

คำสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของแผงกรองคลื่นการศึกษาที่สถานีนำร่อง

นายกัมปนาท ชีวะปรีชา วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา)

โครงการวิจัยเฉพาะเรื่องนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

คณะกรรมการสอบโครงการวิจัยเฉพาะเรื่อง

.....	ประธานกรรมการสอบโครงการวิจัยเฉพาะเรื่อง
(ผศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์)	
.....	กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา
(ศ.ดร.ชัยยุทธ ชินณะราศรี)	
.....	กรรมการ
(ศ.ดร.สมชาย ชูชีพสกุล)	

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิจัยเฉพาะเรื่อง	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของแผงกรองคลื่น กรณีศึกษาที่สถานีน้ำร่อง
หน่วยกิต	6
ผู้เขียน	นายกัมปนาท ชีวะปรีชา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศ. ดร.ชัยยุทธ ชินณะราศรี
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2554

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของแผงกรองคลื่นที่ติดตั้งที่สถานีน้ำร่อง จังหวัดสมุทรปราการ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น รวมถึงเพื่อพัฒนาสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น และเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพแผงกรองคลื่นที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

งานวิจัยซึ่งโดยรวมเป็นการนำข้อมูลสนามมาวิเคราะห์ได้ข้อสรุปว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (K_t) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนความสูงคลื่นด้านหลังแผงกรองคลื่นต่อความสูงคลื่นด้านหน้าแผงกรองคลื่น (H_t/H_i) ขึ้นกับคุณสมบัติคลื่น สภาพแวดล้อม และคุณลักษณะแผงกรองคลื่น โดยแผงกรองคลื่นสามารถลดความสูงคลื่นได้ดีในบริเวณน้ำตื้น แต่มีความแปรปรวนสูงเมื่ออัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่นเข้าใกล้ 0.5 ซึ่งเป็นเกณฑ์กรณีน้ำลึก การพัฒนาสมการทำนายค่า K_t แบบเชิงประจักษ์พบว่าภายใต้ขอบเขตข้อมูลที่ตรวจวัด ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นแปรผันตามระยะห่างระหว่างแผงกรองคลื่น กับความลึกน้ำ และแปรผันโดยกลับกับคาบเวลาคลิ้งยกกำลังสอง กับระยะกินน้ำลึกของแผงกรองคลื่น ส่วนค่าคงที่ในสมการขึ้นกับมุมคลื่น กับจำนวนแผงกรองคลื่น ความคลาดเคลื่อนของสมการ ที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีความแม่นยำสูงกว่าร้อยละ 84.2 สำหรับประสิทธิภาพแผงกรองคลื่นในช่วงเวลาที่ตรวจวัดพบว่าส่วนใหญ่ (ร้อยละ 50) อยู่ระหว่างร้อยละ 60.5 – 81.1 เฉลี่ยร้อยละ 66.8

คำสำคัญ : การตรวจวัดคลื่นในสนาม / เชื่อกันคลื่น / ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น / แผงกรองคลื่น / อ่าวไทย / ท่าเรือ

Special Research Title	Wave Transmission Coefficient of the Wave Screen Case Study at Pilot Station
Credits	6
Candidate	Mr. Kumpanart Chewapreecha
Advisor	Prof. Dr. Chaiyuth Chinnarasri
Program	Master of Engineering
Field of Study	Civil Engineering Technology
Department	Civil Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2554

Abstract

This research investigates the wave transmission coefficient of the wave screen installed at a pilot station in Samuth Prakarn. The objectives are to determine influence factors, to develop equation use to predict its performance, and to determine its effectiveness.

In this research study, field data were obtained and analyzed. It was found that wave transmission coefficient (K_t) which was determined from the ratio of wave height behind wave screen to wave height in front of wave screen (H_t/H_i) depended on wave characteristics, sea climate, and wave screen physical properties. The screens worked well in shallow water but the results fluctuated when the ratio of water depth to wave length (h/L) approached 0.5 which was the threshold for deep water. Empirical formula developed within the scope of measured wave and physical properties of wave screen installed at the pilot station shows that K_t is proportional to the distance between wave screens and the water depth and inversely proportional to the square of wave period and draft. Coefficient and constant parameters in the equation depend on both approach angle and number of wave screens. Accuracy of the predicted formula, at 95% confidence, was better than 84.2%. Regarding to wave-screen effectiveness, the majority of data (50%) were in a range between 60.5 – 81.1 %. The average was 66.8%.

Keywords: Breakwater / Field Measurements / Gulf of Thailand / Port / Wave Screen / Wave Transmission Coefficient

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณกรมเจ้าท่าที่กรุณาอนุญาตให้ติดตั้งอุปกรณ์วัดคลื่นที่สถานีนำร่อง รวมถึงได้อำนวยความสะดวกในการเดินทางเข้าออกหลายครั้ง และขอขอบพระคุณ บริษัท โกลเด้น แพลน จำกัด และศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์ระบบโลก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้กรุณาให้ยืมอุปกรณ์วัดคลื่นที่ใช้ในการศึกษา

นอกจากนั้น ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ศ.ดร.ชัยยุทธ ชินณะราศรี อาจารย์ที่ปรึกษา กับ ศ.ดร.สมชาย ชูชีพสกุล ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ทำให้งานวิจัยประสบผลสำเร็จ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ซ
รายการสัญลักษณ์	ฅ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ฐ

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนดำเนินงาน	2
2. แพลงกรองคลื่นที่ใช้เป็นกรณีศึกษา	4
2.1 ข้อมูลแพลงกรองคลื่น	4
2.2 ความลึกน้ำและกระแสน้ำ	10
2.3 สภาพลมและคลื่น	13
3. การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเขื่อนกันคลื่น	17
3.1 แบบหินทิ้ง (Rubble Mound Breakwater)	17
3.2 แบบจมน้ำ (Submerge Breakwater)	21
3.3 แบบลอยน้ำ (Floating Breakwater)	22
3.4 แบบแพลงกรองคลื่น (Wave Screen)	27
3.4.1 แบบจาลัน	27

3.4.2	แบบแผ่นเจาะรู	28
3.4.3	แบบช่องว่างอยู่ในแนวดิ่ง	32
3.4.4	แบบช่องว่างอยู่ในแนวนอน	35
3.4.5	สรุปการศึกษาแผงกรองคลื่น	43
4.	การดำเนินงานวิจัย	50
4.1	อุปกรณ์วัดคลื่น	50
4.1.1	ไทรตัน เอดีวี	50
4.1.2	เอคัมบลิวเอช-ยูเอสบี	51
4.2	รายละเอียดการทำงานตรวจวัดคลื่น	52
4.3	การวิเคราะห์คุณสมบัติคลื่น	55
5.	การวิเคราะห์ผล	58
5.1	ผลการตรวจวัด	58
5.1.1	ด้านหน้าแผงกรองคลื่น	58
5.1.2	ด้านหลังแผงกรองคลื่น	61
5.2	การวิเคราะห์ความสอดคล้องของข้อมูลและการคัดกรองข้อมูล	62
5.3	การคัดเลือกตัวแปรและจัดกลุ่มข้อมูล	63
5.4	การคำนวณหาค่าตัวแปร	66
5.5	ปัจจัยที่มีผลกระทบกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น	71
5.6	การพัฒนาสมการสำหรับใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น	76
5.7	ประสิทธิภาพแผงกรองคลื่น	86
6.	สรุป	87
	เอกสารอ้างอิง	89
	ภาคผนวก	91
ก	ข้อมูลคลื่นตรวจวัดวันที่ 3 – 19 มิถุนายน 2554	92
ข	ผลวิเคราะห์	104
	ประวัติผู้วิจัย	119

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ความเร็วและทิศทางการจราจรที่สถานีนำร่อง พ.ศ.2544-2553	14
2.2 ข้อมูลคลื่นบริเวณสถานีนำร่องที่สังเคราะห์จากข้อมูลลม พ.ศ.2544 - 2553	15
3.1 งานศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง	44
5.1 การคัดเลือกตัวแปรเพื่อใช้ทำนายสมรรถนะแผงกรองคลื่น	64
5.2 การจัดกลุ่มข้อมูล	66
5.3 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่พิจารณา	72
5.4 การวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง K_t กับตัวแปรแสดงคุณสมบัติแผงกรองคลื่น โดยกำหนดให้ตัวแปรแสดงคุณสมบัติคลื่นกับสภาพแวดล้อมมีค่าคงที่	77
5.5 ผลวิเคราะห์แบบหลายตัวแปร กรณีแผงกรองคลื่น 2 แผง คลื่นทำมุม 0 – 45 องศา	79
5.6 ผลวิเคราะห์แบบตัวแปรพจน์เดียว กรณีแผงกรองคลื่น 2 แผง คลื่นทำมุม 0 – 45 องศา	79
5.7 ผลวิเคราะห์แบบหลายตัวแปร กรณีแผงกรองคลื่น 2 แผง คลื่นทำมุม 45 - 90 องศา	80
5.8 ผลวิเคราะห์แบบตัวแปรพจน์เดียว กรณีแผงกรองคลื่น 2 แผง คลื่นทำมุม 45 – 90 องศา	80
5.9 ผลวิเคราะห์แบบหลายตัวแปร กรณีแผงกรองคลื่น 3 แผง คลื่นทำมุม 0 – 45 องศา	82
5.10 ผลวิเคราะห์แบบตัวแปรพจน์เดียว กรณีแผงกรองคลื่น 3 แผง คลื่นทำมุม 0 – 45 องศา	82
5.11 ผลวิเคราะห์แบบหลายตัวแปร กรณีแผงกรองคลื่น 3 แผง คลื่นทำมุม 45 - 90 องศา	83
5.12 ผลวิเคราะห์แบบตัวแปรพจน์เดียว กรณีแผงกรองคลื่น 3 แผง คลื่นทำมุม 45 - 90 องศา	84
5.13 ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น	85

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 ที่ตั้งสถานีน้ำร่อง	5
2.2 แปลนสะพานท่าเรือและตำแหน่งแผงกรองคลื่น	6
2.3 รูปตัดสะพานท่าเรือและรายละเอียดแผงกรองคลื่น	7
2.4 รูปด้านแผงกรองคลื่น	9
2.5 ผลสำรวจความลึกพื้นที่ตอมน้ำบริเวณสถานีน้ำร่อง	11
2.6 คำอธิบายความลึกน้ำบริเวณสถานีน้ำร่อง	12
2.7 ระดับน้ำทะเลบริเวณสันดอนเจ้าพระยา วันที่ 3 – 19 มิถุนายน 2554 (ทำนาย)	13
2.8 ผังลมตรวจวัดที่สถานีน้ำร่อง พ.ศ.2544 - 2553	14
2.9 ผังคลื่นบริเวณสถานีน้ำร่องที่สังเคราะห์จากข้อมูลลม พ.ศ.2544 - 2553	16
3.1 รูปตัดเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้ง USACE (1986)	17
3.2 นิยามสัญลักษณ์ในสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของ Seelig (1980)	18
3.3 การเลี้ยวเบนผ่านเขื่อนกันคลื่น USACE (2002)	19
3.4 แผนภูมิประเมินความสูงคลื่นหลังเขื่อนกันคลื่นกรณีคลื่นเคลื่อนที่ท่ามม 135 องศา กับแนวเขื่อนกันคลื่นของ Wiegel (1962)	20
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับอัตราส่วน F/Hi ในงานศึกษาของ Van der Meer and Angremond (1992)	21
3.6 สมรรถนะเขื่อนกันคลื่นแบบลอยน้ำตามงานศึกษาของ Hales (1981) กับ Giles and Sorensen (1979)	23
3.7 ทิศการเคลื่อนตัวของเขื่อนกันคลื่นแบบลอยน้ำ	24
3.8 เขื่อนกันคลื่นแบบลอยน้ำดันแบบของ Fousert (2006)	26
3.9 แผงกรองคลื่นแบบจาลันที่ Fugazza and Natale (1992) ศึกษา	27
3.10 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแผงกรองคลื่นแบบจาลันของ Fugazza and Natale (1992)	28
3.11 การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลทดลองของ Grune and Kohlhase (1974) และ ABAM (1993) กรณีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น	29
3.12 การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลทดลองของ Grune and Kohlhase (1974) และ ABAM (1993) กรณีค่าสัมประสิทธิ์คลื่นสะท้อนกลับ	30

3.13	การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลทดลองของ Shepsis (2007) กรณีแผงกรองคลื่น 3 แผง	31
3.14	ผลทดลองวัดความสูงคลื่นหลังติดตั้งแผงกรองคลื่น Shepsis (2007)	32
3.15	เขื่อนกันคลื่นแบบใช้ผนังที่ราบเรียบและมีเสาเข็มรับด้านล่างในงานศึกษาของ Suh et al (2006)	32
3.16	การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและค่าตามทฤษฎีของ Suh et al. (2006)	35
3.17	แผงกรองคลื่นในงานศึกษาของ Rageh and Koriam (2010)	36
3.18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับอัตราส่วนระยะกินน้ำลึกต่อความลึกน้ำ (D/h) และอัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L) ของ Rageh and Koriam (2010)	37
3.19	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับคุณสมบัติคลื่น (Hi/gT2) และอัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L) ของ Rageh and Koriam (2010)	38
3.20	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น การสะท้อนกลับ และการสูญเสียพลังงานกับอัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L) และความพรุนของ Rageh and Koriam (2010)	
3.21	แผงกรองคลื่นในงานศึกษาของ Balaji and Sundar (2002)	39
3.22	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (Ki) กับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผงกรองคลื่น (B) ต่อความยาวคลื่น (Lp) และความลึกน้ำ (d) ของ Balaji and Sundar (2002)	40
3.23	การศึกษาความปั่นป่วนของผิวน้ำช่วงระหว่างแผงกรองคลื่นกับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผงกรองคลื่น (B) ต่อความยาวคลื่น (Lp) และความลึกน้ำ (d) ของ Balaji and Sundar (2002)	41
4.1	อุปกรณ์ไทรตัน เอคิวิ	51
4.2	อุปกรณ์วัดคลื่นเอดับลิวเอช-ยูเอสบี	52
4.3	การติดตั้งอุปกรณ์วัดคลื่น	54
4.4	ขั้นตอนการกู้อุปกรณ์	55
4.5	คุณลักษณะคลื่นบริเวณสถานีนำร่องวันที่ 3 – 19 มิถุนายน 2554	57
5.1	ลักษณะการกระจายตัวของความสูงคลื่นช่วงเวลาต่างๆ	59
5.2	ลักษณะการกระจายตัวของคาบเวลาคลิ้งช่วงเวลาต่างๆ	59
5.3	ลักษณะการกระจายตัวของทิศคลื่น	60
5.4	ความลึกน้ำด้านหน้าแผงกรองคลื่นช่วงเวลาต่างๆ	60
5.5	ความลึกน้ำตรวจวัดโดยอุปกรณ์เอดับลิวเอช-ยูเอสบี	61

5.6	ความสูงคลื่นนัยสำคัญด้านหลังแพงกรองคลื่น	62
5.7	การเปรียบเทียบความลึกน้ำตรวจวัดโดยไทรตันเอดีวี กับเอดับบลิวเอช-ยูเอสบี	63
5.8	ลักษณะการกระจายตัวของทิศคลื่น	65
5.9	ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลความลึกน้ำ	65
5.10	ลักษณะการกระจายตัวของผลวิเคราะห์ความยาวคลื่น	67
5.11	ลักษณะการกระจายตัวของความชันคลื่น (H/L)	68
5.12	ลักษณะการกระจายตัวของอัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L)	68
5.13	ลักษณะการกระจายตัวของอัตราส่วนระยะจมน้ำต่อความลึกน้ำ (d_s/h)	69
5.14	ลักษณะการกระจายตัวของอัตราส่วนระยะจมน้ำต่อความยาวคลื่น (d_s/L)	69
5.15	ลักษณะการกระจายตัวของอัตราส่วนระยะระหว่างแพงกรองคลื่นต่อความยาวคลื่น (B/L)	70
5.16	ลักษณะการกระจายตัวของค่า $H/(gT^2)$	70
5.17	ลักษณะการกระจายตัวของค่า K_t	71
5.18	ความสัมพันธ์ระหว่าง H/L กับ K_t	72
5.19	ความสัมพันธ์ระหว่าง $H/(gT^2)$ กับ K_t	73
5.20	ความสัมพันธ์ระหว่าง B/L กับ K_t	74
5.21	ความสัมพันธ์ระหว่าง h/L กับ K_t	74
5.22	ความสัมพันธ์ระหว่าง d_s/h กับ K_t	75
5.23	ความสัมพันธ์ระหว่าง d_s/L กับ K_t	75
5.24	การเปรียบเทียบค่าทำนายกับค่าที่ตรวจวัดกรณีแพงกรองคลื่นทำงาน 2 แพง คลื่นเอียงทำมุม 0 – 45 องศา กับแนวแพงกรองคลื่น	79
5.25	การเปรียบเทียบค่าทำนายกับค่าที่ตรวจวัดกรณีแพงกรองคลื่นทำงาน 2 แพง คลื่นเอียงทำมุม 45 - 90 องศา กับแนวแพงกรองคลื่น	81
5.26	การเปรียบเทียบค่าทำนายกับค่าที่ตรวจวัดกรณีแพงกรองคลื่นทำงาน 3 แพง คลื่นเอียงทำมุม 0 - 45 องศา กับแนวแพงกรองคลื่น	83
5.27	การเปรียบเทียบค่าทำนายกับค่าที่ตรวจวัดกรณีแพงกรองคลื่นทำงาน 3 แพง คลื่นเอียงทำมุม 45 - 90 องศา กับแนวแพงกรองคลื่น	84

รายการสัญลักษณ์

A	=	ค่าคงที่ของสมการ
B	=	ระยะห่างระหว่างแผงกรองคลื่น, ความกว้างเขื่อนกันคลื่น
b	=	ความหนาแผงกรองคลื่น
C	=	ค่าสัมประสิทธิ์
C_c	=	ค่าสัมประสิทธิ์การไหลผ่านช่องเปิด (Contraction coefficient of water jet)
C_l	=	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงาน
C_r	=	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่น
C_t	=	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น
D	=	ระยะกินน้ำลึกของแผงกรองคลื่น
d	=	ความลึกน้ำ
d_s	=	ระยะกินน้ำลึกของแผงกรองคลื่น (Draft)
F	=	ระยะพ้นน้ำ (Freeboard)
G	=	พารามิเตอร์ความพรุนของผนัง
g	=	ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก
H	=	ความสูงคลื่น
H_0	=	ความสูงคลื่นในน้ำลึก
$H_{1/3}, H_s$	=	ความสูงคลื่นนัยสำคัญ
H_d	=	ความสูงคลื่นที่เกิดจากการเลี้ยวเบน (Diffraction)
H_i	=	ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าหาแผงกรองคลื่น (Incident Wave)
H_r	=	ความสูงคลื่นที่สะท้อนกลับจากแผงกรองคลื่น (Reflected Wave)
H_t	=	ความสูงคลื่นด้านหลังแผงกรองคลื่น (Transmitted Wave)
H_{mo}	=	ความสูงคลื่นนัยสำคัญซึ่งคำนวณหาโดยวิธีสเปกตรัม
h	=	ความลึกน้ำ, ความสูงเขื่อนกันคลื่น
k	=	ตัวเลขคลื่น (Wave number) มีค่าเท่ากับมุมรอบจุดในหน่วยเรเดียนต่อความยาวคลื่น
k_d	=	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงาน
K_A	=	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของเขื่อนกันคลื่นแบบจาลัน
K_r, k_r	=	สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่น
K_t, k_t	=	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของแผงกรองคลื่น
K'	=	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกรณีเลี้ยวเบน
L	=	ความยาวคลื่น

L_0	=	ความยาวคลื่นในน้ำลึก
L_p	=	ความยาวคลื่นที่ค่าสเปกตรัมสูงสุด
P	=	ความพรุน (Porosity)
R	=	ระยะคลื่น โจนตัว (Wave runup)
r	=	รัศมี, ความพรุนของแผงกรองคลื่น
R^2, r^2	=	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R square)
T	=	คาบเวลาคลื่น
T_p	=	คาบเวลาคลื่นที่ค่าสเปกตรัมสูงสุด
W	=	น้ำหนักก้อนหิน, ความกว้างเขื่อนกันคลื่นแบบลอยน้ำ
X	=	แกน X
Z	=	แกน Z
β	=	มุมระหว่างเขื่อนกันคลื่นกับทิศที่คลื่นเคลื่อนที่, ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงาน
ε	=	ความพรุนแผงกรองคลื่น
Φ	=	ศักย์ความเร็วของของเหลว (Velocity potential)
σ	=	ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ω	=	ความเร็วเชิงมุม
$[H_s]_c$	=	ความสูงคลื่นนัยสำคัญช่วงระหว่างแผงกรองคลื่น 2 แผง

ประมวลศัพท์และคำย่อ

นอต	=	หน่วยความเร็ว มีค่าเท่ากับ 1,852.00 เมตร/ชั่วโมง
รทก	=	ระดับน้ำทะเลปานกลาง (Mean Sea Level)
Chart Datum	=	ระดับน้ำที่ใช้เป็นเกณฑ์อ้างอิงในแผนที่ ปกติเป็นระดับน้ำต่ำสุดในแผนที่
E	=	ทิศตะวันออก
ENE	=	ทิศตะวันออกเฉียงเหนือก่อนไปทางทิศตะวันออก หมายถึงทิศทำมุม 22.5 องศา กับทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา
ESE	=	ทิศตะวันออกเฉียงใต้ก่อนไปทางทิศตะวันออก หมายถึงทิศทำมุม 22.5 องศา กับทิศตะวันออก ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา
HEAP	=	การเคลื่อนตัวตามแนวโค้งของวัตถุลอยน้ำ
LLW	=	ระดับน้ำต่ำสุด (Lowest Low Water)
MHWN	=	ระดับน้ำขึ้นเฉลี่ยหน้าน้ำตาย (Mean High Water neap)
MHWS	=	ระดับน้ำขึ้นเฉลี่ยหน้าน้ำเกิด (Mean High Water Spring)
Mixed Tide	=	การขึ้นลงของระดับน้ำแบบผสม
MLWN	=	ระดับน้ำลงเฉลี่ยหน้าน้ำตาย (Mean Low Water Neap)
MLWS	=	ระดับน้ำลงเฉลี่ยหน้าน้ำเกิด (Mean Low Water Spring)
N	=	ทิศเหนือ
NE	=	ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ
NEN	=	ทิศตะวันออกเฉียงเหนือก่อนไปทางทิศเหนือ หมายถึงทิศทำมุม 22.5 องศา กับทิศเหนือ ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา
NW	=	ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ
NWN	=	ทิศตะวันตกเฉียงเหนือก่อนไปทางทิศเหนือ หมายถึงทิศทำมุม 22.5 องศา กับทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา
PITCH	=	การหมุนรอบแกนตั้งฉากกับความยาวในระนาบพื้นน้ำของวัตถุลอยน้ำ
ROLL	=	การหมุนรอบแกนที่อยู่ตามแนวยาวของวัตถุลอยน้ำ
S	=	ทิศใต้
s	=	วินาที
SE	=	ทิศตะวันออกเฉียงใต้
SES	=	ทิศตะวันออกเฉียงใต้ก่อนไปทางทิศใต้ หมายถึงทิศทำมุม 22.5 องศา กับทิศตะวันออกเฉียงใต้ ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา
SURGE	=	การเคลื่อนตัวตามยาวของวัตถุลอยน้ำ

SW	=	ทิศตะวันตกเฉียงใต้
SWAY	=	การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของวัตถุลอยน้ำ
SWL	=	ระดับน้ำนิ่ง (Still Water Line)
SWS	=	ทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางทิศใต้ หมายถึงทิศทำมุม 22.5 องศา กับทิศใต้ ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา
W	=	ทิศตะวันตก
WNW	=	ทิศตะวันตกเฉียงเหนือก่อนไปทางทิศตะวันตก หมายถึงทิศทำมุม 22.5 องศา กับทิศตะวันตก ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา
USACE	=	U.S. Army Corp of Engineer

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การคัดเลือกที่ตั้งท่าเรือนอกจากข้อพิจารณาด้านความลึกน้ำแล้วจำเป็นต้องเลือกบริเวณที่มีสภาพคลื่นลมเหมาะสมเพราะช่วยลดปัญหาเรือกระแทกท่า ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการขนถ่ายสินค้า (หรือการขึ้น-ลงเรือของผู้โดยสาร) และช่วยทำให้การควบคุมเรือในแอ่งจอดเรือมีความสะดวกปลอดภัย ความต้องการดังกล่าวทำให้การศึกษาคัดเลือกที่ตั้งโครงการพัฒนาท่าเรือต้องสำรวจหาบริเวณที่มีแนวป้องกันคลื่นตามธรรมชาติ เช่น เกาะ แล่น ในทิศทางที่เหมาะสม บริเวณที่มีแนวป้องกันคลื่นตามธรรมชาติไม่เพียงพอจำเป็นต้องก่อสร้างเขื่อนกันคลื่นซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบบหินทิ้ง (Rubble Mound) ให้ทำหน้าที่ดังกล่าวแทน

การแก้ปัญหาคลื่นลมโดยก่อสร้างเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้งมีโอกาทำให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมหลายประการ เช่น ทำให้เกิดการกัดเซาะชายฝั่งด้านหนึ่งพร้อมกับทำให้เกิดตีกอดด้านตรงข้ามเพราะเขื่อนกันคลื่นกีดขวางการเคลื่อนที่ของตะกอนทราย ทำให้คุณภาพน้ำในแอ่งจอดเรือเสื่อมโทรมเพราะเขื่อนกันคลื่นกีดขวางการไหลเวียนของกระแสน้ำ และมีผลกระทบกับสิ่งมีชีวิตบนพื้นทะเลที่อยู่อาศัยในบริเวณที่ตั้งเขื่อนกันคลื่น สภาพการณ์ดังกล่าวทำให้งานก่อสร้างเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้งบางครั้งไม่ได้รับการยอมรับจากนักอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม

เพื่อลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม มีความพยายามใช้แนวป้องกันคลื่นที่มีคุณลักษณะพิเศษ เช่น ไม่ตั้งบนพื้นทะเลเพื่อไม่ให้กีดขวางการเคลื่อนที่ของตะกอนทราย โครงสร้างมีความพรุนเพื่อให้กระแสน้ำผ่านไปได้อย่างโครงสร้างเหล่านี้ ได้แก่ เขื่อนกันคลื่นแบบลอยน้ำ (Floating Breakwater) เขื่อนกันคลื่นชนิดไม่ตั้งบนพื้นทะเล (Skirt Breakwater) แผงกรองคลื่น (Wave Screen) เป็นต้น การป้องกันคลื่นด้วยโครงสร้างเหล่านี้มีประสิทธิภาพซึ่งวัดจากอัตราส่วนความสูงคลื่นด้านหลังแนวป้องกันคลื่นต่อความสูงคลื่นด้านหน้าแนวป้องกันคลื่น ($K_t = H_t/H_f$) หรือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (Wave Transmission Coefficient) ต่างจากเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้ง ดังนั้น เพื่อให้มั่นใจว่าแผงกรองคลื่นที่ออกแบบจะสามารถลดความสูงคลื่นในแอ่งจอดเรือให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จึงควรมีการศึกษาช่วงค่าและปัจจัยที่มีผลกระทบกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่จะทำให้การออกแบบแผงกรองคลื่นสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และทำให้เกิดทางเลือกของการลดความสูงคลื่นในบริเวณที่มีความอ่อนไหวด้านสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. วิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของแผงกรองคลื่นที่ใช้เป็นกรณีศึกษา
2. พัฒนารูปสมการสำหรับใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของแผงกรองคลื่น
3. วิเคราะห์ประสิทธิภาพของแผงกรองคลื่นที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

1.3 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ทราบปัจจัยที่มีผลกระทบกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของแผงกรองคลื่น รวมถึงช่วงค่าและประสิทธิภาพของแผงกรองคลื่นที่ใช้เป็นกรณีศึกษา
2. ได้สมการสำหรับใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของแผงกรองคลื่น
3. ทำให้เกิดทางเลือกของการลดความสูงคลื่นในแอ่งจอดเรือในบริเวณที่มีความอ่อนไหวด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อม

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. แผงกรองคลื่นที่ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเป็นแผงกรองคลื่นที่ติดตั้งที่สถานีนำร่องในเขตจังหวัดสมุทรปราการ ของกรมเจ้าท่า
2. ช่วงค่าความสูงคลื่นที่ศึกษาเป็นคลื่นที่เกิดในธรรมชาติบริเวณปากทางเข้าน้ำกรุงเทพฯ (แม่น้ำเจ้าพระยา) ระหว่างวันที่ 1 – 19 มิถุนายน 2554

1.5 ขั้นตอนดำเนินงาน

โครงการศึกษาวิจัยเฉพาะเรื่องประกอบด้วยขั้นตอนดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาคุณลักษณะแผงกรองคลื่นที่ใช้เป็นกรณีศึกษา รวมถึงสภาพแวดล้อมของบริเวณที่ติดตั้งแผงกรองคลื่น
2. ศึกษาทฤษฎีและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเขื่อนกันคลื่น แผงกรองคลื่น และความพยายามลดความสูงคลื่นแบบต่างๆ
3. ตรวจวัดความสูงคลื่นด้านหน้า-ด้านหลังแผงกรองคลื่น และวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่ใช้เป็นกรณีศึกษา
4. วิเคราะห์ตัวแปรที่แสดงคุณลักษณะคลื่น แผงกรองคลื่น และสภาพแวดล้อม จากข้อมูลที่ตรวจวัดได้ในสนาม
5. วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น

6. วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น กับตัวแปรที่แสดงคุณลักษณะคลื่น แผลงกรองคลื่น และสภาพแวดล้อม เพื่อพัฒนาสมการสำหรับใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของแผลงกรองคลื่น
7. วิเคราะห์ประสิทธิภาพของแผลงกรองคลื่นที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

บทที่ 2 แผงกรองคลื่นที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

การสำรวจในปี พ.ศ.2554-2555 พบแผงกรองคลื่นติดตั้งในประเทศไทย 2 แห่ง แผงกรองคลื่นที่ติดตั้งแห่งแรกอยู่ในงานซ่อมปรับปรุงสถานีน้ำร่องปี พ.ศ.2546-2547 ความยาว 38 เมตร ติดตั้งบริเวณความลึกน้ำ 10 เมตร (ที่ตั้งสถานีน้ำร่องซึ่งปรับจากแผนที่ของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ (2540) กับแบบก่อสร้างโครงการซ่อมแซมสถานีน้ำร่องของกรมการขนส่งทางน้ำและพาณิชยนาวี (2546) แสดงในรูปที่ 2.1) แผงกรองคลื่นแห่งที่ 2 อยู่ในโครงการก่อสร้างท่าเทียบเรือสำราญกีฬาอ่าวฉลอง อำเภอเมืองภูเก็ต จังหวัดภูเก็ต ความยาว 54 เมตร ติดตั้งบริเวณความลึกน้ำ 5 เมตร ก่อสร้างปี พ.ศ.2554-2555 รายงานการศึกษาวิจัยฉบับนี้ครอบคลุมเฉพาะแผงกรองคลื่นที่ก่อสร้างแห่งแรก

การศึกษาข้อมูลแผงกรองคลื่นที่ใช้เป็นกรณีศึกษา แบ่งเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย

- ข้อมูลแผงกรองคลื่น
- ความลึกน้ำและกระแสน้ำ
- สภาพลมและคลื่น

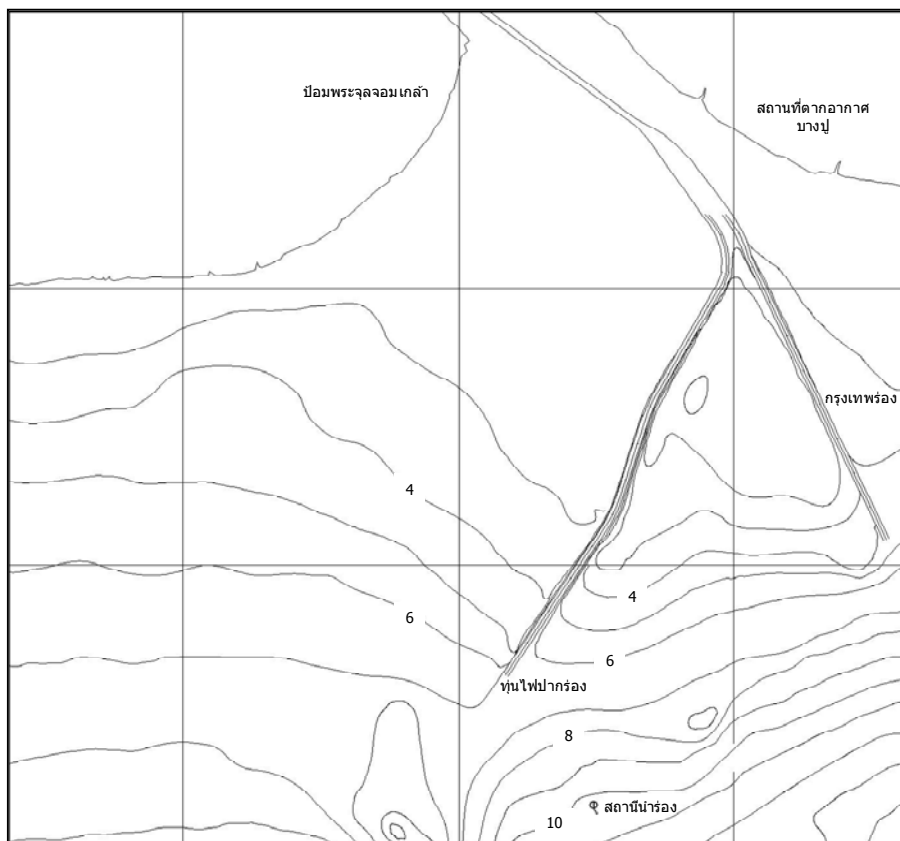
2.1 ข้อมูลแผงกรองคลื่น

จากข้อมูลที่แสดงในแบบก่อสร้างโครงการซ่อมแซมสถานีน้ำร่อง ของกรมการขนส่งทางน้ำและพาณิชยนาวี (2546) มีการออกแบบแผงกรองคลื่นเพื่อใช้ลดความสูงคลื่นสำหรับเรือรับส่งเจ้าหน้าที่น้ำร่องบริเวณใต้สะพานท่าเรือซึ่งเชื่อมระหว่างอาคารสถานีน้ำร่องกับลานจอดเฮลิคอปเตอร์ (ดูรูปที่ 2.2) มี 3 แผง ห่างกันแผงละ 1.5 เมตร (ความกว้างสะพานท่าเรือ 3.0 เมตร) ทั้งหมดวางตัวขนานกับแนวท่าเรือซึ่งวางตัวตามทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ โดยเพื่อความสะดวกในการปฏิบัติงานผู้ควบคุมเรือจะนำเรือเข้าเทียบท่าทางทิศใต้ในฤดูลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และจะนำเรือเข้าเทียบท่าสลับด้านกันในฤดูลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

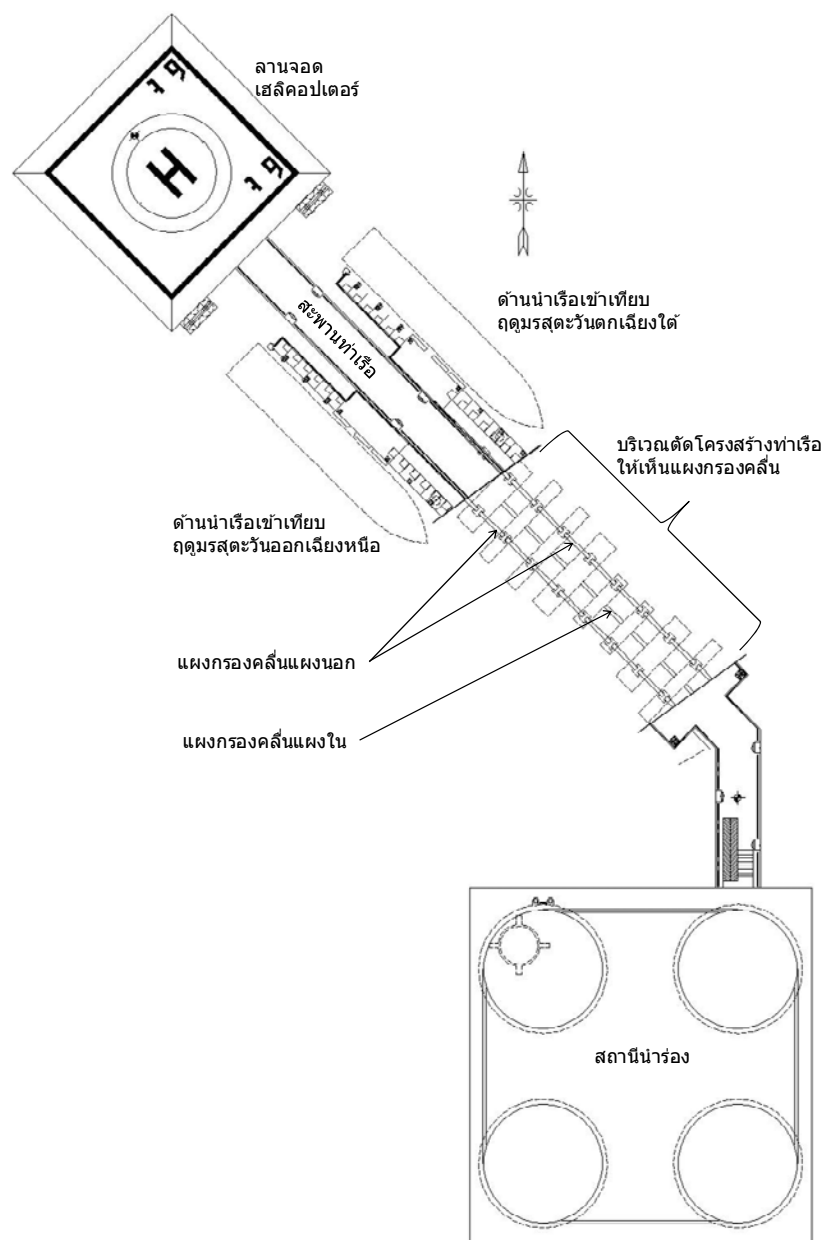
ตามรูปตัดสะพานท่าเรือแสดงในรูปที่ 2.3 ปลายด้านล่างของแผงกรองคลื่นแผงนอก (เหมือนกันทั้งสองด้าน) อยู่ที่ระดับ -1.90 เมตร รทก ปลายแผงกรองคลื่นแผงในอยู่ที่ระดับ -0.50 เมตร รทก (สูงกว่าแผงนอก 1.40 เมตร) ส่วนขอบด้านบนจรดท้องคานสะพานท่าเรือเท่ากันทุกแผง

ลักษณะทั่วไปของแผงกรองคลื่น คือ เป็นแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก กว้าง 1.9 เมตร หนา 0.25 เมตร แผงกรองคลื่นที่ติดตั้งด้านนอก (เหมือนกันทั้งสองด้าน) จะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร ทุกระยะ 0.45 เมตร ทั้งแนวตั้งและแนวนอน (ความพรุนร้อยละ 35) แผงกรองคลื่นแผงในจะรูขนาด

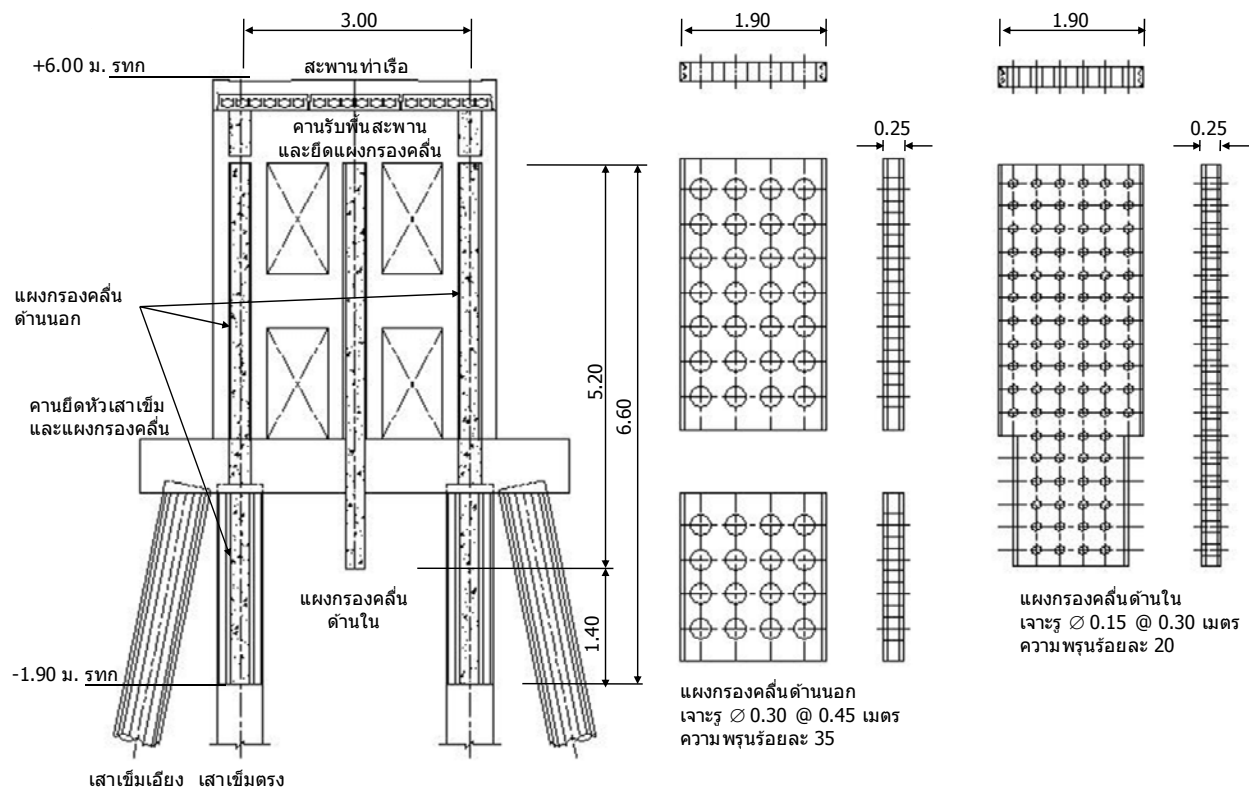
เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร ทุระยะ 0.3 เมตร ทั้งแนวตั้งและแนวนอน (ความพรุนร้อยละ 20)
ขนาดและการจัดเรียงที่ต่างกันทำให้ตำแหน่งรูแฟกกรองคลื่น ไม่ตรงกัน



รูปที่ 2.1 ที่ตั้งสถานีน้ำร่อน



รูปที่ 2.2 แปลนสะพานทำเรือและตำแหน่งแผงกรองคลื่น



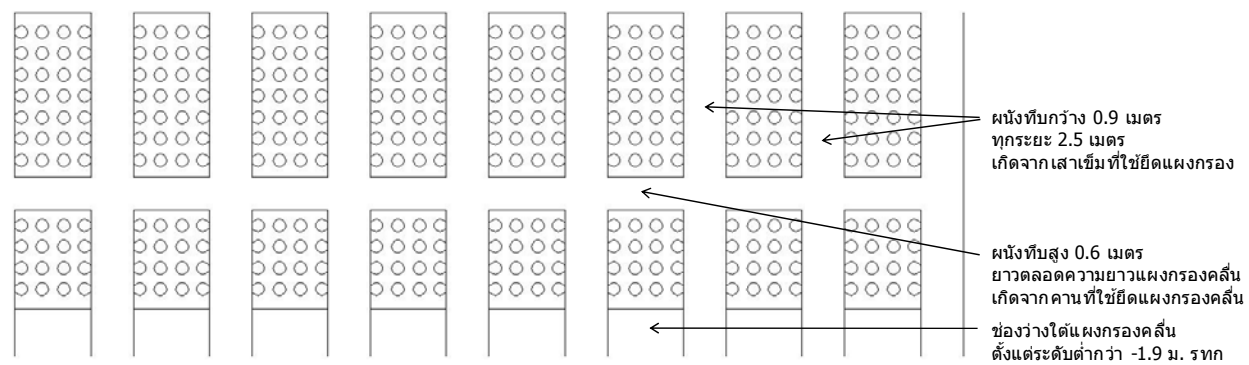
รูปที่ 2.3 รูปตัดสะพานทำเรือและรายละเอียดแฉงกรองคลื่น

ตามแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) แผงกรองคลื่นที่อยู่ด้านนอกแบ่งตามระดับได้เป็น 2 แถว แผงแถวบนสูง 3.70 เมตร ยึดให้อยู่ในตำแหน่งโดยวางแผงกรองคลื่นในร่องเสาเข็มรูปตัว I ซึ่งตอกทุกระยะ 2.5 เมตร (ความกว้างแผงกรองคลื่น 1.9 เมตร) กับมีคานยึดทั้งด้านบนและด้านล่าง แผงแถวล่าง กว้าง 1.90 เมตร เท่ากับแผงแถวบน แต่มีความสูงลดลงเหลือ 2.20 เมตร การยึดให้อยู่ในตำแหน่งทำคล้ายแผงแถวบนแต่ใช้ปาที่เสาเข็มรูปตัว I เป็นจุดรองรับด้านล่างแทนคาน การติดตั้งลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดผนังทึบตามแนวนอนที่เกิดจากคานตัวล่างสูง 0.60 เมตร ขาวตลอดความยาวแผงกรองคลื่น กับทำให้เกิดผนังทึบในแนวตั้งกว้าง 0.90 เมตร ทุกระยะ 2.50 เมตร ความพรุนของแผงกรองคลื่นด้านนอกเมื่อรวมผนังทึบข้างต้นลดลงเหลือร้อยละ 19.4

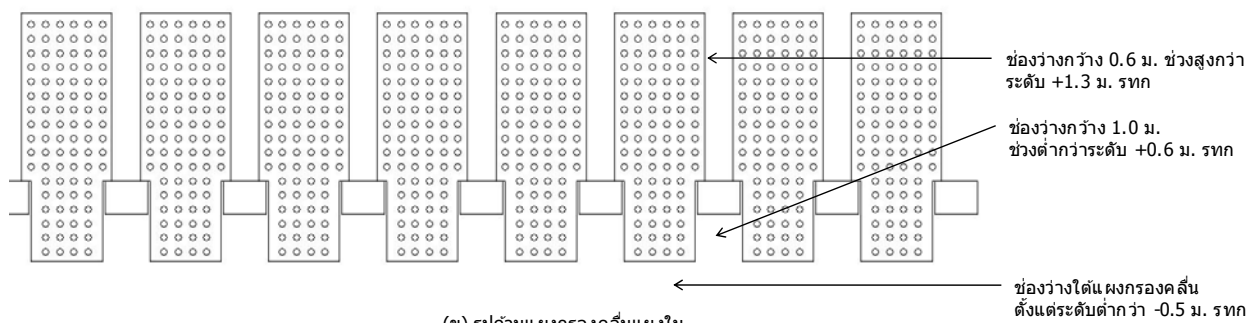
ตามแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) แผงกรองคลื่นที่อยู่ด้านในผลิตเป็นแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กแผ่นเดียว กว้าง 1.90 เมตร สูง 5.20 เมตร ติดตั้งโดยทำป้าให้นั่งบนคานระดับ +1.30 เมตร รทก (คานตัวล่าง) กับยึดท่อนคานด้านบน โดยไม่มีการยึดด้านข้าง ลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดช่องว่างตามแนวตั้งที่ตำแหน่งเสาเข็มซึ่งตอกทุกระยะ 2.50 เมตร ขนาดช่องว่างเปลี่ยนแปลงตามระดับ คือ กว้าง 0.6 เมตร ช่วงเหนือคาน และเพิ่มความกว้างเป็น 1.0 เมตร ช่วงใต้ท่อนคาน ความพรุนของแผงกรองคลื่นแผงกลางสุทธิเพิ่มเป็นร้อยละ 42.6

ลักษณะการติดตั้งข้างต้นทำให้แผงกรองคลื่นทำงานแตกต่างกัน หลายลักษณะ ดังนี้

- เมื่อยอดคลื่นต่ำกว่า -1.4 เมตร รทก ไม่มีแผงกรองคลื่นแผงใดทำงาน ส่วนที่ทำงานเป็นเสาเข็มที่ตอกทุกระยะ 2.5 เมตร ความพรุนร้อยละ 36
- เมื่อยอดคลื่นอยู่ระหว่าง -1.4 เมตร กับ -0.5 เมตร รทก แผงกรองคลื่นที่ติดตั้งด้านนอกทำงาน 2 แผง ระยะห่างระหว่างแผงกรองคลื่น 3.0 เมตร
- เมื่อระดับท้องคลื่นสูงกว่า -0.5 เมตร รทก แผงกรองคลื่นทำงานครบทั้ง 3 แผง ระยะห่างระหว่างแผงกรองคลื่นลดลงเหลือ 1.5 เมตร
- ความพรุนของแผงกรองคลื่นเปลี่ยนแปลงตามระดับน้ำโดยมีความเปลี่ยนแปลงอย่างสำคัญเมื่อระดับน้ำทะเลขึ้นถึงระดับท้องคานตัวล่าง ระดับ +0.6 เมตร รทก
- พฤติกรรมคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านแผงกรองคลื่นมีทั้งกรณีผ่านเฉพาะส่วนยอดคลื่นซึ่งเกิดเมื่อระดับน้ำนิ่งต่ำกว่าปลายแผงกรองคลื่น และกรณีผ่านตลอดความสูงคลื่นเมื่อท้องคลื่นสูงกว่าปลายล่างสุดของแผงกรองคลื่น



(ก) รูปด้านแผงกรองคสล.แผงนอก



(ข) รูปด้านแผงกรองคสล.แผงใน

รูปที่ 2.4 รูปด้านแผงกรองคสล.

2.2 ความลึกน้ำและกระแสน้ำ

ตามข้อมูลแสดงในแผนที่ทางเข้าแม่น้ำเจ้าพระยาของกรมอุทกศาสตร์กองทัพเรือ (2540) แผนที่ 112 ความลึกน้ำที่กลางจากระดับน้ำลงต่ำสุดซึ่งใช้เป็นเส้นเกณฑ์ (Chart Datum) บริเวณที่ตั้งสถานีน้ำร่องมีความลึกประมาณ 10.0 เมตร ซึ่งตามแสดงในรูปที่ 2.5 พบว่าสอดคล้องกับผลสำรวจความลึกพื้นท้องน้ำที่แสดงในแบบก่อสร้างโครงการซ่อมแซมสถานีน้ำร่องของกรมเจ้าท่า

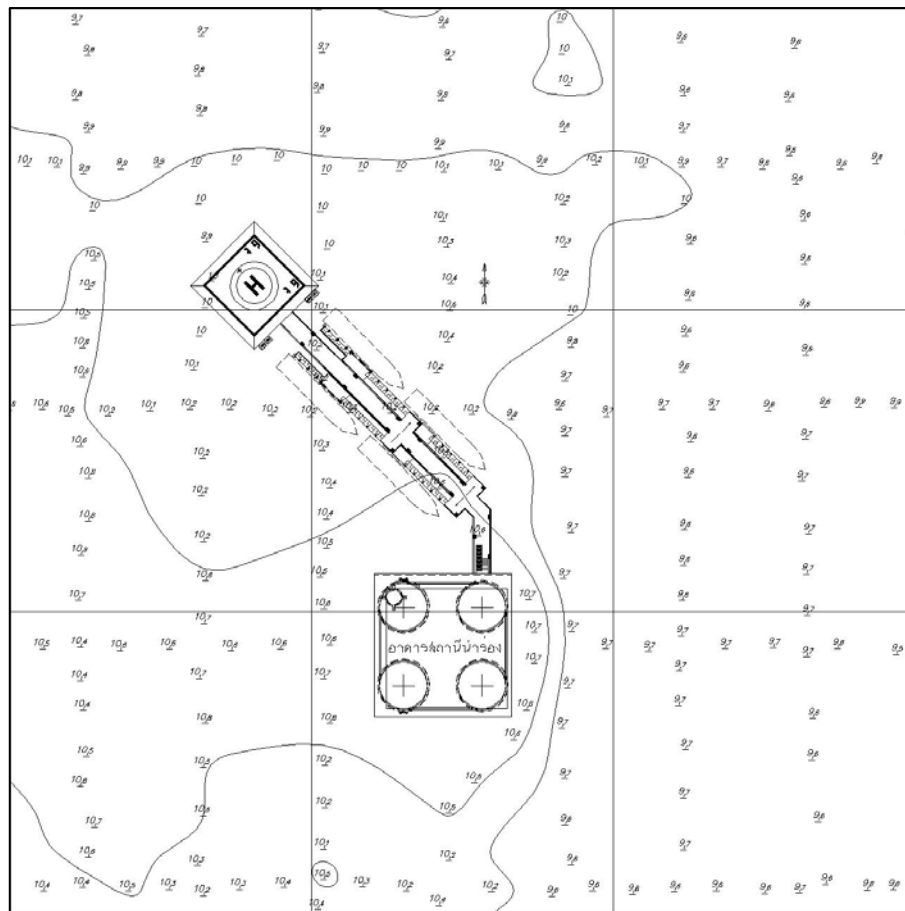
การตรวจสอบข้อมูลระดับน้ำลงต่ำสุดบริเวณสันดอนแม่น้ำเจ้าพระยาที่แสดงในแผนที่ทางเข้าแม่น้ำเจ้าพระยาของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ พบว่าอยู่เหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง 2.42 เมตร ส่วนความสูงน้ำวัดจากระดับน้ำลงต่ำสุด (LLW: Lowest Low Water) ภายใต้อาคารต่างๆ มีรายละเอียด ดังนี้

- ระดับน้ำขึ้นเฉลี่ยหน้าน้ำเกิด (MHWS: Mean High Water Spring) 3.83 เมตร
- ระดับน้ำขึ้นเฉลี่ยหน้าน้ำตาย (MHWN: Mean High Water Neap) 3.37 เมตร
- ระดับน้ำลงเฉลี่ยหน้าน้ำตาย (MLWN: Mean Low Water Neap) 1.54 เมตร
- ระดับน้ำลงเฉลี่ยหน้าน้ำเกิด (MLWS: Mean Low Water Spring) 0.94 เมตร

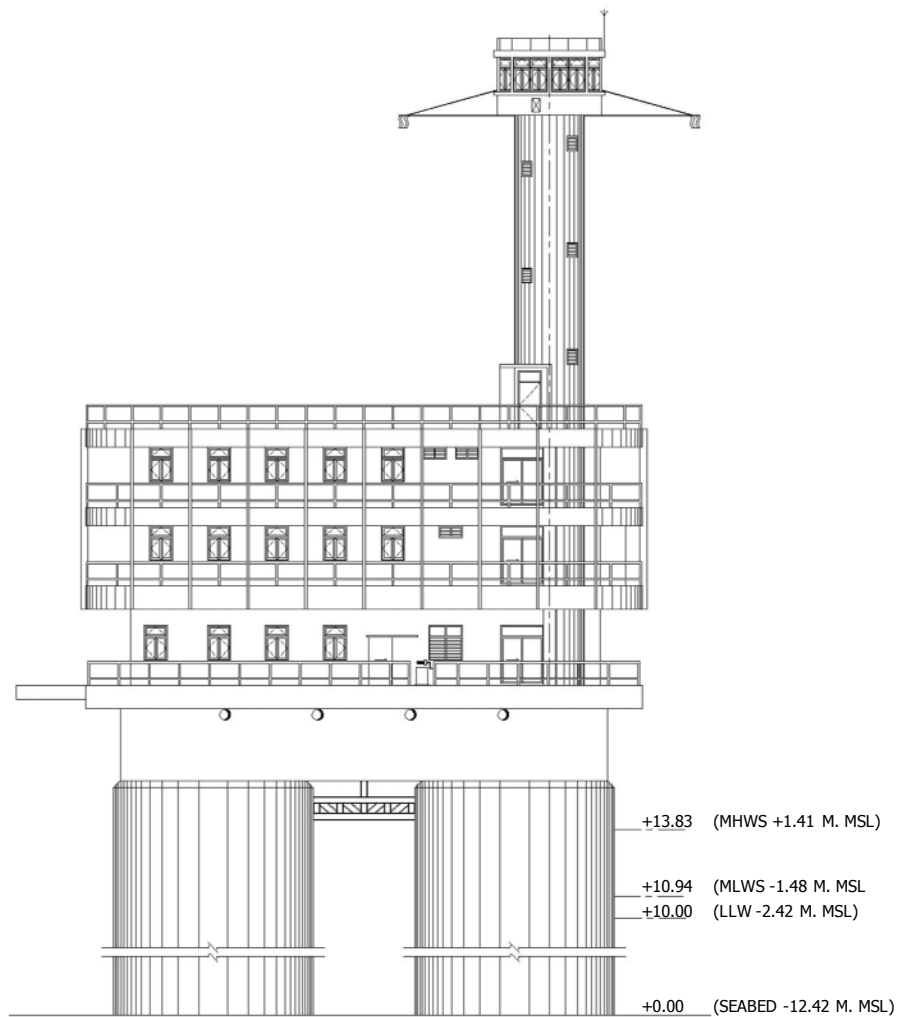
ข้อมูลข้างต้นแสดงว่าในหน้าน้ำเกิดระดับน้ำลงเฉลี่ยสูงกว่าพื้นท้องน้ำ 10.94 เมตร และเพิ่มความสูงเหนือพื้นท้องน้ำเป็น 13.83 เมตร สำหรับระดับน้ำขึ้นเฉลี่ย ค่าอธิบายระดับน้ำและความลึกน้ำแสดงในรูปที่ 2.6

การตรวจสอบข้อมูลระดับน้ำบริเวณปากสันดอนเจ้าพระยาที่ระบุในมาตรฐานน้ำ น่านน้ำไทย ของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ (2554) ระหว่างวันที่ 3 – 19 มิถุนายน 2554 (เป็นช่วงเวลาที่ทำการวัดคลื่นในสนาม) ตามแสดงในรูปที่ 2.7 พบว่าเป็นแบบผสม (Mixed Tide) คือ มีน้ำขึ้น-น้ำลงวันละ 2 ครั้ง ยอดน้ำขึ้นและยอดน้ำลงแต่ละครั้งไม่เท่ากัน ปกติมียอดสูงสุดกับยอดต่ำสุดอย่างละ 1 ค่า

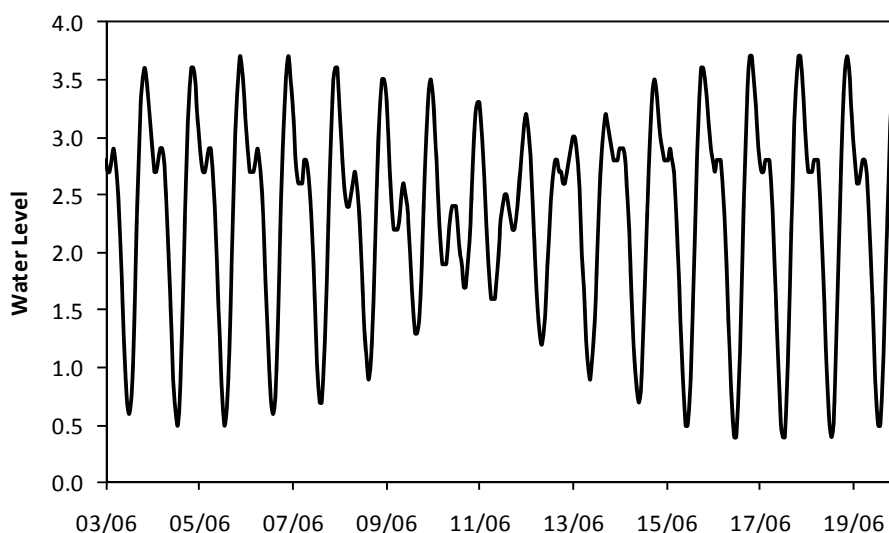
สำหรับทิศทางการไหลของกระแสน้ำ เนื่องจากที่ตั้งสถานีน้ำร่องอยู่บริเวณปากทางเข้าร่องน้ำเจ้าพระยาจึงประมาณได้ว่ากระแสน้ำไหลไปทางทิศเหนือในช่วงเวลาน้ำขึ้น และไหลไปทางทิศใต้ในช่วงเวลาน้ำลง



รูปที่ 2.5 ผลสำรวจความลึกพื้นที่ต่อน้ำบริเวณสถานีน้ำรอง



รูปที่ 2.6 คำอธิบายความลึกน้ำบริเวณสถานีนำร่อง



รูปที่ 2.7 ระดับน้ำทะเลบริเวณปากสันดอนเจ้าพระยา วันที่ 3 – 19 มิถุนายน 2554
(ทำนาย)

2.3 สภาพลมและคลื่น

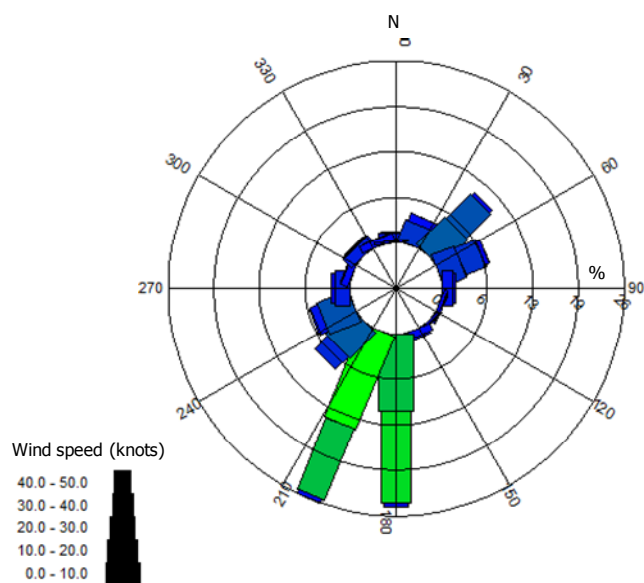
การตรวจสอบข้อมูลลมของกรมอุตุนิยมวิทยา (2554) ตรวจวัดที่สถานีนำร่องในเวลากลางวัน (07.00 – 19.00 น.) ทุก 3 ชั่วโมง ระหว่าง พ.ศ. 2544-2553 (10 ปี) ตามแสดงในตารางที่ 2.1 กับรูปที่ 2.8 พบว่าลมส่วนใหญ่เป็นลมทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางทิศใต้ (SWS) กับลมทิศใต้ (S) ที่สัดส่วนร้อยละ 22.66 กับร้อยละ 21.53 ตามลำดับ ส่วนลมทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) มีสัดส่วนร้อยละ 9.7 ความเร็วลมส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 10 - 20 นอต (ร้อยละ 42.15) รองลงมา มีความเร็วต่ำกว่า 5 นอต กับระหว่าง 5 – 10 นอต ที่สัดส่วนร้อยละ 26.20 กับ 25.79 ตามลำดับ ความเร็วลมสูงสุด 48 นอต

การนำข้อมูลลมมาสังเคราะห์เป็นข้อมูลคลื่นตามขั้นตอนที่เสนอโดย USACE (2002) อย่างง่าย (Simplified Method) ตามแสดงในตารางที่ 2.2 พบว่าความสูงคลื่นส่วนใหญ่ต่ำกว่า 0.5 เมตร คาบเวลาค่คลื่นส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 3.0 – 4.0 วินาที ความสูงคลื่นมากที่สุด 8.09 เมตร และคาบเวลาค่คลื่นยาวที่สุด 10.4 วินาที

การนำผลสังเคราะห์มาทำผังก่คลื่น (Waverose) ตามแสดงในรูปที่ 2.9 พบว่าคลื่นขนาดใหญ่ (ความสูงคลื่น 8.09 เมตร คาบเวลา 10.4 วินาที) เป็นคลื่นที่เคลื่อนตัวเข้ามาทางทิศใต้กับทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางทิศใต้

ตารางที่ 2.1 ความเร็วและทิศทางลมตรวจวัดที่สถานีน้ำร่อง พ.ศ. 2544-2553

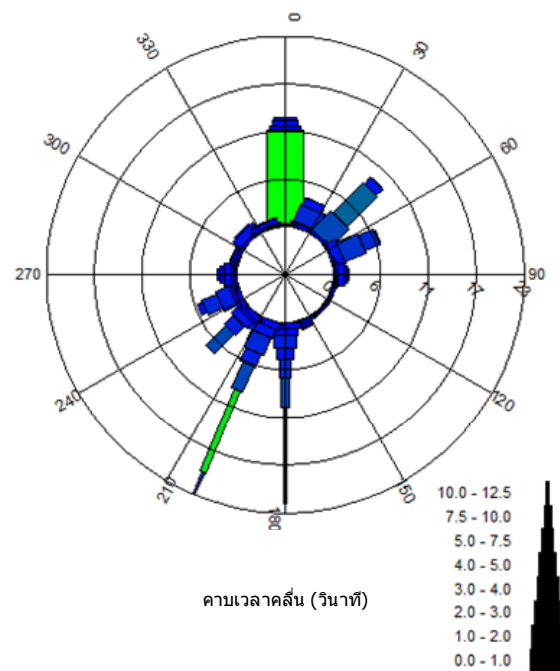
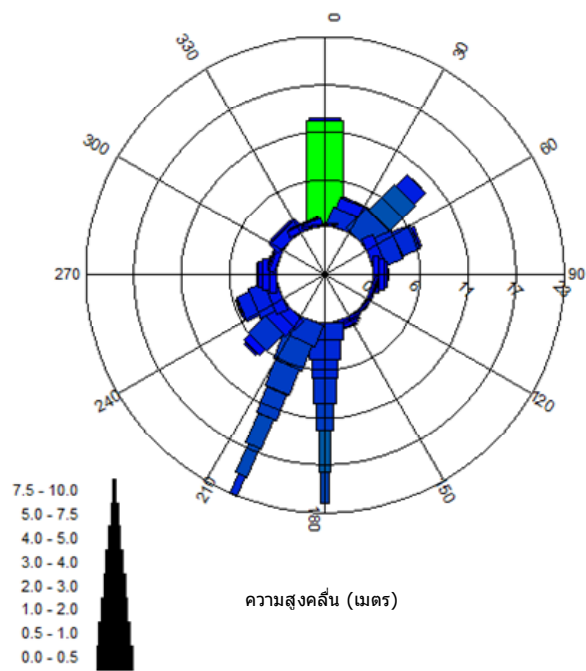
ทิศ	ร้อยละที่ลมพัด ณ ระดับความเร็ว (นอต) ต่างๆ						รวม
	0.0-5.0	5.1-10.0	10.1-20.0	20.1-30.0	30.1-40.0	>40.0	
N	12.43	0.91	0.46	0.00	0.00	0.00	13.79
NEN	0.73	1.48	1.42	0.10	0.01	0.00	3.73
NE	1.02	2.57	5.02	1.07	0.01	0.01	9.70
ENE	0.69	1.56	3.04	0.93	0.02	0.00	6.24
E	0.56	0.62	0.50	0.13	0.01	0.00	1.82
ESE	0.23	0.18	0.10	0.02	0.00	0.00	0.53
SE	0.14	0.18	0.18	0.02	0.00	0.00	0.51
SES	0.29	0.40	0.44	0.04	0.00	0.00	1.17
S	2.04	4.59	13.20	1.70	0.00	0.00	21.53
SWS	2.64	6.57	12.17	1.26	0.02	0.00	22.66
SW	1.37	2.38	2.87	0.26	0.01	0.00	6.89
WSW	1.47	2.00	1.66	0.15	0.01	0.00	5.29
W	0.96	0.85	0.50	0.05	0.00	0.00	2.36
WNW	0.46	0.42	0.13	0.02	0.00	0.00	1.02
NW	0.76	0.70	0.27	0.03	0.00	0.00	1.75
NWN	0.41	0.38	0.20	0.02	0.00	0.00	1.01
รวม	26.20	25.79	42.15	5.78	0.08	0.01	100.00



รูปที่ 2.8 พังลมตรวจวัดที่สถานีน้ำร่อง พ.ศ.2544 – 2553

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลคลื่นบริเวณสถานีนำร่องที่สังเคราะห์จากข้อมูลลม พ.ศ. 2544-2553

H _{mo} (ม.)	จำนวนครั้งที่ช่วงคาบเวลาค่คลื่น (วินาที) ต่างๆ												รวม (ครั้ง)
	0.1-0.5	0.5-1.0	1.1-2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.1-5.0	5.1-6.0	6.1-7.0	7.1-8.0	8.1-9.0	9.1-10.0	>10.0	
0.00-0.50	2,106	15	1,140	2,297	525								6,083
0.51-1.00				169	2,432	926							3,527
1.01-2.00					444	1,093	665	716	152				3,070
2.01-3.00						40	146	153		1,144			1,483
3.01-4.00							3	46	10	69	747	499	1,374
4.01-5.00							1	1	5		625	954	1,586
5.01-6.00										1		973	974
6.01-7.00												161	161
7.01-8.00												1	1
>8.00												2	2
รวม	2,106	15	1,140	2,466	3,401	2,059	815	916	167	1,214	1,372	2,590	18,261



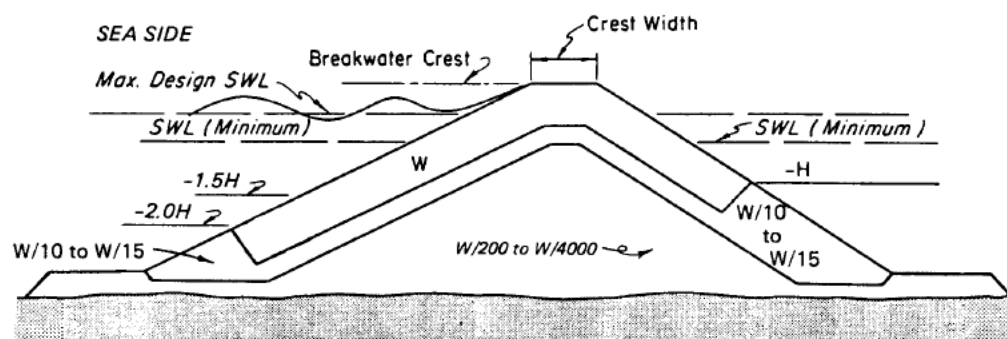
รูปที่ 2.9 พังคลื่นบริเวณสถานีนำร่องที่สังเคราะห์จากข้อมูลม พ.ศ.2544-2555

บทที่ 3 การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวกับเขื่อนกันคลื่น

การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวกับเขื่อนกันคลื่นเริ่มจากงานศึกษาเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้ง (Rubble mound) ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐาน ต่อด้วยการใช้โครงสร้างอย่างอื่น ได้แก่ แบบจมน้ำ (Submerge breakwater) แบบลอยน้ำ (Floating breakwater) และแบบแผงกรองคลื่น (Wave screen)

3.1 แบบหินทิ้ง (Rubble Mound)

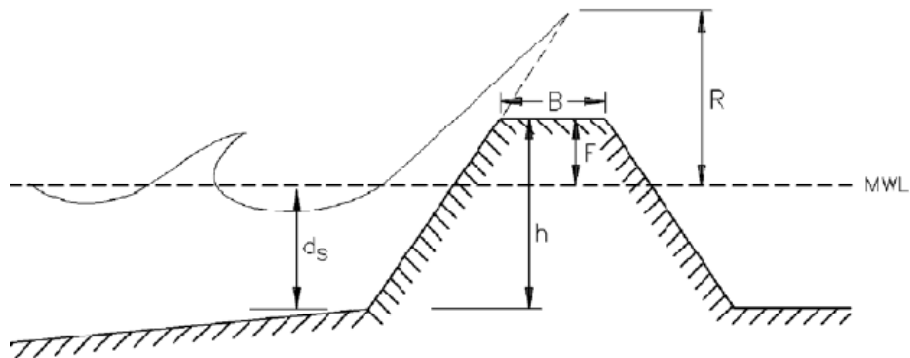
เขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้งที่ใช้โดยทั่วไป ตาม USACE (1986) แสดงในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยหินขนาดเล็กล้อมรอบด้วยชั้นหินกรวด (Core and Bedding Layer) ต่อด้วยชั้นหินกรอง (Filter) และชั้นหินเกราะ (Armor) การกำหนดขนาดหินแต่ละชั้น ตาม Hudson (1958) อ้างถึงโดย USACE (1986) ขึ้นกับน้ำหนักจำเพาะของหินเกราะ ความสูงคลื่น ความลาดเขื่อนกันคลื่น รวมถึงจำนวนก้อนหินที่ประกอบเป็นชั้นหินเกราะ ความพรุน ค่าสัมประสิทธิ์เสถียรภาพ (Stability coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์ของชั้นหิน (Layer coefficient) ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติหินและสถานะการแตกตัวของคลื่น การออกแบบชั้นหินเกราะภายใต้เงื่อนไขน้ำหนักจำเพาะ 26,500 นิวตัน/ลูกบาศก์เมตร ความสูงคลื่น 8.0 เมตร ความลาดเขื่อนกันคลื่น 1: 2 คลื่นแตกตัวที่ด้านหน้าเขื่อนกันคลื่น หินที่ใช้ทำชั้นหินเกราะมีเหลี่ยมมุม (Rough - Angular) ทั้งแบบสุ่ม (Random) และชั้นหินเกราะประกอบด้วยหินเรียงทับกัน 2 ชั้น พบว่าหินเกราะต้องมีย่านน้ำหนักเฉลี่ย 967.5 kN/ก้อน ความกว้างสันเขื่อนกันคลื่น 10.0 เมตร ความหนาชั้นหินเกราะ 6.7 เมตร และต้องเรียงหินเกราะให้ได้ประมาณ 114 ก้อน/1000 ตารางเมตร ภายใต้สภาพการณ์ดังกล่าว ระยะคลื่น โจนตัว (Wave runup) มีค่าประมาณ 11.5 เมตร



รูปที่ 3.1 รูปตัดเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้ง USACE (1986)

การลดความสูงคลื่นโดยเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้ง ตาม USACE (2002) อาศัยทฤษฎีว่าเมื่อคลื่นเคลื่อนที่มากระทบเขื่อนกันคลื่นซึ่งมีหินหลายขนาดเรียงต่อกันหลายชั้น พลังงานคลื่นบางส่วนจะสะท้อนกลับออกไปรวมกับคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ามาทำให้เกิดการหักล้างหรือเสริมกันขึ้นกับมุมคลื่น (Phase) พลังงานบางส่วนสลายไปจากแรงเสียดทานในโพรงก้อนหินที่ประกอบกันเป็นตัวเขื่อน บางส่วนสลายไปจากการเกิดคลื่นแตกตัวบนลาดเขื่อนกันคลื่น บางส่วนสลายไปจากการไต่ขึ้นลาดเขื่อนกันคลื่น (พลังงานจลน์เปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์) แล้วไหลกลับลงมา และบางส่วนกระโจนข้ามสันเขื่อนไปตกด้านหลังทำให้เกิดคลื่นลูกใหม่

อ้างอิงใน USACE (2002) Seelig (1980) ทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (Wave Transmission Coefficient) ของเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้งที่มีรูปหน้าตัดต่างกัน 19 หน้าตัด ได้ผลสรุปตามแสดงในสมการที่ (1) ขึ้นกับความสูงเขื่อนกันคลื่นเหนือระดับน้ำนิ่ง ระยะคลื่นโจนตัว (ดูนิยามแสดงในรูปที่ 3.2) และค่าสัมประสิทธิ์รูปทรงเขื่อนกันคลื่น (C) ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2) ขึ้นกับความกว้างและความสูงเขื่อนกันคลื่น ขอบเขตการใช้สมการของ Seelig (1980) มีที่มาจากขอบเขตการทดลอง คือ ค่าความลึกน้ำสัมพัทธ์ (d_s/gT^2) ระหว่าง 0.03 – 0.006 และค่า B/h ระหว่าง 0 – 3.2



รูปที่ 3.2 นิยามสัญลักษณ์ในสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของ Seelig (1980)

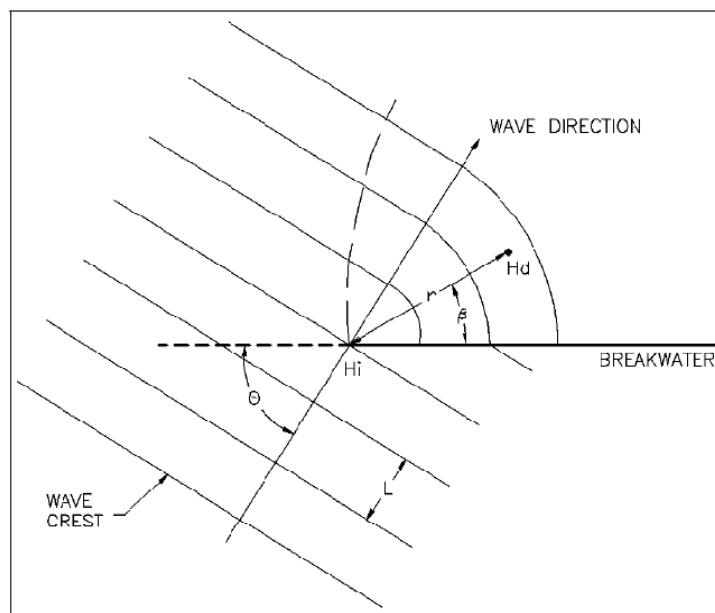
$$C_t = C \left(1 - \frac{F}{R} \right) \quad (1)$$

$$C = 0.51 - \frac{0.11B}{h} \quad (2)$$

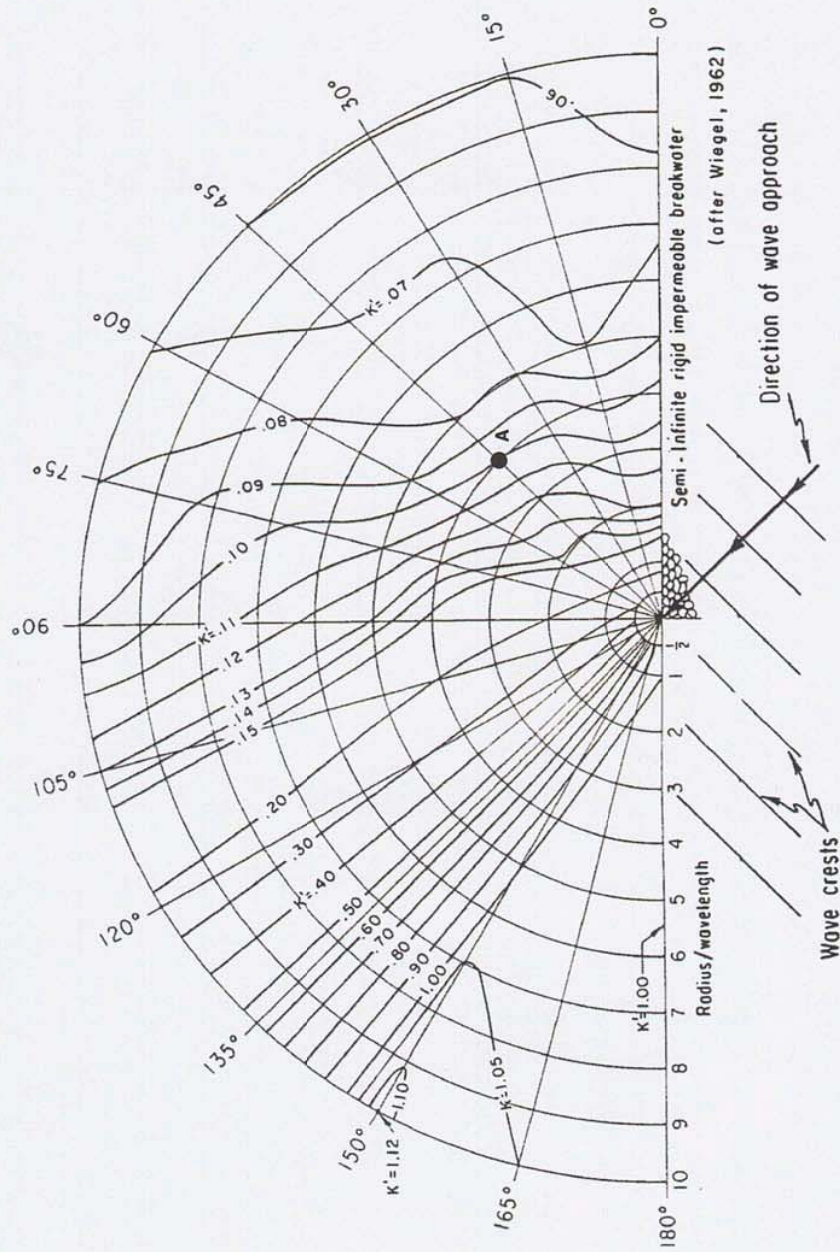
เมื่อ

- C_t ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น
 F ความสูงสันเขื่อนเทียบกับระดับน้ำนิ่ง (เมตร)
 R ระยะคลื่นโจนตัว (เมตร)
 B ความกว้างสันเขื่อนกันคลื่น (เมตร)
 h ความสูงเขื่อนกันคลื่น (เมตร)

สำหรับบริเวณช่องเปิด คลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านเขื่อนกันคลื่นจะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) ตามทฤษฎีที่ว่าพลังงานคลื่นจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีพลังงานสูงไปบริเวณที่มีพลังงานต่ำกว่า เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านเขื่อนกันคลื่นพลังงานคลื่นส่วนหนึ่งจึงเคลื่อนที่ไปด้านข้างที่มีพลังงานต่ำกว่า (ดูรูปที่ 3.3) การประเมินความสูงคลื่นที่เลี้ยวเบนผ่านช่องเปิด ตาม USACE (1984) สามารถใช้แผนภูมิที่พัฒนาโดย Wiegel (1962) โดยตามตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นกรณีคลื่นเคลื่อนที่ท่ามุม 135 องศา กับแนวเขื่อนกันคลื่น ค่า K' เป็นอัตราส่วนความสูงคลื่นด้านหลังเขื่อนกันคลื่นต่อความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าหาเขื่อนกันคลื่น (Incident Wave) ระยะทางจากขอบช่องเปิดถึงจุดที่พิจารณาคำนวณเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น พบว่าที่จุด A ซึ่งเอียงท่ามุม 45 องศา กับแนวเขื่อนกันคลื่น และอยู่ห่างจากช่องเปิดเป็นระยะทาง 4 เท่าของความยาวคลื่น มีความสูงคลื่นลดลงเหลือ 0.10 เท่าของความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าหาเขื่อนกันคลื่น ความสูงคลื่นบริเวณดังกล่าวต้องนำมารวมกับความสูงคลื่นที่คำนวณจากสมการของ Seelig (1980)



รูปที่ 3.3 การเลี้ยวเบนผ่านเขื่อนกันคลื่น USACE (2002)



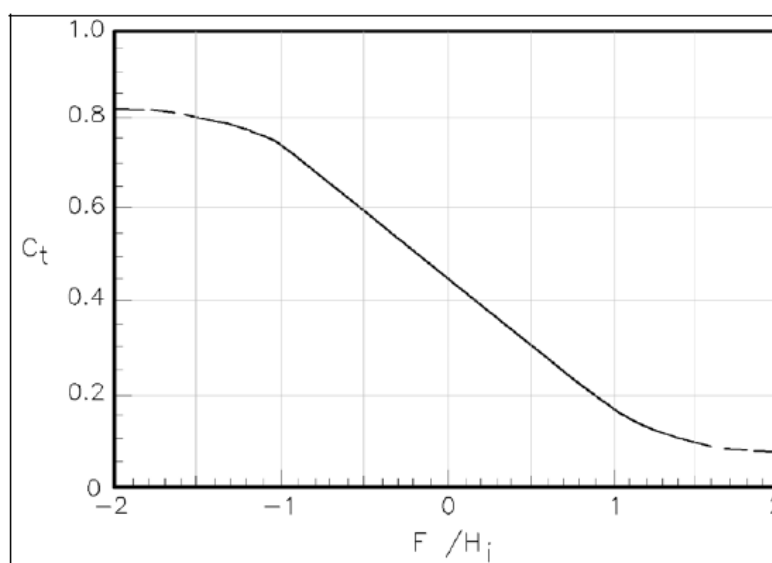
รูปที่ 3.4 แผนภูมิประเมินความสูงคลื่นหลังเขื่อนกันคลื่นกรณีคลื่นเคลื่อนที่ทำมุม 135 องศา กับแนวเขื่อนกันคลื่นของ Wiegel (1962)

3.2 แบบจมน้ำ (Submerge Breakwater)

ตาม USACE (2002) เขื่อนกันคลื่นแบบจมน้ำหมายถึงเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้งที่มีความสูงเขื่อนบางช่วงเวลาไม่พ้นน้ำ โดยนอกจากข้อได้เปรียบค่าใช้จ่ายต่ำกว่าเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้งตามปกติแล้ว พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่มีค่าสูงจะความสูงคลื่นต่ำๆ ในวันทั่วไป มีค่าลดลงเมื่อความสูงคลื่นเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ต้องการ

อ้างอิงโดย USACE (2002) Van der Meer and Angremond (1992) ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นแบบหินทิ้งที่มีความสูงไม่พ้นผิวน้ำจากผลทดลองได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (C_t) กับอัตราส่วน F/H_i ตามแสดงในรูปที่ 3.5 โดย F เป็นระยะพ้นน้ำของเขื่อนกันคลื่น มีค่าเป็นบวก (+) เมื่อสันเขื่อนกันคลื่นสูงกว่าผิวน้ำ และ มีค่าเป็นลบ (-) เมื่อสันเขื่อนจมอยู่ใต้ผิวน้ำ

นอกจากความสัมพันธ์กับอัตราส่วน F/H_i Van der Meer and Angremond (1992) ใช้ผลทดลองวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับอัตราส่วน F/D_{50} , H_s/gT^2 , H_i/D_{50} และ B/D_{50} แต่รูปสมการที่ได้ซับซ้อนมาก



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับอัตราส่วน F/H_i
ในงานศึกษาของ Van der Meer and Angremond (1992)

3.3 แบบลอยน้ำ (Floating Breakwater)

ตาม USACE (2002) เชือกั้นคลื่นแบบลอยน้ำมีข้อได้เปรียบที่สามารถปรับตัวตามระดับน้ำจึงเหมาะกับการติดตั้งในบริเวณที่ระดับน้ำขึ้น-ลงต่างกันมาก ปกติถูกกว่าเชือกั้นคลื่นแบบอยู่กับที่เมื่อก่อสร้างในบริเวณน้ำลึก และมีผลกระทบกับการไหลเวียนของกระแสน้ำรวมถึงการอพยพของปลาไม่มาก อย่างไรก็ตาม ข้อเสียเปรียบสำคัญของเชือกั้นคลื่นแบบลอยน้ำ คือ การชำรุดที่รอยต่อโครงสร้าง เพราะมีแรงกระทำซ้ำๆ ตามคาบเวลาคลื่น และสมรรถนะเชือกั้นคลื่นขึ้นกับคาบเวลาคลื่นซึ่งเป็นข้อกำหนดสถานที่ใช้งาน

อ้างอิงโดย Tsinker (1995) Macagno (1953) เสนอสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของเชือกั้นคลื่นแบบลอยน้ำรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ยึดให้อยู่ในตำแหน่งโดยใช้เสาเข็มประกับดังแสดงในสมการที่ (3) ส่วน Carr (1952) เสนอสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของเชือกั้นคลื่นรูปหน้าตัดเดียวกันแต่ใช้ในน้ำตื้น ($H/L < 0.04$) ดังแสดงในสมการที่ (4)

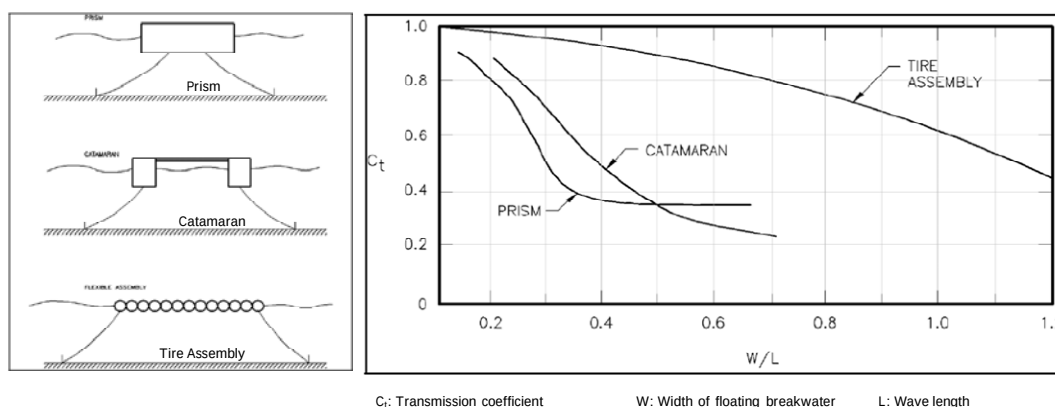
$$C_t = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\pi B \sinh\left(\frac{h}{L}\right)}{L \cosh\left(2\pi \frac{(h-D)}{L}\right)} \right]^2}} \quad (3)$$

$$C_t = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\left(\frac{\pi B}{L}\right) \left(1 + \frac{D}{h-D}\right) \right]^2}} \quad (4)$$

เมื่อ

C_t	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น
h	ความลึกน้ำ (เมตร/ฟุต)
L	ความยาวคลื่น (เมตร/ฟุต)
D	ระยะกั้นน้ำลึกของเชือกั้นคลื่น (เมตร/ฟุต)
B	ความกว้างเชือกั้นคลื่น (เมตร/ฟุต)

อ้างอิงโดย USACE (2002) การศึกษาสมรรถนะเขื่อนกันคลื่นแบบลอยน้ำที่ยึดให้ลอยอยู่กับที่ด้วยสายสมอรูปหน้าตัดปริซึม (Prism)¹ กับรูปหน้าตัดคาตามาราน (Catamaran)² ของ Hales (1981) กับที่ประกอบจากแพยางรถยนต์ใช้แล้ว (Scrap tire)³ ของ Giles and Sorensen (1979) ได้ข้อสรุปว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นแปรผันโดยกลับกับอัตราส่วนความกว้างเขื่อนกันคลื่นต่อความยาวคลื่น (W/L) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยเขื่อนกันคลื่นแบบคาตามารานให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นต่ำที่สุดเมื่ออัตราส่วน W/L มากกว่า 0.5



รูปที่ 3.6 สมรรถนะเขื่อนกันคลื่นแบบลอยน้ำตามงานศึกษาของ Hales (1981) กับ Giles and Sorensen (1979)

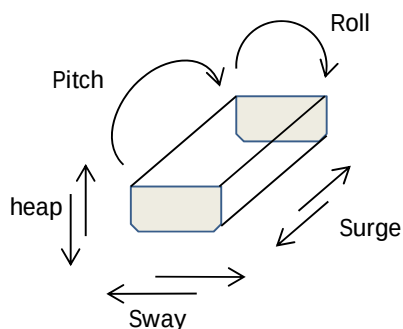
Fousert (2006) ศึกษาคุณสมบัติทางพลวัตอุทก (Hydrodynamic) ของเขื่อนกันคลื่นแบบลอยน้ำพบว่ากลไกที่ทำให้ความสูงคลื่นหลังเขื่อนกันคลื่นลดลงประกอบด้วยการสะท้อนกลับเมื่อกระทบเขื่อนกันคลื่น การไหลวนของกระแสน้ำใต้ตัวเขื่อน และพลังงานที่ใช้ในการยกเขื่อนกันคลื่นให้ลอยขึ้น-ลงตามคาบเวลาคลื่น อย่างไรก็ตาม ภายใต้อสภาพแวดล้อมหนึ่งๆ เมื่อเขื่อนกันคลื่นแบบลอยน้ำไหวตัวพ้องกับความถี่ธรรมชาติ (Resonance) การขยับตัวดังกล่าวก็ทำให้เกิดคลื่นลูกใหม่ซึ่งเป็นข้อจำกัดของสถานที่ติดตั้ง

¹ เขื่อนกันคลื่นแบบปริซึมในการทดลองของ Hales (1981) กว้าง 4.88 เมตร กินน้ำลึก 1.07 เมตร การทดลองทำที่ความลึกน้ำ 7.6 เมตร

² เขื่อนกันคลื่นแบบคาตามารานในการทดลองของ Hales (1981) กว้าง 1.07 เมตร กินน้ำลึก 1.42 เมตร ประกอบกันเป็นคาตามารานที่มีความกว้างสุทธิ 6.4 เมตร การทดลองทำที่ความลึกน้ำ 7.6 เมตร

³ เขื่อนกันคลื่นแบบแพยางในการทดลองของ Giles and Sorensen (1979) กว้าง 12.8 เมตร กินน้ำลึกเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยาง การทดลองทำที่ความลึกน้ำ 3.96 เมตร

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการขยับตัวของเชือกกันคลื่นแต่ละลักษณะ⁴ (ดูรูปที่ 3.7) สรุปได้ ดังนี้



รูปที่ 3.7 ทิศการเคลื่อนตัวของเชือกกันคลื่นแบบลอยน้ำ

การขยับตัวทางด้นข้าง (Sway)

- การขยับตัวทางด้นข้าง ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง ระยะกินน้ำลึก (Draft) และมวลเชือกกันคลื่น
- การเพิ่มมวลและความกว้างเชือกกันคลื่นขณะระยะกินน้ำลึกคงที่ช่วยลดขนาดการเคลื่อนตัวทางด้นข้าง
- การเพิ่มระยะกินน้ำลึกของเชือกกันคลื่นทำให้แรงที่กระทำในแนวราบเพิ่มขึ้นจึงทำให้ขนาดการเคลื่อนตัวทางด้นข้างเพิ่มขึ้น

การขยับตัวตามแนวดิ่ง (Heave)

- การเพิ่มมวลเชือกกันคลื่นแบบลอยน้ำทำให้ความถี่ธรรมชาติลดลง (คาบเวลาความถี่ธรรมชาติยาวขึ้น)
- เมื่อเพิ่มความกว้างเชือกกันคลื่นโดยรักษาระยะกินน้ำลึกคงที่ มวลเชือกกันคลื่นที่เพิ่มขึ้นทำให้ขนาดการเคลื่อนที่ตามแนวดิ่งลดลง
- เมื่อเชือกกันคลื่นกว้างมากๆ ภายใต้อาการคาบเวลาค่อนข้างยาว การไหวตัวของเชือกกันคลื่นเป็นไปตามคาบเวลาค่อนข้างยาวโดยไม่เกี่ยวข้องกับความถี่ธรรมชาติ

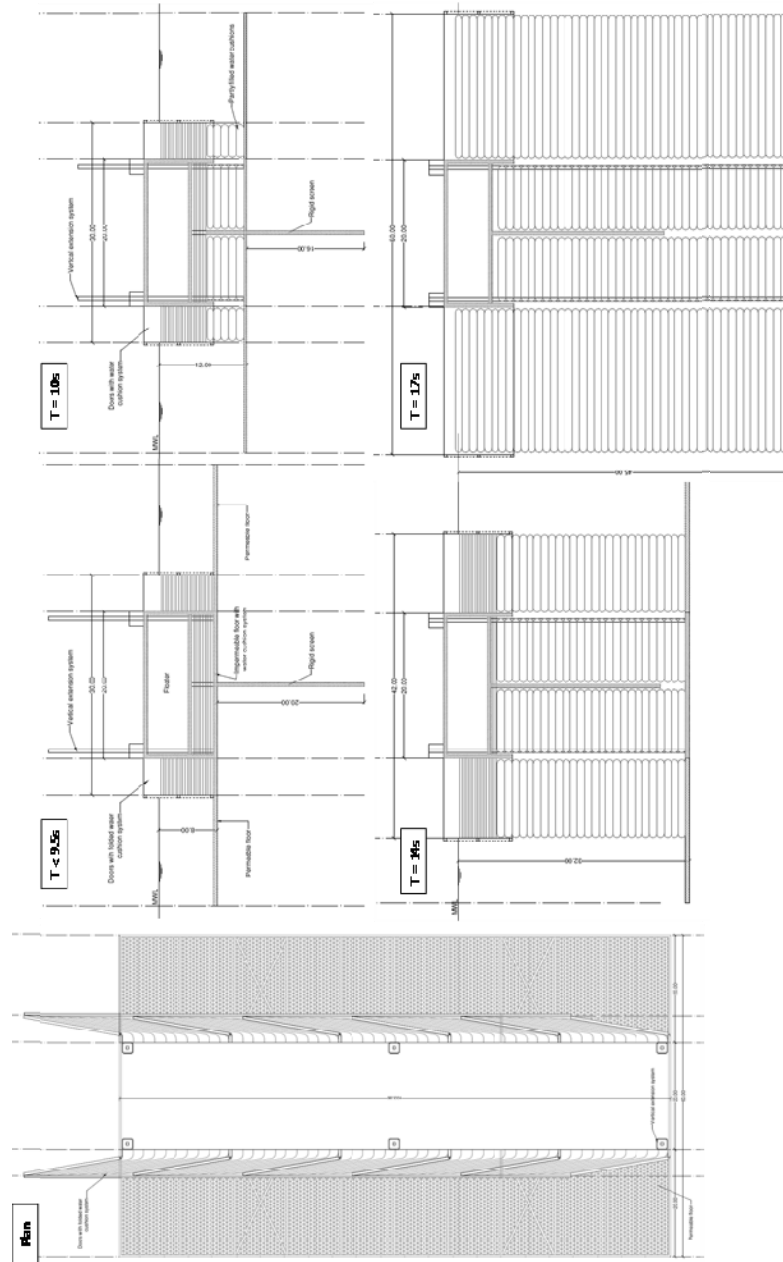
⁴ ไม่พิจารณาการขยับตัวตามความยาวเชือกกันคลื่น (Surge) เพราะไม่มีผลกระทบกับความสูงคลื่นด้านหลังเชือกกันคลื่น และไม่พิจารณาการโคลงตามแกนตั้งฉากกับความยาวเชือกกันคลื่น (Pitch) เพราะค่าโมเมนต์ออฟฟิชั่นเอเซียรอบแกนตั้งฉากกับความยาวคลื่นสูงมาก

- เมื่อความกว้างเชื่อมกันคลื่นคงที่ การลดลงของระยะกินน้ำลึก หรือมวล ทำให้ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างเพิ่มขึ้น
- ระยะกินน้ำลึกของเชื่อมกันคลื่นเพิ่มตามความแข็งของสายที่ใช้ยึดเชื่อมกันคลื่น (Mooring line) การเพิ่มความแข็งของสายที่ใช้ยึดเชื่อมกันคลื่นทำให้ระยะการเคลื่อนที่ตามแนวดิ่งลดลง พร้อมกับทำให้ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างเพิ่มขึ้น

การหมุนรอบแกนแนวนอนที่ขนานกับความยาวเชื่อมกันคลื่น (Roll)

- เชื่อมกันคลื่นที่กว้างมีโอกาสหมุนโคลงรอบแกนตามความยาวเชื่อมกันคลื่นต่ำกว่าเชื่อมกันคลื่นที่แคบ
- การหมุนรอบแกนตามความยาวเชื่อมกันคลื่นมีคุณลักษณะเหมือนการขยับตัวทางข้างกรณีพิจารณาเฉพาะระยะกินน้ำลึก และมีคุณสมบัติเหมือนการเคลื่อนตัวตามแนวดิ่งเมื่อพิจารณาเฉพาะความกว้าง

ตามผลการศึกษาข้างต้น เชื่อมกันคลื่นขนาดหนึ่งๆ จึงเหมาะกับคุณลักษณะคลื่นเพียงคุณลักษณะเดียว ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญของการนำเชื่อมกันคลื่นแบบลอยน้ำไปใช้งานหลายสถานที่ เพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดข้างต้น เชื่อมกันคลื่นแบบลอยน้ำดันแบบที่ Fousert (2006) ออกแบบในงานวิจัยสำหรับนำไปป้องกันคลื่นใต้น้ำขนถ่ายตู้คอนเทนเนอร์บนโป๊ะกลางทะเลซึ่งมีคาบเวลาค้นตั้งแต่ไม่น้อยกว่า 9.5 วินาที ถึง 17 วินาที จึงเป็นเชื่อมกันคลื่นที่สามารถปรับขนาดได้ เช่น สามารถปรับความกว้างได้ระหว่าง 20 – 60 เมตร และสามารถปรับระยะกินน้ำลึกได้ระหว่าง 28 - 32 เมตร เป็นต้น (ดูรูปที่ 3.8)



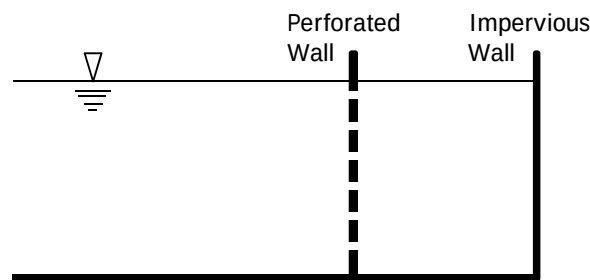
รูปที่ 3.8 เชื้อนกมันคั่นแบบลอยน้ำต้นแบบของ Fousert (2006)

3.4 แบบแผงกรองคลื่น

การทบทวนงานศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำแผงกรองคลื่นมาลดความสูงคลื่นครอบคลุมทั้งแผงกรองคลื่นแบบจาตัน⁵ แบบแผ่นเจาะรู (Perforated wall) แบบช่องว่างอยู่ในแนวตั้ง (Vertical slot wall) และแบบช่องว่างอยู่ในแนวนอน (Horizontal slot wall)

3.4.1 แบบจาตัน

Fugazza and Natale (1992) ศึกษาการลดความสูงคลื่นที่สะท้อนกลับโดยใช้แผงกรองคลื่นแบบจาตัน (ดูรูปที่ 3.9) ซึ่งประกอบด้วยผนังที่มีรูพรุนให้คลื่นเคลื่อนที่ผ่านไปได้อยู่ด้านหน้า กับมีผนังทึบอยู่ด้านหลัง ปกติติดตั้งในแอ่งจอดเรือเพื่อดูดซับพลังงานคลื่นไม่ให้สะท้อนกลับไปกลับมา



รูปที่ 3.9 แผงกรองคลื่นแบบจาตันที่ Fugazza and Natale (1992) ศึกษา

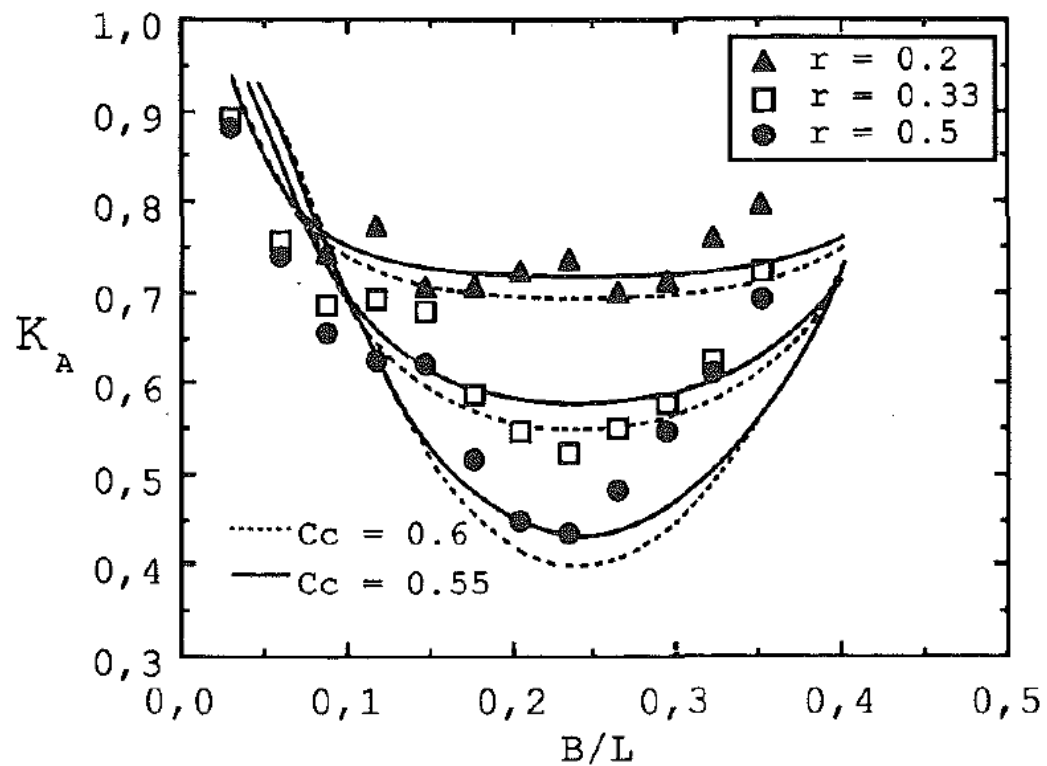
การศึกษาของ Fugazza and Natale (1992) ทั้งทางทฤษฎีและการทดลองได้ข้อสรุปว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่น (K_A) ซึ่งเท่ากับอัตราส่วนความสูงคลื่นที่สะท้อนกลับต่อความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าหาเขื่อน (H_r/H_i) มีค่าต่ำที่สุดเมื่อระยะห่างระหว่างผนังโปร่งกับผนังทึบเท่ากับ $1/4$ ของความยาวคลื่น (ดูรูปที่ 3.10 กราฟเส้นแสดงค่าทางทฤษฎี ส่วนจุดแสดงผลการทดลอง) โดย Fugazza อธิบายว่าเป็นระยะที่ทำให้คลื่นที่สะท้อนกลับไปกลับมาภายในห้อง (Chamber)⁶ หักล้างกันพอดี นอกจากนี้ มีคำอธิบายเพิ่มเติมเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียแรงดันน้ำที่เคลื่อนที่ผ่านรูแผงกรองคลื่น (C_c : Contraction coefficient of water jet) ว่าขึ้นกับขนาดช่องเปิดและความหนาแผงกรอง

⁵ ปกติติดตั้งในแอ่งจอดเรือ มีวัตถุประสงค์เพื่อลดคลื่นที่เกิดจากเรือไม่ให้สะท้อนไป-มา เสนอโดย Jarlan (1961)

อ้างอิงโดย Fugazza and Natale (1992)

⁶ หมายถึงพื้นที่ระหว่างแผงกรองคลื่นกับกำแพงคอนกรีตที่อยู่ด้านหลัง

คลื่น ส่วนผลของความพรุน (r) พบว่าผนังที่มีความพรุนต่ำทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.10 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแผงกรองคลื่นแบบจาตัน

ของ Fugazza and Natale (1992)

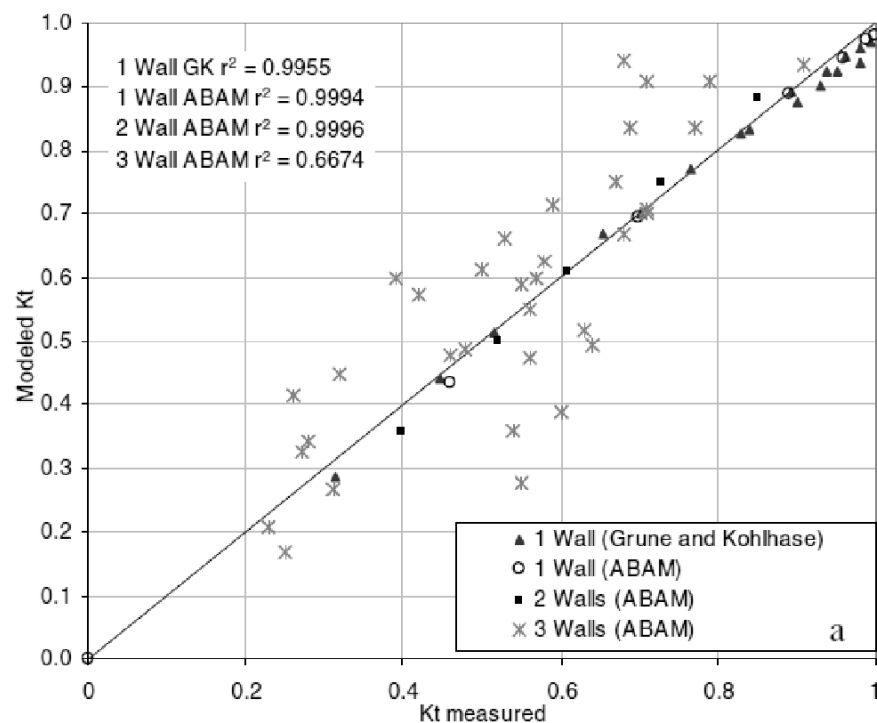
3.4.2 แบบแผ่นเจาะรู

Shepsis (2007) เสนอประสบการณ์งานศึกษา วิเคราะห์ และออกแบบเขื่อนกันคลื่นแบบใช้ผนังพรุน แนวตั้ง (Perforated vertical breakwaters) เป็นแนวป้องกันคลื่นให้ท่าเรือโดยสารในเมืองปูซาน ประเทศเกาหลีใต้ กับเป็นโครงสร้างลดคลื่นในโครงการปรับปรุงทางเดินเรือของท่าเรือโอคแลนด์ ประเทศสหรัฐอเมริกา

เขื่อนกันคลื่นที่ทำเรือโดยสารในเมืองปูซานตั้งอยู่ในบริเวณความลึกน้ำ 12 เมตร มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันคลื่นที่เกิดจากแรงลม ความสูง 1.4 - 2.5 เมตร คาบเวลา 7 - 15 วินาที ให้เหลือความสูงคลื่นในแอ่งจอดเรือไม่เกิน 0.5 เมตร โดยจากข้อจำกัดความลึกน้ำและสภาพดินอ่อน การออกแบบเลือกใช้แผงกรองคลื่นที่มีความพรุนต่างกัน เรียงต่อกัน 3 แผง เป็นแนวป้องกันคลื่น ระยะห่างระหว่างแผงกรอง

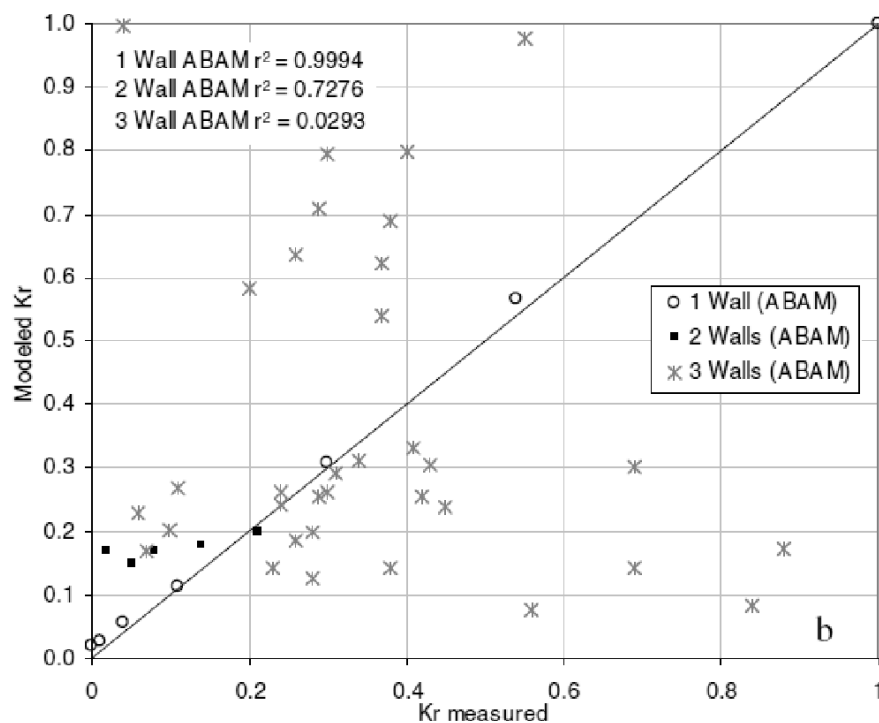
คลื่นแพงที่ 1 (แพงนอก) กับแพงที่ 2 (แพงกลาง) เท่ากับ 16.4 เมตร ส่วนระยะห่างระหว่างแพงกรองคลื่นแพงที่ 2 กับแพงที่ 3 (แพงด้านในสุด) เท่ากับ 1.3 เมตร

การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (K_t) โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลอง 1-D Multi-wall Porous Breakwater Model กับผลทดลองในงานศึกษาของ Grune and Kohlhasse (1974) กรณีแพงกรองคลื่นแพงเดียว และ ABAM (1993) กรณีแพงกรองคลื่นสองและสามแพง ตามผลวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 3.11 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงมาก ($R^2 > 0.99$) กรณีแพงกรองคลื่นแพงเดียวและสองแพง แต่มีค่าลดลงมากกรณี 3 แแพง ($R^2 = 0.6674$) ทำนองเดียวกัน การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์คลื่นสะท้อนกลับ (K_r) ตามผลวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 3.12 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงมากกรณีแพงกรองคลื่นแพงเดียว แต่มีค่าลดลงมากกรณี 2 แแพง และ 3 แแพง (R^2 กรณี 2 แแพง = 0.7276 และมีค่าลดลงเหลือ 0.0293 กรณี 3 แแพง)

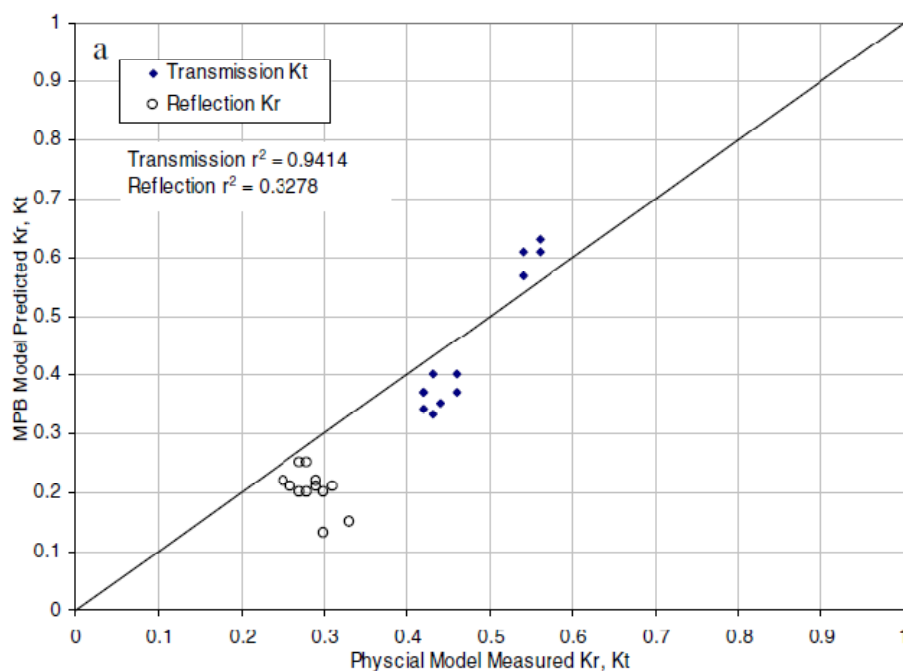


รูปที่ 3.11 การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลทดลองของ Grune and Kohlhasse (1974) และ ABAM (1993) กรณีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น

การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลอง 1-D Multi-wall Porous Breakwater Model กับผลทดลองของ Shephsis (2007) กรณีแผงกรองคลื่น 3 แผง ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ได้ผลทำนองเดียวกัน คือ ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสนใจก่อนข้างสูงกรณีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น แต่ได้ค่า R^2 เพียง 0.3278 กรณีค่าสัมประสิทธิ์คลื่นสะท้อนกลับ ผลการศึกษาข้างต้นแสดงถึงความแปรปรวนกรณีแผงกรองคลื่น 3 แผง

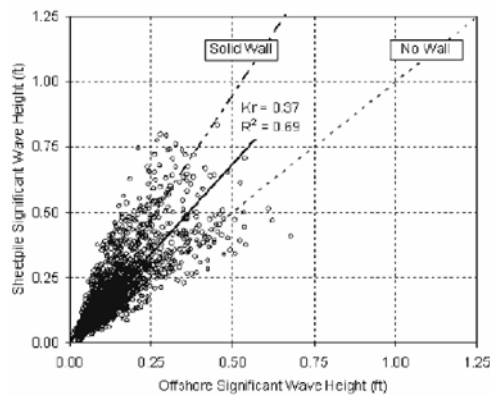


รูปที่ 3.12 การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลทดลองของ Grune and Kohlhasse (1974) และ ABAM (1993) กรณีค่าสัมประสิทธิ์คลื่นสะท้อนกลับ

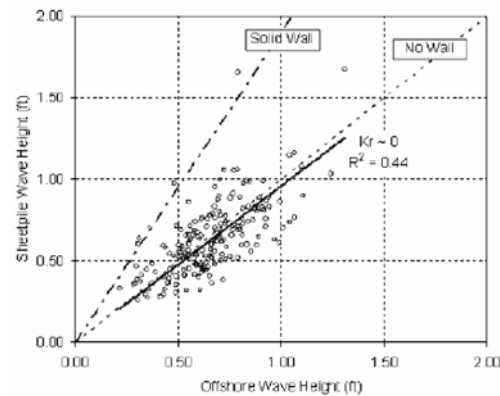


รูปที่ 3.13 การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลทดลอง
ของ Shepsis (2007) กรณีแผงกรองคลื่น 3 แผง

แผงกรองคลื่นที่ไอ้คแลนด์มีวัตถุประสงค์เพื่อกันตะกอนที่นำมาทิ้งหลังขุดลอก กับเพื่อลดความสูงคลื่นที่สะท้อนกลับจากแผงกรองคลื่นทั้งคลื่นที่เกิดจากแรงลมและคลื่นที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของเรือ โดยจากความลึกน้ำประมาณ 6.1 เมตร (20 ฟุต) Shepsis ใช้แผ่นซีตไพล์ (Sheet pile) เป็นแผงกรองคลื่นโดยตอกแผ่นซีตไพล์ 3 แผ่น เว้น 1 แผ่น (ความพรุน 25%) การตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (H_r/H_i) ในสนามหลังติดตั้ง ตามแสดงในรูปที่ 3.14 พบว่าความสูงคลื่นอยู่ระหว่างกรณีไม่มีแผงกรองคลื่น ($H_r/H_i = 1.0$) กับกรณีแผงทึบ ($H_r/H_i = 2.0$) เมื่อเป็นคลื่นที่เกิดจากแรงลม แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเข้าใกล้ศูนย์ ("0") เมื่อเป็นคลื่นที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของเรือ



(ก) ผลตรวจวัดคลื่นทั้งหมด

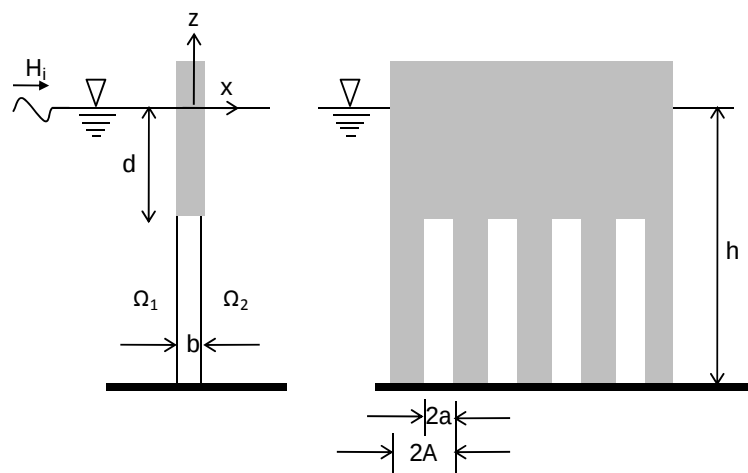


(ข) ผลตรวจวัดเฉพาะคลื่นที่เกิดจากเรือเคลื่อนที่

รูปที่ 3.14 ผลทดลองวัดความสูงคลื่นหลังติดตั้งแผงกรองคลื่น Shepsis (2007)

3.4.3 แบบช่องว่างอยู่ในแนวดิ่ง

Suh et al. (2006) ศึกษาสมรรถนะเขื่อนกันคลื่นชนิดมีผนังที่บิด้านบนและมีเสาเข็มรองรับด้านล่าง (Pile-supported vertical wall) ซึ่งมีความกว้าง b ระยะกั้นน้ำลึก d ในน้ำลึก h ความพรุนของผนังด้านล่าง a/A ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าหาเขื่อนกันคลื่น H_i ความเร็วเชิงมุม ω พื้นที่ 1 อยู่ด้านหน้าเขื่อนกันคลื่น พื้นที่ 2 อยู่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ทั้งทางทฤษฎีและการทดลองในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.15 เขื่อนกันคลื่นแบบใช้ผนังที่บิด้านบนและมีเสาเข็มรับด้านล่าง
ในงานศึกษาของ Suh et al (2006)

การศึกษาทางทฤษฎีสมมุติให้ของเหลวอัดไม่ได้ (Incompressible fluid) เคลื่อนที่ไปแบบไม่มีการหมุน (Irrotational) แล้วใช้สมการศักย์ความเร็ว (Velocity potential) ซึ่งสอดคล้องกับสมการลาปลาซ (Laplace equation) อธิบายพฤติกรรมของของเหลว โดยตามนิยามแสดงในรูปที่ 3.15 สามารถแสดงคุณสมบัติของของเหลวและเงื่อนไขขอบเขตได้ตามสมการที่ (5) – (9) ดังนี้

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \Phi = 0 \text{ at } z = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \text{ at } z = -h \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} = 0 \text{ for } -d \leq z \leq 0, x = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} = iG(\Phi_1 - \Phi_2) \text{ for } -h \leq z \leq -d, x = 0 \quad (9)$$

โดย i แสดงการใช้ค่าเสมือนของสมการ ($i = \sqrt{-1}$) และ G เป็นพารามิเตอร์ความพรุนของผนัง (Permeable parameter) ซึ่ง Suh et al (2006) ประยุกต์ใช้ตามงานศึกษาของ Mei et al. (1974) กำหนดให้ขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงาน (β) ความเร็วเชิงมุม (ω) และความยาวลำน้ำ (l) ที่เคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างเสาเข็ม ดังแสดงในสมการที่ (10) โดยค่าจริงของสมการที่ (10) เป็นแรงเสียดทานของผนังพรุนขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การไหลผ่านช่องเปิด ส่วนค่าเสมือนแทนความต่างมุม (Phase difference) จากผลของความแข็งแรงของโครงสร้าง (Inertia effect)

$$G = \frac{1}{\frac{\beta}{\omega} - il} \quad (10)$$

การแก้สมการ (5), (6) และ (7) โดยใช้ส่วนขยายของไอเจนฟังก์ชัน (Eigenfunction Expansion Method) ได้สมการศักย์ความเร็วของพื้นที่ 1 และพื้นที่ 2 ตามแสดงในสมการที่ (11) และ (12) โดย μ_m เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับความยาวคลื่น (dispersion relation) ของคลื่นหลังแผ่กรอง

คลื่น และ Φ_i เป็นศักย์ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าหาเขื่อนกันคลื่นมีค่าตามแสดงในสมการที่ (13)

$$\Phi_1 = \Phi_i - \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cos[\mu_m(h+z)] \exp(\mu_m x) \quad (11)$$

$$\Phi_2 = \Phi_i + \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cos[\mu_m(h+z)] \exp(-\mu_m x) \quad (12)$$

$$\Phi_i = \cosh[k(h+z)] \exp(ikx) \quad (13)$$

การนำคุณสมบัติที่ขอบเขต ตามแสดงในสมการที่ (8), (9) และ (10) มาแก้สมการข้างต้นได้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (C_t) ค่าสัมประสิทธิ์คลื่นสะท้อนกลับ (C_r) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานคลื่น (C_l) ตามแสดงในสมการที่ (14) ถึง (15) ตามลำดับ โดยค่า A_0 เป็นค่าคงที่ตัวแรกของสมการที่ (11) กับสมการที่ (12)

$$C_t = |1 + A_0| \quad (14)$$

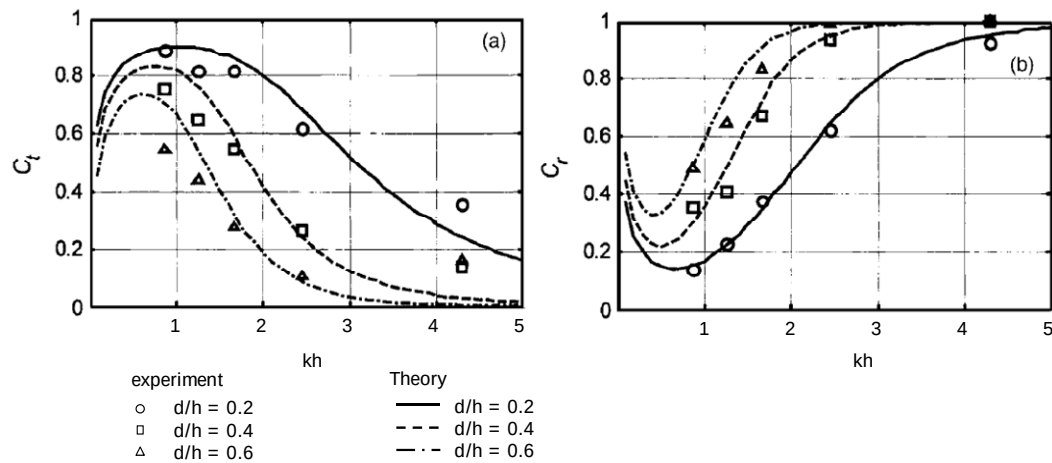
$$C_r = |A_0| \quad (15)$$

$$C_l = 1 - C_r^2 - C_t^2 \quad (16)$$

การทดลองในห้องปฏิบัติการใช้รางเปิดยาว 104 เมตร กว้าง 3.7 เมตร ลึก 4.6 เมตร ความลึกน้ำในการทดลอง 2.4 เมตร เสาเข็มที่ใช้ในการทดลองเป็นเสาเข็มสี่เหลี่ยมกว้าง 7.15 เซนติเมตร เว้นระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 7.15 เซนติเมตร (ความพรุน 50%) คลื่นที่ทำการทดลองกรณีคลื่นสม่ำเสมอ (Regular wave) ปรับตั้งให้คาบเวลาคลื่นมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 – 4.0 วินาที เปลี่ยนทุก 0.5 วินาที ส่วนความสูงคลื่นปรับให้ความชันคลื่น (H/L) คงที่เท่ากับ 0.03 การทดลองกรณีคลื่นไม่สม่ำเสมอ (Irregular wave) ปรับตั้งให้คาบเวลาคลื่นที่ค่าสเปกตรัมสูงสุด (Peak wave period: T_p) กับความชันคลื่นเท่ากับการทดลองกรณีคลื่นสม่ำเสมอ ทำให้ความสูงคลื่นนัยสำคัญที่เคลื่อนที่เข้าหาเขื่อนกันคลื่นมีค่าระหว่าง 9.5 – 49.7 เซนติเมตร นอกจากนั้น มีการปรับค่าอัตราส่วนระยะจมน้ำของผนังต่อดความลึกน้ำ (d/h) ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 – 0.6

ผลการศึกษาทางทฤษฎีและการทดลองสอดคล้องกัน สรุปว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนความลึกน้ำ kh (เมื่อ k เป็นค่า wave number $= 2\pi/L$ และ h เป็นความลึกน้ำ) จึงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L) และพบว่าเมื่ออัตราส่วนระยะจมน้ำของผนังต่อดความลึกน้ำ (d/h) เพิ่มขึ้นก็ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นลดลง ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะสลับกันกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ คือ เมื่อค่าสัมประสิทธิ์

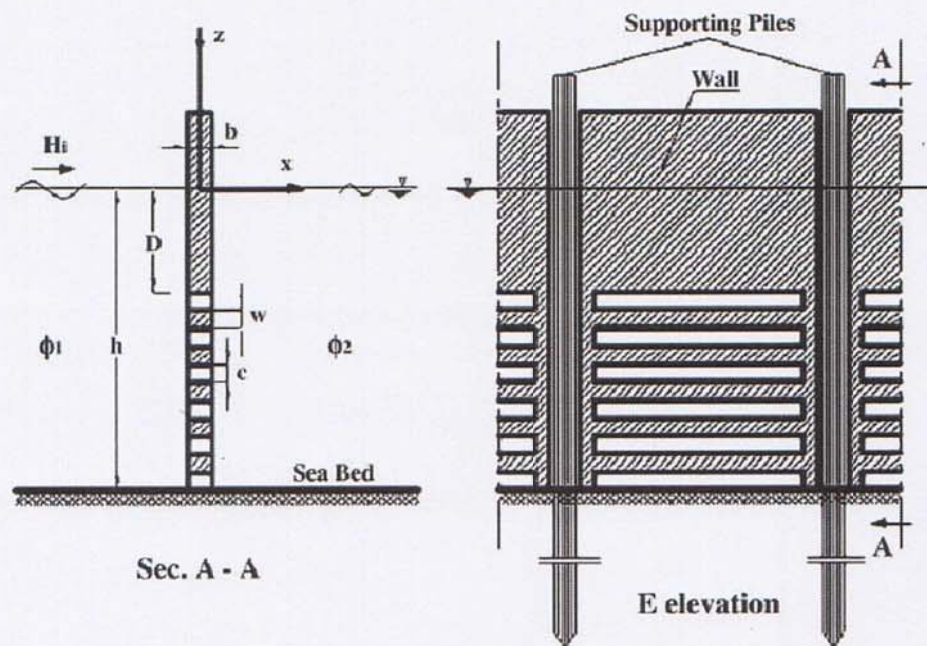
การส่งผ่านคลื่นลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับก็เพิ่มขึ้น รายละเอียดการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและตามทฤษฎีแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและค่าตามทฤษฎีของ Suh et al. (2006)

3.4.4 แบบช่องว่างอยู่ในแนวนอน

Rageh and Koriarn (2010) ศึกษาสมรรถนะแผงกรองคลื่นชนิดมีผนังทึบด้านบนกับมีช่องเปิดตามแนวนอนด้านล่าง (Vertical wall with horizontal slots) ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ทั้งทางทฤษฎีและการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยการศึกษาทางทฤษฎีมีรายละเอียดคล้ายงานศึกษาของ Suh et al (2006) คือใช้วิธีส่วนขยายของไอเจนฟังก์ชัน (Expanded Eigenfunction Method) มาแก้สมการศักย์ความเร็ว (Velocity potential) แล้วใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) มาวิเคราะห์หาค่าคงที่ของสมการรายละเอียดที่ต่างกัน คือ มีการนำผลทดลองมาปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานผ่านช่องเปิด



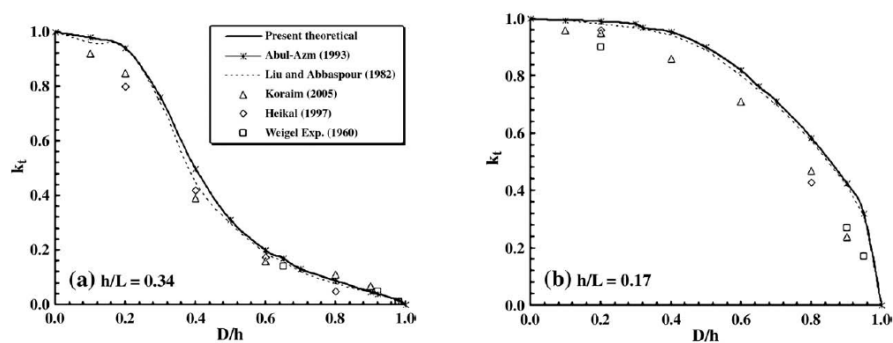
รูปที่ 3.17 แผงกรองคลื่นในงานศึกษาของ Rageh and Koriarn (2010)

เพื่อจำลองการติดตั้งแผงกรองที่ความลึกน้ำ 15 เมตร คาบเวลาคลิ้น 4.9 – 10.4 วินาที โครงสร้างผนังพูนเป็นคานลึก 60 เซนติเมตร สลักกับช่องเปิดสูง 60 เซนติเมตร (ความพูนร้อยละ 50) งานวิจัยของ Rageh and Koriarn (2010) จำลองสถานการณ์ดังกล่าวด้วยค่า Froude Number⁷ ที่มาตราส่วน 1: 30 ได้ข้อกำหนดการทดลองในรางเปิด คือ ความลึกน้ำ 0.5 เมตร คาบเวลาคลิ้น 0.9 – 1.9 วินาที โครงสร้างที่วางตัวในแนวนอนลึก 2 เซนติเมตร สลักกับช่องเปิดสูง 2 เซนติเมตร และมีการทดลองปรับระยะจมน้ำของแผงที่ด้านบนระหว่าง 0.1 – 0.26 เมตร โดยไม่มีกรณีผนังที่จมได้น้ำทั้งหมด

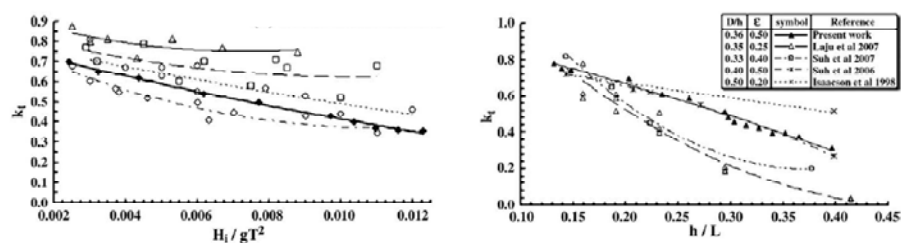
ผลการศึกษาสรุปว่าการวิเคราะห์โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานผ่านช่องเปิด 5.5 ให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นและคลื่นสะท้อนกลับสอดคล้องกับค่าที่วัดได้ในการทดลองมากที่สุด และตามแสดงในรูปที่ 3.18 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนระยะกินน้ำลึกต่อความลึกน้ำ (D/h) เพิ่มขึ้น แต่มีรูปแบบที่อัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L) แต่ละค่าต่างกับตามแสดงในรูปที่ 3.18 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า H/gT^2 กับค่า h/L เพิ่มขึ้น

⁷ Froude number เป็นตัวเลขไม่มีหน่วย หมายถึงอัตราส่วนแรงเฉื่อยต่อแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ $\frac{V}{\sqrt{gL}}$ เมื่อ V หมายถึงความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ย g หมายถึงอัตราเร่งจากแรงโน้มถ่วง และ L หมายถึงความยาววัตถุในสนามการไหลที่พิจารณา (Munson (2010))

สำหรับผลกระทบจากความพรุน และอัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L) ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (k_t) การสะท้อนกลับ (k_r) และการสูญเสียพลังงาน (k_d)⁸ ตามแสดงในรูปที่ 3.19 Rageh and Koriem (2010) สรุปว่าเมื่อความพรุนของผนังคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (k_t) มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L) เพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนระยะกินน้ำลึกต่อความลึกน้ำ (D/h) ที่มากทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นลดลงต่อไปอีก นอกจากนี้ พบว่าผนังที่มีความพรุนน้อย (ผนังมีความทึบน้ำมาก) ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นลดลง สะท้อนกลับมากขึ้น พร้อมทั้งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานมีค่าสูงสุดที่ความลึกน้ำลดลง

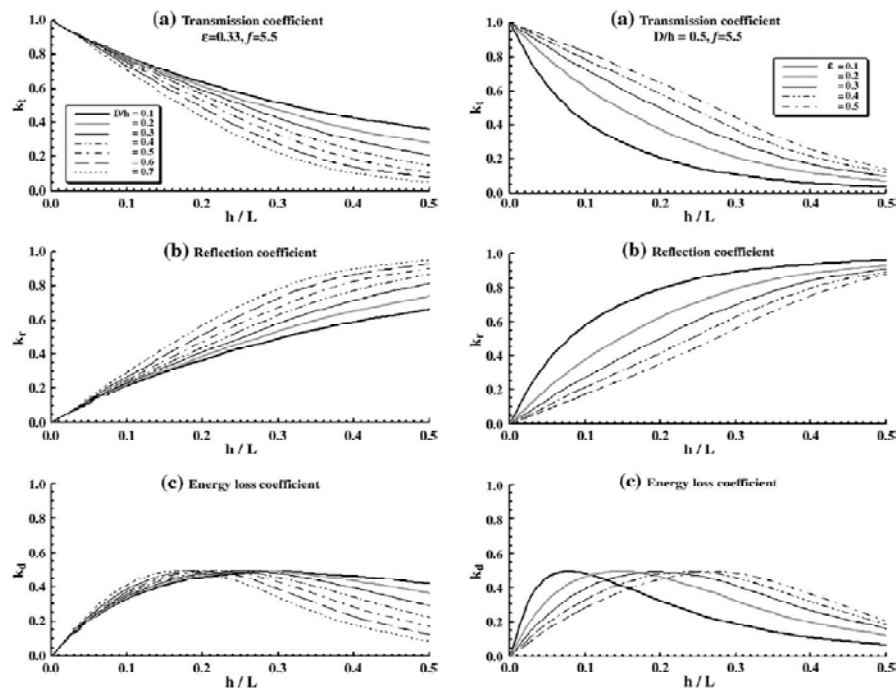


รูปที่ 3.18 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับอัตราส่วนระยะกินน้ำลึกต่อความลึกน้ำ (D/h) และอัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L) ของ Rageh and Koriem (2010)



รูปที่ 3.19 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับคุณสมบัติคลื่น (H_1/gT^2) และอัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L) ของ Rageh and Koriem (2010)

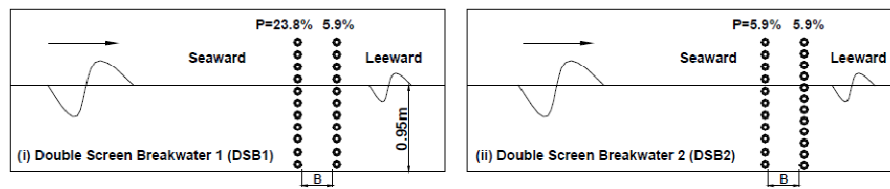
⁸ สัญลักษณ์ใช้ตามแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น การสะท้อนกลับ และการสูญเสียพลังงาน กับอัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L) และความพรุนของ Rageh and Koriem (2010)

งานศึกษาของ Balaji and Sundar (2002) ทำคล้ายงานศึกษาของ Rageh and Koriem (2010) แต่ครอบคลุมเฉพาะการทดลองในห้องปฏิบัติการ และใช้ทอรูปหน้าตัดกลมวางตัวในแนวนอนแทนการรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยม กับเป็นการศึกษาการทำงานของแผงกรองคลื่นที่ติดตั้งซ้อนกัน 2 แผง (Double Wavescreen)

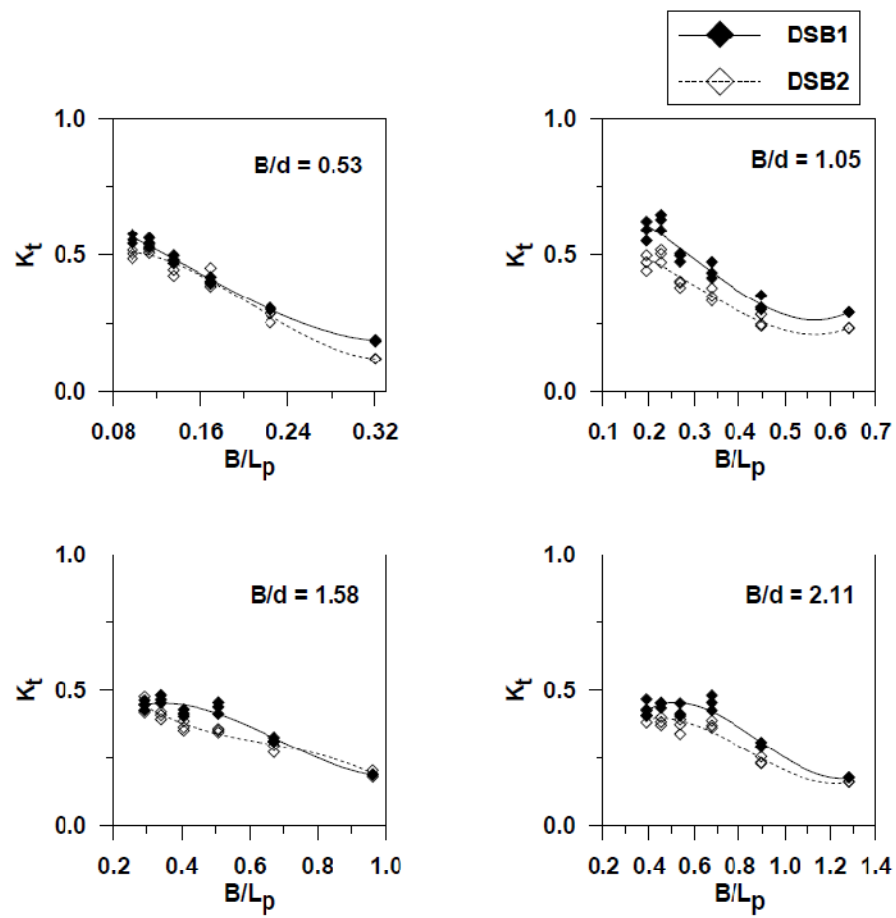
การทดลองของ Balaji and Sundar (2002) ทำในรางเปิดขนาด 72.5x2.0x2.7 เมตร ความลึกน้ำที่ใช้ในการทดลอง 0.95 เมตร แผงกรองคลื่นที่ติดตั้งมี 2 แผง วางห่างกัน 0.5 – 2.0 เมตร เลื่อนครั้งละ 0.5 เมตร วัสดุที่ใช้ทำแผงกรองคลื่นเป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 160 มิลลิเมตร วางตัวในแนวนอนติดตั้งโดยปรับระยะห่างตามแนวตั้งให้ความพรุนแผงด้านหน้าเปลี่ยนแปลงระหว่าง 5.9% กับ 23.8% แผงหลังมีความพรุนคงที่ 5.9% ทำให้เกิดแผงกรองคลื่นแบบ DSB1 เมื่อแผงกรองคลื่นด้านหน้าพรุนกว่าแผงหลัง กับแบบ DSB2 เมื่อความพรุนทั้ง 2 แผง เท่ากัน (ดูรูปที่ 3.21) คลื่นที่ใช้ในการทดลองปรับให้มีค่าสเปกตรัมสูงสุด (Peak spectrum) ที่คาบเวลาคลื่นสูงสุด (Peak period: T_p) 1.0 ถึง 2.0 วินาที ปรับทุก 0.2 วินาที โดยทุกๆ ค่า T_p มีการปรับความสูงคลื่นนัยสำคัญให้อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผงกรองคลื่นต่อความยาวคลื่น (B/L) เปลี่ยนแปลงระหว่าง 0.97 – 1.28



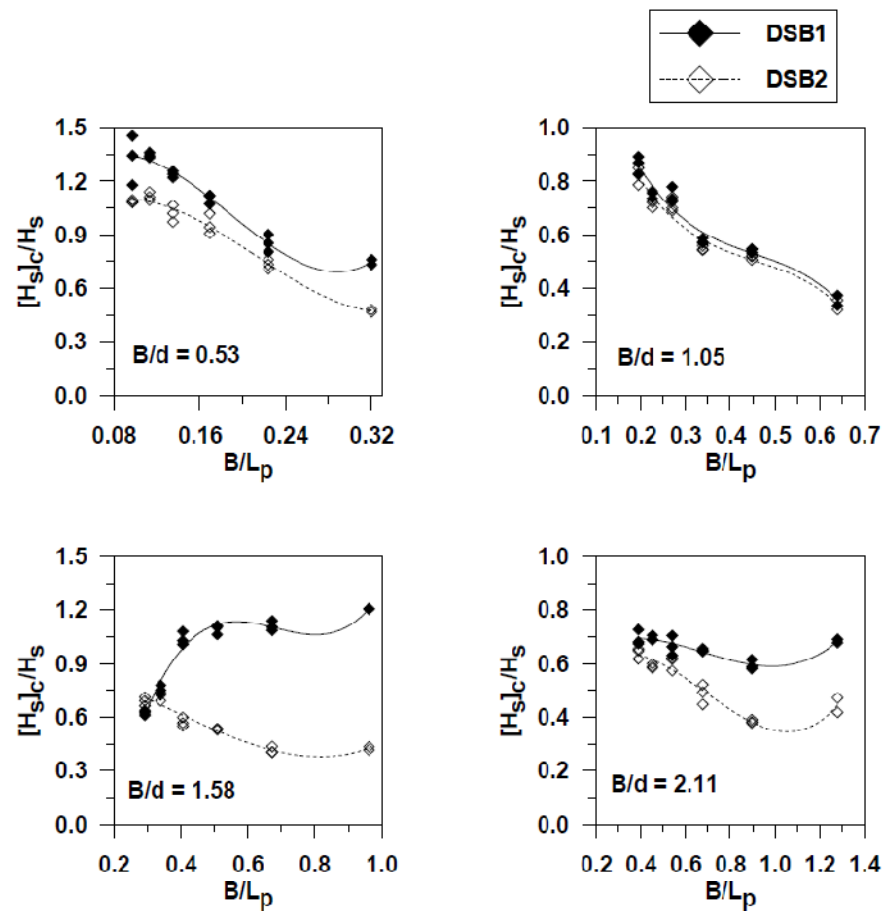
รูปที่ 3.21 แผงกรองคลื่นในงานศึกษาของ Balaji and Sundar (2002)

ผลการทดลองของ Balaji and Sundar (2002) ตามแสดงในรูปที่ 3.22 สรุปว่าอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผงต่อความยาวคลื่น (B/L) ที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นลดลง ทำนองเดียวกับผลกระทบจากอัตราส่วนระยะห่างระหว่างผนังต่อความลึกน้ำ (B/d) โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีค่าต่ำกว่า 0.5 เมื่อค่า B/d เท่ากับ 1.58 กับ 2.11 ส่วนผลกระทบจากความพรุนของผนังด้านหน้า พบว่าความพรุนผนังด้านหน้าที่เพิ่มขึ้น (กรณีเปรียบเทียบ DSB1 กับ DSB2) ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเพิ่มขึ้น

สำหรับความปั่นป่วนของผิวน้ำในช่องระหว่างแผงกรองคลื่น ตามแสดงในรูปที่ 3.23 Balaji and Sundar (2002) สรุปว่าผิวน้ำระหว่างแผงกรองคลื่นมีความปั่นป่วนขนาดทำให้ความสูงคลื่นช่วงตรงกลางระหว่างแผงกรองคลื่นสูงกว่าความสูงคลื่นด้านหน้าแผงกรองคลื่นที่อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผงกรองคลื่นต่อความยาวคลื่น (B/L_p) ต่ำๆ โดยเฉพาะที่ค่าอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผงกรองคลื่นต่อความลึกน้ำ (B/d) 0.53 แนวโน้มดังกล่าวลดลงเมื่อค่า B/d เพิ่มขึ้นจนอยู่ในทิศทางเกือบตรงกันข้ามเมื่อ B/d เท่ากับ 1.58 และ 2.11



รูปที่ 3.22 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (K_t) กับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผงกรองคลื่น (B) ต่อความยาวคลื่น (L_p) และความลึกน้ำ (d) ของ Balaji and Sundar (2002)



รูปที่ 3.23 การศึกษาความปั่นป่วนของผิวน้ำช่วงระหว่างแผงกรองคลื่นกับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผงกรองคลื่น (B) ต่อความยาวคลื่น (L_p) และความลึกน้ำ (d) ของ Balaji and Sundar (2002)

Krishnakumar et al. (2010) ศึกษาสมรรถนะแผงกรองคลื่นแบบติดตั้งท่อกลมในแนวนอนคล้ายงานศึกษาของ Balaji and Sundar (2002) แต่ครอบคลุมทั้งกรณีแผงเดี่ยวและสองแผง การทดลองทำในรางเปิดยาว 72.5 เมตร กว้าง 2 เมตร ลึก 2.7 เมตร ความลึกน้ำที่ใช้ในการทดลอง 0.95 เมตร ความถี่คลื่นอยู่ระหว่าง 0.5 – 1.0 เฮิรตซ์ (Hz) เปลี่ยนครั้งละ 0.1 เฮิรตซ์ ความสูงคลื่นมี 3 ขนาด คือ 0.05 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ท่อกลมที่ติดตั้งในแนวนอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร

การทดลองกรณีแผงกรองคลื่นแผงเดี่ยวติดตั้งท่อกลมให้มีช่องเปิด 0.5 เซนติเมตร (ความพรุน 9.1%) ทุกการทดลอง การทดลองกรณีแผงกรองคลื่น 2 แผง ความพรุนแผงกรองคลื่นแผงแรกใช้ 9.1% คงที่ทุกการทดลอง ความพรุนแผงที่ 2 มี 2 ขนาด คือ 9.1% กับ 23.1% (ระยะห่างระหว่างท่อกลม 1.5 เซนติเมตร)

ระยะห่างระหว่างแผงใช้ 0.5 เมตร และในขณะที่แผงกรองคลื่นแผงที่สองจมตลอดความลึกน้ำ อัตราส่วนระยะจมน้ำของแผงกรองคลื่นแผงแรกต่อความลึกน้ำเปลี่ยนแปลงระหว่าง 0.25 – 1.0 เปลี่ยนครั้งละ 0.25

ผลการทดลองกรณีแผงกรองคลื่นชั้นเดียวสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นลดลงเมื่อ อัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L) เพิ่มขึ้น และมีค่าต่ำที่สุดเมื่ออัตราส่วนระยะจมน้ำต่อความลึกน้ำเท่ากับ 1.0 (ระยะจมน้ำเท่ากับความลึกน้ำ) การวิเคราะห์ด้วยวิธีถดถอย (Regression analysis) ที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) 0.99 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับตัวแปรที่สำคัญตามแสดงในสมการที่ (17)

$$K_t = 0.81 - 1.23\left(\frac{H_i}{L}\right) - 0.12\left(\frac{d_s}{h}\right) - 0.17\left(\frac{h}{L}\right) \quad (17)$$

เมื่อ

K_t	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น
H_i	ความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าหาแผงกรองคลื่น
L	ความยาวคลื่น
d_s	ระยะจมน้ำของแผงกรองคลื่น
h	ความลึกน้ำ

การทดลองกรณีแผงกรองคลื่นสองชั้นพบว่าในกรณีระยะจมน้ำของแผงกรองคลื่นแผงแรกลึกตลอดความลึกน้ำ อัตราส่วนความสูงคลื่นช่วงระหว่างแผงกรองคลื่นต่อความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าหาแผงกรองคลื่น (H_c/H_i)⁹ มีโอกาสมีค่ามากกว่า 1.0 เมื่ออัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L) น้อยกว่า 0.3 และอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผงกรองคลื่นต่อความยาวคลื่น (B/L) น้อยกว่า 0.16 กับพบว่าเมื่ออัตราส่วนระยะจมน้ำต่อความลึกน้ำลดลง ชิดจำกัดข้างต้นก็เพิ่มเป็น 0.4 กับ 0.2 ตามลำดับ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น การวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอย ที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 0.92 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามแสดงในสมการที่ (18)

⁹ H_c หมายถึงความสูงคลื่นภายในห้อง (chamber) ซึ่งเกิดระหว่างแผงกรองคลื่น 2 แผง H_i หมายถึงความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าหาแผงกรองคลื่น (incident wave)

$$K_t = 0.73 - 1.15 \left(\frac{H_i}{L} \right) - 0.08 \left(\frac{d_s}{h} \right) - 0.15 \left(\frac{h}{L} \right) \quad (18)$$

3.4.5 สรุปการศึกษาแพรงรองคลื่น

การทบทวนงานศึกษาวิจัยเกี่ยวกับแพรงรองคลื่นของ Rageh O.S., and Koriem A.S. (2010) พบงานศึกษาวิจัยในมุมมองต่างๆ ตั้งแต่ปี ค.ศ.1947 มากกว่า 20 ฉบับ (ดูตารางที่ 3.1) สรุปว่ามีการศึกษาทั้งค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (K_t) การสะท้อนกลับ (K_r) การสูญเสียพลังงาน (K_d) การยกตัวของน้ำบนแพรงรองคลื่น (Run up) และแรงที่กระทำกับแพรงรองคลื่น คลื่นที่ศึกษามีทั้งคลื่นสม่ำเสมอ (Regular wave) ไม่สม่ำเสมอ (Irregular wave) ทฤษฎีที่ใช้มีทั้งทฤษฎีคลื่นในน้ำลึก ทฤษฎีพลังงาน สมการ Navier Stokes การใช้เงื่อนไขขอบเขต ตลอดจนการใช้สมการเชิงประจักษ์ (Empirical) ซึ่งโดยรวมเป็นการนำค่าที่วัดได้ในห้องปฏิบัติการมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของสมการ แต่ทั้งหมดไม่มีกรณีศึกษากับแพรงรองคลื่นจริงในทะเลชนิดเดียวกับงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 งานศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลำดับ	อ้างอิง	ชนิดโครงสร้าง	วัตถุประสงค์งานวิจัย (ลักษณะงานวิจัย)	ทฤษฎี	การทดลอง (ขนาด flume และ ความลึกน้ำเป็นเมตร)	ชนิดคลื่น	ช่วงตัวแปรหลัก
1	Ursell (1947)	Semi-immersed, thin, vertical, solid barrier	K_t	Deep water theory	-	Regular	$kh = 0.2 - 2.0$ $D/h = 0 - 0.95$
2	Wiegel (1960)	Semi-immersed, thin, vertical, solid barrier	K_t	Power theory	$10 \times 0.3 \times 1.2$ $h = 0.8$	Regular	$kh = 0.2 - 2.0$ $D/h = 0 - 0.95$
3	Liu and Abbsorp. 1982	Semi-immersed, thin, sloped, solid barrier	K_t , K_r and forces	Boundary integral equation	-	Regular	$kh = 0.2 - 2.0$ $D/h = 0 - 0.95$ $\theta = -45 - 45$
4	Kriebel (1992)	Single thin, vertical, slotted barriers	K_t and forces	Empirical equation	-	Regular	$h/L > 0.5$ $H_i/L = 0.025 - 0.07$ $\varepsilon = 0.1 - 0.5$
5	Reddy and Neelamani	Semi-immersed, thin, vertical, solid barrier	K_t and K_r	Power theory	$10 \times 0.3 \times 1.2$ $h = 0.8$	Regular	$h/L = 0.8 - 2.5$ $H_i/L = 0.005 - 0.14$ $D/h = 0.06 - 0.5$
6	Abul-Azm (1993)	Semi-immersed, thin, vertical, solid barrier	K_t and K_r	Eigen function expansion	-	Regular	$kh = 0.2 - 6.0$ $D/h = 0 - 1.0$

ลำดับ	อ้างอิง	ชนิดโครงสร้าง	วัตถุประสงค์งานวิจัย (ลักษณะงานวิจัย)	ทฤษฎี	การทดลอง (ขนาด flume และ ความลึกน้ำเป็นเมตร)	ชนิดคลื่น	ช่วงตัวแปรหลัก
7	Mani and Jayakumar (1995)	Single suspended pipe breakwater	K_t and forces	-	30x2.0x1.5 h = 1.0	Regular	$H_i/gT^2 = 0.002 - 0.016$ $D/h = 0.26 - 0.56$ $\varepsilon = 0.1 - 0.5$
8	Heikal (1997)	Semi-immersed, thin, vertical, solid barrier	K_t and H/H_i distribution	Eigen function expansion	15x0.3x0.8 h = 0.5	Regular	$\omega^2 h/g = 0.1 - 2.0$ $D/h = 0.2 - 0.8$ Sb = 0, 1 and 2%
9	Isaacson et al. (1998)	Semi-immersed, thin, vertical, slotted barrier	K_t , K_r , K_{rp} , R_{up} and forces	Eigen function expansion	20x0.62x1 h = 0.45	Regular and irregular	kh = 0.6 - 2.5 $H_i/L = 0.02 - 0.09$ $D/h = 0.5$ and 1.0 $\varepsilon = 0.11 - 1.0$
10	Mani (1998)	Single suspended pipe breakwater	K_t and forces	Empirical equation	30x2.0x1.5 h = 1.0	Regular	$H_i/gT^2 = 0.003 - 0.022$ $D/h = 0.26 - 0.56$ $\varepsilon = 0.11 - 1.0$
11	Clauss and Habel (1998)	Under filter system	K_p , K_r and K_d	Reynolds Average Navier Stokes equation	80x4.0x2.5 h = 0.45	Regular and irregular	$H_i/gT^2 = 0.01 - 0.05$ $d_s/h = 0.4 - 1.2$ $\varepsilon = 0.0 - 0.5$
12	Isaacson et al. (1999)	Semi-submersed vertical, slotted double barrier	K_t , K_r , K_{rp} , R_{up} and forces	Eigen function expansion	20x0.62x1 h = 0.45	Regular	kh = 0.5 - 2.5 $H_i/L = 0.07$ $D/h = 0.5$ and 1.0

ลำดับ	อ้างอิง	ชนิดโครงสร้าง	วัตถุประสงค์งานวิจัย (ลักษณะงานวิจัย)	ทฤษฎี	การทดลอง (ขนาด flume และ ความลึกน้ำเป็นเมตร)	ชนิดคลื่น	ช่วงตัวแปรหลัก
							$B/h = 0.22, 0.55, 1.1$ $\varepsilon = 0, 5, \text{ and } 10\%$
13	Bergmann (2000)	Thin, vertical screen single, double, and triple barriers (horizontal slots)	K_i, K_p, K_d , pressure and forces	-	$307 \times 5 \times 7$ $h = 3.25 - 4.75$	Regular	$h/L = 0.05 - 0.183$ $H_i = 0.5 - 1.5 \text{ m}$ $T = 4.5 - 12 \text{ s}$ $\varepsilon = 11 - 40.5\%$
14	Abdel-Mawla and Balah (2001)	Thin, vertical and sloped slotted double and triple barriers	K_i, K_p and K_d	-	$13 \times 0.3 \times 0.5$ $h = 0.3$	Regular	$H_i/gT^2 = 0.001 - 0.016$ $\varepsilon = 0.3, 0.15$ $\theta = 45$
15	Balaji and Sundar (2002)	Double screen (double rows of horizontal pipes)	K_i, K_p, K_d , and pressure	-	$72.5 \times 2 \times 2.7$ $h = 0.95$	Regular	$B/L = 0.2 - 0.65$ $B/d = 0.53 - 2.11$ $\varepsilon = 0.238, 0.059$
16	Galal (2002)	Single and double suspended pipe breakwater	K_i, K_p and K_d	-	$13 \times 0.3 \times 0.5$ $h = 0.3$	Regular	$H_i/gT^2 = 0.002 - 0.018$ $D/h = 0.26 - 0.56$ $\varepsilon = 0.18, 0.41$ $\theta = 45, 90$
17	Koether (2002)	Triple underwater filter system (horizontal slots)	K_i, K_p , and forces	-	$307 \times 5 \times 7$ $h = 4.0 - 5.0$	Regular and irregular	$B/L = 0.25 - 1.25$ $H_i = 0.5 - 1.5 \text{ m}$ $T = 3 - 12 \text{ s}$

ลำดับ	อ้างอิง	ชนิดโครงสร้าง	วัตถุประสงค์งานวิจัย (ลักษณะงานวิจัย)	ทฤษฎี	การทดลอง (ขนาด flume และ ความลึกน้ำเป็นเมตร)	ชนิดคลื่น	ช่วงตัวแปรหลัก
							$\varepsilon = 0 - 43\%$
18	Sundar and Subbarao	Quadrant front face pile supported breakwater	K_t , K_r , K_d , pressure and forces	-	72.5x2x2.7 $h = 0.8, 0.9, 1.0$	Regular	$ka = 0.6 - 2.0$ $D/h = 0.3 - 0.45$ $\varepsilon = 0.5, 0.75, 0.83$
19	Rao et al. (2003)	Suspended pipe breakwater	K_d	-	50x0.71x1.1 $h = 0.4, 0.5$	Regular	$H_i/gT^2 = 0.007 - 0.01$ $D/h = 0.1 - 0.6$ $\varepsilon = 0, 0.125, 0.25$
20	Koriam (2005)	Single and double rows of vertical circular and square piles	K_t	Eigen function expansion	15x0.3x0.5 $h = 0.15, 0.2, 0.25$	Regular	$kh = 0.25 - 2.25$ $H_i/L = 0.005 - 0.06$ $B/d = 3.6$ $\varepsilon = 0.1 - 0.45$
21	Suh et al. (2006)	Pile supported vertical single wall (square piles)	K_t , K_r , K_d , R_{up} and forces	Eigen function expansion	104x3.7x4.6 $h = 2.4$	Regular and irregular	$kh = 0.9 - 4.2$ $H_i/L = 0.003$ $D/h = 0.2 - 0.6$ $\varepsilon = 0.5$
22	Huang (2007)	Single and double thin vertical, slotted barriers	K_t and K_r	Eigen function expansion	12x0.3x0.5 $h = 0.3$	Regular	$kh = 1.0 - 2.5$ $H_i/L = 0.01 - 0.04$ $B/L = 0.05 - 0.5$ $\varepsilon = 0.1 - 0.3$

ลำดับ	อ้างอิง	ชนิดโครงสร้าง	วัตถุประสงค์งานวิจัย (ลักษณะงานวิจัย)	ทฤษฎี	การทดลอง (ขนาด flume และ ความลึกน้ำเป็นเมตร)	ชนิดคลื่น	ช่วงตัวแปรหลัก
23	Laju et al. (2007)	Pile-supported vertical double wall (circular pile)	K_p , K_r , K_d and R_{up}	Eigen function expansion	72.5x2x2.7 h = 1.0	Regular	kh = 1.0 – 4.0 B/h = 0.5, 1.0 D/h = 0.1 – 0.5 $\varepsilon = 0.25$
24	Suh et al. (2007)	Pile supported vertical single wall (circular piles)	K_p , K_r , K_d , R_{up} and forces	Eigen function expansion	104x3.7x4.6 h = 2.4	Regular and irregular	kh = 0.9 – 4.2 $H_i/L = 0.003$ D/h = 0.2 – 0.6 $\varepsilon = 0.5$
25	Krishnakumar et al. (2008)	Partially submerged slotted wave screen	K_p , K_r , K_d and pressure	Boundary integral equation	72.5x2x2.7 h = 0.95	Regular and random wave	D/h = 0.3, 0.5, 1.0 $H_i = 0.05 - 0.25$ m T = 1 – 2.5 s $\varepsilon = 16.7, 9.1\%$
26	Koutandos (2009)	Vertical semi- immersed slotted barrier	K_p , K_r , K_d and kinematics' velocity	Reynolds average NavierStokes equation	20x0.62x1 h = 0.45	Regular	kh = 0.6 – 2.5 $H_i/L = 0.02 - 0.09$ D/h = 0.5 and 1.0 $\varepsilon = 0.05 - 0.5$
27	Rageh O.S., and Koriarn A.S. (2010)	Vertical walls with horizontal slots	K_p , K_r and K_d	Eigen function expansion	15x1x1 h = 0.5	Regular	$H_i/gT^2 = 0.002 - 0.012$ h/L = 0.15 – 0.4 D/h = 0.15 – 0.4

ที่มา: งานวิจัยลำดับที่ 1 – 26 ประมวลโดย Rageh O.S., and Koriem A.S. (2010) การประมวลงานวิจัยลำดับที่ 27 ดำเนินการโดยผู้วิจัย
หมายเหตุ

A: Radius of the quadrant front face (Sundar and Subbarao (2002))

B: Space between the double row

d: Pipe or pile diameter

d_f : Height of the filter system (Clauss and habel (1999))

s_b : seabed slope (Heikal (1997))

θ : breakwater inclination angle

บทที่ 4 การดำเนินงานวิจัย

การศึกษาวิจัยนอกจากงานศึกษาทฤษฎีและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นการตรวจวัดคลื่นในทะเลบริเวณด้านหน้า-ด้านหลังแผงกรองคลื่นที่สถานีนำร่องเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติคลื่น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น และวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาที่แสดงในรายงานบทที่ 4 การดำเนินงานวิจัย แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ

- อุปกรณ์วัดคลื่น
- รายละเอียดการทำงานตรวจวัดคลื่น
- การวิเคราะห์หาคุณสมบัติคลื่นในทะเล

4.1 อุปกรณ์วัดคลื่น

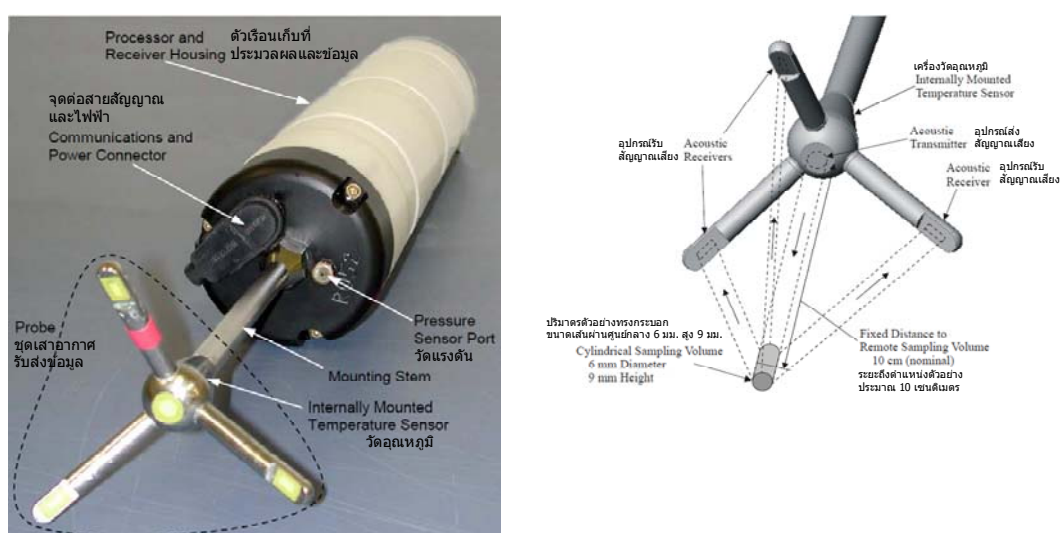
อุปกรณ์วัดคลื่นที่ใช้ในงานศึกษาวิจัยมี 2 ตัว ตัวที่ติดตั้งด้านหน้าแผงกรองคลื่น เป็นของ บริษัท โกลเด้น แพลน จำกัด ผลิตโดย บริษัท ซอนเทค จำกัด (Sontek Inc.) ประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น ไตรตัน เอดีวี (Triton ADV) ตัวที่ติดตั้งด้านหลังแผงกรองคลื่นเป็นของศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์ระบบโลก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ผลิตโดยบริษัท เจเอฟอี แอดวานซ์ เทค จำกัด (JFE Advance Tech) ประเทศญี่ปุ่น รุ่นเอดับบลิวเอช-ยูเอสบี (AWH-USB) อุปกรณ์วัดคลื่นแต่ละตัวมีคุณสมบัติและความสามารถต่างกัน ดังนี้

4.1.1 ไตรตัน เอดีวี

Sontek (2001) อุปกรณ์วัดคลื่นไตรตัน เอดีวี (ดูรูปที่ 4.1) สามารถวัดความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่แขวนลอยในน้ำ การวัดความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่นี้ใช้หลักการว่าคลื่นที่สะท้อนกลับจากอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่มีความถี่เปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้น โดยความถี่คลื่นด้านที่อนุภาคกำลังเคลื่อนที่เข้าหามีค่าเพิ่มขึ้น และมีความถี่ลดลงด้านตรงกันข้าม เมื่อทราบความถี่คลื่นที่จุดกำเนิดทราบความเร็วสัญญาณคลื่น ทราบตำแหน่งจุดรับ-ส่งสัญญาณและจุดสะท้อนสัญญาณ และทราบความถี่คลื่นที่เคลื่อนที่มาถึงจุดรับสัญญาณ ก็สามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณหาความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยเนื่องจากอุปกรณ์ไตรตันเอดีวีมีเข็มทิศแม่เหล็กรวมอยู่ในตัวอุปกรณ์จึงสามารถแสดงทิศทางการเคลื่อนที่เทียบกับทิศเหนือแม่เหล็ก

นอกจากนั้น อุปกรณ์ไทรตัน เอดีวี ยังรวมเครื่องวัดอุณหภูมิน้ำซึ่งสามารถนำมาพิจารณาพร้อมกับความเค็มเพื่อใช้ประเมินความเร็วคลื่น รวมถึงมีเครื่องวัดความดันน้ำซึ่งสามารถนำมาแปลงเป็นความลึกน้ำ ความสูงคลื่น และคาบเวลาคลื่น ความแม่นยำของการตรวจวัดความดัน คือ 0.1% ของค่าที่วัดได้ ส่วนความแม่นยำของทิศทางการเคลื่อนที่ คือ 1.5 องศา

เนื่องจากอุปกรณ์ไทรตันเอดีวีคำนวณหาความลึกน้ำจากแรงดันน้ำที่กคบนอุปกรณ์วัด การนำอุปกรณ์ไทรตัน เอดีวี ไปใช้งาน จึงต้องติดตั้งที่พื้นทะเล



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ไทรตัน เอดีวี

4.1.2 เอดับบลิวเอช-ยูเอสบี

JFE Advance Tech (2000) อุปกรณ์เอดับบลิวเอช-ยูเอสบีที่ติดตั้ง (ดูรูปที่ 4.2) วัดได้เฉพาะความลึกน้ำกับเวลา¹ ช่วงความลึกน้ำที่วัดได้อยู่ระหว่าง 0 – 25 เมตร ความละเอียดของการวัด 0.0005 เมตร ความแม่นยำ 0.1% ของค่าที่อ่านได้ สามารถตั้งเวลาให้วัดความลึกน้ำตั้งแต่ทุกๆ 0.1 วินาที จนถึงทุกๆ 600 วินาที ระยะเวลาทำงานตั้งได้ระหว่าง 1 – 1440 นาที โครงที่ใช้ติดตั้งดัดแปลงให้สามารถติดตั้งแบบเดียวกับไทรตัน เอดีวี คือ ติดตั้งที่พื้นทะเล

¹ สามารถติดตั้งอุปกรณ์เสริมให้สามารถวัดอุณหภูมิน้ำแต่ไม่รวมอยู่ในอุปกรณ์ที่ติดตั้ง



รูปที่ 4.2 อุปกรณ์วัดคลื่นเอดับลิวเอช-ยูเอสบี

4.2 รายละเอียดการทำงานตรวจวัดคลื่น

การติดตั้งอุปกรณ์วัดคลื่นทำในวันศุกร์ที่ 3 มิถุนายน 2554 การกู้ทำในวันอาทิตย์ที่ 19 มิถุนายน 2554 โดยเนื่องจากอุปกรณ์วัดคลื่นทั้งสองตัว ติดตั้งที่ระดับพื้นทะเล เทคนิคสำคัญของการติดตั้งอุปกรณ์ นอกจากความพยายามให้ตัวอุปกรณ์ได้ระดับและยึดแน่นกับพื้นทะเล คือ ต้องสามารถค้นหาและกู้คืนได้ เพราะทัศนวิสัยที่พื้นทะเลบริเวณสถานีนำร่องขณะปฏิบัติงานมีโอกาสต่ำกว่า 0.5 เมตร (สถานีนำร่องเป็นพื้นที่ต่อเนื่องกับร่องน้ำเจ้าพระยาที่มีตะกอนแขวนลอยไหลมากับกระแสน้ำ สภาพการณ์ดังกล่าวทำให้น้ำทะเลขุ่น กับมีทัศนวิสัยต่ำ)

ตามขั้นตอนแสดงในรูปที่ 4.3 การติดตั้งอุปกรณ์วัดคลื่นเริ่มจากควบคุมเรือที่ใช้ติดตั้งอุปกรณ์ให้ลอยอยู่ในบริเวณที่ต้องการ (ห่างจากแพงกรงคลื่นตามระยะตั้งฉากประมาณ 20 เมตร)² ค่อยๆ หย่อนอุปกรณ์ด้วยเชือกลงไปถึงพื้นทะเล นักดำน้ำดำลงไปปรับตำแหน่ง จัดอุปกรณ์ให้ได้ระดับและยึดแน่น

² ช่วงเวลาที่วัดคลื่นอยู่ในฤดูลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ คลื่นหลักที่เคลื่อนที่เข้าหาแพงกรงคลื่นเป็นคลื่นทิศตะวันตกเฉียงใต้ จึงติดตั้งอุปกรณ์ไทรตัน เอดีวี ด้านทิศตะวันตกเฉียงใต้ และติดตั้งอุปกรณ์เอดับลิวเอช-ยูเอสบี ด้านทิศตะวันออกเฉียงเหนือ

กับพื้นทะเล เรือส่งเชือกที่ผูกอุปกรณ์ไปที่สะพานท่าเรือของอาคารสถานีนำร่อง นักดำน้ำผูกเชือกที่ขีดยอุปกรณ์วัดคลื่นกับเสาสะพานท่าเรือที่ระดับความลึกน้ำ 10 เมตร (เพื่อป้องกันไม่ให้ใบจักรเรือรับส่งเจ้าหน้าที่นำร่องพื้นเชือกขาด) แล้วผูกเชือกกับเสาสะพานที่ระดับพื้นน้ำเพื่อใช้เป็นแนวค้ำน้ำตอนกู้อุปกรณ์ โดยมีเชือกผูกอุปกรณ์วัดคลื่นโยงกับเสาสะพานท่าเรือทั้งด้านติดลานจอดเฮลิคอปเตอร์และด้านติดตัวอาคาร (เพื่อสำรอง) ด้านละ 1 เส้น

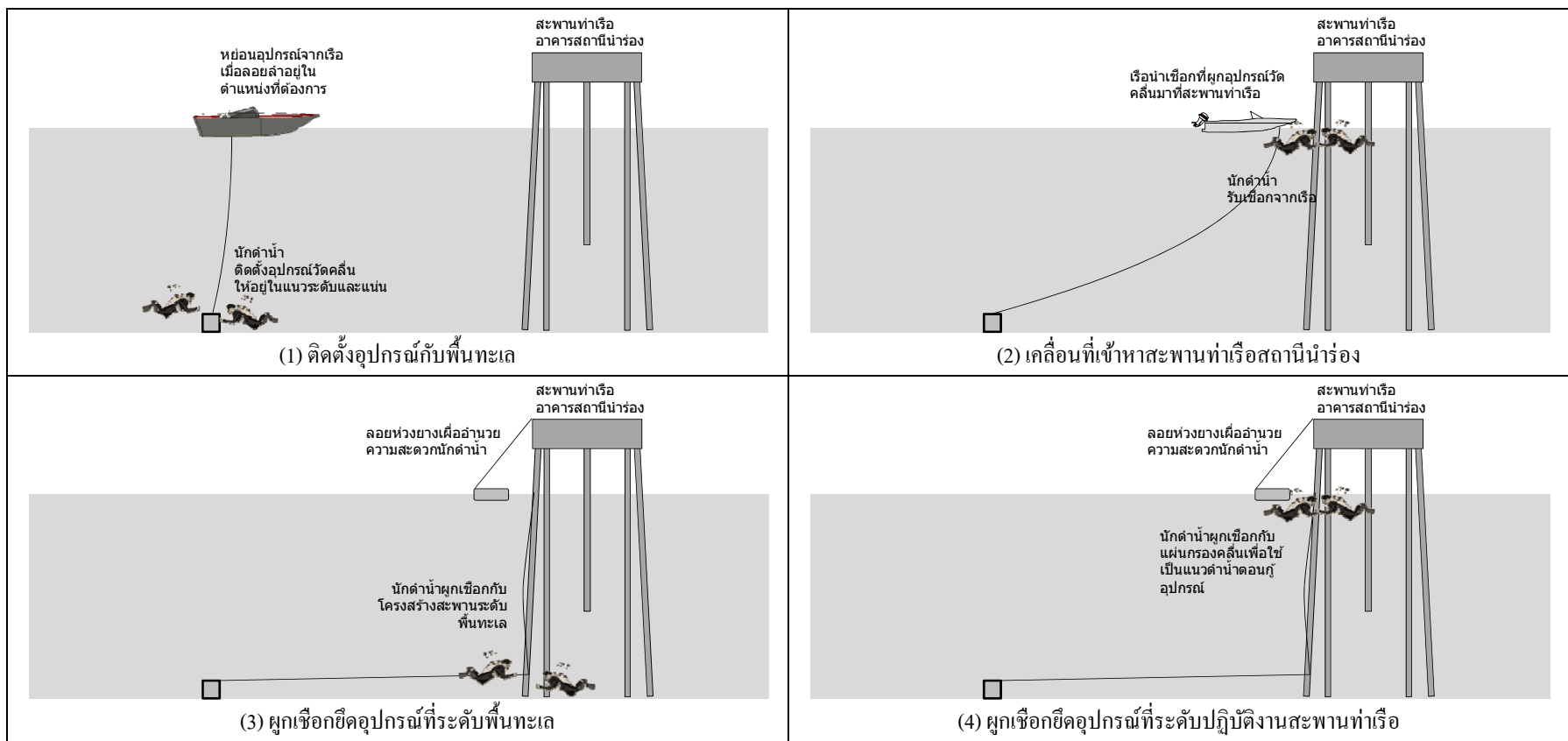
การติดตั้งอุปกรณ์วัดคลื่นพบว่าพื้นทะเลบริเวณติดตั้งไทรตันเอคิวิ (ด้านหน้าแพงกรรคลื่น) มีลักษณะเป็นโคลนเหลว สามารถกดโครงขีดยอุปกรณ์วัดคลื่นให้จมติดพื้นทะเลได้ง่าย ในขณะที่ตำแหน่งติดตั้งเอคิบบิวเอช-ยูเอสบี มีกองหินและวัสดุก่อสร้างกองระเกะระกะที่พื้นทะเลจำนวนมาก แต่การติดตั้งเลือกบริเวณที่สามารถกดโครงขีดยอุปกรณ์ให้จมติดพื้นทะเลแบบเดียวกับการติดตั้งไทรตันเอคิวิ

การตั้งค่าอุปกรณ์ทั้งไทรตัน เอคิวิ และ เอคิบบิวเอช-ยูเอสบี กำหนดให้เริ่มทำงานวันที่ 3 มิถุนายน 2554 เวลา 18.00 นาฬิกา โดยกำหนดให้วัดค่าต่างๆ ทุก 1 วินาที ต่อเนื่องกัน 1024 วินาที³ เสร็จแล้วเว้นไป 776 วินาที จึงเริ่มทำงานวัดรอบต่อไป (วัดค่าต่างๆ ทุก 1800 วินาที) ความเร็วอนุภาคสูงสุดไม่เกิน 480 เซนติเมตร/วินาที⁴

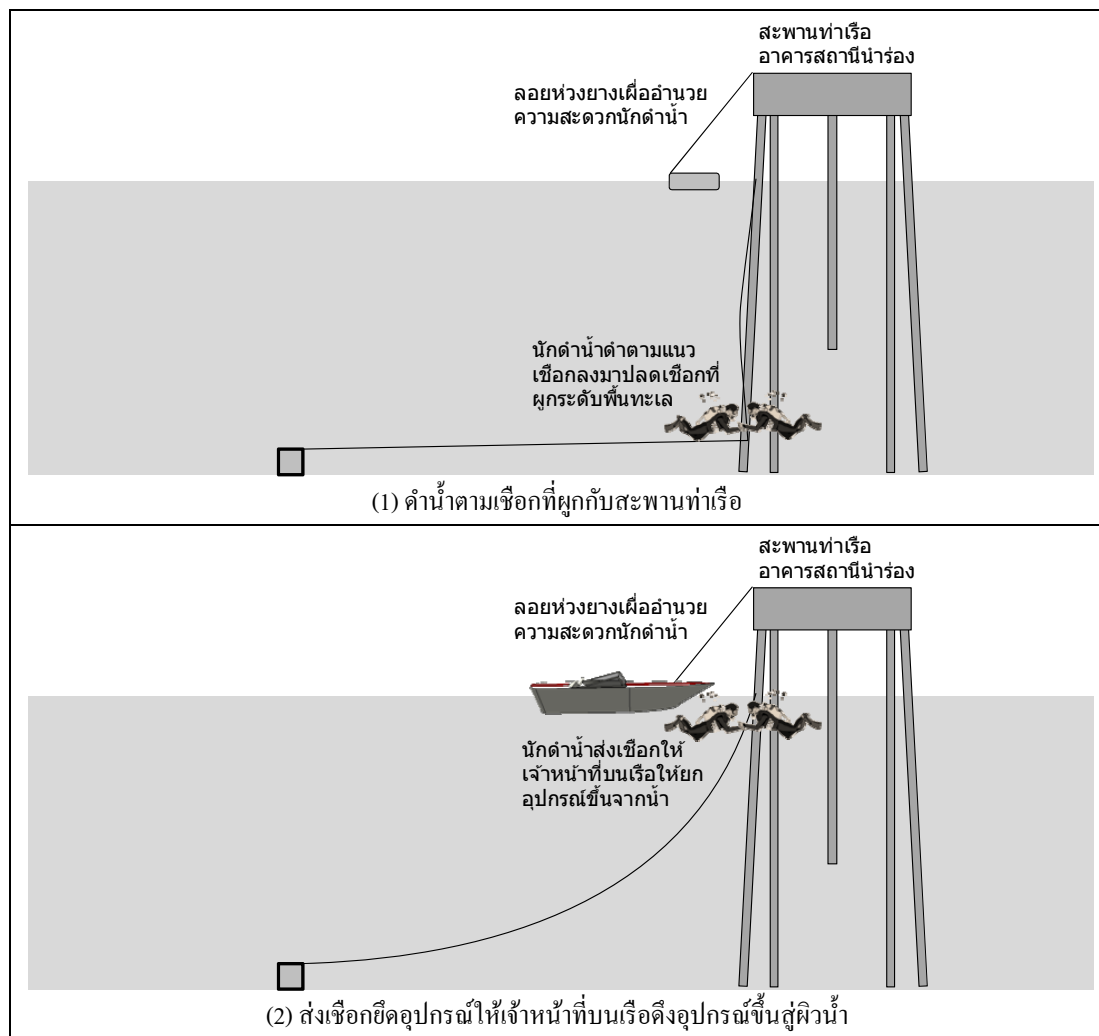
การกู้อุปกรณ์วัดคลื่นในวันอาทิตย์ที่ 19 มิถุนายน 2554 ตามขั้นตอนแสดงในรูปที่ 4.4 เริ่มจากนักดำน้ำดำตามแนวเชือกที่ผูกกับเสาสะพานลงไปถึงระดับความลึก 10 เมตร ปลดเชือกที่ผูกเสาสะพานระดับล่างออก ต่อด้วยปลดเชือกที่ผูกด้านบน นักดำน้ำส่งเชือกให้เจ้าหน้าที่ที่อยู่บนเรือ เจ้าหน้าที่สาวเชือกจนตำแหน่งเรือตรงกับตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์แล้วดึงอุปกรณ์ขึ้นสู่ผิวน้ำ

³ เป็นคำแนะนำของผู้ผลิต

⁴ อุปกรณ์ไทรตัน เอคิวิ สามารถตั้งให้วัดความเร็วแบบอัตราโนมิตี หรือแบบกำหนดความเร็วสูงสุดถึงไม่เกิน ± 600 เซนติเมตร/วินาที การตั้งให้วัดแบบอัตราโนมิตีใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าการกำหนดความเร็วสูงสุด



รูปที่ 4.3 การติดตั้งอุปกรณ์วัดคลื่น



รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการกู้อุปกรณ์

4.3 การวิเคราะห์หาคุณสมบัติคลื่น

การวิเคราะห์หาคุณสมบัติคลื่นในทะเลมี 3 รายการ ประกอบด้วย

- กำหนดหาความสูงคลื่นด้านหลังแ่งกรงคลื่นจากข้อมูลระดับน้ำรายวินาทีที่ได้จากอุปกรณ์เอดับบลิวเอช-ยูเอสบี
- กำหนดหาความยาวคลื่น (L) จากความสัมพันธ์ระหว่างคาบเวลากับความลึกน้ำ
- กำหนดหาค่าตัวแปรที่แสดงคุณสมบัติคลื่นด้านต่างๆ ได้แก่ ความชันคลื่น (H/L), อัตราส่วนไรม์ดิของคลื่น (H/gT^2), อัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L) อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแ่งกรงคลื่นต่อความยาวคลื่น (B/L) อัตราส่วนระยะกินน้ำลึก (Draft) ต่อความลึกน้ำ (d/h) และอัตราส่วนระยะกินน้ำลึกต่อความยาวคลื่น (d/L)

การแปลงข้อมูลความลึกน้ำเป็นความสูงคลื่นดำเนินการตามคำแนะนำของ Journée and Massie (2001) คือ นำข้อมูลความลึกน้ำที่วัดต่อเนื่องกัน 1024 วินาที มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นระดับน้ำนิ่ง เสร็จแล้วคำนวณหาระยะขจัดเทียบกับระดับน้ำนิ่ง (ζ_n) นำระยะขจัดมาคำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ด้วยสมการที่ (19) กับคำนวณหาความสูงคลื่นนัยสำคัญ ($H_{1/3}$) ด้วยสมการที่ (20) เมื่อคำนวณหาความสูงคลื่นด้านหลังเชื่อมกันคลื่นได้แล้วก็คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจากอัตราส่วนความสูงคลื่นด้านหลังเชื่อมกันคลื่น (H_t) ต่อความสูงด้านหน้าเชื่อมกันคลื่น (H_i) ตามแสดงในสมการที่ (21)

ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \zeta_n^2} \quad (19)$$

ความสูงคลื่นนัยสำคัญ

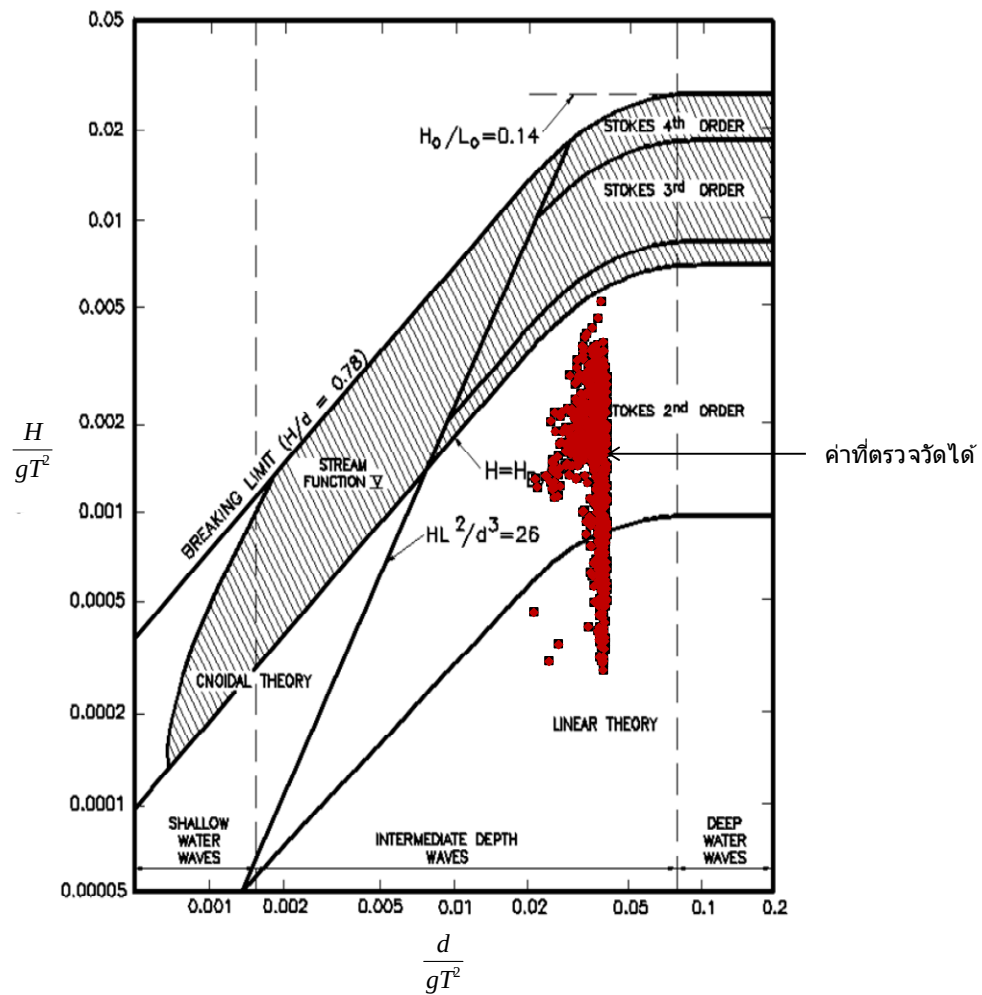
$$H_{1/3} = 4\sigma \quad (20)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น

$$K_t = \frac{H_t}{H_i}$$

การคำนวณหาความยาวคลื่นเริ่มจากการตรวจสอบคุณลักษณะคลื่นจากอัตราส่วนไร้มิติ โดยตามแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าคลื่นที่ตรวจวัดได้ระหว่างวันที่ 3 – 19 มิถุนายน 2554 มีพฤติกรรมอยู่ระหว่างทฤษฎีเส้นตรง (Linear Theory) กับคลื่นลำดับที่ 2 ของสโตกรก (Stokes 2 Order) ซึ่งเนื่องจากคลื่นสองช่วงนี้ใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับความเร็วเชิงมุม (Dispersion) เดียวกัน การวิเคราะห์หาความยาวคลื่นจึงทำโดยนำสมการที่ (22) มาสมมุติค่าความยาวคลื่น (L) ในพจน์ด้านขวาของสมการแล้วตรวจสอบค่า “ L ” ในพจน์ด้านซ้ายของสมการ ลองผิดลองถูก (Trial and error) จนค่า L ในพจน์ด้านซ้ายกับพจน์ด้านขวาเท่ากัน

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (22)$$



รูปที่ 4.5 คุณลักษณะคลื่นบริเวณสถานีนำร่องวันที่ 3 – 19 มิถุนายน 2554

เมื่อคำนวณได้ค่าความยาวคลื่นแล้วก็นำค่าต่างๆ ที่ตรวจวัดได้มาคำนวณหาค่าตัวแปรที่ต้องการประกอบด้วย

- ความชันคลื่น (H/L)
- อัตราส่วนไร้มิติของคลื่น (H/gT^2)
- อัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L)
- อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผงกรองคลื่นต่อความยาวคลื่น (B/L)
- อัตราส่วนระยะกินน้ำลึก (Draft) ต่อความลึกน้ำ (d_s/h)
- อัตราส่วนระยะกินน้ำลึกต่อความยาวคลื่น (d_s/L)

บทที่ 5 การวิเคราะห์ผล

เนื้อหาที่แสดงแบ่งเป็น 7 ส่วน ประกอบด้วย

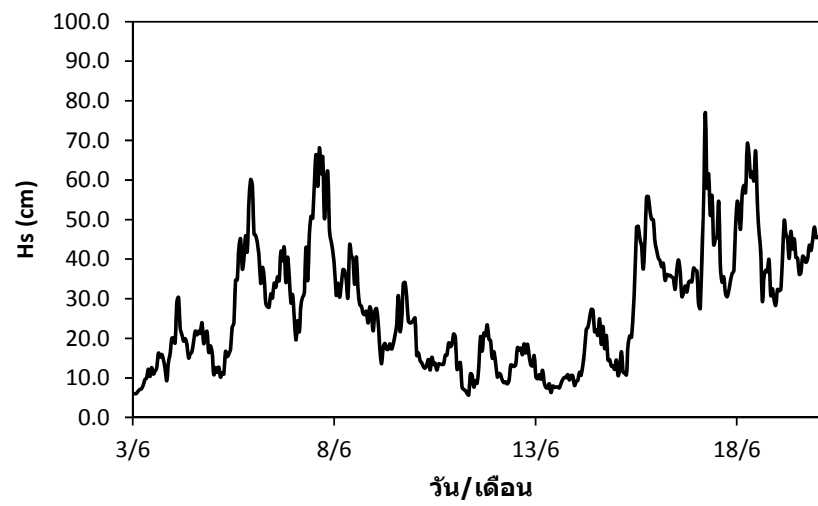
- ผลการตรวจวัด
- การวิเคราะห์ความสอดคล้องของข้อมูลและการคัดกรองข้อมูล
- การคัดเลือกตัวแปรและจัดกลุ่มข้อมูล
- การคำนวณหาค่าตัวแปร
- ปัจจัยที่มีผลกระทบกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น
- การพัฒนาสมการสำหรับใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น
- การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแผงกรองคลื่น

5.1 ผลการตรวจวัด

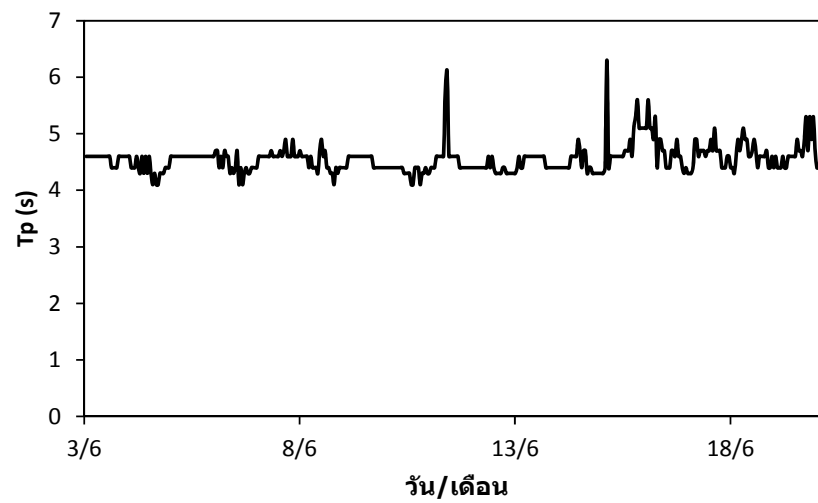
5.1.1 ด้านหน้าแผงกรองคลื่น

การวัดคลื่นด้านหน้าแผงกรองคลื่นด้วยอุปกรณ์ไทรตัน เอทีวี ได้ข้อมูลโดยสรุป ดังนี้

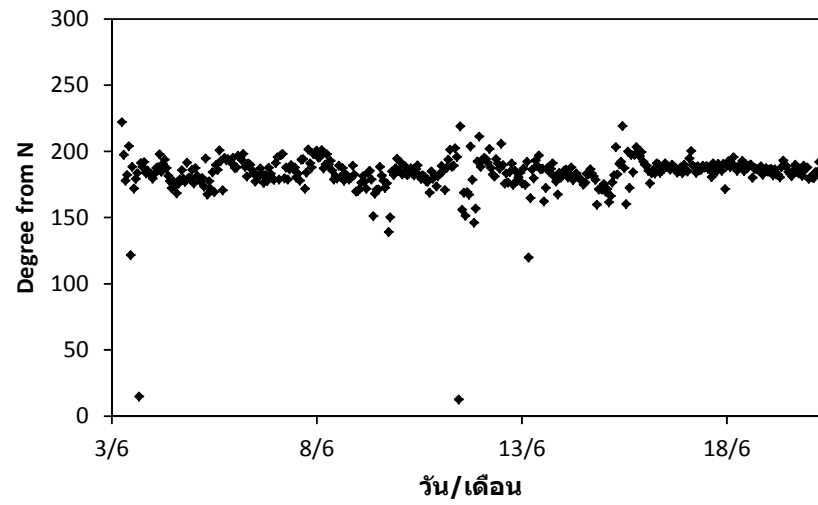
1. ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์เป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดระหว่างวันที่ 3 มิถุนายน 2554 เวลา 18.00 นาฬิกา ถึงวันที่ 19 มิถุนายน เวลา 08.30 นาฬิกา ซึ่งจากการวัดทุก 30 นาที มีจำนวน 750 ข้อมูล
2. คลื่นที่เคลื่อนที่เข้าหาแผงกรองคลื่นระหว่างช่วงเวลาที่ตรวจวัดมีความสูงนัยสำคัญระหว่าง 5.7 – 87.3 เซนติเมตร เฉลี่ย 33.9 เซนติเมตร ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญช่วงเวลาต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.1
3. คาบเวลาคคลื่นในช่วงเวลาที่ตรวจวัดมีค่าอยู่ระหว่าง 4.1 – 6.3 วินาที ลักษณะการกระจายตัวของคาบเวลาคคลื่นช่วงเวลาต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.2
4. ทิศที่คลื่นเคลื่อนที่เข้าหาแผงกรองคลื่นทำมุมระหว่าง 12.5 – 240.1 องศา เทียบกับทิศเหนือแม่เหล็ก (วัดตามเข็มนาฬิกา) แต่ส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 170 – 190 องศา (คลื่นทิศใต้) ลักษณะการกระจายตัวของทิศคลื่นช่วงเวลาต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.3
5. ความลึกน้ำที่วัดได้มีค่าอยู่ระหว่าง 12.13 – 15.82 เมตร จากระดับติดตั้งอุปกรณ์ ลักษณะการกระจายตัวของค่าความลึกน้ำช่วงเวลาต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.4



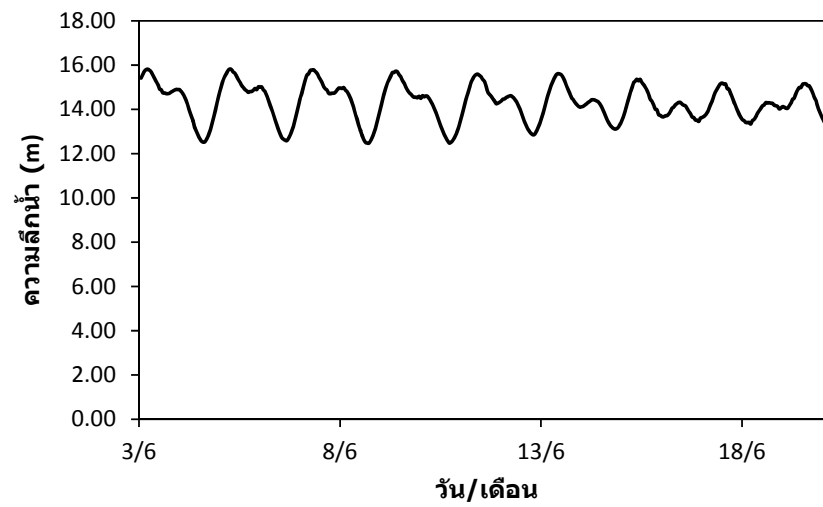
รูปที่ 5.1 ลักษณะการกระจายตัวของความสูงคลื่นช่วงเวลาต่างๆ



รูปที่ 5.2 ลักษณะการกระจายตัวของคาบเวลคลื่นช่วงเวลาต่างๆ



รูปที่ 5.3 ลักษณะการกระจายตัวของทิศคลื่น

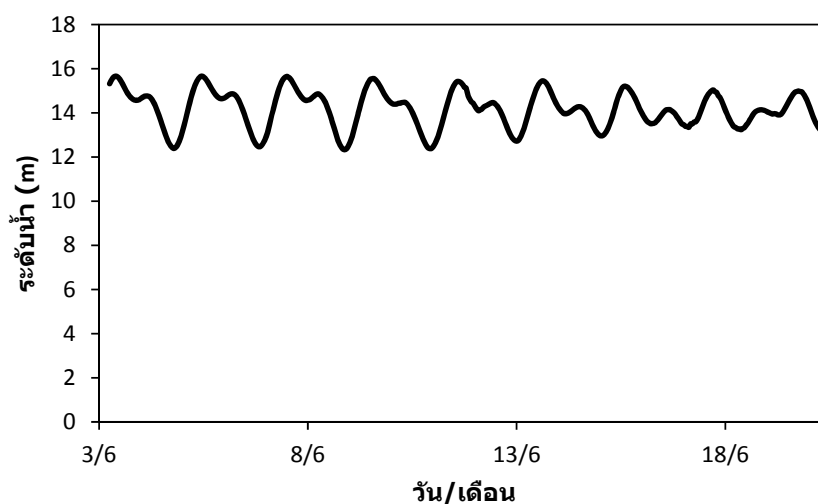


รูปที่ 5.4 ความลึกน้ำด้านหน้าแพงกรองคลื่นตรวจวัดโดยอุปกรณ์ไทรตัน เอดีวี

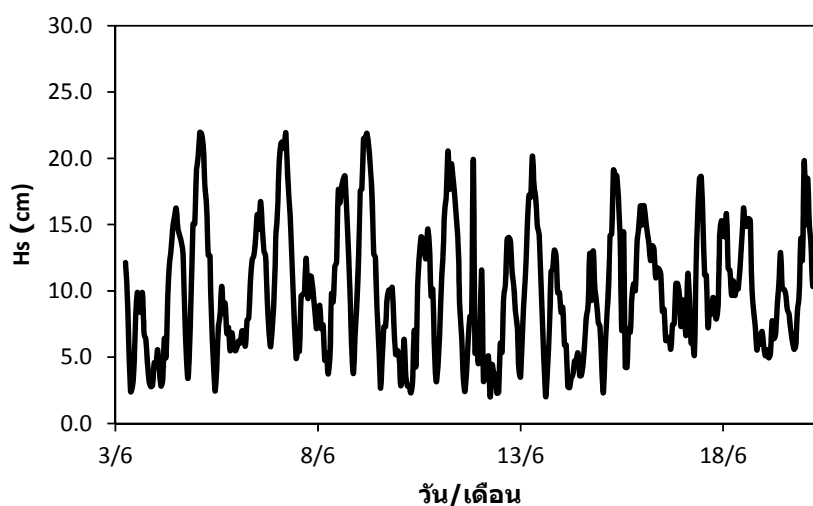
5.1.2 ด้านหลังแพงกรองคลื่น

การวัดคลื่นด้านหลังแพงกรองคลื่นด้วยอุปกรณ์ เอดับบลิวเอช-ยูเอสบี ได้ข้อมูลโดยสรุป ดังนี้

1. ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์เป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดระหว่างวันที่ 3 มิถุนายน 2554 เวลา 18.00 นาฬิกา ถึงวันที่ 19 มิถุนายน เวลา 08.30 นาฬิกา ซึ่งจากการวัดทุก 30 นาที มีจำนวน 750 ข้อมูล เท่ากับการวัดด้วยอุปกรณ์ไทรตัน เออีวี
2. ความลึกน้ำที่วัดได้มีค่าอยู่ระหว่าง 12.06 – 15.66 เมตร จากระดับติดตั้งอุปกรณ์ ลักษณะการกระจายตัวของค่าความลึกน้ำช่วงเวลาต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.5
3. การนำข้อมูลความลึกน้ำมาวิเคราะห์หาความสูงคลื่นนัยสำคัญตามขั้นตอนแสดงในข้อ 4.3 ได้ ความสูงคลื่นนัยสำคัญระหว่าง 2.0 – 25.5 เซนติเมตร เฉลี่ย 10.7 เซนติเมตร ลักษณะการกระจายตัวของความสูงคลื่นนัยสำคัญแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.5 ความลึกน้ำด้านหลังแพงกรองคลื่นตรวจวัดโดยอุปกรณ์เอดับบลิวเอช-ยูเอสบี

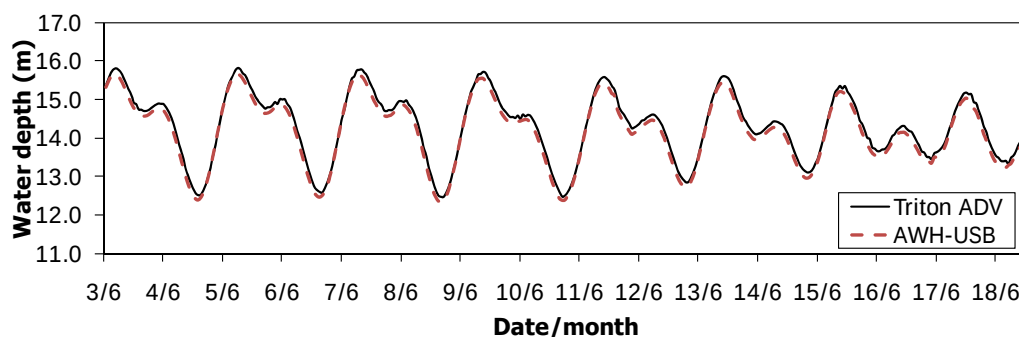


รูปที่ 5.6 ความสูงคลื่นนัยสำคัญด้านหลังแพงกรองคลื่น

5.2 การวิเคราะห์ความสอดคล้องของข้อมูลและการคัดกรองข้อมูล

การวิเคราะห์ความสอดคล้องของข้อมูลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไทรตัน เอดีวี กับเอดับบลิวเอช-ยูเอสบี และจากข้อมูลที่มีของหน่วยงานอื่นได้ข้อสรุป ดังนี้

1. ความลึกน้ำที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์ไทรตัน เอดีวี มีลักษณะการขึ้น-ลงสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์เอดับบลิวเอช-ยูเอสบี (ดูรูปที่ 5.7)
2. ช่วงค่าระดับน้ำ (Range) ที่วัดได้ของอุปกรณ์ไทรตัน เอดีวี เท่ากับ 3.69 เมตร (12.13 – 15.82) ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์เอดับบลิวเอช-ยูเอสบี 3.60 เมตร (12.06 – 15.66) ความแตกต่างที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการหลุดตัวของอุปกรณ์ไทรตัน เอดีวี ที่เกิดในช่วงเวลา 15 วัน เพราะจุดติดตั้งไทรตัน เอดีวี มีสภาพเป็นโคลนเหลว
3. ความสูงคลื่นด้านหลังแพงกรองคลื่นส่วนใหญ่ต่ำกว่าด้านหน้าแพงกรองคลื่น ส่วนที่มีค่ากลับกัน รวมถึงกรณีที่เกิดคลื่นต่างจากข้อมูลลม ประเมินว่าเป็นคลื่นที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของเรือรับส่ง เจ้าหน้าที่นำร่องและเรือเดินทะเลขณะเดินอยู่ด้านหลังเขื่อนกันคลื่น ลักษณะดังกล่าวทำให้คลื่นด้านหลังแพงกรองคลื่นสูงกว่าด้านหน้า การตรวจสอบช่วงเวลาและความลึกน้ำขณะเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวพบว่าสมมุติฐานข้างต้นมีความเป็นไปได้เพราะเป็นเวลาน้ำขึ้นที่เรือเดินทะเลมักใช้เดินผ่านร่องน้ำ



รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบความลึกน้ำตรวจวัดโดยไตรตัน เอดีวี กับเอดับบลิวเอช-ยูเอสบี

เพื่อลดความไม่แน่นอน การศึกษาวิจัยพิจารณาตัดข้อมูลที่มีค่า K_t มากกว่า 1.0 ออกจากฐานข้อมูล และเพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอของแผนกรองคลื่นก็เลือกพิจารณาเฉพาะข้อมูลที่มีความลึกน้ำมากกว่า 13.6 เมตร¹

5.3 การคัดเลือกตัวแปรและจัดกลุ่มข้อมูล

จากแนวคิดว่าสมรรถนะแผนกรองคลื่นควรขึ้นกับคุณสมบัติคลื่น คุณสมบัติแผนกรองคลื่น และสภาพแวดล้อม การคัดเลือกตัวแปรเพื่อใช้ทำนายสมรรถนะแผนกรองคลื่นจึงพิจารณาจากตัวแปรที่แสดงคุณสมบัติต่างๆ ข้างต้น ภายใต้ข้อจำกัดว่าเป็นงานวิจัยที่ทำกับแผนกรองคลื่นที่ติดตั้งไว้แล้ว ไม่สามารถปรับปรุงคุณลักษณะแผนกรองคลื่นทางกายภาพ ภายใต้เงื่อนไขข้างต้น ตัวแปรที่พิจารณาจึงแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม จำนวน 6 ตัว (ดูตารางที่ 5.1) ประกอบด้วย

- ตัวแปรแสดงคุณสมบัติคลื่น มี 2 ตัว ได้แก่ ความชันคลื่น (H/L) กับอัตราส่วนไร้มิติของคลื่น ($H/(gT^2)$)
- ตัวแปรแสดงคุณสมบัติคลื่นที่สัมพันธ์กับสภาพแวดล้อม มี 1 ตัว คือ อัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L)

¹ แผนกรองคลื่นแผนนอกเป็นแผ่นคอนกรีตเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร ทูกระยะ 0.45 เมตร หากระดับน้ำทะเลท่วมแผนกรองคลื่นน้อยกว่า 0.15 เมตร แผนกรองคลื่นจะมีสภาพเป็นแผงทึบคล้ายเขื่อนกันคลื่นแบบไม่จรดพื้นทะเล (skirt breakwater) และหากกำหนดระดับน้ำต่ำไปก็อาจเกิดกรณีคลื่นเคลื่อนที่ผ่านแผนกรองคลื่นเฉพาะส่วนยอดคลื่น ความลึกน้ำ 13.6 เมตร เป็นกรณีที่แผนกรองคลื่นจมน้ำ 1.0 เมตร

- ตัวแปรแสดงคุณสมบัติแพรงกรองคลื่นที่สัมพันธ์กับคุณสมบัติคลื่น มี 2 ตัว ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างระหว่างแพรงกรองคลื่นต่อความยาวคลื่น (B/L) กับอัตราส่วนระยะแพรงกรองคลื่นจมน้ำต่อความยาวคลื่น (d_s/L)
- ตัวแปรแสดงคุณสมบัติแพรงกรองคลื่นที่สัมพันธ์กับสภาพแวดล้อม มี 1 ตัว คือ อัตราส่วนระยะแพรงกรองคลื่นจมน้ำต่อความลึกน้ำ (d_s/h)

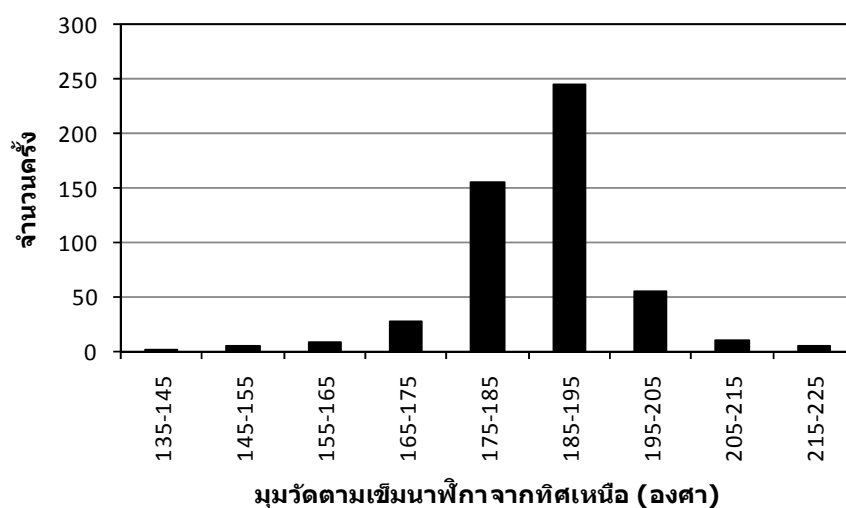
ตารางที่ 5.1 การคัดเลือกตัวแปรเพื่อใช้ทำนายสมรรถนะแพรงกรองคลื่น

กลุ่มตัวแปร	ตัวแปร
คุณสมบัติคลื่น	$H_s/L, H_s/(gT^2)$
คุณสมบัติคลื่นที่สัมพันธ์กับสภาพแวดล้อม	h/L
คุณสมบัติแพรงกรองคลื่นที่สัมพันธ์กับคุณสมบัติคลื่น	$B/L, d_s/L$
คุณสมบัติแพรงกรองคลื่นที่สัมพันธ์กับสภาพแวดล้อม	d_s/h

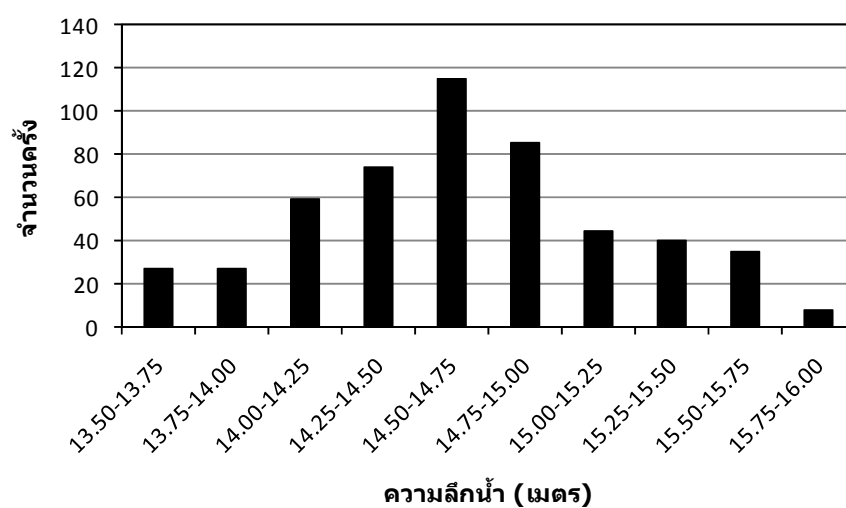
เพื่อให้การทำนายสมรรถนะแพรงกรองคลื่นมีความแม่นยำมากเท่าที่จะเป็นไปได้ งานศึกษาวิจัยพยายามจัดกลุ่มข้อมูลเพื่อให้ข้อมูลที่มีคุณลักษณะพื้นฐานเหมือนกัน อยู่ในกลุ่มเดียวกัน การทำงานเริ่มจากการตรวจสอบช่วงค่า ค่าเฉลี่ย และลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลที่คัดกรองไว้แล้วในส่วนของทิศคลื่นและระดับน้ำ ได้ผลสรุป ดังนี้

1. ทิศคลื่นวัดตามเข็มนาฬิกาจากทิศเหนืออยู่ระหว่าง $139.0 - 222.7$ องศา เฉลี่ย 186.7 องศา ส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง $185 - 195$ องศา ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแสดงในรูปที่ 5.8 ซึ่งเนื่องจากแนวแพรงกรองคลื่นเอียงทำมุม 135 องศา กับทิศเหนือ มุมที่คลื่นทำกับแพรงกรองคลื่นจึงอยู่ระหว่าง $4 - 87.7$ องศา
2. ความลึกน้ำเหนืออุปกรณ์วัดอยู่ระหว่าง $13.62 - 15.82$ เมตร เฉลี่ย 14.67 เมตร ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแสดงในรูปที่ 5.9 โดยปลายแพรงกรองคลื่นแพรงนอกเริ่มจมน้ำเมื่อน้ำลึกกว่า 12.6 เมตร และปลายแพรงกรองคลื่นแพรงในเริ่มจมน้ำที่ความลึกน้ำมากกว่า 14.0 เมตร

² แนวแพรงกรองคลื่นเอียงทำมุม 135 องศา จากทิศเหนือ มุมคลื่นจึงเอียงทำมุม $4 - 87.7$ องศา กับแนวแพรงกรองคลื่น



รูปที่ 5.8 ลักษณะการกระจายตัวของทัศนคติ



รูปที่ 5.9 ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลความลึกน้ำ

การพิจารณาช่วงค่า ค่าเฉลี่ย และลักษณะการกระจายตัวของข้อมูล ได้ข้อสรุปการแบ่งข้อมูลออกเป็น 4 กลุ่ม (ดูตารางที่ 5.2) ดังนี้

- ข้อมูลแพงกรองคลื่นทำงาน 2 แผง (ความลึกน้ำน้อยกว่า 14.0 เมตร) คลื่นทำมุม 0 – 45 องศา กับแนวแพงกรองคลื่น มีจำนวน 9 ข้อมูล
- ข้อมูลแพงกรองคลื่นทำงาน 2 แผง (ความลึกน้ำน้อยกว่า 14.0 เมตร) คลื่นทำมุม 45 – 90 องศา กับแนวแพงกรองคลื่น มีจำนวน 45 ข้อมูล
- ข้อมูลแพงกรองคลื่นทำงาน 3 แผง (ความลึกน้ำเท่ากับและมากกว่า 14.0 เมตร) คลื่นทำมุม 0 – 45 องศา กับแนวแพงกรองคลื่น มีจำนวน 72 ข้อมูล
- กลุ่มข้อมูลแพงกรองคลื่นทำงาน 3 แผง (ความลึกน้ำเท่ากับและมากกว่า 14.0 เมตร) คลื่นทำมุม 45 – 90 องศา กับแนวแพงกรองคลื่น มีจำนวน 388 ข้อมูล

ตารางที่ 5.2 การจัดกลุ่มข้อมูล

รายการ	จำนวนข้อมูลแยกตามมุมที่คลื่นทำกับ แนวแพงกรองคลื่น		รวม
	0 – 45 องศา	45 – 90 องศา	
แพงกรองคลื่น 2 แผง	9	45	54
แพงกรองคลื่น 3 แผง	72	388	460
รวม	81	433	514

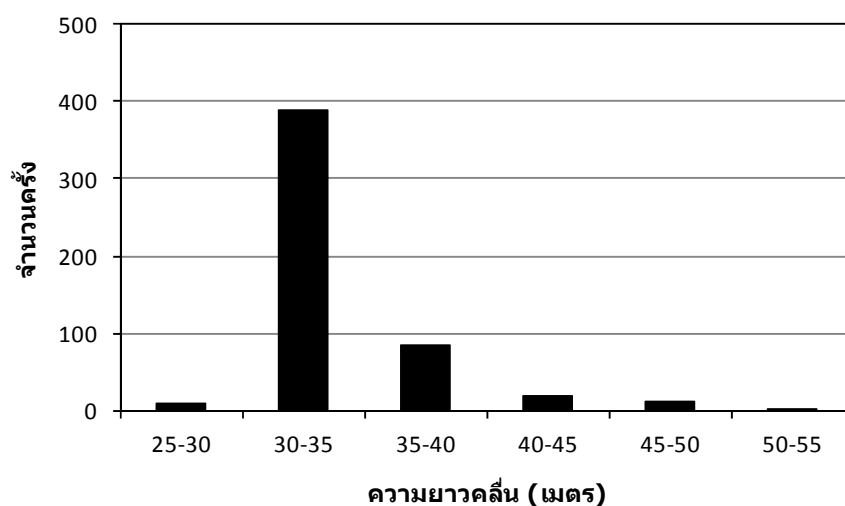
หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยของมุมที่คลื่นทำกับแนวแพงกรองคลื่น คือ 51.7 องศา

5.4 การคำนวณค่าตัวแปร

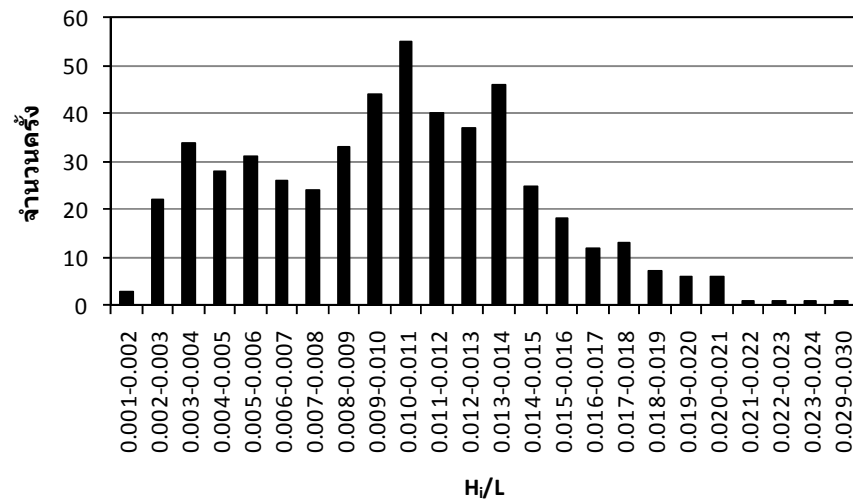
การคำนวณค่าตัวแปรเริ่มจากการคำนวณหาความยาวคลื่นตามวิธีที่แสดงในข้อ 4.3 เสร็จแล้วนำค่าที่คำนวณได้มาคำนวณค่าตัวแปรอื่นๆ ที่สัมพันธ์กัน ผลวิเคราะห์ได้ช่วงค่า ค่าเฉลี่ย และลักษณะการกระจายตัวของค่าตัวแปรสรุปได้ ดังนี้

1. ความยาวคลื่น (L) ที่วิเคราะห์จากความสัมพันธ์ระหว่างคาบเวลาคลื่น ความลึก มีค่าอยู่ระหว่าง 28.7 – 54.9 เมตร เฉลี่ย 33.9 เมตร ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 4.0 เมตร ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแสดงในรูปที่ 5.10
2. ความชันคลื่นที่คำนวณจากอัตราส่วนความสูงคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าหาแพงกรองคลื่นต่อความยาวคลื่น (H/L) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0019 – 0.0291 เฉลี่ย 0.0101 ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0045 ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแสดงในรูปที่ 5.11

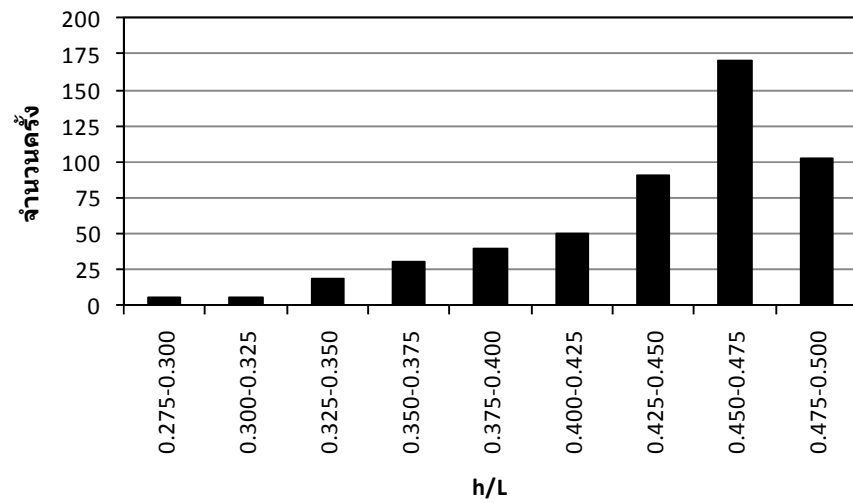
3. อัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.2839 – 0.4917 เฉลี่ย 0.4378 ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0446 ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแสดงในรูปที่ 5.12
4. อัตราส่วนระยะจมน้ำของแพลงก์ตอนสัตว์ต่อความลึกน้ำ (d/h) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0750 – 0.2035 เฉลี่ย 0.1401 ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0308 ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแสดงในรูปที่ 5.13
5. อัตราส่วนระยะจมน้ำของแพลงก์ตอนสัตว์ต่อความยาวคลื่น (d/L) อยู่ระหว่าง 0.0237 – 0.0979 เฉลี่ย 0.0616 ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0159 ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแสดงในรูปที่ 5.14
6. อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแพลงก์ตอนสัตว์ต่อความยาวคลื่น (B/L) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0273 – 0.1045 เฉลี่ย 0.0495 ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0149 ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแสดงในรูปที่ 5.15
7. คุณสมบัติไร้มิติของคลื่น (H/gT^2) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0001 – 0.0013 เฉลี่ย 0.0005 ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0002 ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแสดงในรูปที่ 5.16
8. สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1107 – 0.9949 เฉลี่ย 0.3320 ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.2049 ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลแสดงในรูปที่ 5.17



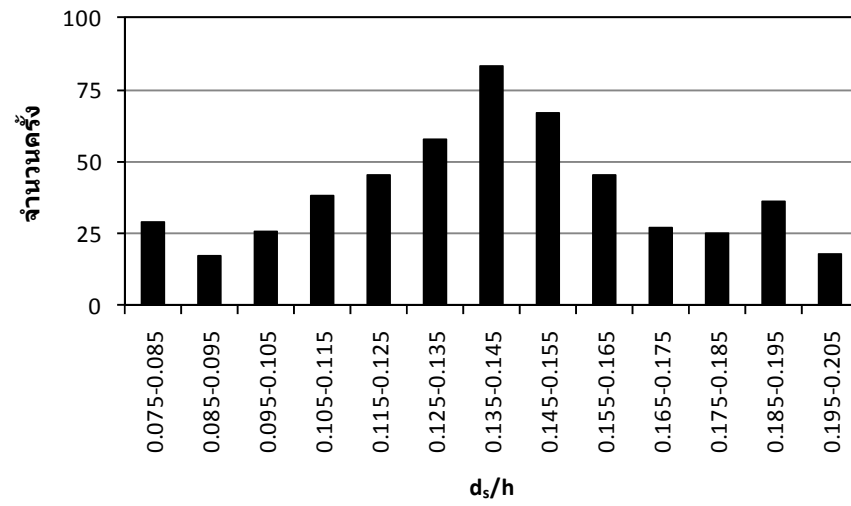
รูปที่ 5.10 ลักษณะการกระจายตัวของผลวิเคราะห์ความยาวคลื่น



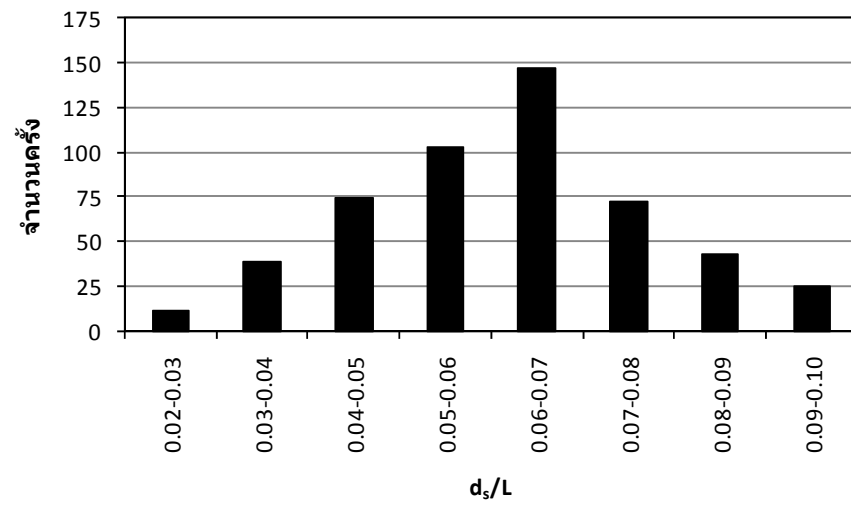
รูปที่ 5.11 ลักษณะการกระจายตัวของความชันคลื่น (H_i/L)



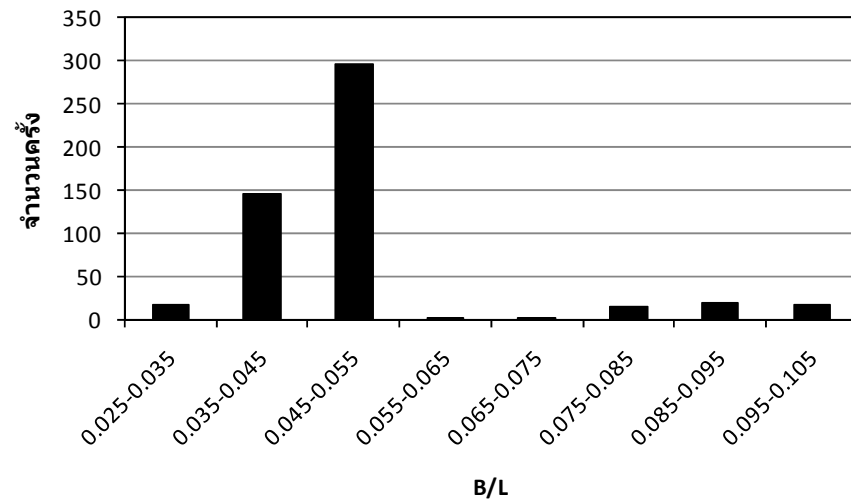
รูปที่ 5.12 ลักษณะการกระจายตัวของอัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L)



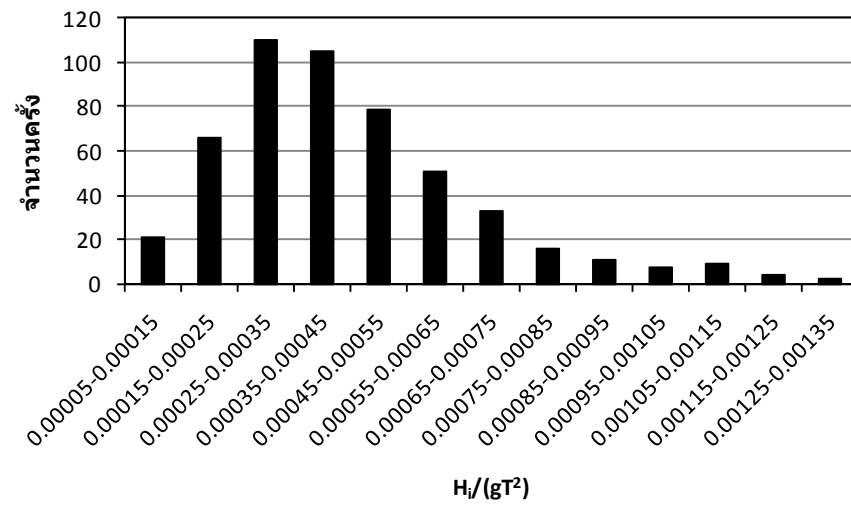
รูปที่ 5.13 ลักษณะการกระจายตัวของอัตราส่วนระยะจมน้ำต่อความลึกน้ำ (d_s/h)



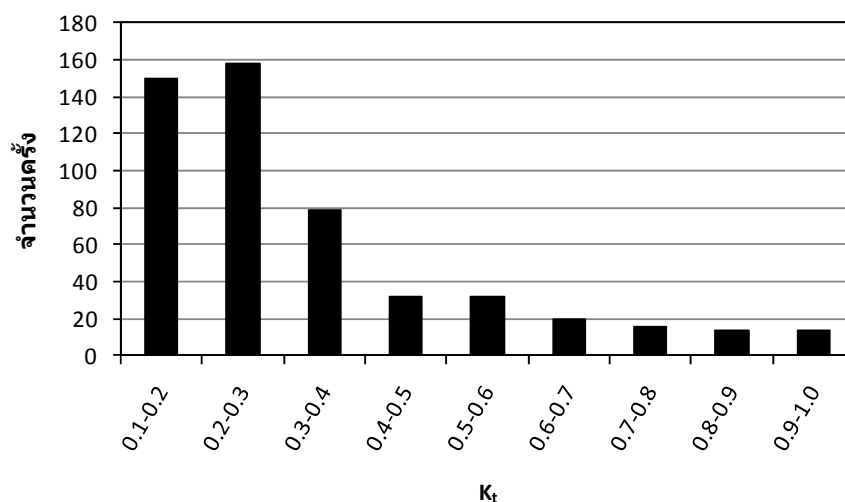
รูปที่ 5.14 ลักษณะการกระจายตัวของอัตราส่วนระยะจมน้ำต่อความยาวคลื่น (d_s/L)



รูปที่ 5.15 ลักษณะการกระจายตัวของอัตราส่วนระยะระหว่างแผงกรองคลื่นต่อความยาวคลื่น (B/L)



รูปที่ 5.16 ลักษณะการกระจายตัวของค่า $H_r/(gT^2)$



รูปที่ 5.17 ลักษณะการกระจายตัวของค่า K_t

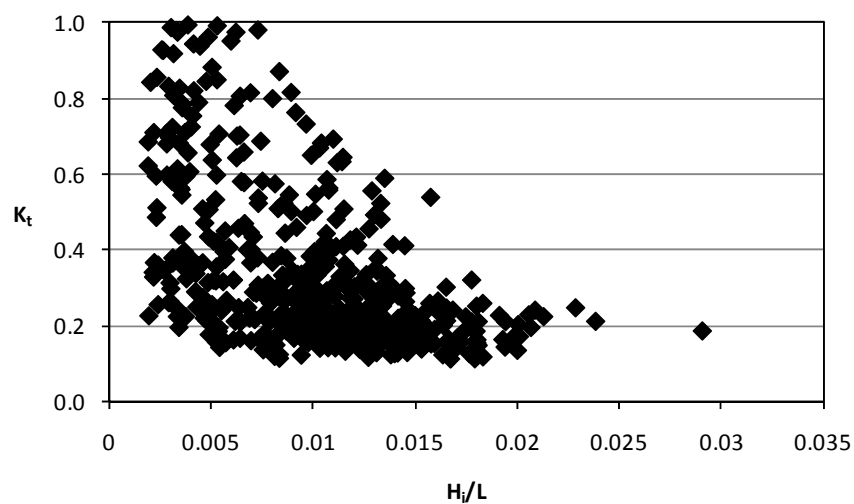
5.5 ปัจจัยที่มีผลกระทบกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น

การวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลกระทบกับค่า K_t เริ่มจากการตรวจสอบค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างตัวแปรที่พิจารณา แสดงในตารางที่ 5.3 ต่อด้วยการตรวจสอบลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแสดงในรูปที่ 5.18 - 5.23 ผลวิเคราะห์ได้ข้อสรุป ดังนี้

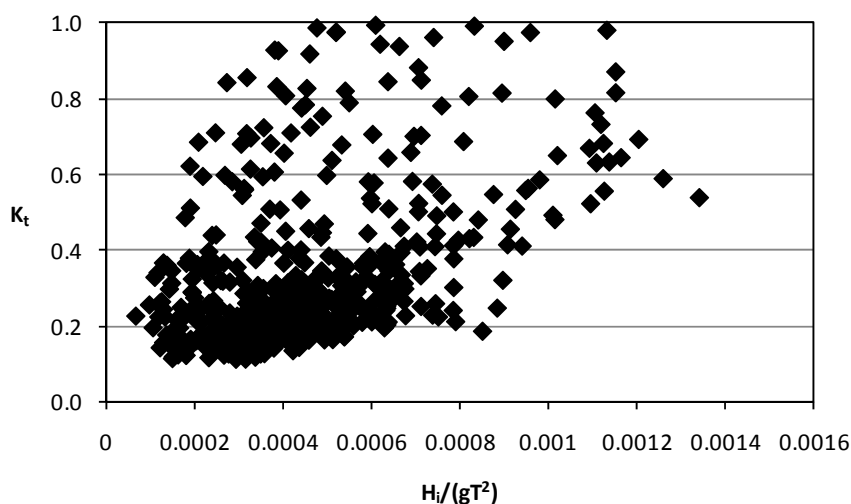
1. การตรวจสอบลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_t กับ H_t/L ซึ่งเป็นตัวแปรแสดงคุณสมบัติคลื่น ตามแสดงในรูปที่ 5.18 พบความแปรปรวนของข้อมูลที่ค่า H_t/L ต่ำกว่า 0.01 (ค่า K_t อยู่ระหว่าง 0.1 – 1.0) แต่ขนาดความแปรปรวนลดลงเมื่อค่า H_t/L เพิ่มขึ้น ลักษณะดังกล่าวแสดงว่าการทำงานของแผงกรองคลื่นมีความไม่แน่นอนที่ค่า H_t/L ต่ำกว่า 0.01 และสามารถทำงานได้แน่นอนขึ้นเมื่อความชันคลื่นเพิ่มขึ้น การตรวจสอบค่าสหสัมพันธ์ตามแสดงในตารางที่ 5.3 พบว่าเท่ากับ -0.521 แสดงว่ามีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันโดยกลับ คือ ค่า K_t ลด เมื่อ H_t/L เพิ่มขึ้นโดยค่าสัมบูรณ์ของค่าสหสัมพันธ์สูงกว่าตัวแปรที่พิจารณาอื่นทุกตัว
2. การตรวจสอบลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_t กับ $H_t/(gT^2)$ ซึ่งเป็นตัวแปรแสดงคุณสมบัติคลื่น ตามแสดงในรูปที่ 5.19 พบความแปรปรวนทุกช่วงข้อมูล การตรวจสอบค่าสหสัมพันธ์ตามแสดงในตารางที่ 5.3 พบว่าเท่ากับ 0.486 อยู่ในลำดับที่สองของตัวแปรที่พิจารณาทั้งหมด ลักษณะความสัมพันธ์เป็นแบบโดยตรง คือ ค่า K_t เพิ่มขึ้น ค่า $H_t/(gT^2)$ เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.3 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่พิจารณา

รายการ		K_t	H_t/L	$H_t/(gT^2)$	B/L	h/L	d_s/h	d_s/L
K_t	Correlation	1	-.521	.486	.232	.192	-.125	-.029
	Sig. (2-tailed)		.000	.000	.000	.000	.004	.505
H_t/L	Correlation	-.521	1	.360	.035	-.207	-.109	-.173
	Sig. (2-tailed)	.000		.000	.422	.000	.013	.000
$H_t/(gT^2)$	Correlation	.486	.360	1	.362	-.071	-.392	-.358
	Sig. (2-tailed)	.000	.000		.000	.106	.000	.000
B/L	Correlation	.232	.035	.362	1	.150	-.604	-.444
	Sig. (2-tailed)	.000	.422	.000		.001	.000	.000
h/L	Correlation	.192	-.207	-.071	.150	1	.214	.558
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.106	.001		.000	.000
d_s/h	Correlation	-.125	-.109	-.392	-.604	.214	1	.925
	Sig. (2-tailed)	.004	.013	.000	.000	.000		.000
d_s/L	Correlation	-.029	-.173	-.358	-.444	.558	.925	1
	Sig. (2-tailed)	.505	.000	.000	.000	.000	.000	



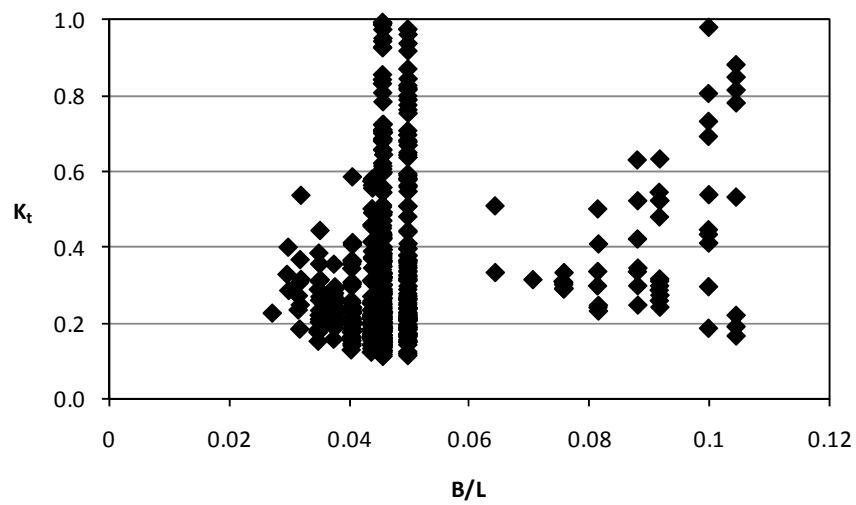
รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง H_t/L กับ K_t



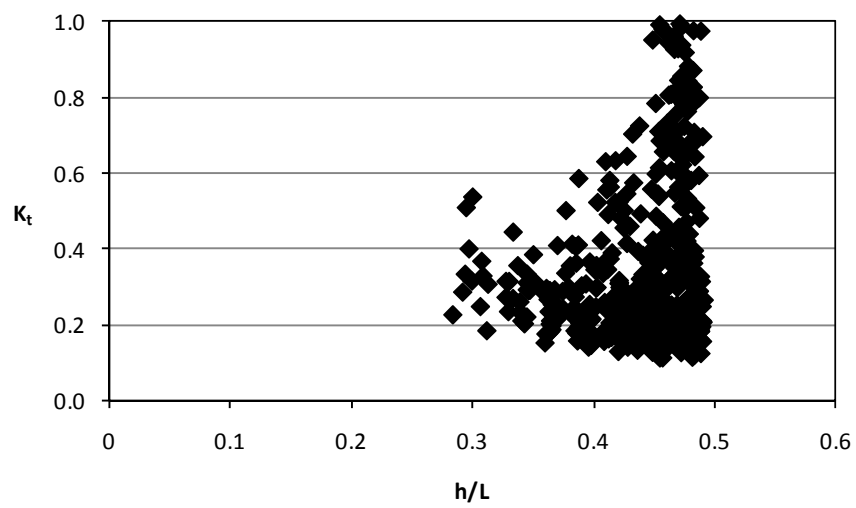
รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง $H_t/(gT^2)$ กับ K_t

3. การตรวจสอบลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_t กับ B/L ซึ่งเป็นตัวแปรแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะทางกายภาพกับคุณสมบัติคลื่น (ความกว้างแผงกรองคลื่นต่อความยาวคลื่น) ตามแสดงในรูปที่ 5.20 พบการกระจุกตัวของข้อมูล 2 ช่วง (เป็นผลจากมีค่า B ให้พิจารณา 2 ช่วง คือ 1.5 เมตร กับ 3.0 เมตร) ข้อมูลทั้งสองช่วงกระจายตัวคล้ายกัน คือ มีความแปรปรวนมากเมื่อค่า B/L เพิ่ม และขนาดความแปรปรวนลดลงเมื่อค่า B/L ลดลง การตรวจสอบค่าสหสัมพันธ์พบว่าสูงเป็นลำดับที่ 3 ในลักษณะโดยตรง คือ ค่า B/L เพิ่ม ค่า K_t ก็เพิ่มตามไปด้วย
4. การตรวจสอบลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_t กับ h/L ซึ่งเป็นตัวแปรแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพแวดล้อมกับคุณสมบัติคลื่น (อัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น) ตามแสดงในรูปที่ 5.21 พบความแปรปรวนของข้อมูลค่อนข้างมากที่ค่า h/L เข้าใกล้ 0.5 ซึ่งเป็นขอบเขตกรณีน้ำลึก³ตาม USACE (2002) แสดงว่าแผงกรองคลื่นทำงานได้ไม่แน่นอนในบริเวณน้ำลึก เมื่ออัตราส่วนดังกล่าวลดลง แผงกรองคลื่นก็ทำงานได้แน่นอนขึ้น การตรวจสอบค่าสหสัมพันธ์พบมีค่าสูงเป็นลำดับที่ 4 ในลักษณะโดยตรง คือ ค่า h/L เพิ่ม ค่า K_t ก็เพิ่มตามไปด้วย

³ ตาม USACE (2002) เกณฑ์กรณีน้ำลึก คือ $h/L > 0.5$ เกณฑ์กรณีน้ำตื้น คือ $h/L < 0.05$

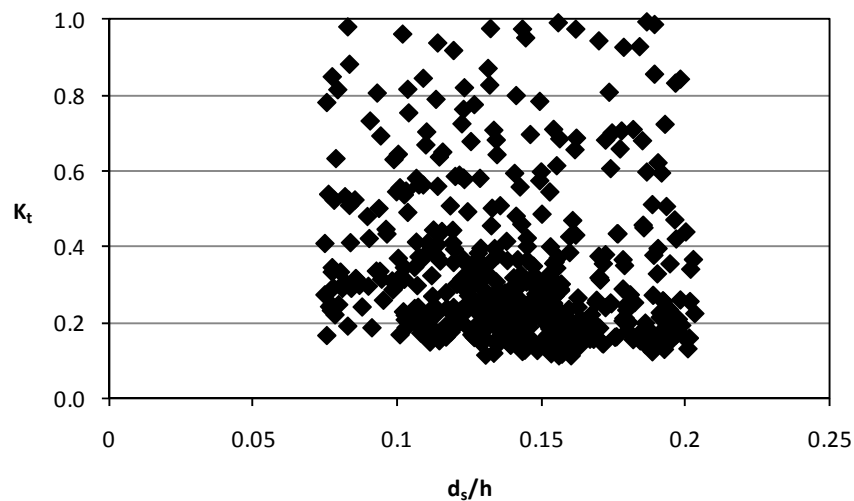


รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง B/L กับ K_t

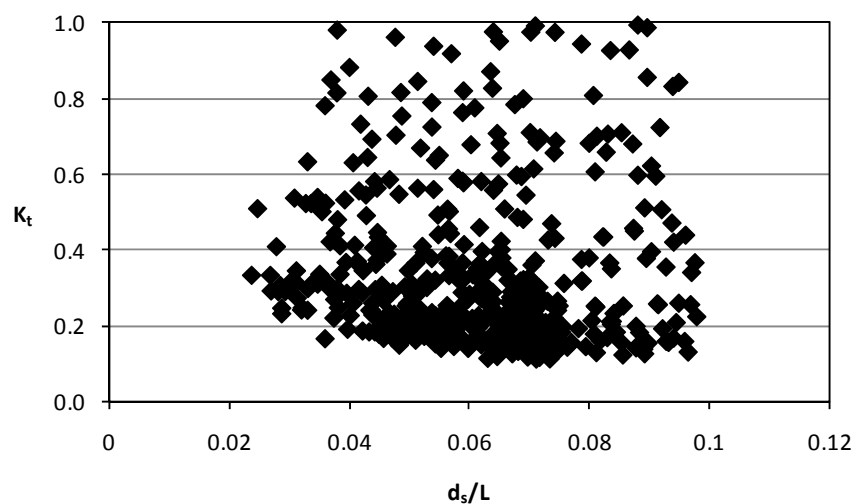


รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง h/L กับ K_t

5. การตรวจสอบลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_t กับ d_s/h ซึ่งเป็นตัวแปรแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพกับสภาพแวดล้อม (ระยะกินน้ำลึกต่อความลึกน้ำ) ตามแสดงในรูปที่ 5.22 พบความแปรปรวนของข้อมูลตลอดทุกช่วงข้อมูลที่มี แสดงว่าภายใต้เงื่อนไขความแปรปรวนของตัวแปรอื่น ค่า K_t มีความสัมพันธ์กับ d_s/h ต่ำ หรือเกือบไม่มีความสัมพันธ์
6. การตรวจสอบลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_t กับ d_s/L ซึ่งเป็นตัวแปรแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพกับคุณสมบัติคลื่น (ระยะกินน้ำลึกต่อความยาวคลื่น) ตามแสดงในรูปที่ 5.23 พบความแปรปรวนทุกช่วงข้อมูล คล้ายกรณี d_s/h



รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง d_s/h กับ K_t



รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง d_s/L กับ K_t

5.6 การพัฒนาสมการสำหรับใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น

การพัฒนาสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (K_L) พยายามเลือกสมการที่ดีที่สุด 4 สมการ ตามการจัดกลุ่มข้อมูลที่แสดงรายละเอียดการพิจารณาไว้ในข้อ 5.3 ดังนี้

- แผงกรองคลื่นทำงาน 2 แผง คลื่นเอียงทำมุม 0 – 45 องศา กับแนวแผงกรองคลื่น
- แผงกรองคลื่นทำงาน 2 แผง คลื่นเอียงทำมุม 45 – 90 องศา กับแนวแผงกรองคลื่น
- แผงกรองคลื่นทำงาน 3 แผง คลื่นเอียงทำมุม 0 – 45 องศา กับแนวแผงกรองคลื่น
- แผงกรองคลื่นทำงาน 3 แผง คลื่นเอียงทำมุม 45 – 90 องศา กับแนวแผงกรองคลื่น

งานศึกษาวิจัยพยายามพัฒนาให้ได้สมการทำนายค่า K_L ที่มีความเหมาะสมที่สุดทั้งจากเทคนิคทางสถิติ (ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด) และจากพฤติกรรมแผงกรองคลื่นตามผลการศึกษาทบทวนงานวิจัยอื่น จากข้อพิจารณาว่าแม้ผลวิเคราะห์ทางสถิติสรุปว่าการทำนายค่า K_L จากตัวแปรคุณสมบัติคลื่นเพียงรายการเดียวให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด การเพิ่มตัวแปรแสดงคุณสมบัติแผงกรองคลื่นไม่ทำให้ความแม่นยำเพิ่มขึ้น แต่หากสรุปแบบนี้ก็แสดงว่าคุณลักษณะแผงกรองคลื่นไม่มีผลกระทบกับค่า K_L ซึ่งไม่ถูกต้อง รวมถึงทำให้ไม่สามารถใช้สมการดังกล่าวมาปรับปรุงการออกแบบแผงกรองคลื่นให้มีความเหมาะสมมากขึ้น ดังนั้น การพัฒนาสมการจึงกำหนดให้มีตัวแปรแสดงคุณสมบัติแผงกรองคลื่นเป็นส่วนประกอบโดยอาจเป็นอัตราส่วนร่วมกับสภาพแวดล้อม หรือ คุณสมบัติคลื่น ก็ได้

การทดสอบแนวคิดข้างต้นโดยวิเคราะห์หาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่า K_L กับตัวแปรแสดงคุณสมบัติแผงกรองคลื่นเมื่อกำหนดให้ตัวแปรแสดงคุณสมบัติคลื่น กับสภาพแวดล้อม มีค่าคงที่ (Partial correlation) ตามแสดงในตารางที่ 5.4 พบว่าค่าสหสัมพันธ์ที่คำนวณได้สูงกว่าค่าที่แสดงในตารางที่ 5.3 ที่เป็นค่าสหสัมพันธ์ภายใต้เงื่อนไขความแปรปรวนของข้อมูลอื่น แสดงว่าเมื่อคุณสมบัติคลื่นและสภาพแวดล้อมคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่าง K_L กับคุณสมบัติแผงกรองคลื่นก็ชัดเจนขึ้น โดยตัวแปร B/L มีค่าสหสัมพันธ์สูงที่สุด รองลงมาเป็น d_s/h กับ d_s/L ตามลำดับ กับพบว่าค่าสหสัมพันธ์ของ d_s/h เพิ่มจากที่แสดงในตารางที่ 5.3 ประมาณ 10 เท่า ส่วน d_s/L เพิ่มประมาณ 2 เท่า และ B/L เพิ่มน้อยที่สุด นอกจากนั้น พบว่าควรมีตัวแปรคุณสมบัติแผงกรองคลื่นในสมการเพียงตัวเดียวเพราะตัวแปรแต่ละตัวมีความสัมพันธ์กันเอง (Co-correlation) ก่อนข้างมาก

ตารางที่ 5.4 การวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง K_t กับตัวแปรแสดงคุณสมบัติแฟกกรองคลื่น โดยกำหนดให้ตัวแปรแสดงคุณสมบัติคลื่นกับสภาพแวดล้อมมีค่าคงที่

ตัวแปร ควบคุม	ตัวแปรที่คำนวณค่าสหสัมพันธ์	K_t	ds/L	ds/h	B/L
H _i /L	K _t Correlation	1.000	-.142	-.215	.294
		Significance (2-tailed)	.	.001	.000
	d _s /L Correlation	-.142	1.000	.925	-.445
		Significance (2-tailed)	.001	.	.000
	d _s /h Correlation	-.215	.925	1.000	-.604
		Significance (2-tailed)	.000	.000	.
	B/L Correlation	.294	-.445	-.604	1.000
		Significance (2-tailed)	.000	.000	.
	K _t Correlation	1.000	-.168	-.174	.210
		Significance (2-tailed)	.	.000	.000
h/L	d _s /L Correlation	-.168	1.000	.994	-.643
		Significance (2-tailed)	.000	.	.000
	d _s /h Correlation	-.174	.994	1.000	-.659
		Significance (2-tailed)	.000	.000	.
	B/L Correlation	.210	-.643	-.659	1.000
		Significance (2-tailed)	.000	.000	.
H _i /L & h/L	K _t Correlation	1.000	-.236	-.241	.283
		Significance (2-tailed)	.	.000	.000
	d _s /L Correlation	-.236	1.000	.994	-.641
		Significance (2-tailed)	.000	.	.000
	d _s /h Correlation	-.241	.994	1.000	-.657
		Significance (2-tailed)	.000	.000	.
	B/L Correlation	.283	-.641	-.657	1.000
		Significance (2-tailed)	.000	.000	.

สำหรับเทคนิคการวิเคราะห์ รูปสมการที่พิจารณาเป็นสมการเส้นตรงแบบหลายตัวแปร (Multi variates) กับแบบมีตัวแปร (ซึ่งเกิดจากการผสมตัวแปรพื้นฐาน) ในสมการเพียงพจน์เดียว การวิเคราะห์แบบมีหลายตัวแปร จำนวนตัวแปรที่พิจารณาไว้ในสมการเริ่มตั้งแต่ 1 ตัวแปร จนถึง 6 ตัวแปร (ครบทุกตัวแปรที่คัดเลือก) การเก็บตัวแปรไว้ในสมการ หรือนำออกจากสมการ ใช้ค่าความเชื่อมั่นทางสถิติ คือ เก็บตัวแปรไว้ในสมการ เมื่อค่าความเชื่อมั่นของการมีตัวแปรอยู่ในสมการสูงกว่า 95% (ค่า Significance ต่ำกว่า 0.025) และนำตัวแปรออกจากสมการเมื่อค่าความเชื่อมั่นของการไม่มีตัวแปรอยู่ในสมการสูงกว่า 90% (Significance ต่ำกว่า 0.05) ยกเว้น ตัวแปรแสดงคุณสมบัติแฟกกรองคลื่นที่ต้องมีอย่างน้อย 1 ตัวแปร

การวิเคราะห์แบบมีตัวแปรในสมการเพียงพจน์เดียว ทำโดยนำตัวแปรที่มีค่าสหสัมพันธ์มากกว่า “0” มาเป็นตัวคูณ กับนำตัวแปรที่มีค่าสหสัมพันธ์น้อยกว่า “0” มาเป็นตัวหาร และทำการทดลองลักษณะดังกล่าวเฉพาะตัวแปรที่มีค่าสหสัมพันธ์สูงสุด 4 ลำดับแรก ได้แก่ H_i/L , $H_i/(gT^2)$, B/L และ d_s/h โดยจากผลวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์แสดงในตารางที่ 5.3 กับตารางที่ 5.4 รูปสมการที่ใช้วิเคราะห์กรณีมีตัวแปรเพียงพจน์เดียวมีลักษณะตามแสดงในสมการที่ (23) ซึ่งสามารถลดรูปได้ตามแสดงในสมการที่ (24)

$$K_t = C \frac{\left(\frac{H_i}{gT^2}\right)\left(\frac{B}{L}\right)}{\left(\frac{H_i}{L}\right)\left(\frac{d_s}{h}\right)} + A \quad (23)$$

$$K_t = C \frac{Bh}{gd_s T^2} + A \quad (24)$$

เมื่อ

C = ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ

A = ค่าคงที่ของสมการ

ผลวิเคราะห์กรณีแฟกกรองคลื่นทำงาน 2 แฟก คลื่นทำมุม 0 – 45 องศา กับแฟกกรองคลื่น พบว่าที่ค่า $R^2 = 0.947$ ได้รูปสมการกรณีหลายตัวแปรตามแสดงในสมการที่ (25) กับตารางที่ 5.5 และที่ค่า $R^2 = 0.957$ ได้รูปสมการกรณีมีตัวแปรเพียงพจน์เดียวตามแสดงในสมการที่ (26) กับตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบค่าทำนายกับค่าที่ตรวจวัดได้ของทั้งสองสมการ ตามแสดงในรูปที่ 5.24 พบว่าผลทำนายทั้งสองแบบใกล้เคียงกัน

$$K_t = 0.377 - 53.064 \frac{H_i}{L} + 2.302 \frac{B}{L} + 654.421 \frac{H_i}{gT^2} \quad (25)$$

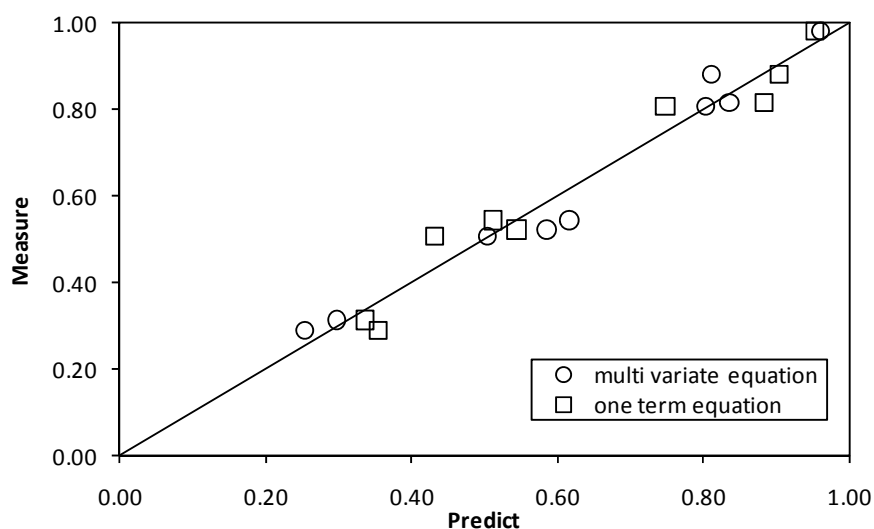
$$K_t = 4.088 \frac{Bh}{gd_s T^2} + 0.189 \quad (24)$$

ตารางที่ 5.5 ผลวิเคราะห์แบบหลายตัวแปร กรณีแพ่งกรองคลื่น 2 แผง คลื่นทำมุม 0 – 45 องศา

Description	Unstandard Coefficient		Std. Coeff. Beta	t	Sig.
	B	Std Error			
Constant	0.377	0.259		1.452	0.206
H_i/L	-53.064	12.427	-.507	-4.270	0.008
B/L	2.302	2.309	.139	0.997	0.364
$H_i/(gT^2)$	654.421	147.257	.491	4.444	0.007

ตารางที่ 5.6 ผลวิเคราะห์แบบตัวแปรพจน์เดียว กรณีแพ่งกรองคลื่น 2 แผง คลื่นทำมุม 0 – 45 องศา

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
C	4.088	.326	3.317	4.860
A	.189	.040	0.095	0.283



รูปที่ 5.24 การเปรียบเทียบค่าทำนายกับค่าที่ตรวจวัดกรณีแพ่งกรองคลื่นทำงาน 2 แผง คลื่นเฉียงทำมุม 0 – 45 องศา กับแนวแพ่งกรองคลื่น

ผลวิเคราะห์กรณีแผงกรองคลื่นทำงาน 2 แผง คลื่นทำมุม 45 – 90 องศา กับแผงกรองคลื่น พบว่าที่ค่า $R^2 = 0.855$ ได้รูปสมการกรณีหลายตัวแปรตามแสดงในสมการที่ (27) กับตารางที่ 5.7 และที่ค่า $R^2 = 0.912$ ได้รูปสมการแบบมีตัวแปรพจน์เดียวตามแสดงในสมการที่ (28) กับตารางที่ 5.8 การเปรียบเทียบค่าทำนายกับค่าที่ตรวจวัดได้ของทั้งสองสมการ ตามแสดงในรูปที่ 5.25 พบว่าผลทำนายทั้งสองแบบใกล้เคียงกัน

$$K_t = 0.157 + 534.966 \frac{H_i}{gT^2} - 27.393 \frac{H_i}{L} + 2.154 \frac{B}{L} \quad (27)$$

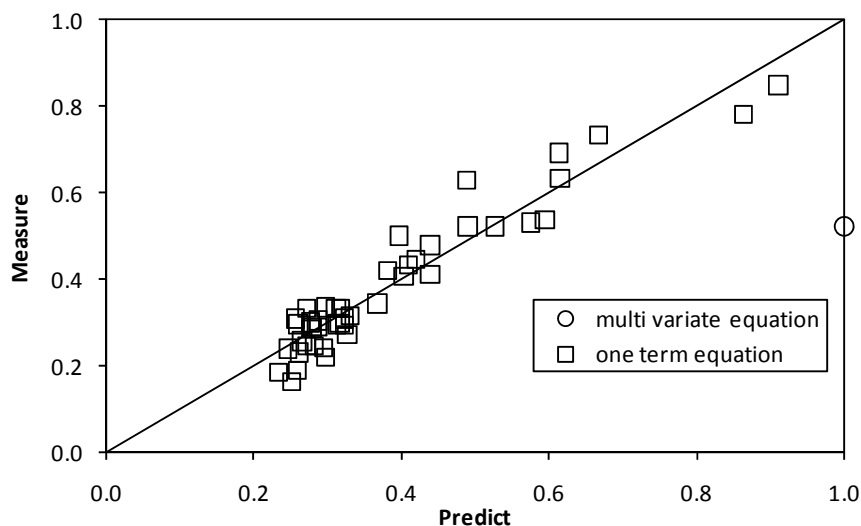
$$K_t = 4.534 \frac{Bh}{gd_s T^2} + 0.088 \quad (28)$$

ตารางที่ 5.7 ผลวิเคราะห์แบบหลายตัวแปร กรณีแผงกรองคลื่น 2 แผง คลื่นทำมุม 45 – 90 องศา

Description	Unstandard Coefficient		Std. Coeff. Beta	t	Sig.
	B	Std Error			
(Constant)	0.157	0.090		1.746	0.088
Hi/gT2	534.966	41.405	0.809	12.920	0.000
Hi/L	-27.393	2.372	-0.700	-11.550	0.000
B/L	2.154	0.982	0.131	2.195	0.034

ตารางที่ 5.8 ผลวิเคราะห์แบบตัวแปรพจน์เดียว กรณีแผงกรองคลื่น 2 แผง คลื่นทำมุม 45 – 90 องศา กับแนวแผงกรองคลื่น

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
C	4.534	0.215	4.100	4.967
A	0.088	0.016	0.056	0.120



รูปที่ 5.25 การเปรียบเทียบค่าทำนายกับค่าที่ตรวจวัดกรณีแผงกรองคลื่นทำงาน 2
แผง คลื่นเฉียงทำมุม 45 - 90 องศา กับแนวแผงกรองคลื่น

ผลวิเคราะห์กรณีแผงกรองคลื่นทำงาน 3 แผง คลื่นทำมุม 0 - 45 องศา กับแผงกรองคลื่น พบว่าที่ค่า $R^2 = 0.795$ ได้รูปสมการกรณีหลายตัวแปรตามแสดงในสมการที่ (29) กับตารางที่ 5.9 และที่ค่า $R^2 = 0.797$ ได้รูปสมการแบบมีตัวแปรพจน์เดียวตามแสดงในสมการที่ (30) กับตารางที่ 5.10 การเปรียบเทียบค่าทำนายกับค่าที่ตรวจวัดได้ของทั้งสองสมการ ตามแสดงในรูปที่ 5.26 พบว่าผลทำนายทั้งสองแบบใกล้เคียงกัน

$$K_t = 0.217 - 46.569 \left(\frac{H_i}{L} \right) + 878.985 \left(\frac{H_i}{gT^2} \right) + 2.724 \left(\frac{d_s}{L} \right) \quad (29)$$

$$K_t = 15.678 \frac{Bh}{gd_s T^2} + 0.126 \quad (30)$$

ตารางที่ 5.9 ผลวิเคราะห์แบบหลายตัวแปร กรณีแฟงกรองคลื่น 3 แฟง คลื่นทำมุม 0 – 45 องศา กับแนวแฟงกรองคลื่น

Description	Unstandard Coefficient		Std. Coeff. Beta	t	Sig.
	B	Std Error			
Constant	0.217	0.092		2.373	0.020
Hi/L	-46.569	3.199	-0.867	-14.558	0.000
$H_i/(gT^2)$	878.985	64.721	0.835	13.581	0.000
ds/L	2.724	1.063	0.143	2.564	0.013

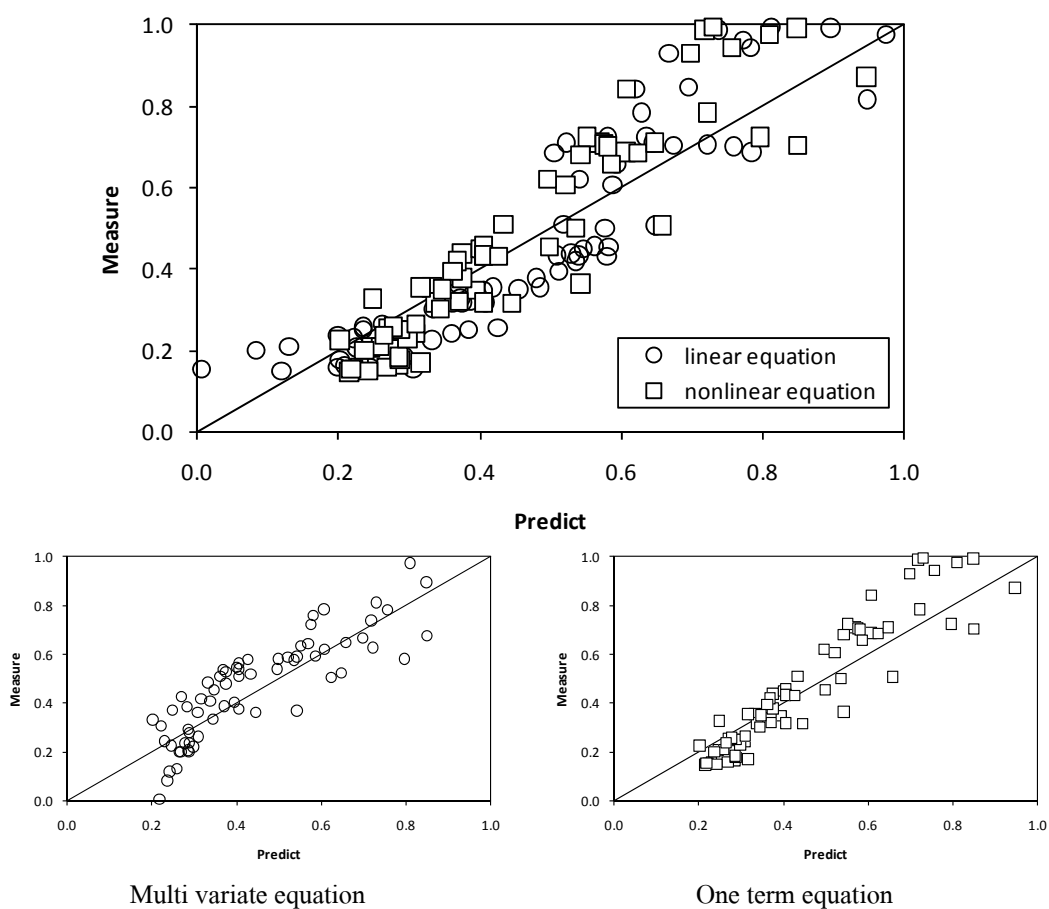
ตารางที่ 5.10 ผลวิเคราะห์แบบตัวแปรพจน์เดียว กรณีแฟงกรองคลื่น 3 แฟง คลื่นทำมุม 0 – 45 องศา กับแนวแฟงกรองคลื่น

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
C	15.678	0.947	13.791	17.566
A	0.126	0.025	0.075	0.176

ผลวิเคราะห์กรณีแฟงกรองคลื่นทำงาน 3 แฟง คลื่นทำมุม 45 - 90 องศา กับแฟงกรองคลื่น พบว่าที่ค่า $R^2 = 0.785$ ได้รูปสมการกรณีหลายตัวแปรตามแสดงในสมการที่ (31) กับตารางที่ 5.11 และที่ค่า $R^2 = 0.885$ ได้รูปสมการกรณีตัวแปรพจน์เดียวตามแสดงในสมการที่ (32) กับตารางที่ 5.12 การเปรียบเทียบค่าทำนายกับค่าที่ตรวจวัดได้ของทั้งสองสมการ ตามแสดงในรูปที่ 5.27 พบว่าการทำนายแบบมีตัวแปรในสมการพจน์เดียวมีลักษณะการกระจายตัวเหมาะสมกว่า

$$K_t = 0.258 - 33.007 \frac{H_i}{L} + 707.724 \frac{H_i}{gT^2} + 1.314 \frac{d_s}{L} \quad (31)$$

$$K_t = 14.979 \frac{Bh}{gd_s T^2} + 0.064 \quad (32)$$



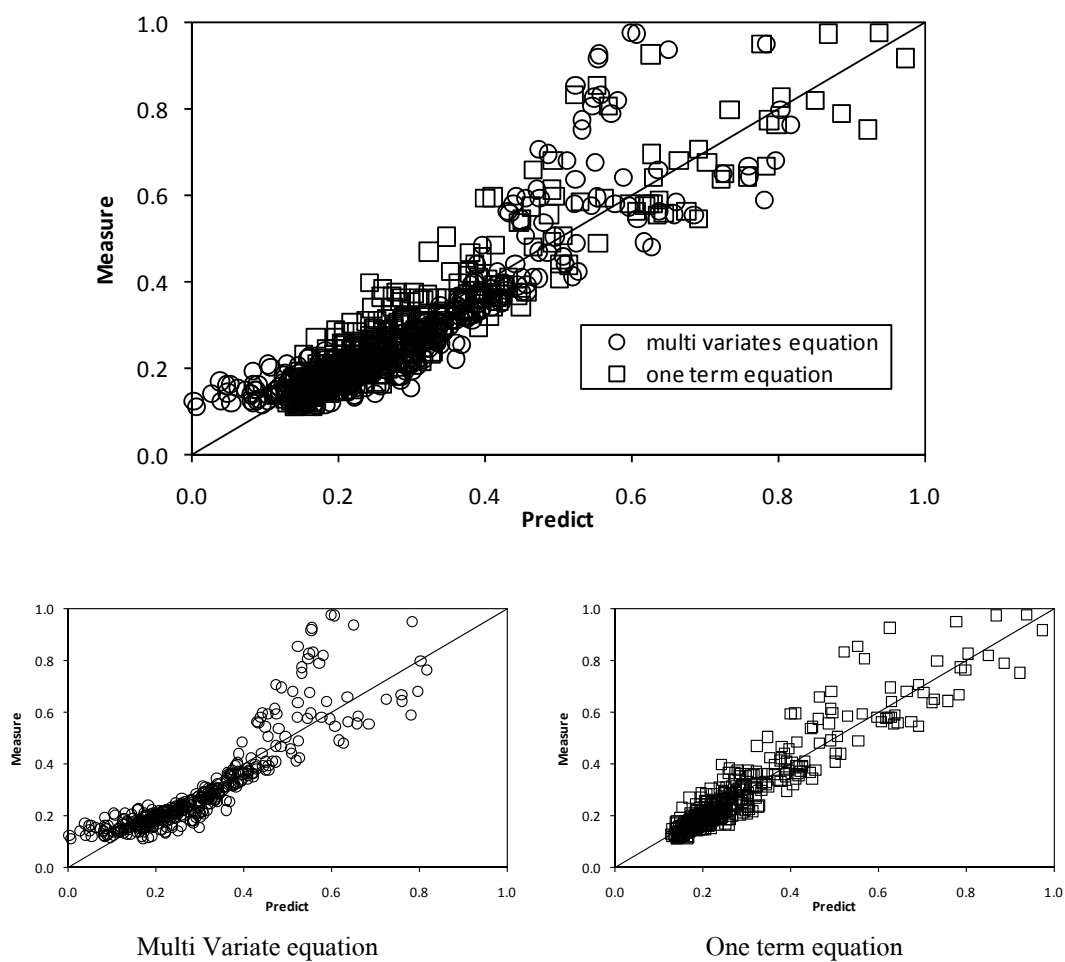
รูปที่ 5.26 การเปรียบเทียบค่าทำนายกับค่าที่ตรวจวัดกรณีแผงกรองคลื่นทำงาน 3 แผง คลื่นเอียงทำมุม 0 - 45 องศา กับแนวแผงกรองคลื่น

ตารางที่ 5.11 ผลวิเคราะห์แบบหลายตัวแปร กรณีแผงกรองคลื่น 3 แผง คลื่นทำมุม 0 – 45 องศา

Description	Unstandard Coefficient		Std. Coeff.	t	Sig.
	B	Std Error	Beta		
(Constant)	0.258	0.026		9.844	0.000
Hi/L	-33.007	1.031	-0.820	-32.018	0.000
Hi/gT2	707.724	23.379	0.805	30.272	0.000
ds/L	1.314	0.333	0.097	3.950	0.000

ตารางที่ 5.12 ผลวิเคราะห์แบบตัวแปรพจน์เดียว กรณีแผงกรองคลื่น 3 แผง คลื่นทำมุม 45 - 90 องศา กับแนวแผงกรองคลื่น

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
C	14.979	0.274	14.440	15.519
A	0.064	0.005	0.053	0.074



รูปที่ 5.27 การเปรียบเทียบค่าทำนายกับค่าที่ตรวจวัดกรณีแผงกรองคลื่นทำงาน 3 แผง คลื่นเอียงทำมุม 45 - 90 องศา กับแนวแผงกรองคลื่น

การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ กับลักษณะการกระจายตัวของผลทำนายตามแสดงในรูปที่ 5.24 - 5.27 สรุปว่าการทำนายแบบมีตัวแปรในสมการเพียงพจน์เดียวตามรูปสมการที่ (24) มีความเหมาะสมมากกว่าโดยค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ในสมการมีรายละเอียดตามแสดงในตารางที่ 5.13

$$K_t = C \frac{Bh}{gd_s T^2} + A \quad (24)$$

เมื่อ

- K_t ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น
 B ระยะห่างระหว่างแผงกรองคลื่น (เมตร)
 h ความลึกน้ำ (เมตร)
 g อัตราเร่งจากแรงโน้มถ่วง (เมตร/วินาที²)
 d_s ระยะกินน้ำลึกของแผงกรองคลื่น (เมตร)
 T คาบเวลาคคลื่น (วินาที)
 C, A ค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของสมการ

ตารางที่ 5.13 ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น

ชุดข้อมูล	C	A	R ²
แผงกรองคลื่นทำงาน 2 แผง คลื่นทำมุม 0 – 45 องศา กับแนวแผงกรองคลื่น	4.088	0.189	0.957
แผงกรองคลื่นทำงาน 2 แผง คลื่นทำมุม 45 - 90 องศา กับแนวแผงกรองคลื่น	4.534	0.088	0.912
แผงกรองคลื่นทำงาน 3 แผง คลื่นทำมุม 0 – 45 องศา กับแนวแผงกรองคลื่น	15.678	0.126	0.797
แผงกรองคลื่นทำงาน 3 แผง คลื่นทำมุม 45 - 90 องศา กับแนวแผงกรองคลื่น	14.979	0.064	0.885

การตรวจสอบขนาดความคลาดเคลื่อนของสมการที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นในรูปร้อยละของความผิดพลาด โดยใช้สมการที่ (25) พบว่าในการวิเคราะห์แบบทางเดียว ที่ค่าความมั่นใจ 95% มีขนาดความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 15.8 การพิจารณาในทางกลับกันพบว่ามีความแม่นยำในระดับสูงกว่าร้อยละ 84.2

$$Acc = \left| \frac{Est - Act}{Act} \right| * 100 \quad (25)$$

เมื่อ

Acc ความคลาดเคลื่อนของสมการที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (ร้อยละ)

Est ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นทำนาย

Act ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่เกิดขึ้นจริง

5.7 ประสิทธิภาพแพ่งกรองคลื่น

ตามแสดงในข้อ 5.4 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นระหว่างวันที่ 3 – 19 มิถุนายน 2555 ที่ตรวจวัดได้ในสนามมีค่าระหว่าง 0.1107 – 0.9949 เฉลี่ย 0.3320 โดยตามแสดงในรูปที่ 5.17 ลักษณะเป็นกราฟเบ้ขวา ค่า Skew เท่ากับ 1.48⁴ โดยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นส่วนใหญ่ (ร้อยละ 50) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.189 – 0.395⁵

ประสิทธิภาพของแพ่งกรองคลื่นซึ่งพิจารณาจากความสามารถในการลดความสูงคลื่น หรือส่วนต่างของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นกับจำนวนเต็ม 1.0 ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.605 - 0.811 เฉลี่ย 0.668 หรือระหว่างร้อยละ 60.5 – 81.1 เฉลี่ยร้อยละ 66.8

⁴ ค่า Skew แสดงลักษณะการกระจายตัวของข้อมูล (โค้งปกติมีค่า skew เท่ากับศูนย์ ค่ามากกว่า “ศูนย์” หมายถึงข้อมูลส่วนใหญ่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ย ค่าน้อยกว่า “ศูนย์” หมายถึงข้อมูลส่วนใหญ่มากกว่าค่าเฉลี่ย) คำนวณได้จากสมการ

$$skew = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum \left(\frac{x_i - \bar{x}}{std} \right)^3$$

⁵ คำนวณจากค่า percentile ที่ 25 กับ 75

บทที่ 6 สรุป

การศึกษาวิจัยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของแผงกรองคลื่นที่ติดตั้งที่สถานีน้ำร่อง จังหวัดสมุทรปราการ ได้ข้อสรุป ดังนี้

1. การวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลกระทบกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (K_t) ของแผงกรองคลื่นที่ใช้เป็นกรณีศึกษาพบว่าขึ้นกับอัตราส่วน H_t/L , $H_t/(gT^2)$, B/L , h/L , d_s/h และ d_s/L เรียงลำดับจากมากไปน้อย
2. ปัจจัยที่แปรผันโดยตรงกับ K_t (เพิ่ม-ลดทิศทางเดียวกัน) มี 3 ตัวแปร คือ $H_t/(gT^2)$, B/L และ h/L ปัจจัยที่แปรผันโดยกลับ (เพิ่ม-ลดตรงข้ามกัน) มี 3 ตัวแปร คือ H_t/L , d_s/h และ d_s/L
3. สมรรถนะแผงกรองคลื่นมีความแปรปรวนมาก (ค่า K_t อยู่ระหว่าง 0.1 – 1.0) เมื่ออัตราส่วนความลึกน้ำต่อความยาวคลื่น (h/L) เข้าใกล้ 0.5 ซึ่งเป็นเกณฑ์น้ำลึก แต่สามารถทำงานได้แน่นอนขึ้นเมื่ออัตราส่วน h/L ลดลง
4. ทำนองเดียวกัน สมรรถนะแผงกรองคลื่นมีความแปรปรวนมาก (ค่า K_t อยู่ระหว่าง 0.1 – 1.0) เมื่อความชันคลื่น (H_t/L) ต่ำ เช่น ขนาดร้อยละ 0.5 ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่จำเป็นต้องมีแผงกรองคลื่นเพราะความสูงคลื่นน้อย แต่สามารถทำงานได้แน่นอนขึ้นเมื่อความชันคลื่นเพิ่ม
5. การพัฒนาสมการทำนายค่า K_t จากชุดตัวแปรที่ศึกษา พบว่าแปรผันตามระยะห่างระหว่างแผงกรองคลื่น กับความลึกน้ำ และแปรผันโดยกลับกับคาบเวลาค้นขยกำลังสอง กับระยะกินน้ำลึกของแผงกรองคลื่น การตรวจสอบความแม่นยำของสมการจากขนาดความคลาดเคลื่อน พบว่าที่ค่าความเชื่อมั่น 95% ผลทำนายมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 15.8
6. ขอบเขตการใช้สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นเป็นคุณลักษณะคลื่นและแผงกรองคลื่นในช่วงเวลาจัดเก็บข้อมูล คือ H_t/L ระหว่าง 0.0019 – 0.0291, $H_t/(gT^2)$ ระหว่าง 0.0001 – 0.0013, B/L ระหว่าง 0.0273 – 0.1045 และ d_s/h ระหว่าง 0.0750 – 0.2035 และคุณลักษณะทางกายภาพของแผงกรองคลื่น คือ มีแผงกรองคลื่น 3 แผง วางห่างกันแผงละ 1.5 เมตร ความพรุนแผงกรองคลื่นแผงนอก 19.4% ความพรุนแผงกรองคลื่นแผงกลาง 42.6%
7. ประสิทธิภาพแผงกรองคลื่นที่ใช้เป็นกรณีศึกษาระหว่างวันที่ 3 – 19 มิถุนายน 2554 ส่วนใหญ่ (ร้อยละ 50) อยู่ระหว่างร้อยละ 60.5 – 81.1 เฉลี่ยร้อยละ 66.8

คำแนะนำสำหรับงานศึกษาวิจัยในโอกาสต่อไปประกอบด้วย

1. การยืนยันข้อสรุปผลการศึกษาวิจัยโดยตรวจวัดคลื่นในช่วงเวลาอื่นของปี เช่น ในฤดูลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือเพื่อตรวจสอบผลกระทบที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของคลื่นในทิศทางตรงข้าม หรือการตรวจวัดที่แผงกรองคลื่นแห่งอื่น หรือการทดลองในห้องปฏิบัติการ
2. การเพิ่มความพรุนแผงกรองคลื่นในสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น
3. การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของของไหลทางชลศาสตร์ เช่น ค่า Froude number, Reynolds number กับสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น

เอกสารอ้างอิง

1. กรมการขนส่งทางน้ำและพาณิชยนาวี, 2546, แบบก่อสร้างโครงการซ่อมแซมสถานีน้ำร่อง จังหวัดสมุทรปราการ, กรุงเทพฯ, แผ่นที่ 1 - 118
2. กรมอุตุนิยมหาวิทยาลัย, 2554, ข้อมูลลมตรวจวัดที่สถานี 429201 (สถานีน้ำร่อง) พ.ศ.2544 – 2553
3. กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ, 2540, แผนที่ทางเข้าแม่น้ำเจ้าพระยา, บรรณาธิกร ครั้งที่ 19, หน้า 112
4. Balaji, R. and Sundar, V., 2002, **Hydraulic Performance of Double Screen Breakwaters** [Online], Available: <ftp://ftp.hamburg.baw.de> [2011, February 6].
5. Fugazza, M. and Natale, L., 2010, “Hydraulic Design of Perforated Breakwaters”, **Journal of Waterway, Ports, Coastal, and Ocean Engineering**, Vol. 118, No. 1, pp. 1 – 14
6. Fousert, M. W., 2006, **Floating Breakwater: A Theoretical study of a dynamic wave attenuating system**, Final report of the master theses Delft University of Technology Faculty of Civil Engineering and Geosciences Section of Hydraulic Engineering, pp. 58 - 62
7. JFE Advance Tech Co., Ltd., 2000, **AWH-USB Specification** [Online], Available: <http://www.jfe-advantech.co.jp> [2012, May 5]
8. Journée, J.M.J. and Massie, W.W., 2001, **Offshore Hydrodynamics**, Delft University of Technology, Netherland, p.5-34
9. Krishnakumar, C., Sundar, V. and Sannasiraj, S.A., 2010, Hydrodynamic Performance of Single and Double Wave Screens, **Journal of Waterway, Ports, Coastal, and Ocean Engineering**, Vol. 136, No. 1, pp. 59 – 65

10. Rageh, O.S. and Koriam, A.S., 2010, Hydraulic performance of vertical walls with slotted used as breakwater, **Journal of Costal Engineering**, Vol. 57, pp. 745 - 756.

11. Shepsis, V., Carter, J.D., Fenical, S., 2007, **Recent Experience in Analysis and Design of Perforated Vertical Breakwaters** [Online], Available: <http://www.ascelibrary.org> [2011, February 26].

12. SonTek Inc., 2001, **SonTek Triton Principles of Operation**, California, pp. 3-16.

13. Suh, K. D., Shin, S. and Daniel, T., 2006, Hydrodynamic Characteristics of Pile-Supported Vertical Wall Breakwaters, **Journal of Waterway, Port, Costal, and Ocean Engineering**, Vol. March/April 2006, pp. 83 - 96.

14. Tsinker, G. P., 1995, **Marine Structures Engineering: Specialized Applications**, Chapman & Hall, Newyork, pp.379 - 380

15. US Army Corp of Engineer (USACE), 1984, **Shore Protection Manual Volume I**, 4th ed., Coastal Engineering Research Center, Mississippi, pp. 2-75 to 2-90

16. US Army Corp of Engineer (USACE), (1986), **Engineering Manual EM 110-2-2904: Design of Breakwaters and Jetties**, Department of the Army, Corps of Engineers, Office of the Chief of Engineers, Washington DC, p.4-13

17. US Army Corp of Engineer (USACE), 2002, **Engineering Manual EM 110-2-1100: Coastal Engineering Manual**, Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington DC, pp. II-2-37 to II-2-47

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลสืบตรวจวัดบริเวณสถานีน้ำร่อง

3 - 19 มิถุนายน พ.ศ.2554

No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)	No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)
1	6/3/11 18:00	15.41	6.0	4.6	222.06	12.1	376	6/11/11 13:30	14.29	35.7	4.6	182.28	6.7
2	6/3/11 18:30	15.57	6.1	4.6	197.29	9.9	377	6/11/11 14:00	14.27	37.2	4.6	186.19	6.0
3	6/3/11 19:00	15.72	6.7	4.6	177.8	5.6	378	6/11/11 14:30	14.27	36.9	4.6	187.37	6.9
4	6/3/11 19:30	15.79	7.1	4.6	182.02	2.4	379	6/11/11 15:00	14.18	39.8	4.6	184.73	5.9
5	6/3/11 20:00	15.81	7.3	4.6	203.78	2.7	380	6/11/11 15:30	14.16	30.9	4.7	186.42	5.1
6	6/3/11 20:30	15.76	8.2	4.6	121.56	4.2	381	6/11/11 16:00	14.13	32.5	4.4	186.7	5.6
7	6/3/11 21:00	15.69	9.6	4.6	188.31	8.0	382	6/11/11 16:30	14.02	29.7	4.4	181.85	4.9
8	6/3/11 21:30	15.55	10.0	4.6	171.79	9.9	383	6/11/11 17:00	14.05	28.4	4.6	186.36	5.3
9	6/3/11 22:00	15.40	12.2	4.6	179.21	8.7	384	6/11/11 17:30	14.12	32.3	4.4	182.63	7.7
10	6/3/11 22:30	15.25	10.4	4.6	183.53	8.4	385	6/11/11 18:00	14.10	32.0	4.6	182.32	6.4
11	6/3/11 23:00	15.13	12.6	4.6	14.76	9.8	386	6/11/11 18:30	14.05	32.4	4.4	180.24	6.7
12	6/3/11 23:30	14.92	11.0	4.6	191.09	6.8	387	6/11/11 19:00	14.05	40.4	4.4	188.04	8.8
13	6/4/11 0:00	14.88	11.7	4.6	188.28	6.4	388	6/11/11 19:30	14.16	49.7	4.4	192.99	10.5
14	6/4/11 0:30	14.74	12.5	4.6	191.75	4.5	389	6/11/11 20:00	14.27	46.4	4.6	189.52	12.9
15	6/4/11 1:00	14.74	16.2	4.4	183.38	3.1	390	6/11/11 20:30	14.45	45.1	4.4	188.65	10.2
16	6/4/11 1:30	14.70	15.3	4.4	185.61	2.8	391	6/11/11 21:00	14.51	40.2	4.4	184.47	10.1
17	6/4/11 2:00	14.70	15.9	4.4	183.02	2.9	392	6/11/11 21:30	14.72	47.0	4.6	182.81	9.8
18	6/4/11 2:30	14.73	14.6	4.4	181.46	4.6	393	6/11/11 22:00	14.87	42.6	4.6	181.15	8.6
19	6/4/11 3:00	14.78	12.3	4.6	179.31	4.3	394	6/11/11 22:30	14.98	45.1	4.6	185.53	8.3
20	6/4/11 3:30	14.83	9.3	4.6	182.86	5.6	395	6/11/11 23:00	14.98	40.5	4.6	189.86	7.0
21	6/4/11 4:00	14.87	14.0	4.6	187.39	4.0	396	6/11/11 23:30	15.13	40.2	4.6	188.13	6.2
22	6/4/11 4:30	14.90	16.1	4.6	188.07	2.8	397	6/12/11 0:00	15.15	36.2	4.9	183.4	5.6
23	6/4/11 5:00	14.89	20.0	4.6	197.73	3.2	398	6/12/11 0:30	15.15	36.6	4.7	184.21	5.8
24	6/4/11 5:30	14.88	20.0	4.6	184.54	6.4	399	6/12/11 1:00	15.07	40.7	4.7	181.34	8.5
25	6/4/11 6:00	14.79	18.9	4.6	190.51	5.0	400	6/12/11 1:30	15.05	40.3	4.6	189.16	9.6
26	6/4/11 6:30	14.70	29.2	4.4	193.71	9.5	401	6/12/11 2:00	14.90	39.2	4.9	186.56	13.9
27	6/4/11 7:00	14.55	30.3	4.4	187.21	12.0	402	6/12/11 2:30	14.75	40.1	5.3	187.86	12.4
28	6/4/11 7:30	14.37	22.6	4.4	181.37	13.1	403	6/12/11 3:00	14.53	43.5	4.7	179.05	19.8
29	6/4/11 8:00	14.16	21.0	4.6	177.35	14.8	404	6/12/11 3:30	14.38	42.2	5.3	180.42	15.0
30	6/4/11 8:30	13.89	19.3	4.4	172.02	15.6	405	6/12/11 4:00	14.11	44.9	4.9	180.3	18.5
31	6/4/11 9:00	13.69	19.9	4.3	177.28	16.2	406	6/12/11 4:30	13.92	48.1	5.3	179.89	15.1
32	6/4/11 9:30	13.48	18.4	4.6	173.58	14.7	407	6/12/11 5:00	13.73	45.5	4.7	184.28	13.5
33	6/4/11 10:00	13.18	15.1	4.3	168.2	14.2	408	6/12/11 5:30	13.57	45.6	4.4	184.29	10.4
34	6/4/11 10:30	13.01	16.1	4.6	175.49	13.7	409	6/12/11 6:00	13.42	45.3	4.4	191.74	11.6
35	6/4/11 11:00	12.82	16.6	4.3	178.9	12.9	410	6/12/11 6:30	13.41	43.9	4.4	184.24	12.1
36	6/4/11 11:30	12.69	19.2	4.6	185.8	8.7	411	6/12/11 7:00	13.28	46.7	4.3	186.5	9.8

No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)	No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)
37	6/4/11 12:00	12.56	21.8	4.3	179.26	5.1	412	6/12/11 7:30	13.22	44.3	4.3	185.95	10.7
38	6/4/11 12:30	12.52	20.9	4.1	176.89	3.4	413	6/12/11 8:00	13.13	49.5	4.4	186.08	10.4
39	6/4/11 13:00	12.53	21.8	4.3	191.3	6.0	414	6/12/11 8:30	13.23	46.8	4.6	191.32	11.6
40	6/4/11 13:30	12.63	21.3	4.1	180.05	10.4	415	6/12/11 9:00	13.28	62.6	4.4	191.48	13.4
41	6/4/11 14:00	12.77	23.9	4.1	179.68	15.1	416	6/12/11 9:30	13.45	75.8	4.7	188.06	15.4
42	6/4/11 14:30	13.00	18.7	4.3	185.88	15.1	417	6/12/11 10:00	13.49	76.9	4.4	186.2	16.3
43	6/4/11 15:00	13.23	21.0	4.3	175.82	19.0	418	6/12/11 10:30	13.69	77.8	4.7	191.69	19.2
44	6/4/11 15:30	13.55	21.7	4.3	187.29	20.0	419	6/12/11 11:00	13.87	87.3	4.4	184.07	16.2
45	6/4/11 16:00	13.82	16.5	4.4	181.32	21.9	420	6/12/11 11:30	14.08	70.5	4.9	185.41	15.9
46	6/4/11 16:30	14.18	18.1	4.4	179.58	21.9	421	6/12/11 12:00	14.18	59.7	4.4	179.79	10.2
47	6/4/11 17:00	14.50	16.6	4.4	177.01	21.0	422	6/12/11 12:30	14.24	68.6	4.7	183.64	11.7
48	6/4/11 17:30	14.81	10.9	4.6	179.79	18.0	423	6/12/11 13:00	14.36	74.0	4.9	190.59	14.9
49	6/4/11 18:00	15.06	12.6	4.6	173.2	16.4	424	6/12/11 13:30	14.33	76.3	4.9	184.47	14.8
50	6/4/11 18:30	15.32	11.4	4.6	194.61	12.7	425	6/12/11 14:00	14.51	70.7	5.1	187.77	14.8
51	6/4/11 19:00	15.49	12.7	4.6	167.34	12.6	426	6/12/11 14:30	14.59	59.7	4.7	187.77	13.3
52	6/4/11 19:30	15.62	10.2	4.6	177.26	7.4	427	6/12/11 15:00	14.63	52.2	4.7	189.14	11.1
53	6/4/11 20:00	15.76	11.3	4.6	171.39	5.0	428	6/12/11 15:30	14.68	49.4	4.9	185.51	12.5
54	6/4/11 20:30	15.82	11.0	4.6	184.17	2.5	429	6/12/11 16:00	14.64	49.4	4.4	192.22	10.3
55	6/4/11 21:00	15.79	16.6	4.6	169.19	4.2	430	6/12/11 16:30	14.63	46.2	5.1	193.49	10.2
56	6/4/11 21:30	15.68	15.4	4.6	189.52	7.2	431	6/12/11 17:00	14.67	48.4	4.7	189.79	10.6
57	6/4/11 22:00	15.63	16.1	4.6	186.07	8.1	432	6/12/11 17:30	14.66	44.9	5.1	190.82	11.0
58	6/4/11 22:30	15.49	17.3	4.6	200.66	10.3	433	6/12/11 18:00	14.57	47.6	5.1	189.75	12.0
59	6/4/11 23:00	15.34	22.8	4.6	192.8	8.3	434	6/12/11 18:30	14.48	45.9	5.3	186.18	10.6
60	6/4/11 23:30	15.23	23.9	4.6	170.64	9.0	435	6/12/11 19:00	14.55	40.1	4.4	187.34	9.1
61	6/5/11 0:00	15.08	34.6	4.6	195.07	6.8	436	6/12/11 19:30	14.49	42.8	5.1	184.95	8.6
62	6/5/11 0:30	14.99	34.8	4.6	193.24	7.2	437	6/12/11 20:00	14.49	33.7	4.6	187.83	7.7
63	6/5/11 1:00	14.89	43.0	4.6	194.14	5.5	438	6/12/11 20:30	14.56	33.8	5.1	188.29	6.3
64	6/5/11 1:30	14.84	45.1	4.6	192.83	6.8	439	6/12/11 21:00	14.59	35.6	4.9	185.6	8.3
65	6/5/11 2:00	14.76	37.6	4.6	191.24	5.8	440	6/12/11 21:30	14.62	33.3	4.4	181.92	9.2
66	6/5/11 2:30	14.80	40.3	4.6	194.98	5.5	441	6/12/11 22:00	14.69	35.4	4.6	188.87	8.4
67	6/5/11 3:00	14.80	45.9	4.6	187.4	5.7	442	6/12/11 22:30	14.77	35.2	4.7	193.8	9.0
68	6/5/11 3:30	14.85	42.0	4.6	187.88	6.2	443	6/12/11 23:00	14.84	33.9	4.6	187.04	7.1
69	6/5/11 4:00	14.93	54.9	4.6	196.54	6.1	444	6/12/11 23:30	14.90	40.4	4.7	192.83	8.6
70	6/5/11 4:30	14.89	60.1	4.6	195.06	7.0	445	6/13/11 0:00	14.92	46.6	4.6	190.16	8.9
71	6/5/11 5:00	15.01	58.8	4.6	193.48	6.5	446	6/13/11 0:30	14.90	50.3	4.7	187.89	9.2
72	6/5/11 5:30	15.00	46.4	4.6	197.91	5.9	447	6/13/11 1:00	14.86	50.0	4.6	188.85	9.7

No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)	No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)
73	6/5/11 6:00	15.00	46.0	4.7	188.33	7.8	448	6/13/11 1:30	14.77	46.3	4.4	182.1	9.5
74	6/5/11 6:30	14.88	43.9	4.7	181.02	8.0	449	6/13/11 2:00	14.67	43.3	4.6	188.15	9.9
75	6/5/11 7:00	14.80	40.8	4.4	190.71	10.8	450	6/13/11 2:30	14.56	43.3	4.9	190.32	13.3
76	6/5/11 7:30	14.62	33.9	4.6	189.92	12.3	451	6/13/11 3:00	14.38	39.8	4.7	184.02	12.2
77	6/5/11 8:00	14.42	37.9	4.4	185.98	12.7	452	6/13/11 3:30	14.21	39.6	4.4	192.01	14.9
78	6/5/11 8:30	14.18	35.6	4.7	183.61	13.8	453	6/13/11 4:00	14.01	36.4	4.7	183.15	13.4
79	6/5/11 9:00	14.00	28.9	4.6	177.17	15.8	454	6/13/11 4:30	13.85	36.1	4.7	187.91	15.2
80	6/5/11 9:30	13.78	28.0	4.6	181.9	14.7	455	6/13/11 5:00	13.66	40.2	4.7	186.34	13.8
81	6/5/11 10:00	13.53	27.9	4.3	180.38	16.7	456	6/13/11 5:30	13.45	33.3	4.6	184.87	11.9
82	6/5/11 10:30	13.30	31.2	4.4	187.19	14.8	457	6/13/11 6:00	13.26	29.6	4.7	182.8	11.3
83	6/5/11 11:00	13.07	30.2	4.3	182.76	13.0	458	6/13/11 6:30	13.07	33.5	4.7	183.85	10.4
84	6/5/11 11:30	12.88	33.9	4.4	176.32	12.6	459	6/13/11 7:00	12.97	29.5	4.6	189.96	8.3
85	6/5/11 12:00	12.72	32.9	4.7	182.15	9.1	460	6/13/11 7:30	12.84	25.2	4.6	190.8	4.2
86	6/5/11 12:30	12.65	35.5	4.1	177.62	6.9	461	6/13/11 8:00	12.81	24.8	4.4	198.74	3.9
87	6/5/11 13:00	12.60	34.6	4.4	187.51	5.8	462	6/13/11 8:30	12.77	29.3	4.3	194.95	4.7
88	6/5/11 13:30	12.58	41.9	4.1	183.1	7.5	463	6/13/11 9:00	12.82	25.7	4.4	196.86	6.1
89	6/5/11 14:00	12.68	39.6	4.3	179.6	9.3	464	6/13/11 9:30	12.89	21.1	4.3	183.02	6.6
90	6/5/11 14:30	12.84	43.0	4.4	178.37	14.1	465	6/13/11 10:00	12.98	21.6	4.3	168.29	11.5
91	6/5/11 15:00	13.01	34.1	4.3	191.25	15.8	466	6/13/11 10:30	13.17	17.2	4.3	179.69	14.9
92	6/5/11 15:30	13.25	40.5	4.3	195.43	19.7	467	6/13/11 11:00	13.30	14.7	4.3	197.28	10.4
93	6/5/11 16:00	13.54	35.6	4.4	178.68	21.1	468	6/13/11 11:30	13.47	14.6	4.4	202.49	15.7
94	6/5/11 16:30	13.86	29.0	4.4	196.96	21.2	469	6/13/11 12:00	13.73	15.0	4.3	199.68	8.0
95	6/5/11 17:00	14.16	31.0	4.4	197.89	20.7	470	6/13/11 12:30	13.85	14.1	4.4	226.19	15.3
96	6/5/11 17:30	14.51	25.1	4.4	179.53	21.9	471	6/13/11 13:00	14.06	12.3	4.4	196.33	9.3
97	6/5/11 18:00	14.73	19.6	4.6	187.67	18.7	472	6/13/11 13:30	14.23	15.2	4.4	204.98	9.7
98	6/5/11 18:30	15.04	24.4	4.6	178.59	16.8	473	6/13/11 14:00	14.41	14.9	4.4	191.44	10.1
99	6/5/11 19:00	15.32	21.7	4.6	186.49	14.3	474	6/13/11 14:30	14.56	18.8	4.4	187.33	12.1
100	6/5/11 19:30	15.54	28.6	4.6	189.55	10.8	475	6/13/11 15:00	14.74	22.8	4.6	188.87	9.1
101	6/5/11 20:00	15.60	30.4	4.6	186.92	7.8	476	6/13/11 15:30	14.87	28.1	4.6	191.45	7.4
102	6/5/11 20:30	15.75	31.5	4.6	187.7	5.0	477	6/13/11 16:00	14.94	24.6	4.6	180.52	7.0
103	6/5/11 21:00	15.77	43.0	4.6	180.19	5.6	478	6/13/11 16:30	15.02	25.4	4.6	186.49	3.6
104	6/5/11 21:30	15.78	34.6	4.7	183.07	5.5	479	6/13/11 17:00	15.06	24.8	4.6	189.17	3.3
105	6/5/11 22:00	15.71	46.3	4.6	177.77	9.6	480	6/13/11 17:30	15.01	28.6	4.6	204.4	5.8
106	6/5/11 22:30	15.63	50.8	4.6	193.61	9.7	481	6/13/11 18:00	14.93	39.6	4.7	192.22	5.2
107	6/5/11 23:00	15.48	50.4	4.6	194.18	10.0	482	6/13/11 18:30	14.96	46.5	4.6	193.83	7.8
108	6/5/11 23:30	15.34	59.4	4.6	171.67	12.5	483	6/13/11 19:00	14.92	45.3	4.6	197.99	5.5

No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)	No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)
109	6/6/11 0:00	15.21	66.4	4.7	183.81	9.4	484	6/13/11 19:30	14.84	35.2	4.6	189.13	4.9
110	6/6/11 0:30	15.02	58.4	4.6	201.36	11.1	485	6/13/11 20:00	14.79	28.5	4.6	189.84	9.2
111	6/6/11 1:00	14.92	68.1	4.7	190.99	11.1	486	6/13/11 20:30	14.70	29.6	4.4	199.23	5.6
112	6/6/11 1:30	14.86	61.6	4.9	187.7	10.0	487	6/13/11 21:00	14.76	15.3	4.6	192.74	3.3
113	6/6/11 2:00	14.72	65.6	4.6	197.93	8.8	488	6/13/11 21:30	14.74	16.8	4.6	183.07	7.1
114	6/6/11 2:30	14.70	50.3	4.6	199.18	7.2	489	6/13/11 22:00	14.82	14.1	4.6	188.86	3.5
115	6/6/11 3:00	14.73	59.0	4.6	200.51	7.4	490	6/13/11 22:30	14.82	11.9	4.6	177.48	9.3
116	6/6/11 3:30	14.72	61.9	4.9	195.17	8.9	491	6/13/11 23:00	14.84	11.0	4.6	170.99	2.7
117	6/6/11 4:00	14.77	47.0	4.6	195.83	7.1	492	6/13/11 23:30	14.86	9.8	4.6	191.78	3.1
118	6/6/11 4:30	14.87	44.5	4.6	200.81	7.4	493	6/14/11 0:00	14.91	7.9	4.6	181.49	2.8
119	6/6/11 5:00	14.95	41.7	4.6	187.15	4.8	494	6/14/11 0:30	14.92	7.5	4.6	96	2.3
120	6/6/11 5:30	14.96	37.9	4.7	189.98	5.3	495	6/14/11 1:00	14.94	6.3	4.6	162.78	4.3
121	6/6/11 6:00	14.94	30.9	4.6	197.86	3.7	496	6/14/11 1:30	14.90	7.2	4.6	139.6	5.1
122	6/6/11 6:30	14.98	33.9	4.6	190.06	4.7	497	6/14/11 2:00	14.83	7.6	4.6	182.19	3.7
123	6/6/11 7:00	14.86	30.4	4.6	192.84	9.8	498	6/14/11 2:30	14.76	8.9	4.4	190.7	6.2
124	6/6/11 7:30	14.79	33.4	4.6	185.55	9.2	499	6/14/11 3:00	14.67	11.3	4.4	184.76	6.7
125	6/6/11 8:00	14.66	37.3	4.4	178.63	11.8	500	6/14/11 3:30	14.52	10.4	4.4	186.96	8.6
126	6/6/11 8:30	14.51	37.1	4.6	180.86	12.2	501	6/14/11 4:00	14.36	10.2	4.4	196.45	13.9
127	6/6/11 9:00	14.29	34.6	4.4	179.54	17.6	502	6/14/11 4:30	14.14	14.3	4.4	178.18	12.1
128	6/6/11 9:30	14.05	30.4	4.4	189.23	16.6	503	6/14/11 5:00	13.96	11.8	4.4	194.66	13.9
129	6/6/11 10:00	13.75	43.5	4.4	180.74	17.9	504	6/14/11 5:30	13.75	14.5	4.3	157.45	12.8
130	6/6/11 10:30	13.55	40.9	4.3	187.21	18.4	505	6/14/11 6:00	13.56	14.9	4.3	204.5	10.7
131	6/6/11 11:00	13.25	40.0	4.7	177.69	18.7	506	6/14/11 6:30	13.36	15.2	4.3	185.13	11.0
132	6/6/11 11:30	13.03	33.7	4.9	182.51	16.0	507	6/14/11 7:00	13.21	13.9	4.3	106.91	13.4
133	6/6/11 12:00	12.81	40.5	4.6	179.77	13.1	508	6/14/11 7:30	13.03	16.9	4.3	223.92	10.2
134	6/6/11 12:30	12.62	32.4	4.7	178.59	9.7	509	6/14/11 8:00	12.93	27.6	4.3	211.74	9.3
135	6/6/11 13:00	12.50	28.6	4.4	179.96	5.6	510	6/14/11 8:30	12.81	42.5	4.1	216.64	8.2
136	6/6/11 13:30	12.47	28.1	4.4	189.2	3.8	511	6/14/11 9:00	12.74	40.1	4.1	215.97	6.0
137	6/6/11 14:00	12.47	26.3	4.3	182.27	6.7	512	6/14/11 9:30	12.73	42.4	4.1	221.96	6.4
138	6/6/11 14:30	12.57	26.0	4.3	169.59	9.0	513	6/14/11 10:00	12.68	28.2	4.1	240.07	4.3
139	6/6/11 15:00	12.71	26.8	4.1	170.02	12.2	514	6/14/11 10:30	12.70	21.9	4.1	204.42	7.3
140	6/6/11 15:30	12.92	23.9	4.4	171.37	17.5	515	6/14/11 11:00	12.82	16.5	4.1	203.27	9.3
141	6/6/11 16:00	13.17	27.9	4.3	176.25	17.7	516	6/14/11 11:30	12.94	11.2	4.3	197.68	15.1
142	6/6/11 16:30	13.42	26.3	4.4	181.13	21.5	517	6/14/11 12:00	13.19	10.3	4.3	188.38	18.2
143	6/6/11 17:00	13.74	21.9	4.4	176.83	21.5	518	6/14/11 12:30	13.42	10.2	4.3	180.21	15.4
144	6/6/11 17:30	14.06	26.8	4.4	171.77	21.9	519	6/14/11 13:00	13.66	12.0	4.6	185.36	14.6

No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)	No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)
145	6/6/11 18:00	14.37	27.5	4.4	183.95	21.0	520	6/14/11 13:30	13.94	11.7	4.6	199.3	16.9
146	6/6/11 18:30	14.68	24.1	4.4	185.32	19.3	521	6/14/11 14:00	14.20	9.6	4.6	171.64	16.8
147	6/6/11 19:00	14.93	17.4	4.6	178.81	17.3	522	6/14/11 14:30	14.46	11.2	4.4	233.09	17.0
148	6/6/11 19:30	15.18	13.6	4.6	150.94	12.8	523	6/14/11 15:00	14.69	9.7	4.4	171.94	13.6
149	6/6/11 20:00	15.33	17.7	4.6	168.13	12.5	524	6/14/11 15:30	14.91	7.4	4.6	187.68	11.7
150	6/6/11 20:30	15.48	18.7	4.6	171.01	8.4	525	6/14/11 16:00	15.09	9.0	4.9	193.53	10.8
151	6/6/11 21:00	15.65	17.3	4.6	171.21	6.1	526	6/14/11 16:30	15.23	11.3	4.6	208.34	7.7
152	6/6/11 21:30	15.66	17.3	4.6	188.22	2.7	527	6/14/11 17:00	15.35	14.0	4.6	175.9	4.9
153	6/6/11 22:00	15.72	18.6	4.6	181.66	4.8	528	6/14/11 17:30	15.40	18.8	4.6	179.54	2.9
154	6/6/11 22:30	15.69	17.3	4.6	177.77	7.3	529	6/14/11 18:00	15.41	18.8	4.6	162.73	4.7
155	6/6/11 23:00	15.57	18.5	4.6	172.46	7.3	530	6/14/11 18:30	15.35	20.5	4.6	127.58	5.2
156	6/6/11 23:30	15.47	20.8	4.6	175.71	9.5	531	6/14/11 19:00	15.30	16.0	4.6	165.24	6.9
157	6/7/11 0:00	15.31	23.2	4.6	138.98	10.1	532	6/14/11 19:30	15.19	17.2	4.6	222.77	5.5
158	6/7/11 0:30	15.18	30.8	4.6	150.11	9.8	533	6/14/11 20:00	15.14	15.2	4.6	74.53	6.6
159	6/7/11 1:00	15.02	21.8	4.6	184.8	10.2	534	6/14/11 20:30	15.03	12.7	4.6	169.41	8.3
160	6/7/11 1:30	14.87	24.7	4.6	182.13	7.4	535	6/14/11 21:00	14.93	13.5	4.6	196.3	5.0
161	6/7/11 2:00	14.76	33.8	4.4	187.03	5.2	536	6/14/11 21:30	14.86	14.1	4.6	45.36	6.2
162	6/7/11 2:30	14.69	34.1	4.4	194.33	5.5	537	6/14/11 22:00	14.80	13.9	4.6	215.68	4.0
163	6/7/11 3:00	14.60	30.4	4.4	185.81	5.1	538	6/14/11 22:30	14.75	19.4	4.4	194.51	4.1
164	6/7/11 3:30	14.54	24.4	4.4	191.63	2.9	539	6/14/11 23:00	14.71	25.1	4.4	188.83	3.1
165	6/7/11 4:00	14.55	23.9	4.4	182.65	3.6	540	6/14/11 23:30	14.69	19.2	4.4	181.26	4.1
166	6/7/11 4:30	14.52	24.0	4.4	183.77	6.3	541	6/15/11 0:00	14.69	16.1	4.4	174.78	3.0
167	6/7/11 5:00	14.58	24.6	4.4	188.23	3.6	542	6/15/11 0:30	14.75	19.1	4.4	200.21	4.7
168	6/7/11 5:30	14.50	25.1	4.4	182.02	2.8	543	6/15/11 1:00	14.78	12.3	4.6	222.17	2.7
169	6/7/11 6:00	14.61	15.7	4.4	183.32	2.9	544	6/15/11 1:30	14.82	15.1	4.6	192.67	4.1
170	6/7/11 6:30	14.56	16.3	4.4	187.28	2.3	545	6/15/11 2:00	14.70	16.3	4.6	216.12	3.5
171	6/7/11 7:00	14.60	14.4	4.4	183.23	3.1	546	6/15/11 2:30	14.75	35.0	4.6	163.64	5.2
172	6/7/11 7:30	14.58	13.8	4.4	181.94	7.0	547	6/15/11 3:00	14.69	42.1	4.6	213.73	5.9
173	6/7/11 8:00	14.48	12.8	4.4	186.47	4.3	548	6/15/11 3:30	14.61	65.9	4.7	215.98	10.7
174	6/7/11 8:30	14.37	12.5	4.4	189.25	10.3	549	6/15/11 4:00	14.49	81.4	4.7	209.12	17.1
175	6/7/11 9:00	14.22	13.4	4.4	181.73	12.6	550	6/15/11 4:30	14.32	71.7	4.9	211.01	15.0
176	6/7/11 9:30	14.03	14.6	4.4	179.1	14.1	551	6/15/11 5:00	14.22	64.0	4.4	211.23	14.3
177	6/7/11 10:00	13.86	12.0	4.4	181.8	13.9	552	6/15/11 5:30	13.98	47.6	4.6	208.05	13.6
178	6/7/11 10:30	13.66	15.2	4.3	180.96	12.9	553	6/15/11 6:00	13.79	44.2	4.6	211	13.7
179	6/7/11 11:00	13.45	13.4	4.3	177.42	12.5	554	6/15/11 6:30	13.56	38.0	4.6	215.57	13.2
180	6/7/11 11:30	13.21	13.7	4.3	177.05	14.7	555	6/15/11 7:00	13.37	35.9	4.4	221.72	15.4

No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)	No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)
181	6/7/11 12:00	13.05	12.0	4.3	168.74	13.4	556	6/15/11 7:30	13.13	28.8	4.4	166.88	15.2
182	6/7/11 12:30	12.86	13.5	4.1	184.83	9.6	557	6/15/11 8:00	12.91	41.8	4.4	199.24	15.3
183	6/7/11 13:00	12.70	13.5	4.1	179.43	10.1	558	6/15/11 8:30	12.74	40.5	4.7	183.17	12.8
184	6/7/11 13:30	12.58	13.4	4.4	181.29	5.5	559	6/15/11 9:00	12.60	55.1	4.7	182.98	13.0
185	6/7/11 14:00	12.47	13.5	4.4	173.54	3.2	560	6/15/11 9:30	12.45	52.7	5.4	185.43	14.0
186	6/7/11 14:30	12.51	15.7	4.4	181.28	4.4	561	6/15/11 10:00	12.49	54.1	5.3	189.13	14.5
187	6/7/11 15:00	12.58	15.8	4.1	182.84	6.5	562	6/15/11 10:30	12.45	50.4	5.1	197.37	14.4
188	6/7/11 15:30	12.70	18.8	4.3	188.86	10.3	563	6/15/11 11:00	12.39	48.3	4.1	188.9	13.2
189	6/7/11 16:00	12.85	17.9	4.3	185.07	12.5	564	6/15/11 11:30	12.47	49.7	4.4	205.37	13.6
190	6/7/11 16:30	13.06	18.5	4.4	170.78	16.0	565	6/15/11 12:00	12.59	46.0	4.1	182.39	13.0
191	6/7/11 17:00	13.29	21.1	4.3	187.61	17.2	566	6/15/11 12:30	12.76	43.8	4.7	193.28	16.7
192	6/7/11 17:30	13.56	20.3	4.3	193.72	20.5	567	6/15/11 13:00	13.01	47.3	4.7	191.6	18.9
193	6/7/11 18:00	13.86	12.2	4.4	201.12	17.7	568	6/15/11 13:30	13.29	37.9	4.4	207.81	20.8
194	6/7/11 18:30	14.16	12.9	4.4	188.55	19.6	569	6/15/11 14:00	13.56	36.6	4.4	194.23	22.7
195	6/7/11 19:00	14.45	13.8	4.4	189.23	18.4	570	6/15/11 14:30	13.91	33.0	4.4	193.8	22.9
196	6/7/11 19:30	14.70	7.7	4.6	202.18	17.2	571	6/15/11 15:00	14.25	29.8	4.4	192.12	19.4
197	6/7/11 20:00	14.95	7.1	4.6	195.74	15.5	572	6/15/11 15:30	14.56	31.3	4.4	183.46	21.3
198	6/7/11 20:30	15.21	6.8	4.6	12.48	13.6	573	6/15/11 16:00	14.82	27.8	4.7	188.2	16.0
199	6/7/11 21:00	15.37	6.1	4.6	218.88	8.7	574	6/15/11 16:30	15.04	39.6	4.6	168.94	17.0
200	6/7/11 21:30	15.50	5.7	4.6	155.8	6.8	575	6/15/11 17:00	15.26	44.0	4.6	199.31	11.0
201	6/7/11 22:00	15.56	11.0	5.8	168.63	3.6	576	6/15/11 17:30	15.36	50.5	5.1	187.64	12.3
202	6/7/11 22:30	15.58	10.7	6.1	151.25	2.4	577	6/15/11 18:00	15.48	52.4	5.3	189.12	9.1
203	6/7/11 23:00	15.53	7.7	4.6	169.28	3.9	578	6/15/11 18:30	15.59	49.2	5.3	181.52	8.6
204	6/7/11 23:30	15.47	9.3	4.6	167.03	6.3	579	6/15/11 19:00	15.61	54.2	4.9	181.47	6.9
205	6/8/11 0:00	15.34	8.7	4.6	203.74	8.1	580	6/15/11 19:30	15.53	56.0	4.7	183.14	6.8
206	6/8/11 0:30	15.26	13.0	4.6	178.41	7.9	581	6/15/11 20:00	15.49	49.7	4.7	187.91	9.0
207	6/8/11 1:00	15.04	20.4	4.6	146.07	19.9	582	6/15/11 20:30	15.37	52.8	4.7	209.57	9.3
208	6/8/11 1:30	14.78	16.8	4.6	156.7	5.4	583	6/15/11 21:00	15.26	43.5	4.6	171.95	10.8
209	6/8/11 2:00	14.68	21.3	4.4	192.25	6.1	584	6/15/11 21:30	15.08	48.6	4.9	197.41	8.5
210	6/8/11 2:30	14.59	20.7	4.4	211.17	4.5	585	6/15/11 22:00	14.94	36.8	5.1	191.02	10.6
211	6/8/11 3:00	14.47	23.4	4.4	188.2	7.3	586	6/15/11 22:30	14.86	41.2	4.6	157.2	9.5
212	6/8/11 3:30	14.37	19.9	4.4	193.6	11.5	587	6/15/11 23:00	14.76	44.0	4.6	191.56	8.2
213	6/8/11 4:00	14.25	19.3	4.4	194.93	3.2	588	6/15/11 23:30	14.70	40.2	4.6	192.34	7.2
214	6/8/11 4:30	14.28	15.0	4.4	194.21	3.5	589	6/16/11 0:00	14.68	39.4	4.7	189.82	8.4
215	6/8/11 5:00	14.31	16.6	4.4	191.45	4.0	590	6/16/11 0:30	14.61	40.2	4.4	197.09	8.6
216	6/8/11 5:30	14.37	13.8	4.4	201.83	5.0	591	6/16/11 1:00	14.58	42.7	4.7	189.25	8.2

No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)	No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)
217	6/8/11 6:00	14.45	10.3	4.4	187.33	2.0	592	6/16/11 1:30	14.61	53.3	4.9	196.9	9.4
218	6/8/11 6:30	14.47	11.1	4.4	182.29	4.4	593	6/16/11 2:00	14.63	58.9	4.9	192.29	8.9
219	6/8/11 7:00	14.53	10.8	4.4	180.96	3.9	594	6/16/11 2:30	14.68	45.8	4.9	191.32	8.3
220	6/8/11 7:30	14.57	9.4	4.4	194.16	3.6	595	6/16/11 3:00	14.65	47.7	4.9	183.06	8.4
221	6/8/11 8:00	14.61	8.8	4.4	190.71	2.3	596	6/16/11 3:30	14.71	48.5	4.9	191.73	10.2
222	6/8/11 8:30	14.61	9.0	4.4	186.88	2.4	597	6/16/11 4:00	14.56	54.2	5.1	190.61	11.0
223	6/8/11 9:00	14.54	8.5	4.4	205.78	6.0	598	6/16/11 4:30	14.48	47.1	5.1	183.1	13.6
224	6/8/11 9:30	14.46	9.3	4.4	189.61	5.4	599	6/16/11 5:00	14.42	44.4	4.9	184.13	13.4
225	6/8/11 10:00	14.36	13.2	4.6	175.56	9.6	600	6/16/11 5:30	14.20	36.7	5.3	181.4	16.3
226	6/8/11 10:30	14.21	13.2	4.4	183.31	10.4	601	6/16/11 6:00	14.04	34.2	5.6	185.05	18.4
227	6/8/11 11:00	14.04	12.9	4.6	176.49	13.9	602	6/16/11 6:30	13.75	38.6	5.6	177.11	19.6
228	6/8/11 11:30	13.84	13.4	4.4	184.46	14.0	603	6/16/11 7:00	13.56	33.9	5.6	186.04	19.8
229	6/8/11 12:00	13.63	17.6	4.3	190.67	13.8	604	6/16/11 7:30	13.25	35.7	5.6	187.6	17.7
230	6/8/11 12:30	13.43	17.0	4.3	174.61	11.4	605	6/16/11 8:00	13.11	38.6	5.7	178.21	21.4
231	6/8/11 13:00	13.26	17.5	4.3	185.32	10.3	606	6/16/11 8:30	12.81	37.3	5.6	185.65	18.3
232	6/8/11 13:30	13.09	15.9	4.3	177.73	8.4	607	6/16/11 9:00	12.62	40.4	5.9	188.97	17.6
233	6/8/11 14:00	12.98	18.6	4.4	180.22	7.3	608	6/16/11 9:30	12.46	36.7	5.8	182.85	16.7
234	6/8/11 14:30	12.90	16.3	4.4	183.71	4.0	609	6/16/11 10:00	12.30	40.7	4.9	198.55	14.9
235	6/8/11 15:00	12.85	18.5	4.3	175.91	3.5	610	6/16/11 10:30	12.23	37.6	5.3	194.96	11.2
236	6/8/11 15:30	12.87	15.5	4.3	186.91	6.6	611	6/16/11 11:00	12.20	37.0	5.3	193.5	11.2
237	6/8/11 16:00	12.99	13.3	4.3	174.54	9.3	612	6/16/11 11:30	12.23	37.3	5.3	195.46	11.2
238	6/8/11 16:30	13.14	13.1	4.3	192.09	11.5	613	6/16/11 12:00	12.32	36.6	5.3	201.77	10.9
239	6/8/11 17:00	13.33	15.6	4.3	119.78	14.9	614	6/16/11 12:30	12.40	37.1	4.9	191.86	15.3
240	6/8/11 17:30	13.57	10.3	4.3	164.62	17.2	615	6/16/11 13:00	12.63	36.5	4.9	167.06	14.4
241	6/8/11 18:00	13.85	9.8	4.4	186.2	17.1	616	6/16/11 13:30	12.79	36.9	4.7	194.99	17.9
242	6/8/11 18:30	14.10	10.8	4.6	179.57	20.2	617	6/16/11 14:00	13.06	34.6	4.3	194.82	19.1
243	6/8/11 19:00	14.38	9.7	4.4	192.95	17.9	618	6/16/11 14:30	13.32	34.8	4.4	189.04	21.0
244	6/8/11 19:30	14.65	11.9	4.4	189.08	17.0	619	6/16/11 15:00	13.68	37.3	4.6	192.16	23.6
245	6/8/11 20:00	14.90	8.7	4.6	196.9	14.8	620	6/16/11 15:30	13.98	38.1	4.7	183.12	24.0
246	6/8/11 20:30	15.12	7.6	4.6	186.3	14.2	621	6/16/11 16:00	14.32	39.4	4.9	187.17	23.1
247	6/8/11 21:00	15.27	7.5	4.6	186.97	10.6	622	6/16/11 16:30	14.68	40.1	4.4	184.43	19.3
248	6/8/11 21:30	15.45	8.5	4.6	162.21	7.9	623	6/16/11 17:00	14.92	48.6	4.9	191.68	16.7
249	6/8/11 22:00	15.57	6.3	4.6	172.44	3.9	624	6/16/11 17:30	15.16	54.6	4.7	173.37	13.7
250	6/8/11 22:30	15.61	7.9	4.6	187.54	2.0	625	6/16/11 18:00	15.36	53.2	4.6	189.56	12.3
251	6/8/11 23:00	15.59	7.6	4.6	184.56	4.5	626	6/16/11 18:30	15.48	55.9	4.6	191.47	7.9
252	6/8/11 23:30	15.55	7.7	4.6	186.55	6.6	627	6/16/11 19:00	15.53	50.3	4.6	195.78	6.9

No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)	No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)
253	6/9/11 0:00	15.43	7.7	4.6	190.85	11.4	628	6/16/11 19:30	15.53	58.0	4.6	189.76	7.2
254	6/9/11 0:30	15.27	7.5	4.6	180.99	11.6	629	6/16/11 20:00	15.50	45.8	4.6	180.16	8.3
255	6/9/11 1:00	15.05	8.6	4.6	177.19	13.1	630	6/16/11 20:30	15.44	58.5	4.7	196.84	9.8
256	6/9/11 1:30	14.89	9.6	4.6	167.28	12.7	631	6/16/11 21:00	15.30	66.8	4.9	199.23	10.8
257	6/9/11 2:00	14.71	10.1	4.4	183.7	9.9	632	6/16/11 21:30	15.19	66.6	4.9	192.58	12.3
258	6/9/11 2:30	14.53	10.1	4.4	180.32	9.9	633	6/16/11 22:00	15.08	59.4	4.7	189.27	10.8
259	6/9/11 3:00	14.43	10.8	4.4	181.78	8.4	634	6/16/11 22:30	14.91	41.0	4.7	198.12	11.0
260	6/9/11 3:30	14.31	9.5	4.4	185.57	8.7	635	6/16/11 23:00	14.80	50.1	5.1	195.49	11.2
261	6/9/11 4:00	14.22	10.6	4.4	186.27	5.9	636	6/16/11 23:30	14.64	45.7	4.7	203.93	9.8
262	6/9/11 4:30	14.14	10.5	4.4	180.37	5.9	637	6/17/11 0:00	14.54	39.9	4.7	204.82	7.8
263	6/9/11 5:00	14.10	8.1	4.4	181.74	2.8	638	6/17/11 0:30	14.49	43.0	4.6	189.95	7.7
264	6/9/11 5:30	14.11	9.1	4.4	187.68	2.7	639	6/17/11 1:00	14.46	41.5	4.4	189.01	6.2
265	6/9/11 6:00	14.13	9.4	4.4	178.26	3.4	640	6/17/11 1:30	14.42	46.0	4.6	198.98	7.7
266	6/9/11 6:30	14.19	11.4	4.4	182.07	3.7	641	6/17/11 2:00	14.49	51.6	4.7	201.37	7.8
267	6/9/11 7:00	14.25	10.7	4.4	183.26	4.7	642	6/17/11 2:30	14.49	58.9	4.7	197.97	9.2
268	6/9/11 7:30	14.31	13.3	4.4	180.75	4.8	643	6/17/11 3:00	14.60	46.8	4.6	191.35	7.4
269	6/9/11 8:00	14.36	16.8	4.4	179.22	5.3	644	6/17/11 3:30	14.64	46.2	4.9	192.15	6.4
270	6/9/11 8:30	14.43	22.1	4.4	177.67	3.6	645	6/17/11 4:00	14.64	43.5	4.7	192.18	6.1
271	6/9/11 9:00	14.43	22.8	4.6	174.77	3.6	646	6/17/11 4:30	14.67	36.2	4.9	195.63	5.8
272	6/9/11 9:30	14.41	25.0	4.6	176.41	4.5	647	6/17/11 5:00	14.60	23.4	4.6	183.15	5.0
273	6/9/11 10:00	14.37	27.3	4.6	183.08	6.1	648	6/17/11 5:30	14.57	29.7	4.6	190.33	8.4
274	6/9/11 10:30	14.33	27.1	4.6	182.54	8.1	649	6/17/11 6:00	14.45	32.3	4.6	185.33	12.4
275	6/9/11 11:00	14.22	21.7	4.9	186.49	8.8	650	6/17/11 6:30	14.32	35.2	4.6	182.58	13.8
276	6/9/11 11:30	14.11	22.1	4.7	183.16	12.8	651	6/17/11 7:00	14.06	33.0	4.7	186.77	16.2
277	6/9/11 12:00	13.94	20.8	4.4	181.05	9.3	652	6/17/11 7:30	13.84	36.4	4.6	185.1	17.5
278	6/9/11 12:30	13.74	24.9	4.7	178.48	13.0	653	6/17/11 8:00	13.60	41.6	5.1	182	15.5
279	6/9/11 13:00	13.58	18.5	4.7	159.6	10.1	654	6/17/11 8:30	13.38	39.6	4.3	191.33	19.7
280	6/9/11 13:30	13.42	23.0	4.3	171.16	9.2	655	6/17/11 9:00	13.07	36.2	4.6	179.53	18.4
281	6/9/11 14:00	13.28	17.4	4.4	171.93	7.6	656	6/17/11 9:30	12.85	38.7	5.3	183.48	16.1
282	6/9/11 14:30	13.19	20.7	4.4	171.29	7.3	657	6/17/11 10:00	12.64	34.0	5.3	184.72	13.9
283	6/9/11 15:00	13.14	14.5	4.3	175.28	4.7	658	6/17/11 10:30	12.42	31.9	5.3	189.55	11.0
284	6/9/11 15:30	13.10	14.6	4.3	169.72	2.3	659	6/17/11 11:00	12.25	35.4	4.7	186.75	10.8
285	6/9/11 16:00	13.12	13.0	4.3	171.38	5.2	660	6/17/11 11:30	12.21	29.1	4.1	190.49	7.5
286	6/9/11 16:30	13.19	13.0	4.3	161.42	8.0	661	6/17/11 12:00	12.14	35.1	4.3	181.91	7.5
287	6/9/11 17:00	13.33	12.2	4.3	166.12	9.9	662	6/17/11 12:30	12.18	41.1	4.1	192.32	9.6
288	6/9/11 17:30	13.46	14.5	4.3	176.48	14.1	663	6/17/11 13:00	12.29	47.7	4.4	189.19	15.4

No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)	No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)
289	6/9/11 18:00	13.68	10.6	4.3	181.95	14.3	664	6/17/11 13:30	12.45	51.9	4.1	194.82	17.8
290	6/9/11 18:30	13.91	12.2	4.4	203.28	19.1	665	6/17/11 14:00	12.66	61.3	4.6	186.98	22.3
291	6/9/11 19:00	14.20	16.6	6.3	182.47	18.7	666	6/17/11 14:30	12.94	55.2	4.3	191.93	24.1
292	6/9/11 19:30	14.45	11.5	4.4	190.42	18.7	667	6/17/11 15:00	13.25	56.6	4.4	194.05	22.1
293	6/9/11 20:00	14.73	11.3	4.6	192.01	16.8	668	6/17/11 15:30	13.64	47.3	4.4	194.87	25.5
294	6/9/11 20:30	14.94	10.8	4.6	219.09	13.7	669	6/17/11 16:00	14.01	37.5	4.6	201.48	24.2
295	6/9/11 21:00	15.18	18.7	4.6	187.27	7.0	670	6/17/11 16:30	14.35	40.6	4.4	192.67	23.9
296	6/9/11 21:30	15.27	20.6	4.6	160.01	14.4	671	6/17/11 17:00	14.70	35.3	4.6	197.92	19.7
297	6/9/11 22:00	15.35	20.3	4.6	199.87	4.3	672	6/17/11 17:30	15.00	38.8	4.6	182.96	16.5
298	6/9/11 22:30	15.29	26.4	4.6	172.37	4.2	673	6/17/11 18:00	15.21	41.7	5.1	178.47	14.8
299	6/9/11 23:00	15.35	35.1	4.6	197.31	7.1	674	6/17/11 18:30	15.39	47.2	5.1	181.64	12.8
300	6/9/11 23:30	15.21	48.0	4.6	184.09	6.9	675	6/17/11 19:00	15.58	47.0	4.9	187.98	10.0
301	6/10/11 0:00	15.12	48.3	4.7	197.35	9.7	676	6/17/11 19:30	15.67	41.2	5.3	189.09	7.4
302	6/10/11 0:30	15.00	45.1	4.7	203.3	10.5	677	6/17/11 20:00	15.73	40.1	5.1	183.9	7.7
303	6/10/11 1:00	14.86	43.4	4.7	197.97	10.0	678	6/17/11 20:30	15.69	50.2	4.6	187.65	8.3
304	6/10/11 1:30	14.69	37.5	4.9	196.05	13.7	679	6/17/11 21:00	15.64	45.0	5.6	182.73	10.5
305	6/10/11 2:00	14.45	44.5	4.6	199.28	14.8	680	6/17/11 21:30	15.54	47.4	5.6	181.64	12.8
306	6/10/11 2:30	14.36	55.7	5.1	191.97	16.4	681	6/17/11 22:00	15.34	43.6	5.3	192.36	12.5
307	6/10/11 3:00	14.20	55.8	5.3	189.78	15.0	682	6/17/11 22:30	15.19	46.9	4.7	182.42	14.6
308	6/10/11 3:30	14.01	52.3	5.6	189.08	16.4	683	6/17/11 23:00	15.00	36.1	5.3	193.87	13.9
309	6/10/11 4:00	13.97	50.1	5.1	185.37	15.5	684	6/17/11 23:30	14.88	33.9	5.8	190.26	13.5
310	6/10/11 4:30	13.76	49.9	5.1	175.69	14.5	685	6/18/11 0:00	14.74	34.4	5.6	189.21	10.5
311	6/10/11 5:00	13.73	44.4	5.1	183.49	13.6	686	6/18/11 0:30	14.65	33.3	5.1	194.09	9.7
312	6/10/11 5:30	13.66	42.2	5.1	186.04	12.3	687	6/18/11 1:00	14.54	33.5	5.3	196.17	7.0
313	6/10/11 6:00	13.66	40.3	5.1	183.26	13.4	688	6/18/11 1:30	14.53	36.1	4.9	188.22	7.1
314	6/10/11 6:30	13.70	39.6	5.6	190.86	13.2	689	6/18/11 2:00	14.56	35.3	5.1	192.16	6.9
315	6/10/11 7:00	13.71	38.1	5.1	189.95	11.0	690	6/18/11 2:30	14.56	34.2	4.9	187.82	6.8
316	6/10/11 7:30	13.78	38.9	5.1	183.7	11.7	691	6/18/11 3:00	14.60	33.4	4.9	189.05	6.8
317	6/10/11 8:00	13.89	34.7	4.9	185.33	11.6	692	6/18/11 3:30	14.67	33.4	4.4	193.25	7.0
318	6/10/11 8:30	14.04	36.1	5.3	187.45	11.3	693	6/18/11 4:00	14.68	39.5	5.6	185.31	7.2
319	6/10/11 9:00	14.10	35.8	4.4	190.93	8.5	694	6/18/11 4:30	14.73	40.7	4.7	188.98	6.6
320	6/10/11 9:30	14.20	35.9	4.9	188.28	8.6	695	6/18/11 5:00	14.74	39.5	5.3	193.25	8.7
321	6/10/11 10:00	14.26	35.5	4.9	187.64	6.3	696	6/18/11 5:30	14.76	37.8	4.9	192.43	8.1
322	6/10/11 10:30	14.31	35.1	4.7	186.08	6.4	697	6/18/11 6:00	14.73	40.1	5.1	187.28	8.5
323	6/10/11 11:00	14.31	32.4	4.7	189.74	6.5	698	6/18/11 6:30	14.58	37.1	5.1	189.5	9.6
324	6/10/11 11:30	14.23	37.2	4.4	188.47	5.6	699	6/18/11 7:00	14.45	39.3	4.4	181.28	13.8

No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)	No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)
325	6/10/11 12:00	14.18	39.8	4.4	187.27	7.4	700	6/18/11 7:30	14.24	42.6	4.9	190.45	15.4
326	6/10/11 12:30	14.15	36.8	4.4	184.02	7.5	701	6/18/11 8:00	14.12	36.7	4.7	183.87	20.7
327	6/10/11 13:00	14.04	30.6	4.7	185.28	10.5	702	6/18/11 8:30	13.90	36.9	4.9	189.98	18.5
328	6/10/11 13:30	13.91	31.5	4.7	188.05	10.5	703	6/18/11 9:00	13.62	40.9	4.9	185.53	16.7
329	6/10/11 14:00	13.80	33.2	4.6	183.43	9.9	704	6/18/11 9:30	13.38	43.2	5.3	191.47	20.2
330	6/10/11 14:30	13.65	31.7	4.9	189.73	7.3	705	6/18/11 10:00	13.11	38.8	4.4	186.03	17.7
331	6/10/11 15:00	13.62	34.1	4.6	185.64	9.3	706	6/18/11 10:30	12.84	35.9	4.9	188.97	17.9
332	6/10/11 15:30	13.51	34.5	4.6	184.91	9.0	707	6/18/11 11:00	12.60	33.5	4.3	186.9	16.9
333	6/10/11 16:00	13.50	34.3	4.4	194.68	6.7	708	6/18/11 11:30	12.36	31.0	5.3	182.56	12.0
334	6/10/11 16:30	13.45	37.7	4.3	200.22	11.2	709	6/18/11 12:00	12.27	34.8	5.3	185.89	11.0
335	6/10/11 17:00	13.60	37.2	4.4	189.28	9.4	710	6/18/11 12:30	12.13	34.2	4.7	190.26	10.0
336	6/10/11 17:30	13.63	36.9	4.3	188.32	6.1	711	6/18/11 13:00	12.13	39.5	5.1	189.47	10.6
337	6/10/11 18:00	13.67	28.6	4.3	183.65	6.3	712	6/18/11 13:30	12.25	48.7	5.1	186.72	15.7
338	6/10/11 18:30	13.74	27.6	4.3	188.76	5.2	713	6/18/11 14:00	12.26	44.5	4.6	194.5	14.7
339	6/10/11 19:00	13.85	41.7	4.4	185.62	12.3	714	6/18/11 14:30	12.55	43.2	5.1	194.22	19.5
340	6/10/11 19:30	14.00	53.5	4.9	186.27	15.9	715	6/18/11 15:00	12.77	47.6	4.9	192.04	19.4
341	6/10/11 20:00	14.21	77.0	4.9	189.16	18.5	716	6/18/11 15:30	13.03	44.2	4.9	188.08	24.1
342	6/10/11 20:30	14.38	58.2	4.6	187.78	18.6	717	6/18/11 16:00	13.36	45.9	4.9	191.74	25.0
343	6/10/11 21:00	14.60	61.5	4.7	188.96	15.4	718	6/18/11 16:30	13.67	43.5	4.6	197.08	22.7
344	6/10/11 21:30	14.80	51.1	4.7	186.91	11.2	719	6/18/11 17:00	14.02	43.9	4.7	191.69	24.4
345	6/10/11 22:00	14.92	56.0	4.7	186.35	11.2	720	6/18/11 17:30	14.39	42.6	4.6	193.92	21.0
346	6/10/11 22:30	15.06	43.7	4.6	180.51	7.3	721	6/18/11 18:00	14.62	47.5	4.7	186.05	19.7
347	6/10/11 23:00	15.16	45.1	4.7	190.86	8.8	722	6/18/11 18:30	14.95	54.2	4.6	176.04	16.3
348	6/10/11 23:30	15.18	45.6	4.7	185.58	8.3	723	6/18/11 19:00	15.17	58.2	4.9	171.51	15.0
349	6/11/11 0:00	15.14	54.5	4.9	184.87	9.5	724	6/18/11 19:30	15.34	56.5	4.9	183.06	11.5
350	6/11/11 0:30	15.14	37.9	4.7	190.52	8.3	725	6/18/11 20:00	15.47	53.6	5.1	183.71	8.4
351	6/11/11 1:00	14.93	34.2	5.1	188.8	7.9	726	6/18/11 20:30	15.49	59.4	4.6	177.5	8.7
352	6/11/11 1:30	14.90	35.5	4.7	185.25	8.9	727	6/18/11 21:00	15.55	59.2	4.6	178.18	9.1
353	6/11/11 2:00	14.71	31.4	4.7	190.6	14.4	728	6/18/11 21:30	15.45	67.7	5.3	181.79	10.2
354	6/11/11 2:30	14.53	30.5	4.7	171.5	15.3	729	6/18/11 22:00	15.38	66.0	4.9	175.97	13.2
355	6/11/11 3:00	14.31	32.0	4.4	189.4	14.2	730	6/18/11 22:30	15.23	57.6	4.9	169.85	13.7
356	6/11/11 3:30	14.17	34.5	4.4	192.42	14.1	731	6/18/11 23:00	15.05	52.9	4.6	177.72	14.0
357	6/11/11 4:00	13.95	36.4	4.4	188.07	15.8	732	6/18/11 23:30	14.89	49.4	4.9	184.27	14.6
358	6/11/11 4:30	13.78	37.1	4.6	190.76	11.7	733	6/19/11 0:00	14.69	43.7	4.4	187.86	11.5
359	6/11/11 5:00	13.65	47.9	4.6	195.39	11.5	734	6/19/11 0:30	14.57	36.0	5.8	189.56	10.3
360	6/11/11 5:30	13.53	54.5	4.4	188.32	9.7	735	6/19/11 1:00	14.42	39.2	5.1	191.92	10.4

No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)	No	m/d/yy hh:mm	WD (m)	H _i (cm)	T _p (s)	Direction (deg)	Ht (cm)
361	6/11/11 6:00	13.49	52.3	4.4	185.35	10.7	736	6/19/11 1:30	14.40	32.1	4.4	180.82	8.7
362	6/11/11 6:30	13.41	47.6	4.3	188.37	9.7	737	6/19/11 2:00	14.39	31.9	5.6	183.67	7.9
363	6/11/11 7:00	13.40	56.6	4.6	189.97	10.4	738	6/19/11 2:30	14.33	34.0	4.7	193.6	7.4
364	6/11/11 7:30	13.41	58.6	4.9	192.75	10.2	739	6/19/11 3:00	14.35	33.3	4.9	188.13	7.6
365	6/11/11 8:00	13.33	56.9	4.7	185.05	11.9	740	6/19/11 3:30	14.41	30.1	5.1	189.67	8.7
366	6/11/11 8:30	13.49	69.0	4.9	190.23	13.6	741	6/19/11 4:00	14.45	30.5	5.1	184.34	7.1
367	6/11/11 9:00	13.54	66.5	5.1	187.29	16.2	742	6/19/11 4:30	14.47	33.7	5.3	180.09	8.7
368	6/11/11 9:30	13.65	60.8	4.9	189.07	14.9	743	6/19/11 5:00	14.57	34.5	4.6	183.92	6.9
369	6/11/11 10:00	13.81	62.0	4.9	190.05	14.9	744	6/19/11 5:30	14.65	36.0	5.3	183.45	7.2
370	6/11/11 10:30	13.93	59.9	4.6	180.09	15.4	745	6/19/11 6:00	14.62	33.8	4.6	188.9	6.7
371	6/11/11 11:00	14.04	67.3	4.6	186.93	15.3	746	6/19/11 6:30	14.68	33.0	4.4	180.87	7.0
372	6/11/11 11:30	14.15	54.4	4.7	186.91	10.3	747	6/19/11 7:00	14.61	36.0	5.1	188.54	10.0
373	6/11/11 12:00	14.20	46.8	4.9	186.29	8.5	748	6/19/11 7:30	14.45	37.6	5.6	181.73	13.8
374	6/11/11 12:30	14.30	42.1	4.7	187.4	7.3	749	6/19/11 8:00	14.31	38.7	4.9	186.81	15.9
375	6/11/11 13:00	14.28	29.4	4.4	188.77	5.5	750	6/19/11 8:30	14.12	36.7	4.7	197.23	13.7

ภาคผนวก ข

ผลวิเคราะห์

กรณีแผนกรองคลื่นทำงาน 2 แผลง คลื่นเสียงทำมุม 0 – 45 องศา กับแนวแผนกรองคลื่น

รูปสมการ

$$K_t = 0.377 - 53.064 \frac{H_i}{L} + 2.302 \frac{B}{L} + 654.421 \frac{H_i}{gT^2} \quad (25)$$

Variables Entered/Removed^b

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Hi/gT2, Hi/L, B/L	.	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: Kt

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.983 ^a	.967	.947	.057419888189511

a. Predictors: (Constant), Hi/gT2, Hi/L, B/L

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.486	3	.162	49.127	.000 ^a
	Residual	.016	5	.003		
	Total	.502	8			

a. Predictors: (Constant), Hi/gT2, Hi/L, B/L

b. Dependent Variable: Kt

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	.377	.259		1.452	.206
	Hi/L	-53.064	12.427	-.507	-4.270	.008
	B/L	2.302	2.309	.139	.997	.364
	Hi/gT2	654.421	147.257	.491	4.444	.007

a. Dependent Variable: Kt

รูปสมการ

$$K_t = 4.088 \frac{Bh}{gd_s T^2} + 0.189 \quad (24)$$

Iteration History^b

Iteration Number ^a	Residual Sum of Squares	Parameter	
		C	A
1.0	1248.687	100.000	.300
1.1	.021	4.088	.189
2.0	.021	4.088	.189
2.1	.021	4.088	.189

Derivatives are calculated numerically.

a. Major iteration number is displayed to the left of the decimal, and minor iteration number is to the right of the decimal.

b. Run stopped after 4 model evaluations and 2 derivative evaluations because the relative reduction between successive residual sums of squares is at most SSCON = 1.00E-008.

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
C	4.088	.326	3.317	4.860
A	.189	.040	.095	.283

Correlations of Parameter Estimates

	C	A
C	1.000	-.886
A	-.886	1.000

ANOVA^a

Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	4.047	2	2.024
Residual	.021	7	.003
Uncorrected Total	4.069	9	
Corrected Total	.502	8	

Dependent variable: Kt

a. R squared = 1 - (Residual Sum of Squares) / (Corrected Sum of Squares) = .957.

กรณีแผนงกรองคลื่นทำงาน 2 แพง คลื่นเอียงทำมุม 45 – 90 องศา กับแนวแผนงกรองคลื่น

รูปสมการ

$$K_t = 0.157 + 534.966 \frac{H_i}{gT^2} - 27.393 \frac{H_i}{L} + 2.154 \frac{B}{L} \quad (27)$$

Variables Entered/Removed ^a			
Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Hi/gT2		Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).
2	Hi/L		Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).
3	B/L		Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).

a. Dependent Variable: Kt

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.626 ^a	.392	.378	.130971889775923
2	.921 ^b	.849	.842	.066083473652000
3	.930 ^c	.865	.855	.063271200718007

a. Predictors: (Constant), Hi/gT2

b. Predictors: (Constant), Hi/gT2, Hi/L

c. Predictors: (Constant), Hi/gT2, Hi/L, B/L

ANOVA^d

Model		Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.475	1	.475	27.705	.000 ^a
	Residual	.738	43	.017		
	Total	1.213	44			
2	Regression	1.029	2	.515	117.865	.000 ^b
	Residual	.183	42	.004		
	Total	1.213	44			
3	Regression	1.049	3	.350	87.323	.000 ^c
	Residual	.164	41	.004		
	Total	1.213	44			

a. Predictors: (Constant), Hi/gT2

b. Predictors: (Constant), Hi/gT2, Hi/L

c. Predictors: (Constant), Hi/gT2, Hi/L, B/L

d. Dependent Variable: Kt

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	.105	.057		1.859	.070
	Hi/gT2	414.055	78.664	.626	5.264	.000
2	(Constant)	.340	.035		9.623	.000
	Hi/gT2	558.881	41.721	.845	13.396	.000
	Hi/L	-27.814	2.469	-.711	-11.265	.000
3	(Constant)	.157	.090		1.746	.088
	Hi/gT2	534.966	41.405	.809	12.920	.000
	Hi/L	-27.393	2.372	-.700	-11.550	.000
	B/L	2.154	.982	.131	2.195	.034

a. Dependent Variable: Kt

Excluded Variables^d

Model		Beta In	t	Sig.	Partial Correlation	Collinearity Statistics
						Tolerance
1	Hi/L	-.711 ^a	-11.265	.000	-.867	.905
	h/L	.181 ^a	1.485	.145	.223	.929
	ds/h	-.074 ^a	-.609	.546	-.094	.965
	B/L	.186 ^a	1.540	.131	.231	.937
	ds/L	.083 ^a	.654	.517	.100	.899
2	h/L	.129 ^b	2.160	.037	.320	.924
	ds/h	-.022 ^b	-.358	.722	-.056	.959
	B/L	.131 ^b	2.195	.034	.324	.931
	ds/L	.081 ^b	1.290	.204	.198	.899
3	h/L	-.241 ^c	-.312	.756	-.049	.006
	ds/h	-.015 ^c	-.253	.802	-.040	.956
	ds/L	-.027 ^c	-.312	.756	-.049	.445

a. Predictors in the Model: (Constant), Hi/gT2

b. Predictors in the Model: (Constant), Hi/gT2, Hi/L

c. Predictors in the Model: (Constant), Hi/gT2, Hi/L, B/L

d. Dependent Variable: Kt

รูปสมการ

$$K_t = 4.534 \frac{Bh}{gd_s T^2} + 0.088 \quad (28)$$

Iteration History ^b			
Iteration Number ^a	Residual Sum of Squares	Parameter	
		C	A
1.0	2366.354	100.000	.300
1.1	.107	4.534	.088
2.0	.107	4.534	.088
2.1	.107	4.534	.088

Derivatives are calculated numerically.

a. Major iteration number is displayed to the left of the decimal, and minor iteration number is to the right of the decimal.

b. Run stopped after 4 model evaluations and 2 derivative evaluations because the relative reduction between successive residual sums of squares is at most SCON = 1.00E-008.

Parameter Estimates				
Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
C	4.534	.215	4.100	4.967
A	.088	.016	.056	.120

Correlations of Parameter Estimates		
	C	A
C	1.000	-.884
A	-.884	1.000

ANOVA ^a			
Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	7.756	2	3.878
Residual	.107	43	.002
Uncorrected Total	7.863	45	
Corrected Total	1.213	44	

Dependent variable: Kt

a. R squared = 1 - (Residual Sum of Squares) / (Corrected Sum of Squares) = .912.

กรณีแผงกรองคลื่นทำงาน 3 แผง คลื่นเสียงทำมุม 0 – 45 องศา กับแนวแผงกรองคลื่น

รูปสมการ

$$K_t = 0.217 - 46.569 \left(\frac{H_i}{L} \right) + 878.985 \left(\frac{H_i}{gT^2} \right) + 2.724 \left(\frac{d_s}{L} \right) \quad (29)$$

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Hi/L		Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).
2	Hi/gT2		Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).
3	ds/L		Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).

a. Dependent Variable: Kt

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.520 ^a	.270	.260	.226733537878092
2	.886 ^b	.785	.779	.123953486023126
3	.897 ^c	.804	.795	.119231747478244

a. Predictors: (Constant), Hi/L

b. Predictors: (Constant), Hi/L, Hi/gT2

c. Predictors: (Constant), Hi/L, Hi/gT2, ds/L

ANOVA^d

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1.333	1	1.333	25.930	.000 ^a
	Residual	3.599	70	.051		
	Total	4.932	71			
2	Regression	3.871	2	1.936	125.986	.000 ^b
	Residual	1.060	69	.015		
	Total	4.932	71			
3	Regression	3.965	3	1.322	92.965	.000 ^c
	Residual	.967	68	.014		
	Total	4.932	71			

a. Predictors: (Constant), Hi/L

b. Predictors: (Constant), Hi/L, Hi/gT2

c. Predictors: (Constant), Hi/L, Hi/gT2, ds/L

d. Dependent Variable: Kt

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	.684	.049		13.862	.000
	Hi/L	-27.918	5.483	-.520	-5.092	.000
2	(Constant)	.438	.033		13.228	.000
	Hi/L	-46.419	3.325	-.864	-13.961	.000
	Hi/gT2	837.854	65.185	.796	12.854	.000
3	(Constant)	.217	.092		2.373	.020
	Hi/L	-46.569	3.199	-.867	-14.558	.000
	Hi/gT2	878.985	64.721	.835	13.581	.000
	ds/L	2.724	1.063	.143	2.564	.013

a. Dependent Variable: Kt

Excluded Variables^d

Model		Beta In	t	Sig.	Partial Correlation	Collinearity Statistics
						Tolerance
1	h/L	.175 ^a	1.743	.086	.205	1.000
	ds/h	-.138 ^a	-1.352	.181	-.161	.989
	B/L	.212 ^a	2.128	.037	.248	.999
	ds/L	-.045 ^a	-.433	.666	-.052	.990
	Hi/gT2	.796 ^a	12.854	.000	.840	.813
2	h/L	.094 ^b	1.697	.094	.202	.987
	ds/h	.112 ^b	1.920	.059	.227	.881
	B/L	.044 ^b	.763	.448	.092	.943
	ds/L	.143 ^b	2.564	.013	.297	.929
3	h/L	.040 ^c	.652	.517	.079	.786
	ds/h	-.090 ^c	-.711	.479	-.087	.182
	B/L	.036 ^c	.652	.517	.079	.940

a. Predictors in the Model: (Constant), Hi/L

b. Predictors in the Model: (Constant), Hi/L, Hi/gT2

c. Predictors in the Model: (Constant), Hi/L, Hi/gT2, ds/L

d. Dependent Variable: Kt

รูปสมการ

$$K_t = 15.678 \frac{Bh}{gd_s T^2} + 0.126 \quad (30)$$

Iteration History ^b			
Iteration Number ^a	Residual Sum of Squares	Parameter	
		C	A
1.0	414.964	100.000	.300
1.1	1.002	15.678	.126
2.0	1.002	15.678	.126
2.1	1.002	15.678	.126

Derivatives are calculated numerically.

a. Major iteration number is displayed to the left of the decimal, and minor iteration number is to the right of the decimal.

b. Run stopped after 4 model evaluations and 2 derivative evaluations because the relative reduction between successive residual sums of squares is at most SCON = 1.00E-008.

Parameter Estimates				
Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
C	15.678	.947	13.791	17.566
A	.126	.025	.075	.176

Correlations of Parameter Estimates		
	C	A
C	1.000	-.830
A	-.830	1.000

ANOVA ^a			
Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	20.024	2	10.012
Residual	1.002	70	.014
Uncorrected Total	21.027	72	
Corrected Total	4.932	71	

Dependent variable: Kt

a. R squared = 1 - (Residual Sum of Squares) / (Corrected Sum of Squares) = .797.

กรณีแผงกรองคลื่นทำงาน 3 แผง คลื่นเสียงทำมุม 45 – 90 องศา กับแนวแผงกรองคลื่น

รูปสมการ

$$K_t = 0.258 - 33.007 \frac{H_i}{L} + 707.724 \frac{H_i}{gT^2} + 1.314 \frac{d_s}{L} \quad (31)$$

Variables Entered/Removed ^a			
Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Hi/L		Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).
2	Hi/gT2		Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).
3	ds/L		Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).

a. Dependent Variable: Kt

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.516 ^a	.266	.264	.150695925200279
2	.882 ^b	.778	.776	.083067005679967
3	.887 ^c	.786	.785	.081535286711850

a. Predictors: (Constant), Hi/L

b. Predictors: (Constant), Hi/L, Hi/gT2

c. Predictors: (Constant), Hi/L, Hi/gT2, ds/L

ANOVA^d

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	3.177	1	3.177	139.879	.000 ^a
	Residual	8.766	386	.023		
	Total	11.942	387			
2	Regression	9.286	2	4.643	672.870	.000 ^b
	Residual	2.657	385	.007		
	Total	11.942	387			
3	Regression	9.389	3	3.130	470.793	.000 ^c
	Residual	2.553	384	.007		
	Total	11.942	387			

a. Predictors: (Constant), Hi/L

b. Predictors: (Constant), Hi/L, Hi/gT2

c. Predictors: (Constant), Hi/L, Hi/gT2, ds/L

d. Dependent Variable: Kt

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	.507	.020		25.776	.000
	Hi/L	-20.748	1.754	-.516	-11.827	.000
2	(Constant)	.350	.012		28.954	.000
	Hi/L	-32.928	1.050	-.819	-31.358	.000
	Hi/gT2	683.148	22.959	.777	29.755	.000
3	(Constant)	.258	.026		9.844	.000
	Hi/L	-33.007	1.031	-.820	-32.018	.000
	Hi/gT2	707.724	23.379	.805	30.272	.000
	ds/L	1.314	.333	.097	3.950	.000

a. Dependent Variable: Kt

Excluded Variables^d

						Collinearity Statistics
Model		Beta In	t	Sig.	Partial Correlation	Tolerance
1	h/L	.064 ^a	1.438	.151	.073	.956
	ds/h	-.159 ^a	-3.711	.000	-.186	1.000
	B/L	.110 ^a	2.473	.014	.125	.955
	ds/L	-.101 ^a	-2.318	.021	-.117	.992
	Hi/gT2	.777 ^a	29.755	.000	.835	.848
2	h/L	.076 ^b	3.118	.002	.157	.956
	ds/h	.073 ^b	2.913	.004	.147	.901
	B/L	.056 ^b	2.282	.023	.116	.950
	ds/L	.097 ^b	3.950	.000	.198	.921
3	h/L	.031 ^c	1.033	.302	.053	.631
	ds/h	-.054 ^c	-1.056	.292	-.054	.213
	B/L	.027 ^c	1.033	.302	.053	.841

a. Predictors in the Model: (Constant), Hi/L

b. Predictors in the Model: (Constant), Hi/L, Hi/gT2

c. Predictors in the Model: (Constant), Hi/L, Hi/gT2, ds/L

d. Dependent Variable: Kt

รูปสมการ

$$K_t = 14.979 \frac{Bh}{gd_s T^2} + 0.064 \quad (32)$$

Iteration History ^b			
Iteration Number ^a	Residual Sum of Squares	Parameter	
		C	A
1.0	1259.286	100.000	.300
1.1	1.369	14.979	.064
2.0	1.369	14.979	.064
2.1	1.369	14.979	.064

Derivatives are calculated numerically.

a. Major iteration number is displayed to the left of the decimal, and minor iteration number is to the right of the decimal.

b. Run stopped after 4 model evaluations and 2 derivative evaluations because the relative reduction between successive residual sums of squares is at most SCON = 1.00E-008.

Parameter Estimates				
Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
C	14.979	.274	14.440	15.519
A	.064	.005	.053	.074

Correlations of Parameter Estimates		
	C	A
C	1.000	-.812
A	-.812	1.000

ANOVA ^a			
Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	43.855	2	21.928
Residual	1.369	386	.004
Uncorrected Total	45.224	388	
Corrected Total	11.942	387	

Dependent variable: Kt

a. R squared = 1 - (Residual Sum of Squares) / (Corrected Sum of Squares) = .885.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	นายกัมปนาท ชีวะปรีชา
วัน เดือน ปีเกิด	2 ตุลาคม 2502
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	ประโยคมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสาธิต มศว.ปทุมวัน
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ.2526
ระดับปริญญาโท	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการการขนส่ง และโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา พ.ศ. 2552 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2554
ทุนการศึกษา หรือทุนวิจัย	ทุนอุดหนุนสนับสนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ทบวงมหาวิทยาลัย ปีงบประมาณ 2554
ประวัติการทำงาน	วิศวกร - ผู้จัดการโครงการ บริษัท เอส.ไอ.พี. โปรดักส์ชั่น จำกัด พ.ศ.2524 - 2530 หัวหน้าส่วนวิศวกรรม บริษัท ภัทรเรียลเอสเตท จำกัด พ.ศ. 2530 - 2531 กรรมการผู้จัดการ บริษัท โกลเด้น แพลน จำกัด พ.ศ. 2531 – ปัจจุบัน
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	กัมปนาท ชีวะปรีชา และมานะ เขาวรัตน์, 2552, “แนวทางการพัฒนา ทางเดินเรือในแม่น้ำป่าสักที่เหมาะสม”, การประชุมวิชาการการ ขนส่งแห่งชาติครั้งที่ 6, โรงแรมท็อปแลนด์ จังหวัดพิษณุโลก, 28 – 30 ตุลาคม 2552

กัมปนาท ชีวะปรีชา, 2551, “ความปลอดภัยการคมนาคมทางน้ำ”,
การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, วันที่ 14 – 16
พฤษภาคม 2551 โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา

กัมปนาท ชีวะปรีชา, 2551, “ท่าเทียบเรือเชียงแสนแห่งที่ 2”, การ
ประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, วันที่ 14 – 16
พฤษภาคม 2551 โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา

กัมปนาท ชีวะปรีชา, 2551, “ท่าคอนกรีตและรอยต่อท่าคอนกรีต”,
การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, วันที่ 14 – 16
พฤษภาคม 2551 โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา

Chewapreecha, K., 2002, “Malaysia Hub and Thailand Gateway:
A Competing or Supporting Strategy”, **MIMA – GMV
Conference on Intra – Asean Shipping and Port Development**,
17 October 2002, Kuala Lumpur, Malaysia,

กัมปนาท ชีวะปรีชา, 2543, ท่าเรือในแม่น้ำโขง, การประชุม
วิชาการทางวิศวกรรมโยธา ครั้งที่ 5, วันที่ 10 – 11 พฤษภาคม
2543, เพชรบุรี