

ความสูงคลื่นที่ผ่านช่องว่างระหว่างโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นได้น้ำ



นายธีรนนท์ ปันใจลือ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

WAVE HEIGHT THROUGH GAP OF SUBMERGED BREAKWATER

Mr. Theeranan Panjailue



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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ความสูงคลื่นที่ผ่านช่องว่างระหว่างโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น
ใต้น้ำ

โดย

นายธีรนนท์ ปันใจลือ

สาขาวิชา

วิศวกรรมแหล่งน้ำ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. เสรี จันทโรยธา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ทวนทัน กิจไพศาลสกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธรรมบุญ รัศมีมาสเมือง)

ธีรพันธ์ ปันใจลือ : ความสูงคลื่นที่ผ่านช่องว่างระหว่างโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ (WAVE HEIGHT THROUGH GAP OF SUBMERGED BREAKWATER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. อนุรักษ์ ศรี อริยวัฒน์, 144 หน้า.

ในปัจจุบันเชื่อมกันคลื่นได้รับความนิยมในการป้องกันการกัดเซาะแนวชายฝั่งในประเทศไทยโดยเฉพาะ อ่าวไทยตอนบน เมื่อเวลาผ่านไปโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นพ่นน้ำที่วางอยู่บนพื้นดินอ่อนตัวต้น มีการทรุดตัวลง รวมทั้ง การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำจากน้ำขึ้น-น้ำลง ทำให้สันเขื่อนจมใต้น้ำทำให้เชื่อมกันคลื่นพ่นน้ำกลายเป็นเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ ดังนั้นการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาพฤติกรรมคลื่นที่ผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนพ่นน้ำและเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำด้วยแบบจำลองกายภาพ ทำการจำลองโดยคลื่นสมำเสมอที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงฉากกับเชื่อมกันคลื่นในอ่างจำลองคลื่นและทำการเปลี่ยนตัวแปรคุณสมบัติคลื่นและลักษณะโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น รวมกรณีศึกษาทั้งหมด 36 กรณีศึกษา ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ระดับน้ำนิ่ง, ความชันคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะโครงสร้าง และระยะห่างช่องว่างระหว่างโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น การศึกษาทำการวัดความคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะโครงสร้างกับคลื่นเคลื่อนที่ผ่านเชื่อมกันคลื่นในช่วงเวลาเดียวกัน ทำการหาความสูงคลื่นนัยสำคัญด้วยวิธีทางสถิติ นำความสูงคลื่นนัยสำคัญสร้างเส้นชั้นของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในพื้นที่ด้านหลังเชื่อมกันคลื่น เพื่อใช้ในการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นในการศึกษาครั้งนี้

ผลการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีความสัมพันธ์กับความชันคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะ(H/L), อัตราส่วนระหว่างระยะห่างช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นกับความยาวคลื่น (B/L) และอัตราส่วนระหว่างความลึกน้ำเหนือสันเชื่อมกันคลื่นกับความสูงคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะ (R_c/H) ในกรณีเชื่อมกันคลื่นพ่นน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การความสัมพันธ์ส่งผ่านคลื่นจะแปรผันตรงกับค่า B/L แต่จะแปรผกผันกับค่า H/L และ R_c/H โดยมีความสัมพันธ์เหมือนกันในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นและพื้นที่อับคลื่น ในกรณีเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นจะแปรผันตรงกับค่า H/L และ R_c/H แต่จะแปรผกผันกับค่า B/L ส่วนในพื้นที่อับคลื่นมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นจะแปรผันตรงกับตัวแปรที่ศึกษาทั้งสามตัวแปร เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของคลื่นในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น พบว่า ในกรณีเชื่อมกันคลื่นพ่นน้ำ คลื่นจะส่งผ่านและกระจายตัวจากพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นเข้าสู่พื้นที่อับคลื่น แต่ในเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำ คลื่นจะส่งผ่านและกระจายตัวจากพื้นที่อับเข้าสู่คลื่นพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น

ภาควิชา วิศวกรรมแหล่งน้ำ

สาขาวิชา วิศวกรรมแหล่งน้ำ

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5670230421 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS: WAVE BEHAVIOR / SUBMERGED BREAKWATER / WAVE TRANSMISSION COEFFICIENT / TRANSMISSION OF WAVES / GAP OF BREAKWATER

THEERANAN PANJAILUE: WAVE HEIGHT THROUGH GAP OF SUBMERGED BREAKWATER.
ADVISOR: ASST. PROF. ANURAK SRIARIYAWAT, Ph.D., 144 pp.

Breakwaters have been commonly used for coastal protection in Thailand. Since the upper Gulf of Thailand had very poor foundations, breakwaters were slowly sunk down into the ground after the construction finished. With this situation concurrent with the tidal, waves passing through these breakwaters changed their actions back and forth between emerged and submerged breakwaters. Therefore, this study aimed to investigate the transmission waves when they passed through the emerged and submerged structures. This study conducted a gap between two rubble mound breakwaters to test in the wave basin under the varied regular wave conditions and characteristics of structures. Direction of wave were perpendicular breakwater. Total of 36 cases were tested in this study. Three main variables were still water level, incident wave steepness and size of gap of breakwater. In this study incident and transmission waves were measured at the same time, then the significant wave heights were analyzed by using the wave train method. The ratio between transmission and incident significant wave heights were used to develop the contour of wave transmission coefficient for further wave behavior explanation.

The result showed that the wave transmission coefficients had a relationship with incident wave steepness (H_i/L), ratio between gap of breakwater and incident wave length (B/L), and ratio between water depths over structure crest and incident wave height (R_c/H_i). For emerged breakwaters wave transmission coefficients were agreed with B/L , whereas they inversed with H_i/L and R_c/H_i in both gap and shadow zones. For submerged breakwaters wave transmission coefficients in gap zone had direct relationship with H_i/L and R_c/H_i , but they had inversed variation with B/L . For the wave transmission coefficients in shadow zone, they had direct variation with all those parameters. Considering the effect of wave transmission and diffraction in the perpendicular axis of wave direction, the result showed that wave transmitted and diffracted from gap zone to shadow zone for emerged breakwater while these wave behaviors acted vice versa for submerged breakwater.

Department: Water Resources Engineering Student's Signature

Field of Study: Water Resources Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ ท่านรองศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทรโยธา ท่านรองศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล และท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนุญ รัชมีมาส เมือง ที่ได้กรุณาสละเวลาในการให้คำแนะนำ และตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์ อย่างยิ่ง ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ตลอดระยะเวลา 4 ปีที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆทั้งในทางวิชาการ การดำเนินชีวิต คอยเตือนสติ และอดทนสั่งสอนข้าพเจ้าตลอดเวลา ทำให้ข้าพเจ้าพัฒนาตนเองทั้งทางวิชาการและการดำเนินชีวิตประจำวัน จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ทั้งนี้ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาและอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาการศึกษา

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนบางส่วนเพื่อใช้ในการทำวิจัย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนการศึกษา สถานที่ทำงานวิจัยตลอดจนเครื่องมือในการทำการงานวิจัย ทำให้การดำเนินงานวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยช่วยเหลือสนับสนุนและอำนวยความสะดวกขณะทำงานวิจัย

ข้าพเจ้าขอขอบคุณการช่วยเหลือด้านแรงกายแรงใจของเพื่อน ตั๊ก เปรี้ยว จี๊ว บুম แมน แบงค์ หนุ่ย ใจ น้องมะนาวจนทำให้งานวิจัยสามารถเริ่มต้นและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณพี่น้องชาวแหล่งน้ำและบุคคลท่านอื่นๆที่มีได้กล่าวนาม ณ ที่นี้ซึ่งมีส่วนทำให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยและคำปรึกษาต่างๆ จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบคุณพระคุณ บิดา มารดา ป้า ลุง ญาติพี่น้องและครอบครัวของข้าพเจ้าที่คอยสนับสนุนเงินทุนให้สำหรับการศึกษา ตลอดจนความรัก ความเอาใจใส่ และคำปรึกษา เพื่อสนับสนุนการศึกษาครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ประโยชน์อันใดที่ก่อให้เกิดกุศลจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอมอบอุทิศให้แด่พ่อ แม่ ครู อาจารย์ ป้า ลุง เพื่อน และผู้มีพระคุณต่อข้าพเจ้าทั้งหลาย

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ฅ |
| สารบัญรูป..... | ฉ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์..... | 3 |
| 1.3 ขอบข่ายการศึกษา..... | 4 |
| 1.4 การดำเนินการศึกษาและระยะเวลาที่ใช้..... | 4 |
| บทที่ 2 หลักการและการศึกษาที่ผ่านมา..... | 6 |
| 2.1 กลศาสตร์ของคลื่น..... | 6 |
| 2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของคลื่น..... | 6 |
| 2.1.2 การบรรยายลักษณะของคลื่นทางคณิตศาสตร์..... | 8 |
| 2.2 การเปลี่ยนแปลงของคลื่น..... | 10 |
| 2.2.1 การเคลื่อนที่ของคลื่นเข้าสู่หน้าตั้ง..... | 11 |
| 2.2.2 การหักเหของคลื่น..... | 11 |
| 2.2.3 การสะท้อนของคลื่น..... | 12 |
| 2.2.4 การกระจายของคลื่น..... | 12 |
| 2.2.5 การแตกตัวของคลื่น..... | 14 |
| 2.3 การศึกษาที่ผ่านมาของการส่งผ่านของคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นพื่นน้ำและใต้น้ำ..... | 15 |

| | |
|--|----|
| 2.3.1 การส่งผ่านคลื่นของเชือกกันคลื่นพื้นน้ำและใต้น้ำแบบหินทิ้ง..... | 16 |
| 2.3.2 การส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเชือกกันคลื่น..... | 20 |
| บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย | 23 |
| 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในงานวิจัย..... | 23 |
| 3.1.1 อย่างจำลองคลื่นและระบบเครื่องกำเนิดคลื่น..... | 23 |
| 3.1.2 เครื่องมือเก็บข้อมูลคลื่นและกระแสน้ำ | 25 |
| 3.2 ปรับเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองที่ใช้..... | 25 |
| 3.3 แบบจำลองของเชือกกันคลื่น | 26 |
| 3.3.1 ตัวแปรคุณสมบัติคลื่น | 26 |
| 3.3.2 การออกแบบเชือกกันคลื่น..... | 26 |
| 3.4 ออกแบบการทดลองและทำการเก็บข้อมูลแบบจำลอง | 28 |
| 3.4.1 การออกแบบการทดลอง | 28 |
| 3.4.2 การเก็บข้อมูลการจำลอง | 32 |
| 3.5 วิธีการดำเนินการทดลอง..... | 35 |
| 3.5.1 การเตรียมก่อนดำเนินงานทดลอง..... | 35 |
| 3.5.2 การดำเนินการทดลอง | 35 |
| บทที่ 4 พฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่น | 36 |
| 4.1 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่น | 36 |
| 4.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม | 36 |
| 4.1.2 วิธีการหาความสูงคลื่นนัยสำคัญ คาบคลื่น และความยาวคลื่น..... | 37 |
| 4.2 ผลการศึกษา | 39 |
| 4.3 การเปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมา | 48 |
| 4.4 อิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ศึกษาต่อการส่งผ่านคลื่น | 50 |

| | | |
|---------|---|----|
| 4.4.1 | อิทธิพลของการเปลี่ยนระดับน้ำนิ่ง | 50 |
| 4.4.2 | อิทธิพลของการเปลี่ยนความชันคลื่น | 51 |
| 4.4.3 | อิทธิพลค่าอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่น | 51 |
| 4.5 | การวิเคราะห์ตัวแปรไร้หน่วย | 52 |
| 4.6 | การวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การส่งผ่านคลื่นรวม | 53 |
| 4.6.1 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยกับกลุ่มตัวแปร ค่าคงที่ | 54 |
| 4.6.2 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับความชันคลื่น | 58 |
| 4.6.3 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับอัตราส่วนระหว่าง ระยะห่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่น | 61 |
| 4.6.4 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับอัตราส่วนระหว่างความ ลึกน้ำเหนือสันเขื่อนกันคลื่นกับความสูงคลื่นวิ่งเข้าปะทะโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น | 63 |
| 4.7 | การวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับตัวแปรไร้หน่วย | 65 |
| 4.7.1 | สมการความสัมพันธ์ในกรณีเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ | 66 |
| 4.7.2 | สมการความสัมพันธ์ในกรณีเขื่อนกันคลื่นปริ่มน้ำ | 68 |
| 4.7.3 | สมการความสัมพันธ์ในกรณีเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ | 69 |
| 4.7.4 | สรุปการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ | 71 |
| 4.8 | พฤติกรรมการณ์การส่งผ่านคลื่นแนวขนานกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น | 72 |
| บทที่ 5 | สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 84 |
| 5 .1 | สรุปผลการศึกษา | 84 |
| 5.1.1 | พฤติกรรมการณ์การส่งผ่านคลื่น | 84 |
| 5.1.2 | ความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์การส่งผ่านคลื่นกับตัวแปรไร้หน่วย | 85 |
| 5.1.3 | การวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ | 87 |
| 5.1.4 | พฤติกรรมการณ์การส่งผ่านคลื่นแนวขนานกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น | 87 |

| | |
|--|-----|
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 88 |
| รายการอ้างอิง | 89 |
| ภาคผนวก..... | 92 |
| ภาคผนวก ก แบบจำลองทางกายภาพ | 93 |
| ภาคผนวก ข การเปรียบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้..... | 95 |
| ภาคผนวก ค ผลการทดลองของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม | 100 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ | 144 |



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติของคลื่นในช่วงความถี่ต่างๆ 10

ตารางที่ 2-2คุณสมบัติของตัวแปรของการส่งผ่านของคลื่น แบบจำลอง 2 มิติ เพื่อการวิเคราะห์
การส่งผ่านของคลื่น โดย van der Meer et al. (2005)..... 19

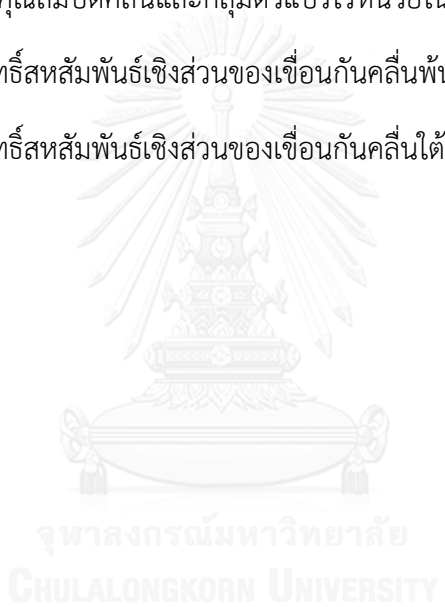
ตารางที่ 3-1 รายชื่อเงื่อนไขการศึกษา..... 31

ตารางที่ 4-1 รายละเอียดคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา..... 38

ตารางที่ 4-2 รายละเอียดคุณสมบัติคลื่นและกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยในแต่ละกรณีศึกษา 55

ตารางที่ 4-3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วนของเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ 67

ตารางที่ 4-4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วนของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ..... 70



สารบัญรูป

รูปที่ 2-1 พารามิเตอร์ของคลื่น 7

รูปที่ 2-2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคบริเวณน้ำตื้นและน้ำลึก 8

รูปที่ 2-3 การสะท้อนของคลื่น 12

รูปที่ 2-4 รูปคลื่นในพื้นที่ต่างๆในกรณีที่ไม่มีการกระจายตัวของคลื่น 13

รูปที่ 2-5 รูปคลื่นในพื้นที่ต่างๆในกรณีที่ไม่มีการกระจายตัวของคลื่น 13

รูปที่ 2-6 ความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของคลื่น 17

รูปที่ 2-7 ข้อมูลวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น โดย van der Meer et al. (2005) 19

รูปที่ 2-8 ความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของคลื่น 21

รูปที่ 2-9 ความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของคลื่น 22

รูปที่ 3-1 อ่างจำลองคลื่น 24

รูปที่ 3-2 ตัวอย่างแบบจำลองเชื่อมกันคลื่น 28

รูปที่ 3-3 ตัวแปรโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น 29

รูปที่ 3-4 การติดตั้งเชื่อมกันคลื่นในอ่างจำลองคลื่น 30

รูปที่ 4-1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นที่เก็บบริเวณด้านหน้าโครงสร้าง 38

รูปที่ 4-2 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมบริเวณด้านหลังเชื่อมกันคลื่น 40

รูปที่ 4-3 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำ 49

รูปที่ 4-4 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำ 49

รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับค่า D_{50}/H_i 57

รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับค่า B_s/H_i 58

รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับความชันคลื่น 59

รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม 62

| | |
|---|----|
| รูปที่ 4-9 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับอัตราส่วน R_c/H_i ของการศึกษาครั้งนี้ | 65 |
| รูปที่ 4-10 กราฟการกระจายข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ | 68 |
| รูปที่ 4-11 กราฟการกระจายข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นปริ่มน้ำ | 69 |
| รูปที่ 4-12 กราฟการกระจายข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ | 71 |
| รูปที่ 4-13 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเฉลี่ยแต่ละพิกัด x/L | 74 |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งทะเลในประเทศไทยโดยเฉพาะพื้นที่อ่าวไทยตอนบนเป็นปัญหาที่มีความความรุนแรงอย่างมาก ในพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ตามแนวชายฝั่งทะเลได้รับผลกระทบอย่างมากจากการกัดเซาะของชายฝั่ง มีการแก้ไขปัญหาของการกัดเซาะหลากหลายวิธีทั้งการใช้ภูมิปัญญาชาวบ้านและใช้โครงสร้างทางวิศวกรรม แต่ยังไม่อาจช่วยแก้ไขปัญหามากนัก

โครงสร้างวิศวกรรมที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายคือเขื่อนกันคลื่น ซึ่งมีอยู่หลากหลายชนิด เช่น เขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้ง เขื่อนกันคลื่นแบบคอนกรีต คลื่นกันแบบเสาเข็ม เป็นต้น โดยเขื่อนกันคลื่นจะทำหน้าที่ลดและกระจายพลังงานของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะในบริเวณลาดชันด้านหน้า โครงสร้างทำให้เกิดการแตกตัวของคลื่น อีกทั้งทำให้เกิดการเสียดทานของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านช่องว่างของวัสดุก่อสร้าง van der Meer et al. (2005) ทำให้คลื่นที่เข้าปะทะชายฝั่งมีพลังงานน้อยลงและลดความรุนแรงที่เข้าปะทะได้

เขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้งเป็นเขื่อนกันคลื่นที่นิยมใช้ในป้องกันการกัดเซาะชายฝั่งทะเล โดยเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เขื่อนกันคลื่นหินทิ้งแบบพ่นน้ำ (emerged rubble mound breakwater) และเขื่อนกันคลื่นหินทิ้งแบบใต้น้ำ (submerged rubble mound breakwater) โดยเขื่อนกันคลื่นหินทิ้งทั้งสองแบบมีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคลื่นที่ไม่เหมือนกัน

เขื่อนกันคลื่นหินทิ้งแบบพ่นน้ำ (emerged rubble mound breakwater) จะมีลักษณะของสันโครงสร้างอยู่สูงกว่าระดับน้ำและเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้เกิดการไหลข้ามสันของคลื่น โดยคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างจะปะทะโครงสร้างในบริเวณลาดชันด้านหน้าและถูกลดพลังงานลงเนื่องจากเกิดการแตกตัวของคลื่น (wave breaking) ในบริเวณลาดชันด้านหน้าของเขื่อนกันคลื่น แต่อย่างไรก็ตามเขื่อนกันคลื่นพ่นน้ำแบบหินทิ้งทำให้เกิดปัญหาตามมาหลายอย่าง เช่น หากคลื่นที่เข้าปะทะมีขนาดใหญ่ เมื่อคลื่นวิ่งเข้าปะทะด้านหน้าของเขื่อนกันคลื่นจะทำให้เกิดการปั่นป่วนอย่างรุนแรงบริเวณด้านหน้าของเขื่อนกันคลื่น จะเกิดการกัดเซาะบริเวณด้านหน้าเขื่อนกันคลื่น เป็นสาเหตุให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย อีกทั้งสันโครงสร้างที่อยู่พ่นน้ำจะทำให้เกิดการบดบังทัศนียภาพที่สวยงามของชายฝั่ง ทำให้ส่งผลกระทบต่อการท่องเที่ยวในหลายพื้นที่ เป็นต้น ในปัจจุบันมีการก่อสร้างเขื่อนกันคลื่นหินทิ้งแบบพ่นน้ำหลายแหล่งที่มีความสูงของสันโครงสร้างไม่เพียงพอ เมื่อ

ประกอบกับเหตุการณ์น้ำขึ้นทำให้ระดับน้ำสูงกว่าระดับของสันเขื่อนกันคลื่น ทำให้โครงสร้างมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับเป็นเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ ลักษณะโครงสร้างจึงผิดไปจากที่ออกแบบไว้

เขื่อนกันคลื่นหินทิ้งแบบใต้น้ำ (submerged rubble mound breakwater) หรือโครงสร้างสันเตี้ย (low crest structure) เป็นทางเลือกหนึ่งเพื่อแก้ไขปัญหา โดยเขื่อนกันคลื่นหินทิ้งแบบใต้น้ำจะมีสันโครงสร้างอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำหรือพ้นระดับเหนือน้ำเพียงเล็กน้อย ทำให้คลื่นสามารถข้ามสันบริเวณสันโครงสร้างได้ แต่จะไม่ทำให้เกิดการบดบังทัศนียภาพที่สวยงามของชายฝั่งและเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำยังใช้วัสดุก่อสร้างน้อยกว่าเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำทั้งทางด้านการก่อสร้างและการบำรุงรักษา (van der Meer et al., 2005) แต่ความสามารถในการสลายพลังงานคลื่นจะลดลงจากเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ

เมื่อคลื่นเข้าปะทะเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ บริเวณด้านหน้าโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น คลื่นจะมีการสะท้อนและแตกตัวด้านหน้าเขื่อนกันคลื่น คลื่นบางส่วนจะข้ามสันสันเขื่อนกันคลื่นเข้าสู่บริเวณด้านหลังเขื่อนกันคลื่น และคลื่นบางส่วนจะมีการเลี้ยวเบนอ้อมเขื่อนกันคลื่นเข้าสู่บริเวณด้านหลังเขื่อนกันคลื่นเช่นกัน ดังนั้น การส่งผ่านคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำจะเป็นผลรวมของการล้นข้ามสันเขื่อนกันคลื่น (Overtopping) ซึมผ่านเขื่อนกันคลื่น (infiltration) และการกระจายตัวอ้อมเขื่อนกันคลื่น (Diffraction) ทำให้รูปแบบกระแสน้ำบริเวณใกล้แนวชายฝั่งเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของตะกอนบริเวณชายฝั่งและรูปแบบการกัดเซาะและทับถมของชายฝั่งอีกด้วย ((US.CERC, 1984); (Nobuoka et al., 1996); (Ranasinghe and Turner, 2006) and (Ranasinghe et al., 2010))

การศึกษาเขื่อนกันคลื่นส่วนใหญ่จะใช้การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 2 มิติ ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้เพียงผลของการข้ามสันและการซึมผ่านเขื่อนกันคลื่นเท่านั้น แต่ยังไม่พิจารณาผลของการกระจายคลื่นอ้อมผ่านเขื่อนกันคลื่นและรูปแบบของกระแสน้ำด้านหลังเขื่อนกันคลื่นที่อยู่ในรูปแบบของแบบจำลอง 3 มิติ ทำให้เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ยังเกิดการคลาดเคลื่อนของการส่งผ่านคลื่นอยู่ (สุวีร์ ศรียี่สุน, 2554)

เมื่อพิจารณาผลของการกระจายตัวของคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นที่สร้างใกล้เคียงกัน ผลของการเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นจะส่งผลกระทบต่อคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านเขื่อนกันคลื่นที่อยู่ใกล้เคียง โดยผลกระทบจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นที่อยู่ใกล้เคียงกัน การพิจารณาจึงจำเป็นต้องคำนึงผลของเขื่อนกันคลื่นที่อยู่ใกล้เคียงกันด้วย ((Penney and Price, 1952); (Wiegel, 1962); (Goda, 1969); (Goda et al., 1978); (Goda and Ahrens, 2008); (Sorensen, 1993); (Ranasinghe et al., 2010) และ (Van der Baan, 2013))

ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้พฤติกรรมของคลื่นมีความแตกต่างกัน หากเขื่อนกันคลื่นอยู่ใกล้กันมาก เนื่องจากผลของการกระจายตัวของคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นจะกระจายตัวไปยังเขื่อนกันคลื่นที่อยู่ใกล้เคียงและกระแสน้ำที่เกิดจากการส่งผ่านคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่น จะมีการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น โดยเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำจะมีกระแสน้ำเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่อับคลื่นด้านหลังเขื่อนกันคลื่นผ่านช่องว่าง แต่เขื่อนกันคลื่นใต้น้ำจะมีกระแสน้ำเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่น ความเร็วของกระแสน้ำขึ้นอยู่กับตำแหน่งในแนวตั้งของกระแสน้ำและความเร็วสูงสุดขึ้นอยู่กับความลึกน้ำเหนือสันเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำและความสูงคลื่นวิ่งเข้าปะทะ (Dronen et al., 2002)

กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง (2551) ได้ศึกษาและสำรวจการกัดเซาะชายฝั่งทะเลบริเวณอ่าวไทยตอนบน พบว่าเขื่อนกันคลื่นในบริเวณอ่าวไทยตอนบนในหลายพื้นที่มีการทรุดตัวและมีการก่อสร้างเขื่อนกันคลื่นหินทิ้งแบบพื้นน้ำหลายแห่งที่มีความสูงของสันโครงสร้างไม่เพียงพอ เมื่อกើน้ำขึ้นทำให้ระดับน้ำสูงกว่าระดับของสันเขื่อนกันคลื่น ทำให้โครงสร้างเป็นเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ พฤติกรรมคลื่นด้านหลังเขื่อนกันคลื่นและกระแสน้ำเปลี่ยนไป

การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำและอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นที่อยู่ใกล้เคียงกันทำให้พฤติกรรมของคลื่นเปลี่ยนไปนั้นอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพของเขื่อนกันคลื่นไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงพฤติกรรมคลื่นด้านหลังเขื่อนกันคลื่นและช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นด้วย

งานวิจัยครั้งนี้จึงมีจุดมุ่งหมาย คือ ศึกษาความสัมพันธ์ของพฤติกรรมการส่งผ่านของคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้งในรูปของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่เกิดขึ้นระหว่างช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำด้วยแบบจำลองทางกายภาพแบบ 3 มิติ เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมให้ครอบคลุมตัวแปรต่างๆที่จำเป็นต้องพิจารณาให้มากที่สุดเพื่อการแก้ไขปัญหาการกัดเซาะทรายฝั่งที่มีประสิทธิภาพต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นหินทิ้งแบบใต้น้ำ
- 2) พัฒนาศมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมทั้งผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับตัวแปรคลื่นและลักษณะโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น

1.3 ขอบข่ายการศึกษา

การศึกษานี้ใช้แบบจำลองทางกายภาพ โดยใช้อ่างจำลองคลื่น ขนาดความกว้าง 10 เมตร ยาว 20 เมตร และลึก 0.70 เมตร ณ ห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีรายละเอียดขอบเขตการศึกษา ดังนี้

- 1) คลื่นที่ใช้ในการทดลองเป็นคลื่นสม่ำเสมอ (regular wave) สร้างขึ้นโดยเครื่องกำเนิดคลื่น (wave generator) โดยมีทิศทางคลื่นตั้งฉากกับเขื่อนกันคลื่น
- 2) เขื่อนกันคลื่น ใช้วัสดุแบบหินทิ้งและยอมให้น้ำซึมผ่านได้ มีความลาดชันด้านหน้าและด้านหลัง เท่ากับ 2:1 (H:V) และมีความสูงของโครงสร้างเท่ากับ 0.40 เมตร
- 3) ระดับน้ำนิ่งในอ่างจำลองคลื่น (wave basin) มีความลึกที่ระดับเท่ากับ 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 เมตร
- 4) ตัวแปรที่สนใจ คือ คุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างอันได้แก่ ความสูงคลื่น, คาบคลื่น, ความยาวคลื่น, ความชันคลื่น ความลึกน้ำเหนือสันโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น ระยะห่างของช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นที่อยู่ใกล้เคียงกัน
- 5) การศึกษาครั้งนี้มีการศึกษาตัวแปรทั้งสิ้น 3 ตัวแปร ดังต่อไปนี้
 - ก) ตัวแปรความลึกน้ำ มีค่าเท่ากับ 0.30, 0.40, 0.45, 0.50 เมตร
 - ข) ตัวแปรความชันคลื่น มีค่า 3 ช่วง คือ 0.010-0.015, 0.020-0.025, 0.030-0.035
 - ค) ตัวแปรอัตราส่วนระหว่างช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นต่อความยาวคลื่นวิ่งเข้าสู่ฝั่ง มีค่า 3 ช่วง คือ 0.47-0.52, 1.47-1.52 , 2.97-3.02

1.4 การดำเนินการศึกษาและระยะเวลาที่ใช้

ขั้นตอนและแผนการดำเนินการศึกษาวิทยานิพนธ์มีดังนี้คือ

1. ศึกษารวบรวมเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาและทบทวนหลักการและทฤษฎีทางวิศวกรรมชายฝั่ง
3. ศึกษาและออกแบบจำลองทางกายภาพ
4. ทำการศึกษาและจำลองด้วยแบบจำลองทางกายภาพ
5. วิเคราะห์และสรุปผล
6. จัดทำรายงานวิทยานิพนธ์

โดยระยะเวลาที่ใช้ในการทำแต่ละขั้นตอนแสดงดังตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

| เวลา | พ.ศ. 2557 | | | พ.ศ. 2558 | | | | | | | | | | | | พ.ศ. 2559 | | | | | | | |
|---|-----------|----|----|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|-----------|---|---|---|---|---|---|--|
| | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| การดำเนินงานวิจัย | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1. ศึกษารวบรวมเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2. ศึกษาและทบทวนหลักการและทฤษฎีทางวิศวกรรมชายฝั่ง | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3. ออกแบบและสร้างแบบจำลองทางกายภาพ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4. ศึกษาและจำลองด้วยแบบจำลองทางกายภาพ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5. วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6. จัดทำรายงานวิทยานิพนธ์ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

บทที่ 2

หลักการและการศึกษาที่ผ่านมา

ในการศึกษาครั้งนี้ เพื่อให้สามารถดำเนินงานวิจัย วิเคราะห์ผล และสรุปผลการวิจัยได้ จึงมีการศึกษาทบทวนถึงหลักการและการศึกษาที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้สามารถอธิบายถึงกลศาสตร์ของคลื่น พฤติกรรมของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง การเปลี่ยนแปลงคลื่น พลังงานของคลื่น อีกทั้งยังรวมไปถึงการศึกษาที่ผ่านมาของการส่งผ่านคลื่นผ่านโครงสร้าง ซึ่งจะนำมาสู่แนวทางการดำเนินงานการศึกษานี้ต่อไป

2.1 กลศาสตร์ของคลื่น

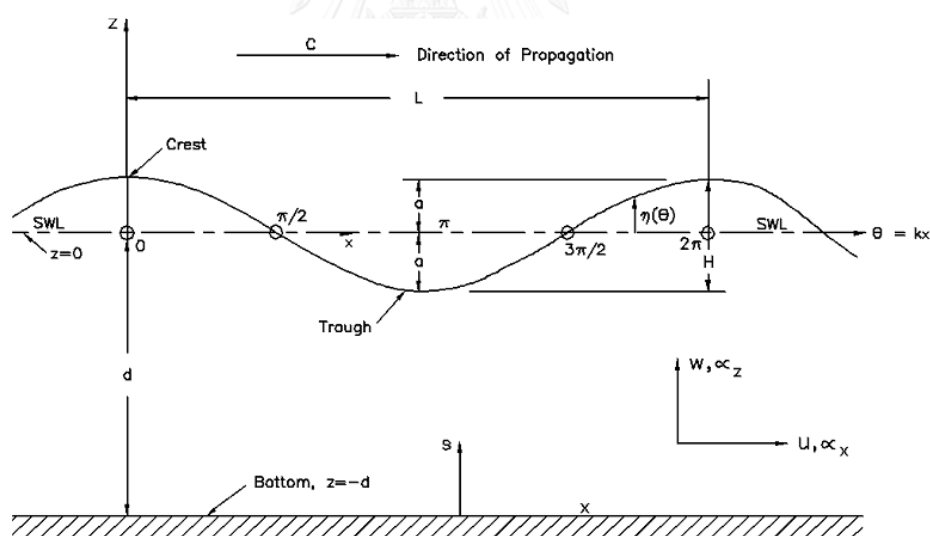
ในการศึกษาคลื่นจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่ต้องเข้าใจในกลศาสตร์ของคลื่น ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่จะอธิบายความสัมพันธ์และพฤติกรรมต่างๆของคลื่น ตั้งแต่คุณสมบัติทางกายภาพตลอดจนถึงพฤติกรรมของคลื่นที่ส่งผลกระทบต่อเขื่อนกันคลื่น ลักษณะคลื่นน้ำเป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำที่ผิวหน้าภายใต้อิทธิพลของแรงดึงดูดของโลก คลื่นจะเป็นการเคลื่อนที่ของพลังงานคลื่น โดยแหล่งของพลังงานนั้นมีหลากหลาย เช่น คลื่นที่เกิดจากลม คลื่นที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของวัตถุบนผิวน้ำ คลื่นที่เกิดจากแผ่นดินไหว เป็นต้น ลักษณะกลศาสตร์ของคลื่นก็จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของคลื่น

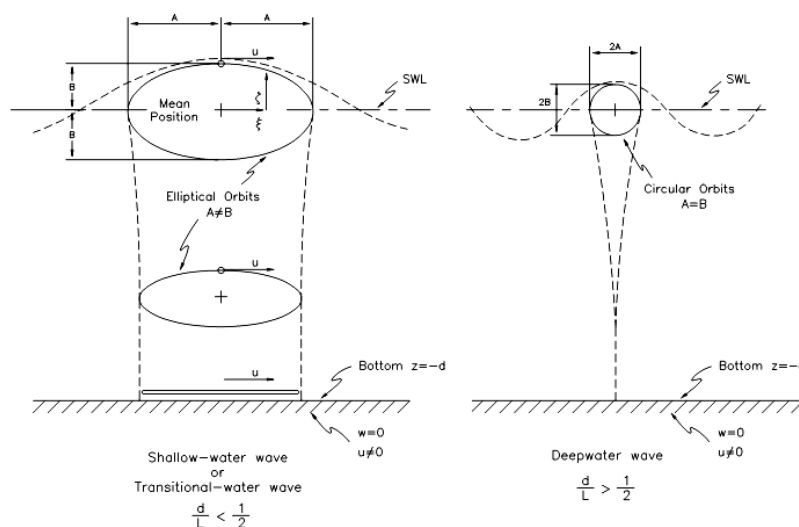
คลื่นน้ำเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับผิวน้ำขึ้นลงในแต่ละช่วงเวลาและตำแหน่ง โดยมีลักษณะเป็นคลื่นฮาร์โมนิก ดังแสดงในรูปที่ 2-1 โดยแสดงนิยามของพารามิเตอร์หลักของคลื่น ดังต่อไปนี้

- 1) ความสูงคลื่น (wave height, H) คือ ระยะจากท้องคลื่น (wave trough) ถึงสันคลื่น (wave crest) ในแนวตั้ง
- 2) คาบคลื่น (period, T) คือ ระยะเวลาที่ขึ้นลงของอนุภาคน้ำบนผิวน้ำที่จุดใดจุดหนึ่งครบ 1 รอบ
- 3) ความยาวคลื่น (wave length, L) คือ ระยะทางจากสันคลื่นหนึ่งถึงอีกสันคลื่นหนึ่งที่อยู่ถัดไป
- 4) ความเร็วคลื่น (celerity, C) คือ ความเร็วที่สันคลื่นเคลื่อนที่ไป โดยมีค่าเท่ากับ $C=L/T$

ในธรรมชาติคลื่นที่เกิดขึ้นภายใต้แรงดึงดูดของโลกจะมีความแปรปรวนสูงมาก ไม่ว่าจะแหล่งกำเนิดของพลังงานจะเป็นอะไรก็ตาม ความแปรปรวนนี้มีความซับซ้อนและยากมากที่จะอธิบายได้ในทางคณิตศาสตร์ให้ถูกต้องตรงกับลักษณะทางกายภาพ เพื่อให้สามารถอธิบายลักษณะทางกายภาพได้เข้าใจในทางคณิตศาสตร์ จึงได้มีการใช้สมมติฐานให้กับการอธิบายเงื่อนไขให้ใกล้เคียงกับคลื่นในธรรมชาติมากที่สุด โดยมีการแบ่งคลื่นตามลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคของน้ำ (water particle movement) ออกเป็น คลื่นแบบ oscillatory ที่มีลักษณะเป็นคลื่นนิ่ง (standing wave) หรือลักษณะเป็นคลื่นเคลื่อนที่ (progressive wave) ก็ได้ ส่วนใหญ่คลื่นที่เคลื่อนที่ในน้ำลึก (deep water) ซึ่งถูกนิยามจากอัตราส่วนของความลึกน้ำหนึ่ง (water depth, d) ต่อความยาวคลื่น (wave length, L) มากกว่า 0.5 ($d/L > 0.5$) ซึ่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำจะวนเวียนอยู่กับที่โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ในตำแหน่งที่คงที่ และคลื่นอีกรูปแบบหนึ่งก็คือ คลื่นแบบ Translatory ซึ่งมีการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำตามทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น หากความเร็วของอนุภาคน้ำมีค่ามากกว่าความเร็วเฉือนวิกฤตของตะกอนท้องน้ำ จะทำให้น้ำพัดพาตะกอนท้องน้ำไปด้วย โดยส่วนใหญ่เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ในน้ำตื้น (shallow water) ซึ่งถูกนิยามจากอัตราส่วนของความลึกน้ำต่อความยาวคลื่นน้อยกว่า 0.04 ($d/L < 0.04$) ดังแสดงในรูปที่ 2-2



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



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

2.1.2 การบรรยายลักษณะของคลื่นทางคณิตศาสตร์

จากที่กล่าวมาแล้วว่า คลื่นที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติมีความแปรปรวนสูง มีการเปลี่ยนแปลงของสันคลื่นและท้องคลื่นตลอดเวลาและความซับซ้อน เนื่องจากกระบวนการการถ่ายทอดพลังงานสู่ผิวน้ำไม่สม่ำเสมอและคงที่ ทำให้ลักษณะของคลื่นและทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นไม่คงที่และเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

เมื่อคลื่นได้รับพลังงานจากแหล่งกำเนิด คลื่นจะเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดโดยที่จะมีลักษณะเป็นระเบียบและสม่ำเสมอมากขึ้นตามระยะทาง สันคลื่นและท้องคลื่นเริ่มปรากฏเด่นชัดขึ้น พลังงานของคลื่นจะลดลงเรื่อยๆตามระยะทาง เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานภายในที่เกิดจากการเสียดทานของอนุภาคน้ำที่ผิวน้ำกับอากาศ การเสียดทานของอนุภาคน้ำกับท้องน้ำ การเสียดทานของอนุภาคน้ำด้วยกันเอง การแตกตัวและการกระจายตัวของคลื่น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะทำให้คลื่นมีพลังงานลดลงตามระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ไป

จากสิ่งที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ เป็นการยากยิ่งที่จะบรรยายลักษณะทางกายภาพของคลื่นให้เป็นลักษณะทางคณิตศาสตร์ การแปรปรวนที่สูงและความซับซ้อนของรูปแบบคลื่นทำให้การบรรยายทางคณิตศาสตร์เป็นไปได้ยากที่จะถูกต้องตลอดการเคลื่อนที่ของคลื่น รูปแบบของคลื่นนั้นเป็นลักษณะไม่เชิงเส้น (non-linear wave) ทำให้ตลอดการเคลื่อนที่เป็นไปมีรูปแบบที่มากมาย การบรรยายคลื่นทางคณิตศาสตร์จึงจำเป็นต้องมีสมมติฐานเงื่อนไขบางอย่างเพื่อให้สามารถบรรยายคลื่นได้ แต่การบรรยายทางคณิตศาสตร์นั้นเป็นเพียงการประมาณเท่านั้น ไม่อาจให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแท้จริงได้ เพื่อ

นำไปสู่หลักเกณฑ์และความพยายามในการที่จะทำความเข้าใจปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้น จึงมีหลายทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายลักษณะต่างๆของคลื่น

ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย (small amplitude wave theory) บรรยายลักษณะของคลื่นเป็นลักษณะ simple harmonic wave ที่เคลื่อนที่อย่างง่ายโดยรูปแบบฟังก์ชันคลื่นรูปไซน์ (sine function) ที่มีการอธิบายการเคลื่อนที่ของคลื่นเป็นแบบเชิงเส้นตรง ซึ่งคลื่นในน้ำลึกจะมีลักษณะใกล้เคียงกับคลื่นในรูปแบบนี้ เพราะมีความเป็นระเบียบและสม่ำเสมอ ทำให้การบรรยายคลื่นในน้ำลึกในรูปแบบนี้จะมีความถูกต้องสูง แต่คลื่นในน้ำตื้นจะลักษณะที่แตกต่างกันไป เนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง

ทฤษฎีคลื่นความสูงมาก (finite amplitude wave theory) บรรยายลักษณะของคลื่นที่เคลื่อนที่ไม่เชิงเส้น ซึ่งมีการบรรยายหลายทฤษฎีและมีขอบเขตที่แต่ละทฤษฎีให้ความถูกต้องที่แตกต่างกัน การบรรยายการเคลื่อนที่ของคลื่นในน้ำตื้นด้วยทฤษฎีนี้จะให้ผลที่ดีกว่าการบรรยายด้วยทฤษฎีคลื่นความสูงน้อย โดยในแต่ละทฤษฎีนั้นจะมีสมมติฐาน ข้อจำกัด และขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณที่แตกต่างกันไป ทฤษฎีคลื่นความสูงมากที่สำคัญ เช่น ทฤษฎีคลื่นของ Stokes (Stoke's wave theory) ทฤษฎีคลื่นชีนอยดอล (Cnoidal wave theory) ทฤษฎีคลื่นโดดเดี่ยว (Solitary wave theory) เป็นต้น

ในการศึกษาครั้งนี้ได้พิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นภายใต้ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อยกับคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น โดยอาศัยทฤษฎีนี้มากำหนดคุณสมบัติของคลื่นที่ใช้เปรียบเทียบ สอบเทียบและคลื่นที่จะใช้ในการศึกษา ทฤษฎีคลื่นความสูงน้อยนี้จะจำแนกคลื่นตามความลึกน้ำประกอบด้วย คลื่นในน้ำลึก คลื่นในความลึกเปลี่ยนแปลง และคลื่นน้ำตื้น เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ในน้ำลึก คุณสมบัติต่างๆของคลื่นมีลักษณะคงที่ ได้แก่ ความเร็ว ความยาวคลื่น และคาบคลื่น เป็นต้น แต่เมื่อคลื่นเริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่ น้ำตื้น คลื่นจะมีคุณสมบัติต่างๆเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากกระบวนการต่างๆเช่น การเคลื่อนที่เข้าสู่ น้ำตื้น (wave shoaling) การหักเหของคลื่น (wave refraction) การสะท้อนของคลื่น (wave reflection) การกระจายของคลื่น (wave diffraction) และการแตกตัวของคลื่น (wave breaking) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวทำให้ความเร็วคลื่นและ ความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงไป ยกเว้นคาบคลื่นที่เท่าเดิม โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นและความเร็วของคลื่นในช่วงความลึกต่างๆตามทฤษฎีคลื่นความสูงน้อยดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติของคลื่นในช่วงความลึกต่างๆ (US.CERC, 1984)

| คุณสมบัติคลื่น | คลื่นในน้ำตื้น (shallow water waves) $\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$ | คลื่นในความลึกเปลี่ยนแปลง (transition water waves) $\frac{1}{2} > \frac{d}{L} > \frac{1}{25}$ | คลื่นในน้ำลึก (deep water waves) $\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$ |
|-----------------------------------|---|---|--|
| ความยาวคลื่น (wave length) | $L = T\sqrt{gd}$ | $L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{L}\right)$ | $L = \frac{gT^2}{2\pi}$ |
| ความเร็วคลื่น (wave celerity) | $C = \sqrt{gd}$ | $C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{L}\right)$ | $C = \frac{gT}{2\pi} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$ |
| ความเร็วกลุ่ม (Group celerity) | $C_g = C = \sqrt{gd}$ | $C_g = nC = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi d / L}{\sinh(4\pi d / L)} \right] C$ | $C_g = \frac{1}{2} C = \frac{gT}{4\pi}$ |

2.2 การเปลี่ยนแปลงของคลื่น

เมื่อคลื่นได้รับพลังงานจากแหล่งกำเนิด คลื่นจะเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดอย่างเป็นระเบียบและสม่ำเสมอตามระยะทาง จนกระทั่งคลื่นเริ่มคลื่นเข้าสู่ น้ำตื้น อิทธิพลของน้ำตื้นจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคลื่น (wave transformation) ผลมาจากระดับความลึกน้ำที่ลดลง ทำให้ความเสียดทานกับท้องน้ำมีอิทธิพลต่อคลื่นหรือการเคลื่อนที่เข้าปะทะกับสิ่งกีดขวาง จากทฤษฎีคลื่น ความสูงน้อย ความยาวคลื่นลดลง แต่ความความสูงคลื่นจะเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความชันคลื่น (wave steepness, H/L) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความสูงคลื่นที่วิ่งเข้าสู่โครงสร้าง (incident wave height, H) ต่อความยาวคลื่น (wave length) เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่าความชันสูงสุด คลื่นไม่สามารถที่จะทรงตัวอยู่ได้ จึงเกิดปรากฏการณ์แตกตัวของคลื่น (wave breaking) และกลายเป็นคลื่นลูกใหม่เคลื่อนที่ตามกันไปจนถึงชายฝั่ง

2.2.1 การเคลื่อนที่ของคลื่นเข้าสู่หาด

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิด คลื่นเคลื่อนที่ผ่านน้ำลึก ผลของน้ำลึกไม่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลื่น ทำให้คลื่นเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบและสม่ำเสมอ อนุภาคของน้ำที่ผิวน้ำจะเคลื่อนที่เป็นวงกลมโดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดใดจุดหนึ่งและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับความสูงคลื่น แต่เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่หาด อนุภาคของน้ำที่ผิวน้ำจะเปลี่ยนแปลงลักษณะการเคลื่อนที่เป็นวงรี เนื่องจากอิทธิพลของหาด ซึ่งจะมีผลการเปลี่ยนแปลงตามระยะทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ดังรูปที่ 2-2

เมื่อพิจารณาหน้าคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่แนวชายฝั่ง ขนานกับเส้นชั้นระดับท้องน้ำ โดยสมมติว่าพลังงานของคลื่นที่ผ่านเข้าชายฝั่งนั้นไม่มีการสูญเสียพลังงาน อันเนื่องมาจากความเสียดทานหรือความปั่นป่วนของท้องน้ำ จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์น้ำตื้น (shoaling coefficient) ดังสมการ 2-1

$$K_s = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{C_0}{n C_s}} \quad (2-1)$$

| | | | |
|-------|-------|-----|---|
| เมื่อ | K_s | คือ | สัมประสิทธิ์น้ำตื้น (shoaling coefficient) |
| | C_0 | คือ | ความเร็วของคลื่นในน้ำลึก (deep water wave celerity) |
| | C_s | คือ | ความเร็วของคลื่นในน้ำตื้น (shallow water wave celerity) |
| | n | คือ | $\left[1 + \frac{4\pi d / L}{\sinh(4\pi d / L)} \right]$ |

2.2.2 การหักเหของคลื่น

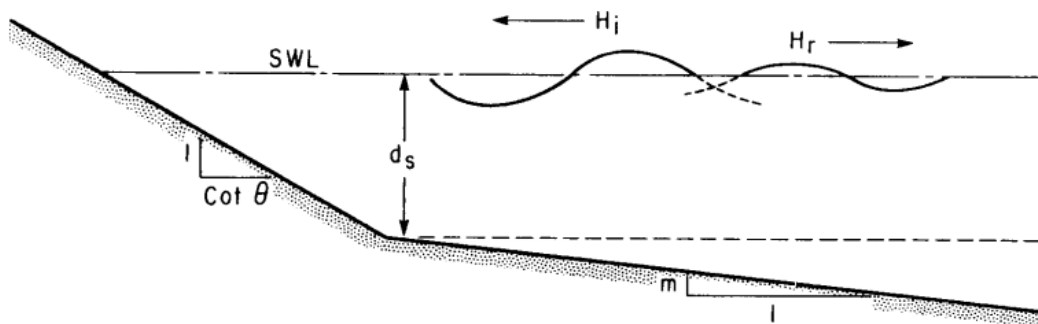
เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่ง โดยที่มีระดับท้องน้ำไม่สม่ำเสมอ ความเร็วคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่งจะมีค่าแตกต่างกัน โดยที่ความเร็วคลื่นจะมีค่ามากเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านน้ำลึก และความเร็วคลื่นจะมีค่าน้อยเมื่อเคลื่อนที่ผ่านน้ำตื้น รวมถึงผลของทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นทำมุมกับแนวชายฝั่ง จะส่งผลให้แนวสันคลื่นเกิดการบิดแนวและทิศทางการเคลื่อนที่จะเปลี่ยนไป เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การหักเหของคลื่น (wave refraction) จะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความลึกน้ำกับความเร็วในปรากฏการณ์การหักเหของคลื่นนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับการหักเหของแสงที่สามารถอธิบายได้ตามกฎของสเนลล์ (Snell's Law) แต่เนื่องจากการศึกษาในครั้งนี้ ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ตั้งฉากกับแนวชายฝั่งและโครงสร้างอยู่บนท้องน้ำที่มีระดับเดียวกัน ทำให้ไม่พิจารณาผลเนื่องจากการหักเหของคลื่น

2.2.3 การสะท้อนของคลื่น

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะกับระดับท้องน้ำที่มีความลาดชันท้องน้ำมากขึ้นหรือโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างตัวกลาง คลื่นจะสะท้อนกลับไปในตัวกลางเดิมที่วิ่งเข้าปะทะ โดยที่คลื่นจะมีการสูญเสียพลังงาน การสะท้อนของคลื่นสามารถอธิบายได้ด้วยกฎการสะท้อน ซึ่งในโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำจะทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นที่รุนแรงมาก (สุวิร์ ศรียี่สุน, 2554) ดังรูปที่ 2-3 แสดงการสะท้อนของคลื่น ค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนคลื่น (reflection coefficient) สามารถหาได้จากสมการที่ 2-2

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

| | | | |
|-------|-------|-----|---|
| เมื่อ | K_R | คือ | สัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่น (reflection coefficient) |
| | H_r | คือ | ความสูงคลื่นที่สะท้อน (reflection wave height) |
| | H_i | คือ | ความสูงคลื่นก่อนผ่านเขื่อนกันคลื่น (incident wave height) |

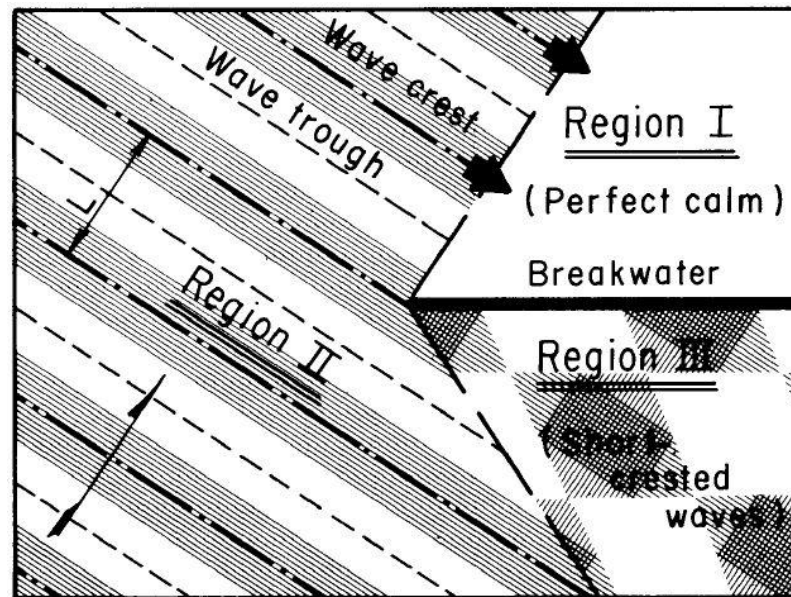


รูปที่ 2-3 การสะท้อนของคลื่น

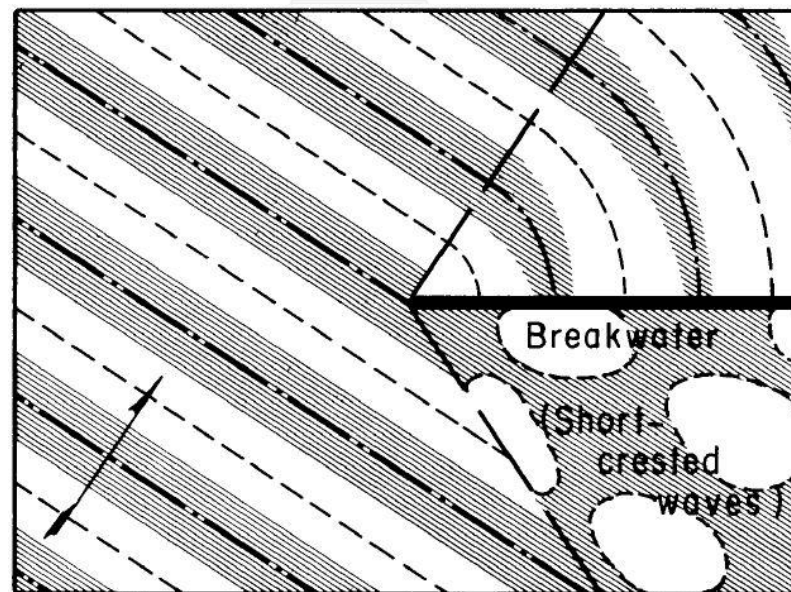
2.2.4 การกระจายของคลื่น

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่ง แล้วมีการเคลื่อนที่ปะทะเข้ากับสิ่งกีดขวาง เช่น โครงสร้างเขื่อนกันคลื่น หรือเกาะเล็กๆ เป็นต้น คลื่นจะเกิดการกระจายเป็นรัศมีเข้าสู่บริเวณอับคลื่น (shadow area) โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ปลายของสิ่งกีดขวางที่คลื่นนั้นไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้ ทำให้เกิดปรากฏการณ์การส่งผ่านพลังงานคลื่นออกด้านข้างตามความยาวของแนวสันคลื่น เข้าสู่บริเวณหลังสิ่งกีดขวาง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การกระจายตัวของคลื่น (wave diffraction) โดยส่วนใหญ่แล้วจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่เจอสิ่งกีดขวาง เช่น โครงสร้างหรือเกาะ เป็นต้น ซึ่งถ้าหากไม่เกิดการถ่ายทอดพลังงานคลื่นออกด้านข้างตามแนวสันคลื่นขึ้น คลื่นจะไม่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณพื้นที่อับคลื่น ในขณะที่บริเวณนอกขอบของโครงสร้างกลับมีคลื่นเคลื่อนที่ผ่านโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความสูง

ซึ่งจะทำให้เส้นแบ่งขอบเขตพื้นที่ทั้งสองนั้นมีความไม่ต่อเนื่องกันเกิด ดังเช่นรูปที่ 2-4 แต่ในความเป็นจริงแล้วผลการศึกษาพบว่า มีการถ่ายทอดพลังงานออกด้านนอกตลอดแนวสันคลื่นจากพื้นที่ II เข้าสู่พื้นที่ I และพื้นที่ III เป็นพฤติกรรมผสมกันระหว่างคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะกับคลื่นที่เกิดจากการสะท้อน ดังเช่นรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-4 รูปคลื่นในพื้นที่ต่างๆในกรณีที่ไม่มีการกระจายตัวของคลื่น (US.CERC, 1984)



รูปที่ 2-5 รูปคลื่นในพื้นที่ต่างๆในกรณีที่ไม่มีการกระจายตัวของคลื่น (US.CERC, 1984)

2.2.5 การแตกตัวของคลื่น

การแตกตัวของคลื่น (wave breaking) เป็นปัจจัยที่สำคัญของการลดพลังงานของคลื่น โดยการแตกตัวของคลื่นจะเกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ ดังนี้

1) การแตกตัวของคลื่นในน้ำลึก

เกิดขึ้นเมื่อความชันของคลื่นที่เคลื่อนที่ในน้ำลึกมีความชันคลื่น (wave steepness, H/L) เท่ากับความชันคลื่นสูงสุด (limiting steepness) ความเร็วของอนุภาคน้ำที่สันคลื่นจะเท่ากับความเร็วคลื่น คลื่นจะไม่สามารถคงรูปลักษณะของคลื่นไว้ได้จึงเกิดการแตกตัว โดยการศึกษาของ Michell (1893) (ถูกอ้างอิงโดย US.CERC.(1984)) พบว่าความชันคลื่นสูงสุดโดยประมาณเท่ากับ 0.142

2) การแตกตัวของคลื่นในน้ำตื้น

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ น้ำตื้น ความชันคลื่นสูงสุดจะมีค่าลดลง โดยขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนของความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (d/L) และความลาดเอียงของชายฝั่ง คลื่นที่เคลื่อนที่จากน้ำลึกจะยังคงคุณสมบัติเดิมไปจนกระทั่งเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณน้ำตื้นที่เพียงพอสำหรับเริ่มแตกตัว ความลึกน้ำที่คลื่นเริ่มแตกตัว เรียกว่าความลึกคลื่นแตกตัว (Breaking depth, d_b) Munk (1949) (ถูกอ้างอิงโดย US.CERC (1984)) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความลึกน้ำแตกตัว (d_b), ความสูงคลื่นแตกตัว (breaker height, H_b), ความสูงคลื่นในน้ำลึกที่ไม่หักเห (Unrefracted Deepwater wave height, H'_0) และความยาวคลื่นในน้ำลึก (Deepwater wave length, L_0) ดังสมการที่ 2-3 และ 2-4

$$\frac{H_b}{H'_0} = \frac{1}{3.3(H'_0/L_0)^{1/3}} \quad (2-3)$$

$$\frac{d_b}{H_b} = 1.28 \quad (2-4)$$

Wiegel (1962)(ถูกอ้างอิง US.CERC (1984)) ได้เสนอผลการพัฒนาสมการโดยเพิ่มผลของความลาดชันของชายฝั่ง ดังสมการที่ 2-5

$$\frac{d_b}{H_b} = \frac{1}{b - (aH_b / gT^2)} \quad (2-5)$$

โดย

$$a = 43.75(1 - e^{-19m}) \quad (2-6)$$

$$b = \frac{1.56}{(1 + e^{-19.5m})} \quad (2-7)$$

เมื่อ T คือ คาบคลื่น
 m คือ ค่าความชันของชายฝั่ง

2.3 การศึกษาที่ผ่านมาของการส่งผ่านของคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำและใต้น้ำ

ในการออกแบบเขื่อนกันคลื่นจำเป็นต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงคลื่นหลังจากคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง ผลของการเปลี่ยนแปลงคลื่นนั้นเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ผลรวมจากหลายสาเหตุทำให้คลื่นมีการเปลี่ยนแปลงไปจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (wave transmission coefficient, K_t) คำนวณจากอัตราส่วนความสูงคลื่นด้านหลังโครงสร้างเขื่อน (transmission wave height, H_t) ต่อความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ฝั่ง (incident wave height, H_i) ซึ่งจะเป็นค่าที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของคลื่นว่าจะมีความสูงคลื่นเพิ่มขึ้นหรือน้อยลง

การศึกษาที่ผ่านมาการส่งผ่านคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำนั้นส่วนใหญ่จะศึกษาด้วยแบบจำลอง 2 มิติ ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นและโครงสร้างเฉพาะการซึมผ่านโครงสร้าง (infiltration) และการข้ามล้นโครงสร้าง (overtopping) เท่านั้น แต่ในความเป็นจริงนั้น การใช้งานจำเป็นต้องมีการพิจารณาในแบบ 3 มิติ ส่งผลให้การพิจารณาด้วยแบบจำลอง 2 มิติ ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง เนื่องจากผลของการกระจายคลื่น (diffraction) บริเวณด้านหลังโครงสร้างที่เคลื่อนที่เข้ามาจากปลายของโครงสร้าง โดยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในการจำลองแบบ 3 มิติ จะมีค่าสูงกว่าแบบจำลอง 2 มิติ เนื่องจากผลการกระจายตัวของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าโครงสร้างเขื่อนกัน (สุวิร์ ศรียี่สุน, 2554) ทำให้ค่าที่ได้นั้นมีความแตกต่างกันเมื่อพิจารณาการส่งผ่านคลื่นในแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ

การกระจายตัวของคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นเป็นผลมาจากคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นและมีการถ่ายทอดพลังงานคลื่นไปด้านหลังเขื่อนกันคลื่น ปัจจัยที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของคลื่นที่ต่างกันคือ ทิศทางของคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะโครงสร้าง ความสูงคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะ

โครงสร้าง และคาบคลื่น นอกจากนี้จากการศึกษาที่ผ่านมา การเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นที่แตกต่างกันจะทำให้ผลของการกระจายตัวผ่านเขื่อนกันคลื่นนั้นมีความแตกต่างกันด้วย ((Johnson, 1951); (Briggs et al., 1995) และ (Goda et al., 1978))

2.3.1 การส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำและใต้น้ำแบบหินทิ้ง

การศึกษาการส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำและใต้น้ำแบบหินทิ้ง มีทั้งการศึกษาด้วยแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการศึกษาที่ผ่านมานั้นสามารถอธิบายการส่งผ่านคลื่นได้ดังนี้

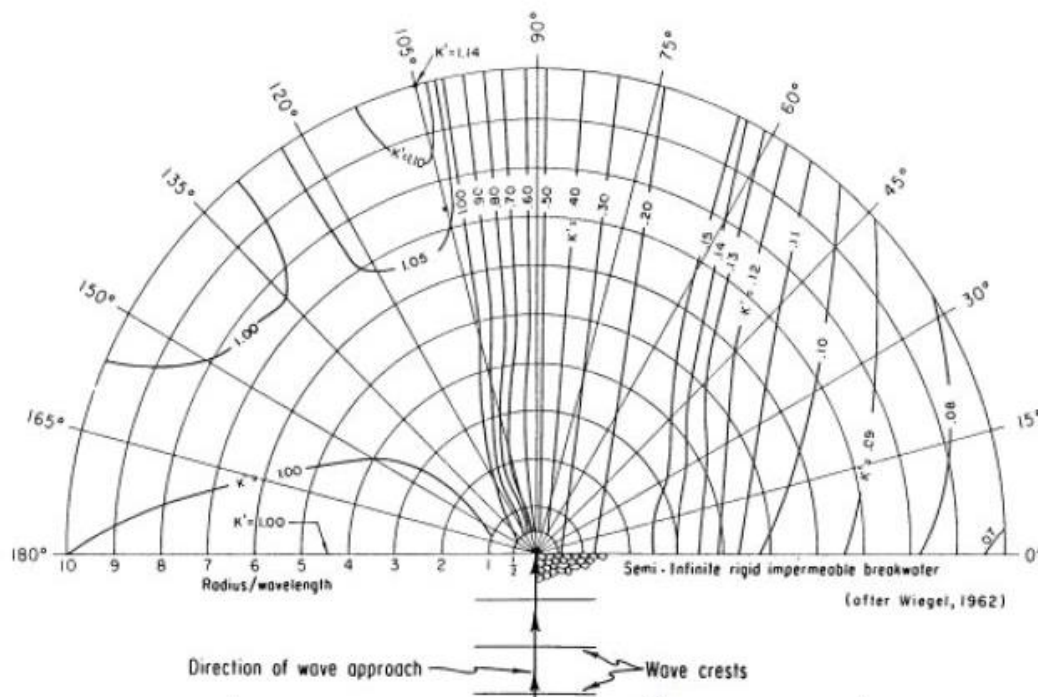
เขื่อนกันคลื่นหินทิ้งแบบพื้นน้ำ เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ด้านหน้าโครงสร้าง คลื่นจะสะท้อนและแตกตัวตั้งแต่บริเวณความลาดชันด้านหน้าโครงสร้าง คลื่นจะไม่สามารถไหลข้ามสันโครงสร้างได้ เนื่องจากลักษณะของสันโครงสร้างได้ ดังนั้นการส่งผ่านของคลื่นของเขื่อนกันคลื่นหินทิ้งแบบพื้นน้ำเพื่อเข้าสู่บริเวณด้านหลังโครงสร้างจะเกิดขึ้นเนื่องจากซึมผ่านโครงสร้าง (infiltration) เพราะวัสดุโครงสร้างเป็นหินทิ้งจึงยอมให้น้ำซึมผ่านได้ (van der Meer et al., 2005) คลื่นบางส่วนจะมีการกระจายตัวเข้าไปในส่วนที่อยู่ด้านหลังเขื่อนหรือบริเวณอับคลื่น (shadow zone) เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความสูงคลื่นที่อยู่ในบริเวณด้านอับคลื่นกับความสูงคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะโครงสร้างหรือค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของคลื่น (wave diffraction coefficient, K_d) โดยจะแสดงถึงอัตราส่วนของคลื่น ณ ตำแหน่งใดๆ ต่อความสูงคลื่นที่เข้าปะทะ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติคลื่นและโครงสร้าง เช่น ความสูงคลื่น ทิศทางคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะทำมุมกับสิ่งกีดขวาง ทิศทางการกระจายตัวของคลื่นทำมุมกับสิ่งกีดขวาง อัตราส่วนของรัศมีการกระจายตัวต่อความยาวคลื่น เป็นต้น

เขื่อนกันคลื่นหินทิ้งแบบใต้น้ำ เมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาถึงบริเวณด้านหน้าโครงสร้าง คลื่นจะสะท้อนและแตกตัวบริเวณความชันด้านหน้าโครงสร้าง หลังจากนั้นคลื่นจะมีคลื่นที่สู่บริเวณสันโครงสร้าง รูปแบบคลื่นมีความผันผวนเป็นอย่างมาก จากการสูญเสียพลังงานภายในของคลื่น ได้แก่ ความเสียดทานบนพื้นผิวของสันโครงสร้าง การแตกตัวของคลื่น การปั่นป่วนของกระแสน้ำที่เคลื่อนที่ย้อนกลับผ่านสันโครงสร้าง รวมทั้งแรงต้านการเคลื่อนที่ผ่านวัสดุโครงสร้าง เป็นต้น คลื่นบางส่วนจะข้ามสันเขื่อนกันคลื่นเข้าสู่บริเวณด้านหลังเขื่อนกันคลื่น และคลื่นบางส่วนจะมีการเลียวนอ้อมเขื่อนกันคลื่นเข้าสู่บริเวณด้านหลังเขื่อนกันคลื่นเช่นกัน ดังนั้น การส่งผ่านคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำจะเป็นผลรวมของการล้นข้ามสันเขื่อนกันคลื่น (overtopping) ซึมผ่านเขื่อนกันคลื่น (infiltration) และการกระจายตัวอ้อมเขื่อนกันคลื่น (diffraction)

Penney and Price (1952) ได้พัฒนาสมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของคลื่น ในกรณีที่คลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะเขื่อนกันคลื่นเป็นคลื่นแบบเดียวกันและคุณสมบัติของคลื่นคงที่หรือ คลื่นสม่ำเสมอ (Regular wave)

Wiegel (1962) ได้ทำการรวบรวมผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของคลื่น จาก Penney and Price (1952) เป็นกราฟความสัมพันธ์และตารางคำนวณ เพื่อสะดวกต่อการใช้งานและ ได้ถูกนำมาเป็นแนวทางการออกแบบเขื่อนกันคลื่นโดย US.CERC (1984) ดังรูปที่ 2-9

Goda et al. (1978) ได้ทำการศึกษาและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายคลื่น ในกรณี คลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะเป็นคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ (Random wave) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การ กระจายตัวของคลื่นมีค่าสูงกว่าในกรณีคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะเป็นคลื่นสม่ำเสมอ และเมื่อเทียบกับ ข้อมูลภาคสนามพบว่า ผลการคำนวณด้วยคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลภาคสนาม มากกว่า



รูปที่ 2-6 ความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของคลื่น

กรณีทำมุมตั้งฉากกับโครงสร้าง ((Wiegel, 1962)อ้างอิงโดย US.CERC,1984)

Hanson and Kraus (1990) พบว่า การส่งผ่านคลื่นจะมีค่าเพิ่มขึ้น และการกระจายตัวอ้อม เขื่อนกันคลื่นของคลื่นจะมีค่าลดลง ทำให้เกิดการลดลงของตะกอนที่เกิดจากการนำพาตะกอน

เนื่องจากการกระจายตัวอ้อมเชื่อมกันคลื่นไปด้านบริเวณอัปคลื่น และคลื่นที่ข้ามล้นเชื่อมกันคลื่นจะกระแทกแหลมทราย (salient) ทำให้เกิดการกัดเซาะบริเวณด้านหลังเชื่อมกันคลื่น

van der Meer and Daemen (1994) ศึกษาการส่งผ่านคลื่นของเชื่อมกันคลื่นพ่นน้ำและได้น้ำแบบหินทิ้ง จากข้อมูลผลการทดลองที่ผ่านมาในอดีต พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะขึ้นอยู่กับระยะห่างของสันโครงสร้างจากน้ำนิ่ง (crest freeboard) ซึ่งเชื่อมกันคลื่นพ่นน้ำค่าระยะห่างของสันโครงสร้างจากระดับน้ำนิ่งมีเครื่องหมายเป็นบวก เชื่อมกันคลื่นได้น้ำมีเครื่องหมายเป็นลบ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{50}) และคุณสมบัติคลื่นกับโครงสร้าง และได้เสนอสมการในการหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นผ่านเชื่อมกันคลื่น

d'Angremond et al. (1996) ได้ศึกษาการส่งผ่านคลื่นของเชื่อมกันคลื่นพ่นน้ำและได้น้ำแบบหินทิ้ง จากข้อมูลผลการศึกษาที่ผ่านมาในอดีตและเป็นข้อมูลชุดเดียวกับการศึกษาของ van der Meer and Daemen (1994) มีคุณสมบัติของตัวแปรของการส่งผ่านคลื่นที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของสันโครงสร้างจากน้ำนิ่งกับความสูงคลื่นวิ่งเข้าสู่โครงสร้างที่แตกต่างกันและได้เสนอสมการในการหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นไว้เช่นกัน

Seabrook and Hall (1998) ได้ทำการเสนอสมการเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบเชื่อมกันคลื่นหินทิ้งแบบได้น้ำ และศึกษาเปรียบด้วยแบบจำลองทางกายภาพแบบ 2 มิติและ 3 มิติ พบว่า ผลของการจำลองในแบบจำลอง 2 มิติมีค่าที่สอดคล้องกับสมการที่เสนอมามาก แต่เมื่อเทียบกับแบบจำลอง 3 มิติ พบว่า ค่าจากสมการที่เสนอมีค่าน้อยกว่าผลของการจำลองในแบบจำลอง เนื่องจากพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นผ่านเชื่อมกันคลื่นในแบบ 3 มิติ มีความซับซ้อนมากกว่า

Yu et al. (2000) ได้ทำการศึกษาการส่งผ่านคลื่นผ่านเชื่อมกันคลื่นและช่องว่างระหว่างเชื่อมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายคลื่นด้านนอกบริเวณอัปคลื่นกรณีคลื่นแบบสม่ำเสมอจะมีค่าสูงกว่ากรณีคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ และค่าการกระจายตัวของค่าทิศทางเคลื่อนที่ (Directional spreading) มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น และค่าการกระจายตัวของค่าทิศทางเคลื่อนที่จะลดลงตามการลดลงของอัตราส่วนระหว่างความกว้างของช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นกับความยาวคลื่น

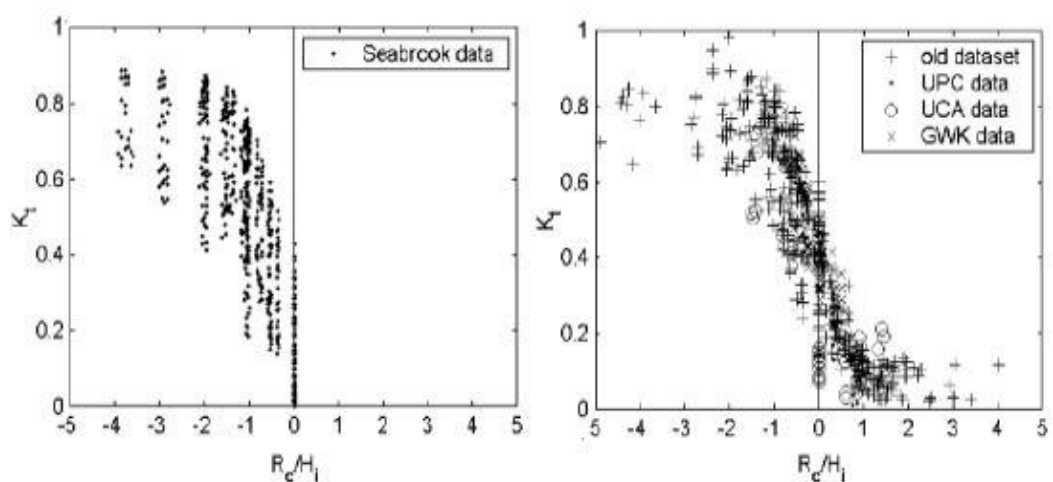
van der Meer et al. (2005) ศึกษาการส่งผ่านของคลื่นของเชื่อมกันคลื่นพ่นน้ำและได้น้ำแบบหินทิ้ง โดยการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการศึกษาหลายแหล่ง ได้แก่ ข้อมูลที่รวบรวมโดย Van der Meer และ Daemen (1994), D'angremond et al. (1996) การทดลองของ Seabrook และ Hall (1998) และสถาบันการศึกษาต่างๆ ได้แก่ University of Cantabria (UCA),

Polytechnic of Catalonia (UPC) และ Coastal Research Center in Hanover (GWK) โดยแสดงรายละเอียดการรวบรวมและวิเคราะห์ผลดังตารางที่ 2-2 และรูปที่ 2-9

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติของตัวแปรของการส่งผ่านของคลื่น แบบจำลอง 2 มิติ เพื่อการวิเคราะห์การส่งผ่านของคลื่น 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 | |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-7 ข้อมูลวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น โดย van der Meer et al. (2005)

สุวีร์ ศรียี่สุน (2554) ได้ทำการศึกษาและจำลองการส่งผ่านคลื่นแบบหินทิ้งตัวเดียวด้วยแบบจำลองทางกายภาพแบบ 3 มิติ พบว่าค่าของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของการส่งผ่านคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นหินทิ้งแบบใต้น้ำจะมีสูงกว่าการส่งผ่านคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นหินทิ้งแบบพ่นน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่ได้มีค่าสูงกว่าการศึกษาด้วยแบบจำลองแบบ 2 มิติในการศึกษาที่ผ่านมา

2.3.2 การส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น

การศึกษาที่ผ่านมาในหัวข้อ 2.3.1 เป็นการศึกษาการส่งผ่านคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นตัวเดียว ผลการกระจายตัวของคลื่นจะเกิดเนื่องจากตัวเขื่อนกันคลื่นเองเท่านั้น แต่มีหลายการศึกษาที่พบว่าเขื่อนกันคลื่นที่อยู่ใกล้เคียงกันจะทำให้เกิดการกระจายตัวของคลื่นที่แตกต่างกันออกไป จึงมีการต้องศึกษาผลของการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างของเขื่อนกันคลื่น โดยรายละเอียดของการศึกษาที่ผ่านมาดังต่อไปนี้

Penney and Price (1952) ได้พัฒนาสมการการหาสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของคลื่นหลังเขื่อนกันคลื่นที่จุดใดก็ตามโดยค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของคลื่นเป็นความสัมพันธ์ของมุมที่คลื่นเข้าปะทะกับเขื่อนกันคลื่นและระยะหาระหว่างจุดใด ๆ กับปลายขอบของเขื่อนกันคลื่น (tips of breakwater)

เมื่ออัตราส่วนของช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะมีค่าน้อย ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นจะมีลักษณะเหมือนแหล่งกำเนิดคลื่นเป็นจุดและคลื่นจะกระจายตัวออกเป็นวงกลมรอบจุดกำเนิด (ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น) แต่เมื่ออัตราส่วนของช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะมีค่ามาก การกระจายตัวของคลื่นจะมีทิศทางเคลื่อนที่หลักตามทิศทางเคลื่อนที่เดิมและสามารถประมาณค่าคล้ายการกระจายตัวออกเป็นวงกลม การประมาณค่าการกระจายตัวโดยวิธี Superposition จากการเคลื่อนที่ผ่านเขื่อนกันคลื่นแบบ semi-infinite barrier สามารถได้ค่าประมาณที่ดี

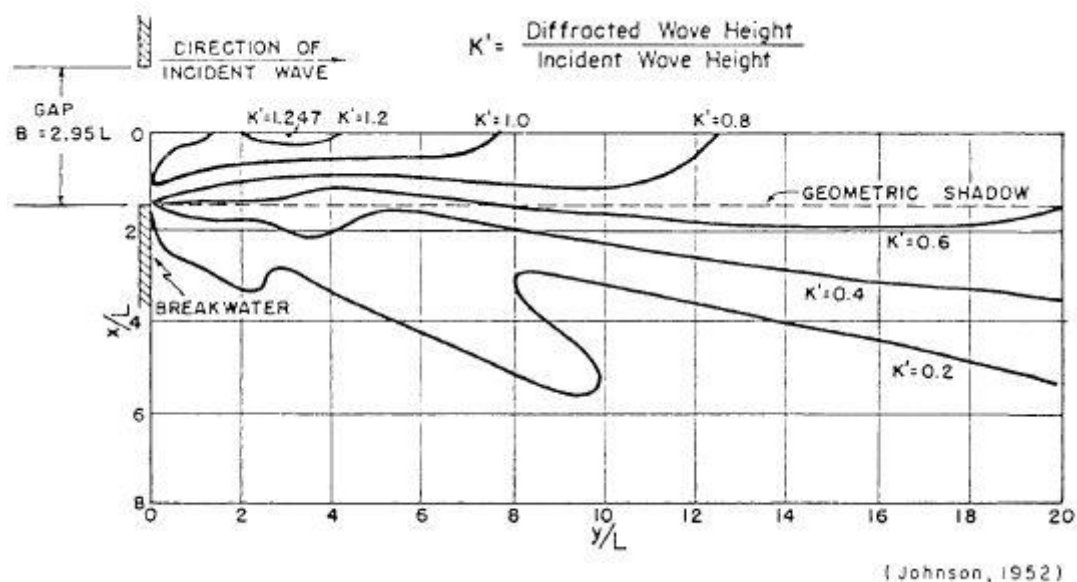
Johnson (1951) ได้พัฒนากราฟความสัมพันธ์เพื่อหาสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของคลื่นที่มีค่าอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นต่อความยาวคลื่น (B/L) ที่วิ่งเข้าปะทะตั้งแต่ 0.50 ถึง 5.00 พบว่าเกิดการกระจายตัวขึ้นที่บริเวณทั้งสองข้างของช่องว่างและค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของคลื่นเปลี่ยนไปแตกต่างจากการกระจายตัวของคลื่นที่เป็นเขื่อนกันคลื่นตัวเดียว

Goda et al. (1978) ได้ทำการศึกษาและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นในกรณีคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะเป็นคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ (random

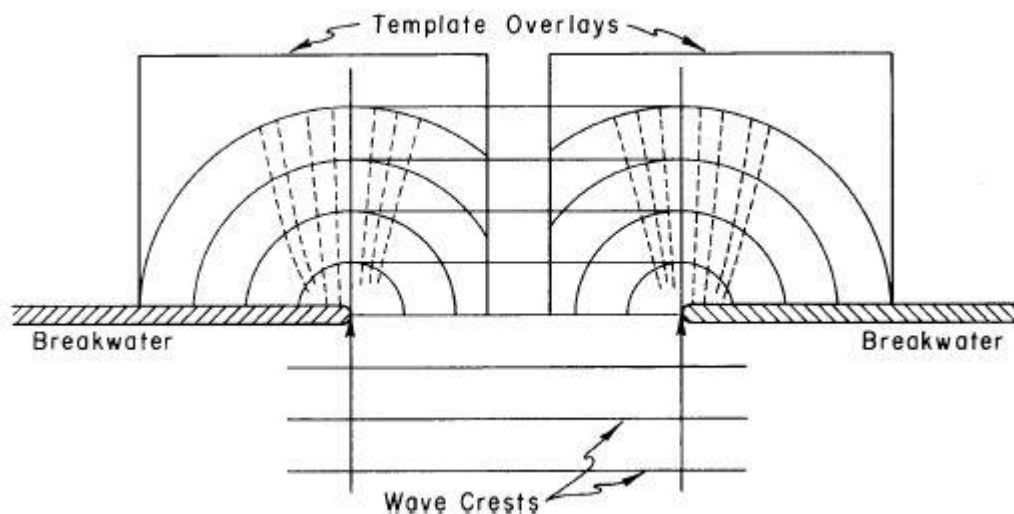
wave) และได้เสนอกราฟค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน

US.CERC (1984) เสนอให้ใช้กราฟค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นของ Johnson (1952) ในกรณีคลื่นเคลื่อนที่ตั้งฉากกับเขื่อนกันคลื่น และอัตราส่วนของช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น(B/L)มีค่าน้อยกว่า 5.00 ดังแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น กรณี B/L=2.95 ดังรูปที่ 2-11 แต่ในกรณีที่อัตราส่วนของช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นมีค่ามากกว่า 5.00 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของคลื่นของเขื่อนกันคลื่นแต่ละตัวจะเป็นอิสระต่อกัน สามารถคิดหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นแบบตัวเดียวได้ ดังรูปที่ 2-12

Yu et al. (2000) ได้ศึกษาผลของการหักเหและการกระจายตัวของคลื่นแบบสม่ำเสมอและแบบไม่สม่ำเสมอผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น พบว่าคลื่นแบบสม่ำเสมอจะทำให้การส่งผ่านคลื่นมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในบริเวณด้านนอกพื้นที่อับคลื่นหรือบริเวณช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นสูงกว่าคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ และผลของการกระจายตัวของทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นมีผลกับสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของคลื่นมากกว่าการกระจายตัวของความถี่คลื่น โดยที่การกระจายตัวของทิศทางคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงสูงในบริเวณจุดกึ่งกลางช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นและจะลดลงตามอัตราส่วนระหว่างช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่น



รูปที่ 2-8 ความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น กรณี B/L=2.95 (Johnson, 1951)



รูปที่ 2-9 ความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของคลื่น
ผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น กรณี $B/L > 5.00$

Van der Baan (2013) ได้ศึกษาผลของช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวเขื่อนกันคลื่น พบว่า อัตราส่วนระหว่างช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวเขื่อนกันคลื่นมีค่าน้อย จะทำให้ระดับน้ำหลังเขื่อนกันคลื่น (piling-up level) มีค่าสูงขึ้น

ธีรนนท์ ปันใจลือ และ อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์ (2558) ได้ทำการศึกษาการส่งผ่านคลื่นและกระจายคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า เมื่อความลึกน้ำต่ำกว่าสันเขื่อนกันคลื่น การส่งผ่านคลื่นจะมีเพียงการกระจายตัวของคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นเท่านั้น เมื่อความลึกน้ำเพิ่มมากขึ้น การส่งผ่านคลื่นจะมีผลของการข้ามสันผ่านสันเขื่อนกันคลื่นรวมด้วย ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่าอัตราส่วนระหว่างช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นต่อความยาวคลื่น (B/L) ก็มีผลต่อการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นเช่นกัน เมื่อค่าอัตราส่วน B/L มีค่าน้อย พฤติกรรมของคลื่นของการกระจายตัวจะเป็นเหมือนจุดกำเนิดคลื่นใหม่และกระจายตัวเข้าไปพื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่น และเมื่อค่า B/L เพิ่มมากขึ้นการส่งผ่านคลื่นจะมีมากขึ้นและอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นที่อยู่ใกล้เคียงจะลดลง

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

การศึกษาจำลองการส่งผ่านคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำด้วยแบบจำลองทางกายภาพ การส่งผ่านของคลื่นนั้นเป็นผลรวมของการข้ามล้นสันเขื่อนกันคลื่น การกระจายตัวผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น และการซึมผ่านตัวเขื่อนกันคลื่น เพื่อมีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวกับช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นและระดับน้ำเหนือสันเขื่อนกันคลื่นที่เปลี่ยนไป ที่มีผลต่อพฤติกรรมของคลื่นเปลี่ยนแปลงไป การศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินการตามขั้นตอนการศึกษา เพื่อให้ครอบคลุมขอบเขตและวัตถุประสงค์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในงานวิจัย

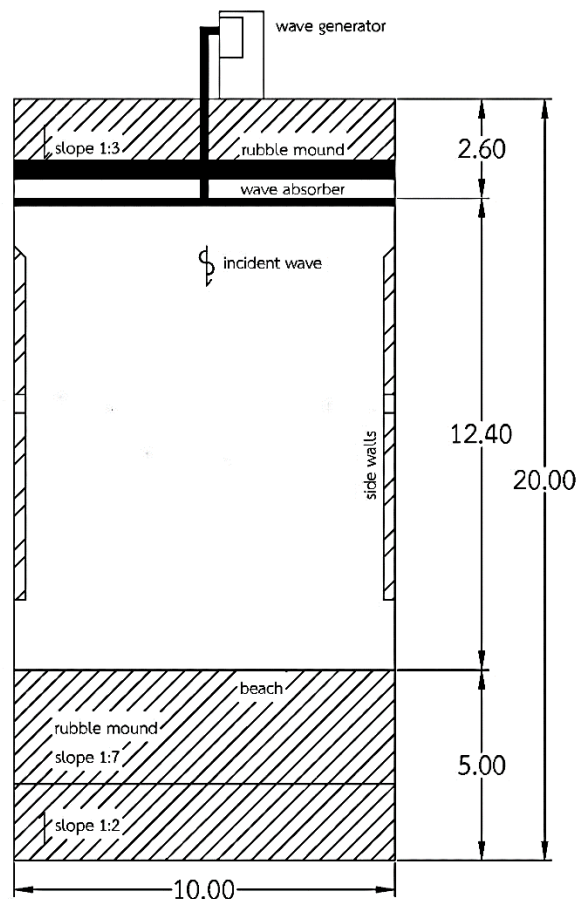
การศึกษาครั้งนี้ทำการจำลองการส่งผ่านคลื่นและกระจายคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นในอ่างจำลองคลื่น (wave basin) ณ ห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นการจำลองแบบจำลองทางกายภาพแบบ 3 มิติ อ่างจำลองคลื่นจะสร้างคลื่นจากเครื่องกลโดยสามารถจำลองคลื่นที่มีคุณสมบัติต่างๆด้วยการปรับระยะคันชักและความเร็วรอบในการหมุนของมอเตอร์ เครื่องกำเนิดคลื่นจะทำให้ระดับผิวน้ำ (water surface) มีการเปลี่ยนแปลง เป็นคลื่นที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลของคลื่นที่จำลองโดยใช้เครื่องมือวัดความสูงของคลื่นเพื่อหาความสูงคลื่น (wave height) และคาบของคลื่น (wave period) เครื่องมือจะเก็บข้อมูลระดับผิวน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาต่างๆและคำนวณเป็นความสูงคลื่นและคาบคลื่น นอกจากนี้การศึกษานี้ยังทำการเก็บข้อมูลของความเร็วน้ำของกระแสน้ำ (current) ในจุดต่างๆ โดยรายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้มีดังต่อไปนี้

3.1.1 อ่างจำลองคลื่นและระบบเครื่องกำเนิดคลื่น

- 1) อ่างจำลองคลื่น (wave basin) เป็นแอ่งคอนกรีตสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาดความกว้าง 10 เมตร ยาว 20 เมตร และสูง 0.70 เมตร ผนังด้านข้างติดตั้งโครงสร้างตะแกรงสลายพลังงานคลื่น เพื่อลดการสะท้อนของคลื่นเมื่อปะทะผนังด้านข้าง ปลายอ่างจำลองคลื่นมีการถมหินเป็นทางลาดชันเพื่อสลายพลังงานคลื่นที่เข้าปะทะ ลดคลื่นที่สะท้อนกลับ ทำให้คลื่นมีความเสถียรภาพ ดังรูปที่ 3-1

- 2) ระบบเครื่องกำเนิดคลื่น (wave generator) เป็นเครื่องจักรกล ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ติดกับแขนกลที่มีแผ่นเหล็กในอ่างจำลองคลื่น เมื่อมอเตอร์ทำงานจะขับเคลื่อนแขนกลทำให้แผ่นเหล็กในอ่างจำลองคลื่นที่สามารถเคลื่อนที่กลับไปกลับได้ น้ำในอ่างจำลองคลื่นทำให้เกิดคลื่นขึ้น ระบบแขนกลสามารถปรับระดับคันชักให้ระยะการเคลื่อนที่ของแผ่นเหล็กมีค่าแตกต่างกัน และสามารถควบคุมความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ได้ คลื่นที่เกิดขึ้นจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป ระบบเครื่องกำเนิดคลื่นมีข้อจำกัดที่สำคัญคือ ชุดมอเตอร์สามารถปรับความเร็วรอบการหมุนได้อยู่ที่ 5 เฮิร์ต-25 เฮิร์ต และระยะแขนกลสามารถปรับความยาวได้อยู่ที่ 0-15 เซนติเมตร



Overview of the wave basin
(dimension in meter)

รูปที่ 3-1 อ่างจำลองคลื่น

3.1.2 เครื่องมือเก็บข้อมูลคลื่นและกระแสไฟฟ้า

- 1) เครื่องมือวัดคลื่น (wave gage) เป็นเครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงระดับผิวน้ำตามเวลาเพื่อหาพารามิเตอร์ของความสูงคลื่น ตามตำแหน่งการเก็บข้อมูลคลื่น การศึกษาครั้งนี้ใช้แบบ CH-403A & CHT4-40 ของบริษัท Kennek ช่วงข้อมูลที่เครื่องทำการประมวลผลที่ ± 5 โวลต์ ความคาดเคลื่อน ± 0.02 มิลลิเมตร
- 2) แผงวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (A/D converter) ข้อมูลคลื่นที่ได้จากเครื่องมือวัดคลื่นและเครื่องมือวัดความเร็วการไหล จะส่งข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์กับเวลาสู่แผงวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล และอาศัยการแสดงผลจากคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม LabVIEW ของบริษัท National Instruments เพื่อทำการจัดเก็บข้อมูลเป็นดิจิทัลต่อไป
- 3) เครื่องมือวัดระดับน้ำ (point gauge) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวัดระดับความลึกน้ำนิ่งก่อนและหลังการทดลอง มีความละเอียด 0.5 มิลลิเมตร
- 4) กล้องถ่ายภาพวิดีโอและกล้องถ่ายรูป บันทึกภาพพฤติกรรมขณะทดลอง เช่น การเคลื่อนที่ของคลื่นเข้าปะทะโครงสร้าง การแตกตัวของคลื่น การกระจายของคลื่นบริเวณด้านหลังโครงสร้าง การกระจายของคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างโครงสร้าง การเคลื่อนตัวของคลื่นเมื่อถึงแนวชายฝั่ง เป็นต้น

3.2 เปรียบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองที่ใช้

การศึกษานี้จำเป็นต้องมีการเปรียบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง คือเครื่องมือวัดความสูงคลื่น เครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำ และเครื่องกำเนิดคลื่น เนื่องจากเครื่องวัดความสูงคลื่นและเครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำจะวัดข้อมูลเป็นความต่างศักย์ จึงจำเป็นที่จะต้องเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดกับข้อมูลจริงที่เกิดขึ้น และการเปรียบเทียบเครื่องกำเนิดคลื่นนั้นทำให้สามารถกำหนดคุณสมบัติคลื่นที่จะทำการจำลองได้โดยอาศัยการปรับระยะคันชักของแขนกลกับความถี่รอบการหมุนของมอเตอร์ การเปรียบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์นั้นแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข-1.

3.3 แบบจำลองของเขื่อนกันคลื่น

การศึกษานี้จะกำหนดตัวแปรในสองส่วนคือ คุณสมบัติของคลื่นที่วิ่งเข้าสู่โครงสร้าง ได้แก่ ความสูงคลื่น คาบคลื่น ความยาวคลื่น และความชันคลื่น และตัวแปรโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น ได้แก่ ความสูงของสันเขื่อนกันคลื่น ระยะห่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น โดยศึกษาถึงความสัมพันธ์ของตัวแปร คุณสมบัติของคลื่นกับตัวแปรโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น กำหนดรูปแบบของเขื่อนกันคลื่นและคุณสมบัติคลื่นที่จะศึกษาดังต่อไปนี้

3.3.1 ตัวแปรคุณสมบัติคลื่น

การศึกษาคั้งนี้สนใจตัวแปรคุณสมบัติคลื่นวิ่งเข้าคือ ความชันคลื่น(wave steepness) ซึ่งคือค่าอัตราส่วนความสูงคลื่นต่อความยาวคลื่น โครงการ IMPAC-T Project (2012) ได้ทำการเก็บข้อมูลคลื่นบริเวณอ่าวไทยตอนบน พบว่า ความชันคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 0.01-0.03 ดังนั้นการศึกษาคั้งนี้จึงกำหนดตัวแปรคุณสมบัติคลื่นโดยจะพิจารณาความชันคลื่น 3 ช่วงความชันคลื่น คือ 0.010-0.015, 0.020-0.025 และ 0.030-0.035 ตามลำดับ

3.3.2 การออกแบบเขื่อนกันคลื่น

การศึกษานี้สนใจเขื่อนกันคลื่นที่มีความสูงคงที่ คือ 0.40 เมตร เป็นเขื่อนกันคลื่นหินทิ้ง โดยเลือกใช้หินปูน(limestone) เป็นวัสดุเดียวในการก่อสร้างเขื่อนกันคลื่น โครงสร้างนี้จึงเป็นโครงสร้างวัสดุเนื้อเดียว(homogenous structure) น้ำสามารถซึมผ่านได้ โดยมีรายละเอียดของโครงสร้างดังต่อไปนี้

จากการศึกษาที่ผ่านมา เพื่อให้โครงสร้างและวัสดุมีเสถียรภาพจึงต้องคำนึงถึงความลาดชันด้านหน้าและด้านหลังของโครงสร้าง จาก US.CERC. (1984) นิยมใช้ความลาดชันของโครงสร้างของเขื่อนกันคลื่นหินทิ้งที่น้ำซึมผ่านได้มีค่าเท่ากับ 1:1.5 และ 1:2 (ระยะแนวตั้ง: ระยะแนวราบ) การศึกษานี้จึงเลือกใช้ค่าความลาดชันเท่ากับ 1:2 ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของโครงสร้าง

นอกจากความลาดชันของโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นแล้ว เพื่อให้โครงสร้างมีความเสถียรภาพ จำเป็นต้องพิจารณาถึงขนาดของหินทิ้ง โดยการศึกษาคั้งของ Hudson (1959) ที่ถูกอ้างอิงโดย US.CERC. (1984) ได้แนะนำการพิจารณาขนาดหินทิ้งแบบเฉลี่ย (mean stone size) ดังสมการที่ 3-

$$W_{50} = \frac{W_r H_i^3}{K_{RR} (S_r - 1)^3 \cot \theta} \quad (3-1)$$

| | | | |
|--------|------------|-----|---|
| โดยที่ | W_{50} | คือ | น้ำหนักของหินที่ค่าร้อยละ 50 ของการกระจายวัสดุโครงสร้าง |
| | W_r | คือ | น้ำหนักมวลรวมของหินที่ใช้ในหนึ่งลูกบาศก์เมตร |
| | H_i | คือ | ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างที่ใช้ออกแบบ |
| | K_{RR} | คือ | ค่าสัมประสิทธิ์ความมีเสถียรภาพ(stability coefficient) |
| | S_r | คือ | ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ |
| | θ_s | คือ | มุมของความลาดชันด้านหน้าโครงสร้างเขื่อน |

เพื่อให้มีความเสถียรภาพของโครงสร้างในทุกกรณีการศึกษา จึงใช้คลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะสูงสุดของการศึกษาครั้งนี้ในการออกแบบโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นมีค่าเท่ากับ 8.0 ซม. เลือกใช้หินที่มีมวลรวมที่มีความหนาแน่น (density) 1,500–1,700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.6 พบว่า ขนาดของหินทิ้งที่มีค่าที่ร้อยละ 50 ของการกระจายวัสดุโครงสร้าง (D_{50}) ควรมีขนาดอย่างต่ำเท่ากับ 3.5 ซม. การศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้ขนาดของหินทิ้งที่มีค่าที่ร้อยละ 50 ของการกระจายวัสดุโครงสร้าง (D_{50}) ควรมีขนาดอย่างต่ำเท่ากับ 3.75 ซม. (1.5 นิ้ว)

การออกแบบโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นจำเป็นต้องคำนึงถึงความกว้างของสันเขื่อนกันคลื่น จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา US.CERC (1984) ได้แนะนำถึงการพิจารณาความกว้างของสันเขื่อนกันคลื่นดังสมการที่ 3-2

$$B_s = n_m K_e \left(\frac{W_{50}}{W_r} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3-2)$$

| | | | |
|--------|----------|-----|---|
| โดยที่ | B_s | คือ | ความกว้างของสันเขื่อนกันคลื่น |
| | W_{50} | คือ | น้ำหนักของหินที่ค่าร้อยละ 50 ของการกระจายวัสดุโครงสร้าง |
| | W_r | คือ | น้ำหนักมวลรวมของหินที่ใช้ในหนึ่งลูกบาศก์เมตร |
| | K_e | คือ | ค่าสัมประสิทธิ์ชั้นวัสดุ(layer coefficient) |
| | n_m | คือ | ค่าคงที่ของวัสดุ |

การพิจารณาถึงความกว้างของสันเขื่อนกันคลื่นในครั้งนี้ โดยใช้วัสดุชนิดเดียวกันทั้งหมดมีค่าสัมประสิทธิ์ชั้นวัสดุค่าเท่ากับ 1.5 และใช้วัสดุหินประเภท limestone มีค่าคงที่ของวัสดุเท่ากับ 3 พบว่าโครงสร้างควรมีความกว้างของสันเขื่อนกันคลื่นมากกว่า 15 ซม. ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงกำหนดให้ความกว้างของสันเขื่อนกันคลื่นเท่ากับ 20 ซม.

สรุปการออกแบบเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้งในการศึกษาครั้งนี้ เป็นโครงสร้างแบบไม่ทับน้ำ ด้านนอกเป็นกรอบโครงสร้างเหล็ก บรรจุหินขนาด D_{50} เท่ากับ 3.75 ซม. คลุมหินชั้นนอกด้วยด้วยหิน

ขนาด 5.0 ซม. บรรจุภายในกรงลวดตาข่ายโครงเหล็ก กำหนดรายละเอียดโครงสร้างของความกว้างสันเชื่อมกันคลื่น (B_s) เท่ากับ 20 ซม. ความสูงของเชื่อมกันคลื่น (h_s) เท่ากับ 40 ซม. ความลาดชันด้านหน้าและด้านหลังของเชื่อมกันเชื่อมเท่ากับ 1:2 (ระยะแนวตั้ง:ระยะแนวราบ) ดังรูป 3-2



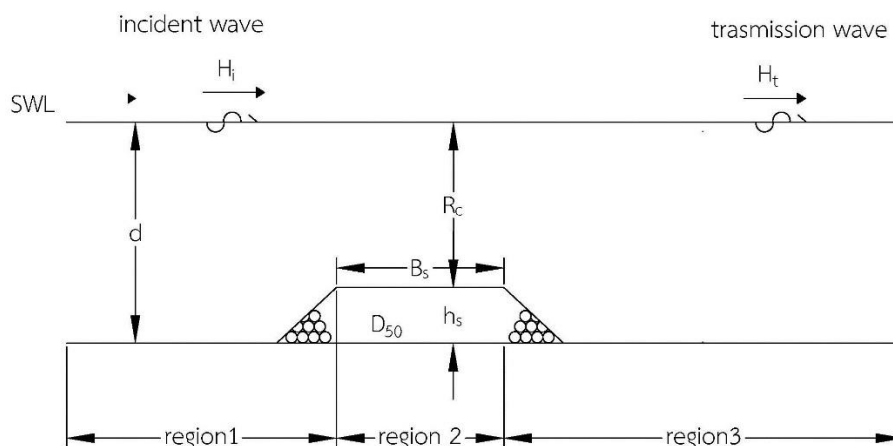
รูปที่ 3-2 ตัวอย่างแบบจำลองเชื่อมกันคลื่น

3.4 ออกแบบการทดลองและทำการเก็บข้อมูลแบบจำลอง

3.4.1 การออกแบบการทดลอง

การพิจารณาออกแบบการทดลอง กำหนดความสูงของโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น (h_s) เท่ากับ 0.40 เมตร ตัวแปรที่สนใจคือความลึกน้ำเหนือสันเชื่อมกันคลื่น (R_c) ดังรูปที่ 3-3 โดยมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในอ่างจำลองคลื่น (d) ทั้งหมด 4 ระดับ คือ 0.30, 0.40, 0.45 และ 0.50 เมตร ซึ่งเมื่อเทียบกับระดับของความสูงเชื่อมกันคลื่น จะได้ดังนี้

- 1) ระดับน้ำสูงกว่าระดับความสูงโครงสร้าง เป็นโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นแบบใต้น้ำ คือระดับน้ำเท่ากับ 0.45 และ 0.50 เมตร
- 2) ระดับน้ำเท่ากับระดับความสูงโครงสร้าง เป็นโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นที่ปริ่มน้ำพอดี คือระดับน้ำเท่ากับ 0.40 เมตร
- 3) ระดับน้ำต่ำกว่าระดับความสูงโครงสร้าง เป็นโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นแบบพ้นน้ำ คือระดับน้ำเท่ากับ 0.30 เมตร



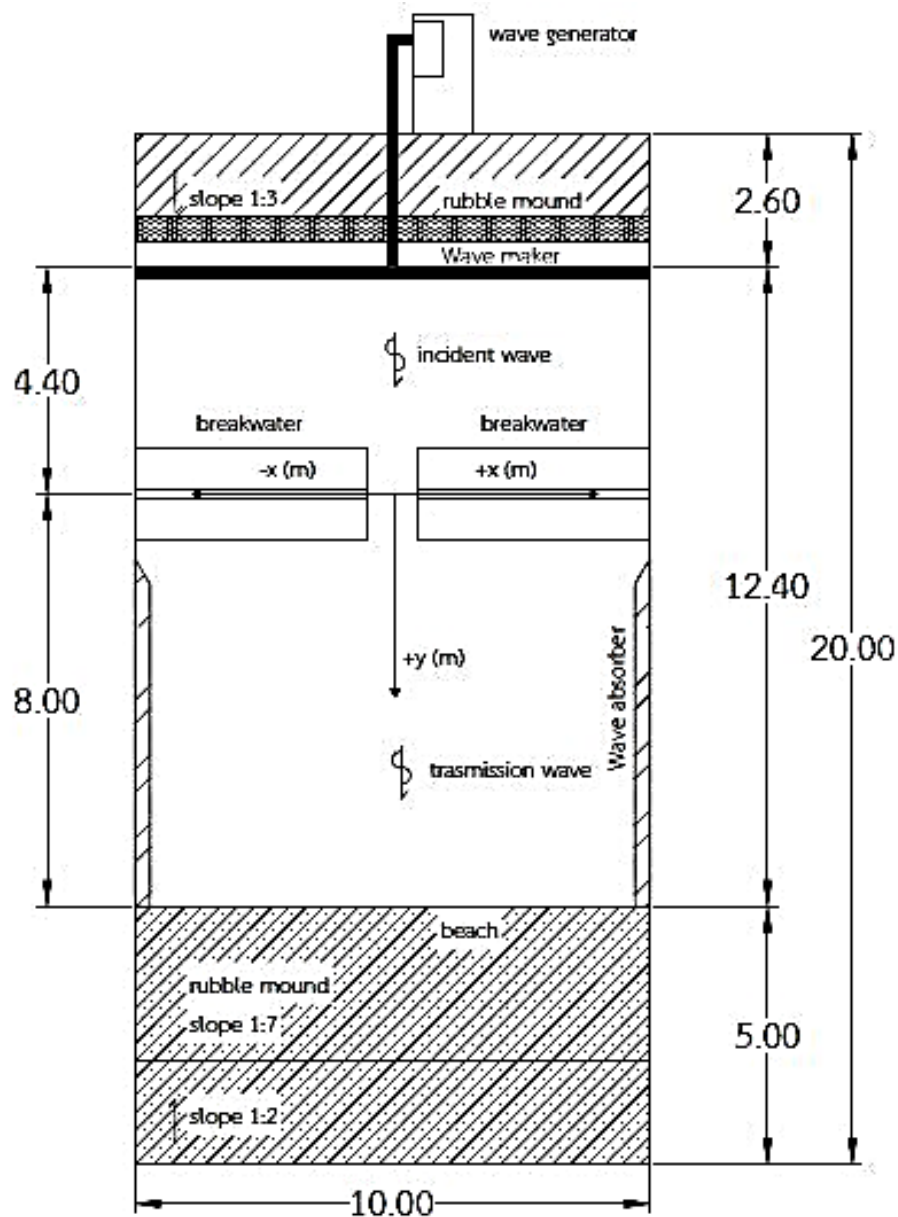
รูปที่ 3-3 ตัวแปรโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น

ตัวแปรที่พิจารณาเกี่ยวกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นอีกหนึ่งตัวแปรคือระยะห่างของช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น (B) โดยการศึกษาจะพิจารณาถึงผลของช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น โดยมีการติดตั้งเขื่อนกันคลื่นติดกับผนังอ่างจำลองเขื่อนกันคลื่นทั้งสองฝั่งและยาวขนานกับแนวชายฝั่ง (along shore) มีช่องเปิดระหว่างเขื่อนกันคลื่นทั้งสองฝั่งในแนวตรงกลางของอ่างจำลองคลื่นดังรูปที่ 3-4 ตัวแปรที่สนใจคือ อัตราส่วนระหว่างระยะห่างของช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่น (B/L) เมื่ออัตราส่วนระหว่างระยะห่างของช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่นมีค่าน้อยกว่า 5 การกระจายตัวของคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นจะได้รับอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นที่ติดกัน แต่เมื่ออัตราส่วนระหว่างระยะห่างของช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่น มีค่ามากกว่า 5 การกระจายตัวของคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นจะไม่ได้รับอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นที่ติดกัน (US.CERC, 1984)

จากการศึกษาด้วยภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณอ่าวไทยตอนบนในช่วงเวลา วันที่ 5 เดือน กุมภาพันธ์ 2558 (ที่มา: โปรแกรม Google Earth; <http://www.google.com/earth>, วันที่ค้นข้อมูล 20 มีนาคม 2558) พบว่า ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นจะมีความยาวประมาณ 30–60 เมตร และข้อมูลการศึกษาของ IMPAC-T Project (2012)พบว่าความสูงในบริเวณอ่าวไทยตอนบนมีความยาวคลื่นประมาณ 10–50 เมตร จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่นในบริเวณอ่าวไทยตอนบนมีค่าประมาณ 0.6–6.0 ดังนั้นการศึกษารังนี้ จะศึกษาตัวแปรอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าว คือประมาณ 0.5, 1.5 และ 3.0

การพิจารณาความสูงคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะโครงสร้างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ขึ้นอยู่กับความชันคลื่นดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา คือค่าความชันคลื่น โดยจะเปลี่ยนแปลงค่าความชันทั้งสิ้น 3 ช่วงความชันคลื่น คือ 0.010-0.015, 0.020-0.025 และ 0.030-0.035

สรุปการออกแบบการทดลองในศึกษาครั้งนี้ โดยตัวแปรที่สนใจมีทั้งสิ้น 3 ตัวแปร คือ ระดับน้ำ(d) ความชันคลื่น และอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับยาวคลื่น ซึ่งจะได้จำนวนกรณีการศึกษาทั้งหมด 36 กรณีศึกษา ดังตารางที่ 3-1



Overview of the wave basin
(dimension in meter)

รูปที่ 3-4 การติดตั้งเขื่อนกันคลื่นในอ่างจำลองคลื่น

ตารางที่ 3-1 รายชื่อเงื่อนไขการศึกษา

| เงื่อนไขการศึกษา | | ความชื้นคลื่นวิ่งเข้าสู่โครงสร้าง(H _v /L) | | | | |
|------------------------|--------------|--|----------------------|---------------------|-------------|-------------|
| | | 0.0105-0.0152(W01) | 0.0212-0.0252 (W02) | 0.0294-0.0351 (W03) | | |
| ระดับน้ำในอ่างจำลอง(d) | 0.30 m (D30) | อัตราส่วนระหว่างระยะช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่น (B/L) | 0.46-0.54 (BL050) | D30BL050W01 | D30BL050W02 | D30BL050W03 |
| | | | 1.42-1.56 (BL150) | D30BL150W01 | D30BL150W02 | D30BL150W03 |
| | | | 2.78-2.93 (BL300) | D30BL300W01 | D30BL300W02 | D30BL300W03 |
| | 0.40 m (D40) | | 0.46-0.54 (BL050) | D40BL050W01 | D40BL050W02 | D40BL050W03 |
| | | | 1.42-1.56 (BL150) | D40BL150W01 | D40BL150W02 | D40BL150W03 |
| | | | 2.78-2.93 (BL300) | D40BL300W01 | D40BL300W02 | D40BL300W03 |
| | 0.45 m (D45) | | 0.46-0.54 (BL050) | D45BL050W01 | D45BL050W02 | D45BL050W03 |
| | | | 1.42-1.56 (BL150) | D45BL150W01 | D45BL150W02 | D45BL150W03 |
| | | | 2.78-2.93 (BL300) | D45BL300W01 | D45BL300W02 | D45BL300W03 |
| | 0.50 m (D50) | | 0.46-0.54 (BL050) | D50BL050W01 | D50BL050W02 | D50BL050W03 |
| | | | 1.42-1.56 (BL150) | D50BL150W01 | D50BL150W02 | D50BL150W03 |
| | | | 2.78-2.93 (BL300) | D50BL300W01 | D50BL300W02 | D50BL300W03 |

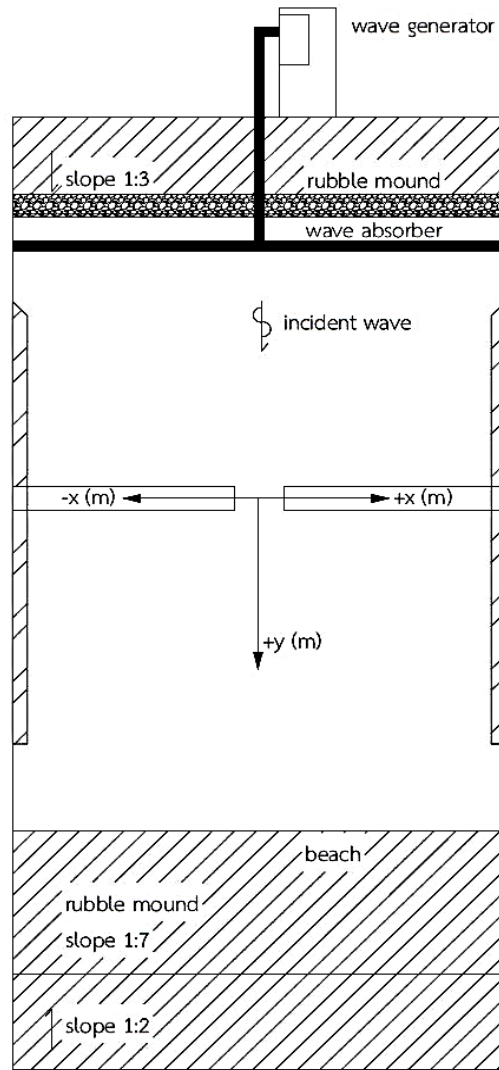
3.4.2 การเก็บข้อมูลการจำลอง

การศึกษาในครั้งนี้จะทำการเก็บข้อมูลของความสูงคลื่นและข้อมูลของกระแสน้ำทั้งก่อนเข้าปะทะกับโครงสร้างและหลังปะทะกับโครงสร้างเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลที่ของการเปลี่ยนแปลงคลื่นและกระแสน้ำเนื่องจากผลของเขื่อนกันคลื่น การเก็บข้อมูลก่อนปะทะและหลังปะทะจะทำการเก็บที่แตกต่างกัน โดยจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

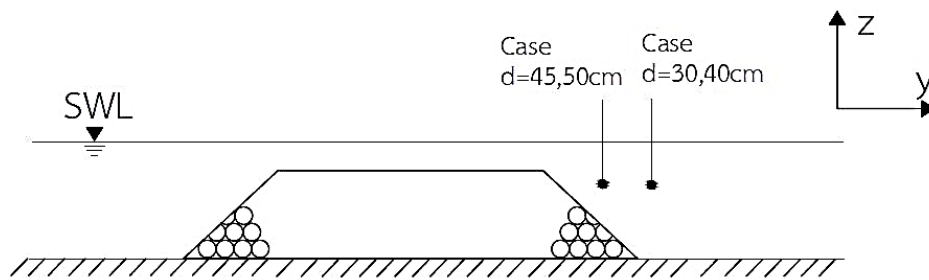
การเก็บข้อมูลคลื่นในการศึกษานี้ จะใช้เครื่องมือเครื่องวัดความสูงคลื่นแบบ CH-403A & CHT4-40 ของบริษัท Kennek มีข้อจำกัดในการติดตั้งเครื่องมือเพื่อเก็บข้อมูลความสูงคลื่นโดยเครื่องมือมีความยาวระหว่างหัวรับสัญญาณจนถึงก้านเครื่องวัดสามารถจมน้ำได้ลึกจากระดับผิวน้ำเท่ากับ 0.22 เมตร และหัวรับสัญญาณต้องจมที่ระดับน้ำอย่างต่ำ เท่ากับ 0.05 เมตร ดังนั้นจึงพิจารณาตำแหน่งเก็บข้อมูลวัดความสูงคลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของช่วงที่สามารถวัดได้ซึ่งเท่ากับ 0.13 เมตร จากระดับน้ำนิ่ง ทำการบันทึกข้อมูลที่ความถี่ 50 ข้อมูลต่อวินาที ต่อเนื่องกันเป็นเวลา 30 วินาที

การเก็บข้อมูลคลื่นในแนวระนาบจะแบ่งกันพิกัดออกเป็นสองแกน โดยกำหนดแนวแกน x เป็นแกนขนานกับแนวชายฝั่ง (along shore) แนวแกน y เป็นแกนตั้งฉากกับแนวชายฝั่ง (cross shore) โดยมีตำแหน่งศูนย์กลางการวัด ($x=0, y=0$) อยู่ที่กึ่งกลางของสันเขื่อนกันคลื่นและกึ่งกลางระหว่างช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น ดังรูปที่ 3-4 โดยที่พิกัดแกน x มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 5.00 เมตร และ พิกัดแกน y มากที่สุดเท่ากับ 8.00 เมตร โดยให้ทิศทางของแนวแกนเป็นดังรูปที่ 3-4

การเก็บข้อมูลคลื่นด้านหลังเขื่อนกันคลื่นนั้น ต้องพิจารณาการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ เมื่อระดับน้ำลดลง ทำให้ความลึกน้ำหลังโครงสร้างบริเวณความลาดชันของฐานมีความลึกไม่เพียงพอสำหรับติดตั้งเครื่องมือเก็บข้อมูล(ต้องการความลึกน้ำอย่างน้อย 0.13 เมตร) ทำให้ตำแหน่งการเก็บข้อมูลเริ่มแรกนั้นแตกต่างกัน โดยกรณีความลึกน้ำเท่ากับ 0.30 และ 0.40 เมตร จะเริ่มเก็บข้อมูลห่างจากขอบของสันโครงสร้างเท่ากับ 0.30 เมตร(เมื่อรวมกับครึ่งหนึ่งของความกว้างของเขื่อนกันคลื่นจะได้พิกัดเป็น (0,0.40)) และในกรณีความลึกน้ำเท่ากับ 0.45 และ 0.50 เมตร จะเริ่มเก็บข้อมูลห่างจากขอบสันโครงสร้างเท่ากับ 0.20 เมตร(เมื่อรวมกับครึ่งหนึ่งของความกว้างของเขื่อนกันคลื่นจะได้พิกัดเป็น (0,0.30)) ดังรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-4 แกนพิกัดในการอ้างอิงเพื่อเก็บข้อมูลการจำลอง



รูปที่ 3-5 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการเก็บข้อมูลเริ่มแรกในแต่ละกรณี

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การเก็บข้อมูลด้านหลังเขื่อนกันคลื่นนั้นจะเก็บเป็นพื้นที่กว้างมาก แต่ไม่มีระบุอย่างแน่ชัดว่าผลของเขื่อนกันคลื่นนั้นทำให้คลื่นเปลี่ยนแปลงในบริเวณด้านหลังเขื่อนกันคลื่นมากน้อยเพียงใด เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของคลื่นในหลายการศึกษาจะแสดงตำแหน่งของข้อมูลเป็นจำนวนเท่าอัตราส่วนระหว่างระยะของช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่น (B/L) การศึกษานี้เนื่องจากมีข้อจำกัดของการจำลอง (ขนาดของอ่างจำลองคลื่น) ทำให้ในบางกรณีศึกษาเก็บข้อมูลได้ไม่ครอบคลุมทั้งหมด

การเปลี่ยนแปลงของคลื่นด้านหลังเขื่อนกันคลื่นจะมีการอัตราการเปลี่ยนแปลงมากในบางพื้นที่ของด้านหลังของเขื่อนกันคลื่น โดยเฉพาะบริเวณใกล้ปลายเขื่อนกันคลื่นและบริเวณช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น ซึ่งจำเป็นต้องเก็บข้อมูลในบริเวณนั้นอย่างละเอียด ตำแหน่งในการเก็บข้อมูลจำเป็นต้องคำนึงถึงผลของระดับความลึกน้ำที่เพียงพอสำหรับการติดตั้งเครื่องมือดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และระยะห่างของช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น ดังนั้นตำแหน่งของการเก็บข้อมูลคลื่นในแต่ละกรณีศึกษามีรายละเอียดดังนี้

ตำแหน่งในแนวแกน x ขนานกับชายฝั่ง(along shore)

- 1) กรณีค่า B/L เท่ากับ 0.50 ในแนวแกน x จะมีตำแหน่งการเก็บข้อมูล ในตำแหน่ง 0.00, ± 0.50 , ± 0.60 , ± 0.65 , ± 0.70 , ± 0.75 , ± 0.80 , ± 0.85 , ± 0.90 , ± 0.95 , ± 1.00 , ± 1.50 , ± 2.00 , ± 2.50 , ± 3.50 , ± 4.30 เมตร
- 2) กรณีค่า B/L เท่ากับ 1.50 ในแนวแกน x จะมีตำแหน่งการเก็บข้อมูล ในตำแหน่ง 0.00, ± 0.70 , ± 1.30 , ± 1.35 , ± 1.40 , ± 1.45 , ± 1.50 , ± 1.55 , ± 1.60 , ± 1.65 , ± 1.70 , ± 2.00 , ± 2.50 , ± 3.00 , ± 3.50 , ± 4.30 เมตร
- 3) กรณีค่า B/L เท่ากับ 3.0 ในแนวแกน x จะมีตำแหน่งการเก็บข้อมูล ในตำแหน่ง 0.00, ± 0.70 , ± 1.30 , ± 1.35 , ± 1.40 , ± 1.45 , ± 1.50 , ± 1.55 , ± 1.60 , ± 1.65 , ± 1.70 , ± 2.00 , ± 2.50 , ± 3.00 , ± 3.50 , ± 4.30 เมตร

ตำแหน่งในแนวแกน y ตั้งฉากกับชายฝั่ง (cross shore)

- 1) กรณีระดับความลึกน้ำ เท่ากับ 0.35, 0.40 เมตร ในแนวแกน y จะมีตำแหน่งการเก็บข้อมูล ในตำแหน่ง 0.60, 1.00, 1.50, 2.00, 4.00, 6.00 เมตร
- 2) กรณีระดับความลึกน้ำ เท่ากับ 0.45, 0.50 เมตร ในแนวแกน y จะมีตำแหน่งการเก็บข้อมูล ในตำแหน่ง 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 4.00, 6.00 เมตร

3.5 วิธีการดำเนินการทดลอง

3.5.1 การเตรียมก่อนดำเนินงานทดลอง

1. ติดตั้งแบบจำลองเชื่อมกันคลื่นหินทิ้งในอ่างจำลองคลื่นตามตำแหน่งที่ได้ออกแบบไว้ พร้อมทั้งติดตั้งกำแพงสลาย (Wave absorber) พลังงานคลื่นบริเวณผนังอ่างจำลองคลื่น เพื่อลดคลื่นที่สะท้อนจากผนังอ่างจำลองคลื่น
2. ติดตั้งเครื่องวัดระดับน้ำภายในอ่างจำลองคลื่น เพื่อใช้วัดระดับน้ำนิ่ง (Still water level, SWL)
3. เติมน้ำเข้าสู่อ่างจำลองคลื่นด้วยเครื่องสูบน้ำ จนได้ระดับน้ำนิ่งที่วัดได้จากเครื่องมือตามที่ได้ออกแบบไว้

3.5.2 การดำเนินการทดลอง

1. บันทึกระดับน้ำนิ่งจากเครื่องมือวัดระดับน้ำก่อนการทดลอง
2. ปรับและเปิดเครื่องกำเนิดคลื่นให้ได้คลื่นตามเงื่อนไขคลื่นที่ออกแบบไว้ เปิดเครื่องกำเนิดคลื่นทิ้งไว้จนกระทั่งคลื่นมีลักษณะการเคลื่อนที่คงที่
3. ทำการวัดและเก็บข้อมูลคลื่นตามตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้
4. บันทึกระดับน้ำที่วัดได้จากเครื่องมือวัดระดับน้ำหลังการทดลอง
5. ทำขั้นตอน 1 ถึง 4 ซ้ำ โดยทำการเปลี่ยนค่าความชันคลื่นจนครบทั้ง 3 ช่วงความชันคลื่น
6. ทำการเปลี่ยนระดับน้ำโดยการเติมน้ำเข้าสู่อ่างจำลองคลื่นให้ได้ตามที่ออกแบบไว้ และทำขั้นตอน 1 ถึง 5 ซ้ำ โดยทำการเปลี่ยนระดับน้ำจนครบทั้ง 4 ระดับ
7. ทำการปรับเงื่อนไขคลื่นใหม่หรือช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นในแบบจำลอง และทำขั้นตอน 1 ถึง 6 ซ้ำ โดยทำการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความกว้างช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นกับความยาวคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้าง จนครบทั้ง 3 ช่วงอัตราส่วน

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดลองแบบจำลองทางกายภาพทั้งสิ้น 36 กรณี โดยในแต่ละกรณี จะใช้เวลาในการจำลองต่อเนื่องประมาณ 7-9 ชั่วโมง ใช้เวลาการสร้างแบบจำลองและทดลองเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2558 ถึงเดือนเมษายน 2559 รวมระยะเวลาในการจำลองและเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 9 เดือน

บทที่ 4

พฤติกรรมการณ์การส่งผ่านของคลื่น

ในการศึกษาครั้งนี้ เมื่อทำการวัดข้อมูลการเปลี่ยนแปลงระดับผิวน้ำตามเวลาและตำแหน่งต่างๆในอ่างจำลองคลื่นด้วยข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดจะเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆในแต่ละตำแหน่ง เมื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปปรับเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการปรับเทียบเครื่องมือ จะได้ข้อมูลความสูงคลื่น (wave height) คาบคลื่น (wave period) และความยาวคลื่น (wave length) ซึ่งเป็นตัวแทนของข้อมูลในตำแหน่งต่างๆ จากนั้นจึงวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การส่งผ่านของคลื่น และสรุปผลพฤติกรรมการณ์การส่งผ่านของคลื่น โดยรายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้

4.1 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่น

การศึกษาครั้งนี้ทำการเก็บข้อมูลของคลื่นที่จำลองโดยใช้เครื่องมือวัดความสูงของคลื่น เครื่องมือจะเก็บข้อมูลระดับผิวน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาต่างๆ จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของคลื่น (wave characteristic) ได้แก่ ความสูงคลื่น (wave height) ความยาวคลื่น (wave length) คาบคลื่น (wave period) ด้วยวิธีการทางสถิติ ผลที่ได้คือคุณสมบัติคลื่นที่เป็นตัวแทนของคลื่นในแต่ละตำแหน่ง

ข้อมูลคลื่นที่เก็บเป็นคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะโครงสร้างและคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้าง โดยเก็บในช่วงเวลาเดียวกัน เพื่อนำคุณสมบัติคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นไปพิจารณา ร่วมกับคุณสมบัติคลื่นด้านหลังโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม (wave transmission coefficient, K_t)

4.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม (wave transmission coefficient, K_t) คือ อัตราส่วนระหว่างความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นที่มีผลของทั้งการซึมผ่าน การข้ามล้นโครงสร้าง และการกระจายตัวผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น ต่อความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น ดังสมการที่ 4-1 โดยการศึกษาจะพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมการณ์คลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา และเปรียบเทียบกับเปลี่ยนแปลงไปของพฤติกรรมการณ์คลื่นในแต่ละกรณีเงื่อนไขคลื่น

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

- เมื่อ K_t คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม (wave transmission coefficient),
 H_t คือ ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น (transmission wave height)
 H_i คือ ความสูงคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น (incident wave height)

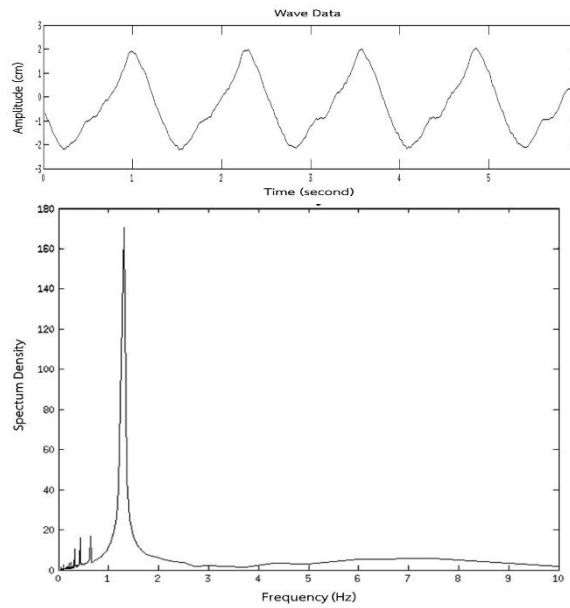
4.1.2 วิธีการหาความสูงคลื่นนัยสำคัญ คาบคลื่น และความยาวคลื่น

การเก็บของมูลคลื่นในแต่ละตำแหน่งจะใช้เครื่องมือวัดระดับผิวน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลที่บันทึกได้เป็นข้อมูลต่อเนื่องเป็นคลื่นหลายลูก เพื่อให้สามารถหาคุณลักษณะของคลื่นในแต่ละลูกจำเป็นต้องตัดข้อมูลออกเป็นช่วงๆตามคาบคลื่น การหาคาบคลื่นจะใช้วิธีการวิเคราะห์ความถี่ (frequency analysis) โดยการแปลงข้อมูลที่อยู่ในโดเมนเวลา (time domain) เป็นข้อมูลที่อยู่ในโดเมนความถี่ (frequency domain) เพื่อหาคาบคลื่นที่เป็นตัวแทนของชุดข้อมูล และใช้คาบคลื่นไปวิเคราะห์หาความสูงคลื่นและความยาวคลื่นต่อไป

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์ความถี่ด้วยวิธี Power spectral energy (PSE) เพื่อแปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปโดเมนเวลาให้อยู่ในรูปโดเมนความถี่ ในการแปลงข้อมูลใช้ขั้นตอนทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพลังงานกับความถี่ ซึ่งในกรณีที่ทำการศึกษานี้เป็นคลื่นแบบสม่ำเสมอ (regular wave) กราฟดังกล่าวจึงมีเพียงยอดสูงสุดที่ความถี่เดียว และส่วนกลับของความถี่ทั้งค่าสูงสุดนั้นคือคาบคลื่น ดังตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นที่เก็บบริเวณด้านหน้าโครงสร้างดังรูปที่ 4-1

คาบคลื่นที่ได้จากการวิเคราะห์ความถี่จะนำมาตัดข้อมูลค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่บันทึกอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้หาความสูงคลื่นย่อยๆในแต่ละคาบคลื่น หลังจากนั้นจะนำความสูงคลื่นย่อยมาวิเคราะห์ทางสถิติ (statistical analysis) เพื่อหาตัวแทนความสูงคลื่น ที่เรียกว่า ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (significant wave height) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญเพื่อใช้ในการศึกษาทางวิศวกรรมชายฝั่งทะเล (US.CERC., 1984)

การวิเคราะห์หาความยาวคลื่นพิจารณาจากการคำนวณด้วยทฤษฎีคลื่นความสูงน้อยดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ในการศึกษาทุกกรณีคลื่นจะถูกจำแนกเป็นคลื่นในความลึกเปลี่ยนแปลง และอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและคาบคลื่น ดังตารางที่ 2-1



รูปที่ 4-1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นที่เก็บบริเวณด้านหน้าโครงสร้าง

ตารางที่ 4-1 รายละเอียดคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา

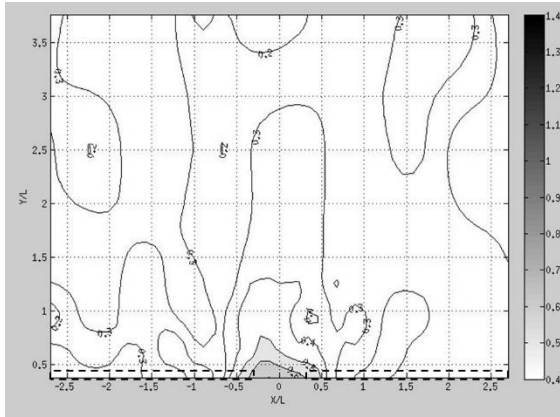
| case | d (m) | B (m) | H_s (m) | T (sec) | L (m) | H_s/L | B/L |
|-------------|-------|-------|-----------|---------|-------|---------|------|
| D30BL050W01 | 0.30 | 0.84 | 0.0230 | 1.10 | 1.59 | 0.0144 | 0.53 |
| D30BL050W02 | 0.30 | 0.84 | 0.0368 | 1.10 | 1.59 | 0.0231 | 0.53 |
| D30BL050W03 | 0.30 | 0.84 | 0.0523 | 1.10 | 1.59 | 0.0328 | 0.53 |
| D30BL150W01 | 0.30 | 2.84 | 0.0270 | 1.25 | 1.87 | 0.0144 | 1.52 |
| D30BL150W02 | 0.30 | 2.84 | 0.0427 | 1.30 | 1.96 | 0.0217 | 1.45 |
| D30BL150W03 | 0.30 | 2.84 | 0.0616 | 1.25 | 1.87 | 0.0330 | 1.52 |
| D30BL300W01 | 0.30 | 2.84 | 0.0107 | 0.83 | 1.02 | 0.0105 | 2.78 |
| D30BL300W02 | 0.30 | 2.84 | 0.0222 | 0.81 | 0.98 | 0.0226 | 2.89 |
| D30BL300W03 | 0.30 | 2.84 | 0.0305 | 0.81 | 0.98 | 0.0311 | 2.89 |
| D40BL050W01 | 0.40 | 0.84 | 0.0226 | 1.15 | 1.82 | 0.0124 | 0.46 |
| D40BL050W02 | 0.40 | 0.84 | 0.0458 | 1.15 | 1.82 | 0.0252 | 0.46 |
| D40BL050W03 | 0.40 | 0.84 | 0.0636 | 1.15 | 1.82 | 0.0349 | 0.46 |
| D40BL150W01 | 0.40 | 2.84 | 0.0218 | 1.15 | 1.82 | 0.0120 | 1.56 |
| D40BL150W02 | 0.40 | 2.84 | 0.0386 | 1.15 | 1.82 | 0.0212 | 1.56 |
| D40BL150W03 | 0.40 | 2.84 | 0.0534 | 1.15 | 1.82 | 0.0294 | 1.56 |
| D40BL300W01 | 0.40 | 2.84 | 0.0146 | 0.79 | 0.96 | 0.0151 | 2.95 |
| D40BL300W02 | 0.40 | 2.84 | 0.0229 | 0.79 | 0.96 | 0.0237 | 2.95 |
| D40BL300W03 | 0.40 | 2.84 | 0.0338 | 0.79 | 0.96 | 0.0350 | 2.95 |
| D45BL050W01 | 0.45 | 0.84 | 0.0228 | 1.07 | 1.67 | 0.0136 | 0.50 |
| D45BL050W02 | 0.45 | 0.84 | 0.0339 | 1.03 | 1.57 | 0.0216 | 0.54 |
| D45BL050W03 | 0.45 | 0.84 | 0.0550 | 1.03 | 1.57 | 0.0351 | 0.54 |
| D45BL150W01 | 0.45 | 2.84 | 0.0284 | 1.15 | 1.87 | 0.0152 | 1.52 |
| D45BL150W02 | 0.45 | 2.84 | 0.0499 | 1.20 | 2.00 | 0.0250 | 1.42 |
| D45BL150W03 | 0.45 | 2.84 | 0.0654 | 1.15 | 1.87 | 0.0349 | 1.52 |
| D45BL300W01 | 0.45 | 2.84 | 0.0143 | 0.79 | 0.97 | 0.0148 | 2.93 |
| D45BL300W02 | 0.45 | 2.84 | 0.0236 | 0.79 | 0.97 | 0.0244 | 2.93 |
| D45BL300W03 | 0.45 | 2.84 | 0.0331 | 0.79 | 0.97 | 0.0342 | 2.93 |
| D50BL050W01 | 0.50 | 0.84 | 0.0179 | 1.03 | 1.59 | 0.0112 | 0.53 |
| D50BL050W02 | 0.50 | 0.84 | 0.0357 | 1.03 | 1.59 | 0.0224 | 0.53 |
| D50BL050W03 | 0.50 | 0.84 | 0.0535 | 1.03 | 1.59 | 0.0336 | 0.53 |
| D50BL150W01 | 0.50 | 2.84 | 0.0250 | 1.15 | 1.92 | 0.0131 | 1.48 |
| D50BL150W02 | 0.50 | 2.84 | 0.0457 | 1.15 | 1.92 | 0.0239 | 1.48 |
| D50BL150W03 | 0.50 | 2.84 | 0.0650 | 1.15 | 1.92 | 0.0339 | 1.48 |
| D50BL300W01 | 0.50 | 2.84 | 0.0141 | 0.80 | 0.97 | 0.0145 | 2.92 |
| D50BL300W02 | 0.50 | 2.84 | 0.0236 | 0.80 | 0.97 | 0.0243 | 2.92 |
| D50BL300W03 | 0.50 | 2.84 | 0.0329 | 0.80 | 0.97 | 0.0338 | 2.92 |

4.2 ผลการศึกษา

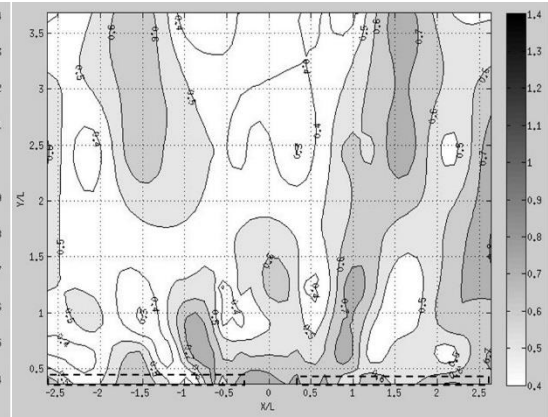
จากการวิเคราะห์ความสูงคลื่นแต่ละกรณี ใช้ข้อมูลความสูงมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมตัวแทนในแต่ละพิกัด นำมาลากเส้นขึ้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมบริเวณด้านหลังโครงสร้าง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์พฤติกรรมของการส่งผ่านของคลื่นในแต่ละกรณีได้โดยกำหนดให้จุด (0,0) เป็นตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น แกน y เป็นค่าของระยะทางแนวตั้งฉากต่อความยาวคลื่น (y/L) แกน x เป็นค่าของระยะทางแนวขนานต่อความยาวคลื่น (x/L) ตามการศึกษาที่ผ่านมาของ Johnson (1951) สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นความจะถูกแบ่งระดับในช่วง 0.40–1.40 ตามระดับชั้นสี่ เรียงจากสีขาวถึงสีดำตามลำดับ และมีเส้นกรอบสี่เหลี่ยม (เส้นประ) แสดงอาณาเขตเขื่อนกันคลื่น ดังรูปที่ 4-2

การศึกษาจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติคลื่นเพื่อให้ได้ตามเงื่อนไขการทดลอง การศึกษาในแต่ละกรณีศึกษาจึงมีคลื่นที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน แต่ยังอยู่ในเงื่อนไขคุณสมบัติคลื่นตามทีออกแบบไว้ และข้อจำกัดของขนาดอ่างจำลองคลื่น ทำให้มีพื้นที่จำกัดในการเก็บข้อมูลคลื่น เมื่อทำการเก็บข้อมูลคลื่นในแต่ละพิกัดแกน x และ แกน y ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.4 และนำพิกัดมาแปลงอยู่ในรูปของค่าของระยะทางแนวตั้งฉากต่อความยาวคลื่น (y/L) กับค่าของระยะทางแนวขนานต่อความยาวคลื่น (x/L) ทำให้พิกัดของข้อมูลในแต่ละกรณีศึกษาจะไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 4-2 เมื่อทำการเปรียบเทียบการพฤติกรรมคลื่นในแต่ละกรณีการศึกษาจึงจำเป็นต้องเลือกขอบเขตของข้อมูลที่ตำแหน่ง แกน y/L และ x/L เดียวกัน แต่เพื่อให้เห็นพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นมากที่สุด ในหัวข้อนี้จึงแสดงรูปเส้นชั้นความสูงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมทั้งหมด

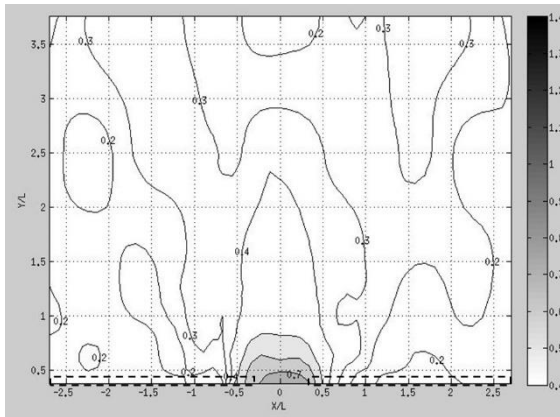
เมื่อพิจารณาการส่งผ่านคลื่นในกรณีอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะ (B/L) ช่วง 0.46-0.54 (BL050) ดังรูปที่ 4-2 ก) ถึง รูปที่ 4-2 ฎ) พบว่า ในกรณีเขื่อนกันคลื่นพื่นน้ำนั้นการส่งผ่านคลื่นส่วนใหญ่เป็นการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น โดยช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นจะเสมือนเป็นจุดกำเนิดคลื่นใหม่และกระจายตัวเข้าไปในพื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่น ผลของค่าความชันคลื่นทำให้การส่งผ่านคลื่นเข้าไปในพื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่นได้มากขึ้น ดังรูปที่ 4-2 ก) ถึง รูปที่ 4-2 ค) เมื่อระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับระดับสันเขื่อนกันคลื่น คลื่นจะสามารถข้ามสันเขื่อนกันคลื่นได้ ทำให้การส่งผ่านคลื่นมีอิทธิพลของการข้ามสันเขื่อนเข้ามาเกี่ยวข้องมากขึ้น การส่งผ่านคลื่นจะเพิ่มขึ้นในพื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่น(ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมมีค่าเพิ่มขึ้น) การกระจายตัวของคลื่นจะกระจายตัวจากพื้นที่อับคลื่นเข้าสู่พื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น โดยอิทธิพลของค่าความชันคลื่นทำให้การส่งผ่านคลื่นข้ามสันเขื่อนกันคลื่นมีค่าสูงขึ้นตามค่าความชันคลื่น ดังรูปที่ 4-2 ง) ถึง รูปที่ 4-2 ฉ)



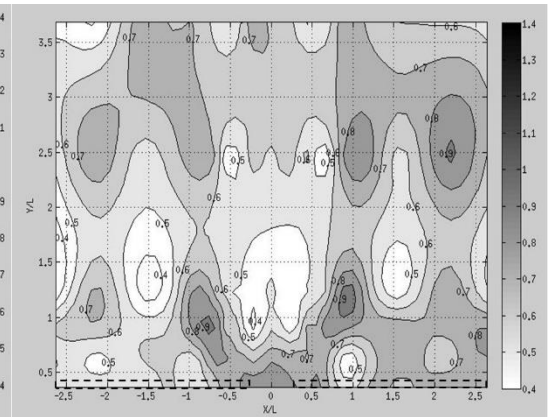
ก) กรณี D30BL050W01



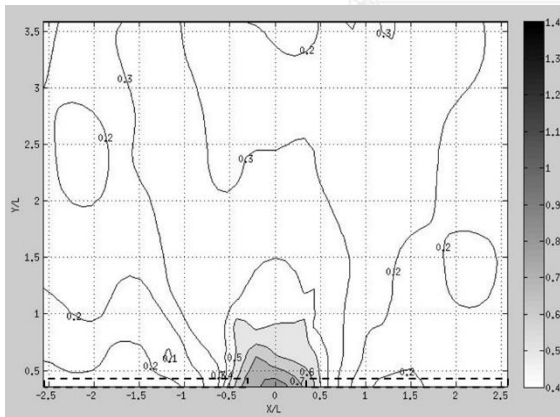
ง) กรณี D40BL050W01



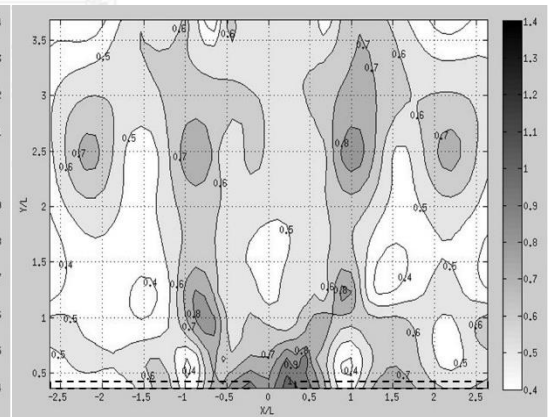
ข) กรณี D30BL050W02



จ) กรณี D40BL050W02

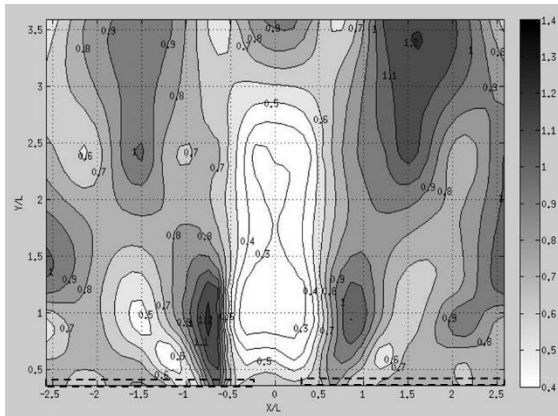


ค) กรณี D30BL050W03

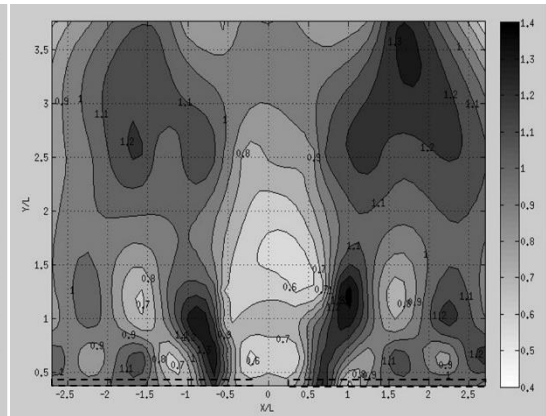


ฉ) กรณี D40BL050W03

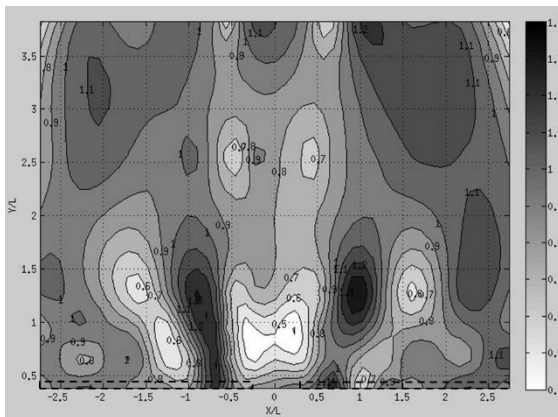
รูปที่ 4-2 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมบริเวณด้านหลังเขื่อนกันคลื่น
ในแต่ละกรณีศึกษา



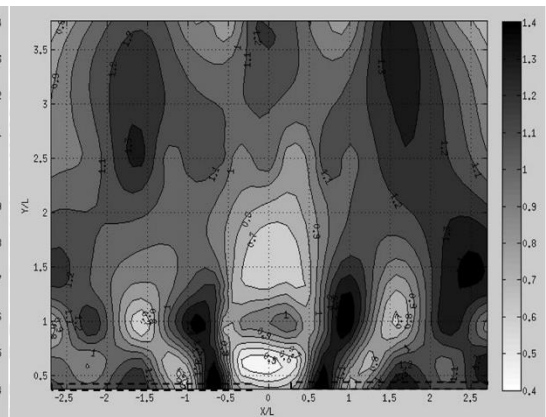
ข) กรณี D45BL050W01



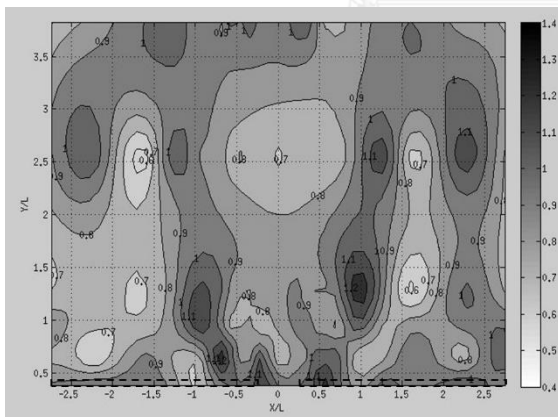
ญ) กรณี D50BL050W01



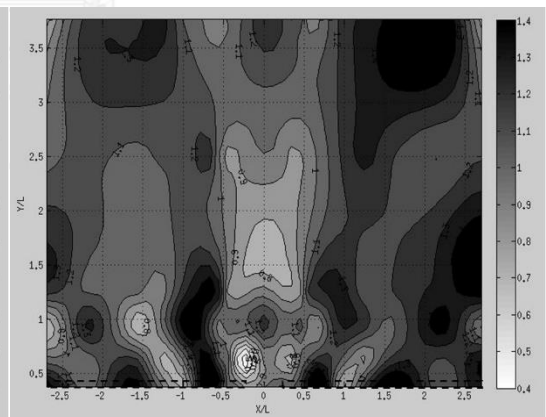
ช) กรณี D45BL050W02



ฎ) กรณี D50BL050W02

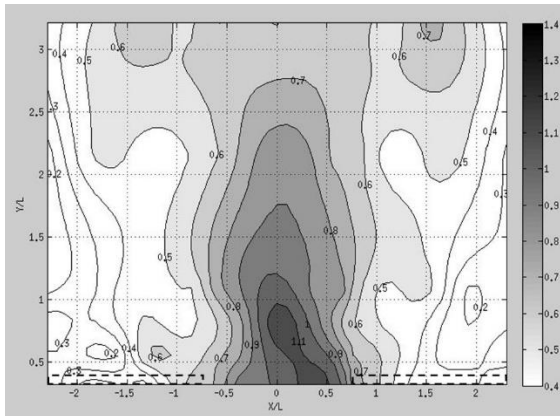


ฉ) กรณี D45BL050W03

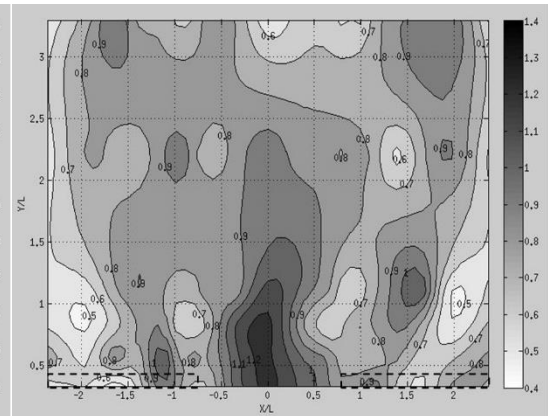


ฏ) กรณี D50BL050W03

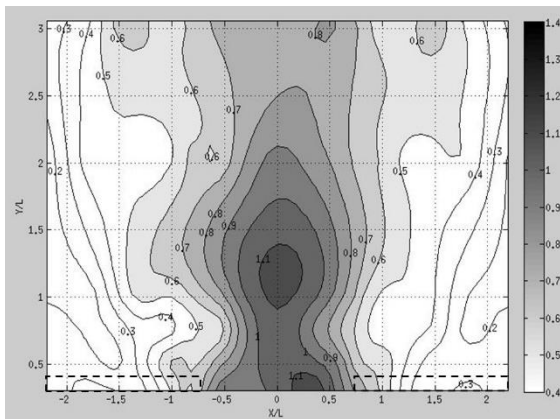
รูปที่ 4-2 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมบริเวณด้านหลังเขื่อนกันคลื่น
ในแต่ละกรณีศึกษา(ต่อ)



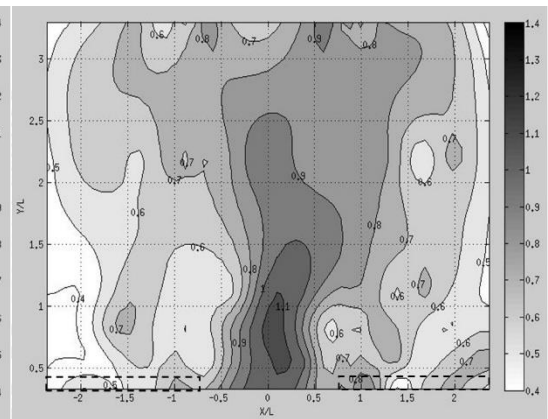
จ) กรณี D30BL150W01



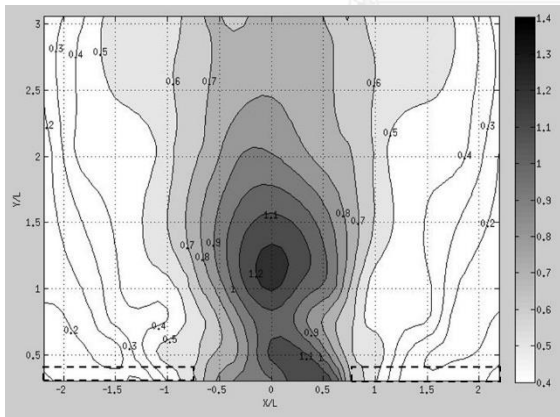
ฉ) กรณี D40BL150W01



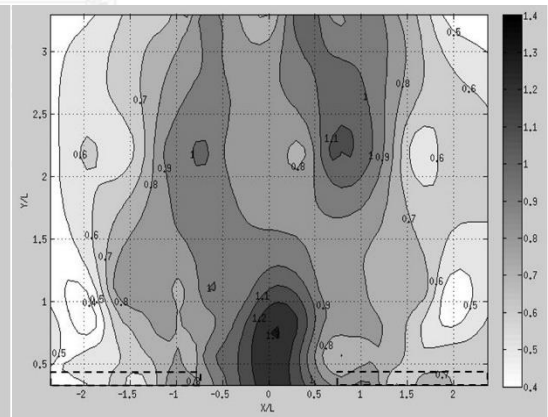
จ) กรณี D30BL150W02



ฉ) กรณี D40BL150W02

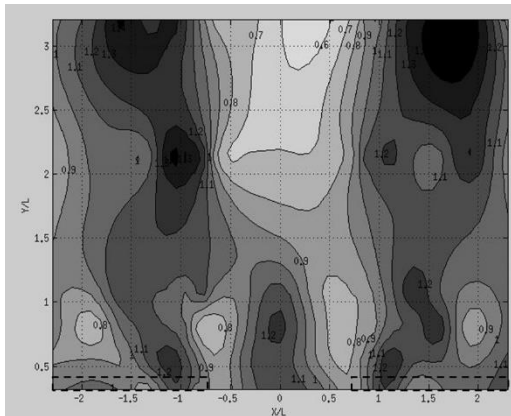


จ) กรณี D30BL150W03

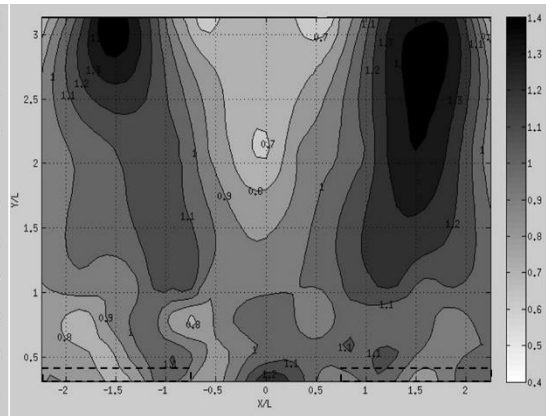


ฉ) กรณี D40BL150W03

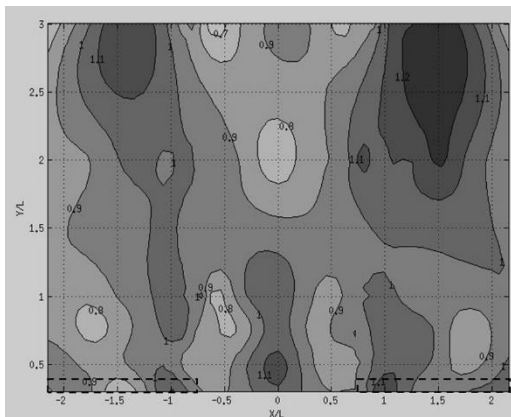
รูปที่ 4-2 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมบริเวณด้านหลังเขื่อนกันคลื่น
ในแต่ละกรณีศึกษา(ต่อ)



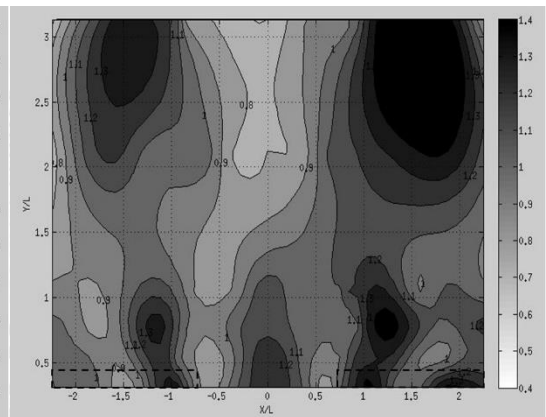
ก) กรณี D45BL150W01



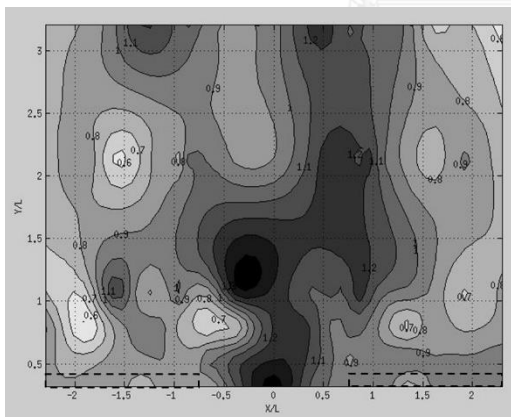
น) กรณี D50BL150W01



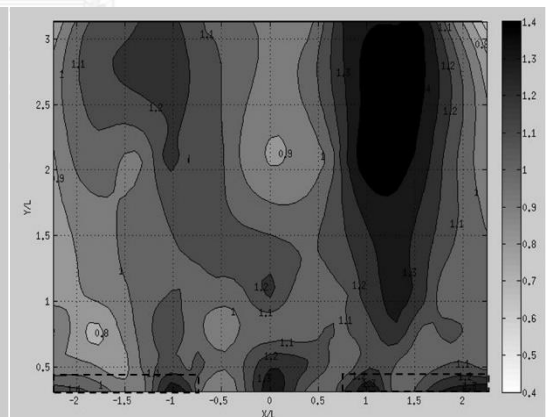
ท) กรณี D45BL150W02



บ) กรณี D50BL150W02

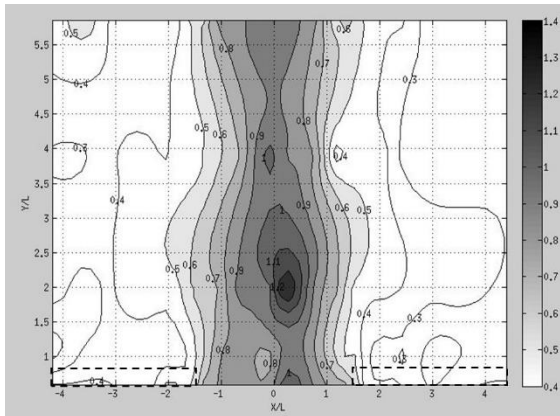


จ) กรณี D45BL150W03

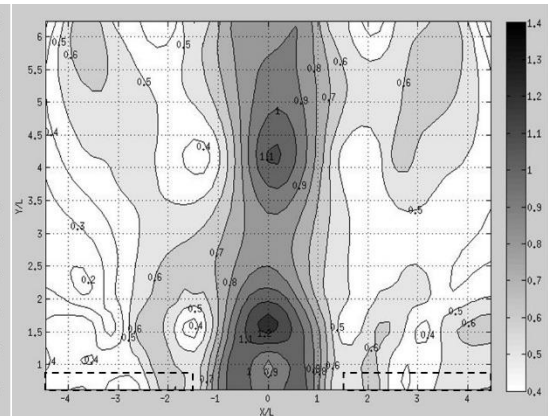


ป) กรณี D50BL150W03

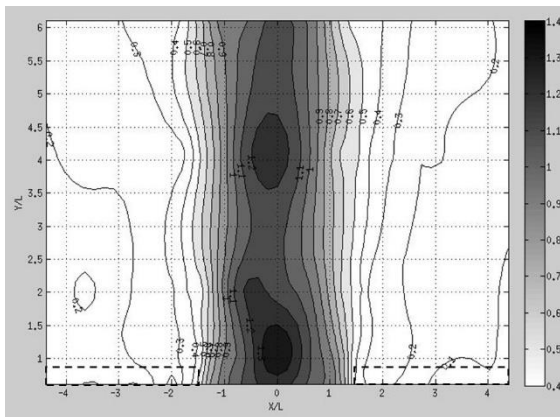
รูปที่ 4-2 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมบริเวณด้านหลังเขื่อนกันคลื่น
ในแต่ละกรณีศึกษา(ต่อ)



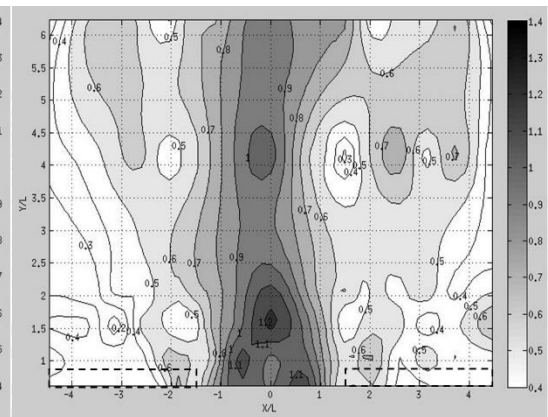
ฉ) กรณี D30BL300W01



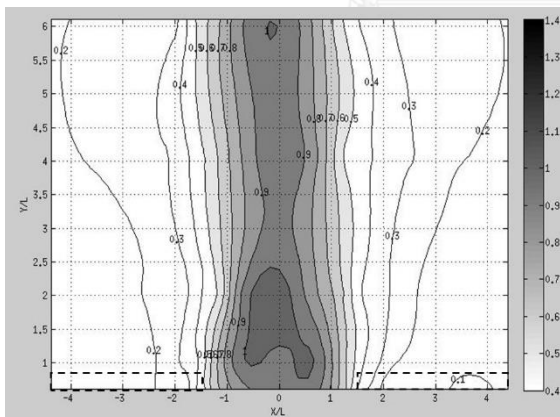
ฟ) กรณี D40BL300W01



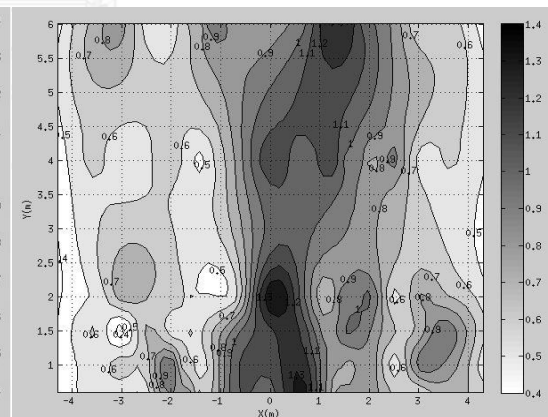
ฝ) กรณี D30BL300W02



ภ) กรณี D40BL300W02

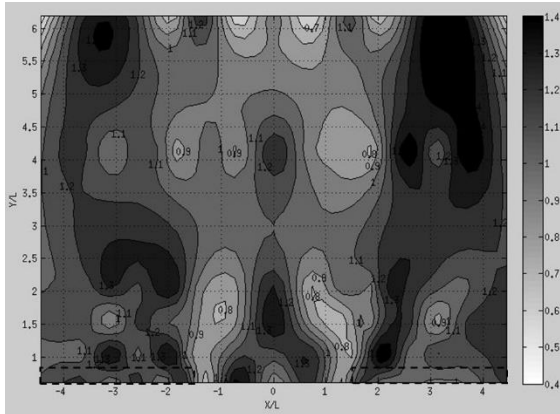


พ) กรณี D30BL300W03

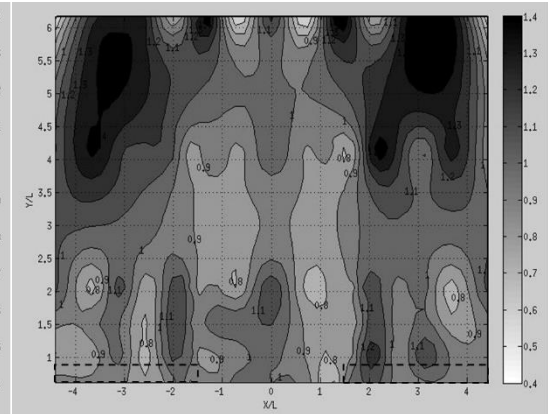


ม) กรณี D40BL300W03

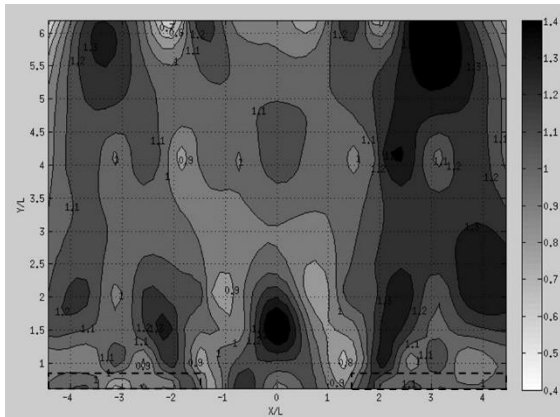
รูปที่ 4-2 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมบริเวณด้านหลังเขื่อนกันคลื่น
ในแต่ละกรณีศึกษา(ต่อ)



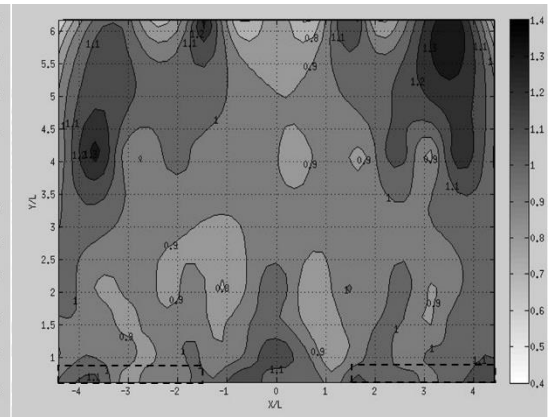
ย) กรณีส D45BL300W01



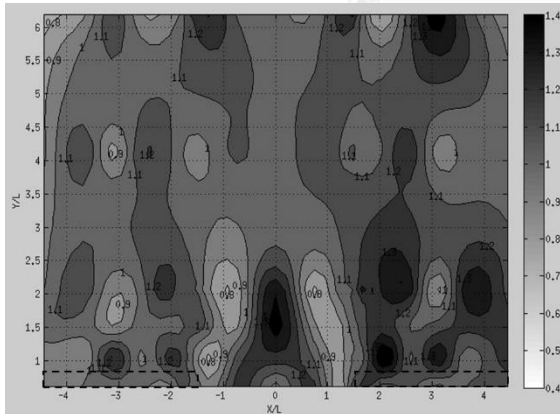
จ) กรณีส D50BL300W01



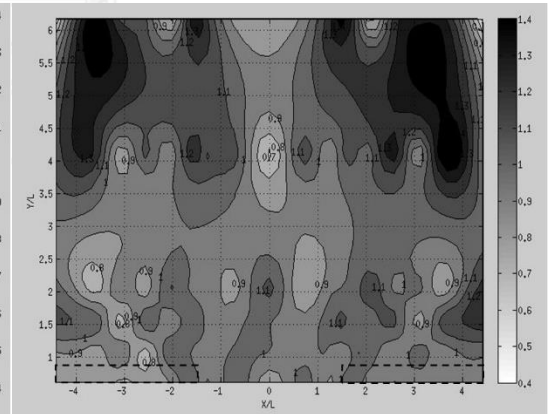
ร) กรณีส D45BL300W02



ค) กรณีส D50BL300W02



ล) กรณีส D45BL300W03



ช) กรณีส D50BL300W03

รูปที่ 4-2 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมบริเวณด้านหลังเชื่อมกันคลื่น
ในแต่ละกรณีศึกษา(ต่อ)

เมื่อระดับน้ำเพิ่มสูงท่วมสันเขื่อนกันคลื่นพฤติกรรมคลื่นจะเปลี่ยนเป็นเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ การส่งผ่านคลื่นด้วยการข้ามสันคลื่นจะมีความมากขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในพื้นที่อับคลื่นมีค่าสูงมากขึ้นการกระจายตัวของคลื่นจะกระจายตัวจากพื้นที่อับคลื่นเข้าสู่พื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นมากขึ้น และส่งผลให้บริเวณพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นมีลักษณะการแทรกสอดแบบหักล้าง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในพื้นที่นั้นจึงมีค่าลดลง แต่การเพิ่มขึ้นของความชันทำให้การส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากความชันคลื่นทำให้เกิดการข้ามสันเขื่อนกันคลื่นด้วยเช่นกัน ทำให้อิทธิพลของการข้ามสันเขื่อนกันคลื่นมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในพื้นที่ด้านหลังของเขื่อนกันคลื่นมากกว่า ดังรูปที่ 4-2 ข) ถึง รูปที่ 4-2 ฎ)

เมื่อพิจารณาเพิ่มอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะ (B/L) มากขึ้นอยู่ช่วง 1.42-1.56 (BL150) ดังรูปที่ 4-2 ฐ) ถึง รูปที่ 4-2 ป) พบว่า เมื่อพิจารณาในเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ การเพิ่มของอัตราส่วน B/L ที่มากขึ้นส่งผลให้การส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นเพิ่มสูงขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น และมีคลื่นการกระจายตัวเข้าสู่พื้นที่อับคลื่นมากขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในพื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่นมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4-2 ฐ) ถึง รูปที่ 4-2 ฉ) เมื่อระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับระดับสันเขื่อนกันคลื่น การส่งผ่านคลื่นจะได้รับอิทธิพลของการข้ามสันเขื่อนมากขึ้น ทำให้การส่งผ่านคลื่นในพื้นที่อับคลื่นมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้การส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นลดลง เนื่องจากคลื่นข้ามสันเขื่อนกันคลื่นในพื้นที่อับคลื่นจะกระจายตัวเข้าสู่พื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นมากขึ้น ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น ดังรูปที่ 4-2 ฉ) ถึง รูปที่ 4-2 ต) และเมื่อระดับน้ำเพิ่มท่วมเหนือสันเขื่อนกันคลื่นมากขึ้น พฤติกรรมเขื่อนกันคลื่นเปลี่ยนเป็นเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ การส่งผ่านคลื่นจากพื้นที่อับคลื่นเข้าสู่พื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นจะเพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง และลดอิทธิพลการส่งคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นลง แต่อย่างไรก็ตาม การส่งผ่านคลื่นรวมยังมีค่าสูง(ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมมีค่าสูง) เนื่องจากอิทธิพลของคลื่นที่ข้ามสันเขื่อนกันคลื่นยังมีค่าที่สูง ดังรูปที่ 4-2 ฉ) ถึง รูปที่ 4-2 ป)

เมื่อพิจารณาเพิ่มอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะ (B/L) มากขึ้นอยู่ช่วง 2.78-2.93 (BL300) ดังรูปที่ 4-2 ผ) ถึง รูปที่ 4-2 ช) ซึ่งเป็นค่าสูงสุดในการศึกษาครั้งนี้ พบว่า ในเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ การส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นจะเพิ่มสูงขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น แต่การกระจายตัวเข้าสู่พื้นที่อับคลื่นมีค่าลดลง และจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความสูงคลื่นในช่วงของพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นอย่างมาก (มีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมสูง) อิทธิพลของค่าความชันคลื่นมีน้อย

มาต่อการส่งผ่านคลื่น ดังรูปที่ 4-2 ผ) ถึง รูปที่ 4-2 พ) เมื่อพิจารณาการเพิ่มระดับน้ำเท่ากับสันเขื่อนกันคลื่น อิทธิพลของการข้ามสันคลื่นจะมีมากขึ้นทำให้พื้นที่อับคลื่นมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมที่สูงขึ้นจากกรณีเขื่อนกันคลื่นพื่นน้ำ ถึงแม้การเพิ่มขึ้นของการข้ามสันเขื่อนกันคลื่น แต่การส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นยังมีอิทธิพลต่อการส่งผ่านคลื่นในทิศทางตั้งฉากกับเขื่อนกันคลื่นในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น แต่ผลของการกระจายตัวของคลื่นจากพื้นที่อับคลื่นเข้าสู่พื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นทำให้ช่วงการเปลี่ยนแปลงความสูงคลื่นเลื่อนเข้าสู่พื้นที่อับคลื่นมากขึ้น ดังรูปที่ 4-2 พ) ถึง รูปที่ 4-2 ม) เมื่อระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้นจนท่วมเหนือสันเขื่อนกันคลื่น พฤติกรรมเขื่อนกันคลื่นเปลี่ยนเป็นเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ การข้ามสันเหนือสันคลื่นเพิ่มสูงขึ้น ทำให้การกระจายตัวของคลื่นจากพื้นที่อับคลื่นเข้าสู่พื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นมีค่าสูงขึ้น ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น ส่งผลให้การส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นในทิศทางตั้งฉากกับเขื่อนกันคลื่นมีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำเหนือสันเขื่อนกันคลื่นทำให้เกิดการข้ามสันมากขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในพื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่นมีค่าที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 4-2 ย) ถึง รูปที่ 4-2 ช)

จากผลการศึกษาพบว่า ในบางกรณีโดยเฉพาะเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมที่มากกว่า 1 ในบริเวณพื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่น แต่ไม่สามารถสรุปได้ว่าพลังงานคลื่นเพิ่มขึ้นเนื่องจากข้อมูลความเร็วกระแส น้ำ ดังนั้นจึงยังไม่สามารถวิเคราะห์และสรุปได้อย่างแน่ชัด อีกทั้งการศึกษานี้พบว่าคลื่นพื้นที่ด้านหลังเขื่อนคลื่นอาจได้รับอิทธิพลของคลื่นสะท้อนจากด้านข้างและด้านท้ายอ่างจำลองคลื่นที่ได้ใช้อุปกรณ์สลายพลังงานป้องกันแล้ว ผลของคลื่นสะท้อนอาจทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีค่าที่สูง ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการศึกษา การศึกษานี้จึงทำเพียงการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการส่งผ่านคลื่นระหว่างกันแต่ละเงื่อนไขการศึกษาโดยพิจารณารวมผลของคลื่นที่สะท้อนกำแพงด้านข้างด้วย

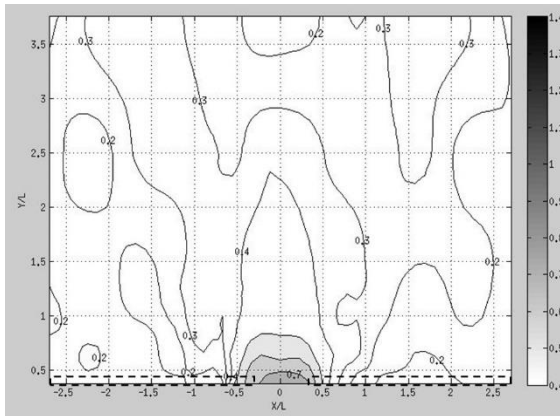
ผลการศึกษาจำเป็นต้องวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นรวม โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับตัวแปรต่างๆที่ศึกษา เพื่ออธิบายการส่งผ่านคลื่นภายใต้อิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ศึกษา และวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นในทิศทางขนานกับเขื่อนกันคลื่นที่มีในแบบจำลอง 3 มิติ โดยการวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นรวมจะอภิปรายในหัวข้อถัดไป

4.3 การเปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมา

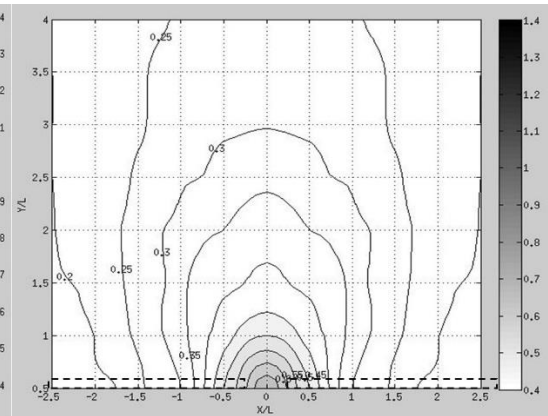
จากการศึกษาที่ผ่านมาได้กล่าวถึงคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงในบริเวณด้านหลังเชื่อมกันคลื่นหินทิ้งแบบพ่นน้ำหลังจากคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง คลื่นบางส่วนจะมีการสะท้อนกลับและแตกตัวในบริเวณด้านหน้าโครงสร้าง คลื่นส่วนที่เหลือจะซึมผ่านโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นและกระจายตัวเข้าสู่พื้นที่ด้านหลังโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น(ทั้งพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นและพื้นที่อับคลื่น)ผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น ((Johnson, 1951), (Penney and Price, 1952), (Wiegel, 1962), (Robert G. and Robert A., 1984), (Sorensen, 1993))

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการศึกษาที่ผ่านมาของการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นแบบพ่นน้ำของ Johnson (1951) ที่ได้เสนอรูปแบบความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมกับตัวแปรของทิศทางการกระจายตัวของคลื่นทำมุมกับสิ่งกีดขวาง (β) และอัตราส่วนของช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นกับความยาวคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น (B/L) เพื่อให้สอดคล้องกับการศึกษานี้ จะพิจารณาทิศทางการกระจายตัวของคลื่นทำมุมตั้งฉากกับสิ่งกีดขวาง ($\beta = 90^\circ$) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นพ่นน้ำของการศึกษาครั้งนี้และผลการศึกษาของ Johnson (1951) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีรูปแบบที่ใกล้เคียงกัน นั่นคือการส่งผ่านคลื่นของการศึกษาครั้งนี้มีรูปแบบเดียวกันกับการศึกษาที่ผ่านมา เมื่อพิจารณาอัตราส่วน $B/L \approx 0.5$ (รูปที่ 4-3 ก) และรูปที่ 4-4 ก)) พบว่าลักษณะการกระจายคลื่นเสมือนช่องว่างเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นใหม่ ทิศทางการส่งผ่านส่วนใหญ่ยังเป็นทิศทางเดิมกับทิศทางคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะเชื่อมกันคลื่นและกระจายตัวเข้าสู่พื้นที่อับคลื่น เมื่ออัตราส่วน B/L เพิ่มขึ้นจะมีการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นมากขึ้นและมีการกระจายตัวเข้าสู่พื้นที่อับคลื่นมากขึ้น มีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นสูงในช่วงของพื้นที่รอยต่อระหว่างพื้นที่ช่องว่างระหว่างโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นกับพื้นที่อับคลื่น ดังรูปที่ 4-3 ข) - ค) และรูปที่ 4-4 ข) - ค)

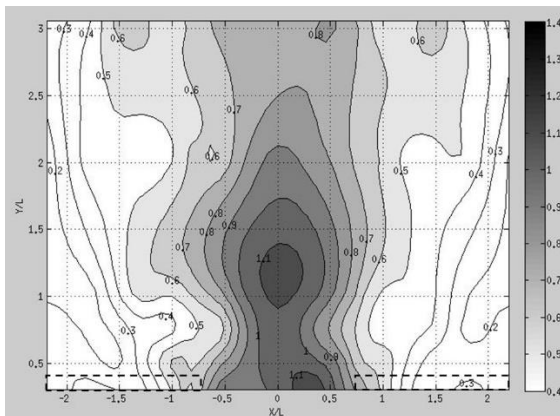
เมื่อพิจารณาการส่งผ่านคลื่นผ่านเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมา van der Meer et al. (2005) ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับตัวแปร R_c/H พบว่า ผลการศึกษามีแนวโน้มสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา โดยเมื่อเชื่อมกันคลื่นเป็นเชื่อมกันคลื่นพ่นน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมจะมีค่าที่ต่ำและจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อสันเชื่อมมีระดับเท่ากับน้ำนิ่ง และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อระดับน้ำท่วมเหนือสันคลื่นกันคลื่นมากขึ้น แต่เนื่องจากการศึกษาของ van der Meer et al. (2005) เป็นการศึกษาในแบบจำลอง 2 มิติ ทำให้ไม่มีผลของการกระจายตัวของคลื่น ทำให้เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมของการศึกษาครั้งนี้ที่เป็นแบบจำลอง 3 มิติ มีค่าสูงกว่าความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นนี้จะมีความสำคัญต่อออกแบบที่ใช้สมการการออกแบบเชื่อมกันคลื่นจากการศึกษาด้วยแบบจำลอง 2 มิติ โดยอิทธิพลของค่าอัตราส่วน R_c/H จะกล่าวโดยละเอียดอีกครั้งในหัวข้อ 4.6.4



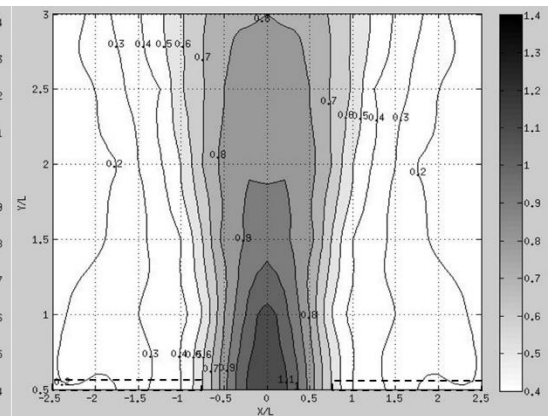
ก) กรณี $B/L \approx 0.5$



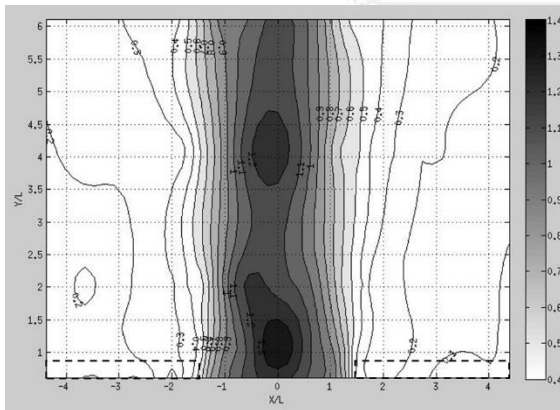
ก) กรณี $B/L \approx 0.5$



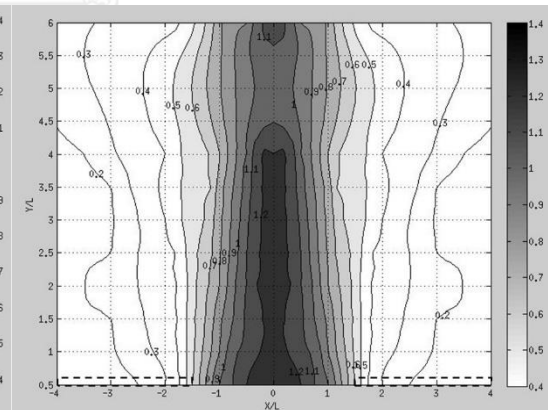
ข) กรณี $B/L \approx 1.5$



ข) กรณี $B/L \approx 1.5$



ค) กรณี $B/L \approx 3.0$



ค) กรณี $B/L \approx 3.0$

รูปที่ 4-3 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นผ่าน
ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ
ในการศึกษา

รูปที่ 4-4 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นผ่าน
ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ
ในการศึกษาที่ผ่านมา

4.4 อิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ศึกษาต่อการส่งผ่านคลื่น

4.4.1 อิทธิพลของการเปลี่ยนระดับน้ำนิ่ง

เมื่อทำการจำลองในการเปลี่ยนระดับน้ำนิ่งแตกต่างกัน 4 ความลึก เพื่อศึกษาพฤติกรรมคลื่นเมื่อโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นมีพฤติกรรมแตกต่างกัน เรียงลำดับระดับน้ำนิ่งเท่ากับ 0.30, 0.40, 0.45, 0.50 เมตร ตามลำดับ

ที่ระดับน้ำนิ่งเท่ากับ 0.30 เมตร พฤติกรรมเขื่อนกันคลื่นเป็นเขื่อนกันคลื่นแบบพื้นน้ำ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการศึกษาที่ผ่านมา มีลักษณะการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นรวมกับการซึมผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นรวมกัน และคลื่นกระจายตัวไปยังพื้นที่บริเวณด้านหลังเขื่อนกันคลื่น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นบริเวณพื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่นลดลง โดยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะสูงในบริเวณพื้นที่ด้านหลังช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น ซึ่งเกิดจากการส่งผ่านคลื่นส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมจะลดลงในบริเวณที่เป็นด้านหลังเขื่อนกันคลื่นและมีความปั่นป่วนของคลื่นด้านหลังเขื่อนกันคลื่นบ้างในบางจุด ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมบริเวณพื้นที่ด้านหลังช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นจะมีค่าสูงกว่าบริเวณด้านหลังเขื่อนกันคลื่น

ที่ระดับน้ำนิ่งเท่ากับ 0.40 เมตร มีระดับน้ำนิ่งเท่ากับความสูงของสันเขื่อนกันคลื่น พบว่าการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นยังคงได้อิทธิพลจากเขื่อนกันคลื่นที่อยู่ใกล้เคียง และมีการข้ามสันของคลื่นผ่านสันเขื่อนกันคลื่น ทำให้คลื่นสามารถส่งผ่านเข้าไปสู่บริเวณพื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่นได้มากขึ้น แต่การส่งผ่านคลื่นส่วนใหญ่ยังเกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ด้านหลังช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น เนื่องจากการส่งผ่านคลื่นจะเป็นรวมของการกระจายตัวผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น การซึมผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น และการข้ามสันสันเขื่อน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมนั้นมีค่าที่สูงขึ้น

ที่ระดับน้ำนิ่งเท่ากับ 0.45 และ 0.50 ซึ่งมีระดับน้ำอยู่เหนือสันเขื่อน เขื่อนกันคลื่นจะมีพฤติกรรมเป็นเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ คลื่นสามารถข้ามสันสันเขื่อนได้มากขึ้นตามความลึกน้ำที่เพิ่มขึ้น ทำให้อิทธิพลของคลื่นที่ข้ามสันสันเขื่อนมีมากกว่าการกระจายตัวผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นในบริเวณพื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่นและการซึมผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น แต่ในบริเวณนอกพื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่นหรือบริเวณช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นพบว่า ผลของการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นยังคงมีอิทธิพลต่อการส่งผ่านคลื่นและมีผลจากคลื่นที่เกิดจากการข้ามสัน

สั้นเชื่อมรวมด้วย ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมที่สูงมากขึ้นในพื้นที่บริเวณด้านหลังเชื่อมกันคลื่นและสูงกว่าบริเวณพื้นที่ด้านหลังช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น

การเปลี่ยนแปลงระดับความลึกน้ำยังส่งผลต่อการกระจายตัวของคลื่นบริเวณพื้นที่ด้านหลังเชื่อมกันคลื่นและช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น กล่าวคือ เมื่อระดับน้ำสูงขึ้นการส่งผ่านคลื่นไปสู่พื้นที่ด้านหลังเชื่อมกันคลื่นส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการข้ามล้นสันเชื่อมกันคลื่น ทำให้การส่งผ่านคลื่นมีค่าสูงขึ้น คลื่นจะกระจายตัวจากบริเวณพื้นที่ด้านหลังเชื่อมกันคลื่นเข้าสู่พื้นที่ด้านหลังช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น บริเวณพื้นที่ด้านหลังเชื่อมกันคลื่นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะสูงและลดระดับลงเมื่ออยู่ในพื้นที่ด้านหลังช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น

4.4.2 อิทธิพลของการเปลี่ยนความชันคลื่น

การศึกษานี้ได้ทำการจำลองการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นโดยเปลี่ยนความชันคลื่น 3 ค่า คือ 0.0105 - 0.0152, 0.0212 - 0.0252 และ 0.0294 - 0.0351 ตามลำดับ โดยเรียงจาก ซึ่งอิทธิพลความชันคลื่นต่อการส่งผ่านคลื่นจะมีความแตกต่างกันไป

อิทธิพลของความชันคลื่นจะมีผลต่อคลื่นที่ส่งผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นมากกว่าคลื่นที่ข้ามล้นคลื่นกันคลื่น เมื่อเชื่อมกันคลื่นเป็นเชื่อมกันคลื่นแบบพ่นน้ำและเชื่อมกันคลื่นที่สันเชื่อมเท่ากับระดับความลึกน้ำ คลื่นส่วนใหญ่จะถูกส่งผ่านไปบริเวณพื้นด้านหลังเชื่อมกันเชื่อมผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น อิทธิพลของความชันคลื่นจะมีค่าน้อย โดยเฉพาะในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น แต่ในพื้นที่อับคลื่นจะมีอิทธิพลทำให้การส่งผ่านคลื่นสูงขึ้น

เมื่อระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้นและท่วมสันเชื่อมกันคลื่น เชื่อมกันคลื่นเปลี่ยนพฤติกรรมเป็นเชื่อมกันคลื่นแบบใต้น้ำ อิทธิพลของการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นน้อยลง กลับกันอิทธิพลของการส่งผ่านคลื่นจากการท่วมล้นสันเชื่อมมีค่ามากขึ้น ความชันคลื่นมีอิทธิพลมากขึ้นเนื่องจากการข้ามล้นสันเชื่อมกันคลื่น ทำให้การส่งผ่านคลื่นเข้าสู่พื้นที่ด้านหลังเชื่อมกันคลื่นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นทั้งในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นกับพื้นที่อับคลื่น

4.4.3 อิทธิพลค่าอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นกับความยาวคลื่น

การศึกษานี้ได้ทำการจำลองการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นโดยเปลี่ยนค่าอัตราส่วนระช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นกับความยาว (B/L) คลื่น 3 ค่า คือ 0.46-0.54, 1.42-1.56 และ 2.78-2.93 โดยเรียงจากอิทธิพลค่าอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นกับความยาวคลื่นต่อการส่งผ่านคลื่นจะมีความแตกต่างกันไป

เมื่อพิจารณากรณีเชื่อมกันคลื่นแบบพื้นน้ำ พบว่า เมื่อค่าอัตราส่วน B/L อยู่ในช่วง 0.46-0.54 คลื่นจะกระจายตัวผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น โดยเสมือนช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นเป็นจุดกำเนิดคลื่นใหม่ และกระจายตัวเข้าไปในพื้นที่อับคลื่น เมื่ออัตราส่วน B/L เพิ่มขึ้นเป็น 1.42-1.56 การส่งผ่านคลื่นเข้าสู่พื้นที่ด้านหลังเชื่อมกันคลื่นจะมีเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น และจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน B/L เพิ่มขึ้นเป็น 2.78-2.93

เมื่อพิจารณากรณีเชื่อมกันคลื่นแบบใต้น้ำ พบว่าเมื่ออัตราส่วนระช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นกับความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น การส่งผ่านคลื่นในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นจะมีค่าลดลง (ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมมีค่าลดลง) แต่ในพื้นที่อับคลื่นจะมีการกระจายคลื่นเพิ่มขึ้น (ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเพิ่มขึ้น) เนื่องจากการส่งผ่านคลื่นส่วนใหญ่เกิดจากการข้ามล้นสันเชื่อมกันคลื่นและกระจายตัวจากพื้นที่อับคลื่นเข้าสู่พื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น ช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมจะอยู่ในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นมีค่าลดลง

4.5 การวิเคราะห์ตัวแปรไร้หน่วย

การศึกษาที่ผ่านมาได้ศึกษาเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจากตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการส่งผ่านคลื่น ด้วยข้อจำกัดของการจำลองด้วยแบบจำลองทางกายภาพนี้จึงทำการศึกษาเฉพาะตัวแปรที่สัมพันธ์กับความสูงคลื่นบริเวณหลังโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น (H_t) ที่มีความเกี่ยวข้องกับตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความสูงโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น (h_s) ระยะห่างของสันโครงสร้างจากระดับน้ำนิ่ง (R_c) ความสูงคลื่นที่เข้าเคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง (H_i), ความยาวคลื่น (L), ความกว้างโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น (B_s), ระยะห่างระหว่างโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น (B), ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุโครงสร้าง (D_{50}) ดังสมการที่ 4-2

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

การพิจารณาตัวแปรเหล่านี้จะทำการลดรูปตามทฤษฎีวิเคราะห์ตัวแปรไร้หน่วย (เสรี จันทรโยธา, 2553) โดยความความสูงคลื่นบริเวณด้านหลังโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นมีหน่วยพื้นฐานคือ ความยาว(length) ดังนั้นตัวแปรอิสระทั้ง 7 ตัว สามารถลดรูปจากตัวแปรซ้ำได้แก่ ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้าง (H_i) และความยาวคลื่น (L) เพื่อกำหนดตัวแปรไร้หน่วยในการศึกษานี้ได้อย่างอิงจากการศึกษาที่ผ่านมาของ van der Meer et al. (2005) โดยจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ของ

ความสูงคลื่นบริเวณด้านหลังโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นในรูปกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย (dimensionless parameter) ได้ดังสมการที่ 4-3

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = f\left(\frac{R_c}{H_i}, \frac{D_{50}}{H_i}, \frac{B_s}{H_i}, \frac{B}{L}, \frac{H_i}{L}\right) \quad (4-3)$$

ด้วยข้อจำกัดในการศึกษานี้ที่มีการปรับค่าตัวแปร ความลึกน้ำเหนือสันเชื่อมกันคลื่น (R_c) ระยะห่างช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น (B) ความชันคลื่น (H_i/L) โดยไม่มีการปรับเปลี่ยนค่า D_{50} และ B_s จึงส่งผลให้กลุ่มตัวแปรไร้หน่วย D_{50}/H_i และ B_s/H_i ไม่ส่งผลที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้มีการแบ่งกลุ่มการพิจารณาตัวแปรซ้ำเป็นกลุ่มตัวแปรที่เป็นค่าคงที่กับกลุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลง ดังสมการ 4-4 และ 4-5 ตามลำดับ

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = f\left(\frac{D_{50}}{H_i}, \frac{B_s}{H_i}\right) \quad (4-4)$$

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

เพื่อให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรไร้หน่วยต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม จะทำการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับตัวแปรไร้หน่วยในแต่ละกลุ่มการวิเคราะห์และอภิปรายผลโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

4.6 การวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นรวม

ด้วยข้อจำกัดของขนาดอ่างจำลองคลื่นที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ส่งผลให้มีข้อจำกัดในการเปลี่ยนค่าของตัวแปรที่ศึกษา เช่น คุณสมบัติคลื่น ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น เป็นต้น อีกทั้งการตัวเก็บข้อมูลความสูงคลื่นในพื้นที่ด้านหลังเชื่อมกันคลื่นยังถูกจำกัดด้วยขนาดของอ่างจำลองคลื่น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.2 เมื่อพิจารณาการส่งผ่านคลื่นในรูปของเส้นชั้นความสูงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในพิกัดแกน x/L และ y/L ดังการศึกษาที่ผ่านมาของ Johnson (1951) ทำให้ตำแหน่งของจุดที่เก็บข้อมูลจริงไม่อยู่ในตำแหน่งเดียวกันในพิกัดแกน x/L และ y/L เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบพฤติกรรมคลื่นในแต่ละกรณีศึกษาได้ จึงจำเป็นต้องเลือกตำแหน่งข้อมูลจริงที่มีค่าพิกัดแกน x/L และ y/L ใกล้เคียงกัน ในการศึกษาอิทธิพลของกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยต่อพฤติกรรมการส่งผ่าน

คลื่นนี้จะเลือกข้อมูลโดยมีเงื่อนไข คือ จะเลือกข้อมูลตำแหน่งแกน y/L ที่ไกลจากเขื่อนกันคลื่นมาก ที่สุดเพื่อลดผลการปั่นป่วนเนื่องจากการแตกตัวของคลื่น และมีตำแหน่งที่ y/L ไกลเคียงกัน เมื่อพิจารณารูปเส้นชั้นความสูงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในรูปที่ 4-2 จึงเลือกข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่ ตำแหน่ง y/L ในช่วงประมาณ 3.00-4.00 และทำการหาเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์การผ่านคลื่นรวมโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมทุกจุดในพิกัด x/L เพื่อใช้เป็นค่าตัวแทนค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา โดยทำการแบ่งค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยออกเป็นสองพื้นที่คือ พื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น(gap zone) และพื้นที่อับคลื่น(shadow zone) โดยรายละเอียดข้อมูลคลื่นในแต่ละกรณีศึกษาจะแสดงในตารางที่ 4-2

4.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยกับกลุ่มตัวแปรค่าคงที่

จากข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในหัวข้อที่ผ่านมา นำมาพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยกับตัวแปรไร้หน่วยกลุ่มตัวแปรค่าคงที่ เนื่องจากตัวแปรเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุโครงสร้าง (D_{50}) และความกว้างของสันเขื่อนกันคลื่น (B_s) เป็นตัวแปรที่อยู่นอกขอบเขตการศึกษา ทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรดังกล่าว แต่เนื่องจากเป็นกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยค่าคงที่นี้แสดงถึงลักษณะทางกายภาพของเขื่อนกันคลื่นโดยตรงกับคุณสมบัติคลื่น เพื่อแสดงถึงอิทธิพลของลักษณะกายภาพโดยตรงต่อการส่งผ่านคลื่น การศึกษาครั้งนี้จึงพิจารณากลุ่มตัวแปรค่าคงที่ด้วย ซึ่งประกอบด้วย อัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุโครงสร้างกับความสูงคลื่นที่วิ่งเข้าสู่ฝั่ง (D_{50}/H_i) และอัตราส่วนของความกว้างของสันเขื่อนกันคลื่นกับความสูงคลื่นที่วิ่งเข้าสู่ฝั่ง (B_s/H_i) คือมีรายละเอียดดังนี้

เมื่อพิจารณารูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยกับอัตราส่วน (D_{50}/H_i) ดังรูปที่ 4-5 กับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยกับอัตราส่วน (B_s/H_i) ดังรูปที่ 4-6 พบว่ามีแนวโน้มการความสัมพันธ์ที่เหมือนกัน กล่าวคือ กรณีเขื่อนกันคลื่นแบบพื้นน้ำเมื่อพิจารณาในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น มีการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นเป็นส่วนใหญ่ไม่ผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นโดยตรง ผลของตัวแปรลักษณะทางกายภาพของเขื่อนกันคลื่นมีอิทธิพลน้อย อิทธิพลของคลื่นจะส่งผลมากกว่า โดยที่เมื่อคลื่นมีความสูงน้อยจะส่งผลให้การส่งผ่านคลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาในพื้นที่อับคลื่น การส่งผ่านคลื่นจะส่งผ่านคลื่นผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นโดยตรงด้วยการซึมผ่านผลของตัวแปรลักษณะทาง

ตารางที่ 4-2 รายละเอียดคุณสมบัติคลื่นและกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยในแต่ละกรณีศึกษา

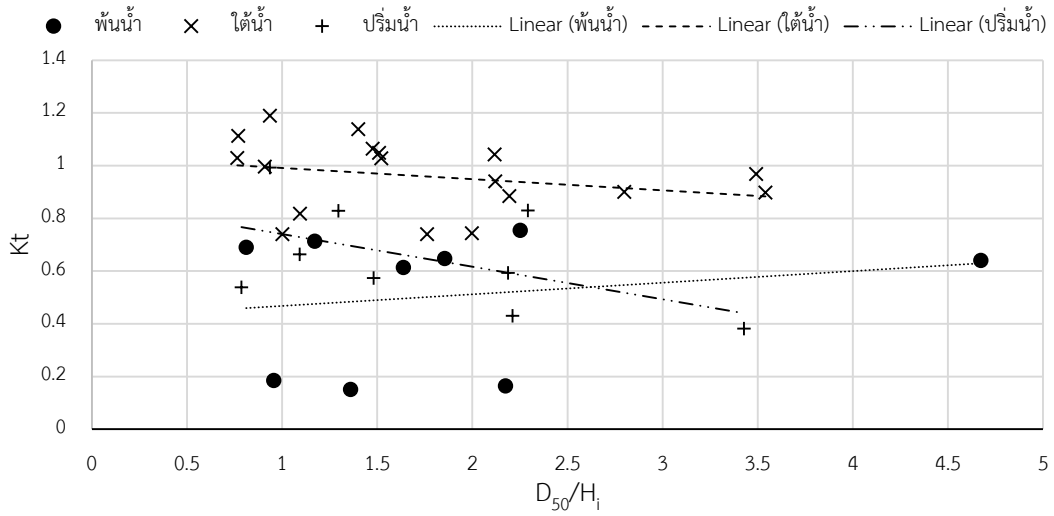
| Case condition | dimensionless parameter | | | | | Kt | |
|----------------|-------------------------|-------|------|--------|-------|---------|--------|
| | Hi/L | Rc/Hi | B/L | D50/Hi | Bs/Hi | GapZone | Shadow |
| D30BL050W01 | 0.0144 | 2.17 | 0.53 | 2.17 | 8.70 | 0.16 | 0.23 |
| D30BL050W02 | 0.0231 | 1.36 | 0.53 | 1.36 | 5.44 | 0.15 | 0.23 |
| D30BL050W03 | 0.0328 | 0.96 | 0.53 | 0.96 | 3.83 | 0.19 | 0.23 |
| D30BL150W01 | 0.0144 | 1.85 | 1.53 | 1.85 | 7.42 | 0.65 | 0.58 |
| D30BL150W02 | 0.0217 | 1.17 | 1.45 | 1.17 | 4.68 | 0.71 | 0.57 |
| D30BL150W03 | 0.0330 | 0.81 | 1.53 | 0.81 | 3.25 | 0.69 | 0.55 |
| D30BL300W01 | 0.0105 | 4.67 | 2.79 | 4.67 | 18.69 | 0.64 | 0.39 |
| D30BL300W02 | 0.0226 | 2.25 | 2.90 | 2.25 | 9.01 | 0.76 | 0.32 |
| D30BL300W03 | 0.0311 | 1.64 | 2.90 | 1.64 | 6.55 | 0.61 | 0.34 |
| D40BL050W01 | 0.0124 | 0.00 | 0.46 | 2.21 | 8.84 | 0.43 | 0.42 |
| D40BL050W02 | 0.0252 | 0.00 | 0.46 | 1.09 | 4.37 | 0.66 | 0.57 |
| D40BL050W03 | 0.0349 | 0.00 | 0.46 | 0.79 | 3.15 | 0.54 | 0.54 |
| D40BL150W01 | 0.0134 | 0.00 | 1.75 | 2.29 | 9.17 | 0.38 | 0.46 |
| D40BL150W02 | 0.0237 | 0.00 | 1.75 | 1.30 | 5.19 | 0.59 | 0.57 |
| D40BL150W03 | 0.0328 | 0.00 | 1.75 | 0.94 | 3.74 | 0.57 | 0.57 |
| D40BL300W01 | 0.0151 | 0.00 | 2.96 | 3.43 | 13.71 | 0.43 | 0.42 |
| D40BL300W02 | 0.0237 | 0.00 | 2.96 | 2.19 | 8.75 | 0.66 | 0.57 |
| D40BL300W03 | 0.0350 | 0.00 | 2.96 | 1.48 | 5.92 | 0.54 | 0.54 |
| D45BL050W01 | 0.0136 | -2.19 | 0.50 | 2.19 | 8.78 | 0.89 | 0.73 |
| D45BL050W02 | 0.0216 | -1.48 | 0.54 | 1.48 | 5.90 | 1.06 | 0.83 |
| D45BL050W03 | 0.0351 | -0.91 | 0.54 | 0.91 | 3.64 | 1.00 | 0.91 |
| D45BL150W01 | 0.0152 | -1.76 | 1.52 | 1.76 | 7.05 | 0.74 | 1.12 |
| D45BL150W02 | 0.025 | -1.00 | 1.42 | 1.00 | 4.00 | 0.74 | 1.12 |
| D45BL150W03 | 0.0349 | -0.76 | 1.52 | 0.76 | 3.06 | 1.03 | 0.98 |
| D45BL300W01 | 0.0148 | -3.49 | 2.93 | 3.49 | 13.97 | 0.97 | 1.02 |
| D45BL300W02 | 0.0244 | -2.12 | 2.93 | 2.12 | 8.47 | 1.04 | 1.05 |
| D45BL300W03 | 0.0342 | -1.51 | 2.93 | 1.51 | 6.04 | 1.05 | 1.04 |
| D50BL050W01 | 0.0112 | -5.60 | 0.53 | 2.80 | 11.19 | 0.90 | 0.87 |
| D50BL050W02 | 0.0224 | -2.80 | 0.53 | 1.40 | 5.60 | 1.14 | 0.94 |
| D50BL050W03 | 0.0336 | -1.87 | 0.53 | 0.94 | 3.74 | 1.19 | 1.07 |
| D50BL150W01 | 0.0131 | -4.00 | 1.49 | 2.00 | 7.99 | 0.74 | 1.01 |
| D50BL150W02 | 0.0239 | -2.19 | 1.49 | 1.09 | 4.37 | 0.82 | 1.09 |
| D50BL150W03 | 0.0339 | -1.54 | 1.49 | 0.77 | 3.08 | 1.11 | 1.18 |
| D50BL300W01 | 0.0145 | -7.08 | 2.93 | 3.54 | 14.16 | 0.90 | 1.02 |
| D50BL300W02 | 0.0243 | -4.24 | 2.93 | 2.12 | 8.48 | 0.94 | 0.98 |
| D50BL300W03 | 0.0338 | -3.04 | 2.93 | 1.52 | 6.09 | 1.03 | 1.16 |

กายภาพของเขื่อนกันคลื่นมีอิทธิพลมากการส่งผ่านคลื่นผ่านโครงสร้างโดยตรงจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานมากขึ้นเมื่ออัตราส่วน D_{50}/H_i และอัตราส่วน B_s/H_i เพิ่มขึ้น การส่งผ่านคลื่นเข้าสู่พื้นที่อับคลื่นจึงน้อยลงด้วย ดังนั้นจะพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมเฉลี่ยมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับอัตราส่วน D_{50}/H_i และอัตราส่วน B_s/H_i

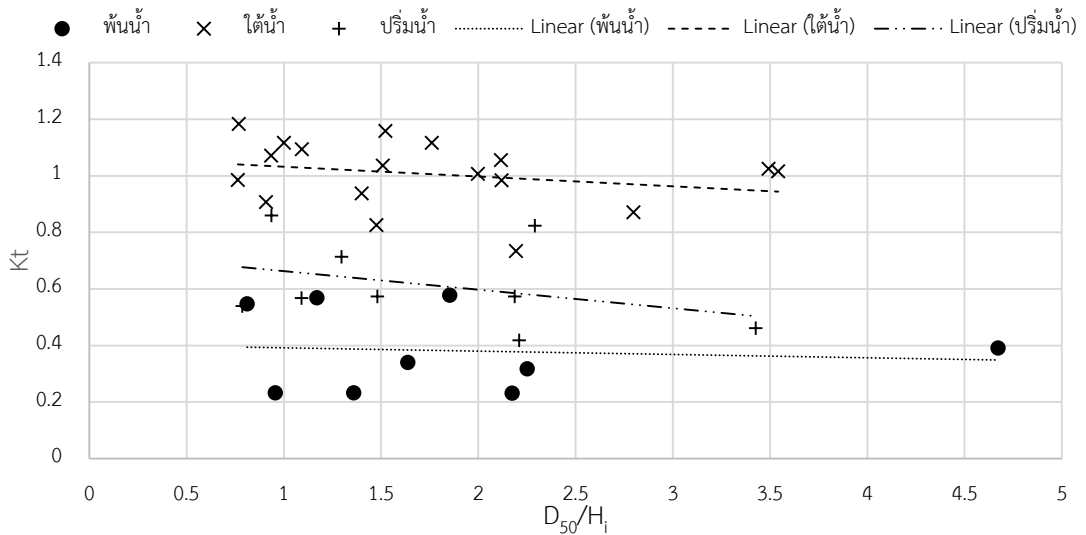
เมื่อพิจารณาโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นปริ่มน้ำ การส่งผ่านคลื่นจะได้รับอิทธิพลของข้ำมล้นของเขื่อนกันคลื่น ทำให้ลักษณะทางกายภาพของเขื่อนกันคลื่นมีอิทธิพลต่อการส่งผ่านคลื่นอย่างมากพบว่า เมื่ออัตราส่วน D_{50}/H_i และอัตราส่วน B_s/H_i เพิ่มสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยจะลดลงอย่างมาก ดังรูปที่ 4-5 ข) และ รูปที่ 4-6 ข) ซึ่งจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยมีความสัมพันธ์ผกผันกับอัตราส่วน D_{50}/H_i และอัตราส่วน B_s/H_i ในกรณีเขื่อนกันคลื่นปริ่มน้ำ

เมื่อพิจารณาโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นแบบใต้น้ำ การส่งผ่านคลื่นส่วนใหญ่เกิดจากการข้ำมล้นสันเขื่อนกันคลื่นทำให้ลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นมีอิทธิพลต่อการส่งผ่านคลื่นทั้งในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นและพื้นที่อับคลื่น เมื่ออัตราส่วน D_{50}/H_i และอัตราส่วน B_s/H_i จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยลดลง ดังรูปที่ 4-5 ข) และ รูปที่ 4-6 ข) ดังนั้นจึงพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นรวมเฉลี่ยมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับอัตราส่วน D_{50}/H_i และอัตราส่วน B_s/H_i เช่นกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับกลุ่มตัวแปรค่าคงที่ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นกับลักษณะของคลื่นที่วิ่งเข้าสู่ฝั่ง เป็นความสัมพันธ์ที่ส่งผลต่อการสูญเสียพลังงานของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างโดยตรง การส่งผ่านคลื่นเข้าสู่พื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่นจึงเปลี่ยนแปลงไป ทำให้เมื่อพิจารณากลุ่มตัวแปรค่าคงที่ความสัมพันธ์จะผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ เขื่อนกันคลื่นปริ่มน้ำ และในพื้นที่อับคลื่นของกรณีเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ และเมื่อพิจารณาการส่งผ่านคลื่นในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นของกรณีเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำที่ลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นมีอิทธิพลน้อย อิทธิพลของคลื่นคลื่นมีค่ามาก จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยจะค่ามากขึ้น

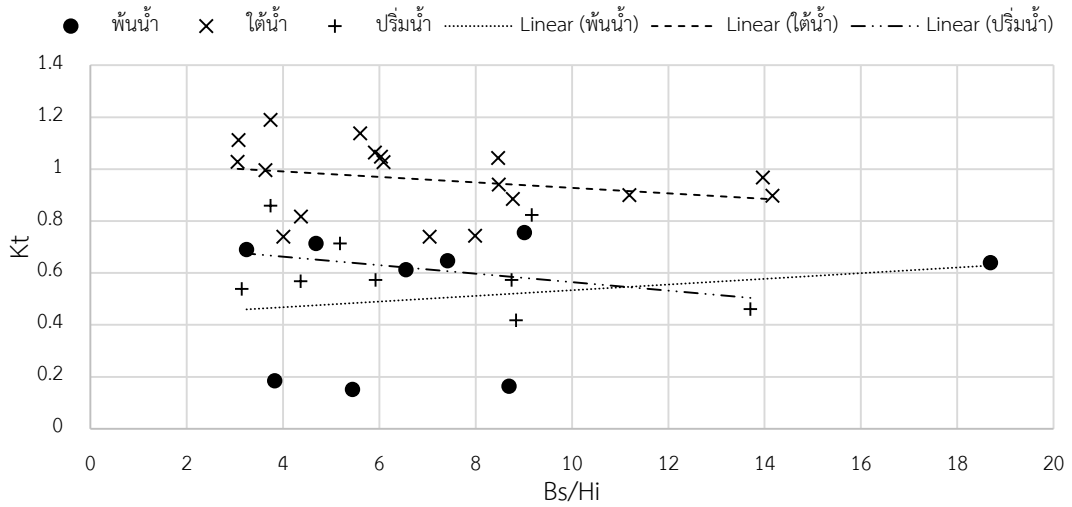


ก) กรณีสถานที่ช่วงว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น

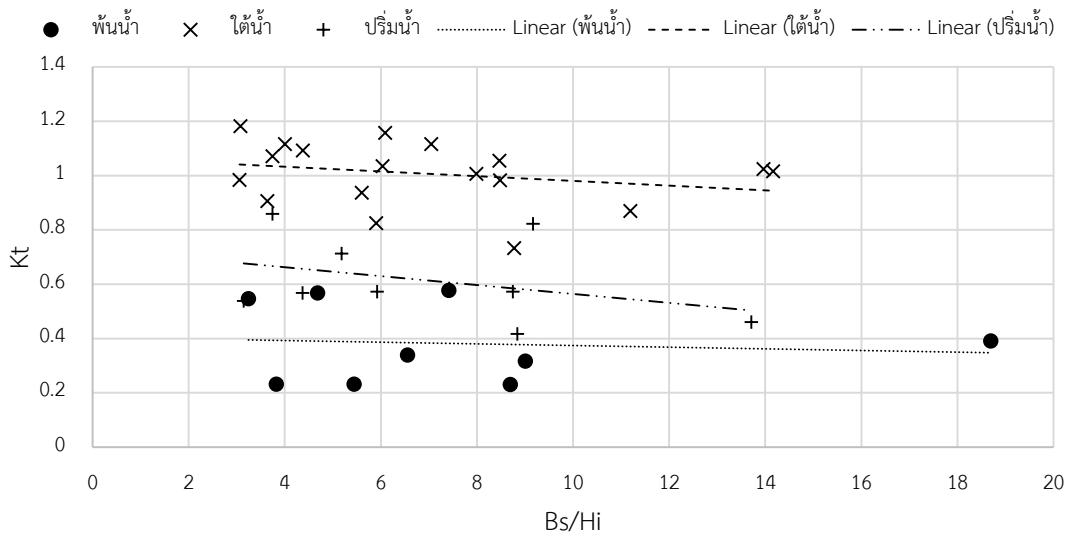


ข) กรณีสถานที่อับคลื่น

รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับค่า D_{50}/H_i



ก) กรณีสัมพันธ์ที่ช่วงว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น

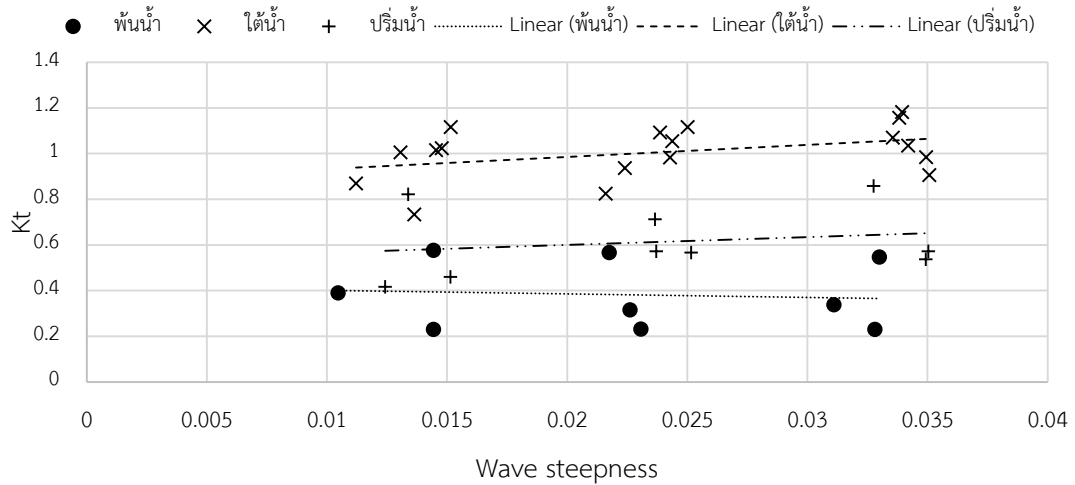


ข) กรณีสัมพันธ์ที่อับคลื่น

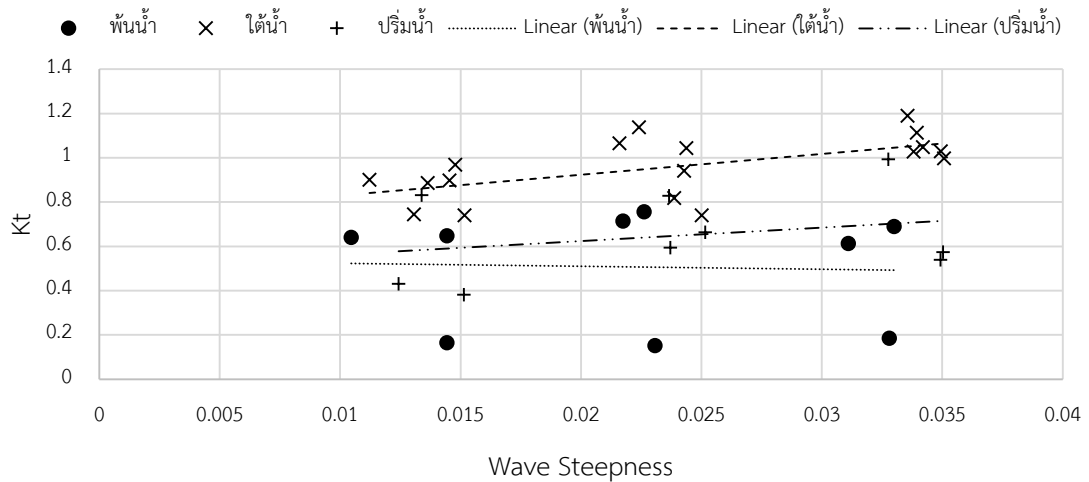
รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับค่า B_s/H_i

4.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับความชันคลื่น

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับความชันคลื่น ค่าความชันที่พิจารณามีทั้งหมด 3 ช่วง คือ 0.0105-0.0152, 0.0212-0.0252, 0.0294-0.0351 ในการพิจารณาจะแบ่งลักษณะเขื่อนกันคลื่นเป็นเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ(ระดับน้ำนิ่งเท่ากับ 0.30 ,0.40 ม.) และเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ (ระดับน้ำนิ่งเท่ากับ 0.45, 0.50 ม.) สามารถอธิบายพฤติกรรมกรรมการส่งผ่านของคลื่นดังรูปที่ 4-7



ก) กรณีสถานที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น



ข) กรณีสถานที่อับคลื่น

รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับความชันคลื่น

เมื่อพิจารณาพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น โครงสร้างเขื่อนกันคลื่นพันน้ำจะมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมอยู่ระหว่าง 0.1-0.6 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ค่อนข้างกระจายตัวสูงในแต่ละช่วงความชันคลื่นอย่างไรก็ตามแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความชันของคลื่นลดลงแต่เมื่อพิจารณาจากความชันของกราฟในรูปที่ 4-7 จะพบว่ามีแนวโน้มการลดลงที่ไม่มีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาเขื่อนกันคลื่นปริ่มน้ำมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.4-0.8 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าความชันคลื่น เนื่องจาก

ความชันคลื่นจะมีอิทธิพลต่อการข้ามล้นสันเชื่อมกันคลื่น ทำให้มีการส่งผ่านคลื่นได้มากขึ้น ในกรณีโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นแบบใต้น้ำมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.7–1.2 โดยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นค่อนข้างเกาะกลุ่มในแต่ละช่วงความชันคลื่น มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามค่าความชันที่เพิ่มขึ้นชัดเจน เนื่องการความชันคลื่นที่สูงขึ้นทำให้การส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีผลเนื่องจากการข้ามล้นสันเชื่อมกันคลื่นทำให้การส่งผ่านคลื่นมีสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมของเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำจึงมีค่าสูงกว่าเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำในทุกช่วงความชันคลื่น

เมื่อพิจารณาพื้นที่อับคลื่น(บริเวณด้านหลังโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น) โครงสร้างเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำจะมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมอยู่ระหว่าง 0.2–0.8 โดยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมค่อนข้างเกาะกลุ่มกันในแต่ละช่วงความชันคลื่น และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเกือบคงที่ เช่นเดียวกับในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น เมื่อพิจารณากรณีโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นปริมน้ำ จะพบว่าความชันคลื่นมีอิทธิพลทำให้แนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น โดยจะมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.4-0.8 ในกรณีโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นแบบใต้น้ำมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.7–1.2 โดยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นค่อนข้างเกาะกลุ่มกันในแต่ละช่วงความชันคลื่น มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามค่าความชันที่เพิ่มขึ้นชัดเจน เนื่องจากผลของการข้ามล้นข้ามสันเชื่อมกันคลื่นที่มากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจึงเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้น เมื่อรวมผลของการข้ามล้นสันเชื่อมกันคลื่นแล้วทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมของเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำจะมีค่าสูงกว่าเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นกับพื้นที่อับคลื่น พบว่า ในกรณีเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำความชันคลื่นไม่มีอิทธิพลมากนักต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ย ในกรณีเชื่อมกันคลื่นปริมน้ำและใต้น้ำ เมื่อระดับน้ำเพิ่มขึ้นคลื่นสามารถข้ามล้นเชื่อมกันคลื่นได้ ทำให้อิทธิพลของคลื่นที่ข้ามล้นเชื่อมกันคลื่นต่อพฤติกรรมคลื่นด้านหลังเชื่อมกันคลื่นมีมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะมีค่าสูงขึ้น โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นกับพื้นที่อับคลื่นไม่มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และแนวโน้มเป็นไปในเพิ่มขึ้นตามความชันคลื่นที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

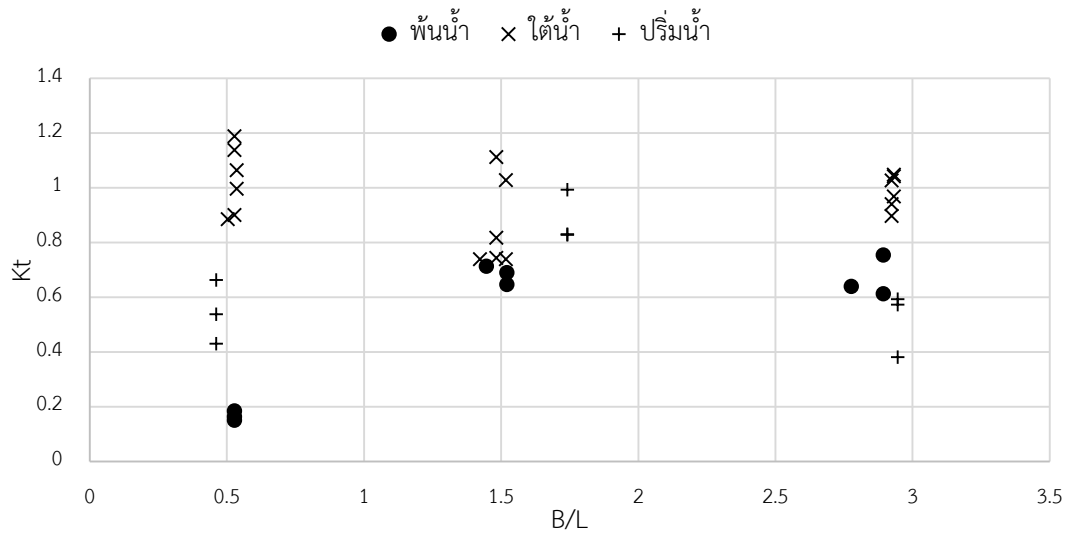
เมื่อพิจารณาความชันของกราฟ พบว่า สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในคลื่นกันคลื่นพื้นน้ำค่าผกผันกับความชันเชื่อมในกรณีเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำ แต่ในเชื่อมกันคลื่นปริมน้ำและใต้น้ำความชันคลื่นมีความสัมพันธ์แบบผกผันตรงกับความชันของคลื่นรวมเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ

4.6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่น

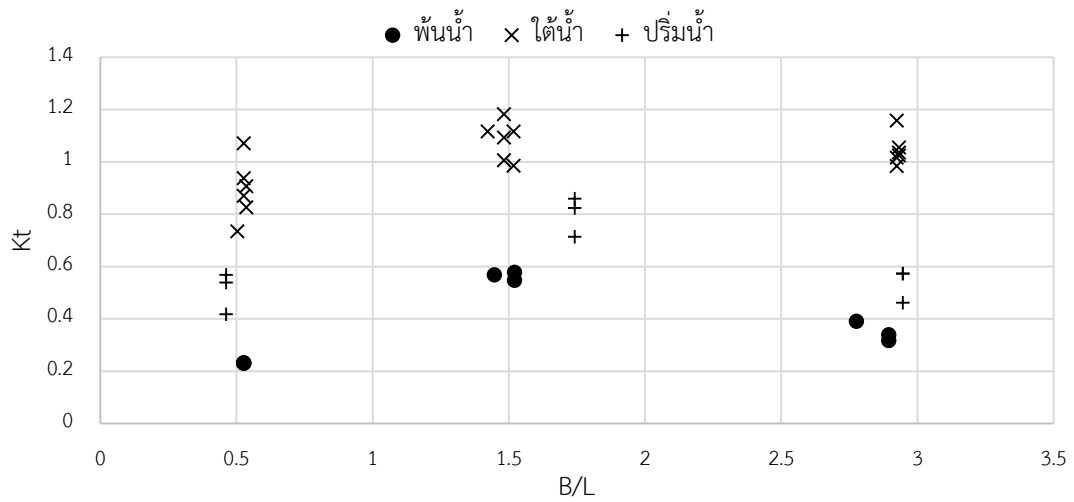
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่น (B/L) มีความแตกต่างกันในเขื่อนกันคลื่นแบบพื้นน้ำกับเขื่อนกันคลื่นแบบใต้น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4-8 เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นแบบพื้นน้ำ การส่งผ่านคลื่นส่วนใหญ่จะเกิดจากการกระจายตัวผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นเข้าสู่พื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่น เมื่ออัตราส่วน $B/L \approx 0.5$ ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นเสมือนเป็นจุดกำเนิดคลื่นใหม่ที่กระจายตัวเข้าสู่พื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่น ทำให้ผลของการส่งผ่านมีค่าน้อย และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน B/L ช่วงของอัตราส่วน $B/L \approx 1.5$ การส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นได้มากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน B/L เป็นช่วงของอัตราส่วน $B/L \approx 3.0$ พบว่า ช่วงเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยเกิดขึ้นในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นมากขึ้น ทำให้ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแต่ละพื้นที่มีค่าลดลง จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยกับอัตราส่วน B/L ของเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำไม่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง

เมื่อพิจารณาเขื่อนกันคลื่นปริมน้ำ พบว่า การส่งผ่านคลื่นมีลักษณะใกล้เคียงกับกรณีเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ เนื่องจากการส่งผ่านคลื่นในเขื่อนกันคลื่นปริมน้ำจะยังได้รับอิทธิพลของการกระจายตัวผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น เมื่อรวมกับผลของการข้ามล้นสันเขื่อนกันคลื่น จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นจากเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ

เมื่อพิจารณาเขื่อนกันคลื่นแบบใต้น้ำ การส่งผ่านคลื่นส่วนใหญ่เกิดจากการข้ามล้นสันเขื่อนกันคลื่น ทำให้ผลของการกระจายตัวผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นน้อยลง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นจึงมีการเปลี่ยนแปลงน้อย แต่ในพื้นที่อับคลื่นมีการเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ B/L ที่เพิ่มขึ้น



ก) กรณีพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น



ข) กรณีพื้นที่อับคลื่น

รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม
กับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่น

4.6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับอัตราส่วนระหว่างความลึกน้ำเหนือสันเขื่อนกันคลื่นกับความสูงคลื่นวิ่งเข้าปะทะโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น

การพิจารณาผลของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับอัตราส่วนระหว่างความลึกน้ำเหนือสันเขื่อนกันคลื่นกับความสูงคลื่นวิ่งเข้าปะทะโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น (R_c/H_i) ทั้งในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นและพื้นที่อับคลื่น มีแนวโน้มทิศทางเดียวกัน โดยพบว่า เมื่อค่าอัตราส่วน R_c/H_i เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะลดลง เนื่องจากพฤติกรรมของโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นเปลี่ยนไป กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วน R_c/H_i มีค่าติดลบ โครงสร้างเขื่อนกันคลื่นจะมีพฤติกรรมเป็นเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ คลื่นจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างได้ทั้งการข้ามสัน การกระจายตัวผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น และการซึมผ่านโครงสร้าง ทำให้การส่งผ่านคลื่นจะสูง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะสูงตาม เมื่ออัตราส่วน R_c/H_i เพิ่มขึ้นเป็นศูนย์ แสดงถึงโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นจะมีความสูงเท่ากับระดับน้ำนิ่งหรือเขื่อนกันคลื่นปริมน้ำ ผลของการข้ามสันสันเขื่อนลดน้อยลงและมีการสูญเสียพลังงานมากขึ้นจากแรงเสียดทานกับผิวโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น ทำให้การส่งผ่านคลื่นรวมลดลงอย่างมาก และเมื่อการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน R_c/H_i เป็นบวก พฤติกรรมของโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นจะเป็นเขื่อนกันคลื่นแบบพื้นน้ำ ไม่มีผลของการข้ามสันสันเขื่อนกันคลื่น การส่งผ่านคลื่นรวมจะมีเพียงการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นและการซึมผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นเท่านั้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมมีค่าลดลง ดังรูปที่ 4-9 ก)

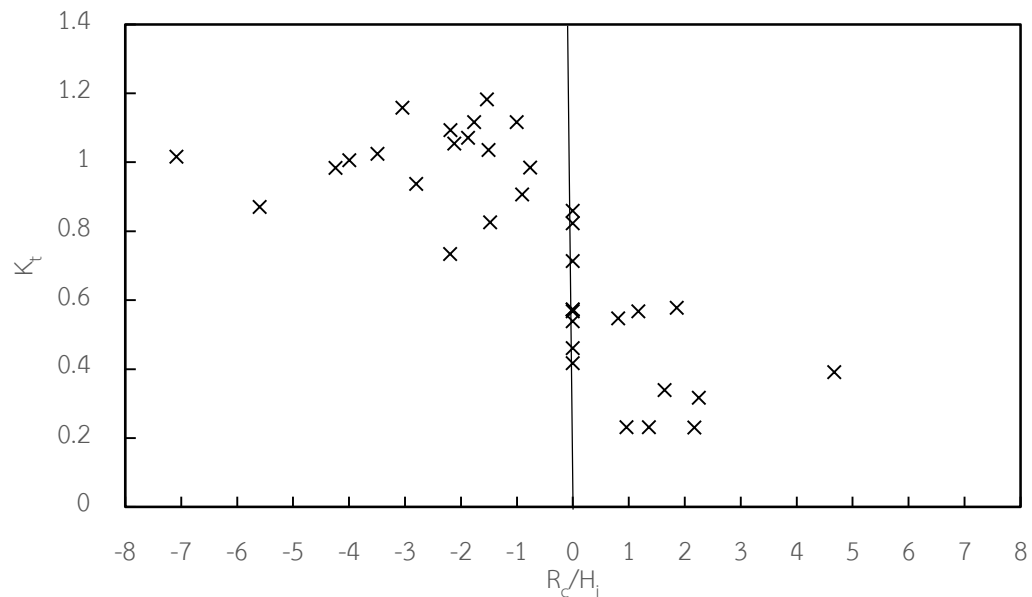
จากการศึกษาที่ผ่านมาของ van der Meer et al. (2005) ที่ทำการรวบรวมผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการส่งผ่านคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นหินทิ้งแบบ 2 มิติ ดังรูปที่ 4-9 ข) เมื่อเปรียบเทียบผลของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับอัตราส่วนระหว่างความลึกน้ำเหนือสันเขื่อนกันคลื่นกับความสูงคลื่นวิ่งเข้าปะทะโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น (R_c/H_i) ในการศึกษาพบว่า เขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้งมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับอัตราส่วน R_c/H_i มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาของ van der Meer et al. (2005) แต่เนื่องจากการกระจายตัวของคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นทำให้ความสูงคลื่นเฉลี่ยตามแนวขนานโครงสร้างมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมจึงมีค่ามากกว่าการศึกษาของ van der Meer et al. (2005)

จากการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมทั้งบริเวณพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นและพื้นที่อับคลื่นมีทิศทางเดียวกัน โดยมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมา แต่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมมีค่าที่มากกว่า เนื่องมาจากการกระจายตัวผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นเข้าสู่พื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่น ซึ่งความแตกต่างของการส่งผ่านของคลื่นมีส่วนสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้งเป็นอย่างมาก ดังนั้นการใช้สมการการส่งผ่านของคลื่น

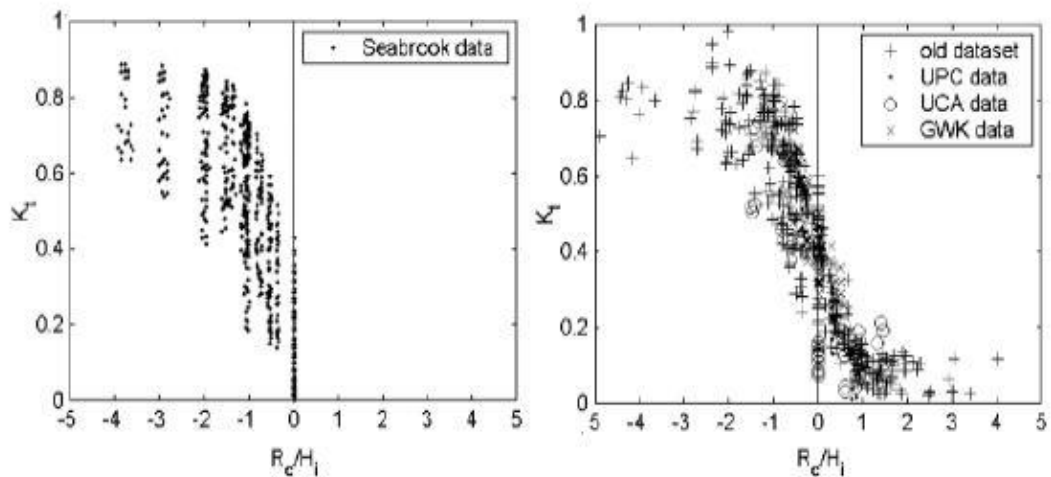
ด้วยแบบจำลอง 2 มิติ ที่พิจารณาเฉพาะผลของการข้ามล้นและการซึมผ่านโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องถูกพิจารณาร่วมด้วย

เมื่อเพิ่มระดับน้ำสูงขึ้นทำให้น้ำท่วมล้นเชื่อมกันคลื่น เชื่อมกันคลื่นจะมีพฤติกรรมเป็นเชื่อมกันคลื่นหินทิ้งแบบได้น้ำ ทำให้ผลของการข้ามล้นคลื่นเชื่อมกันคลื่นมีมากขึ้น จากการศึกษาที่ผ่านมาของ van der Meer et al. (2005) ที่ได้วิเคราะห์และรวบรวมข้อมูลผลการศึกษากการส่งผ่านคลื่นโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมของเชื่อมกันคลื่นได้น้ำในการจำลองแบบ 2 มิติ และได้มีการเสนอกราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับอัตราส่วนระหว่างความลึกน้ำเหนือสันเชื่อมกันคลื่นกับความสูงคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะเชื่อมกันคลื่น (R_c/H_i) โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผลของการศึกษาในครั้งนี้ โดยอัตราส่วน R_c/H_i เป็นบวกแสดงถึงเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำ อัตราส่วน R_c/H_i เป็นศูนย์แสดงถึงเชื่อมกันคลื่นปริมน้ำ และอัตราส่วน R_c/H_i เป็นลบแสดงถึงเชื่อมกันคลื่นได้น้ำ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับอัตราส่วน R_c/H_i ในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นกับพื้นที่อับคลื่นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาที่ผ่านมา เมื่อเทียบในเชื่อมกันคลื่นได้น้ำของการศึกษานี้มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านอยู่ในช่วง 0.6–1.2 ส่วนการศึกษาที่ผ่านมา มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นอยู่ในช่วง 0.2–1.0 และในเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำของการศึกษานี้มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านอยู่ในช่วง 0.2–0.8 ส่วนการศึกษาที่ผ่านมา มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นอยู่ในช่วง 0.0–0.2

จากการศึกษาครั้งนี้จะพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่สูงกว่า เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ได้จำลองในแบบจำลอง 3 มิติ ทำให้มีผลของการกระจายคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นด้วย อิทธิพลของการกระจายตัวผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่สูงขึ้น โดยเฉพาะพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นจะของเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำ จากการวิเคราะห์การส่งผ่านคลื่นในแนวขนานเชื่อมกันคลื่นในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่า อัตราส่วน B/L ที่มากขึ้นทำให้ช่วงของการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเลื่อนเข้าไปในพื้นที่อับคลื่นมากขึ้น ซึ่งแสดงถึงการส่งผ่านคลื่นที่มากขึ้นผ่านช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในพื้นที่อับคลื่นมีค่าสูงขึ้นกว่าการจำลองแบบ 2 มิติ



ก) ผลการจากศึกษา



ข) ผลการศึกษาของ van der Meer et al. (2005)

รูปที่ 4-9 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับอัตราส่วน R_c/H_i ของการศึกษาครั้งนี้

4.7 การวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับตัวแปรไร้หน่วย

จากผลการศึกษาที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา นำข้อมูลหาสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับตัวแปรที่สนใจ โดยใช้ตัวแปรที่สนใจในรูปของตัวแปรไร้หน่วยในกลุ่มตัวแปรเปลี่ยนแปลงค่า อันได้แก่ ความชันคลื่น (H_i/L) อัตราส่วนของระยะห่างของช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นต่อความยาวคลื่น (B/L) และอัตราส่วนระดับน้ำหลังสันเขื่อนกันคลื่นต่อความสูงคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะ (R_c/H_i) ไม่วิเคราะห์ถึงผลของตัวแปรไร้หน่วยกลุ่มค่าคงที่เนื่องไม่อยู่ในขอบเขตการศึกษา นี้ การศึกษานี้จะวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ตัวแปรไร้หน่วยกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น

รวมเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่ของทั้งกรณีเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำและเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำโดยวิธีการวิเคราะห์ความถดถอย (regression analysis) ผลของสมการความสัมพันธ์จะอยู่ในรูปดังสมการที่ 4-6

$$K_t = A \cdot \left(\frac{H_i}{L}\right)^a \cdot \left(\frac{B}{L}\right)^b \cdot \left(\left|\frac{R_c}{H_i}\right|\right)^c \quad (4-6)$$

โดยที่ K_t คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ย

$\frac{H_i}{L}$ คือ ความชันคลื่น

$\frac{B}{L}$ คือ อัตราส่วนของระยะห่างของช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นต่อความความคลื่น

$\left|\frac{R_c}{H_i}\right|$ คือ อัตราส่วนระดับน้ำหลังสันเชื่อมกันคลื่นต่อความสูงคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะ

A คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของสมการ

a, b, c คือ เลขชี้กำลังในแต่ละตัวแปร

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบความแตกต่างของข้อมูลที่ได้รับปัจจัยที่ต่างระดับกัน จะทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) โดยเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว หรือ 1-way ANOVA เพื่อทดสอบว่าตัวแปรที่ศึกษาตัวใดตัวหนึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยหรือไม่ เพื่อพิจารณาความอิทธิพลของตัวแปรที่ศึกษาต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยจึงวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วน (Coefficients of Partial Correlation) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยกับตัวแปรที่ศึกษาตัวใดตัวหนึ่งโดยให้ตัวแปรอื่นๆ มีค่าคงที่ (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2556) หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ความถดถอยเพื่อหาสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A และเลขชี้กำลัง a, b, c แต่ละแต่ละกรณีศึกษา โดยการใช้ข้อมูลการศึกษาในแต่ละเงื่อนไขการทดลองในตารางที่ 4-2 และหาสมการที่สอดคล้องกับผลการทดลองและมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) ที่มากที่สุด โดยมีรายในแต่ละกรณีเชื่อมกันคลื่นดังนี้

4.7.1 สมการความสัมพันธ์ในกรณีเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำ

ก่อนการพิจารณาหาสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยจะทำการทดสอบว่าตัวแปรที่ศึกษาตัวใดตัวหนึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยหรือไม่ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว พบว่าตัวแปรที่ศึกษาที่มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในกรณีเชื่อมกันคลื่นพื้นน้ำ และมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิง

ส่วนที่สูง ดังนั้นตัวแปรที่ศึกษามีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในการศึกษา

การหาสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยโดยวิธีวิเคราะห์ความถดถอย ให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ค่าคงที่และเลขชี้กำลังในรูปของสมการที่ 4-6 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) ที่มากที่สุด โดยจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4-7. ในพื้นที่อับคลื่นและสมการที่ 4-8 ในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น ตามลำดับ

พื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น

$$K_t = 0.0071 \cdot \left(\frac{H_i}{L}\right)^{-1.130} \cdot \left(\frac{B}{L}\right)^{1.158} \cdot \left(\left|\frac{R_c}{H_i}\right|\right)^{-1.188} \quad (4-8)$$

$$R^2 = 0.99$$

พื้นที่อับคลื่น

$$K_t = 0.0021 \cdot \left(\frac{H_i}{L}\right)^{-1.451} \cdot \left(\frac{B}{L}\right)^{0.621} \cdot \left(\left|\frac{R_c}{H_i}\right|\right)^{-1.384} \quad (4-7)$$

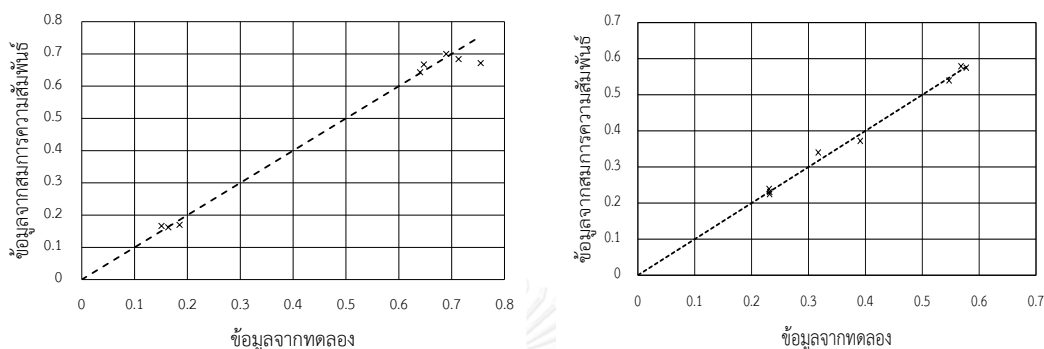
$$R^2 = 0.99$$

ตารางที่ 4-3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วนของเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ

| | พื้นที่ที่พิจารณา | H_i/L | B/L | $ R_c/H_i $ |
|-----------------------|--------------------------------------|---------|-------|-------------|
| เขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ | พื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น | -0.947 | 0.994 | -0.964 |
| | พื้นที่อับคลื่น | -0.992 | 0.995 | -0.994 |

เมื่อนำสมการไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยและสร้างกราฟการกระจายข้อมูลดังรูปที่ 4-10 พบว่า ผลของการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการศึกษา และค่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของทั้งสองสมการความสัมพันธ์มีค่าที่สูง แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีความสัมพันธ์กับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยที่ศึกษาอย่างมาก เมื่อพิจารณาค่าพบว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วนทั้งสามตัวแปรมีค่าใกล้เคียงกัน โดยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วนมีค่าดังตารางที่ 4-3 พบว่าค่าความชันคลื่นและอัตราส่วน R_c/H_i จะ

พบว่ามีความสัมพันธ์แบบผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในเขื่อนกันคลื่นพื่นน้ำ แต่ค่าอัตราส่วน B/L มีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรงแต่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา



ก พื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น

ข พื้นที่อัปคลื่น

รูปที่ 4-10 กราฟการกระจายข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นพื่นน้ำ

4.7.2 สมการความสัมพันธ์ในกรณีเขื่อนกันคลื่นปริ่มน้ำ

ดังกรณีการหาความสัมพันธ์ในกรณีที่ผ่านมา ก่อนการพิจารณาหาสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยจะวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว พบว่าตัวแปรที่ศึกษาไม่มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในกรณีเขื่อนกันคลื่นปริ่มน้ำ แต่เพื่ออธิบายพฤติกรรมของการส่งผ่านคลื่นบางประการของคลื่นในกรณีเขื่อนกันคลื่นปริ่ม จึงทำหาค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ศึกษากับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม

จะหาสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมโดยวิธีวิเคราะห์ความถดถอย มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ(coefficient of determination, R^2) ที่มากที่สุด แต่เนื่องจากในกรณีเขื่อนกันคลื่นปริ่มน้ำ ค่าอัตราส่วน R_c/H_i จะเท่ากับศูนย์ การหาความสัมพันธ์นี้จึงไม่พิจารณา ค่าอัตราส่วน R_c/H_i โดยจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4-9.ในพื้นที่อัปคลื่น และ สมการที่ 4-10 ในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น ตามลำดับ

พื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น

$$K_t = 1.3812 \cdot \left(\frac{H_i}{L}\right)^{0.2110} \cdot \left(\frac{B}{L}\right)^{0.0691} \quad (4-10)$$

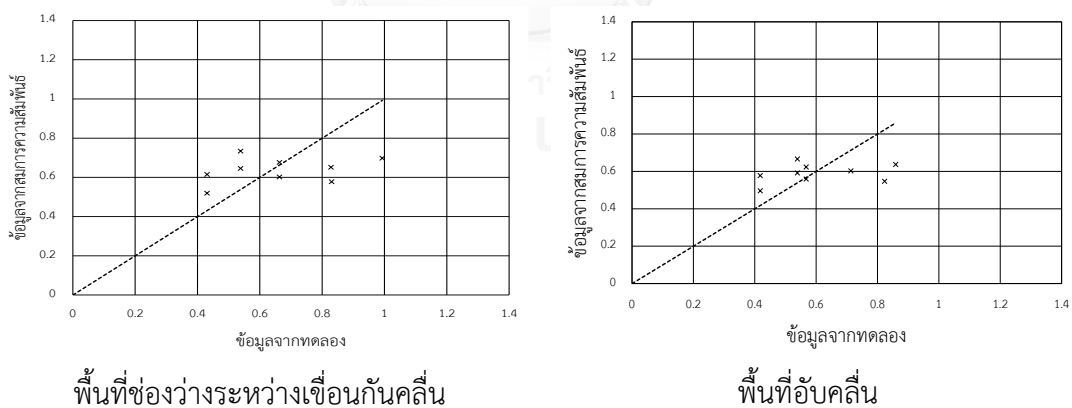
$$R^2 = 0.13$$

พื้นที่อับคลื่น

$$K_t = 1.1015 \cdot \left(\frac{H_i}{L}\right)^{0.171} \cdot \left(\frac{B}{L}\right)^{0.064} \quad (4-9)$$

$$R^2 = 0.12$$

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 ของสมการความสัมพันธ์ในกรณีเขื่อนกันคลื่นปริ่มน้ำ แล้วพบว่า มีค่าที่ค่อนข้างต่ำ และเมื่อนำข้อมูลมาสร้างกราฟการกระจายตัวของข้อมูลดังรูปที่ 4-11 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่ได้จากสมการความสัมพันธ์มีแนวโน้มที่ไม่สอดคล้องกัน ซึ่งแสดงถึงว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในกรณีเขื่อนกันคลื่นที่ปริ่มน้ำมีความสัมพันธ์ที่ไม่ชัดเจนกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วย และจากการทดสอบด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว พบว่าตัวแปรที่ศึกษาไม่มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในกรณีเขื่อนกันคลื่นปริ่มน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับการอภิปรายในหัวข้อที่ผ่านมาที่พบว่า ในกรณีนี้ลักษณะพฤติกรรมเขื่อนกันคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงจากเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำเป็นเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ ได้รับอิทธิพลของการส่งผ่านคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่น การซึมผ่าน และการข้ามล้น ทำให้ไม่สามารถอธิบายลักษณะความสัมพันธ์การส่งผ่านคลื่นกับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยได้อย่างแน่ชัด



รูปที่ 4-11 กราฟการกระจายข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นปริ่มน้ำ

4.7.3 สมการความสัมพันธ์ในกรณีเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ

ดังกรณีการหาความสัมพันธ์ในกรณีที่ผ่านมา ก่อนการพิจารณาหาสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยจะวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว พบว่าตัวแปรที่ศึกษามีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในกรณีเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ และ

พบว่า ในพื้นที่อัปคลีน ค่า $|R_c/H_i|$ มีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วนที่ต่ำ แสดงถึงตัวแปรดังกล่าวไม่มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ย ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ในพื้นที่อัปคลีนจะไม่พิจารณาผลของค่า $|R_c/H_i|$

จะหาสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมโดยวิธีวิเคราะห์ความถดถอย มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) ที่มากที่สุด โดยจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4-11. ในพื้นที่อัปคลีน และ สมการที่ 4-12 ในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น ตามลำดับ

พื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น

$$K_t = 3.6812 \cdot \left(\frac{H_i}{L}\right)^{0.380} \cdot \left(\frac{B}{L}\right)^{-0.082} \cdot \left(\left|\frac{R_c}{H_i}\right|\right)^{0.145} \quad (4-12)$$

$$R^2 = 0.55$$

พื้นที่อัปคลีน

$$K_t = 1.4689 \cdot \left(\frac{H_i}{L}\right)^{0.108} \cdot \left(\frac{B}{L}\right)^{0.099} \quad (4-11)$$

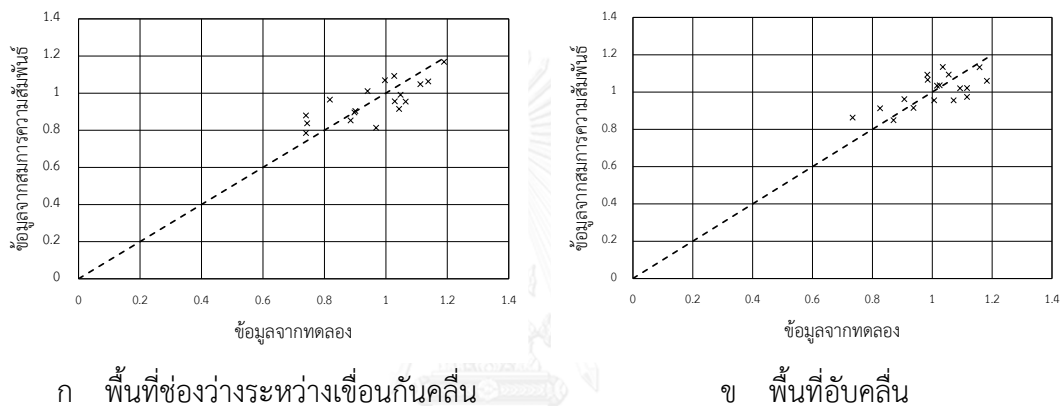
$$R^2 = 0.50$$

ตารางที่ 4-4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วนของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ

| | พื้นที่ที่พิจารณา | H_i/L | B/L | $ R_c/H_i $ |
|----------------------|--------------------------------------|---------|--------|-------------|
| เขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ | พื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น | 0.731 | -0.483 | 0.528 |
| | พื้นที่อัปคลีน | 0.440 | 0.635 | - |

เมื่อนำสมการไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยและสร้างกราฟการกระจายข้อมูลพบว่า แม้ว่าค่า R^2 ของกรณีเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำจะมีค่าน้อยกว่าในกรณีเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ แต่แนวโน้มของข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับข้อมูลจากสมการความสัมพันธ์มีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน แต่มีการกระจายตัวของข้อมูลมากขึ้นจากกรณีเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ ดังรูปที่ 4-12 เมื่อพิจารณาค่าพบว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วนทั้งสามตัวแปรมีค่าที่แตกต่างกัน โดยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วนมีค่าดังตารางที่ 4-4 พบว่าการส่งผ่านคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำได้รับอิทธิพลอย่างมากจาก

ความชันคลื่น ซึ่งเป็นคุณสมบัติของคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น ค่าความชันคลื่นมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ย เช่นเดียวกับกับค่าอัตราส่วน R_c/H_i ที่แปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น แต่อธิพลที่น้อยกว่าค่าความชันคลื่น ค่าอัตราส่วน B/L จะมีความสัมพันธ์แปรผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่น แต่จะมีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในพื้นที่อับคลื่น และเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงสุดในพื้นที่อับคลื่นอีกด้วย



รูปที่ 4-12 กราฟการกระจายข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของเชื่อมกันคลื่นได้นำ

4.7.4 สรุปการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์

จากการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่า สมการความสัมพันธ์มีความสอดคล้องอย่างดีกับเชื่อมกันคลื่นพื่นน้ำและเชื่อมกันคลื่นใต้ แต่ในเชื่อมกันคลื่นปริมน้ำยังมีความสอดคล้องที่ต่ำ สมการสามารถแสดงถึงอิทธิพลของตัวแปรไร้หน่วยต่างๆต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ย แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์นี้มีขอบเขตการใช้งานจำกัด ได้แก่

- 1) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยที่ได้คือค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมที่ตำแหน่ง y/L ในช่วง 3.00 ถึง 4.00
- 2) ครอบคลุมค่าความชันคลื่น (H_i/L) ในช่วง 0.010 ถึง 0.035
- 3) ครอบคลุมค่าอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นกับความยาวคลื่น(B/L) ในช่วง 0.46 ถึง 2.98

- 4) ครอบคลุมค่าอัตราส่วนระหว่างความลึกน้ำเหนือสันเขื่อนกันคลื่นกับความสูงคลื่นวิ่งเข้าปะทะโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น (R_c/H_i) ในช่วง -8.0 ถึง 5.0

4.8 พฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นแนวขนานกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น

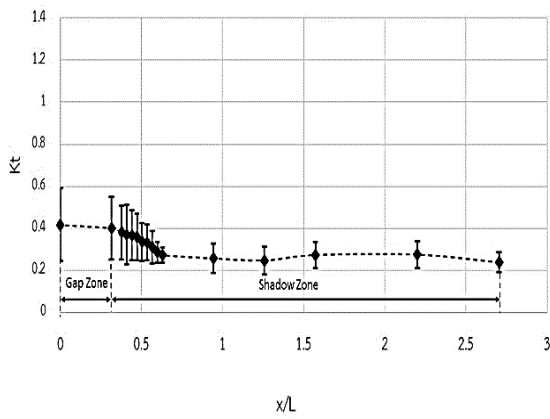
จากหัวข้อที่ผ่านมาของการศึกษาครั้งนี้เป็นการอธิบายผลของพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นในแนวตั้งฉากกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแนวแกน y/L โดยใช้ค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมที่ตำแหน่งที่อยู่ห่างจากสถานะที่มีความปั่นป่วนของคลื่นจากการแตกตัวของคลื่น ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ y/L ประมาณ 3.2–3.7 ในหัวข้อนี้จะอธิบายผลของพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นในแนวขนานกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในแนวแกน x/L เพื่อจะแสดงถึงพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นในแนวขนานกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น

การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแนวขนานกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นหรือแนวแกน x/L จะทำโดยการหาค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมที่พิกัด x/L เดียวกันทุกจุด นำค่าเฉลี่ยมาสร้างกราฟค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเฉลี่ยที่พิกัด x/L ต่างๆในแต่ละกรณีศึกษา เพื่อใช้ในการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นในแต่ละกรณีศึกษา โดยกรณีศึกษา D30 ถึง D50 คือกรณีความลึกน้ำเท่ากับ 0.30, 0.40, 0.45, และ 0.50 เมตร ตามลำดับ กรณีศึกษา BL050 ถึง BL300 คือกรณีค่าอัตราส่วนระหว่างระยะห่างช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นเท่ากับ 0.46–0.52, 1.42–1.56, 2.78–2.93 เท่ากับ ดังรูปที่ 4-13

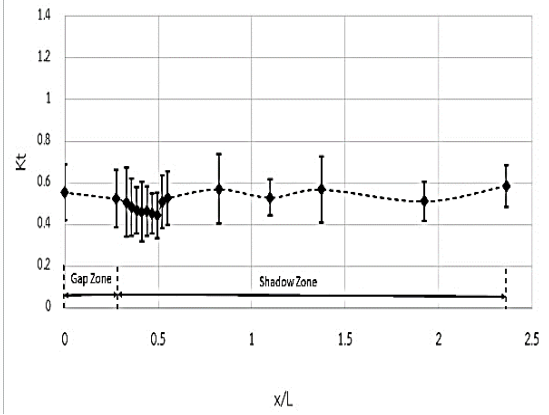
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น จากการศึกษาที่ผ่านมาของเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ เมื่ออัตราส่วนระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะ (B/L) มีค่าน้อย จะทำให้ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นมีลักษณะเหมือนแหล่งกำเนิด (ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น) และกระจายตัวออกเป็นวงกลม (Penney and Price, 1952) จากรูปที่ 4-13 ก) ถึงรูปที่ 4-13 ค) เป็นการส่งผ่านคลื่นผ่านคลื่นกันคลื่นพื้นน้ำที่อัตราส่วน B/L อยู่ในช่วง 0.46–0.54 การส่งผ่านคลื่นส่วนใหญ่จะผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำและกระจายตัวเข้าสู่พื้นที่อับคลื่น จะเห็นได้อย่างชัดเจนค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะสูงสุดในบริเวณช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น (gap zone) และจะลดลงเมื่อคลื่นเข้าสู่พื้นที่อับคลื่น (shadow zone) การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงมากในบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับพื้นที่อับคลื่น เมื่อคลื่นเข้าสู่พื้นที่อับคลื่นมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมจะไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ค่าความชันคลื่นที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในบริเวณช่องว่างระหว่างเขื่อนกัน

คลื่นมีค่าสูงขึ้น แต่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในพื้นที่อับคลื่นจะไม่มีเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญมากนักเมื่อระดับน้ำเพิ่มขึ้นเท่ากับระดับสันโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น การพฤติกรรม การส่งผ่านคลื่นจะเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากคลื่นสามารถข้ามสันเขื่อนกันคลื่นได้ ทำให้การส่งผ่านคลื่นไปยังพื้นที่อับคลื่นมีค่าสูงขึ้น จากรูปที่ 4-13 ง) ถึงรูปที่ 4-13 ฉ) การล้นข้ามสันเขื่อนกันคลื่นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น การส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นและการล้นข้ามสันเขื่อนกันคลื่นมีอิทธิพลเท่ากันในกรณีระดับน้ำเท่ากับระดับสันโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น

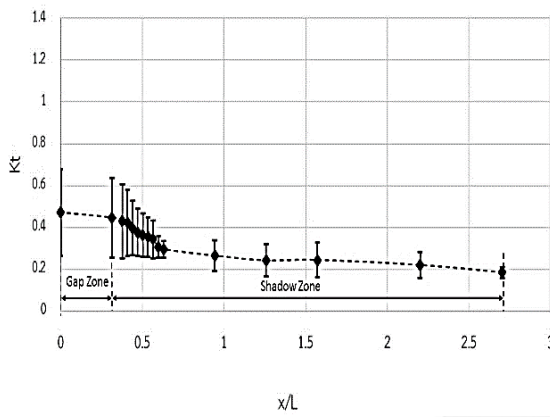
การเพิ่มมากขึ้นของระดับน้ำจนท่วมสันเขื่อนกันคลื่น พฤติกรรมเขื่อนกันคลื่นจะเปลี่ยนไปเป็นเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยค่าสูงขึ้นการส่งผ่านคลื่นมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของการข้ามสันเขื่อนกันคลื่น จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมบริเวณพื้นที่อับคลื่นจะมีค่าสูงกว่าในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น เนื่องจากการส่งผ่านคลื่นผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นส่วนใหญ่เกิดจากการข้ามสันเขื่อนกันคลื่น เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะเขื่อนกันคลื่นที่มีความลาดชัน พฤติกรรมคลื่นจะเหมือนการเคลื่อนที่เข้าสู่หน้าดิน คลื่นจะมีการยกตัวสูงขึ้นและกระจายตัวเข้าสู่พื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น จากรูปที่ 4-13 ช) ถึงรูปที่ 4-13 ฐ) จะพบว่าระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยจะสูงในพื้นที่อับคลื่นและจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากในช่วงรอยต่อระหว่างพื้นที่อับคลื่นกับพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น ระดับน้ำที่มากขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยสูงขึ้นเช่นกัน อิทธิพลของค่าความชันคลื่นส่งผลถึงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยสูงขึ้นในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นแต่ในพื้นที่อับคลื่นจะไม่มีเปลี่ยนแปลงมากนัก



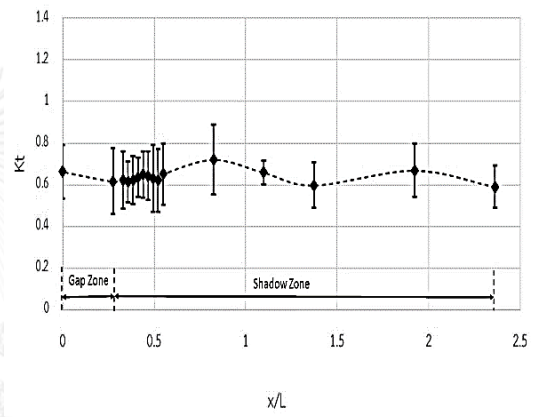
ก) กรณีส D30BL050W01



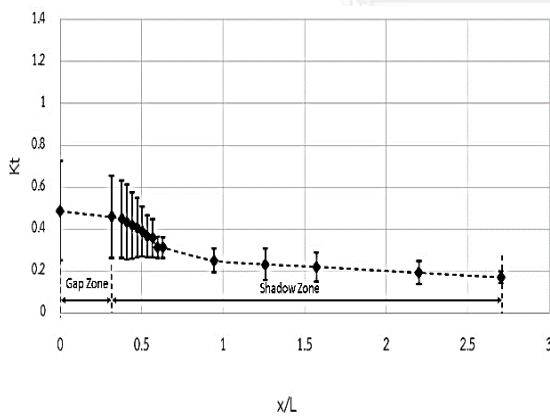
ง) กรณีส D40BL050W01



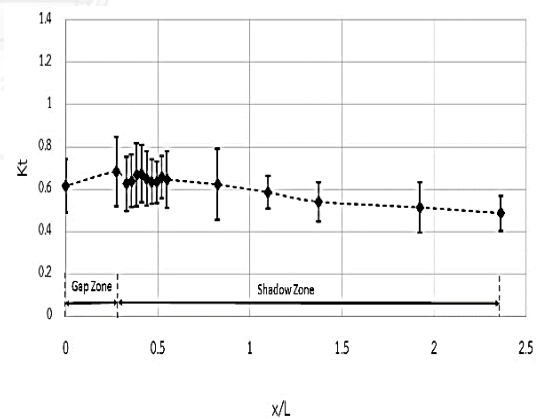
ข) กรณีส D30BL050W02



จ) กรณีส D40BL050W02

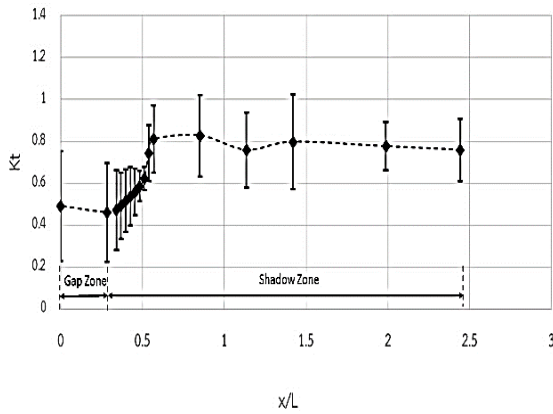


ค) กรณีส D30BL050W03

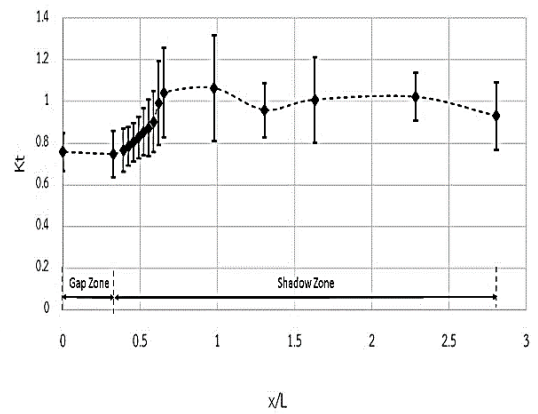


ฉ) กรณีส D40BL050W03

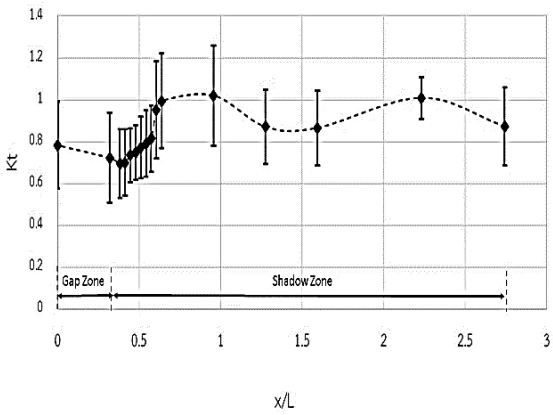
รูปที่ 4-13 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเฉลี่ยแต่ละพิกัด x/L



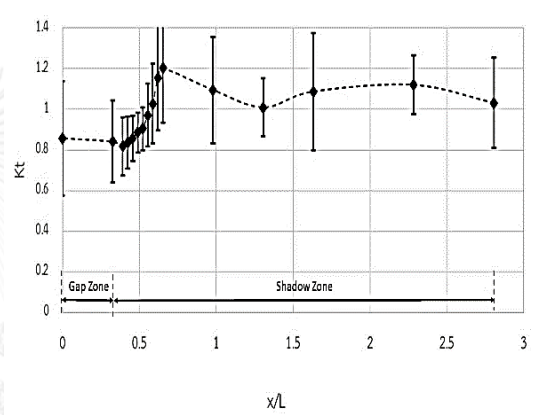
ข) กรณี D45BL050W01



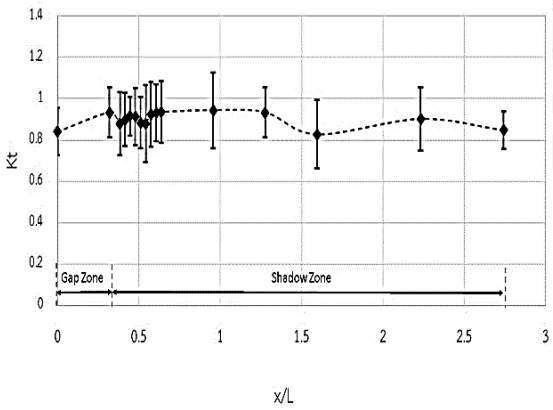
ฅ) กรณี D50BL050W01



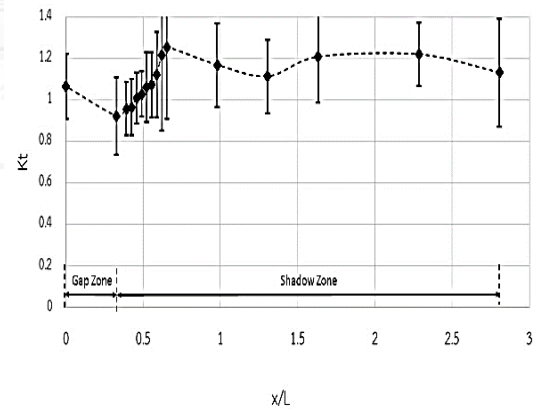
ช) กรณี D45BL050W02



ฅ) กรณี D50BL050W02

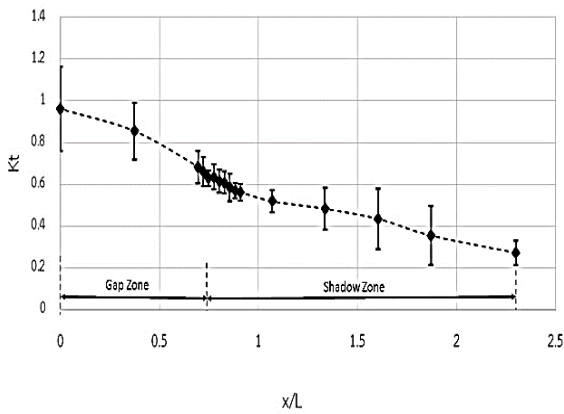


ฉ) กรณี D45BL050W03

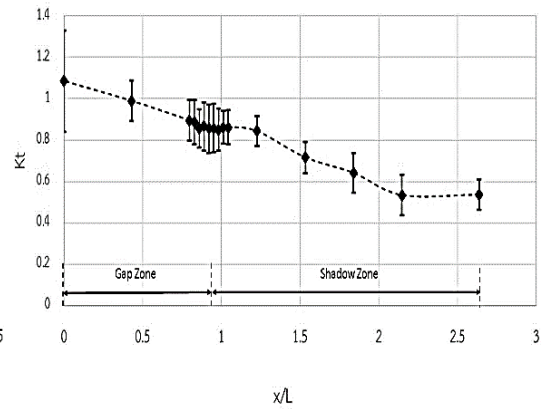


ค) กรณี D50BL050W03

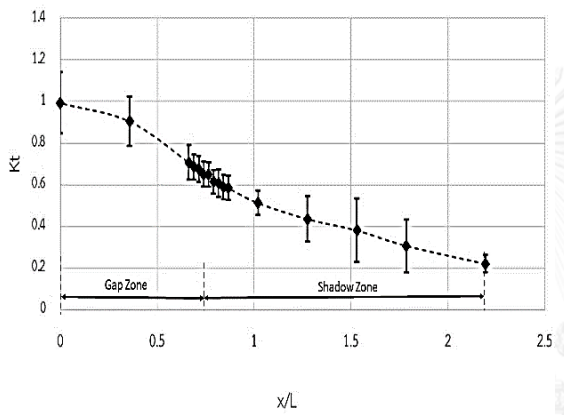
รูปที่ 4-13 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเฉลี่ยแต่ละพิกัด x/L



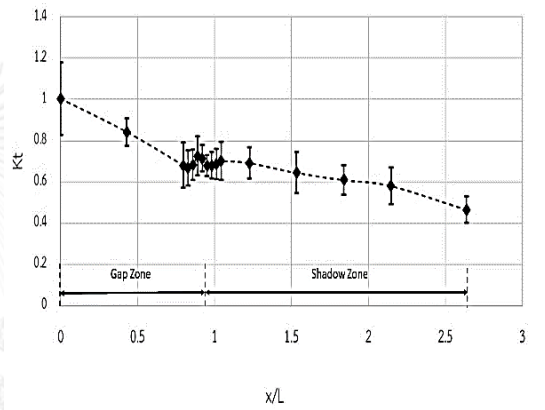
๗) กรณี D30BL150W01



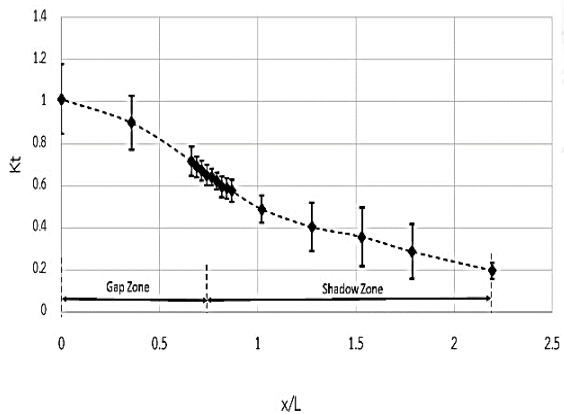
ด) กรณี D40BL150W01



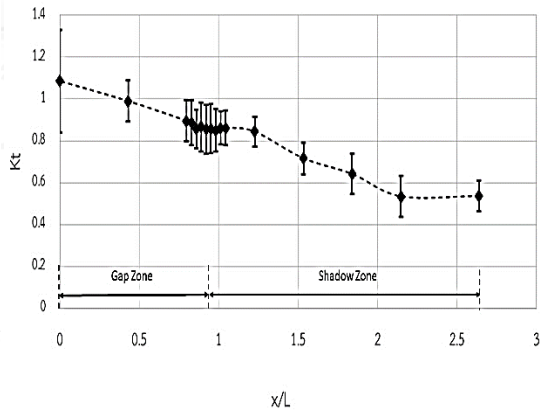
ฅ) กรณี D30BL150W02



ต) กรณี D40BL150W02

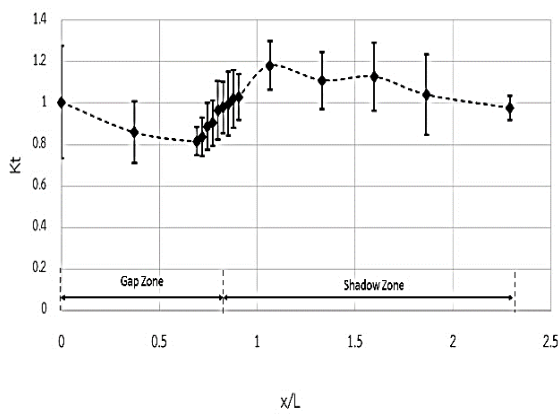


ณ) กรณี D30BL150W03

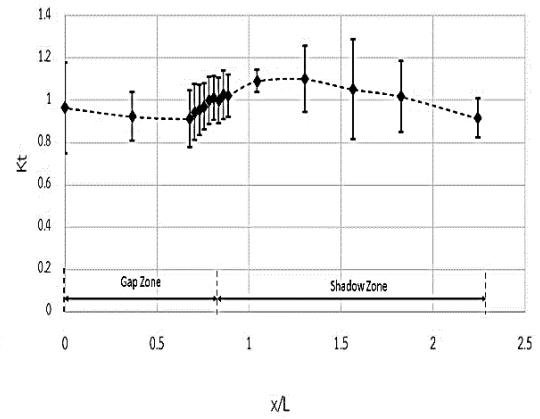


ถ) กรณี D40BL150W03

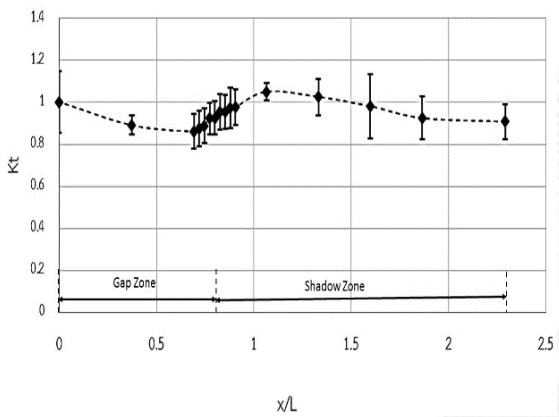
รูปที่ 4-13 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเฉลี่ยแต่ละพิกัด x/L



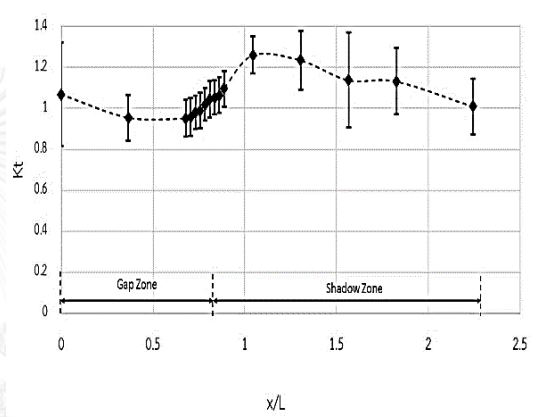
ท) กรณี D45BL150W01



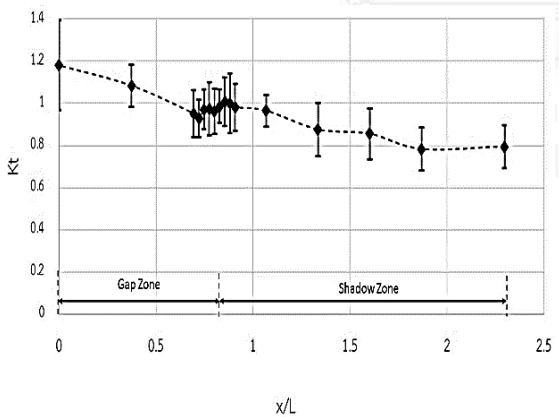
บ) กรณี D50BL150W01



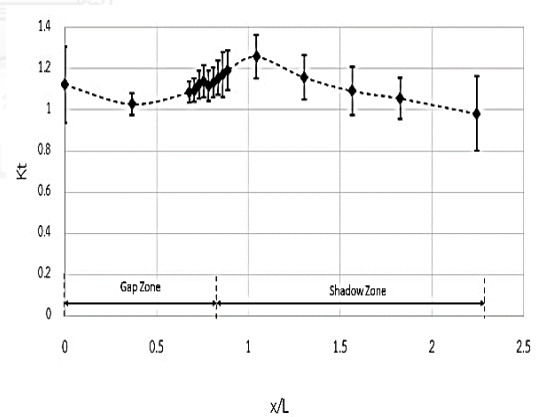
จ) กรณี D45BL150W02



ป) กรณี D50BL150W02

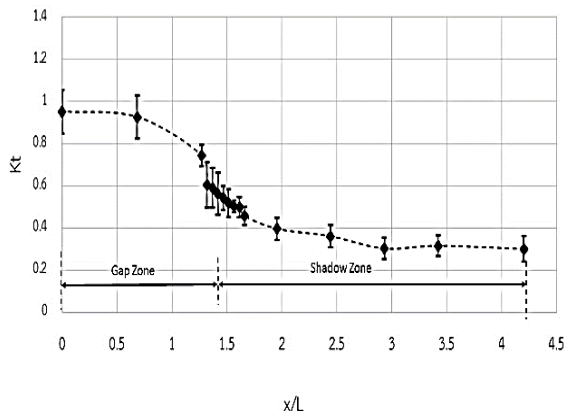


น) กรณี D45BL150W03

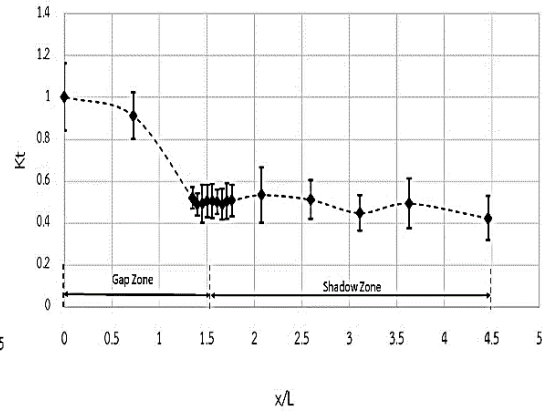


ผ) กรณี D50BL150W03

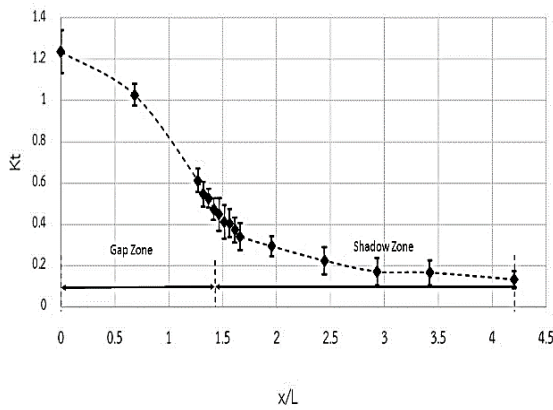
รูปที่ 4-13 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเฉลี่ยแต่ละพิกัด x/L



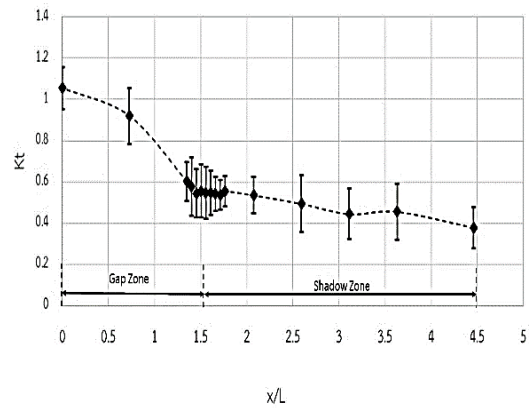
จ) กรณี D30BL300W01



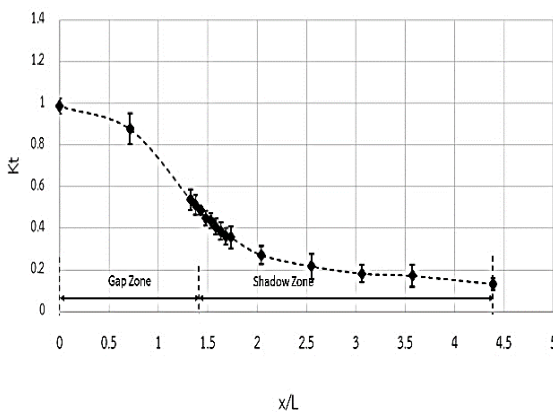
ข) กรณี D40BL300W01



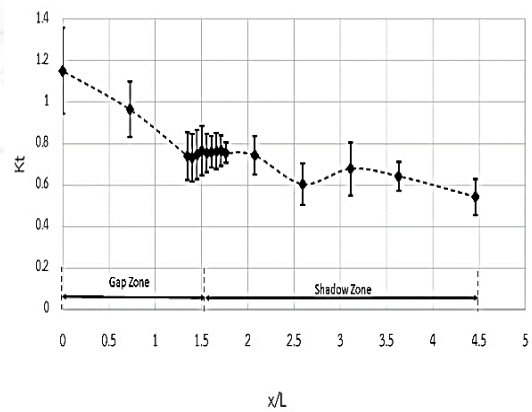
ค) กรณี D30BL300W02



ด) กรณี D40BL300W02

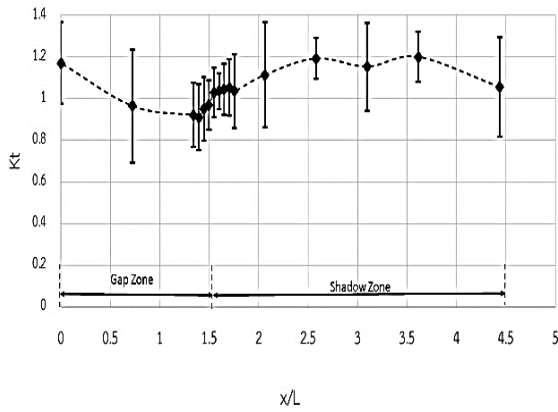


ฉ) D30BL300W03

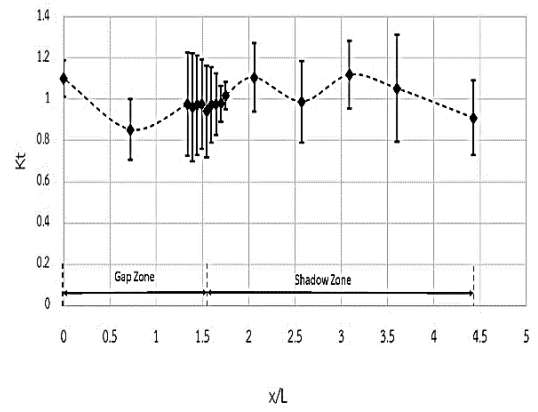


ช) กรณี D40BL300W01

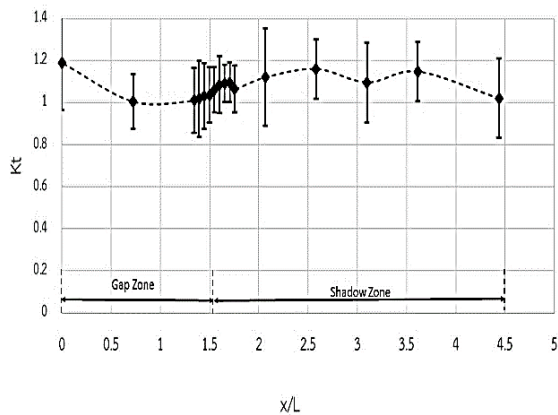
รูปที่ 4-11 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเฉลี่ยแต่ละพิภัก x/L



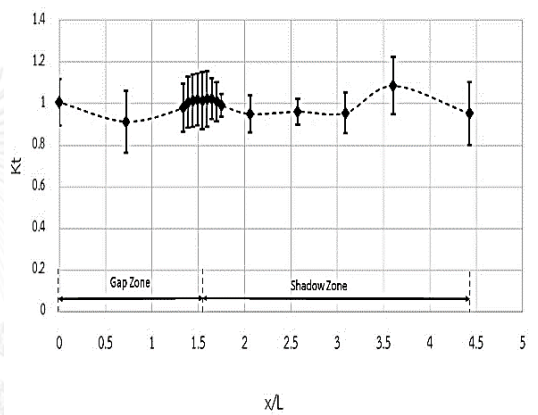
ร) กรณี D45BL300W01



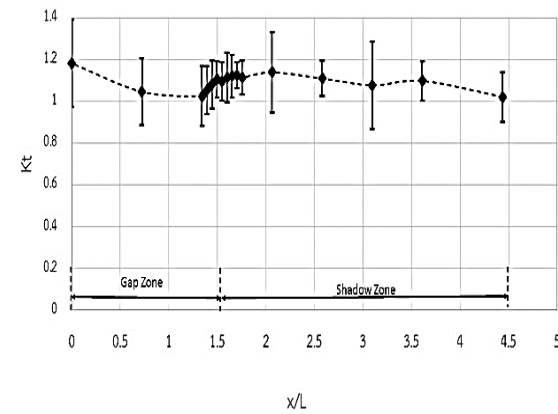
ค) กรณี D50BL300W01



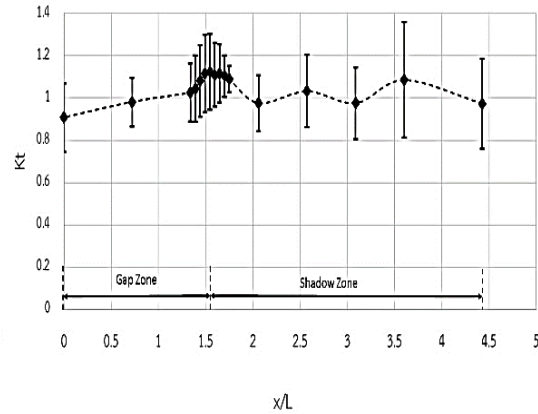
ล) D45BL300W02



ช) กรณี D50BL300W02



ง) D50BL300W03



จ) กรณี D50BL300W03

รูปที่ 4-13 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเฉลี่ยแต่ละพิกัด x/L

เมื่อพิจารณาเพิ่มอัตราการอัตราส่วนระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะ (B/L) เป็น 1.42–1.56 ในเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำดังรูปที่ 4-13 ท) ถึงรูปที่ 4-13 ฉ) พบว่าการส่งผ่านคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำส่วนใหญ่ยังเป็นการส่งผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นและมีการส่งผ่านคลื่นที่สูงขึ้น(ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น) มีการกระจายตัวเข้าสู่พื้นที่อับคลื่นมากขึ้น ทำให้พื้นที่อับคลื่นมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในพื้นที่อับคลื่นสูงกว่าในกรณีอัตราส่วน B/L น้อยกว่า เนื่องจากการคลื่นสามารถส่งผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นได้มากขึ้น เนื่องจากการศึกษาที่มีข้อจำกัดพื้นที่เก็บข้อมูล ทำให้ช่วงที่เก็บข้อมูลในแนว x/L นั้นการส่งผ่านคลื่นยังอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยจึงยังมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยสูงในบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นที่อับคลื่นกับพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น

เมื่อระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับระดับสันเขื่อนกันคลื่น เขื่อนกันคลื่นกลายเป็นเขื่อนกันคลื่นปริมน้ำ พบว่าการค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในพื้นที่อับคลื่น เนื่องจากผลของการข้ามสันเขื่อนกันคลื่นแต่ยังมีค่าน้อยกว่าในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นจึงกระจายตัวเข้าสู่พื้นที่อับคลื่น จะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจากพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นสู่พื้นที่อับคลื่น การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยอย่างมากคือช่วงช่องว่างระหว่างคลื่นกันคลื่น ดังรูปที่ 4-13 ฉ) ถึงรูปที่ 4-13 ค)

เมื่อระดับน้ำเพิ่มขึ้นสูงเหนือสันเขื่อนกันคลื่น พฤติกรรมเขื่อนกันคลื่นเปลี่ยนเป็นแบบได้้น้ำ การข้ามสันเขื่อนกันคลื่นจะมีอิทธิพลมากขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นดังรูปที่ 4-13 ท) ถึง รูปที่ 4-13 ฉ) พบว่าพื้นที่อับคลื่นมีความสูงคลื่นเพิ่มขึ้นและกระจายตัวเข้าสู่พื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น การกระจายตัวของคลื่นจากพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นและพื้นที่อับคลื่นทำให้บริเวณช่วงรอยต่อของทั้งสองพื้นที่เกิดการแทรกสอดและหักล้างกัน คลื่นในบริเวณพื้นที่นั้นจึงมีความสูงคลื่นที่ลดลง จะเห็นผลของการแทรกสอดชัดเจนมากขึ้นในระดับน้ำที่สูงมากขึ้น ความแตกต่างระหว่างระดับน้ำในเขื่อนกันคลื่นแบบได้้น้ำส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยแตกต่างกัน กล่าวคือ ระดับน้ำที่สูงกว่าจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยสูงกว่าเช่นกัน

เมื่อพิจารณาการเพิ่มอัตราอัตราการอัตราส่วนระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะ (B/L) มากขึ้น เท่ากับ 2.78–2.93 ซึ่งเป็นอัตราส่วน B/L ที่มากที่สุดในการศึกษาครั้งนี้ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแนวขนานกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นหรือแนวแกน x/L ของเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ จากรูปที่ 4-13 ฉ) ถึงรูปที่ 4-13 พ) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การ

ส่งผ่านคลื่นในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นมีค่าใกล้เคียงกับในกรณีอัตราส่วน B/L เท่ากับ 1.42-1.56 และลักษณะการกระจายตัวของเข้าสู่พื้นที่อับคลื่นก็มีพฤติกรรมใกล้เคียงกัน แต่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากกว่าในช่วงรอยต่อของระหว่างพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับพื้นที่อับคลื่น การพิจารณาการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน B/L ยังพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในพื้นที่อับคลื่นไม่มีเปลี่ยนแปลงมากนัก อย่างไรก็ตาม โดยทั้ง 3 กรณีศึกษาอัตราส่วน B/L ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยประมาณ 0.2-0.4 แต่การเพิ่มค่าอัตราส่วน B/L จะทำให้ช่วงของการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยเพิ่มขึ้น และอัตราการเปลี่ยนแปลงจะสูงขึ้นตามการเพิ่มของอัตราส่วน B/L เนื่องจากการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นมีค่าสูงขึ้น ความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับพื้นที่อับคลื่นมีค่าสูง ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามเช่นกันเมื่อพิจารณาค่าความชันคลื่นมีอิทธิพลทำให้การส่งผ่านคลื่นในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นสูงขึ้น

เมื่อระดับน้ำเพิ่มขึ้นเท่ากับระดับสันเขื่อนกันคลื่น เขื่อนกันคลื่นกลายเป็นเขื่อนกันคลื่นปริ่มน้ำ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแนวขนานกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นหรือแนวแกน x/L ดังรูปที่ 4-13 ก) ถึงรูปที่ 4-13 ย) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของการข้ามสันเขื่อนกันคลื่น โดยเฉพาะพื้นที่อับคลื่นที่มีการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยมากขึ้นอย่างชัดเจน แต่การส่งผ่านคลื่นส่วนใหญ่ยังเกิดจากการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นและกระจายตัวเข้าสู่พื้นที่อับคลื่น ความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับพื้นที่อับคลื่นมีค่าลดลงผลทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยลดลงจากกรณีเขื่อนกันคลื่นปริ่มน้ำ และดังเช่นเขื่อนกันคลื่นปริ่มน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในพื้นที่อับคลื่นไม่มีเปลี่ยนแปลงมากนัก อย่างไรก็ตาม โดยทั้ง 3 กรณีศึกษาอัตราส่วน B/L ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยประมาณ 0.4-0.6 นั่นคือ อัตราส่วน B/L มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยน้อยมาก เมื่อพิจารณาค่าความชันคลื่นมีอิทธิพลทำให้การส่งผ่านคลื่นในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นสูงขึ้น

เมื่อระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้นจนท่วมสันเขื่อนกันคลื่น พฤติกรรมโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นจะเปลี่ยนไปเป็นเขื่อนกันคลื่นแบบใต้น้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแนวขนานกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นหรือแนวแกน x/L ดังรูปที่ 4-11 ร) ถึงรูปที่ 4-11 ส) พบว่าเมื่อคลื่นสามารถข้ามสันเขื่อนกันคลื่นได้มากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยจะเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะในพื้นที่อับคลื่น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยจะมีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น ผลของ

การกระจายตัวของคลื่นในทั้งสองบริเวณที่มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยใกล้เคียงกันทำให้ในช่วงการบริเวณรอยต่อของทั้งสองบริเวณเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง ทำให้ในบริเวณนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยที่ต่ำกว่าบริเวณอื่น เมื่อผลของการข้ามล้นสันเขื่อนมีมากขึ้น อิทธิพลของอัตราส่วน B/L จึงมีน้อยมากในพื้นที่อับคลื่น กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในพื้นที่อับคลื่นมีค่าใกล้เคียงกันในทุกกรณีศึกษาอัตราส่วน B/L ดังเช่นในกรณีเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ และค่าความชันคลื่นมีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยมากนัก

เมื่อพิจารณาโดยรวมของการส่งผ่านคลื่นตามแนวขนานเขื่อนกันคลื่นด้วยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม พบว่า การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำนิ่งเป็นอิทธิพลหลักที่ทำให้พฤติกรรมเขื่อนกันคลื่นเปลี่ยนแปลงไปทำให้การส่งผ่านคลื่นเปลี่ยนแปลงด้วย เมื่อเขื่อนกันคลื่นเป็นเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ การส่งผ่านคลื่นในแนวขนานเขื่อนกันคลื่นจะกระจายตัวจากช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นเข้าสู่พื้นที่อับคลื่นอย่างชัดเจน การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมอยู่ในช่วงรอยต่อระหว่างพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับพื้นที่อับคลื่น จะเห็นได้ถึงผลกระทบของขอบเขื่อนกันคลื่นต่อการส่งผ่านคลื่นได้อย่างชัดเจน เมื่อระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้นทำให้เขื่อนกันคลื่นเป็นเขื่อนกันคลื่นปริมน้ำ การส่งผ่านคลื่นส่วนใหญ่เป็นการข้ามล้นสันเขื่อนกันคลื่น ทำการส่งผ่านคลื่นในแนวขนานเขื่อนกันคลื่นเป็นผลรวมของการกระจายคลื่นและการข้ามล้นสันเขื่อน แต่เมื่อระดับน้ำเพิ่มขึ้นจนเขื่อนกันคลื่นเป็นเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ การข้ามล้นสันเขื่อนจะมีอิทธิพลต่อการส่งคลื่นมากขึ้น การส่งผ่านคลื่นในแนวขนานเขื่อนกันคลื่นจะมีการกระจายตัวของคลื่นจากพื้นที่อับคลื่นเข้าสู่พื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมที่ต่ำกว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะเกิดขึ้นในช่องรอยต่อของพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับพื้นที่อับคลื่น ซึ่งจะเห็นผลกระทบของขอบเขื่อนกันคลื่นเช่นเดียวกับเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ

เมื่อพิจารณาโดยสรุปของการส่งผ่านคลื่นตามแนวแกน x/L ในกรณีเขื่อนกันคลื่นแบบพื้นน้ำ จะมีการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกระจายตัวเข้าสู่พื้นที่อับคลื่นเป็นส่วนใหญ่ เมื่ออัตราส่วน B/L และความชันคลื่นเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ช่วงของการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเลื่อนเข้าไปในพื้นที่อับคลื่นมากขึ้น ทำให้การกระจายคลื่นเข้าสู่พื้นที่อับคลื่นเพิ่มขึ้น เมื่อระดับเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับระดับสันเขื่อนกันคลื่น การส่งผ่านคลื่นจะมีผลของการข้ามล้นสันเขื่อนกันคลื่น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นโดยเฉพาะในพื้นที่อับคลื่น การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน B/L ทำให้การส่งผ่านคลื่นในบริเวณช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในพื้นที่อับคลื่นลดลง และเมื่อระดับท่วมเหนือสันคลื่นกันคลื่น พฤติกรรมโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นจะเปลี่ยนไปเป็นเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ อิทธิพลของการข้ามล้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในพื้นที่อับคลื่นสูงขึ้นใกล้เคียงกับพื้นที่ช่องว่าง

ระหว่างเขื่อนกันคลื่น การกระจายตัวของคลื่นทั้งสองพื้นที่จะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง ในช่วงรอยต่อของทั้งสองบริเวณ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยลดลง



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ทำการจำลองการส่งผ่านคลื่นผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นหินทิ้งโดยแบบจำลองทางกายภาพ 3 มิติ ใช้การจำลองในอ่างจำลองคลื่นขนาดความกว้าง 10 เมตร ยาว 20 เมตร และสูง 0.70 เมตร เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมคลื่นที่ส่งผ่านเขื่อนกันคลื่นและช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นในรูปของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในพื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่น โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ระดับน้ำนิ่ง (still water level) ระยะห่างระหว่างโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น (gap of breakwater) และคุณสมบัติคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะเขื่อนกันคลื่น (incident wave characteristic)

การศึกษาได้เปลี่ยนแปลงตัวแปรที่ศึกษา 3 ตัวแปร ได้แก่ ค่าระดับน้ำนิ่ง 4 ระดับ คือ 0.30, 0.40, 0.45, 0.50 เมตร ค่าความชันคลื่น 3 ช่วงความชันคลื่น อยู่ในช่วง 0.010–0.035 และอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะ 3 ช่วง อยู่ในช่วง 0.40–0.35 จากข้อมูลการศึกษาจะนำมาวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมคลื่นด้านหลังเขื่อนกันคลื่นที่เป็นผลมาจากการเขื่อนที่ผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น

จากผลการศึกษาพบว่า ในบางกรณีโดยเฉพาะเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมที่มากกว่า 1 ในบริเวณพื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่น แต่ไม่สามารถสรุปได้ว่าพลังงานคลื่นเพิ่มขึ้นเนื่องจากข้อมูลความเร็วกระแสน้ำ ดังนั้นจึงยังไม่สามารถวิเคราะห์และสรุปได้อย่างแน่ชัด อีกทั้งการศึกษานี้พบว่าคลื่นพื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่นอาจได้รับอิทธิพลของคลื่นสะท้อนจากด้านข้างและด้านท้ายอ่างจำลองคลื่นที่ได้ใช้อุปกรณ์สลายพลังงานป้องกันแล้ว ผลของคลื่นสะท้อนอาจทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีค่าที่สูง ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการศึกษา การศึกษานี้จึงทำเพียงการเปรียบเทียบพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นระหว่างกันแต่ละเงื่อนไขการศึกษาโดยพิจารณารวมผลของคลื่นที่สะท้อนกำแพงด้านข้างด้วย

5.1.1 พฤติกรรมการส่งผ่านคลื่น

การศึกษานี้เปรียบเทียบการส่งผ่านคลื่นผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นแบบ 3 มิติ โดยรวมผลของการส่งผ่านคลื่นทั้งการซึมผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น การข้ามล้นสันเขื่อนกันคลื่น และการกระจายตัวผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น เมื่อเปรียบเทียบเส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในกรณีเขื่อนกันคลื่นพื่นน้ำ (ระดับน้ำนิ่งเท่ากับ 0.30 เมตร) กับผลการศึกษาของ Johnson (1951) พบว่า ลักษณะการกระจายตัวของเขื่อนกันคลื่นมีแนวโน้มสอดคล้องกัน เมื่อคลื่นเข้าปะทะ

โครงสร้างและกระจายตัวผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น ทิศทางการกระจายตัวคลื่นจะมีทิศทางเดียวกันกับคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะเขื่อนกันคลื่น และมีการกระจายตัวเข้าสู่พื้นที่อับคลื่น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมของการศึกษานี้จะมีค่าสูงกว่าการศึกษาของ Johnson (1951) เนื่องจากการศึกษามีผลของการซึมผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นร่วมกับผลของการกระจายตัวผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรวมสูงขึ้น การส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำยังไม่มีการศึกษา จึงไม่มีการเปรียบเทียบในการศึกษานี้

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการศึกษาที่ผ่านมาของเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ โดยเทียบกับการศึกษาของ Van der Meer (van der Meer et al., 2005) ที่ศึกษาการส่งผ่านคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้งด้วยแบบจำลอง 2 มิติ พบว่าความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในแนวขนานเขื่อนกันคลื่นที่ตำแหน่ง y/L ห่างจากเขื่อนกันคลื่นไกลที่สุดกับค่าอัตราส่วน R_c/H_i ของการศึกษานี้มีแนวโน้มสอดคล้องกับการศึกษาของ van der Meer แต่ผลการศึกษานี้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยมีค่าสูงกว่า เนื่องจากการศึกษานี้มีผลของการกระจายตัวผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นเข้าสู่พื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่น ความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีส่วนสำคัญต่อความถูกต้องของการออกแบบเขื่อนกันคลื่นที่ใช้สมการการส่งผ่านคลื่นแบบ 2 มิติ ที่พิจารณาเฉพาะผลของการข้ามล้นและการซึมผ่านโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น ดังนั้นการออกแบบเขื่อนกันคลื่นจำเป็นต้องพิจารณาผลของการกระจายตัวของคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นเสริมด้วย

5.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์การส่งผ่านคลื่นกับตัวแปรไร้หน่วย

เมื่อวิเคราะห์ผลการศึกษากการส่งผ่านคลื่นโดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์การส่งผ่านคลื่นกับตัวแปรไร้หน่วย ได้แก่ กลุ่มตัวแปรไร้หน่วยค่าคงที่ ความชันคลื่น (H_i/L) อัตราส่วนระหว่างระยะช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่น (B/L) และอัตราส่วนความลึกน้ำเหนือสันเขื่อนกันคลื่นกับความสูงคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะเขื่อนกันคลื่น โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) เมื่อพิจารณากลุ่มตัวแปรไร้หน่วยค่าคงที่ ได้แก่ อัตราส่วน B_3/H_i และอัตราส่วน D_{50}/H_i พบว่าเมื่อพิจารณาในเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นจะได้รับอิทธิพลจากคลื่น แต่เมื่อพิจารณาในพื้นที่อับคลื่น การส่งผ่านคลื่นมีผลของการซึมผ่านเขื่อนกันคลื่นโดยตรง มีอิทธิพลของกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยค่าคงที่มาก ความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยจะผกผันตามกัน และเมื่อพิจารณาในเขื่อนกันคลื่นปริมน้ำและใต้น้ำซึ่งมีพฤติกรรมเหมือนกัน พบว่ากลุ่มตัวแปรไร้หน่วยคงที่มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การผ่านคลื่นรวมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการส่งผ่านคลื่นผ่านเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำส่วนใหญ่เป็นการข้ามล้นสันเขื่อนกันคลื่น ทำ

ให้ลักษณะทางกายของเขื่อนกันคลื่นมีอิทธิพลโดยตรงต่อการส่งผ่านคลื่น โดยความสัมพันธของกุ่มตัวแปรไว้หน่วยกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยจะผกผันตามกันในทั้งพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นและพื้นที่อับคลื่น

- 2) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับความชันคลื่น พบว่าความชันคลื่นมีความสัมพันธ์แบบผกผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม เมื่อความชันคลื่นเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นและพื้นที่อับคลื่นทั้งในกรณีเขื่อนกันคลื่นพื่นน้ำ เขื่อนคลื่นปริมน้ำ และเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ
- 3) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่นในเขื่อนกันคลื่นพื่นน้ำจะแตกต่างกันกับเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ พบว่าในเขื่อนกันคลื่นพื่นน้ำและเขื่อนกันคลื่นปริมน้ำมีพฤติกรรมคลื่นเหมือนกัน ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์กันในแบบไม่เป็นเส้นตรง ในกรณีเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง แต่ในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นจะมีความสัมพันธ์ที่แตกต่างกับในพื้นที่อับคลื่น โดยในพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์กันแบบผกผัน แต่ในพื้นที่อับคลื่นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์กันแบบแปรผันตรง
- 4) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมกับอัตราส่วนระหว่างความลึกน้ำเหนือสันเขื่อนกันคลื่นกับความสูงคลื่น พบว่า ในกรณีเขื่อนกันคลื่นพื่นน้ำอัตราส่วนระหว่างความลึกน้ำเหนือสันเขื่อนกันคลื่นมีค่าเป็นบวก การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระหว่างความลึกน้ำเหนือสันเขื่อนกันคลื่น (สันเขื่อนอยู่เหนือระดับน้ำนิ่งมากขึ้น) ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยมีแนวโน้มที่ลดลง และเมื่อระดับน้ำนิ่งเพิ่มสูงขึ้นจนเท่ากับระดับสันคลื่น เป็นเขื่อนกันคลื่นแบบปริมน้ำ (อัตราส่วนระหว่างความลึกน้ำเหนือสันเขื่อนกันคลื่นมีค่าเป็นศูนย์) ค่าสัมประสิทธิ์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการส่งผ่านคลื่นมีอิทธิพลของการข้ามสันเขื่อนกันคลื่นรวมด้วย เมื่อระดับน้ำเพิ่มสูงท่วมสันเขื่อนกันคลื่น (อัตราส่วนระหว่างความลึกน้ำเหนือสันเขื่อนกันคลื่นมีค่าเป็นลบ) พฤติกรรมคลื่นเปลี่ยนเป็นเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ การข้ามสันเขื่อนมีมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อ อัตราส่วนระหว่างความลึกน้ำเหนือสันเขื่อนกันคลื่นมีค่าลดลง (อัตราส่วน

ระหว่างความลึกน้ำเหนือสันเขื่อนกันคลื่นมีค่าเป็นลบมากขึ้นหรือระดับน้ำนิ่งเหนือสันเขื่อนกันคลื่นสูงขึ้น) ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาของ van der Meer (van der Meer et al., 2005)

5.1.3 การวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์

จากการนำข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมที่ได้จากการทดลองมาหาสมการความสัมพันธ์กับกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยที่ศึกษา พบว่า ในกรณีเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำ สมการความสัมพันธ์ที่ได้มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องอย่างมากกับข้อมูลการทดลอง เมื่อพิจารณาเลขชี้กำลังพบว่า สอดคล้องกับอิทธิพลของกลุ่มตัวแปรไร้หน่วยต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมดังที่วิเคราะห์ไว้ในหัวข้อที่ผ่านมาได้เป็นอย่างดี ในกรณีเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ พบว่า สมการความสัมพันธ์ที่ได้มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง เมื่อพิจารณารูปการกระจายตัวของข้อมูลเมื่อเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมที่ได้มีความสอดคล้องและมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันแต่มีการกระจายตัวของข้อมูลมากขึ้นจากกรณีเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำเนื่องจากการส่งผ่านคลื่นที่มีความซับซ้อนมากกว่า ในกรณีเขื่อนกันคลื่นที่มีสันเท่ากับระดับน้ำนิ่งจะพบว่า เขื่อนกันคลื่นจะเป็นช่วงของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากเขื่อนกันคลื่นพื้นน้ำเป็นเขื่อนกันคลื่นใต้น้ำ ทำให้มีพฤติกรรมการส่งผ่านที่ซับซ้อนมาก สมการความสัมพันธ์ที่ได้มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องไม่มากนักกับข้อมูลการทดลอง และเมื่อพิจารณาพิจารณารูปการกระจายตัวของข้อมูลเมื่อเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมที่ได้ไม่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

5.1.4 พฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นแนวขนานกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่น

เมื่อพิจารณาการส่งผ่านคลื่นในแนวขนานกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นโดยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในแนวขนานกับโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นหรือแนวแกน x/L จะทำโดยการหาค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมที่พิกัด x/L เดียวกันทุกจุด นำค่าเฉลี่ยมาสร้างกราฟค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยที่พิกัด x/L ต่างๆในแต่ละกรณีศึกษา และใช้การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในการอธิบายถึงพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่น โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) การส่งผ่านคลื่นตามแนวแกน x/L ในกรณีเขื่อนกันคลื่นแบบพื้นน้ำจะมีการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นและกระจายตัวเข้าสู่พื้นที่อับคลื่นเป็นส่วนใหญ่ เมื่ออัตราส่วน B/L และความชันคลื่นเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ช่วงของการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเลื่อนเข้าไปในพื้นที่อับคลื่นมากขึ้น ทำให้การกระจายคลื่นเข้าสู่พื้นที่อับคลื่น

เพิ่มขึ้น เมื่อระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับระดับสันเขื่อนกันคลื่น การส่งผ่านคลื่นจะมีผลของการข้ามสันเขื่อนกันคลื่นทำให้สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นโดยเฉพาะในพื้นที่อับคลื่น การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน B/L ในบริเวณช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่นมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในพื้นที่อับคลื่นลดลง

- 2) การส่งผ่านคลื่นตามแนวแกน x/L ในกรณีเขื่อนกันคลื่นแบบใต้น้ำจะมีอิทธิพลของการข้ามสันส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยในพื้นที่อับคลื่นสูงขึ้นใกล้เคียงกับพื้นที่ช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น การกระจายตัวของคลื่นทั้งสองพื้นที่จะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างในช่วงรอยต่อของทั้งสองบริเวณ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเฉลี่ยลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) การศึกษาการส่งผ่านคลื่นครั้งนี้ได้พิจารณาเพียงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมเท่านั้น เพื่อให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของการส่งผ่านคลื่นและอิทธิพลของเขื่อนกันคลื่นมากขึ้น ควรศึกษาพฤติกรรมของกระแสหน้าด้านหลังเขื่อนกันคลื่นที่เกิดจากการส่งผ่านคลื่นรวมด้วย
- 2) จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมมีความสัมพันธ์กับตัวแปรไร้หน่วย ได้แก่ อัตราส่วน R_c/H_i อัตราส่วน B/L อัตราส่วน H_i/L เป็นต้น รวมถึงตัวแปรนอกขอบเขตการศึกษา โดยพิจารณาเป็นตัวแปรคงที่ เพื่อให้ครอบคลุมและสามารถอธิบายได้มากขึ้น จึงควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในกลุ่มตัวแปรกลุ่มตัวแปรอื่นๆ เช่น ความกว้างของสันเขื่อนกันคลื่น เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเขื่อนกันคลื่น ความยาวของเขื่อนกันคลื่นด้วย
- 3) เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในพื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่น พบว่า มีการแทรกสอดและเกิดแนวบัพและปฏิบัพ ซึ่งเป็นผลของการส่งผ่านคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างเขื่อนกันคลื่น จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงการเกิดการแทรกสอดและอธิบายตามหลักทางวิชาการ
- 4) จากการศึกษาพบว่าผลของคลื่นสะท้อนจากกำแพงด้านข้างทำให้คลื่นในพื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่นมีค่าที่สูง ผลทำให้การพิจารณาคคลื่นด้านหลังเป็นผลรวมของการส่งผ่านคลื่นกับคลื่นสะท้อนด้านข้าง จึงควรมีการลดการสะท้อนของคลื่นจากกำแพงด้านข้างก่อนทำการทดลอง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, โครงการจัดทำแผนหลักและแผนปฏิบัติการแก้ไขปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งทะเลบริเวณอ่าวไทยตอนบน. สถาบันวิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2551.
- กัลยา วานิชย์บัญชา, *การวิเคราะห์สถิติ:สถิติสำหรับการบริหารและวิจัย*, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- ธีรนนท์ ปันใจลือ และ อนุรักษ ศรีอริยวัฒน์, *การศึกษาการส่งผ่านและการกระจายคลื่นผ่านช่องว่างระหว่างโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์*. การประชุมวิชาการ วิศวกรรมแหล่งน้ำแห่งชาติ ครั้งที่6. โรงแรมเซ็นทารา โฮเทล แอนด์ คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์ จังหวัดอุดรธานี. 2558.
- สุวีร์ ศรียี่สุน, *การส่งผ่านและการกระจายคลื่นของโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นใต้น้ำแบบหินทิ้งพร้อมด้วยรูปแบบกระแสน้ำ*. ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- เสรี จันทโรยธา, *ชลศาสตร์*, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

ภาษาอังกฤษ

- Briggs, M. J., Thompson, E. F., Vincent, C. L., Member & ASCE, Wave Diffraction Around Breakwater. Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering. 121, 13, 1995.
- d'Angremond, K., van der Meer, J. W. & De Jong, R. J., Wave Transmission At Low-Crested Structure. *Proc, 25th Int. Conf. on Coastal Engineering*. ASCE. 1996.
- Dronen, N., Karunarathna, H., Fredsoe, J., Sumer, B. M. & Deigaard, R., An experimental study of rip channel flow. Coastal Engineering. 45, 223-238, 2002.
- Goda, Y., Re-analysis of Laboratory Data on wave Transmission over Breakwaters. Port and Harbour Research Institute. 1969.
- Goda, Y. & Ahrens, J. P. New formulation of wave transmission over and through low-crested structures. Proceedings of the 31st International Conference of Coastal Engineering, 2008. World Scientific.
- Goda, Y., Takayama, T. & Suzuki, T., Diffraction diagrams for directional random waves. Coastal Engineering Proceedings. 1, 1978.

- Hanson, H. & Kraus, N. C., Shoreline response to a single transmissive detached breakwater. Coastal Engineering Proceedings, 1, 1990.
- Johnson, J., Generalized wave diffraction diagrams. Coastal Engineering Proceedings, 1, 2, 1951.
- Manual, S. P. & Handbook, S. W. S., volume II. US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory, 1984.
- Nobuoka, H., Irie, I., Kato, H. & Mimura, N., Regulation of nearshore circulation by submerged breakwater for shore protection. Coastal Engineering Proceedings, 1, 1996.
- Penney, W. G. & Price, A. T., Part I. The Diffraction Theory of Sea Waves and the Shelter Afforded by Breakwaters. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 244, 236-253, 1952.
- Project, I.-T. & Agency, J. I. C., Oceanographic Data Observation Survey. Department of Water Resource Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University 2012.
- Ranasinghe, R., Larson, M. & Savioli, J., Shoreline response to a single shore-parallel submerged breakwater. Coastal Engineering, 57, 1006-1017, 2010.
- Ranasinghe, R. & Turner, I. L., Shoreline response to submerged structures: a review. Coastal Engineering, 53, 65-79, 2006.
- Robert G., D. & Robert A., D., Water Wave Mechanics For Engineers And Scientists, Prentice-Hall, 1984.
- Seabrook, S. R. & Hall, K. R., Wave transmission at submerged rubblemound breakwaters. Coastal Engineering Proceedings, 1, 1998.
- Sorensen, R. M., Basic Wave Mechanics for Coastal and Ocean Engineers, New York, Wiley, 1993.
- US Army Engineer Waterways Experiment Station & Laboratory, C. a. H., volume I. Shore Protection Manual Handbook, Social Work Student, 1984.
- Van der Baan, A., Developing a design criterion for the shoreline response to multiple submerged breakwaters. TU Delft, Delft University of Technology, 2013.

- van der Meer, J. W., Briganti, R., Zanuttigh, B. & Wang, B., Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change. Coastal Engineering, 52, 915-929, 2005.
- van der Meer, J. W. & Daemen, I. F., Stability and wave transmission at low-crested rubble-mound structures. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 120, 1-19, 1994.
- Wiegel, R., Diffraction of waves by semi-infinite breakwater. Journal of the Hydraulics Division, 88, 27-44, 1962.
- Yu, Y.-X., Liu, S.-X., Li, Y. & Wai, O. W., Refraction and diffraction of random waves through breakwater. Ocean Engineering, 27, 489-509, 2000.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

แบบจำลองทางกายภาพ

ก -1 อ่างจำลองคลื่น

อ่างจำลองมีขนาดกว้าง 10 เมตร ยาว 20 เมตร สูง 0.70 เมตร พื้นและผนังของอ่างจำลองคลื่นเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังรูปที่ รายละเอียดต่างๆ มีดังนี้

- 1) ผนังด้านข้างมีโครงสร้างเหล็กหุ้มลวดด้วยตะแกรงละเอียดภายในบรรจุเม็ดโฟม เพื่อช่วยลดการสะท้อนของคลื่นจากผนังด้านข้าง
- 2) บริเวณปลายอ่างจำลองคลื่น มีหินสลายพลังงาน เพื่อช่วยลดการสะท้อนของคลื่นและทำให้เกิดคลื่นในอ่างจำลองคลื่น หากไม่มีหินสลายพลังงานคลื่นที่สร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ผนังด้านตรงข้าม คลื่นจะสะท้อนกลับเข้ามาในอ่างจำลองคลื่น ทำให้คลื่นที่ได้มีลักษณะเหมือนคลื่นนิ่ง ดังนั้นจึงต้องทำการเทหินทั้งสองด้านของอ่างจำลองการศึกษาครั้งนี้ใช้หินเบอร์#1 เทบริเวณต้นอ่างจำลองคลื่นเป็นแนวลาด 1:3 แลบริเวณปลายอ่างเทเป็นแนวลาด 2 ช่วง ได้แก่ แนวลาด 1:2 และ 1:7 ตามลำดับ
- 3) ระบบการหมุนเวียนน้ำ มีการออกแบบการหมุนเวียนน้ำภายในอ่างจำลองคลื่นกับบ่อกักน้ำด้านข้าง สำหรับการเติมน้ำเข้าอ่างจำลองคลื่น สามารถทำการสูบน้ำจากบ่อกักน้ำโดยใช้เครื่องสูบน้ำแบบขนาดกำลัง 1.5 แรงม้า ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า 220V การสูบน้ำเข้าอ่างจำลองให้มีระดับน้ำสูงขึ้น 20 เซนติเมตร ใช้เวลา 1 ชั่วโมง และระบายน้ำออกทางรูระบายน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว บริเวณปลายอ่างจำลองคลื่นหรือใช้เครื่องสูบน้ำกลับสู่อ่างกักน้ำบริเวณด้านข้างอ่างจำลองคลื่น



รูปที่ ก-1 อ่างจำลองคลื่น

ก - 2 เครื่องกำเนิดคลื่น

เครื่องกำเนิดคลื่นติดตั้งบริเวณปลายด้านหนึ่งของอ่างจำลองคลื่น มีหน้าที่สร้างคลื่นลักษณะต่างๆ ขึ้นอยู่กับการตั้งความเร็วมอเตอร์และระยะช่วงชัก โดยรายละเอียดส่วนประกอบการทำงานดังนี้

- 1) ชุดหม้อแปลงไฟฟ้า มีหน้าที่ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าสม่ำเสมอ ประกอบด้วยตัวเก็บประจุเรียงต่อกันหลายตัว เพื่อเก็บประจุไฟฟ้าและจ่ายไฟเข้าสู่ระบบ
- 2) ชุดปรับความเร็วมอเตอร์ มีหน้าที่ปรับระดับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าก่อนจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่เครื่องมอเตอร์ ซึ่งเป็นการควบคุมรอบการหมุนมอเตอร์ 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 37 กิโลวัตต์ 4 โพล แบบรุ่น SF-JR โดยต่อกับไฟฟ้าขนาดความต่างศักย์ 200 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 14.6 แอมแปร์และทำความเร็วรอบได้สูงสุดที่ 1420 รอบต่อวินาที
- 4) ชุดปรับช่วงชักเป็นก้านที่ต่อมาจากเพลลา ปรับระยะได้ตามต้องการ สำหรับก้านที่ใช้งานมีความยาวแขนสูงสุด 0.40 เมตร
- 5) กระดานสร้างคลื่น เป็นชนิดปลายยึดหมุน (hinge connection) ยึดติดกับห้องอ่างจำลองคลื่น สามารถหมุนกลับไปมาได้ วัสดุที่ใช้ทำเป็นแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ภาคผนวก ข

การเปรียบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

ข-1 การเปรียบเทียบเครื่องมือวัดความสูงคลื่น

การศึกษานี้ใช้เครื่องวัดความสูงคลื่นแบบ CH-403A & CHT4-40 ของบริษัท Kennek จำนวน 4 ตัว คือ AI1, AI2, AI3 และ AI4 ซึ่งการเปรียบเทียบเครื่องมือวัดความสูงคลื่นมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ติดตั้งเครื่องมือวัดความสูงคลื่น ภายในอ่างจำลองคลื่น ดังรูปที่ ก-1
- 2) ติดตั้งกล้องถ่ายวิดีโอ เพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงของระดับผิวน้ำที่ขึ้นลงตามเวลาและหาความสูงคลื่นที่วัดได้จริงจากภาพที่บันทึกได้
- 3) เปิดเครื่องกำเนิดคลื่น เพื่อสร้างคลื่นเข้าปะทะตัวรับสัญญาณ ทำการเก็บข้อมูลคลื่นต่อเนื่อง 3 นาที
- 4) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 2-3 โดยเปลี่ยนแปลงความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะตัวรับสัญญาณ
- 5) คำนวณหาค่าตัวปรับความสูงคลื่นแต่ละตัวรับสัญญาณ จากความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นที่ได้จากกล้องถ่ายวิดีโอกับค่านัยสำคัญของผลต่างระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากที่สุดกับน้อยที่สุด

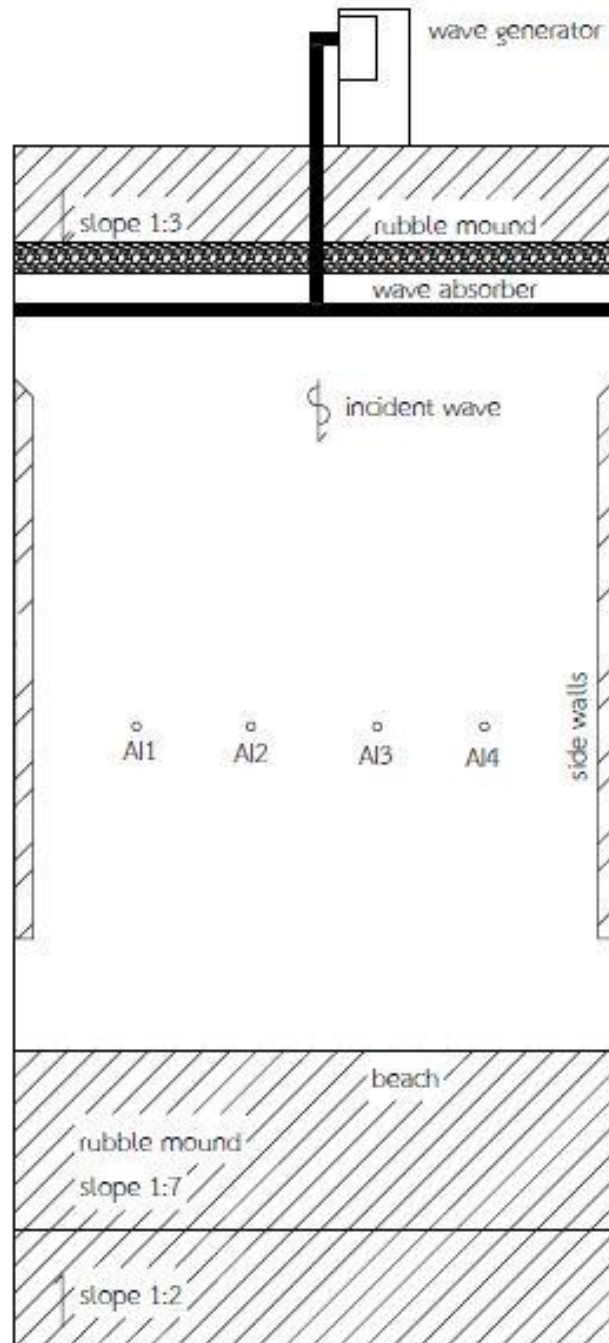
โดยการคำนวณหาค่านัยสำคัญของผลต่างระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากที่สุดกับน้อยที่สุด มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) วิเคราะห์ความถี่ (frequency analysis) เพื่อหาคาบคลื่น ด้วยวิธี power spectral density (PSE) จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าตามเวลาแล้วสร้างเป็นกราฟ density spectral histogram คลื่นแบบสม่ำเสมอจะมีจุดยอดของความถี่ของพลังงานคลื่นเพียงจุดเดียวเท่านั้น โดยมีส่วนกลับของความถี่เป็นคาบคลื่น

2) วิเคราะห์ทางสถิติ (statistical analysis) เพื่อหาความสูงคลื่น โดยการนำคาบคลื่นที่ได้มาแบ่งข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าตามเวลาออกเป็นช่วง หาผลต่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากที่สุดกับน้อยที่สุด

3) คำนวณค่านัยสำคัญของผลต่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากที่สุดกับน้อยที่สุด ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยหนึ่งในสามเมื่อเรียงลำดับจากผลต่างของความต่างศักย์ไฟฟ้าจากมากถึงน้อยตามลำดับ

ซึ่งผลการทดลองเปรียบเทียบเครื่องมือวัดความสูงคลื่น แสดงดังตารางที่ ข-1 ตัวคูณปรับความสูงคลื่น จากรับตัวสัญญาณดังตารางที่ ข-2 รูปความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำจากกล้องวิดีโอกับค่านัยสำคัญของความต่างศักย์ ดังรูปที่ ข-2 ถึง รูปที่ ข-5



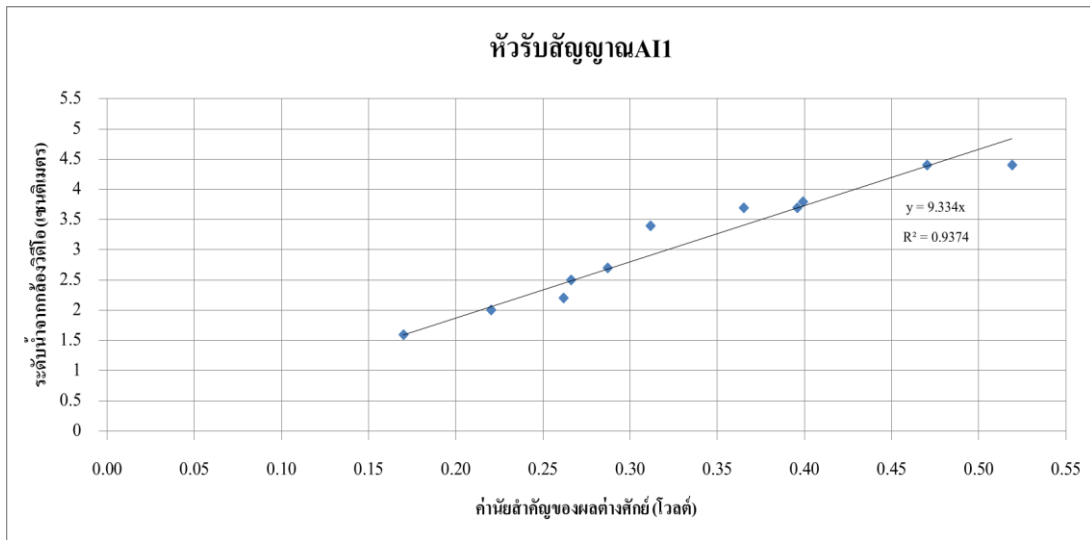
รูปที่ ข-1 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดความสูงคลื่น

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองเปรียบเทียบเครื่องมือวัดความสูงคลื่น

| ระดับน้ำจากกล้องถ่ายวิดีโอ(เซนติเมตร) | ค่านัยสำคัญของผลต่างความต่างศักย์(โวลต์) | | | |
|---------------------------------------|--|------|------|------|
| | AI1 | AI2 | AI3 | AI4 |
| 1.6 | 0.17 | 0.15 | 0.16 | 0.18 |
| 2.0 | 0.22 | 0.18 | 0.21 | 0.19 |
| 2.2 | 0.26 | 0.25 | 0.23 | 0.30 |
| 2.5 | 0.27 | 0.19 | 0.27 | 0.33 |
| 2.7 | 0.29 | 0.33 | 0.32 | 0.37 |
| 3.4 | 0.31 | 0.38 | 0.34 | 0.37 |
| 3.7 | 0.37 | 0.37 | 0.40 | 0.40 |
| 3.7 | 0.40 | 0.34 | 0.41 | 0.46 |
| 3.8 | 0.40 | 0.36 | 0.42 | 0.46 |
| 4.4 | 0.47 | 0.45 | 0.43 | 0.51 |
| 4.4 | 0.52 | 0.47 | 0.43 | 0.50 |

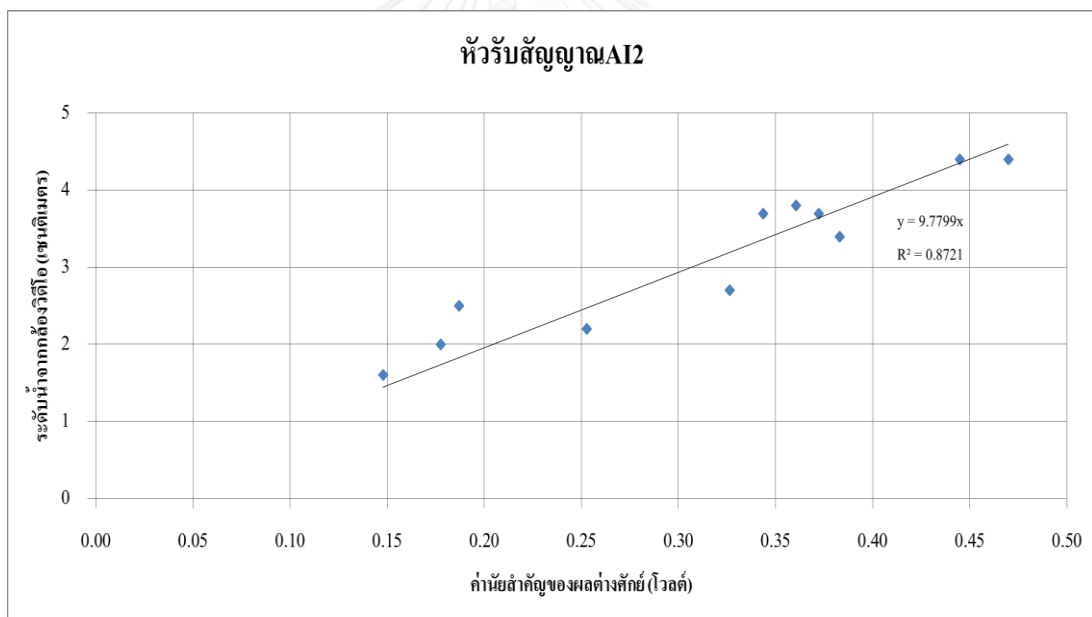
ตารางที่ ข-2 ตัวคูณปรับความสูงคลื่นจากตัวรับสัญญาณ

| ตัวรับสัญญาณ | ตัวคูณปรับความสูงของตัวรับสัญญาณ (เซนติเมตรต่อโวลต์) |
|--------------|---|
| AI1 | 9.334 |
| AI2 | 9.780 |
| AI3 | 9.529 |
| AI4 | 8.443 |



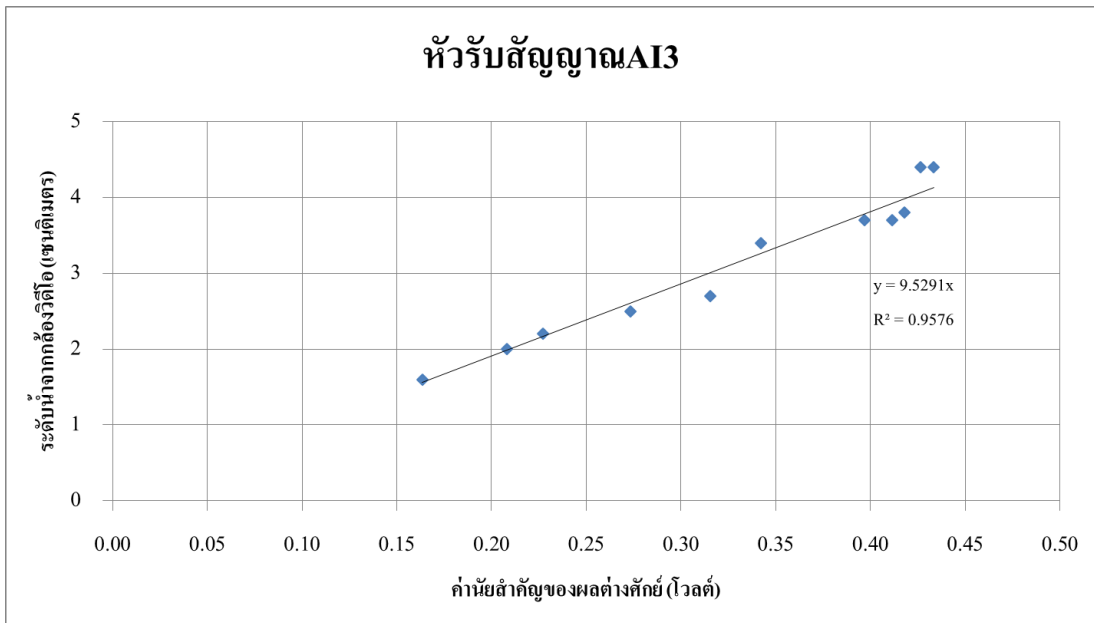
รูปที่ ข-2 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำจากวิดีโอเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยสำคัญของความต่างศักย์เครื่องวัดความสูง

คลื่น AI1

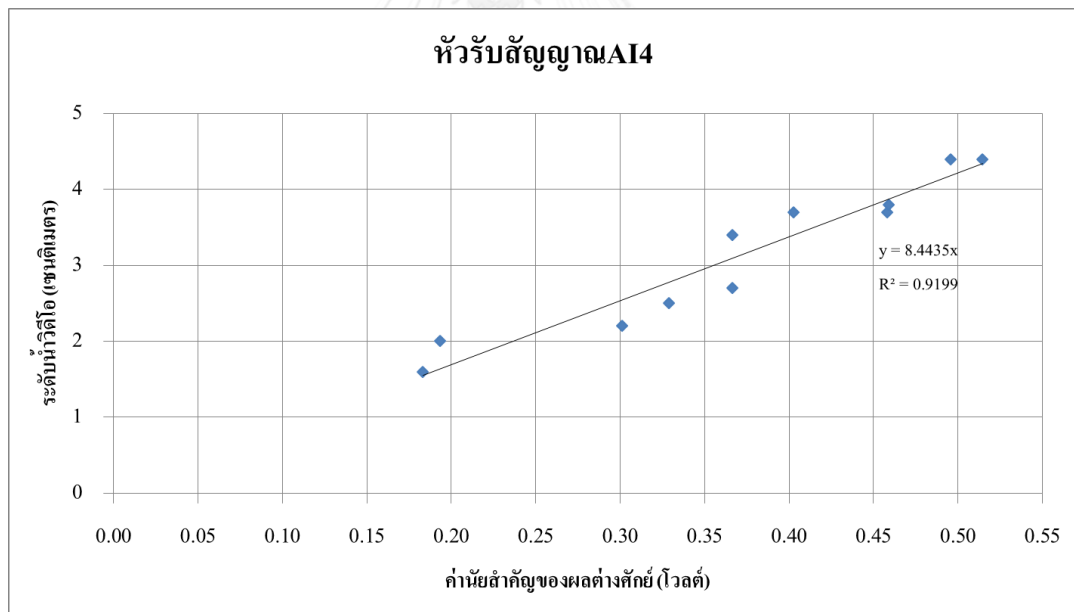


รูปที่ ข-3 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำจากวิดีโอเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยสำคัญของความต่างศักย์เครื่องวัดความสูง

คลื่น AI2



รูปที่ ข-4 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับนำจากวิดีโอกับค่าสำคัญของความต่างศักย์เครื่องวัดความสูง
คลื่น AI3



รูปที่ ข-5 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับนำจากวิดีโอกับค่าสำคัญของความต่างศักย์เครื่องวัดความสูง
คลื่น AI4

ภาคผนวก ค

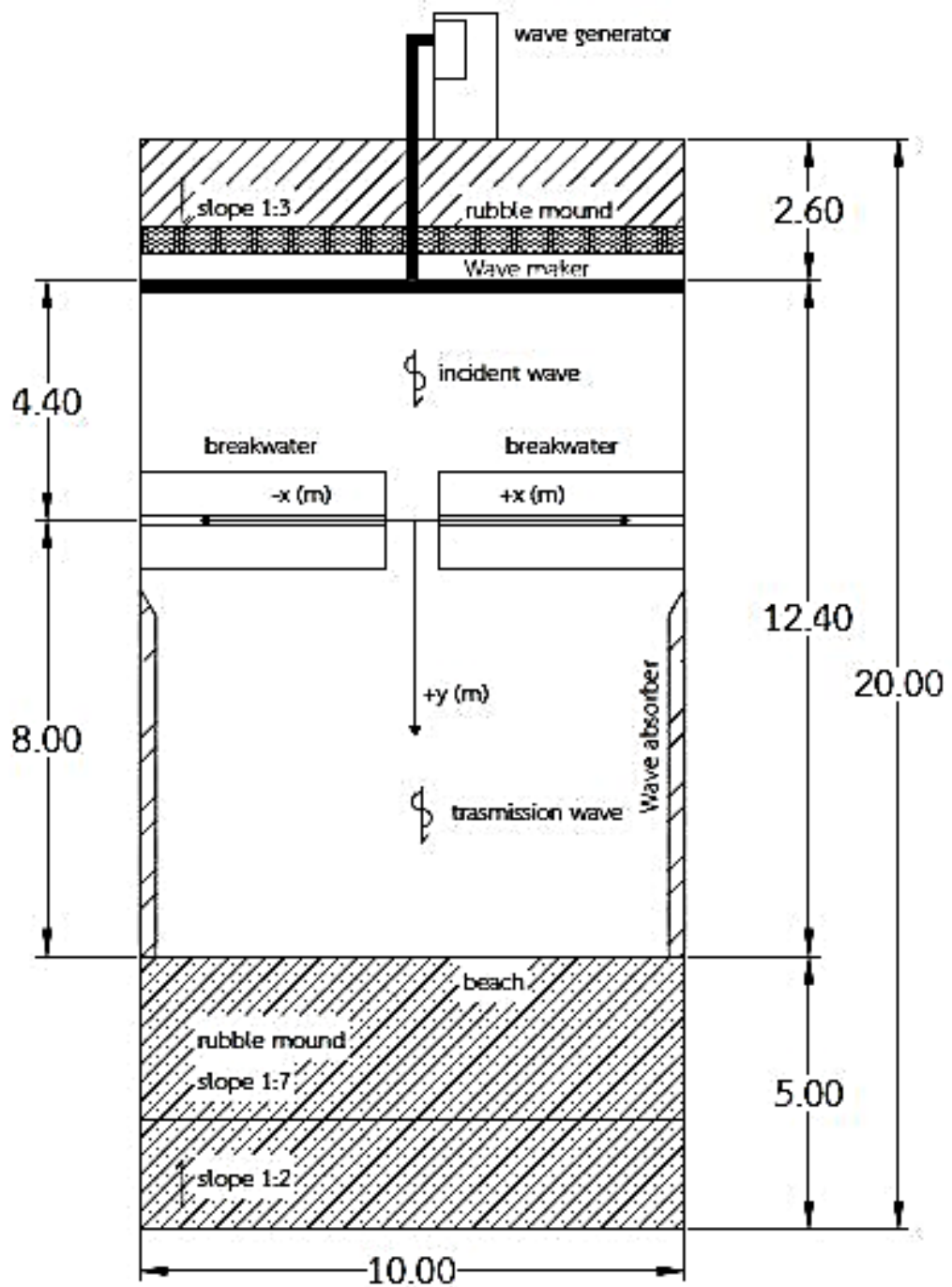
ผลการทดลองของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม

ค-1 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม

เนื้อหาส่วนนี้จะแสดงผลการทดลองของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมจากการทดลองทั้งสิ้น 36 กรณี โดยมีตัวแปรที่สนใจ ได้แก่ ขนาดโครงสร้าง และคุณสมบัติของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าปะทะโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น กำหนดระดับความสูงเชื่อมกันคลื่น เท่ากับ 0.40 เมตร มีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำนิ่งทั้งสิ้น 4 ระดับ คือ 0.30, 0.40, 0.45, 0.50 เมตร ตามลำดับ ค่าความชันคลื่นแตกต่างกัน 3 ค่า คือ 0.0105-0.0152, 0.0212-0.0252, 0.0294-0.0351 และอัตราส่วนระหว่างช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นกับความยาวคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะเชื่อมกันคลื่นแตกต่างกัน 3 ค่า คือ 0.46-0.54, 1.42-1.56, 2.78-2.93

ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นอัตราส่วนระหว่างความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างเชื่อมกันคลื่นต่อความสูงคลื่นที่วิ่งเข้าปะทะเชื่อมกันคลื่น ข้อมูลความสูงคลื่นที่เก็บและผ่านการวิเคราะห์ทางสถิติจะใช้ไปหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม และใช้เป็นตัวแทนในแต่ละพิกัดในพื้นที่ด้านหลังเชื่อมกันคลื่น โดยค่าพิกัดในแนวแกน y จะเริ่มที่ตำแหน่งกึ่งกลางสันเชื่อมกันคลื่นเป็นพิกัด 0 และค่าพิกัดในแนวแกน x จะเริ่มที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างช่องว่างระหว่างเชื่อมกันคลื่นเป็นพิกัด 0 ดังรูปที่ โดยข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในแต่ละพิกัดแกน x และแกน y จะแสดงในตารางที่ ถึงตารางที่ ค-1 ถึง ตารางที่ ค-32

เพื่อให้สามารถพิจารณาและเปรียบเทียบพฤติกรรมคลื่นจำเป็นต้องนำค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมที่ได้มาสร้างเส้นชั้นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในพื้นที่ด้านหลังโครงสร้างเชื่อมกันคลื่น เมื่อพิจารณาจะเห็นถึงพฤติกรรมการส่งผ่านคลื่นที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละกรณีศึกษา ดังรูปที่



Overview of the wave basin
(dimension in meter)

รูปที่ ค-1 แกนพิกัดการเก็บข้อมูลความสูงคลื่นพื้นที่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่น

ตารางที่ ค-1 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D30BL050W01

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.33338 | 0.33573 | 0.15464 | 0.2946 | 0.31153 | 0.25379 |
| -3.50 | 0.33245 | 0.25451 | 0.34307 | 0.35799 | 0.19505 | 0.38346 |
| -2.50 | 0.29196 | 0.2946 | 0.22403 | 0.25126 | 0.39473 | 0.34717 |
| -2.00 | 0.2737 | 0.10329 | 0.28335 | 0.32624 | 0.34849 | 0.31169 |
| -1.50 | 0.14745 | 0.28848 | 0.37465 | 0.32947 | 0.27969 | 0.17356 |
| -1.00 | 0.2741 | 0.29439 | 0.26872 | 0.22792 | 0.19906 | 0.22711 |
| -0.95 | 0.27321 | 0.32749 | 0.27053 | 0.27011 | 0.21664 | 0.22325 |
| -0.90 | 0.45186 | 0.353 | 0.36692 | 0.25944 | 0.26039 | 0.18888 |
| -0.85 | 0.4554 | 0.427 | 0.41653 | 0.28887 | 0.24899 | 0.18552 |
| -0.80 | 0.4343 | 0.41311 | 0.40451 | 0.30676 | 0.20941 | 0.17175 |
| -0.75 | 0.48858 | 0.37891 | 0.41888 | 0.34235 | 0.25437 | 0.15425 |
| -0.70 | 0.54206 | 0.4251 | 0.40744 | 0.34248 | 0.27134 | 0.17133 |
| -0.65 | 0.59796 | 0.4537 | 0.45473 | 0.34873 | 0.25847 | 0.15069 |
| -0.60 | 0.58131 | 0.39842 | 0.41754 | 0.38722 | 0.27297 | 0.18932 |
| -0.50 | 0.64811 | 0.48761 | 0.46626 | 0.40275 | 0.31219 | 0.15882 |
| 0.00 | 0.68247 | 0.49391 | 0.43402 | 0.4005 | 0.34053 | 0.15307 |
| 0.50 | 0.6078 | 0.42231 | 0.39207 | 0.39223 | 0.34196 | 0.19014 |
| 0.60 | 0.56608 | 0.44954 | 0.41346 | 0.36569 | 0.32904 | 0.20153 |
| 0.65 | 0.55752 | 0.39924 | 0.39981 | 0.33409 | 0.33904 | 0.1653 |
| 0.70 | 0.54069 | 0.4213 | 0.42125 | 0.31034 | 0.34084 | 0.22363 |
| 0.75 | 0.58604 | 0.39472 | 0.38002 | 0.33405 | 0.34631 | 0.25613 |
| 0.80 | 0.4636 | 0.42277 | 0.3344 | 0.29522 | 0.30994 | 0.2638 |
| 0.85 | 0.40742 | 0.36805 | 0.3572 | 0.27962 | 0.29966 | 0.25578 |
| 0.90 | 0.39973 | 0.33844 | 0.31631 | 0.28468 | 0.29172 | 0.21718 |
| 0.95 | 0.40723 | 0.38132 | 0.28937 | 0.24827 | 0.26556 | 0.25949 |
| 1.00 | 0.34574 | 0.34424 | 0.27522 | 0.28819 | 0.2658 | 0.26231 |
| 1.50 | 0.18808 | 0.28278 | 0.33316 | 0.22716 | 0.25779 | 0.19878 |
| 2.00 | 0.19686 | 0.15635 | 0.18509 | 0.21969 | 0.28946 | 0.27155 |
| 2.50 | 0.23379 | 0.21804 | 0.16147 | 0.21436 | 0.3329 | 0.31401 |
| 3.50 | 0.24048 | 0.23378 | 0.24951 | 0.24357 | 0.13583 | 0.33167 |
| 4.30 | 0.25321 | 0.21541 | 0.21424 | 0.20759 | 0.17152 | 0.11093 |

ตารางที่ ค-2 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D30BL050W02

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.21343 | 0.25091 | 0.17033 | 0.19781 | 0.24097 | 0.16602 |
| -3.50 | 0.2201 | 0.18207 | 0.24975 | 0.28536 | 0.12876 | 0.3185 |
| -2.50 | 0.24149 | 0.29144 | 0.19263 | 0.13681 | 0.34661 | 0.35171 |
| -2.00 | 0.22976 | 0.1282 | 0.20341 | 0.28185 | 0.32331 | 0.35736 |
| -1.50 | 0.1676 | 0.29377 | 0.36726 | 0.31613 | 0.316 | 0.2079 |
| -1.00 | 0.23816 | 0.29455 | 0.29523 | 0.33065 | 0.25313 | 0.25877 |
| -0.95 | 0.28437 | 0.3429 | 0.30809 | 0.28514 | 0.19427 | 0.26297 |
| -0.90 | 0.48108 | 0.44231 | 0.39887 | 0.32189 | 0.21734 | 0.2251 |
| -0.85 | 0.48555 | 0.44736 | 0.36457 | 0.34043 | 0.27296 | 0.22107 |
| -0.80 | 0.47389 | 0.4669 | 0.40521 | 0.35864 | 0.27848 | 0.21064 |
| -0.75 | 0.51491 | 0.4815 | 0.41048 | 0.37771 | 0.2894 | 0.21425 |
| -0.70 | 0.57664 | 0.48178 | 0.41054 | 0.405 | 0.31043 | 0.19668 |
| -0.65 | 0.6323 | 0.50584 | 0.44157 | 0.46364 | 0.29727 | 0.18506 |
| -0.60 | 0.66308 | 0.5411 | 0.44788 | 0.4371 | 0.31893 | 0.15342 |
| -0.50 | 0.67144 | 0.59066 | 0.45112 | 0.46796 | 0.37082 | 0.12581 |
| 0.00 | 0.78277 | 0.57174 | 0.47842 | 0.46052 | 0.36909 | 0.16153 |
| 0.50 | 0.7162 | 0.55568 | 0.46362 | 0.43669 | 0.35193 | 0.15469 |
| 0.60 | 0.68532 | 0.50985 | 0.47455 | 0.42161 | 0.33942 | 0.16033 |
| 0.65 | 0.64105 | 0.49359 | 0.48521 | 0.40721 | 0.34085 | 0.17426 |
| 0.70 | 0.57013 | 0.46685 | 0.40885 | 0.41292 | 0.33361 | 0.19402 |
| 0.75 | 0.50298 | 0.46805 | 0.3958 | 0.34657 | 0.31413 | 0.19542 |
| 0.80 | 0.48054 | 0.43588 | 0.38855 | 0.36434 | 0.28002 | 0.20397 |
| 0.85 | 0.44927 | 0.44202 | 0.34707 | 0.36597 | 0.3021 | 0.21762 |
| 0.90 | 0.41249 | 0.41996 | 0.3344 | 0.35843 | 0.27031 | 0.24522 |
| 0.95 | 0.3872 | 0.39115 | 0.35732 | 0.32101 | 0.27465 | 0.2505 |
| 1.00 | 0.34828 | 0.39379 | 0.31832 | 0.31651 | 0.24581 | 0.24435 |
| 1.50 | 0.14021 | 0.29554 | 0.29875 | 0.30597 | 0.28657 | 0.18101 |
| 2.00 | 0.26322 | 0.09713 | 0.19643 | 0.24039 | 0.26617 | 0.31746 |
| 2.50 | 0.23283 | 0.20915 | 0.11644 | 0.15858 | 0.34538 | 0.3086 |
| 3.50 | 0.1965 | 0.16542 | 0.20669 | 0.23747 | 0.14686 | 0.3044 |
| 4.30 | 0.15545 | 0.17833 | 0.13793 | 0.15141 | 0.19659 | 0.16436 |

ตารางที่ ค-3 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D30BL050W03

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.20393 | 0.19991 | 0.12332 | 0.19208 | 0.23715 | 0.1516 |
| -3.50 | 0.24539 | 0.16446 | 0.19189 | 0.25549 | 0.12278 | 0.27312 |
| -2.50 | 0.23923 | 0.25937 | 0.13225 | 0.16945 | 0.32151 | 0.31678 |
| -2.00 | 0.25581 | 0.08582 | 0.17424 | 0.28485 | 0.29945 | 0.36203 |
| -1.50 | 0.16668 | 0.23072 | 0.33091 | 0.35943 | 0.34948 | 0.23268 |
| -1.00 | 0.29128 | 0.31906 | 0.34083 | 0.33546 | 0.25412 | 0.2744 |
| -0.95 | 0.29901 | 0.30248 | 0.33127 | 0.34783 | 0.25576 | 0.27083 |
| -0.90 | 0.48549 | 0.42525 | 0.41678 | 0.36185 | 0.2462 | 0.30025 |
| -0.85 | 0.47592 | 0.44285 | 0.45891 | 0.34385 | 0.25461 | 0.26865 |
| -0.80 | 0.53436 | 0.47549 | 0.47449 | 0.34454 | 0.28566 | 0.24248 |
| -0.75 | 0.58342 | 0.51143 | 0.52914 | 0.36236 | 0.31256 | 0.23123 |
| -0.70 | 0.65351 | 0.5129 | 0.52465 | 0.37163 | 0.26996 | 0.22438 |
| -0.65 | 0.67804 | 0.53608 | 0.55336 | 0.378 | 0.28354 | 0.2225 |
| -0.60 | 0.75183 | 0.5254 | 0.55109 | 0.39497 | 0.29456 | 0.20453 |
| -0.50 | 0.73769 | 0.66945 | 0.48988 | 0.42486 | 0.30189 | 0.20106 |
| 0.00 | 0.85882 | 0.62654 | 0.50399 | 0.45607 | 0.30452 | 0.18576 |
| 0.50 | 0.70645 | 0.56827 | 0.51197 | 0.40763 | 0.32445 | 0.16807 |
| 0.60 | 0.67557 | 0.5581 | 0.52183 | 0.376 | 0.33149 | 0.19064 |
| 0.65 | 0.6965 | 0.53201 | 0.4804 | 0.37313 | 0.30302 | 0.16775 |
| 0.70 | 0.62963 | 0.53557 | 0.38755 | 0.39378 | 0.32929 | 0.18135 |
| 0.75 | 0.58095 | 0.52732 | 0.39663 | 0.42404 | 0.27163 | 0.178 |
| 0.80 | 0.53147 | 0.49481 | 0.37134 | 0.41558 | 0.30715 | 0.1848 |
| 0.85 | 0.49438 | 0.47057 | 0.36613 | 0.34073 | 0.27231 | 0.21393 |
| 0.90 | 0.44733 | 0.43452 | 0.37265 | 0.34756 | 0.24368 | 0.21916 |
| 0.95 | 0.40146 | 0.37525 | 0.34232 | 0.36019 | 0.24587 | 0.21801 |
| 1.00 | 0.38148 | 0.37682 | 0.35481 | 0.35166 | 0.25833 | 0.21954 |
| 1.50 | 0.17716 | 0.22748 | 0.23247 | 0.27728 | 0.23734 | 0.19624 |
| 2.00 | 0.2328 | 0.14955 | 0.19627 | 0.23983 | 0.21012 | 0.30791 |
| 2.50 | 0.21797 | 0.18921 | 0.14435 | 0.12147 | 0.2794 | 0.26844 |
| 3.50 | 0.14591 | 0.15306 | 0.15328 | 0.23809 | 0.11207 | 0.25286 |
| 4.30 | 0.16028 | 0.18903 | 0.15497 | 0.16782 | 0.15588 | 0.11319 |

ตารางที่ ค-4 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D30BL150W01

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.2198 | 0.28122 | 0.34975 | 0.18258 | 0.15259 | 0.33334 |
| -3.50 | 0.44479 | 0.19236 | 0.28803 | 0.27223 | 0.48761 | 0.48944 |
| -3.00 | 0.4027 | 0.20358 | 0.39236 | 0.40986 | 0.51857 | 0.60485 |
| -2.50 | 0.26429 | 0.55057 | 0.5158 | 0.46481 | 0.45457 | 0.61496 |
| -2.00 | 0.49335 | 0.60836 | 0.46685 | 0.48265 | 0.46755 | 0.61576 |
| -1.70 | 0.57927 | 0.52329 | 0.47649 | 0.49854 | 0.49846 | 0.55086 |
| -1.65 | 0.59963 | 0.53063 | 0.49875 | 0.48882 | 0.50185 | 0.5792 |
| -1.60 | 0.65918 | 0.48366 | 0.48153 | 0.49052 | 0.49198 | 0.59877 |
| -1.55 | 0.63411 | 0.60708 | 0.49015 | 0.53362 | 0.54441 | 0.62289 |
| -1.50 | 0.65851 | 0.58963 | 0.49843 | 0.53841 | 0.53362 | 0.6025 |
| -1.45 | 0.66528 | 0.58228 | 0.53365 | 0.5457 | 0.58159 | 0.61472 |
| -1.40 | 0.68111 | 0.57276 | 0.48138 | 0.60864 | 0.56907 | 0.6099 |
| -1.35 | 0.68687 | 0.60927 | 0.48906 | 0.58182 | 0.5901 | 0.66072 |
| -1.30 | 0.67078 | 0.63426 | 0.52345 | 0.64408 | 0.57648 | 0.68354 |
| -0.70 | 0.94231 | 0.79893 | 0.76201 | 0.88838 | 0.7174 | 0.65158 |
| 0.00 | 1.0101 | 1.0654 | 1.1694 | 1.0503 | 0.87373 | 0.59751 |
| 0.70 | 1.1389 | 1.0774 | 0.95449 | 0.876 | 0.79203 | 0.65894 |
| 1.30 | 0.92955 | 0.80697 | 0.64981 | 0.77584 | 0.65308 | 0.66328 |
| 1.35 | 0.86119 | 0.74396 | 0.63169 | 0.69079 | 0.67825 | 0.69513 |
| 1.40 | 0.60333 | 0.72175 | 0.62334 | 0.67638 | 0.71073 | 0.69057 |
| 1.45 | 0.82675 | 0.69564 | 0.60414 | 0.66577 | 0.66223 | 0.64547 |
| 1.50 | 0.74227 | 0.70152 | 0.58694 | 0.67671 | 0.62288 | 0.6282 |
| 1.55 | 0.73979 | 0.68917 | 0.5971 | 0.60007 | 0.65751 | 0.59818 |
| 1.60 | 0.7236 | 0.69445 | 0.5543 | 0.58895 | 0.58559 | 0.66404 |
| 1.65 | 0.63719 | 0.66323 | 0.5575 | 0.57792 | 0.61768 | 0.60084 |
| 1.70 | 0.65766 | 0.65968 | 0.55907 | 0.54937 | 0.58954 | 0.61587 |
| 2.00 | 0.57206 | 0.58426 | 0.48449 | 0.48337 | 0.47362 | 0.50502 |
| 2.50 | 0.38599 | 0.44719 | 0.46901 | 0.51739 | 0.46051 | 0.65527 |
| 3.00 | 0.33546 | 0.29419 | 0.33284 | 0.47413 | 0.53959 | 0.71714 |
| 3.50 | 0.33628 | 0.25964 | 0.2018 | 0.20181 | 0.49811 | 0.59809 |
| 4.30 | 0.20149 | 0.34014 | 0.28868 | 0.28616 | 0.28496 | 0.35516 |

ตารางที่ ค-5 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D30BL150W02

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.20639 | 0.2621 | 0.28003 | 0.17576 | 0.13505 | 0.23341 |
| -3.50 | 0.33261 | 0.23912 | 0.18021 | 0.16033 | 0.45705 | 0.39076 |
| -3.00 | 0.29688 | 0.17529 | 0.23497 | 0.37858 | 0.49518 | 0.61882 |
| -2.50 | 0.2772 | 0.36392 | 0.36502 | 0.54791 | 0.43819 | 0.60837 |
| -2.00 | 0.48993 | 0.60103 | 0.35575 | 0.51126 | 0.48892 | 0.57596 |
| -1.70 | 0.61046 | 0.61437 | 0.47768 | 0.56242 | 0.59405 | 0.59779 |
| -1.65 | 0.55799 | 0.58252 | 0.4505 | 0.5536 | 0.65327 | 0.61556 |
| -1.60 | 0.59926 | 0.5549 | 0.44489 | 0.62474 | 0.63226 | 0.62301 |
| -1.55 | 0.6144 | 0.56601 | 0.47894 | 0.64177 | 0.59983 | 0.59875 |
| -1.50 | 0.63791 | 0.63718 | 0.4816 | 0.62006 | 0.70011 | 0.65064 |
| -1.45 | 0.65862 | 0.61584 | 0.51551 | 0.63578 | 0.65532 | 0.62244 |
| -1.40 | 0.70427 | 0.59526 | 0.51558 | 0.68291 | 0.63278 | 0.67415 |
| -1.35 | 0.6856 | 0.58574 | 0.62095 | 0.71558 | 0.63019 | 0.6648 |
| -1.30 | 0.78651 | 0.64352 | 0.531 | 0.70598 | 0.59887 | 0.68576 |
| -0.70 | 0.96033 | 0.89919 | 0.82094 | 0.96337 | 0.76684 | 0.7299 |
| 0.00 | 1.0242 | 1.077 | 1.0817 | 1.1209 | 0.93044 | 0.72383 |
| 0.70 | 1.1643 | 1.019 | 0.88481 | 1.0227 | 0.83676 | 0.79596 |
| 1.30 | 0.88205 | 0.76585 | 0.6454 | 0.76464 | 0.71563 | 0.76066 |
| 1.35 | 0.87844 | 0.68552 | 0.62576 | 0.72303 | 0.6827 | 0.73787 |
| 1.40 | 0.76713 | 0.6844 | 0.62955 | 0.78484 | 0.6928 | 0.74819 |
| 1.45 | 0.8112 | 0.658 | 0.58698 | 0.67382 | 0.68933 | 0.69045 |
| 1.50 | 0.76584 | 0.65982 | 0.59305 | 0.66662 | 0.66392 | 0.71882 |
| 1.55 | 0.72 | 0.61509 | 0.55587 | 0.6143 | 0.63102 | 0.7282 |
| 1.60 | 0.71715 | 0.62172 | 0.5231 | 0.61221 | 0.67244 | 0.6614 |
| 1.65 | 0.73848 | 0.5637 | 0.5395 | 0.57244 | 0.62071 | 0.62171 |
| 1.70 | 0.69441 | 0.57463 | 0.48676 | 0.55881 | 0.63365 | 0.61394 |
| 2.00 | 0.55885 | 0.55332 | 0.46164 | 0.47873 | 0.5658 | 0.51991 |
| 2.50 | 0.2999 | 0.3579 | 0.44119 | 0.49011 | 0.46705 | 0.58005 |
| 3.00 | 0.27409 | 0.24473 | 0.3603 | 0.38451 | 0.48473 | 0.6351 |
| 3.50 | 0.31835 | 0.25289 | 0.17634 | 0.21289 | 0.48909 | 0.48684 |
| 4.30 | 0.23676 | 0.22975 | 0.23594 | 0.1816 | 0.1955 | 0.28301 |

ตารางที่ ค-6 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D D30BL150W03

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.16553 | 0.26222 | 0.24711 | 0.1613 | 0.13294 | 0.19782 |
| -3.50 | 0.26188 | 0.21431 | 0.1669 | 0.21581 | 0.46426 | 0.40559 |
| -3.00 | 0.2652 | 0.13303 | 0.32275 | 0.35991 | 0.44292 | 0.54108 |
| -2.50 | 0.18285 | 0.35982 | 0.37992 | 0.4614 | 0.45499 | 0.55525 |
| -2.00 | 0.39254 | 0.54883 | 0.38797 | 0.45339 | 0.53927 | 0.51087 |
| -1.70 | 0.5053 | 0.55394 | 0.48709 | 0.51219 | 0.64919 | 0.61114 |
| -1.65 | 0.53652 | 0.60856 | 0.48343 | 0.48994 | 0.65137 | 0.61912 |
| -1.60 | 0.54189 | 0.53237 | 0.49867 | 0.59294 | 0.64278 | 0.61662 |
| -1.55 | 0.58348 | 0.53648 | 0.55357 | 0.56544 | 0.65475 | 0.6118 |
| -1.50 | 0.60586 | 0.54253 | 0.55825 | 0.61827 | 0.6594 | 0.62734 |
| -1.45 | 0.5813 | 0.53156 | 0.53252 | 0.66746 | 0.70243 | 0.6113 |
| -1.40 | 0.64249 | 0.61007 | 0.60066 | 0.67371 | 0.6834 | 0.63821 |
| -1.35 | 0.66229 | 0.63596 | 0.57362 | 0.72891 | 0.69369 | 0.65524 |
| -1.30 | 0.69356 | 0.65371 | 0.58318 | 0.72463 | 0.69908 | 0.6884 |
| -0.70 | 0.90627 | 0.76767 | 0.84044 | 1.0129 | 0.87541 | 0.67519 |
| 0.00 | 0.99538 | 1.1284 | 1.0722 | 1.2226 | 0.89604 | 0.75895 |
| 0.70 | 1.1812 | 1.0921 | 0.88165 | 1.0415 | 0.79477 | 0.73814 |
| 1.30 | 0.9515 | 0.72212 | 0.68091 | 0.83097 | 0.71682 | 0.66954 |
| 1.35 | 0.83858 | 0.68388 | 0.66977 | 0.73725 | 0.71737 | 0.67332 |
| 1.40 | 0.78346 | 0.70099 | 0.5736 | 0.76327 | 0.70001 | 0.69873 |
| 1.45 | 0.71935 | 0.64493 | 0.67005 | 0.71406 | 0.72269 | 0.71139 |
| 1.50 | 0.69109 | 0.61551 | 0.66896 | 0.70884 | 0.71127 | 0.7006 |
| 1.55 | 0.7042 | 0.6268 | 0.60859 | 0.65214 | 0.7178 | 0.66276 |
| 1.60 | 0.64244 | 0.562 | 0.57152 | 0.62246 | 0.68231 | 0.63401 |
| 1.65 | 0.65564 | 0.54645 | 0.59743 | 0.57252 | 0.65783 | 0.6354 |
| 1.70 | 0.63229 | 0.58092 | 0.52958 | 0.56549 | 0.66449 | 0.6216 |
| 2.00 | 0.49606 | 0.55882 | 0.46011 | 0.40973 | 0.57249 | 0.53979 |
| 2.50 | 0.2648 | 0.32332 | 0.42602 | 0.4581 | 0.4106 | 0.57508 |
| 3.00 | 0.22243 | 0.19095 | 0.39698 | 0.40925 | 0.44411 | 0.55659 |
| 3.50 | 0.25579 | 0.1825 | 0.14335 | 0.20545 | 0.44287 | 0.48485 |
| 4.30 | 0.16177 | 0.22222 | 0.21728 | 0.15237 | 0.20038 | 0.23703 |

ตารางที่ ค-7 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D30BL300W01

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.40269 | 0.18676 | 0.35166 | 0.29612 | 0.44559 |
| -3.50 | 0.41142 | 0.36144 | 0.25478 | 0.30969 | 0.51705 |
| -3.00 | 0.38819 | 0.31921 | 0.43258 | 0.40673 | 0.32171 |
| -2.50 | 0.31619 | 0.34374 | 0.48582 | 0.4219 | 0.36351 |
| -2.00 | 0.53697 | 0.35966 | 0.42514 | 0.40147 | 0.35616 |
| -1.70 | 0.43732 | 0.3973 | 0.56834 | 0.4342 | 0.46056 |
| -1.65 | 0.43585 | 0.43656 | 0.63311 | 0.38321 | 0.51309 |
| -1.60 | 0.45659 | 0.48595 | 0.64062 | 0.41546 | 0.47212 |
| -1.55 | 0.52818 | 0.45135 | 0.60346 | 0.3853 | 0.57274 |
| -1.50 | 0.57588 | 0.5526 | 0.58108 | 0.4386 | 0.47963 |
| -1.45 | 0.69213 | 0.52275 | 0.70921 | 0.4253 | 0.6035 |
| -1.40 | 0.69213 | 0.56214 | 0.62075 | 0.47735 | 0.60235 |
| -1.35 | 0.74929 | 0.62473 | 0.73467 | 0.5392 | 0.58659 |
| -1.30 | 0.73869 | 0.66379 | 0.66991 | 0.5482 | 0.68232 |
| -0.70 | 0.90369 | 0.8643 | 0.93068 | 0.68275 | 0.85942 |
| 0.00 | 0.8744 | 0.81058 | 1.0538 | 1.0258 | 0.9934 |
| 0.10 | 0.99711 | 0.89249 | 1.2371 | 0.93816 | 0.95676 |
| 0.80 | 0.87617 | 0.80034 | 0.85934 | 0.78058 | 0.81532 |
| 1.35 | 0.71529 | 0.51484 | 0.62949 | 0.36509 | 0.58988 |
| 1.40 | 0.71208 | 0.493 | 0.56474 | 0.46559 | 0.7104 |
| 1.45 | 0.62875 | 0.49724 | 0.53422 | 0.40867 | 0.60717 |
| 1.50 | 0.64498 | 0.4491 | 0.54113 | 0.50437 | 0.66303 |
| 1.55 | 0.59676 | 0.54207 | 0.47211 | 0.43539 | 0.58177 |
| 1.60 | 0.59528 | 0.47071 | 0.41089 | 0.52364 | 0.55351 |
| 1.65 | 0.48009 | 0.53019 | 0.47214 | 0.52719 | 0.58222 |
| 1.70 | 0.40921 | 0.41737 | 0.44378 | 0.47141 | 0.52618 |
| 2.00 | 0.31609 | 0.25736 | 0.42526 | 0.47094 | 0.4122 |
| 2.50 | 0.29681 | 0.30436 | 0.39264 | 0.26891 | 0.41029 |
| 3.00 | 0.1922 | 0.16276 | 0.32547 | 0.22396 | 0.25147 |
| 3.50 | 0.26447 | 0.1875 | 0.34881 | 0.23559 | 0.26552 |
| 4.50 | 0.31286 | 0.22837 | 0.27099 | 0.26841 | 0.2387 |

ตารางที่ ค-8 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D30BL300W02

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.1339 | 0.14168 | 0.09965 | 0.18324 | 0.2058 |
| -3.50 | 0.09487 | 0.14564 | 0.21872 | 0.22832 | 0.226 |
| -3.00 | 0.11279 | 0.15688 | 0.13145 | 0.21052 | 0.28743 |
| -2.50 | 0.10581 | 0.24973 | 0.25881 | 0.24759 | 0.3349 |
| -2.00 | 0.32162 | 0.26658 | 0.28028 | 0.26157 | 0.36588 |
| -1.70 | 0.30582 | 0.32558 | 0.38452 | 0.30063 | 0.44823 |
| -1.65 | 0.35097 | 0.31578 | 0.41965 | 0.36386 | 0.4881 |
| -1.60 | 0.38367 | 0.34401 | 0.4366 | 0.35176 | 0.54025 |
| -1.55 | 0.43895 | 0.29079 | 0.42231 | 0.39877 | 0.59381 |
| -1.50 | 0.47676 | 0.29951 | 0.46329 | 0.44021 | 0.5926 |
| -1.45 | 0.52226 | 0.40862 | 0.45829 | 0.4486 | 0.63363 |
| -1.40 | 0.62108 | 0.54353 | 0.44341 | 0.57032 | 0.68966 |
| -1.35 | 0.74532 | 0.48555 | 0.45834 | 0.62166 | 0.61719 |
| -1.30 | 0.76614 | 0.61442 | 0.55804 | 0.61453 | 0.74283 |
| -0.70 | 1.0884 | 1.0248 | 1.1778 | 1.0966 | 0.95906 |
| 0.00 | 1.2453 | 1.398 | 1.1489 | 1.2541 | 1.1369 |
| 0.10 | 1.0423 | 1.0527 | 0.96696 | 0.94535 | 0.92224 |
| 0.80 | 0.62216 | 0.62783 | 0.52259 | 0.55861 | 0.49403 |
| 1.35 | 0.45454 | 0.52135 | 0.49382 | 0.59932 | 0.46249 |
| 1.40 | 0.44926 | 0.45616 | 0.48118 | 0.57704 | 0.43666 |
| 1.45 | 0.38135 | 0.41706 | 0.47 | 0.52026 | 0.4746 |
| 1.50 | 0.35299 | 0.37954 | 0.43981 | 0.53269 | 0.51064 |
| 1.55 | 0.31761 | 0.31883 | 0.38897 | 0.49464 | 0.45372 |
| 1.60 | 0.31817 | 0.33708 | 0.37358 | 0.49614 | 0.47917 |
| 1.65 | 0.28206 | 0.32069 | 0.37159 | 0.39061 | 0.43587 |
| 1.70 | 0.26958 | 0.27859 | 0.27622 | 0.37281 | 0.46084 |
| 2.00 | 0.21664 | 0.27228 | 0.22616 | 0.34319 | 0.38689 |
| 2.50 | 0.15706 | 0.19458 | 0.1869 | 0.20933 | 0.2998 |
| 3.00 | 0.07431 | 0.11852 | 0.17456 | 0.21188 | 0.23142 |
| 3.50 | 0.08215 | 0.09961 | 0.17939 | 0.14383 | 0.24633 |
| 4.50 | 0.08343 | 0.08738 | 0.07489 | 0.16237 | 0.15732 |

ตารางที่ ค-9 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D30BL300W03

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.10626 | 0.14919 | 0.11251 | 0.16808 | 0.15793 |
| -3.50 | 0.1518 | 0.15005 | 0.15342 | 0.20854 | 0.22423 |
| -3.00 | 0.1695 | 0.17744 | 0.1605 | 0.22592 | 0.2004 |
| -2.50 | 0.15183 | 0.17739 | 0.20852 | 0.27794 | 0.25642 |
| -2.00 | 0.28351 | 0.26092 | 0.23946 | 0.31044 | 0.24966 |
| -1.70 | 0.23859 | 0.34613 | 0.30768 | 0.402 | 0.41432 |
| -1.65 | 0.31506 | 0.32722 | 0.33386 | 0.40217 | 0.44229 |
| -1.60 | 0.38124 | 0.34949 | 0.3207 | 0.42357 | 0.49872 |
| -1.55 | 0.40009 | 0.40274 | 0.33343 | 0.48384 | 0.51771 |
| -1.50 | 0.44633 | 0.43981 | 0.36999 | 0.52651 | 0.53492 |
| -1.45 | 0.4427 | 0.4476 | 0.38149 | 0.47745 | 0.56057 |
| -1.40 | 0.53663 | 0.46648 | 0.4765 | 0.49206 | 0.55775 |
| -1.35 | 0.58456 | 0.54346 | 0.45638 | 0.52051 | 0.60845 |
| -1.30 | 0.60874 | 0.59 | 0.43129 | 0.54129 | 0.61851 |
| -0.70 | 0.86437 | 0.99222 | 0.91462 | 0.80716 | 0.88996 |
| 0.00 | 0.96202 | 0.96062 | 1.0481 | 0.97553 | 0.99476 |
| 0.10 | 0.93173 | 0.99488 | 0.80832 | 0.81196 | 0.75733 |
| 0.80 | 0.57811 | 0.57144 | 0.52706 | 0.45432 | 0.45442 |
| 1.35 | 0.55247 | 0.54686 | 0.45044 | 0.44167 | 0.43505 |
| 1.40 | 0.48541 | 0.47722 | 0.46281 | 0.44494 | 0.44772 |
| 1.45 | 0.38882 | 0.50334 | 0.45153 | 0.41074 | 0.42763 |
| 1.50 | 0.39352 | 0.4553 | 0.3949 | 0.42912 | 0.37988 |
| 1.55 | 0.36259 | 0.40592 | 0.39954 | 0.42894 | 0.35416 |
| 1.60 | 0.3134 | 0.40319 | 0.38264 | 0.45022 | 0.34078 |
| 1.65 | 0.31538 | 0.35242 | 0.36751 | 0.41284 | 0.35896 |
| 1.70 | 0.32191 | 0.36696 | 0.36874 | 0.41003 | 0.39028 |
| 2.00 | 0.13828 | 0.25722 | 0.31797 | 0.34233 | 0.3286 |
| 2.50 | 0.14301 | 0.1743 | 0.21663 | 0.30653 | 0.26241 |
| 3.00 | 0.12255 | 0.13872 | 0.156 | 0.22409 | 0.2584 |
| 3.50 | 0.07467 | 0.12326 | 0.16014 | 0.20303 | 0.27147 |
| 4.50 | 0.10599 | 0.10278 | 0.10057 | 0.15047 | 0.17805 |

ตารางที่ ค-10 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D40BL050W01

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.68781 | 0.4066 | 0.44054 | 0.50393 | 0.61382 | 0.37833 |
| -3.50 | 0.45944 | 0.35826 | 0.55604 | 0.48313 | 0.33446 | 0.48305 |
| -2.50 | 0.66586 | 0.64277 | 0.29499 | 0.36278 | 0.69705 | 0.66087 |
| -2.00 | 0.54562 | 0.3207 | 0.4722 | 0.47997 | 0.58647 | 0.51614 |
| -1.50 | 0.36121 | 0.70314 | 0.75547 | 0.52688 | 0.52606 | 0.30049 |
| -1.00 | 0.75208 | 0.65338 | 0.5096 | 0.52936 | 0.46732 | 0.3906 |
| -0.95 | 0.7476 | 0.58949 | 0.46576 | 0.52205 | 0.4149 | 0.39505 |
| -0.90 | 0.49192 | 0.59211 | 0.36968 | 0.2771 | 0.41329 | 0.38325 |
| -0.85 | 0.52878 | 0.5819 | 0.35573 | 0.39639 | 0.48247 | 0.34455 |
| -0.80 | 0.59113 | 0.61529 | 0.37995 | 0.34073 | 0.43088 | 0.37486 |
| -0.75 | 0.71891 | 0.56959 | 0.44162 | 0.37789 | 0.36759 | 0.2837 |
| -0.70 | 0.65948 | 0.58299 | 0.39577 | 0.425 | 0.37927 | 0.38373 |
| -0.65 | 0.64873 | 0.58896 | 0.43169 | 0.4444 | 0.31835 | 0.39624 |
| -0.60 | 0.68749 | 0.65061 | 0.34578 | 0.57523 | 0.29705 | 0.41803 |
| -0.50 | 0.75401 | 0.60855 | 0.4074 | 0.50725 | 0.38782 | 0.42835 |
| 0.00 | 0.7517 | 0.6072 | 0.49431 | 0.63482 | 0.41427 | 0.42859 |
| 0.50 | 0.71895 | 0.61125 | 0.56827 | 0.56183 | 0.30893 | 0.43746 |
| 0.60 | 0.78763 | 0.63225 | 0.5533 | 0.49472 | 0.27989 | 0.35844 |
| 0.65 | 0.74067 | 0.57253 | 0.49224 | 0.49472 | 0.3252 | 0.35134 |
| 0.70 | 0.61811 | 0.56424 | 0.46963 | 0.3604 | 0.36795 | 0.41543 |
| 0.75 | 0.62863 | 0.6081 | 0.4807 | 0.38779 | 0.37128 | 0.32003 |
| 0.80 | 0.65811 | 0.57777 | 0.53585 | 0.34646 | 0.37799 | 0.36036 |
| 0.85 | 0.63681 | 0.51885 | 0.47654 | 0.37822 | 0.41536 | 0.32166 |
| 0.90 | 0.6669 | 0.57429 | 0.42866 | 0.40169 | 0.39592 | 0.33678 |
| 0.95 | 0.70144 | 0.60808 | 0.41399 | 0.38644 | 0.41599 | 0.44512 |
| 1.00 | 0.73573 | 0.59493 | 0.47023 | 0.37912 | 0.41531 | 0.43955 |
| 1.50 | 0.512 | 0.75876 | 0.71273 | 0.73012 | 0.6283 | 0.34091 |
| 2.00 | 0.70024 | 0.44148 | 0.51476 | 0.64617 | 0.58056 | 0.56189 |
| 2.50 | 0.56015 | 0.57592 | 0.43767 | 0.40797 | 0.77989 | 0.74335 |
| 3.50 | 0.71823 | 0.45031 | 0.67837 | 0.65684 | 0.46425 | 0.50641 |
| 4.30 | 0.6617 | 0.72721 | 0.60473 | 0.76074 | 0.77076 | 0.48366 |

ตารางที่ ค-11 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D40BL050W02

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.55422 | 0.49523 | 0.61318 | 0.33484 | 0.52698 | 0.47142 |
| -3.50 | 0.55729 | 0.46224 | 0.68463 | 0.71997 | 0.77341 | 0.39522 |
| -2.50 | 0.5106 | 0.61121 | 0.55723 | 0.35966 | 0.54205 | 0.77893 |
| -2.00 | 0.61584 | 0.6174 | 0.6092 | 0.49237 | 0.65106 | 0.68541 |
| -1.50 | 0.52611 | 0.55831 | 0.85904 | 0.8416 | 0.75234 | 0.69799 |
| -1.00 | 0.71175 | 0.78609 | 0.84199 | 0.59768 | 0.57859 | 0.4905 |
| -0.95 | 0.76007 | 0.67111 | 0.77451 | 0.56176 | 0.44035 | 0.44254 |
| -0.90 | 0.76615 | 0.83293 | 0.57259 | 0.56107 | 0.39153 | 0.55189 |
| -0.85 | 0.76904 | 0.82778 | 0.60349 | 0.63405 | 0.43797 | 0.56468 |
| -0.80 | 0.75149 | 0.70672 | 0.64891 | 0.60638 | 0.47538 | 0.53396 |
| -0.75 | 0.76497 | 0.65767 | 0.6445 | 0.57612 | 0.44655 | 0.51793 |
| -0.70 | 0.70063 | 0.80406 | 0.70479 | 0.44887 | 0.44684 | 0.51983 |
| -0.65 | 0.80732 | 0.71069 | 0.58883 | 0.5666 | 0.56775 | 0.55026 |
| -0.60 | 0.85775 | 0.77592 | 0.59989 | 0.52967 | 0.4903 | 0.56634 |
| -0.50 | 0.86891 | 0.69585 | 0.41293 | 0.44206 | 0.60887 | 0.71134 |
| 0.00 | 0.83332 | 0.79503 | 0.58322 | 0.52694 | 0.56754 | 0.67351 |
| 0.50 | 0.80378 | 0.74219 | 0.45765 | 0.42823 | 0.63013 | 0.59363 |
| 0.60 | 0.76314 | 0.76589 | 0.61002 | 0.53483 | 0.46988 | 0.50575 |
| 0.65 | 0.69075 | 0.71032 | 0.6686 | 0.5242 | 0.46258 | 0.52977 |
| 0.70 | 0.77169 | 0.6711 | 0.70004 | 0.48908 | 0.6528 | 0.58455 |
| 0.75 | 0.77905 | 0.71985 | 0.73334 | 0.53458 | 0.62013 | 0.62864 |
| 0.80 | 0.90098 | 0.73097 | 0.69736 | 0.54127 | 0.60182 | 0.60449 |
| 0.85 | 0.80023 | 0.71627 | 0.66851 | 0.55675 | 0.52502 | 0.60508 |
| 0.90 | 0.8542 | 0.79921 | 0.72847 | 0.52787 | 0.45171 | 0.52342 |
| 0.95 | 0.85342 | 0.79185 | 0.64772 | 0.57052 | 0.46096 | 0.4839 |
| 1.00 | 0.80687 | 0.77222 | 0.76866 | 0.56059 | 0.4197 | 0.4872 |
| 1.50 | 0.54862 | 0.42695 | 0.82997 | 0.96396 | 0.85338 | 0.79906 |
| 2.00 | 0.73069 | 0.65631 | 0.75388 | 0.64335 | 0.81913 | 0.63913 |
| 2.50 | 0.67496 | 0.7702 | 0.75921 | 0.44609 | 0.56824 | 0.60046 |
| 3.50 | 0.78101 | 0.64258 | 0.73876 | 0.77862 | 0.9085 | 0.58921 |
| 4.30 | 0.73831 | 0.79359 | 0.79322 | 0.5236 | 0.69622 | 0.54649 |

ตารางที่ ค-12 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D40BL050W03

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.44599 | 0.44994 | 0.54844 | 0.34894 | 0.46486 | 0.34027 |
| -3.50 | 0.46061 | 0.52518 | 0.47197 | 0.48628 | 0.73818 | 0.32509 |
| -2.50 | 0.51497 | 0.59096 | 0.42067 | 0.38563 | 0.41323 | 0.59214 |
| -2.00 | 0.64855 | 0.58058 | 0.48956 | 0.45375 | 0.57319 | 0.53463 |
| -1.50 | 0.42873 | 0.39021 | 0.72995 | 0.79555 | 0.77245 | 0.59776 |
| -1.00 | 0.73123 | 0.73625 | 0.7871 | 0.6401 | 0.66102 | 0.37913 |
| -0.95 | 0.66539 | 0.68447 | 0.7075 | 0.59764 | 0.64254 | 0.51381 |
| -0.90 | 0.71102 | 0.56742 | 0.64825 | 0.50371 | 0.5141 | 0.53503 |
| -0.85 | 0.73071 | 0.59235 | 0.66701 | 0.52169 | 0.47269 | 0.64104 |
| -0.80 | 0.81565 | 0.59453 | 0.57575 | 0.50372 | 0.50843 | 0.67077 |
| -0.75 | 0.82295 | 0.67053 | 0.5526 | 0.53863 | 0.54751 | 0.64666 |
| -0.70 | 0.87934 | 0.64856 | 0.49458 | 0.52358 | 0.5179 | 0.65195 |
| -0.65 | 0.85249 | 0.5833 | 0.53793 | 0.47612 | 0.54268 | 0.62122 |
| -0.60 | 0.82812 | 0.64071 | 0.53997 | 0.492 | 0.51665 | 0.5379 |
| -0.50 | 0.9412 | 0.7047 | 0.61203 | 0.56379 | 0.6131 | 0.5235 |
| 0.00 | 0.83523 | 0.71226 | 0.60487 | 0.44467 | 0.57116 | 0.52906 |
| 0.50 | 1.0501 | 0.90302 | 0.58562 | 0.59252 | 0.53767 | 0.57065 |
| 0.60 | 0.94178 | 0.72819 | 0.65191 | 0.55995 | 0.57464 | 0.5 |
| 0.65 | 0.94422 | 0.74841 | 0.68891 | 0.55483 | 0.59291 | 0.52908 |
| 0.70 | 0.98 | 0.96112 | 0.67203 | 0.55014 | 0.56886 | 0.56713 |
| 0.75 | 0.9161 | 1.0232 | 0.67819 | 0.53589 | 0.53065 | 0.61934 |
| 0.80 | 0.90364 | 0.90783 | 0.7561 | 0.49802 | 0.49339 | 0.58022 |
| 0.85 | 0.93704 | 0.66601 | 0.69164 | 0.61319 | 0.52849 | 0.57136 |
| 0.90 | 0.88243 | 0.71491 | 0.7944 | 0.59296 | 0.56021 | 0.57266 |
| 0.95 | 0.85094 | 0.78852 | 0.79744 | 0.66737 | 0.48868 | 0.47674 |
| 1.00 | 0.81646 | 0.72763 | 0.78508 | 0.55521 | 0.51096 | 0.43081 |
| 1.50 | 0.4351 | 0.38091 | 0.60117 | 0.85385 | 0.83716 | 0.65261 |
| 2.00 | 0.69157 | 0.57471 | 0.65186 | 0.4255 | 0.7442 | 0.65677 |
| 2.50 | 0.75806 | 0.69308 | 0.67604 | 0.41355 | 0.4696 | 0.56129 |
| 3.50 | 0.59423 | 0.46113 | 0.46894 | 0.53929 | 0.73872 | 0.34791 |
| 4.30 | 0.63193 | 0.56276 | 0.67603 | 0.41312 | 0.52194 | 0.4305 |

ตารางที่ ค-13 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D40BL150W01

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.5463 | 0.74463 | 0.5848 | 0.57564 | 0.54263 | 0.50715 |
| -3.50 | 0.59837 | 0.58416 | 0.48682 | 0.55667 | 0.81317 | 0.7687 |
| -3.00 | 0.43209 | 0.85413 | 0.64988 | 0.77384 | 0.76953 | 0.98929 |
| -2.50 | 0.6424 | 0.74411 | 0.81556 | 0.89703 | 0.74066 | 0.77268 |
| -2.00 | 0.97618 | 1.0878 | 0.85562 | 0.79388 | 0.9046 | 0.77879 |
| -1.70 | 0.79722 | 0.73437 | 0.6167 | 0.72984 | 0.97189 | 0.66132 |
| -1.65 | 0.7432 | 0.74347 | 0.66207 | 0.77786 | 0.995 | 0.67664 |
| -1.60 | 0.73056 | 0.78629 | 0.6668 | 0.76114 | 0.93759 | 0.67404 |
| -1.55 | 0.73105 | 0.80848 | 0.64901 | 0.72885 | 0.94663 | 0.72935 |
| -1.50 | 0.71161 | 0.83308 | 0.67281 | 0.72684 | 0.82087 | 0.69333 |
| -1.45 | 0.65354 | 0.90899 | 0.66666 | 0.72183 | 0.79996 | 0.7245 |
| -1.40 | 0.71054 | 0.81034 | 0.64261 | 0.77515 | 0.81217 | 0.69732 |
| -1.35 | 0.68968 | 0.70983 | 0.65798 | 0.72415 | 0.82058 | 0.80898 |
| -1.30 | 0.67682 | 0.75352 | 0.66766 | 0.80666 | 0.783 | 0.80936 |
| -0.70 | 0.9953 | 1.0187 | 1.068 | 0.81934 | 0.8223 | 0.81836 |
| 0.00 | 1.2235 | 1.2163 | 1.233 | 1.1418 | 0.97525 | 0.53758 |
| 0.70 | 1.0586 | 0.99694 | 0.7997 | 0.95548 | 0.83941 | 0.665 |
| 1.30 | 0.84318 | 0.79582 | 0.6129 | 0.75723 | 0.82371 | 0.68358 |
| 1.35 | 0.77844 | 0.68861 | 0.62587 | 0.72264 | 0.73892 | 0.70764 |
| 1.40 | 0.76632 | 0.73433 | 0.65087 | 0.69093 | 0.81537 | 0.57599 |
| 1.45 | 0.83265 | 0.77647 | 0.70914 | 0.60597 | 0.75699 | 0.55558 |
| 1.50 | 0.88442 | 0.7998 | 0.72307 | 0.63882 | 0.82908 | 0.55304 |
| 1.55 | 0.91449 | 0.78584 | 0.70754 | 0.5815 | 0.91245 | 0.68012 |
| 1.60 | 0.83808 | 0.75271 | 0.73183 | 0.59737 | 0.93334 | 0.61618 |
| 1.65 | 0.78934 | 0.73452 | 0.73159 | 0.61928 | 0.8563 | 0.57923 |
| 1.70 | 0.82785 | 0.71957 | 0.7816 | 0.62081 | 0.84961 | 0.56558 |
| 2.00 | 0.97569 | 0.72285 | 0.78981 | 0.74262 | 0.79223 | 0.70043 |
| 2.50 | 0.69224 | 0.8133 | 0.93039 | 0.94684 | 0.5753 | 0.88393 |
| 3.00 | 0.57849 | 0.64112 | 0.779 | 1.066 | 0.76388 | 0.92057 |
| 3.50 | 0.79059 | 0.67258 | 0.51982 | 0.53844 | 0.91655 | 0.98696 |
| 4.30 | 0.78513 | 0.81836 | 0.71425 | 0.61736 | 0.58957 | 0.5915 |

ตารางที่ ค-14 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D40BL150W02

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.41733 | 0.39015 | 0.3338 | 0.40101 | 0.47063 | 0.39189 |
| -3.50 | 0.61073 | 0.40774 | 0.45943 | 0.42092 | 0.64938 | 0.55915 |
| -3.00 | 0.50086 | 0.50983 | 0.70055 | 0.60056 | 0.6456 | 0.64431 |
| -2.50 | 0.52613 | 0.62934 | 0.6786 | 0.69215 | 0.58346 | 0.71333 |
| -2.00 | 0.66353 | 0.59323 | 0.53264 | 0.57958 | 0.72644 | 0.51883 |
| -1.70 | 0.75307 | 0.61726 | 0.56589 | 0.58433 | 0.76164 | 0.63783 |
| -1.65 | 0.70882 | 0.51888 | 0.6044 | 0.60407 | 0.69712 | 0.57166 |
| -1.60 | 0.72493 | 0.58977 | 0.60448 | 0.53358 | 0.65694 | 0.58758 |
| -1.55 | 0.69445 | 0.63482 | 0.60487 | 0.55136 | 0.6291 | 0.66528 |
| -1.50 | 0.69286 | 0.6529 | 0.63265 | 0.56447 | 0.73934 | 0.69745 |
| -1.45 | 0.69936 | 0.59994 | 0.54119 | 0.60114 | 0.79984 | 0.69486 |
| -1.40 | 0.67851 | 0.51885 | 0.52314 | 0.58079 | 0.72978 | 0.65367 |
| -1.35 | 0.63693 | 0.47779 | 0.50245 | 0.5545 | 0.74328 | 0.78626 |
| -1.30 | 0.66754 | 0.49289 | 0.53385 | 0.56937 | 0.71091 | 0.8225 |
| -0.70 | 0.92881 | 0.80527 | 0.81094 | 0.58624 | 0.81287 | 0.69241 |
| 0.00 | 1.0802 | 1.0869 | 1.1357 | 1.0666 | 0.99902 | 0.65608 |
| 0.70 | 0.92085 | 1.0151 | 0.87753 | 1.0031 | 0.8528 | 0.81389 |
| 1.30 | 0.71455 | 0.67267 | 0.5544 | 0.77241 | 0.80247 | 0.86189 |
| 1.35 | 0.74318 | 0.74647 | 0.58717 | 0.74611 | 0.73187 | 0.76288 |
| 1.40 | 0.83195 | 0.74926 | 0.64426 | 0.70657 | 0.80171 | 0.76828 |
| 1.45 | 0.81427 | 0.78467 | 0.63656 | 0.78921 | 0.95634 | 0.79875 |
| 1.50 | 0.77782 | 0.69831 | 0.66959 | 0.79357 | 0.92274 | 0.72917 |
| 1.55 | 0.71532 | 0.67471 | 0.58978 | 0.79091 | 0.85129 | 0.76645 |
| 1.60 | 0.75206 | 0.63975 | 0.61326 | 0.77013 | 0.85539 | 0.84581 |
| 1.65 | 0.79634 | 0.68799 | 0.58783 | 0.79474 | 0.83946 | 0.82659 |
| 1.70 | 0.84177 | 0.73416 | 0.56498 | 0.78155 | 0.87073 | 0.7064 |
| 2.00 | 0.87609 | 0.67555 | 0.72668 | 0.75911 | 0.87958 | 0.77478 |
| 2.50 | 0.38684 | 0.71288 | 0.70176 | 0.58591 | 0.73952 | 0.78491 |
| 3.00 | 0.61902 | 0.51593 | 0.58119 | 0.71774 | 0.52219 | 0.76512 |
| 3.50 | 0.71714 | 0.63863 | 0.49106 | 0.59987 | 0.72254 | 0.69668 |
| 4.30 | 0.55838 | 0.73327 | 0.5775 | 0.47681 | 0.50245 | 0.34048 |

ตารางที่ ค-15 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D40BL150W03

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.4951 | 0.5036 | 0.5556 | 0.4442 | 0.4497 | 0.4014 |
| -3.50 | 0.5072 | 0.5453 | 0.3457 | 0.4398 | 0.621 | 0.4862 |
| -3.00 | 0.6243 | 0.5861 | 0.6465 | 0.8297 | 0.525 | 0.5745 |
| -2.50 | 0.5619 | 0.6776 | 0.7536 | 0.8659 | 0.664 | 0.6598 |
| -2.00 | 0.8132 | 0.7597 | 0.8582 | 0.8355 | 0.9329 | 0.6712 |
| -1.70 | 0.8772 | 0.8132 | 0.7713 | 0.7764 | 0.9429 | 0.7419 |
| -1.65 | 0.8348 | 0.7783 | 0.7764 | 0.8265 | 0.9307 | 0.6934 |
| -1.60 | 0.8152 | 0.744 | 0.8347 | 0.8156 | 0.9674 | 0.6768 |
| -1.55 | 0.8017 | 0.745 | 0.8169 | 0.8465 | 0.9939 | 0.7687 |
| -1.50 | 0.8255 | 0.7551 | 0.8321 | 0.8462 | 0.9869 | 0.8525 |
| -1.45 | 0.7978 | 0.8006 | 0.8053 | 0.8671 | 1.0451 | 0.8392 |
| -1.40 | 0.7886 | 0.7686 | 0.8292 | 0.8227 | 0.9925 | 0.9328 |
| -1.35 | 0.8231 | 0.7888 | 0.8582 | 0.8593 | 1.0193 | 0.9516 |
| -1.30 | 0.8245 | 0.8802 | 0.8437 | 0.9546 | 1.0232 | 0.9372 |
| -0.70 | 1.0453 | 1.0675 | 0.9939 | 0.8995 | 0.8493 | 0.8353 |
| 0.00 | 1.2537 | 1.2867 | 1.2861 | 1.1015 | 0.881 | 0.7004 |
| 0.70 | 1.1023 | 1.0376 | 1.14 | 1.0215 | 0.7873 | 1.0926 |
| 1.30 | 0.8873 | 0.7093 | 0.8635 | 0.8091 | 1.1456 | 0.8713 |
| 1.35 | 0.8818 | 0.7317 | 0.8918 | 0.8136 | 1.1315 | 0.8866 |
| 1.40 | 0.878 | 0.7097 | 0.8359 | 0.8272 | 1.026 | 0.8762 |
| 1.45 | 0.859 | 0.695 | 0.8351 | 0.8365 | 1.1338 | 0.886 |
| 1.50 | 0.8303 | 0.6692 | 0.8914 | 0.8464 | 1.1477 | 0.7881 |
| 1.55 | 0.8816 | 0.7038 | 0.907 | 0.8402 | 1.159 | 0.832 |
| 1.60 | 0.8818 | 0.7236 | 0.842 | 0.846 | 1.112 | 0.9468 |
| 1.65 | 0.914 | 0.7651 | 0.8851 | 0.8743 | 1.084 | 0.9668 |
| 1.70 | 0.9192 | 0.7487 | 0.857 | 0.8933 | 1.0747 | 0.9256 |
| 2.00 | 0.9044 | 0.7935 | 0.8275 | 0.7535 | 1.0144 | 0.9578 |
| 2.50 | 0.5965 | 0.7486 | 0.7538 | 0.7375 | 0.7674 | 0.81 |
| 3.00 | 0.7443 | 0.6209 | 0.6017 | 0.7726 | 0.5018 | 0.6719 |
| 3.50 | 0.7035 | 0.6745 | 0.4801 | 0.4639 | 0.6732 | 0.4721 |
| 4.30 | 0.687 | 0.6698 | 0.6116 | 0.5724 | 0.635 | 0.4072 |

ตารางที่ ค-16 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D40BL300W01

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.4451 | 0.38648 | 0.41441 | 0.32498 | 0.32549 | 0.27108 |
| -3.50 | 0.50747 | 0.38473 | 0.48216 | 0.18592 | 0.49204 | 0.6748 |
| -2.50 | 0.35513 | 0.47127 | 0.24855 | 0.38471 | 0.51475 | 0.49242 |
| -2.00 | 0.38557 | 0.48383 | 0.65465 | 0.53565 | 0.59772 | 0.40725 |
| -1.50 | 0.64615 | 0.68678 | 0.59217 | 0.63864 | 0.45284 | 0.30986 |
| -1.00 | 0.67716 | 0.56129 | 0.44959 | 0.63201 | 0.43342 | 0.43334 |
| -0.95 | 0.61257 | 0.61302 | 0.42909 | 0.58856 | 0.33965 | 0.457 |
| -0.90 | 0.59432 | 0.579 | 0.34313 | 0.56213 | 0.39967 | 0.54427 |
| -0.85 | 0.59934 | 0.50624 | 0.37872 | 0.55734 | 0.40228 | 0.55221 |
| -0.80 | 0.51042 | 0.61517 | 0.37081 | 0.61355 | 0.38884 | 0.55173 |
| -0.75 | 0.53232 | 0.55753 | 0.34175 | 0.64002 | 0.39765 | 0.59165 |
| -0.70 | 0.47455 | 0.53451 | 0.33347 | 0.52027 | 0.32262 | 0.60684 |
| -0.65 | 0.46228 | 0.5523 | 0.43992 | 0.55375 | 0.38005 | 0.51499 |
| -0.60 | 0.56846 | 0.57979 | 0.43992 | 0.57711 | 0.36074 | 0.52715 |
| -0.50 | 1.0428 | 1.045 | 0.95151 | 0.83594 | 0.65535 | 0.80373 |
| 0.00 | 0.9373 | 0.88559 | 1.2402 | 1.0433 | 1.1089 | 0.80092 |
| 0.50 | 1.0343 | 1.004 | 0.98683 | 0.8051 | 0.92232 | 0.87607 |
| 0.60 | 0.54357 | 0.56162 | 0.53427 | 0.54276 | 0.51434 | 0.50327 |
| 0.65 | 0.53911 | 0.4917 | 0.46143 | 0.56545 | 0.4418 | 0.48745 |
| 0.70 | 0.48884 | 0.57907 | 0.42625 | 0.64117 | 0.4687 | 0.52998 |
| 0.75 | 0.5231 | 0.54285 | 0.42582 | 0.51283 | 0.48665 | 0.52931 |
| 0.80 | 0.58689 | 0.55868 | 0.41656 | 0.52447 | 0.44885 | 0.47436 |
| 0.85 | 0.5262 | 0.5361 | 0.47609 | 0.52167 | 0.45431 | 0.50526 |
| 0.90 | 0.51938 | 0.51496 | 0.40379 | 0.48711 | 0.45634 | 0.48921 |
| 0.95 | 0.62308 | 0.53081 | 0.50806 | 0.47201 | 0.43488 | 0.46146 |
| 1.00 | 0.57404 | 0.56137 | 0.47757 | 0.41967 | 0.43433 | 0.45135 |
| 1.50 | 0.65715 | 0.62666 | 0.58649 | 0.47989 | 0.4116 | 0.33309 |
| 2.00 | 0.40788 | 0.4263 | 0.57323 | 0.50922 | 0.65106 | 0.52182 |
| 2.50 | 0.46601 | 0.44558 | 0.36259 | 0.53905 | 0.54851 | 0.57294 |
| 3.50 | 0.54059 | 0.52471 | 0.57153 | 0.40332 | 0.52323 | 0.65274 |
| 4.30 | 0.60764 | 0.5222 | 0.64879 | 0.48821 | 0.43507 | 0.22534 |

ตารางที่ ค-17 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D40BL300W02

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.33634 | 0.24765 | 0.41041 | 0.27604 | 0.34578 | 0.22189 |
| -3.50 | 0.33825 | 0.32007 | 0.40676 | 0.23208 | 0.44939 | 0.61438 |
| -2.50 | 0.33592 | 0.38315 | 0.13951 | 0.43676 | 0.57044 | 0.63534 |
| -2.00 | 0.32001 | 0.35531 | 0.5324 | 0.40432 | 0.63072 | 0.57149 |
| -1.50 | 0.49612 | 0.65285 | 0.46763 | 0.58244 | 0.43529 | 0.38784 |
| -1.00 | 0.72652 | 0.60897 | 0.41828 | 0.5537 | 0.50867 | 0.60044 |
| -0.95 | 0.59492 | 0.62252 | 0.43913 | 0.61245 | 0.50392 | 0.63078 |
| -0.90 | 0.57161 | 0.61424 | 0.42348 | 0.60411 | 0.5583 | 0.63107 |
| -0.85 | 0.51338 | 0.55335 | 0.47058 | 0.62583 | 0.50431 | 0.70457 |
| -0.80 | 0.55587 | 0.54422 | 0.45472 | 0.67224 | 0.51622 | 0.69625 |
| -0.75 | 0.51486 | 0.576 | 0.4798 | 0.72592 | 0.59003 | 0.66572 |
| -0.70 | 0.50188 | 0.52745 | 0.46207 | 0.61149 | 0.61686 | 0.69772 |
| -0.65 | 0.53425 | 0.62541 | 0.45462 | 0.67186 | 0.61628 | 0.74488 |
| -0.60 | 0.6239 | 0.55438 | 0.57193 | 0.68872 | 0.64067 | 0.69314 |
| -0.50 | 1.0657 | 1.1002 | 0.91077 | 0.88445 | 0.90128 | 0.83315 |
| 0.00 | 0.98699 | 0.97556 | 1.2217 | 1.1301 | 1.047 | 0.96753 |
| 0.50 | 1.1382 | 1.0183 | 0.9429 | 0.7962 | 0.62208 | 0.82835 |
| 0.60 | 0.55644 | 0.62142 | 0.50331 | 0.58923 | 0.35309 | 0.83765 |
| 0.65 | 0.50686 | 0.62292 | 0.43754 | 0.59696 | 0.25569 | 0.86601 |
| 0.70 | 0.52246 | 0.53649 | 0.41935 | 0.51527 | 0.29428 | 0.82727 |
| 0.75 | 0.50953 | 0.48795 | 0.39719 | 0.64077 | 0.26968 | 0.81102 |
| 0.80 | 0.58696 | 0.57561 | 0.39137 | 0.52876 | 0.27223 | 0.78927 |
| 0.85 | 0.57073 | 0.60421 | 0.42701 | 0.54553 | 0.32847 | 0.72823 |
| 0.90 | 0.49813 | 0.48507 | 0.45455 | 0.56942 | 0.38351 | 0.71445 |
| 0.95 | 0.51666 | 0.49254 | 0.45905 | 0.53287 | 0.41201 | 0.6415 |
| 1.00 | 0.51976 | 0.62422 | 0.48931 | 0.48442 | 0.49244 | 0.628 |
| 1.50 | 0.59993 | 0.6941 | 0.56637 | 0.51802 | 0.62219 | 0.40226 |
| 2.00 | 0.36742 | 0.39447 | 0.53689 | 0.46857 | 0.78541 | 0.56585 |
| 2.50 | 0.38288 | 0.57996 | 0.33751 | 0.57887 | 0.45842 | 0.49756 |
| 3.50 | 0.46098 | 0.39907 | 0.46403 | 0.37582 | 0.71358 | 0.70041 |
| 4.30 | 0.48351 | 0.45629 | 0.6892 | 0.49057 | 0.31767 | 0.2775 |

ตารางที่ ค-18 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D40BL300W03

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.44608 | 0.40662 | 0.5368 | 0.45783 | 0.51321 | 0.36475 |
| -3.50 | 0.62491 | 0.48847 | 0.71584 | 0.55857 | 0.61056 | 0.67159 |
| -2.50 | 0.71001 | 0.79342 | 0.46384 | 0.59701 | 0.60426 | 0.79077 |
| -2.00 | 0.52832 | 0.52346 | 0.7226 | 0.5413 | 0.65094 | 0.60891 |
| -1.50 | 0.81881 | 0.90786 | 0.73066 | 0.80348 | 0.5246 | 0.39102 |
| -1.00 | 0.82945 | 0.71409 | 0.58269 | 0.63743 | 0.52993 | 0.61593 |
| -0.95 | 0.76006 | 0.67375 | 0.68214 | 0.6269 | 0.54142 | 0.67095 |
| -0.90 | 0.71098 | 0.72193 | 0.68164 | 0.57642 | 0.48382 | 0.74142 |
| -0.85 | 0.73738 | 0.74179 | 0.63072 | 0.58961 | 0.46807 | 0.69943 |
| -0.80 | 0.75341 | 0.6312 | 0.58684 | 0.59875 | 0.48936 | 0.66207 |
| -0.75 | 0.77839 | 0.5561 | 0.67308 | 0.64446 | 0.49098 | 0.72195 |
| -0.70 | 0.8031 | 0.58367 | 0.60289 | 0.63648 | 0.46014 | 0.70699 |
| -0.65 | 0.77059 | 0.58261 | 0.59609 | 0.62174 | 0.52293 | 0.73422 |
| -0.60 | 0.70973 | 0.5281 | 0.64922 | 0.60966 | 0.53168 | 0.70628 |
| -0.50 | 1.0302 | 0.96988 | 0.7997 | 0.74339 | 0.81283 | 0.83472 |
| 0.00 | 1.116 | 1.2329 | 1.1353 | 1.4949 | 1.0567 | 0.87352 |
| 0.50 | 1.2825 | 1.2057 | 1.0564 | 0.82793 | 1.0436 | 0.98025 |
| 0.60 | 0.85715 | 0.66661 | 0.82322 | 0.78273 | 0.84739 | 1.1727 |
| 0.65 | 0.78408 | 0.6218 | 0.8202 | 0.77317 | 0.81374 | 1.1404 |
| 0.70 | 0.89702 | 0.72222 | 0.87094 | 0.70932 | 0.82812 | 1.1626 |
| 0.75 | 0.85322 | 0.64837 | 0.96646 | 0.69714 | 0.99718 | 1.1479 |
| 0.80 | 0.71929 | 0.72802 | 1.0177 | 0.73454 | 0.97547 | 1.1608 |
| 0.85 | 0.75184 | 0.798 | 0.92753 | 0.73071 | 0.96917 | 1.0698 |
| 0.90 | 0.75619 | 0.76693 | 0.93019 | 0.79452 | 0.90792 | 1.0949 |
| 0.95 | 0.69973 | 0.804 | 0.98164 | 0.84429 | 0.8168 | 1.0849 |
| 1.00 | 0.68592 | 0.73617 | 0.93685 | 0.90534 | 0.84312 | 1.0516 |
| 1.50 | 0.72495 | 0.71363 | 0.79781 | 0.89409 | 0.71216 | 0.90032 |
| 2.00 | 0.59964 | 0.45637 | 0.64549 | 0.45683 | 0.75767 | 0.76054 |
| 2.50 | 0.61168 | 0.98958 | 0.51102 | 0.75625 | 0.71274 | 0.59965 |
| 3.50 | 0.7337 | 0.72072 | 0.74153 | 0.51105 | 0.7689 | 0.56352 |
| 4.30 | 0.74256 | 0.58846 | 0.79079 | 0.65062 | 0.54671 | 0.46138 |

ตารางที่ ค-19 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D45BL050W01

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.7502 | 0.69547 | 0.5534 | 0.93861 | 0.74608 | 0.49905 |
| -3.50 | 0.63031 | 0.75253 | 0.76092 | 0.77995 | 0.59425 | 0.82075 |
| -2.50 | 0.81322 | 0.66857 | 0.45751 | 0.53165 | 1.0155 | 0.93112 |
| -2.00 | 0.70101 | 0.40065 | 0.69626 | 0.76742 | 0.72702 | 0.92224 |
| -1.50 | 0.52316 | 0.79376 | 1.0462 | 0.99019 | 0.70384 | 0.71412 |
| -1.00 | 1.0602 | 1.0454 | 0.99262 | 0.98846 | 0.72207 | 0.49347 |
| -0.95 | 1.0138 | 0.8736 | 0.82518 | 0.82028 | 0.71579 | 0.45443 |
| -0.90 | 0.66811 | 0.671 | 0.53257 | 0.6004 | 0.58182 | 0.5613 |
| -0.85 | 0.62833 | 0.61997 | 0.44663 | 0.47439 | 0.56312 | 0.58874 |
| -0.80 | 0.61963 | 0.54464 | 0.39544 | 0.46879 | 0.54251 | 0.67715 |
| -0.75 | 0.60469 | 0.55717 | 0.35968 | 0.40562 | 0.48537 | 0.70855 |
| -0.70 | 0.59458 | 0.5378 | 0.32369 | 0.37305 | 0.50131 | 0.71161 |
| -0.65 | 0.61694 | 0.49776 | 0.30077 | 0.31234 | 0.48812 | 0.6808 |
| -0.60 | 0.61518 | 0.44816 | 0.24679 | 0.28644 | 0.46069 | 0.72114 |
| -0.50 | 0.65051 | 0.45654 | 0.2584 | 0.23885 | 0.32304 | 0.81199 |
| 0.00 | 0.67609 | 0.47982 | 0.25913 | 0.29214 | 0.31921 | 0.92265 |
| 0.50 | 0.6336 | 0.40073 | 0.29448 | 0.25701 | 0.3252 | 0.88291 |
| 0.60 | 0.64005 | 0.4953 | 0.31629 | 0.29612 | 0.34635 | 0.80395 |
| 0.65 | 0.63953 | 0.52918 | 0.37933 | 0.35713 | 0.36336 | 0.76977 |
| 0.70 | 0.62343 | 0.53879 | 0.38138 | 0.41363 | 0.41961 | 0.78784 |
| 0.75 | 0.64864 | 0.56332 | 0.40321 | 0.47262 | 0.43457 | 0.81202 |
| 0.80 | 0.67361 | 0.62671 | 0.43174 | 0.48057 | 0.51314 | 0.74417 |
| 0.85 | 0.67736 | 0.69936 | 0.52502 | 0.57674 | 0.57882 | 0.66219 |
| 0.90 | 0.69279 | 0.71891 | 0.5835 | 0.61757 | 0.60818 | 0.64298 |
| 0.95 | 0.77943 | 0.80764 | 0.63511 | 0.77186 | 0.62404 | 0.60073 |
| 1.00 | 0.81719 | 0.84698 | 0.69528 | 0.80279 | 0.65514 | 0.59913 |
| 1.50 | 0.59949 | 0.88075 | 1.1057 | 1.0336 | 0.8927 | 0.65509 |
| 2.00 | 0.73637 | 0.52589 | 0.76923 | 0.81476 | 0.96709 | 1.0879 |
| 2.50 | 0.79167 | 0.75172 | 0.64255 | 0.65056 | 1.1393 | 1.184 |
| 3.50 | 0.69731 | 0.70849 | 0.98916 | 0.80417 | 0.72343 | 1.0645 |
| 4.30 | 0.73524 | 0.78258 | 0.74116 | 1.0284 | 1.002 | 0.64531 |

ตารางที่ ค-20 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D45BL050W02

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.83198 | 0.94829 | 0.84862 | 1.0062 | 0.80188 | 0.56843 |
| -3.50 | 1.0232 | 0.7645 | 1.0059 | 0.92916 | 1.0691 | 1.036 |
| -2.50 | 0.82704 | 0.97961 | 0.7966 | 0.54422 | 0.96319 | 0.90828 |
| -2.00 | 0.84781 | 0.55667 | 0.53662 | 0.86189 | 0.91235 | 1.0536 |
| -1.50 | 0.82103 | 0.73837 | 1.1318 | 1.2913 | 1.0336 | 1.0356 |
| -1.00 | 1.3043 | 1.313 | 1.1147 | 1.0132 | 0.77536 | 0.80696 |
| -0.95 | 1.3011 | 1.2867 | 0.99787 | 0.93046 | 0.76274 | 0.71821 |
| -0.90 | 1.0349 | 0.86887 | 0.76314 | 0.79915 | 0.662 | 0.60157 |
| -0.85 | 1.0291 | 0.85771 | 0.77239 | 0.66533 | 0.61999 | 0.67332 |
| -0.80 | 0.99698 | 0.78118 | 0.76035 | 0.66209 | 0.70936 | 0.73802 |
| -0.75 | 0.91065 | 0.73296 | 0.75651 | 0.63485 | 0.68595 | 0.79607 |
| -0.70 | 0.85707 | 0.68432 | 0.61095 | 0.59816 | 0.61354 | 0.81559 |
| -0.65 | 0.8262 | 0.71279 | 0.49751 | 0.60745 | 0.54139 | 0.91557 |
| -0.60 | 0.7639 | 0.60771 | 0.42551 | 0.59986 | 0.56966 | 0.98934 |
| -0.50 | 0.81888 | 0.49184 | 0.46819 | 0.71625 | 0.82334 | 1.0779 |
| 0.00 | 0.88739 | 0.61015 | 0.52405 | 0.74765 | 0.82749 | 1.1038 |
| 0.50 | 0.96296 | 0.56152 | 0.45822 | 0.62185 | 0.70406 | 0.97208 |
| 0.60 | 0.91933 | 0.62585 | 0.62442 | 0.65705 | 0.65201 | 0.91912 |
| 0.65 | 0.98126 | 0.70188 | 0.62159 | 0.54866 | 0.60403 | 0.8455 |
| 0.70 | 1.0452 | 0.77919 | 0.71639 | 0.61747 | 0.67234 | 0.81416 |
| 0.75 | 1.0591 | 0.76543 | 0.70172 | 0.58457 | 0.62217 | 0.72838 |
| 0.80 | 1.0761 | 0.85877 | 0.78644 | 0.59992 | 0.61567 | 0.68093 |
| 0.85 | 1.1068 | 0.85366 | 0.83285 | 0.72841 | 0.69562 | 0.65644 |
| 0.90 | 1.0933 | 0.89009 | 0.94159 | 0.76969 | 0.73957 | 0.61543 |
| 0.95 | 1.2734 | 1.0085 | 0.90915 | 0.76255 | 0.85573 | 0.60543 |
| 1.00 | 1.3427 | 0.99987 | 0.96069 | 0.84827 | 0.8302 | 0.62741 |
| 1.50 | 0.6399 | 0.80011 | 1.1879 | 1.4255 | 0.95345 | 1.1761 |
| 2.00 | 0.96258 | 0.71669 | 0.85777 | 0.94539 | 1.0136 | 1.1846 |
| 2.50 | 0.85113 | 0.98269 | 0.79747 | 0.56381 | 1.0994 | 1.082 |
| 3.50 | 1.1172 | 0.865 | 0.98336 | 1.1784 | 1.0922 | 1.0467 |
| 4.30 | 0.89617 | 1.1535 | 0.95712 | 0.99217 | 0.98762 | 0.47902 |

ตารางที่ ค-21 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D45BL050W03

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.91918 | 0.78912 | 0.86506 | 0.70369 | 0.89119 | 0.6913 |
| -3.50 | 0.99356 | 0.60644 | 0.73654 | 0.77545 | 1.0642 | 0.83167 |
| -2.50 | 0.94596 | 0.92958 | 0.73435 | 0.69735 | 0.57472 | 1.0072 |
| -2.00 | 0.86984 | 0.79064 | 0.88165 | 0.85983 | 1.0784 | 1.0517 |
| -1.50 | 0.69882 | 0.76483 | 1.1713 | 1.1326 | 0.88758 | 0.94383 |
| -1.00 | 0.9698 | 1.2849 | 0.9068 | 0.96433 | 0.82187 | 0.85386 |
| -0.95 | 0.9474 | 1.2668 | 0.91525 | 0.94293 | 0.74435 | 0.79563 |
| -0.90 | 0.99938 | 1.0336 | 0.71626 | 0.88033 | 0.72468 | 1.0967 |
| -0.85 | 1.0644 | 0.94873 | 0.82765 | 0.7906 | 0.64258 | 0.90857 |
| -0.80 | 0.88448 | 0.97823 | 0.76443 | 0.74063 | 0.75097 | 0.8625 |
| -0.75 | 1.0168 | 0.94801 | 0.72249 | 0.7991 | 0.76229 | 0.92068 |
| -0.70 | 1.0154 | 0.83973 | 0.83756 | 0.8206 | 0.87407 | 0.98203 |
| -0.65 | 1.0897 | 0.82239 | 0.83108 | 0.92087 | 0.72214 | 0.9747 |
| -0.60 | 0.91992 | 0.6992 | 0.87739 | 0.76474 | 0.71715 | 1.1431 |
| -0.50 | 1.1127 | 1.0241 | 0.76909 | 0.8478 | 0.77685 | 1.0335 |
| 0.00 | 0.99169 | 0.7442 | 0.81945 | 0.86269 | 0.68631 | 0.937 |
| 0.50 | 1.0243 | 0.91151 | 0.96836 | 0.89542 | 0.74279 | 1.0789 |
| 0.60 | 1.061 | 0.87805 | 0.92154 | 0.7955 | 0.69293 | 1.0805 |
| 0.65 | 1.1491 | 0.9801 | 0.78755 | 0.74816 | 0.81328 | 0.95939 |
| 0.70 | 1.1284 | 1.035 | 0.8733 | 0.8595 | 0.78099 | 0.9384 |
| 0.75 | 1.139 | 1.1962 | 0.88146 | 0.96428 | 0.73409 | 0.88038 |
| 0.80 | 1.2708 | 0.96772 | 0.98498 | 0.8563 | 0.70651 | 0.83757 |
| 0.85 | 1.3535 | 0.96624 | 0.81644 | 0.77426 | 0.68662 | 0.78213 |
| 0.90 | 1.2286 | 1.1612 | 0.81123 | 0.91539 | 0.76942 | 0.76515 |
| 0.95 | 1.1108 | 0.98895 | 0.94196 | 0.92174 | 0.7504 | 0.84749 |
| 1.00 | 1.1038 | 1.0683 | 0.82496 | 0.88978 | 0.72411 | 0.80976 |
| 1.50 | 0.85194 | 0.74425 | 1.0764 | 1.2727 | 0.92864 | 0.8458 |
| 2.00 | 1.0574 | 0.78625 | 0.7883 | 0.92357 | 1.1703 | 0.94384 |
| 2.50 | 0.94658 | 0.97949 | 0.85324 | 0.58906 | 0.6778 | 1.0012 |
| 3.50 | 1.0938 | 0.75696 | 0.93577 | 1.0118 | 1.1541 | 0.86073 |
| 4.30 | 0.91486 | 1.0591 | 0.98301 | 0.79164 | 0.78692 | 0.77385 |

ตารางที่ ค-22 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D45BL150W01

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.9816 | 0.89169 | 0.95143 | 0.91729 | 0.80508 | 0.95672 |
| -3.50 | 1.0254 | 0.92134 | 0.72557 | 0.93083 | 1.0339 | 1.1808 |
| -3.00 | 0.98859 | 0.89214 | 1.0236 | 1.1856 | 1.0601 | 1.4192 |
| -2.50 | 0.85603 | 1.1172 | 1.1204 | 1.1082 | 1.0221 | 1.2551 |
| -2.00 | 1.1585 | 1.261 | 1.0754 | 1.0707 | 1.4565 | 1.3298 |
| -1.70 | 1.0851 | 1.0904 | 0.94208 | 0.99362 | 1.2822 | 1.1333 |
| -1.65 | 0.9614 | 1.062 | 0.85842 | 1.0374 | 1.3931 | 1.0608 |
| -1.60 | 0.94822 | 1.0328 | 0.79994 | 1.1021 | 1.4177 | 1.0837 |
| -1.55 | 1.0417 | 1.0051 | 0.75699 | 1.0618 | 1.3044 | 1.0227 |
| -1.50 | 1.0508 | 0.96884 | 0.7278 | 1.1579 | 1.4013 | 1.0068 |
| -1.45 | 1.0016 | 0.9056 | 0.69564 | 1.1138 | 1.2125 | 0.93361 |
| -1.40 | 0.96407 | 0.89702 | 0.70648 | 1.1322 | 1.1962 | 0.87197 |
| -1.35 | 0.88076 | 0.85356 | 0.68727 | 0.99877 | 1.1496 | 0.86569 |
| -1.30 | 0.84277 | 0.83049 | 0.70351 | 0.97399 | 0.96741 | 0.81548 |
| -0.70 | 1.0025 | 1.0372 | 0.95853 | 0.94892 | 0.7034 | 0.75238 |
| 0.00 | 1.1679 | 1.1563 | 1.2338 | 1.1519 | 0.71373 | 0.60536 |
| 0.70 | 1.0526 | 0.90026 | 0.88293 | 0.81901 | 0.71273 | 0.54741 |
| 1.30 | 0.86031 | 0.75118 | 0.74106 | 0.7893 | 0.81355 | 0.70697 |
| 1.35 | 0.86268 | 0.73065 | 0.73694 | 0.78271 | 0.7985 | 0.71756 |
| 1.40 | 0.85999 | 0.82578 | 0.78015 | 0.80755 | 0.89934 | 0.72075 |
| 1.45 | 0.83397 | 0.87239 | 0.80541 | 0.8046 | 0.93337 | 0.7366 |
| 1.50 | 0.82363 | 0.85873 | 0.8502 | 0.8152 | 1.0329 | 0.88683 |
| 1.55 | 0.90403 | 0.91252 | 0.89249 | 0.86508 | 1.105 | 0.87806 |
| 1.60 | 0.92173 | 0.9806 | 0.81865 | 0.81016 | 1.1327 | 0.92525 |
| 1.65 | 1.0228 | 0.97122 | 0.88606 | 0.85152 | 1.1669 | 0.98577 |
| 1.70 | 1.0806 | 0.98185 | 0.85326 | 0.88408 | 1.136 | 0.89847 |
| 2.00 | 1.1979 | 1.2853 | 1.0335 | 1.0173 | 1.2239 | 1.0654 |
| 2.50 | 0.91028 | 1.1138 | 1.1089 | 1.2666 | 1.1056 | 1.3402 |
| 3.00 | 0.98217 | 1.1028 | 1.2742 | 1.1051 | 1.0669 | 1.4367 |

ตารางที่ ค-23 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D45BL150W02

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.88439 | 0.95612 | 0.87602 | 0.88453 | 0.8642 | 0.69871 |
| -3.50 | 0.91632 | 0.86319 | 0.77118 | 0.819 | 0.89777 | 0.99922 |
| -3.00 | 0.71606 | 0.88059 | 0.82792 | 0.90471 | 0.99756 | 1.1711 |
| -2.50 | 0.86712 | 0.97514 | 0.94677 | 0.97615 | 1.0216 | 1.1557 |
| -2.00 | 1.1132 | 0.968 | 1.0272 | 1.0342 | 0.98936 | 0.96658 |
| -1.70 | 0.9942 | 0.84857 | 1.0265 | 0.99167 | 1.0242 | 0.84424 |
| -1.65 | 0.95866 | 0.82173 | 0.96189 | 0.9707 | 1.0031 | 0.8708 |
| -1.60 | 0.98712 | 0.80587 | 0.92863 | 0.96402 | 1.0035 | 0.96375 |
| -1.55 | 0.93423 | 0.83265 | 0.89263 | 1.0428 | 1.0074 | 0.85324 |
| -1.50 | 0.90404 | 0.84472 | 0.85505 | 0.96594 | 1.0005 | 0.82615 |
| -1.45 | 0.93234 | 0.87095 | 0.87317 | 1.0541 | 0.99457 | 0.82467 |
| -1.40 | 0.84102 | 0.89441 | 0.84527 | 0.9305 | 0.94348 | 0.7075 |
| -1.35 | 0.81903 | 0.80949 | 0.88196 | 0.89831 | 0.94278 | 0.69813 |
| -1.30 | 0.8527 | 0.81144 | 0.85975 | 0.81895 | 0.96076 | 0.66727 |
| -0.70 | 0.93375 | 0.95849 | 0.80817 | 0.96359 | 0.89195 | 0.80021 |
| 0.00 | 1.085 | 1.1428 | 1.0428 | 1.0739 | 0.73579 | 0.92925 |
| 0.70 | 0.9344 | 0.88993 | 0.85844 | 0.89053 | 0.89453 | 0.88152 |
| 1.30 | 0.90895 | 0.86002 | 0.94296 | 0.92542 | 0.97504 | 0.76293 |
| 1.35 | 0.9124 | 0.8642 | 0.90505 | 0.95471 | 1.0328 | 0.77894 |
| 1.40 | 0.87527 | 0.93093 | 0.89103 | 0.90377 | 1.0782 | 0.80844 |
| 1.45 | 0.91733 | 0.85894 | 0.8993 | 0.95691 | 1.0487 | 0.85043 |
| 1.50 | 0.93877 | 0.92562 | 0.91931 | 0.97897 | 1.1148 | 0.83283 |
| 1.55 | 0.97002 | 0.92652 | 0.97504 | 1.0388 | 1.1257 | 0.85155 |
| 1.60 | 0.94282 | 0.92433 | 0.92862 | 0.95886 | 1.1983 | 0.83482 |
| 1.65 | 1.0359 | 0.87947 | 1.0248 | 1.0547 | 1.2147 | 0.87873 |
| 1.70 | 1.0729 | 0.9572 | 1.0123 | 1.0306 | 1.0786 | 0.84463 |
| 2.00 | 1.1542 | 1.0732 | 1.0754 | 1.0315 | 1.0937 | 1.0787 |
| 2.50 | 0.99425 | 1.0619 | 1.0588 | 0.95185 | 1.0993 | 1.1982 |
| 3.00 | 0.89857 | 0.96322 | 0.97582 | 0.95224 | 1.2225 | 1.2667 |
| 3.50 | 0.99608 | 0.8456 | 0.81902 | 0.94484 | 1.0863 | 1.1524 |
| 4.30 | 1.0339 | 1.0129 | 0.97452 | 0.9943 | 0.91703 | 0.80388 |

ตารางที่ ค-24 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D45BL150W03

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.81055 | 0.83469 | 0.90693 | 0.70766 | 0.72546 | 0.72479 |
| -3.50 | 0.83259 | 0.74561 | 0.49875 | 0.67815 | 0.87686 | 0.82441 |
| -3.00 | 0.87244 | 0.84337 | 0.82662 | 1.1788 | 0.58042 | 0.98271 |
| -2.50 | 0.73689 | 0.87719 | 0.94077 | 0.81705 | 0.70579 | 1.2016 |
| -2.00 | 0.86889 | 0.89659 | 0.89658 | 0.8837 | 0.88029 | 1.1322 |
| -1.70 | 0.88362 | 0.86165 | 0.71877 | 1.0256 | 0.80121 | 1.0805 |
| -1.65 | 0.87197 | 0.88905 | 0.69708 | 1.0033 | 0.92974 | 1.1502 |
| -1.60 | 0.86631 | 0.84504 | 0.73866 | 0.82751 | 1.1167 | 1.0932 |
| -1.55 | 0.88119 | 0.85207 | 0.76224 | 0.78178 | 0.99698 | 1.0388 |
| -1.50 | 0.86885 | 0.74945 | 0.72455 | 0.72414 | 1.0224 | 0.93873 |
| -1.45 | 0.85423 | 0.80339 | 0.67273 | 0.82251 | 1.0876 | 1.0269 |
| -1.40 | 0.85875 | 0.91098 | 0.67432 | 0.85867 | 0.97335 | 1.1024 |
| -1.35 | 0.82588 | 1.0051 | 0.54438 | 0.83914 | 0.95682 | 0.94742 |
| -1.30 | 0.80792 | 0.99793 | 0.59786 | 0.82362 | 0.9871 | 0.935 |
| -0.70 | 1.1131 | 1.154 | 0.71953 | 1.3579 | 0.87695 | 0.89357 |
| 0.00 | 1.4506 | 1.2954 | 1.2125 | 1.2673 | 0.90183 | 0.95037 |
| 0.70 | 1.0818 | 1.1704 | 1.1954 | 1.0895 | 1.1292 | 1.2201 |
| 1.30 | 0.95992 | 0.91835 | 0.99547 | 1.039 | 1.24 | 1.1085 |
| 1.35 | 0.94846 | 0.86938 | 1.0801 | 0.92297 | 1.1593 | 1.0374 |
| 1.40 | 0.93032 | 0.89603 | 1.0776 | 1.1128 | 1.1758 | 1.0782 |
| 1.45 | 0.96851 | 0.84882 | 1.093 | 1.1673 | 1.2459 | 1.0937 |
| 1.50 | 0.97554 | 0.95338 | 1.0348 | 1.2624 | 1.2757 | 1.0234 |
| 1.55 | 1.0064 | 0.9928 | 1.0321 | 1.21 | 1.1815 | 1.0907 |
| 1.60 | 0.93342 | 0.97053 | 1.0946 | 1.2721 | 1.1893 | 1.1492 |
| 1.65 | 0.95779 | 0.86529 | 1.0044 | 1.3048 | 1.1373 | 1.1877 |
| 1.70 | 0.91797 | 0.92147 | 1.0036 | 1.2281 | 1.26 | 1.0707 |
| 2.00 | 0.98753 | 0.97914 | 0.88354 | 1.0412 | 1.0449 | 1.0777 |
| 2.50 | 0.749 | 0.98426 | 0.67892 | 0.96872 | 0.87113 | 0.97751 |
| 3.00 | 0.91844 | 0.90404 | 0.86959 | 0.87535 | 0.72772 | 0.68118 |
| 3.50 | 0.91062 | 0.91374 | 0.77828 | 0.70016 | 0.90725 | 0.72372 |
| 4.30 | 0.93791 | 0.94876 | 0.8383 | 0.81856 | 0.73584 | 0.54232 |

ตารางที่ ค-25 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D45BL300W01

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 1.1332 | 1.0381 | 1.1696 | 1.0786 | 1.0828 | 0.51548 |
| -3.50 | 1.2273 | 1.0698 | 1.16 | 1.1393 | 1.2251 | 1.2868 |
| -3.00 | 1.0134 | 1.4104 | 0.91991 | 1.3153 | 1.0092 | 1.3696 |
| -2.50 | 1.2509 | 1.0626 | 1.2348 | 1.177 | 1.1613 | 1.1763 |
| -2.00 | 0.9998 | 1.3931 | 1.1011 | 1.3887 | 1.0235 | 0.7547 |
| -1.70 | 1.2943 | 1.1947 | 1.0746 | 1.2527 | 0.81927 | 0.90482 |
| -1.65 | 1.2257 | 1.0648 | 1.0752 | 1.1454 | 0.8651 | 1.0469 |
| -1.60 | 1.284 | 0.95237 | 1.0799 | 1.1496 | 0.9184 | 1.0641 |
| -1.55 | 1.1764 | 0.9431 | 1.0033 | 1.0437 | 1.021 | 1.1006 |
| -1.50 | 1.1389 | 0.92182 | 0.96508 | 1.1169 | 0.99902 | 1.1484 |
| -1.45 | 0.96979 | 0.85033 | 0.9412 | 0.99344 | 0.93357 | 1.2104 |
| -1.40 | 0.88443 | 0.83939 | 0.9193 | 1.0015 | 0.98329 | 1.2547 |
| -1.35 | 0.78724 | 0.80339 | 0.90418 | 0.87959 | 0.93349 | 1.2556 |
| -1.30 | 0.74395 | 0.84549 | 0.86154 | 0.89843 | 1.0463 | 1.2514 |
| -0.70 | 1.434 | 1.1525 | 0.87995 | 0.87261 | 0.88511 | 0.62184 |
| 0.00 | 0.92964 | 1.1481 | 1.392 | 1.3065 | 1.2956 | 0.94769 |
| 0.70 | 1.2525 | 1.2907 | 0.87461 | 0.79713 | 0.9157 | 0.59484 |
| 1.30 | 0.80277 | 0.79313 | 0.76074 | 1.066 | 0.86216 | 1.1217 |
| 1.35 | 0.86864 | 0.70044 | 0.7819 | 1.0232 | 0.83306 | 1.1536 |
| 1.40 | 0.97847 | 0.73809 | 0.81765 | 1.0031 | 0.79741 | 1.192 |
| 1.45 | 1.0658 | 0.8043 | 0.8563 | 1.0708 | 0.83843 | 1.0948 |
| 1.50 | 1.103 | 0.82151 | 0.96279 | 1.0854 | 0.89129 | 1.2051 |
| 1.55 | 1.1361 | 0.99025 | 0.99684 | 1.0711 | 0.83356 | 1.1083 |
| 1.60 | 1.17 | 0.95346 | 1.0244 | 1.0751 | 0.83474 | 1.046 |
| 1.65 | 1.3167 | 1.0651 | 1.0463 | 0.98331 | 0.83126 | 0.98188 |
| 1.70 | 1.2601 | 1.1312 | 0.92552 | 0.92316 | 0.7672 | 0.88316 |
| 2.00 | 1.0333 | 1.5151 | 1.1759 | 1.2577 | 0.99058 | 0.7385 |
| 2.50 | 1.0425 | 1.0362 | 1.2544 | 1.2763 | 1.5062 | 1.1365 |
| 3.00 | 0.96795 | 1.205 | 0.85834 | 1.1304 | 1.1084 | 1.5298 |
| 3.50 | 0.99826 | 1.1504 | 1.1835 | 1.0696 | 1.4757 | 1.4188 |
| 4.30 | 1.2164 | 1.2179 | 1.2359 | 1.2265 | 1.1288 | 0.62352 |

ตารางที่ ค-26 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D45BL300W02

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 1.0235 | 0.92636 | 1.1613 | 1.1007 | 0.948 | 0.55869 |
| -3.50 | 1.1076 | 0.91195 | 1.1089 | 1.2051 | 1.1814 | 1.2612 |
| -3.00 | 0.74877 | 1.17 | 1.0216 | 0.96614 | 0.97863 | 1.2526 |
| -2.50 | 1.0256 | 0.88334 | 1.1943 | 1.2117 | 1.204 | 0.99902 |
| -2.00 | 0.87967 | 1.2912 | 1.323 | 1.1522 | 0.98 | 0.6164 |
| -1.70 | 1.2051 | 1.0743 | 1.0481 | 1.1284 | 0.85441 | 0.96325 |
| -1.65 | 1.2085 | 1.0823 | 1.0445 | 1.1278 | 0.92796 | 1.1339 |
| -1.60 | 1.1865 | 0.99063 | 1.0539 | 1.1386 | 0.96647 | 1.1785 |
| -1.55 | 1.1948 | 0.83898 | 1.0774 | 1.2089 | 0.94619 | 1.213 |
| -1.50 | 1.1256 | 0.88634 | 1.0459 | 1.1664 | 0.96762 | 1.1561 |
| -1.45 | 1.0554 | 0.80665 | 1.0162 | 1.149 | 1.0142 | 1.2095 |
| -1.40 | 0.97038 | 0.77593 | 1.0384 | 1.1394 | 1.0532 | 1.2984 |
| -1.35 | 0.94268 | 0.81108 | 0.93095 | 1.0809 | 1.0726 | 1.3454 |
| -1.30 | 0.85952 | 0.89665 | 1.0101 | 0.96583 | 1.0868 | 1.2771 |
| -0.70 | 1.291 | 1.1256 | 0.91401 | 0.9541 | 0.99192 | 0.93447 |
| 0.00 | 0.9625 | 1.1989 | 1.5675 | 1.2581 | 1.1855 | 0.96629 |
| 0.70 | 1.122 | 1.0871 | 0.95125 | 0.80501 | 1.0482 | 0.85805 |
| 1.30 | 0.89581 | 0.76775 | 0.95824 | 1.1442 | 1.0098 | 1.267 |
| 1.35 | 0.88869 | 0.78062 | 0.96754 | 1.1975 | 0.95507 | 1.2729 |
| 1.40 | 0.98187 | 0.80827 | 0.99727 | 1.1337 | 0.98459 | 1.208 |
| 1.45 | 1.0699 | 0.89595 | 0.9283 | 1.1716 | 0.92559 | 1.2112 |
| 1.50 | 1.1484 | 0.93751 | 0.98732 | 1.1491 | 1.0028 | 1.186 |
| 1.55 | 1.0671 | 0.96765 | 0.98832 | 1.2644 | 1.0175 | 1.2437 |
| 1.60 | 1.1465 | 0.95469 | 1.0642 | 1.1873 | 1.0564 | 1.1752 |
| 1.65 | 1.2102 | 0.98356 | 1.1099 | 1.1099 | 0.99945 | 1.2351 |
| 1.70 | 1.2703 | 1.0926 | 1.1023 | 1.0883 | 0.96161 | 1.0152 |
| 2.00 | 1.0102 | 1.3758 | 1.3399 | 1.2837 | 1.321 | 0.88277 |
| 2.50 | 1.1599 | 0.93185 | 1.2411 | 1.3283 | 1.3598 | 1.4025 |
| 3.00 | 0.99616 | 1.192 | 1.0699 | 1.1054 | 1.0652 | 1.6072 |
| 3.50 | 1.0194 | 0.91944 | 1.1652 | 1.3324 | 1.2826 | 1.2963 |
| 4.30 | 1.0492 | 1.0162 | 1.2342 | 1.3424 | 1.0716 | 0.83808 |

ตารางที่ ค-27 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D45BL300W03

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.92959 | 0.93103 | 1.0742 | 0.99577 | 0.87534 | 0.73396 |
| -3.50 | 1.0168 | 0.92804 | 1.0448 | 1.1514 | 1.1739 | 0.90578 |
| -3.00 | 1.0096 | 1.3236 | 0.87968 | 0.90965 | 0.85437 | 1.1771 |
| -2.50 | 1.0472 | 0.96606 | 1.061 | 1.039 | 1.1945 | 0.90703 |
| -2.00 | 0.96078 | 1.2343 | 1.0736 | 1.276 | 1.1191 | 0.93036 |
| -1.70 | 1.1293 | 1.1716 | 1.0761 | 1.1374 | 1.0253 | 1.0563 |
| -1.65 | 1.0965 | 1.1011 | 1.0867 | 1.2095 | 0.99743 | 1.1155 |
| -1.60 | 1.1095 | 1.0768 | 1.1318 | 1.1632 | 0.90991 | 1.2211 |
| -1.55 | 1.1621 | 0.94328 | 1.268 | 1.2264 | 0.88544 | 1.243 |
| -1.50 | 1.1162 | 0.94887 | 1.1228 | 1.1991 | 0.90225 | 1.1993 |
| -1.45 | 1.0469 | 0.91907 | 1.1607 | 1.0987 | 1.0418 | 1.2001 |
| -1.40 | 0.9889 | 0.8844 | 1.1641 | 1.0293 | 0.97074 | 1.2306 |
| -1.35 | 0.97058 | 0.83251 | 1.132 | 1.0774 | 0.94156 | 1.2202 |
| -1.30 | 0.94865 | 0.78367 | 1.1072 | 0.98464 | 0.97427 | 1.282 |
| -0.70 | 1.2435 | 1.1609 | 0.87778 | 0.84269 | 1.1235 | 1.0833 |
| 0.00 | 0.96903 | 1.2498 | 1.4515 | 1.3877 | 1.0145 | 1.0259 |
| 0.70 | 1.2268 | 1.1009 | 0.92306 | 0.7848 | 1.1726 | 1.0034 |
| 1.30 | 0.91907 | 0.91961 | 0.95702 | 1.0987 | 1.0604 | 1.2718 |
| 1.35 | 1.0706 | 0.9898 | 1.0472 | 1.0654 | 1.0256 | 1.2834 |
| 1.40 | 1.1501 | 0.95806 | 1.0895 | 1.0877 | 1.1108 | 1.3127 |
| 1.45 | 1.1573 | 1.0582 | 1.03 | 1.1124 | 1.1236 | 1.3174 |
| 1.50 | 1.1322 | 0.96522 | 1.0684 | 1.1941 | 1.136 | 1.1632 |
| 1.55 | 1.1186 | 0.97294 | 1.1875 | 1.2248 | 1.0706 | 1.0641 |
| 1.60 | 1.1855 | 1.044 | 1.1149 | 1.396 | 1.0268 | 1.0664 |
| 1.65 | 1.2955 | 1.1285 | 1.2069 | 1.1632 | 1.0965 | 1.0143 |
| 1.70 | 1.2527 | 1.1646 | 1.2333 | 1.1518 | 1.0422 | 0.93391 |
| 2.00 | 1.0519 | 1.5418 | 1.2381 | 1.3331 | 1.1141 | 0.80253 |
| 2.50 | 1.1306 | 1.0808 | 1.0907 | 1.3414 | 1.2771 | 1.1831 |
| 3.00 | 0.96971 | 1.4008 | 1.1313 | 0.87066 | 0.94202 | 1.4531 |
| 3.50 | 1.0993 | 1.0382 | 1.2379 | 1.3577 | 1.0401 | 1.1839 |
| 4.30 | 1.1443 | 1.2368 | 1.2254 | 1.1717 | 1.0214 | 0.90872 |

ตารางที่ ค-28 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D50BL050W01

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.93996 | 1.0708 | 0.85981 | 0.87826 | 0.84066 | 0.67779 |
| -3.50 | 0.94773 | 0.81082 | 1.0211 | 1.0446 | 0.9962 | 0.89603 |
| -2.50 | 1.0186 | 1.1561 | 0.74148 | 0.69784 | 1.1992 | 1.093 |
| -2.00 | 0.83271 | 0.66145 | 0.92806 | 1.0086 | 1.0015 | 1.0257 |
| -1.50 | 0.79331 | 0.93559 | 1.3776 | 1.1587 | 1.1865 | 0.8023 |
| -1.00 | 1.2565 | 1.3982 | 1.109 | 0.9709 | 1.0654 | 0.74729 |
| -0.95 | 1.2498 | 1.3918 | 1.033 | 0.91433 | 1.0123 | 0.62359 |
| -0.90 | 0.96145 | 1.0515 | 0.78147 | 0.71559 | 1.0128 | 0.77909 |
| -0.85 | 0.87604 | 1.0677 | 0.72013 | 0.67882 | 0.95801 | 0.87368 |
| -0.80 | 0.83914 | 1.0259 | 0.74343 | 0.69438 | 0.99111 | 0.8393 |
| -0.75 | 0.8805 | 0.95492 | 0.69329 | 0.66214 | 0.9009 | 0.84516 |
| -0.70 | 0.80745 | 0.82233 | 0.71774 | 0.65647 | 0.90603 | 0.88281 |
| -0.65 | 0.75255 | 0.80869 | 0.69303 | 0.65002 | 0.90646 | 0.88417 |
| -0.60 | 0.7379 | 0.7651 | 0.71693 | 0.63179 | 0.86059 | 0.89503 |
| -0.50 | 0.76002 | 0.61184 | 0.75553 | 0.63133 | 0.77397 | 0.90377 |
| 0.00 | 0.7718 | 0.65404 | 0.73974 | 0.66681 | 0.81335 | 0.89607 |
| 0.50 | 0.78809 | 0.61472 | 0.77043 | 0.61357 | 0.83598 | 0.90588 |
| 0.60 | 0.8502 | 0.66386 | 0.76762 | 0.57116 | 0.82931 | 0.89952 |
| 0.65 | 0.86622 | 0.73831 | 0.79055 | 0.61955 | 0.80415 | 0.91467 |
| 0.70 | 0.90336 | 0.78651 | 0.83818 | 0.61365 | 0.83063 | 0.87904 |
| 0.75 | 0.94081 | 0.82569 | 0.90095 | 0.61472 | 0.84354 | 0.86017 |
| 0.80 | 1.0143 | 0.9194 | 0.92792 | 0.60235 | 0.79968 | 0.85892 |
| 0.85 | 1.0841 | 1.0101 | 0.87948 | 0.63657 | 0.8726 | 0.82331 |
| 0.90 | 1.1291 | 1.0643 | 1.0154 | 0.62323 | 0.86457 | 0.84411 |
| 0.95 | 1.1674 | 1.0775 | 0.99613 | 0.63175 | 0.90379 | 0.91693 |
| 1.00 | 1.289 | 1.1599 | 1.0313 | 0.62212 | 1.0003 | 0.85322 |
| 1.50 | 0.69014 | 1.0309 | 1.3364 | 1.4228 | 1.1813 | 0.846 |
| 2.00 | 0.939 | 0.82968 | 1.0593 | 1.0578 | 1.2441 | 0.91745 |
| 2.50 | 1.0271 | 1.1645 | 0.8282 | 0.7528 | 1.1389 | 1.2736 |
| 3.50 | 1.1107 | 0.84278 | 1.216 | 1.1592 | 1.2058 | 1.0042 |
| 4.30 | 0.94209 | 1.241 | 1.0267 | 0.95963 | 1.1108 | 0.61631 |

e

ตารางที่ ค-29 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D50BL050W02

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 1.1209 | 1.0405 | 0.74289 | 1.1577 | 0.95637 | 0.71121 |
| -3.50 | 1.0477 | 0.88665 | 1.3002 | 1.1141 | 1.0267 | 0.99024 |
| -2.50 | 1.2758 | 1.1442 | 0.59707 | 0.84419 | 1.3254 | 1.1753 |
| -2.00 | 0.94504 | 0.71386 | 1.0775 | 0.96291 | 1.0662 | 1.0839 |
| -1.50 | 0.7692 | 0.9642 | 1.4366 | 1.1803 | 1.1538 | 0.89349 |
| -1.00 | 1.7452 | 1.393 | 1.0873 | 1.2423 | 1.1234 | 0.85787 |
| -0.95 | 1.7031 | 1.3736 | 0.94818 | 1.258 | 1.1152 | 0.79771 |
| -0.90 | 1.3045 | 1.004 | 0.75971 | 1.0122 | 1.1554 | 0.81229 |
| -0.85 | 1.1833 | 0.96257 | 0.7778 | 0.92749 | 1.0378 | 0.76132 |
| -0.80 | 1.0402 | 0.83986 | 0.78993 | 0.84405 | 1.0427 | 0.76527 |
| -0.75 | 0.91673 | 0.76135 | 0.74647 | 0.79979 | 1.0514 | 0.85451 |
| -0.70 | 0.87905 | 0.70072 | 0.79302 | 0.7798 | 0.97464 | 0.88251 |
| -0.65 | 0.87737 | 0.60206 | 0.84669 | 0.70765 | 0.9343 | 0.88642 |
| -0.60 | 0.78714 | 0.5487 | 0.89218 | 0.72313 | 0.94561 | 0.83696 |
| -0.50 | 0.81241 | 0.46537 | 0.92823 | 0.736 | 0.95036 | 1.0526 |
| 0.00 | 0.72128 | 0.43495 | 0.98046 | 0.73121 | 1.0889 | 1.1881 |
| 0.50 | 0.83494 | 0.55681 | 1.0506 | 0.75802 | 0.81196 | 1.1228 |
| 0.60 | 0.9156 | 0.61856 | 0.93874 | 0.69079 | 0.87472 | 1.0498 |
| 0.65 | 0.99053 | 0.71064 | 0.87664 | 0.67992 | 0.89593 | 1.0277 |
| 0.70 | 1.0309 | 0.76083 | 0.85109 | 0.68131 | 0.89094 | 1.0581 |
| 0.75 | 1.1023 | 0.86346 | 0.88037 | 0.75753 | 0.91341 | 0.97217 |
| 0.80 | 1.1443 | 1.0062 | 0.85029 | 0.76542 | 0.82524 | 0.9435 |
| 0.85 | 1.3171 | 1.0669 | 0.87484 | 0.84394 | 0.92506 | 0.96545 |
| 0.90 | 1.4507 | 1.1361 | 0.88391 | 0.86104 | 0.97248 | 0.97635 |
| 0.95 | 1.4636 | 1.2543 | 0.97211 | 0.9608 | 1.0491 | 0.95687 |
| 1.00 | 1.5605 | 1.3304 | 0.99275 | 1.0031 | 1.134 | 0.94574 |
| 1.50 | 0.7726 | 1.1061 | 1.5051 | 1.4152 | 1.0803 | 0.85634 |
| 2.00 | 1.0839 | 0.74606 | 0.99161 | 1.1208 | 1.1562 | 1.1548 |
| 2.50 | 1.3921 | 1.1703 | 0.69246 | 0.77538 | 1.2788 | 1.3692 |
| 3.50 | 1.1168 | 1.0626 | 1.3702 | 1.3558 | 1.2066 | 0.9555 |
| 4.30 | 1.273 | 1.3927 | 0.95019 | 1.3132 | 1.0121 | 0.70499 |

ตารางที่ ค-30 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D50BL050W03

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 1.479 | 1.0408 | 0.7056 | 1.2435 | 1.0564 | 0.7642 |
| -3.50 | 1.0356 | 1.0405 | 1.338 | 1.082 | 1.1242 | 1.2318 |
| -2.50 | 1.4453 | 1.2061 | 0.71486 | 1.0272 | 1.0712 | 1.2657 |
| -2.00 | 1.006 | 0.75045 | 1.0338 | 0.9568 | 1.1167 | 1.3365 |
| -1.50 | 0.86965 | 1.1227 | 1.5371 | 1.3105 | 1.1332 | 1.0456 |
| -1.00 | 1.84 | 1.425 | 1.0177 | 1.4988 | 1.2331 | 0.91634 |
| -0.95 | 1.828 | 1.3458 | 0.87107 | 1.5714 | 1.1677 | 0.83226 |
| -0.90 | 1.376 | 1.1185 | 0.95603 | 1.3794 | 1.0031 | 0.97124 |
| -0.85 | 1.3917 | 1.021 | 1.0123 | 1.2111 | 0.94295 | 0.88532 |
| -0.80 | 1.2591 | 1.0863 | 1.028 | 1.0863 | 0.85336 | 0.92576 |
| -0.75 | 1.1725 | 0.96891 | 1.0696 | 0.94024 | 0.91234 | 0.90912 |
| -0.70 | 0.99761 | 1.1045 | 1.0154 | 0.85612 | 0.82319 | 1.0507 |
| -0.65 | 0.98601 | 0.98344 | 0.98528 | 0.73464 | 0.87439 | 1.0486 |
| -0.60 | 1.0827 | 0.86484 | 1.1166 | 0.84545 | 0.85872 | 1.055 |
| -0.50 | 0.97269 | 0.45739 | 1.0816 | 0.8441 | 0.90976 | 1.0723 |
| 0.00 | 0.99073 | 0.92408 | 1.2516 | 0.94856 | 0.99528 | 1.2751 |
| 0.50 | 1.1138 | 0.74937 | 1.0233 | 0.80583 | 0.90509 | 1.1337 |
| 0.60 | 1.0289 | 0.83718 | 1.0643 | 0.83506 | 0.81492 | 1.0884 |
| 0.65 | 1.1297 | 0.93684 | 1.0432 | 0.79295 | 0.83607 | 1.2186 |
| 0.70 | 1.1591 | 0.97307 | 1.2233 | 0.82308 | 0.91688 | 1.1693 |
| 0.75 | 1.2531 | 1.0653 | 1.0896 | 0.98744 | 0.87832 | 1.1061 |
| 0.80 | 1.4789 | 1.1434 | 0.99016 | 0.98836 | 0.94564 | 0.95254 |
| 0.85 | 1.3092 | 1.1631 | 1.0058 | 1.0122 | 0.90707 | 1.0039 |
| 0.90 | 1.4666 | 1.1273 | 0.95595 | 1.2621 | 0.91832 | 0.94173 |
| 0.95 | 1.7495 | 1.111 | 0.83922 | 1.362 | 0.99797 | 0.90043 |
| 1.00 | 1.8264 | 1.1915 | 0.84519 | 1.3062 | 0.99988 | 0.94241 |
| 1.50 | 0.81108 | 1.119 | 1.3141 | 1.3465 | 1.2002 | 1.2147 |
| 2.00 | 1.2455 | 0.88296 | 1.2439 | 1.1199 | 1.3331 | 1.3319 |
| 2.50 | 1.6177 | 1.2207 | 1.0705 | 1.1929 | 1.2169 | 1.4329 |
| 3.50 | 1.1042 | 1.1833 | 1.4651 | 1.3337 | 1.1004 | 1.5941 |
| 4.30 | 1.3782 | 1.406 | 0.98821 | 1.482 | 1.1863 | 0.85372 |

ตารางที่ ค-31 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D50BL150W01

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.89546 | 0.86191 | 0.85335 | 0.89186 | 0.90898 | 0.70269 |
| -3.50 | 0.8586 | 0.82329 | 0.73567 | 0.96119 | 1.0278 | 1.1789 |
| -3.00 | 0.7911 | 0.77117 | 0.91943 | 0.90996 | 1.0825 | 1.4859 |
| -2.50 | 0.81051 | 0.97164 | 1.0233 | 0.97371 | 1.1392 | 1.3183 |
| -2.00 | 1.0594 | 1.0558 | 0.98276 | 1.1383 | 1.1313 | 1.0562 |
| -1.70 | 1.0522 | 1.0789 | 0.81655 | 1.1202 | 1.1486 | 0.82555 |
| -1.65 | 1.0787 | 1.0237 | 0.84742 | 1.1512 | 1.0574 | 0.80346 |
| -1.60 | 0.93085 | 1.0723 | 0.84607 | 1.1406 | 1.0628 | 0.80768 |
| -1.55 | 0.9893 | 1.0192 | 0.84012 | 1.1572 | 1.0715 | 0.84673 |
| -1.50 | 1.0142 | 1.0313 | 0.76957 | 1.1529 | 1.0756 | 0.79756 |
| -1.45 | 0.90147 | 1.0057 | 0.77131 | 1.1493 | 1.0704 | 0.79937 |
| -1.40 | 0.89497 | 0.98737 | 0.75728 | 1.0765 | 0.9986 | 0.71228 |
| -1.35 | 0.8858 | 1.018 | 0.79335 | 1.1665 | 1.0168 | 0.684 |
| -1.30 | 0.84606 | 0.96998 | 0.8167 | 1.0576 | 0.97773 | 0.65725 |
| -0.70 | 0.94661 | 0.89991 | 0.99088 | 0.92943 | 0.80879 | 0.7539 |
| 0.00 | 1.2794 | 1.0199 | 1.0679 | 0.97336 | 0.68611 | 0.76434 |
| 0.70 | 1.1159 | 1.0524 | 0.97948 | 1.0011 | 0.93303 | 0.67689 |
| 1.30 | 0.88211 | 1.0643 | 0.9966 | 1.0362 | 0.96487 | 0.69947 |
| 1.35 | 0.86841 | 1.0602 | 1.0581 | 1.0443 | 0.96189 | 0.77981 |
| 1.40 | 0.91743 | 1.1048 | 1.0818 | 1.1203 | 0.9933 | 0.81116 |
| 1.45 | 0.95659 | 1.0788 | 1.0229 | 1.0623 | 1.0136 | 0.82382 |
| 1.50 | 0.92934 | 1.084 | 1.0814 | 1.068 | 1.1292 | 0.85435 |
| 1.55 | 0.92941 | 1.1581 | 1.1051 | 1.0865 | 1.0692 | 0.84672 |
| 1.60 | 0.97958 | 1.0558 | 1.0529 | 1.1518 | 1.0201 | 0.87232 |
| 1.65 | 0.95811 | 1.1596 | 1.0638 | 1.2031 | 1.0748 | 0.89798 |
| 1.70 | 0.96626 | 1.0931 | 1.088 | 1.1305 | 1.0431 | 0.90563 |
| 2.00 | 1.0771 | 1.0963 | 1.0567 | 1.1777 | 1.1599 | 1.1052 |
| 2.50 | 0.98603 | 1.1071 | 1.0007 | 1.1967 | 1.3579 | 1.3218 |
| 3.00 | 0.81908 | 0.97993 | 1.0481 | 1.0619 | 1.393 | 1.3683 |
| 3.50 | 0.96834 | 0.97078 | 0.94327 | 1.1041 | 1.2839 | 1.3584 |
| 4.30 | 1.0983 | 1.0032 | 1.0385 | 1.0306 | 0.93036 | 0.76788 |

ตารางที่ ค-32 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D50BL150W02

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.98754 | 1.0216 | 1.0319 | 0.9281 | 0.7469 | 0.67281 |
| -3.50 | 1.0455 | 0.99685 | 0.87119 | 0.88641 | 1.1664 | 1.1216 |
| -3.00 | 0.86638 | 0.90645 | 0.96148 | 0.96683 | 1.2181 | 1.3409 |
| -2.50 | 0.96837 | 1.1365 | 1.2799 | 1.1393 | 1.0834 | 1.3363 |
| -2.00 | 1.3512 | 1.2349 | 1.291 | 1.1336 | 1.0234 | 1.2119 |
| -1.70 | 1.2367 | 0.97123 | 1.042 | 1.0212 | 1.057 | 1.003 |
| -1.65 | 1.132 | 0.96587 | 1.0024 | 1.0112 | 1.0396 | 0.88663 |
| -1.60 | 1.1232 | 0.96694 | 0.99793 | 0.95296 | 1.0516 | 0.85011 |
| -1.55 | 1.0881 | 0.91987 | 1.035 | 0.96235 | 1.0949 | 0.84008 |
| -1.50 | 1.0556 | 0.90477 | 1.0099 | 0.93247 | 1.0724 | 0.81393 |
| -1.45 | 0.9714 | 0.8909 | 0.93922 | 0.8813 | 1.0551 | 0.80009 |
| -1.40 | 0.95417 | 0.89814 | 0.94533 | 0.88894 | 1.052 | 0.81833 |
| -1.35 | 0.96796 | 0.85314 | 0.92547 | 0.87195 | 1.0655 | 0.80515 |
| -1.30 | 0.89212 | 0.84735 | 0.91823 | 0.87408 | 1.0695 | 0.81122 |
| -0.70 | 1.0502 | 0.97719 | 1.0501 | 0.91273 | 0.7949 | 0.74681 |
| 0.00 | 1.2791 | 1.2882 | 1.1697 | 1.1709 | 0.80369 | 0.70056 |
| 0.70 | 1.0913 | 1.0604 | 1.0408 | 1.0056 | 0.84436 | 0.88689 |
| 1.30 | 0.89819 | 0.98313 | 1.0126 | 1.0939 | 1.1391 | 0.88231 |
| 1.35 | 0.98019 | 0.97835 | 0.99724 | 1.0766 | 1.1325 | 0.82663 |
| 1.40 | 1.0329 | 0.98275 | 1.0585 | 1.0428 | 1.1785 | 0.91436 |
| 1.45 | 1.0748 | 1.0001 | 1.0691 | 1.0905 | 1.1884 | 0.92091 |
| 1.50 | 1.1201 | 1.0595 | 1.0807 | 1.1407 | 1.1128 | 0.94229 |
| 1.55 | 1.158 | 1.1168 | 1.0896 | 1.1426 | 1.1688 | 0.93608 |
| 1.60 | 1.218 | 1.116 | 1.0255 | 1.2059 | 1.1445 | 0.99902 |
| 1.65 | 1.2416 | 1.1364 | 1.0331 | 1.1608 | 1.195 | 0.98065 |
| 1.70 | 1.2517 | 1.2055 | 1.0265 | 1.168 | 1.1893 | 0.98303 |
| 2.00 | 1.4595 | 1.2706 | 1.324 | 1.3047 | 1.2448 | 1.2794 |
| 2.50 | 1.0896 | 1.2567 | 1.4444 | 1.2562 | 1.3088 | 1.5312 |
| 3.00 | 1.0749 | 0.99902 | 1.2175 | 1.001 | 1.3836 | 1.7217 |
| 3.50 | 1.414 | 0.97815 | 1.0766 | 1.1138 | 1.3992 | 1.5179 |
| 4.30 | 1.2976 | 1.1206 | 1.2254 | 1.032 | 1.1579 | 0.88947 |

ตารางที่ ค-33 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D50BL150W03

| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 1.1601 | 0.90964 | 1.0086 | 0.8507 | 0.88641 | 0.78889 |
| -3.50 | 1.0851 | 0.89921 | 0.77137 | 0.91874 | 1.0777 | 1.1158 |
| -3.00 | 0.96805 | 0.84661 | 0.9013 | 0.96452 | 1.0065 | 1.1232 |
| -2.50 | 0.97516 | 1.0298 | 1.0513 | 1.0453 | 1.0058 | 1.2162 |
| -2.00 | 1.3673 | 1.1267 | 1.164 | 1.1024 | 1.2427 | 1.2396 |
| -1.70 | 1.2928 | 1.0805 | 1.0799 | 1.0872 | 1.1364 | 1.1704 |
| -1.65 | 1.2577 | 1.0278 | 1.0137 | 1.0529 | 1.0713 | 1.153 |
| -1.60 | 1.2768 | 1.0629 | 1.0959 | 1.0499 | 1.091 | 1.1252 |
| -1.55 | 1.136 | 1.0651 | 1.0447 | 1.0435 | 1.1226 | 1.125 |
| -1.50 | 1.0904 | 1.1601 | 1.0477 | 1.0047 | 1.1682 | 1.1203 |
| -1.45 | 1.0627 | 1.202 | 1.1004 | 1.0436 | 1.178 | 1.1403 |
| -1.40 | 1.0273 | 1.1146 | 1.0442 | 1.0657 | 1.1853 | 1.1745 |
| -1.35 | 1.018 | 1.0896 | 1.0834 | 1.0402 | 1.2076 | 1.0347 |
| -1.30 | 0.97197 | 1.0911 | 0.99573 | 1.0677 | 1.2024 | 1.0633 |
| -0.70 | 0.96987 | 1.0448 | 0.98236 | 1.042 | 1.0268 | 1.0357 |
| 0.00 | 1.3554 | 1.2749 | 1.0382 | 1.2083 | 0.89077 | 0.96775 |
| 0.70 | 1.098 | 1.2143 | 1.0181 | 1.0256 | 0.9444 | 0.94435 |
| 1.30 | 1.089 | 1.06 | 1.0951 | 1.0743 | 1.111 | 1.2126 |
| 1.35 | 1.1333 | 1.0215 | 1.0579 | 1.0463 | 1.1726 | 1.2327 |
| 1.40 | 1.1766 | 1.0086 | 1.0901 | 1.1197 | 1.2104 | 1.2554 |
| 1.45 | 1.1905 | 1.0214 | 1.04 | 1.0663 | 1.2899 | 1.3175 |
| 1.50 | 1.1719 | 0.99974 | 1.0433 | 1.0861 | 1.1989 | 1.3132 |
| 1.55 | 1.2471 | 1.0272 | 1.0846 | 1.1493 | 1.2557 | 1.2904 |
| 1.60 | 1.2374 | 1.0593 | 1.1 | 1.1194 | 1.3205 | 1.3187 |
| 1.65 | 1.3581 | 1.0918 | 1.1822 | 1.0852 | 1.4311 | 1.3452 |
| 1.70 | 1.3237 | 1.096 | 1.147 | 1.149 | 1.4162 | 1.3281 |
| 2.00 | 1.3979 | 1.1809 | 1.1664 | 1.2515 | 1.4782 | 1.3825 |
| 2.50 | 1.0347 | 1.0979 | 1.2847 | 1.3297 | 1.443 | 1.3846 |
| 3.00 | 1.1669 | 1.05 | 1.0846 | 1.2465 | 1.3635 | 1.3902 |
| 3.50 | 1.3278 | 1.0929 | 1.1281 | 1.0207 | 1.1704 | 1.0664 |
| 4.30 | 1.3973 | 1.041 | 1.083 | 1.0918 | 0.92331 | 0.65186 |

ตารางที่ ค-34 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D50BL300W01

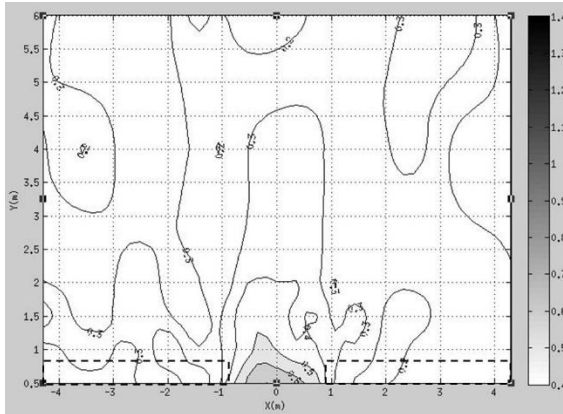
| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.94138 | 0.80011 | 0.94187 | 1.1255 | 1.092 | 0.56434 |
| -3.50 | 0.93328 | 0.85709 | 0.98202 | 0.77341 | 1.4182 | 1.2831 |
| -3.00 | 0.93027 | 1.0364 | 1.0053 | 1.1568 | 1.2104 | 1.3128 |
| -2.50 | 0.8128 | 0.74246 | 0.78329 | 0.81436 | 1.1747 | 1.2985 |
| -2.00 | 0.9454 | 1.1239 | 1.1688 | 1.1196 | 1.1498 | 0.81831 |
| -1.70 | 1.0284 | 1.0675 | 1.1211 | 1.1462 | 0.89678 | 0.9854 |
| -1.65 | 0.94978 | 1.0615 | 1.022 | 1.0634 | 0.85757 | 1.0681 |
| -1.60 | 0.87352 | 1.0385 | 0.99628 | 0.9432 | 0.85559 | 1.2354 |
| -1.55 | 0.96362 | 0.9659 | 0.97779 | 0.94185 | 0.80396 | 1.23 |
| -1.50 | 0.93375 | 0.84415 | 0.94659 | 0.90411 | 0.80205 | 1.3446 |
| -1.45 | 0.94664 | 0.87452 | 0.96054 | 0.87527 | 0.837 | 1.2264 |
| -1.40 | 0.98073 | 0.85934 | 0.8998 | 0.86228 | 0.97282 | 1.503 |
| -1.35 | 0.99829 | 0.9034 | 0.89146 | 0.79433 | 0.90114 | 1.537 |
| -1.30 | 0.93994 | 0.88774 | 0.99543 | 0.87824 | 0.96627 | 1.5018 |
| -0.70 | 1.0389 | 0.95329 | 1.0453 | 0.80189 | 0.86595 | 0.60195 |
| 0.00 | 0.99963 | 1.0144 | 1.111 | 1.1727 | 1.0879 | 1.2225 |
| 0.70 | 0.9559 | 0.88685 | 0.86919 | 0.7655 | 0.88217 | 0.58627 |
| 1.30 | 0.72802 | 0.8471 | 0.827 | 0.837 | 0.84582 | 1.4617 |
| 1.35 | 0.80958 | 0.89223 | 0.82289 | 0.82314 | 0.73013 | 1.445 |
| 1.40 | 0.85426 | 0.8561 | 0.8065 | 0.84963 | 0.7989 | 1.4179 |
| 1.45 | 0.912 | 0.91924 | 0.86516 | 0.9012 | 0.79655 | 1.5935 |
| 1.50 | 0.87266 | 0.82591 | 0.79975 | 0.83047 | 0.76187 | 1.4331 |
| 1.55 | 0.97914 | 0.82843 | 0.88622 | 0.85981 | 0.81236 | 1.4318 |
| 1.60 | 1.0945 | 0.91674 | 0.80581 | 0.83329 | 0.83178 | 1.2841 |
| 1.65 | 1.0215 | 0.87577 | 0.88864 | 0.9483 | 0.83645 | 1.1635 |
| 1.70 | 1.0474 | 0.9798 | 0.87802 | 1.0188 | 0.89815 | 1.1471 |
| 2.00 | 1.1322 | 1.2781 | 1.1991 | 1.149 | 1.3999 | 0.79592 |
| 2.50 | 0.95487 | 0.91142 | 0.92559 | 0.95967 | 1.2746 | 1.2258 |
| 3.00 | 0.98531 | 1.1807 | 1.0342 | 1.0589 | 0.98307 | 1.5434 |
| 3.50 | 0.96999 | 1.0027 | 0.8386 | 0.76416 | 1.3343 | 1.4837 |
| 4.30 | 0.92159 | 0.91221 | 0.96598 | 1.1242 | 0.92273 | 0.61824 |

ตารางที่ ค-35 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D50BL300W02

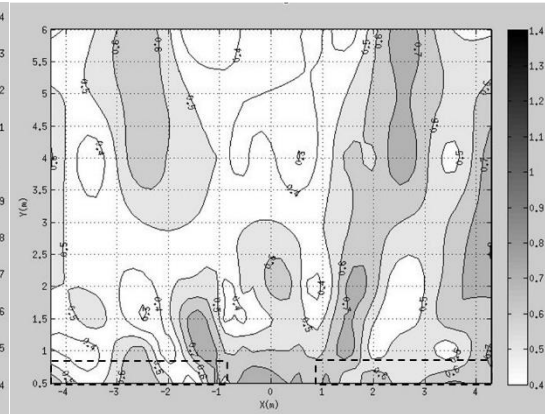
| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 1.0147 | 0.89168 | 0.98257 | 1.0542 | 0.90857 | 0.59226 |
| -3.50 | 1.1241 | 0.98098 | 0.96724 | 0.88263 | 1.3243 | 1.0466 |
| -3.00 | 0.85487 | 0.94243 | 0.86995 | 0.91154 | 0.96397 | 1.0589 |
| -2.50 | 0.95316 | 0.87791 | 0.92347 | 0.92815 | 0.92052 | 0.7928 |
| -2.00 | 0.90249 | 0.97837 | 0.9323 | 0.85666 | 1.0674 | 0.82657 |
| -1.70 | 0.97463 | 1.0344 | 0.97079 | 0.95067 | 0.99947 | 1.0291 |
| -1.65 | 1.0465 | 1.0769 | 0.97708 | 0.90832 | 0.95288 | 1.0723 |
| -1.60 | 1.0738 | 1.031 | 0.98047 | 0.98543 | 0.96441 | 1.1565 |
| -1.55 | 1.0235 | 0.99439 | 0.95078 | 0.94372 | 0.95476 | 1.3322 |
| -1.50 | 1.0792 | 0.99609 | 0.92713 | 0.90269 | 0.93728 | 1.3176 |
| -1.45 | 1.0342 | 0.98639 | 0.9138 | 0.89609 | 0.9789 | 1.3282 |
| -1.40 | 1.0155 | 0.91537 | 0.92533 | 0.95099 | 0.99233 | 1.3243 |
| -1.35 | 0.99701 | 0.93679 | 0.87899 | 0.91569 | 0.98085 | 1.3175 |
| -1.30 | 1.003 | 0.9256 | 0.88333 | 0.85527 | 0.96185 | 1.2326 |
| -0.70 | 1.1982 | 0.98448 | 0.96248 | 0.86396 | 0.96045 | 0.68948 |
| 0.00 | 1.0073 | 1.1739 | 1.0156 | 1.0697 | 0.9027 | 0.87572 |
| 0.70 | 1.0829 | 0.98003 | 0.84581 | 0.81106 | 0.8971 | 0.69103 |
| 1.30 | 1.0238 | 0.87682 | 0.91119 | 0.95427 | 0.9686 | 1.1572 |
| 1.35 | 1.104 | 0.96463 | 0.95538 | 0.94374 | 0.93047 | 1.1576 |
| 1.40 | 1.084 | 0.91037 | 0.93436 | 1.0176 | 0.92231 | 1.1778 |
| 1.45 | 1.1056 | 0.93 | 0.99394 | 1.0089 | 0.88656 | 1.1765 |
| 1.50 | 1.1127 | 0.89036 | 0.95554 | 0.96704 | 0.88322 | 1.2085 |
| 1.55 | 1.1555 | 0.91081 | 0.97615 | 0.97062 | 0.85704 | 1.2043 |
| 1.60 | 1.1578 | 0.93232 | 0.95312 | 0.95708 | 0.8966 | 1.2022 |
| 1.65 | 1.1695 | 0.93471 | 0.9642 | 0.91251 | 0.89667 | 1.2022 |
| 1.70 | 1.1434 | 0.96982 | 0.96729 | 0.9266 | 0.87542 | 1.0771 |
| 2.00 | 1.0079 | 1.0796 | 0.99947 | 0.94532 | 1.0292 | 0.78525 |
| 2.50 | 1.0782 | 0.92902 | 0.99902 | 1.0469 | 1.1407 | 0.95157 |
| 3.00 | 0.96827 | 1.021 | 0.88626 | 0.89314 | 0.8674 | 1.2319 |
| 3.50 | 1.0784 | 1.0144 | 1.0496 | 0.96683 | 1.2429 | 1.3571 |
| 4.30 | 1.1101 | 1.0962 | 1.0194 | 1.0509 | 0.98583 | 0.72823 |

ตารางที่ ค-36 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวม กรณี D50BL300W03

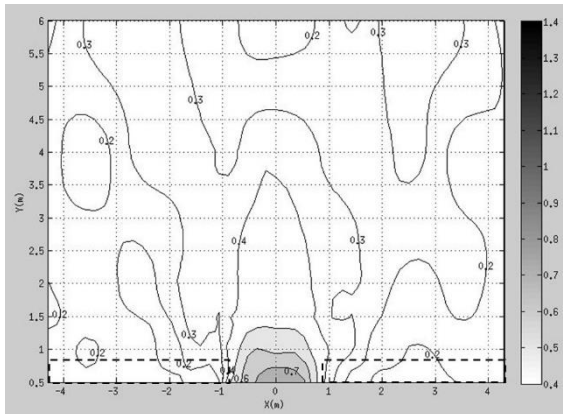
| แกน x (m) | แกน y (m) | | | | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0.6 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 4.0 | 6.0 |
| -4.30 | 0.81252 | 0.87946 | 1.1149 | 1.0372 | 1.1466 | 0.63706 |
| -3.50 | 0.88106 | 0.81951 | 1.0795 | 0.74181 | 1.2792 | 1.4965 |
| -3.00 | 0.77882 | 1.0042 | 0.74792 | 1.0112 | 0.83048 | 1.1678 |
| -2.50 | 0.84471 | 0.7388 | 1.0761 | 0.8426 | 1.1332 | 1.1225 |
| -2.00 | 0.89471 | 1.0916 | 0.93152 | 1.1038 | 0.90993 | 0.77386 |
| -1.70 | 1.0556 | 1.0554 | 1.0375 | 1.0457 | 1.1791 | 1.1302 |
| -1.65 | 1.0914 | 1.0516 | 1.0722 | 1.0254 | 1.2284 | 1.2259 |
| -1.60 | 1.0826 | 0.9831 | 1.1195 | 0.97536 | 1.2498 | 1.3133 |
| -1.55 | 1.0666 | 0.96612 | 1.0541 | 0.97926 | 1.2471 | 1.4017 |
| -1.50 | 1.0775 | 0.96867 | 1.0744 | 0.9659 | 1.3169 | 1.4283 |
| -1.45 | 1.0221 | 0.98738 | 1.0587 | 0.9771 | 1.2786 | 1.4031 |
| -1.40 | 0.97166 | 0.92943 | 1.0732 | 0.92133 | 1.1996 | 1.3664 |
| -1.35 | 0.94518 | 0.94839 | 1.0738 | 0.92304 | 1.0867 | 1.3226 |
| -1.30 | 0.90488 | 0.95922 | 0.99511 | 0.95192 | 1.0907 | 1.2517 |
| -0.70 | 1.0794 | 1.0167 | 0.97128 | 0.86188 | 1.1475 | 0.86274 |
| 0.00 | 0.8286 | 0.99122 | 1.0057 | 1.1293 | 0.68418 | 0.80874 |
| 0.70 | 1.0434 | 0.97389 | 0.9272 | 0.8025 | 1.1612 | 0.93544 |
| 1.30 | 0.90112 | 0.94576 | 1.0856 | 0.99381 | 0.91113 | 1.323 |
| 1.35 | 0.95381 | 0.88266 | 1.0953 | 1.0036 | 0.96111 | 1.3603 |
| 1.40 | 1.0081 | 0.94009 | 1.136 | 0.99115 | 1.0176 | 1.4142 |
| 1.45 | 1.0037 | 0.91727 | 1.148 | 1.0032 | 1.104 | 1.4851 |
| 1.50 | 1.0387 | 0.93235 | 1.1061 | 1.0009 | 1.1503 | 1.4217 |
| 1.55 | 1.0391 | 0.94012 | 1.1325 | 1.0106 | 1.1599 | 1.3269 |
| 1.60 | 1.0645 | 0.96681 | 1.069 | 1.0288 | 1.1782 | 1.3594 |
| 1.65 | 1.0436 | 0.97306 | 1.0751 | 1.0085 | 1.1709 | 1.2764 |
| 1.70 | 1.0661 | 1.0555 | 1.0519 | 1.0333 | 1.1373 | 1.2386 |
| 2.00 | 0.93875 | 1.065 | 1.042 | 1.168 | 1.0394 | 0.74628 |
| 2.50 | 1.0025 | 0.90194 | 1.1329 | 0.98146 | 1.3729 | 1.2351 |
| 3.00 | 0.95406 | 1.052 | 0.85155 | 1.0328 | 0.90974 | 1.3642 |
| 3.50 | 0.97737 | 0.92485 | 1.1544 | 0.82579 | 1.52 | 1.3334 |
| 4.30 | 0.988 | 1.0078 | 1.2565 | 1.2396 | 0.99838 | 0.57049 |



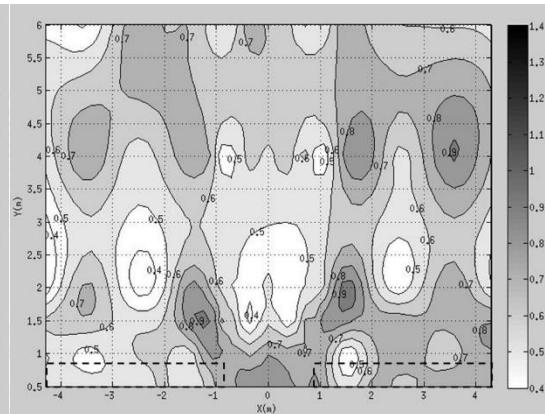
ก) กรณี D30BL050W01



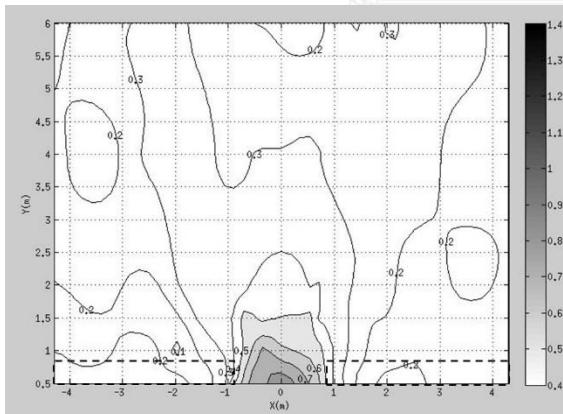
ง) กรณี D40BL050W01



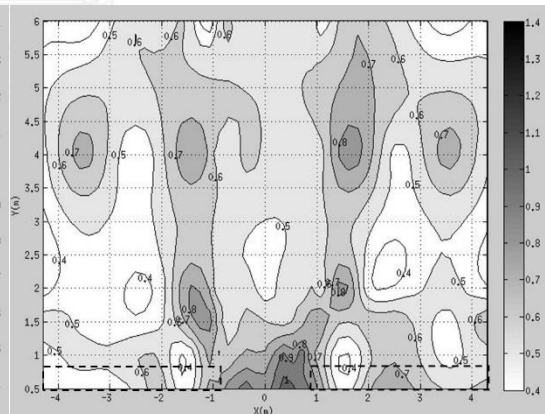
ข) กรณี D30BL50W02



จ) กรณี D40BL050W02

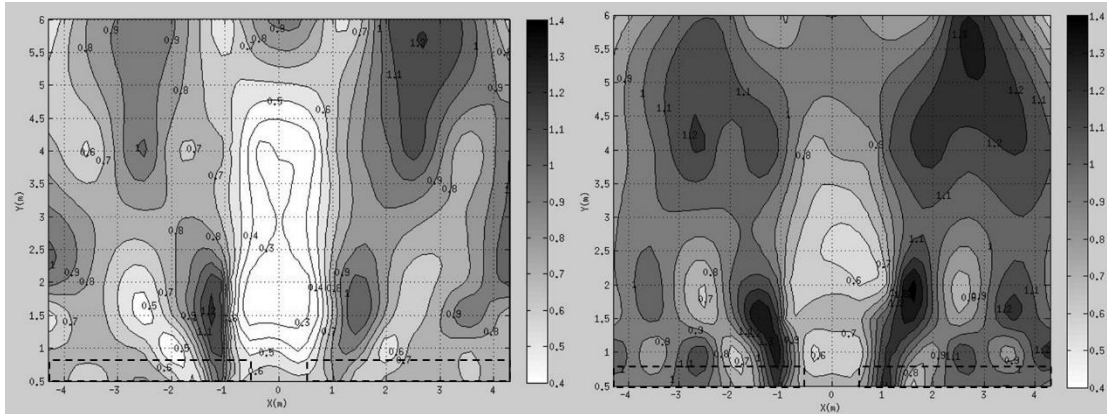


ค) กรณี D30BL50W03



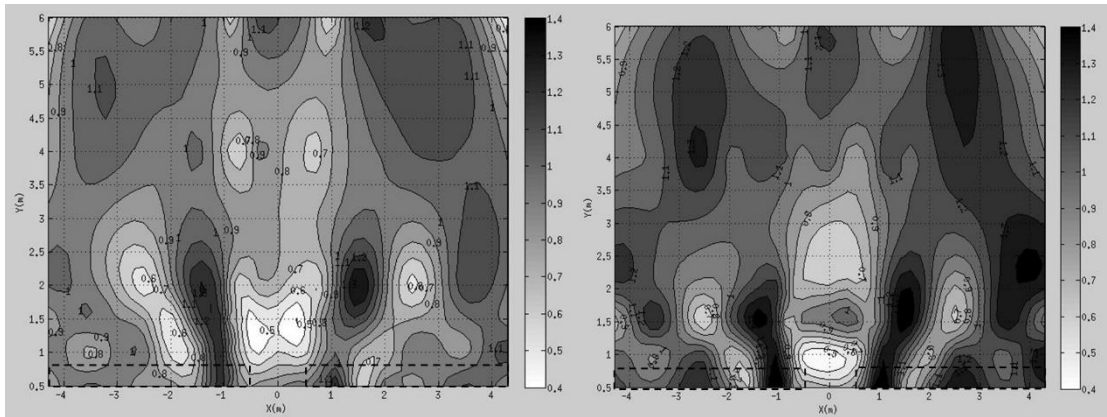
ฉ) กรณี D40BL050W03

รูปที่ ค-1 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในแต่ละกรณีศึกษา



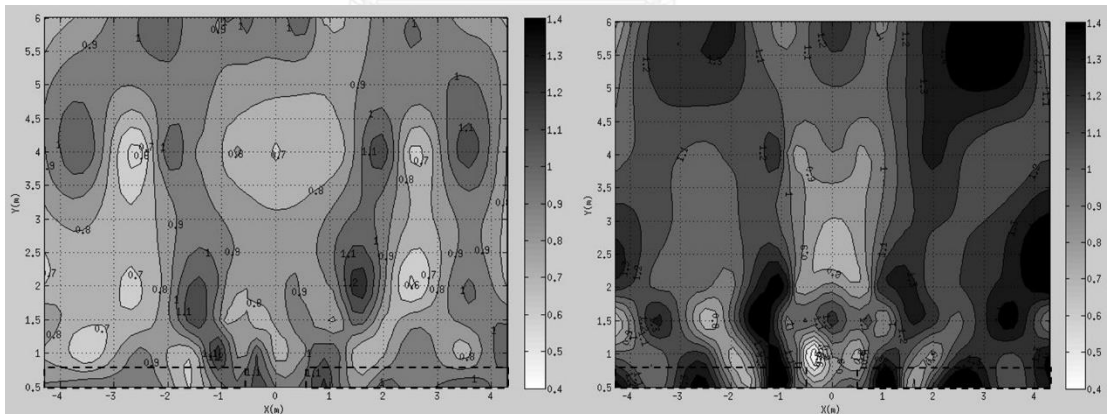
ข) กรณี D45BL050W01

ญ) กรณี D50BL050W01



ช) กรณี D45BL050W02

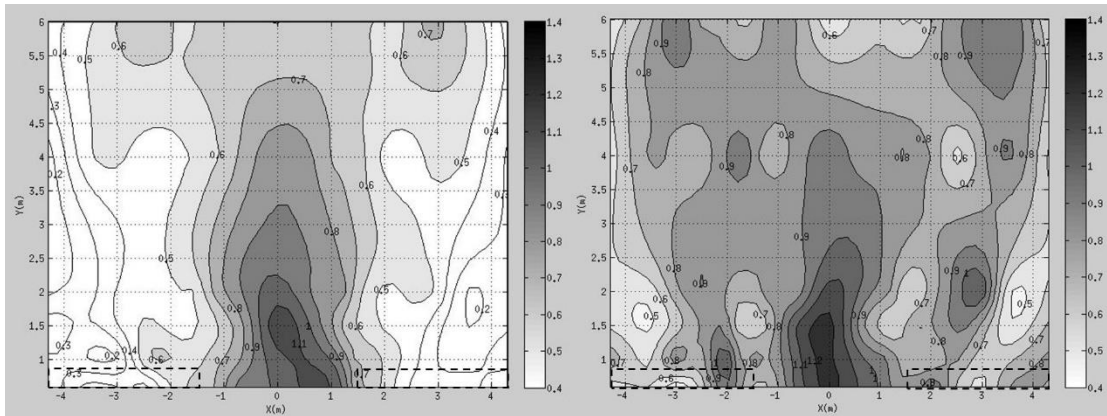
ฎ) กรณี D50BL050W02



ณ) กรณี D45BL050W03

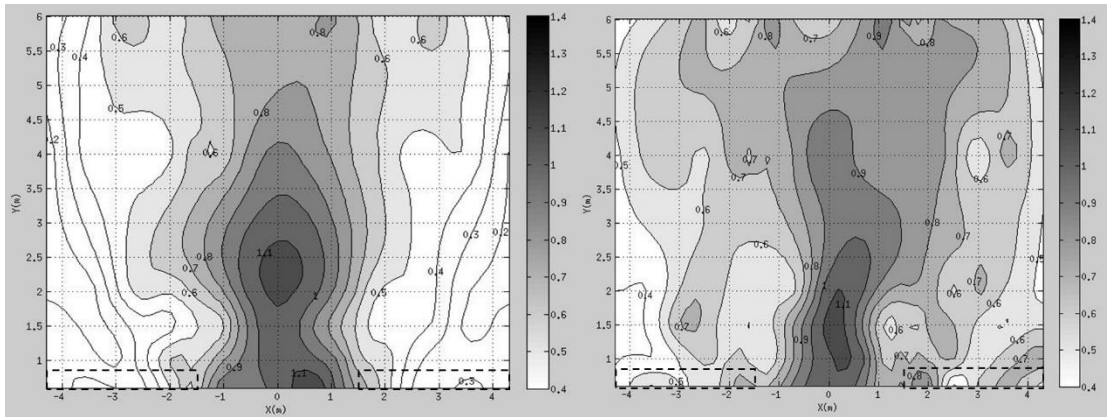
ฏ) กรณี D50BL050W03

รูปที่ ค-2 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในแต่ละกรณีศึกษา(ต่อ)



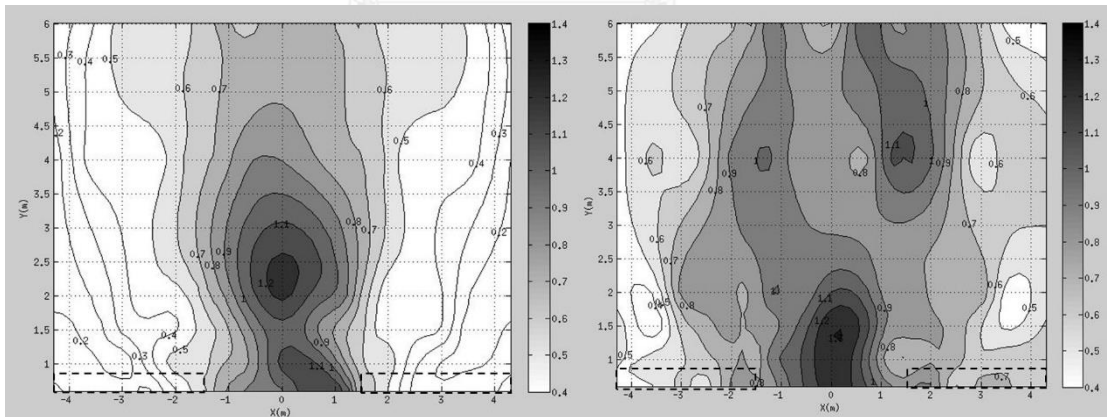
จ) กรณีส D30BL150W01

ณ) กรณีส D40BL150W01



จ) กรณีส D30BL150W02

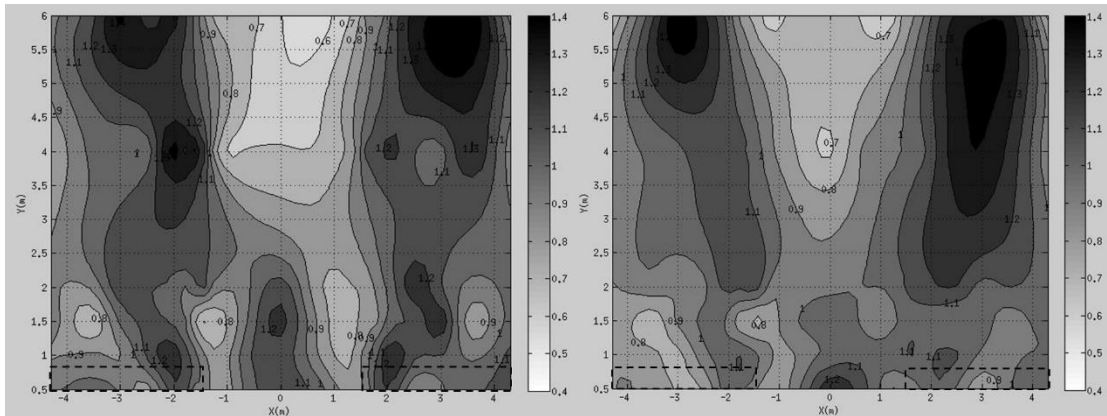
ด) กรณีส D40BL150W02



ค) กรณีส D30BL150W03

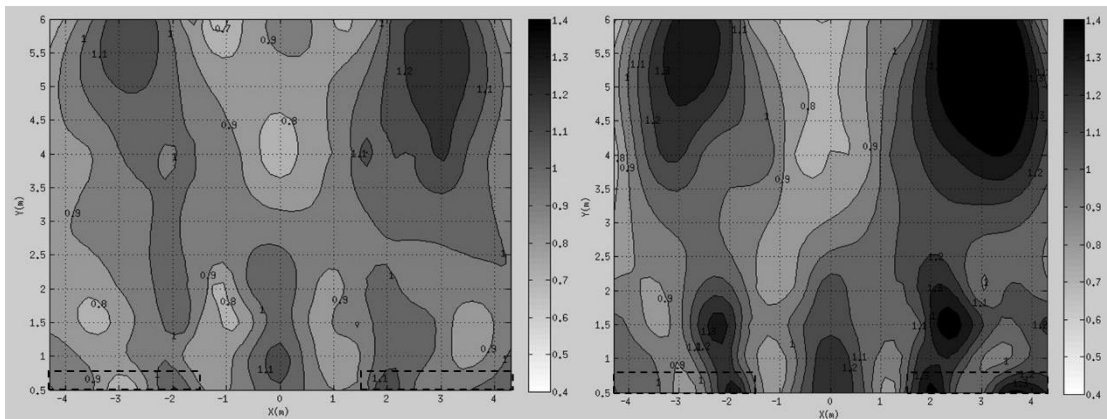
ต) กรณีส D40BL150W03

รูปที่ ค-2 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในแต่ละกรณีศึกษา(ต่อ)



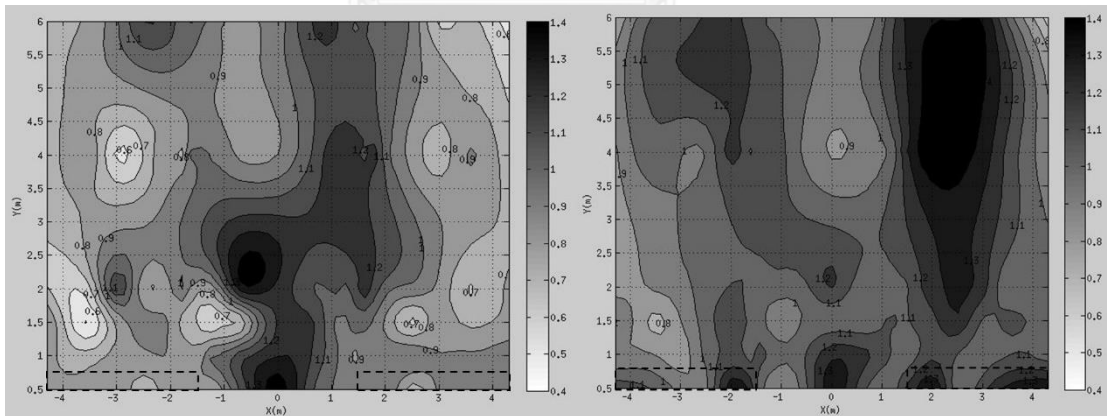
ก) กรณีส D45BL150W01

ข) กรณีส D50BL150W01



ค) กรณีส D45BL150W02

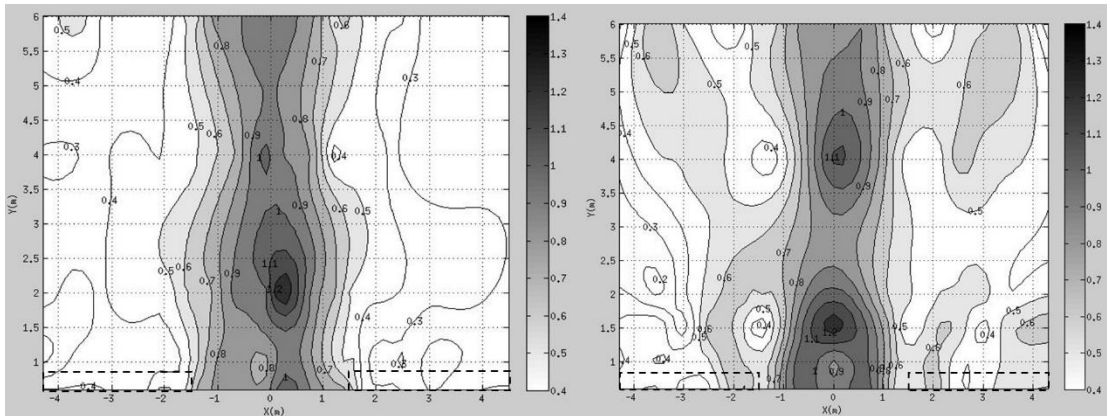
ง) กรณีส D50BL150W02



ฉ) กรณีส D45BL150W03

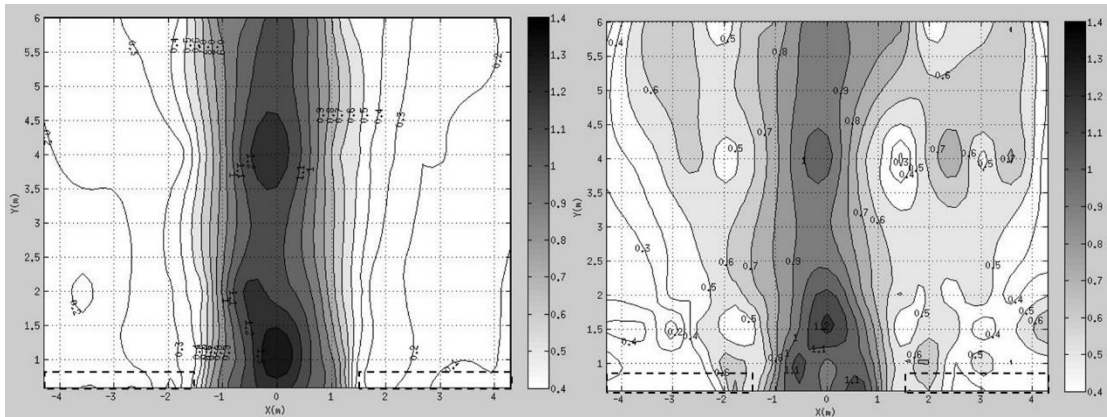
ช) กรณีส D50BL150W03

รูปที่ 4-2 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในแต่ละกรณีศึกษา(ต่อ)



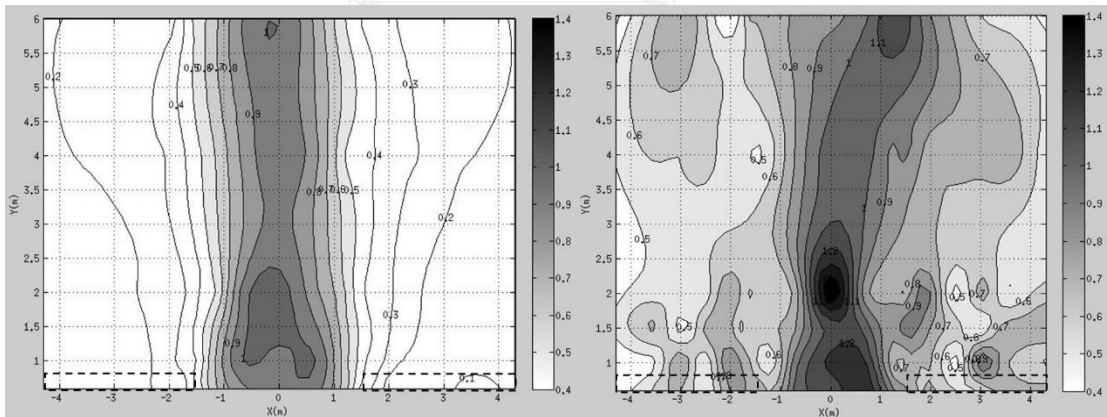
ฉ) กรณี D30BL300W01

ฟ) กรณี D40BL300W01



ค) กรณี D30BL300W02

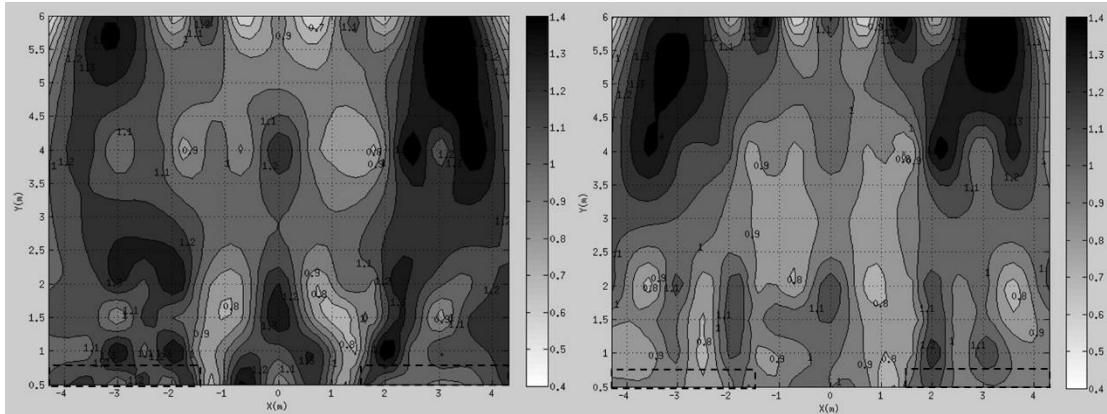
ก) กรณี D40BL300W02



ข) กรณี D30BL300W03

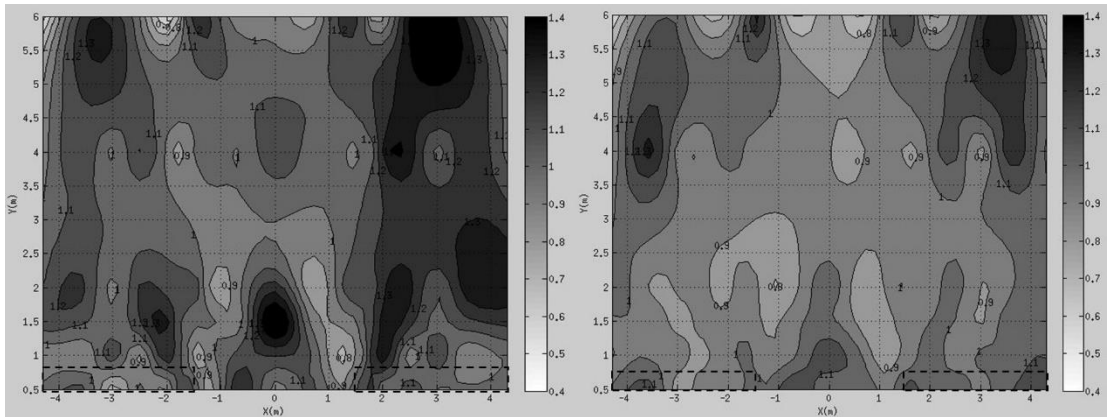
ง) กรณี D40BL300W03

รูปที่ 4-2 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในแต่ละกรณีศึกษา(ต่อ)



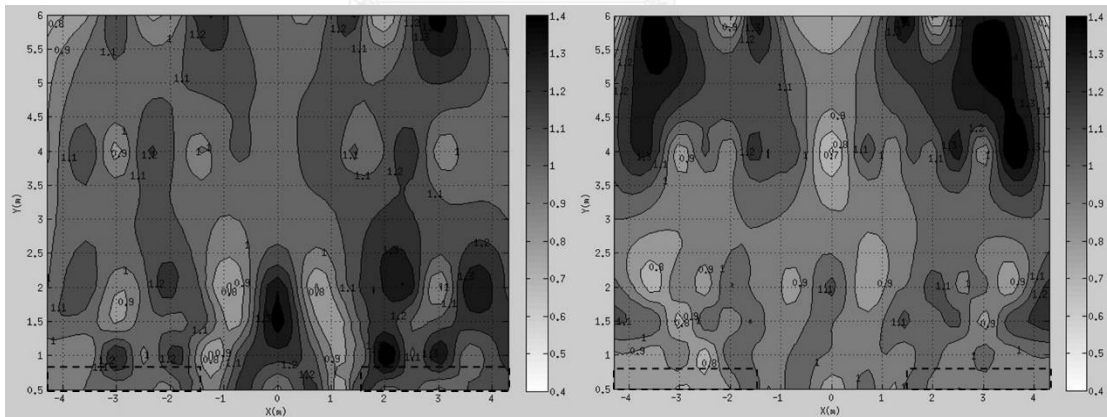
บ) กรณี D50BL300W01

ก) กรณี D50BL300W01



ร) กรณี D50BL300W02

ค) กรณี D50BL300W02



ล) กรณี D50BL300W03

ช) กรณี D50BL300W03

รูปที่ 4-2 เส้นชั้นระดับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นรวมในแต่ละกรณีศึกษา(ต่อ)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

- ชื่อ นายธีรนนท์ ปันใจลือ
- เกิด 11 กันยายน 2533 จังหวัดเชียงราย
- การศึกษา พ.ศ. 2555 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.โยธา)
 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
 มหาวิทยาลัย
- พ.ศ. 2556 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
 ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
 มหาวิทยาลัย
- ประสบการณ์ พ.ศ. 2557-2558 ได้รับทุนผู้ช่วยสอน ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

