92	1.05	0.67
1.0	1.13	1.34	1.42	1.12	1.44	1.35	1.15	1.27	1.07	1.14	1.18	0.98
2.0	0.96	1.09	0.79	1.10	1.11	0.68	1.04	0.86	0.55	1.01	0.78	0.68
3.0	1.12	0.75	0.97	1.20	0.79	1.07	1.09	0.78	0.92	0.94	0.80	0.86
4.0	1.15	1.27	1.25	1.22	1.31	1.33	1.12	1.01	1.17	1.09	1.14	1.02

ตารางที่ ซ-1(ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในกรณีศึกษาต่าง ๆ ที่คลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง

Y-axis	X-axis											
	AB3D1W3			AB3D2W3			AB3D3W3			AB3D4W3		
	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5
0.1	0.91	1.02	0.92	0.92	0.98	0.67	0.93	0.85	0.52	0.80	0.86	0.42
0.2	1.06	1.14	0.94	0.99	1.03	0.77	1.07	0.93	0.64	0.91	1.02	0.62
0.4	1.08	1.11	1.20	0.98	1.27	1.05	1.01	1.21	0.85	0.97	1.25	0.73
0.6	0.95	0.95	0.98	1.01	1.09	1.08	0.98	1.13	0.93	1.03	0.96	0.93
1.0	1.04	0.73	0.54	1.14	0.69	0.70	1.23	0.70	0.62	1.08	0.72	0.67
2.0	1.02	0.86	0.64	1.16	0.87	0.87	1.21	0.97	0.76	1.09	0.92	0.64
3.0	1.01	0.87	0.79	1.08	1.00	0.87	1.05	0.94	0.97	0.90	0.84	0.76
4.0	0.94	1.07	0.68	0.99	0.84	0.82	0.94	0.99	0.83	0.88	0.79	0.74
	AB3D1W4			AB3D2W4			AB3D3W4			AB3D4W4		
0.1	0.68	0.75	0.93	0.80	0.86	0.88	0.86	0.91	0.61	0.54	0.72	0.45
0.2	0.78	0.87	1.02	0.89	0.96	1.01	0.95	1.02	0.64	0.73	0.81	0.56
0.4	0.89	0.85	1.03	0.87	1.07	1.09	0.96	1.14	0.78	0.81	0.95	0.81
0.6	0.85	0.66	0.87	0.85	0.85	1.10	0.94	0.93	0.80	0.85	0.79	0.76
1.0	0.80	0.59	0.52	1.10	0.64	0.84	1.10	0.75	0.57	0.86	0.62	0.64
2.0	0.85	0.72	0.55	1.08	0.74	0.73	0.96	0.87	0.66	0.89	0.85	0.55
3.0	0.74	0.59	0.72	0.88	0.85	0.79	0.90	0.97	0.84	0.73	0.82	0.81
4.0	0.69	0.79	0.87	0.77	0.80	0.82	0.77	0.92	0.87	0.59	0.85	0.70
	AB3D1W5			AB3D2W5			AB3D3W5			AB3D4W5		
0.1	0.76	0.91	1.03	0.64	0.84	0.87	0.68	0.60	0.64	0.65	0.73	0.55
0.2	0.78	0.91	1.13	0.81	0.93	1.05	0.80	0.70	0.64	0.73	0.70	0.70
0.4	0.90	0.89	1.15	0.84	0.89	1.02	0.81	0.83	0.77	0.86	0.95	0.85
0.6	0.89	0.70	1.00	0.76	0.69	0.85	0.75	0.68	0.73	0.84	0.85	0.85
1.0	0.84	0.83	0.87	0.84	0.65	0.86	0.78	0.51	0.53	0.81	0.82	0.51
2.0	0.86	0.78	0.84	0.84	0.66	0.80	0.78	0.71	0.66	0.80	0.84	0.63
3.0	0.84	0.80	0.58	0.87	0.71	0.77	0.65	0.64	0.65	0.74	0.79	0.67
4.0	0.74	0.79	0.89	0.61	0.77	0.88	0.60	0.85	0.78	0.70	1.04	0.91

ตารางที่ ข-2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในกรณีศึกษาต่าง ๆ ที่คลื่นไม่ล้ำข้ามโครงสร้าง

Y-axis	X-axis											
	OB1D1W1			OB1D2W1			OB1D3W1			OB1D4W1		
	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5
0.1	1.19	1.02	0.91	0.98	0.84	0.76	0.71	0.57	0.52	0.48	0.52	0.42
0.2	1.11	1.00	0.97	1.11	0.81	0.79	0.78	0.58	0.61	0.55	0.57	0.49
0.4	1.10	1.14	1.00	0.73	0.82	0.91	0.73	0.64	0.68	0.59	0.61	0.66
0.6	1.35	1.20	1.16	1.00	1.04	1.13	0.94	0.68	0.89	0.69	0.70	0.82
1.0	1.41	1.18	1.20	1.09	1.03	1.11	1.02	0.73	0.85	0.81	0.68	0.88
2.0	0.87	1.12	0.97	0.40	1.05	0.78	0.63	0.80	0.68	0.39	0.71	0.55
3.0	1.13	0.77	0.78	0.65	0.82	0.74	0.69	0.54	0.68	0.56	0.55	0.55
4.0	1.44	1.38	1.09	0.89	1.24	1.14	0.93	1.00	0.80	0.71	0.87	0.82
	OB1D1W2			OB1D2W2			OB1D3W2			OB1D4W2		
0.1	1.32	1.27	1.33	1.04	1.11	1.32	0.69	0.91	1.04	0.50	0.68	1.01
0.2	1.33	1.22	1.26	1.13	1.20	1.29	0.71	0.81	1.09	0.55	0.74	0.96
0.4	1.21	1.11	0.94	1.02	1.03	1.15	0.61	0.79	0.92	0.56	0.66	0.76
0.6	0.98	1.18	0.71	0.96	1.07	0.79	0.58	0.75	0.76	0.43	0.57	0.57
1.0	1.16	1.51	1.28	0.95	1.34	1.26	0.63	0.79	0.78	0.44	0.78	0.87
2.0	1.06	1.14	0.69	1.05	0.97	0.82	0.58	0.62	0.78	0.41	0.49	0.43
3.0	1.06	1.08	1.16	0.96	1.08	1.19	0.62	0.76	0.91	0.41	0.64	0.65
4.0	1.15	1.44	1.39	1.11	1.31	1.23	0.72	0.89	0.92	0.48	0.81	0.80
	OB1D1W3			OB1D2W3			OB1D3W3			OB1D4W3		
0.1	0.96	1.16	0.78	0.79	1.03	0.81	0.27	0.56	0.48	0.24	0.42	0.41
0.2	1.03	1.17	0.81	0.80	1.07	0.93	0.31	0.59	0.52	0.26	0.47	0.42
0.4	1.06	1.27	1.05	0.87	1.21	1.04	0.37	0.62	0.59	0.40	0.48	0.58
0.6	1.17	1.18	1.13	0.88	1.12	1.14	0.37	0.64	0.67	0.37	0.48	0.59
1.0	1.00	0.80	0.75	0.78	0.92	0.77	0.34	0.58	0.56	0.44	0.35	0.37
2.0	1.09	0.99	0.68	0.86	1.01	0.98	0.34	0.63	0.60	0.39	0.47	0.46
3.0	1.06	0.91	0.89	0.71	0.90	0.94	0.18	0.65	0.49	0.31	0.49	0.49
4.0	1.07	1.07	0.89	0.74	0.96	0.89	0.20	0.68	0.53	0.21	0.52	0.41

ตารางที่ ข-2(ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในกรณีศึกษาต่าง ๆ ที่คลื่นไม่ผ่านข้ามโครงสร้าง

Y-axis	X-axis											
	OB1D1W4			OB1D2W4			OB1D3W4			OB1D4W4		
	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5
0.1	0.87	1.12	0.85	0.59	0.95	0.78	0.29	0.57	0.54	0.32	0.41	0.44
0.2	0.93	1.15	0.93	0.65	0.98	0.80	0.30	0.59	0.61	0.36	0.43	0.47
0.4	0.93	1.19	1.14	0.66	1.02	0.94	0.33	0.66	0.68	0.41	0.48	0.52
0.6	0.99	0.96	1.09	0.76	1.03	1.01	0.36	0.63	0.75	0.48	0.48	0.58
1.0	0.85	0.87	0.84	0.63	0.82	0.73	0.37	0.62	0.65	0.42	0.40	0.38
2.0	0.96	0.94	0.87	0.66	0.85	0.86	0.32	0.69	0.67	0.42	0.46	0.46
3.0	0.93	0.81	0.94	0.57	0.85	0.86	0.24	0.67	0.64	0.30	0.42	0.40
4.0	0.90	1.07	0.99	0.67	0.87	0.86	0.30	0.65	0.62	0.27	0.53	0.37
	OB1D1W5			OB1D2W5			OB1D3W5			OB1D4W5		
0.1	0.78	0.99	0.94	0.45	0.75	0.66	0.33	0.56	0.55	0.33	0.35	0.43
0.2	0.81	1.01	0.95	0.48	0.77	0.70	0.36	0.60	0.62	0.38	0.40	0.43
0.4	0.84	1.05	1.16	0.49	0.83	0.85	0.36	0.66	0.70	0.44	0.43	0.53
0.6	0.81	0.83	0.90	0.49	0.82	0.82	0.39	0.62	0.72	0.47	0.43	0.54
1.0	0.78	0.83	0.72	0.44	0.64	0.66	0.31	0.61	0.59	0.41	0.36	0.35
2.0	0.88	0.87	0.86	0.49	0.70	0.74	0.34	0.66	0.67	0.44	0.40	0.42
3.0	0.84	0.75	0.85	0.44	0.68	0.72	0.24	0.59	0.59	0.35	0.41	0.41
4.0	0.83	1.02	0.90	0.47	0.71	0.73	0.30	0.63	0.58	0.28	0.43	0.36
	OB2D1W1			OB2D2W1			OB2D3W1			OB2D4W1		
0.1	1.05	0.84	0.67	0.98	0.98	1.07	0.80	0.65	0.72	0.62	0.50	0.39
0.2	1.06	0.91	0.79	1.03	0.88	1.02	0.87	0.71	0.74	0.61	0.53	0.42
0.4	0.96	1.02	0.88	1.11	1.07	1.06	0.85	0.74	0.86	0.60	0.61	0.47
0.6	1.19	1.08	0.97	1.18	1.23	1.28	1.01	0.85	1.05	0.69	0.72	0.90
1.0	1.27	1.16	1.13	1.15	1.07	1.17	1.14	0.97	1.07	0.68	0.66	0.76
2.0	0.87	1.07	0.80	0.69	1.02	0.94	0.71	0.93	0.79	0.46	0.76	0.68
3.0	1.05	0.77	0.97	1.00	0.75	0.94	0.85	0.66	0.91	0.57	0.50	0.40
4.0	1.25	1.27	1.05	1.22	1.30	1.18	0.98	1.04	0.98	0.78	0.91	0.84

ตารางที่ ข-2(ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในกรณีศึกษาต่าง ๆ ที่คลื่นไม่ผ่านข้ามโครงสร้าง

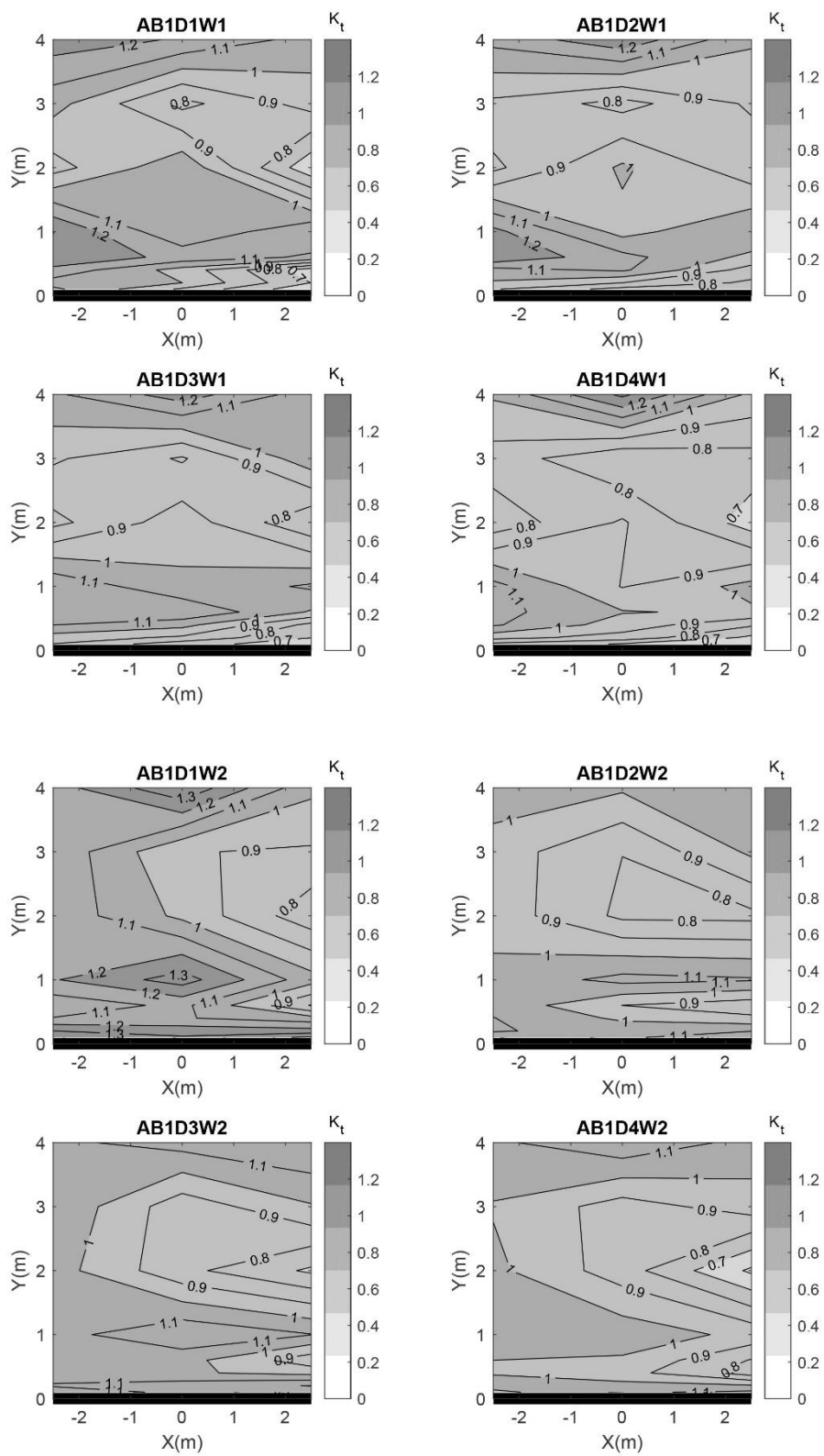
Y-axis	X-axis											
	OB2D1W2			OB2D2W2			OB2D3W2			OB2D4W2		
	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5
0.1	1.29	1.30	1.40	1.23	1.30	1.18	0.91	1.12	1.35	0.59	0.78	1.15
0.2	1.24	1.27	1.32	1.23	1.01	1.08	0.92	1.08	1.39	0.62	0.86	1.10
0.4	1.07	1.17	1.03	1.12	1.02	0.78	0.86	1.06	1.19	0.64	0.78	0.90
0.6	1.02	1.02	0.87	0.90	1.12	0.80	0.72	0.93	0.76	0.61	0.82	0.59
1.0	1.01	1.44	1.15	1.00	1.38	1.22	0.80	1.24	1.20	0.45	1.00	0.99
2.0	1.07	1.07	0.85	0.97	1.03	0.66	0.81	0.78	0.84	0.51	0.78	0.65
3.0	1.03	1.12	1.24	0.89	0.93	1.06	0.80	0.95	1.12	0.51	0.87	0.78
4.0	1.16	1.41	1.32	1.09	1.24	1.23	1.01	1.16	1.16	0.58	1.07	0.84
	OB2D1W3			OB2D2W3			OB2D3W3			OB2D4W3		
0.1	0.95	1.08	0.68	0.63	1.00	0.81	0.42	0.67	0.67	0.34	0.43	0.44
0.2	0.96	1.17	0.78	0.79	1.05	0.90	0.47	0.71	0.65	0.35	0.44	0.50
0.4	1.00	1.27	0.84	0.89	1.12	1.10	0.51	0.80	0.82	0.38	0.51	0.55
0.6	1.14	1.23	1.16	0.63	1.04	1.06	0.52	0.77	0.93	0.41	0.44	0.57
1.0	1.12	0.96	0.85	0.60	0.60	0.66	0.49	0.62	0.68	0.34	0.28	0.37
2.0	1.16	1.05	0.94	0.67	0.82	0.87	0.51	0.81	0.83	0.35	0.45	0.44
3.0	0.94	0.94	0.79	0.63	0.75	0.93	0.31	0.78	0.72	0.23	0.38	0.40
4.0	1.06	1.05	0.85	0.63	0.77	0.89	0.39	0.79	0.71	0.20	0.42	0.42
	OB2D1W4			OB2D2W4			OB2D3W4			OB2D4W4		
0.1	0.96	1.11	0.66	0.64	1.08	0.86	0.37	0.69	0.69	0.31	0.46	0.49
0.2	1.02	1.21	0.78	0.76	1.14	0.97	0.35	0.72	0.69	0.35	0.46	0.52
0.4	1.03	1.24	0.93	0.79	1.12	1.13	0.45	0.78	0.79	0.43	0.45	0.59
0.6	1.16	1.17	1.06	0.66	1.03	1.05	0.45	0.77	0.84	0.45	0.41	0.63
1.0	1.04	0.90	0.75	0.61	0.74	0.71	0.41	0.70	0.73	0.47	0.26	0.43
2.0	1.08	0.97	0.79	0.58	0.87	0.81	0.40	0.78	0.77	0.41	0.46	0.41
3.0	1.07	0.90	0.91	0.55	0.74	0.90	0.29	0.67	0.74	0.27	0.44	0.44
4.0	1.05	1.03	0.87	0.61	0.91	0.77	0.37	0.67	0.68	0.23	0.45	0.46

ตารางที่ ข-2(ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในกรณีศึกษาต่าง ๆ ที่คลื่นไม่ผ่านข้ามโครงสร้าง

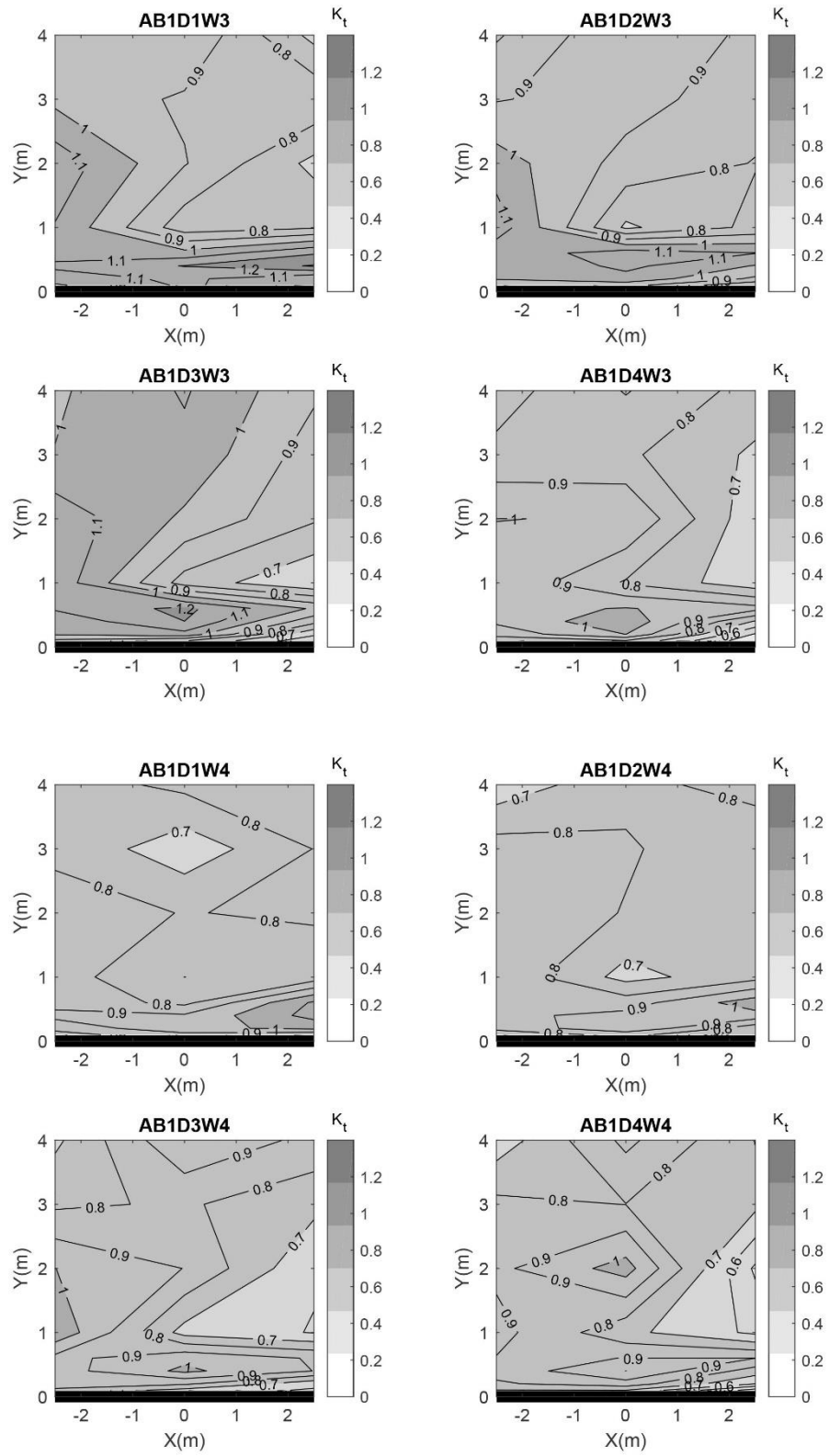
Y-axis	X-axis											
	OB2D1W5			OB2D2W5			OB2D3W5			OB2D4W5		
	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5
0.1	0.82	0.97	0.70	0.63	1.02	1.00	0.32	0.60	0.62	0.31	0.34	0.45
0.2	0.87	1.04	0.78	0.65	1.02	1.07	0.32	0.58	0.63	0.38	0.36	0.52
0.4	0.91	1.02	0.93	0.45	0.89	1.08	0.35	0.62	0.70	0.42	0.38	0.59
0.6	0.93	0.93	0.95	0.45	0.89	1.08	0.37	0.61	0.71	0.41	0.35	0.59
1.0	0.86	0.74	0.73	0.46	0.72	0.80	0.25	0.60	0.60	0.39	0.27	0.44
2.0	0.93	0.93	0.72	0.47	0.87	0.78	0.24	0.63	0.68	0.41	0.37	0.41
3.0	0.92	0.70	0.73	0.59	0.75	0.84	0.14	0.56	0.63	0.26	0.32	0.42
4.0	0.90	0.87	0.75	0.54	0.92	0.84	0.25	0.63	0.63	0.23	0.43	0.37
	OB3D1W1			OB3D2W1			OB3D3W1			OB3D4W1		
0.1	1.15	0.85	0.73	0.96	0.76	0.75	0.87	0.74	0.73	0.57	0.51	0.54
0.2	1.12	0.90	0.80	0.96	0.82	0.79	0.92	0.71	0.81	0.64	0.55	0.59
0.4	1.11	0.95	0.87	0.97	0.88	0.90	0.88	0.77	0.83	0.64	0.60	0.72
0.6	1.24	1.14	1.11	1.23	1.00	1.05	1.03	0.81	1.01	0.72	0.65	0.79
1.0	1.34	1.15	1.10	1.30	1.06	1.14	1.07	0.85	0.99	0.83	0.71	0.90
2.0	0.78	1.07	0.75	0.78	1.03	0.78	0.59	0.82	0.82	0.57	0.66	0.50
3.0	1.13	0.85	1.06	0.88	0.70	0.89	0.79	0.61	0.64	0.61	0.52	0.77
4.0	1.36	1.33	1.23	1.20	1.19	1.07	1.12	1.06	1.00	0.74	0.88	0.84
	OB3D1W2			OB3D2W2			OB3D3W2			OB3D4W2		
0.1	1.23	1.24	1.31	1.25	1.23	1.48	0.97	0.92	1.10	0.75	0.80	1.11
0.2	1.18	1.20	1.08	1.26	1.33	1.45	0.99	0.94	1.13	0.81	0.85	1.06
0.4	1.12	1.05	0.92	1.09	1.07	1.06	0.90	0.88	0.79	0.75	0.77	0.86
0.6	1.04	1.02	0.74	1.09	1.13	0.84	0.79	0.86	0.57	0.65	0.60	0.72
1.0	1.01	1.42	1.27	1.05	1.45	1.24	0.79	0.88	0.57	0.66	0.90	1.01
2.0	1.11	1.04	0.78	1.08	1.21	0.91	0.80	0.84	0.74	0.61	0.51	0.74
3.0	0.97	1.08	1.09	1.08	1.21	1.15	0.81	0.88	0.93	0.64	0.69	0.91
4.0	1.18	1.37	1.45	1.27	1.42	1.33	0.90	1.03	0.97	0.75	0.82	0.91

ตารางที่ ข-2(ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในกรณีศึกษาต่าง ๆ ที่คลื่นไม่ล้ำข้ามโครงสร้าง

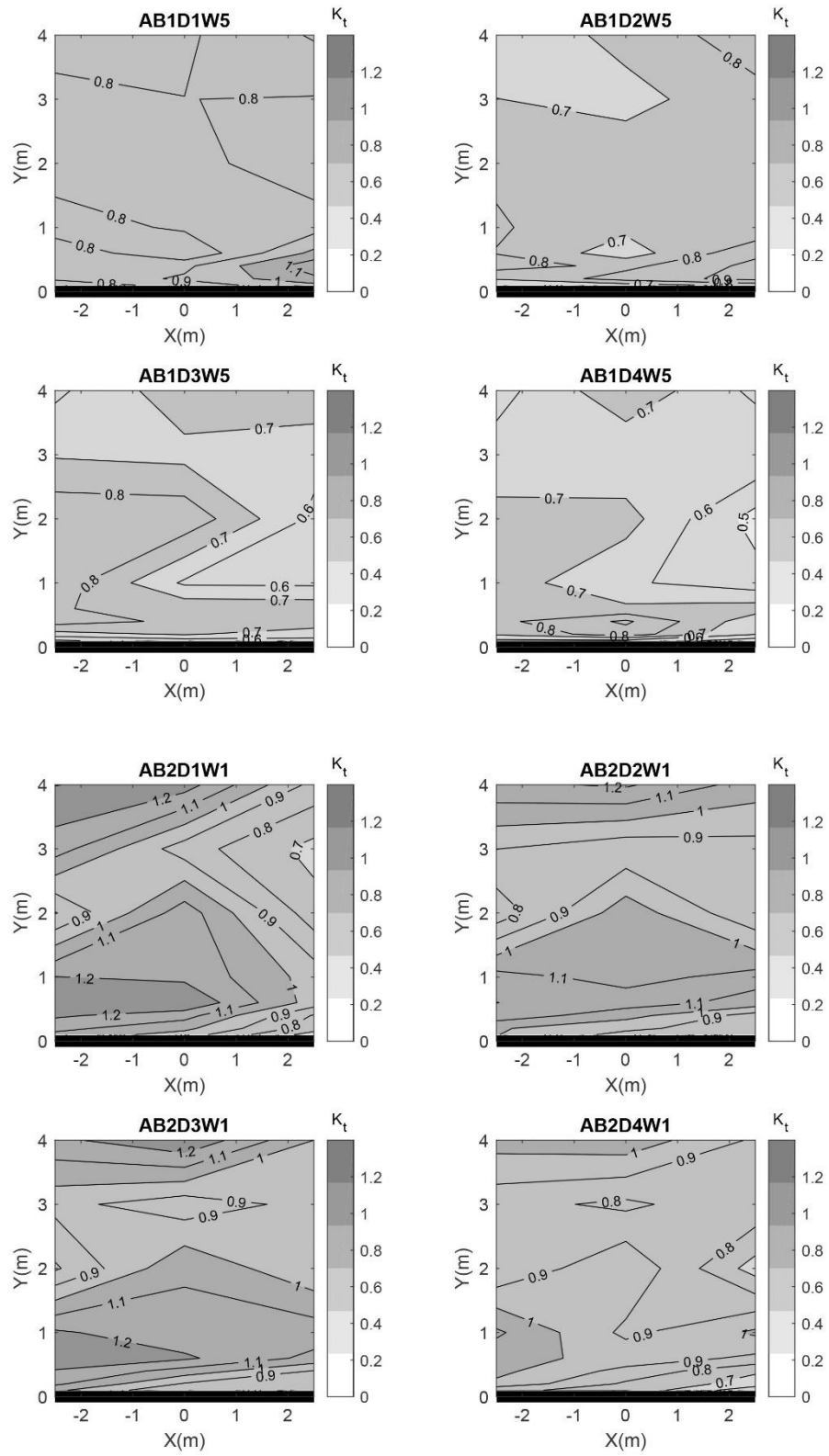
Y-axis	X-axis											
	OB3D1W3			OB3D2W3			OB3D3W3			OB3D4W3		
	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5	-2.5	0.0	2.5
0.1	1.08	1.10	0.71	0.81	1.04	0.86	0.40	0.71	0.72	0.37	0.36	0.45
0.2	1.06	1.18	0.80	0.80	1.08	0.93	0.47	0.78	0.73	0.43	0.37	0.47
0.4	1.14	1.25	1.05	0.82	1.21	1.06	0.50	0.83	0.85	0.45	0.45	0.61
0.6	1.18	1.24	1.16	0.84	1.21	1.19	0.48	0.81	0.88	0.51	0.40	0.59
1.0	1.12	0.97	0.77	0.84	0.89	0.91	0.43	0.62	0.75	0.49	0.29	0.41
2.0	1.14	1.05	0.84	0.98	1.11	1.12	0.42	0.77	0.85	0.50	0.43	0.46
3.0	0.95	0.94	0.86	0.82	0.92	1.03	0.27	0.71	0.74	0.36	0.38	0.41
4.0	1.05	1.10	0.90	0.69	0.93	0.97	0.31	0.76	0.69	0.32	0.39	0.37
	OB3D1W4			OB3D2W4			OB3D3W4			OB3D4W4		
0.1	0.85	0.99	0.71	0.71	1.10	0.86	0.33	0.68	0.73	0.43	0.37	0.46
0.2	0.95	1.09	0.82	0.74	1.08	0.97	0.37	0.70	0.83	0.44	0.36	0.48
0.4	0.96	1.08	1.05	0.76	1.19	1.08	0.42	0.79	0.87	0.52	0.43	0.63
0.6	1.03	1.04	0.99	0.76	1.18	1.18	0.38	0.75	0.94	0.56	0.43	0.61
1.0	0.98	0.72	0.67	0.62	0.98	0.88	0.29	0.66	0.77	0.54	0.26	0.43
2.0	0.99	0.90	0.75	0.73	1.07	1.05	0.30	0.77	0.80	0.62	0.46	0.46
3.0	0.90	0.90	0.74	0.59	1.03	0.98	0.24	0.66	0.79	0.43	0.35	0.42
4.0	0.87	0.96	0.72	0.69	1.08	0.92	0.34	0.71	0.75	0.37	0.40	0.36
	OB3D1W5			OB3D2W5			OB3D3W5			OB3D4W5		
0.1	0.72	0.86	0.63	0.67	0.99	0.82	0.29	0.60	0.62	0.38	0.31	0.42
0.2	0.75	0.89	0.74	0.68	1.04	0.94	0.35	0.61	0.70	0.43	0.29	0.45
0.4	0.77	0.88	0.90	0.70	1.07	1.04	0.40	0.64	0.76	0.50	0.40	0.56
0.6	0.78	0.71	0.79	0.73	1.07	1.08	0.34	0.65	0.79	0.47	0.34	0.55
1.0	0.72	0.63	0.59	0.66	0.75	0.80	0.30	0.55	0.61	0.45	0.27	0.43
2.0	0.77	0.76	0.66	0.74	0.88	0.90	0.23	0.63	0.69	0.48	0.40	0.46
3.0	0.74	0.56	0.62	0.61	0.91	0.88	0.17	0.54	0.65	0.34	0.32	0.27
4.0	0.74	0.73	0.67	0.64	0.86	0.86	0.27	0.63	0.62	0.30	0.34	0.39



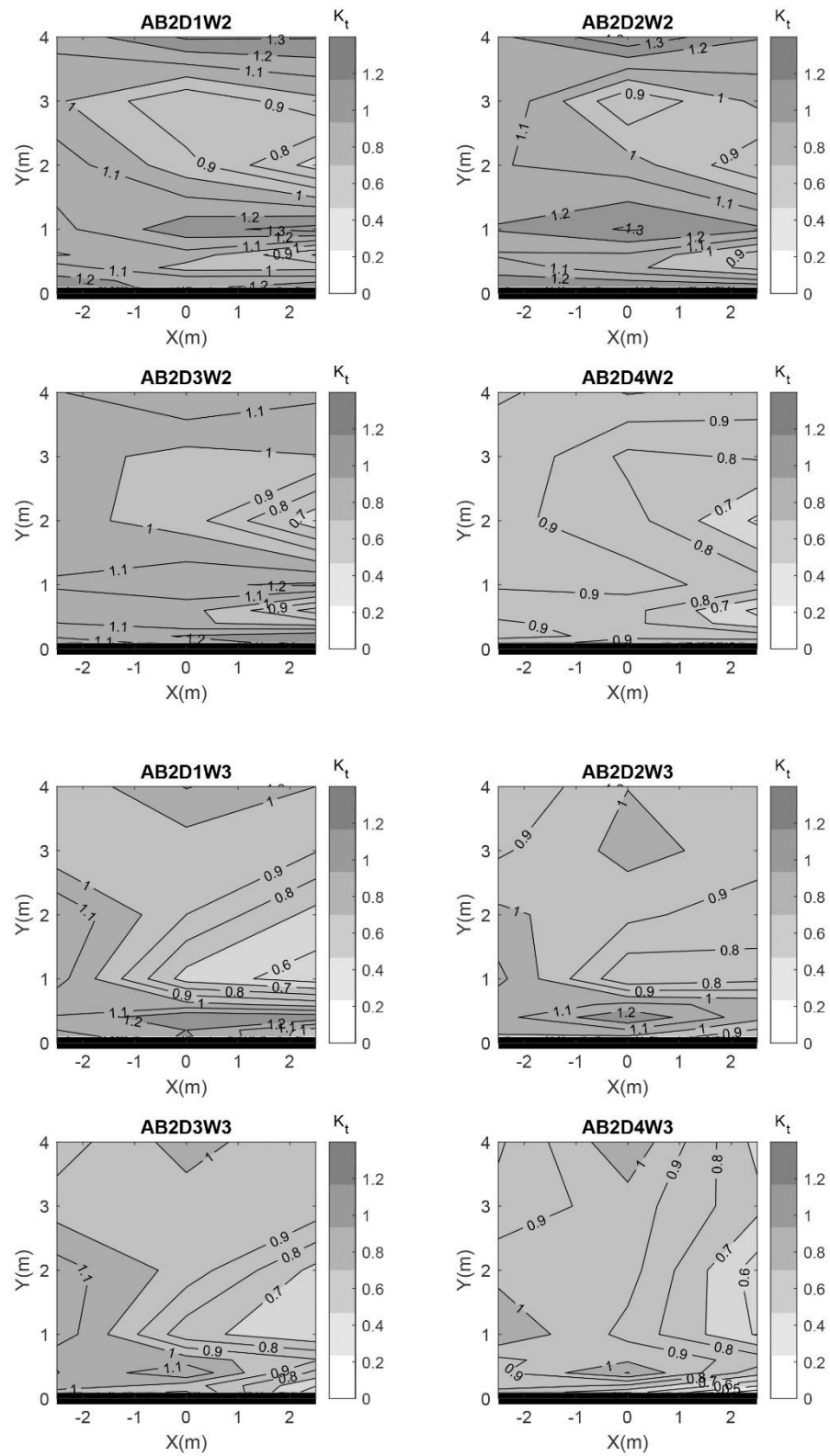
รูปที่ ข-2 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา
สำหรับกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



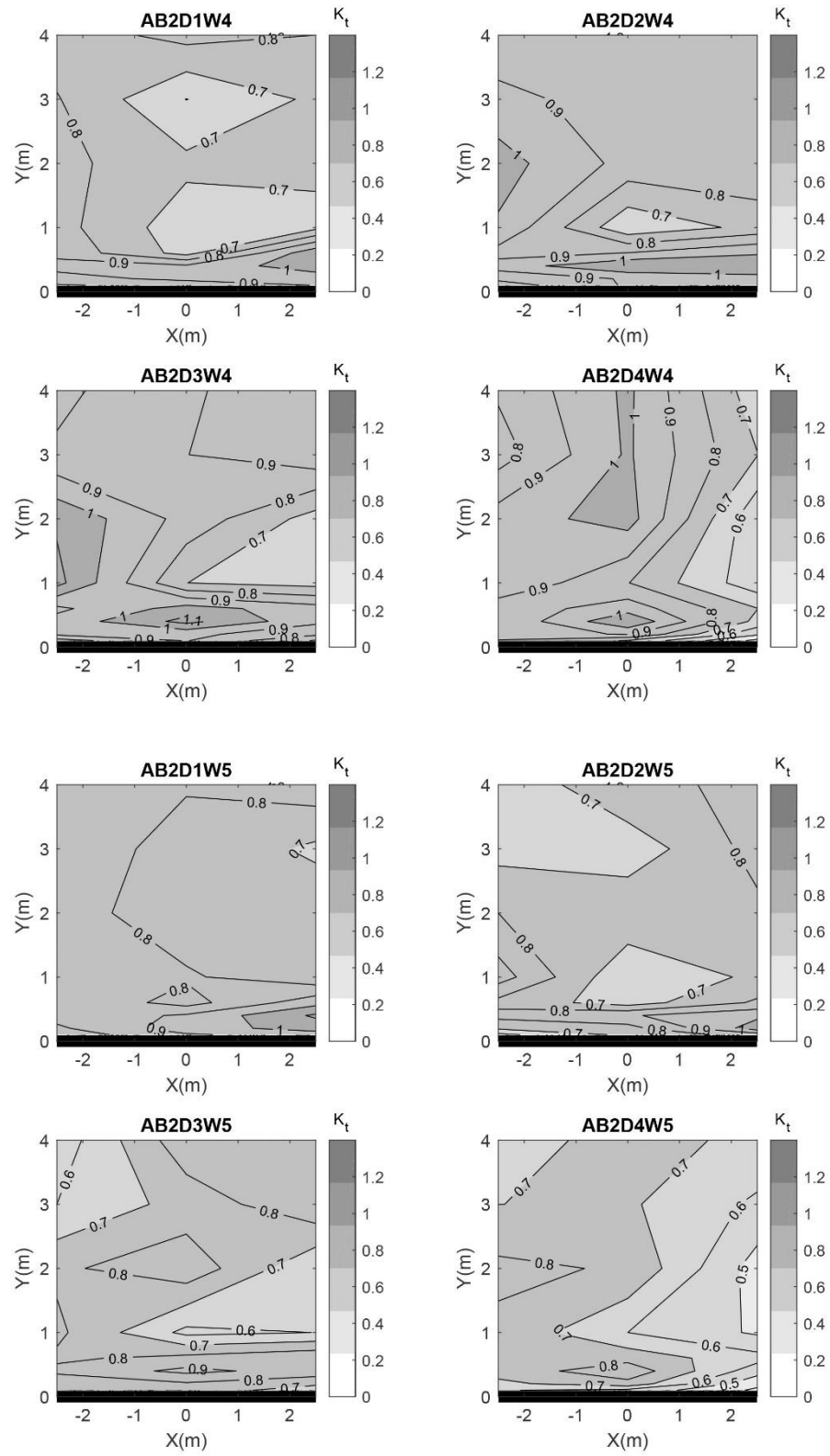
รูปที่ ข-2(ต่อ) เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา
สำหรับกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



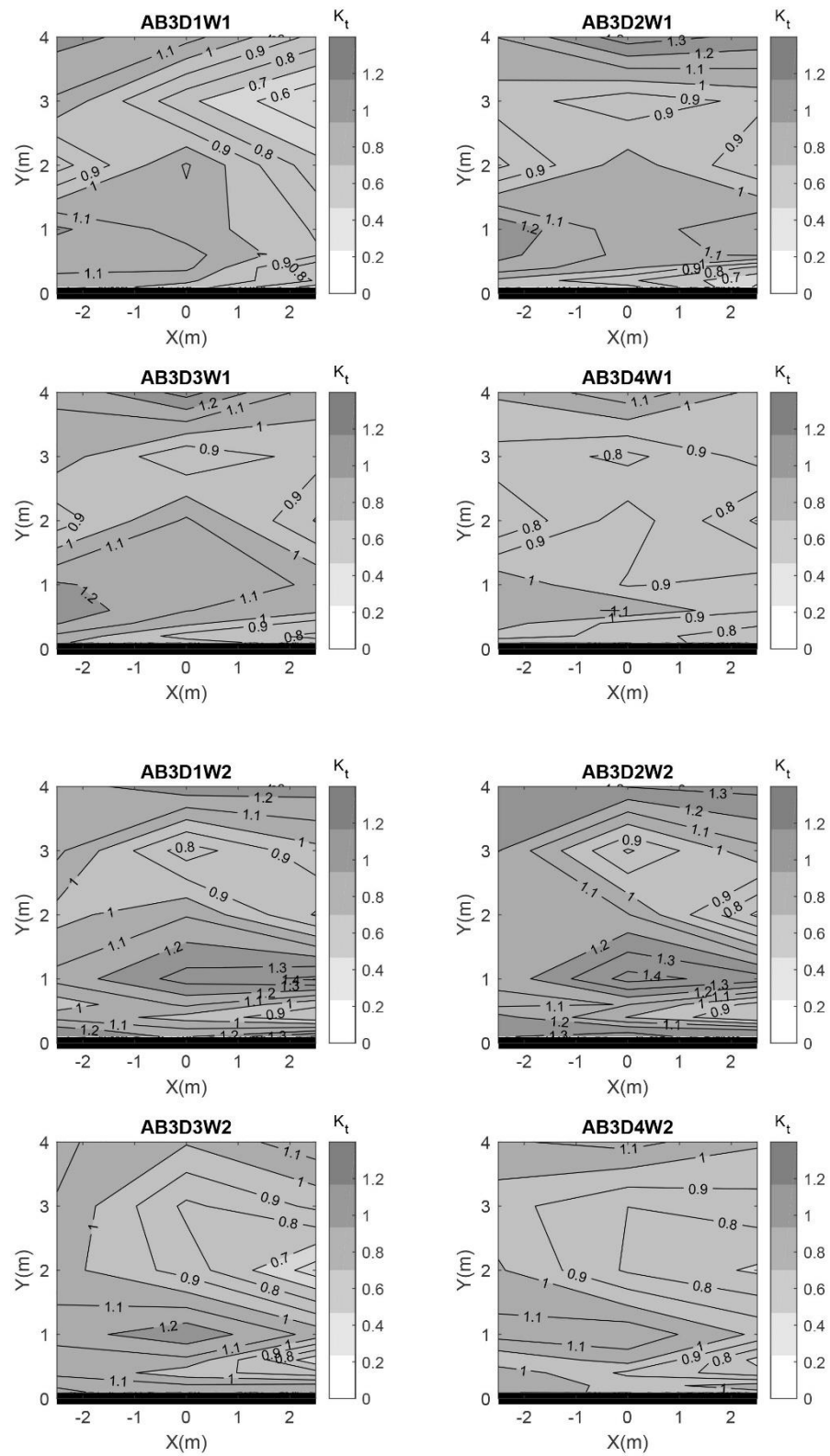
รูปที่ ข-2(ต่อ) เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา
สำหรับกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



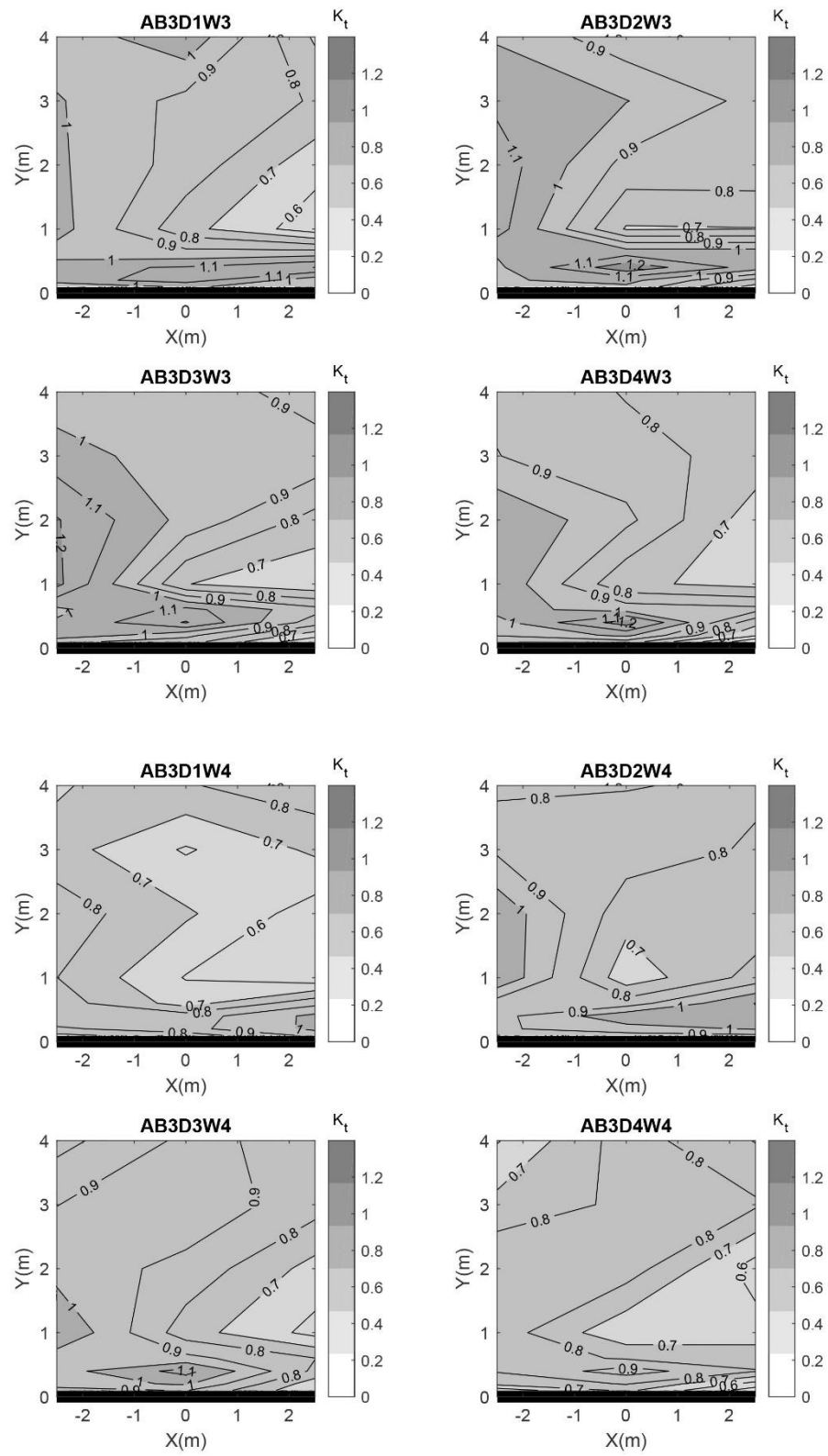
รูปที่ ข-2(ต่อ) เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา
สำหรับกรณีที่คลื่นล้มข้ามโครงสร้าง



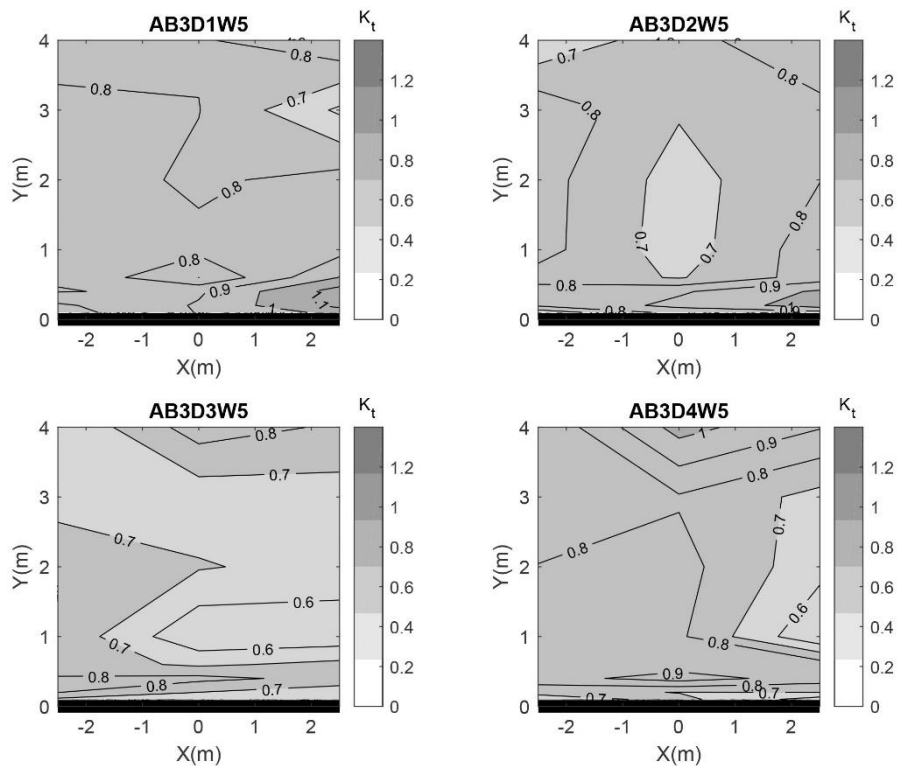
รูปที่ ข-2(ต่อ) เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา
สำหรับกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ ข-2(ต่อ) เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา
สำหรับกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



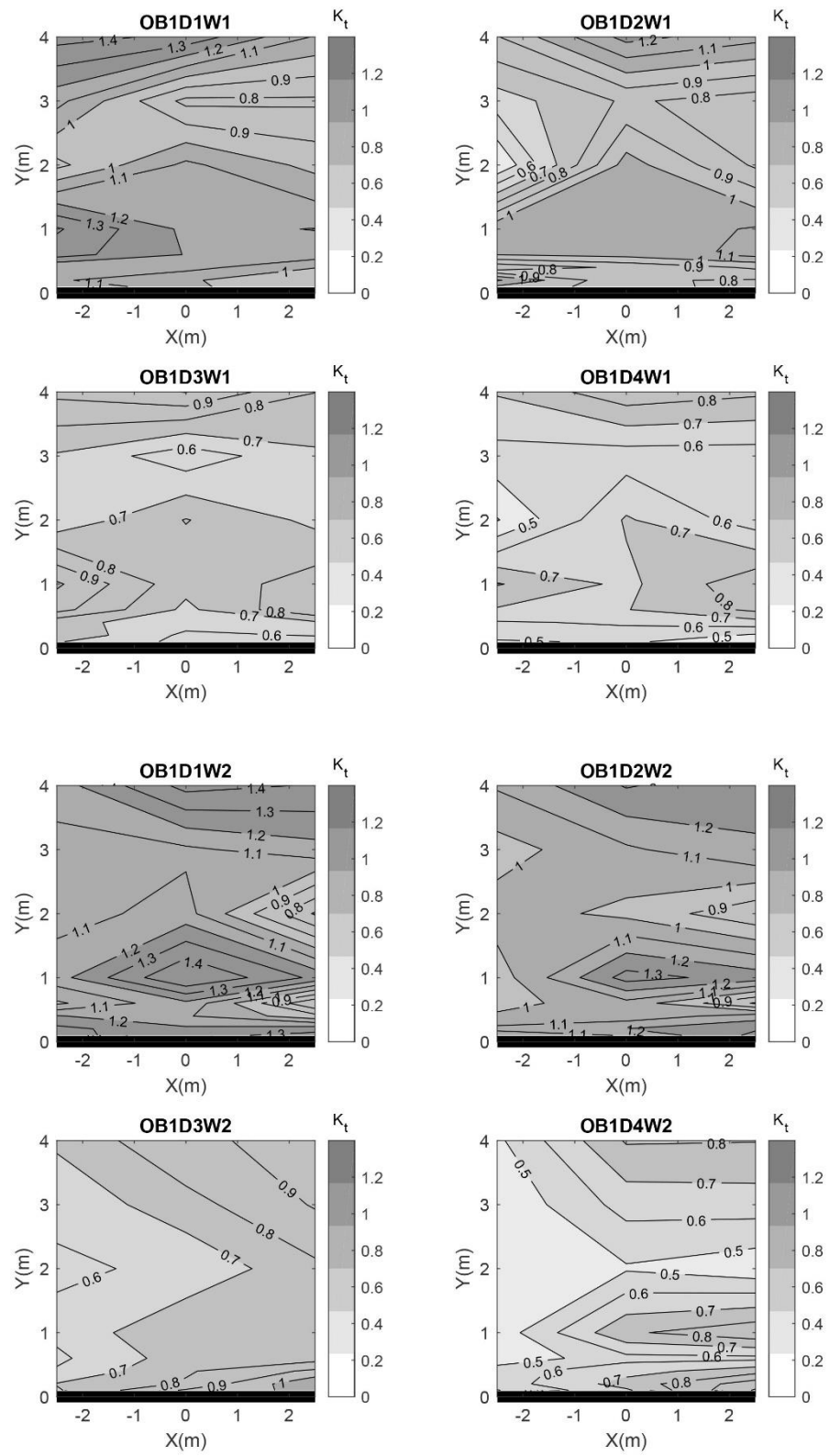
รูปที่ ข-2(ต่อ) เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา
สำหรับกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง



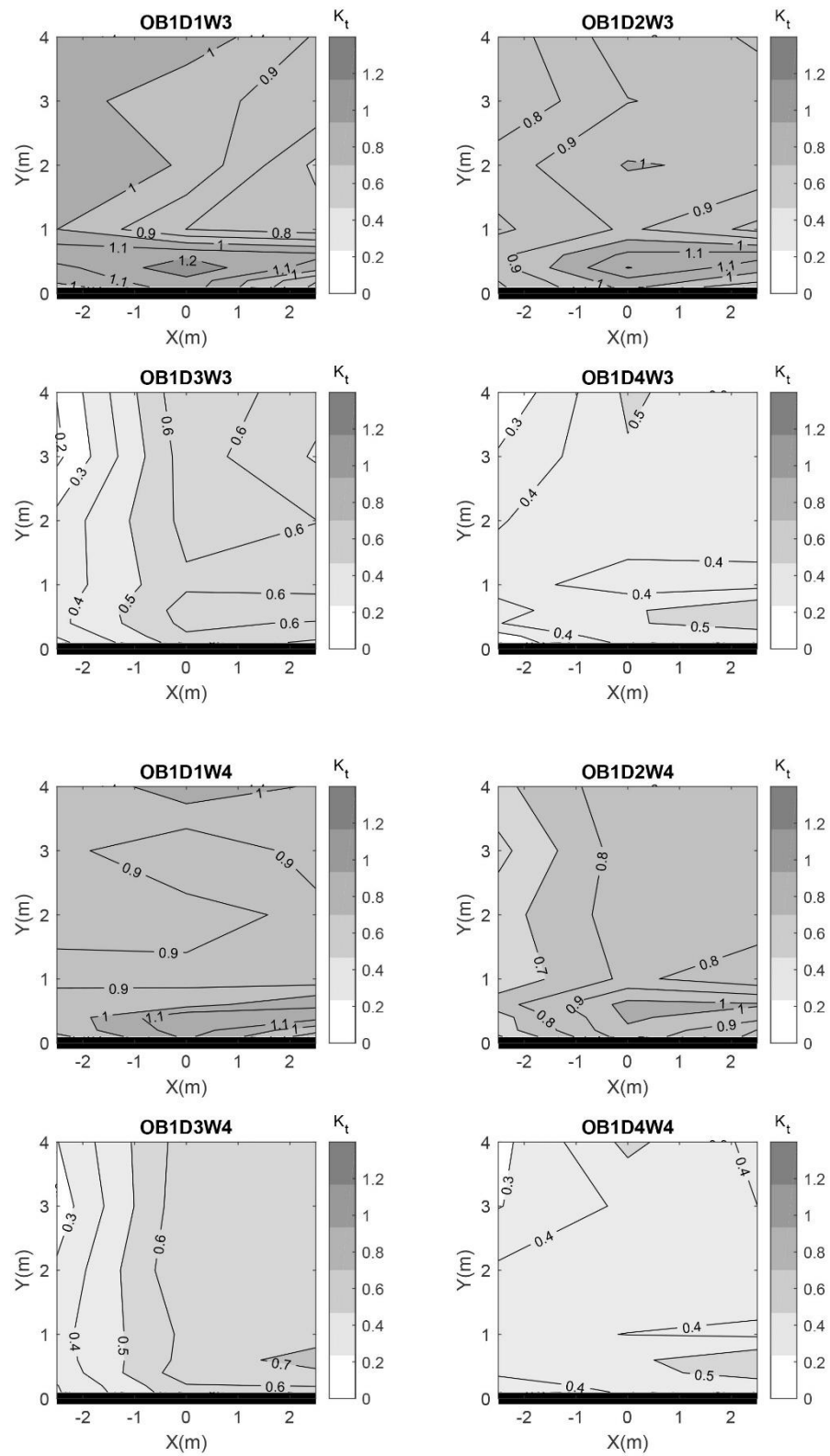
รูปที่ ซ-2(ต่อ) เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา

สำหรับกรณีที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง

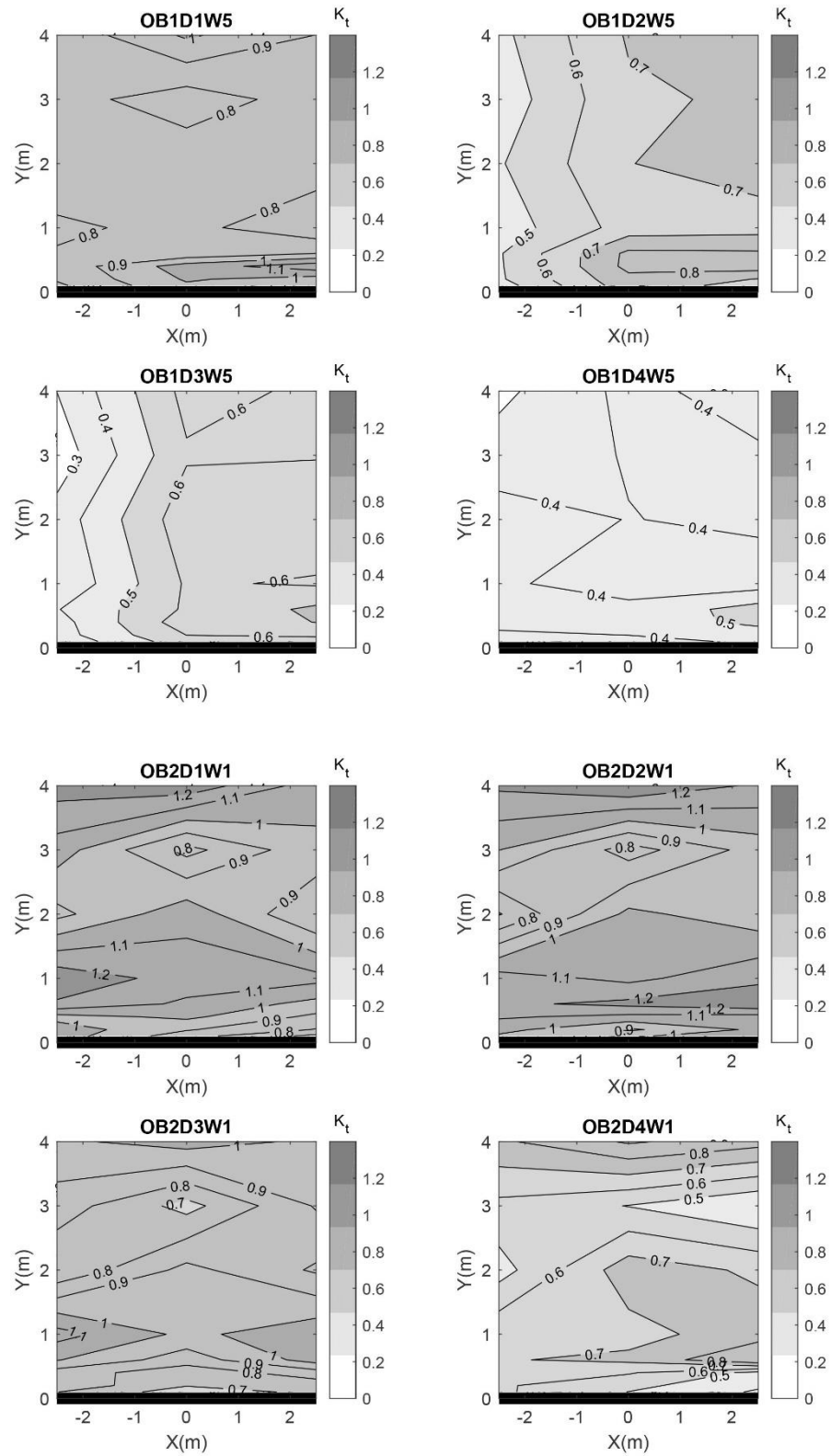




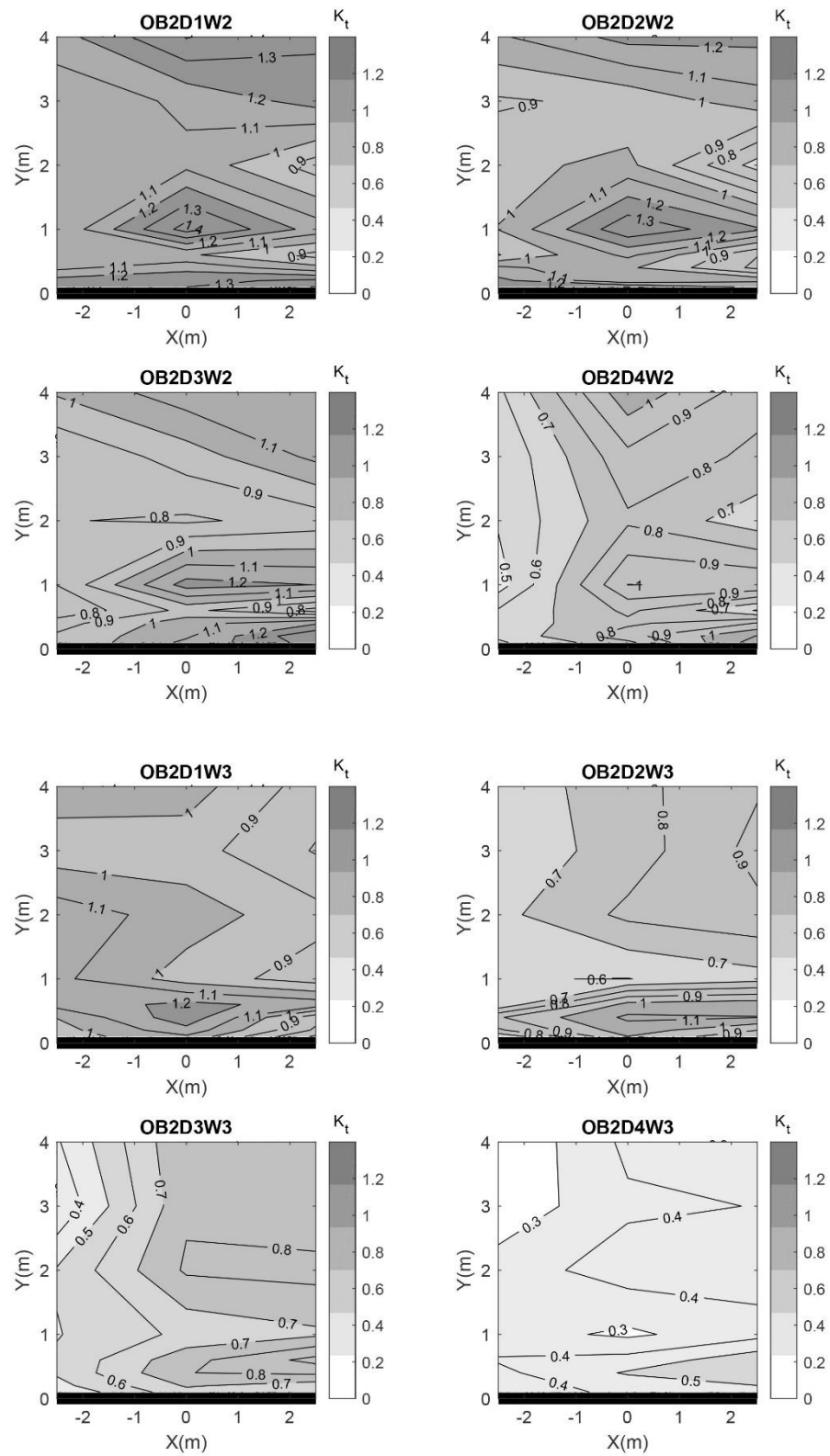
รูปที่ ข-3 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา
สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง



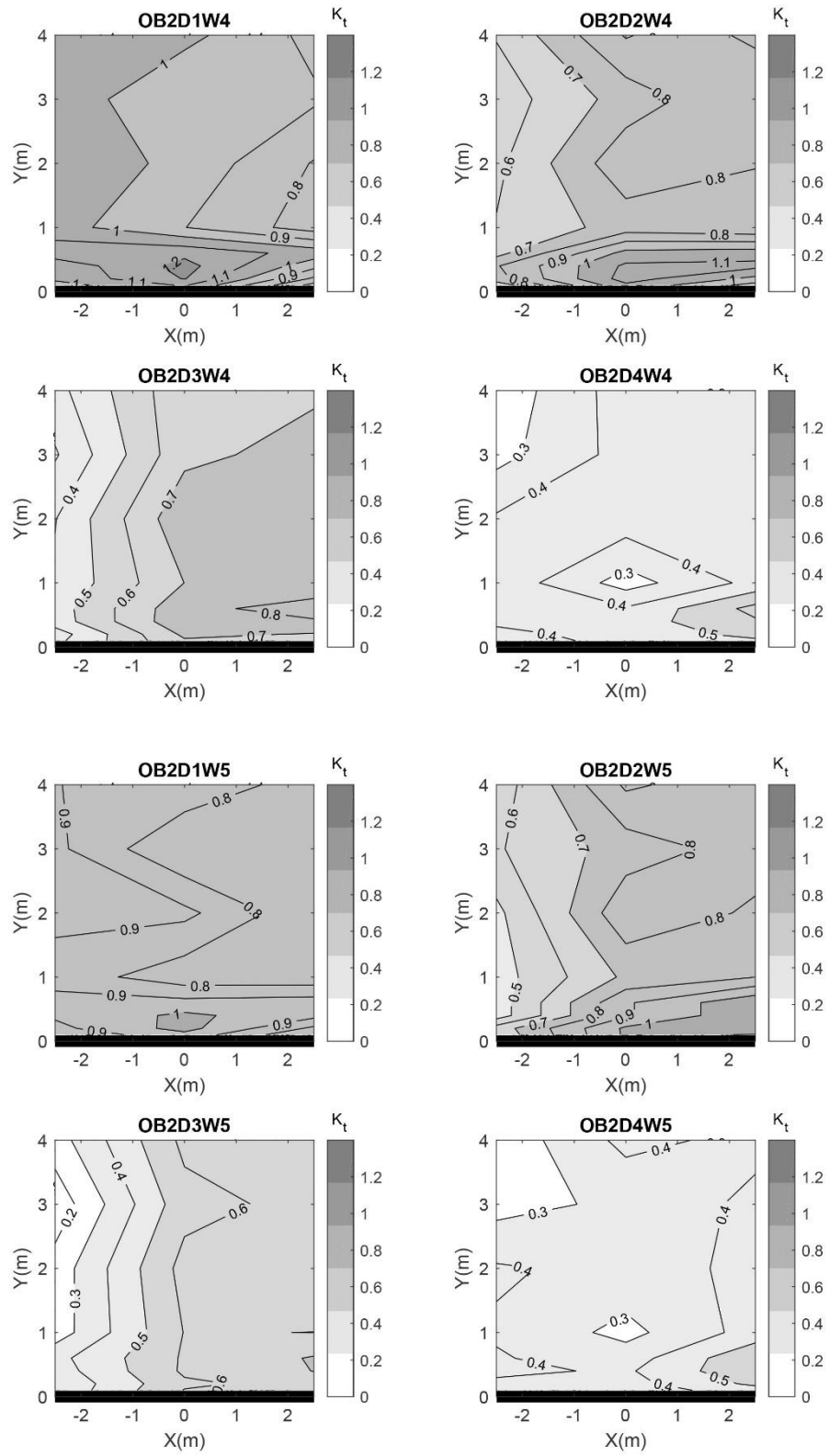
รูปที่ ข-3(ต่อ) เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา
สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง



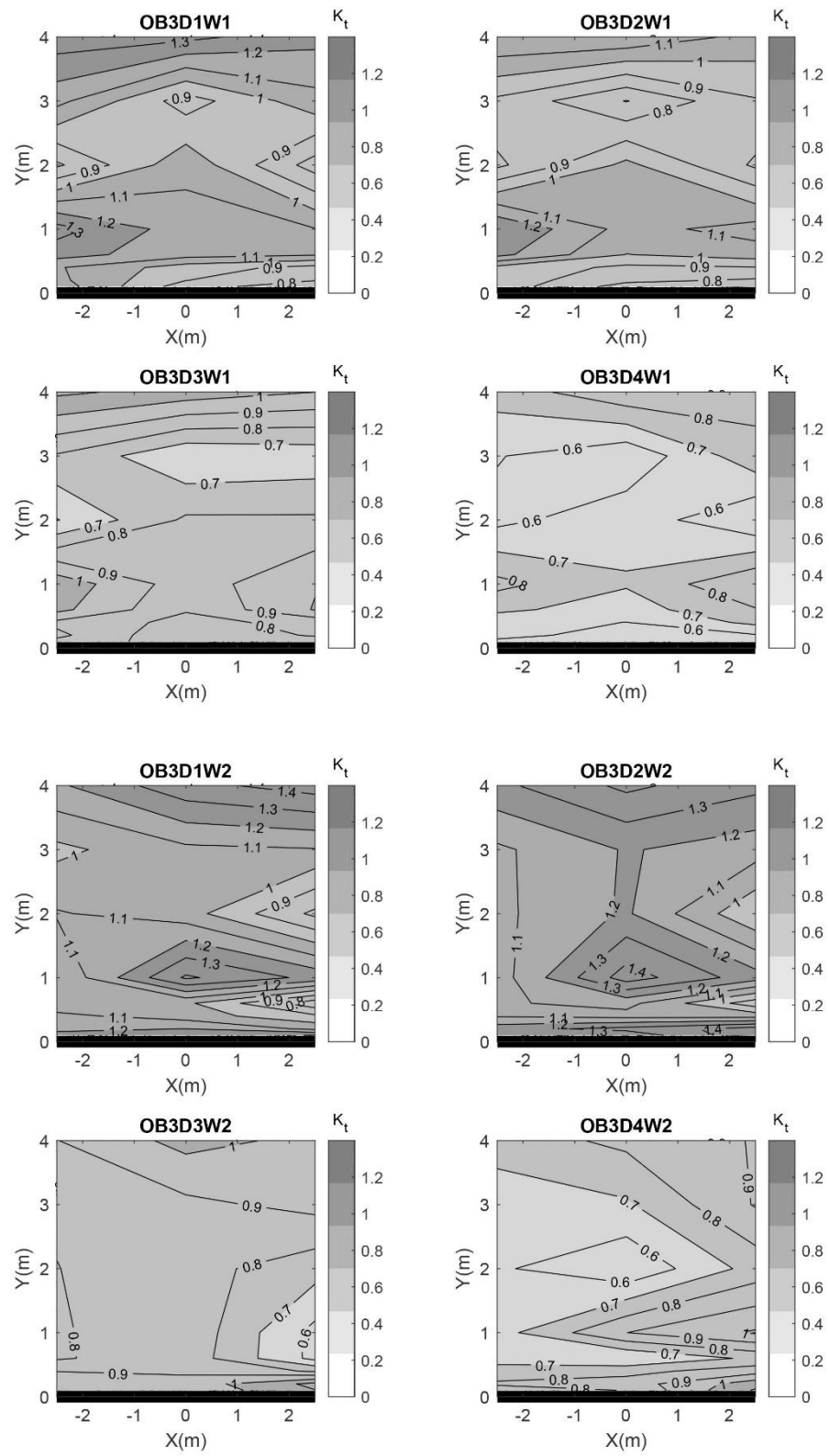
รูปที่ ข-3(ต่อ) เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา
สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง



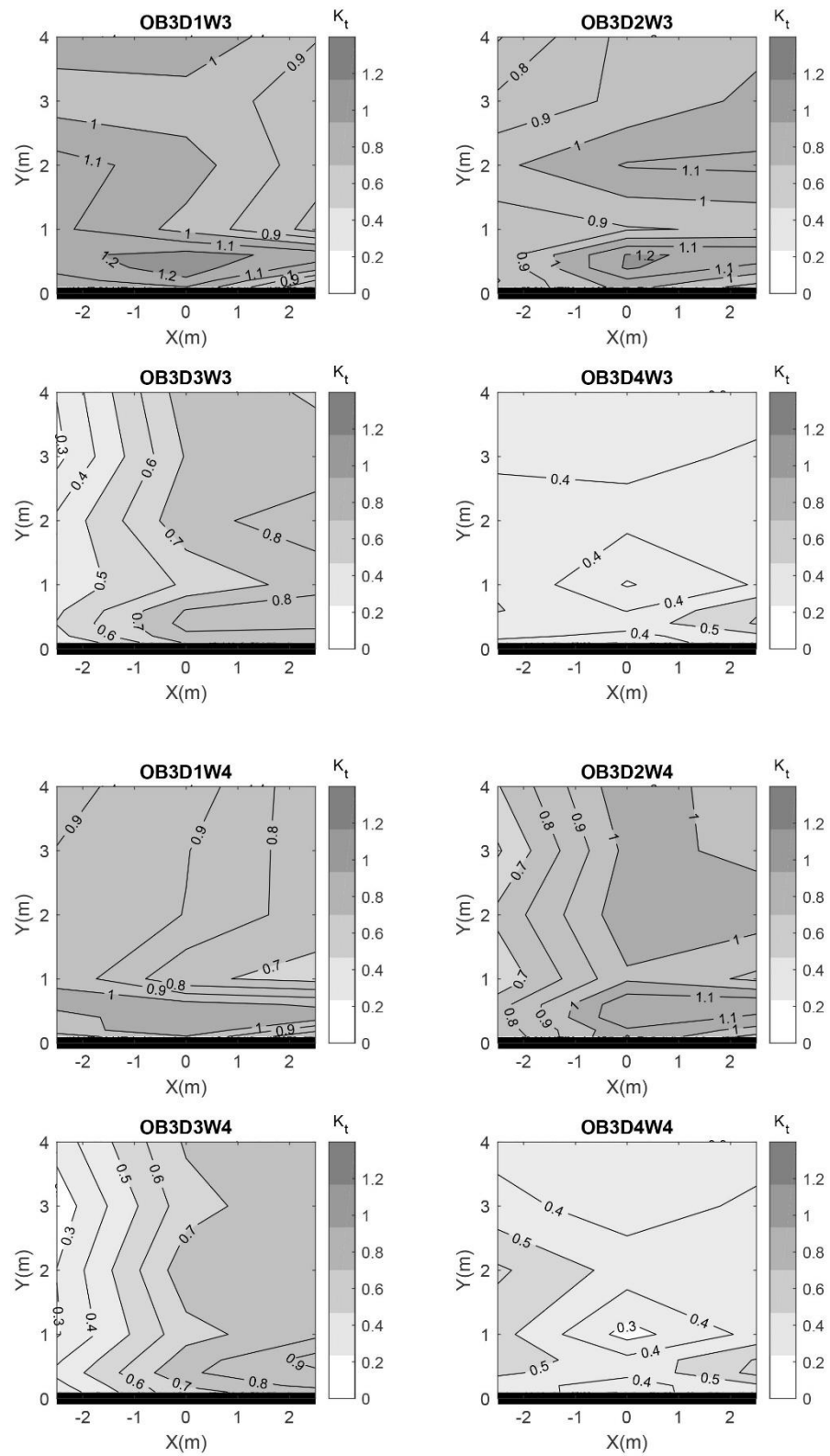
รูปที่ ข-3(ต่อ) เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา
สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง



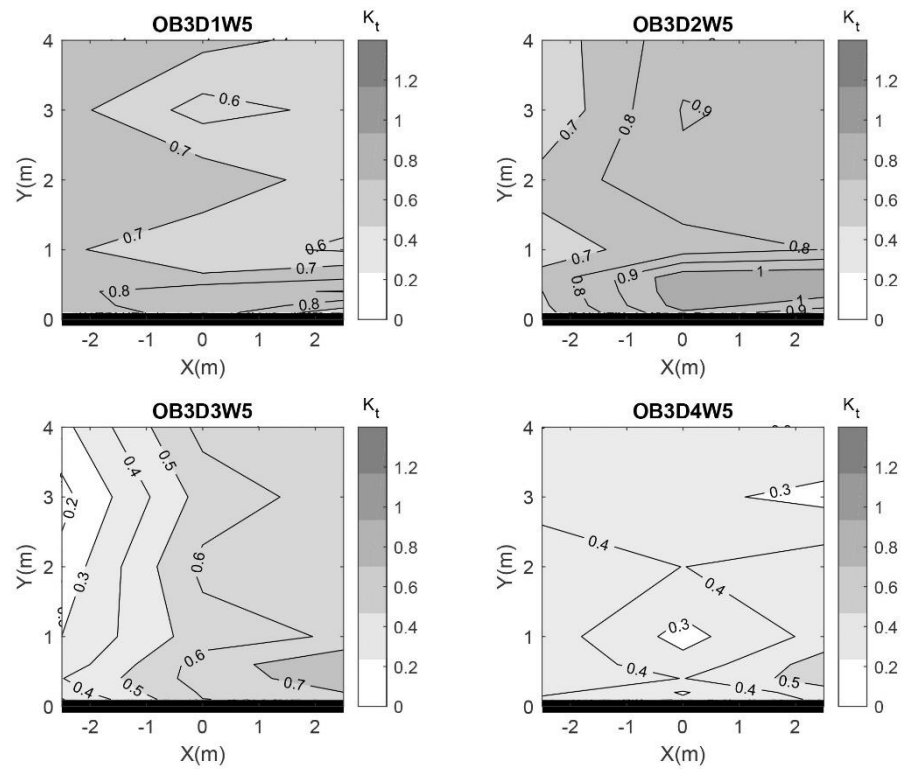
รูปที่ ข-3(ต่อ) เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา
สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ ข-3(ต่อ) เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา
สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ ข-3(ต่อ) เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา
สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง



รูปที่ ซ-3(ต่อ) เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา
สำหรับกรณีที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง

ซ-2 การพิจารณาพฤติกรรมคลื่นด้านหลังโครงสร้าง

คลื่นที่ถูกสร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดคลื่นจะเคลื่อนที่เข้าสู่เขื่อนกันคลื่นและถูกสลายพลังงานผ่านการเสียดสีในช่องว่างระหว่างโครงสร้าง ส่งผลให้พลังงานคลื่นที่ส่งผ่านโครงสร้างไปได้ลดน้อยลง ดังแสดงผลในรูปของขนาดความสูงคลื่นด้านหลังโครงสร้างที่ลดลง ทั้งนี้เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างจะเกิดการปั่นป่วนของคลื่นเป็นระยะหนึ่งด้านหลังโครงสร้าง ก่อนที่พฤติกรรมของคลื่นจะเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ (Bricio et al., 2008) ส่งผลให้ต้องมีการพิจารณาระยะที่คลื่นเกิดความแปรปรวนเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระยะห่างของเขื่อนกันคลื่นกับแนวชายฝั่งที่ต้องการป้องกัน

ในการนี้ ได้พิจารณาโดยใช้กราฟที่แกน x เป็นระยะห่างจากโครงสร้างในด้านหลังต่อความยาวคลื่น (y/L) ตามการศึกษาที่ผ่านมาของ Johnson (1951) เพื่อให้ผลการวิเคราะห์สามารถอธิบายระยะการแปรปรวนในรูปจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่โครงสร้าง และให้แกน y เป็นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น ดังแสดงในรูปที่ ซ-4 ถึงรูปที่ ซ-6 สำหรับกรณีศึกษาที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และรูปที่ ซ-7 ถึงรูปที่ ซ-9 สำหรับกรณีศึกษาที่คลื่นไม่ล้นข้ามโครงสร้าง สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่เป็นตัวแทนของแต่ละระยะห่างจากโครงสร้างต่อความยาวคลื่น (y/L) คำนวณได้จากการเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแนวขนานโครงสร้างทั้ง 3 ตำแหน่งเก็บ ได้แก่ -2.5, 0 และ 2.5 เมตร

จากรูปที่ ซ-4 ถึงรูปที่ ซ-9 พบว่า เมื่อพิจารณาที่ขนาดความชันคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างเดียวกัน ลักษณะของพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นบริเวณด้านหลังโครงสร้างจะมีลักษณะการกระจายตัวใกล้เคียงกันในทุก ๆ ความลึกการจมโครงสร้าง โดยสำหรับกรณีที่ความชันคลื่นอยู่ในช่วง 0.010 – 0.013 นั้นพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะมีลักษณะของความแปรปรวนในช่วงหลังโครงสร้างถึงระยะประมาณ 0.65 เท่าของความยาวคลื่น แต่สำหรับกรณีที่ความชันคลื่นอยู่ในช่วง 0.013 – 0.016 จะมีความแปรปรวนจากหลังโครงสร้างถึงระยะประมาณ 0.6 เท่าของความยาวคลื่น ในขณะที่ช่วงความชันคลื่นที่เหลือ ได้แก่ 0.016 – 0.019, 0.019 – 0.022 และ 0.022 – 0.025 จะมีความแปรปรวนจากหลังโครงสร้างจนถึงระยะประมาณ 0.5 เท่าของความยาวคลื่น

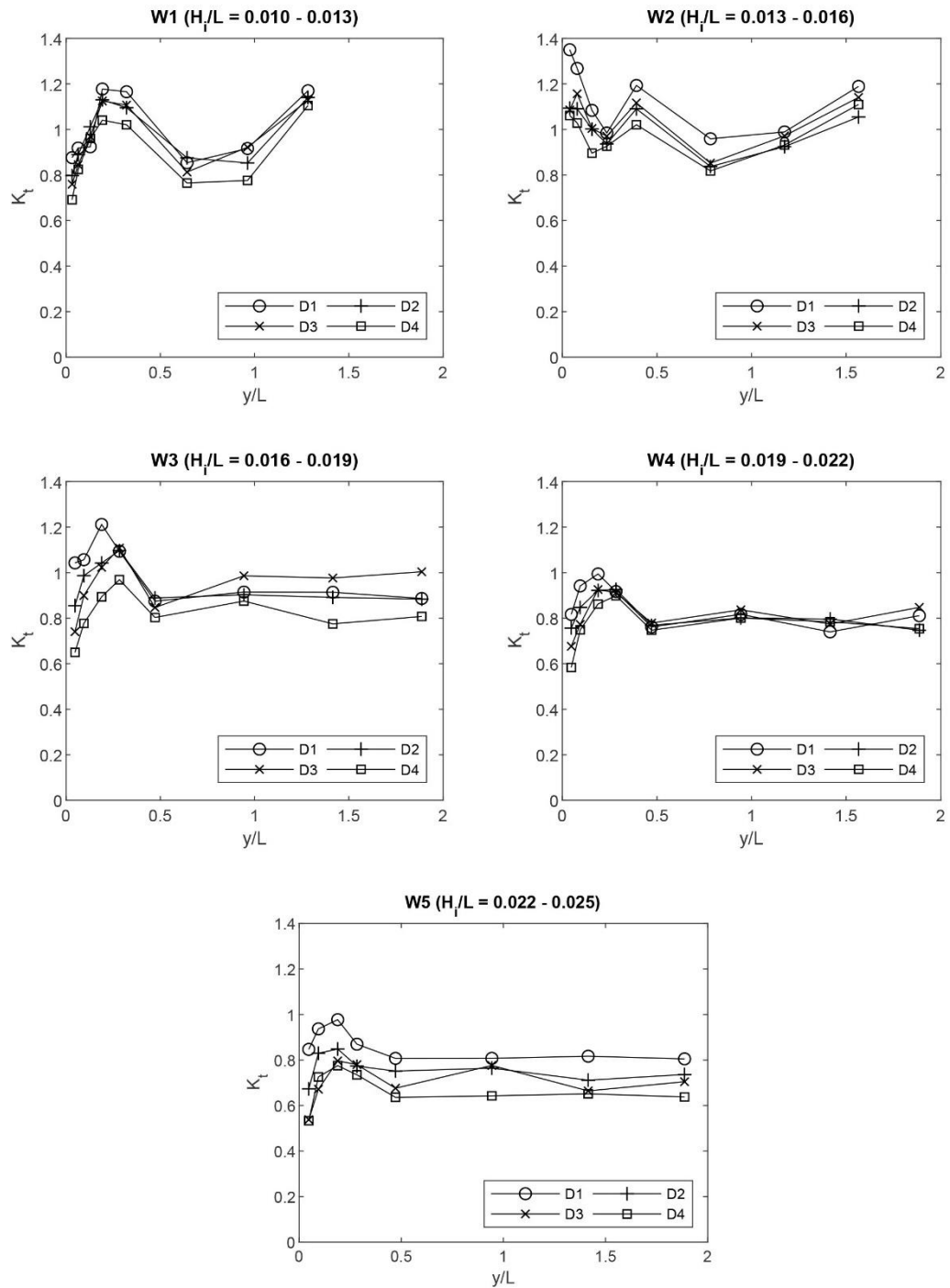
เมื่อพิจารณาจากทุกระยะในแนวตั้งฉากโครงสร้างพบว่า ในระยะที่ไกลจนเกินกว่าช่วงของระยะแปรปรวน ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีศึกษาที่มีความชันคลื่นอยู่ในช่วง 0.010 – 0.013 และ 0.013 – 0.016 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น อาจเกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการสะท้อนจากชายหาดสลายพลังงานบริเวณท้ายอ่างจำลองคลื่น จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ระยะของการแปรปรวนของพฤติกรรม

การส่งผ่านคลื่นในบริเวณด้านหลังโครงสร้าง มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น โดยสรุปรายละเอียดได้ดังตารางที่ ซ-3

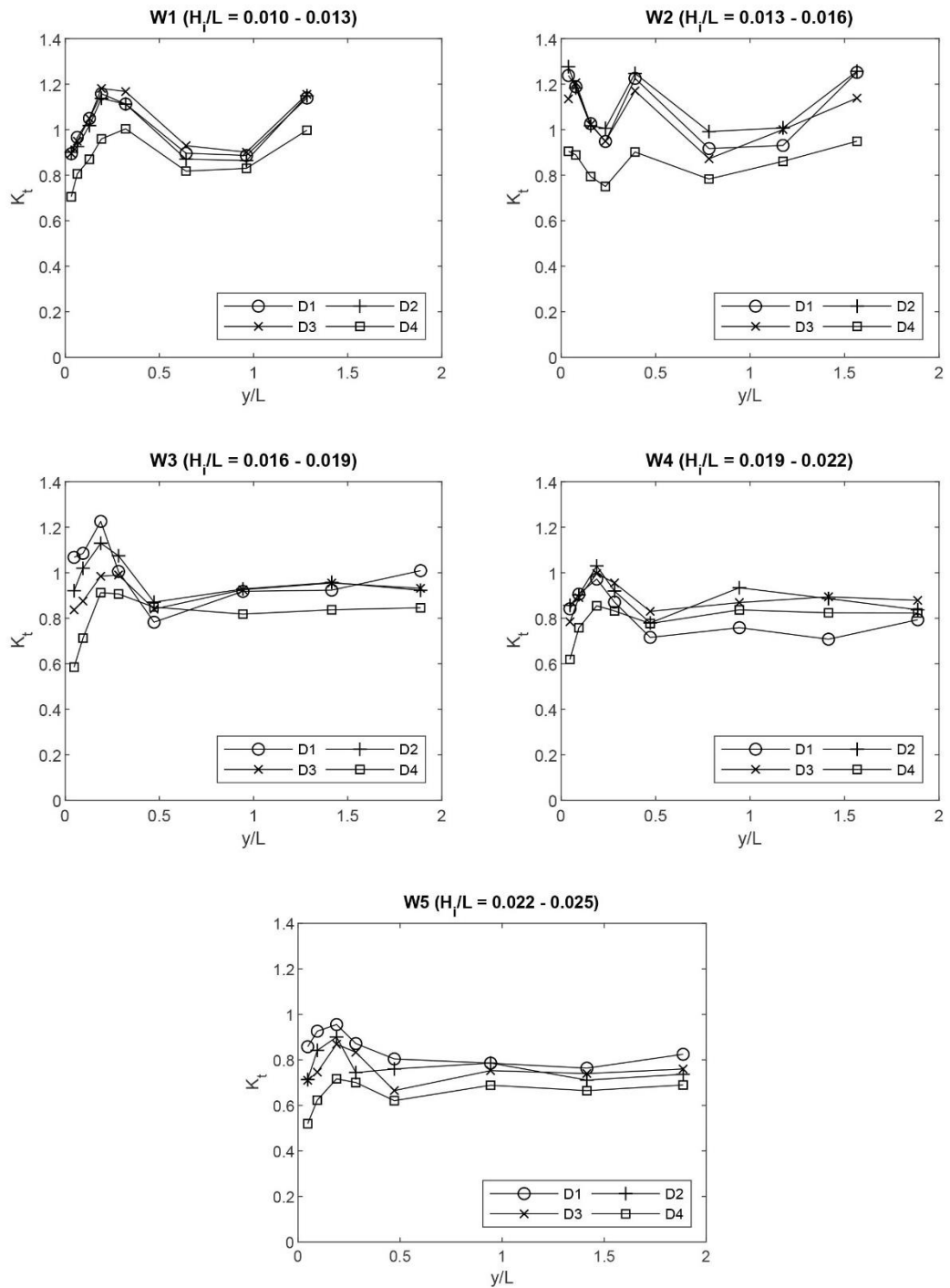
ตารางที่ ซ-3 พฤติกรรมคลื่นด้านหลังโครงสร้าง

parameter	wave				
	W1	W2	W3	W4	W5
ความชันคลื่น	0.010-0.013	0.013-0.016	0.016-0.019	0.019-0.022	0.022-0.025
ความยาวคลื่น (m)	3.117	2.555	2.120	2.120	2.120
ระยะการปั่นป่วน (y/L)	0.65	0.60	0.50	0.50	0.50

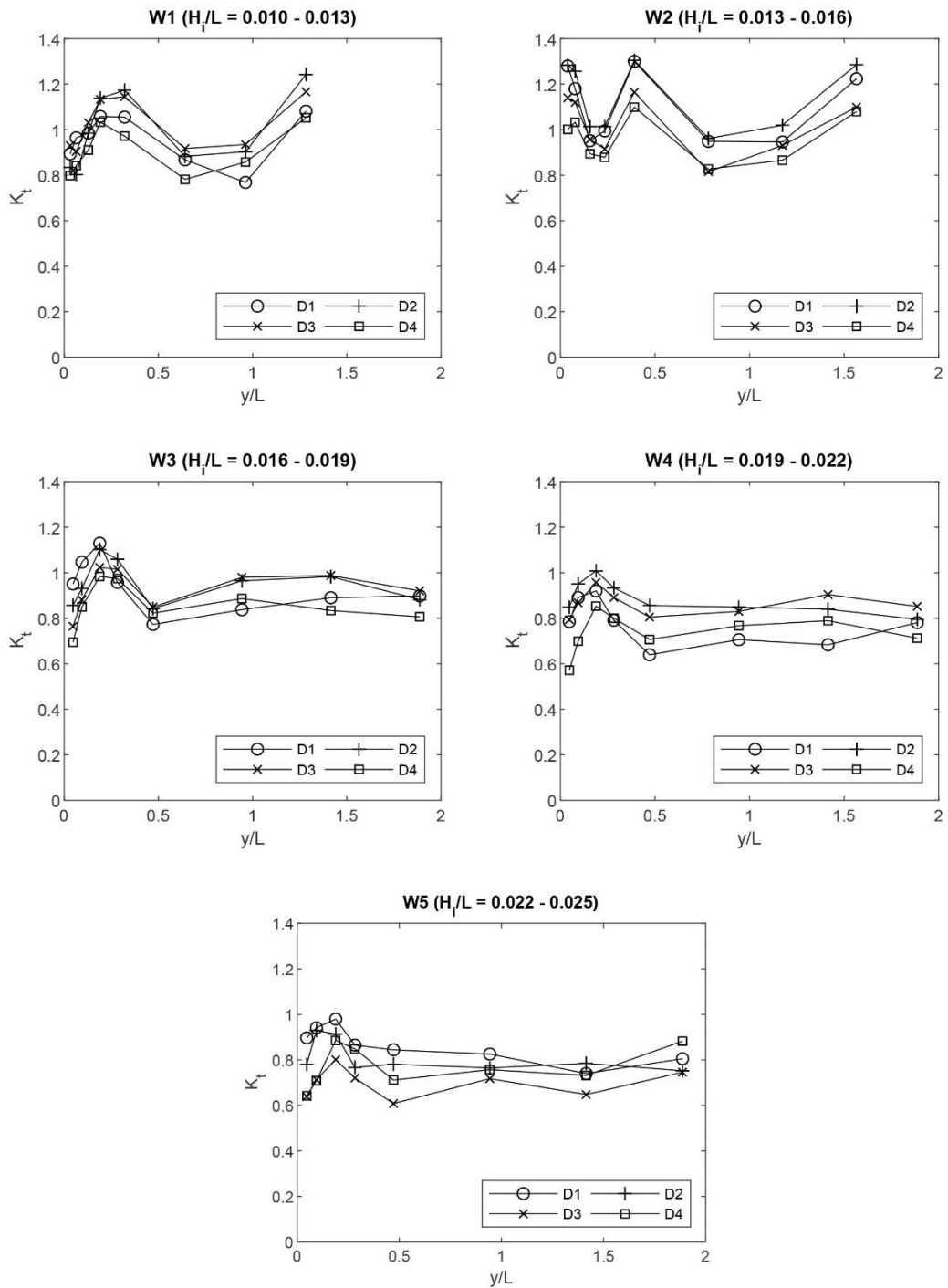




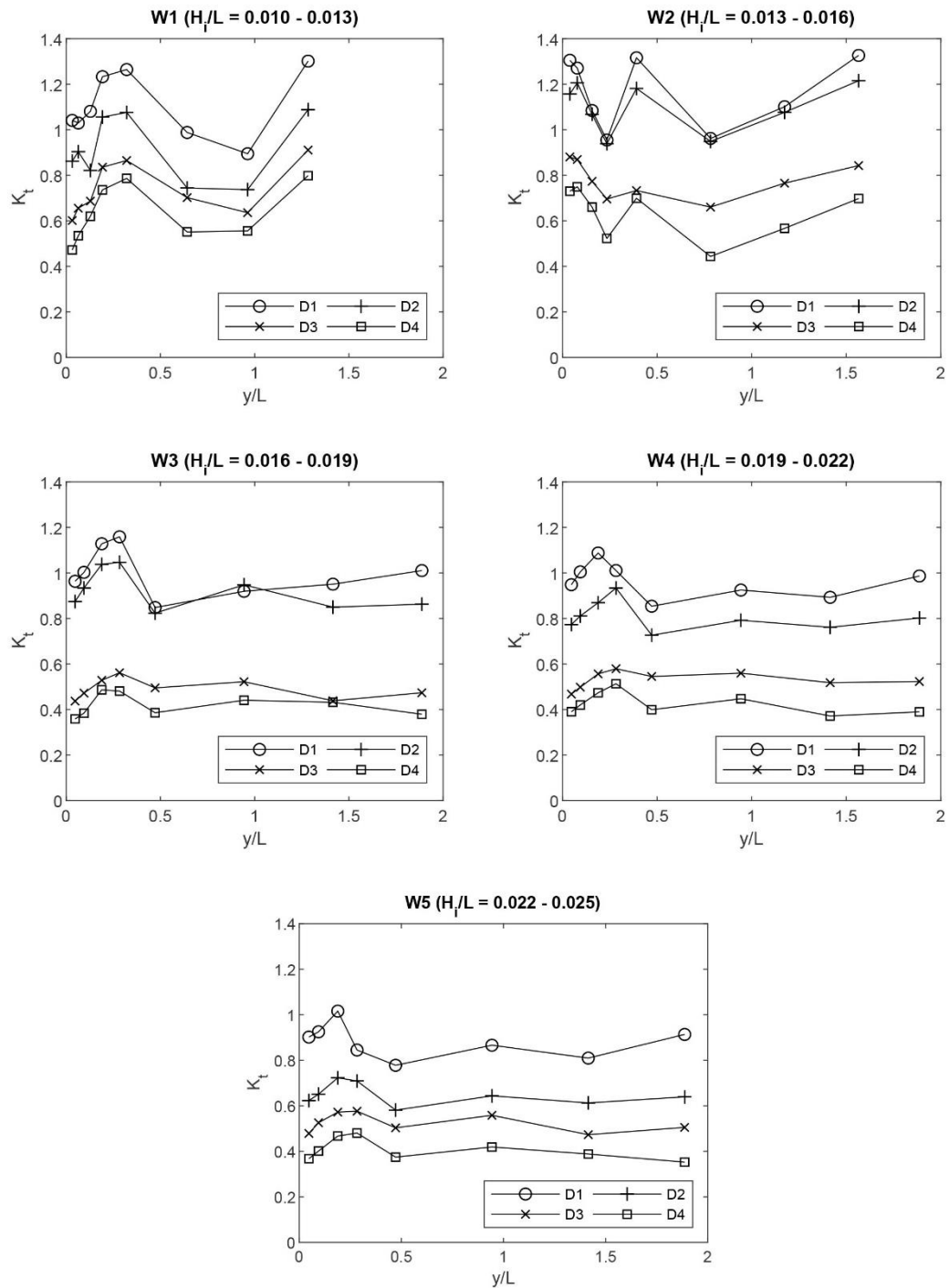
รูปที่ ๗-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากโครงสร้างต่อความยาวคลื่น และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง และมีระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง 0.5 เมตร



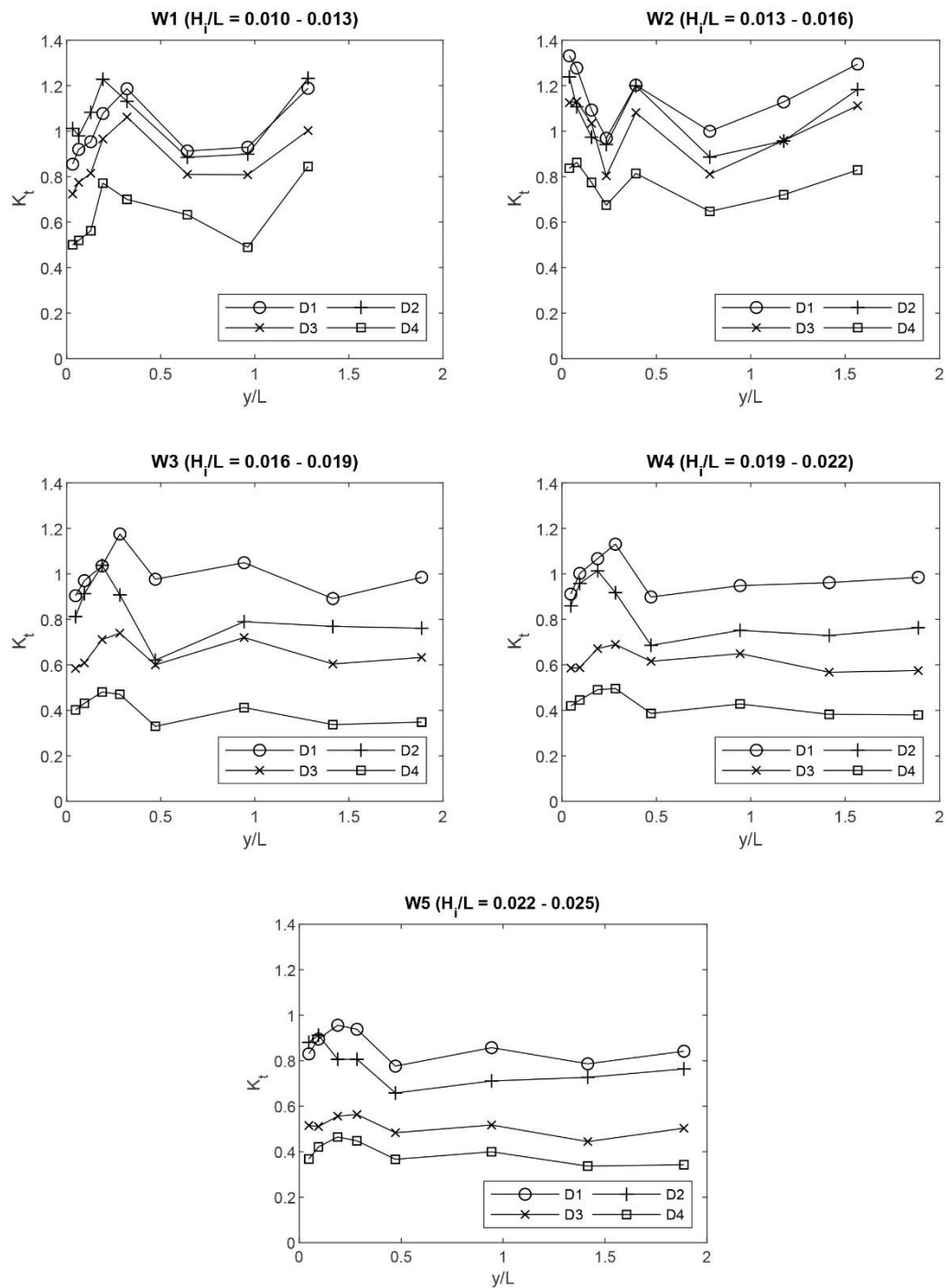
รูปที่ ๕-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากโครงสร้างต่อความยาวคลื่น และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กรณีคลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง และมีระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง 1.0 เมตร



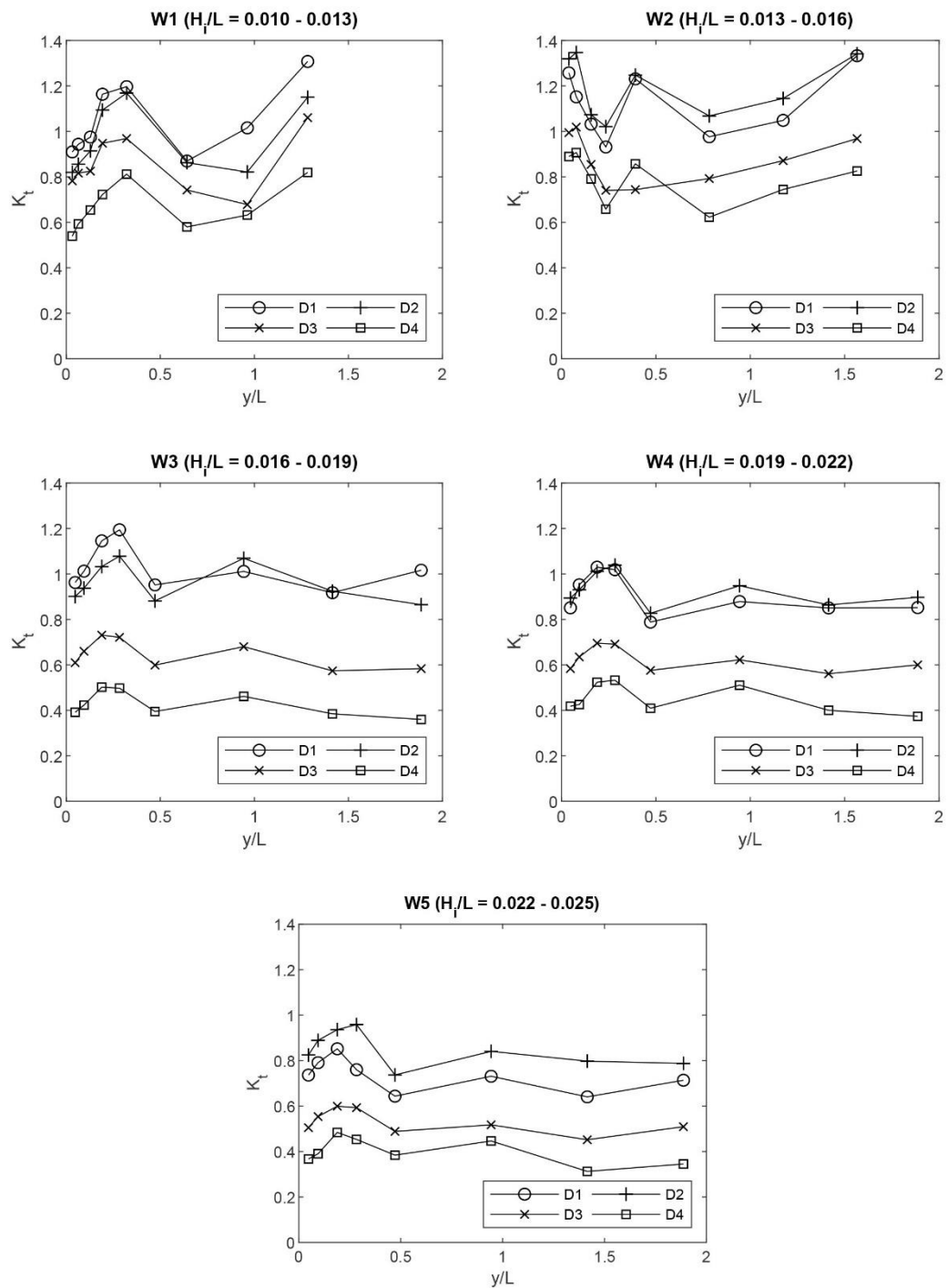
รูปที่ ข-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากโครงสร้างต่อความยาวคลื่น และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กรณีคลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง และมีระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง 1.5 เมตร



รูปที่ ข-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากโครงสร้างต่อความยาวคลื่น และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กรณีคลื่นไม่ล้ำข้ามโครงสร้าง และมีระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง 0.5 เมตร



รูปที่ ๗-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากโครงสร้างต่อความยาวคลื่น และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กรณีคลื่นไม่ล้ำข้ามโครงสร้าง และมีระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง 1.0 เมตร



รูปที่ ข-9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากโครงสร้างต่อความยาวคลื่น และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กรณีคลื่นไม่ล้ำข้ามโครงสร้าง และมีระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง 1.5 เมตร

ซ-3 สมการแนวโน้มของการวิเคราะห์กลุ่มตัวแปรไร้หน่วยกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น

เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมาของ Suh et al. (2007), Mani (2008) และ Ji et al. (2015) ได้กล่าวไว้ว่า พฤติกรรมการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นเนื่องจากอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นส่วนมาก จะมีการกระจายตัวเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อมีตัวแปรคุณสมบัติคลื่นและลักษณะทางกายภาพ เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงกำหนดให้ความสัมพันธ์ในกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยต่าง ๆ มีการกระจายตัวไปใน ทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจึงมีสมมติฐานว่าพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นมีความสัมพันธ์กับชุดตัวแปรไร้ หน่วยตามการกระจายตัวแบบสมการกำลัง (power distribution) และสรุปสมการของกลุ่มตัว แปรไร้หน่วยกลุ่มต่าง ๆ กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น ได้ดังสมการที่ ซ-1 ถึงสมการที่ ซ-5

$$\text{ความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์} \quad K_t = \alpha \left(\frac{b}{L} \right)^\beta \quad (\text{ซ-1})$$

$$\text{ปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น} \quad K_t = \alpha (\phi)^\beta \quad (\text{ซ-2})$$

$$\text{ความลึกสัมพัทธ์} \quad K_t = \alpha \left(\frac{d}{L} \right)^\beta \quad (\text{ซ-3})$$

$$\text{ความสูงคลื่นสัมพัทธ์} \quad K_t = \alpha \left(\frac{H_i}{d} \right)^\beta \quad (\text{ซ-4})$$

$$\text{ความชันคลื่น} \quad K_t = \alpha \left(\frac{H_i}{L} \right)^\beta \quad (\text{ซ-5})$$

เมื่อ α และ β คือค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ และค่าเลขยกกำลัง สำหรับการวิเคราะห์ค่า α และ β ใช้วิธีการวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่าย (simple regression analysis) และมีรายละเอียดของ สมการถดถอยต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ ซ-4 ถึงตารางที่ ซ-8

จากตารางที่ ซ-4 ถึงตารางที่ ซ-8 แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (α) และค่าเลขยกกำลัง (β) ของแต่ละกรณีศึกษานั้นมีค่าแตกต่างกัน นอกจากนั้นยังพบว่า ค่าจากสมการกับชุดข้อมูลของบาง รูปแบบในบางกรณีศึกษา มีความสัมพันธ์กันน้อย โดยเห็นได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ที่ต่ำ อาจเนื่องมาจากจำนวนการเก็บข้อมูลที่น้อย ส่งผลให้ อาจได้ข้อมูลที่ยังไม่ครบถ้วนและแม่นยำ หรือเกิดเนื่องจากไม่มีความสัมพันธ์กันของกลุ่มตัวแปรนั้น ๆ กับพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นของโครงสร้าง

ตารางที่ ซ-4 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ และค่าคงที่ในสมการที่ ซ-1 ที่ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด

Case	ความลึกการจม (D)	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณและค่าคงที่		
		α	β	R^2
กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง (A)	0.075 เมตร	0.166	-0.395	0.44
	0.150 เมตร	0.173	-0.390	0.33
	0.225 เมตร	0.146	-0.435	0.27
	0.300 เมตร	0.143	-0.422	0.39
กรณีคลื่นล้นไม่ข้ามโครงสร้าง (O)	0.075 เมตร	-	-	-
	0.150 เมตร	0.225	-0.314	0.16
	0.225 เมตร	0.005	-1.188	0.63
	0.300 เมตร	0.001	-1.518	0.75

ตารางที่ ซ-5 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ และค่าคงที่ในสมการที่ ซ-2 ที่ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด

Case	ความชันคลื่น (W)	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณและค่าคงที่		
		α	β	R^2
กรณีคลื่นล้นข้ามโครงสร้าง (A)	0.01 - 0.013	0.986	0.075	0.59
	0.013 - 0.016	-	-	-
	0.016 - 0.019	0.960	0.091	0.29
	0.019 - 0.022	0.884	0.090	0.34
	0.022 - 0.025	0.801	0.134	0.49
กรณีคลื่นล้นไม่ข้ามโครงสร้าง (O)	0.01 - 0.013	1.124	0.464	0.86
	0.013 - 0.016	-	-	-
	0.016 - 0.019	1.224	1.004	0.94
	0.019 - 0.022	1.130	0.890	0.96
	0.022 - 0.025	0.967	0.839	0.92

ตารางที่ ซ-6 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ และค่าคงที่ในสมการที่ ซ-3 ที่ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด

Case	ความลึกการจม (D)	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณและค่าคงที่		
		α	β	R^2
กรณีคลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง (A)	0.075 เมตร	0.443	-0.395	0.44
	0.150 เมตร	0.455	-0.390	0.33
	0.225 เมตร	0.431	-0.435	0.27
	0.300 เมตร	0.407	-0.422	0.39
กรณีคลื่นสั้นไม่ข้ามโครงสร้าง (O)	0.075 เมตร	-	-	-
	0.150 เมตร	0.490	-0.314	0.16
	0.225 เมตร	0.090	-1.188	0.63
	0.300 เมตร	0.039	-1.518	0.75

ตารางที่ ซ-7 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ และค่าคงที่ในสมการที่ ซ-4 ที่ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด

Case	ความลึกการจม (D)	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณและค่าคงที่		
		α	β	R^2
กรณีคลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง (A)	0.075 เมตร	0.393	-0.319	0.84
	0.150 เมตร	0.330	-0.387	0.90
	0.225 เมตร	0.215	-0.540	0.91
	0.300 เมตร	0.214	-0.510	0.75
กรณีคลื่นสั้นไม่ข้ามโครงสร้าง (O)	0.075 เมตร	0.289	-0.455	0.83
	0.150 เมตร	0.274	-0.411	0.66
	0.225 เมตร	0.076	-0.814	0.82
	0.300 เมตร	0.024	-1.119	0.84

ตารางที่ ข-8 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ และค่าคงที่ในสมการที่ ข-5 ที่ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด

Case	ความลึกการจม (D)	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณและค่าคงที่		
		α	β	R^2
กรณีคลื่นสั้นข้ามโครงสร้าง (A)	0.075 เมตร	0.404	-0.185	0.75
	0.150 เมตร	0.327	-0.236	0.75
	0.225 เมตร	0.237	-0.309	0.71
	0.300 เมตร	0.261	-0.266	0.63
กรณีคลื่นสั้นไม่ข้ามโครงสร้าง (O)	0.075 เมตร	0.249	-0.321	0.83
	0.150 เมตร	0.275	-0.254	0.54
	0.225 เมตร	0.062	-0.545	0.84
	0.300 เมตร	0.022	-0.709	0.88

ภาคผนวก ฅ
สรุปลัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

A	กรณีศึกษาที่คลื่นล้นข้ามโครงสร้าง
A ₁ และ A ₂	ค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูเรียร์
A _b	พื้นที่หน้าตัดที่บ้น้ำ
ANOVA	การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)
a	แอมพลิจูดของคลื่น (wave amplitude)
a _i	แอมพลิจูดของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง
a _r	แอมพลิจูดของคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้าง
B	ระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง
B(i)	กรณีศึกษาของระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้าง
B ₁ และ B ₂	ค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูเรียร์
b	ความหนาของโครงสร้าง
C	ความเร็วของคลื่น (wave celerity)
C _m	ความเร็วคลื่นของแบบจำลอง
C _g	ความเร็วคลื่นกลุ่ม
c	จุดตัดแกน y (y-interception) หรือค่าของ y เมื่อ x มีค่าเป็น 0
D	ความลึกโครงสร้างที่อยู่ใต้น้ำ
D(i)	กรณีศึกษาของความลึกการจมโครงสร้าง
Df	องศาอิสระ (degree of freedom)
d หรือ h	ความลึกน้ำ (water depth)
d ₅₀	ขนาดวัสดุท้องน้ำ (sediment size)
E	พลังงานรวมของคลื่น
\bar{E}	พลังงานของคลื่นเฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่
E _i	พลังงานคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างเชื่อมกันคลื่น
E _k	พลังงานจลน์ (kinetic energy)
E _{loss}	พลังงานที่ถูกสลายโดยเชื่อมกันคลื่น

E_p	พลังงานศักย์ (potential energy)
E_r	พลังงานคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้าง
E_t	พลังงานคลื่นที่ส่งผ่านโครงสร้าง
F	ค่าทดสอบสถิติ F
F_e	แรงซึ่งเกิดจากการอัดตัวของของเหลว (elastic compression force)
F_i	แรงเฉื่อย (inertia force)
F_g	แรงซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดของโลก (gravity force)
F_p	แรงซึ่งเกิดจากความดันของของเหลว (pressure force)
F_t	แรงซึ่งเกิดจากแรงตึงผิว (surface tension force)
F_v	แรงเฉือนซึ่งเกิดจากความหนืด (viscous force)
Fr	ฟรูดนัมเบอร์ (Froude number)
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
H	ความสูงคลื่น (wave height)
\bar{H}	ความสูงคลื่นเฉลี่ย
H_i	ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างเขื่อนกันคลื่น (incident wave height)
H_s	ความสูงคลื่นนัยสำคัญ
H_t	ความสูงคลื่นหลังผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น (transmitted wave height)
H_r	ความสูงคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น (reflection wave height)
H_{rms}	ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความสูงคลื่น
K	จำนวนลูกคลื่น (wave number)
K_r	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น (reflection coefficient)
K_t หรือ C_t	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (transmission coefficient)
$K_{t,Wiegel}$	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของ Wiegel (1959)
k	จำนวนคลื่น (wave number)
L	ความยาวคลื่น (wave length)
L_m	มิติความยาวของแบบจำลอง
L_p	มิติความยาวของต้นแบบจริง
MAE	ผลต่างค่าสัมบูรณ์เฉลี่ย (mean absolute error)

MS	ผลบวกกำลังสองเฉลี่ย (mean square)
m	ความชัน (slope) ของกราฟเส้นตรง
m_i	สัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงส่วน (partial regression coefficient)
n	มาตราส่วนหรืออัตราส่วนของมิติความยาว (scale ratio)
n_h	อัตราส่วนของมิติความยาวในแนวระนาบ (horizontal length ratio)
n_d	อัตราส่วนของมิติความยาวในแนวตั้ง (vertical length ratio)
n_t	มาตราส่วนหรืออัตราส่วนของคาบคลื่น (time ratio)
n_v	มาตราส่วนหรืออัตราส่วนของความเร็ว (velocity ratio)
O	กรณีศึกษาที่คลื่นไม่ล้ำนข้ามโครงสร้าง
R^2	ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ
S_0	ความลาดเอียงของท้องน้ำ (bed slope)
Sig.	ค่านัยสำคัญการทดสอบสถิติ F จากโปรแกรม SPSS
SS	ผลบวกกำลังสอง (sum of square)
SSE	ผลรวมความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (residual sum square)
SSR	ผลรวมความถดถอยกำลังสอง (regression sum square)
SSReg	ค่าแปรปรวนของ y เนื่องจากอิทธิพลของ x_i
SST	ผลรวมกำลังสอง (total sum square)
SWL	ระดับน้ำนิ่ง (still water level)
T	คาบคลื่น (wave period)
T_m	คาบคลื่นของแบบจำลอง
T_p	คาบคลื่นของต้นแบบจริง
u หรือ V_x	ความเร็วของกระแสน้ำในแนวราบ
v_m	ความเร็วคลื่นของแบบจำลอง
v_p	ความเร็วคลื่นของต้นแบบจริง
W(i)	กรณีศึกษาของความชันคลื่น
WP_i	หมายเลขเครื่องวัดคลื่น
w หรือ V_z	ความเร็วของกระแสน้ำในแนวตั้ง
x	ระยะทางตามแนวขนานกับชายฝั่งและโครงสร้าง (along shore direction)

y	ระยะทางตามแนวตั้งฉากกับชายฝั่งและโครงสร้าง (cross shore direction)
Δl	ระยะห่างระหว่างตำแหน่งวัดคลื่นด้านหน้าโครงสร้าง
α	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณหรือสัมประสิทธิ์คงที่ของสมการถดถอย
α_0	ทิศทางของคลื่น
β	ค่าสัมประสิทธิ์ยกกำลังของสมการถดถอย
ϵ_l	ความต่างเฟสของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง
ϵ_R	ความต่างเฟสของคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้าง
η	ระดับผิวน้ำอิสระ (free surface elevation)
η_l	ระดับผิวน้ำอิสระของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง
η_R	ระดับผิวน้ำอิสระของคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้าง
π	กลุ่มตัวแปรที่ไม่มีมิติวัด
ρ	ความหนาแน่นของน้ำ
ρ_s	ความหนาแน่นของวัสดุท้องน้ำ (density of the sediment)
ν	ความหนืดจลน์ของของไหล (kinematics viscosity)
ω	ความถี่เชิงมุม (angular frequency)
φ_l	ความต่างเฟสรวมของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง
φ_R	ความต่างเฟสรวมของคลื่นที่สะท้อนจากโครงสร้าง
Φ	ปัจจัยความไม่เต็มส่วนของเขื่อนกันคลื่น (partial breakwater factor)
B/L	อัตราส่วนระหว่างระยะช่องว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่น
H_i/B	ระยะห่างระหว่างเสาโครงสร้างสัมพัทธ์
b/L	ความหนาโครงสร้างสัมพัทธ์ (relative thickness)
D/d	ความลึกโครงสร้างสัมพัทธ์ (relative submerged depth)
H_i/d	ความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (relative wave height)
d/h_s	ความลึกน้ำต่อความสูงโครงสร้าง
d/L	ความลึกสัมพัทธ์ (relative depth)
H/L	ความชันคลื่น (wave steepness)
H_i/L	ความชันคลื่นก่อนเข้าโครงสร้าง (incident wave steepness)

R_c/H_i อัตราส่วนระหว่างความลึกน้ำเหนือโครงสร้างต่อความสูงคลื่น
 y/L ระยะทางตามแนวตั้งฉากโครงสร้างต่อความยาวคลื่น



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายันทวุฒิ อินทรีย์งค์
วัน เดือน ปี เกิด	6 กันยายน 2537
สถานที่เกิด	จังหวัดสมุทรสาคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ.2555 สำเร็จการศึกษาจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย พ.ศ.2559 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.โยธา) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ.2560 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	98/8 ม.12 ต.สวนหลวง อ.กระทุ่มแบน จ.สมุทรสาคร 74110
ผลงานตีพิมพ์	Effective of Wave Transmissibility on Partial Breakwater (การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24)
รางวัลที่ได้รับ	พ.ศ.2560 - 2562 ได้รับทุนการศึกษาจากภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ.2561 - 2563 ได้รับทุนผู้ช่วยสอน ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย