

การส่งผ่านและการกระจายคลื่นของโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นได้นำแบบหินทิ้ง
พร้อมด้วยรูปแบบกระแสน้ำ

นายสุวิทย์ ศรียี่สุน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

WAVE TRANSMISSION AND DIFFRACTION OF SUBMERGED RUBBLE MOUND
BREAKWATER WITH CIRCULATION PATTERN

Mr. Suwee Sriyisoorn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Water Resources Engineering
Department of Water Resources Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2011
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การส่งผ่านและการกระจายคลื่นของโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น
ได้น้ำแบบหินทิ้งพร้อมด้วยรูปแบบกระแสน้ำ

โดย

นายสุวิทย์ ศรียี่สุน

สาขาวิชา

วิศวกรรมแหล่งน้ำ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสวี จันทโรยธำ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิษฐ์ พรพรหมินทร์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รักรวิชัย)

สุวีร์ ศรียี่สุน : การส่งผ่านและการกระจายคลื่นของโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบ
หินทิ้งพร้อมด้วยรูปแบบกระแสน้ำ (WAVE TRANSMISSION AND DIFFRACTION
OF SUBMRGERGED RUBBLE MOUND BREAKWATER WITH CIRCULATION
PATTERN) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์, 135 หน้า.

ปัจจุบันการออกแบบงานป้องกันชายฝั่งทะเล มีความจำเป็นต้องพิจารณาและ
ตระหนักถึงผลกระทบสิ่งแวดล้อม จึงเริ่มมีความสนใจที่จะทำการศึกษาเกี่ยวกับเขื่อนกันคลื่น
ใต้น้ำแบบหินทิ้ง จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมากการศึกษาการส่งผ่านคลื่น (wave
transmission) รวมกับการกระจาย (wave diffraction) หลังโครงสร้างยังมีอยู่อย่างจำกัด
ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งศึกษาความสัมพันธ์ของการส่งผ่านคลื่นรวมกับผลของการกระจาย
คลื่น ของการถ่ายทอดพลังงานเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้าง ในการศึกษาที่ใช้แบบจำลอง
กายภาพ ภายใต้เงื่อนไขคลื่นสม่ำเสมอ (regular wave) โดยพิจารณาถึงตัวแปรสภาพคลื่น
และโครงสร้าง อันได้แก่ ความชันคลื่น และความสูงโครงสร้าง

ผลการศึกษาพฤติกรรมของการส่งผ่านของคลื่น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม
(wave global transmission coefficient, K_{gt}) มีความสัมพันธ์กับความลึกน้ำสัมพัทธ์
(relative water depth, d/h_s) ความชันคลื่น (wave steepness, H/L) และความสูงคลื่น
สัมพัทธ์ (relative wave height, R_c/H) โดยการลดลงของความลึกน้ำสัมพัทธ์เป็นส่วนสำคัญ
ที่มีผลต่อการลดลงของการส่งผ่านของคลื่น ความชันคลื่นน้อยเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างได้ง่าย
กว่าความชันคลื่นมาก ซึ่งความชันคลื่นมากจะมีแตกตัวของคลื่นบนสันโครงสร้างที่มากกว่า
ทำให้สูญเสียพลังงานของคลื่นมากขึ้น นอกจากนี้จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน
ของคลื่นรวมจากแบบจำลอง 3 มิติ ให้ค่ามากกว่าแบบจำลอง 2 มิติ อันกล่าวได้ว่าการ
กระจายของคลื่นมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมจากแบบจำลอง 3 มิติเป็น
อย่างมาก

รูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำบริเวณหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำมีพฤติกรรมแตกต่าง
กับเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ เนื่องจากผลของความลาดชันของความสูงคลื่น (wave height
gradient) โดยเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำมีรูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำจากพื้นที่อับคลื่น
(shadow area) ออกนอกขอบเขตที่ไม่ได้ปกป้อง (non-protect region) และตรงข้ามกับเขื่อน
กันคลื่นพื้นน้ำ

ภาควิชา.....วิศวกรรมแหล่งน้ำ.....ลายมือชื่อ.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมแหล่งน้ำ.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2554.....

5270565321 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS : SUBMERGED BREAKWATER / WAVE TRANSMISSION / WAVE DIFFRACTION /
CIRCULATION

SUWEE SRIYISOON : WAVE TRANSMISSION AND DIFFRACTION OF SUBMERGED
RUBBLE MOUND BREAKWATER WITH CIRCULATION PATTERN. ADVISOR : ANURAK
SRIARIYAWAT, Ph.D. 135 pp.

Nowadays, structural design for coastal protection has to concern about the environmental impact; thus, there are more intentions to study about the submerged rubble mound breakwater. The previous researches were still limited studies on the combined effect between wave transmission and wave diffraction behind submerged structure. Hence, this research aims to study the relationship between wave transmission and wave diffraction when waves pass over the submerged structure. This study conducts the physical model under the varied regular wave steepness condition. The characteristics of submerged structure are also varied in height to be the design criteria for coastal engineer.

As a result, it can be summarized behavior of the wave transmission that the wave global transmission coefficient (K_{gt}) could be related with relative water depth (d/h_s), wave steepness (H/L) and relative wave height (R_c/H_i). Decreasing in the relative water depth leads to wave breaking over the crest of the structure to the reduction of wave transmission. The structure allows the smaller wave steepness pass through breakwater easier, while the higher wave structure is broken on the crest causing more energy dissipation. Moreover this study found that the wave global transmission coefficient value from 3D model is higher than those from previous 2D model study. This can be implied that the wave diffraction has an effect to the wave global transmission coefficient value especial for 3D model

The circulation pattern in the leeside of a submerged structure would be different to that behind emerged structure because the current is induced by the wave height gradient behind the structure. This cause the current behind the submerged structure moves from the shadow area to non-protect region, while the direction of the current from emerged structure is opposite.

Department : Water Resources Engineering..... Student's Signature

Field of Study : Water Resources Engineering ... Advisor's Signature

Academic Year : 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณท่าน รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รักรวิชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรยธ่า ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิษฐ์ พรพรมินทร์ และอาจารย์ ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์ ที่ได้สละเวลาในการให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไข ข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งท่าน อาจารย์ ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้หลักการทำงาน คำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์แก่ข้าพเจ้า ทั้งนี้ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาและอบรมข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนทุนในการวิจัย รวมทั้งอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่าน รวมทั้งพี่น้องชาววิศวกรรมแหล่งน้ำ ที่คอยให้คำแนะนำและเป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้า ซึ่งเป็นผู้ที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จที่คอยเป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้า ขอขอบคุณมากครับ ประโยชน์ที่ก่อให้เกิดกุศลอันใดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ หากพึงมีข้าพเจ้าขอมอบอุทิศแด่ บิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทั้งหลาย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	4
1.5 สิ่งที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 หลักการและการศึกษาที่ผ่านมา.	5
2.1 กลศาสตร์ของคลื่น.....	5
2.2 การเปลี่ยนแปลงคลื่น.....	7
2.3 พลังงานของคลื่น.....	11
2.4 การศึกษาที่ผ่านมาของการส่งผ่านของคลื่น.....	14
บทที่ 3 แบบจำลองกายภาพ.....	26
3.1 การดำเนินการทดลอง.....	26
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.3 การออกแบบโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น.....	29
3.4 การออกแบบการทดลอง.....	31
3.5 การเก็บข้อมูล.....	31
3.6 วิธีการทดลอง.....	34

	หน้า
บทที่ 4 พฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่น	38
4.1 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่น.....	38
4.2 ผลการทดลอง.....	40
4.3 การเปรียบเทียบการทดลองกับการศึกษาที่ผ่านมา.....	45
4.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่นรวม.....	47
4.5 สรุปพฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่น.....	61
บทที่ 5 พฤติกรรมของกระแสน้ำหลังเชื่อมกันคลื่น.....	67
5.1 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลความเร็วการไหล.....	67
5.2 ผลการทดลอง.....	69
5.3 การวิเคราะห์ผล.....	74
5.4 สรุปพฤติกรรมของกระแสน้ำหลังโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น.....	77
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	78
6.1 สรุปผลการศึกษา.....	78
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	81
รายการอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก ก แบบจำลองทางกายภาพ.....	86
ภาคผนวก ข การปรับเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้.....	89
ภาคผนวก ค ความสมมาตรของข้อมูลคลื่นหลังโครงสร้าง.....	96
ภาคผนวก ง ผลการทดลองของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นและระยะสถานะ ความปั่นป่วนหลังเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ.....	100
ภาคผนวก จ ผลการทดลองของความเร็วการไหลเฉลี่ย.....	118
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	135

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	คุณสมบัติของคลื่น ในช่วงความถี่ต่างๆ.....	8
2-2	การเปลี่ยนแปลงคลื่นหลังเชื่อมกันคลื่นแบบหिनทัง.....	15
2-3	คุณสมบัติของตัวแปรการส่งผ่านของคลื่น แบบจำลอง 2 มิติ เพื่อการวิเคราะห์ การส่งผ่านของคลื่น โดย Van der Meer et al. (2005).....	19
3-1	คุณสมบัติคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นที่ใช้ในการศึกษา	32
3-2	รายชื่อกรณีศึกษา.....	32
4-1	ระยะของสภาวะที่มีการแตกตัวของคลื่นหลังเชื่อมกันคลื่นได้น้ำแบบหिनทัง....	50
4-2	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น ของแต่ละกรณีความสูงโครงสร้าง.....	59
4-3	พฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่น กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.50 เมตร.....	63
4-4	พฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่น กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.40 เมตร.....	64
4-5	พฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่น กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.35 เมตร.....	65
4-6	พฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่น กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 เมตร.....	66

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	พารามิเตอร์ของคลื่น (U.S.CERC., 1984).....	8
2-2	การเคลื่อนที่ของอนุภาคบริเวณน้ำตื้นและน้ำลึก (U.S.CERC., 1984).....	8
2-3	การสะท้อนของคลื่น(U.S.CERC., 1984).....	10
2-4	การพิจารณาพลังงานศักย์ของคลื่น(Ippen, 1966).....	12
2-5	การพิจารณาพลังงานจลน์ของคลื่น (Ippen, 1966).....	12
2-6	พารามิเตอร์ของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ.....	15
2-7	ข้อมูลวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น โดย Van der Meer et al. (2005).....	19
2-8	การกระจายของคลื่น (Sorensen, 1993).....	21
2-9	กราฟความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของคลื่น กรณีทำมุมตั้งฉากกับ โครงสร้าง (U.S.CERC., 1984).....	21
2-10	การเคลื่อนที่ของกระแสน้ำหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ (Browder et al., 1994).....	24
2-11	การเคลื่อนที่ของกระแสน้ำหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ (Nobuoka et al., 1996)	24
2-12	การเปลี่ยนแปลงท้องน้ำเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ (Loveless และ MacLeod, 1999).....	24
2-13	การเคลื่อนที่ของกระแสน้ำหลังโครงสร้างเขื่อน A เขื่อนกันคลื่นพ่นน้ำ B เขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ (Loveless และ MacLeod,1999)	25
2-14	การเคลื่อนที่ของกระแสน้ำหลังโครงสร้างเขื่อน โดย Ranasinghe (2005).....	25
3-1	แบบแ่งจำลองคลื่น.....	28
3-2	ภาพถ่ายแบบจำลองแ่งจำลองคลื่น ห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และ ชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	29
3-3	ตำแหน่งติดตั้งการเก็บข้อมูลความเร็วการไหล.....	32
3-4	การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการเก็บข้อมูล.....	33
3-5	ตำแหน่งการเก็บข้อมูลเครื่องมือวัดความสูงคลื่น.....	36
3-6	ตำแหน่งการเก็บข้อมูลเครื่องมือวัดความเร็วคลื่น.....	37

ภาพที่	หน้า
4-1	ตัวอย่างการวิเคราะห์ความถี่ของข้อมูลคลื่น ในขั้นตอนการปรับเทียบ เครื่องกำเนิดคลื่น..... 39
4-2	เส้นชั้นระดับ K_t กรณีความสูงโครงสร้าง (h_s) เท่ากับ 0.30 เมตร (จมน้ำ 0.10 เมตร)..... 41
4-3	เส้นชั้นระดับ K_t กรณีความสูงโครงสร้าง (h_s) เท่ากับ 0.35 เมตร (จมน้ำ 0.05 เมตร)..... 42
4-4	เส้นชั้นระดับ K_t กรณีความสูงโครงสร้าง (h_s) เท่ากับ 0.40 เมตร (ระดับน้ำนิ่ง)..... 43
4-5	เส้นชั้นระดับ K_t กรณีความสูงโครงสร้าง (h_s) เท่ากับ 0.50 เมตร (พื้นน้ำ 0.05 เมตร)..... 44
4-6	การเปรียบเทียบเส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.50 เมตร กับ Wiegel (1962)..... 46
4-7	ตัวอย่างความสูงคลื่นหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 เมตร (จมน้ำ 0.10 เมตร) ความชันคลื่น เท่ากับ 0.018..... 48
4-8	ตัวอย่างสภาวะความปั่นป่วนของคลื่นหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.35 เมตร (จมน้ำ 0.05 เมตร)..... 49
4-9	ตำแหน่งการข้อมูลคลื่น เพื่อการวิเคราะห์การส่งผ่านของคลื่น 2 มิติ..... 52
4-10	ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{gt} กับ B/H_t ของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง..... 54
4-11	ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{gt} กับ L_s/H_t ของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง..... 54
4-12	ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{gt} กับ D_{50}/H_t ของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง 54
4-13	ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{gt} กับ d/H_t ของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง..... 55
4-14	ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{gt} กับ H_t/L 56
4-15	ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{gt} กับ d/h_s ของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง..... 59
4-16	ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{gt} กับ R_c/H_t ของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง..... 60
5-1	ตัวอย่างข้อมูลความเร็วการไหลตามแนวแกน x, y และ z กรณี H30C1 ความ สูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 เมตร ความชันคลื่น เท่ากับ 0.018..... 69
5-2	รูปแบบการหมุนกระแสน้ำ ความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 เมตร (จมน้ำ 0.10 เมตร)..... 70

ภาพที่	หน้า	
5-3	รูปแบบการหมุนวนกระแสน้ำ ความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.35 เมตร (จมน้ำ 0.05 เมตร).....	71
5-4	รูปแบบการหมุนวนกระแสน้ำ ความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.40 เมตร (ระดับน้ำนิ่ง).....	72
5-5	รูปแบบการหมุนวนกระแสน้ำ ความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.50 เมตร (พื้นน้ำ 0.10 เมตร).....	73
5-6	ตัวอย่างข้อมูลคลื่น กรณีความสูงโครงสร้างต่ำกว่าความลึกน้ำ ก) รูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำ ข) เส้นชั้นระดับ K_{gt}	74
5-7	ตัวอย่างข้อมูลคลื่น กรณีความสูงโครงสร้างเท่ากับความลึกน้ำ ก) รูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำ ข) เส้นชั้นระดับ K_{gt}	75
5-8	ตัวอย่างข้อมูลคลื่น กรณีความสูงโครงสร้างสูงกว่าความลึกน้ำ ก) รูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำ ข) เส้นชั้นระดับ K_{gt}	76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของโครงการ

การป้องกันการกัดเซาะแนวชายฝั่งทะเลและการบรรเทาปัญหา น้ำท่วมหลังพื้นที่แนวชายฝั่งทะเล ดังเช่น พื้นที่ท่าเรือเพื่อการขนส่งสินค้าและประมง เส้นทางสัญจรทางน้ำ พื้นที่อยู่อาศัย แหล่งท่องเที่ยว โรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น อาจจำเป็นต้องใช้โครงสร้างทางวิศวกรรมเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น โดยเชื่อมกันคลื่นเป็นโครงสร้างประเภทหนึ่งที่ใช้เพื่อป้องกันหรือบรรเทาปัญหาดังกล่าว โดยการลดพลังงานของคลื่น

ส่วนใหญ่วัสดุที่ใช้สำหรับเชื่อมกันคลื่นนิยมเป็นหินทิ้ง (rubble mound) เนื่องจากประหยัดเรื่องของงบประมาณค่าวัสดุก่อสร้าง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่นๆ ในการออกแบบรองรับคลื่นที่มีความรุนแรงเช่นเดียวกัน (Lamberti et al., 2005) โดยหินทิ้งจะทำหน้าที่กระจายและลดพลังงานของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะจากการแตกตัวของคลื่น บริเวณลาดชันด้านหน้าโครงสร้างรวมทั้งจากการเสียดทานของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านช่องว่างของหินทิ้ง (Van der Meer et al., 2005) เชื่อมกันคลื่นแบบหินทิ้ง สามารถแบ่งเป็นประเภทได้ดังนี้

ประเภทแรกเป็นเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้ง (emerged rubble mound breakwater) มีลักษณะของสันโครงสร้างอยู่สูงกว่าระดับน้ำและเพียงพอที่จะป้องกันการไหลข้ามสันของคลื่นได้ โดยคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างจะถูกกักหรือสลายพลังงานตั้งแต่บริเวณด้านหน้าโครงสร้างจากกระบวนการแตกตัวของคลื่น (wave breaking) (Rao et al., 2009)

อย่างไรก็ตามการใช้เชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำก่อให้เกิดปัญหาหลายประการ เช่น เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างแล้วไม่สามารถผ่านข้ามสันสันโครงสร้างได้ พลังงานคลื่นจะสะท้อนคลื่นกลับสู่ทะเล หากเป็นคลื่นที่มีขนาดใหญ่ ความรุนแรงของคลื่นที่สะท้อนจะมีปริมาณมาก ทำให้คลื่นด้านหน้าโครงสร้างเกิดการปั่นป่วนและเกิดการกัดเซาะท้องน้ำด้านหน้าโครงสร้าง อันเป็นสาเหตุหลักของความเสียหายหรือพังทลายของโครงสร้าง (Suh et al., 2001)

การที่สันโครงสร้างอยู่เหนือระดับน้ำส่งผลต่อการบดบังทัศนียภาพอันสวยงามของแนวชายฝั่งทะเลในหลายประเทศ เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา ประเทศญี่ปุ่น และประเทศในทวีปยุโรป ที่พื้นที่ชายหาดเป็นแหล่งท่องเที่ยวที่สำคัญ ประเด็นนี้ถูกจัดให้มีประกอบกับการพิจารณาความเหมาะสมของโครงการด้วย (Japanese Manual, 1988 (อ้างอิงใน Yoshioka et al., 1993) และ Calabrese et al., 2008)

บริเวณพื้นที่หลังเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำยังอาจเกิดปัญหามลพิษทางด้านสิ่งแวดล้อมเมื่ออยู่ใกล้พื้นที่โรงงานอุตสาหกรรม ที่มีการใช้น้ำในกระบวนการหล่อเย็น จากการที่ความสูงคลื่นหลังเขื่อนกันคลื่นลดลง ส่งผลให้เกิดกระแสน้ำในแนวขนานชายฝั่งบริเวณพื้นที่ดังกล่าวลดลงตาม ดังนั้นกระบวนการถ่ายเทความร้อนหรือการลดอุณหภูมิของน้ำจะมีประสิทธิภาพลดลง และเป็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมของพื้นที่ดังกล่าวและพื้นที่ใกล้เคียง (Calabrese et al., 2008)

จากปัญหาดังกล่าวจึงเป็นที่มาของการก่อสร้างประเภทที่สอง คือ เขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง (submerged rubble mound breakwater) หรือโครงสร้างสันเตี้ย (low crest structure) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สร้างขนานตามแนวชายฝั่ง มีระดับของสันโครงสร้างอยู่ต่ำกว่าจากระดับน้ำหรือพื้นระดับเหนือน้ำเพียงเล็กน้อยทำให้คลื่นสามารถข้ามสันบริเวณสันโครงสร้างได้ และเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำยังใช้วัสดุก่อสร้างน้อยกว่าเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำทั้งทางด้านการก่อสร้างและการบำรุงรักษา (Van der Meer et al., 2005)

เมื่อพิจารณาเรื่องการส่งผ่านของคลื่นของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ ได้มีการศึกษาทางทฤษฎีและการทดลองหลายผลงาน โดยตัวแปรที่สนใจของการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มคุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง อันได้แก่ ความสูงคลื่น ความยาวคลื่น คาบคลื่น ทิศทางของคลื่น เป็นต้น และกลุ่มคุณสมบัติการซึมผ่านได้ของโครงสร้าง

การศึกษาส่วนใหญ่จะใช้วิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 2 มิติ ที่พิจารณาเฉพาะผลของการข้ามสันและการซึมผ่านเขื่อนกันคลื่น แต่เมื่อนำมาประยุกต์ใช้การส่งผ่านคลื่นจริงที่มีความซับซ้อนและเคลื่อนตัวแบบ 3 มิติ พบว่า การส่งผ่านคลื่นที่ได้ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ เนื่องจากไม่ได้พิจารณาผลของกระบวนการกระจายของคลื่นที่เคลื่อนเข้ามาจากปลายของเขื่อนกันคลื่นด้วย นอกจากนี้เขื่อนกันคลื่นใต้น้ำนั้นยังมีส่วนสำคัญต่อรูปแบบกระแสน้ำบริเวณใกล้แนวชายฝั่ง ซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของการเปลี่ยนแปลงของตะกอนชายฝั่งการทับถมแบบแหลมทราย หรือแบบแหลมทรายยื่นติดกับเขื่อนกันคลื่น (US.CERC., 1984 และ Japanese Manual, 1988 (อ้างอิงใน Yoshioka et al., 1993))

ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงมีจุดมุ่งหมายสองประการ คือ การศึกษาความสัมพันธ์พฤติกรรมของการส่งผ่านของคลื่นในรูปของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น และศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำด้านหลังโครงสร้าง โดยตัวแปรที่สนใจของการศึกษา ได้แก่ ขนาดโครงสร้าง และคุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปเป็นแนวทางในการออกแบบเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำหรือประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมเพื่อป้องกันชายฝั่งรูปแบบอื่นต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาความสัมพันธ์พฤติกรรมการส่งผ่าน ที่ประกอบด้วยกระบวนการเคลื่อนที่ผ่าน สันโครงสร้างและการซึมผ่าน รวมกับการกระจายคลื่น ของเชื่อมกันคลื่นได้น้ำแบบ หินทิ้ง
- 2) ศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำหลังเชื่อมกันคลื่นได้น้ำแบบหินทิ้ง

1.3 ขอบเขตของโครงการ

การศึกษานี้ใช้แบบจำลองทางกายภาพ โดยใช้แอ่งจำลองคลื่น ขนาดความกว้าง 10 เมตร ยาว 20 เมตร และสูง 0.70 เมตร ณ ห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีรายละเอียด ขอบเขตการศึกษา ดังนี้

- 1) คลื่นที่ใช้ในการทดลองเป็นคลื่นสม่ำเสมอ (regular wave) สร้างขึ้นโดยเครื่องกำเนิด คลื่น (wave generator) โดยมีทิศทางคลื่นตั้งฉากกับเชื่อมกันคลื่น
- 2) ระดับน้ำในแอ่งคลื่น (wave basin) มีความลึกที่ระดับ เท่ากับ 0.40 เมตร
- 3) เชื่อมกันคลื่น ใช้วัสดุแบบหินทิ้งและยอมให้น้ำซึมผ่านได้ มีความกว้างสันโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 เมตร ความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30, 0.35, 0.40 และ 0.50 เมตร และ ความลาดชันด้านหน้าและด้านหลัง เท่ากับ 2:1 (H:V)
- 4) ตัวแปรที่สนใจ คือ คุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง และความสูง โครงสร้าง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การศึกษานี้ได้ดำเนินการตามขั้นตอนการศึกษา เพื่อให้ครอบคลุมขอบเขตและ วัตถุประสงค์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- 1) ศึกษารวบรวมเอกสารทางวิชาการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ทั้งจากสิ่งตีพิมพ์ งานวิจัย และหนังสือ เพื่อใช้เป็นแนวทางการศึกษาและออกแบบการทดลอง
- 2) ศึกษาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ ทดสอบ พร้อมทั้งปรับปรุงให้เหมาะสมแก่การศึกษา
- 3) ปรับเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์
- 4) ออกแบบการทดลองและสร้างเชื่อมกันคลื่น

- 5) ทำการทดลองกรณีต่างๆ โดยทำการเก็บข้อมูลจากการวัดข้อมูลคลื่น ความเร็วการไหลคลื่น และสังเกตพฤติกรรมของลักษณะที่เกิดขึ้นจริงขณะเก็บข้อมูล
- 6) การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง ได้แก่ พฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่น และลักษณะรูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำด้านหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง
- 7) จัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 สิ่งที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงความสัมพันธ์พฤติกรรมของการส่งผ่านของคลื่นหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง กับคุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างและความสูงโครงสร้าง
- 2) ทราบถึงรูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำบริเวณด้านหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง
- 3) เป็นข้อมูลเพื่อที่จะเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเขื่อนกันคลื่น
- 4) ได้แนวทางและประสบการณ์การดำเนินงาน จากแบบจำลองกายภาพ เพื่อการหาคำตอบทางด้านวิศวกรรมอย่างเป็นระบบ
- 5) เป็นแนวทางการประยุกต์เพื่อการออกแบบเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง และเป็นแนวทางการศึกษา รวมทั้งวิจัยขั้นถัดไป

บทที่ 2

หลักการและการศึกษาที่ผ่านมา

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทบทวนหลักการและการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับกลศาสตร์ของคลื่น อธิบายปรากฏการณ์ของคลื่นกระทำต่อชายฝั่ง การเปลี่ยนแปลงคลื่น พลังงานของคลื่น การศึกษาที่ผ่านมาของการส่งผ่านของคลื่น รูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำ อันเป็นแนวทางของการศึกษาครั้งนี้

2.1 กลศาสตร์ของคลื่น

การออกแบบโครงสร้างเพื่อป้องกันแนวชายฝั่งนั้นต้องทราบถึงกลศาสตร์ของคลื่นและกระบวนการที่คลื่นจะเคลื่อนตัวสู่ฝั่ง ซึ่งลักษณะของคลื่นน้ำนั้นเป็นการเคลื่อนที่ของผิวน้ำอิสระในสถานะที่เปลี่ยนแปลงภายใต้อิทธิพลของแรงดึงดูดโลก ซึ่งมีหลายแบบด้วยกัน ดังเช่น คลื่นลม กระแสน้ำขึ้นน้ำลง คลื่นที่เกิดจากแผ่นดินไหว คลื่นที่เกิดจากเรือ เป็นต้น โดยการเคลื่อนที่ของคลื่นในช่วงความลึกน้ำที่แตกต่างกัน ย่อมมีผลต่อกลศาสตร์ของคลื่นที่แตกต่างกัน

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของคลื่น

คลื่นน้ำเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับผิวน้ำขึ้นลงในแต่ละช่วงเวลา และตำแหน่ง โดยมีลักษณะเป็นคลื่นฮาร์มอนิก ดังรูปที่ 2-1 แสดงนิยามของพารามิเตอร์หลักของคลื่น ดังต่อไปนี้

- 1) ความสูงคลื่น (wave height, H) คือ ระยะจากท้องคลื่น (wave trough) ถึงสันคลื่น (wave crest) ในแนวตั้ง
- 2) คาบคลื่น (period, T) คือ ระยะเวลาที่ขึ้นลงของผิวน้ำที่จุดใดจุดหนึ่งครบ 1 รอบ
- 3) ความยาวคลื่น (wave length, L) คือ ระยะทางจากสันคลื่นถึงสันคลื่นถัดไปจากรูปแบบคลื่นในชั่วขณะหนึ่ง
- 4) ความเร็วคลื่น (celerity, C) คือ ความเร็วที่สันคลื่นเคลื่อนที่ โดย $C = L/T$

คลื่นที่เกิดขึ้นภายใต้อิทธิพลของแรงดึงดูดโลก มีความแปรปรวนทางธรรมชาติสูง มีความซับซ้อนและยากที่จะอธิบายได้ด้วยนิพจน์ทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของคลื่นจึงสามารถแบ่งคลื่นตามลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคของคลื่น (wave

particle movement) ได้แก่ คลื่นแบบ oscillatory มีลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายคลื่นนิ่ง (standing wave) เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ในน้ำลึก (deep water) ซึ่งมีนิยามจากอัตราส่วนของความลึกน้ำ (water depth, d) ต่อความยาวคลื่นมากกว่า 0.5 ($d/L > 0.5$) การเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำจะวนเวียนอยู่กับที่โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ในตำแหน่งที่คงที่ และคลื่นแบบ translatory เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ในน้ำตื้น (shallow water) ซึ่งมีนิยามจากอัตราส่วนของความลึกน้ำต่อความยาวคลื่นน้อยกว่า 0.04 ($d/L < 0.04$) โดยมีการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำไปในทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่น หากความเร็วเฉือนของอนุภาคน้ำมากกว่าความเร็วเฉือนวิกฤตของตะกอนท้องน้ำจะเกิดการพัดพาตะกอนท้องน้ำได้ แสดงดังรูปที่ 2-2

2.1.2 การบรรยายลักษณะของคลื่นในเชิงคณิตศาสตร์

การเปลี่ยนแปลงคลื่นที่เกิดขึ้นในทะเลนั้น ลักษณะของผิวหน้าที่สันคลื่นและท้องคลื่นค่อนข้างจะมีความซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เนื่องจากการไม่คงที่ของคลื่นและทิศทางของการเคลื่อนที่ โดยเฉพาะคลื่นที่เกิดจากลม ซึ่งมีขบวนการถ่ายทอดพลังงานจากลมสู่ผิวน้ำไม่แน่นอน

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ออกจากบริเวณกำเนิดแล้ว คลื่นจะเริ่มมีลักษณะเป็นระเบียบและสม่ำเสมอมากขึ้นตามระยะทาง สันคลื่นและท้องคลื่นเริ่มปรากฏเด่นชัดขึ้น พลังงานของคลื่นจะลดลงไปเรื่อยๆ ตามระยะทาง เนื่องจากการสูญเสียพลังงานภายใน เช่น ความเสียดทานของผิวน้ำและอากาศ ความเสียดทานของกันทะเลในน้ำตื้น และการปั่นป่วนจากการแตกตัวและการกระจายของคลื่น เป็นต้น

การบรรยายลักษณะของคลื่นทางคณิตศาสตร์เป็นไปได้ยาก และเป็นไปไม่ได้ที่จะถูกต้องตลอดการเคลื่อนที่ ความสลับซับซ้อนในรูปแบบคลื่น มีลักษณะความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นสูง ดังนั้นการบรรยายคลื่นทางคณิตศาสตร์จึงทำได้เพียงการประมาณเท่านั้น เพื่อนำไปสู่หลักเกณฑ์และความพยายามในการที่จะทำความเข้าใจปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้น จึงมีหลายทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายลักษณะต่างๆของคลื่น ดังนี้

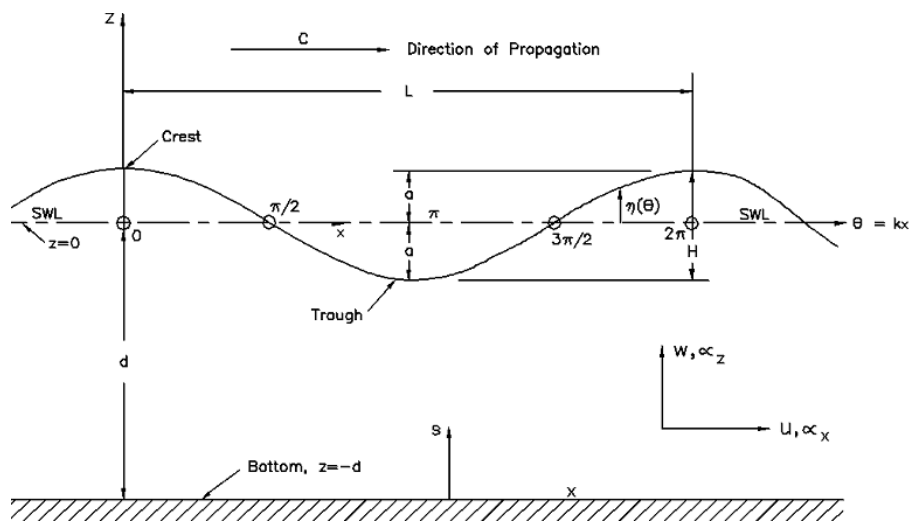
- 1) ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย (small amplitude wave theory) บรรยายลักษณะของคลื่นที่เคลื่อนที่อย่างง่าย ด้วยรูปแบบฟังก์ชันคลื่นรูปไซน์ (sine function) ที่มีการอธิบายการเคลื่อนที่ของคลื่นในเชิงเส้นตรง ทฤษฎีนี้มีความถูกต้องสูงสำหรับการบรรยายลักษณะของคลื่นที่เคลื่อนที่ในน้ำลึก แต่การเคลื่อนที่ของคลื่นในน้ำตื้นที่มีปัจจัยการเปลี่ยนแปลงหลายอย่างจึงเป็นเพียงการประมาณเบื้องต้นเท่านั้น

- 2) ทฤษฎีคลื่นความสูงมาก (finite amplitude wave theory) ประกอบด้วยทฤษฎีการเคลื่อนที่ของคลื่นแบบความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้นหลายทฤษฎี เพื่ออธิบายพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของคลื่นในน้ำตื้นที่ดีกว่าทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย โดยแต่ละทฤษฎีมีข้อจำกัดและขอบเขตการคำนวณแตกต่างกัน

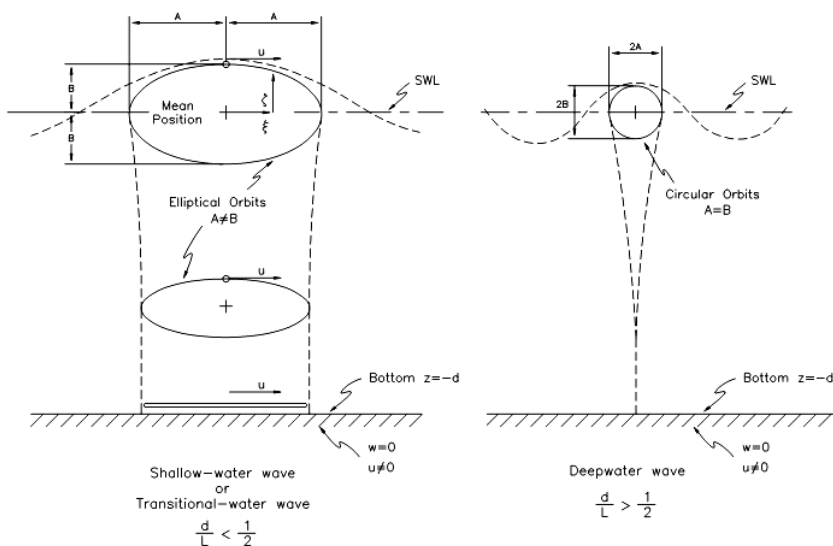
สำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ได้พิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นภายใต้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อยที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยทฤษฎีคลื่นความสูงน้อยจำแนกคลื่นตามความลึกน้ำประกอบด้วย คลื่นในน้ำลึก คลื่นในความลึกเปลี่ยนแปลง และคลื่นน้ำตื้น เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ในน้ำลึก คุณสมบัติต่างๆของคลื่นมีลักษณะคงที่ ได้แก่ ความเร็วคลื่น ความยาวคลื่น และคาบคลื่น เป็นต้น แต่เมื่อคลื่นเริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่ น้ำตื้นคลื่นจะมีคุณสมบัติต่างๆของคลื่นเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากกระบวนการต่างๆ เช่น การเคลื่อนที่เข้าสู่ น้ำตื้น (wave shoaling) การหักเหของคลื่น (wave refraction) การสะท้อนของคลื่น (wave reflection) การกระจายของคลื่น (wave diffraction) และการแตกตัวของคลื่น (wave breaking) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวทำให้ความเร็วคลื่นลดลง ความยาวคลื่นสั้นลง ยกเว้นคาบคลื่นที่เท่าเดิม โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นและความเร็วของคลื่นในช่วงความลึกต่างๆ ตามทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย ดังตารางที่ 2-1 (US.CERC., 1984)

2.2 การเปลี่ยนแปลงคลื่น

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่จากบริเวณน้ำลึกเข้าสู่ น้ำตื้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงคลื่น (wave transformation) เนื่องจากความเสียดทานกับท้องทะเลหรือการเคลื่อนที่เข้าปะทะสิ่งกีดขวางตามทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย ความยาวคลื่นเท่าเดิม แต่ความสูงคลื่นจะเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงความชันคลื่น (wave steepness, H/L) มีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคลื่นไม่สามารถทรงตัวอยู่ได้ จึงเกิดการแตกตัวแล้วเกิดเป็นคลื่นลูกใหม่เคลื่อนที่ตามกันไปจนถึงชายฝั่ง



รูปที่ 2-1 พารามิเตอร์ของคลื่น (US.CERC., 1984)



รูปที่ 2-2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคบริเวณน้ำตื้นและน้ำลึก (US.CERC., 1984)

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติของคลื่น ในช่วงความลึกต่างๆ

คุณสมบัติคลื่น	คลื่นในน้ำลึก (deep water waves) $d/L > 0.5$	คลื่นในความลึกเปลี่ยนแปลง (transition water waves) $0.5 > d/L > 0.04$	คลื่นในน้ำตื้น (shallow water waves) $d/L < 0.04$
ความยาวคลื่น	$L = \frac{gT^2}{2\pi}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$	$L = T\sqrt{gd}$
ความเร็วคลื่น	$C = \frac{gT}{2\pi}$	$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$	$C = \sqrt{gd}$

2.2.1 การเคลื่อนที่ของคลื่นเข้าสู่หาด

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดคลื่นที่อยู่ในน้ำลึก และอยู่นอกบริเวณอิทธิพลการกระทำของลม คลื่นจะมีลักษณะเป็นระเบียบและสม่ำเสมอ มีลักษณะวงโคจรเป็นรูปวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางของวงโคจรที่ผิวน้ำอิสระเท่ากับความสูงคลื่น แต่เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าบริเวณหาดน้ำตื้นอนุภาคน้ำจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นรูปวงรี เนื่องจากอิทธิพลของความลึกน้ำ คุณสมบัติดังกล่าวจะเริ่มเปลี่ยนแปลงตามระยะทางที่เคลื่อนที่ผ่าน ดังรูปที่ 2-2

เมื่อพิจารณาหน้าคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่แนวชายฝั่ง ขนานกับเส้นชั้นระดับท้องน้ำ โดยสมมติว่าพลังงานของคลื่นที่ผ่านเข้ามาสู่ชายฝั่งนั้นไม่มีการสูญเสียพลังงาน อันเนื่องมาจากความเสียดทานหรือความปั่นป่วนของท้องน้ำ จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์น้ำตื้น (shoaling coefficient) ดังสมการที่ (2-1)

$$K_s = \left(1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)}\right)^{-0.5} \quad (2-1)$$

เมื่อ K_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์น้ำตื้น (shoaling coefficient)

2.2.2 การหักเหของคลื่น

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่งมีทิศทางทำมุมกับเส้นระดับท้องน้ำ ความเร็วคลื่นที่เคลื่อนตัวเข้าสู่ฝั่งจะขึ้นอยู่กับความลึกน้ำ หากความลึกน้ำไม่สม่ำเสมอจะทำให้ความเร็วไม่เท่ากันด้วยคลื่นที่อยู่ตำแหน่งความลึกน้ำมากกว่าจะเคลื่อนตัวด้วยความเร็วคลื่นที่มากกว่าคลื่นที่อยู่ตำแหน่งความลึกน้ำน้อยกว่า ลักษณะของความลึกน้ำที่แตกต่างกันจะทำให้แนวสันคลื่นเกิดการบิดแนว และทิศทางการเคลื่อนที่จะเปลี่ยนไปเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การหักเหของคลื่น (wave refraction)

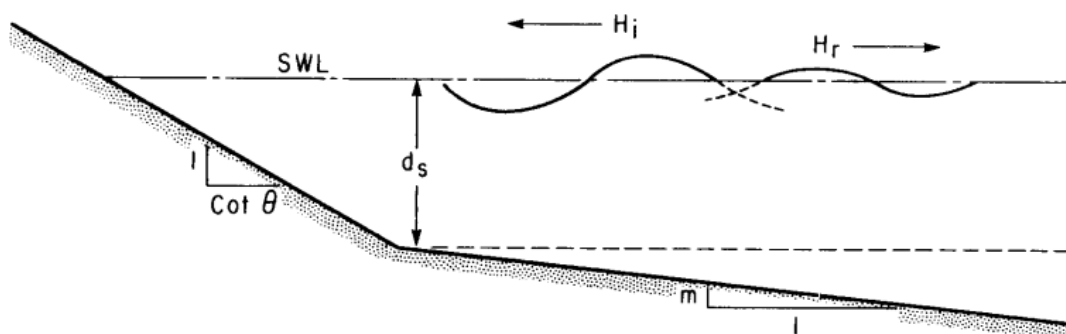
ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกน้ำกับความเร็วคลื่นในปรากฏการณ์การหักเหของคลื่นน้ำนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับการหักเหของแสงที่สามารถอธิบายได้จากกฎของสเนลล์ (Snell's Law) (U.S.CERC, 1984) สำหรับการศึกษาคั้งนี้พิจารณาเฉพาะคลื่นที่มีทิศทางตั้งฉากกับชายฝั่งเท่านั้น ดังนั้นจึงไม่พิจารณาผลของการหักเหของคลื่น

2.2.3 การสะท้อนของคลื่น

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะกับระดับท้องน้ำที่มีความลาดชันท้องน้ำมากขึ้นหรือโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น อันเป็นรอยต่อระหว่างตัวกลาง คลื่นจะสะท้อนกลับในตัวกลางเดิมที่วิ่งเคลื่อนที่เข้าปะทะ ดังรูปที่ 2-3 แสดงการสะท้อนของคลื่น โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนของคลื่น (wave reflection coefficient) ดังสมการที่ (2-2)

$$K_{\text{reflection}} = \frac{H_r}{H_i} \quad (2-2)$$

เมื่อ $K_{\text{reflection}}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น H_r คือ ความสูงคลื่นสะท้อน (reflection wave height) และ H_i คือ ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ฝั่ง (incident wave height)



รูปที่ 2-3 การสะท้อนของคลื่น (US.CERC, 1984)

2.2.4 การกระจายของคลื่น

การกระจายของคลื่น (wave diffraction) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะสิ่งกีดขวาง เช่น โครงสร้างเขื่อนกันคลื่น โดยคลื่นจะเกิดการกระจายเป็นรัศมีวงกลมโดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ปลายโครงสร้างเข้าสู่ด้านหลังโครงสร้างที่คลื่นนั้นไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ สำหรับรายละเอียดการกระจายของคลื่นจะแสดงในส่วนของหัวข้อ 2.4.2 เกี่ยวกับการส่งผ่านของคลื่นของโครงสร้างเขื่อนพันน้ำแบบหินทิ้ง แบบจำลอง 3 มิติ

2.2.5 การแตกตัวของคลื่น

การแตกตัวของคลื่น (wave breaking) เป็นปัจจัยที่สำคัญของการลดพลังงานของคลื่น โดยการแตกตัวของคลื่นจะเกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ ดังนี้

- 1) การแตกตัวของคลื่นในน้ำลึก เกิดขึ้นเมื่อความชันของคลื่นที่เคลื่อนที่ในน้ำลึกมีความชันคลื่น (wave steepness, H/L) เท่ากับความชันคลื่นสูงสุด (limiting steepness, $H/L \sim 0.142$) ความเร็วของอนุภาคน้ำที่สันคลื่นจะเท่ากับความเร็วคลื่น คลื่นจะไม่สามารถคงรูปลักษณะคลื่นไว้ได้จึงเกิดการแตกตัวขึ้น
- 2) การแตกตัวของคลื่นในน้ำตื้น ความชันคลื่นสูงสุดที่เป็นตัวควบคุมการแตกตัวของคลื่นจะมีค่าลดลง โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยของระดับความลึกน้ำต่อความยาวคลื่นและความลาดชันของชายฝั่ง จากการศึกษาของ Goda (1978, อ้างอิงใน Masataro et al., 1994) ได้เสนอความสัมพันธ์ของดัชนีการแตกตัว เรียกว่า Goda's breaker index โดยคำนึงถึงความชันบริเวณด้านหน้าของเขื่อนกันคลื่น ดังสมการที่ (2-3)

$$\frac{d_B}{L} = A(1 - \exp(-1.5 \frac{ph_B}{L}(1 + 15 \tan^{1.33} \alpha))) \quad (2-3)$$

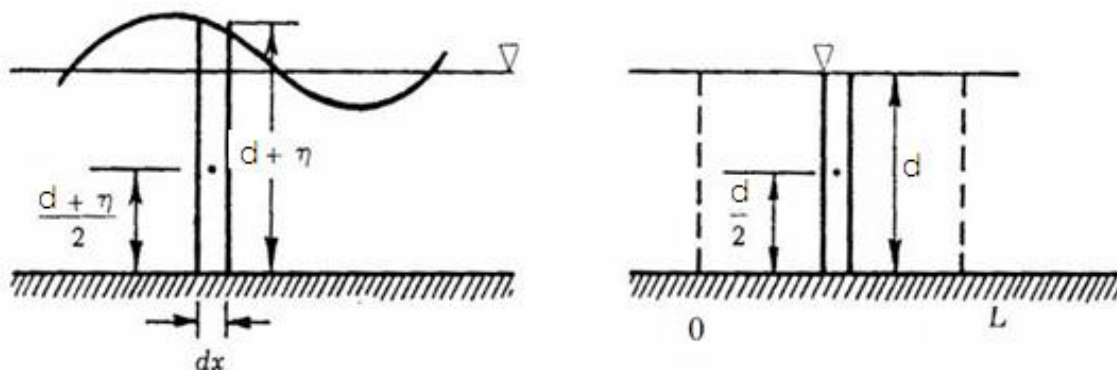
เมื่อ d_B คือ ความลึกคลื่นแตกตัว (breaking depth) h_B คือ ความสูงคลื่นแตกตัว (breaking wave height) L คือ ความยาวคลื่น A คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.15 และ α คือ ความชันด้านหน้าโครงสร้างเขื่อน

2.3 พลังงานของคลื่น

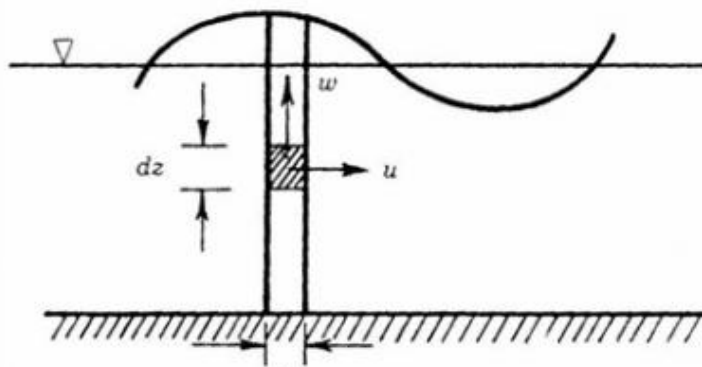
พลังงานของคลื่นเป็นผลรวมของพลังงานศักย์ (potential energy) กับพลังงานจลน์ (kinetic energy) โดยพลังงานศักย์นั้นได้แก่มวลน้ำที่อยู่เหนือตำแหน่งที่พิจารณา ดังรูปที่ 2-4 ไม่คำนึงถึงแรงตึงผิวของน้ำและ พลังงานจลน์เกิดจากความเร็วมวลน้ำที่เคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2-5 (Ippen, 1966; US.CERC., 1984)

พลังงานศักย์ เป็นพลังงานที่เกิดจากมวลน้ำ พิจารณาจากมวลน้ำในส่วนของผิวน้ำอิสระที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือมวลน้ำในลูกคลื่นพิจารณาจากท้องน้ำ ดังสมการที่ (2-4) และ (2-5)

$$E_p = E_{p1} - E_{p2} \quad (2-4)$$



รูปที่ 2-4 การพิจารณาพลังงานศักย์ของคลื่น (Ippen, 1966)



รูปที่ 2-5 การพิจารณาพลังงานจลน์ของคลื่น (Ippen, 1966)

เมื่อ E_p คือ พลังงานศักย์รวมของคลื่นต่อหนึ่งความกว้างสันคลื่น E_{p1} คือ พลังงานศักย์ที่พิจารณาจากท้องน้ำจนถึงผิวน้ำอิสระ E_{p2} คือ พลังงานศักย์ที่พิจารณาจากท้องน้ำจนถึงระดับน้ำนิ่ง

$$E_p = \frac{\rho g}{2} \int_0^L (d + \eta)^2 dx - \frac{\rho g}{2} \int_0^L (d)^2 dx \tag{2-5}$$

เมื่อ d คือ ความลึกน้ำ η คือ ระยะการเปลี่ยนแปลงผิวน้ำในแนวตั้งจากระดับผิวน้ำนิ่ง ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก และ L คือ ความยาวคลื่น

โดยพลังงานจลน์พิจารณาจากความเร็วนุภาคน้ำที่เคลื่อนที่ได้ผิวน้ำ สามารถคำนวณพลังงานจลน์ได้ดังสมการที่ (2-6)

$$E_k = \frac{\rho}{2} \int_0^L \int_{-d}^{\eta \approx 0} (u^2 + w^2) dz dx \tag{2-6}$$

เมื่อ E_k คือ พลังงานจลน์รวมของคลื่นต่อหนึ่งความกว้างสันคลื่น u คือ ความเร็วของอนุภาคในแนวราบ และ W คือ ความเร็วของอนุภาคในแนวตั้ง

จากทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย เมื่อคำนวณพลังงานศักย์จากระดับน้ำนิ่ง (still water level, SWL) และคลื่นทั้งหมดที่เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน พลังงานศักย์และพลังงานจลน์นั้นมีค่าเท่ากัน และพลังงานคลื่นรวมใน 1 ความยาวคลื่นต่อความกว้างของสันคลื่นหนึ่งหน่วย ดังสมการที่ (2-7)

$$E = E_p + E_k = \frac{\rho g H^2 L}{16} + \frac{\rho g H^2 L}{16} = \frac{\rho g H^2 L}{8} \quad (2-7)$$

เมื่อ E คือ พลังงานรวมของคลื่น ต่อ 1 หน่วยความกว้างของสันคลื่น E_p คือ พลังงานศักย์ E_k คือ พลังงานจลน์ และ H คือ ความสูงคลื่น

เมื่อพิจารณาพลังงานของคลื่นเฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (total average wave energy per unit area, \bar{E}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2-8)

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

Ippen (1966) กล่าวว่า พลังงานของคลื่นสามารถวิเคราะห์เชิงความถี่ด้วยวิธีการแปลงอนุกรมฟูริเยร์ (fourier series) แต่กระบวนการแปลงต้องพิจารณาวิธีที่มีความสัมพันธ์ในทอมความสูงคลื่นยกกำลังสอง ดังเช่น วิธีการวิเคราะห์ด้วย power spectral energy (PSE) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพลังงานของคลื่นกับความถี่ โดยพลังงานของคลื่นสามารถหาได้จากการแปลงอนุกรมฟูริเยร์ ดังสมการที่ (2-9) และสมการที่ (2-10)

$$|\eta(x, n)|^2 = \frac{1}{8} (H_{f1}^2(x) + H_{f2}^2(x) + H_{f3}^2(x) + \dots + H_{fn}^2(x)) \quad (2-9)$$

$$E = E_p + E_k = \frac{\rho g L |\eta(x, n)|^2}{16} + \frac{\rho g L |\eta(x, n)|^2}{16} = \frac{\rho g L |\eta(x, n)|^2}{8} \quad (2-10)$$

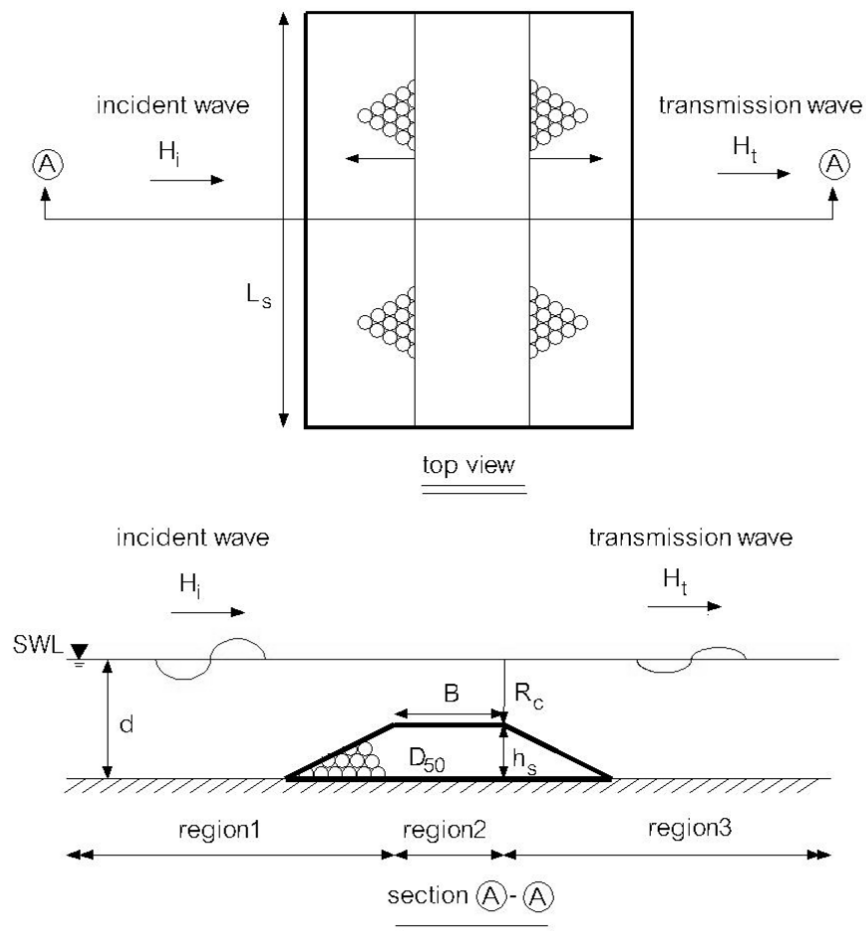
เมื่อ $|\eta(x, n)|$ คือ การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำต่อเวลา และ H_n คือ ความสูงคลื่นที่ถูกแปลงมาจากอนุกรมฟูริเยร์ที่ความสูงลำดับที่ i

2.4 การศึกษาที่ผ่านมาของการส่งผ่านของคลื่น

ปัจจัยการออกแบบเขื่อนกันคลื่นที่มีความสำคัญ คือ การเปลี่ยนแปลงคลื่น (wave transformation) ที่ลดลง หลังจากคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (wave transmission coefficient, K_t) คำนวณจากอัตราส่วนความสูงคลื่นด้านหลังโครงสร้างเขื่อน (transmission wave height, H_t) ต่อความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ฝั่ง (incident wave height, H_i) และแสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ดังรูปที่ 2-6

การศึกษาที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะศึกษาการส่งผ่านของคลื่นของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำด้วยแบบจำลอง 2 มิติ ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นและโครงสร้างเฉพาะการซึมผ่านโครงสร้าง (infiltration) และการข้ามสันโครงสร้าง (overtopping) เท่านั้น แต่เมื่อนำมาประยุกต์ใช้การส่งผ่านของคลื่นจริงที่มีความซับซ้อนและเคลื่อนตัวแบบ 3 มิติ พบว่า การส่งผ่านของคลื่นที่คำนวณจากแบบจำลอง 2 มิติ มีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากไม่ได้พิจารณาผลของการกระจายของคลื่น (diffraction) บริเวณด้านหลังโครงสร้างที่เคลื่อนที่เข้ามาจากปลายของโครงสร้างด้วย (Japanese Manual, 1988 (อ้างอิงใน Yoshioka et al., 1993); Lamberti et al., 2005; Calabrese et al., 2008 และ Rao et al., 2009) ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีความสนใจพฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่นด้วยแบบจำลอง 3 มิติ ที่มีผลของการกระจายของคลื่นบริเวณด้านหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ และกำหนดให้อัตราส่วนของความสูงคลื่นด้านหลังโครงสร้างเขื่อน ที่มีผลของทั้งการซึมผ่านโครงสร้าง การข้ามสันโครงสร้าง และการกระจายตัว ต่อความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ฝั่ง เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม (wave global transmission coefficient K_{gt})

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงคลื่นบริเวณด้านหลังเขื่อนกันคลื่น จำแนกตามประเภทเขื่อนกันคลื่นและแนวทางการศึกษาจากแบบจำลองได้ดังตารางที่ 2-2 และได้อธิบายการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการส่งผ่านของคลื่นของเขื่อนกันคลื่นพ่นน้ำและใต้น้ำ แบบ 2 มิติ และการส่งผ่านของคลื่นของเขื่อนกันคลื่นพ่นน้ำ แบบ 3 มิติ ในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2-6 พารามิเตอร์ของเขื่อนกันคลื่นแบบใต้น้ำ

ตารางที่ 2-2 การเปลี่ยนแปลงคลื่นหลังเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้ง

การส่งผ่านของคลื่น (wave transmission)	เขื่อนกันคลื่นพ่นน้ำแบบหินทิ้ง (emerged rubble mound breakwater)	เขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง (submerged rubble mound breakwater)
แบบจำลอง 2 มิติ	การซึมผ่านโครงสร้าง (infiltration)	การซึมผ่านโครงสร้าง (infiltration) การข้ามล้นโครงสร้าง (overtopping)
แบบจำลอง 3 มิติ	การซึมผ่านโครงสร้าง (infiltration) การกระจายของคลื่น (diffraction)	การซึมผ่านโครงสร้าง (infiltration) การข้ามล้นโครงสร้าง (overtopping) การกระจายของคลื่น (diffraction)

2.4.1 การส่งผ่านของคลื่นของเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำและใต้น้ำแบบหินทิ้ง แบบ 2 มิติ

การศึกษาที่ผ่านมาของเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำและใต้น้ำแบบหินทิ้งด้วยแบบจำลอง 2 มิติ ทั้งแบบจำลองกายภาพและคณิตศาสตร์ สามารถอธิบายการส่งผ่านของคลื่นได้ดังต่อไปนี้

เขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้ง เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ด้านหน้าโครงสร้าง คลื่นจะสะท้อนและแตกตัวตั้งแต่บริเวณความลาดชันด้านหน้าโครงสร้าง คลื่นจะไม่สามารถไหลข้ามล้นสันโครงสร้างได้ เนื่องจากลักษณะของสันโครงสร้างอยู่สูงกว่าระดับน้ำและเพียงพอที่จะป้องกันการไหลข้ามล้นของคลื่นได้ ดังนั้นการส่งผ่านของคลื่นของเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้งเพื่อเข้าสู่บริเวณด้านหลังโครงสร้างจึงมีเฉพาะการซึมผ่านโครงสร้าง (infiltration) เนื่องจากวัสดุโครงสร้างเป็นหินทิ้งจึงยอมให้น้ำซึมผ่านได้ (Van der Meer et al., 2005)

เขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง เมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาถึงบริเวณด้านหน้าโครงสร้าง คลื่นจะสะท้อนของคลื่นและการแตกตัวบริเวณความชันด้านหน้าโครงสร้าง หลังจากนั้นคลื่นจะเคลื่อนที่สู่บริเวณสันโครงสร้าง รูปแบบคลื่นมีความผันผวนเป็นอย่างมาก จากการสูญเสียพลังงานภายในของคลื่น ได้แก่ ความเสียดทานบนพื้นผิวของสันโครงสร้าง การแตกตัวของคลื่น การปั่นป่วนของกระแสน้ำที่เคลื่อนที่ย้อนกลับผ่านสันโครงสร้าง รวมทั้งแรงต้านการเคลื่อนที่ผ่านวัสดุโครงสร้าง เป็นต้น ดังนั้นการส่งผ่านของคลื่นเข้าสู่บริเวณด้านหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำจะมีผลของทั้งการข้ามล้นโครงสร้าง (overtopping) และการซึมผ่านโครงสร้าง (infiltration) (Chen et al., 2007)

บริเวณด้านหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำช่วงระยะแรกยังคงมีการแตกตัวของคลื่น เป็นระยะทางประมาณ 0.50-1.00 ของความยาวคลื่นนับจากปลายของสันด้านท้ายโครงสร้าง (Goda, 1969 และ Ahrens, 1987) จากนั้นคลื่นจะก่อตัวเกิดคลื่นลูกใหม่และเริ่มมีลักษณะเป็นระเบียบและสม่ำเสมอมากขึ้นตามระยะทาง (Van der Meer et al., 2005) ระดับน้ำทะเลเฉลี่ย (mean sea level) หลังเขื่อนมีการยกตัวเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการข้ามล้นโครงสร้างและเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า damping wave คล้ายกับปรากฏการณ์น้ำกระโดด ในการไหลแบบทางน้ำเปิด (Diskin et al., 1970; Groenewoud et al., 1996 และ Loveless et al., 1999)

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าถึงแนวชายฝั่งทะเล ความสูงคลื่นที่วิ่งตามแนวลาดชายฝั่ง (wave runup) และความเร็วคลื่น (celerity) บริเวณหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำมีปริมาณลดลง เนื่องจากการสูญเสียพลังงานของคลื่นหลังจากที่คลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง (Chen et al., 2007)

การศึกษาและวิจัยที่ผ่านมาของการส่งผ่านของคลื่น จากแบบจำลอง 2 มิติ พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นกับตัวแปรอื่นๆ กรณีเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ

และได้นำแบบหินทิ้ง ที่มีขอบเขตของการศึกษาครอบคลุมหรือใกล้เคียงกับช่วงของการออกแบบทดลองครั้งนี้ กล่าวโดยสังเขปดังนี้

Ahrens (1987) ศึกษาการส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำและได้นำแบบหินทิ้ง ตัวแปรของการศึกษา ได้แก่ ความชันคลื่น ความสูงโครงสร้าง และขนาดของวัสดุโครงสร้าง ซึ่งผลการศึกษารูปดังนี้

- 1) เขื่อนกันคลื่นได้นำแบบหินทิ้ง ความสูงของระดับน้ำเหนือสันโครงสร้างและความชันคลื่นส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น
- 2) เขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้ง การซึมผ่านโครงสร้างส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น ซึ่งวัสดุที่มีขนาดคลื่นจะซึมผ่านโครงสร้างได้น้อยกว่าวัสดุที่มีขนาดเดียวกัน เนื่องจากวัสดุที่มีขนาดคลื่นจะมีพื้นที่ของการซึมผ่านโครงสร้างน้อยกว่าวัสดุที่มีขนาดเดียวกัน คลื่นจึงซึมผ่านโครงสร้างได้น้อยกว่า ความชันคลื่นมากจะซึมผ่านโครงสร้างได้ดีกว่าความชันคลื่นน้อย เนื่องจากความชันคลื่นมากจะมีพลังงานของคลื่นที่มากกว่าความชันคลื่นน้อย คลื่นจึงซึมผ่านโครงสร้างได้มากกว่า

Van der Meer และ Deamen (1994) ศึกษาการส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำและได้นำแบบหินทิ้ง จากข้อมูลผลการทดลองที่ผ่านมาในอดีต มีคุณสมบัติของตัวแปรของการส่งผ่านคลื่น ซึ่งมีค่า R_c/H_i ในช่วงระหว่าง -8.7 ถึง 4.0 ดังตารางที่ 2-3 จากการศึกษาได้เสนอสมการการหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น ดังสมการที่ (2-11)

$$K_t = a \left(\frac{R_c}{D_{50}} \right) + b \quad (2-11)$$

เมื่อ K_t คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น R_c คือ ระยะห่างของสันโครงสร้างจากระดับน้ำนิ่ง (crest freeboard) ซึ่งเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำค่าระยะห่างของสันโครงสร้างสร้างจากระดับน้ำนิ่งมีเครื่องหมายเป็นบวก เขื่อนกันคลื่นได้นำมีเครื่องหมายเป็นลบ D_{50} คือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุโครงสร้าง a, b เป็นค่าคุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง ดังสมการที่ (2-12) และสมการที่ (2-13)

$$a = 0.03 \left(\frac{H_i}{D_{50}} \right) - 0.024 \quad (2-12)$$

$$b = -5.42 \left(\frac{H_i}{L}\right) + 0.0323 \left(\frac{H_i}{D_{50}}\right) - 0.0017 \left(\frac{B}{D_{50}}\right)^{1.84} + 0.51 \quad (2-13)$$

เมื่อ H_i คือ ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง B คือ ความกว้างของโครงสร้าง และ L คือ ความยาวคลื่น

D'Angremond et al. (1996) ศึกษาการส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำและใต้น้ำแบบหินทิ้ง จากข้อมูลผลการศึกษาที่ผ่านมาในอดีตและเป็นข้อมูลชุดเดียวกับการศึกษาของ Van der Meer และ Deamen (1994) มีคุณสมบัติของตัวแปรของการส่งผ่านคลื่น ซึ่งมีค่า R_c/H_i ในช่วงระหว่าง -8.7 ถึง 4.0 ดังตารางที่ 2-3 จากผลการวิเคราะห์ที่ได้เสนอสมการการหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น ดังสมการที่ (2-14)

$$K_t = -0.4 \left(\frac{R_c}{H_i}\right) + 0.64 \left(\frac{B}{H_i}\right)^{-0.31} (1 - \exp(-0.5\xi)) \quad (2-14)$$

เมื่อ ξ (Iribarren number) คือ ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความชันบริเวณด้านหน้าโครงสร้าง (α) กับความชันคลื่นที่เข้าปะทะโครงสร้าง (H_i/L) ตามสมการที่ (2-15)

$$\xi = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{H_i/L}} \quad (2-15)$$

Seabrook และ Hall (1998) ศึกษาการส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง มีคุณสมบัติของตัวแปรของการส่งผ่านคลื่น ซึ่งมีค่า R_c/H_i ในช่วงระหว่าง -3.9 ถึง 0 ดังตารางที่ 2-3 ได้เสนอสมการการหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น ดังสมการที่ (2-16)

$$K_t = 1 - \exp\left(-0.65 \frac{R_c}{H_i} - 1.09 \frac{H_i}{B}\right) + 0.047 \left(\frac{BR_c}{LD_{50}}\right) - 0.067 \left(\frac{H_i R_c}{BD_{50}}\right) \quad (2-16)$$

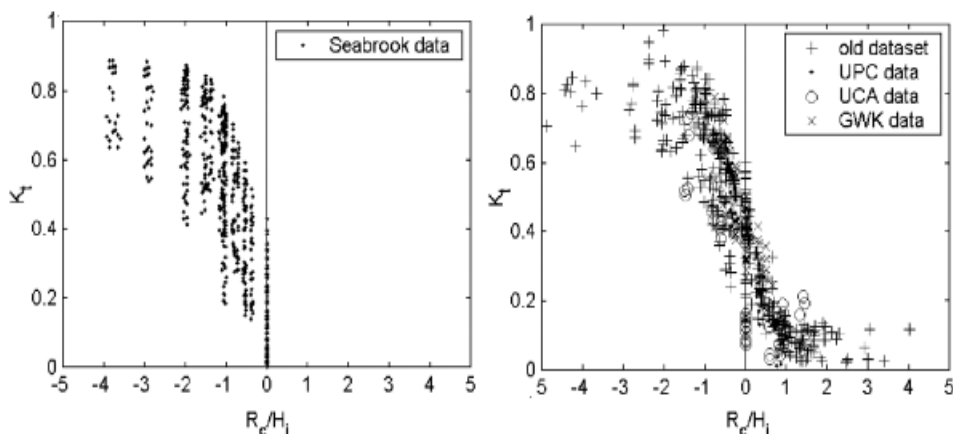
Van der Meer et al. (2005) ศึกษาการส่งผ่านของคลื่นของเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำและใต้น้ำแบบหินทิ้ง ซึ่งได้วิเคราะห์ข้อมูลจากผลการศึกษาหลายแหล่ง ได้แก่ ข้อมูลที่รวบรวมโดย Van der Meer และ Deamen (1994) D'Angremond et al. (1996) การทดลองของ Seabrook และ Hall (1998) และสถาบันการศึกษาต่างๆ ได้แก่ University of Cantabria (UCA) Polytechnic of Catalonia (UPC) และ Coastal Research Centre in Hanover (GWK) (แสดงรายละเอียดดัง

ตารางที่ 2-3 และรูปที่ 2-7 ผลการวิเคราะห์ที่ได้เสนอสมการการหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น
 ดังสมการที่ (2-17)

$$K_t = 0.35 \left(\frac{h_s}{H_i}\right) + 0.51 \left(\frac{B}{H_i}\right)^{-0.65} (1 - \exp(-0.41\xi)) \quad (2-17)$$

ตารางที่ 2-3 คุณสมบัติของตัวแปรของการส่งผ่านของคลื่น แบบจำลอง 2 มิติ เพื่อการวิเคราะห์
 การส่งผ่านของคลื่น โดย Van der Meer et al. (2005)

Database	Armor type	R_c/H_i	B/H_i	B/L	H_i/D_{50}	H_i/d	H_i/L	Tests
Van der Meer และ Deamen (1994), D'Angremond et al. (1996) (old dataset)	rubble mound	-8.7	0.37	0.009	0.3	0.03	0.0002	398
		4.0	43.48	0.51	6.62	0.62	0.06	
Seabrook และ Hall (1998)	rubble mound	-3.9	1.38	0.04	0.78	0.11	0.01	632
		0	74.47	1.66	3.2	0.58	0.06	
UPA (2001)	rubble mound	-1.5	2.67	0.04	0.84	0.1	0.002	53
		1.53	30.66	0.4	2.42	0.37	0.02	
UPC (2001)	rubble mound	-0.37	2.66	0.07	2.65	0.17	0.02	24
		0.88	8.38	0.24	4.36	0.33	0.02	
GWK (2001)	rubble mound	-0.76	1.05	0.02	1.82	0.31	0.034	45
		0.66	8.13	0.21	3.84	0.61	0.01	



รูปที่ 2-7 ข้อมูลวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น โดย Van der Meer et al. (2005)

2.4.2 การส่งผ่านคลื่นเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้ง แบบจำลอง 3 มิติ

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้งจากแบบจำลอง 3 มิติ คลื่นบางส่วนจะสูญเสียพลังงานไปหรือถูกสะท้อนกลับ และคลื่นบางส่วนสามารถเคลื่อนที่ซึมผ่านโครงสร้างและกระจายตัวเข้าไปในส่วนที่อยู่ด้านหลังเขื่อนหรือบริเวณอับคลื่น ดังรูปที่ 2-8 แสดงสันคลื่นรูปวงกลมบนปลายของเขื่อนกันคลื่น ที่เรียกว่า จุดกระจาย (diffraction point)

เมื่อพิจารณาการคำนวณความสูงคลื่นที่อยู่ในบริเวณอับคลื่นนั้นจะอาศัยค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของคลื่น (wave diffraction coefficient, K_d) ซึ่งเป็นอัตราส่วนความสูงคลื่น ณ ตำแหน่งใดๆ ต่อคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ฝั่ง โดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง ได้แก่ ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นกระทบทำมุมกับสิ่งกีดขวาง (Θ) ทิศทางการกระจายของคลื่นทำมุมกับสิ่งกีดขวาง (β) และอัตราส่วนของรัศมีการกระจายต่อความยาวคลื่น (r/L) (Penny และ Price, 1952; Wiegel, 1962; Dean และ Dalrymple, 1984; Goda, 1985 และ Sorensen, 1993)

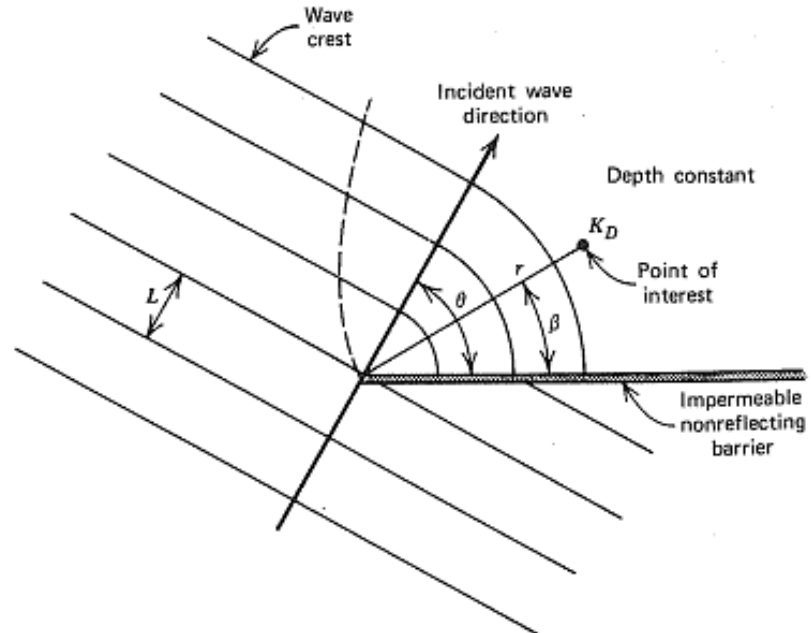
Penny และ Price (1952) ได้พัฒนาสมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของคลื่นในกรณีที่คลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะเขื่อนกันคลื่น โดยคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ามาปะทะถือว่าเป็นคลื่นแบบเดียวกัน และมีคุณสมบัติของคลื่นคงที่

Wiegel (1962) ได้ทำการรวบรวมผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของคลื่นกรณีคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น จาก Penny และ Price (1952) เป็นกราฟความสัมพันธ์ (ดังรูปที่ 2-9) และตารางคำนวณ เพื่อสะดวกต่อการใช้งาน และได้ถูกนำมาเป็นแนวทางการออกแบบเขื่อนกันคลื่น (US.CERC., 1984)

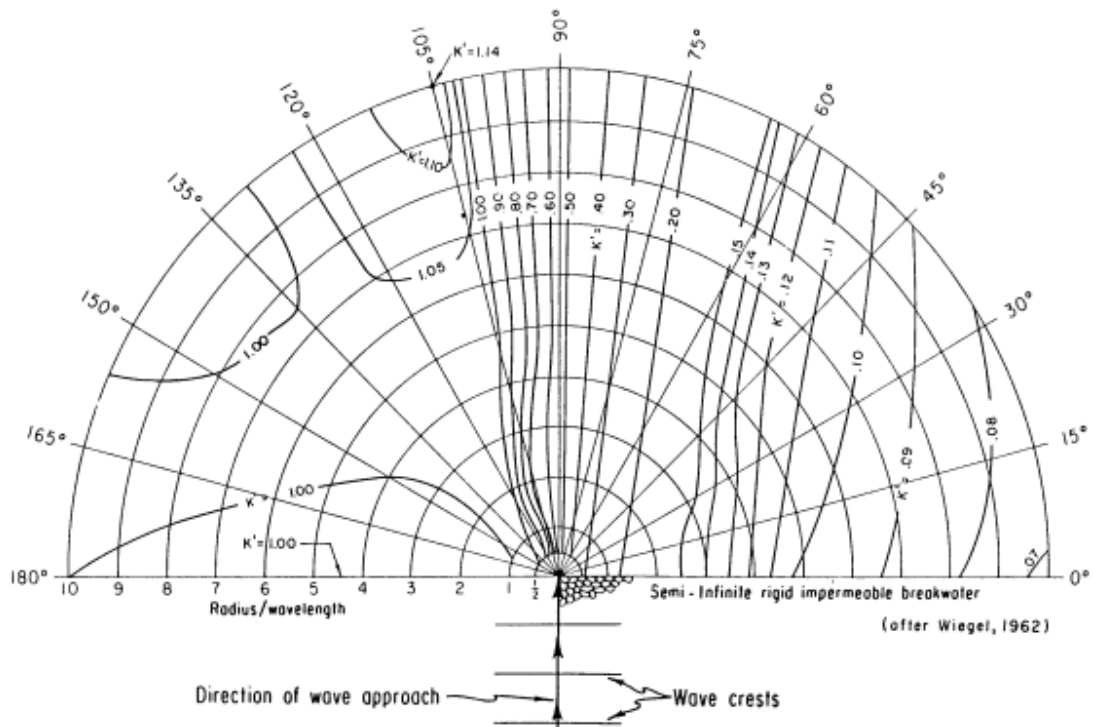
2.5 รูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำ

รูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำเป็นผลมาจากการเหนี่ยวนำของพลังงานจลน์ของคลื่น สำหรับรูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำจะมีความซับซ้อนมากกว่าเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ เนื่องจากเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำมีผลของการข้ามล้นโครงสร้าง (overtopping) เข้ามา มีอิทธิพลต่อรูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำด้วย (Owen, 1980; Van der Meer และ Janssen, 1995 และ Hedges, 1998)

ลักษณะการหมุนวนด้านหลังโครงสร้างที่แตกต่างกันย่อมส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของตะกอนชายฝั่ง การเกิดการทับถมแบบต่างๆ ดังเช่น แผลมทราย (salient) แบบแผลมทรายยื่นติดกับเขื่อนกันคลื่น (tombolo) เป็นต้น (US.CERC., 1984 และ Japanese Manual, 1988 (อ้างอิงใน Yoshioka et al., 1993))



รูปที่ 2-8 การกระจายของคลื่น (Sorensen, 1993)



รูปที่ 2-9 กราฟความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของคลื่น
กรณีทำมุมตั้งฉากกับโครงสร้าง (US.CERC., 1984)

การศึกษาและวิจัยที่ผ่านมาของการรูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำบริเวณด้านหลังเขื่อนกันคลื่น กล่าวโดยสังเขปได้ดังนี้

Browder et al. (1994) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งทะเล เนื่องจากการก่อสร้างเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง จากแบบจำลองกายภาพ 3 มิติ โดยจำลองชายหาดบริเวณ Palm Beach รัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่มีคลื่นเข้าปะทะโครงสร้างแบบคลื่นสม้าเสมอ และมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ผลการศึกษาพบว่า รูปแบบกระแสน้ำบริเวณรอบเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ มีลักษณะแนวโน้มหมุนวนและเลี้ยวเบนออกจากแนวกึ่งกลางด้านหลังโครงสร้าง ดังรูปที่ 2-10 ทำให้ตะกอนบริเวณด้านหลังใกล้โครงสร้างเขื่อนบางส่วนเคลื่อนที่ออกสู่ทะเลตามการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำ

Nobuoka et al. (1996) ศึกษารูปแบบกระแสน้ำบริเวณรอบเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง จากแบบจำลองกายภาพ 3 มิติ มีคลื่นเข้าปะทะโครงสร้างแบบคลื่นสม้าเสมอ ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ จากการเก็บข้อมูลรูปแบบกระแสน้ำทั้งที่ผิวน้ำ (surface water) และท้องน้ำ (bottom water) โดยการบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของสารเคมีด้วยกล้องวิดีโอ ผลจากการศึกษาพบว่า รูปแบบกระแสน้ำบริเวณรอบเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ มีแนวโน้มที่พัดพาตะกอนหมุนวนรอบเขื่อนกันคลื่นในทิศทางออกจากแนวชายฝั่งทั้งจากข้อมูลผิวน้ำและท้องน้ำ ดังรูปที่ 2-11

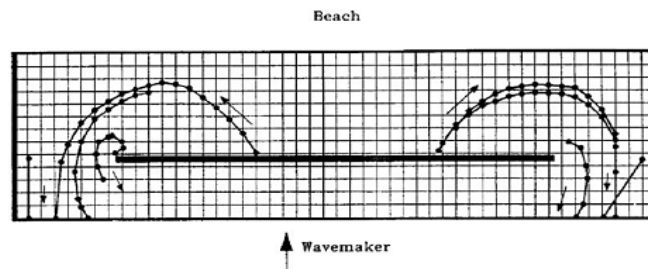
Groenewoud et al. (1996) ศึกษารูปแบบพฤติกรรมของกระแสน้ำรอบเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง แบบแยกออกจากกัน (detached breakwater) จากแบบจำลองกายภาพ 3 มิติ ซึ่งมีคลื่นเข้าปะทะโครงสร้างแบบคลื่นสม้าเสมอ และมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ จากการศึกษาพบว่า บริเวณรอบเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำมีรูปแบบกระแสน้ำหมุนวนพัดพาวัสดุท้องน้ำเคลื่อนที่ออกไป แม้ว่าจะมีการก่อสร้างเขื่อนกันคลื่นตามแนวชายฝั่งก็ยังคงมีการกัดเซาะเกิดขึ้นเนื่องจากคลื่นที่เข้าปะทะโครงสร้างมีพลังงานของคลื่นที่สูง โครงสร้างเขื่อนกันคลื่นจึงช่วยเพียงบรรเทาพลังงานของคลื่นลงและชะลอการกัดเซาะชายฝั่งที่เกิดขึ้น และยังพบว่าระยะห่างของโครงสร้างจากชายฝั่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่ง

Loveless และ MacLeod (1999) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำและรูปแบบพฤติกรรมของกระแสน้ำรอบเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำและใต้น้ำแบบหินทิ้ง แบบแยกออกจากกัน จากแบบจำลองกายภาพ 3 มิติ โดยการจำลองบริเวณชายหาด Elmer ประเทศอังกฤษ มีคลื่นเข้าปะทะโครงสร้างแบบคลื่นสม้าเสมอ ทิศทางของคลื่นที่เข้าปะทะโครงสร้าง เท่ากับ -20° , 0° และ 20° และมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ตามรูปที่ 2-12 ผลการศึกษาพบว่า รูปแบบการหมุนของกระแสน้ำมี

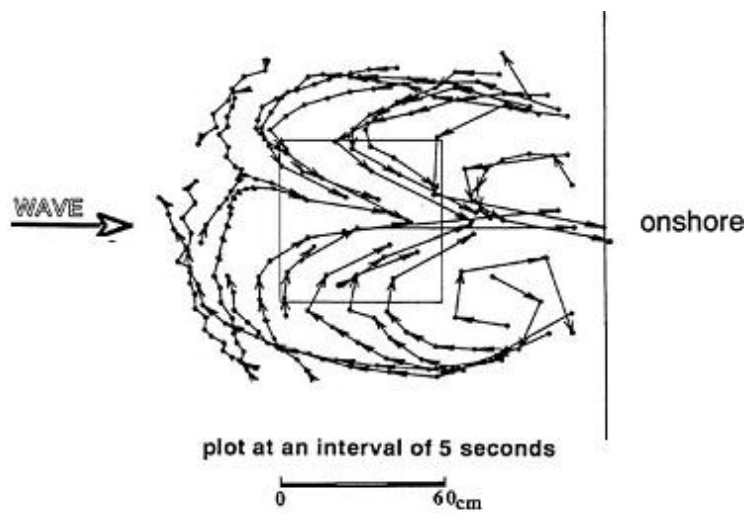
ทิศทางที่ตรงข้ามกันเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำมีรูปแบบการเคลื่อนที่หมุนเข้ากึ่งกลางเชื่อมกันคลื่น ขณะที่เชื่อมกันคลื่นใต้น้ำมีรูปแบบการเคลื่อนที่หมุนออกกึ่งกลางโครงสร้าง ดังรูปที่ 2-13

Ranasinghe (2005) ได้อธิบายการเหนี่ยวนำของพลังงานจลน์ด้านหลังเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ฝั่งเข้าปะทะเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ คลื่นจะถูกยกตัวให้สูงขึ้นขณะคลื่นเคลื่อนที่ผ่านความชันด้านหน้าโครงสร้าง เนื่องจากการผลของการเคลื่อนที่เข้าสู่ใต้น้ำ หลังจากนั้นคลื่นจะข้ามล้นบริเวณสันโครงสร้างเข้าสู่บริเวณด้านหลังโครงสร้าง และเมื่อเข้าใกล้แนวชายฝั่ง คลื่นจะหมุนวนออกจากแนวกึ่งกลางโครงสร้าง (ดังรูปที่ 2-14)

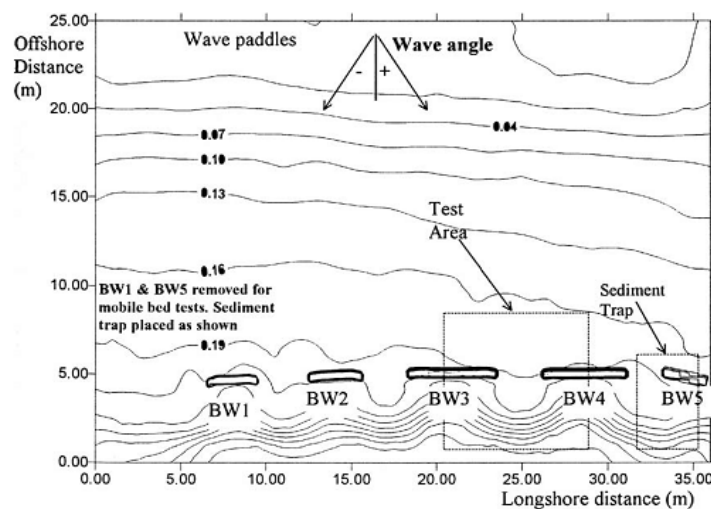
นอกจากนี้ Ranasinghe (2005) ได้กล่าวว่ารูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำด้านหลังเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำจะช่วยลดกระแสน้ำตามแนวขนานชายฝั่ง (longshore current) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำในทิศทางตรงข้ามกัน ทำให้ความเร็วของกระแสน้ำลดลง พลังงานของคลื่นลดลงตาม เมื่อพลังงานของคลื่นไม่เพียงพอที่ทำให้ตะกอนท้องน้ำเคลื่อนที่ต่อไปได้ ทำให้เกิดการทับถมของตะกอนบริเวณแนวชายฝั่งขึ้นหลังโครงสร้าง



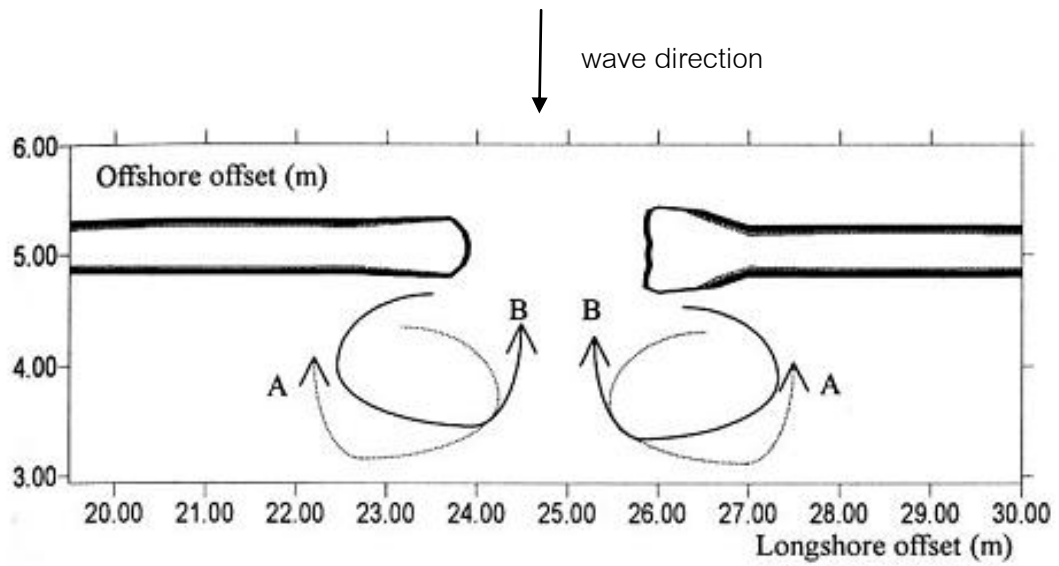
รูปที่ 2-10 การเคลื่อนที่ของกระแสน้ำหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ
(Browder et al., 1994)



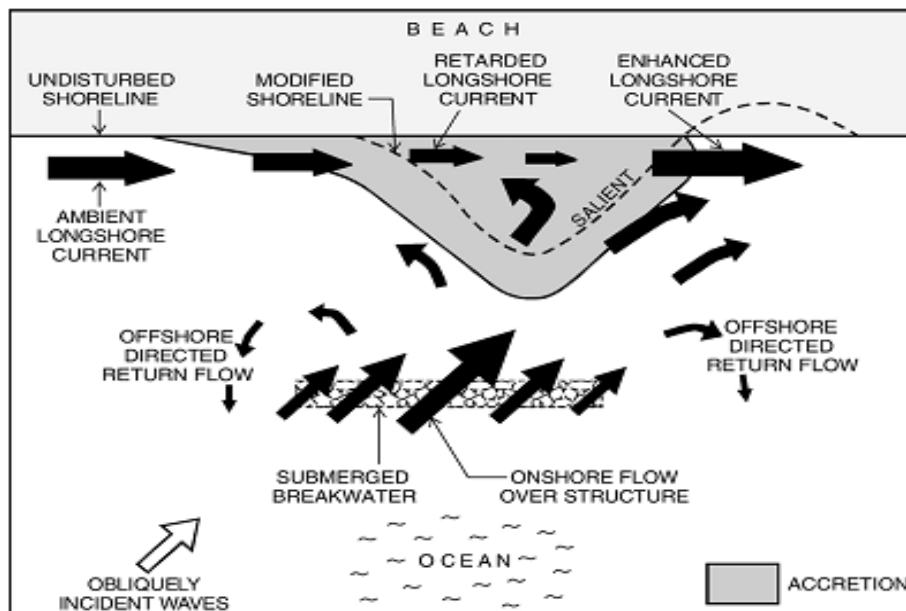
รูปที่ 2-11 การเคลื่อนที่ของกระแสน้ำหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ
(Nobuoka et al., 1996)



รูปที่ 2-12 การเปลี่ยนแปลงท้องน้ำเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ
(Loveless และ MacLeod, 1999)



รูปที่ 2-13 การเคลื่อนที่ของกระแสน้ำหลังเขื่อนกันคลื่น
 A. เขื่อนกันคลื่นพ่นน้ำ B. เขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ (Loveless และ MacLeod, 1999)



รูปที่ 2-14 การเคลื่อนที่ของกระแสน้ำหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ โดย Ranasinghe (2005)

บทที่ 3

แบบจำลองทางกายภาพ

3.1 การดำเนินการทดลอง

การศึกษานี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นและการกระจายคลื่น การเคลื่อนที่ของกระแสน้ำด้านหลังเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้ง จากแบบจำลองทางกายภาพ 3 มิติ ในอ่างจำลองคลื่น (wave basin) ณ ห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อ่างจำลองคลื่นมีเครื่องกำเนิดคลื่น ที่สามารถสร้างคลื่นที่มีคุณสมบัติขนาดต่างๆ ตามที่ต้องการได้ โดยการปรับระยะช่วงชักและความถี่ของการหมุนแกนขับ สำหรับข้อมูลการเปลี่ยนแปลงระดับผิวน้ำ (surface elevation) และความเร็วคลื่น (velocity) ใช้เครื่องมือวัดคลื่น (wave gauge) และเครื่องมือวัดความเร็วการไหล (flow velocity gauge) ในการตรวจวัดตามลำดับ

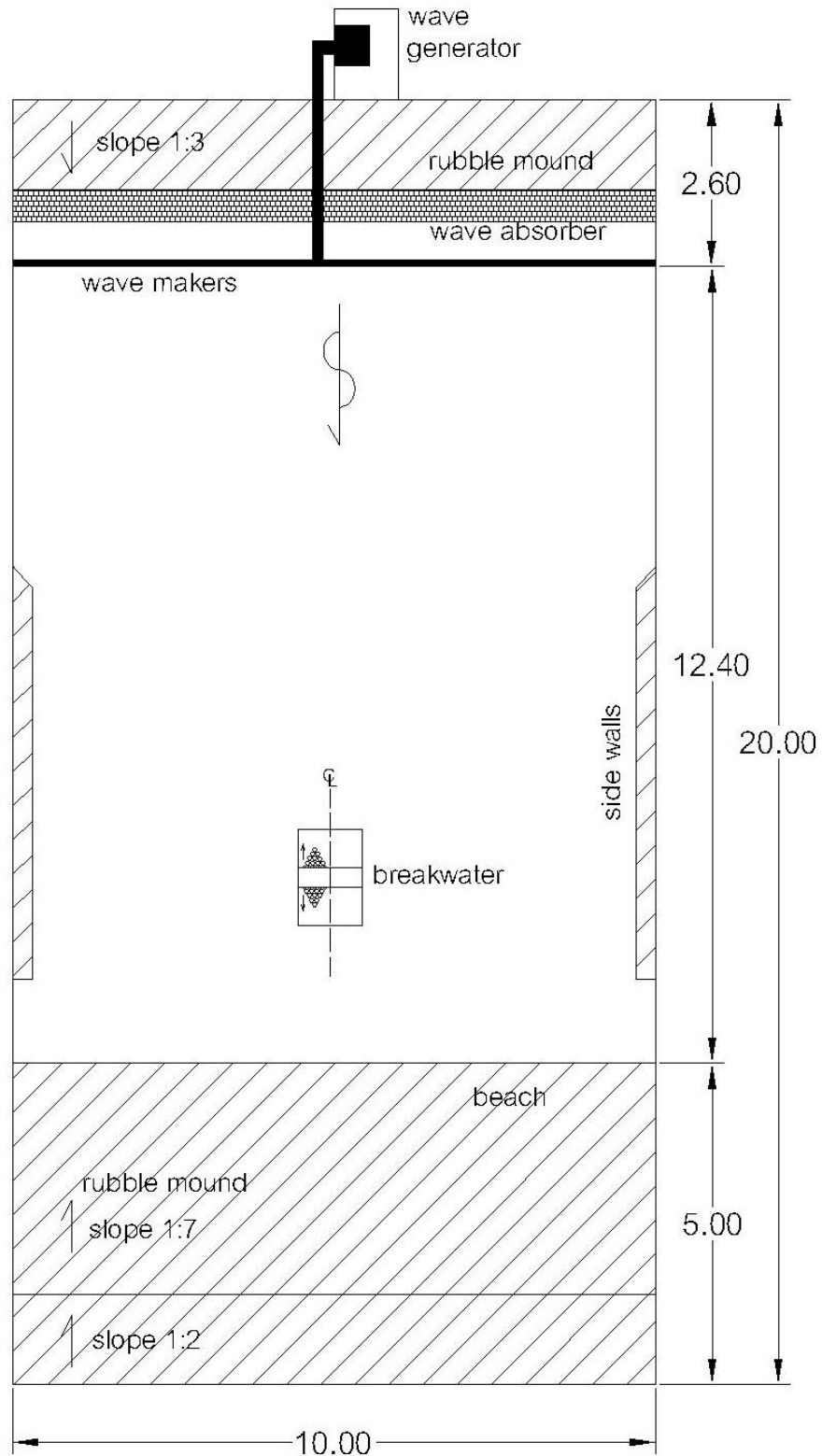
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ มีดังต่อไปนี้

- 1) อ่างจำลองคลื่น (wave basin) เป็นอ่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาดความกว้าง 10 เมตร ยาว 20 เมตร และสูง 0.70 เมตร ผนังด้านข้างติดตั้งโครงสร้างตะแกรงสลายพลังงานคลื่น เพื่อลดการสะท้อนของคลื่นเมื่อปะทะผนังด้านข้าง ปลายอ่างจำลองคลื่น มีหินสลายพลังงานคลื่น เพื่อลดการสะท้อนของคลื่น และทำให้เกิดคลื่นในอ่างจำลองคลื่น ดังรูปที่ 3-1 และรูปที่ 3-2 (รายละเอียดอ่างจำลองคลื่น แสดงในภาคผนวก ก-1)
- 2) เครื่องกำเนิดคลื่น (wave generator) เป็นชนิดปลายยึดหมุนติดกับพื้นอ่างจำลองคลื่น ด้านบนของเครื่องต่อกับส่วนขับเคลื่อน มีลักษณะเป็นแกนที่สามารถเคลื่อนที่กลับไปกลับมา ได้ตามการปรับช่วงชัก และสามารถปรับความถี่ของการหมุนแกนขับได้ (รายละเอียดเครื่องกำเนิดคลื่น แสดงในภาคผนวก ก-2)
- 3) เครื่องมือวัดคลื่น (wave gauge) สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงระดับผิวน้ำตามเวลา เพื่อหาพารามิเตอร์ของความสูงคลื่นที่มีนัยสำคัญ (significant wave height) ตามตำแหน่งการเก็บข้อมูลคลื่น การศึกษานี้ใช้แบบ CH-403A & CHT4-40 ของบริษัท Kennek ช่วงข้อมูลที่เครื่องทำการประมวลผลได้ประมาณ +/- 5 โวลต์ ความ

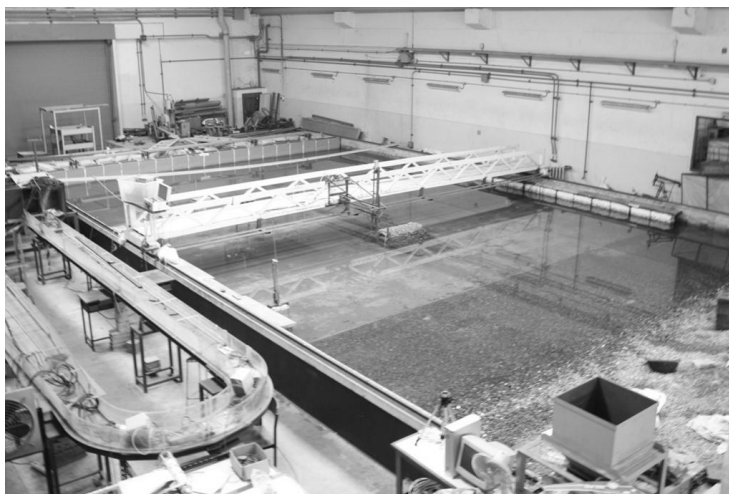
คาดเคลื่อน +/- 0.02 มิลลิเมตร ดังรายละเอียดของเครื่องมือวัดคลื่น และการเปรียบเทียบเครื่องมือ แสดงในภาคผนวก ข-1

- 4) เครื่องมือวัดความเร็วการไหล (flow velocity gauge) สามารถวัดความเร็วคลื่นตามแกน x, y และ z เพื่อหาความเร็วคลื่นตามค่าเฉลี่ยของเวลา (time average) ตามตำแหน่งการเก็บข้อมูลคลื่น การศึกษาครั้งนี้ใช้เครื่องมือวัดความเร็วการไหลรุ่น ACM-300 ของบริษัท ALEC ELECTRONICS เครื่องมือวัดความเร็วการไหลนี้มีส่วนหัวปล่อยสัญญาณคลื่นแม่เหล็ก เรียกว่า acoustic transmitter มีระยะทำงานอยู่ที่ประมาณ 5 เซนติเมตร จากหัวปล่อยสัญญาณคลื่น หรือภายในปริมาตร 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตร ช่วงข้อมูลที่เครื่องทำการประมวลผลได้ประมาณ +/- 5 โวลต์ ความคาดเคลื่อน +/- 0.1 เซนติเมตร/วินาที สำหรับความถูกต้องและแม่นยำของการตรวจวัดขึ้นกับช่วงความเร็วคลื่นเสียง (speed of sound) ที่สามารถตรวจวัดได้ อันเป็นผลจากความหนาแน่นและอุณหภูมิของของไหล สำหรับรายละเอียดเครื่องมือวัดคลื่น และการเปรียบเทียบเครื่องมือ แสดงในภาคผนวก ข-2
- 5) แผงวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (A/D converter) ข้อมูลคลื่นที่ได้จากเครื่องมือวัดคลื่นและเครื่องมือวัดความเร็วการไหล จะส่งข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์กับเวลาสู่แผงวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล และอาศัยการแสดงผลจากคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม LabVIEW ของบริษัท Nation Instruments เพื่อทำการจัดเก็บข้อมูลเป็นดิจิตอลต่อไป
- 6) เครื่องมือวัดระดับน้ำ (point gauge) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวัดระดับความลึกน้ำนิ่งก่อนและหลังการทดลอง มีความละเอียด 0.5 มิลลิเมตร
- 7) กล้องถ่ายวิดีโอและกล้องถ่ายรูป บันทึกภาพพฤติกรรมขณะทดลอง เช่น การเคลื่อนที่ของคลื่นเข้าปะทะโครงสร้าง การแตกตัวของคลื่น การกระจายของคลื่นบริเวณด้านหลังโครงสร้าง การเคลื่อนตัวของคลื่นเมื่อถึงแนวชายฝั่ง เป็นต้น



Overview of the wave basin
(dimension in meter)

รูปที่ 3-1 แบบแบ่งจำลองคลื่น



รูปที่ 3-2 ภาพถ่ายแบบจำลองอ่างจำลองคลื่น ห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 การออกแบบเขื่อนกันคลื่น

การพิจารณาการออกแบบเขื่อนกันคลื่น มีรายละเอียดของรูปร่างและขนาดโครงสร้างดังต่อไปนี้

ความลาดชันด้านหน้าและหลังโครงสร้างจะออกแบบค้ำอิงถึงเรื่องความมีเสถียรภาพของวัสดุก่อสร้างโครงสร้าง จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา US.CERC. (1984) และ Japanese Manual (1988 อ้างอิงใน Yoshioka et al., 1993) เขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำและใต้น้ำแบบหินทิ้ง นิยมออกแบบความลาดชันด้านหน้าและหลังโครงสร้าง เท่ากับ H2:V1

ขนาดหินทิ้งออกแบบตามคุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างที่สนใจ เมื่อขนาดคลื่นแตกต่างกัน ทำให้ความมีเสถียรภาพของขนาดหินทิ้งแตกต่างกัน การศึกษาครั้งนี้พิจารณาออกแบบการทดลองความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง สูงสุดไม่เกิน 5 เซนติเมตร และเลือกใช้หินที่มีมวลรวมที่มีความหนาแน่น (density) 1,500-1,700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.6) โดย US.CERC. (1984) ได้แนะนำการพิจารณาขนาดหินทิ้งแบบเฉลี่ย (mean stone size) เป็นการศึกษาของ Hudson เมื่อปี ค.ศ. 1959 ตามสมการที่ (3-1)

$$D_{50} = \frac{W_r H_i^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \theta} \quad (3-1)$$

เมื่อ D_{50} คือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุโครงสร้าง W_r คือ ความหนาแน่นแบบคิวหลวม (bulk modulus) H_i คือ ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง K_D คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความมีเสถียรภาพ (stability coefficient) สำหรับหินที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความมีเสถียรภาพขั้นต่ำ เท่ากับ $2.3 S_r$ คือ ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ และ θ คือ มุมของความลาดชันด้านหน้าโครงสร้างเขื่อน

จากการคำนวณเพื่อหาขนาดหินทิ้ง ซึ่งค่าที่ร้อยละ 50 ของการกระจายวัสดุโครงสร้าง (D_{50}) ควรมีขนาดอย่างต่ำ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร การทดสอบวัสดุที่มีภายในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้ พบว่า ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุโครงสร้าง เท่ากับ 1.2 เซนติเมตร จึงมีขนาดใหญ่เพียงพอที่ทำให้วัสดุมีเสถียรภาพต่อพลังงานของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง

เรื่องของความกว้างโครงสร้าง จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา US.CERC (1984) ได้แนะนำการพิจารณาความกว้างโครงสร้างตามสมการที่ (3-2)

$$B = nK_e \left(\frac{D_{50}}{W_r} \right)^{0.33} \quad (3-2)$$

เมื่อ B คือ ความกว้างโครงสร้าง n คือ ค่าคงที่วัสดุ (สำหรับหินประเภท limestone เท่ากับ 3) K_e คือ ค่าสัมประสิทธิ์ชั้นวัสดุ (layer coefficient) สำหรับเขื่อนกันคลื่นที่ใช้วัสดุประเภทเดียวกันทั้งหมด (reef structure) เท่ากับ 1.5

จากการคำนวณเพื่อหาความกว้างโครงสร้าง พบว่า โครงสร้างควรมีความกว้างโครงสร้างอย่างต่ำ 0.30 เมตร ดังนั้นการศึกษาคั้งนี้จึงกำหนดให้มีความกว้างโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 เมตร

สรุปการออกแบบเขื่อนแบบหินทิ้ง เป็นโครงสร้างแบบไม่ทึบน้ำ ด้านนอกเป็นกรอบโครงสร้างเหล็ก บรรจุหินขนาด D_{50} เท่ากับ 1.2 เซนติเมตร บรรจุภายในกรงลวดตาข่ายโครงเหล็ก ขนาด 0.01×0.01 เมตร กำหนดรายละเอียดโครงสร้างของความกว้างโครงสร้าง (B) เท่ากับ 0.30 เมตร ความยาวโครงสร้าง (L_s) เท่ากับ 1.00 เมตร ความลาดชันด้านหน้าและด้านหลังของเขื่อนกันคลื่น เท่ากับ H2:V1 และเปลี่ยนแปลงความสูงโครงสร้าง (h_s) 4 ระดับ ได้แก่ 0.30, 0.35, 0.40 และ 0.50 เมตร ตามรูปที่ 2-4

3.4 การออกแบบการทดลอง

การพิจารณาออกแบบการทดลอง กำหนดระดับน้ำในแอ่งคลื่น มีความลึกน้ำ (d) เท่ากับ 0.40 เมตร มีการเปลี่ยนแปลงความสูงโครงสร้าง (h_s) ทั้งสิ้น 4 ระดับ ทำการเปรียบเทียบความสูงโครงสร้างกับระดับน้ำ ดังนี้

- 1) ระดับความสูงโครงสร้างต่ำกว่าความลึกน้ำ ($h_s < d$) คือ โครงสร้างที่มีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 และ 0.35 เมตร
- 2) ระดับความสูงโครงสร้างเท่ากับความลึกน้ำ ($h_s = d$) คือ โครงสร้างที่มีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.40 เมตร
- 3) ระดับความสูงโครงสร้างเท่ากับความลึกน้ำ ($h_s > d$) คือ โครงสร้างที่มีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.50 เมตร

สำหรับคุณสมบัติคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง ในการศึกษาครั้งนี้กำหนดให้ใช้คลื่นที่มีความชันคลื่นแตกต่างกัน 4 ระดับ ระหว่างช่วง 0.018 – 0.035 มีรายละเอียดดังตารางที่ 3-1 โดยการศึกษาได้ทำการทดลองทั้งสิ้น จำนวน 16 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 3-2

3.5 การเก็บข้อมูล

ข้อมูลการทดลองประกอบด้วย ข้อมูลคลื่น กำหนดให้ตำแหน่งกึ่งกลางอุปกรณ์อยู่สูงจากระดับท้องน้ำเท่ากับ 0.40 เมตร และข้อมูลความเร็วคลื่น ติดตั้งหัวรับสัญญาณสูงจากระดับท้องน้ำเท่ากับ 0.27 เมตร (0.13 จากระดับน้ำนิ่ง) เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือที่มีความยาวระหว่างหัวรับสัญญาณจนถึงก้านเครื่องวัดสามารถจมน้ำได้ลึกจากระดับผิวน้ำ เท่ากับ 0.22 เมตร และหัวรับสัญญาณต้องจมน้ำอย่างต่ำ เท่ากับ 0.05 เมตร ดังนั้นจึงพิจารณาตำแหน่งเก็บข้อมูลวัดความเร็วคลื่น ตำแหน่งกึ่งกลางของช่วงที่สามารถวัดได้ซึ่งเท่ากับ 0.13 เมตร จากระดับน้ำนิ่ง แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือตามความลึกน้ำดังรูปที่ 3-3 ทำการบันทึกข้อมูลที่มีความถี่ 250 ข้อมูลต่อวินาที ต่อเนื่องกันเป็นเวลา 2 นาที และเก็บข้อมูลคลื่นทั้งบริเวณด้านหน้าและด้านหลัง เชื่อมกันคลื่นพร้อมกัน

จากการทดลองเก็บข้อมูลเชื่อมกันคลื่นได้น้ำ เมื่อแบ่งการเก็บข้อมูลบริเวณด้านหลังโครงสร้างตามความยาวออกเป็น 2 ส่วน พบว่า ข้อมูลความสูงคลื่นที่ได้มีลักษณะแนวโน้มใกล้เคียงกันทั้งสองด้าน มีความสมมาตรของพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของคลื่น โดยมีตำแหน่ง

กึ่งกลางเขื่อนกันคลื่นเป็นแกนสมมาตร ดังแสดงรายละเอียดความสมมาตรของข้อมูลคลื่น ดัง
ภาคผนวก ค-1 ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงเก็บข้อมูลเพียงครึ่งหนึ่งของเขื่อนกันคลื่น

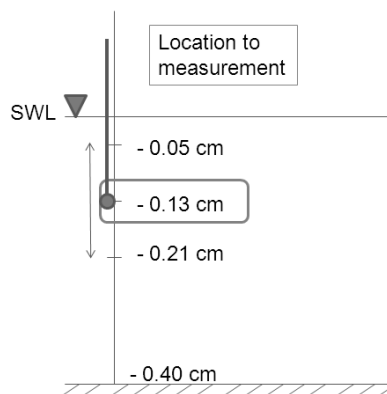
ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นที่ใช้ในการศึกษา

Wave condition	H_i (cm)	T (sec)	L (cm)	H_i/L
C1	2.181 - 2.211	0.871 - 0.875	118.44	0.018 - 0.019
C2	3.092 - 3.129	0.923 - 0.926	133.01	0.023 - 0.024
C3	4.120 - 4.155	1.011 - 1.014	159.58	0.026 - 0.027
C4	4.612 - 4.699	0.924 - 0.928	133.30	0.034 - 0.035

หมายเหตุ : เมื่อ H_i คือ ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง T คือ คาบคลื่น L คือ ความยาวคลื่น H_i/L คือ ความชันคลื่น และคุณสมบัติคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง ทำการทดลอง
ขณะมีระดับความลึกน้ำ เท่ากับ 0.40 เมตร

ตารางที่ 3-2 รายชื่อกรณีศึกษา

Height of structure (cm)	Wave steepness (H_i/L)			
	C1	C2	C3	C4
30	H30C1	H30C2	H30C3	H30C4
35	H35C1	H35C2	H35C3	H35C4
40	H40C1	H40C2	H40C3	H40C4
50	H50C1	H50C2	H50C3	H50C4



รูปที่ 3-3 ตำแหน่งติดตั้งการเก็บข้อมูลความเร็วการไหล

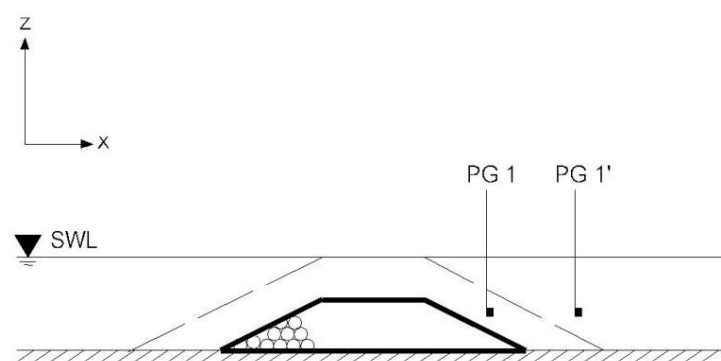
3.5.1 การเก็บข้อมูลคลื่น

จากการทดลองติดตั้งเครื่องมือเก็บข้อมูล เมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความสูงโครงสร้างเพิ่มขึ้น ทำให้ความยาวด้านฐานโครงสร้างเพิ่มขึ้นตาม เพื่อสอดคล้องกับความลาดชันบริเวณด้านหน้าและหลังโครงสร้าง เท่ากับ 2:1 (H:V) ทำให้ตำแหน่งการเก็บข้อมูลบางจุดอาจต้องเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านการติดตั้งเครื่องมือและความลึกน้ำต่ำสุดที่สามารถวัดได้ ดังตัวอย่างรูปที่ 3-4 ที่มีการย้ายตำแหน่งจาก PG1 เป็น PG1'

ดังนั้นจึงแบ่งการเก็บข้อมูลของเครื่องมือวัดคลื่นออกเป็น 2 ชุด ตามลำดับความสูงโครงสร้าง โดยกำหนดแนวแกน x เป็นแกนขนานกับแนวชายฝั่ง (along shore) แนวแกน y เป็นแกนตั้งฉากกับแนวชายฝั่ง (cross shore) โดยมีตำแหน่งศูนย์กลางการวัด ($x=0, y=0$) อยู่ที่กึ่งกลางของโครงสร้าง ตามรูปที่ 3-5

กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 และ 0.35 เมตร มีตำแหน่งการเก็บข้อมูลดังนี้ ข้อมูลคลื่นบริเวณก่อนเข้าปะทะโครงสร้างเก็บข้อมูลตามตำแหน่ง I1, I2, I3 และ I4 ข้อมูลคลื่นด้านบนสันและหลังโครงสร้าง ตามแนวแกน x ขนานกับแนวชายฝั่ง ทุกระยะ 0.10 เมตร ในตำแหน่ง 0 จนถึง 0.80 เมตร และแนวแกน y ซึ่งตั้งฉากกับแนวชายฝั่ง ที่ตำแหน่ง 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.35, 0.55, 0.75, 1.05 และ 1.35 เมตร

กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.40 และ 0.50 เมตร มีตำแหน่งการเก็บข้อมูลดังนี้ ข้อมูลคลื่นบริเวณก่อนเข้าปะทะโครงสร้างเก็บข้อมูลตามตำแหน่ง I1, I2, I3 และ I4 ข้อมูลคลื่นด้านบนสันและหลังโครงสร้าง ตามแนวแกน x ขนานกับแนวชายฝั่ง ทุกระยะ 0.10 เมตร ในตำแหน่ง 0 จนถึง 0.80 เมตร และแนวแกน y ซึ่งตั้งฉากกับแนวชายฝั่ง ที่ตำแหน่ง 0.55, 0.75, 1.05, 1.35, 1.65, 1.95 และ 2.25 เมตร



รูปที่ 3-4 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการเก็บข้อมูล

3.5.2 การเก็บข้อมูลความเร็วคลื่น

ความเร็วคลื่นตรวจวัดจากเครื่องมือวัดความเร็วการไหล แบ่งการเก็บข้อมูลของเครื่องมือวัดความสูงคลื่นออกเป็น 2 ชุด ตามลำดับความสูงโครงสร้างเช่นเดียวกับการเก็บข้อมูลคลื่น โดยกำหนดแนวแกน x เป็นแกนขนานกับแนวชายฝั่ง แนวแกน y เป็นแกนตั้งฉากกับแนวชายฝั่ง และตำแหน่งศูนย์กลางการวัด ($x=0, y=0$) อยู่ที่กึ่งกลางของโครงสร้าง ตามรูปที่ 3-6

กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 และ 0.35 เมตร มีตำแหน่งการเก็บข้อมูลดังนี้ ข้อมูลคลื่นด้านหลังโครงสร้าง ตามแนวแกน x ขนานกับแนวชายฝั่ง ทุกระยะ 0.10 เมตร ในตำแหน่ง 0 จนถึง 0.80 เมตร และแนวแกน y ซึ่งตั้งฉากกับแนวชายฝั่ง ที่ตำแหน่ง 0.35, 0.55, 0.75, 1.05 และ 1.35 เมตร

กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.40 และ 0.50 เมตร มีตำแหน่งการเก็บข้อมูลดังนี้ ข้อมูลคลื่นด้านหลังโครงสร้าง ตามแนวแกน x ขนานกับแนวชายฝั่ง ทุกระยะ 0.10 เมตร ในตำแหน่ง 0 จนถึง 0.80 เมตร และแนวแกน y ซึ่งตั้งฉากกับแนวชายฝั่ง ที่ตำแหน่ง 1.05, 1.35, 1.65, 1.95 และ 2.25 เมตร

3.6 วิธีการทดลอง

3.6.1 การเตรียมก่อนการทดลอง

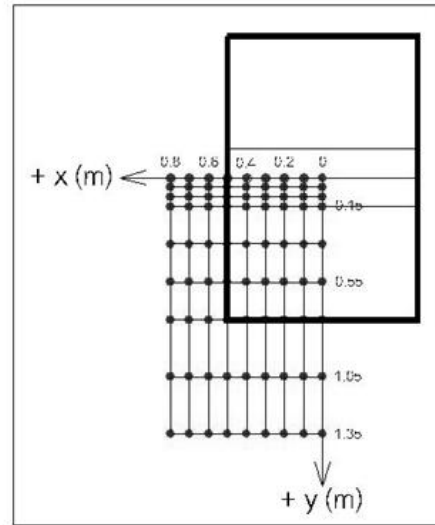
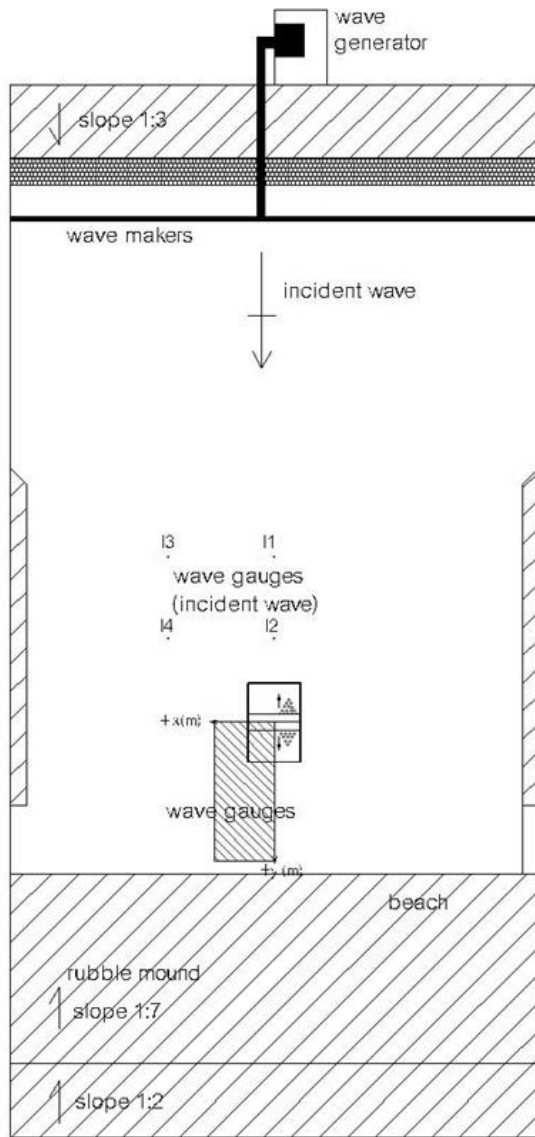
- 1) ติดตั้งเครื่องมือวัดระดับน้ำ ภายในแอ่งจำลองคลื่น สำหรับวัดระดับน้ำนิ่ง (still water level, SWL)
- 2) ติดตั้งเครื่องวัดคลื่นและเครื่องวัดความเร็วการไหล
- 3) เปิดเครื่องสูบน้ำเพื่อเติมน้ำเข้าแอ่งจำลองคลื่น กำหนดความลึกน้ำ (wave depth, d) ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดระดับน้ำ เท่ากับ 0.40 เมตร
- 4) ติดตั้งกล้องถ่ายรูปและกล้องวิดีโอ เพื่อการบันทึกภาพพฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่น การเปลี่ยนแปลงคลื่น ขณะดำเนินการทดลอง

3.6.2 การดำเนินการทดลอง

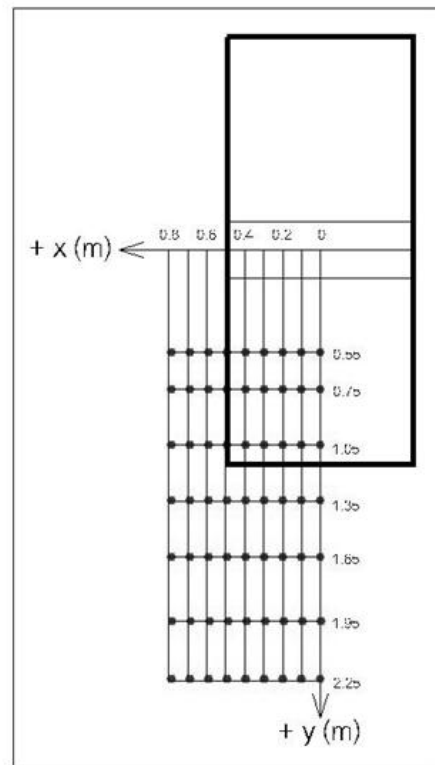
- 1) ติดตั้งเชือกกันคลื่น ที่ตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ในแบบแผน
- 2) บันทึกความลึกน้ำที่วัดได้จากเครื่องมือวัดระดับน้ำ ก่อนการทดลอง
- 3) เปิดเครื่องกำเนิดคลื่นตามเงื่อนไขของคลื่นที่กำหนด เวลาประมาณ 5 – 10 นาที หรือจนกระทั่งคลื่นมีลักษณะการเคลื่อนตัวคงที่

- 4) ทำการวัดเก็บข้อมูลคลื่นตามตำแหน่งที่ได้กำหนด
- 5) บันทึกความลึกน้ำที่วัดได้จากเครื่องมือวัดระดับน้ำ หลังการทดลอง
- 6) ทำขั้นตอนที่ 2 ถึง 5 ซ้ำ โดยทำการเปลี่ยนความชันคลื่นจนครบทั้ง 4 ค่า
- 7) ทำการปล่อยน้ำออกจากแอ่งจำลองคลื่น และทำขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 ซ้ำ โดยทำการเปลี่ยนขนาดของเขื่อนกันคลื่นจนครบทั้ง 4 ค่า

การศึกษานี้ได้ทำการทดลองแบบจำลองกายภาพทั้งสิ้น 16 กรณี โดยใช้ระยะเวลาการตรวจวัดและเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องประมาณ 6-7 ชั่วโมงในแต่ละกรณี และเวลาในการติดตั้งเขื่อนกันคลื่นแต่ละขนาดความสูงโครงสร้าง ประมาณ 4 วัน โดยได้ทำการทดลองระหว่างเดือน มิถุนายน 2554 ถึงเดือนสิงหาคม 2554

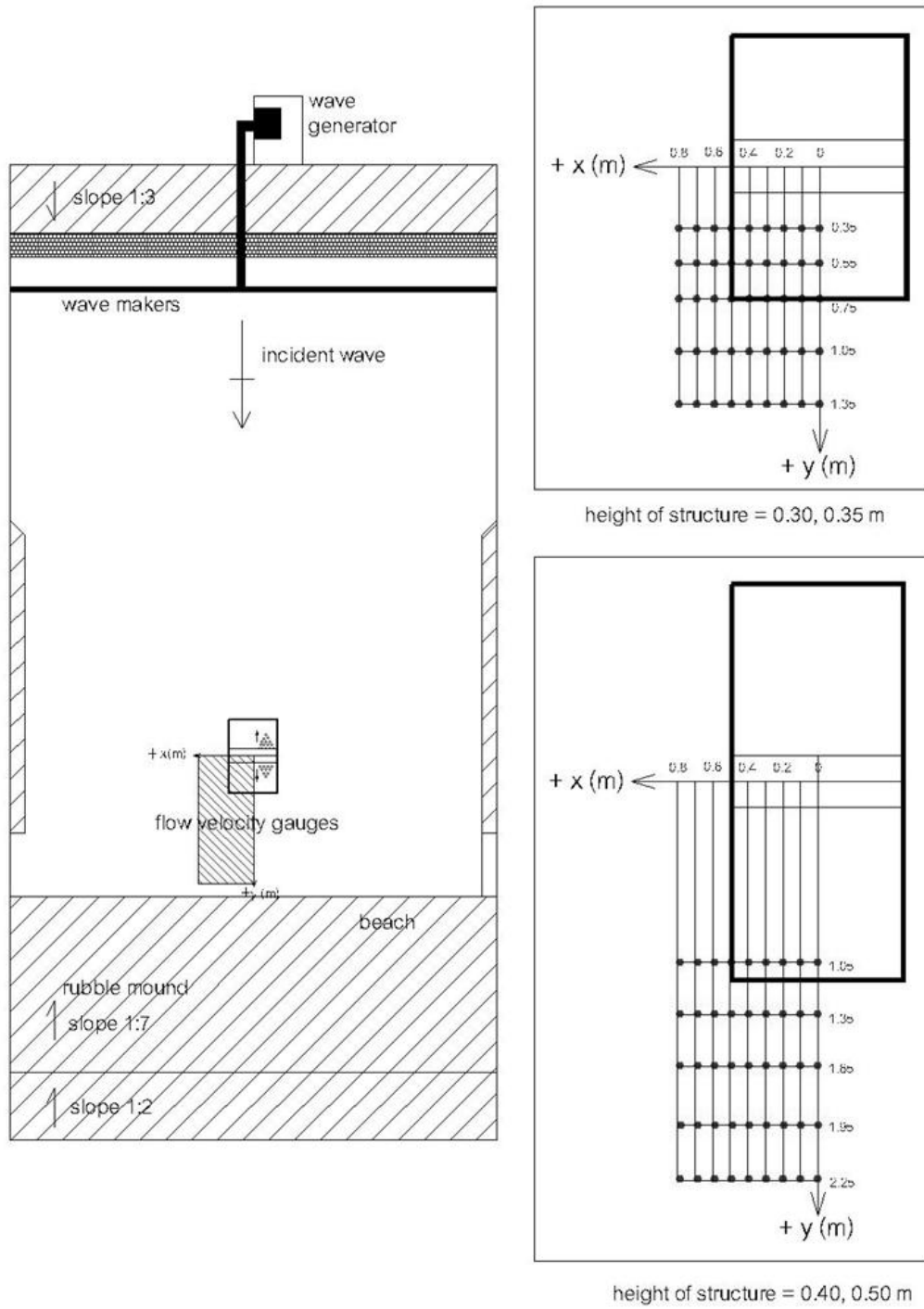


height of structure = 0.30, 0.35 m



height of structure = 0.40, 0.50 m

รูปที่ 3-5 ตำแหน่งการเก็บข้อมูลเครื่องมือวัดความสูงคลื่น



รูปที่ 3-6 ตำแหน่งการเก็บข้อมูลเครื่องมือวัดความเร็วคลื่น

บทที่ 4

พฤติกรรมการณ์การส่งผ่านของคลื่น

เนื้อหาของบทนี้เกี่ยวกับพฤติกรรมการณ์การส่งผ่านของคลื่น โดยเริ่มจากวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่น ผลการทดลอง การวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การส่งผ่านของคลื่น และการสรุปผลพฤติกรรมการณ์การส่งผ่านของคลื่น รายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้

4.1 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่น

เมื่อได้ทำการวัดข้อมูลการเปลี่ยนแปลงระดับผิวน้ำตามเวลาและตำแหน่งแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาคุณลักษณะของคลื่น (wave characteristic) อันประกอบด้วย คาบคลื่น (wave period) ความยาวคลื่น (wave length) และความสูงคลื่น (wave height)

โดยข้อมูลความสูงคลื่นและความยาวคลื่นที่เก็บบริเวณก่อนเข้าปะทะโครงสร้างจะนำไปหาความชันคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง และนำข้อมูลความสูงคลื่นที่เก็บบริเวณก่อนเข้าปะทะโครงสร้างไปพิจารณาร่วมกับข้อมูลความสูงคลื่นหลังโครงสร้าง เพื่อนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม (wave global transmission coefficient, K_{gt})

4.1.1 ความสูงคลื่นและความยาวคลื่น

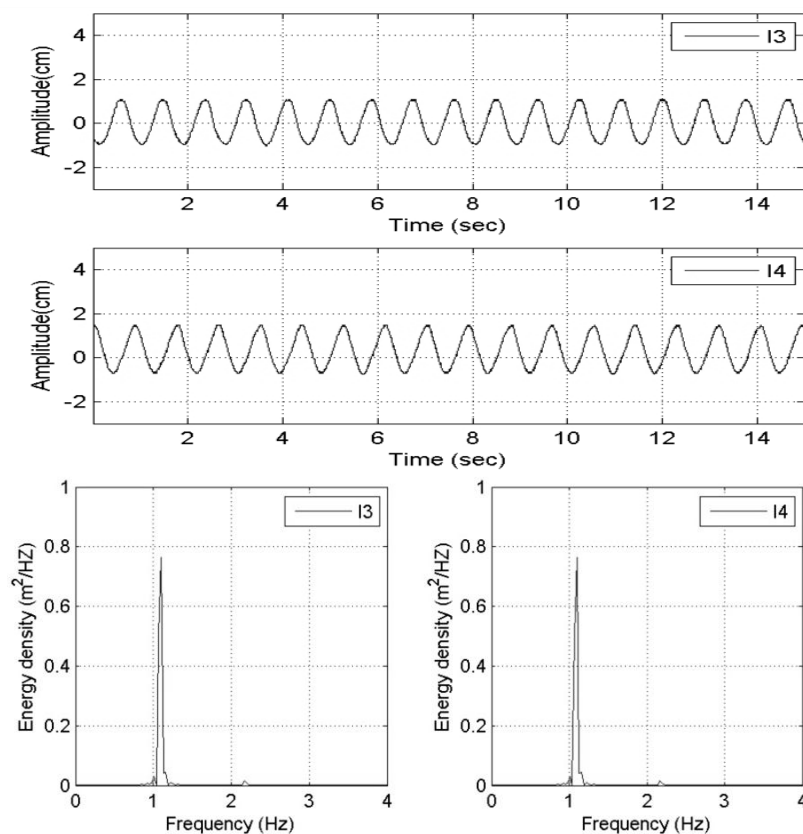
ข้อมูลคลื่นที่บันทึกมาจะเป็นการเปลี่ยนแปลงระดับผิวน้ำตามเวลาและตำแหน่ง ประกอบด้วยลูกคลื่นเคลื่อนที่ต่อเนื่องกัน ดังนั้นจำเป็นต้องทำการตัดข้อมูลออกเป็นช่วงๆ ตามคาบคลื่น ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความถี่ (frequency analysis) จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษานี้ โดยทำการแปลงการเปลี่ยนแปลงระดับผิวน้ำตามเวลา ซึ่งการแปลงด้วยการวิเคราะห์ความถี่นี้ไม่ได้เป็นการลดทอนสัญญาณคลื่น แต่เป็นเพียงการใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการวิเคราะห์คลื่น

ในการศึกษานี้ใช้วิธีการวิเคราะห์ความถี่ด้วยวิธี power spectral energy (PSE) และสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพลังงานกับความถี่ ซึ่งในกรณีที่ทำการศึกษานี้เป็นคลื่นแบบสม่ำเสมอ (regular wave) กราฟดังกล่าวจึงมีเพียงยอดความถี่เดียว และส่วนกลับของยอดความถี่นั้นคือคาบคลื่น ดังตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นที่เก็บบริเวณด้านหน้าโครงสร้าง ตำแหน่ง 13 และ 14 ในขั้นตอนการปรับเทียบเครื่องกำเนิดคลื่นขณะไม่มีโครงสร้าง

ความสูงคลื่น อยู่ในช่วงประมาณ 2.181 – 2.195 เซนติเมตร คาบคลื่น ประมาณ 0.87 วินาที ดังรูปที่ 4-1

เมื่อนำคาบคลื่นที่ได้มาตัดข้อมูลค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จากการบันทึกอย่างต่อเนื่อง เพื่อหาความสูงคลื่นย่อยๆของแต่ละช่วงคาบคลื่น หลังจากนั้นนำความสูงคลื่นย่อยๆมาวิเคราะห์ทางสถิติ (statistical analysis) เพื่อหาตัวแทนความสูงคลื่นที่มีนัยสำคัญ (significant wave height) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการศึกษาทางวิศวกรรมชายฝั่งทะเล (US.CERC., 1984)

โดยการทดลองทุกกรณีคุณสมบัติของคลื่นอยู่ในช่วงคลื่นในน้ำลึกปานกลาง ตามทฤษฎีคลื่นความสูงน้อยจำแนกคลื่นตามความลึกน้ำ สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและคาบคลื่น ดังตารางที่ 2-1 ซึ่งความยาวคลื่นเป็นส่วนหนึ่งของพารามิเตอร์ของคลื่นที่ศึกษา



รูปที่ 4-1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ความถี่ของข้อมูลคลื่น ในขั้นตอนการปรับเทียบเครื่องกำเนิดคลื่น

4.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม (wave global transmission coefficient, K_{gt}) คือ อัตราส่วนความสูงคลื่นที่ตำแหน่งเก็บข้อมูลตำแหน่งต่างๆบริเวณด้านหลังโครงสร้าง ที่มีผลของทั้ง การซึมผ่านโครงสร้าง การข้ามล้นโครงสร้าง และการกระจายตัว ต่อความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ฝั่ง ดังสมการที่ (4 -1) ในการศึกษาครั้งนี้ได้พิจารณาความสูงคลื่นเฉลี่ยจากตำแหน่ง I3 และ I4 เนื่องจากเป็นตำแหน่งด้านข้างโครงสร้างที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการสะท้อนของคลื่นบริเวณด้านหน้าโครงสร้างโดยตรง ซึ่งแตกต่างจากตำแหน่ง I1 และ I2 เป็นตำแหน่งที่มีผลการสะท้อนของคลื่นเกิดขึ้นโดยตรง

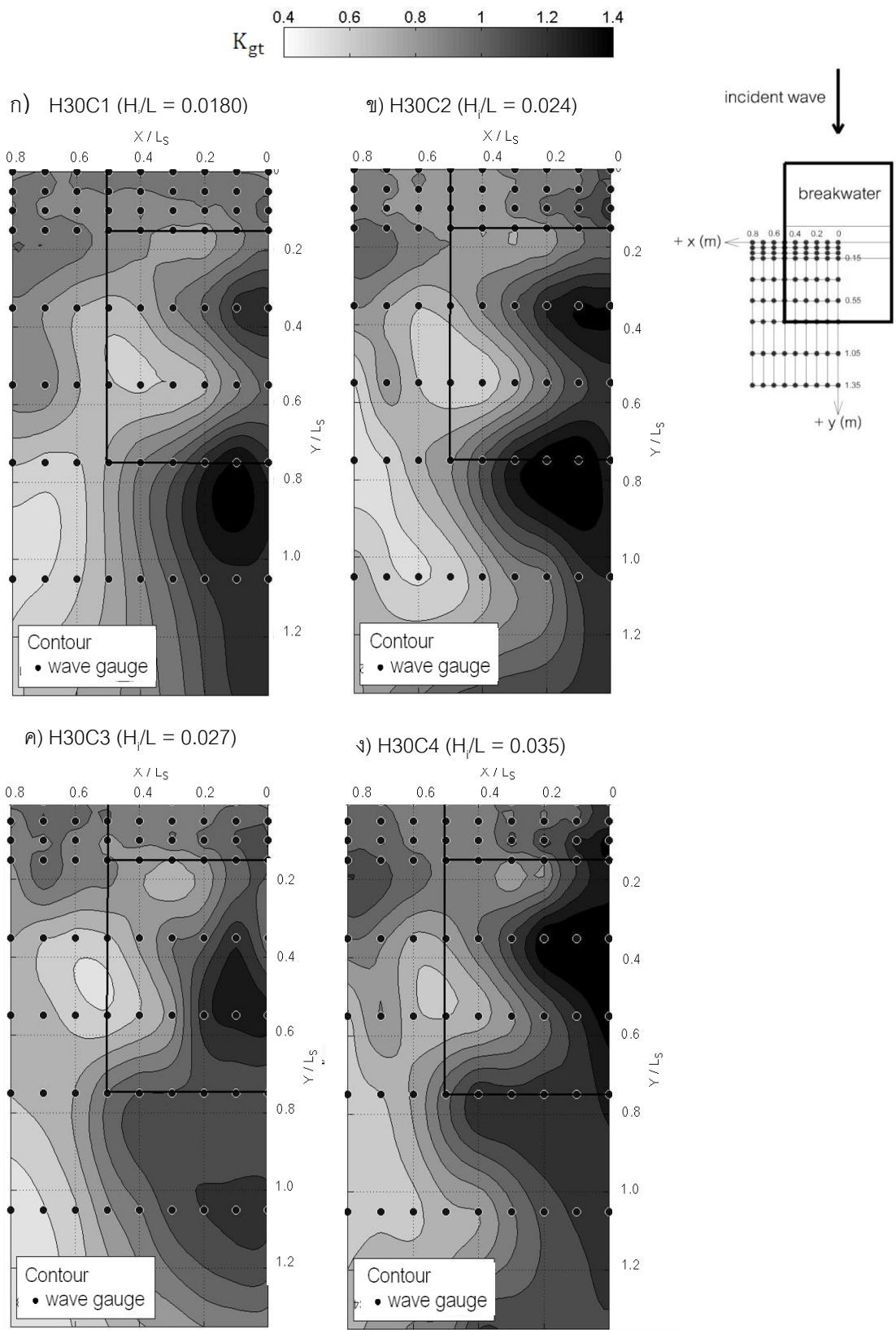
$$K_{gt} = \frac{H_t}{H_i} \quad (4-1)$$

4.2 ผลการทดลอง

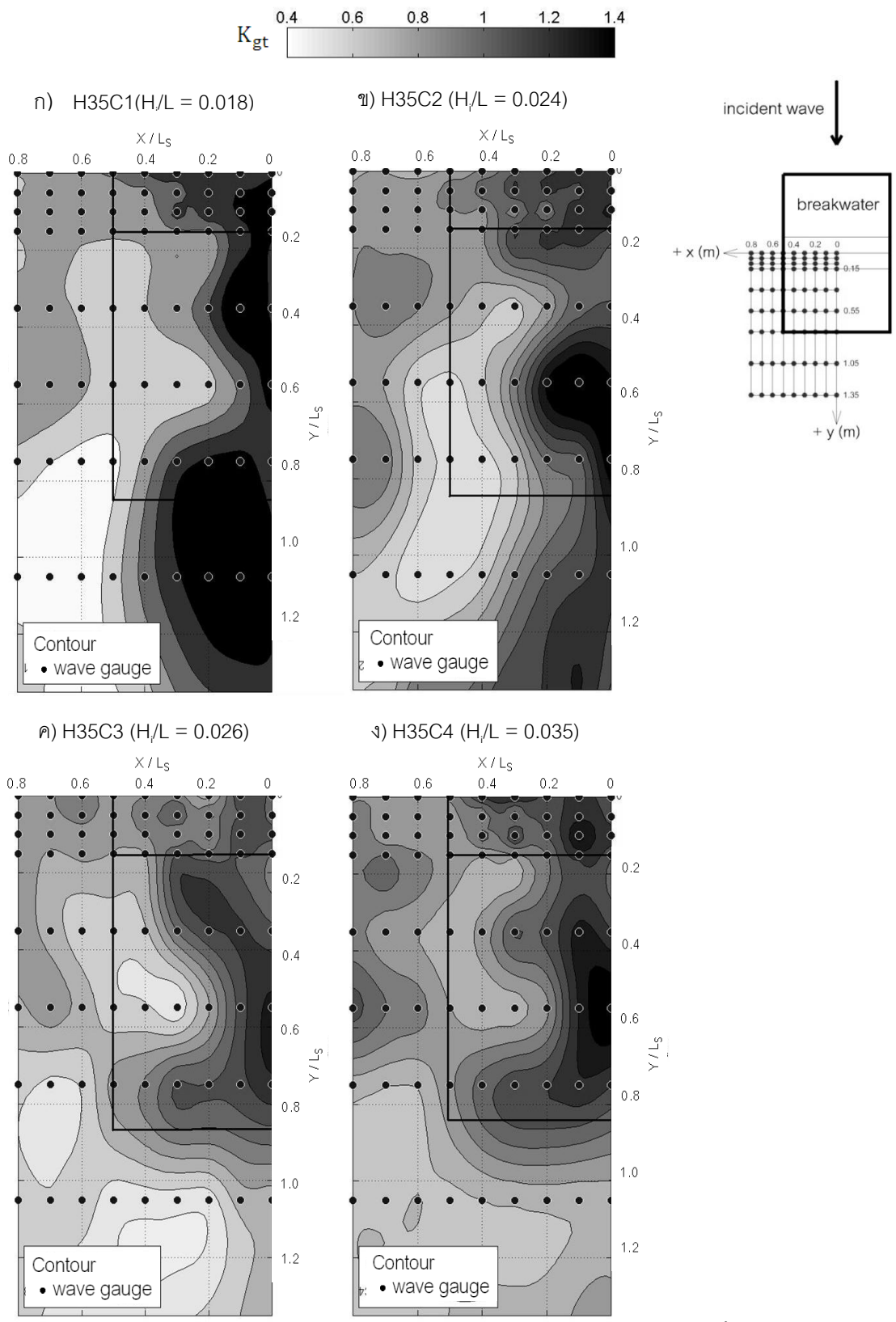
จากผลการวิเคราะห์ความสูงคลื่นแต่ละกรณี เมื่อนำมาลากเส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม บริเวณด้านหลังโครงสร้าง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์พฤติกรรมของการส่งผ่านของคลื่นของแต่ละกรณีได้

โดยกำหนดให้จุด (0,0) เป็นตำแหน่งกึ่งกลางโครงสร้าง แกน y เป็นค่าของระยะทางแนวตั้งฉากต่อความยาวโครงสร้าง (y/L_s) แกน x เป็นค่าของระยะทางแนวนอนต่อความยาวโครงสร้าง (x/L_s) ตำแหน่งเก็บข้อมูลเป็นจุดวงกลมสีดำ และแบ่งระดับสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม ในช่วง $K_{gt} = 0.4 - 1.4$ ตามระดับชั้นสี เรียงจากสีขาวอ่อนถึงสีดำเข้มตามลำดับ และมีเส้นกรอบสีเหลี่ยมแสดงอาณาเขตเชื่อมกันคลื่น โดยแสดงผลเส้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมของการทดลองทั้งสิ้น 16 กรณี แบ่งตามระดับความสูงโครงสร้าง ได้ดังนี้

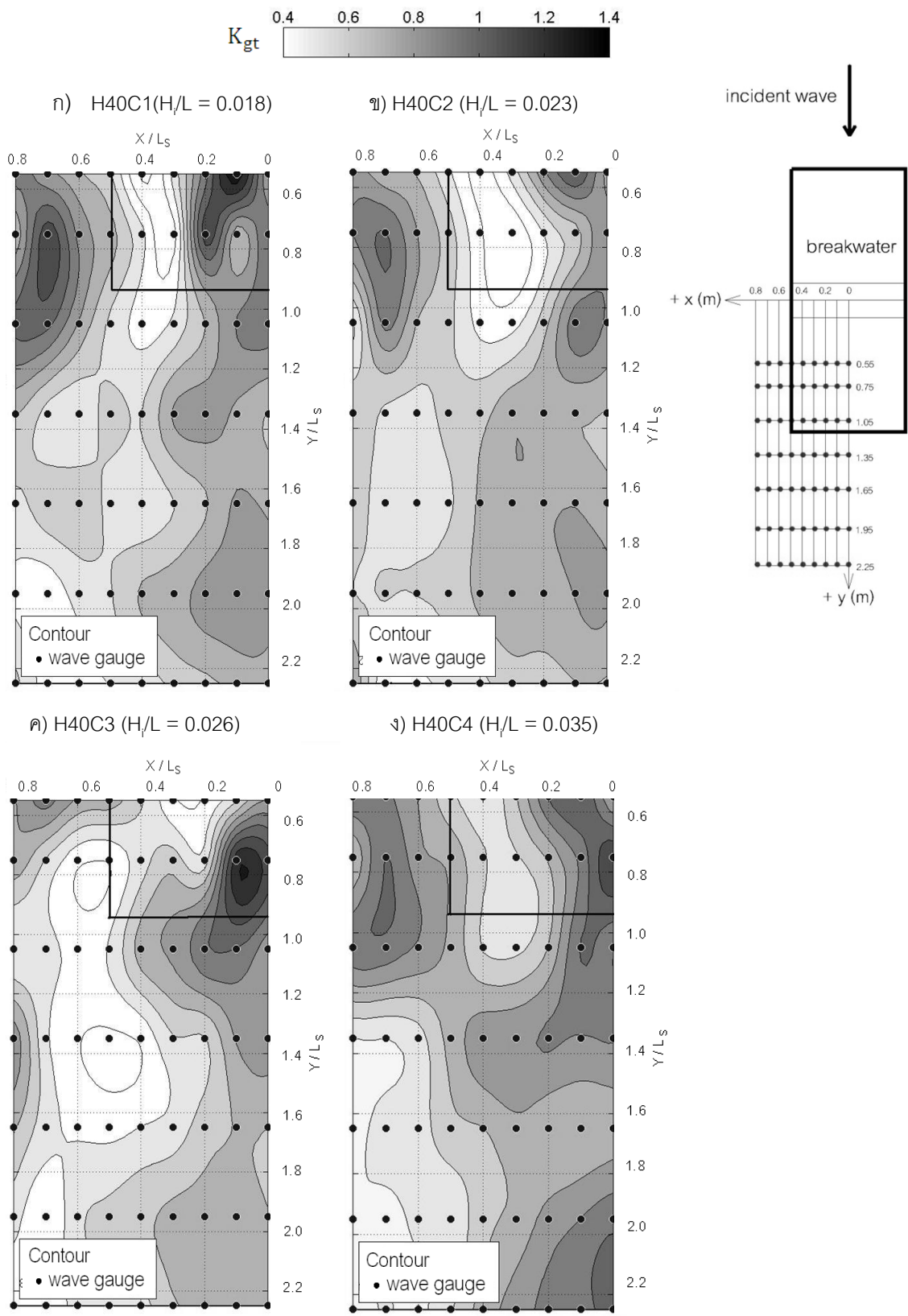
- 1) กรณีความสูงโครงสร้าง (h_s) เท่ากับ 0.30 เมตร (จมน้ำ 0.10 เมตร) แสดงดังรูปที่ 4-2
- 2) กรณีความสูงโครงสร้าง (h_s) เท่ากับ 0.35 เมตร (จมน้ำ 0.05 เมตร) แสดงดังรูปที่ 4-3
- 3) กรณีความสูงโครงสร้าง (h_s) เท่ากับ 0.40 เมตร (ระดับน้ำนิ่ง) แสดงดังรูปที่ 4-4
- 4) กรณีความสูงโครงสร้าง (h_s) เท่ากับ 0.50 เมตร (พื้นน้ำ 0.10 เมตร) แสดงดังรูปที่ 4-5



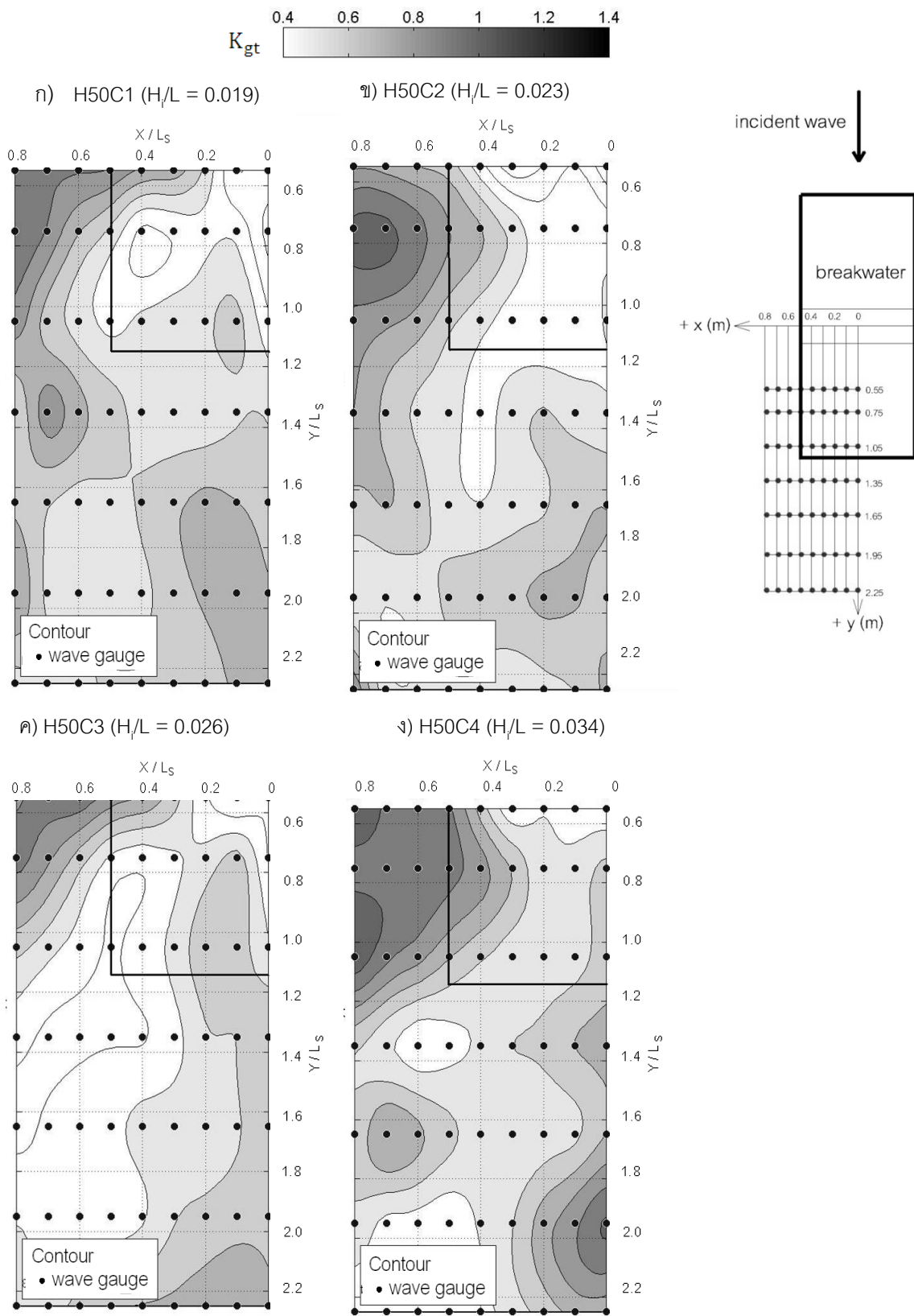
รูปที่ 4-2 เส้นชั้นระดับ K_{gt} ความสูงโครงสร้าง (h_s) เท่ากับ 0.30 เมตร (จมน้ำ 0.10 เมตร)



รูปที่ 4-3 เส้นชั้นระดับ K_{gt} ความสูงโครงสร้าง (h_s) เท่ากับ 0.35 เมตร (จมน้ำ 0.05 เมตร)



รูปที่ 4-4 เส้นชั้นระดับ K_{gt} ความสูงโครงสร้าง (h_s) เท่ากับ 0.40 เมตร (ระดับน้ำนิ่ง)



รูปที่ 4-5 เส้นชั้นระดับ K_{gt} ความสูงโครงสร้าง (h_s) เท่ากับ 0.50 เมตร (พื้นน้ำ 0.10 เมตร)

4.3 การเปรียบเทียบการทดลองกับการศึกษาที่ผ่านมา

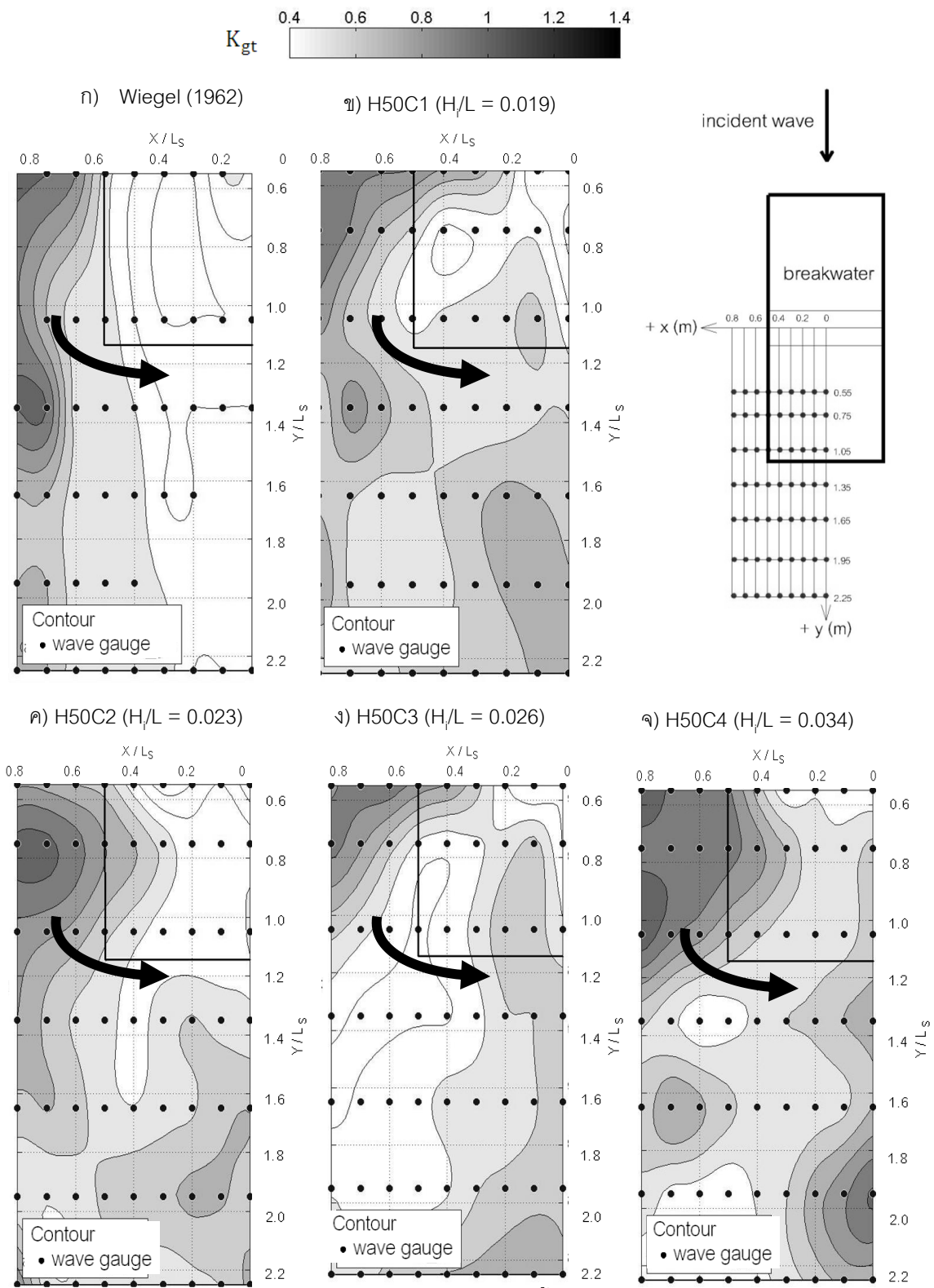
จากผลการทดลองที่ได้แสดงในหัวข้อที่ 4.2 เมื่อนำมาเปรียบเทียบพฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่นรวมกับการศึกษาที่ผ่านมา ในกรณีของการส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้งจากแบบจำลอง 3 มิติ ที่เป็นผลของการซึมผ่านโครงสร้างและการกระจายของคลื่น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากการศึกษาที่ผ่านมา Penny และ Price (1952); Wiegel (1962); Dean และ Darlymple (1984); Goda (1985) และ Sorensen (1993) ได้กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงคลื่นบริเวณหลังเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้ง จากแบบจำลอง 3 มิติ เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง คลื่นส่วนแรกจะมีการสะท้อนและการแตกตัวบริเวณด้านหน้าโครงสร้าง คลื่นส่วนที่เหลือจะซึมผ่านโครงสร้างและกระจายตัวเข้าไปในส่วนที่อยู่ด้านหลังโครงสร้าง

Wiegel (1962) ได้เสนอความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม กับตัวแปรของทิศทางการกระจายของคลื่นทำมุมกับสิ่งกีดขวาง (β) และอัตราส่วนของรัศมีการกระจายต่อความยาวคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะฝั่ง (r/L) กรณีคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะเขื่อนกันคลื่นแบบกั้นตลอดเพียงข้างเดียว (semi infinite) ดังรูปที่ 2-7

เมื่อเปรียบเทียบเส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม (K_{gr}) จากการทดลอง ในกรณีความสูงโครงสร้าง (h_s) เท่ากับ 0.50 เมตร (พื้นน้ำ 0.10 เมตร) กับผลการศึกษาของ Wiegel (1962) พบว่า ลักษณะการกระจายตัวของคลื่นมีแนวโน้มสอดคล้องกัน แสดงดังรูปที่ 4-6 เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างพื้นน้ำแบบหินทิ้ง จะเกิดการกระจายตัวของคลื่นจากปลายด้านข้างของโครงสร้าง สันคลื่นได้มีการเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณด้านหลังโครงสร้าง อันเป็นบริเวณที่เรียกว่า พื้นที่อับคลื่น (shadow area) ซึ่งสันคลื่นที่เคลื่อนที่มีทิศตามลูกศรในรูปที่ 4-6 และเมื่อพิจารณาความสูงคลื่นบริเวณหลังโครงสร้าง พบว่า ความสูงคลื่นบริเวณปลายด้านข้างโครงสร้าง จะมีความสูงคลื่นมากกว่าแนวกึ่งกลางด้านหลังโครงสร้างทุกกรณีที่เป็นเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมที่มากกว่า Wiegel (1962) เนื่องจากผลของการซึมผ่านโครงสร้างที่แตกต่างกัน

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จะเห็นว่าการเปรียบเทียบการส่งผ่านของคลื่น กรณีเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้งของการทดลองกับการศึกษาที่ผ่านมาของ Wiegel (1962) มีแนวโน้มการกระจายตัวของคลื่นบริเวณด้านหลังโครงสร้างไปในทางเดียวกัน และแสดงการวิเคราะห์พฤติกรรมของการส่งผ่านของคลื่นในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4-6 การเปรียบเทียบเส้นชั้นระดับ K_{gt}

ความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.50 เมตร (พื้นน้ำ 0.10 เมตร) กับ Wiegel (1962)

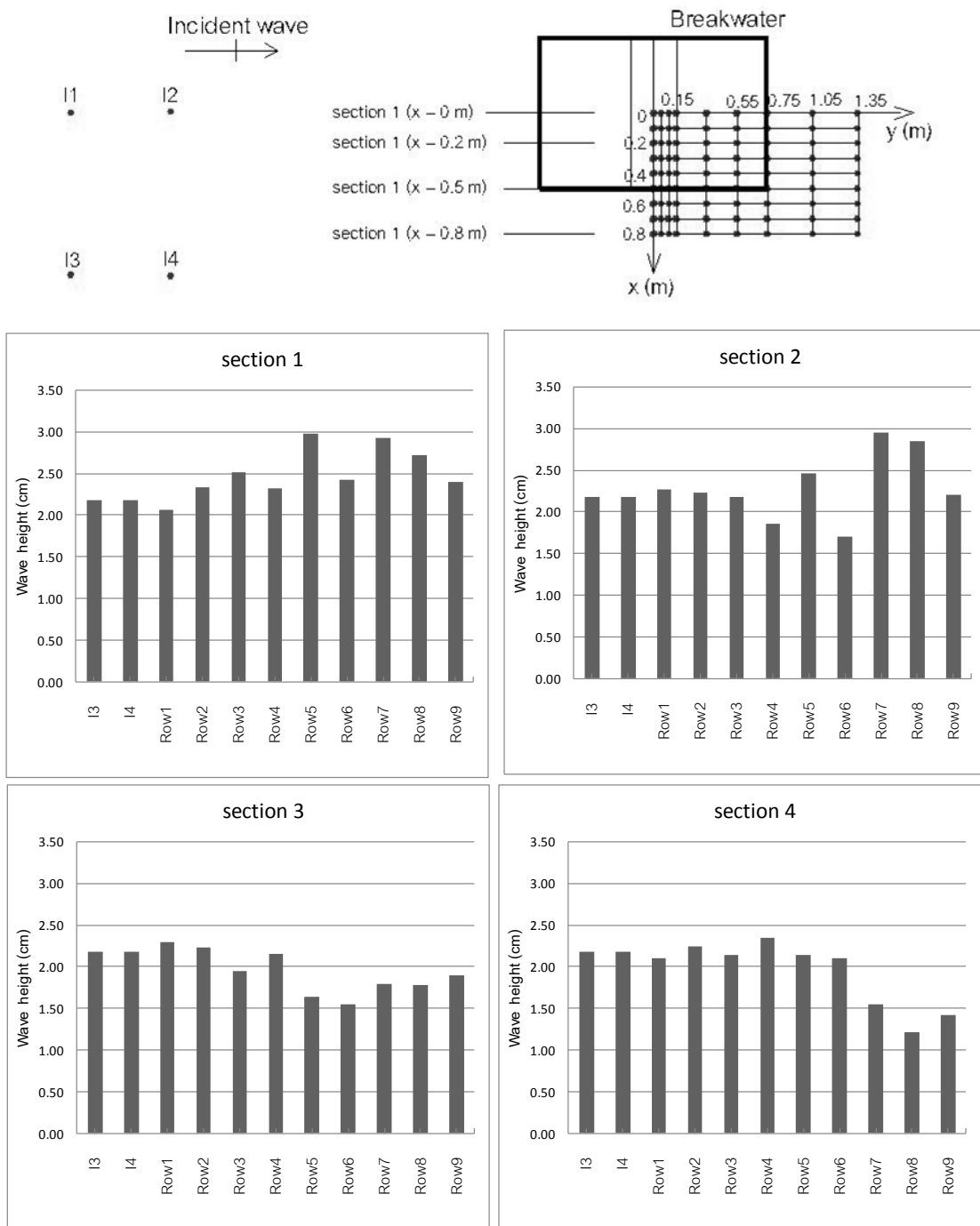
4.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่นรวม

ส่วนของหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่น ประกอบด้วย สภาวะความปั่นป่วนของคลื่นหลังเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ การวิเคราะห์ตัวแปรไร้หน่วย ผลการวิเคราะห์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

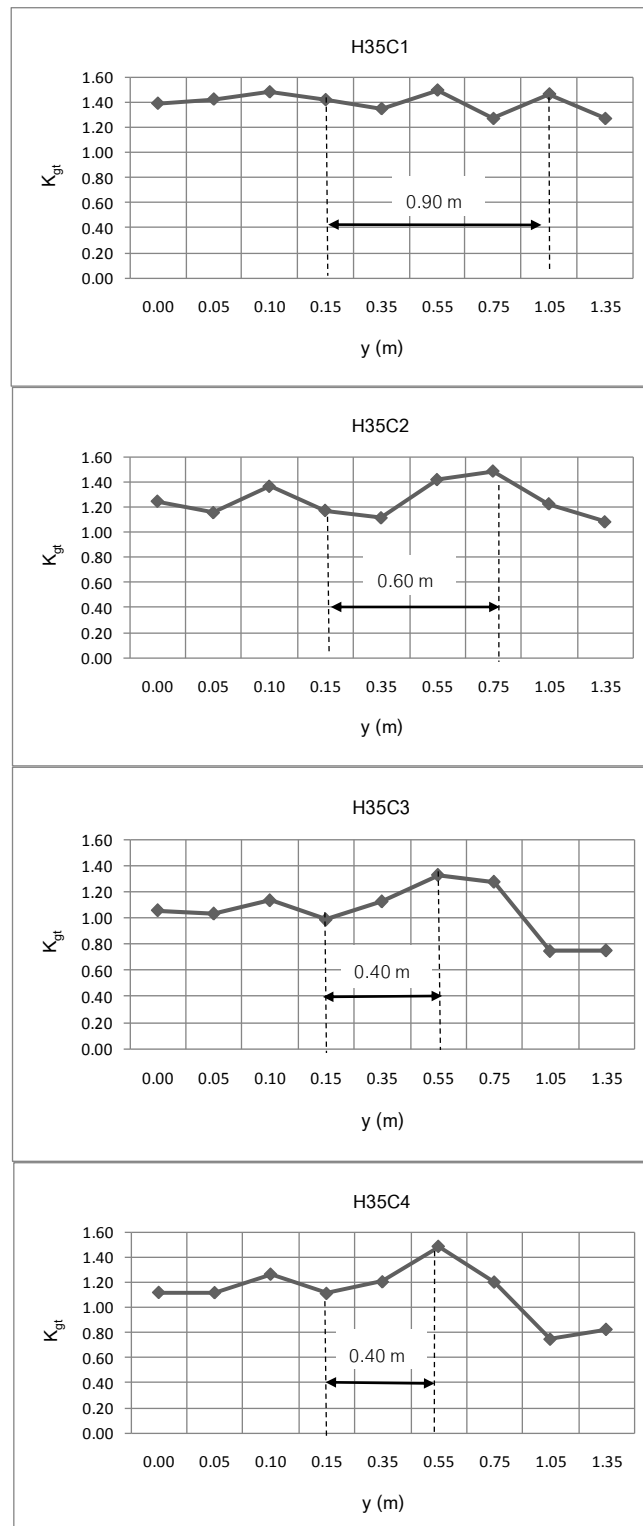
4.4.1 สภาวะความปั่นป่วนของคลื่นหลังเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคลื่นหลังเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ จากความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างของตำแหน่งที่มีผลจากการสะท้อนบริเวณด้านหน้าโครงสร้างน้อย (13 และ 14) กับความสูงคลื่นบริเวณด้านหลังโครงสร้างตำแหน่งต่างๆ ดังตัวอย่างรูปที่ 4-7 แสดงความสูงคลื่นของตำแหน่งด้านหน้าและหลังเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 เมตร ความชันคลื่น เท่ากับ 0.018 จากข้อมูลพบว่า คลื่นในแนวกึ่งกลางหลังเชื่อมกันคลื่น (หน้าตัดที่ 1 และ 2) มีพฤติกรรมการแตกตัวของคลื่นเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยความสูงคลื่นจะเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกัน เรียกว่า ช่วงสภาวะความปั่นป่วนของคลื่น ซึ่งการแตกตัวของคลื่นส่งผลให้ความสูงคลื่นตำแหน่งที่ไกลจากเชื่อมกันคลื่นมีความสูงคลื่นลดลง และยังมีผลให้แนวถัดจากกึ่งกลางหลังเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ (หน้าตัดที่ 3 และ 4) ความสูงคลื่นลดลงเช่นกัน เนื่องจากพลังงานของคลื่นลดลง

การศึกษาครั้งนี้ได้พิจารณาช่วงสภาวะความปั่นป่วนของคลื่น ในแนวกึ่งกลางด้านหลังโครงสร้าง โดยกำหนดให้ระยะห่างของความปั่นป่วนของคลื่น คือ ระยะตั้งแต่ปลายของสันด้านท้ายโครงสร้าง จนถึงตำแหน่งแตกตัวสุดท้ายหลังเคลื่อนตัวผ่านโครงสร้าง โดยตำแหน่งคลื่นแตกตัวสุดท้าย คือ ตำแหน่งที่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม (K_{gr}) มีค่าลดลงมากกว่าร้อยละ 5 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม ในตำแหน่งก่อนหน้า โดยหลังจากตำแหน่งคลื่นแตกตัวสุดท้ายแล้วค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมจะไม่มีค่าเพิ่มขึ้นอีก ดังแสดงตัวอย่างช่วงสภาวะความปั่นป่วนของคลื่น กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.35 เมตร ในรูปที่ 4-8 และรายละเอียดกรณีความสูงโครงสร้างอื่นๆ แสดงในส่วนของภาคผนวก ง-2



รูปที่ 4-7 ตัวอย่างความสูงคลื่นหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ
กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 เมตร (จมน้ำ 0.10 เมตร) ความชันคลื่น เท่ากับ 0.018



รูปที่ 4-8 ตัวอย่างสภาวะความปั่นป่วนของคลื่นหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ
กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.35 เมตร (จมน้ำ 0.05 เมตร)

เมื่อพิจารณาระยะเวลาของสภาวะความปั่นป่วนของคลื่นหลังเชื่อมกันคลื่นได้นำแบบหินทิ้งในกรณีศึกษาดังแสดงผลในตารางที่ 4-1 สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังนี้

- 1) ระยะเวลาความปั่นป่วนของคลื่นต่อความยาวคลื่นนับจากปลายของสันด้านท้ายโครงสร้าง มีค่าอยู่ในช่วง 0.30-0.68, 0.25-0.76 และ 0.37-0.67 เมื่อความสูงโครงสร้างเท่ากับ 0.30 (จมน้ำ 0.10 เมตร), 0.35 (จมน้ำ 0.05 เมตร) และ 0.40 (ระดับน้ำนิ่ง) เมตร ตามลำดับ ซึ่งช่วงความปั่นป่วนของคลื่นมีช่วงอยู่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นความสูงโครงสร้างไม่ส่งผลต่อระยะเวลาของสภาวะความปั่นป่วนของคลื่นหลังเชื่อมกันคลื่นได้นำอย่างมีนัยสำคัญ
- 2) ความชันคลื่นมีผลต่อระยะเวลาของสภาวะที่มีการแตกตัวของคลื่น เมื่อความชันคลื่นเพิ่มขึ้น ความปั่นป่วนของคลื่นบริเวณสันโครงสร้างได้เพิ่มขึ้น ทำให้การแตกตัวของคลื่นได้มากขึ้น พลังงานคลื่นจึงลดลงเป็นอย่างมากบริเวณสันโครงสร้าง จึงส่งผลให้ช่วงระยะเวลาของความปั่นป่วนของคลื่นหลังเชื่อมกันคลื่นลดลง ด้วยเหตุนี้ความชันคลื่นจะส่งผลต่อระยะเวลาของสภาวะความปั่นป่วนของคลื่นหลังเชื่อมกันคลื่นได้นำอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4-1 ระยะเวลาของสภาวะที่มีการแตกตัวของคลื่นหลังเชื่อมกันคลื่นได้นำแบบหินทิ้ง

กรณีศึกษา	ความยาวคลื่น (เมตร)	ระยะเวลาความปั่นป่วนของคลื่น (เมตร)	ระยะเวลาความปั่นป่วนของคลื่น ต่อความยาวคลื่น (เมตร/เมตร)
H30C1	1.195	0.60	0.50L
H30C2	1.330	0.90	0.68L
H30C3	1.596	0.90	0.56L
H30C4	1.336	0.40	0.30L
H35C1	1.184	0.90	0.76L
H35C2	1.333	0.90	0.68L
H35C3	1.605	0.40	0.25L
H35C4	1.333	0.40	0.75L
H40C1	1.195	0.90	0.67L
H40C2	1.339	0.90	0.67L
H40C3	1.602	0.60	0.37L
H40C4	1.345	0.60	0.45L

4.4.2 การวิเคราะห์ตัวแปรไร้หน่วย

การศึกษาที่ผ่านมาทั้งแบบจำลองกายภาพและคณิตศาสตร์ ได้มีความสนใจเพื่อการศึกษา ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น จากตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการส่งผ่านของคลื่น ดังนี้

- 1) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของของไหล (fluid characteristic) เช่น ความหนาแน่นของของไหล (density of fluid) ความหนืดจลน์ของของไหล (kinematic viscosity of fluid) ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (acceleration due to gravity) เป็นต้น
- 2) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของวัสดุท้องน้ำ (sediment characteristic) เช่น ขนาดของวัสดุท้องน้ำ (sediment size) ความหนาแน่นของวัสดุท้องน้ำ (density of sediment) การกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ (size distribution) ลักษณะของวัสดุท้องน้ำ (grain form) แรงดึงดูดระหว่างวัสดุท้องน้ำ (cohesion of material) เป็นต้น
- 3) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคลื่น (variables of wave characteristic) เช่น ความสูงคลื่น (wave height) คาบคลื่น (wave period) ความยาวคลื่น (wave length) ทิศทางของคลื่น (wave direction) ความลึกน้ำ (depth of water) ความลาดชันท้องน้ำ (bed slope) เป็นต้น
- 4) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น (variables of breakwater characteristic) เช่น ความสูงโครงสร้าง (height of structure) ความกว้างของโครงสร้าง (length of structure) ความลาดชันโครงสร้าง (slope of structure) ขนาดวัสดุโครงสร้าง (material size) เป็นต้น

เนื่องจากข้อจำกัดของการศึกษาจากแบบจำลองกายภาพ ในการศึกษาครั้งนี้จึงพิจารณาเฉพาะพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา โดยตัวแปรที่สัมพันธ์กับความสูงคลื่น บริเวณหลังโครงสร้าง (H_t) มีความเกี่ยวข้องกับตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความลึกน้ำ (d) ความสูงโครงสร้าง (h_s) ระยะห่างของสันโครงสร้างจากระดับน้ำนิ่ง (R_c) ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง (H_i) ความยาวคลื่น (L) ความกว้างโครงสร้าง (B) ความยาวโครงสร้าง (L_s) ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุโครงสร้าง (D_{50}) ดังสมการที่ (4-2)

$$H_t = f(d, h_s, R_c, H_i, L, B, L_s, D_{50}) \quad (4-2)$$

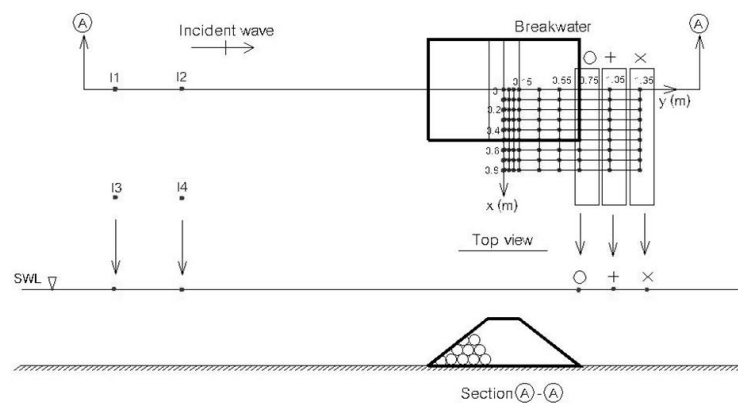
ความสูงคลื่นบริเวณหลังโครงสร้างเกี่ยวข้องกับหน่วยพื้นฐาน คือ ความยาว (length) ดังนั้นตัวแปรอิสระ 9 ตัว สามารถลดรูปจากตัวแปรซ้ำ ได้แก่ สูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง (H_i) และความยาวคลื่น (L) เป็นต้น ความตามทฤษฎีวิเคราะห์ตัวแปรไร้หน่วย (เสรี จันทโรโยธา, 2553) โดยจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ของความสูงคลื่นบริเวณหลังโครงสร้างในรูปกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (dimensionless parameter) ได้ดังสมการที่ (4-3)

$$K_{gt} = \frac{H_t}{H_i} = f\left(\frac{R_c}{H_i}, \frac{H_i}{L}, \frac{B}{H_i}, \frac{L_s}{H_i}, \frac{D_{50}}{H_i}, \frac{d}{H_i}\right) \quad (4-3)$$

จากสมการที่ (4-3) รูปกลุ่มตัวแปรไร้มิติบางตัวยังคงมีตัวแปรที่ซ้ำกันและเป็นค่าคงที่ ได้แก่ ความกว้างโครงสร้าง ความยาวโครงสร้าง และค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุโครงสร้าง แสดงดังสมการที่ (4-4)

$$K_{gt} = \frac{H_t}{H_i} = f\left(\frac{B}{H_i}, \frac{L_s}{H_i}, \frac{D_{50}}{H_i}, \frac{d}{H_i}\right) \quad (4-4)$$

เมื่อการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่นครั้งนี้ ได้กำหนดตำแหน่งความสูงคลื่นที่เข้าสู่ฝั่ง เป็นความสูงคลื่นเฉลี่ยของตำแหน่งที่มีผลจากการสะท้อนบริเวณด้านหน้าโครงสร้างน้อย (I3 และ I4) ตำแหน่งเก็บข้อมูลความสูงคลื่นด้านหลังโครงสร้าง เป็นตำแหน่งที่อยู่ห่างจากสภาวะที่มีความปั่นป่วนของคลื่นที่มีการแตกตัวของคลื่น คำนวณเป็นความสูงคลื่นเฉลี่ยตามแนวขนานโครงสร้าง โดยความสูงคลื่นเฉลี่ยตามแนวขนานโครงสร้าง เรียงตำแหน่งจากใกล้จนถึงไกลสันโครงสร้าง มีสัญลักษณ์ O + และ X ตามลำดับ ดังรูปที่ 4-9



รูปที่ 4-9 ตำแหน่งการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่น เพื่อการวิเคราะห์การส่งผ่านของคลื่น 2 มิติ

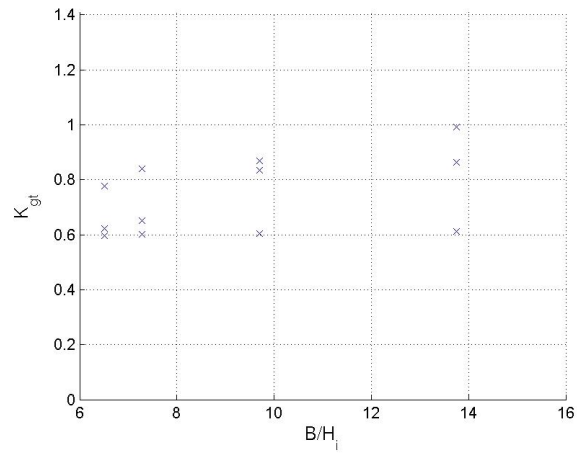
การพิจารณาผลของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม (K_{gr}) กับตัวแปรไร้หน่วย ของ ความกว้างสันโครงสร้าง (B/H_i) ความยาวโครงสร้างสัมพัทธ์ (L_s/H_i) ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ของวัสดุโครงสร้างสัมพัทธ์ (D_{50}/H_i) และความลึกน้ำต่อความสูงคลื่น (d/H_i) ของเขื่อนกันคลื่นได้ น้ำแบบหินทิ้ง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การเปลี่ยนแปลงความกว้างสันโครงสร้างสัมพัทธ์ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ คลื่นรวม เมื่อความกว้างสันโครงสร้างสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น สามารถพบจากสาเหตุ ได้แก่ ความสูงคลื่น ลดลงหรือความกว้างสันโครงสร้างเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการสลายพลังงานบริเวณสันโครงสร้าง เนื่องจากความเสียดทานและความปั่นป่วนของคลื่นมีค่าน้อย จึงทำให้ไม่สามารถเห็นการ เปลี่ยนแปลงจากความกว้างสันโครงสร้างมากนัก ดังรูปที่ 4-10

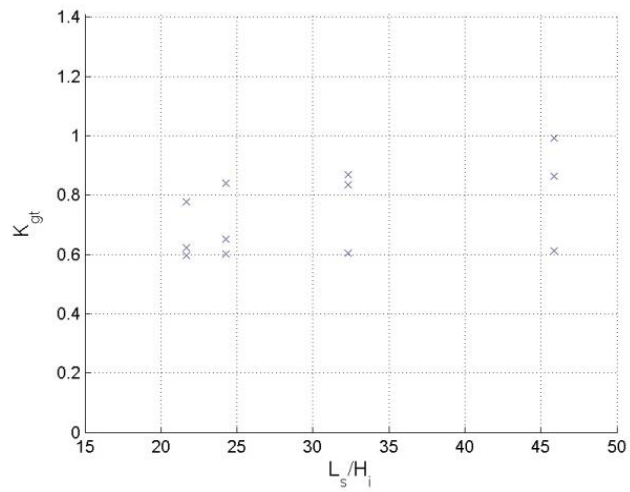
ความยาวโครงสร้างสัมพัทธ์มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม เมื่อความยาว โครงสร้างสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น สามารถพบจากสาเหตุ ได้แก่ ความสูงคลื่นลดลงหรือความยาว โครงสร้างเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การกระจายคลื่นเข้าสู่บริเวณด้านหลังโครงสร้างลดลง ทำให้การส่งผ่าน ของคลื่นเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4-11

ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุโครงสร้างสัมพัทธ์มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของคลื่นรวม เมื่อค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุโครงสร้างสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้น สามารถพบ จากสาเหตุ ได้แก่ ความสูงคลื่นลดลงหรือการกระจายวัสดุโครงสร้างเพิ่มขึ้น คลื่นจะมีการสูญเสีย พลังงานขณะซึมผ่านโครงสร้างลดลง จึงทำให้การส่งผ่านของคลื่นเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4-12

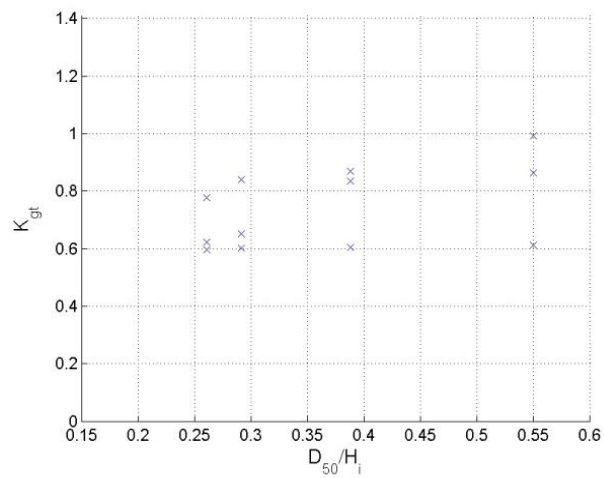
ค่าความลึกน้ำต่อความสูงคลื่นมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม เมื่อค่า ความลึกน้ำต่อความสูงคลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น ระยะห่างของสันโครงสร้างจากระดับน้ำนิ่งลดลง ทำให้ คลื่นสามารถแตกตัวบนสันโครงสร้างเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการลดพลังงานของคลื่น ทำให้การส่งผ่านของ คลื่นเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4-13



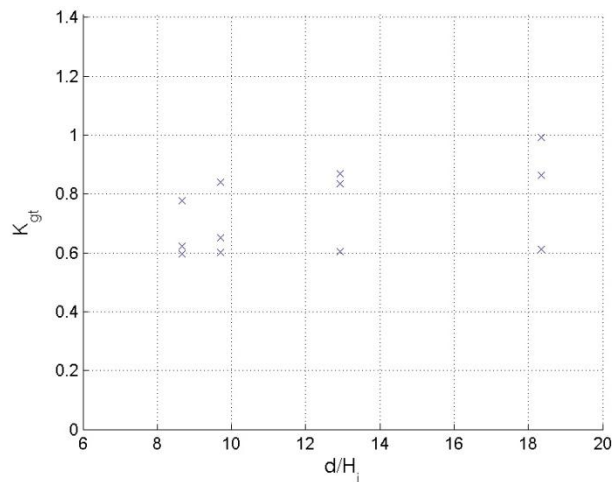
รูปที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{gt} กับ B/H_i ของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง



รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{gt} กับ L_s/H_i ของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง



รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{gt} กับ D_{50}/H_i ของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง



รูปที่ 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{gt} กับ d/H_i ของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง

ดังนั้นตัวแปรไร้หน่วยที่เหลือจากสมการที่ (4-3) จากการพิจารณาตัวแปรที่ซ้ำกันและเป็นค่าคงที่ แสดงดังสมการที่ (4-5)

$$K_{gt} = \frac{H_t}{H_i} = f\left(\frac{R_c}{H_i}, \frac{H_i}{L}\right) \quad (4-5)$$

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา Goda (1969) กล่าวว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นมีความสัมพันธ์กับตัวแปรไร้หน่วยของอัตราส่วนความลึกน้ำต่อความสูงโครงสร้าง การศึกษาครั้งนี้จึงเพิ่มตัวแปรไร้หน่วยของอัตราส่วนความลึกน้ำต่อความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง

ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้สามารถเขียนความสัมพันธ์ของความสูงคลื่นบริเวณด้านหลังโครงสร้างกับตัวแปรไร้หน่วย ดังสมการที่ (4-6)

$$K_{gt} = \frac{H_t}{H_i} = f\left(\frac{d}{h_s}, \frac{R_c}{H_i}, \frac{H_i}{L}\right) \quad (4-6)$$

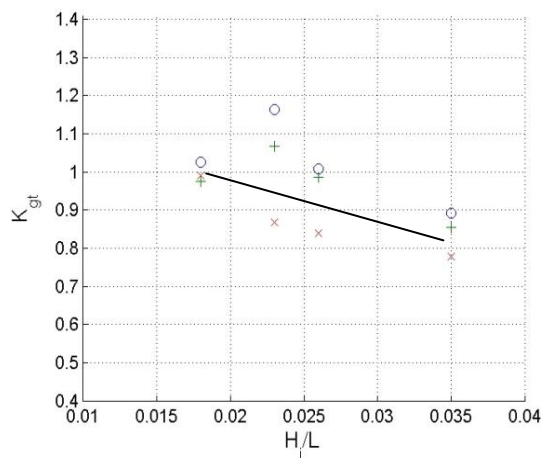
เมื่อ d/h_s คือ ความลึกน้ำสัมพัทธ์ (relative wave depths) R_c/H_i คือ ความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (relative wave height) H_i/L คือ ความชันคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่ง (wave steepness)

4.4.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมกับความชันคลื่น

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม (K_{gt}) กับความชันคลื่น (H/L) ในแต่ละระดับความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30, 0.35, 0.40 และ 0.50 เมตร สามารถอธิบายพฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่นแสดงดังรูปที่ 4-14 และมีรายละเอียดดังนี้

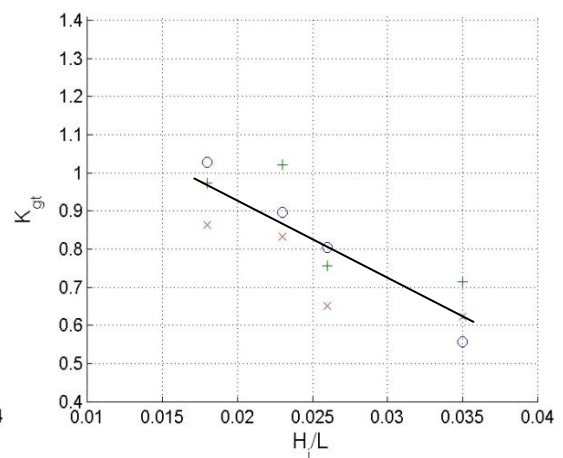
ก) กรณีความสูงโครงสร้างเท่ากับ 0.30 เมตร

(จมน้ำ 0.10 เมตร) $d/h_s = 1.33$



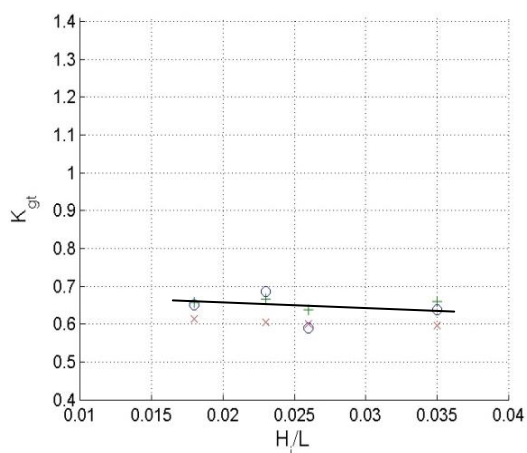
ข) กรณีความสูงโครงสร้างเท่ากับ 0.35 เมตร

(จมน้ำ 0.05 เมตร) $d/h_s = 1.14$



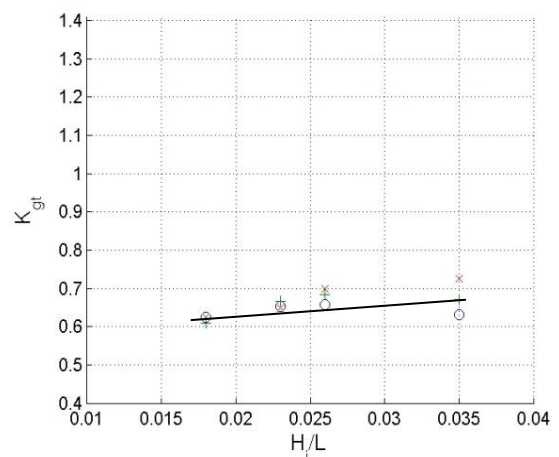
ค) กรณีความสูงโครงสร้างเท่ากับ 0.40 เมตร

(ระดับน้ำนิ่ง) $d/h_s = 1.00$



ง) กรณีความสูงโครงสร้างเท่ากับ 0.50 เมตร

(พื้นน้ำ 0.10 เมตร) $d/h_s = 0.80$



รูปที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{gt} กับ H/L

- 1) เมื่อความสูงโครงสร้างต่ำกว่าความลึกน้ำ ($h_s < d$) ความลึกน้ำสัมพัทธ์ (d/h_s) จะมีค่ามากกว่า 1 ผลการทดลองกรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 เมตร ($d/h_s = 1.33$) และ 0.35 เมตร ($d/h_s = 1.14$) แสดงดังรูปที่ 4-14 ก และ 4-14 ข ตามลำดับ เมื่อคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ฝั่งมีความชันคลื่นอยู่ในช่วง 0.018 – 0.035 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม (K_{gt}) จะอยู่ในช่วง 0.80-1.00 และ 0.60-1.00 ตามลำดับ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมบางตัวที่มีค่ามากกว่า 1.00 เนื่องจากความสูงคลื่นเฉลี่ยตามแนวขนานโครงสร้างยังคงอยู่ในช่วงสภาวะที่มีความปั่นป่วนของคลื่นที่มีการแตกตัวเกิดขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นมีค่ามากกว่า 1

เมื่อพิจารณาความชันของกราฟ พบว่า ความชันคลื่นมีความสัมพันธ์ผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม เมื่อความชันคลื่นเพิ่มสูงขึ้น การแตกตัวของคลื่นบนสันโครงสร้างจากความปั่นป่วนของคลื่นจะเพิ่มสูงขึ้นตาม การสลายพลังงานของคลื่นจึงมีสูงขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมมีค่าลดลง

- 2) เมื่อความสูงโครงสร้างเท่ากับความลึกน้ำ ($h_s = d$) ความลึกน้ำสัมพัทธ์ (d/h_s) จะมีค่าเท่ากับ 1 ผลการทดลองกรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.40 เมตร ($d/h_s = 1.00$) แสดงดังรูปที่ 4-14 ค เมื่อคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ฝั่งมีความชันคลื่นอยู่ในช่วง 0.018 – 0.035 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมอยู่ในช่วง 0.63 – 0.66

เมื่อพิจารณาความชันของกราฟ พบว่า กรณีสภาวะความสูงโครงสร้าง เท่ากัน ความชันคลื่นมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น เมื่อความชันคลื่นเพิ่มสูงขึ้น การแตกตัวของคลื่นบนสันโครงสร้างจากความปั่นป่วนของคลื่นเพิ่มสูงขึ้นตาม การสลายพลังงานของคลื่นจึงมีสูงขึ้น จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นมีค่าลดลง

- 3) เมื่อความสูงโครงสร้างสูงกว่าความลึกน้ำ ($h_s > d$) ความลึกน้ำสัมพัทธ์ (d/h_s) จะมีค่าน้อยกว่า 1 ผลการทดลองกรณีความสูงโครงสร้างเท่ากับ 0.50 เมตร ($d/h_s = 0.80$) แสดงดังรูปที่ 4-14 ง เมื่อคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ฝั่งมีความชันคลื่นอยู่ในช่วง 0.018 – 0.035 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมอยู่ในช่วง 0.60 – 0.65

เมื่อพิจารณาความชันของกราฟ พบว่า ความชันคลื่นมีความสัมพันธ์แบบผกผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม เมื่อความชันคลื่นเพิ่มสูงขึ้น พลังงานของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างจึงเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถซึมผ่านโครงสร้างได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การส่งผ่านของคลื่นเพิ่มขึ้น โดยการทดลองในส่วนนี้ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Ahrens (1987) ที่เกี่ยวข้องกับการที่คลื่นเคลื่อนที่ซึมผ่านเชื่อมกันคลื่น

ดังนั้นจากการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม (K_{gr}) กับความชันคลื่น (H/L) ในแต่ละระดับความลึกน้ำสัมพัทธ์ (d/h_0) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 1) การส่งผ่านของคลื่นหลังเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง บริเวณนอกช่วงสภาวะการปั่นป่วนของคลื่น มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมมีค่าน้อยกว่า 1
- 2) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมมีความสัมพันธ์กับความชันคลื่น สำหรับเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้ง ความชันคลื่นมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม เมื่อความชันคลื่นเพิ่มขึ้น พลังงานของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างจะเพิ่มขึ้น ทำให้คลื่นสามารถซึมผ่านโครงสร้างเพิ่มขึ้น ดังนั้นการส่งผ่านของคลื่นเข้าสู่บริเวณหลังโครงสร้างจึงเพิ่มขึ้น แต่เชื่อมกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง ผลของการข้ามล้นโครงสร้างมีอิทธิพลมากกว่าการซึมผ่านโครงสร้าง ทำให้ความชันคลื่นมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น เมื่อความชันคลื่นเพิ่มขึ้น การแตกตัวของคลื่นจากความปั่นป่วนของคลื่นบริเวณสันโครงสร้างเพิ่มขึ้น จึงทำให้สลายพลังงานของคลื่นเพิ่มขึ้น การส่งผ่านของคลื่นจึงน้อยลง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมน้อยลงตาม
- 3) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมมีความสัมพันธ์กับความลึกน้ำสัมพัทธ์ (d/h_0) เมื่อความลึกน้ำสัมพัทธ์ลดลง การส่งผ่านของคลื่นจะลดลง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมมีค่าลดลง ดังตารางที่ 4-2

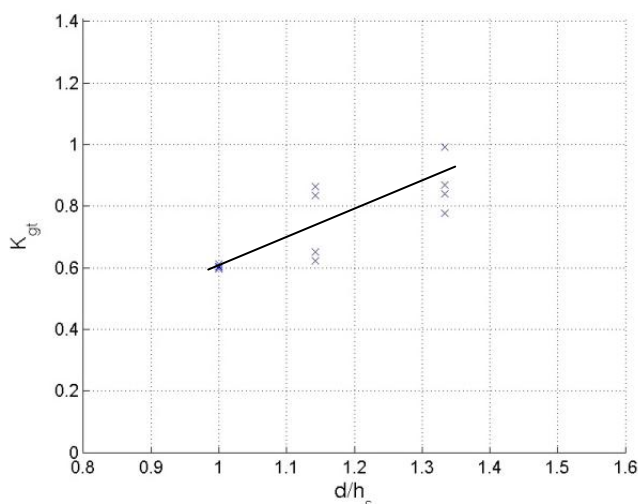
ตารางที่ 4-2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม ของแต่ละกรณีความสูงโครงสร้าง

โครงสร้างเชื่อมกันคลื่น	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม (K_{gt})
ความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 เมตร ($d/h_s = 1.33$)	0.80 – 1.00
ความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.35 เมตร ($d/h_s = 1.14$)	0.60 – 1.00
ความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.40 เมตร ($d/h_s = 1.00$)	0.63 – 0.66
ความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.50 เมตร ($d/h_s = 0.80$)	0.60 – 0.65

หมายเหตุ : ความลึกน้ำ เท่ากับ 0.40 เมตร

4.4.2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมกับความลึกน้ำสัมพันธ์

เมื่อพิจารณาผลของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม (K_{gt}) กับความลึกน้ำสัมพันธ์ (d/h_s) ของเชื่อมกันคลื่นได้นำแบบหินทิ้ง กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 (จมน้ำ 0.10 เมตร), 0.35 (จมน้ำ 0.05 เมตร) และ 0.40 (ระดับน้ำนิ่ง) เมตร พบว่า เมื่อความลึกน้ำสัมพันธ์ลดลง ทำให้ระยะห่างของสันโครงสร้างจากระดับน้ำนิ่งมีค่าลดลง การแตกตัวของคลื่นบริเวณสันโครงสร้างจะเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถลดพลังงานของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ฝั่งเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมจึงมีค่าลดลง ดังรูปที่ 4-15



รูปที่ 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{gt} กับ d/h_s ของเชื่อมกันคลื่นได้นำแบบหินทิ้ง

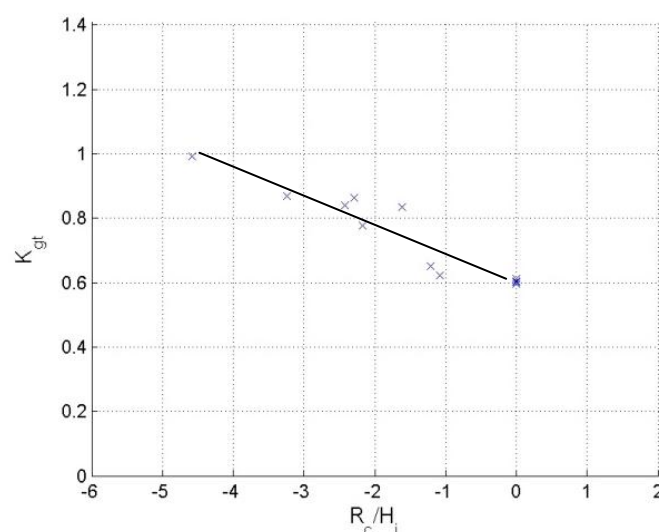
4.4.2.3 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมกับความสูงคลื่นสัมพันธ์

การพิจารณาผลของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม (K_{gt}) กับความสูงคลื่นสัมพันธ์ (R_c/H) ของเชื่อมกันคลื่นได้นำแบบหินทิ้ง กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 (จมน้ำ 0.10 เมตร), 0.35 (จมน้ำ 0.05 เมตร) และ 0.40 (ระดับน้ำนิ่ง) พบว่า ความสูงคลื่นสัมพันธ์เพิ่มขึ้น

ทำให้ระยะห่างของสันโครงสร้างจากระดับน้ำนิ่งมีค่าลดลง การแตกตัวของคลื่นบริเวณสันโครงสร้างจะเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้สามารถลดพลังงานของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ฝั่งเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมจึงมีค่าลดลง ดังรูปที่ 4-16

จากการทดลองครั้งนี้ได้พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมกับความสูงคลื่นสัมพัทธ์ เปรียบเทียบกับการศึกษาของ Van der Meer et al. (2005) โดยได้รวบรวมข้อมูลจากการทดลองเกี่ยวกับเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้ง แบบจำลอง 2 มิติ (ดังรูปที่ 2-7) ผลการเปรียบเทียบพบว่า เขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้งมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมกับความสูงคลื่นสัมพัทธ์ของการทดลอง มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาของ Van der Meer et al. (2005) แต่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นของการทดลองมีค่ามากกว่า เนื่องจากผลของการกระจายตัวของคลื่น ทำให้ความสูงคลื่นเฉลี่ยตามแนวขนานโครงสร้างเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมจึงเพิ่มขึ้น

แม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม แบบเฉลี่ยตามแนวขนานโครงสร้างหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำของการทดลองจะมีแนวโน้มสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา แต่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมยังมีมากกว่า เนื่องจากผลการกระจายตัวของคลื่นที่เคลื่อนเข้ามาหลังเขื่อนกันคลื่น ซึ่งความแตกต่างของการส่งผ่านของคลื่นมีส่วนสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำเป็นอย่างมาก ดังนั้นการใช้สมการการส่งผ่านของคลื่นด้วยแบบจำลอง 2 มิติ ที่พิจารณาเฉพาะผลของการข้ามสันและการซึมผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น มีความจำเป็นต้องพิจารณาผลของการกระจายของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ามาจากปลายเขื่อนกันคลื่น



รูปที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{gt} กับ R_c/H_i ของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง

4.5 การสรุปพฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่น

จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่นในแบบจำลอง และการวิเคราะห์ในรูปแบบของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม (K_{gr}) ที่นำมาลากเป็นเส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม แบ่งการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมออกเป็น 3 ขอบเขต ได้แก่ บริเวณด้านหน้าโครงสร้าง (region 1) บริเวณสันโครงสร้าง (region 2) และบริเวณด้านหลังโครงสร้าง (region 3) เป็นต้น (ดังรูปที่ 2-4) ของแต่ละระดับความสูงโครงสร้าง มีรายละเอียดดังตารางที่ 4-3, 4-4, 4-5 และ 4-6 เรียงจากกรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.50, 0.40, 0.35 และ 0.30 เมตร ตามลำดับ

การวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่นรวม จากผลการทดลองทั้ง 16 กรณี แบ่งกลุ่มของการส่งผ่านของคลื่นของบริเวณด้านหลังโครงสร้างออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้ง มีผลของการข้ามผ่านโครงสร้างและการกระจายของคลื่น กลุ่มที่สองเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง มีผลของการข้ามสันโครงสร้าง การข้ามผ่านโครงสร้าง และการกระจายของคลื่น สรุปประเด็นต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

- 1) เชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำและใต้น้ำแบบหินทิ้ง ช่วยลดการส่งผ่านของคลื่นบริเวณด้านหลังโครงสร้างได้
- 2) ในกรณีเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้ง ผลของการข้ามผ่านโครงสร้างมีมากกว่าผลการกระจายของคลื่น เมื่อความชันคลื่นเพิ่มขึ้น คลื่นจะสามารถข้ามผ่านโครงสร้างได้เพิ่มขึ้น การส่งผ่านของคลื่นเพิ่มขึ้น ขณะที่ความชันคลื่นลดลง คลื่นจะสามารถข้ามผ่านโครงสร้างได้ลดลง การส่งผ่านของคลื่นจึงลดลง ในกรณีเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง แม้ว่าผลของการข้ามผ่านโครงสร้างมีผลมากกว่าการกระจายของคลื่น แต่ผลของการข้ามสันโครงสร้าง ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความชันคลื่นและการส่งผ่านของคลื่นกลับตรงกันข้ามกัน เนื่องจากกรณีที่สันโครงสร้างอยู่ใต้น้ำ อิทธิพลของการข้ามสันจะมีมาก เมื่อความชันคลื่นเพิ่มขึ้น คลื่นสามารถที่จะไปปั่นป่วนท้องน้ำได้เพิ่มขึ้น สามารถแตกตัวของคลื่นเพิ่มขึ้น จึงสลายพลังงานของคลื่นได้เพิ่มขึ้น การส่งผ่านของคลื่นจึงลดลง ขณะที่ความชันคลื่นลดลง การแตกตัวของคลื่นลดลง สลายพลังงานของคลื่นลดลง การส่งผ่านของคลื่นจึงเพิ่มขึ้น
- 3) เมื่อพิจารณาการแตกตัวของคลื่น ในกรณีเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้ง ไม่พบการแตกตัวบริเวณด้านหลังโครงสร้าง คลื่นไม่สามารถล้นข้ามสันโครงสร้างได้ ขณะที่ใน

กรณีเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ คลื่นสามารถล้นข้ามสันโครงสร้างมาได้ คลื่นจะเคลื่อนที่ผ่านบริเวณสันโครงสร้าง เมื่อความชันคลื่นถึงความชันสูงสุด คลื่นจะเกิดการแตกตัวขึ้น และจะแตกตัวอย่างต่อเนื่องเข้าสู่บริเวณหลังโครงสร้าง เพื่อลดพลังงานของคลื่น ช่วงนี้จะมีสภาวะของความปั่นป่วนของคลื่นเป็นอย่างมาก โดยอัตราส่วนของความลึกน้ำต่อความสูงโครงสร้าง (relative water depths, d/h_s) มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาแตกตัวของคลื่นจากปลายของสันด้านท้ายโครงสร้าง เมื่อความสูงโครงสร้างเพิ่มขึ้น การแตกตัวของคลื่นบนสันโครงสร้างเพิ่มขึ้น การสลายพลังงานของคลื่นบนสันโครงสร้างเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะเหลือพลังงานที่ต้องสลายบริเวณด้านหลังโครงสร้างลดลง ทำให้ระยะเวลาแตกตัวของคลื่นลดลงตาม

- 4) ความลาดชันของความสูงคลื่น ในกรณีเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้ง มีลักษณะลาดเอียงจากปลายโครงสร้างสู่บริเวณกึ่งกลางโครงสร้าง ซึ่งแตกต่างกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง มีลักษณะลาดเอียงจากกึ่งกลางโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นสู่ปลายโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น สอดคล้องกับเหตุผลที่ว่า แม้ว่าผลของการซึมผ่านโครงสร้างมีผลมากกว่าการกระจายของคลื่น แต่ผลของการข้ามสันโครงสร้าง ทำให้พฤติกรรมของการส่งผ่านของคลื่นกลับตรงกันข้ามกัน เนื่องจากกรณีที่สันโครงสร้างอยู่ใต้น้ำ อิทธิพลของการข้ามสันจะมีมาก โดยความลาดเอียงของคลื่นจะมีผลต่อรูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำที่หมุนวนหลังโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น ซึ่งจะกล่าวในส่วนของบทถัดไป

ตารางที่ 4-3 พฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่น กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.50 เมตร (พื้นน้ำ 0.10 เมตร)

ขอบเขต	รายละเอียด
<p>บริเวณ ด้านหน้า โครงสร้าง (region 1)</p>	<p>การที่สันโครงสร้างอยู่สูงกว่าระดับน้ำมาก ทำให้คลื่นไม่สามารถข้ามสันโครงสร้างได้ คลื่นส่วนใหญ่จะมีการสะท้อนกลับทิศทางตรงกันข้ามกับคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง ผลของการสะท้อนทำให้รูปแบบคลื่น (wave form) มีความปั่นป่วน บางทีมีลักษณะเป็นแนวเสริมและแนวหักล้างกันขณะทำการทดลอง</p> <p>เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณความชันด้านหน้าโครงสร้าง คลื่นจะถูกยกตัวตามความลาดชัน แต่คลื่นไม่สามารถข้ามสันโครงสร้างได้ คลื่นจึงเกิดการแตกตัวขึ้น จากการที่เป็นเชือกกัน คลื่นแบบหินทิ้งและยอมให้น้ำซึมผ่านได้ ทำให้คลื่นบางส่วนสามารถซึมผ่านโครงสร้างเข้าสู่บริเวณสันโครงสร้าง (region 2)</p> <p>ความชันคลื่นมีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับการสะท้อนของคลื่น การแตกตัวของคลื่น และการซึมผ่านโครงสร้าง เมื่อความชันคลื่นเพิ่มขึ้น ทำให้การสะท้อนของคลื่น การแตกตัวของคลื่น และการซึมผ่านโครงสร้างมีเพิ่มขึ้น</p>
<p>บริเวณสัน โครงสร้าง (region 2)</p>	<p>คลื่นไม่สามารถข้ามสันโครงสร้าง แต่คลื่นสามารถที่จะซึมผ่านโครงสร้างได้ ความชันคลื่นมีความสัมพันธ์แปรผันการซึมผ่านโครงสร้าง เมื่อความชันเพิ่มขึ้น การซึมผ่านโครงสร้างและเข้าสู่บริเวณด้านหลังได้เพิ่มขึ้น ทำให้การส่งผ่านของคลื่นบริเวณด้านหลังโครงสร้างเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ Ahrens (1987)</p>
<p>บริเวณ ด้านหลัง โครงสร้าง (region 3)</p>	<p>การส่งผ่านของคลื่น บริเวณด้านหลังโครงสร้างเป็นผลมาจากการซึมผ่านโครงสร้างและการกระจายของคลื่นจากปลายโครงสร้าง โครงสร้างเชือกกันคลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้งสามารถช่วยลดความรุนแรงของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ฝั่งอย่างเห็นได้ชัด ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม (K_{gt}) กระจายตัวอยู่ช่วงประมาณ 0.60-0.65</p> <p>ความสูงคลื่นบริเวณปลายหลังโครงสร้างมีมากกว่าบริเวณกึ่งกลางหลังโครงสร้าง ทำให้ความลาดชันของคลื่น (Wave height gradient) มีแนวลาดเทจากปลายหลังโครงสร้างเข้าสู่บริเวณกึ่งกลางหลังโครงสร้าง</p>

ตารางที่ 4-4 พฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่น กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.40 เมตร (ระดับน้ำนิ่ง)

ขอบเขต	รายละเอียด
<p>บริเวณ ด้านหน้า โครงสร้าง (region 1)</p>	<p>การที่สันโครงสร้างเท่ากับระดับน้ำ คลื่นส่วนใหญ่จะมีการสะท้อนกลับทิศทางตรงกันข้ามกับคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะ ผลของการสะท้อนทำให้รูปแบบคลื่นมีความปั่นป่วน เช่นเดียวกับกรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.50 เมตร เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณความชันด้านหน้าโครงสร้าง คลื่นจะถูกยกตัว จากความลาดชันของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้น และเกิดการแตกตัวของคลื่นขึ้น เนื่องจากความชันคลื่นมีค่าเกินกว่าความชันคลื่นสูงสุด ซึ่งเป็นขีดจำกัดของการทำให้คลื่นแตกตัว คลื่นบางส่วนสามารถข้ามสันโครงสร้าง</p>
<p>บริเวณสัน โครงสร้าง (region 2)</p>	<p>มีการข้ามสันโครงสร้าง คลื่นที่มาถึงบริเวณสันโครงสร้าง ส่วนใหญ่จะมีการแตกตัวเกิดขึ้นเนื่องจากความชันคลื่นมีค่าเท่ากับความชันคลื่นสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกตัว บริเวณสันโครงสร้างมีความปั่นป่วนของคลื่นเป็นอย่างมาก นอกจากการข้ามสันโครงสร้างยังมีการซึมผ่านโครงสร้างเกิดขึ้นบริเวณสันโครงสร้างเช่นกัน ความชันคลื่นมีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับการข้ามสัน การแตกตัว และการซึมผ่านโครงสร้าง เมื่อความชันคลื่นเพิ่มขึ้น ทำให้การข้ามสัน การแตกตัวและการซึมผ่านโครงสร้างมีเพิ่มขึ้น</p>
<p>บริเวณ ด้านหลัง โครงสร้าง (region 3)</p>	<p>การส่งผ่านของคลื่น บริเวณด้านหลังโครงสร้างเป็นผลมาจากการข้ามสัน การซึมผ่านโครงสร้างและการกระจายของคลื่นจากปลายโครงสร้าง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม (K_{gt}) กระจายตัวอยู่ช่วงประมาณ 0.63 -0.66</p> <p>บริเวณกึ่งกลางด้านหลังโครงสร้างจะเห็นการแตกตัวของคลื่นที่ต่อเนื่องมาจากสันโครงสร้าง ซึ่งเป็นผลของการข้ามสันโครงสร้าง กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.40 เมตร ระยะการแตกตัวของคลื่น ประมาณ 0.37-0.67 ของความยาวคลื่นนับจากปลายของสันด้านท้ายโครงสร้าง (0.45L-0.65L) เรียกว่าช่วงสภาวะที่มีความปั่นป่วนของคลื่น และมีการกระจายตัวของคลื่นจากปลายโครงสร้างเกิดขึ้น สันคลื่นจะแผ่เข้ามาสู่บริเวณด้านหลังโครงสร้าง แต่บริเวณกึ่งกลางด้านหลังโครงสร้างจะไม่เห็นผลของการกระจาย เนื่องจากผลของการแตกตัวของคลื่นมีอิทธิพลมากกว่าการกระจายของคลื่น มีความลาดชันของคลื่นมีแนวลาดเทจากบริเวณกึ่งกลางหลังโครงสร้างเข้าสู่ปลายหลังโครงสร้าง นอกจากนี้ความชันคลื่นมีผลต่อการส่งผ่านคลื่น บริเวณด้านหลังโครงสร้างที่อยู่นอกสภาวะที่มีการปั่นป่วนของคลื่น เมื่อความชันคลื่นเพิ่มขึ้น การแตกตัวของคลื่นเพิ่มขึ้น จึงสามารถสลายพลังงาน การส่งผ่านของคลื่นจะลดลง</p>

ตารางที่ 4-5 พฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่น กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.35 เมตร (จมน้ำ 0.05 เมตร)

ขอบเขต	รายละเอียด
<p>บริเวณ ด้านหน้า โครงสร้าง (region 1)</p>	<p>การสะท้อนของคลื่น จากการที่เป็นโครงสร้างที่สั้นโครงสร้างต่ำกว่าระดับน้ำ ผลของการสะท้อนจะน้อยกว่ากรณีโครงสร้าง เท่ากับ 0.40 และ 0.50 เมตร บริเวณความชันด้านหน้าโครงสร้าง คลื่นบางส่วนเริ่มมีการแตกตัวเกิดขึ้น เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณความชันด้านหน้าโครงสร้าง คลื่นจะถูกยกตัว จากความลาดชันของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้น และมักเกิดการแตกตัวของคลื่นขึ้น คลื่นบางส่วนสามารถข้ามลันสันและซึมผ่านโครงสร้างได้</p>
<p>บริเวณสัน โครงสร้าง (region 2)</p>	<p>มีการแตกตัวของคลื่นตลอดความยาวโครงสร้าง รูปแบบคลื่นมีความผันผวนเป็นอย่างมาก เนื่องจากการสูญเสียพลังงานภายในของคลื่น ได้แก่ ความเสียดทานบนพื้นผิวของสันโครงสร้าง การแตกตัวของคลื่น การปั่นป่วนของกระแสน้ำที่เคลื่อนที่ย้อนกลับผ่านสันโครงสร้าง รวมทั้งแรงต้านการเคลื่อนที่ผ่านวัสดุโครงสร้าง</p> <p>รูปแบบคลื่นที่มีความผันผวนมีความสัมพันธ์กับความสูงโครงสร้างและความชันคลื่นที่เข้าสู่โครงสร้าง เมื่อความสูงโครงสร้างเพิ่มขึ้น ระยะความสูงของระดับน้ำเหนือสันโครงสร้างลดลง หรือความชันคลื่นที่เข้าสู่โครงสร้างเพิ่มขึ้น ทำให้คลื่นสามารถที่จะไปทำให้เกิดการปั่นป่วนบริเวณสันโครงสร้างได้มากขึ้น คลื่นจึงมีการแตกตัวได้เพิ่มมากขึ้น</p>
<p>บริเวณ ด้านหลัง โครงสร้าง (region 3)</p>	<p>การส่งผ่านของคลื่น บริเวณด้านหลังโครงสร้างเป็นผลมาจากการข้ามลัน การซึมผ่านโครงสร้างและการกระจายของคลื่นจากปลายโครงสร้าง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมกระจายตัวอยู่ช่วงประมาณ 0.60 -1.00</p> <p>บริเวณกึ่งกลางด้านหลังโครงสร้างมีแตกตัวของคลื่นที่ต่อเนื่องมาจากสันโครงสร้าง ระยะการแตกตัวของคลื่น ประมาณ 0.25-0.76 ของความยาวคลื่นนับจากปลายของสันด้านท้ายโครงสร้าง (0.25L-0.75L) และมีการกระจายตัวของคลื่นจากปลายโครงสร้างเกิดขึ้น สันคลื่นจะแผ่เข้ามาสู่บริเวณด้านหลังโครงสร้าง แต่บริเวณกึ่งกลางด้านหลังโครงสร้างจะไม่เห็นผลของการกระจาย เนื่องจากผลของการแตกตัวของคลื่นมีอิทธิพลมากกว่าการกระจายของคลื่น มีความลาดชันของคลื่นมีแนวลาดเทจากบริเวณกึ่งกลางหลังโครงสร้างเข้าสู่ปลายหลังโครงสร้าง และความชันคลื่นมีผลต่อการส่งผ่านคลื่นบริเวณด้านหลังโครงสร้างที่อยู่นอกสภาวะที่มีการปั่นป่วนของคลื่น เมื่อความชันคลื่นเพิ่มขึ้น การแตกตัวของคลื่นเพิ่มขึ้น จึงสามารถสลายพลังงาน การส่งผ่านของคลื่นจะลดลง เช่นเดียวกับกรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.40 เมตร</p>

ตารางที่ 4-6 พฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่น กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 เมตร (จมน้ำ 0.10 เมตร)

ขอบเขต	รายละเอียด
บริเวณ ด้านหน้า โครงสร้าง (region 1)	มีพฤติกรรมการสะท้อนเช่นเดียวกับกรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.35 เมตร แต่ผลของการสะท้อนของคลื่นจะน้อยกว่า เนื่องจากมีระดับความสูงโครงสร้างที่ต่ำกว่า
บริเวณสัน โครงสร้าง (region 2)	มีพฤติกรรมการแตกตัวเช่นเดียวกับกรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.35 เมตร แต่ผลของการแตกตัวของคลื่นจะน้อยกว่า เนื่องจากมีระดับความสูงโครงสร้างที่ต่ำกว่า ทำให้การปั่นป่วนของคลื่นกับสันโครงสร้างมีน้อยกว่า
บริเวณ ด้านหลัง โครงสร้าง (region 3)	<p>การส่งผ่านของคลื่น บริเวณด้านหลังโครงสร้างเป็นผลมาจากการข้ามสัน การซึมผ่านโครงสร้างและการกระจายของคลื่นจากปลายโครงสร้าง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นกระจายตัวอยู่ช่วงประมาณ 0.80 -1.00 มีพฤติกรรมการแตกตัวเช่นเดียวกับกรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.35 เมตร</p> <p>เมื่อคลื่นเคลื่อนเข้าสู่บริเวณด้านหลังโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น บริเวณกึ่งกลางด้านหลังโครงสร้างมีแตกตัวของคลื่นที่ต่อเนื่องมาจากสันโครงสร้าง ระยะการแตกตัวของคลื่น ประมาณ 0.30-0.68 ของความยาวคลื่นนับจากปลายของสันด้านท้ายโครงสร้าง (0.30L-0.68L)</p>

บทที่ 5

พฤติกรรมของกระแสน้ำหลังเชื่อมกันคลื่น

งานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวกับเชื่อมกันคลื่นได้นำจะให้ความสำคัญกับเรื่องของความสูงคลื่นที่ลดลงเนื่องจากการส่งผ่านของคลื่น ความมีเสถียรภาพของวัสดุโครงสร้างที่ทนต่อแรงกระทำของคลื่นที่ข้ามล้นสันโครงสร้าง ซึ่งเป็นเพียงส่วนหนึ่งของการออกแบบโครงสร้างเท่านั้น แต่การก่อสร้างโครงสร้างใกล้แนวชายฝั่งยังมีสิ่งที่สำคัญต่อการศึกษาคือ รูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำบริเวณใกล้แนวชายฝั่ง (nearshore circulation) ซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของการเปลี่ยนแปลงของตะกอนชายฝั่ง การทับถมแบบแหลมทรายลักษณะต่างๆ

ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการข้ามล้นสันโครงสร้าง ที่มีผลต่อรูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำในแนวราบ (horizontal circulation) บริเวณด้านหลังโครงสร้าง ซึ่งเป็นส่วนประกอบในการพิจารณาออกแบบเชื่อมกันคลื่นได้นำ

เนื้อหาของบทนี้อธิบายพฤติกรรมของกระแสน้ำหลังโครงสร้าง ประกอบด้วย วิธีการวิเคราะห์ความเร็วการไหลจากข้อมูลความเร็วการไหลแต่ละตำแหน่งการเก็บข้อมูล ผลการทดลอง การวิเคราะห์ผล และสรุปผล มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลความเร็วการไหล

เมื่อทำการเก็บวัดข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลตามเวลาและตำแหน่ง ขั้นตอนต่อไปเป็นการวิเคราะห์ความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น (phase average velocity) สำหรับการศึกษานี้ให้ความสนใจรูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำเฉพาะในแนวราบเท่านั้น ผลการวิเคราะห์จึงพิจารณาความเร็วการไหลเฉลี่ยแกน x และ y เท่านั้น

ข้อมูลความเร็วการไหลที่เก็บข้อมูลมาจะประกอบด้วยหลายลูกคลื่น รูปแบบข้อมูลที่ได้มาความสัมพันธ์กับข้อมูลความสูงคลื่นที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 ที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับผิวน้ำขึ้นลงในแต่ละช่วงเวลา มีลักษณะเป็นคลื่นฮาร์โมนิก เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลความเร็วการไหล เพื่อหาคาบคลื่นด้วยการวิเคราะห์ความถี่ (frequency analysis) โดยเลือกใช้วิธี power spectral energy (PSE) จากผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่อคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างมีขนาดความชันคลื่นเท่ากัน ข้อมูลคลื่นและความเร็วการไหลสามารถวิเคราะห์ได้คาบคลื่นเท่ากัน

เมื่อนำคาบคลื่นที่ได้มาแบ่งข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลตามเวลาที่ได้จากการบันทึกอย่างต่อเนื่อง โดยจะสามารถหาความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น (phase average velocity) ของแต่ละช่วงคาบคลื่นตามแกน x และแกน y ดังสมการที่ (5-1) และ (5-2) ตามลำดับ เมื่อผลรวมการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลตามเวลาในช่วงย่อยๆ ของแต่ละช่วงเวลามีค่าเป็นบวก แสดงว่าความเร็วการไหลมีทิศทางตามแกนที่กำหนดไว้ หากผลรวมมีค่าเป็นลบ แสดงว่าความเร็วการไหลมีทิศทางตรงข้ามกับแกนที่กำหนดไว้

$$\bar{V}_x = \frac{1}{T} \int_0^T v_x dt \quad (5-1)$$

$$\bar{V}_y = \frac{1}{T} \int_0^T v_y dt \quad (5-2)$$

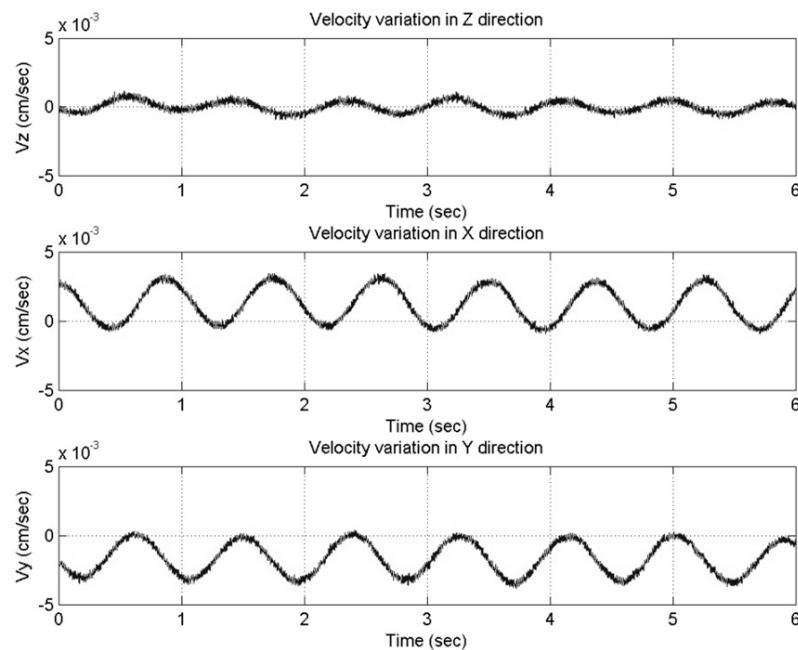
เมื่อ \bar{V}_x คือ ความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่นในแนวแกนขนานกับโครงสร้าง (แกน x) \bar{V}_y คือ ความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่นในแนวตั้งฉากโครงสร้าง (แกน y) และ T คือ คาบคลื่น

สำหรับการพิจารณาความเร็วการไหลของแต่ละตำแหน่งจะเป็นผลรวมร่วมกันของความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบเฉลี่ยในแนวแกน x และแกน y ซึ่งมีขนาดความเร็วการไหลเฉลี่ยในแนวราบ ดังสมการที่ (5-3) และมุมที่แกนทั้งสองกระทำกัน ดังสมการที่ (5-4)

$$\bar{V} = \sqrt{\bar{V}_x^2 + \bar{V}_y^2} \quad (5-3)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\bar{V}_y}{\bar{V}_x}\right) \quad (5-4)$$

เมื่อ \bar{V} คือ ความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบเฉลี่ยในแนวราบ ซึ่งเป็นผลรวมกันของความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบเฉลี่ยแนวแกน x และแกน y และ θ คือ มุมของความเร็วเฉลี่ยตามคาบคลื่นในแนวราบเมื่อเทียบกับแกน x และแกน y



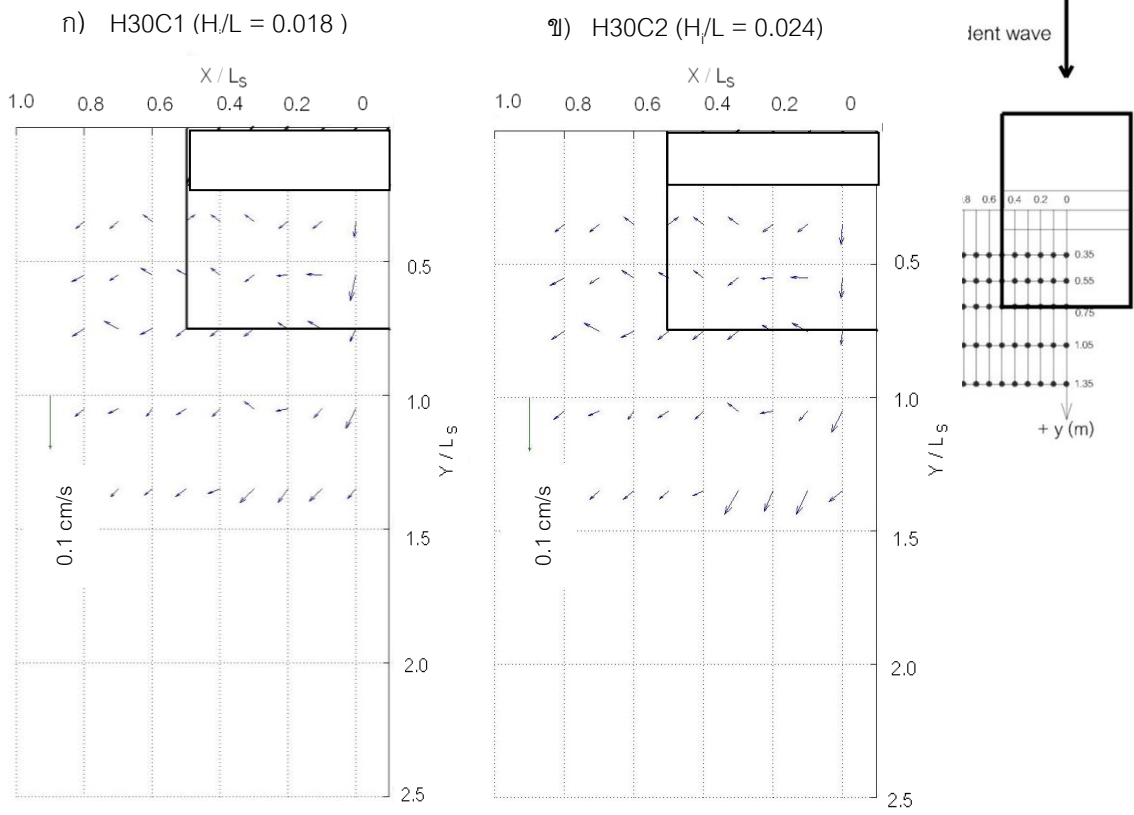
รูปที่ 5-1 ตัวอย่างข้อมูลความเร็วการไหลตามแนวแกน x, y และ z
กรณี H30C1 ความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 เมตร ความชันคลื่น เท่ากับ 0.018

5.2 ผลการทดลอง

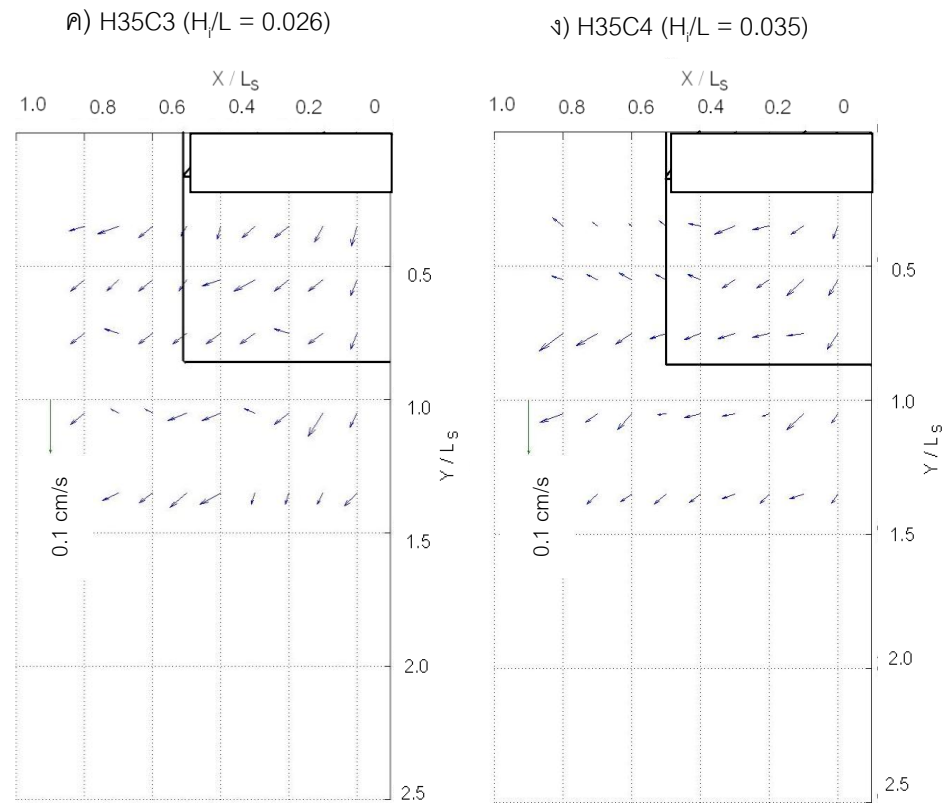
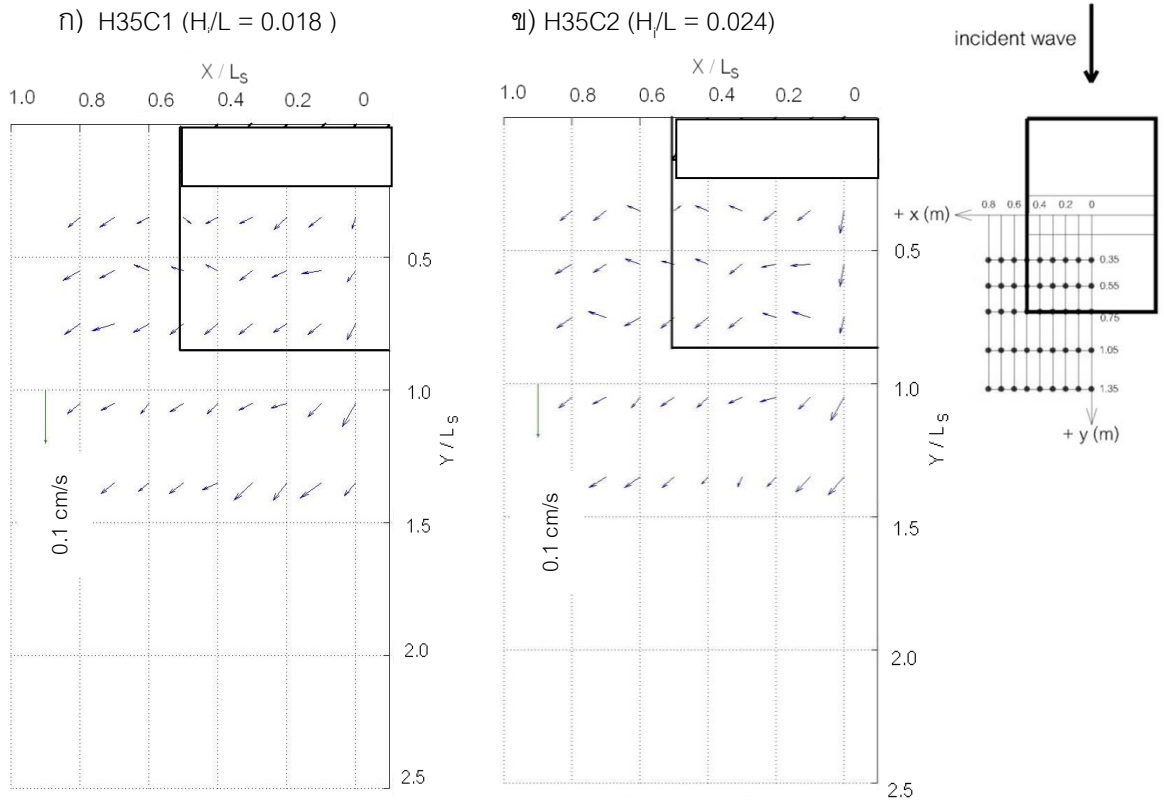
ในการทดลองแต่ละกรณีจะสามารถหาความเร็วการไหลเฉลี่ยแต่ละตำแหน่งได้ เมื่อนำมาเขียนทิศทางการไหลบริเวณด้านหลังโครงสร้าง จะสามารถแสดงรูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำแต่ละกรณีได้

โดยกำหนดให้จุด (0,0) เป็นตำแหน่งกึ่งกลางโครงสร้าง แกน y เป็นค่าของระยะทางแนวตั้งฉากกับโครงสร้างต่อความยาวโครงสร้าง (y/L_s) แกน x เป็นค่าของระยะทางแนวขนานกับโครงสร้างต่อความยาวโครงสร้าง (x/L_s) ความยาวของลูกศรเป็นขนาดความเร็วการไหลแต่ละตำแหน่งการเก็บข้อมูล และมีเส้นกรอบสีเหลี่ยมแสดงขอบเขตของเขื่อนกันคลื่น ซึ่งแสดงผลรูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำจากการทดลองทั้งสิ้น 16 กรณี แบ่งตามระดับความสูงโครงสร้างได้ดังนี้

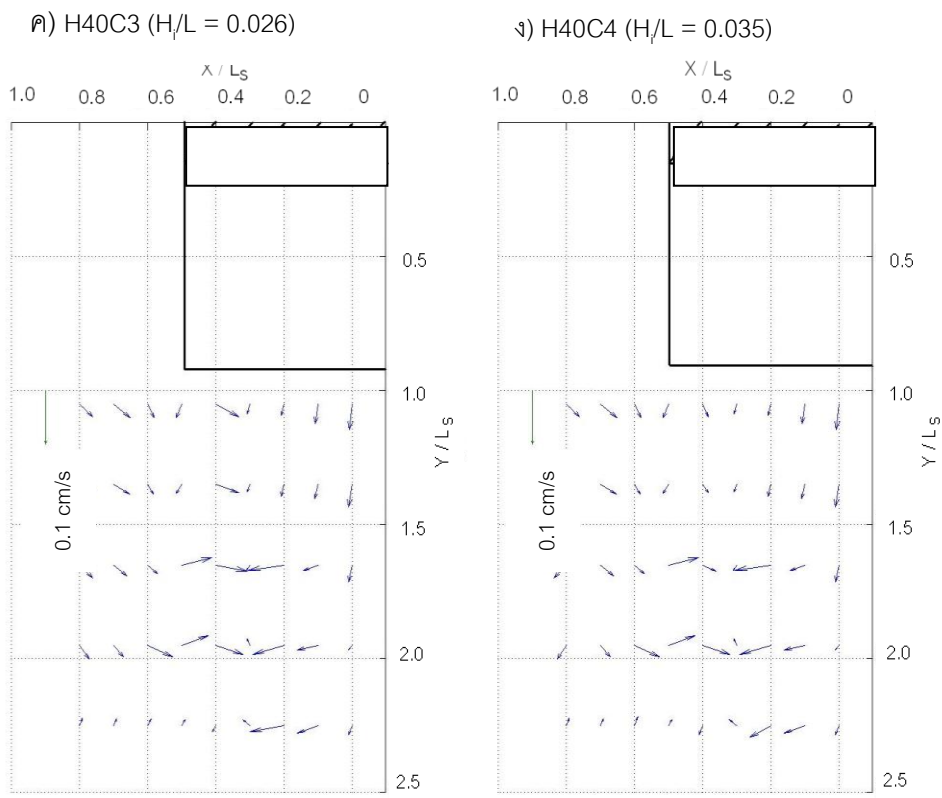
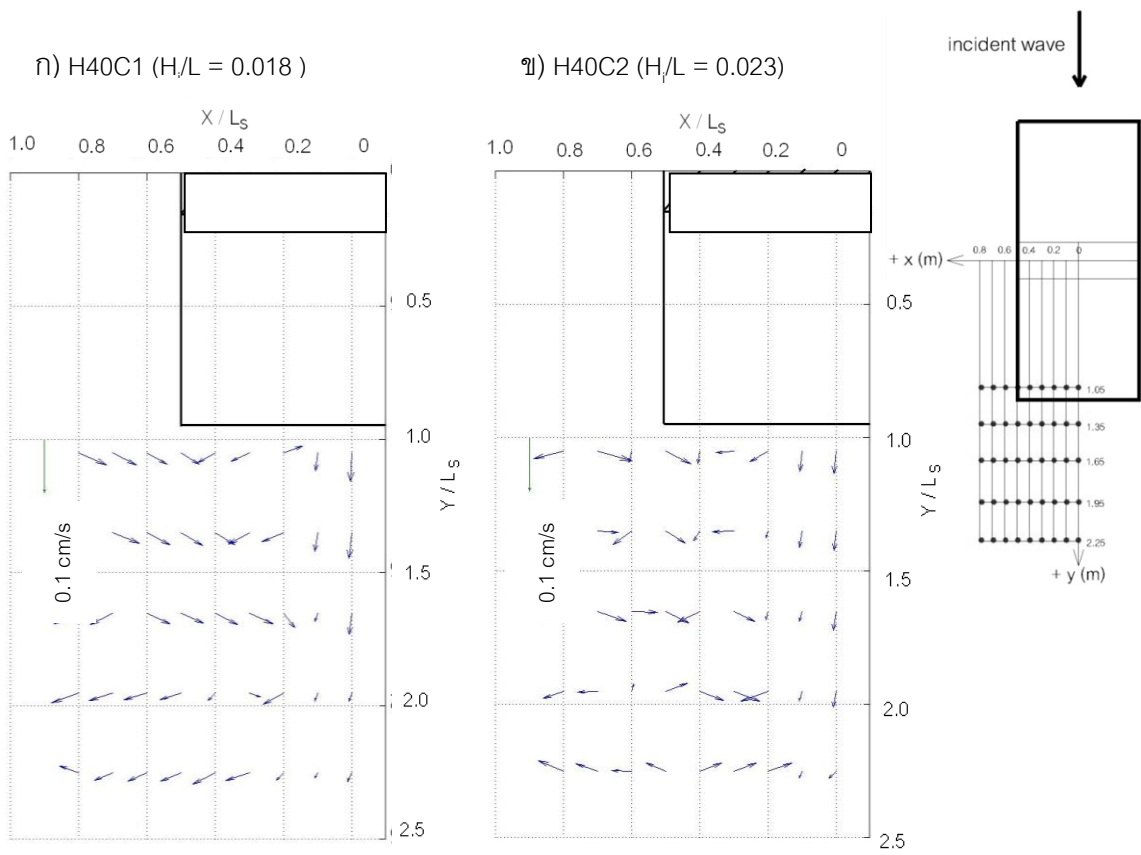
- 1) กรณีความสูงโครงสร้าง (h_s) เท่ากับ 0.30 เมตร (จมน้ำ 0.10 เมตร) แสดงดังรูปที่ 5-2
- 2) กรณีความสูงโครงสร้าง (h_s) เท่ากับ 0.35 เมตร (จมน้ำ 0.05 เมตร) แสดงดังรูปที่ 5-3
- 3) กรณีความสูงโครงสร้าง (h_s) เท่ากับ 0.40 เมตร (ระดับน้ำนิ่ง) แสดงดังรูปที่ 5-4
- 4) กรณีความสูงโครงสร้าง (h_s) เท่ากับ 0.50 เมตร (พื้นน้ำ 0.10 เมตร) แสดงดังรูปที่ 5-5



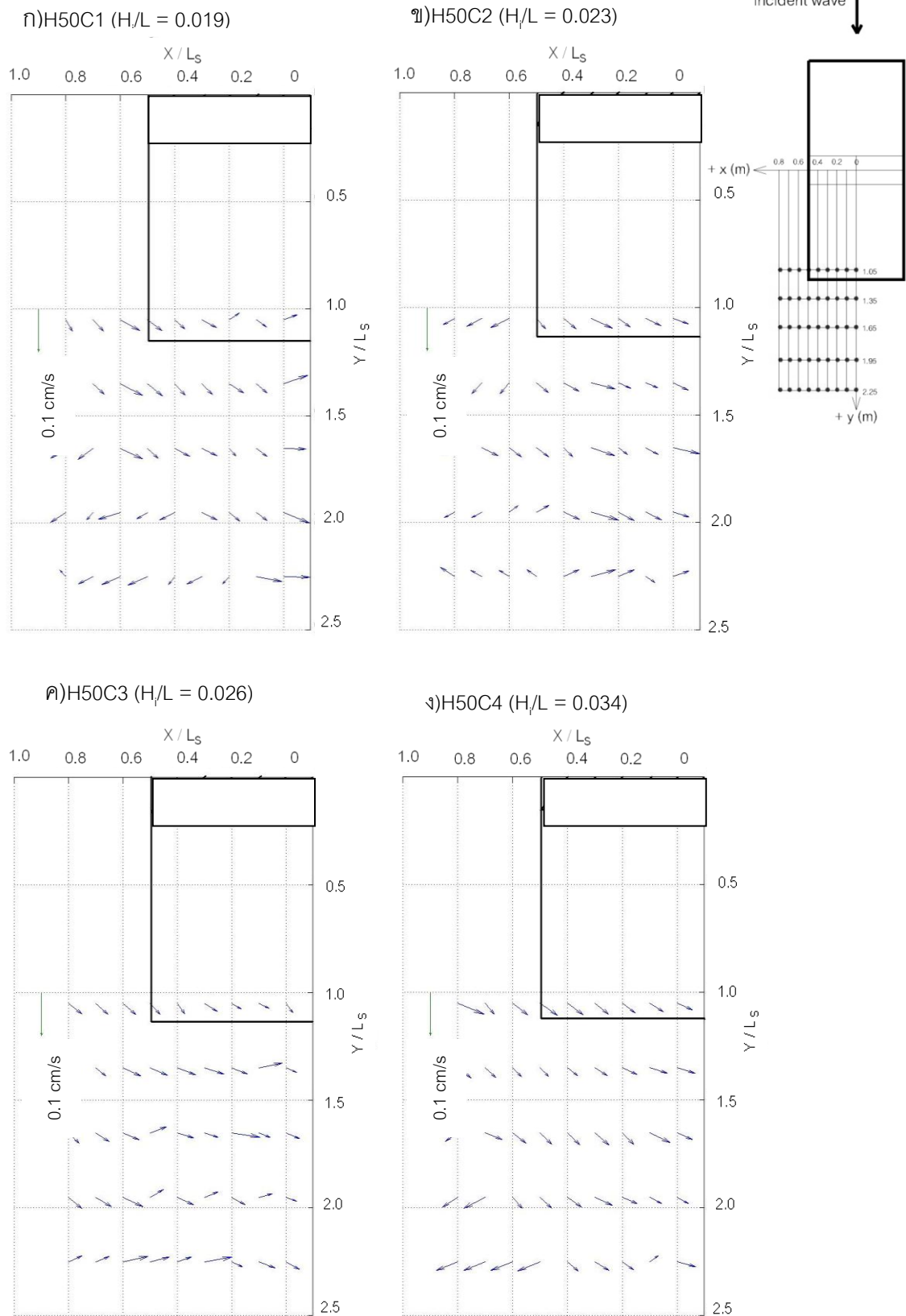
รูปที่ 5-2 รูปแบบการหมุนกระแสน้ำ ความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 เมตร (จมน้ำ 0.10 เมตร)



รูปที่ 5-3 รูปแบบการหมุนวนกระแสน้ำ ความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.35 เมตร (จมน้ำ 0.05 เมตร)



รูปที่ 5-4 รูปแบบการหมุนวนกระแสน้ำ ความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.40 เมตร (ระดับน้ำนิ่ง)

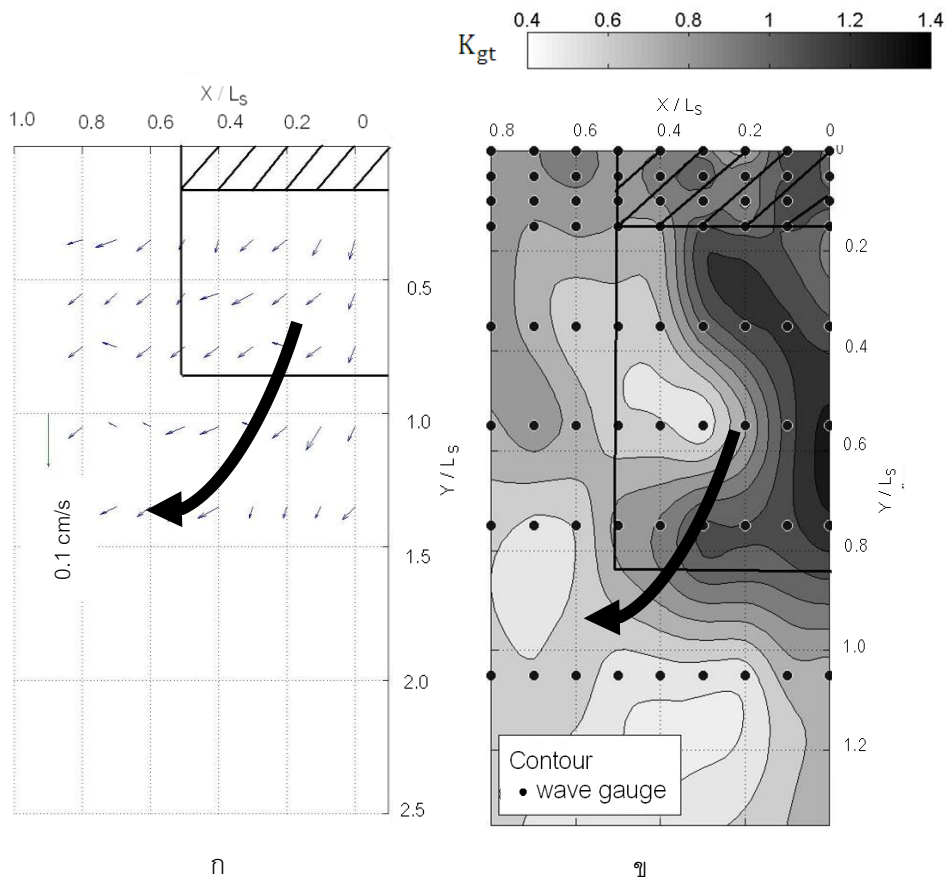


รูปที่ 5-5 รูปแบบการหมุนวนกระแสน้ำ ความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.50 เมตร (พื้นน้ำ 0.10 เมตร)

5.3 การวิเคราะห์ผล

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการหมุนวนของกระแสน้ำบริเวณหลังเขื่อนกันคลื่น สามารถอธิบายตามกรณีความสูงโครงสร้าง ดังต่อไปนี้

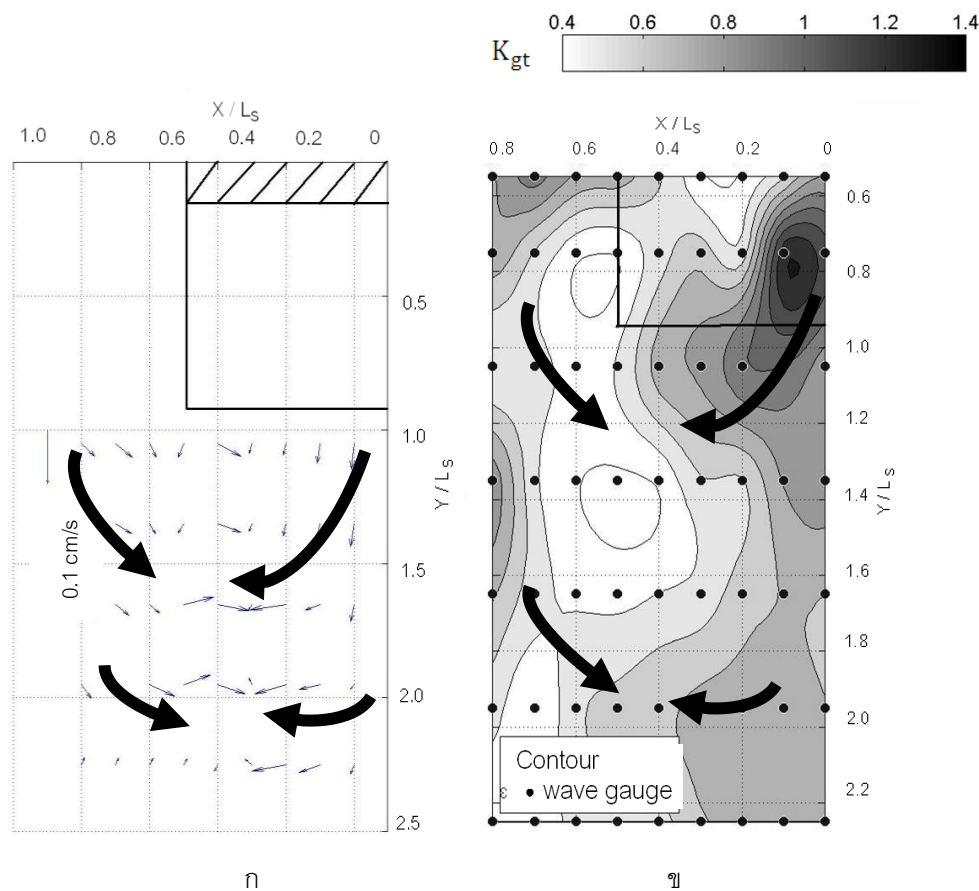
กรณีความสูงโครงสร้างต่ำกว่าระดับน้ำ ($h_s < d$) ผลการทดลองพบว่า ความเร็วการไหลบริเวณหลังโครงสร้างมีผลทำให้รูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำมีลักษณะเดี่ยวเบนออกหรือหมุนตัวออกจากแนวกึ่งกลางหลังโครงสร้าง ดังตัวอย่างการทดลองกรณี H35C3 ที่มีรูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำหมุนตัวออกตามลูกศร ดังรูปที่ 5-6 ก และเมื่อเปรียบเทียบกับความลาดชันของความสูงคลื่น (wave height gradient) ตามลูกศร จากกราฟของเส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม ดังรูปที่ 5-6 ข พบว่า รูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำสอดคล้องกับการลาดเทของความชันของความสูงคลื่นที่เกิดขึ้น โดยการข้ามล้นโครงสร้าง (overtopping) ทำให้เกิดการแตกตัวของคลื่นบริเวณหลังโครงสร้าง ความสูงคลื่นในแนวกึ่งกลางสูงกว่าบริเวณปลายด้านข้างโครงสร้าง คลื่นจึงมีแนวลาดเทจากกึ่งกลางสู่ปลายด้านข้างโครงสร้าง



รูปที่ 5-6 ตัวอย่างข้อมูลคลื่น กรณีความสูงโครงสร้างต่ำกว่าความลึกน้ำ

ก) รูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำ ข) เส้นชั้นระดับ K_{gt}

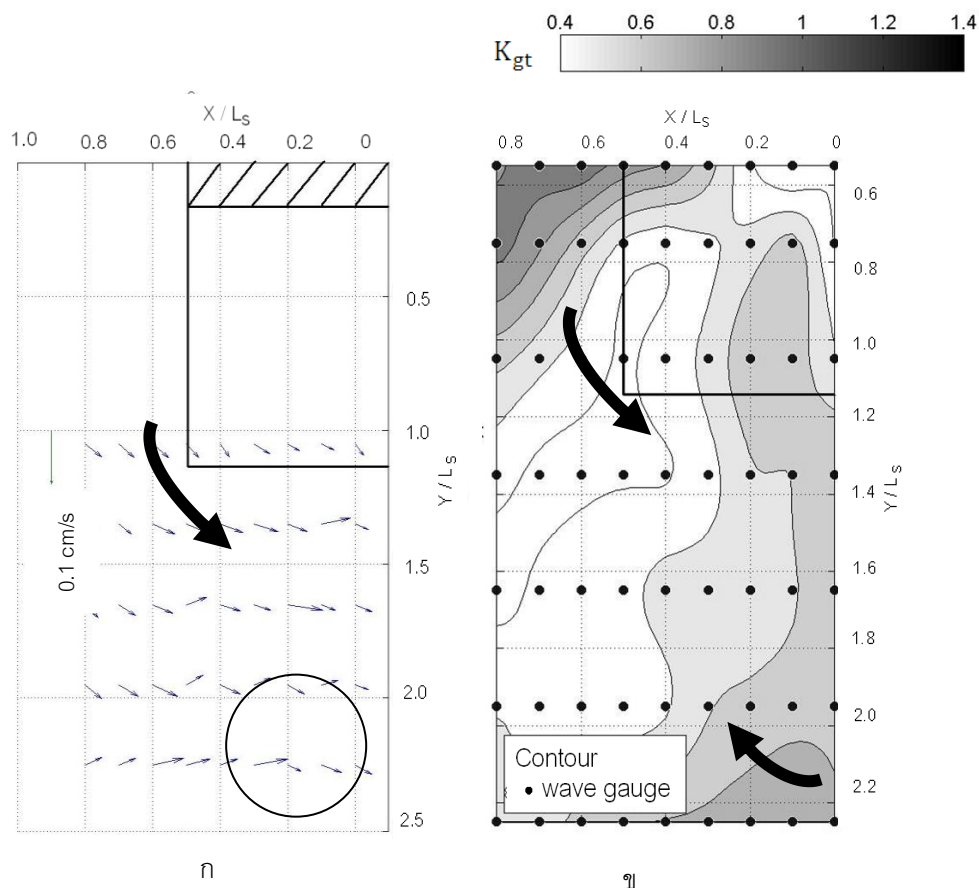
กรณีความสูงโครงสร้างเท่ากับระดับน้ำ ($h_s=d$) ผลการทดลองพบว่า ความเร็วการไหลบริเวณหลังโครงสร้างมีผลทำให้รูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำมีทั้งลักษณะของการเลี้ยวเบนออกหรือหมุนตัวออกจากแนวกึ่งกลางบริเวณหลังโครงสร้าง และการเลี้ยวเบนเข้ามาหรือหมุนตัวเข้าหาแนวกึ่งกลางโครงสร้าง ดังตัวอย่างการทดลองกรณี H40C3 ที่มีรูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำหมุนตัวตามลูกศร ดังรูปที่ 5-7 ก และเมื่อเปรียบเทียบกับความลาดชันของความสูงคลื่น ตามลูกศร จากกราฟของเส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม ดังรูปที่ 5-7 ข พบว่า รูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำสอดคล้องกับการลาดเทของความชันของความสูงคลื่น โดยการข้ามสันโครงสร้าง (overtopping) ก่อให้เกิดแนวลาดเทความชันของคลื่นจากกึ่งกลางสู่ปลายด้านข้างโครงสร้าง และการกระจายตัวของคลื่น (diffraction) ก่อให้เกิดแนวลาดเทความชันของคลื่นจากปลายด้านข้างโครงสร้างสู่แนวกึ่งกลางโครงสร้าง



รูปที่ 5-7 ตัวอย่างข้อมูลคลื่น กรณีความสูงโครงสร้างเท่ากับความลึกน้ำ

ก) รูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำ ข) เส้นชั้นระดับ K_{gt}

กรณีความสูงโครงสร้างสูงกว่าระดับน้ำ ($h_s > d$) ผลการทดลองพบว่า ความเร็วการไหลบริเวณหลังโครงสร้างมีผลทำให้รูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำมีการเลี้ยวเบนเข้ามาหรือหมุนตัวเข้าหาแนวกึ่งกลางโครงสร้าง ดังตัวอย่างการทดลองกรณี H50C3 ที่มีรูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำหมุนตัวตามลูกศร ดังรูปที่ 5-8 ก และเมื่อเปรียบเทียบกับความลาดชันของความสูงคลื่น ตามลูกศรจากกราฟของเส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม ดังรูปที่ 5-8 ข พบว่า รูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำสอดคล้องกับการลาดเทของความชันของความสูงคลื่น แต่ช่วงตำแหน่งปลายบริเวณกึ่งกลางโครงสร้างพบว่าความลาดเทของความชันของความสูงคลื่นมีลักษณะหมุนวนออกจากแนวกึ่งกลางโครงสร้าง มีผลทำให้ความเร็วการไหลเฉลี่ยช่วงตำแหน่งดังกล่าวลดลง แสดงตำแหน่งภายในเส้นวงกลม ดังรูป 5-8 ก



รูปที่ 5-8 ตัวอย่างข้อมูลคลื่น กรณีความสูงโครงสร้างสูงกว่าความลึกน้ำ

ก) รูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำ ข) เส้นชั้นระดับ K_{gt}

5.4 สรุปพฤติกรรมของกระแสน้ำหลังเชื่อมกันคลื่น

การศึกษาพฤติกรรมรูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำ จากการวิเคราะห์รูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำ พบว่า ความสูงโครงสร้างมีผลต่อรูปแบบพฤติกรรมของกระแสน้ำหลังโครงสร้าง ดังนี้

- 1) กรณีความสูงโครงสร้างต่ำกว่าระดับน้ำ พบว่า รูปแบบของกระแสน้ำหลังโครงสร้าง หมุนออกจากแนวกึ่งกลางโครงสร้าง
- 2) กรณีความสูงโครงสร้างเท่ากับระดับน้ำ พบว่า รูปแบบของกระแสน้ำหลังโครงสร้าง หมุนวนพร้อมกันสองรูปแบบ ได้แก่ การหมุนวนออกจากแนวกึ่งกลางโครงสร้าง และการหมุนวนเข้าหาแนวกึ่งกลางโครงสร้าง
- 3) กรณีความสูงโครงสร้างสูงกว่าระดับน้ำ พบว่า รูปแบบของกระแสน้ำหลังโครงสร้าง หมุนเข้าหาแนวกึ่งกลางโครงสร้าง

เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำในการศึกษาครั้งนี้กับการศึกษาที่ผ่านมา ทั้งกรณีเชื่อมกันคลื่นได้นำกับการศึกษาของ Browder et al. (1994) Nobuoka et al. (1996) Groenewoud et al. (1996) และ Loveless และ MacLeod (1999) ซึ่งมีรูปแบบการหมุนวนออกจากแนวกึ่งกลางโครงสร้าง และกรณีเชื่อมกันคลื่นพัวพันกับรายงานจาก US.CERC. (1984) และ Loveless และ MacLeod (1999) ซึ่งมีรูปแบบการหมุนวนเข้าหาแนวกึ่งกลางโครงสร้าง พบว่า มีลักษณะไปในทิศทางเดียวกัน

นอกจากนี้การศึกษายังพบว่า ความลาดชันของความสูงคลื่น (wave height gradient) จะเหนี่ยวนำพลังงานจลน์ของคลื่นให้เคลื่อนที่ทิศทางตาม จึงทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของความเร็วการไหลบริเวณหลังโครงสร้าง ลักษณะเช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ของน้ำจากระดับที่สูงลงสู่ระดับที่ต่ำกว่า พลังงานจลน์ของคลื่นหรือความเร็วการไหลก็มีทิศทางตาม

สำหรับตัวแปรของความชันคลื่นที่ส่งผลกระทบต่อรูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำนั้น การศึกษาครั้งนี้ผลการทดลองมีความซับซ้อนของรูปแบบกระแสน้ำ ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ผลเพื่อหาแนวโน้มของความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ทำการทดลองโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ 3 มิติ โดยใช้แอ่งจำลองคลื่นขนาดความกว้าง 10 เมตร ยาว 20 เมตร และสูง 0.70 เมตร ณ ห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อศึกษาความสัมพันธ์พฤติกรรมของการส่งผ่านของคลื่นในรูปของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน และรูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำด้านหลังโครงสร้าง โดยตัวแปรที่สนใจของการศึกษา ได้แก่ ขนาดของโครงสร้าง (dimension of structure) และคุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง (incident wave characteristic)

ในส่วนของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้จากการเปลี่ยนแปลงความสูงโครงสร้าง 4 ระดับ คือ ความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30, 0.35, 0.40 และ 0.50 เมตร มีการเปลี่ยนแปลงความชันคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง 4 ขนาด อยู่ในช่วง 0.018 - 0.035 ที่ระดับน้ำในแอ่งคลื่นมีความลึกเท่ากับ 0.40 เมตร จากการวิเคราะห์ผลการทดลองสรุปแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ พฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่น และรูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำหลังเขื่อนกันคลื่น

6.1.1 พฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่น

เมื่อเปรียบเทียบเส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม จากการทดลองในกรณีความสูงโครงสร้าง (h_s) เท่ากับ 0.50 เมตร กับผลการศึกษาของ Wiegel (1962) ลักษณะการกระจายตัวของคลื่นมีแนวโน้มสอดคล้องกัน เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้ง ซึ่งพบการกระจายตัวจากปลายด้านข้างของโครงสร้าง สันคลื่นจะเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณด้านหลังโครงสร้าง เมื่อพิจารณาความสูงคลื่นบริเวณหลังโครงสร้าง ความสูงคลื่นบริเวณปลายโครงสร้างจะมากกว่าบริเวณกึ่งกลางด้านหลังโครงสร้าง ข้อมูลจากการทดลองมีการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมที่มากกว่า Wiegel (1962) เนื่องจากผลของการซึมผ่านโครงสร้างที่แตกต่างกัน

ซึ่งผลการวิเคราะห์การส่งผ่านของคลื่นหลังเขื่อนกันคลื่น พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมมีความสัมพันธ์กับตัวแปรไร้หน่วย ได้แก่ ความลึกน้ำสัมพันธ์ (relative water depths) และความชันคลื่น (wave steepness) ดังนี้

- 1) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมมีความสัมพันธ์กับความลึกน้ำสัมพัทธ์ (d/h_s) เมื่อความชันคลื่นเท่ากัน โดยความลึกน้ำสัมพัทธ์ลดลงหรือระดับความสูงโครงสร้างเพิ่มสูงขึ้น การส่งผ่านของคลื่นจะลดลง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นมีค่าลดลง โดยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นมีค่าในช่วง 0.80 – 1.00, 0.60 – 1.00, 0.63 – 0.66 และ 0.60 – 0.65 สำหรับกรณีความลึกสัมพัทธ์ เท่ากับ 1.33, 1.14, 1.00 และ 0.80 ตามลำดับ
- 2) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมมีความสัมพันธ์กับความชันคลื่น สำหรับโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้ง ความชันคลื่นมีความสัมพันธ์แบบผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม เมื่อความชันคลื่นเพิ่มขึ้น พลังงานของคลื่นเพิ่มขึ้น ทำให้คลื่นสามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านโครงสร้างเพิ่มขึ้น การส่งผ่านของคลื่นจึงเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามกันเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ พบว่า การข้ามผ่านโครงสร้างมีอิทธิพลมากกว่าการข้ามผ่านโครงสร้าง ทำให้ความชันคลื่นมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม เมื่อความชันคลื่นเพิ่มขึ้น การแตกตัวของคลื่นจากความปั่นป่วนของคลื่นบริเวณสันโครงสร้างเพิ่มขึ้น ทำให้สลายพลังงานของคลื่นเพิ่มขึ้น การส่งผ่านของคลื่นจึงน้อยลง

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมมีความสัมพันธ์กับความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (relative wave height) ของการทดลองครั้งนี้เปรียบเทียบกับการศึกษาของ Van der Meer et al. (2005) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม แบบเฉลี่ยตามแนวขนานเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ ผลของการทดลองมีแนวโน้มสอดคล้องกับการศึกษาของ Van der Meer et al. (2005) แต่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมมีค่าที่สูงมากกว่า เนื่องจากการกระจายตัวของคลื่นที่เคลื่อนเข้ามาหลังโครงสร้าง ซึ่งความแตกต่างของการส่งผ่านของคลื่นมีส่วนสำคัญต่อการออกแบบเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำเป็นอย่างมาก การออกแบบการส่งผ่านคลื่นโดยใช้สมการการส่งผ่านของคลื่นด้วยแบบจำลอง 2 มิติ ที่พิจารณาเฉพาะผลของการข้ามผ่านและการข้ามผ่านโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น ต้องพิจารณาการกระจายของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ามาจากปลายโครงสร้างเสริมด้วย

เมื่อพิจารณาสถานะความปั่นป่วนของคลื่นหลังโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ ทั้งแบบกรณีความสูงโครงสร้างต่ำกว่าและเท่ากับความลึกน้ำ ที่ความชันคลื่นต่างๆ มีผลการทดลองดังนี้

ความสูงโครงสร้างไม่ส่งผลต่อระยะของสถานะความปั่นป่วนของคลื่นหลังเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลองพบว่า ระยะสถานะความปั่นป่วนของคลื่นต่อความยาว

คลื่นนับจากปลายของสันด้านท้ายโครงสร้าง มีค่าอยู่ในช่วง 0.30-0.68, 0.25-0.76 และ 0.37-0.67 เมื่อความสูงโครงสร้างอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำนิ่ง 0.10, 0.05 และเท่ากับระดับน้ำนิ่ง

ความชันคลื่นมีผลต่อระยะของสภาวะที่มีการแตกตัวของคลื่น กรณีความสูงโครงสร้างต่ำกว่าความลึกน้ำ เมื่อความชันคลื่นเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการปั่นป่วนบริเวณสันโครงสร้างได้เพิ่มขึ้น โดยการแตกตัวดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อเนื่องสู่บริเวณด้านหลังโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นด้วย ก่อให้เกิดการแตกตัวของคลื่นได้มากขึ้น ช่วงระยะสภาวะที่มีการแตกตัวจึงลดลง กรณีความสูงโครงสร้างเท่ากับ ความลึกน้ำ การส่งผ่านของคลื่นประกอบด้วย การข้ามสันโครงสร้าง การซึมผ่านโครงสร้าง และการกระจายของคลื่น เมื่อความสูงโครงสร้างเท่ากับความลึกน้ำ อิทธิพลของการข้ามสันโครงสร้าง จึงมีค่าน้อยลง การส่งผ่านของคลื่นมีผลของการซึมผ่านโครงสร้างและการกระจายของคลื่นที่ เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อความชันคลื่นเพิ่มขึ้น พลังงานของคลื่นสามารถผ่านโครงสร้างได้เพิ่มขึ้น ทำให้ การซึมผ่านโครงสร้างเพิ่มขึ้น ระยะสภาวะที่มีการแตกตัวของคลื่นที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาความลาดชันของความสูงคลื่น (wave height gradient) สำหรับเชื่อมกัน คลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้ง มีลักษณะลาดเอียงจากปลายเชื่อมกันคลื่นสู่บริเวณกึ่งกลางเชื่อมกันคลื่น ซึ่งแตกต่างกับโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง มีลักษณะลาดเอียงจากกึ่งกลางโครงสร้าง เชื่อมกันคลื่นสู่ปลายโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น สอดคล้องกับเหตุผลที่ว่า แม้ว่าผลของการซึมผ่าน โครงสร้างมีผลมากกว่าการกระจายของคลื่น แต่ผลของการข้ามสันโครงสร้าง ทำให้พฤติกรรมของ การส่งผ่านของคลื่นกลับตรงกันข้ามกัน เนื่องจากกรณีที่สันโครงสร้างอยู่ใต้น้ำ อิทธิพลของการ ซ้ำมสันจะมีมาก

6.1.2 รูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำหลังเชื่อมกันคลื่น

การศึกษาพฤติกรรมรูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำ ผลการทดลองพบว่า ความสูง โครงสร้างมีผลต่อรูปแบบพฤติกรรมของกระแสน้ำหลังโครงสร้าง สำหรับเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำแบบ หินทิ้งจะมีรูปแบบการหมุนวนของกระแสน้ำหมุนออกจากแนวกึ่งกลางโครงสร้าง แตกต่างกับเชื่อม กันคลื่นพื้นน้ำแบบหินทิ้งมีรูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำหมุนเข้าแนวกึ่งกลางด้านหลัง โครงสร้าง

ความลาดชันของความสูงคลื่น จะเหนี่ยวนำพลังงานจลน์ของคลื่นให้เคลื่อนที่ทิศทางตาม ทำให้มีการเลี้ยวเบนของความเร็วการไหลบริเวณหลังโครงสร้าง ลักษณะเช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ ของน้ำจากระดับที่สูงลงสู่ระดับที่ต่ำกว่า พลังงานจลน์ของคลื่นหรือความเร็วการไหลก็มีทิศทาง ตาม

การเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำหลังเขื่อนกันคลื่นของการทดลองครั้งนี้กับการศึกษาที่ผ่านมา มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้งรูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำหลังเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ (US.CERC.,1984 และ Loveless และ MacLeod, 1999) และเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ (Browder et al., 1994; Nobuoka et al., 1996 และ Groenewoud et al., 1996 และ Loveless และ MacLeod (1999) เมื่อพิจารณาตัวแปรของความชันคลื่นที่ส่งผลต่อรูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำนั้น การศึกษาครั้งนี้ผลการทดลองมีความซับซ้อนของรูปแบบกระแสน้ำ ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ผล เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมมีความสัมพันธ์กับตัวแปรไร้หน่วย ได้แก่ ความลึกน้ำสัมพัทธ์ (relative water depths) ความสูงคลื่นสัมพัทธ์ (relative water height) และความชันคลื่น (wave steepness) และจากการศึกษาพบว่าการข้ามสันโครงสร้างของคลื่นก่อให้เกิดการแตกตัวบริเวณสันโครงสร้าง รวมทั้งการกระจายตัวของคลื่นจากปลายของโครงสร้าง เป็นปัจจัยสำคัญต่อระยะของสภาวะการปั่นป่วนของคลื่น การส่งผ่านของคลื่น และรูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้ง แต่ยังคงมีตัวแปรหลายตัวอันส่งผลต่อพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นที่มีได้พิจารณาและควรมีการศึกษาในอนาคต ได้แก่ คลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างแบบไม่สม่ำเสมอ ความกว้างโครงสร้าง ความยาวโครงสร้าง และค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุโครงสร้าง
- 2) ควรมีการเก็บข้อมูลคลื่นบริเวณด้านหลังโครงสร้างบริเวณแนวชายฝั่ง เพื่อศึกษาความสูงคลื่นที่วิ่งตามแนวลาดชายฝั่ง (wave runup) และข้อมูลการยกตัวของคลื่นบริเวณด้านหลังโครงสร้าง ซึ่งต้องอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่า water surface level follower มีหน้าที่หาระดับน้ำเฉลี่ย
- 3) ควรมีการศึกษาการวิเคราะห์ความถดถอยและสหสัมพันธ์เชิงซ้อน (multiple regression and correlation analysis) ของการส่งผ่านคลื่น เพิ่มเติมจากผลการทดลองศึกษาที่ได้ครั้งนี้ เพื่อพัฒนาการออกแบบการส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำต่อไป

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ปิยะ กุณาศล, การไหลลอดประตูระบายภายใต้อิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท
บัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
2547.

เสรี จันทโรยธา, ชลศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553

ภาษาอังกฤษ

Ahrens, J.P., Stability of reef breakwaters, ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal, and
Ocean Engineering, 1987.

Browder, A., Wave Transmission and Current Patterns Associated with Narrow-crested
Submerged Breakwaters, MSc Thesis, Coastal and Oceanographic Engineering
Department, University of Florida, Gainesville, 1994.

Calabrese, M. et al., 2D Wave setup behind submerged breakwater, Ocean
Engineering. 35, 2008.

Chen, H.B., Wave Transformation between Submerged Breakwater and Seawall,
Journal of Coastal Research, 2007.

D'Angremond, K et al., Wave transmission at low crested structures, Proc. 25th Int. Conf.
on Coastal Engineering, ASCE, 1996.

Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists,
Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1984.

Diskin, M.H.V et al., Piling-up behind low and submerged permeable breakwaters,
Journal of Waterways and Harbours Division, ASCE, 1970 .

Goda, Y., Re-analysis of Laboratory Data on Wave Transmission over Breakwaters,
Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 18 No. 3., 1969.

Goda, Y., Random Seas and Design of Maritime Structure, University of Tokyo Press,
1985.

- Groenewoud, M.D., Van de Graaff, J., Effect of submerged breakwater on profile development, Proc. 25th International Conference on Coastal Engineering. ASCE, Orlando, USA, 1996.
- Hughes. S.A., Physical models and laboratory techniques in coastal engineering, Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 7. World Scientific, 1993.
- Katano, A., Hattori, M., Murakami, S., Breakers and beach, Coastal Engineering (JSCE), Vol.39, 1992.
- Ippen, A.T., Estuary and Coastline Hydrodynamics, New York, McGraw Hil, 1966
- Lamberti, A. et al., European experience of low crested structure for coastal management, Coastal Engineering. 52, 2005.
- Loveless, J., Macleco, B., The influence of set-up currents on sediment movement behind detached breakwaters, Proc. Coastal Sediments '99. ASCE, Long Island, USA, 1999.
- Masataro, H., Wave breaking over permeable submerged breakwaters, Coastal Engineering (JSCE), 1994
- Nobuoka, H., Irie, I., Kato, H., Mimura, N., Regulation of nearshore circulation by submerged breakwater for shore protection, Proc.25th International Conference on Coastal Engineering, 1996.
- Owen, M.W., Design of seawall allowing for wave overtopping, Report EX, 1980.
- Penny, W.G. and Price, A.T., The Diffraction Theory of Sea Waves and Shelter Afforded by Breakwaters, Philos. Trans. R. Soc. London, 1952.
- Rao, S. et al., Physical model studies on wave transmission of a submerged inclined plate breakwater, Coastal Engineering. 36, 2009.
- Seabrook, S.R., Hall, K.R., Wave Transmission at Submerged Rubble Mound Breakwater, Proceedings of the 26th International Conference Coastal Engineering, 1998.
- Shirlal, K.G., Rao, S., Ocean wave transmission by submerged reef--A physical model study, Ocean Engineering, 2007.

- Sorensen, R.M., Basic Wave Mechanics for Coastal and Ocean Engineers, Wiley, New York, 1993.
- Suh, K.D. et al., Separation of incident and reflected waves in wave current flume, Coastal Engineering. 43, 2001.
- U.S. CERC., Shore Protection Manual, Department of the US. Army Corps. of Engineers, 1984 .
- Van der Meer, J.W., Deaman, F.R., Stability and Wave Transmission at Low-Crested Rubblemound Structures, Journal of Waterway Port and Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, 1994.
- Van der Meer. J.W., Janssen, J.P.F.M., Wave run-up and wave overtopping at dikes, In: Kobayashi, N., Demirbilck, Z. (Eds.), Wave Force on Inclined and Vertical Structures, 1995.
- Van der Meer, J.W. et al., Wave transmission and reflection at low crest structure: Design formulae, Oblique wave attack and spectral change, Coastal Engineering. 52, 2005
- Wiegel, R.L., Diffraction of Wave by a Semi-infinite Breakwater, J. of Hydraulic Div. ASCE, 1962.
- Yoshioka, K. et al., Design Manual for Artificial Reefs in Coastlines of Japan II, Coastal Zone: The American Society of Civil Engineers, 1993.

ภาคผนวก

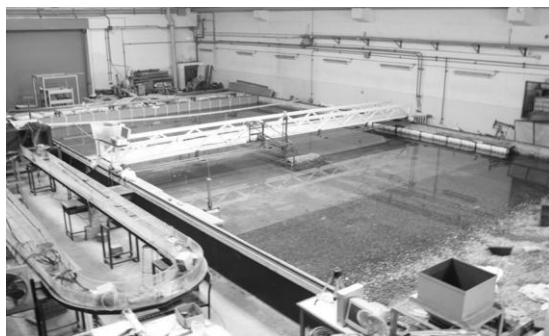
ภาคผนวก ก

แบบจำลองทางกายภาพ

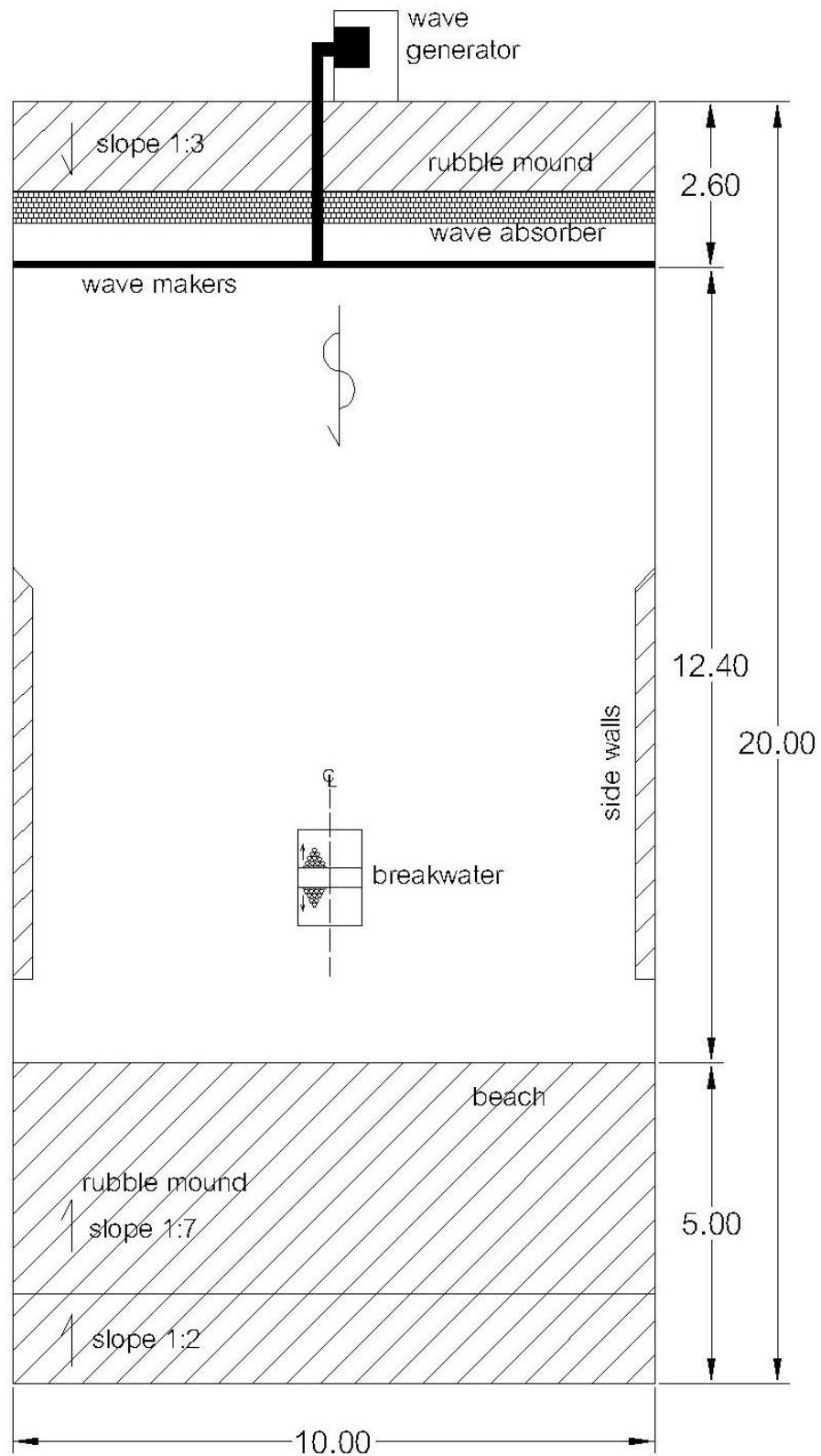
ก-1 แอ่งจำลองคลื่น

แอ่งจำลองคลื่น มีขนาดกว้าง 10 เมตร ยาว 20 เมตร และสูง 0.70 เมตร พื้นและผนังของแอ่งจำลองคลื่นเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังรูปที่ ก-1 รายละเอียดต่างๆ มีดังนี้

- 1) ผนังด้านข้าง มีโครงสร้างเหล็กหุ้มลวดด้วยตะแกรงละเอียดภายในบรรจุเม็ดโฟม เพื่อช่วยลดการสะท้อนของคลื่นจากผนังด้านข้าง
- 2) บริเวณปลายแอ่งจำลองคลื่น มีหินสลายพลังงานคลื่น เพื่อช่วยลดการสะท้อนของคลื่น และทำให้เกิดคลื่นในแอ่งจำลองคลื่น หากไม่มีหินสลายพลังงานคลื่นที่สร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ผนังด้านตรงข้าม คลื่นจะสะท้อนกลับเข้ามาในแอ่งจำลองคลื่น ทำให้คลื่นที่ได้มีลักษณะเหมือนคลื่นนิ่ง ดังนั้นจึงต้องทำการเทหินทั้งสองด้านของแอ่งจำลอง การศึกษาครั้งนี้ใช้หินเบอร์ #1 เทบริเวณต้นแอ่งจำลองคลื่นเป็นแนวลาด 1:3 และบริเวณปลายแอ่งเป็นแนวลาด 2 ช่วง ได้แก่ แนวลาด 1:2 และ 1:7 ตามลำดับ
- 3) ระบบการหมุนเวียนน้ำ มีการออกแบบการหมุนเวียนน้ำภายในแอ่งคลื่นกับบ่อพักน้ำด้านข้าง สำหรับการเติมน้ำเข้าแอ่งจำลองคลื่น สามารถทำการสูบน้ำจากบ่อพักน้ำโดยใช้เครื่องสูบน้ำแบบ ขนาดกำลัง 1.5 แรงม้า ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า 220 V การสูบน้ำเข้าแอ่งจำลองให้มีระดับน้ำสูงขึ้น 2 เซนติเมตร ใช้เวลา 1 ชั่วโมง และระบายน้ำออกทางรูระบายน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว บริเวณปลายแอ่งคลื่นหรือใช้เครื่องสูบน้ำกลับสู่อบ่พักน้ำบริเวณด้านข้างแอ่งคลื่น



รูปที่ ก-1 แอ่งจำลองคลื่น



Overview of the wave basin
(dimension in meter)

รูปที่ ก-2 แอ่งจำลองคลื่น

ก-2 เครื่องกำเนิดคลื่น

เครื่องกำเนิดคลื่น ติดตั้งบริเวณปลายด้านหนึ่งของแ่งจำลองคลื่น มีหน้าที่สร้างคลื่นลักษณะต่างๆ ขึ้นอยู่กับการตั้งความเร็วมอเตอร์และระยะช่วงชัก โดยรายละเอียดและส่วนประกอบการทำงาน มีดังนี้

- 1) ชุดหม้อแปลงไฟฟ้า มีหน้าที่ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าสม่ำเสมอ ประกอบด้วยตัวเก็บประจุเรียงต่อกันหลายตัว เพื่อเก็บประจุไฟฟ้าและจ่ายไฟเข้าสู่ระบบ
- 2) ชุดปรับความเร็วมอเตอร์ มีหน้าที่ปรับระดับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าก่อนจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่เครื่องมอเตอร์ ซึ่งเป็นการควบคุมรอบการหมุนของมอเตอร์ การศึกษาครั้งนี้ใช้เครื่องบริษัท Mitsubishi รุ่น FR-A700 (220V) ใช้กำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ความต่างศักย์ 240 โวลต์ สามารถปรับการทำงานให้รอบการหมุนเป็นทั้งแบบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ
- 3) ชุดส่งกำลังเป็นมอเตอร์ มีหน้าที่ส่งแรงขับสู่เพลลา ซึ่งต่อกับก้านโยกกระดานคลื่นที่สามารถเคลื่อนที่กลับไปมาได้ตามการปรับช่วงชัก (stroke) มอเตอร์เป็นของบริษัท Mitsubishi รุ่น 4MD05 ซึ่งใช้ไฟฟ้าแบบ 3 เฟส กำลัง 3.7 กิโลวัตต์ 4 โพล แบบรุ่น SF-JR โดยต่อกับไฟฟ้าขนาดความต่างศักย์ 200 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 14.6 แอมแปร์ และทำความเร็วรอบได้สูงสุดที่ 1420 รอบต่อวินาที
- 4) ชุดปรับช่วงชักเป็นก้านที่ต่อมาจากเพลลา ปรับระยะได้ตามต้องการ สำหรับก้านที่ใช้งานมีความยาวแขนสูงสุด 0.40 เมตร
- 5) กระดานสร้างคลื่น เป็นชนิดปลายยึดหมุน (hinge connection) ยึดติดกับท้องแ่งคลื่น สามารถหมุนกลับไปมาได้ วัสดุที่ใช้ทำเป็นแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ภาคผนวก ข

การเปรียบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

ข-1 การเปรียบเทียบเครื่องมือวัดความสูงคลื่น

การศึกษานี้ใช้เครื่องวัดความสูงคลื่นแบบ CH-403A & CHT4-40 ของบริษัท Kennek ซึ่งการเปรียบเทียบเครื่องมือวัดความสูงคลื่นมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ติดตั้งเครื่องมือวัดความสูงคลื่น ภายในแอ่งจำลองคลื่น ดังรูปที่ ข-1 และรูปที่ ข-2
- 2) ติดตั้งกล้องถ่ายภาพวิดีโอ เพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงของระดับผิวน้ำที่ขึ้นลงตามเวลา
- 3) เปิดเครื่องกำเนิดคลื่น เพื่อสร้างคลื่นเข้าปะทะตัวรับสัญญาณ
- 4) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 2-3 เปลี่ยนแปลงความสูงคลื่นที่บันทึกได้จากกล้องถ่ายภาพวิดีโอ ตั้งแต่ 1- 8 เซนติเมตร (เป็นช่วงความสูงคลื่นของการศึกษารั้งนี้)
- 5) คำนวณหาค่าตัวปรับความสูงคลื่นแต่ละตัวรับสัญญาณ จากความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นที่ได้จากกล้องถ่ายภาพวิดีโอกับค่านัยสำคัญของผลต่างระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากที่สุดกับน้อยที่สุด

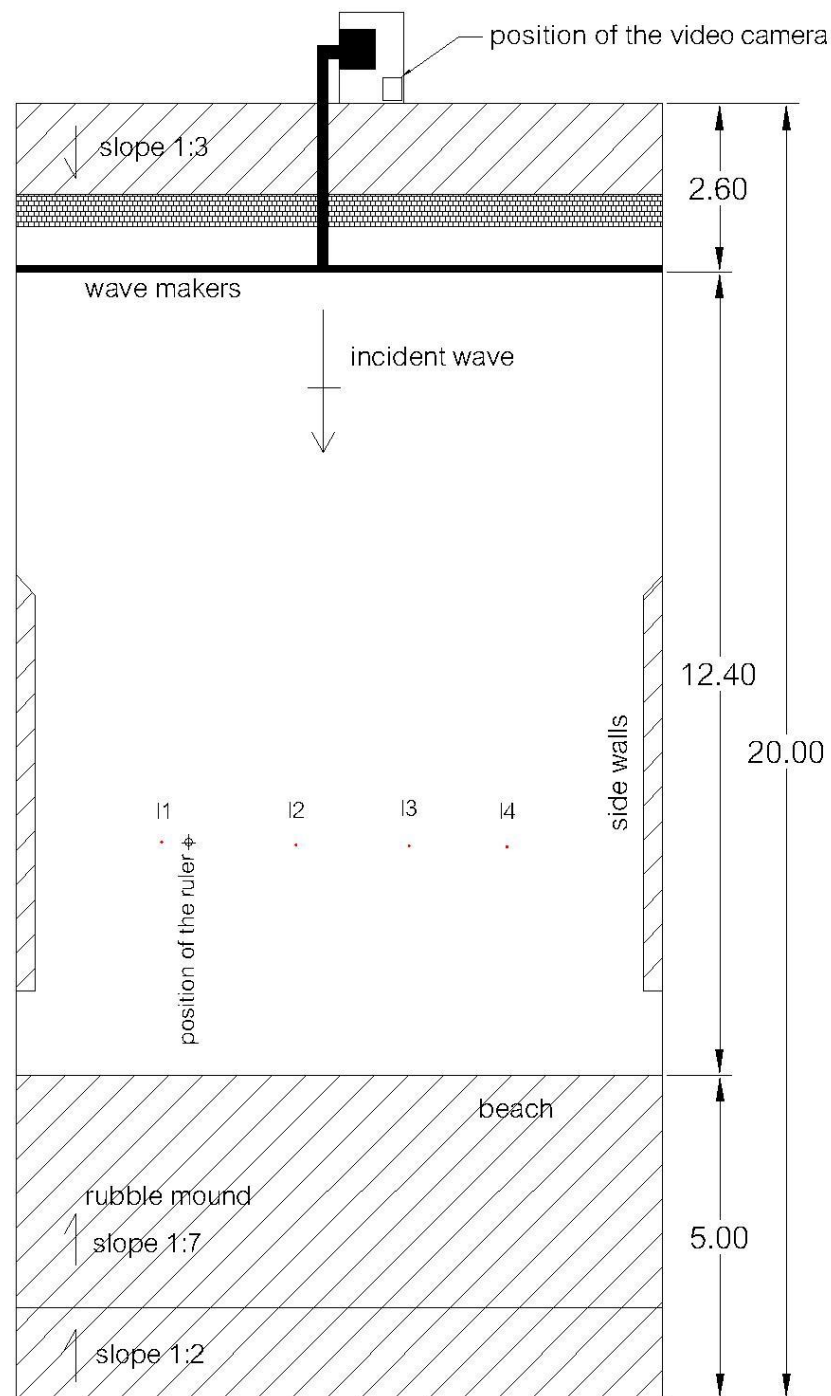
โดยการคำนวณหาค่านัยสำคัญของผลต่างระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากที่สุดกับน้อยที่สุด มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) วิเคราะห์ความถี่ (frequency analysis) เพื่อหาคาบคลื่น ด้วยวิธี Power spectral density (PSE) จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าตามเวลาแล้วสร้างเป็นกราฟ density spectral histogram ดังรูปที่ ข-3 คลื่นแบบสม่ำเสมอจะมีจุดยอดของความถี่ของพลังงานคลื่นเพียงจุดเดียวเท่านั้น โดยมีส่วนกลับของความถี่เป็นคาบคลื่น
- 2) วิเคราะห์ทางสถิติ (statistical analysis) เพื่อหาความสูงคลื่น โดยการนำคาบคลื่นที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 มาแบ่งข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าตามเวลาออกเป็นช่วง หาผลต่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากที่สุดกับน้อยที่สุด
- 3) คำนวณค่านัยสำคัญของผลต่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากที่สุดกับน้อยที่สุด ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยหนึ่งในสามเมื่อเรียงลำดับจากความสูงคลื่นมากถึงความสูงคลื่นน้อยตามลำดับ

ซึ่งผลการทดลองเปรียบเทียบเครื่องมือวัดความสูงคลื่น แสดงดังตารางที่ ข-1 ตัวคูณปรับความสูงคลื่นจากรับสัญญาณ ดังรูปที่ ข-4 และสรุปผลดังตารางที่ ข-2

ตารางที่ ข-1 การเปรียบเทียบเครื่องมือวัดความสูงคลื่น

ระดับน้ำจากกล้องถ่ายวิดีโอ (เซนติเมตร)	ค่านัยสำคัญของผลต่างความต่างศักย์ (โวลต์)			
	I1	I2	I3	I4
7.1	0.62	0.64	0.65	0.7
7.2				
7.1				
6.7	0.54	0.55	0.57	0.62
6.6				
6.8				
5.5	0.44	0.45	0.46	0.5
5.5				
5.6				
4.0	0.36	0.36	0.36	0.39
3.9				
4.0				
3.2	0.27	0.26	0.26	0.28
3.1				
3.2				
2.1	0.19	0.18	0.19	0.19
2.1				
2.2				
0.9	0.11	0.07	0.09	0.09
1.0				
1.0				

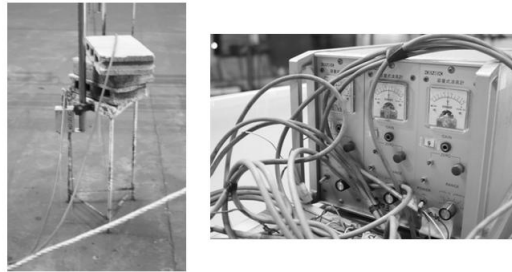


Overview of the wave basin
(dimension in meter)

รูปที่ ข-1 ตำแหน่งเครื่องมือวัดความสูงคลื่น ภายในแอ่งคลื่น

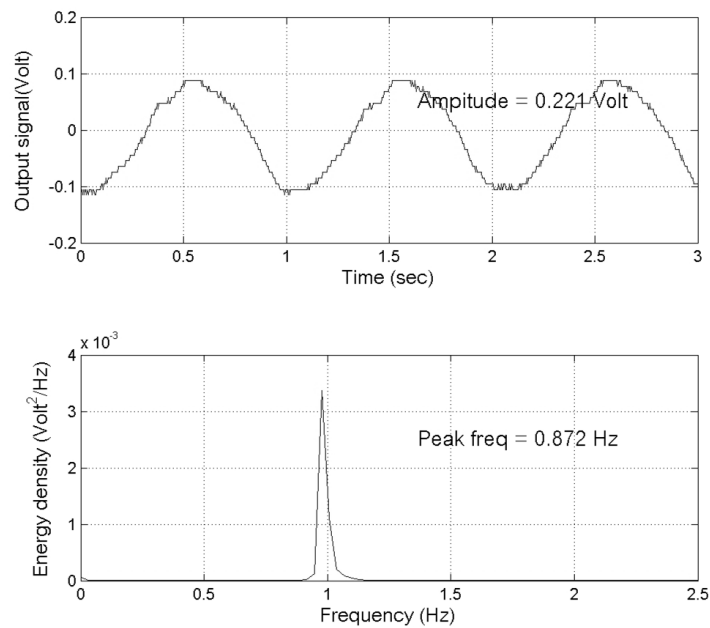
ตารางที่ ข-2 ตัวคูณปรับความสูงคลื่นของตัวรับสัญญาณ

ตัวรับสัญญาณ	ตัวคูณปรับความสูงของตัวรับสัญญาณ (เซนติเมตรต่อโวลต์)
I1	11.845
I2	11.699
I3	11.450
I4	10.607

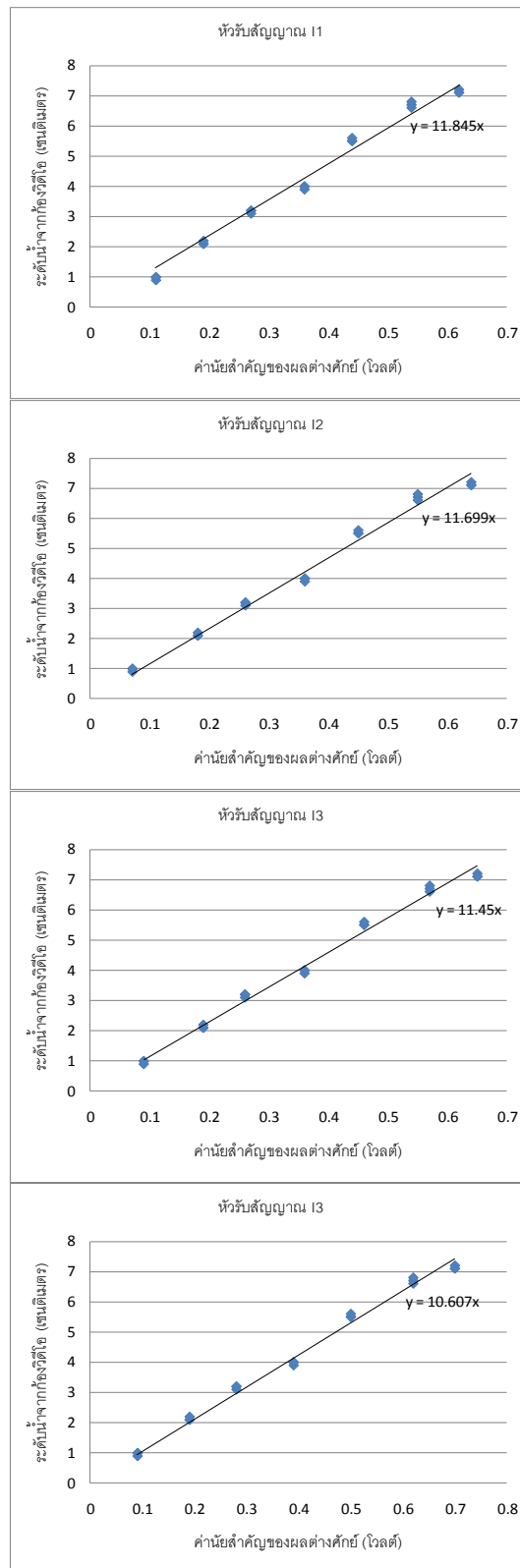


รูปที่ ข-2 เครื่องมือรับสัญญาณและจอแสดงผลของเครื่องมือวัดความสูงคลื่น

แบบ CH-403A & CHT4-40 ของบริษัท Kennek



รูปที่ ข-3 ตัวอย่างการเก็บข้อมูลคลื่น



รูปที่ ข-4 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำจากกึ่งวิถีไอกับค่านัยสำคัญของความต่างศักย์

ข-2 การปรับเทียบเครื่องวัดความเร็วคลื่น

การสอบเทียบเครื่องมือวัดความเร็วคลื่น 3 ทิศทาง แบบ ACM-300 ของบริษัท ALEC ELECTRONICS (ดังรูปที่ ข-5) ซึ่งตรวจวัดความเร็วคลื่น 3 แกน ได้แก่ แกน x, y และ z ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ผลของการปรับเทียบเครื่องมือวัดโดย ปิยะ กุณาสล (2547) ได้ปรับเทียบความเร็วในแนวแกน x และแกน y แสดงดังตารางที่ ข-3 และตารางที่ ข-4 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า เมื่อความเร็วเปลี่ยนแปลง 1 เซนติเมตรต่อวินาที ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลง 0.02 โวลต์

สำหรับการปรับเทียบแนวแกน z นั้นไม่สามารถทำการทดสอบได้ เนื่องจากไม่มีเครื่องมือปรับเทียบได้ในแนวตั้ง แต่จากการทดสอบทั้งแนวแกน x และแกน y นั้นให้ผลของค่าปรับแก้ที่ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายคลื่นจากหัวปล่อยสัญญาณตัวเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ค่าปรับแก้ของแนวแกน z จึงควรที่จะเท่ากับแนวแกน x และ y เช่นกัน



รูปที่ ข-5 เครื่องรับสัญญาณและจอแสดงผลของเครื่องมือวัดความเร็วคลื่น
แบบ ACM-300 ของบริษัท ALEC ELECTRONIC

ตารางที่ ข-3 การเปรียบเทียบเครื่องมือวัดความเร็วคลื่น แนวแกน x โดย ปิยะ ภูณาสล (2547)

ระยะทาง (เซนติเมตร)	เวลา (วินาที)	ความเร็วรถทดลอง (เซนติเมตร/วินาที)	ความเร็วของหัวปล่อยสัญญาณ (เซนติเมตร/วินาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)
1200	159.66	7.52	8.50	0.176
1200	91.53	13.11	14.00	0.256
1200	64.56	18.59	21.50	0.432
1200	62.94	19.07	23.00	0.455
1200	55.09	21.78	25.00	0.514
1200	48.78	24.60	28.00	0.572
1200	40.58	29.57	34.00	0.682
1200	36.13	33.21	39.00	0.773

ตารางที่ ข-4 การเปรียบเทียบเครื่องมือวัดความเร็วคลื่น แนวแกน y โดย ปิยะ ภูณาสล (2547)

ระยะทาง (เซนติเมตร)	เวลา (วินาที)	ความเร็วรถทดลอง (เซนติเมตร/วินาที)	ความเร็วของหัวปล่อยสัญญาณ (เซนติเมตร/วินาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)
1200	148.98	8.05	7.50	0.160
1200	63.66	18.85	17.00	0.354
1200	53.56	22.40	20.50	0.422
1200	45.46	26.40	24.00	0.494
1200	40.73	29.46	28.00	0.575
1200	38.50	31.17	29.00	0.587
1200	34.45	34.83	32.00	0.668
1200	32.74	36.65	34.00	0.686

ข-3 การปรับเทียบเครื่องกำเนิดคลื่น

จากการปรับเทียบเครื่องกำเนิดคลื่น ที่ความลึกน้ำ เท่ากับ 0.40 เมตร โดยทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์และระยะช่วงชัก เพื่อหาความสูงคลื่นและคาบคลื่น สำหรับการออกแบบการศึกษางานวิจัยครั้งนี้ที่สนใจตัวแปรของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง ซึ่งอาศัยเครื่องมือวัดความสูงคลื่นแบบ CH-403A & CHT4-40 ของบริษัท Kennek จำนวน 4 ตัว กำหนดตำแหน่งการเก็บข้อมูลคลื่น ดังรูปที่ ข-1 และผลของลักษณะคลื่นจากการปรับเทียบเครื่องกำเนิดคลื่น แสดงดังตารางที่ ข-5

ตารางที่ ข-5 ลักษณะคลื่นจากการปรับเทียบเครื่องกำเนิดคลื่น

ระยะช่วงชัก (เซนติเมตร)	ความเร็วรอบมอเตอร์ (เฮิร์ต)	ความสูงคลื่น (เซนติเมตร)	คาบคลื่น (วินาที)	ความชันคลื่น
3.0	23	1.59	0.86	0.014
4.0	23	2.18	0.87	0.018
5.0	22	3.09	0.92	0.023
6.0	20	4.12	1.01	0.026
6.5	22	4.61	0.92	0.035
7.0	20	5.35	1.00	0.036

หมายเหตุ : ความลึกน้ำ เท่ากับ 0.40 เมตร

ภาคผนวก ค

ความสมมาตรของข้อมูลคลื่นหลังโครงสร้าง

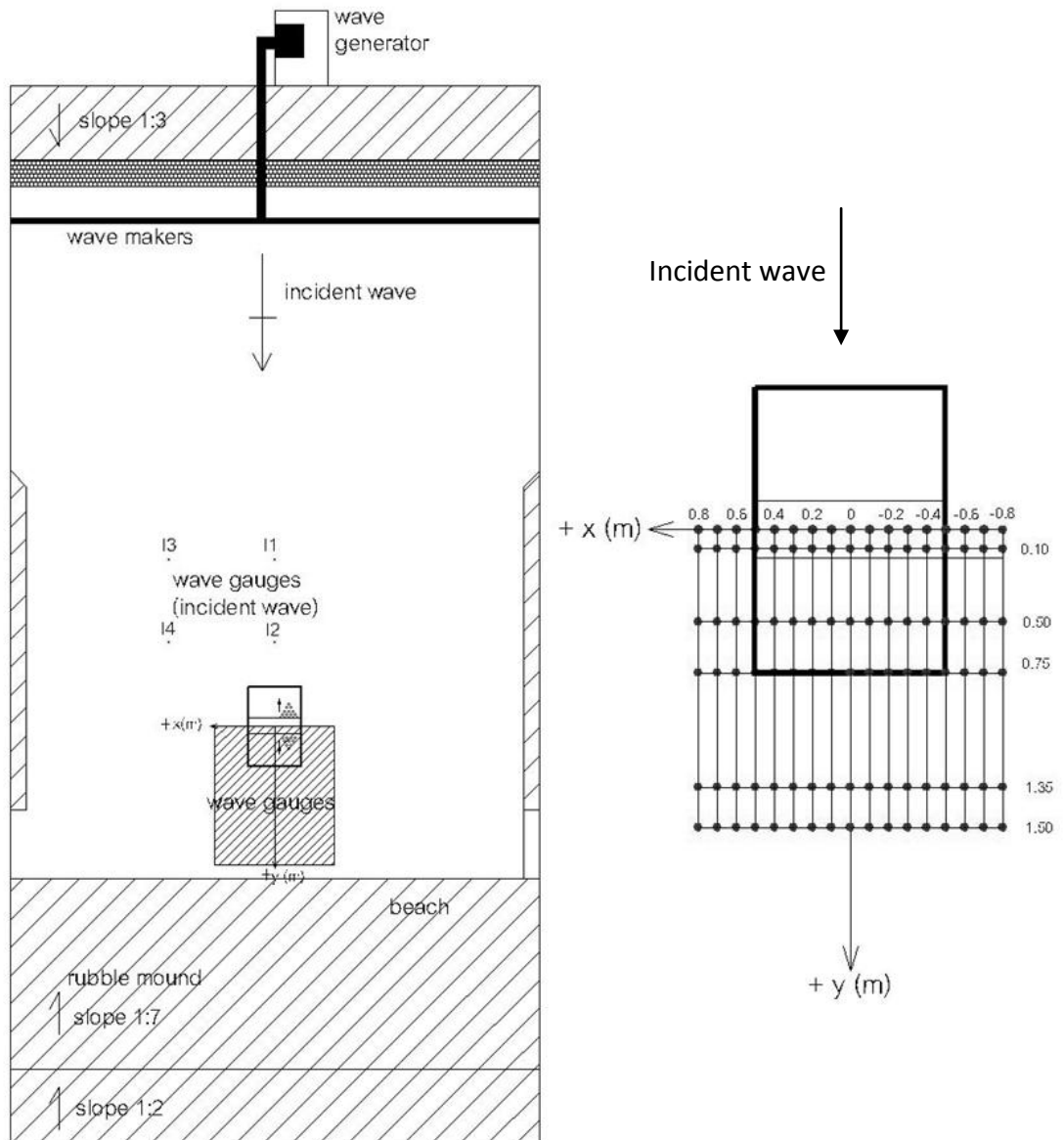
ค-1 การตรวจสอบความสมมาตรของข้อมูลคลื่นหลังโครงสร้าง

การตรวจสอบความสมมาตรของข้อมูลคลื่นบริเวณด้านหลังโครงสร้าง กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 เมตร (จมน้ำ 0.10 เมตร) และคุณสมบัติคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง มีความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง (H_i) เท่ากับ 0.0258 เมตร และคาบคลื่น (L) เท่ากับ 0.87 วินาที เก็บข้อมูลความสูงคลื่น บันทึกข้อมูลที่ความถี่ 250 ข้อมูลต่อวินาที ต่อเนื่องกันเป็นเวลา 2 นาที

โดยกำหนดแกน x ขนานกับแนวชายฝั่ง (along shore) แนวแกน y ตั้งฉากกับแนวชายฝั่ง (cross shore) และตำแหน่งศูนย์กลางการวัด ($x=0, y=0$) อยู่ที่กึ่งกลางของโครงสร้าง ดังรูปที่ ค-1 มีตำแหน่งการเก็บข้อมูลดังนี้ข้อมูลคลื่นบริเวณก่อนเข้าปะทะโครงสร้างตามตำแหน่ง I1, I2, I3 และ I4 ข้อมูลคลื่นด้านบนสันและหลังโครงสร้าง ตามแนวแกน x ขนานกับแนวชายฝั่ง ทุกระยะ 0.10 เมตร ในตำแหน่ง 0 จนถึง 0.80 เมตร และแนวแกน y ซึ่งตั้งฉากกับแนวชายฝั่ง ที่ตำแหน่ง 0.10, 0.50, 0.75, 1.35 และ 1.50 เมตร

ข้อมูลคลื่นที่บันทึกมาจะเป็นการเปลี่ยนแปลงระดับผิวน้ำตามเวลาและตำแหน่ง ประกอบด้วยลูกคลื่นเคลื่อนที่ต่อเนื่องกัน ทำการตัดข้อมูลออกเป็นช่วงๆ ตามคาบคลื่น ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความถี่ ใช้วิธีการวิเคราะห์ความถี่ด้วยวิธี power spectral energy (PSE) และสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพลังงานกับความถี่ สำหรับคลื่นแบบสม่ำเสมอ (regular wave) กราฟดังกล่าวจะมีเพียงยอดความถี่เดียว และส่วนกลับของยอดความถี่นั้นคือคาบเวลา นำคาบคลื่นที่ได้มาตัดข้อมูลค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จากการบันทึกอย่างต่อเนื่อง เพื่อหาความสูงคลื่นย่อยๆของแต่ละช่วงคาบคลื่น จากนั้นนำความสูงคลื่นย่อยๆมาวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อหาตัวแทนความสูงคลื่นที่มีนัยสำคัญ

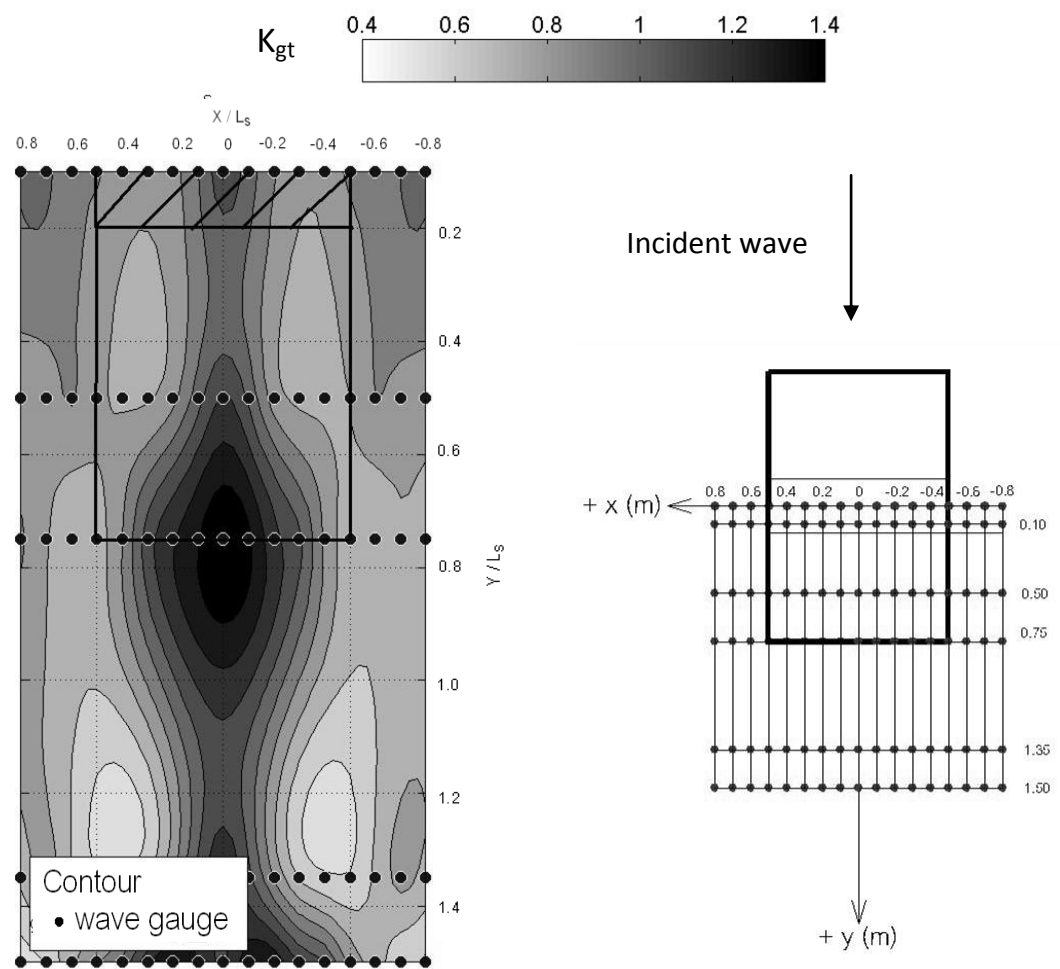
เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นด้านหลังโครงสร้างแต่ละตำแหน่งได้ มาลากเส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม โดยกำหนดจุด (0, 0) เป็นตำแหน่งกึ่งกลางโครงสร้าง แกน y เป็นค่าของระยะทางแนวตั้งฉากต่อความยาวโครงสร้าง (y/L_s) แกน x เป็นค่าของระยะทางแนวขนานต่อความยาวโครงสร้าง (x/L_s) ตำแหน่งเก็บข้อมูลเป็นจุดวงกลมสีดำ และแบ่งระดับสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นในช่วง $K_{gt} = 0.4 - 1.4$ ตามระดับชั้นสี เรียงจากสีขาวอ่อนถึงสีดำเข้มตามลำดับ และมีเส้นกรอบสีเหลี่ยมแสดงอาณาเขตเชื่อมกันคลื่น แสดงดังรูปที่



Overview of the wave basin
(dimension in meter)

รูปที่ ค-1 ตำแหน่งการเก็บข้อมูลคลื่น กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 เมตร

ซึ่งจากการทดลองเก็บข้อมูลเขื่อนกันคลื่นได้น้ำ เมื่อแบ่งการเก็บข้อมูลบริเวณด้านหลังโครงสร้างตามความยาวออกเป็น 2 ส่วน จากการวิเคราะห์ผลของเส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม พบว่า ข้อมูลความสูงคลื่นที่ได้มีลักษณะแนวโน้มใกล้เคียงกันทั้งสองด้าน นั้นคือมีความสมมาตรของพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของคลื่น โดยมีตำแหน่งกึ่งกลางโครงสร้างเป็นแกนสมมาตร ดังนั้นจึงพิจารณาดำเนินการเก็บข้อมูลบริเวณด้านหลังโครงสร้างเพียงครึ่งหนึ่งของโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น แสดงดังตารางที่ ค-1



รูปที่ ค-2 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม เพื่อศึกษาความสมมาตรของข้อมูลคลื่นหลังโครงสร้าง

ตารางที่ ค-1 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม เพื่อตรวจสอบความสมมาตรข้อมูล
คลื่นหลังเขื่อนกันคลื่น

y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}
0.10	0.80	2.23	1.00	0.50	-0.20	1.91	0.85	1.30	0.50	1.36	0.61
0.10	0.70	2.28	1.02	0.50	-0.30	1.75	0.78	1.30	0.40	1.36	0.61
0.10	0.60	2.04	0.92	0.50	-0.40	1.75	0.78	1.30	0.30	1.57	0.70
0.10	0.50	2.04	0.91	0.50	-0.50	1.79	0.80	1.30	0.20	2.04	0.91
0.10	0.40	1.89	0.85	0.50	-0.60	2.01	0.90	1.30	0.10	2.54	1.14
0.10	0.30	1.88	0.84	0.50	-0.70	1.91	0.86	1.30	0.00	2.87	1.29
0.10	0.20	1.94	0.87	0.50	-0.80	1.89	0.85	1.30	-0.10	2.52	1.13
0.10	0.10	2.23	1.00	0.75	0.80	2.02	0.91	1.30	-0.20	1.99	0.89
0.10	0.00	2.59	1.16	0.75	0.70	1.80	0.81	1.30	-0.30	1.55	0.69
0.10	-0.10	2.35	1.05	0.75	0.60	1.60	0.72	1.30	-0.40	1.38	0.62
0.10	-0.20	2.03	0.91	0.75	0.50	1.70	0.76	1.30	-0.50	1.36	0.61
0.10	-0.30	1.86	0.83	0.75	0.40	2.00	0.90	1.30	-0.60	1.60	0.72
0.10	-0.40	1.85	0.83	0.75	0.30	2.57	1.15	1.30	-0.70	1.84	0.83
0.10	-0.50	2.06	0.92	0.75	0.20	2.66	1.19	1.30	-0.80	1.69	0.76
0.10	-0.60	2.04	0.92	0.75	0.10	2.66	1.19	1.50	0.80	1.20	0.54
0.10	-0.70	2.23	1.00	0.75	0.00	2.90	1.30	1.50	0.70	1.36	0.61
0.10	-0.80	2.23	1.00	0.75	-0.10	2.95	1.32	1.50	0.60	1.74	0.78
0.50	0.80	1.89	0.85	0.75	-0.20	2.75	1.23	1.50	0.50	1.99	0.89
0.50	0.70	1.89	0.85	0.75	-0.30	2.50	1.12	1.50	0.40	2.30	1.03
0.50	0.60	2.04	0.91	0.75	-0.40	1.95	0.88	1.50	0.30	2.86	1.28
0.50	0.50	1.82	0.82	0.75	-0.50	1.65	0.74	1.50	0.20	2.71	1.21
0.50	0.40	1.77	0.79	0.75	-0.60	1.58	0.71	1.50	0.10	2.91	1.31
0.50	0.30	1.77	0.79	0.75	-0.70	1.76	0.79	1.50	0.00	2.63	1.18
0.50	0.20	1.95	0.87	0.75	-0.80	1.67	0.75	1.50	-0.10	2.82	1.27
0.50	0.10	2.37	1.06	1.30	0.80	1.60	0.72	1.50	-0.20	2.84	1.27
0.50	0.00	2.69	1.21	1.30	0.70	1.84	0.83	1.50	-0.30	2.68	1.20
0.50	-0.10	2.42	1.08	1.30	0.60	1.55	0.70	1.50	-0.40	2.46	1.10

หมายเหตุ : กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 เมตร (จมน้ำ 0.10 เมตร)

ความสูงคลื่น เท่ากับ 2.231 เซนติเมตร

ความยาวคลื่น เท่ากับ 120.14 เซนติเมตร

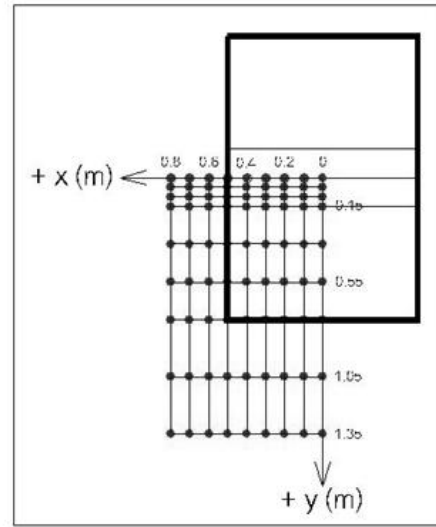
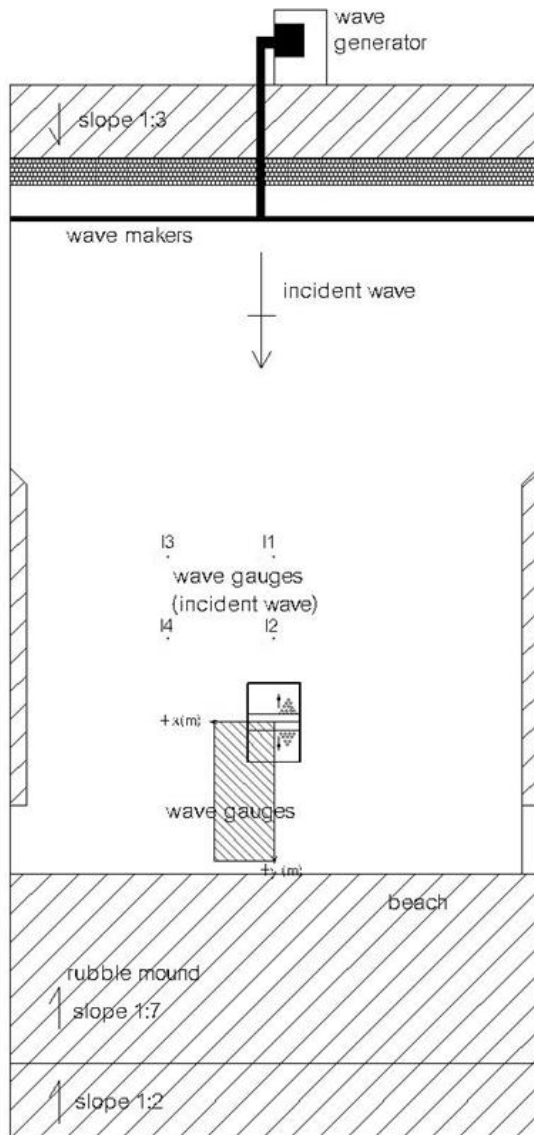
ภาคผนวก ง
ผลการทดลองของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม
และระยะสภาวะความปั่นป่วนหลังเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ

ง-1 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม

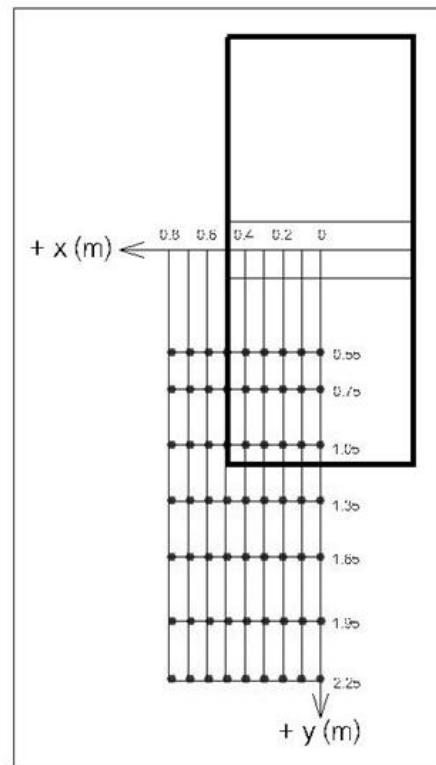
เนื้อหาส่วนนี้จะแสดงผลการทดลองของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม จากการทดลองทั้งสิ้น 16 กรณี โดยมีตัวแปรที่สนใจ ได้แก่ ขนาดโครงสร้าง และคุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง กำหนดระดับน้ำในแอ่งคลื่น มีความลึกน้ำ เท่ากับ 0.40 เมตร มีการเปลี่ยนแปลงความสูงโครงสร้าง ทั้งสิ้น 4 ระดับ ดังนี้ ความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30, 0.35, 0.40 และ 0.50 เมตร ความชันคลื่นแตกต่างกัน 4 ระดับ ระหว่างช่วง 0.018 – 0.035 มีรายละเอียดดังตารางที่ ง-1 และมีการกำหนดตำแหน่งการเก็บข้อมูลคลื่นดังรูป ง-1

ตารางที่ ง-1 รายชื่อและรายละเอียดกรณีศึกษาต่างๆ

Test	H_i (cm)	T (sec)	L (cm)	H_i/L
H30C1	2.181	0.875	119.54	0.018
H30C2	3.129	0.923	133.01	0.024
H30C3	4.155	1.011	159.58	0.027
H30C4	4.615	0.925	133.59	0.035
H35C1	2.190	0.871	118.45	0.018
H35C2	3.192	0.924	133.30	0.024
H35C3	4.120	1.014	160.53	0.026
H35C4	4.612	0.924	133.30	0.035
H40C1	2.211	0.875	119.54	0.018
H40C2	3.092	0.926	133.88	0.023
H40C3	4.151	1.013	160.22	0.026
H40C4	4.699	0.928	134.46	0.035
H50C1	2.205	0.873	118.99	0.019
H50C2	3.121	0.925	133.59	0.023
H50C3	4.155	1.011	159.58	0.026
H50C4	4.612	0.928	134.46	0.034



height of structure = 0.30, 0.35 m



height of structure = 0.40, 0.50 m

รูปที่ ง-1 ตำแหน่งการเก็บข้อมูลเครื่องมือวัดความสูงคลื่น

ตารางที่ ง-2 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม กรณี H30C1

y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}
0.00	0.80	2.10	0.96	0.15	0.80	2.35	1.08	0.75	0.80	1.55	0.71
0.00	0.70	2.18	1.00	0.15	0.70	2.35	1.08	0.75	0.70	1.45	0.66
0.00	0.60	2.19	1.00	0.15	0.60	2.27	1.04	0.75	0.60	1.50	0.69
0.00	0.50	2.30	1.05	0.15	0.50	2.15	0.99	0.75	0.50	1.79	0.82
0.00	0.40	2.30	1.05	0.15	0.40	1.99	0.91	0.75	0.40	2.18	1.00
0.00	0.30	2.41	1.11	0.15	0.30	1.91	0.88	0.75	0.30	2.47	1.13
0.00	0.20	2.28	1.04	0.15	0.20	1.85	0.85	0.75	0.20	2.95	1.35
0.00	0.10	2.18	1.00	0.15	0.10	2.05	0.94	0.75	0.10	3.30	1.52
0.00	0.00	2.06	0.95	0.15	0.00	2.32	1.06	0.75	0.00	2.73	1.25
0.05	0.80	2.24	1.03	0.35	0.80	2.14	0.98	1.05	0.80	1.21	0.55
0.05	0.70	2.23	1.02	0.35	0.70	1.95	0.90	1.05	0.70	1.30	0.60
0.05	0.60	2.19	1.00	0.35	0.60	1.75	0.80	1.05	0.60	1.48	0.68
0.05	0.50	2.23	1.02	0.35	0.50	1.64	0.75	1.05	0.50	1.78	0.82
0.05	0.40	2.18	1.00	0.35	0.40	1.78	0.81	1.05	0.40	2.14	0.98
0.05	0.30	2.21	1.01	0.35	0.30	2.17	0.99	1.05	0.30	2.47	1.13
0.05	0.20	2.23	1.02	0.35	0.20	2.47	1.13	1.05	0.20	2.85	1.31
0.05	0.10	2.25	1.03	0.35	0.10	2.92	1.34	1.05	0.10	2.98	1.37
0.05	0.00	2.34	1.07	0.35	0.00	2.98	1.37	1.05	0.00	2.95	1.35
0.10	0.80	2.14	0.98	0.55	0.80	2.10	0.96	1.35	0.80	1.42	0.65
0.10	0.70	2.06	0.95	0.55	0.70	2.10	0.96	1.35	0.70	1.64	0.75
0.10	0.60	2.06	0.95	0.55	0.60	1.78	0.82	1.35	0.60	1.75	0.80
0.10	0.50	1.95	0.89	0.55	0.50	1.55	0.71	1.35	0.50	1.90	0.87
0.10	0.40	1.96	0.90	0.55	0.40	1.49	0.68	1.35	0.40	2.08	0.95
0.10	0.30	2.12	0.97	0.55	0.30	1.53	0.70	1.35	0.30	2.27	1.04
0.10	0.20	2.18	1.00	0.55	0.20	1.70	0.78	1.35	0.20	2.62	1.20
0.10	0.10	2.36	1.08	0.55	0.10	2.12	0.97	1.35	0.10	2.86	1.31
0.10	0.00	2.52	1.16	0.55	0.00	2.43	1.11	1.35	0.00	2.49	1.14

หมายเหตุ : กรณี H30C1 ความสูงคลื่น เท่ากับ 2.181 เซนติเมตร

ความยาวคลื่น เท่ากับ 119.54 เซนติเมตร

ตารางที่ ง-3 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม กรณี H30C2

y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}
0.00	0.80	2.99	0.96	0.15	0.80	3.22	1.03	0.75	0.80	1.68	0.54
0.00	0.70	2.74	0.87	0.15	0.70	3.20	1.02	0.75	0.70	1.90	0.61
0.00	0.60	2.79	0.89	0.15	0.60	2.92	0.93	0.75	0.60	2.45	0.78
0.00	0.50	2.80	0.89	0.15	0.50	2.76	0.88	0.75	0.50	2.77	0.89
0.00	0.40	2.78	0.89	0.15	0.40	2.50	0.80	0.75	0.40	3.48	1.11
0.00	0.30	2.90	0.93	0.15	0.30	2.52	0.81	0.75	0.30	4.22	1.35
0.00	0.20	3.03	0.97	0.15	0.20	2.62	0.84	0.75	0.20	4.64	1.48
0.00	0.10	3.13	1.00	0.15	0.10	3.06	0.98	0.75	0.10	4.78	1.53
0.00	0.00	3.65	1.17	0.15	0.00	3.40	1.09	0.75	0.00	4.12	1.32
0.05	0.80	3.01	0.96	0.35	0.80	2.84	0.91	1.05	0.80	2.38	0.76
0.05	0.70	3.06	0.98	0.35	0.70	2.54	0.81	1.05	0.70	1.97	0.63
0.05	0.60	2.86	0.91	0.35	0.60	2.21	0.71	1.05	0.60	1.84	0.59
0.05	0.50	2.72	0.87	0.35	0.50	2.38	0.76	1.05	0.50	1.97	0.63
0.05	0.40	2.53	0.81	0.35	0.40	2.89	0.92	1.05	0.40	2.38	0.76
0.05	0.30	2.79	0.89	0.35	0.30	3.45	1.10	1.05	0.30	2.89	0.92
0.05	0.20	2.92	0.93	0.35	0.20	4.09	1.31	1.05	0.20	3.08	0.98
0.05	0.10	3.08	0.98	0.35	0.10	4.43	1.41	1.05	0.10	3.86	1.23
0.05	0.00	3.36	1.07	0.35	0.00	4.37	1.40	1.05	0.00	4.07	1.30
0.10	0.80	2.96	0.95	0.55	0.80	1.86	0.60	1.35	0.80	2.36	0.76
0.10	0.70	2.65	0.85	0.55	0.70	2.67	0.85	1.35	0.70	2.79	0.89
0.10	0.60	2.42	0.77	0.55	0.60	2.18	0.70	1.35	0.60	3.07	0.98
0.10	0.50	2.52	0.81	0.55	0.50	1.94	0.62	1.35	0.50	3.40	1.09
0.10	0.40	2.68	0.86	0.55	0.40	1.91	0.61	1.35	0.40	3.57	1.14
0.10	0.30	3.07	0.98	0.55	0.30	2.37	0.76	1.35	0.30	3.67	1.17
0.10	0.20	3.40	1.09	0.55	0.20	3.00	0.96	1.35	0.20	3.72	1.19
0.10	0.10	3.66	1.17	0.55	0.10	3.60	1.15	1.35	0.10	3.83	1.22
0.10	0.00	4.24	1.35	0.55	0.00	3.91	1.25	1.35	0.00	3.61	1.15

หมายเหตุ : กรณี H30C2 ความสูงคลื่น เท่ากับ 3.129 เซนติเมตร

ความยาวคลื่น เท่ากับ 133.01 เซนติเมตร

ตารางที่ ง-4 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม กรณี H30C3

y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}
0.00	0.80	4.55	1.10	0.15	0.80	3.74	0.90	0.75	0.80	2.92	0.70
0.00	0.70	4.12	0.99	0.15	0.70	4.47	1.08	0.75	0.70	3.08	0.74
0.00	0.60	4.20	1.01	0.15	0.60	4.03	0.97	0.75	0.60	3.35	0.81
0.00	0.50	3.95	0.95	0.15	0.50	3.87	0.93	0.75	0.50	4.15	1.00
0.00	0.40	3.81	0.92	0.15	0.40	3.48	0.84	0.75	0.40	4.60	1.11
0.00	0.30	4.03	0.97	0.15	0.30	3.19	0.77	0.75	0.30	4.61	1.11
0.00	0.20	4.03	0.97	0.15	0.20	3.64	0.88	0.75	0.20	4.65	1.12
0.00	0.10	4.09	0.99	0.15	0.10	4.35	1.05	0.75	0.10	4.62	1.11
0.00	0.00	3.89	0.94	0.15	0.00	4.60	1.11	0.75	0.00	4.64	1.12
0.05	0.80	3.56	0.86	0.35	0.80	3.34	0.80	1.05	0.80	2.19	0.53
0.05	0.70	4.75	1.14	0.35	0.70	2.93	0.71	1.05	0.70	2.47	0.59
0.05	0.60	4.50	1.08	0.35	0.60	2.72	0.66	1.05	0.60	2.85	0.69
0.05	0.50	4.29	1.03	0.35	0.50	2.85	0.69	1.05	0.50	3.64	0.87
0.05	0.40	3.96	0.95	0.35	0.40	3.44	0.83	1.05	0.40	4.12	0.99
0.05	0.30	3.87	0.93	0.35	0.30	4.13	0.99	1.05	0.30	4.76	1.15
0.05	0.20	3.93	0.95	0.35	0.20	4.38	1.05	1.05	0.20	5.00	1.20
0.05	0.10	4.43	1.07	0.35	0.10	5.29	1.27	1.05	0.10	5.09	1.23
0.05	0.00	4.52	1.09	0.35	0.00	4.28	1.03	1.05	0.00	5.09	1.23
0.10	0.80	4.08	0.98	0.55	0.80	3.12	0.75	1.35	0.80	2.29	0.55
0.10	0.70	3.87	0.93	0.55	0.70	3.10	0.75	1.35	0.70	2.15	0.52
0.10	0.60	3.72	0.89	0.55	0.60	2.72	0.65	1.35	0.60	2.54	0.61
0.10	0.50	3.46	0.83	0.55	0.50	2.55	0.61	1.35	0.50	2.89	0.70
0.10	0.40	3.87	0.93	0.55	0.40	2.92	0.70	1.35	0.40	3.29	0.79
0.10	0.30	4.28	1.03	0.55	0.30	3.51	0.84	1.35	0.30	3.43	0.82
0.10	0.20	4.43	1.07	0.55	0.20	5.22	1.26	1.35	0.20	3.75	0.90
0.10	0.10	4.62	1.11	0.55	0.10	5.51	1.33	1.35	0.10	3.84	0.92
0.10	0.00	4.54	1.09	0.55	0.00	5.52	1.33	1.35	0.00	3.79	0.91

หมายเหตุ : กรณี H30C3 ความสูงคลื่น เท่ากับ 4.155 เซนติเมตร

ความยาวคลื่น เท่ากับ 159.58 เซนติเมตร

ตารางที่ ง-5 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม กรณี H30C4

y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}
0.00	0.80	4.89	1.06	0.15	0.80	5.38	1.17	0.75	0.80	3.00	0.65
0.00	0.70	4.57	0.99	0.15	0.70	5.17	1.12	0.75	0.70	3.21	0.70
0.00	0.60	4.27	0.93	0.15	0.60	4.87	1.06	0.75	0.60	3.78	0.82
0.00	0.50	4.47	0.97	0.15	0.50	4.52	0.98	0.75	0.50	4.90	1.06
0.00	0.40	4.38	0.95	0.15	0.40	4.28	0.93	0.75	0.40	5.85	1.27
0.00	0.30	4.89	1.06	0.15	0.30	4.04	0.87	0.75	0.30	5.70	1.24
0.00	0.20	5.07	1.10	0.15	0.20	4.33	0.94	0.75	0.20	5.91	1.28
0.00	0.10	5.18	1.12	0.15	0.10	5.63	1.22	0.75	0.10	5.82	1.26
0.00	0.00	6.09	1.32	0.15	0.00	6.35	1.38	0.75	0.00	6.14	1.33
0.05	0.80	4.87	1.06	0.35	0.80	4.61	1.00	1.05	0.80	2.88	0.62
0.05	0.70	5.03	1.09	0.35	0.70	4.27	0.93	1.05	0.70	3.14	0.68
0.05	0.60	4.67	1.01	0.35	0.60	3.58	0.78	1.05	0.60	3.10	0.67
0.05	0.50	4.49	0.97	0.35	0.50	3.79	0.82	1.05	0.50	3.56	0.77
0.05	0.40	4.45	0.97	0.35	0.40	4.61	1.00	1.05	0.40	3.69	0.80
0.05	0.30	4.47	0.97	0.35	0.30	5.57	1.21	1.05	0.30	4.53	0.98
0.05	0.20	4.39	0.95	0.35	0.20	6.82	1.48	1.05	0.20	5.24	1.13
0.05	0.10	4.92	1.07	0.35	0.10	7.05	1.53	1.05	0.10	5.61	1.22
0.05	0.00	5.40	1.17	0.35	0.00	7.01	1.52	1.05	0.00	5.66	1.23
0.10	0.80	4.70	1.02	0.55	0.80	3.15	0.68	1.35	0.80	3.48	0.75
0.10	0.70	4.51	0.98	0.55	0.70	4.18	0.90	1.35	0.70	3.80	0.82
0.10	0.60	4.31	0.93	0.55	0.60	3.36	0.73	1.35	0.60	4.23	0.92
0.10	0.50	4.30	0.93	0.55	0.50	3.20	0.69	1.35	0.50	4.35	0.94
0.10	0.40	4.53	0.98	0.55	0.40	3.39	0.74	1.35	0.40	5.54	1.20
0.10	0.30	5.39	1.17	0.55	0.30	4.04	0.88	1.35	0.30	5.44	1.18
0.10	0.20	5.98	1.30	0.55	0.20	4.91	1.06	1.35	0.20	5.38	1.16
0.10	0.10	6.26	1.36	0.55	0.10	5.89	1.28	1.35	0.10	5.36	1.16
0.10	0.00	7.07	1.53	0.55	0.00	6.78	1.47	1.35	0.00	5.46	1.18

หมายเหตุ : กรณี H30C4 ความสูงคลื่น เท่ากับ 4.615 เซนติเมตร

ความยาวคลื่น เท่ากับ 133.59 เซนติเมตร

ตารางที่ ง-6 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม กรณี H35C1

y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}
0	0.8	1.75	0.8	0.15	0.8	1.80	0.82	0.75	0.8	1.62	0.74
0	0.7	1.86	0.85	0.15	0.7	1.88	0.86	0.75	0.7	1.34	0.61
0	0.6	2.04	0.93	0.15	0.6	1.84	0.84	0.75	0.6	1.16	0.53
0	0.5	2.32	1.06	0.15	0.5	1.84	0.84	0.75	0.5	1.20	0.55
0	0.4	2.67	1.22	0.15	0.4	1.86	0.85	0.75	0.4	1.88	0.86
0	0.3	3.00	1.37	0.15	0.3	2.06	0.94	0.75	0.3	2.78	1.27
0	0.2	3.04	1.39	0.15	0.2	2.04	0.93	0.75	0.2	3.18	1.45
0	0.1	2.69	1.23	0.15	0.1	2.87	1.31	0.75	0.1	3.24	1.48
0	0	3.04	1.39	0.15	0	3.11	1.42	0.75	0	2.78	1.27
0.05	0.8	1.69	0.77	0.35	0.8	1.91	0.87	1.05	0.8	1.03	0.47
0.05	0.7	1.77	0.81	0.35	0.7	1.80	0.82	1.05	0.7	1.05	0.48
0.05	0.6	1.73	0.79	0.35	0.6	1.69	0.77	1.05	0.6	1.05	0.48
0.05	0.5	1.84	0.84	0.35	0.5	1.31	0.6	1.05	0.5	1.55	0.71
0.05	0.4	1.99	0.91	0.35	0.4	1.73	0.79	1.05	0.4	2.37	1.08
0.05	0.3	2.26	1.03	0.35	0.3	2.12	0.97	1.05	0.3	3.00	1.37
0.05	0.2	2.52	1.15	0.35	0.2	2.61	1.19	1.05	0.2	3.46	1.58
0.05	0.1	3.11	1.42	0.35	0.1	3.79	1.73	1.05	0.1	3.74	1.71
0.05	0	3.13	1.43	0.35	0	2.96	1.35	1.05	0	3.22	1.47
0.1	0.8	2.08	0.95	0.55	0.8	2.12	0.97	1.35	0.8	1.66	0.76
0.1	0.7	1.84	0.84	0.55	0.7	2.12	0.97	1.35	0.7	1.23	0.56
0.1	0.6	1.97	0.9	0.55	0.6	1.84	0.84	1.35	0.6	0.92	0.42
0.1	0.5	2.08	0.95	0.55	0.5	1.55	0.71	1.35	0.5	1.27	0.58
0.1	0.4	2.10	0.96	0.55	0.4	1.38	0.63	1.35	0.4	1.62	0.74
0.1	0.3	2.89	1.32	0.55	0.3	1.31	0.6	1.35	0.3	2.21	1.01
0.1	0.2	3.15	1.44	0.55	0.2	1.58	0.72	1.35	0.2	2.61	1.19
0.1	0.1	3.18	1.45	0.55	0.1	2.28	1.04	1.35	0.1	2.72	1.24
0.1	0	3.24	1.48	0.55	0	3.29	1.5	1.35	0	2.78	1.27

หมายเหตุ : กรณี H35C1 ความสูงคลื่น เท่ากับ 2.190 เซนติเมตร

ความยาวคลื่น เท่ากับ 118.45 เซนติเมตร

ตารางที่ ง-7 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม กรณี H35C2

y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}
0	0.8	2.43	0.76	0.15	0.8	2.78	0.87	0.75	0.8	3.13	0.98
0	0.7	2.55	0.8	0.15	0.7	2.75	0.86	0.75	0.7	3.06	0.96
0	0.6	2.43	0.76	0.15	0.6	2.78	0.87	0.75	0.6	2.14	0.67
0	0.5	2.59	0.81	0.15	0.5	2.81	0.88	0.75	0.5	1.88	0.59
0	0.4	2.90	0.91	0.15	0.4	2.84	0.89	0.75	0.4	1.82	0.57
0	0.3	3.38	1.06	0.15	0.3	3.77	1.18	0.75	0.3	2.23	0.7
0	0.2	3.70	1.16	0.15	0.2	3.86	1.21	0.75	0.2	3.26	1.02
0	0.1	4.09	1.28	0.15	0.1	4.02	1.26	0.75	0.1	3.45	1.08
0	0	3.99	1.25	0.15	0	3.73	1.17	0.75	0	4.76	1.49
0.05	0.8	2.65	0.83	0.35	0.8	2.87	0.9	1.05	0.8	2.23	0.7
0.05	0.7	2.71	0.85	0.35	0.7	3.10	0.97	1.05	0.7	2.01	0.63
0.05	0.6	2.75	0.86	0.35	0.6	2.90	0.91	1.05	0.6	1.72	0.54
0.05	0.5	3.13	0.98	0.35	0.5	2.65	0.83	1.05	0.5	1.85	0.58
0.05	0.4	3.48	1.09	0.35	0.4	2.33	0.73	1.05	0.4	2.11	0.66
0.05	0.3	3.99	1.25	0.35	0.3	2.07	0.65	1.05	0.3	2.87	0.9
0.05	0.2	4.02	1.26	0.35	0.2	2.62	0.82	1.05	0.2	3.48	1.09
0.05	0.1	3.70	1.16	0.35	0.1	3.32	1.04	1.05	0.1	3.77	1.18
0.05	0	3.70	1.16	0.35	0	3.54	1.11	1.05	0	3.93	1.23
0.1	0.8	2.71	0.85	0.55	0.8	2.75	0.86	1.35	0.8	2.17	0.68
0.1	0.7	2.78	0.87	0.55	0.7	2.52	0.79	1.35	0.7	2.33	0.73
0.1	0.6	2.81	0.88	0.55	0.6	1.98	0.62	1.35	0.6	3.10	0.97
0.1	0.5	2.81	0.88	0.55	0.5	1.82	0.57	1.35	0.5	3.06	0.96
0.1	0.4	2.78	0.87	0.55	0.4	2.20	0.69	1.35	0.4	3.35	1.05
0.1	0.3	2.94	0.92	0.55	0.3	3.06	0.96	1.35	0.3	3.80	1.19
0.1	0.2	3.13	0.98	0.55	0.2	4.50	1.41	1.35	0.2	3.86	1.21
0.1	0.1	4.02	1.26	0.55	0.1	5.01	1.57	1.35	0.1	4.18	1.31
0.1	0	4.37	1.37	0.55	0	4.53	1.42	1.35	0	3.45	1.08

หมายเหตุ : กรณี H35C2 ความสูงคลื่น เท่ากับ 3.192 เซนติเมตร

ความยาวคลื่น เท่ากับ 133.30 เซนติเมตร

ตารางที่ ง-8 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม กรณี H35C3

y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}
0	0.8	3.67	0.89	0.15	0.8	3.67	0.89	0.75	0.8	2.60	0.63
0	0.7	3.67	0.89	0.15	0.7	3.21	0.78	0.75	0.7	2.39	0.58
0	0.6	3.83	0.93	0.15	0.6	3.38	0.82	0.75	0.6	2.51	0.61
0	0.5	3.54	0.86	0.15	0.5	3.30	0.8	0.75	0.5	3.46	0.84
0	0.4	3.67	0.89	0.15	0.4	3.25	0.79	0.75	0.4	3.79	0.92
0	0.3	3.83	0.93	0.15	0.3	4.57	1.11	0.75	0.3	4.61	1.12
0	0.2	3.05	0.74	0.15	0.2	4.33	1.05	0.75	0.2	4.57	1.11
0	0.1	4.90	1.19	0.15	0.1	4.53	1.1	0.75	0.1	4.78	1.16
0	0	4.37	1.06	0.15	0	4.08	0.99	0.75	0	5.27	1.28
0.05	0.8	3.46	0.84	0.35	0.8	3.46	0.84	1.05	0.8	2.64	0.64
0.05	0.7	3.67	0.89	0.35	0.7	3.13	0.76	1.05	0.7	2.51	0.61
0.05	0.6	3.83	0.93	0.35	0.6	2.60	0.63	1.05	0.6	2.68	0.65
0.05	0.5	3.67	0.89	0.35	0.5	2.68	0.65	1.05	0.5	2.27	0.55
0.05	0.4	4.12	1	0.35	0.4	2.80	0.68	1.05	0.4	2.27	0.55
0.05	0.3	4.70	1.14	0.35	0.3	4.16	1.01	1.05	0.3	2.27	0.55
0.05	0.2	4.24	1.03	0.35	0.2	4.90	1.19	1.05	0.2	2.27	0.55
0.05	0.1	4.49	1.09	0.35	0.1	5.03	1.22	1.05	0.1	3.09	0.75
0.05	0	4.24	1.03	0.35	0	4.66	1.13	1.05	0	3.09	0.75
0.1	0.8	3.54	0.86	0.55	0.8	3.21	0.78	1.35	0.8	2.68	0.65
0.1	0.7	3.54	0.86	0.55	0.7	3.54	0.86	1.35	0.7	2.39	0.58
0.1	0.6	3.58	0.87	0.55	0.6	3.17	0.77	1.35	0.6	2.14	0.52
0.1	0.5	3.38	0.82	0.55	0.5	2.60	0.63	1.35	0.5	2.14	0.52
0.1	0.4	3.71	0.9	0.55	0.4	2.51	0.61	1.35	0.4	2.14	0.52
0.1	0.3	3.63	0.88	0.55	0.3	2.18	0.53	1.35	0.3	2.39	0.58
0.1	0.2	3.54	0.86	0.55	0.2	3.25	0.79	1.35	0.2	2.55	0.62
0.1	0.1	4.90	1.19	0.55	0.1	4.70	1.14	1.35	0.1	2.88	0.7
0.1	0	4.66	1.13	0.55	0	5.48	1.33	1.35	0	3.09	0.75

หมายเหตุ : กรณี H35C3 ความสูงคลื่น เท่ากับ 4.120 เซนติเมตร

ความยาวคลื่น เท่ากับ 160.53 เซนติเมตร

ตารางที่ ง-9 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม กรณี H35C4

y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}
0	0.8	4.06	0.88	0.15	0.8	4.47	0.97	0.75	0.8	3.46	0.75
0	0.7	4.10	0.89	0.15	0.7	4.70	1.02	0.75	0.7	3.27	0.71
0	0.6	4.01	0.87	0.15	0.6	4.29	0.93	0.75	0.6	3.27	0.71
0	0.5	4.24	0.92	0.15	0.5	4.10	0.89	0.75	0.5	4.06	0.88
0	0.4	5.63	1.22	0.15	0.4	3.74	0.81	0.75	0.4	4.84	1.05
0	0.3	6.04	1.31	0.15	0.3	3.83	0.83	0.75	0.3	5.40	1.17
0	0.2	5.40	1.17	0.15	0.2	4.57	0.99	0.75	0.2	5.53	1.2
0	0.1	5.58	1.21	0.15	0.1	5.72	1.24	0.75	0.1	5.90	1.28
0	0	5.17	1.12	0.15	0	5.12	1.11	0.75	0	5.53	1.2
0.05	0.8	4.38	0.95	0.35	0.8	4.24	0.92	1.05	0.8	3.14	0.68
0.05	0.7	4.10	0.89	0.35	0.7	3.83	0.83	1.05	0.7	3.14	0.68
0.05	0.6	3.92	0.85	0.35	0.6	3.69	0.8	1.05	0.6	3.23	0.7
0.05	0.5	3.92	0.85	0.35	0.5	3.37	0.73	1.05	0.5	3.09	0.67
0.05	0.4	4.10	0.89	0.35	0.4	3.92	0.85	1.05	0.4	3.23	0.7
0.05	0.3	4.15	0.9	0.35	0.3	5.12	1.11	1.05	0.3	3.32	0.72
0.05	0.2	5.17	1.12	0.35	0.2	5.21	1.13	1.05	0.2	3.37	0.73
0.05	0.1	5.77	1.25	0.35	0.1	6.18	1.34	1.05	0.1	3.37	0.73
0.05	0	5.17	1.12	0.35	0	5.58	1.21	1.05	0	3.46	0.75
0.1	0.8	4.15	0.9	0.55	0.8	5.26	1.14	1.35	0.8	2.95	0.64
0.1	0.7	3.69	0.8	0.55	0.7	4.61	1	1.35	0.7	2.95	0.64
0.1	0.6	3.69	0.8	0.55	0.6	4.34	0.94	1.35	0.6	3.00	0.65
0.1	0.5	4.06	0.88	0.55	0.5	3.69	0.8	1.35	0.5	3.23	0.7
0.1	0.4	4.89	1.06	0.55	0.4	3.37	0.73	1.35	0.4	3.37	0.73
0.1	0.3	5.86	1.27	0.55	0.3	3.46	0.75	1.35	0.3	3.41	0.74
0.1	0.2	5.12	1.11	0.55	0.2	4.06	0.88	1.35	0.2	3.46	0.75
0.1	0.1	6.69	1.45	0.55	0.1	6.04	1.31	1.35	0.1	3.78	0.82
0.1	0	5.86	1.27	0.55	0	6.87	1.49	1.35	0	3.83	0.83

หมายเหตุ : กรณี H35C4 ความสูงคลื่น เท่ากับ 4.612 เซนติเมตร

ความยาวคลื่น เท่ากับ 133.30 เซนติเมตร

ตารางที่ ง-10 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม กรณี H40C1

y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}
0.55	0.8	2.06	0.93	1.05	0.5	1.28	0.58	1.65	0.2	1.53	0.69
0.55	0.7	1.84	0.83	1.05	0.4	1.02	0.46	1.65	0.1	1.79	0.81
0.55	0.6	1.57	0.71	1.05	0.3	1.17	0.53	1.65	0	1.72	0.78
0.55	0.5	1.33	0.6	1.05	0.2	1.55	0.7	1.95	0.8	1.04	0.47
0.55	0.4	0.84	0.38	1.05	0.1	2.01	0.91	1.95	0.7	0.95	0.43
0.55	0.3	1.19	0.54	1.05	0	2.12	0.96	1.95	0.6	1.19	0.54
0.55	0.2	2.12	0.96	1.35	0.8	1.57	0.71	1.95	0.5	1.30	0.59
0.55	0.1	3.03	1.37	1.35	0.7	1.24	0.56	1.95	0.4	1.59	0.72
0.55	0	1.77	0.8	1.35	0.6	1.17	0.53	1.95	0.3	1.68	0.76
0.75	0.8	1.64	0.74	1.35	0.5	1.42	0.64	1.95	0.2	1.86	0.84
0.75	0.7	2.56	1.16	1.35	0.4	1.33	0.6	1.95	0.1	1.88	0.85
0.75	0.6	1.92	0.87	1.35	0.3	1.79	0.81	1.95	0	1.88	0.85
0.75	0.5	1.64	0.74	1.35	0.2	1.86	0.84	2.25	0.8	1.37	0.62
0.75	0.4	1.17	0.53	1.35	0.1	1.72	0.78	2.25	0.7	0.99	0.45
0.75	0.3	0.80	0.36	1.35	0	1.53	0.69	2.25	0.6	0.99	0.45
0.75	0.2	2.56	1.16	1.65	0.8	1.28	0.58	2.25	0.5	1.11	0.5
0.75	0.1	1.61	0.73	1.65	0.7	1.46	0.66	2.25	0.4	1.17	0.53
0.75	0	2.17	0.98	1.65	0.6	1.46	0.66	2.25	0.3	1.37	0.62
1.05	0.8	2.28	1.03	1.65	0.5	1.28	0.58	2.25	0.2	1.48	0.67
1.05	0.7	2.28	1.03	1.65	0.4	1.17	0.53	2.25	0.1	1.61	0.73
1.05	0.6	1.75	0.79	1.65	0.3	1.33	0.6	2.25	0	1.57	0.71

หมายเหตุ : กรณี H40C1 ความสูงคลื่น เท่ากับ 2.211 เซนติเมตร

ความยาวคลื่น เท่ากับ 119.54 เซนติเมตร

ตารางที่ ง-11 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม กรณี H40C2

y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}
0.55	0.8	2.57	0.83	1.05	0.5	1.92	0.62	1.65	0.2	2.44	0.79
0.55	0.7	2.23	0.72	1.05	0.4	1.42	0.46	1.65	0.1	2.47	0.8
0.55	0.6	2.13	0.69	1.05	0.3	1.42	0.46	1.65	0	2.29	0.74
0.55	0.5	1.61	0.52	1.05	0.2	2.04	0.66	1.95	0.8	1.86	0.6
0.55	0.4	1.11	0.36	1.05	0.1	2.97	0.96	1.95	0.7	1.89	0.61
0.55	0.3	1.70	0.55	1.05	0	2.75	0.89	1.95	0.6	1.86	0.6
0.55	0.2	2.72	0.88	1.35	0.8	2.10	0.68	1.95	0.5	1.95	0.63
0.55	0.1	3.40	1.1	1.35	0.7	1.79	0.58	1.95	0.4	2.26	0.73
0.55	0	2.35	0.76	1.35	0.6	1.73	0.56	1.95	0.3	2.35	0.76
0.75	0.8	2.78	0.9	1.35	0.5	1.95	0.63	1.95	0.2	2.35	0.76
0.75	0.7	3.12	1.01	1.35	0.4	2.04	0.66	1.95	0.1	2.47	0.8
0.75	0.6	2.47	0.8	1.35	0.3	2.41	0.78	1.95	0	2.54	0.82
0.75	0.5	2.01	0.65	1.35	0.2	2.32	0.75	2.25	0.8	2.41	0.78
0.75	0.4	1.30	0.42	1.35	0.1	2.20	0.71	2.25	0.7	1.27	0.41
0.75	0.3	0.99	0.32	1.35	0	2.13	0.69	2.25	0.6	1.45	0.47
0.75	0.2	1.55	0.5	1.65	0.8	2.07	0.67	2.25	0.5	1.61	0.52
0.75	0.1	2.04	0.66	1.65	0.7	1.64	0.53	2.25	0.4	1.76	0.57
0.75	0	2.66	0.86	1.65	0.6	1.73	0.56	2.25	0.3	2.04	0.66
1.05	0.8	1.52	0.49	1.65	0.5	1.79	0.58	2.25	0.2	2.01	0.65
1.05	0.7	2.88	0.93	1.65	0.4	2.23	0.72	2.25	0.1	2.16	0.7
1.05	0.6	2.16	0.7	1.65	0.3	2.44	0.79	2.25	0	2.10	0.68

หมายเหตุ : กรณี H40C2 ความสูงคลื่น เท่ากับ 3.092 เซนติเมตร

ความยาวคลื่น เท่ากับ 133.88 เซนติเมตร

ตารางที่ ง-12 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม กรณี H40C3

y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}
0.55	0.8	3.24	0.78	1.05	0.5	2.12	0.51	1.65	0.2	2.74	0.66
0.55	0.7	3.90	0.94	1.05	0.4	3.11	0.75	1.65	0.1	2.91	0.7
0.55	0.6	3.24	0.78	1.05	0.3	3.40	0.82	1.65	0	2.91	0.7
0.55	0.5	3.11	0.75	1.05	0.2	4.11	0.99	1.95	0.8	2.24	0.54
0.55	0.4	2.57	0.62	1.05	0.1	4.11	0.99	1.95	0.7	1.70	0.41
0.55	0.3	1.74	0.42	1.05	0	3.45	0.83	1.95	0.6	2.41	0.58
0.55	0.2	1.70	0.41	1.35	0.8	3.57	0.86	1.95	0.5	2.57	0.62
0.55	0.1	2.45	0.59	1.35	0.7	2.16	0.52	1.95	0.4	2.78	0.67
0.55	0	3.32	0.8	1.35	0.6	1.70	0.41	1.95	0.3	3.03	0.73
0.75	0.8	3.20	0.77	1.35	0.5	1.58	0.38	1.95	0.2	3.07	0.74
0.75	0.7	2.45	0.59	1.35	0.4	1.70	0.41	1.95	0.1	3.07	0.74
0.75	0.6	1.74	0.42	1.35	0.3	2.45	0.59	1.95	0	2.95	0.71
0.75	0.5	1.70	0.41	1.35	0.2	2.45	0.59	2.25	0.8	1.70	0.41
0.75	0.4	2.28	0.55	1.35	0.1	3.36	0.81	2.25	0.7	1.74	0.42
0.75	0.3	2.74	0.66	1.35	0	3.57	0.86	2.25	0.6	2.20	0.53
0.75	0.2	2.24	0.54	1.65	0.8	2.95	0.71	2.25	0.5	2.32	0.56
0.75	0.1	5.23	1.26	1.65	0.7	2.28	0.55	2.25	0.4	2.32	0.56
0.75	0	4.73	1.14	1.65	0.6	1.99	0.48	2.25	0.3	2.86	0.69
1.05	0.8	2.08	0.5	1.65	0.5	1.91	0.46	2.25	0.2	2.99	0.72
1.05	0.7	2.20	0.53	1.65	0.4	2.08	0.5	2.25	0.1	3.15	0.76
1.05	0.6	1.95	0.47	1.65	0.3	2.20	0.53	2.25	0	3.15	0.76

หมายเหตุ : กรณี H40C3 ความสูงคลื่น เท่ากับ 4.151 เซนติเมตร

ความยาวคลื่น เท่ากับ 160.22 เซนติเมตร

ตารางที่ ง-13 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม กรณี H40C4

y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}
0.55	0.8	4.61	0.98	1.05	0.5	3.62	0.77	1.65	0.2	3.43	0.73
0.55	0.7	4.32	0.92	1.05	0.4	2.77	0.59	1.65	0.1	3.38	0.72
0.55	0.6	3.71	0.79	1.05	0.3	2.68	0.57	1.65	0	3.52	0.75
0.55	0.5	2.91	0.62	1.05	0.2	3.29	0.7	1.95	0.8	2.35	0.5
0.55	0.4	2.44	0.52	1.05	0.1	4.75	1.01	1.95	0.7	2.16	0.46
0.55	0.3	3.24	0.69	1.05	0	4.28	0.91	1.95	0.6	2.44	0.52
0.55	0.2	4.75	1.01	1.35	0.8	2.35	0.5	1.95	0.5	2.44	0.52
0.55	0.1	5.17	1.1	1.35	0.7	2.35	0.5	1.95	0.4	3.15	0.67
0.55	0	3.62	0.77	1.35	0.6	2.63	0.56	1.95	0.3	3.38	0.72
0.75	0.8	3.34	0.71	1.35	0.5	3.48	0.74	1.95	0.2	3.95	0.84
0.75	0.7	4.70	1	1.35	0.4	4.04	0.86	1.95	0.1	4.23	0.9
0.75	0.6	3.90	0.83	1.35	0.3	4.14	0.88	1.95	0	4.61	0.98
0.75	0.5	3.67	0.78	1.35	0.2	4.28	0.91	2.25	0.8	2.07	0.44
0.75	0.4	2.87	0.61	1.35	0.1	4.18	0.89	2.25	0.7	2.40	0.51
0.75	0.3	2.77	0.59	1.35	0	4.28	0.91	2.25	0.6	2.26	0.48
0.75	0.2	3.38	0.72	1.65	0.8	2.11	0.45	2.25	0.5	2.77	0.59
0.75	0.1	4.37	0.93	1.65	0.7	2.63	0.56	2.25	0.4	3.52	0.75
0.75	0	5.54	1.18	1.65	0.6	2.68	0.57	2.25	0.3	3.95	0.84
1.05	0.8	4.56	0.97	1.65	0.5	3.15	0.67	2.25	0.2	4.42	0.94
1.05	0.7	4.56	0.97	1.65	0.4	3.29	0.7	2.25	0.1	4.56	0.97
1.05	0.6	4.18	0.89	1.65	0.3	3.62	0.77	2.25	0	4.70	1.00

หมายเหตุ : กรณี H40C4 ความสูงคลื่น เท่ากับ 4.699 เซนติเมตร

ความยาวคลื่น เท่ากับ 134.46 เซนติเมตร

ตารางที่ ง-14 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม กรณี H50C1

y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}
0.55	0.8	2.07	0.94	1.05	0.5	1.04	0.47	1.65	0.2	1.61	0.73
0.55	0.7	2.03	0.92	1.05	0.4	1.17	0.53	1.65	0.1	1.54	0.7
0.55	0.6	2.01	0.91	1.05	0.3	1.26	0.57	1.65	0	1.46	0.66
0.55	0.5	1.96	0.89	1.05	0.2	1.28	0.58	1.95	0.8	1.76	0.8
0.55	0.4	1.72	0.78	1.05	0.1	1.39	0.63	1.95	0.7	1.28	0.58
0.55	0.3	1.65	0.75	1.05	0	0.93	0.42	1.95	0.6	1.26	0.57
0.55	0.2	1.28	0.58	1.35	0.8	1.35	0.61	1.95	0.5	1.30	0.59
0.55	0.1	0.66	0.3	1.35	0.7	1.87	0.85	1.95	0.4	1.28	0.58
0.55	0	0.79	0.36	1.35	0.6	1.63	0.74	1.95	0.3	1.43	0.65
0.75	0.8	2.16	0.98	1.35	0.5	1.41	0.64	1.95	0.2	1.59	0.72
0.75	0.7	1.96	0.89	1.35	0.4	1.26	0.57	1.95	0.1	1.63	0.74
0.75	0.6	1.57	0.71	1.35	0.3	1.19	0.54	1.95	0	1.57	0.71
0.75	0.5	1.28	0.58	1.35	0.2	1.19	0.54	2.25	0.8	1.19	0.54
0.75	0.4	0.84	0.38	1.35	0.1	1.30	0.59	2.25	0.7	1.30	0.59
0.75	0.3	0.93	0.42	1.35	0	1.30	0.59	2.25	0.6	1.26	0.57
0.75	0.2	1.04	0.47	1.65	0.8	1.50	0.68	2.25	0.5	1.37	0.62
0.75	0.1	1.04	0.47	1.65	0.7	1.35	0.61	2.25	0.4	1.35	0.61
0.75	0	0.60	0.27	1.65	0.6	1.21	0.55	2.25	0.3	1.41	0.64
1.05	0.8	1.87	0.85	1.65	0.5	1.28	0.58	2.25	0.2	1.41	0.64
1.05	0.7	1.46	0.66	1.65	0.4	1.35	0.61	2.25	0.1	1.61	0.73
1.05	0.6	1.21	0.55	1.65	0.3	1.50	0.68	2.25	0	1.70	0.77

หมายเหตุ : กรณี H50C1 ความสูงคลื่น เท่ากับ 2.205 เซนติเมตร

ความยาวคลื่น เท่ากับ 118.99 เซนติเมตร

ตารางที่ ง-15 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม กรณี H50C2

y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}
0.55	0.8	2.43	0.78	1.05	0.5	1.97	0.63	1.65	0.2	1.84	0.59
0.55	0.7	2.37	0.76	1.05	0.4	1.65	0.53	1.65	0.1	2.09	0.67
0.55	0.6	2.18	0.7	1.05	0.3	1.40	0.45	1.65	0	2.18	0.7
0.55	0.5	2.03	0.65	1.05	0.2	1.28	0.41	1.95	0.8	1.62	0.52
0.55	0.4	1.37	0.44	1.05	0.1	1.28	0.41	1.95	0.7	1.59	0.51
0.55	0.3	0.75	0.24	1.05	0	1.59	0.51	1.95	0.6	1.69	0.54
0.55	0.2	0.97	0.31	1.35	0.8	2.50	0.8	1.95	0.5	1.94	0.62
0.55	0.1	1.28	0.41	1.35	0.7	2.12	0.68	1.95	0.4	2.09	0.67
0.55	0	0.66	0.21	1.35	0.6	1.81	0.58	1.95	0.3	2.15	0.69
0.75	0.8	3.21	1.03	1.35	0.5	1.72	0.55	1.95	0.2	2.25	0.72
0.75	0.7	3.21	1.03	1.35	0.4	1.44	0.46	1.95	0.1	2.22	0.71
0.75	0.6	2.93	0.94	1.35	0.3	1.75	0.56	1.95	0	2.06	0.66
0.75	0.5	2.50	0.8	1.35	0.2	1.90	0.61	2.25	0.8	2.72	0.87
0.75	0.4	2.22	0.71	1.35	0.1	1.75	0.56	2.25	0.7	1.69	0.54
0.75	0.3	1.78	0.57	1.35	0	1.62	0.52	2.25	0.6	1.59	0.51
0.75	0.2	1.37	0.44	1.65	0.8	2.06	0.66	2.25	0.5	1.72	0.55
0.75	0.1	1.40	0.45	1.65	0.7	2.22	0.71	2.25	0.4	1.65	0.53
0.75	0	1.44	0.46	1.65	0.6	2.00	0.64	2.25	0.3	1.56	0.5
1.05	0.8	2.72	0.87	1.65	0.5	1.69	0.54	2.25	0.2	1.75	0.56
1.05	0.7	2.59	0.83	1.65	0.4	1.56	0.5	2.25	0.1	1.90	0.61
1.05	0.6	2.37	0.76	1.65	0.3	1.72	0.55	2.25	0	2.25	0.72

หมายเหตุ : กรณี H50C2 ความสูงคลื่น เท่ากับ 3.121 เซนติเมตร

ความยาวคลื่น เท่ากับ 133.59 เซนติเมตร

ตารางที่ ง-16 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม กรณี H50C3

y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}
0.55	0.8	3.66	0.88	1.05	0.5	1.62	0.39	1.65	0.2	2.33	0.56
0.55	0.7	3.91	0.94	1.05	0.4	1.87	0.45	1.65	0.1	2.45	0.59
0.55	0.6	4.03	0.97	1.05	0.3	2.20	0.53	1.65	0	2.78	0.67
0.55	0.5	3.57	0.86	1.05	0.2	2.78	0.67	1.95	0.8	2.04	0.49
0.55	0.4	3.28	0.79	1.05	0.1	2.66	0.64	1.95	0.7	1.87	0.45
0.55	0.3	2.66	0.64	1.05	0	2.16	0.52	1.95	0.6	1.70	0.41
0.55	0.2	1.70	0.41	1.35	0.8	1.83	0.44	1.95	0.5	1.83	0.44
0.55	0.1	1.25	0.3	1.35	0.7	1.58	0.38	1.95	0.4	2.04	0.49
0.55	0	1.54	0.37	1.35	0.6	1.58	0.38	1.95	0.3	2.45	0.59
0.75	0.8	3.86	0.93	1.35	0.5	1.62	0.39	1.95	0.2	2.58	0.62
0.75	0.7	3.41	0.82	1.35	0.4	1.62	0.39	1.95	0.1	2.74	0.66
0.75	0.6	2.70	0.65	1.35	0.3	1.91	0.46	1.95	0	2.74	0.66
0.75	0.5	1.99	0.48	1.35	0.2	2.45	0.59	2.25	0.8	2.20	0.53
0.75	0.4	1.83	0.44	1.35	0.1	2.49	0.6	2.25	0.7	2.20	0.53
0.75	0.3	2.04	0.49	1.35	0	2.91	0.7	2.25	0.6	2.70	0.65
0.75	0.2	2.20	0.53	1.65	0.8	1.54	0.37	2.25	0.5	2.87	0.69
0.75	0.1	2.62	0.63	1.65	0.7	1.75	0.42	2.25	0.4	2.95	0.71
0.75	0	1.62	0.39	1.65	0.6	1.87	0.45	2.25	0.3	3.03	0.73
1.05	0.8	2.62	0.63	1.65	0.5	1.99	0.48	2.25	0.2	3.16	0.76
1.05	0.7	2.24	0.54	1.65	0.4	2.20	0.53	2.25	0.1	3.28	0.79
1.05	0.6	1.87	0.45	1.65	0.3	2.29	0.55	2.25	0	2.99	0.72

หมายเหตุ : กรณี H50C3 ความสูงคลื่น เท่ากับ 4.155 เซนติเมตร

ความยาวคลื่น เท่ากับ 159.58 เซนติเมตร

ตารางที่ ง-17 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม กรณี H50C4

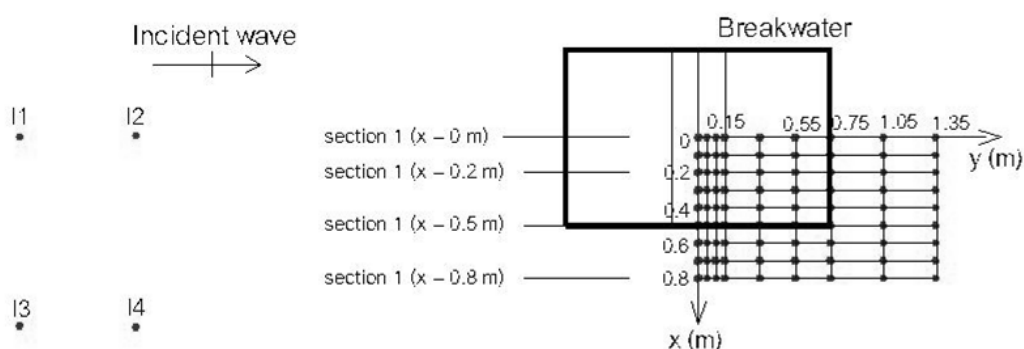
y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}	y (m)	x (m)	H _t	K _{gt}
0.55	0.8	4.98	1.08	1.05	0.5	3.27	0.71	1.65	0.2	2.54	0.55
0.55	0.7	4.57	0.99	1.05	0.4	2.81	0.61	1.65	0.1	2.67	0.58
0.55	0.6	4.38	0.95	1.05	0.3	2.49	0.54	1.65	0	3.23	0.7
0.55	0.5	4.20	0.91	1.05	0.2	2.49	0.54	1.95	0.8	2.63	0.57
0.55	0.4	3.00	0.65	1.05	0.1	2.54	0.55	1.95	0.7	2.17	0.47
0.55	0.3	1.98	0.43	1.05	0	3.00	0.65	1.95	0.6	2.08	0.45
0.55	0.2	2.26	0.49	1.35	0.8	2.86	0.62	1.95	0.5	1.94	0.42
0.55	0.1	1.89	0.41	1.35	0.7	2.40	0.52	1.95	0.4	2.40	0.52
0.55	0	1.89	0.41	1.35	0.6	2.03	0.44	1.95	0.3	2.77	0.6
0.75	0.8	4.47	0.97	1.35	0.5	2.21	0.48	1.95	0.2	3.51	0.76
0.75	0.7	4.47	0.97	1.35	0.4	2.35	0.51	1.95	0.1	4.06	0.88
0.75	0.6	4.47	0.97	1.35	0.3	2.77	0.6	1.95	0	4.66	1.01
0.75	0.5	4.29	0.93	1.35	0.2	2.86	0.62	2.25	0.8	1.98	0.43
0.75	0.4	3.92	0.85	1.35	0.1	3.23	0.7	2.25	0.7	1.98	0.43
0.75	0.3	3.18	0.69	1.35	0	3.37	0.73	2.25	0.6	1.98	0.43
0.75	0.2	2.44	0.53	1.65	0.8	2.91	0.63	2.25	0.5	2.03	0.44
0.75	0.1	2.49	0.54	1.65	0.7	3.69	0.8	2.25	0.4	2.17	0.47
0.75	0	2.86	0.62	1.65	0.6	3.37	0.73	2.25	0.3	2.54	0.55
1.05	0.8	4.93	1.07	1.65	0.5	2.86	0.62	2.25	0.2	2.95	0.64
1.05	0.7	4.29	0.93	1.65	0.4	2.54	0.55	2.25	0.1	3.37	0.73
1.05	0.6	3.87	0.84	1.65	0.3	2.35	0.51	2.25	0	3.32	0.72

หมายเหตุ : กรณี H50C4 ความสูงคลื่น เท่ากับ 4.612 เซนติเมตร

ความยาวคลื่น เท่ากับ 134.46 เซนติเมตร

ง-2 ระยะเวลาความปั่นป่วนของคลื่นหลังเชื่อมกันคลื่นได้น้ำ

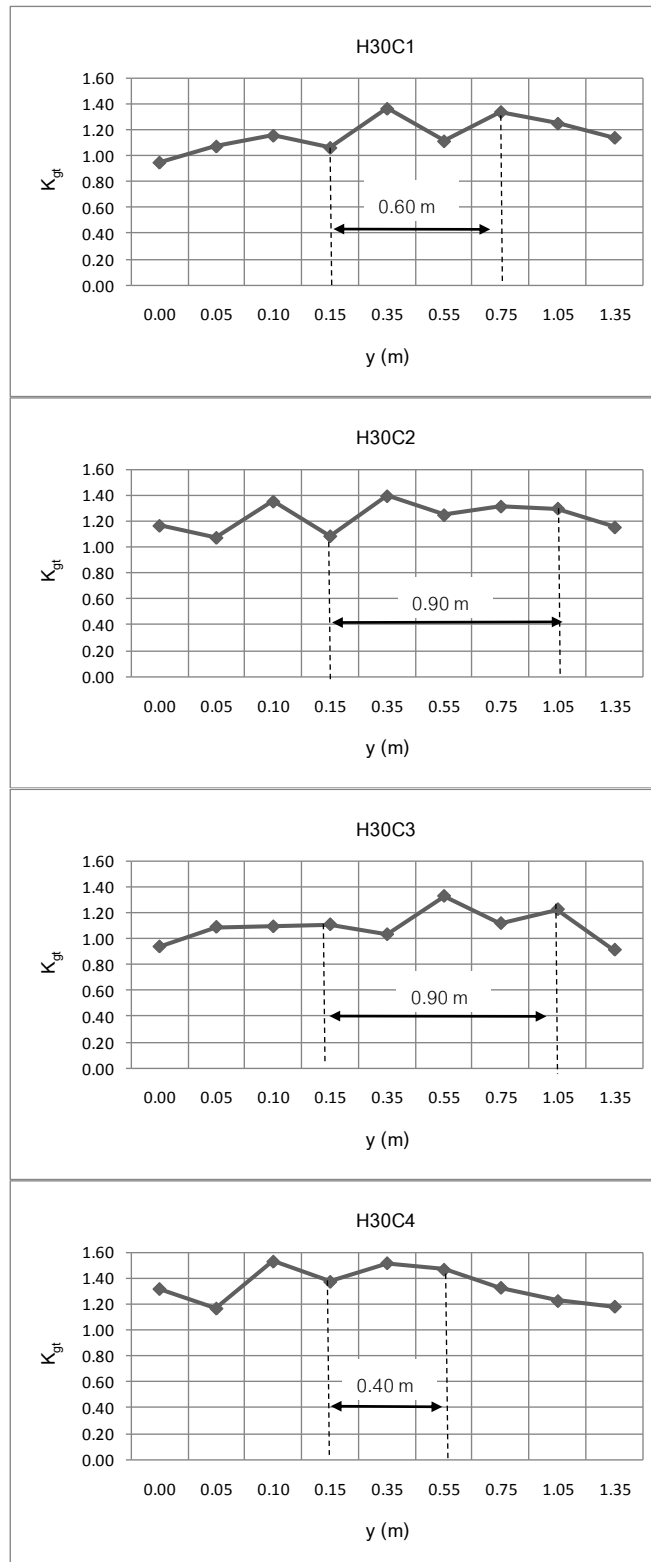
ส่วนนี้เป็นการแสดงระยะเวลาความปั่นป่วนของคลื่นหลังเชื่อมกันคลื่นได้น้ำ ในแนวกึ่งกลางด้านหลังโครงสร้าง (ดังรูปที่ ง-1 หน้าตัดที่ 1) กำหนดตำแหน่งระยะห่างของความปั่นป่วนของคลื่นนับตั้งแต่ปลายของสันด้านท้ายโครงสร้าง จนถึงตำแหน่งค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวม (K_{gt}) ครั้งสุดท้ายก่อนที่ความลาดชันของกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมกับระยะทางตามแกน y มีค่าเป็นลบ และผลสรุปดังตารางที่ ง-18



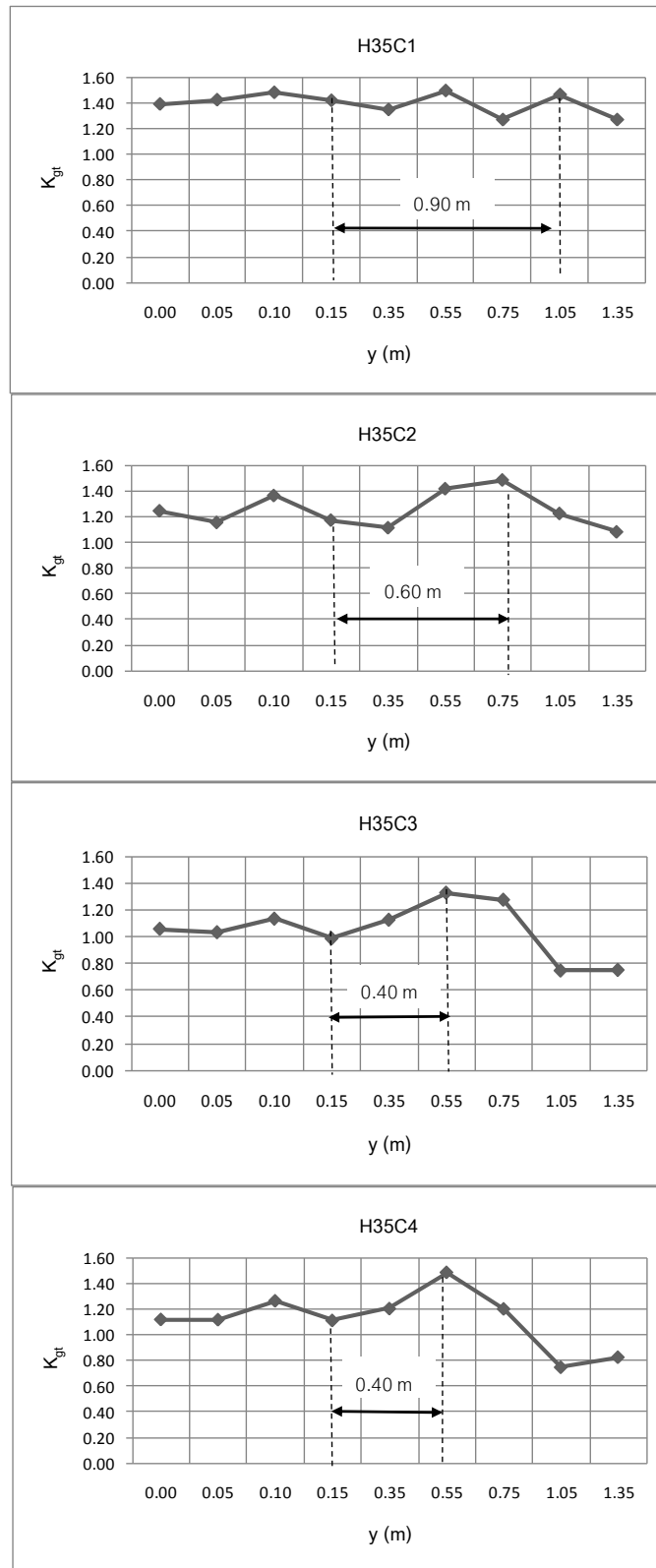
รูปที่ ง-1 แสดงหน้าตัดการพิจารณาช่วงการแตกตัวของคลื่นหลังเชื่อมกันคลื่นได้น้ำ

ตารางที่ ง-18 ระยะเวลาของสภาวะที่มีการแตกตัวของคลื่นหลังเชื่อมกันคลื่นได้น้ำแบบหินทิ้ง

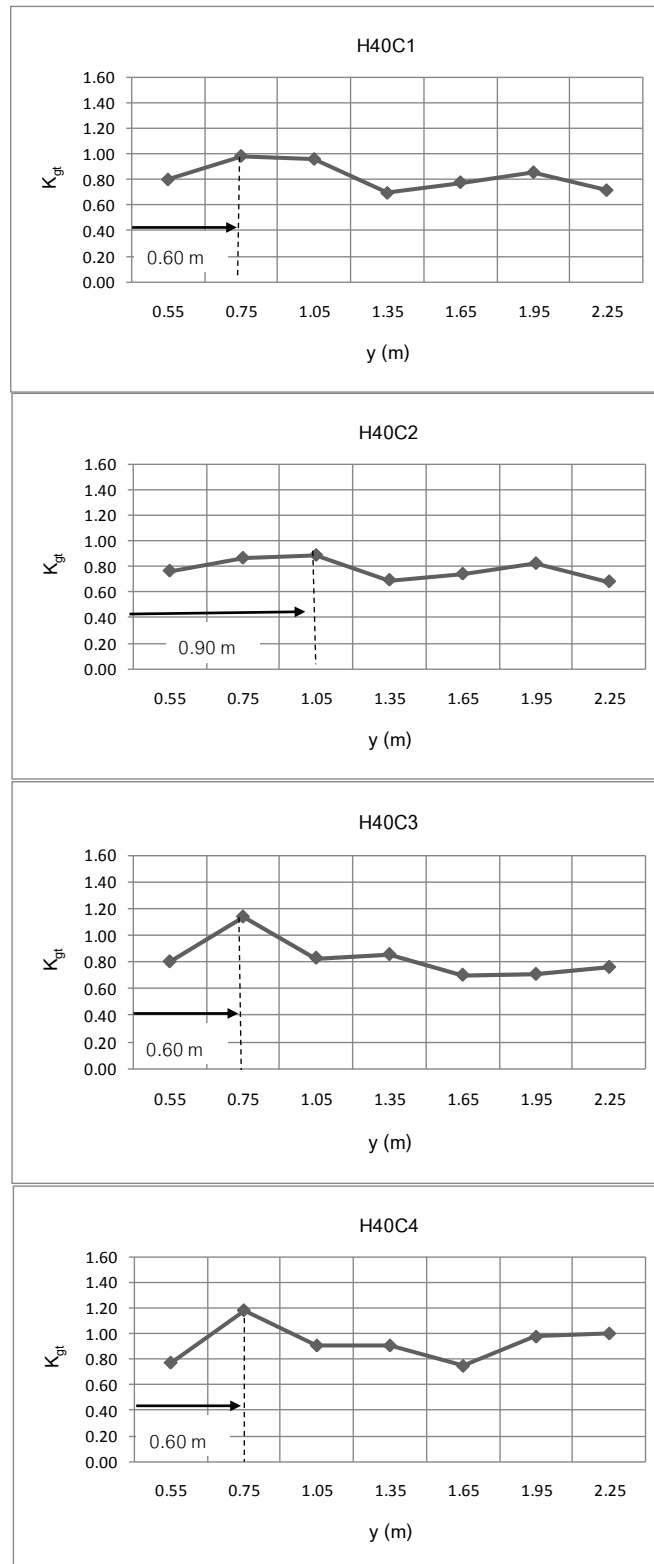
กรณีศึกษา	ความยาวคลื่น (เมตร)	ระยะเวลาความปั่นป่วนของคลื่น (เมตร)	ระยะเวลาความปั่นป่วนของคลื่น ต่อความยาวคลื่น (เมตร/เมตร)
H30C1	1.195	0.60	0.50L
H30C2	1.330	0.90	0.68L
H30C3	1.596	0.90	0.56L
H30C4	1.336	0.40	0.30L
H35C1	1.184	0.90	0.76L
H35C2	1.333	0.90	0.68L
H35C3	1.605	0.40	0.25L
H35C4	1.333	0.40	0.75L
H40C1	1.195	0.90	0.67L
H40C2	1.339	0.90	0.67L
H40C3	1.602	0.60	0.37L
H40C4	1.345	0.60	0.45L



รูปที่ ง-2 สภาวะความปั่นป่วนของคลื่นหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ
กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.30 เมตร (จมน้ำ 0.10 เมตร)



รูปที่ 3 ตัวอย่างสภาวะความปั่นป่วนของคลื่นหลังเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ
กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.35 เมตร (จมน้ำ 0.05 เมตร)

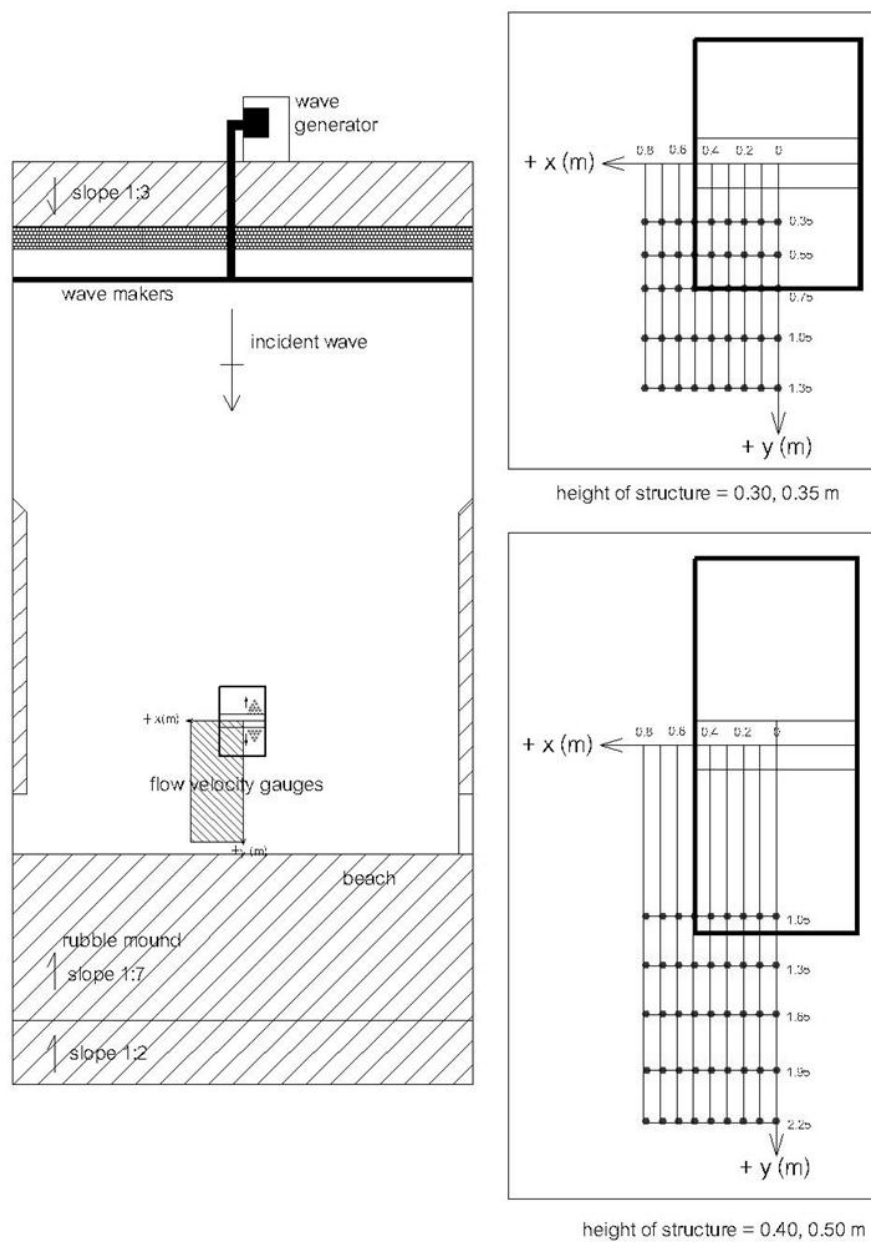


รูปที่ ง-3 ตัวอย่างสภาวะความปั่นป่วนของคลื่นหลังเขื่อนกันคลื่นได้นำ
กรณีความสูงโครงสร้าง เท่ากับ 0.40 เมตร (ระดับน้ำนิ่ง)

ภาคผนวก จ

ผลการทดลองของความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น

เนื้อหาส่วนนี้จะแสดงผลการทดลองของความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น ของแกน x และ y จากการทดลองทั้งสิ้น 16 กรณี โดยมีตัวแปรที่สนใจ ได้แก่ ขนาดโครงสร้าง และคุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง มีรายละเอียดดังตารางที่ ง-1 และมีการกำหนดตำแหน่งการเก็บข้อมูลคลื่นดังรูป จ-1



รูปที่ จ-1 ตำแหน่งการเก็บข้อมูลเครื่องมือวัดความเร็วคลื่น

ตารางที่ จ-1 ข้อมูลความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น ของแกน x และ y กรณี H30C1

y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)	y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)
0.35	0.8	0.041	0.041	0.75	0.3	0.045	0.045
0.35	0.7	0.041	0.041	0.75	0.2	-0.035	0.045
0.35	0.6	-0.041	0.041	0.75	0.1	-0.045	0.065
0.35	0.5	-0.041	-0.041	0.75	0	0.075	0.025
0.35	0.4	-0.041	0.041	1.05	0.8	0.045	0.045
0.35	0.3	-0.041	0.041	1.05	0.7	0.025	0.045
0.35	0.2	0.041	0.041	1.05	0.6	0.045	0.025
0.35	0.1	0.041	0.041	1.05	0.5	0.035	0.045
0.35	0	0.091	0.004	1.05	0.4	0.045	0.035
0.55	0.8	0.041	0.061	1.05	0.3	-0.045	0.045
0.55	0.7	0.031	0.041	1.05	0.2	0.012	0.055
0.55	0.6	-0.041	0.051	1.05	0.1	0.052	0.035
0.55	0.5	-0.031	0.041	1.05	0	0.116	0.045
0.55	0.4	-0.041	0.041	1.35	0.8	0.075	0.026
0.55	0.3	0.041	0.041	1.35	0.7	0.045	0.035
0.55	0.2	0.004	0.051	1.35	0.6	0.035	0.036
0.55	0.1	-0.004	0.071	1.35	0.5	0.045	0.051
0.55	0	0.151	0.025	1.35	0.4	0.025	0.055
0.75	0.8	0.045	0.055	1.35	0.3	0.081	0.067
0.75	0.7	-0.045	0.065	1.35	0.2	0.081	0.047
0.75	0.6	0.035	0.055	1.35	0.1	0.069	0.057
0.75	0.5	0.045	0.045	1.35	0	0.057	0.037
0.75	0.4	0.045	0.045				

หมายเหตุ : กรณี H30C1 ความสูงคลื่น เท่ากับ 2.181 เซนติเมตร
ความยาวคลื่น เท่ากับ 119.54 เซนติเมตร

ตารางที่ จ-2 ข้อมูลความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น ของแกน x และ y กรณี H30C2

y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)	y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)
0.35	0.8	0.041	0.041	0.75	0.3	0.045	0.045
0.35	0.7	0.041	0.041	0.75	0.2	-0.035	0.045
0.35	0.6	-0.041	0.041	0.75	0.1	-0.045	0.065
0.35	0.5	-0.041	-0.041	0.75	0	0.075	0.005
0.35	0.4	-0.041	0.041	1.05	0.8	0.045	0.045
0.35	0.3	-0.041	0.041	1.05	0.7	0.025	0.045
0.35	0.2	0.041	0.041	1.05	0.6	0.045	0.025
0.35	0.1	0.041	0.041	1.05	0.5	0.035	0.045
0.35	0	0.111	0.004	1.05	0.4	0.045	0.035
0.55	0.8	0.041	0.061	1.05	0.3	-0.045	0.045
0.55	0.7	0.031	0.041	1.05	0.2	0.012	0.055
0.55	0.6	-0.041	0.051	1.05	0.1	0.052	0.035
0.55	0.5	-0.031	0.041	1.05	0	0.116	0.045
0.55	0.4	-0.041	0.041	1.35	0.8	0.045	0.045
0.55	0.3	0.041	0.041	1.35	0.7	0.045	0.041
0.55	0.2	0.004	0.051	1.35	0.6	0.045	0.045
0.55	0.1	-0.004	0.071	1.35	0.5	0.045	0.041
0.55	0	0.111	0.005	1.35	0.4	0.025	0.045
0.75	0.8	0.045	0.055	1.35	0.3	0.129	0.057
0.75	0.7	-0.045	0.065	1.35	0.2	0.109	0.037
0.75	0.6	0.035	0.055	1.35	0.1	0.129	0.047
0.75	0.5	0.045	0.045	1.35	0	0.057	0.057
0.75	0.4	0.045	0.045				

หมายเหตุ : กรณี H30C2 ความสูงคลื่น เท่ากับ 3.129 เซนติเมตร
ความยาวคลื่น เท่ากับ 133.01 เซนติเมตร

ตารางที่ จ-3 ข้อมูลความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น ของแกน x และ y กรณี H30C3

y (m)	x (m)	V_y (cm/s)	V_x (cm/s)	y (m)	x (m)	V_y (cm/s)	V_x (cm/s)
0.35	0.8	0.005	0.085	0.75	0.3	0.045	0.045
0.35	0.7	0.025	0.075	0.75	0.2	-0.045	0.045
0.35	0.6	0.045	0.045	0.75	0.1	0.045	0.045
0.35	0.5	0.035	0.045	0.75	0	0.075	0.008
0.35	0.4	0.055	0.035	1.05	0.8	0.045	0.045
0.35	0.3	0.045	0.045	1.05	0.7	-0.045	0.045
0.35	0.2	0.045	0.045	1.05	0.6	-0.045	0.045
0.35	0.1	0.075	0.015	1.05	0.5	0.025	0.065
0.35	0	0.095	0.005	1.05	0.4	0.025	0.065
0.55	0.8	0.045	0.045	1.05	0.3	-0.045	0.045
0.55	0.7	0.045	0.035	1.05	0.2	0.045	0.045
0.55	0.6	0.045	0.045	1.05	0.1	0.117	0.045
0.55	0.5	0.045	0.015	1.05	0	0.065	0.011
0.55	0.4	0.015	0.065	1.35	0.8	0.015	0.065
0.55	0.3	0.045	0.075	1.35	0.7	0.025	0.055
0.55	0.2	0.045	0.045	1.35	0.6	0.035	0.041
0.55	0.1	0.045	0.045	1.35	0.5	0.065	0.055
0.55	0	0.075	0.008	1.35	0.4	0.045	0.045
0.75	0.8	0.045	0.045	1.35	0.3	0.045	0.045
0.75	0.7	-0.045	0.045	1.35	0.2	0.045	0.045
0.75	0.6	0.045	0.045	1.35	0.1	0.045	0.045
0.75	0.5	0.045	0.045	1.35	0	0.055	0.015
0.75	0.4	0.045	0.045				

หมายเหตุ : กรณี H30C3 ความสูงคลื่น เท่ากับ 4.155 เซนติเมตร
ความยาวคลื่น เท่ากับ 159.58 เซนติเมตร

ตารางที่ จ-4 ข้อมูลความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น ของแกน x และ y กรณี H30C4

y (m)	x (m)	V_y (cm/s)	V_x (cm/s)	y (m)	x (m)	V_y (cm/s)	V_x (cm/s)
0.35	0.8	-0.045	0.035	0.75	0.3	-0.045	0.045
0.35	0.7	-0.045	0.055	0.75	0.2	-0.045	0.045
0.35	0.6	-0.045	0.055	0.75	0.1	-0.045	0.045
0.35	0.5	-0.045	0.045	0.75	0	0.045	0.015
0.35	0.4	-0.045	0.04	1.05	0.8	0.025	0.045
0.35	0.3	0.045	0.085	1.05	0.7	0.035	0.045
0.35	0.2	0.065	0.045	1.05	0.6	0.045	0.045
0.35	0.1	0.045	0.045	1.05	0.5	-0.055	0.045
0.35	0	0.075	0.005	1.05	0.4	-0.035	0.045
0.55	0.8	-0.035	0.04	1.05	0.3	-0.045	0.045
0.55	0.7	-0.045	0.035	1.05	0.2	-0.045	0.045
0.55	0.6	-0.055	0.045	1.05	0.1	0.045	0.045
0.55	0.5	-0.045	0.035	1.05	0	0.045	0.015
0.55	0.4	-0.045	0.045	1.35	0.8	0.03	0.053
0.55	0.3	0.045	0.045	1.35	0.7	0.047	0.042
0.55	0.2	0.045	0.045	1.35	0.6	0.035	0.045
0.55	0.1	0.045	0.045	1.35	0.5	0.048	0.045
0.55	0	0.045	0.005	1.35	0.4	0.04	0.045
0.75	0.8	0.045	0.045	1.35	0.3	-0.045	0.045
0.75	0.7	0.045	0.045	1.35	0.2	0.045	0.045
0.75	0.6	0.045	0.045	1.35	0.1	-0.045	0.045
0.75	0.5	-0.045	0.045	1.35	0	0.045	0.015
0.75	0.4	0.045	0.045				

หมายเหตุ : กรณี H30C4 ความสูงคลื่น เท่ากับ 4.615 เซนติเมตร
ความยาวคลื่น เท่ากับ 133.59 เซนติเมตร

ตารางที่ จ-5 ข้อมูลความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น ของแกน x และ y กรณี H35C1

y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)	y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)
0.8	0.35	0.05	0.051	0.3	0.75	0.054	0.054
0.7	0.35	0.05	0.062	0.2	0.75	-0.025	0.054
0.6	0.35	-0.031	0.051	0.1	0.75	-0.035	0.074
0.5	0.35	-0.031	-0.031	0	0.75	0.084	0.035
0.4	0.35	-0.031	0.052	0.8	1.05	0.054	0.054
0.3	0.35	-0.031	0.057	0.7	1.05	0.035	0.054
0.2	0.35	0.053	0.053	0.6	1.05	0.054	0.035
0.1	0.35	0.051	0.054	0.5	1.05	0.044	0.054
0	0.35	0.099	0.014	0.4	1.05	0.054	0.044
0.8	0.55	0.053	0.071	0.3	1.05	-0.035	0.054
0.7	0.55	0.041	0.061	0.2	1.05	0.021	0.064
0.6	0.55	-0.031	0.061	0.1	1.05	0.062	0.044
0.5	0.55	-0.021	0.052	0	1.05	0.124	0.054
0.4	0.55	-0.031	0.055	0.8	1.35	0.084	0.035
0.3	0.55	0.053	0.055	0.7	1.35	0.054	0.054
0.2	0.55	0.014	0.066	0.6	1.35	0.044	0.045
0.1	0.55	0.006	0.083	0.5	1.35	0.054	0.059
0	0.55	0.158	0.035	0.4	1.35	0.035	0.064
0.8	0.75	0.054	0.064	0.3	1.35	0.089	0.075
0.7	0.75	0.035	0.094	0.2	1.35	0.089	0.055
0.6	0.75	0.044	0.064	0.1	1.35	0.078	0.065
0.5	0.75	0.054	0.054	0	1.35	0.065	0.046
0.4	0.75	0.054	0.054				

หมายเหตุ : กรณี H35C1 ความสูงคลื่น เท่ากับ 2.190 เซนติเมตร
ความยาวคลื่น เท่ากับ 118.45 เซนติเมตร

ตารางที่ จ-6 ข้อมูลความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น ของแกน x และ y กรณี H35C2

y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)	y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)
0.35	0.8	0.053	0.053	0.75	0.3	0.057	0.057
0.35	0.7	0.053	0.053	0.75	0.2	-0.023	0.057
0.35	0.6	-0.029	0.053	0.75	0.1	-0.033	0.077
0.35	0.5	-0.029	-0.029	0.75	0	0.087	0.017
0.35	0.4	-0.029	0.053	1.05	0.8	0.057	0.057
0.35	0.3	-0.029	0.053	1.05	0.7	0.037	0.057
0.35	0.2	0.053	0.053	1.05	0.6	0.057	0.037
0.35	0.1	0.053	0.053	1.05	0.5	0.047	0.057
0.35	0	0.123	0.016	1.05	0.4	0.057	0.047
0.55	0.8	0.053	0.073	1.05	0.3	-0.033	0.057
0.55	0.7	0.043	0.053	1.05	0.2	0.024	0.067
0.55	0.6	-0.029	0.063	1.05	0.1	0.064	0.047
0.55	0.5	-0.019	0.053	1.05	0	0.128	0.057
0.55	0.4	-0.029	0.053	1.35	0.8	0.057	0.057
0.55	0.3	0.053	0.053	1.35	0.7	0.057	0.052
0.55	0.2	0.016	0.063	1.35	0.6	0.057	0.057
0.55	0.1	0.008	0.083	1.35	0.5	0.057	0.052
0.55	0	0.123	0.017	1.35	0.4	0.037	0.057
0.75	0.8	0.057	0.067	1.35	0.3	0.141	0.069
0.75	0.7	-0.033	0.077	1.35	0.2	0.121	0.049
0.75	0.6	0.047	0.067	1.35	0.1	0.141	0.059
0.75	0.5	0.057	0.057	1.35	0	0.069	0.069
0.75	0.4	0.057	0.057				

หมายเหตุ : กรณี H35C2 ความสูงคลื่น เท่ากับ 3.192 เซนติเมตร
ความยาวคลื่น เท่ากับ 133.30 เซนติเมตร

ตารางที่ จ-7 ข้อมูลความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น ของแกน x และ y กรณี H35C3

y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)	y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)
0.8	0.35	0.023	0.106	0.3	0.75	0.064	0.066
0.7	0.35	0.043	0.096	0.2	0.75	-0.026	0.066
0.6	0.35	0.064	0.066	0.1	0.75	0.064	0.066
0.5	0.35	0.054	0.066	0	0.75	0.094	0.029
0.4	0.35	0.074	0.056	0.8	1.05	0.064	0.066
0.3	0.35	0.064	0.066	0.7	1.05	-0.026	0.066
0.2	0.35	0.064	0.066	0.6	1.05	-0.026	0.066
0.1	0.35	0.094	0.036	0.5	1.05	0.044	0.086
0	0.35	0.114	0.026	0.4	1.05	0.044	0.086
0.8	0.55	0.064	0.066	0.3	1.05	-0.026	0.066
0.7	0.55	0.064	0.056	0.2	1.05	0.064	0.066
0.6	0.55	0.064	0.066	0.1	1.05	0.135	0.066
0.5	0.55	0.064	0.036	0	1.05	0.084	0.032
0.4	0.55	0.034	0.086	0.8	1.35	0.034	0.086
0.3	0.55	0.064	0.096	0.7	1.35	0.044	0.076
0.2	0.55	0.064	0.066	0.6	1.35	0.054	0.061
0.1	0.55	0.064	0.066	0.5	1.35	0.084	0.076
0	0.55	0.094	0.029	0.4	1.35	0.064	0.066
0.8	0.75	0.064	0.066	0.3	1.35	0.064	0.066
0.7	0.75	-0.026	0.066	0.2	1.35	0.064	0.066
0.6	0.75	0.064	0.066	0.1	1.35	0.064	0.066
0.5	0.75	0.064	0.066	0	1.35	0.074	0.036
0.4	0.75	0.064	0.066				

หมายเหตุ : กรณี H35C3 ความสูงคลื่น เท่ากับ 4.120 เซนติเมตร
ความยาวคลื่น เท่ากับ 160.53 เซนติเมตร

ตารางที่ จ-8 ข้อมูลความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น ของแกน x และ y กรณี H35C4

y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)	y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)
0.35	0.8	-0.035	0.055	0.75	0.3	0.015	0.085
0.35	0.7	-0.035	0.075	0.75	0.2	0.015	0.085
0.35	0.6	-0.035	0.075	0.75	0.1	0.015	0.085
0.35	0.5	-0.035	0.065	0.75	0	0.105	0.055
0.35	0.4	-0.035	0.06	1.05	0.8	0.085	0.085
0.35	0.3	0.055	0.105	1.05	0.7	0.095	0.085
0.35	0.2	0.075	0.065	1.05	0.6	0.105	0.085
0.35	0.1	0.055	0.065	1.05	0.5	0.005	0.085
0.35	0	0.085	0.025	1.05	0.4	0.025	0.085
0.55	0.8	-0.025	0.06	1.05	0.3	0.015	0.085
0.55	0.7	-0.035	0.055	1.05	0.2	0.015	0.085
0.55	0.6	-0.045	0.065	1.05	0.1	0.105	0.085
0.55	0.5	-0.035	0.055	1.05	0	0.06	0.034
0.55	0.4	-0.035	0.065	1.35	0.8	0.045	0.068
0.55	0.3	0.055	0.065	1.35	0.7	0.062	0.057
0.55	0.2	0.055	0.065	1.35	0.6	0.052	0.062
0.55	0.1	0.105	0.085	1.35	0.5	0.063	0.062
0.55	0	0.105	0.045	1.35	0.4	0.055	0.067
0.75	0.8	0.105	0.085	1.35	0.3	-0.035	0.067
0.75	0.7	0.105	0.085	1.35	0.2	0.065	0.064
0.75	0.6	0.105	0.085	1.35	0.1	-0.034	0.061
0.75	0.5	0.015	0.085	1.35	0	0.065	0.032
0.75	0.4	0.105	0.085				

หมายเหตุ : กรณี H35C4 ความสูงคลื่น เท่ากับ 4.612 เซนติเมตร
ความยาวคลื่น เท่ากับ 133.30 เซนติเมตร

ตารางที่ จ-9 ข้อมูลความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น ของแกน x และ y กรณี H40C1

y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)	y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)
1.05	0.8	0.034	-0.062	1.65	0.3	0.022	-0.053
1.05	0.7	0.034	-0.052	1.65	0.2	0.023	-0.054
1.05	0.6	0.033	-0.046	1.65	0.1	0.025	-0.055
1.05	0.5	0.032	-0.041	1.65	0	0.025	-0.053
1.05	0.4	0.027	-0.04	1.95	0.8	0.03	0.061
1.05	0.3	0.023	-0.041	1.95	0.7	0.022	0.053
1.05	0.2	-0.02	-0.043	1.95	0.6	0.02	0.052
1.05	0.1	0.021	-0.043	1.95	0.5	0.019	0.048
1.05	0	-0.027	-0.033	1.95	0.4	0.022	0.049
1.35	0.8	0.019	0.043	1.95	0.3	0.022	-0.051
1.35	0.7	0.03	-0.059	1.95	0.2	0.026	-0.054
1.35	0.6	0.035	-0.052	1.95	0.1	0.023	-0.06
1.35	0.5	0.036	-0.049	1.95	0	0.016	-0.061
1.35	0.4	0.034	-0.045	2.25	0.8	-0.02	0.043
1.35	0.3	0.032	-0.046	2.25	0.7	0.021	0.042
1.35	0.2	0.026	-0.049	2.25	0.6	0.023	0.043
1.35	0.1	0.026	-0.057	2.25	0.5	0.025	0.046
1.35	0	0.026	-0.057	2.25	0.4	0.024	0.052
1.65	0.8	0.03	0.056	2.25	0.3	0.022	0.054
1.65	0.7	0.033	0.051	2.25	0.2	0.022	0.054
1.65	0.6	0.032	-0.052	2.25	0.1	0.015	-0.061
1.65	0.5	0.03	-0.05	2.25	0	0.015	-0.063
1.65	0.4	0.025	-0.051				

หมายเหตุ : กรณี H40C1 ความสูงคลื่น เท่ากับ 2.211 เซนติเมตร
ความยาวคลื่น เท่ากับ 119.54 เซนติเมตร

ตารางที่ จ-10 ข้อมูลความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น ของแกน x และ y กรณี H40C2

y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)	y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)
1.05	0.8	0.024	0.076	1.65	0.3	0.032	-0.053
1.05	0.7	0.031	0.088	1.65	0.2	0.028	-0.057
1.05	0.6	0.036	0.077	1.65	0.1	0.026	-0.061
1.05	0.5	0.04	-0.063	1.65	0	0.025	-0.063
1.05	0.4	0.04	-0.054	1.95	0.8	0.023	0.052
1.05	0.3	0.038	-0.046	1.95	0.7	0.022	0.051
1.05	0.2	0.033	-0.045	1.95	0.6	-0.025	-0.053
1.05	0.1	0.027	-0.046	1.95	0.5	-0.027	-0.055
1.05	0	0.02	-0.05	1.95	0.4	0.029	-0.063
1.35	0.8	0.042	0.054	1.95	0.3	0.031	-0.065
1.35	0.7	0.042	0.052	1.95	0.2	0.033	-0.069
1.35	0.6	0.042	0.048	1.95	0.1	0.03	-0.073
1.35	0.5	0.037	-0.05	1.95	0	0.019	-0.072
1.35	0.4	0.031	-0.051	2.25	0.8	-0.035	0.064
1.35	0.3	0.023	-0.055	2.25	0.7	-0.024	0.054
1.35	0.2	0.021	-0.057	2.25	0.6	-0.025	0.052
1.35	0.1	0.019	-0.056	2.25	0.5	-0.026	0.051
1.35	0	0.028	-0.052	2.25	0.4	-0.026	-0.054
1.65	0.8	0.024	0.059	2.25	0.3	-0.026	-0.057
1.65	0.7	0.033	-0.072	2.25	0.2	-0.026	-0.061
1.65	0.6	0.036	-0.064	2.25	0.1	0.023	-0.066
1.65	0.5	0.036	-0.059	2.25	0	-0.022	-0.071
1.65	0.4	0.036	-0.057				

หมายเหตุ : กรณี H40C2 ความสูงคลื่น เท่ากับ 3.092 เซนติเมตร
ความยาวคลื่น เท่ากับ 133.88 เซนติเมตร

ตารางที่ จ-11 ข้อมูลความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น ของแกน x และ y กรณี H40C3

y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)	y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)
1.05	0.8	0.047	-0.085	1.65	0.3	0.021	-0.098
1.05	0.7	0.054	-0.075	1.65	0.2	0.024	-0.105
1.05	0.6	0.051	-0.07	1.65	0.1	0.021	-0.104
1.05	0.5	0.051	-0.068	1.65	0	0.028	-0.095
1.05	0.4	0.046	-0.067	1.95	0.8	0.052	-0.071
1.05	0.3	0.037	-0.072	1.95	0.7	0.043	-0.071
1.05	0.2	0.026	-0.073	1.95	0.6	0.043	-0.072
1.05	0.1	0.021	-0.072	1.95	0.5	-0.037	-0.077
1.05	0	0.043	-0.063	1.95	0.4	0.034	-0.081
1.35	0.8	0.028	-0.074	1.95	0.3	-0.025	-0.087
1.35	0.7	0.036	-0.065	1.95	0.2	0.034	-0.091
1.35	0.6	0.036	-0.065	1.95	0.1	-0.018	-0.093
1.35	0.5	0.032	-0.063	1.95	0	0.018	-0.093
1.35	0.4	0.032	-0.067	2.25	0.8	-0.027	-0.077
1.35	0.3	0.027	-0.072	2.25	0.7	-0.025	-0.081
1.35	0.2	0.027	-0.079	2.25	0.6	-0.025	-0.091
1.35	0.1	-0.023	-0.085	2.25	0.5	-0.023	-0.095
1.35	0	0.022	-0.087	2.25	0.4	-0.023	-0.098
1.65	0.8	0.048	-0.071	2.25	0.3	-0.023	-0.121
1.65	0.7	0.041	-0.073	2.25	0.2	0.023	-0.099
1.65	0.6	0.033	-0.084	2.25	0.1	0.027	-0.099
1.65	0.5	-0.028	-0.087	2.25	0	0.034	-0.092
1.65	0.4	0.023	-0.092				

หมายเหตุ : กรณี H40C3 ความสูงคลื่น เท่ากับ 4.151 เซนติเมตร
ความยาวคลื่น เท่ากับ 160.22 เซนติเมตร

ตารางที่ จ-12 ข้อมูลความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น ของแกน x และ y กรณี H40C4

y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)	y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)
1.05	0.8	0.047	-0.085	1.65	0.3	0.02	-0.098
1.05	0.7	0.05	-0.075	1.65	0.2	0.02	-0.105
1.05	0.6	0.051	-0.071	1.65	0.1	0.021	-0.104
1.05	0.5	0.05	-0.068	1.65	0	0.028	-0.095
1.05	0.4	0.046	-0.067	1.95	0.8	0.052	-0.071
1.05	0.3	0.037	-0.072	1.95	0.7	0.043	-0.071
1.05	0.2	0.026	-0.073	1.95	0.6	0.043	-0.072
1.05	0.1	0.021	-0.071	1.95	0.5	-0.037	-0.077
1.05	0	0.043	-0.063	1.95	0.4	0.034	-0.08
1.35	0.8	0.028	-0.074	1.95	0.3	-0.025	-0.087
1.35	0.7	0.036	-0.065	1.95	0.2	0.034	-0.09
1.35	0.6	0.036	-0.065	1.95	0.1	-0.018	-0.093
1.35	0.5	0.032	-0.063	1.95	0	0.018	-0.093
1.35	0.4	0.03	-0.067	2.25	0.8	-0.027	-0.077
1.35	0.3	0.027	-0.072	2.25	0.7	-0.025	-0.081
1.35	0.2	0.027	-0.079	2.25	0.6	-0.025	-0.091
1.35	0.1	-0.023	-0.085	2.25	0.5	-0.023	-0.095
1.35	0	0.02	-0.087	2.25	0.4	-0.023	-0.098
1.65	0.8	0.048	-0.071	2.25	0.3	-0.023	-0.112
1.65	0.7	0.041	-0.073	2.25	0.2	0.023	-0.099
1.65	0.6	0.033	-0.084	2.25	0.1	0.027	-0.099
1.65	0.5	-0.028	-0.087	2.25	0	0.034	-0.092
1.65	0.4	0.023	-0.092				

หมายเหตุ : กรณี H40C4 ความสูงคลื่น เท่ากับ 4.699 เซนติเมตร
ความยาวคลื่น เท่ากับ 134.46 เซนติเมตร

ตารางที่ จ-13 ข้อมูลความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น ของแกน x และ y กรณี H50C

y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)	y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)
1.05	0.8	0.034	-0.062	1.65	0.3	0.022	-0.053
1.05	0.7	0.034	-0.052	1.65	0.2	0.023	-0.054
1.05	0.6	0.033	-0.046	1.65	0.1	0.025	-0.055
1.05	0.5	0.032	-0.041	1.65	0	0.025	-0.053
1.05	0.4	0.027	-0.04	1.95	0.8	0.031	0.061
1.05	0.3	0.023	-0.041	1.95	0.7	0.022	0.053
1.05	0.2	-0.021	-0.043	1.95	0.6	0.021	0.052
1.05	0.1	0.021	-0.043	1.95	0.5	0.019	0.048
1.05	0	-0.027	-0.033	1.95	0.4	0.022	0.049
1.35	0.8	0.019	0.043	1.95	0.3	0.022	-0.051
1.35	0.7	0.031	-0.059	1.95	0.2	0.026	-0.054
1.35	0.6	0.035	-0.052	1.95	0.1	0.023	-0.061
1.35	0.5	0.036	-0.049	1.95	0	0.016	-0.061
1.35	0.4	0.034	-0.045	2.25	0.8	-0.02	0.043
1.35	0.3	0.032	-0.046	2.25	0.7	0.021	0.042
1.35	0.2	0.026	-0.049	2.25	0.6	0.023	0.043
1.35	0.1	0.026	-0.057	2.25	0.5	0.025	0.046
1.35	0	0.026	-0.057	2.25	0.4	0.024	0.052
1.65	0.8	0.03	0.056	2.25	0.3	0.022	0.054
1.65	0.7	0.033	0.051	2.25	0.2	0.022	0.054
1.65	0.6	0.032	-0.052	2.25	0.1	0.015	-0.061
1.65	0.5	0.031	-0.05	2.25	0	0.015	-0.063
1.65	0.4	0.025	-0.051				

หมายเหตุ : กรณี H50C1 ความสูงคลื่น เท่ากับ 2.205 เซนติเมตร
ความยาวคลื่น เท่ากับ 118.99 เซนติเมตร

ตารางที่ จ-14 ข้อมูลความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น ของแกน x และ y กรณี H50C2

y (m)	x (m)	V_y (cm/s)	V_x (cm/s)	y (m)	x (m)	V_y (cm/s)	V_x (cm/s)
1.05	0.8	0.024	0.076	1.65	0.3	0.032	-0.053
1.05	0.7	0.031	0.088	1.65	0.2	0.028	-0.057
1.05	0.6	0.036	0.077	1.65	0.1	0.026	-0.061
1.05	0.5	0.042	-0.063	1.65	0	0.025	-0.063
1.05	0.4	0.044	-0.054	1.95	0.8	0.023	0.052
1.05	0.3	0.038	-0.046	1.95	0.7	0.022	0.051
1.05	0.2	0.033	-0.045	1.95	0.6	-0.025	-0.053
1.05	0.1	0.027	-0.046	1.95	0.5	-0.027	-0.055
1.05	0	0.021	-0.051	1.95	0.4	0.029	-0.061
1.35	0.8	0.042	0.054	1.95	0.3	0.031	-0.065
1.35	0.7	0.042	0.052	1.95	0.2	0.033	-0.069
1.35	0.6	0.042	0.048	1.95	0.1	0.03	-0.073
1.35	0.5	0.037	-0.05	1.95	0	0.019	-0.072
1.35	0.4	0.031	-0.051	2.25	0.8	-0.035	0.064
1.35	0.3	0.023	-0.055	2.25	0.7	-0.024	0.054
1.35	0.2	0.021	-0.057	2.25	0.6	-0.025	0.052
1.35	0.1	0.019	-0.056	2.25	0.5	-0.026	0.051
1.35	0	0.028	-0.05	2.25	0.4	-0.026	-0.054
1.65	0.8	0.024	0.059	2.25	0.3	-0.026	-0.057
1.65	0.7	0.033	-0.072	2.25	0.2	-0.026	-0.061
1.65	0.6	0.036	-0.064	2.25	0.1	0.023	-0.066
1.65	0.5	0.036	-0.059	2.25	0	-0.022	-0.071
1.65	0.4	0.036	-0.057				

หมายเหตุ : กรณี H50C2 ความสูงคลื่น เท่ากับ 3.121 เซนติเมตร
ความยาวคลื่น เท่ากับ 133.59 เซนติเมตร

ตารางที่ จ-15 ข้อมูลความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น ของแกน x และ y กรณี H50C3

y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)	y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)
1.05	0.8	0.047	-0.085	1.65	0.3	0.02	-0.098
1.05	0.7	0.05	-0.075	1.65	0.2	0.02	-0.105
1.05	0.6	0.051	-0.071	1.65	0.1	0.021	-0.104
1.05	0.5	0.05	-0.068	1.65	0	0.028	-0.095
1.05	0.4	0.046	-0.067	1.95	0.8	0.052	-0.071
1.05	0.3	0.037	-0.072	1.95	0.7	0.043	-0.071
1.05	0.2	0.026	-0.073	1.95	0.6	0.043	-0.072
1.05	0.1	0.021	-0.071	1.95	0.5	-0.037	-0.077
1.05	0	0.043	-0.063	1.95	0.4	0.034	-0.082
1.35	0.8	0.028	-0.074	1.95	0.3	-0.025	-0.087
1.35	0.7	0.036	-0.065	1.95	0.2	0.034	-0.09
1.35	0.6	0.036	-0.065	1.95	0.1	-0.018	-0.093
1.35	0.5	0.032	-0.063	1.95	0	0.018	-0.093
1.35	0.4	0.03	-0.067	2.25	0.8	-0.027	-0.077
1.35	0.3	0.027	-0.072	2.25	0.7	-0.025	-0.081
1.35	0.2	0.027	-0.079	2.25	0.6	-0.025	-0.09
1.35	0.1	-0.023	-0.085	2.25	0.5	-0.023	-0.095
1.35	0	0.02	-0.087	2.25	0.4	-0.023	-0.098
1.65	0.8	0.048	-0.071	2.25	0.3	-0.02	-0.112
1.65	0.7	0.041	-0.073	2.25	0.2	0.02	-0.117
1.65	0.6	0.033	-0.084	2.25	0.1	0.03	-0.131
1.65	0.5	-0.028	-0.087	2.25	0	0.03	-0.09
1.65	0.4	0.023	-0.092				

หมายเหตุ : กรณี H50C3 ความสูงคลื่น เท่ากับ 4.155 เซนติเมตร
ความยาวคลื่น เท่ากับ 159.58 เซนติเมตร

ตารางที่ จ-16 ข้อมูลความเร็วการไหลเฉลี่ยตามคาบคลื่น ของแกน x และ y กรณี H50C4

y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)	y (m)	x (m)	V _y (cm/s)	V _x (cm/s)
1.05	0.8	0.004	-0.112	1.65	0.3	0.05	-0.063
1.05	0.7	0.043	-0.095	1.65	0.2	0.046	-0.074
1.05	0.6	0.046	-0.083	1.65	0.1	0.039	-0.083
1.05	0.5	0.047	-0.074	1.65	0	0.028	-0.091
1.05	0.4	0.045	-0.068	1.95	0.8	0.039	0.051
1.05	0.3	0.042	-0.062	1.95	0.7	0.043	0.047
1.05	0.2	0.038	-0.061	1.95	0.6	0.045	-0.049
1.05	0.1	0.032	-0.063	1.95	0.5	0.043	-0.057
1.05	0	0.025	-0.068	1.95	0.4	0.038	-0.064
1.35	0.8	0.039	-0.062	1.95	0.3	0.032	-0.074
1.35	0.7	0.037	-0.052	1.95	0.2	0.026	-0.083
1.35	0.6	0.035	-0.047	1.95	0.1	0.026	-0.089
1.35	0.5	0.033	-0.047	1.95	0	0.026	-0.095
1.35	0.4	0.031	-0.052	2.25	0.8	0.034	0.047
1.35	0.3	0.03	-0.058	2.25	0.7	0.033	0.041
1.35	0.2	0.025	-0.066	2.25	0.6	0.034	0.047
1.35	0.1	0.021	-0.074	2.25	0.5	0.036	0.052
1.35	0	0.021	-0.076	2.25	0.4	0.036	-0.053
1.65	0.8	0.034	0.059	2.25	0.3	0.035	-0.063
1.65	0.7	0.026	-0.072	2.25	0.2	0.031	-0.074
1.65	0.6	0.041	-0.062	2.25	0.1	-0.025	-0.085
1.65	0.5	0.046	-0.057	2.25	0	0.019	-0.095
1.65	0.4	0.048	-0.057				

หมายเหตุ : กรณี H50C4 ความสูงคลื่น เท่ากับ 4.612 เซนติเมตร
ความยาวคลื่น เท่ากับ 134.46 เซนติเมตร

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

- ชื่อ-นามสกุล** นายสุวีร์ ศรียี่สุน
- เกิดวันที่** 20 สิงหาคม 2530 ที่จังหวัดนครสวรรค์
- การศึกษา** พ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.โยธา)
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- พ.ศ. 2552 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ประสบการณ์** พ.ศ. 2552-2554 ได้รับทุนผู้ช่วยสอน ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย