



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

การพัฒนาสมการความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวไม่เรียบ

(Development of a formula for wave run-up

on non-smooth sloping structures)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธรรมนุญ รัศมีมาสเมือง

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้

จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2558A10802332

สัญญาเลขที่ 105/2558

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

การพัฒนาสมการความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวไม่เรียบ

(Development of a formula for wave run-up on

non-smooth sloping structures)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธรรมนุญ รัศมีมาสเมือง

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สิงหาคม พ.ศ. 2558

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 105/2558

## Acknowledgement

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant no. 105/2558)

## บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียง ผิวไม่เรียบ และสร้างสมการเชิงประสพการณ์ในการทำนายความสูงคลื่นชดดังกล่าว โครงสร้างพื้นเอียง แบบผิวไม่เรียบที่สนใจในการศึกษานี้มีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด ได้แก่ แบบหินเรียง แบบชั้นบันได และแบบ กุญทราย ข้อมูลแบบชั้นบันไดและแบบกุญทราย เป็นข้อมูลที่มีอยู่แล้วโดยโครงการงานวิจัยที่ผ่านมา สำหรับ กรณีโครงสร้างแบบหินเรียง มีการทำการทดลองเพิ่มเติมในการศึกษานี้

การทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบหินเรียงถูกดำเนินการในรางจำลอง คลื่น ความยาว 16 เมตร ความกว้าง 0.6 เมตร และความลึก 0.8 เมตร คลื่นที่ใช้ในการทดลองถูกสร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นแบบสม่ำเสมอ มีช่วงความชันของคลื่น ระหว่าง 0.01 ถึง 0.15 ทำการทดสอบ ที่มุมลาดเอียง 15.0, 17.5, 20 .0, 22.5 และ 25.0 องศา หินเรียงทำมาจากหินก่อสร้าง ซึ่งมีขนาด ประมาณ 20, 30, 40 และ 50 มิลลิเมตร

ผลการศึกษา พบว่า ความสูงคลื่นชดสัมพันธ์มีความสัมพันธ์กับความลาดชันของโครงสร้าง ความชันของคลื่น และความสูงขรุขระสัมพันธ์ ชัดเจนมาก ความสูงคลื่นชดจะมีค่าลดลง เมื่อความลาด ชันของโครงสร้างลดลง หรือความชันของคลื่นเพิ่มขึ้น สำหรับอิทธิพลของความสูงขรุขระสัมพันธ์นั้น ความสูงขรุขระสัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเสียดทานของผิวโครงสร้างเพิ่มขึ้น คลื่นถูกสลายพลังงาน ได้มากขึ้น และความสูงคลื่นชดจึงลดลงตาม ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นทั้งกรณีของพื้นเอียงแบบกุญทราย และแบบชั้นบันได แต่สำหรับกรณีของหินเรียง เนื่องจากการศึกษานี้ได้มีการเรียงหินให้มีลักษณะเรียบ ขนาดตัวแทนของวัสดุผิวจึงไม่สะท้อนความสูงขรุขระโดยตรง ในทางกลับกันวัสดุที่มีขนาดตัวแทนใหญ่ กว่า เมื่อเรียงกันแล้วจะมีความพรุนน้อยกว่ากรณีของวัสดุที่มีขนาดตัวแทนเล็กกว่า ความพรุนที่น้อย กว่าทำให้การสลายพลังงานเกิดขึ้นน้อย และผลที่ตามมาคือความสูงคลื่นชดมีค่าสูงกว่ากรณีของวัสดุที่มี ขนาดตัวแทนเล็กกว่า

การศึกษาได้นำเสนอสมการเชิงประสพการณ์ที่มีพจน์ของความลาดชันของโครงสร้าง ความ ชันของคลื่น และเพิ่มพจน์ของความสูงขรุขระสัมพันธ์เข้าไปในสมการ โดยพิจารณารูปแบบของสมการ จำนวน 4 รูปแบบ พบว่า สมการแบบเลขยกกำลังของตัวแปรแต่ละตัว ให้ความแม่นยำมากที่สุด สมการรูปแบบนี้เป็นรูปแบบที่ใช้มากในงานชลศาสตร์ทั่วไป จึงเป็นที่คุ้นเคย เรียบง่าย และมีความ แม่นยำที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม สมการมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถใช้ร่วมกับกรณีของพื้นเรียบได้ ในกรณี

ของพื้นเรียบจำเป็นต้องใช้สมการรูปแบบเดิมที่มีอยู่ การศึกษานี้ยังได้สรุปค่าแนะนำของพารามิเตอร์  
เชิงประสบการณ์สำหรับทั้งโครงสร้างพื้นเอียงทั้งสามแบบด้วย

## Abstract

This research are to study the behaviors of wave run-up on non-smooth sloping structures and to develop an empirical formula of this wave run-up. The non-smooth sloping structures interested in the study are rocks, steps and sandbags. For the cases of steps and sandbags, the data is available from previous studies. For the case of rocks, laboratory experiment was carried out additionally.

The laboratory experiment was carried out in a wave flume of which the width of 60 cm., the depth of 80 cm. and the length of 16 m., in Hydraulic Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Burapha University, Chon Buri Province. The wave used in the study was regular with the wave steepness of 0.01 to 0.15. The slope of the structures ranged from 15 to 25 degrees. The representative sizes of the rocks used in the study were 20, 30, 40 and 50 mm.

Study results show that the relative wave run-up has strong relationship with the slope of the structures, the wave steepness and the relative roughness height. The wave run-up decreases, as the structure slope decreases and the wave steepness increases. For the influence of the relative roughness height, for the cases of sandbag and stepped slopes, when the relative roughness increases, consequently the friction at the bottom increases and lead to the reduction of wave run-up. However, for the case of rock slope, since in this study the rocks were smoothly and orderly replaced on the slope, thus the representative sizes of rocks did not show the roughness height straightforwardly. On the other hand, the porosity of the smaller rocks was greater than it of the larger rocks, thus the wave run-up on the smaller rocks was lower than it on the larger rocks.

The study proposed an empirical formula, in which the terms of the structure slope, the wave steepness and the relative roughness height are taken into account. Four forms of the formula were tested for finding the best formula. Finally it is found

that the power equation gave the best results. This type of the equation is widely used in the field of Hydraulic Engineering, very simple and considerably accurate. The study also gives the recommended values for all empirical parameters in the equation as well.

The laboratory results indicate that the wave runup on the sloping structures is clearly relative to the slope of the structures, the wave steepness and the roughness of structure surface, which is the height of the steps in this case. Milder structure slope, greater wave steepness and rougher structure surface lower the wave runup, because these three conditions cause more the dissipation of incident waves.

Experimental data was applied to develop an empirical formula for predicting the wave runup that is able to be use for both smooth slope and stepped slope in the same equation. The proposed formula gives more accurate results compared to the formula of smooth slope. With the more accurate calculation of wave runup, design of lower height of structures can be done and lead to reduce the construction cost.



## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ	iii
Abstract	iv
สารบัญ	v
สารบัญตาราง	ix
สารบัญรูป	xi
บทที่ 1    บทนำ	1
1.1    ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2    วัตถุประสงค์	2
1.3    ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4    ผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2    การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1    นิยามและความสำคัญของความสูงคลื่นซัด	4
2.2    การศึกษาความสูงคลื่นซัดด้วยการทดลองในห้องปฏิบัติการ	5
2.3    การศึกษาความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม	19
บทที่ 3    วิธีดำเนินการวิจัย	30
3.1    การทดลองความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างลาดเอียงในห้องปฏิบัติการ	30
3.2    การพัฒนาสมการความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียง	42
บทที่ 4    ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	45
4.1    ผลการทดลองความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบและผิวหินเรียง	45
4.2    การพัฒนาสมการความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียง	46
บทที่ 5    สรุปผลการศึกษา	75
5.1    ที่มาและความสำคัญของปัญหา	45
5.2    ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	46

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	77
ภาคผนวก ก ผลผลิต	81
ภาคผนวก ข รายงานสรุปการเงิน	82
ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย	83

## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2-1	สรุปค่าพารามิเตอร์เชิงประสพการณ์ (Mase, 1989)	9
ตารางที่ 2-2	สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษา (Hedges & Mase,2004)	10
ตารางที่ 2-3	สรุปค่าพารามิเตอร์เชิงประสพการณ์ (Van der Meer & Stam, 1992)	14
ตารางที่ 2-4	ค่าแฟคเตอร์ความขรุขระของพื้นผิวโครงสร้าง (TAW, 2002)	15
ตารางที่ 2-5	สรุปการศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นระดับนโครงสร้างลาดเอียง	9
ตารางที่ 3-1	สรุปสภาพการทดลอง	31
ตารางที่ 3-2	ลักษณะทางกายภาพของรางจำลองคลื่น	32
ตารางที่ 3-3	ค่าแฟคเตอร์ความขรุขระของพื้นผิวโครงสร้าง (TAW, 2002)	44
ตารางที่ 4-1	ค่าพารามิเตอร์ในการทดลอง สำหรับกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ	46
ตารางที่ 4-2	ค่าแนะนำสำหรับพารามิเตอร์ และ สำหรับสมการที่ (4.2) (Mase, 1989)	48
ตารางที่ 4-3	ช่วงข้อมูลการทดลองกรณีพื้นเอียงแบบหินเรียง	49
ตารางที่ 4-4	ช่วงข้อมูลการทดลองกรณีพื้นเอียงแบบถู่ทราย	49
ตารางที่ 4-5	ช่วงข้อมูลการทดลองกรณีพื้นเอียงแบบชั้นบันได	49
ตารางที่ 4-7	ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของสมการที่ 4.6	54
ตารางที่ 4-8	ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของสมการที่ 4.7	55
ตารางที่ 4-9	ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของสมการที่ 4.8	56
ตารางที่ 4-10	ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของสมการที่ 4.9	57
ตารางที่ 4-11	พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณาความแม่นยำของทั้งสมการที่ 4.6 และ 4.7	73

## สารบัญรูปภาพ

		หน้า
รูปที่ 2-1	นิยามของความสูงคลื่นชัด	4
รูปที่ 2-2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $R_s / H_s$ และ $R_s / H_s$ (Ahrens, 1981)	7
รูปที่ 2-3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $R_s / H_s$ และ $\xi_0$ (Hedges & Mase, 2004)	11
รูปที่ 2-4	เปรียบเทียบความสูงคลื่นชัดบนพื้นเรียบและพื้นหินเรียง (Van der Meer & Stam, 1992)	12
รูปที่ 2-5	พื้นเอียงผิวขรุขระ (a) Dentated (b) Serrated (Neelamani & Sandhya, 2004)	17
รูปที่ 2-6	การวัดความสูงคลื่นชัดในภาคสนาม (Swenson, n.d.)	19
รูปที่ 3-1	การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง	30
รูปที่ 3-2	ส่วนประกอบของรางจำลองคลื่น (GUNT, 2001a)	33
รูปที่ 3-3	เครื่องกำเนิดคลื่น (GUNT, 2001b)	35
รูปที่ 3-4	ส่วนประกอบของมอเตอร์และคันชักข้อเหวี่ยง (GUNT, 2001b)	35
รูปที่ 3-5	ส่วนประกอบของใบพัดสร้างคลื่น (GUNT, 2001c)	36
รูปที่ 3-6	โครงสร้างพื้นเอียงแบบผิวเรียบ	37
รูปที่ 3-7	โครงสร้างพื้นเอียงแบบผิวหินเรียง	37
รูปที่ 3-8	ก้อนหินขนาด 5 เซนติเมตร	38
รูปที่ 3-9	การติดแผ่นไม้อัดเข้ากับแผ่นพื้นเรียบ	38
รูปที่ 3-10	การติดก้อนหินด้วยกาวซิลิโคนลงบนแผ่นไม้อัด	39
รูปที่ 3-11	โครงสร้างพื้นเอียงแบบผิวหินเรียงที่เสร็จสมบูรณ์	39
รูปที่ 3-12	การปรับระยะคันชักข้อเหวี่ยง	40
รูปที่ 3-13	การวัดความสูงของคลื่น	41
รูปที่ 4-1	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพัทธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ ) สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวชั้นบันไดจากสมการที่ 4.6	60
รูปที่ 4-2	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพัทธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ ) สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวฉลุทรายจากสมการที่ 4.6	60

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ ) สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวหินเรียงจากสมการที่ 4.6	61
รูปที่ 4-4 การเรียงหินบนผิวพื้นเอียงในลักษณะให้ผิวหน้าเรียบ	61
รูปที่ 4-5 การเรียงหินบนผิวพื้นเอียงในลักษณะให้ผิวหน้าไม่เรียบ	61
รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ ) สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวชั้นบันไดจากสมการที่ 4.7	62
รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ ) สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวฉุ่ยทรายจากสมการที่ 4.7	62
รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ ) สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวหินเรียงจากสมการที่ 4.7	63
รูปที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ ) สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวชั้นบันไดจากสมการที่ 4.8	63
รูปที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ ) สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวฉุ่ยทรายจากสมการที่ 4.8	64
รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ ) สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวหินเรียงจากสมการที่ 4.8	64
รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ ) สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวชั้นบันไดจากสมการที่ 4.9	65
รูปที่ 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ ) สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวฉุ่ยทรายจากสมการที่ 4.9	65
รูปที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ ) สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวหินเรียงจากสมการที่ 4.9	66
รูปที่ 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.6 สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวชั้นบันได	67

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.6 สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวฉุททราย	67
รูปที่ 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.6 สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวหินเรียง	68
รูปที่ 4-18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.7 สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวชั้นบันได	68
รูปที่ 4-19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.7 สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวฉุททราย	69
รูปที่ 4-20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.7 สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวหินเรียง	69
รูปที่ 4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.8 สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวฉุททราย	70
รูปที่ 4-22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.8 สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวฉุททราย	70
รูปที่ 4-23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.8 สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวหินเรียง	71
รูปที่ 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.9 สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวชั้นบันได	71
รูปที่ 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.9 สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวฉุททราย	72
รูปที่ 4-26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.6 สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวหินเรียง	72

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เมื่อคลื่นในทะเลเคลื่อนตัวเข้าสู่ชายฝั่ง ระดับพื้นท้องทะเลที่ตื้นขึ้นส่งผลให้คลื่นมีการแปลงรูปร่างของมัน โดยความสูงคลื่นจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดจำกัดค่าหนึ่ง คลื่นจะเกิดการแตกตัว (Wave breaking) และ คลายพลังงานส่วนใหญ่ของมันออกมาบริเวณเขตคลื่นแตกตัว (Surf zone) นี้ แต่อย่างไรก็ตาม พลังงานที่เหลือส่วนหนึ่งจะแปรรูปกลายเป็นพลังงานศักย์ในรูปของความสูงคลื่นซัด (Wave run-up) บนหน้าหาด พฤติกรรมเช่นนี้เกิดขึ้นกับคลื่นที่ซัดบนพื้นเอียงของโครงสร้างอย่างกำแพงกันคลื่น (Seawall) และเขื่อนกันคลื่น (Breakwater) ด้วยเช่นกัน ความสูงคลื่นซัดเป็นความยาวในแนวตั้งที่วัดจากระดับน้ำนิ่งไปยังระดับสูงสุดที่คลื่นซัดขึ้นไปบนหาดหรือบนพื้นเอียงของโครงสร้าง ความสูงคลื่นซัดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากสำหรับงานทางวิศวกรรมชายฝั่งทะเล เพราะเป็นตัวกำหนดความสูงของโครงสร้างชายฝั่งทะเล นอกจากนี้ ความสูงคลื่นซัดยังเป็นขอบเขตบนของบริเวณเขตคลื่นซัดหาด (Swash zone) ซึ่งเป็นเขตที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนทรายทั้งตามแนวชายฝั่งทะเลและตามแนวขวางฝั่ง อันจะทำให้เกิดการกัดเซาะชายฝั่งทะเล (Coastal erosion) ตามมา

สมการความสูงคลื่นซัดส่วนใหญ่เป็นสมการที่ได้มาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการและทำการทดลองบนพื้นเอียงผิวเรียบที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ ในสมการความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์กับความสูงคลื่น (Relative wave run-up height:  $R/H$ ) เป็นฟังก์ชันกับความชันของคลื่น (Wave steepness:  $H/L$ ) และความลาดชันของหาดหรือโครงสร้างพื้นเอียง (Beach or Structure slope:  $\tan \theta$ ) เช่น สมการของ Hunt (Hunt, 1959), สมการของ Mase (Mase, 1989) ในกรณีที่ต้องการคำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากความขรุขระของพื้นผิวของโครงสร้าง สมการความสูงคลื่นซัดดังกล่าวจะถูกคูณด้วยสัมประสิทธิ์เกี่ยวกับความขรุขระของโครงสร้าง (Van der Meer & Stam, 1992; TAW2002) แต่อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์ดังกล่าวไม่ได้เป็นฟังก์ชันของความสูงขรุขระ (Roughness height) โดยตรง แต่เป็นค่าตามกลุ่มของวัสดุของโครงสร้างเท่านั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ในกรณีวัสดุชนิดเดียวกันแต่ขนาดไม่เท่ากัน ก็มีความสัมพันธ์เท่ากัน

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ประสงค์ในการพัฒนาสมการความสูงคลื่นซัดที่คำนึงความสูงตัวทานความขรุขระของผิวโครงสร้าง โดยทำการศึกษาสมการจำนวน 4 รูปแบบ แต่ละรูปแบบจะประกอบด้วยพารามิเตอร์ความชันคลื่น ความลาดชันของหาดหรือโครงสร้าง ความสูงขรุขระ และพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ หลักคิดในการเลือกสมการ คือ การเลือกรูปแบบที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการใช้งาน จากนั้นทำการหาพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ที่ดีที่สุดของแต่ละสมการสำหรับโครงสร้างพื้นเอียงผิวหินเรียง

ชั้นบันได และถุทราย พร้อมทั้งประเมินว่าสมการรูปแบบใดมีความเหมาะสมและมีความแม่นยำที่สุด ผลสำเร็จสุดท้ายของการศึกษา คือ สมการความสูงคลื่นระดับบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวไม่เรียบที่คำนึงถึงความสูงตัวแทนความขรุขระของผิวโครงสร้าง ที่มีความแม่นยำและสะดวกต่อการใช้งานต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ ดังนี้

(1) เพื่อศึกษาอิทธิพลของความสูงขรุขระของผิวโครงสร้างต่อความสูงคลื่นระดับบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวไม่เรียบ 3 แบบ คือ แบบหินเรียง แบบบันได และแบบถุทราย

(2) เพื่อพัฒนาสมการทำนายความสูงคลื่นบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวไม่เรียบ ที่คำนึงถึงขนาดความสูงตัวแทนความขรุขระ มีรูปแบบที่ง่ายต่อการนำไปใช้งานทางวิศวกรรมชายฝั่งทะเล และมีความแม่นยำที่ยอมรับได้

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาด้วยการทดลองในห้องปฏิบัติการและการใช้ข้อมูลที่มีอยู่แล้ว โดยมีขอบเขตของการวิจัย ดังนี้

(1) การศึกษาทำการทดลองความสูงคลื่นระดับบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบผิวเรียบ และแบบหินเรียง โดยดำเนินการทดลองในรางจำลองคลื่น ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา

รางจำลองคลื่นที่ใช้ในการทดลองมีความยาว 16 เมตร และขนาดหน้าตัดกว้าง 60 เซนติเมตร ลึก 80 เซนติเมตร ผิวของพื้นเอียงที่ใช้ทดลองมีสองลักษณะ คือ แบบผิวเรียบ และแบบผิวหินเรียง คลื่นที่ใช้ในการทดลองถูกสร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นแบบสม่ำเสมอ (Regular wave generator) ที่สร้างคลื่นด้วยความถี่ 0.83, 1.00, 1.17, 1.33, 1.50 และ 1.67 เฮิรตซ์ ระยะคันชักข้อเหวี่ยงของใบพัดคลื่น 80, 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 มิลลิเมตร การตั้งความถี่ของคลื่นและระยะคันชักข้อเหวี่ยงของใบพัดคลื่นเช่นนี้ทำให้ได้คลื่นที่มีความชันของคลื่น ครอบคลุมระหว่าง 0.01 ถึง 0.15 ซึ่งอยู่ในช่วงความชันของคลื่นลม (Wind waves) ที่พบทั่วไปในพื้นที่ชายฝั่งทะเลของประเทศไทย ระดับความลึกของน้ำคงที่ตลอดหน้าตัดที่ 35 เซนติเมตร ความสูงของคลื่นและความสูงคลื่นระดับบนพื้นเอียงถูกวัดด้วยเครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้ (Point gauge) พื้นเอียงผิวเรียบสร้างโดยใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) มีความยาว 255 เซนติเมตร กว้างเท่ากับความกว้างของรางจำลองคลื่น ทำการทดสอบที่มุมลาดเอียง 15.0, 17.5, 20.0, 22.5 และ 25.0 องศา สำหรับพื้นเอียงแบบหินเรียงทำมาจากหินก่อสร้าง ซึ่งมีขนาดประมาณ 20, 30, 40 และ 50 มิลลิเมตร ที่ความลาดชันเดียวกับกรณีของผิวแบบพื้นเอียง คือ 15.0, 17.5, 20.0, 22.5 และ 25.0 องศา



(2) ข้อมูลเดิมที่มีอยู่แล้ว คือ ข้อมูลการทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบ  
ขั้นบันไดและแบบถูทราย

(3) การพัฒนาสมการทำนายความสูงคลื่น ใช้สมการทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย เช่น สมการเชิง  
เส้น สมการเลขยกกำลัง สมการเอกโปเนนเชียล เป็นต้น โดยใช้ข้อมูลความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียง  
4 รูปแบบ คือ แบบผิวเรียบ แบบหินเรียง แบบบันได และแบบถูทราย

#### 1.4 ผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

ผลสำเร็จของงานวิจัยนี้เป็นผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้ ได้แก่

- (1) ความเข้าใจในในกลไกคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบผิวเรียบและแบบผิวไม่เรียบ ซึ่งเป็น  
องค์ความรู้ในการวิจัยปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นและโครงสร้างชายฝั่งทะเลต่อไป
- (2) สมการทำนายความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบและผิวไม่เรียบ ที่คำนึงถึงความสูง  
ตัวแทนความขรุขระของผิวโครงสร้าง และสามารถประยุกต์ใช้ได้กับโครงสร้างพื้นเอียงแบบหินเรียง แบบ  
ขั้นบันได และแบบถูทราย ซึ่งจะเป็นเครื่องมือในการศึกษาและออกแบบโครงสร้างชายฝั่งทะเลต่อไป

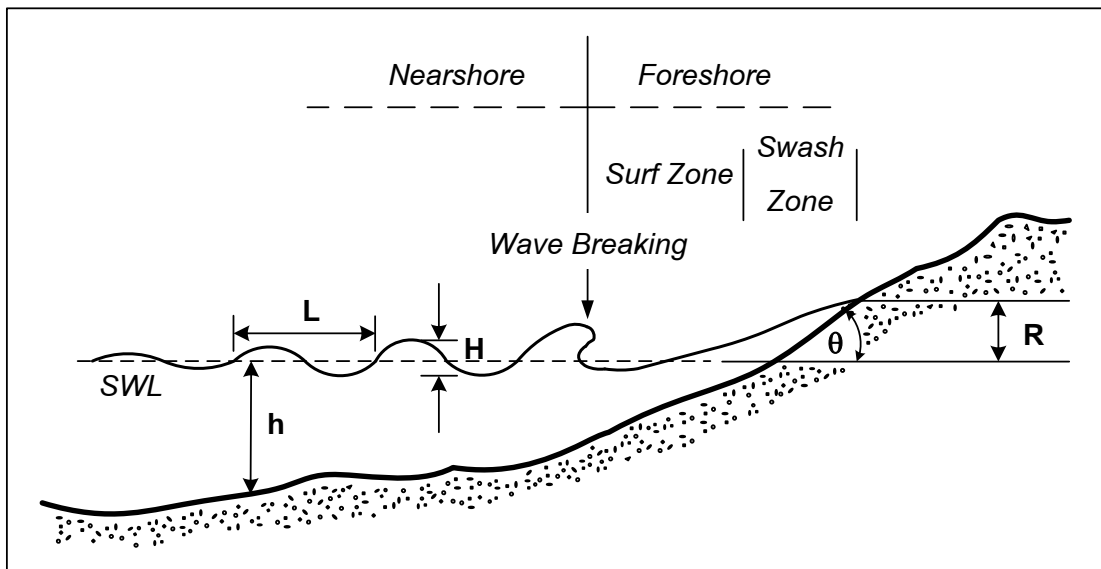
## บทที่ 2

### การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้นำเสนอการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยเริ่มต้นจากบทนำเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัด และตามด้วยงานวิจัยที่เคยมีผู้ทำการการศึกษาวิจัยไว้เพื่อสนับสนุนการวิจัยเรื่องนี้

#### 2.1 นิยามและความสำคัญของความสูงคลื่นซัด

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าใกล้ชายฝั่ง ความสูงคลื่นจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของพื้นท้องทะเลที่ตื้น โดยความสูงคลื่นเพิ่มขึ้นจนถึงขีดจำกัดจากนั้นจะเกิดการแตกตัว และมีการสลายพลังงานออกมาบริเวณเขตคลื่นแตกตัว (Surf zone) พลังงานส่วนหนึ่งจะกลายเป็นพลังงานศักย์ในรูปของความสูงคลื่นซัด ( $R$ ) บริเวณเขตคลื่นซัดหาด (Swash zone) ซึ่งความสูงคลื่นซัดเป็นความยาวในแนวตั้งที่วัดจากระดับน้ำนิ่ง (SWL) ขึ้นไปจนถึงระดับสูงสุดที่คลื่นซัดไปบนหาดหรือพื้นเอียงของโครงสร้างชายฝั่งทะเล (U.S. Army Corps of Engineers, 2002) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยที่  $\theta$  คือ มุมที่เกิดจากความลาดชันของหาดหรือโครงสร้างพื้นเอียง  $H$  คือ ความสูงคลื่น  $L$  คือ ความยาวคลื่น และ  $h$  คือ ระดับความลึกของน้ำจากระดับน้ำนิ่งถึงพื้น



รูปที่ 2.1 นิยามของความสูงคลื่นซัด

ความสูงคลื่นซัดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับงานวิศวกรรมชายฝั่งทะเล เนื่องจากเป็นตัวกำหนดความสูงของโครงสร้างชายฝั่งทะเล อีกทั้งขอบเขตบนของความสูงคลื่นซัดเป็นเขตที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนทรายทั้งตามแนวชายฝั่งและตามแนวขวางฝั่งทะเล ซึ่งจะทำให้เกิดการกัดเซาะชายฝั่งทะเลตามมา (Ruggiero, Komar, McDougal, Marra, & Beach, 2001) นอกจากนี้การสร้างสมการพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดที่แม่นยำสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการเตือนภัยขนาดของความรุนแรงคลื่นได้ดีอีกด้วย (Shankar, & Jayaratne, 2003)

การหาความสูงคลื่นซัดสามารถหาได้สองรูปแบบ คือ การหาความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างลาดเอียงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีทั้งการทดสอบบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ และโครงสร้างพื้นเอียงแบบผิวไม่เรียบ เช่น แบบผิวหินเรียง แบบกล่องหลุมสลับพื้นปลา แบบกล่องนูนสลับพื้นปลา เป็นต้น คลื่นที่ใช้ทดสอบเป็นคลื่นสม่ำเสมอ และไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อการศึกษาความสูงคลื่นซัดด้วยการทดลองในห้องปฏิบัติการ สำหรับการหาความสูงคลื่นซัดอีกหนึ่งรูปแบบ คือ การหาความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม โดยส่วนใหญ่ดำเนินการวัดความสูงคลื่นซัดจากชายหาดธรรมชาติโดยตรง หรือวัดความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างชายฝั่งทะเล เช่น กำแพงกันคลื่น เขื่อนกันคลื่น เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อการศึกษาความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม

## 2.2 การศึกษาความสูงคลื่นซัดด้วยการทดลองในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัดบนชายหาดหรือโครงสร้างพื้นเอียงที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ และมักทดสอบกับพื้นเอียงผิวเรียบที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ คลื่นแบบสม่ำเสมอ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคลื่นซัดบนพื้นเอียงรวมทั้งมีการนำเสนอสมการเชิงประจักษ์สำหรับการทำนายความสูงคลื่น นอกจากนี้ยังมีการทดลองจำนวนหนึ่งที่ทดสอบบนพื้นเอียงผิวไม่เรียบ ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดการทดลองความสูงคลื่นซัดที่ผ่านมา ดังนี้

### 2.2.1 การทดลองความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ

Hunt (1959) ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวเรียบน้ำซึมผ่านไม่ได้ และคลื่นแบบสม่ำเสมอ โดยวิเคราะห์จากข้อมูลการทดลองในห้องปฏิบัติการของ (Granthem (1953); Iribarren & Nogales (1947); Miche (1944, 1951); Saville (1957)) และนำเสนอสมการความสูงคลื่นซัดเพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างชายฝั่งทะเล โดยที่ความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์ (Relative wave runup height:  $R / H_0$ ) เป็นฟังก์ชันกับความชันคลื่น ณ น้ำลึก (Wave steepness:  $H_0 / L_0$ ) และความลาดชันของโครงสร้างพื้นเอียง ( $\tan \theta$ ) ดังนี้

$$\frac{R}{H_0} = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H_0 / L_0}} \quad (2-1)$$

สมการที่ 2-1 เป็นสมการที่ได้รับจากการทดลองกรณีคลื่นแบบสม่ำเสมอ ซึ่งเปรียบเสมือนการพิจารณาด้วยคลื่นที่มีความสูงคลื่นและคาบคลื่นเท่ากันทุกลูกคลื่น ทำให้เป็นสมการพื้นฐานที่ไม่สลับซับซ้อน ดังนั้นจึงเป็นสมการทั่วไปที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ และถูกใช้อ้างอิงเรื่อยมา นอกจากนี้ยังแนะนำถึงแนวทางการศึกษาต่อไปในอนาคต โดยเปลี่ยนจากคลื่นแบบสม่ำเสมอเป็นคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ นั่นคือคลื่นลมที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (Wind generated) รวมถึงควรทดสอบในรางจำลองคลื่นที่มีขนาดใหญ่กว่าเพื่อจำลองคลื่นให้ใกล้เคียงธรรมชาติมากที่สุด และเน้นความสำคัญในเรื่องของการเกิดคลื่นสะท้อนซึ่งถ้าเป็นไปได้ควรทำให้เกิดคลื่นสะท้อนน้อยที่สุดในระหว่างการทดลอง เนื่องจากทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อน

จากการศึกษาของ Battjes (1974) พบว่าสมการที่ 2-1 ของ Hunt (1959) สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$\frac{R}{H_0} = \zeta \quad (2-2)$$

สำหรับ  $0.1 < \zeta < 2.3$

พารามิเตอร์  $\zeta$  นี้ถูกเรียกว่า "Surf similarity parameter" หรือ "Iribarren number" หรือ พารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น มีค่าเท่ากับ  $\tan \theta / \sqrt{H/L}$  โดยสามารถแบ่งการแตกตัวออกได้เป็นสี่ลักษณะ ได้แก่ การแตกตัวแบบ Spilling เมื่อ  $\zeta < 0.5$  การแตกตัวแบบ Plunging เมื่อ  $0.5 < \zeta < 3.0$  การแตกตัวแบบ Surging เมื่อ  $\zeta > 3.0$  และการแตกตัวแบบ Collapsing เมื่อ  $\zeta > 3.3$

ต่อมา Roos and Battjes (1976) ได้ทำการทดลองความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงผิวเรียบน้ำขุ่นผ่านไม้ได้ โดยใช้คลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ ขนาดหน้าตัดรางจำลองคลื่นกว้าง 0.8 เมตร ลึก 0.6 เมตร และยาว 30 เมตร ความลาดชันของพื้นเอียงเท่ากับ 1:3, 1:5 และ 1:7 ระดับความลึกของน้ำ ( $h$ ) เท่ากับ 0.45 เมตร และความชันคลื่นในการทดลองอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.07 จากผลการทดลองพบว่าค่าความสูงคลื่นชดที่ได้มีความสอดคล้องดีมากกับสมการที่ 2-1 ของ Hunt (1959)

Ahrens (1981) ได้สรุปจากผลการทดลองของ (Ahrens (1979); Kamphuis & Mohammed (1978); van Oorschot & d'Angremond (1968)) ซึ่งดำเนินการทดลองความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงผิวเรียบ คลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ ภายใต้เงื่อนไขเขตน้ำลึก (Deepwater) โดยที่  $3 \leq h/H_s \leq 12$  ความลาดชันของโครงสร้างพื้นเอียง 1 : 1 ถึง 1 : 4 และทดลองโดยใช้ลักษณะความสูงคลื่นชด (Characteristic of wave runup:  $R_{char}$ ) สามรูปแบบ ได้แก่ ความสูงที่มีเพียงความสูงคลื่นชดจำนวน 2% ที่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า (2% excess runup height:  $R_{2\%}$ ) ความสูงคลื่นชดสูงสุด 1/3 (The one-third highest runup height:  $R_{1/3}$ ) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ความสูงคลื่นชดที่มีนัยสำคัญ (The significant runup height:  $R_s$ ) และความสูงคลื่นชดเฉลี่ย (Mean runup height:  $\bar{R}$ ) จากการทดลองเขาได้ทำการวาดกราฟ

ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์กับความสูงคลื่นที่มีนัยสำคัญ ( $R_{char} / H_s$ ) กับฟังก์ชันของความชันคลื่น ( $H_s / gT_p^2$ ) โดยที่  $T_p$  คือ คาบคลื่นที่มีพลังงานสูงสุด และ  $g$  คือ ความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก พร้อมทั้งนำเสนอสมการความสูงคลื่นซัดแบ่งเป็นสองรูปแบบ คือ สมการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial regression equation) ดังสมการที่ 2-3 และสมการเชิงประสพการณ์ (Empirical equation) ดังสมการที่ 2-4 ถึง สมการที่ 2-6 ที่เพิ่มพารามิเตอร์เชิงประสพการณ์ เข้ามาจากสมการที่ 2-1 ของ Hunt (1959) ดังนี้

สมการถดถอยแบบพหุนาม

$$\frac{R_{Char}}{H_s} = C_1 + C_2 \frac{H_s}{gT_p^2} + C_3 \left( \frac{H_s}{gT_p^2} \right)^2 \quad (2-2)$$

สำหรับ  $\frac{1}{3} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1}$ ,  $0.003 \leq \frac{H_s}{gT_p^2} \leq 0.005$  และ  $\frac{h}{H_s} > 3$

โดยที่  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยแบบไร้มิติ (Dimensionless regression coefficients)

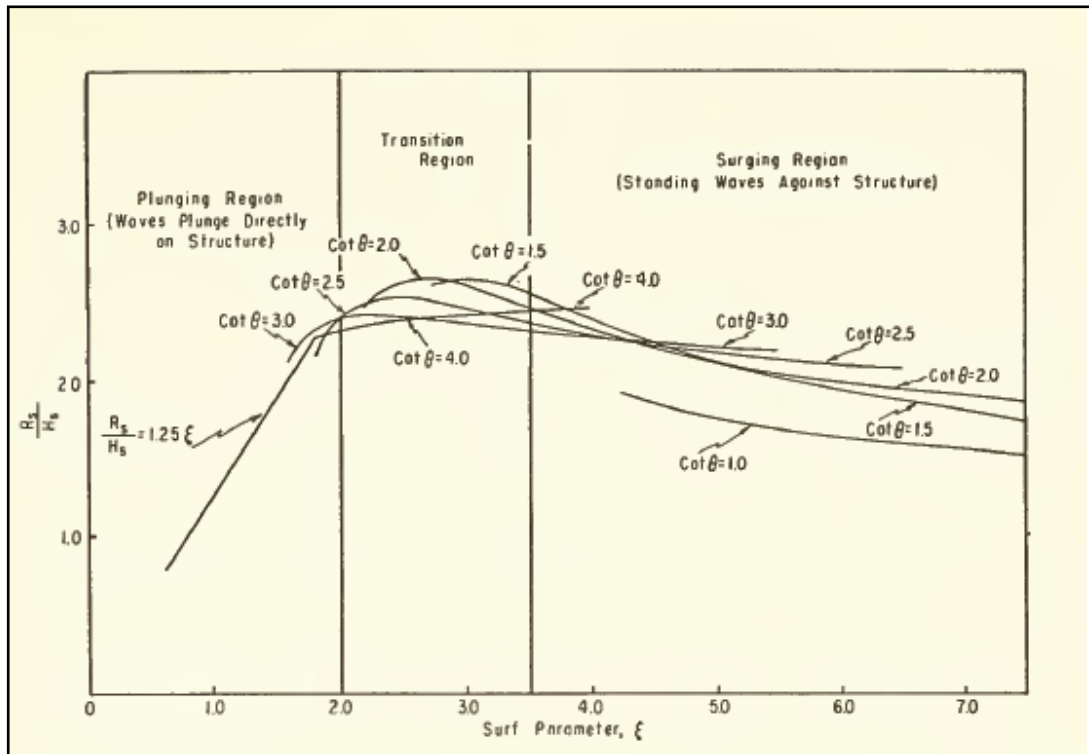
สมการเชิงประสพการณ์

$$\frac{R_{2\%}}{H_s} = 1.61\xi \quad (2-4)$$

$$\frac{R_s}{H_s} = 1.25\xi \quad (2-5)$$

$$\frac{\bar{R}}{H_s} = 0.84\xi \quad (2-6)$$

สำหรับ  $\tan \theta \leq \frac{1}{4}$ ,  $\frac{H_s}{gT_p^2} > 0.003$ ,  $\frac{h}{H_s} > 3$  และ  $\xi \leq 2$



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $R_s / H_s$  และ  $R_s / H_s$  (Ahrens, 1981)

นอกจากนี้เราได้วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญ ( $R_s / H_s$ ) และพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น ( $\xi$ ) ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นการอธิบายตามช่วงของพารามิเตอร์  $\xi$  โดยจากกราฟความสัมพันธ์พบว่า เมื่อ  $\xi \leq 2.0$  อยู่ในระหว่างการแตกตัวแบบ Plunging และเป็นช่วงที่มีขนาดความชันคลื่นมาก ค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์จะมีค่าลดลงเมื่อความชันคลื่นมีค่ามากขึ้น และโครงสร้างมีความลาดชันน้อย ๆ ในขณะที่  $\xi \geq 3.5$  อยู่ในระหว่างการแตกตัวแบบ Surging ค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์จะมีค่าลดลงเมื่อความชันคลื่นมีค่าลดลง และโครงสร้างมีความลาดชันเพิ่มขึ้น สำหรับในช่วง  $2.0 \leq \xi \leq 3.5$  พบว่ามีผลกระทบต่อกันน้อยมากระหว่าง ความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ ความชันคลื่น และความลาดชันของโครงสร้างพื้นเอียง ดังนั้น สมการที่ 2-4 ถึง สมการที่ 2-6 สามารถใช้ได้ดีในช่วง  $\xi \leq 2.0$  และให้คำแนะนำเพิ่มเติมว่าสมการยังสามารถใช้ได้ดีกับความลาดชันของโครงสร้างที่น้อยกว่า 1 : 4

Mase (1989) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัด โดยดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ บนพื้นเอียงผิวเรียบ น้ำซึมผ่านไม่ได้ คลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ เพื่อพัฒนาสูตรที่ใช้ในการพยากรณ์ความสูงคลื่นซัด ดำเนินการทดสอบในรางจำลองคลื่นที่มีความกว้าง 50 เซนติเมตร ลึก 75 เซนติเมตร และยาว 27 เมตร ความลาดชันของแบบจำลองพื้นเอียงเท่ากับ 1 : 5, 1 : 10, 1 : 20 และ 1 : 30 ระดับความลึกน้ำคงที่ตลอดรางจำลองคลื่นซึ่งลึกเท่ากับ 45 เซนติเมตร สำหรับพื้นเอียงที่ลาดชันเท่ากับ 1 : 5, 1 : 10 และ 1 :

20 และลึกเท่ากับ 43 เซนติเมตร สำหรับพื้นเอียงที่ลาดชันเท่ากับ 1 : 30 รวมทั้งหมด 120 กรณี ความชันคลื่น ณ น้ำลึก อยู่ในช่วง 0.007 ถึง 0.07 ความสูงคลื่นถูกวัดด้วยมาตรวัดคลื่นแบบวัดการเก็บประจุ (Capacitance wave gauge) และสร้างคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอด้วยสเปกตรัมแบบ Pierson-Moskowitz จากผลการทดลองเขาพบว่าเมื่อทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ของความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์  $R_{\max} / H_0$ ,  $R_s / H_0$  และ  $\bar{R} / H_0$  กับความชันคลื่น ณ น้ำลึก ( $H_0 / L_0$ ) บนสเกล log-log แล้วค่าความลาดชันของเส้นตรงมีแนวโน้มของความสัมพันธ์แตกต่างจาก -0.5 ตามที่ Hunt (1959) ได้เสนอตั้งสมการที่ 2-1 ดังนั้นเขาจึงเสนอสมการทำนายความสูงคลื่นซัดเชิงประสบการณ์ที่มีรูปแบบ ดังนี้

$$\frac{R}{H_0} = a\xi^b \quad (2-7)$$

สำหรับ  $\frac{1}{30} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{5}$  และ  $0.007 \leq \frac{H_0}{L_0} \leq 0.07$

โดยที่

$\frac{R}{H_0}$  และ  $\xi$  ดังอธิบายข้างต้น

$a$  และ  $b$  คือ พารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ที่ได้จากการทดลอง

นอกจากนี้ยังแนะนำค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ของความสูงคลื่นซัดรูปแบบต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สรุปค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ (Mase, 1989)

$R_{char}$	$a$	$b$
$R_{max}$	2.32	0.77
$R_{2\%}$	1.86	0.71
$R_{1/10}$	1.70	0.71
$R_S$	1.38	0.70
$\bar{R}$	0.88	0.69

โดยที่

$R_{char}$ ,  $R_{2\%}$ ,  $R_S$  หรือ  $R_{1/3}$  และ  $\bar{R}$  ดังอธิบายข้างต้น

$R_{max}$  คือ ความสูงคลื่นซัดสูงสุดแต่ละการทดสอบ (Highest runup height)

$R_{1/10}$  คือ ความสูงคลื่นซัดสูงสุด 1/10 (The one-tenth highest runup height)

Hedges and Mase (2004) ได้ทำการปรับเปลี่ยนสมการความสูงคลื่นซัดของ Hunt (1959) เนื่องจากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าที่ความลาดชันของพื้นเอียงหรือโครงสร้างน้อย ๆ ค่าความสูงคลื่นซัดจะเข้าใกล้ศูนย์ แต่ในความเป็นจริงแล้วไม่ว่าความลาดชันจะน้อยเพียงใดก็ตาม ค่าความสูงคลื่นซัดก็ไม่เท่ากับศูนย์ เนื่องจากคลื่นที่แตกตัวและซัดเข้าสู่ชายฝั่งหรือโครงสร้างพื้นเอียงตลอดเวลา ทำให้ระดับน้ำเกิดการยกตัวขึ้นในระดับที่สูงกว่าระดับน้ำนิ่ง (SWL) ซึ่งเรียกว่า ระดับคลื่นยกตัว (Wave setup) ดังนั้น Hedges and Mase (2004) จึงทำการปรับแก้สมการโดยคำนึงถึงระดับคลื่นยกตัว เพิ่มเข้ามาดังสมการที่ 2-8

$$\frac{R_{char}}{H_S} = \frac{S_{char}}{H_S} + c \cdot \xi_0 \quad (2-8)$$

สำหรับ  $0.13 < \xi_0 \leq 2.20$

โดยที่

$R_{char}$  และ  $H_S$  ดังอธิบายข้างต้น

$S_{char}$  คือ ระดับคลื่นยกตัวหรือค่าต่ำสุดของ  $R_{char}$  ที่ความลาดชันพื้นเอียงเข้าใกล้ศูนย์

$T_S$  คือ คาบคลื่นที่มีนัยสำคัญ

$c$  คือ พารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ที่ได้จากการทดลอง

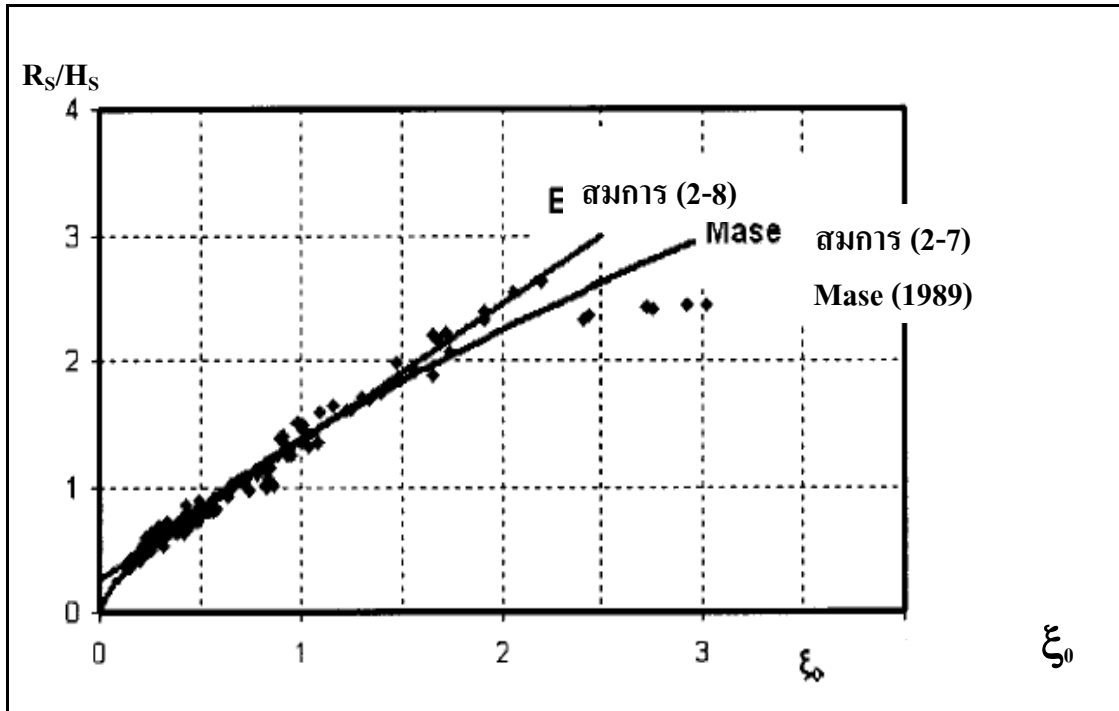
$\xi_0$  คือ พารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น คำนวณโดยใช้  $H_S$  และ  $T_S$



ค่า  $S/H_s$  และ  $c$  ถูกนำเสนอโดยวิเคราะห์จากข้อมูลการทดลองของ Mase (1989) ซึ่งศึกษาความสูงคลื่นซัดของคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ บนพื้นเอียงผิวเรียบ น้ำซึมผ่านไม่ได้ ความลาดชันของพื้นเอียงเท่ากับ 1 : 5, 1 : 10, 1 : 20 และ 1 : 30 โดยสรุปค่าพารามิเตอร์ไว้ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งผลการคำนวณจากสมการที่ 2-8 ถูกนำไปตรวจสอบกับข้อมูลการทดลองชุดเดิมของ Mase (1989) ดังรูปที่ 2.3 พบว่าสมการทั้งสองให้ค่าใกล้เคียงกันมาก โดยเฉพาะในช่วง  $\xi_0 < 1.5$  แต่สมการที่ 2-7 ของ Mase (1989) ให้ค่าที่ต่ำกว่าเมื่อ  $\xi_0 \geq 2.2$  จากการศึกษาที่ผ่านมารวมทั้งการศึกษาของ CIRIA/CUR (1991) ได้ให้คำแนะนำว่าช่วง  $\xi_0 \geq 2.2$  ค่าความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์จะเริ่มลดลง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดด้วยสมการเส้นตรงอย่างง่ายของ Hedges and Mase (2004) จะให้ค่าที่แม่นยำในช่วง  $\xi_0 < 2.2$  ซึ่งคลื่นเกิดการแตกตัวแบบ Plunging นั้นเอง

ตารางที่ 2.2 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษา (Hedges & Mase,2004)

$\frac{R_{char}}{H_s}$	$\frac{S_{char}}{H_s}$	$c$	$\frac{S}{S_s}$	$\frac{c}{c_s}$	$\left(\frac{R}{R_s}\right)_{Rayleigh}$
$\frac{R_{2\%}}{H_s}$	0.37	1.38	1.37	1.33	1.40
$\frac{R_{1/10}}{H_s}$	0.34	1.27	1.26	1.22	1.27
$\frac{R_S}{H_s}$	0.27	1.04	1.00	1.00	1.00
$\frac{R_{mean}}{H_s}$	0.17	0.66	0.63	0.63	0.63

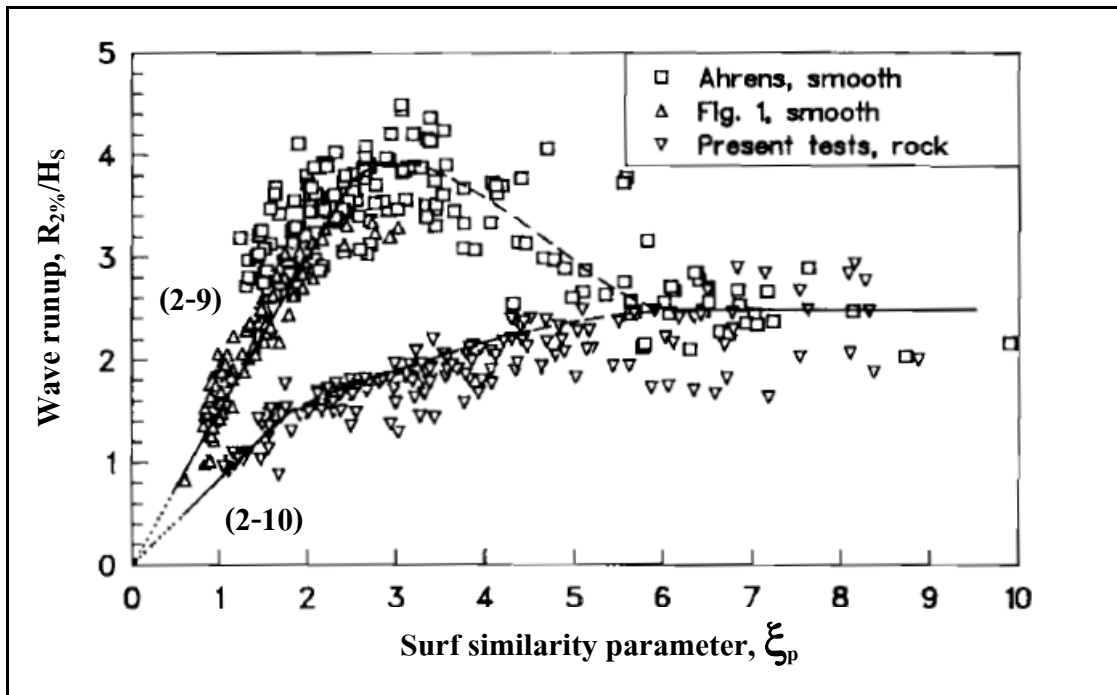


รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $R_s / H_s$  และ  $\xi_0$  (Hedges & Mase, 2004)

### 2.2.2 การทดลองความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวไม่เรียบ

นอกเหนือจากที่มีการศึกษาความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ ยังมีผู้ทำการศึกษา และทดลองความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบไม่ผิวเรียบ เช่น โครงสร้างแบบหินเรียง แบบกล่อง หลุมสลัฟพื้นปลา แบบกล่องนูนสลัฟพื้นปลา เป็นต้น

Van der Meer and Stam (1992) ดำเนินการทดลองความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียง แบบผิวหินเรียงที่วางด้วยหินเป็นชั้น ๆ ทั้งหมดสี่ลักษณะการเรียง ดำเนินการทดสอบโดยใช้คลื่นแบบไม่ สม่าเสมอ ความลาดชันของโครงสร้างพื้นเอียง 1 : 2, 1 : 3 , 1 : 4 และ 1 : 6 รวางจำลองคลื่นขนาดความ ยาว 50 เมตร กว้าง 1.0 เมตร และลึก 1.2 เมตร ความลึกของระดับน้ำเท่ากับ 20, 40 และ 80 เซนติเมตร และใช้ขนาดก้อนหินร้อนผ่านตะแกรง 85% และ 15% โดยมวล รวมทั้งสิ้น 230 กรณี นอกจากนี้ยังได้นำ ข้อมูลการทดลองบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบของ (Ahrens (1981); Fuhrboter, Sparboom, & Witte (1989); Van Oorschot & d' Angremond (1968)) ซึ่งทดสอบในรางจำลองคลื่นขนาดใหญ่ที่มีขนาด ความยาว 230 เมตร กว้าง 5 เมตร และลึก 7 เมตร ยกเว้นการทดสอบของ Ahrens (1981) ที่มาจากการ ทดสอบในรางจำลองคลื่นขนาดเล็ก เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองแบบผิวหินเรียง ดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบความสูงคลื่นซัดบนพื้นเรียบและพื้นหินเรียง (Van der Meer & Stam, 1992)

จากผลการทดลองได้เสนอสมการความสูงคลื่นซัด ดังนี้

กรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ

$$\frac{R_{2\%}}{H_s} = 1.5\xi_p \quad (2-9)$$

สำหรับ  $\frac{1}{8} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{3}$  และ  $0.5 < \xi_p < 2.0$

กรณีโครงสร้างพื้นเอียงแบบหินเรียง

$$\frac{R_{2\%}}{H_s} = 0.83\xi_p \quad (2-10)$$

สำหรับ  $\frac{1}{6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1.5}$  และ  $0.5 < \xi_p < 2.0$

$$\frac{R_{char}}{H_s} = a\xi_m \quad (2-11)$$

สำหรับ  $\frac{1}{6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1.5}$ ,  $0.004 \leq \frac{H_s}{L_m} \leq 0.063$  และ  $\xi_m \leq 1.5$

$$\frac{R_{char}}{H_s} = b \xi_m^c \quad (2-12)$$

สำหรับ  $\frac{1}{6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1.5}$ ,  $0.004 \leq \frac{H_s}{L_m} \leq 0.063$  และ  $\xi_m > 1.5$

$$\frac{R_{char}}{H_s} = d' \quad (2-13)$$

สำหรับ  $\frac{1}{6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1.5}$ ,  $0.004 \leq \frac{H_s}{L_m} \leq 0.063$

โดยที่

$a, b, c, R_{char}, R_{2\%}, H_s$  และ  $T_p$  ดังอธิบายข้างต้น

$d'$  คือ ค่าสูงสุด

$T_m$  คือ คาบคลื่นเฉลี่ย

$L_m$  คือ ความยาวคลื่นเฉลี่ย คำนวณได้จาก  $L_m = \frac{gT_m^2}{2\pi}$

$\xi_m$  คือ พารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น คำนวณโดยใช้  $H_s$  และ  $T_m$

$\xi_p$  คือ พารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น คำนวณโดยใช้  $H_s$  และ  $T_p$

นอกจากนี้ยังแนะนำค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์สำหรับใช้พยากรณ์ความสูงคลื่นซัดแต่ละรูปแบบ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สรุปค่าพารามิเตอร์เชิงประสพการณ์ (Van der Meer & Stam, 1992)

$R_{char}$	$a$	$b$	$c$	$d'$
$R_{0.13\%}$	1.12	1.34	0.55	2.58
$R_{1\%}$	1.01	1.24	0.48	2.15
$R_{2\%}$	0.96	1.17	0.46	1.97
$R_{5\%}$	0.86	1.05	0.44	1.68
$R_{10\%}$	0.77	0.94	0.42	1.45
$R_S$	0.72	0.88	0.41	1.35
$\bar{R}$	0.47	0.60	0.34	0.82

Technical Advisory Committee on Flood Defence (TAW, 2002) ได้ทำการทดลองความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงแบบผิวไม่เรียบ ซึ่งเป็นพื้นผิวที่มีความขรุขระน้ำซึมผ่านไม่ได้ เช่น พื้นคอนกรีต (Concrete) ยางมะตอย (Asphalt) ชั้นหิน (Armour rock) เป็นต้น ความลาดชันของโครงสร้างพื้นเอียง 1 : 1 ถึง 1 : 8 และสร้างคลื่นแบบสม่ำเสมอ โดยมีการพิจารณาความขรุขระ (Roughness) คั่นดิน (Berm) และมุมของคลื่นที่เข้าปะทะโครงสร้างพื้นเอียง (The angle of incidence of wave attack) เข้ามาเกี่ยวข้อง พร้อมเสนอสมการความสูงคลื่นซัดดังสมการที่ 2.14 และแนะนำค่าแฟคเตอร์ความขรุขระซึ่งแบ่งตามกลุ่มลักษณะของวัสดุพื้นผิวโครงสร้าง ดังตารางที่ 2.4

$$\frac{R_{2\%}}{H_S} = 1.75 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\alpha \cdot \xi_0 \quad (2-14)$$

สำหรับ  $\frac{1}{8} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1}$  และ  $\xi_0 < 1.8$

โดยที่

$R_{2\%}$ ,  $H_S$  และ  $\xi_0$  ดังอธิบายข้างต้น

$\gamma_b$ ,  $\gamma_f$  และ  $\gamma_\alpha$  คือ แฟคเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับคั่นดิน ความขรุขระของผิวโครงสร้าง และมุมของคลื่นที่เข้าปะทะโครงสร้างพื้นเอียง ตามลำดับ

ตารางที่ 2.4 ค่าแฟคเตอร์ความขรุขระของพื้นผิวโครงสร้าง (TAW, 2002)

ผิวโครงสร้าง	$\gamma_f$
คอนกรีต (Concrete)	1.00
ยางมะตอย (Asphalt)	1.00
คอนกรีตบล็อก (Closed concrete block)	1.00
หญ้า (Grass)	1.00
หินภูเขาไฟ (Basalt)	0.90
บล็อกขนาดเล็ก 1/25 ของผิวหน้า (Small block over 1/25 of surface)	0.85
บล็อกขนาดเล็ก 1/9 ของผิวหน้า (Small block over 1/9 of surface)	0.80
หินสองชั้น (Armour rock – two layers thick)	0.55
หินชั้นเดียว (Armour rock – single layer)	0.70

Shankar and Jayaratne (2003) ทำการทดลองเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัดและคลื่นไหลล้นข้าม (Wave overtopping) ในรางจำลองคลื่น เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของคลื่น ได้แก่ ความสูงคลื่น คาบคลื่น ความชันคลื่น และพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น ( $\xi$ ) โดยอิทธิพลของคุณลักษณะพื้นเอียง ได้แก่ ความขรุขระ ความหนา และความพรุนที่มีผลต่อความสูงคลื่นซัดและคลื่นไหลล้นข้ามที่ความลาดชัน 1 : 2 ทั้งในกรณีน้ำซึมผ่านได้และน้ำซึมผ่านไม่ได้ รวมทั้งกรณีพื้นเอียงผิวเรียบและผิวขรุขระ และยังทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นซัดกับคลื่นไหลล้นข้าม สำหรับการทดสอบความสูงคลื่นซัดจะใช้มาตรวัดคลื่นและบันทึกข้อมูลลงคอมพิวเตอร์และมีการบันทึกภาพเคลื่อนไหวไว้ด้วย โดยใช้พื้นเอียงผิวเรียบน้ำซึมผ่านไม่ได้ พื้นเอียงผิวขรุขระน้ำซึมผ่านไม่ได้ และพื้นเอียงผิวขรุขระน้ำซึมผ่านได้ ส่วนการทดสอบหาคลื่นไหลล้นข้ามจะใช้พื้นเรียบน้ำซึมผ่านไม่ได้และพื้นขรุขระน้ำซึมผ่านได้ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการทดสอบมีความน่าเชื่อถือที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับ (Shore Protection Manual (SPM, 1984); Automated Coastal Engineering System (ACES, 1992)) และผลการทดสอบจากคนอื่น ๆ นอกจากนี้พบว่าความชันคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่ดีในการอธิบายผลกระทบรวมของความสูงคลื่น และคาบคลื่น สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นซัดกับคลื่นไหลล้นข้ามนั้นจะมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเลขชี้กำลัง (Exponential function) ส่วนแฟคเตอร์ความขรุขระ ( $\gamma_f$ ) อยู่ระหว่าง 0.45 ถึง 1 และความพรุนนั้นพบว่าไม่มีนัยสำคัญ

Neelamani and Sandhya (2004) ดำเนินการทดลองความสูงคลื่นชัตบนโครงสร้างทั้งพื้นเอียงผิวเรียบ และพื้นเอียงผิวขรุขระน้ำซึมผ่านไม่ได้ เพื่อเปรียบเทียบกัน โดยที่พื้นเอียงผิวขรุขระมีสองรูปแบบ คือ แบบกล่องหลุมสลับพื้นปลา และแบบกล่องนูนสลับพื้นปลา ดังรูปที่ 2.5 ทดสอบในรางจำลองคลื่น ขนาดความยาว 30 เมตร กว้าง 2 เมตร และลึก 1.7 เมตร ระดับน้ำลึก 0.7 เมตร สร้างคลื่นแบบสม่ำเสมอ และทดสอบพื้นเอียงที่มุม 30, 40, 50, 60 และ 90 องศา จากผลการทดสอบพบว่า พื้นเอียงแบบกล่องนูนสลับพื้นปลาสามารถสลายพลังงานคลื่นได้ดีที่สุด โดยสามารถสลายพลังงานของคลื่นได้ถึงสองเท่าเมื่อเทียบกับพื้นเอียงผิวเรียบ พร้อมเสนอสมการความสูงคลื่นชัตสำหรับพื้นเอียงทั้งสามรูปแบบ ดังนี้ กรณีพื้นเอียงผิวเรียบ

$$\frac{R}{H} = \frac{\xi}{2.9 + 0.23\xi} \quad (2-15)$$

สำหรับ  $1.74 < \xi < 5.50$  และ C.C. = .87

กรณีพื้นเอียงผิวขรุขระแบบกล่องหลุมสลับพื้นปลา

$$\frac{R}{H} = 0.37\xi^{0.81} \quad (2-16)$$

สำหรับ  $1.80 < \xi < 5.50$  และ C.C. = .82

กรณีพื้นเอียงผิวขรุขระแบบกล่องนูนสลับพื้นปลา

$$\frac{R}{H} = 0.37\xi^{0.58} \quad (2-17)$$

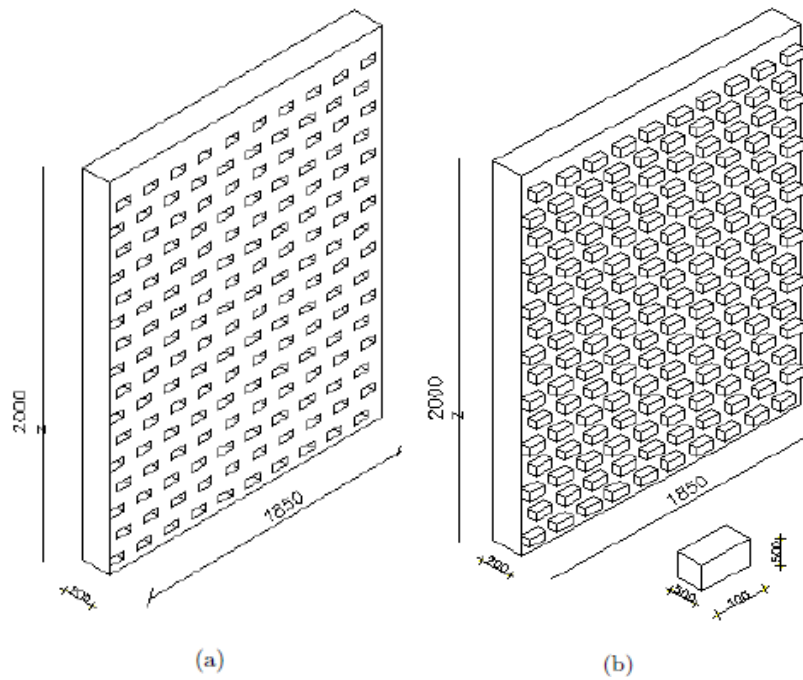
สำหรับ  $1.74 < \xi < 5.50$  และ C.C. = .86

โดยที่

$\frac{R}{H}$  และ  $\xi$  ดังอธิบายข้างต้น

C.C. คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of correlation) ระหว่างความสูงคลื่นชัต

สัมพันธ์ ( $\frac{R}{H}$ ) ที่ได้จากการทดลองและได้จากสมการ



รูปที่ 2.5 พื้นเอียงผิวขรุขระ (a) Dentated (b) Serrated (Neelamani & Sandhya, 2004)

Janaka (2008) ดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ ความสูงคลื่นซัดและคลื่นไหลล้นข้าม โดยใช้รางจำลองคลื่นขนาดความยาว 40 เมตร กว้าง 2 เมตร และลึก 2.13 เมตร ความลาดชันโครงสร้างพื้นเอียงเท่ากับ 23.3 องศา ใช้พื้นเอียงผิวเรียบและผิวขรุขระ ดำเนินการทดลองคล้ายการศึกษาของ Van der Meer and Stam (1992) โดยพื้นเอียงผิวขรุขระนั้นจะแบ่งเป็นสองชั้น ชั้นล่างถูกวางด้วยหินขนาดเฉลี่ย 38 มิลลิเมตร น้ำหนัก 0.12 ถึง 0.18 กิโลกรัม และชั้นบนถูกวางด้วยหินที่มีขนาดเฉลี่ย 95 มิลลิเมตร น้ำหนัก 1.8 ถึง 2.0 กิโลกรัม หินทั้งหมดวางอยู่บนแผ่นไม้อัดซึ่งมีแผ่นเหล็กรองรับ คลื่นที่ใช้แบบสมำเสมอ วัดคลื่นโดยมาตรวัดคลื่นแบบวัดการเก็บประจุ (Capacitance wave gauge) ส่วนการวัดคลื่นไหลล้นข้ามดำเนินการโดยใช้ถังสี่เหลี่ยมรองรับน้ำที่ไหลล้นข้ามแบบจำลอง เพื่อนำมาหาปริมาณ จากผลการทดลองให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลองของ (Ahrens (1981); Van der Meer (1996)) ซึ่งเป็นคลื่นไม่สมำเสมอ ส่วนคลื่นไหลล้นข้ามเฉลี่ยบนพื้นเอียงผิวเรียบก็ให้ผลสอดคล้องที่ดีกับสมการที่นำเสนอของ (Owen (1980); Van der Meer (1996)) และคลื่นไหลล้นข้ามเฉลี่ยบนพื้นเอียงผิวขรุขระก็ให้ผลสอดคล้องที่ดีกับการทดลองของ Van der Meer (1996) เช่นกัน

ธรรมนูญ รัศมีมาสเมือง (2554) ทำการพัฒนาสมการความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบและพื้นเอียงผิวขรุขระให้สามารถประยุกต์ใช้ร่วมกันได้ในสมการเดียว โดยใช้ข้อมูลการทดลองของธรรมนูญ รัศมีมาสเมือง, เอกพล คำชมพู และภาณุ แสงเพชร (2553) ซึ่งได้ทดลองความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเรียบและโครงสร้างพื้นเอียงผิวขรุขระแบบหินเรียงน้ำซึมผ่านไม่ได้ ในรางจำลองคลื่นขนาดความยาว 16 เมตร กว้าง 60 เซนติเมตร และลึก 80 เซนติเมตร ความลาดชันของโครงสร้างพื้นเอียงเท่ากับ 10.0, 12.5, 15.0, 17.5 และ 20.0 องศา สำหรับพื้นเอียงผิวเรียบจะใช้แผ่นเหล็กความยาว 255 เซนติเมตร



และสำหรับพื้นที่เชิงผิวยุขระ ผิวนองพื้นที่เชิงถูกเรียงด้วยหินที่มีขนาดเฉลี่ยหรือเรียกว่าความสูงขรุขระ ( $d$ ) เท่ากับ 9.53, 15.88 และ 22.23 มิลลิเมตร ระดับความลึกของน้ำค้างที่ตลอดหน้าตัดที่ 25, 30 และ 35 เซนติเมตร สำหรับกรณีพื้นที่เชิงผิวยุขระ และความลึก 35 เซนติเมตร สำหรับพื้นที่เชิงผิวยเรียบ คลื่นที่ใช้ในการทดลองถูกสร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นแบบสม่ำเสมอ ที่สร้างขึ้นด้วยความถี่ 0.67, 0.83, 1.00 และ 1.17 เฮิรตซ์ ความสูงคลื่นที่ถูกสร้างขึ้นบริเวณน้ำลึกและความสูงคลื่นชดบนพื้นที่เชิงถูกวัดด้วยเครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้ รวมทั้งสิ้น 280 กรณี ข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นชดสัมพัทธ์ ( $R/H_0$ ) และพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น ( $\xi$ ) เพื่อสร้างสมการความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างลาดเอียงผิวยเรียบ โดยมีค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ที่คำนวณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) คล้ายรูปแบบสมการที่ 2-7 ของ Mase (1989) ซึ่งทำให้ได้สมการพยากรณ์ความสูงคลื่นชดสำหรับพื้นที่เชิงผิวยเรียบ ดังสมการที่ 2-18 สำหรับสมการพยากรณ์ความสูงคลื่นชดบนพื้นที่เชิงผิวยุขระจะคำนึงถึงความสูงขรุขระ ( $d$ ) ของผิวยโครงสร้างพื้นที่เชิงเข้ามาโดยตรง ซึ่งมีรูปแบบดังสมการที่ 2-19 และสุดท้ายได้สมการพยากรณ์ความสูงคลื่นชดสำหรับพื้นที่เชิงผิวยุขระซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้กับพื้นที่เชิงผิวยเรียบเพียงแค่ระบุค่าความสูงขรุขระ ( $d$ ) ดังสมการที่ 2-20

กรณีพื้นที่เชิงผิวยเรียบ

$$\frac{R}{H_0} = 1.11\xi^{0.60} \quad (2-18)$$

สำหรับ  $10^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$ ,  $0.002 \leq \frac{H_0}{L_0} \leq 0.136$  และ  $0.6 < \xi < 5.0$

กรณีพื้นที่เชิงผิวยุขระ

$$\frac{R}{H_0} = a\xi^b \left[ 1 - c \left( \frac{d}{H_0} \right)^{d''} \right] \quad (2-19)$$

$$\frac{R}{H_0} = 1.11\xi^{0.60} \left[ 1 - 0.53 \left( \frac{d}{H_0} \right)^{0.12} \right] \quad (2-20)$$

สำหรับ  $10^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$ ,  $0.002 \leq \frac{H_0}{L_0} \leq 0.03$  และ  $0.3 \leq \frac{d}{H_0} \leq 3.0$

โดยที่

$a, b, c$  และ  $\frac{R}{H_0}$  ดังอธิบายข้างต้น

$d''$  คือ พารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ที่ได้จากการทดลอง

$\frac{d}{H_0}$  คือ ความสูงขรุขระสัมพัทธ์

## 2.3 การศึกษาความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม

การศึกษาความสูงคลื่นซัดในภาคสนามมีการดำเนินการอยู่พอสมควร เช่น ตามชายหาดธรรมชาติ บริเวณที่มีกำแพงกันคลื่น เป็นต้น โดยทั่วไปมักใช้กล้องวิดีโอบันทึกภาพเคลื่อนไหวของความสูงคลื่นซัดบนชายหาดหรือโครงสร้างทางชายฝั่งทะเลแล้วทำการตอกหมุดหรือกำหนดสเกลความสูงคลื่นซัดให้เป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2.6 และใช้เครื่องวัดความลาดเอียง (Inclinometer) ของชายหาด การคำนวณหาความสูงคลื่นซัด ( $R$ ) จะต้องทราบถึงระยะที่คลื่นซัดตามแนวหาด (Length of runup:  $RL$ ) และมุมองศาของชายฝั่ง ( $\theta$ ) ซึ่งคำนวณ ดังสมการที่ 2-21

$$R = RL \sin \theta \quad (2-21)$$

แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ การเก็บข้อมูลเป็นสิ่งที่วัดได้ยากในภาคสนาม เช่น ความสูงคลื่นคาบคลื่น ขนาดของเม็ดทราย เป็นต้น จำเป็นต้องมีเครื่องมือเฉพาะทาง นอกจากนี้สมการส่วนใหญ่เป็นสมการที่ได้มาจากการดำเนินการตามชายหาดธรรมชาติ และไม่มีการยืนยันว่าสามารถนำไปใช้กับโครงสร้างได้หรือไม่



รูปที่ 2.6 การวัดความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม (Swenson, n.d.)

Holman (1986) ดำเนินการศึกษาความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม ณ ชายหาดธรรมชาติ

(Duck, North Carolina) ซึ่งเป็นมหาสมุทรเปิดและมีคลื่นซัดรุนแรง เขาทำการบันทึกภาพเคลื่อนไหวกว้างบริเวณเขตคลื่นซัดฝั่ง เป็นระยะเวลาประมาณ 3 สัปดาห์ ซึ่งข้อมูลภาพเคลื่อนไหวกว้างรวบรวมแล้วแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลและนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบสเปกตรัม มีข้อมูลความสูงคลื่นซัดทั้งหมด 149 ชุด ข้อมูลซึ่งมีความสูงคลื่นอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 4.0 เมตร และคาบคลื่น 6 ถึง 16 วินาที ข้อมูลถูกวัดด้วยทุ่นลึก 20 เมตร และวัดด้วย Baylor gage บริเวณท้ายท่าเรือมีความลึก 8 เมตร จากการทดสอบเขาได้นำเสนอสมการเส้นตรง ดังสมการที่ 2-22

$$\frac{R_{2\%}}{H_0} = 0.83\xi + 0.20 \quad (2-22)$$

สำหรับ  $\frac{1}{15} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{5}$

โดยที่

$R_{2\%}$ ,  $H_0$  และ  $\xi$  ดังอธิบายข้างต้น

Nielsen and Hanslow (1991) ศึกษาความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม ณ ชายหาดธรรมชาติทั้งหมดหกชายหาด ของ New South Wales มีความลาดชันของหาด 1 : 5 ถึง 1 : 30 ข้อมูลความสูงคลื่นอยู่ในช่วง 0.53 ถึง 3.76 เมตร และคาบคลื่น 6.4 ถึง 11.5 วินาที โดยวัดจากทุ่นที่อยู่ห่างออกไป 30 กิโลเมตร ที่ความลึก 80 เมตร ในแต่ละหาดมีขนาดเม็ดทรายเฉลี่ยที่แตกต่างกันซึ่งวัดจากเขตคลื่นซัด มีขนาดเท่ากับ 0.18, 0.40, 0.50, 0.80, 0.21 และ 0.22 มิลลิเมตร จากการวิเคราะห์ข้อมูลพวกเขาได้เสนอสมการเชิงเส้นสำหรับพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดแต่ละรูปแบบ ดังสมการที่ 2-23 ถึง สมการที่ 2-30

$$R_{rms} = L' \quad (2-23)$$

$$R_s = 1.42L' \quad (2-24)$$

$$R_{50\%} = 0.83L' \quad (2-25)$$

$$\bar{R} = 0.89L' \quad (2-26)$$

$$R_{2\%} = 1.98L' \quad (2-27)$$

$$R_{1\%} = 2.15L' \quad (2-28)$$

เมื่อ

$$L' = 0.6(H_{orms} L_0)^{0.5} \tan \theta \quad (2-29)$$

สำหรับ  $\tan \theta \geq \frac{1}{10}$

$$L' = 0.05(H_{orms} L_0)^{0.5} \tan \theta \quad (2-30)$$

สำหรับ  $\tan \theta \leq \frac{1}{10}$

โดยที่

$R_S, \bar{R}, R_{2\%}, L_0$  และ  $\tan \theta$  ดังอธิบายข้างต้น

$R_{rms}$  คือ ความสูงคลื่นซัดแบบ Root mean square

$R_{50\%}$  คือ ความสูงที่มีเพียงความสูงคลื่นซัดจำนวน 50% ที่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า (50%

Excess runup height)

$R_{1\%}$  คือ ความสูงที่มีเพียงความสูงคลื่นซัดจำนวน 1% ที่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า

(1% Excess runup height)

$H_{orms}$  คือ ความสูงคลื่นน้ำลึกแบบ Root mean square

$L'$  คือ ความยาวคลื่นที่คำนวณมาจาก  $H_{orms}$  และ  $L_0$

Ahrens and Seelig (1996) ศึกษาโดยใช้ข้อมูลของ (Douglass (1990); van Hijum & Pilarczyk (1982); Holman (1986); Nielsen & Hanslow (1991); Ward & Ahrens (1992)) ซึ่งดำเนินการศึกษาความสูงคลื่นซัดบนหาดทรายและหาดกรวด ผลจากการนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อพัฒนาสมการพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดขึ้นมาใหม่ โดยมีการพิจารณาเกี่ยวกับความขรุขระของชายหาด นั่นคือขนาดของเม็ดทรายและกรวดบริเวณเขตคลื่นแตกตัว และบริเวณเขตคลื่นซัดฝั่ง ซึ่งเสนอสมการ ดังสมการที่ 2-31 และสมการที่ 2-32

$$\frac{R_{2\%}}{H_S} = \frac{4.1}{N_0} \sqrt{\frac{d_{sw}}{d_{sr}}} \quad (2-31)$$

เมื่อ

$$N_0 = \frac{H_s}{w_{sr} T}, w_{sr} = 14.5(d_{sr})^{1.1} \quad (2-32)$$

โดยที่

$R_{2\%}$ ,  $H_s$  และ  $T$  ดังอธิบายข้างต้น

$N_0$  คือ พารามิเตอร์เกี่ยวกับความเร็วในการตกตะกอน หรือเรียกว่า “Dean number”

$w_{sr}$  คือ ความเร็วการตกตะกอนในเขตคลื่นแตกตัว

$d_{sw}$  คือ ขนาดอนุภาคตะกอนในเขตคลื่นซัดฝั่ง

$d_{sr}$  คือ ขนาดอนุภาคตะกอนในเขตคลื่นแตกตัว

Ruggiero, Komar, McDougal, Marra, and Beach (2001) ศึกษาความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม ณ ชายฝั่งทะเลออริกอน (Oregon) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นชายฝั่งที่มีคลื่นซัดรุนแรงจากพายุ ดำเนินการวัดความสูงคลื่นซัดจากการบันทึกภาพเคลื่อนไหว และใช้ข้อมูลความสูงคลื่นและคาบคลื่นจากทุ่นวัดที่อยู่ในทะเลลึก 64 เมตร โดยมีขอบเขตความสูงคลื่นน้ำลึกอยู่ในช่วง 1.4 ถึง 4.6 คาบคลื่น 7 ถึง 17 วินาที และความลาดชันของหาด 0.005 ถึง 0.047 จากการวิเคราะห์ผลพวกเขาเสนอสมการเส้นตรงสำหรับพยากรณ์ความสูงคลื่นซัด ดังสมการที่ 2-33

$$R_{2\%} = 0.27 \tan \theta (H_0 L_0)^{0.5} \quad (2-33)$$

โดยที่

$R_{2\%}$ ,  $H_0$ ,  $L_0$  และ  $\tan \theta$  ดังอธิบายข้างต้น

Na, Do, and Suh (2011) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการพยากรณ์ขนาดความสูงคลื่นซัดโดยใช้ข้อมูลจากการพยากรณ์ร่วมด้วย เช่น ข้อมูลคลื่นพยากรณ์ ข้อมูลลมพยากรณ์ เป็นต้น โดยดำเนินการศึกษาในภาคสนาม ณ ชายฝั่งทะเลด้านตะวันออกของประเทศเกาหลีใต้ คณะผู้วิจัยวัดข้อมูลความสูงคลื่นซัดจากเขื่อนกันคลื่นทั้งหมดสี่แห่ง โดยการใช้กล้องดิจิทัลบันทึกภาพเคลื่อนไหวในขณะคลื่นซัดเข้าปะทะเขื่อนกันคลื่นวันละ 2 ครั้ง ความสูงคลื่นซัดถูกจำแนกเป็นสเกลจาก 1 ถึง 9 แทนการบอกค่าความสูงคลื่นซัดเป็นตัวเลขในหน่วยความยาว มีลักษณะคล้ายกับสเกลโบฟอร์ต (Beaufort wind scale) ดำเนินการศึกษาทั้งหมด 9 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนกันยายน ค.ศ. 2008 โดยข้อมูล 6 เดือนแรกสำหรับการสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression equation) ที่มีการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของลมและคลื่นในทะเล เช่น ขนาดลม ทิศทางลม ความสูงคลื่น เป็นต้น มีรูปแบบสมการ ดังสมการที่ 2-34

$$RS = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (2-34)$$

โดยที่

$RS$  หรือ  $Y$  คือ ตัวแปรตาม สำหรับการศึกษานี้ คือ สเกลความสูงคลื่นซัด

$x_1, x_2, \dots, x_k$  หรือ  $X_1, X_2, \dots, X_k$  คือ ตัวแปรอิสระ สำหรับการศึกษานี้ เช่น ความสูงคลื่นทิศทางลม ทิศทางคลื่น เป็นต้น

$\beta_0$  คือ ส่วนตัดแกน  $Y$  เมื่อ  $X_1 = X_2 = \dots = X_k = 0$

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  คือ สัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงส่วน (Partial regression coefficient)

สำหรับข้อมูล 3 เดือนหลังถูกนำมาสอบทานและนำมาเปรียบเทียบกับค่าขนาดคลื่นซัดที่ได้จากการสังเกต ซึ่งใช้หลักสถิติในการวิเคราะห์ผล จากผลการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบระหว่างขนาดความสูงคลื่นซัดที่พยากรณ์กับขนาดความสูงคลื่นซัดที่ได้จากการสำรวจโดยการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าสเกลความสูงคลื่นซัดมีความคลาดเคลื่อน  $\pm 1$  สเกล ซึ่งถือว่ามีคลาดเคลื่อนน้อย ดังนั้นสมการการพยากรณ์จึงมีความแม่นยำในระดับที่ดีและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เตือนภัยขนาดความรุนแรงของคลื่นซัดได้อีกด้วย

จากการศึกษาที่อ้างอิงข้างต้นซึ่งมีพอสมควร สามารถสรุปสมการพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดที่ผ่านมา ทั้งการศึกษาในห้องปฏิบัติการและการศึกษาในภาคสนาม ดังตารางที่ 2.5 สมการสำหรับทำนายความสูงคลื่นซัดส่วนใหญ่ยังคงมีพื้นฐานมาจากสมการของ Hunt (1959) และจะเห็นได้ว่าสมการที่มีการพิจารณาความขรุขระเข้ามาเกี่ยวข้องยังมีจำนวนน้อย และเป็นเพียงการแนะนำค่าแฟกเตอร์ความขรุขระ ได้แก่ สมการของ Ahrens and Seelig (1996) ซึ่งนำเสนอสมการความสูงคลื่นซัดที่พิจารณาขนาดอนุภาคเฉลี่ยของทรายบริเวณเขตคลื่นซัด ( $d_{sw}$ ) และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของทรายบริเวณเขตคลื่นแตกตัว ( $d_{sr}$ ) สมการค่อนข้างซับซ้อนและจำเป็นต้องหาค่าพารามิเตอร์  $N_0$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความสูงคลื่น คาบคลื่น และความเร็วตกตะกอนของทรายบริเวณเขตคลื่นแตกตัว อีกหนึ่งการศึกษาที่มีการพิจารณาความขรุขระของพื้นเอียงหรือความขรุขระของหาด คือ การศึกษาของ TAW (2002) โดยในสมการมีแฟกเตอร์เกี่ยวกับความขรุขระของพื้นเอียง แฟกเตอร์เกี่ยวกับคันดิน และแฟกเตอร์เกี่ยวกับมุมของคลื่น ซึ่งค่าของแฟกเตอร์ความขรุขระจะขึ้นกับลักษณะของวัสดุของพื้นเอียงหรือหาด ส่วนการศึกษาของ Shankar and Jayaratne (2003) ก็มีการแนะนำช่วงของแฟกเตอร์ความขรุขระที่เหมาะสม ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ TAW (2002) มีเพียงสมการของ ธรรมบุญ รัศมีมาสเมือง (2554) เท่านั้นที่คำนึงถึงความสูงขรุขระ ( $d$ ) โดยตรงและเป็นสมการอย่างง่ายที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งพื้นเอียงผิวเรียบและพื้นเอียงผิวขรุขระในสมการเดียวทำให้เกิดความสะดวกในการประมาณค่าความสูงคลื่นซัดบนหาดหรือโครงสร้างพื้นเอียง สำหรับสมการที่ได้จากการศึกษาในภาคสนามของ Na et al. (2011) ก็เป็นอีกหนึ่งการศึกษาที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณสำหรับพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดที่นำไปประยุกต์ใช้ได้ดีกว่าสมการรูปแบบดั้งเดิม แต่

ก็ยังมีสิ่งที่คุณควรทำเพิ่มเติม เช่น การคำนึงถึงความลาดชันของโครงสร้างหรือการเพิ่มตัวแปรอิสระที่มีผลต่อสเกลคลื่นซัด ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล เป็นต้น



ตารางที่ 2.5 สรุปการศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างลาดเอียง

ผู้ศึกษา	รูปแบบการศึกษา	ลักษณะพื้นเอียง	ความชัน ( $\tan \theta$ )	สมการที่ได้รับ
Hunt (1959), Battjes (1974)	Lab, Regular Wave	Smooth, Impermeable	1 : 10 – 1 : 3	$\frac{R}{H} = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} = \xi$ For $0.1 < \xi < 2.3$
Ahrens (1981)	Lab, Irregular Wave	Smooth, Impermeable	1 : 4 – 1 : 1	$\frac{R_{char}}{H_s} = C_1 + C_2 \frac{H_s}{gT_p^2} + C_3 \left( \frac{H_s}{gT_p^2} \right)^2$ For $\frac{1}{3} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1}$ $\frac{R_{char}}{H_s} = a\xi$ For $\tan \theta \leq \frac{1}{4}$
Holman (1986)	Field, Irregular	Sand Beaches	1 : 15 – 1 : 5	$\frac{R_{2\%}}{H_0} = 0.83\xi + 0.20$ For $\frac{1}{15} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{5}$
Mase (1989)	Lab, Irregular Wave	Smooth, Impermeable	1 : 30 – 1 : 5	$\frac{R}{H_0} = a\xi^b$ For $\frac{1}{30} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{5}$ , $0.007 \leq \frac{H_0}{L_0} \leq 0.07$
Nielsen and Hanslow (1991)	Field, Irregular Wave	Sand Beaches	1 : 30 – 1 : 5	$R = C \cdot L'$ $\tan \theta \geq \frac{1}{10}, L' = 0.6(H_0 L_0)^{0.5} \tan \theta$ $\tan \theta < \frac{1}{10}, L' = 0.05(H_0 L_0)^{0.5} \tan \theta$

ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

ผู้ศึกษา	รูปแบบการศึกษา	ลักษณะพื้นเอียง	ความชัน ( $\tan \theta$ )	สมการที่ได้รับ
Van der Meer and Stam (1992)	Lab, Irregular Wave	Rough, Impermeable	1 : 6 – 1 : 1.5	$\frac{R_{char}}{H_s} = a \xi_m$ For $\frac{1}{6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1.5}, \xi_m \leq 1.5$ $\frac{R_{Char}}{H_s} = b \xi_m^c$ For $\frac{1}{6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1.5}, \xi_m > 1.5$ $\frac{R_{Char}}{H_s} = d'$ For $d' = \text{Maximum}$
Ahrens and Seelig (1996)	Lab and Field, Irregular Wave	Sand and Gravel Beaches	–	$\frac{R_{2\%}}{H_s} = \frac{4.1}{N_0} \sqrt{\frac{d_{sw}}{d_{sr}}}$ $N_0 = \frac{H_s}{w_{sr} T}, w_{sr} = 14.5(d_{sr})^{1.1}$
Ruggiero et al. (2001)	Field, Irregular Wave	Sand Beaches	1 : 30 – 1 : 20	$R_{2\%} = 0.27 \tan \theta (H_0 L_0)^{0.5}$
TAW (2002)	Lab, Regular Wave	Smooth and Rough, Impermeable	1 : 8 – 1 : 1	$\frac{R_{2\%}}{H_s} = 1.75 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\alpha \cdot \xi_0$ For $\frac{1}{8} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1}, \xi_0 < 1.8$
Nielsen and Hanslow (1991)	Field, Irregular Wave	Sand Beaches	1 : 30 – 1 : 5	$R = C \cdot L'$ $\tan \theta \geq \frac{1}{10}, L' = 0.6(H_0 L_0)^{0.5} \tan \theta$ $\tan \theta < \frac{1}{10}, L' = 0.05(H_0 L_0)^{0.5} \tan \theta$

ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

ผู้ศึกษา	รูปแบบการศึกษา	ลักษณะพื้นเอียง	ความชัน ( $\tan \theta$ )	สมการที่ได้รับ
				$\frac{R_{char}}{H_s} = a\xi_m$
Van der Meer and Stam (1992)	Lab, Irregular Wave	Rough, Impermeable	1 : 6 – 1 : 1.5	For $\frac{1}{6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1.5}$ , $\xi_m \leq 1.5$ $\frac{R_{Char}}{H_s} = b\xi_m^c$ For $\frac{1}{6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1.5}$ , $\xi_m > 1.5$ $\frac{R_{Char}}{H_s} = d'$ For $d' = \text{Maximum}$
Ahrens and Seelig (1996)	Lab and Field, Irregular Wave	Sand and Gravel Beaches	-	$\frac{R_{2\%}}{H_s} = \frac{4.1}{N_0} \sqrt{\frac{d_{sw}}{d_{sr}}}$ $N_0 = \frac{H_s}{w_{sr}T}, w_{sr} = 14.5(d_{sr})^{1.1}$
Ruggiero et al. (2001)	Field, Irregular Wave	Sand Beaches	1 : 30 – 1 : 20	$R_{2\%} = 0.27 \tan \theta (H_0 L_0)^{0.5}$
TAW (2002)	Lab, Regular Wave	Smooth and Rough, Impermeable	1 : 8 – 1 : 1	$\frac{R_{2\%}}{H_s} = 1.75 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\alpha \cdot \xi_0$ For $\frac{1}{8} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1}$ , $\xi_0 < 1.8$

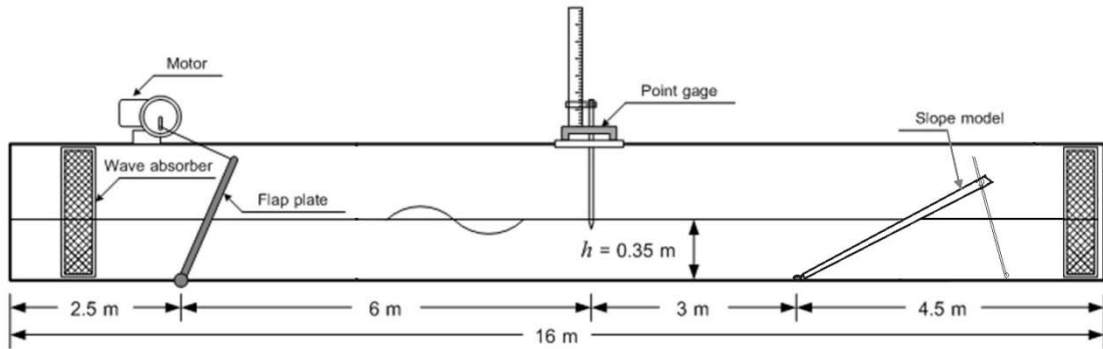
## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้อธิบายถึงวิธีการดำเนินการวิจัยอย่างละเอียด ซึ่งโครงการวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นระดับบนโครงสร้างลาดเอียง โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ทดสอบคลื่นระดับบนโครงสร้างลาดเอียงทั้งแบบผิวเรียบและแบบหินเรียง ซึ่งอธิบายในส่วนที่ 3.1 จากนั้นแล้วนำข้อมูลการทดลองพร้อมกับข้อมูลการทดลองเดิมที่มีอยู่แล้ว ได้แก่ การทดลองความสูงคลื่นระดับบนพื้นเอียงแบบขั้นบันไดและแบบถูทราย ไปสร้างสมการความสูงคลื่นชัด ซึ่งมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.2 ดังนี้

#### 3.1 การทดลองความสูงคลื่นระดับบนโครงสร้างลาดเอียงในห้องปฏิบัติการ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นระดับบนโครงสร้างลาดเอียงแบบต่าง ๆ ได้แก่ พื้นเอียงแบบผิวเรียบ และพื้นเอียงแบบหินเรียง การทดลองความสูงคลื่นระดับบนโครงสร้างลาดเอียงได้ดำเนินการในรางจำลองคลื่นที่มีความยาว 16 เมตร และขนาดหน้าตัดกว้าง 60 เซนติเมตร ลึก 80 เซนติเมตร คลื่นที่ใช้ในการทดลองถูกสร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นแบบสมมาตร ที่สร้างคลื่นด้วยความเร็วรอบของใบพัด 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 รอบต่อนาที หรือคิดเป็นความถี่ 0.83, 1.00, 1.17, 1.33, 1.50 และ 1.67 เฮิรตซ์ ระยะคันชักข้อเหวี่ยงของใบพัดคลื่น 80, 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 มิลลิเมตร ด้านหลังเครื่องกำเนิดคลื่นและด้านหลังโครงสร้างจำลองพื้นเอียงมีการติดตั้งตัวสลายคลื่น (Wave absorber) เพื่อลดการเกิดคลื่นสะท้อน ระดับความลึกของน้ำคงที่ตลอดหน้าตัดที่ 35 เซนติเมตร ความสูงของคลื่น ( $H$ ) ถูกวัดด้วยเครื่องวัดความสูงแบบวัดความต้านทาน และความสูงคลื่นชัด ( $R$ ) บนพื้นเอียงถูกวัดด้วยเครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้ ซึ่งทำการวัดอย่างละ 5 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย ผิวของพื้นเอียงที่ใช้ทดลองมีทั้งหมดสองลักษณะดังที่กล่าวไว้ข้างต้น น้ำซึมผ่านไม่ได้ทุกลักษณะ และดำเนินการทดลองทั้งหมด 1,050 กรณี แบ่งเป็นพื้นเอียงผิวเรียบ 210 กรณี แบบหินเรียง 840 กรณี ลักษณะและตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.1 และสภาพการทดลองทั้งหมดถูกสรุปไว้ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

ตารางที่ 3.1 สรุปสภาพการทดลอง

พารามิเตอร์	ผิวเรียบ	หินเรียง
ความลาดชันของพื้นเอียง, $\theta$ (องศา)	15.0, 17.5, 20.0, 22.5, 25.0	
ความลึกของน้ำ, $h$ (ซม.)	35	
ระยะคันชักข้อเหวี่ยง (มม.)	80, 100, 120, 140, 160, 180, 200	
ความเร็วรอบของใบพัดน้ำ (รอบ/นาที)	50, 60, 70, 80, 90, 100	
ความถี่ในการสร้างคลื่น, $f$ (เฮิรตซ์)	0.83, 1.00, 1.17, 1.33, 1.49, 1.67	
คาบของคลื่น, $T$ (วินาที)	1.20, 1.00, 0.86, 0.75, 0.67, 0.60	
ความสูงขรุขระของผิวพื้น, $d$ (ซม.)	-	2, 3, 4, 5
จำนวนการทดสอบ (กรณี)	210	840

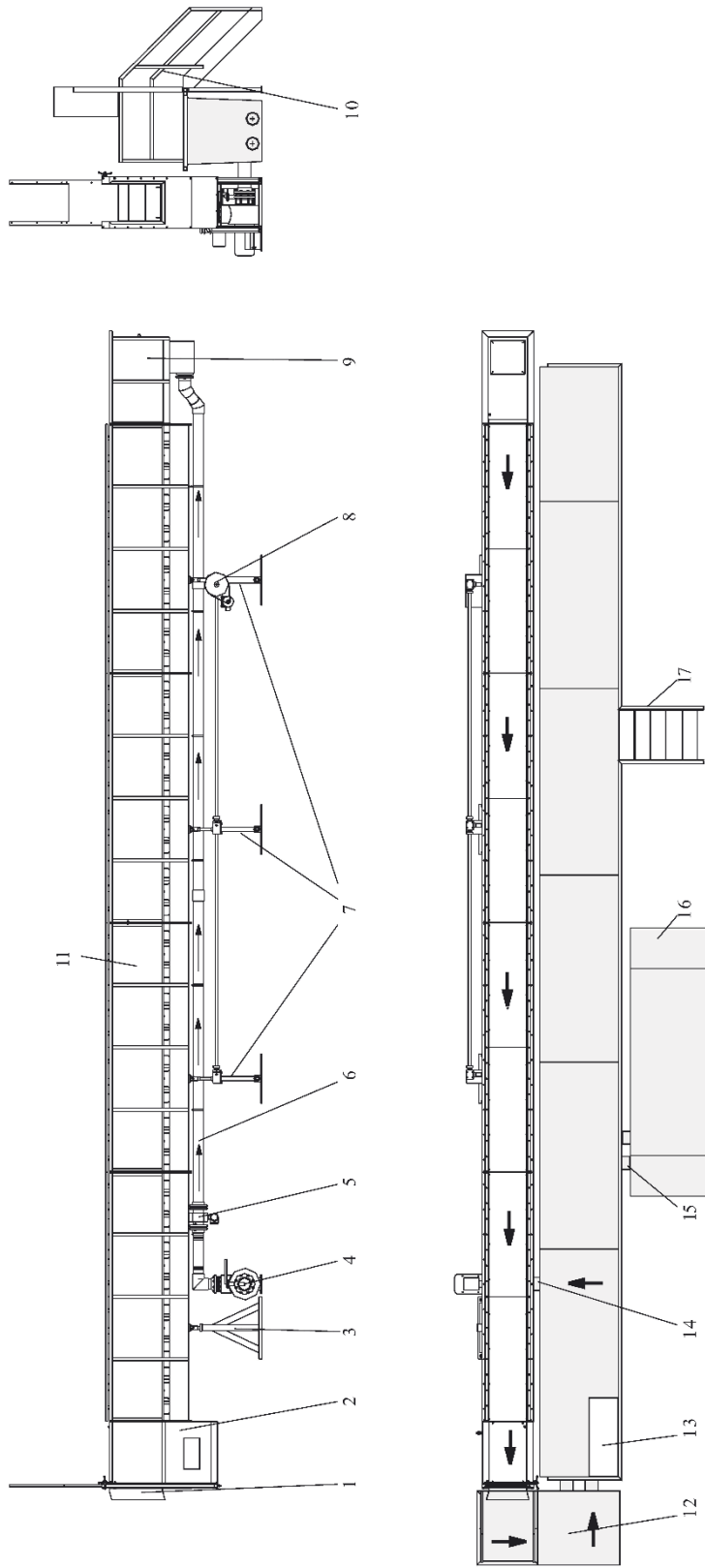
### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ของรางจำลองคลื่น

(1) รางจำลองคลื่น คือ เครื่องมือการทดลองทางชลศาสตร์ ซึ่งสามารถใช้เป็นรางจำลองคลื่นและรางทดลองการไหลได้ เครื่องมือมีลักษณะเป็นรางน้ำขนาดใหญ่ มีความยาวช่วงทดสอบ 16 เมตร หน้าตัดช่วงทดสอบกว้าง 60 เซนติเมตร ลึก 80 เซนติเมตร มีถังเก็บน้ำอยู่ข้างล่าง มีเครื่องสูบน้ำสำหรับการไหลผ่านรางและวนกลับมาที่ถังเก็บน้ำเพื่อสูบลบกลับไปที่รางวนเป็นวงจร รางทดลองการไหลนี้สามารถสร้างอัตราการไหลสูงได้ถึง ประมาณ 330 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง หรือประมาณ 5,500 ลิตรต่อนาที ทำให้เกิดความเร็วจนเฉลี่ยของหน้าตัดสูงสุดถึง 0.2 เมตรต่อวินาที ตัวรางสามารถปรับความลาดเอียงได้

ในกรณีการใช้รางเป็นรางจำลองคลื่นนั้น ตัวรางจะต้องถูกทำให้เป็นระบบปิดโดยการปิดกันด้านท้ายน้ำ สูบน้ำเข้าไปในรางจนได้ปริมาณที่ต้องการ ติดตั้งเครื่องกำเนิดคลื่น (สำหรับรายละเอียดของเครื่องกำเนิดคลื่นถูกอธิบายในหัวข้อถัดไป) และทำการสร้างคลื่นตามรูปแบบการศึกษาที่สนใจ เช่น การศึกษาพฤติกรรมของคลื่นที่พัดเข้าสู่ชายหาด หรือการเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านโครงสร้างต่าง ๆ เช่น กำแพงกันคลื่น เชือกกันคลื่น เป็นต้น โดยลักษณะทางกายภาพของรางจำลองคลื่นแสดงดังตารางที่ 3.2 และส่วนประกอบของรางจำลองคลื่นแสดงดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ลักษณะทางกายภาพของรางจำลองคลื่น

ความยาวทั้งหมดของเครื่อง (ม.)	21.0
ความยาวของช่วงทดสอบ (ม.)	16.0
ความสูงของเครื่อง (ม.)	2.1
ความกว้างของหน้าตัดทดสอบ (ม.)	0.6
ความลึกของหน้าตัดทดสอบ (ม.)	0.8
น้ำหนักของเครื่องเปล่า (ตัน)	4.0
น้ำหนักของเครื่องรวมกับน้ำ (ตัน)	14.0
ความจุของถังรวบรวมน้ำ (ลบ.ม.)	2.3
ความจุของถังกักเก็บน้ำ (ลบ.ม.)	4.3



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบของรางจำลองคัลลิน (GUNT, 2001a)

ส่วนประกอบของรางจำลองคลื่น

หมายเลข 1: ช่องทางน้ำไหลออก (Channel outlet)

หมายเลข 2: บ่อดักตะกอน (Sediment trap)

หมายเลข 3: ฐานรองรับ (Fixed bearing)

หมายเลข 4: เครื่องสูบน้ำ (Pump unit)

หมายเลข 5: มาตรวัดอัตราการไหล (Flow meter)

หมายเลข 6: ท่อส่งน้ำ (Delivery line)

หมายเลข 7: ตัวปรับความลาดเอียง (Inclination adjustment)

หมายเลข 8: มอเตอร์สำหรับปรับความลาดเอียง (Motor drive inclination adjustment)

หมายเลข 9: ช่องทางน้ำเข้า (Inlet element)

หมายเลข 10: ราวกันตก (Railing)

หมายเลข 11: ส่วนทดสอบ (Measuring section)

หมายเลข 12: ถังรวบรวมน้ำ (Collecting tank)

หมายเลข 13: ตู้แผงวงจร (Switch box)

หมายเลข 14: แนวท่อดูดน้ำ (Pump suction line)

หมายเลข 15: ท่อเชื่อมระหว่างถังเก็บน้ำ (Pipe connection)

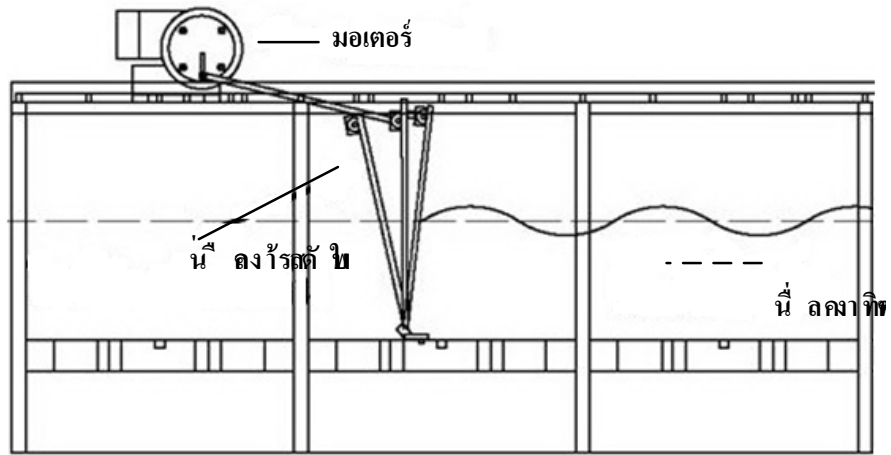
หมายเลข 16: ถังกักเก็บน้ำ (Return tank)

หมายเลข 17: บันไดทางขึ้น (Gallery stairway)

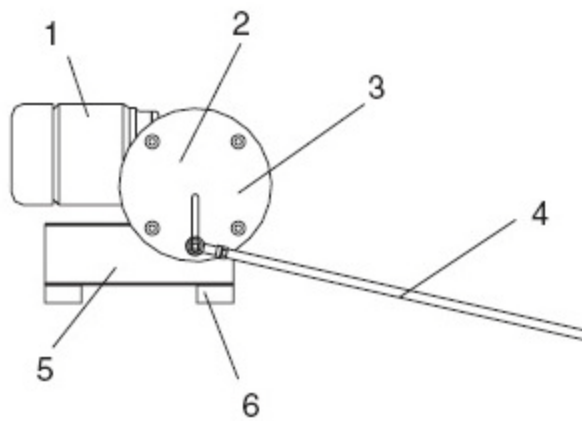
(2) เครื่องกำเนิดคลื่น คือ อุปกรณ์ที่ใช้เพื่อการสร้างคลื่นในรูปแบบต่าง ๆ โดยใช้ร่วมกับรางจำลองคลื่น อุปกรณ์นี้ยังช่วยในเรื่องของการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นบนพื้นที่ชายฝั่ง มอเตอร์ของอุปกรณ์นี้มีความเร็วในการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 114 รอบต่อนาที ซึ่งจะเท่ากับความเร็วของคลื่นที่ 0 ถึง 1.9 เฮิร์ตซ์ ความสูงของคลื่นที่ถูกสร้างขึ้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะคันชักข้อเหวี่ยงซึ่งสามารถปรับได้ตั้งแต่ 40 ถึง 200 มิลลิเมตร

เครื่องกำเนิดคลื่นมีสลักเกลียวเพื่อนำไปติดตั้งกับรางจำลองคลื่น คันชักเชื่อมต่อกับจุดยึดของใบพัดที่ทำจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (Paddle and blocking plate) แสดงดังรูปที่ 3.3 เครื่องกำเนิดคลื่นขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ โดยที่ลำดับของความเร็วในการหมุนมีหลากหลายขึ้นอยู่กับความเร็วของเครื่องมีการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าและอุปกรณ์วัดระดับความดันไฟฟ้าดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ส่วนประกอบของมอเตอร์และคันชักข้อเหวี่ยงแสดงดังรูปที่ 3.4 และส่วนประกอบของใบพัดสร้างคลื่นแสดงดังรูปที่ 3.5





รูปที่ 3.3 เครื่องกำเนิดคลื่น (GUNT, 2001b)



รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของมอเตอร์และคันทวนข้อเหวี่ยง (GUNT, 2001b)

ส่วนประกอบของมอเตอร์

หมายเลข 1: มอเตอร์ (Worm gear motor)

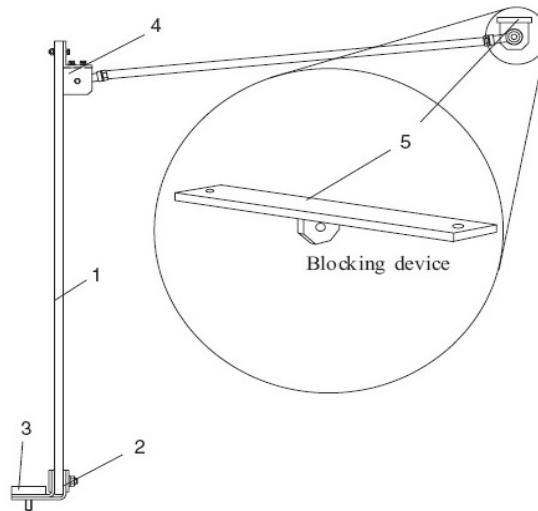
หมายเลข 2: ตัวปรับระยะคันทวนข้อเหวี่ยง (Stroke adjustment)

หมายเลข 3: จานข้อเหวี่ยง (Crank disk)

หมายเลข 4: คันทวน (Push rod)

หมายเลข 5: หมอนรองมอเตอร์ (Motor support)

หมายเลข 6: คานยึดหมอนรองมอเตอร์ (Cross bar)



รูปที่ 3.5 ส่วนประกอบของใบพัดสร้างคลื่น (GUNT, 2001c)

ส่วนประกอบของใบพัดสร้างคลื่น

หมายเลข 1: ใบพัดสร้างคลื่น (Paddle and blocking plate)

หมายเลข 2: แผ่นประกบยางสำหรับยึดใบพัดกับพื้นราง (Flexible rubber bearing for connecting the plate to the channel bed)

หมายเลข 3: อุปกรณ์สำหรับยึดแผ่นประกบยางกับพื้นราง (Cramping device for fixing the rubber bearing to the channel bed)

หมายเลข 4: ตัวยึดคั่นชกกับใบพัด (Holder for connecting the pushing rod to the paddle and blocking plate)

หมายเลข 5: อุปกรณ์สำหรับยึดใบพัดให้กลายเป็นแผ่นกั้นน้ำ (Device for blocking the plate)

### 3.1.2 โครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบและผิวหินเรียง

โครงสร้างพื้นเอียงแบบผิวเรียบที่ใช้ในการทดลองทำมาจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) น้ำซึมผ่านไม่ได้ มีความยาว 255 เซนติเมตร กว้างเท่ากับความกว้างของรางจำลองคลื่น บริเวณฐานพื้นเอียงยึดติดด้วยสลักเกลียว และบริเวณหัวพื้นเอียงถูกยึดด้วยฐานที่มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กสองแกนซึ่งสามารถปรับความลาดชันได้ตามต้องการ ดังรูปที่ 3.6 ในการทดลองนี้ มุมลาดชันที่ใช้เท่ากับ 15.0, 17.5, 20.0, 22.5, และ 25 องศา นอกจากนี้พื้นเอียงผิวเรียบนี้จะถูกใช้เป็นฐานสำหรับการทดสอบพื้นผิวลักษณะอื่น ๆ ต่อไป



รูปที่ 3.6 โครงสร้างพื้นเอียงแบบผิวเรียบ

โครงสร้างพื้นเอียงแบบหินเรียงถูกทำมาจากหินทรายหรือหินก่อสร้าง แต่มีขนาดใหญ่กว่า โดยนำหินมาจากโรงโม่หิน จังหวัดชลบุรี ขนาดตัวแทนของหินซึ่งใช้เป็นขนาดความสูงขรุขระ ( $d$ ) เท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 เซนติเมตร หินถูกติดเข้ากับพื้นเอียงผิวเรียบอีกครั้ง ดังรูปที่ 3.7 และในการทดลอง พื้นเอียงผิวหินเรียงนี้ทำมุมเดียวกับมุมของพื้นเอียงผิวราบ คือ 15.0, 17.5, 20.0, 22.5 และ 25.0 องศา



รูปที่ 3.7 โครงสร้างพื้นเอียงแบบผิวหินเรียง

ขั้นตอนการทำพื้นเอียงแบบผิวชั้นบันได

(1) กำหนดขนาดของหินและคัดเลือกขนาดของก้อนหินที่โรงโม่หิน โดยกำหนดขนาดความสูงขรุขระ ( $d$ ) ให้อยู่ช่วง 2 ถึง 5 เซนติเมตร ซึ่งใช้ความสูงขรุขระหรือขนาดตัวแทนของก้อนหินเท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 เซนติเมตร โดยประมาณ โดยพยายามเลือกก้อนที่มีลักษณะสีเหลี่ยมและมีปริมาณเพียงพอสำหรับการทดลอง ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ก้อนหินขนาด 5 เซนติเมตร

(2) นำแผ่นไม้อัดขนาดกว้าง 60 เซนติเมตร ยาว 240 เซนติเมตร และหนา 0.5 เซนติเมตร สำหรับเป็นฐานรองก้อนหิน โดยเจาะรูไม้อัดให้ตรงตามแผ่นพื้นเรียบด้วยสว่านไฟฟ้าแล้วขันน็อตให้แน่น ดังรูปที่ 3.9



### รูปที่ 3.9 การติดแผ่นไม้อัดเข้ากับแผ่นพื้นเรียบ

(3) ติดตั้งแผ่นพื้นเอียงลงในรางจำลองคลื่นให้ได้มุมตามต้องการแล้วนำก้อนหินทากาวซีลิโคนแล้ววางกดไปบนไม้อัด ดังรูปที่ 3.10 เมื่อติดก้อนหินเสร็จแล้วรอการแห้งประมาณ 5 ชั่วโมง หรืออาจปล่อยให้แห้งให้แห้งสนิทแล้วมาทำการทดลองในวันถัดไป



รูปที่ 3.10 การติดก้อนหินด้วยกาวซีลิโคนลงบนแผ่นไม้อัด

(4) เสร็จสิ้นขั้นตอนการทำพื้นเอียงแบบหินเรียง พร้อมสำหรับขั้นตอนการทดลองต่อไป ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 โครงสร้างพื้นเอียงแบบหินเรียงที่เสร็จสมบูรณ์

### 3.1.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

- (1) ทำการทดลองความสูงคลื่นซัดโดยเริ่มจากกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ จากนั้นจึงทดลองกรณีพื้นเอียงผิวหินเรียง ตามลำดับ โดยกรณีพื้นเอียงผิวหินเรียงต้องทำการทดลองที่ละขนาดของหิน
- (2) ปรับพื้นเอียงให้ได้ความลาดชันตามต้องการ อาจจะเริ่มจากความลาดชันน้อยไปมาก หรือความลาดชันมากไปน้อยตามความเหมาะสม
- (3) ปรับระยะคันชักข้อเหวี่ยง (Stroke) ดังรูปที่ 3.12 โดยเริ่มการทดสอบที่ระยะ 80 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.12 การปรับระยะคันชักข้อเหวี่ยง

- (4) เปิดสวิทช์เครื่องกำเนิดคลื่นที่แผงควบคุม โดยเริ่มทดสอบที่ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดคลื่นเท่ากับ 50 รอบต่อนาที จากนั้นรอจนคลื่นมีการเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอประมาณ 2 นาที
- (5) ใช้เครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้วัดค่าความสูงของคลื่นในตำแหน่งที่คลื่นเกิดการก่อตัวขึ้นช่วงที่ห่างจากเครื่องกำเนิดคลื่นสองในสาม หรือที่ระยะประมาณ 8.50 เมตร จากประตูท้ายน้ำ ดังรูปที่ 3.13 (เนื่องจากได้ทดลองหาช่วงที่คลื่นก่อตัวอย่างสมบูรณ์ที่สุดจึงเลือกช่วงดังกล่าว) วัดและบันทึกค่าความสูงคลื่น จำนวน 5 ครั้ง เพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ย จากนั้นเลื่อนเครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้มาวัดค่าความสูงคลื่นซัดที่แบบจำลองโครงสร้างพื้นเอียง โดยพยายามวัดคลื่นซัดที่มีความสูงที่สุดบนพื้นเอียง บันทึกค่าความสูงคลื่นซัดจำนวน 5 ครั้ง เพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกัน
- (6) ทำการเปลี่ยนความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดคลื่นเป็น 60, 70, 80, 90 และ 100 รอบต่อ นาที ตามลำดับ แล้วปฏิบัติตามข้อ 4 และข้อ 5 จนครบทุกความเร็วรอบดังที่กล่าวมา จากนั้นปิดสวิทช์เครื่องกำเนิดคลื่นเพื่อเปลี่ยนระยะคันชัก

(7) เปลี่ยนระยะคันชักข้อเหวี่ยงเป็น 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยแต่ละระยะให้ปฏิบัติตามข้อ 4 ถึง ข้อ 6 จนครบทุกระยะคันชักข้อเหวี่ยง



รูปที่ 3-36 การวัดความสูงของคลื่น

(8) เปลี่ยนความลาดชันของแบบจำลองโครงสร้างพื้นเอียง โดยแต่ละความลาดชันให้ปฏิบัติตามข้อ 3 ถึง ข้อ 7 จนครบทุกความลาดชัน

(9) กรณีพื้นเอียงผิวเรียบจะเสร็จสิ้นการดำเนินการทดลอง แต่สำหรับกรณีพื้นเอียงผิวขรุขระให้ทำการเปลี่ยนพื้นเอียงที่มีขนาดความสูงขรุขระค่าต่อไป แล้วทำการทดลองโดยปฏิบัติตามข้อ 2 ถึง ข้อ 8 จนครบทุกขนาดจึงเสร็จสิ้นการดำเนินการทดลอง

## 3.2 การพัฒนาสมการความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียง

### 3.2.1 รูปแบบตัวเลือกลำหรับสมการความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 พบว่าจากงานวิจัยของ Hunt (1959) และ Mase (1989) ได้เสนอสมการทำนายความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงผิวเรียบไว้ ดังนี้

$$\frac{R}{H_0} = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H_0/L_0}} = \xi \quad (3.1)$$

$$\frac{R}{H_0} = a\xi^b \quad (3.2)$$

รูปแบบสมการพื้นผิวขรุขระได้ถูกคิดขึ้นโดยมีพื้นฐานมาจากสมการพื้นเรียบด้วยกระบวนการหลายกระบวนการ เช่น การใช้โปรแกรม excel สร้างสมการ การลองสร้างสมการจากรูปสมการอย่างง่าย การพิจารณากราฟความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์แต่ละตัว เป็นต้น โดยสมการที่ถูกสร้างขึ้นมาจะต้องอยู่บนพื้นฐาน ดังนี้

- สมการควรมีรูปแบบเรียบง่าย ไม่ซับซ้อนและมีตัวแปรเชิงประสบการณ์น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้
- สมการต้องมีความแม่นยำและความถูกต้อง
- สมการควรอธิบายลักษณะทางกายภาพได้ เช่น เมื่อความขรุขระเพิ่มขึ้นความสูงขรุขระลดลงเป็นสัดส่วนเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้น เป็นต้น
- สมการต้องประยุกต์ใช้ได้กับโครงสร้างพื้นเอียงทุกชนิดที่สามารถหาความสูงขรุขระตัวแทนได้ ในการศึกษานี้จะใช้ข้อมูลจากการทดลองในกรณีของโครงสร้างพื้นเอียงผิวไม่เรียบ ได้แก่ ผิวหินเรียง ผิวชั้นบันไดและผิวถูทราย

### 3.2.1 การประเมินความถูกต้องและแม่นยำของสมการ

สมการพื้นผิวขรุขระที่ได้สร้างขึ้นมานั้นจะได้รับการประเมิน แล้วนำผลการประเมินนั้นมาหาข้อสรุปเพื่อเลือกสมการที่มีความเหมาะสมที่สุดในการทำนายความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงผิวไม่เรียบ โดยมีหลักการในการพิจารณา ดังนี้



(1) สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination : R<sup>2</sup>)

เป็นค่าที่บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด (ตัวแปรตามสามารถอธิบายโดยตัวแปรอิสระได้มากน้อยเพียงใด) เช่น ถ้าคำนวณค่า R<sup>2</sup> ได้เท่ากับ 96.00% แสดงว่าความผันแปรของตัวแปรตาม (Y) สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ (X) ถึง 96%

(2) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation : S.D.)

เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูลเพื่อพิจารณาค่าของแต่ละตัวจะแตกต่างไปจากค่ากลางมากน้อยเพียงใด หากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่ามากแสดงว่าค่าของแต่ละตัวมีค่ากระจายจากค่ากลางมาก

(3) สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient : C.C.)

เป็นตัววัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในเชิงเส้นตรง บ่งบอกถึงระดับความสัมพันธ์ของชุดข้อมูล 2 ชุด ว่ามีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นตรงมากหรือน้อยเพียงใด ค่า C.C. มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ค่าลบมีนัยว่า หากค่าตัวแปรต้นเพิ่มขึ้น ค่าตัวแปรตามจะลดลง ในลักษณะแปรผกผันเชิงเส้นตรง

ค่าต่างๆ ที่ได้กล่าวมานั้นสามารถหาได้จากการใช้การพล็อตกราฟระหว่างพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบความสัมพันธ์และกราฟระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายจากสมการที่ได้สร้างขึ้นมา

ตารางที่ 3.3 รูปแบบตัวเลือกสำหรับสมการความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบและผิวไม่เรียบ

รูปแบบที่	กรณีพื้นเอียงผิวเรียบ	กรณีพื้นเอียงผิวไม่เรียบ
1	$\frac{R}{H} = \xi$	$\frac{R}{H} = a\xi \left(\frac{d}{H}\right)^b$
2	$\frac{R}{H} = \xi$	$\frac{R}{H} = \xi \left[1 - a \left(\frac{d}{H}\right)^b\right]$
3	$\frac{R}{H} = \xi$	$\frac{R}{H} = \xi - a \left(\frac{d}{H}\right)$
4	$\frac{R}{H} = \xi$	$\frac{R}{H} = \xi - a \tanh\left(\frac{d}{H}\right)$

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

บทนี้ประกอบไปด้วยสองส่วนหลัก คือ ส่วนแรกจะอธิบายผลการทดลองความสูงคลื่นบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบและผิวหินเรียง และส่วนที่สองจะอธิบายถึงการพัฒนาสมการความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงผิวไม่เรียบ ซึ่งนำข้อมูลที่มีอยู่แล้ว ได้แก่ ข้อมูลการทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างผิวถูทรายและผิวชั้นบันได ร่วมกับข้อมูลในส่วนที่หนึ่ง เพื่อนำมาหาสมการความสูงคลื่นชดที่ง่ายและแม่นยำที่สุด

#### 4.1 ผลการทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบและผิวหินเรียง

การทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบและผิวหินเรียงดังอธิบายในบทที่ 3 จำนวนทั้งหมด 1,050 กรณี แบ่งเป็นพื้นเอียงผิวเรียบ 210 กรณี และพื้นเอียงผิวหินเรียง 840 กรณี ในการทดลองมีการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เครื่องกำเนิดทำให้เกิดการสร้างคลื่น ณ ความถี่ต่างๆ ส่งผลให้คลื่นมีความยาวคลื่น ( $L$ ) แตกต่างกัน ในส่วนของการปรับระยะคันชักข้อเหวี่ยง ทำให้ระยะชักของใบพัดกำเนิดขึ้นแตกต่างกัน ส่งผลให้คลื่นที่ถูกสร้างขึ้นมีความสูงคลื่น ( $L$ ) แตกต่างกัน ด้วยค่าความสูงคลื่นและความยาวคลื่นที่ต่างกันนี้ ค่าความชันของคลื่น ( $H/L$ ) แตกต่างกันตามไปด้วย ช่วงค่าของความสูงคลื่น ความยาวคลื่น และความชันคลื่นที่เกิดขึ้นในการทดลอง ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

นอกจากการสร้างที่มีลักษณะต่างๆ เป็นตัวแปรต้นที่สนใจแล้ว ยังมีพารามิเตอร์อื่นที่สนใจด้วย ได้แก่ ความลาดชันของโครงสร้าง และความสูงขรุขระของวัสดุผิว ในกรณีของโครงสร้างพื้นเอียงผิวหินเรียง ในกรณีความลาดชันของโครงสร้าง มุมของพื้นเอียงถูกเปลี่ยนแปลงระหว่าง 15 ถึง 25 องศา ส่วนความสูงขรุขระของวัสดุผิว การศึกษานี้ใช้ขนาดตัวแทนของหินที่นำมาเรียงทำเป็นวัสดุผิวของโครงสร้างพื้นเอียง ซึ่งมีขนาดตัวแทนระหว่าง 2 ถึง 5 เซนติเมตร ช่วงค่าพารามิเตอร์ต่างที่เกิดขึ้นในการทดลองทั้งกรณีพื้นเอียงผิวเรียบและกรณีพื้นเอียงผิวหินเรียง แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตัวแปรตามที่การศึกษานี้สนใจ คือ ความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียง ( $R$ ) ซึ่งถูกวัดในแต่ละกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้น ค่าความสูงคลื่นชดนี้ คือ ค่าความสูงในแนวตั้งจากระดับน้ำนิ่งถึงจุดสูงสุดที่คลื่นชดขึ้นไปได้บนพื้นเอียง

ในกรณีการทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสูงคลื่นชดมีความสัมพันธ์กับความลาดชันของพื้นเอียงและความชันของคลื่นอย่างชัดเจน เมื่อความลาดชันของพื้นเอียงมากขึ้น ความสูงคลื่นชดจะมากขึ้นด้วย และเมื่อความชันของคลื่นมากขึ้น ความสูงคลื่นชดจะน้อยลงด้วย ด้วยเหตุนี้ทำให้ความสูงคลื่นชดมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงของการแตกตัว (Surf similarity parameter) หรือ  $\xi$  มาก เนื่องจากพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงของการแตกตัวเป็นฟังก์ชันของทั้งความลาดชันของพื้นเอียงและความชันของคลื่น

ตารางที่ 4-1 ค่าพารามิเตอร์ในการทดลอง สำหรับกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ

พารามิเตอร์	กรณีพื้นเอียงผิวเรียบ			กรณีพื้นเอียงผิวหินเรียง		
	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย
$R$ (เซนติเมตร)	3.00	19.20	9.46	1.02	11.74	5.37
$H$ (เซนติเมตร)	1.88	13.00	6.93	1.24	11.76	6.02
$L$ (เซนติเมตร)	56.13	186.03	108.52	56.13	186.03	108.73
$d$ (เซนติเมตร)	–	–	–	2.00	5.00	3.5
$\tan \theta$	0.27	0.47	0.37	0.27	0.47	0.37
$R/H$	0.63	3.35	1.48	0.30	2.02	0.93
$H/L$	0.01	0.15	0.08	0.01	0.14	0.07
$\xi = \tan \theta / \sqrt{H/L}$	0.74	3.60	1.50	0.71	5.45	1.64
$d/H$	–	–	–	0.18	2.66	0.66

ในกรณีการทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวหินเรียง ผลการศึกษาที่มีลักษณะเดียวกับกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ กล่าวคือ ความสูงคลื่นชดจะเพิ่มขึ้น เมื่อความลาดชันของพื้นเอียงเพิ่มขึ้น และความชันของคลื่นลดลง นอกจากนี้ผลการทดลองบ่งชี้ว่า ความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงผิวหินเรียงมีค่าน้อยกว่าความสูงคลื่นบนพื้นเอียงผิวเรียบ เมื่อพิจารณาที่ความลาดชันของพื้นเอียงและความชันของคลื่นเท่ากัน ซึ่งการอธิบายกลไกทางกายภาพของเหตุการณ์ทั้งหมดนี้จะกล่าวต่อไปในการวิเคราะห์ข้อมูลและการพัฒนาสมการความสูงคลื่นชด

## 4.2 การพัฒนาสมการความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียง

การพัฒนาสมการความสูงคลื่นชดเริ่มต้นจากการวิเคราะห์เชิงมิติ (Dimensional analysis) ความสูงคลื่นชดเป็นฟังก์ชันของตัวแปร ดังต่อไปนี้

$$R = f_1(H, L, \tan \theta, h, d, K) \quad (4.1)$$

เมื่อ  $R$  คือ ความสูงคลื่นซัด,  $H$  คือ ความสูงคลื่นเข้ากระทบ,  $L$  คือ ความยาวคลื่น,  $\tan \theta$  คือ ความลาดชันของโครงสร้างหรือชายหาด,  $h$  คือ ความลึกน้ำบริเวณโครงสร้าง,  $d$  คือ ความสูงขรุขระ และ  $K$  คือ ความซึมผ่านได้ของวัสดุผิวของโครงสร้าง (ในหน่วย  $m^2$  ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความซึมผ่านได้ปกติของวัสดุ  $k$  ซึ่งอยู่ในหน่วย  $m^2/s$  โดย  $K = kv/g$  เมื่อ  $v$  คือ ความหนืดจลน์ของน้ำ และ  $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก

สมการที่ (4.1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ ได้ดังนี้

$$\frac{R}{H} = f_2 \left( \frac{H}{L}, \tan \theta, \frac{h}{H}, \frac{d}{H}, \frac{\sqrt{K}}{H} \right) \quad (4.2)$$

หากความลึกน้ำมีค่ามากกว่าความสูงคลื่น 3 เท่า หรือ  $h/H > 3.0$  แล้ว อิทธิพลของความลึกจะมีค่าน้อยมากจนละทิ้งได้ (Saville, 1956) ดังนั้นในกรณีของคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบและน้ำซึมผ่านไม่ได้ สมการที่ (4.2) คงเหลือ

$$\frac{R}{H} = f_3 \left( \frac{H}{L}, \tan \theta \right) \quad (4.3)$$

#### 4.2.1 สมการความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ

ในการพัฒนาสมการความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียง ขั้นตอนแรกคือ การเลือกสมการความสูงคลื่นซัดสำหรับกรณีพื้นเอียงผิวเรียบก่อน โดยทั่วไป สมการสำหรับกรณีพื้นเอียงผิวเรียบที่นิยมใช้ คือ สมการของ Hunt (1959) ดังสมการที่ (4.4)

$$\frac{R}{H} = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} = \xi \quad (4.4)$$

ซึ่งเป็นสมการที่พัฒนามาจากข้อมูลการทดลองในห้องปฏิบัติการสำหรับคลื่นแบบสม่ำเสมอ ต่อมา Mase (1989) ได้นำเสนอว่า ในกรณีของคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ เลขยกกำลังของความชันคลื่น ( $H/L$ ) ในสมการไม่เท่ากับ -0.5 ตามสมการของ Hunt และได้เสนอสมการเชิงประสพการณ์ในรูปแบบสมการยกกำลัง คือ

$$\frac{R}{H} = a\xi^b \quad (4.5)$$

สำหรับ  $\frac{1}{30} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{5}$  และ  $\frac{H}{L} \geq 0.007$ , เมื่อ  $a$  และ  $b$  คือ พารามิเตอร์เชิงประสพการณ์จากการทดลอง ซึ่ง Mase (1989) ได้แนะนำค่า  $a$  และ  $b$  สำหรับความสูงคลื่นซัดสูงสุด ( $R_{\max}$ ), ความสูงคลื่นซัด

ที่มีความสูงคลื่นซัดมากกว่า 2% ( $R_{2\%}$ ), ความสูงคลื่นซัดเฉลี่ยของ 1/10 ค่าแรก ( $R_{1/10}$ ), ความสูงคลื่นซัดน้อยสำคัญหรือความสูงคลื่นซัดเฉลี่ยของ 1/3 ค่าแรก ( $R_{1/3}$ ) และความสูงคลื่นซัดเฉลี่ย ( $\bar{R}$ ) ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าแนะนำสำหรับพารามิเตอร์  $a$  และ  $b$  สำหรับสมการที่ (4.2) (Mase, 1989)

ความสูงคลื่นซัด	$a$	$b$
$\bar{R}$	0.88	0.69
$R_{\max}$	2.32	0.77
$R_{2\%}$	1.86	0.71
$R_{1/10}$	1.70	0.71
$R_{1/3}$	1.38	0.70

จากข้อมูลการทดลองในหัวข้อย่อย 4.1 พิจารณาด้วยสมการของ Mase ได้ค่าพารามิเตอร์  $a = 0.98$  และ  $b = 0.94$  ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ทั้งสองตัวใกล้เคียง 1 มาก หากค่าพารามิเตอร์ทั้งสองตัวมีค่าเท่ากับ 1 แล้ว สมการของ Mase ก็คือ สมการของ Hunt นั่นเอง การศึกษานี้ได้เลือกใช้สมการของ Hunt แทนที่จะสมการของ Mase เนื่องจากพารามิเตอร์ตามสมการของ Mase ที่ได้ใกล้เคียง 1 มาก ทำให้สมการใกล้เคียงสมการของ Hunt และสมการของ Hunt เป็นสมการที่อยู่ในรูปแบบที่ง่ายกว่า ซึ่งเป็นเป้าประสงค์ของการศึกษาที่ต้องการพัฒนาสมการที่มีรูปแบบง่าย ไม่ซับซ้อน และไม่มีพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ที่เยอะเกินจำเป็น

#### 4.2.2 สมการความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวไม่เรียบ

เมื่อได้สมการสำหรับกรณีพื้นเรียบแล้ว ลำดับถัดไปคือ การพัฒนาสมการความสูงคลื่นซัดสำหรับกรณีพื้นไม่เรียบ ซึ่งข้อมูลการทดลองความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียง 3 แบบ ได้แก่ แบบหินเรียงแบบถูทราย และแบบชั้นบันได ซึ่งรายละเอียดช่วงข้อมูลของทั้ง 3 กรณี แสดงไว้ดังตารางที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ช่วงข้อมูลการทดลองกรณีพื้นเอียงแบบหินเรียง

พารามิเตอร์	สูงสุด	ต่ำสุด
$\tan \theta$	0.47	0.27
$H$	11.76	1.88
$H/L$	0.14	0.01
$\xi$	2.95	0.71
$R/H$	2.02	0.30
$d/H$	1.39	0.18

ตารางที่ 4.4 ช่วงข้อมูลการทดลองกรณีพื้นเอียงแบบหญ้าทราย

พารามิเตอร์	สูงสุด	ต่ำสุด
$\tan \theta$	0.47	0.27
$H$	14.04	2.00
$H/L$	0.18	0.01
$\xi$	4.94	0.71
$R/H$	2.27	0.09
$d/H$	3.05	0.17

ตารางที่ 4.5 ช่วงข้อมูลการทดลองกรณีพื้นเอียงแบบชั้นบันได

พารามิเตอร์	สูงสุด	ต่ำสุด
$\tan \theta$	0.51	0.25
$H$	14.12	1.80
$H/L$	0.19	0.01
$\xi$	4.89	0.64
$R/H$	1.90	0.31
$d/H$	3.05	0.17

ข้อมูลการทดลองเพื่อใช้ในการพัฒนาสมการความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวไม่เรียบในการศึกษานี้มีทั้งสิ้น 2,730 กรณีการทดลอง แบ่งเป็น

(1) กรณีพื้นเอียงผิวหินเรียง 840 การทดลอง โดยทดสอบที่มุมลาดเอียง  $15^\circ$ ,  $17.5^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $22.5^\circ$  และ  $25^\circ$  ใช้ขนาดความสูงขรุขระ เท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 ซม.

(2) กรณีโครงสร้างพื้นเอียงแบบถูทราย 1,050 การทดลอง โดยทดสอบที่มุมลาดเอียง  $15^\circ$ ,  $17.5^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $22.5^\circ$  และ  $25^\circ$  ใช้ขนาดความสูงขรุขระ เท่ากับ 2.25, 2.85, 4.40, 5.25 และ 6.10 ซม.

(3) กรณีโครงสร้างพื้นเอียงแบบชั้นบันได 840 การทดลอง โดยทดสอบที่มุมลาดเอียง  $14^\circ$ ,  $16^\circ$ ,  $18^\circ$ ,  $22^\circ$  และ  $27^\circ$  ใช้อัตราส่วนชั้นบันได เท่ากับ 1:4, 1:3.5, 1:3, 1:2.5 และ 1:2 ใช้ขนาดความสูงขรุขระ เท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 ซม.

ทั้ง 3 กรณีใช้ความเร็วรอบที่ 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 รอบต่อนาที และระยะคันชักที่ 80, 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 มิลลิเมตร

การศึกษานี้ได้นำเสนอสมการความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวไม่เรียบ โดยพิจารณาขนาดตัวแทนของวัสดุผิวเข้าไปในสมการด้วย จากสมการความสัมพันธ์ที่ (4.2) พจน์ของ  $(d/H)$  หรือความขรุขระสัมพันธ์ ถูกรวมเข้าไปในสมการความสูงคลื่นชดสำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวเรียบ โดยให้ค่าความสูงขรุขระ  $d$  คือ ค่าขนาดตัวแทนของหิน สำหรับกรณีหินเรียง, ค่าความสูงของถูทราย สำหรับกรณีถูทราย และค่าความสูงลูกตั้ง สำหรับกรณีชั้นบันได การศึกษานี้นำเสนอสมการในรูปแบบต่างๆ จำนวน 4 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

$$\text{รูปแบบที่ 1} \quad \frac{R}{H} = a_1 \xi \left( \frac{d}{H} \right)^{b_1} \quad (4.6)$$

$$\text{รูปแบบที่ 2} \quad \frac{R}{H} = \xi \left[ 1 - a_2 \left( \frac{d}{H} \right)^{b_2} \right] \quad (4.7)$$

$$\text{รูปแบบที่ 3} \quad \frac{R}{H} = \xi - a_3 \left( \frac{d}{H} \right) \quad (4.8)$$

$$\text{รูปแบบที่ 4} \quad \frac{R}{H} = \xi - a \tanh \left( \frac{d}{H} \right) \quad (4.9)$$

สมการรูปแบบที่ 1 มีลักษณะเป็นสมการไม่เชิงเส้นในรูปของสมการยกกำลังของตัวแปรไร้มิติ ซึ่งเป็นรูปแบบสมการที่ใช้ทั่วไปในการวิเคราะห์เชิงมิติ (Dimensional analysis) แต่สมการรูปแบบที่ 1 ไม่



สามารถใช้ร่วมกับกรณีของพื้นเรียบได้ กล่าวคือ กรณีของพื้นเรียบ ค่า  $d$  เท่ากับ 0 ผลลัพธ์ของสมการจะเท่ากับ 0 ทันที จึงจำเป็นต้องแยกแยะระหว่างสมการสำหรับพื้นเรียบและสมการสำหรับพื้นไม่เรียบ

สมการรูปแบบที่ 2 เป็นความพยายามที่จะให้สมการใช้กับทั้งกรณีพื้นเรียบและพื้นไม่เรียบได้ สมการตั้งต้นเป็นสมการสำหรับพื้นเรียบ จากนั้นในกรณีของพื้นไม่เรียบ ค่าความสูงคลื่นซัดจะลดลงเป็นสัดส่วนของพื้นเรียบที่คุณด้วยอัตราส่วนค่าหนึ่งซึ่งเกิดจากพจน์  $a_2 (d/H)^{b_2}$  นั้นเอง จะเห็นได้ว่า สมการนี้สามารถใช้ได้กับทั้งกรณีของพื้นเรียบและพื้นไม่เรียบ ในกรณีพื้นเรียบ ค่า  $d$  เท่ากับ 0 สมการจะย้อนกลับไปเป็นสมการของพื้นเรียบนั่นเอง

สมการรูปแบบที่ 3 มีลักษณะคล้ายสมการรูปแบบที่ 2 เพียงแต่ค่าความสูงคลื่นซัดในกรณีของพื้นไม่เรียบจะลดลงเป็นอัตราส่วนของของค่า  $(d/H)$  คงที่ตลอดหรือเชิงเส้นนั่นเอง เช่นเดียวกับสมการรูปแบบที่ 2 คือ สำหรับกรณีพื้นเรียบ เมื่อ  $d$  เท่ากับ 0 สมการจะย้อนกลับไปเป็นสมการของพื้นเรียบนั่นเอง

สมการรูปแบบที่ 4 มีลักษณะคล้ายรูปแบบที่ 2 และ 3 ตรงที่สมการตั้งต้นด้วยสมการของพื้นเรียบ จากนั้นในกรณีของพื้นไม่เรียบ สมการจะถูกลดค่าลงจำนวนหนึ่ง เพียงแต่ในรูปแบบที่ 4 ใช้อัตราส่วนของค่า  $\tanh(d/H)$  เหตุผลที่ใช้ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก เนื่องจากในสมการเชิงประสพการณ์ที่เกี่ยวข้องกับคลื่นน้ำจำนวนมาก นิยมใช้ฟังก์ชันประเภทนี้ และเหตุที่เลือกฟังก์ชัน  $\tanh$  นั้นเพราะว่า เมื่อค่า  $(d/H)$  เท่ากับ 0 แล้ว ค่า  $\tanh$  จะเท่ากับ 0 และสมการจะย้อนกลับไปเป็นสมการพื้นเรียบด้วย

#### 4.2.3 การกรองข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อนออก

ก่อนเริ่มวิเคราะห์ความเหมาะสมและแม่นยำของสมการแต่ละรูปแบบ เราจำเป็นต้องมีการกรองข้อมูลที่มีปัญหาออกจากชุดข้อมูลเสียก่อน ข้อมูลที่มีปัญหาเหล่านั้น เช่น ข้อมูลที่อยู่ในช่วงที่มีความคลาดเคลื่อนสูงมากเกินไป ข้อมูลที่ไม่เป็นไปตามสมมติฐานของการศึกษา ข้อมูลที่ไม่ได้อยู่ในโดเมนของสมการ เป็นต้น

ในการศึกษานี้เราพบว่า เมื่อค่า  $\xi > 3.0$  และ  $H/L < 0.04$  ข้อมูลมีความคลาดเคลื่อนและกระจัดกระจาย ซึ่งพฤติกรรมเช่นนี้เกิดขึ้นเมื่อค่า  $\xi$  มีค่ามาก และค่า  $H/L$  มีค่าน้อย โดยมีงานวิจัยหลายเรื่อง เช่น Mase (1989), Stam et al. (1992) อ้างเช่นเดียวกัน

##### การกรองข้อมูลในกรณี $\xi > 3.0$

จากการศึกษาพบว่าเมื่อค่า  $\xi > 3.0$  ข้อมูลมีความคลาดเคลื่อนของผลการทำนายจากสมการสูง จึงได้มีการกรองข้อมูลที่  $\xi > 3.0$  ออก โดยในกรณีพื้นเอียงผิวชันบันได กรองข้อมูลออกจำนวน 39 ข้อมูล กรณีพื้นเอียงผิวถูทราย กรองข้อมูลออกจำนวน 47 ข้อมูล และกรณีพื้นเอียงผิวหินเรียง กรองข้อมูลออกจำนวน 0 ข้อมูล

##### การกรองข้อมูลในกรณี $H/L < 0.04$

จากข้อมูลการทดลอง ได้ทำการสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยการแบ่งตามข้อมูล  $R/H$ ,  $H/L$ ,  $d/H$  และ  $\xi$  ซึ่งแต่ละข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น 4 ช่วงของการวิเคราะห์ ได้แก่ เปอร์เซ็นไทล์ที่ 0-25 (แดง), 25-50 (เขียว), 50-75 (เหลือง) และ 75-100 (น้ำเงิน) โดยได้ทำตารางแสดงความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นไทล์ของแต่ละข้อมูล เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจะแบ่งส่วนของความคลาดเคลื่อนเป็น 2 ส่วน คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ทำนายจากสมการซึ่งให้ค่าน้อยกว่าข้อมูลจากการทดลองเกินร้อยละ 20 และค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ทำนายจากสมการซึ่งให้ค่ามากกว่าข้อมูลจากการทดลองเกินร้อยละ 20 ได้ทำการรวมจำนวนข้อมูลที่อยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเพื่อความง่ายในการวิเคราะห์โดยแสดงจำนวนความคลาดเคลื่อนสองอันดับแรกด้วยแถบสี แบ่งเป็นจำนวนความคลาดเคลื่อนสูงสุดด้วยแถบสีเทา และจำนวนความคลาดเคลื่อนสูงรองลงมาด้วยแถบสีส้ม

ตารางที่ 4.7 เป็นตารางข้อมูลที่ถูกคำนวณด้วยสมการรูปแบบที่ 1 หรือสมการที่ 4.6 และแสดงให้เห็นว่า ถ้าดูข้อมูลที่เรียงตามค่า  $R/H$  ช่วงข้อมูล  $R/H$  น้อยที่สุดและมากที่สุด จะมีจำนวนความคลาดเคลื่อนมาก ถ้าดูข้อมูลที่เรียงตามค่า  $H/L$  ช่วงข้อมูล  $H/L$  น้อย จะมีจำนวนความคลาดเคลื่อนมากที่สุดสองอันดับแรก ถ้าดูข้อมูลที่เรียงตามค่า  $\xi$  ช่วงข้อมูล  $\xi$  กลางถึงมาก จะมีจำนวนความคลาดเคลื่อนมาก และถ้าดูข้อมูลที่เรียงตามค่า  $d/H$  ช่วงข้อมูลที่  $d/H$  น้อยสุดและมากที่สุด จะมีจำนวนความคลาดเคลื่อนมาก ซึ่งจากภาพรวมนั้นจำนวนความคลาดเคลื่อนจะมีการกระจายสูงเมื่อเรียงตามค่า  $R/H$ ,  $\xi$  และ  $d/H$  ต่างจากกรณีเรียงตามค่า  $H/L$

ตารางที่ 4.8 เป็นตารางข้อมูลที่ถูกคำนวณด้วยสมการรูปแบบที่ 2 หรือสมการที่ 4.7 และแสดงให้เห็นว่า ถ้าดูข้อมูลที่เรียงตามค่า  $R/H$  ช่วงข้อมูล  $R/H$  ที่มีจำนวนความคลาดเคลื่อนมากมีการกระจายมาก ถ้าดูข้อมูลที่เรียงตามค่า  $H/L$  ช่วงข้อมูล  $H/L$  น้อยสองช่วงแรก จะมีจำนวนความคลาดเคลื่อนมากที่สุด ถ้าดูข้อมูลที่เรียงตามค่า  $\xi$  ช่วงข้อมูล  $\xi$  ค่อนไปทางค่ามาก จะมีจำนวนความคลาดเคลื่อนมาก และถ้าดูข้อมูลที่เรียงตามค่า  $d/H$  ช่วงข้อมูลที่  $d/H$  ที่มีจำนวนความคลาดเคลื่อนมาก มีการกระจายมาก ซึ่งจากภาพรวมนั้นจำนวนความคลาดเคลื่อนจะมีการกระจายสูงเมื่อเรียงตามค่า  $R/H$  และ  $d/H$  ต่างจากกรณีเรียงตามค่า  $H/L$  และ  $\xi$  ที่มีความชัดเจนของแนวโน้มของจำนวนความคลาดเคลื่อนมากกว่า

ตารางที่ 4.9 เป็นตารางข้อมูลที่ถูกคำนวณด้วยสมการรูปแบบที่ 3 หรือสมการที่ 4.8 และแสดงให้เห็นว่า ถ้าดูข้อมูลที่เรียงตามค่า  $R/H$  ช่วงข้อมูล  $R/H$  ที่มีจำนวนความคลาดเคลื่อนมากยังมีการกระจายมากทำให้ไม่สามารถหาแนวโน้มได้ ถ้าดูข้อมูลที่เรียงตามค่า  $H/L$  ช่วงข้อมูล  $H/L$  น้อย จะมีจำนวนความคลาดเคลื่อนมากอย่างชัดเจน ถ้าดูข้อมูลที่เรียงตามค่า  $\xi$  ช่วงข้อมูล  $\xi$  สูงสุดและต่ำสุด จะมีจำนวนความคลาดเคลื่อนมากและถ้าดูข้อมูลที่เรียงตามค่า  $d/H$  ช่วงข้อมูลที่  $d/H$  ที่มีจำนวนความคลาดเคลื่อนมากมีแนวโน้มคล้ายกับค่า  $\xi$  ซึ่งจากภาพรวมนั้นจำนวนความคลาดเคลื่อนจะมีการกระจายสูงเมื่อเรียงตามค่า  $R/H$ ,  $\xi$  และ  $d/H$  แต่ในกรณีที่เรียงตามค่า  $H/L$  จะมีความชัดเจนของแนวโน้มของจำนวนความคลาดเคลื่อน

ตารางที่ 4.10 เป็นตารางข้อมูลที่ถูกคำนวณด้วยสมการรูปแบบที่ 4 หรือสมการที่ 4.9 และแสดงให้เห็นว่า ถ้าดูข้อมูลที่เรียงตามค่า  $R/H$  ช่วงข้อมูล  $R/H$  ที่มีจำนวนความคลาดเคลื่อนมากยังมีการกระจายแต่แนวโน้มจะค่อนข้างน้อย ถ้าดูข้อมูลที่เรียงตามค่า  $H/L$  ช่วงข้อมูล  $H/L$  ที่มีจำนวนความคลาดเคลื่อนมากเริ่มมีการกระจายบ้างแต่แนวโน้มยังคงไปทางค่าน้อย ถ้าดูข้อมูลที่เรียงตามค่า  $\xi$  ช่วงข้อมูล  $\xi$  สูงสุดและต่ำสุด จะมีจำนวนความคลาดเคลื่อนมากและถ้าดูข้อมูลที่เรียงตามค่า  $d/H$  ช่วงข้อมูลที่  $d/H$  ที่มีจำนวนความคลาดเคลื่อนมากยังมีการกระจายแต่แนวโน้มจะค่อนข้างมาก ซึ่งจากภาพรวมนั้นจำนวนความคลาดเคลื่อนจะมีการกระจายเมื่อเรียงตามค่า  $R/H$ ,  $\xi$  และ  $d/H$  ต่างกับกรณีเรียงตามค่า  $H/L$  จะมีความชัดเจน

จากการศึกษาพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่มีผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงนั้น คือ เมื่อค่า  $H/L$  ที่มีค่าน้อย ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มที่ว่าค่า  $\xi$  ที่มีค่ามากจะทำให้ค่าความสูงคลื่นที่ได้จากสมการนั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนมาก จึงได้มีการกรองข้อมูลที่  $H/L < 0.04$  ออก โดยในกรณีพื้นเอียงผิวชั้นบันได กรองข้อมูลออกจำนวน 149 ข้อมูล กรณีพื้นเอียงผิวถูทราย กรองข้อมูลออกจำนวน 189 ข้อมูล และกรณีพื้นเอียงผิวหินเรียง กรองข้อมูลออกจำนวน 220 ข้อมูล ทั้งนี้ถ้าพิจารณาถึงความแม่นยำของสมการอย่างคร่าวๆ พบเห็นได้ว่าสมการรูปแบบที่ 1 (สมการที่ 4.6) และสมการรูปแบบที่ 2 (สมการที่ 4.7) นั้นให้จำนวนความคลาดเคลื่อนสูงน้อยกว่าสมการรูปแบบที่ 3 (สมการที่ 4.8) และสมการรูปแบบที่ 4 (สมการที่ 4.9) อย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของสมการที่ 4.6

ชุดข้อมูล	เรียงตามพารามิเตอร์	เปอร์เซ็นต์ไทล์	ค่า	ช่วงข้อมูล	จำนวน	>1.2	%	<0.8	%	ผลรวม	
ตัวขั้นบันได	R/H	แดง	0	0.313	0.313-0.567	218	31	14.22	20	9.17	51
		เขียว	25	0.566	0.567-0.700	218	35	16.06	37	16.97	72
		เหลือง	50	0.700	0.700-0.839	211	35	16.59	32	15.17	67
		น้ำเงิน	75	0.839	0.839-1.529	193	29	15.03	31	16.06	60
	H/L	แดง	0	0.013	0.013-0.047	207	36	17.39	34	16.43	70
		เขียว	25	0.047	0.047-0.090	207	44	21.26	26	12.56	70
		เหลือง	50	0.090	0.090-0.117	199	28	14.07	35	17.59	63
		น้ำเงิน	75	0.117	0.117-0.192	201	22	10.95	25	12.44	47
	ξ	แดง	0	0.638	0.638-0.928	204	17	8.33	24	11.76	41
		เขียว	25	0.928	0.928-1.221	203	41	20.20	32	15.76	73
		เหลือง	50	1.221	1.221-1.598	207	38	18.36	38	18.36	76
		น้ำเงิน	75	1.598	1.598-2.988	200	34	17.00	26	13.00	60
	d/H	แดง	0	0.154	0.154-0.333	220	39	17.73	21	9.55	60
		เขียว	25	0.333	0.333-0.481	189	32	16.93	26	13.76	58
		เหลือง	50	0.481	0.481-0.638	203	24	11.82	33	16.26	57
		น้ำเงิน	75	0.638	0.667-1.667	202	35	17.33	40	19.80	75
ตัวลงทแยง	R/H	แดง	0	0.097	0.097-0.704	264	44	16.67	1	0.38	45
		เขียว	25	0.704	0.704-0.912	261	27	10.34	11	4.21	38
		เหลือง	50	0.912	0.912-1.143	264	37	14.02	46	17.42	83
		น้ำเงิน	75	1.143	1.143-2.273	230	21	9.13	41	17.83	62
	H/L	แดง	0	0.011	0.011-0.047	262	52	19.85	31	11.83	83
		เขียว	25	0.047	0.047-0.084	248	32	12.90	29	11.69	61
		เหลือง	50	0.084	0.084-0.112	264	22	8.33	26	9.85	48
		น้ำเงิน	75	0.112	0.112-0.177	245	23	9.39	13	5.31	36
	ξ	แดง	0	0.712	0.712-1.062	255	10	3.92	18	7.06	28
		เขียว	25	1.062	1.062-1.316	255	29	11.37	36	14.12	65
		เหลือง	50	1.316	1.316-1.680	254	19	7.48	29	11.42	48
		น้ำเงิน	75	1.680	1.680-2.927	255	71	27.84	16	6.27	87
	d/H	แดง	0	0.174	0.174-0.389	256	33	12.89	3	1.17	36
		เขียว	25	0.389	0.389-0.578	255	37	14.51	34	13.33	71
		เหลือง	50	0.578	0.578-0.780	255	23	9.02	29	11.37	52
		น้ำเงิน	75	0.780	0.780-3.050	253	36	14.23	33	13.04	69
ตัวทึบเรียง	R/H	แดง	0	0.097	0.097-0.736	276	105	38.04	11	3.99	116
		เขียว	25	0.736	0.736-0.900	270	52	19.26	45	16.67	97
		เหลือง	50	0.900	0.900-1.078	272	36	13.24	64	23.53	100
		น้ำเงิน	75	1.078	1.078-2.019	231	3	1.30	117	50.65	120
	H/L	แดง	0	0.011	0.009-0.043	252	86	34.13	44	17.46	130
		เขียว	25	0.043	0.043-0.075	249	32	12.85	71	28.51	103
		เหลือง	50	0.075	0.075-0.100	265	41	15.47	69	26.04	110
		น้ำเงิน	75	0.100	0.100-0.176	231	37	16.02	53	22.94	90
	ξ	แดง	0	0.638	0.638-1.081	251	46	18.33	73	29.08	119
		เขียว	25	1.081	1.081-1.387	249	28	11.24	61	24.50	89
		เหลือง	50	1.387	1.387-1.750	249	36	14.46	69	27.71	105
		น้ำเงิน	75	1.750	1.750-2.984	248	86	34.68	34	13.71	120
	d/H	แดง	0	0.171	0.171-0.391	253	46	18.18	74	29.25	120
		เขียว	25	0.391	0.391-0.610	247	29	11.74	62	25.10	91
		เหลือง	50	0.610	0.610-0.971	247	35	14.17	67	27.13	102
		น้ำเงิน	75	0.971	0.971-3.245	245	86	35.10	34	13.88	120

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของสมการที่ 4.7

ชุดข้อมูล	เรียงตามพารามิเตอร์	เปอร์เซ็นต์ไทล์	ค่า	ช่วงข้อมูล	จำนวน	>1.2	%	<0.8	%	ผลรวม	
ตัวขั้นบันได	R/H	แดง	0	0.313	0.313-0.559	204	42	20.59	8	3.92	50
		เขียว	25	0.559	0.559-0.692	205	49	23.90	25	12.20	74
		เหลือง	50	0.692	0.692-0.833	209	53	25.36	18	8.61	71
		น้ำเงิน	75	0.833	0.833-1.529	196	61	31.12	17	8.67	78
	H/L	แดง	0	0.013	0.013-0.047	207	96	46.38	11	5.31	107
		เขียว	25	0.047	0.047-0.090	207	42	20.29	22	10.63	64
		เหลือง	50	0.090	0.090-0.117	199	27	13.57	22	11.06	49
		น้ำเงิน	75	0.117	0.117-0.192	201	40	19.90	13	6.47	53
	ξ	แดง	0	0.638	0.638-0.930	205	5	2.44	39	19.02	44
		เขียว	25	0.928	0.930-1.223	204	25	12.25	18	8.82	43
		เหลือง	50	1.221	1.223-1.598	205	57	27.80	9	4.39	66
		น้ำเงิน	75	1.598	1.598-2.988	200	118	59.00	2	1.00	120
	d/H	แดง	0	0.154	0.154-0.333	220	50	22.73	11	5.00	61
		เขียว	25	0.332	0.333-0.481	189	47	24.87	13	6.88	60
		เหลือง	50	0.481	0.481-0.638	203	54	26.60	25	12.32	79
		น้ำเงิน	75	0.637	0.638-1.667	202	54	26.73	19	9.41	73
ตัวลงทแยง	R/H	แดง	0	0.097	0.097-0.699	258	60	23.26	0	0.00	60
		เขียว	25	0.699	0.699-0.893	253	45	17.79	3	1.19	48
		เหลือง	50	0.893	0.893-1.122	253	45	17.79	18	7.11	63
		น้ำเงิน	75	1.122	1.122-2.000	255	38	14.90	17	6.67	55
	H/L	แดง	0	0.011	0.011-0.047	262	71	27.10	12	4.58	83
		เขียว	25	0.047	0.047-0.085	253	45	17.79	11	4.35	56
		เหลือง	50	0.084	0.085-0.112	259	37	14.29	7	2.70	44
		น้ำเงิน	75	0.112	0.112-0.177	245	35	14.29	8	3.27	43
	ξ	แดง	0	0.712	0.712-1.063	257	18	7.00	10	3.89	28
		เขียว	25	1.062	1.063-1.317	254	40	15.75	14	5.51	54
		เหลือง	50	1.316	1.317-1.682	254	39	15.35	9	3.54	48
		น้ำเงิน	75	1.680	1.682-2.927	254	90	35.43	5	1.97	95
	d/H	แดง	0	0.174	0.174-0.390	256	40	15.63	2	0.78	42
		เขียว	25	0.389	0.390-0.578	255	50	19.61	13	5.10	63
		เหลือง	50	0.578	0.578-0.780	255	39	15.29	12	4.71	51
		น้ำเงิน	75	0.780	0.780-3.050	253	58	22.92	11	4.35	69
ตัวทแยง	R/H	แดง	0	0.097	0.097-0.726	250	100	40.00	9	3.60	109
		เขียว	25	0.726	0.726-0.891	250	74	29.60	26	10.40	100
		เหลือง	50	0.891	0.891-1.055	248	68	27.42	28	11.29	96
		น้ำเงิน	75	1.055	1.055-2.019	249	52	20.88	43	17.27	95
	H/L	แดง	0	0.009	0.009-0.043	252	146	57.94	10	3.97	156
		เขียว	25	0.043	0.043-0.075	249	66	26.51	24	9.64	90
		เหลือง	50	0.075	0.075-0.100	265	47	17.74	32	12.08	79
		น้ำเงิน	75	0.100	0.100-0.176	230	34	14.78	40	17.39	74
	ξ	แดง	0	0.638	0.638-1.080	249	36	14.46	60	24.10	96
		เขียว	25	1.080	1.080-1.387	251	36	14.34	26	10.36	62
		เหลือง	50	1.387	1.387-1.746	247	61	24.70	16	6.48	77
		น้ำเงิน	75	1.746	1.746-2.984	249	160	64.26	4	1.61	164
	d/H	แดง	0	0.171	0.171-0.391	253	78	30.83	22	8.70	100
		เขียว	25	0.391	0.391-0.610	251	54	21.51	32	12.75	86
		เหลือง	50	0.610	0.610-0.971	247	63	25.51	25	10.12	88
		น้ำเงิน	75	0.971	0.971-3.275	245	98	40.00	27	11.02	125

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของสมการที่ 4.8

ชุดข้อมูล	เรียงตามพารามิเตอร์	เปอร์เซ็นต์ไทล์	ค่า	ช่วงข้อมูล	จำนวน	>1.2	%	<0.8	%	ผลรวม	
ตัวขั้นบันได	R/H	แดง	0	0.313	0.313-0.567	204	46	22.55	93	45.59	139
		เขียว	25	0.566	0.567-0.700	205	62	30.24	77	37.56	139
		เหลือง	50	0.700	0.700-0.839	209	89	42.58	48	22.97	137
		น้ำเงิน	75	0.839	0.839-1.529	196	106	54.08	34	17.35	140
	H/L	แดง	0	0.013	0.013-0.047	207	106	51.21	38	18.36	144
		เขียว	25	0.047	0.047-0.090	207	81	39.13	61	29.47	142
		เหลือง	50	0.090	0.090-0.117	199	51	25.63	88	44.22	139
		น้ำเงิน	75	0.117	0.117-0.192	201	65	32.34	65	32.34	130
	ξ	แดง	0	0.638	0.638-0.928	204	11	5.39	124	60.78	135
		เขียว	25	0.928	0.928-1.221	203	48	23.65	79	38.92	127
		เหลือง	50	1.221	1.221-1.598	207	95	45.89	39	18.84	134
		น้ำเงิน	75	1.598	1.598-2.988	200	149	74.50	10	5.00	159
	d/H	แดง	0	0.154	0.154-0.332	204	112	54.90	10	4.90	122
		เขียว	25	0.332	0.332-0.481	205	86	41.95	47	22.93	133
		เหลือง	50	0.481	0.481-0.637	203	59	29.06	94	46.31	153
		น้ำเงิน	75	0.637	0.637-1.667	202	46	22.77	101	50.00	147
ตัวลงทราย	R/H	แดง	0	0.097	0.097-0.699	258	66	25.58	90	34.88	156
		เขียว	25	0.699	0.699-0.893	253	70	27.67	57	22.53	127
		เหลือง	50	0.893	0.893-1.122	253	74	29.25	41	16.21	115
		น้ำเงิน	75	1.122	1.122-2.000	255	77	30.20	35	13.73	112
	H/L	แดง	0	0.011	0.011-0.047	262	96	36.64	41	15.65	137
		เขียว	25	0.047	0.047-0.084	248	84	33.87	46	18.55	130
		เหลือง	50	0.084	0.084-0.112	264	51	19.32	74	28.03	125
		น้ำเงิน	75	0.112	0.112-0.177	245	56	22.86	62	25.31	118
	ξ	แดง	0	0.712	0.712-1.062	255	27	10.59	115	45.10	142
		เขียว	25	1.062	1.062-1.316	255	54	21.18	57	22.35	111
		เหลือง	50	1.316	1.316-1.680	254	79	31.10	35	13.78	114
		น้ำเงิน	75	1.680	1.680-2.927	255	127	49.80	16	6.27	143
	d/H	แดง	0	0.174	0.174-0.389	256	123	48.05	0	0.00	123
		เขียว	25	0.389	0.389-0.578	255	93	36.47	26	10.20	119
		เหลือง	50	0.578	0.578-0.780	255	39	15.29	83	32.55	122
		น้ำเงิน	75	0.780	0.780-3.050	253	32	12.65	114	45.06	146
ตัวหินเรียง	R/H	แดง	0	0.097	0.097-0.726	250	168	67.20	8	3.20	176
		เขียว	25	0.726	0.736-0.891	250	99	39.60	31	12.40	130
		เหลือง	50	0.891	0.891-1.055	248	72	29.03	48	19.35	120
		น้ำเงิน	75	1.055	1.055-2.019	249	30	12.05	113	45.38	143
	H/L	แดง	0	0.009	0.009-0.043	253	114	45.06	54	21.34	168
		เขียว	25	0.043	0.043-0.075	249	81	32.53	57	22.89	138
		เหลือง	50	0.075	0.075-0.100	265	82	30.94	59	22.26	141
		น้ำเงิน	75	0.100	0.100-0.176	230	92	40.00	30	13.04	122
	ξ	แดง	0	0.638	0.638-1.081	251	89	35.46	53	21.12	142
		เขียว	25	1.080	1.081-1.387	249	75	30.12	51	20.48	126
		เหลือง	50	1.387	1.387-1.750	249	75	30.12	58	23.29	133
		น้ำเงิน	75	1.746	1.750-2.984	247	130	52.63	38	15.38	168
	d/H	แดง	0	0.171	0.171-0.391	253	153	60.47	8	3.16	161
		เขียว	25	0.391	0.391-0.610	251	86	34.26	35	13.94	121
		เหลือง	50	0.610	0.610-0.971	247	67	27.13	57	23.08	124
		น้ำเงิน	75	0.971	0.971-3.245	245	63	25.71	100	40.82	163

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของสมการที่ 4.9

ชุดข้อมูล	เรียงตามพารามิเตอร์	เปอร์เซ็นต์ไทล์	ค่า	ช่วงข้อมูล	จำนวน	>1.2	%	<0.8	%	ผลรวม	
ตัวขึ้นบันได	R/H	แดง	0	0.313	0.313-0.559	204	33	16.18	109	53.43	142
		เขียว	25	0.559	0.559-0.692	205	52	25.37	93	45.37	145
		เหลือง	50	0.692	0.692-0.833	209	75	35.89	49	23.44	124
		น้ำเงิน	75	0.833	0.833-1.529	196	103	52.55	33	16.84	136
	H/L	แดง	0	0.013	0.013-0.047	207	102	49.28	34	16.43	136
		เขียว	25	0.047	0.047-0.090	207	68	32.85	70	33.82	138
		เหลือง	50	0.090	0.090-0.117	199	41	20.60	97	48.74	138
		น้ำเงิน	75	0.117	0.117-0.192	201	52	25.87	83	41.29	135
	ξ	แดง	0	0.638	0.638-0.928	204	5	2.45	145	71.08	150
		เขียว	25	0.928	0.928-1.221	203	31	15.27	90	44.33	121
		เหลือง	50	1.221	1.221-1.598	207	78	37.68	46	22.22	124
		น้ำเงิน	75	1.598	1.598-2.988	200	149	74.50	3	1.50	152
	d/H	แดง	0	0.154	0.154-0.332	204	93	45.59	19	9.31	112
		เขียว	25	0.332	0.332-0.481	205	68	33.17	65	31.71	133
		เหลือง	50	0.481	0.481-0.637	201	52	25.87	98	48.76	150
		น้ำเงิน	75	0.637	0.637-1.667	204	50	24.51	102	50.00	152
ตัวดุงทราย	R/H	แดง	0	0.097	0.097-0.698	255	44	17.25	106	41.569	150
		เขียว	25	0.698	0.698-0.893	256	56	21.88	67	26.172	123
		เหลือง	50	0.893	0.893-1.122	253	69	27.27	57	22.530	126
		น้ำเงิน	75	1.122	1.122-2	254	71	27.95	33	12.992	104
	H/L	แดง	0	0.011	0.011-0.047	261	97	37.16	32	12.261	129
		เขียว	25	0.047	0.047-0.084	248	67	27.02	60	24.194	127
		เหลือง	50	0.084	0.084-0.112	252	36	14.29	91	36.111	127
		น้ำเงิน	75	0.112	0.112-0.177	257	40	15.56	80	31.128	120
	ξ	แดง	0	0.712	0.712-1.062	255	11	4.31	140	54.902	151
		เขียว	25	1.062	1.062-1.317	255	39	15.29	74	29.020	113
		เหลือง	50	1.317	1.317-1.681	254	64	25.20	40	15.748	104
		น้ำเงิน	75	1.681	1.681-2.927	254	126	49.61	9	3.543	135
	d/H	แดง	0	0.174	0.174-0.388	255	94	36.86	2	0.784	96
		เขียว	25	0.388	0.388-0.577	254	74	29.13	54	21.260	128
		เหลือง	50	0.577	0.577-0.780	256	30	11.72	103	40.234	133
		น้ำเงิน	75	0.780	0.780-3.050	253	42	16.60	104	41.107	146
ตัวหินเรียง	R/H	แดง	0	0.097	0.097-0.726	250	123	49.200	27	10.800	150
		เขียว	25	0.726	0.726-0.891	250	67	26.800	66	26.400	133
		เหลือง	50	0.891	0.891-1.055	248	62	25.000	77	31.048	139
		น้ำเงิน	75	1.055	1.055-2.019	249	43	17.269	103	41.365	146
	H/L	แดง	0	0.009	0.009-0.043	253	129	50.988	35	13.834	164
		เขียว	25	0.043	0.043-0.075	249	56	22.490	85	34.137	141
		เหลือง	50	0.075	0.075-0.1	265	52	19.623	95	35.849	147
		น้ำเงิน	75	0.100	0.1-0.176	230	58	25.217	58	25.217	116
	ξ	แดง	0	0.638	0.638-1.081	251	55	21.912	95	37.849	150
		เขียว	25	1.081	1.081-1.387	249	44	17.671	85	34.137	129
		เหลือง	50	1.387	1.387-1.750	249	54	21.687	75	30.120	129
		น้ำเงิน	75	1.750	1.750-3.080	248	142	57.258	18	7.258	160
	d/H	แดง	0	0.171	0.171-0.391	253	107	42.292	27	10.672	134
		เขียว	25	0.391	0.391-0.610	251	58	23.108	74	29.482	132
		เหลือง	50	0.610	0.610-0.971	247	48	19.433	89	36.032	137
		น้ำเงิน	75	0.971	0.971-3.245	246	82	33.333	83	33.740	165

การกรองข้อมูลในกรณีที่ข้อมูลไม่เป็นไปตามสมมติฐานหรือโดเมนของสมการ

จากการศึกษาข้อมูลการทดลองพบว่า มีข้อมูลบางส่วนที่ไม่เป็นไปตามสมมติฐานของสมการที่สร้างขึ้นมา กล่าวคือ ข้อมูลที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่สร้างขึ้นมาได้ จึงจำเป็นที่จะต้องกรองข้อมูลจำพวกนี้ออก เพื่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์สมการ ได้แก่

สำหรับสมการรูปแบบที่ 1 (สมการที่ 4.6) อัตราส่วนระหว่าง  $R/H$  และ  $\xi$  ต้องมีค่าไม่เกิน 1 หรือ

$$\frac{R/H}{\xi} \leq 1 \quad (4.10)$$

สำหรับสมการรูปแบบที่ 2 (สมการที่ 4.7) ผลลัพธ์จากการนำอัตราส่วนระหว่าง  $R/H$  และ  $\xi$  มาลบออกจาก 1 ต้องไม่เป็นค่าติดลบ

$$1 - \frac{R/H}{\xi} \geq 0 \quad (4.11)$$

สำหรับสมการรูปแบบที่ 3 (สมการที่ 4.8) และสมการรูปแบบที่ 4 (สมการที่ 4.9) ผลลัพธ์จากการนำค่า  $R/H$  มาลบออกจาก  $\xi$  ต้องไม่เป็นค่าติดลบ

$$\xi - \frac{R}{H} \geq 0 \quad (4.12)$$

การกรองข้อมูลที่ไม่เป็นไปตามสมมติฐานของสมการพบว่า สมมติฐานในสมการที่ 4.10 มีการกรองข้อมูลออกเป็นจำนวน 27 ข้อมูล แบ่งเป็นกรณีผิวชั้นบันได 0 ข้อมูล ผิวฉุทราย 2 ข้อมูล และผิวหินเรียง 25 ข้อมูล จากสมมติฐานในสมการที่ 4.11 มีการกรองข้อมูลออกเป็นจำนวน 28 ข้อมูล แบ่งเป็นกรณีผิวชั้นบันได 2 ข้อมูล ผิวฉุทราย 2 ข้อมูล และผิวหินเรียง 24 ข้อมูล จากสมมติฐานในสมการที่ 4.12 มีการกรองข้อมูลออกเป็นจำนวน 94 ข้อมูล โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มสมการ คือ สมการที่ 4.8 จำนวน 36 ข้อมูล แบ่งเป็นกรณีผิวชั้นบันได 3 ข้อมูล ผิวฉุทราย 13 ข้อมูล และผิวหินเรียง 20 ข้อมูล และสมการที่ 4.9 จำนวน 58 ข้อมูล แบ่งเป็นกรณีผิวชั้นบันได 3 ข้อมูล ผิวฉุทราย 12 ข้อมูล และผิวหินเรียง 43 ข้อมูล



#### 4.2.4 การคัดเลือกสมการ

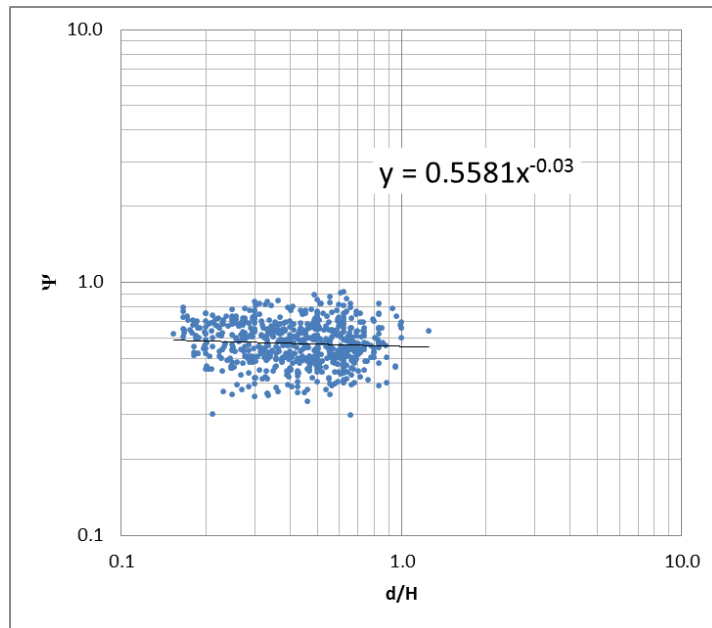
ในการคัดเลือกสมการที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำนายความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ และผิวไม่เรียบนั้น จะพิจารณาจากพารามิเตอร์ 3 ตัวด้วยกัน ได้แก่ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination :  $R^2$ ) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation : S.D.) และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient : C.C.) โดยมีสมการที่พิจารณาทั้งหมด 4 รูปแบบ สำหรับ 3 ชนิดของผิวโครงสร้าง ได้แก่ ผิวขั้นบันได ผิวถูทรายและผิวหินเรียง รวมทั้งหมด 12 กรณี ในการพิจารณาค่า  $R^2$  สมการจะถูกจัดให้อยู่ในรูปของพารามิเตอร์  $\Psi$  กับค่า  $d/H$  กราฟความสัมพันธ์ของทั้ง 12 กรณี แสดงได้ตามรูป ดังนี้

จากรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 จะเห็นได้ว่ากราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการที่ 4.6 นั้นมีการเกาะกลุ่มกันของข้อมูลสูงที่สุด และสมการที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ยังเป็นไปตามสมมติฐานอีกด้วย แม้ว่ารูปที่ 4.3 เส้นแนวโน้มพุ่งขึ้นซึ่งไม่เป็นไปตามสมมติฐานนั้นเพราะในการทดลองผิวหินเรียงสามารถทำการเรียงหินในลักษณะได้ 2 ลักษณะ คือ เรียงให้ผิวหน้าเรียบและเรียงให้ผิวไม่เรียบ ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ ซึ่งในการทดลองได้ทำการเรียงหินในลักษณะผิวหน้าเรียบ ในลักษณะของผิวหน้าเรียบนั้นเปรียบได้กับการใช้ผิวเรียบที่มีรูซึ่งเกิดความเสียหายที่ปลดพลังงานของคลื่นได้น้อยเมื่อเทียบกับผิวหน้าไม่เรียบ ดังจะเห็นได้จากสมการที่แสดงในรูปที่ 4.3 ว่าเมื่อค่า  $d/H$  เพิ่มขึ้นความสูงคลื่นซัดกลับเพิ่ม หมายความว่าเมื่อหินมีขนาดใหญ่ขึ้นการสลายพลังงานของคลื่นกลับลดลง

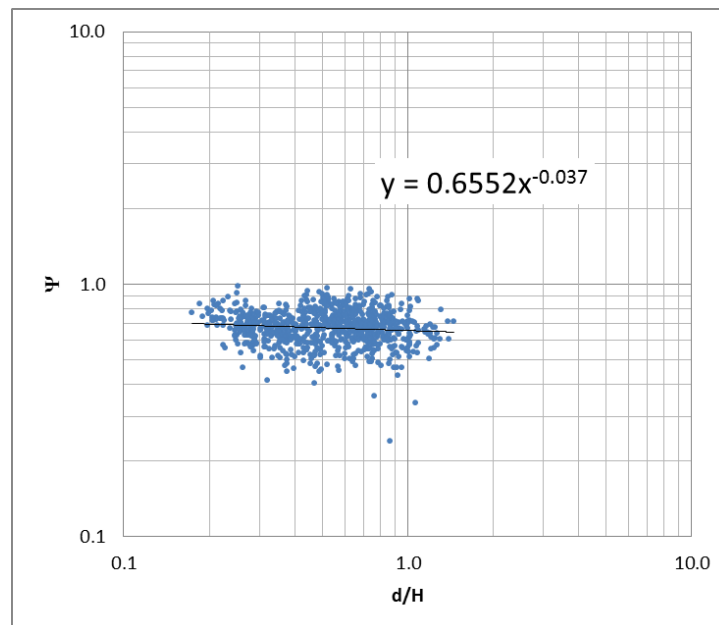
จากรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 จะเห็นได้ว่ากราฟความสัมพันธ์จากสมการที่ 4.7 นั้นมีการเกาะกลุ่มกันดีพอสมควร แต่ในช่วงที่ค่าแกน  $y$  อยู่ระหว่าง 0.1 – 0.2 นั้น ข้อมูลมีการกระจายตัวสูงซึ่งอาจเกิดจากการที่สมการที่ 4.7 นั้น ความสูงคลื่นซัดจะลดลงเป็นส่วนส่วนของกรณีพื้นเรียบนั่นเอง เลขยกกำลังของ  $d/H$  สำหรับสมการรูปแบบที่ 2 ต่างจากรูปแบบที่หนึ่ง กล่าวคือ รูปแบบที่ 1 มักจะเป็นค่าลบ แต่สำหรับรูปแบบที่ 2 จะเป็นค่าบวก เนื่องจากพจน์  $d/H$  จะเป็นพจน์ที่ไปลบออกจากสมการของพื้นเรียบ ดังนั้นเมื่อ  $d/H$  เพิ่มขึ้น ตัวไปลบจะมีมากขึ้นเพิ่มตามไปด้วย

รูปที่ 4.9, 4.10 และ 4.11 แสดงให้เห็นว่ากราฟความสัมพันธ์จากสมการที่ 4.8 นั้น ข้อมูลมีการกระจายตัวสูงในทุกพื้นผิว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีผิวหินเรียงที่ข้อมูลมีความคลาดเคลื่อนมาก โดยมีการกระจายตัวสูงและแถบไม่เกาะกลุ่มกันเลย ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าสมการที่ 4.8 นั้นเป็นสมการเชิงเส้นตรงที่บังคับค่าตัดเกิดเท่ากับ 0 ซึ่งในทางธรรมชาตินั้น ความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวไม่เรียบอาจจะไม่ได้ลดลงจากกรณีพื้นเรียบเป็นเชิงเส้นตรง

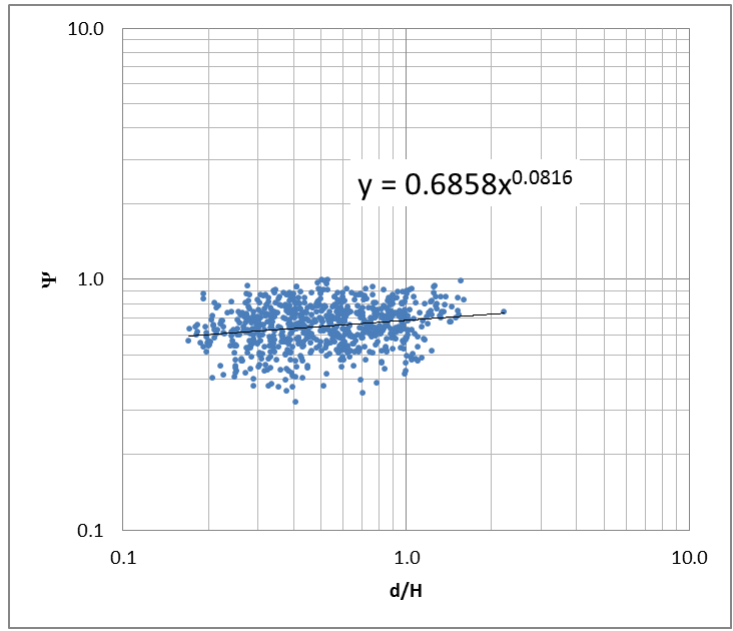
รูปที่ 4.12, 4.13 และ 4.14 แสดงให้เห็นว่ากราฟความสัมพันธ์จากสมการที่ 4.9 พบว่ามีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับกราฟความสัมพันธ์จากสมการที่ 4.8 คือ มีการกระจายตัวของข้อมูลสูง แต่จะมีการเกาะกลุ่มกันของข้อมูลที่ดีกว่านั้น อาจเป็นเพราะว่าสมการที่ 4.6 นั้นมีการเพิ่มฟังก์ชัน  $\tanh$  เข้าไปซึ่งช่วยให้สมการสามารถที่จะอธิบายถึงการลดลงของความสูงคลื่นซัดได้มากขึ้นกว่าสมการที่ 4.8 เพราะฟังก์ชัน  $\tanh$  ได้ที่อธิบายคุณลักษณะของคลื่นได้ดีกว่า



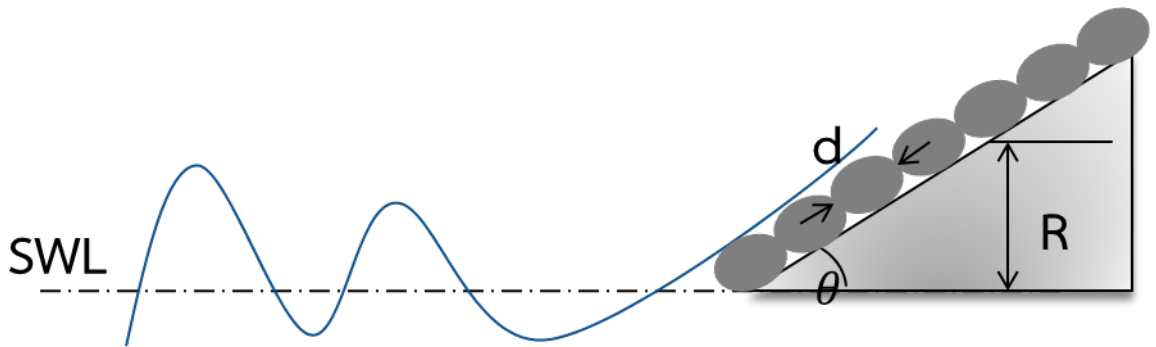
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพัทธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ )  
สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวขรุขระได้จากสมการที่ 4.6



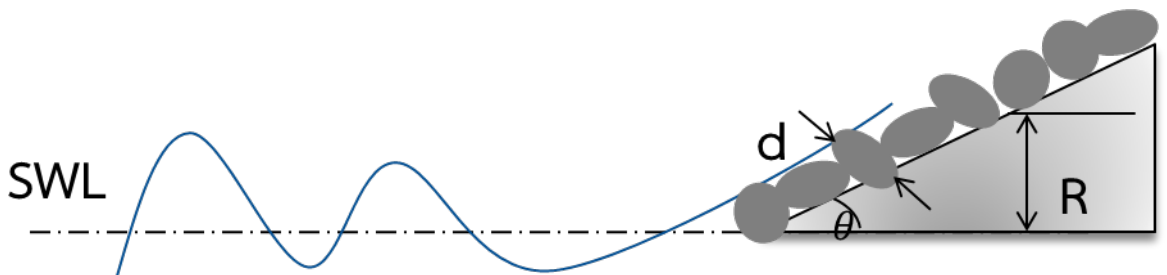
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพัทธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ )  
สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวถูทรายจากสมการที่ 4.6



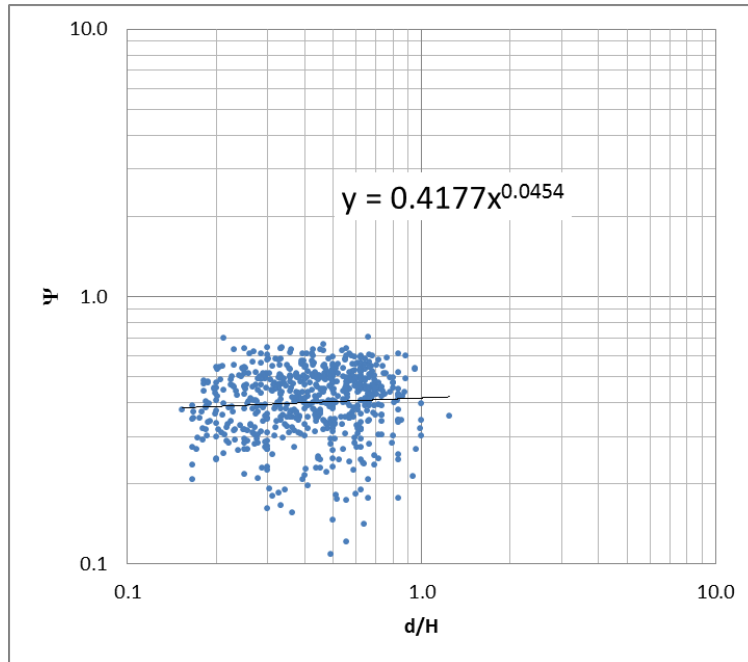
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ )  
สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวหินเรียงจากสมการที่ 4.6



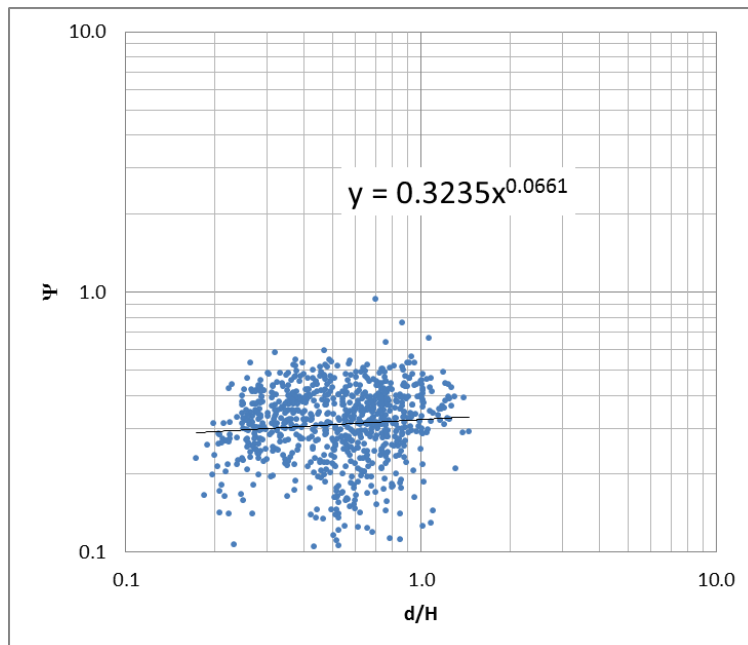
รูปที่ 4.4 การเรียงหินบนผิวพื้นเอียงในลักษณะให้ผิวหน้าเรียบ



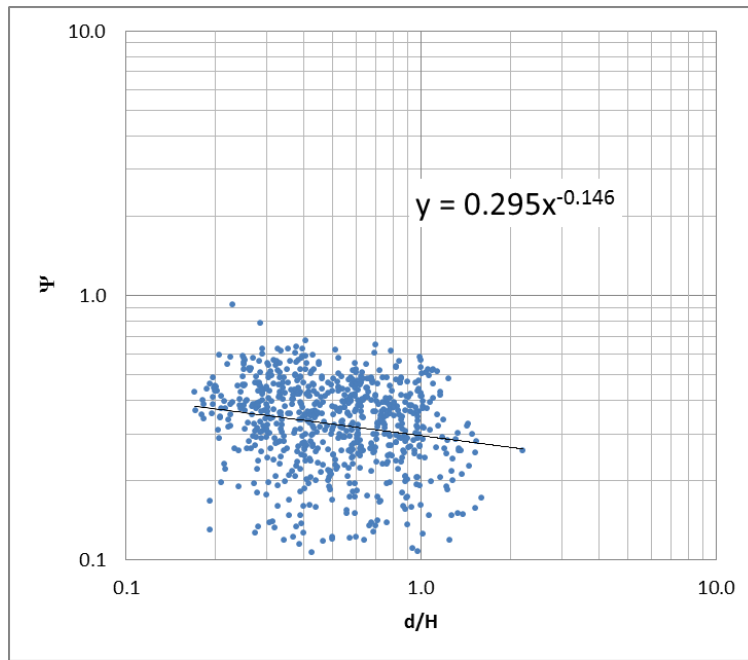
รูปที่ 4.5 การเรียงหินบนผิวพื้นเอียงในลักษณะให้ผิวหน้าไม่เรียบ



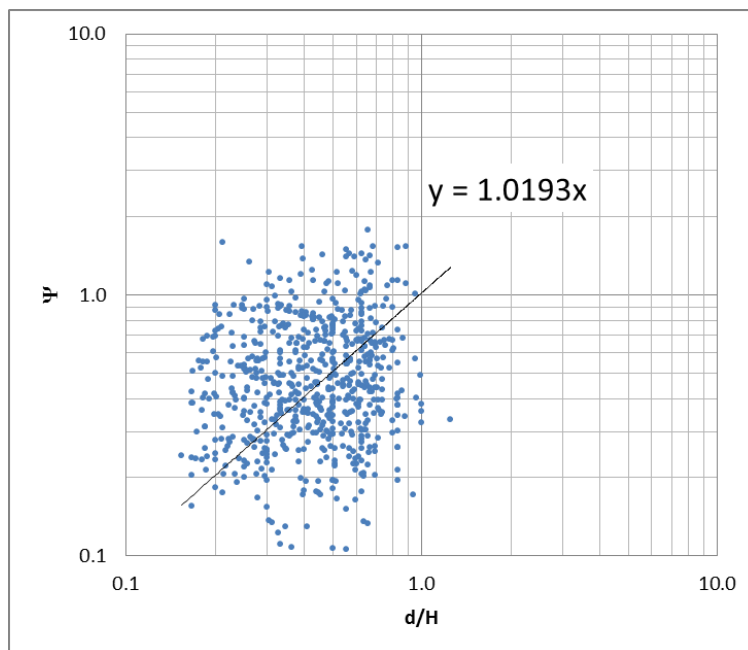
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ )  
สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวขั้นบันไดจากสมการที่ 4.7



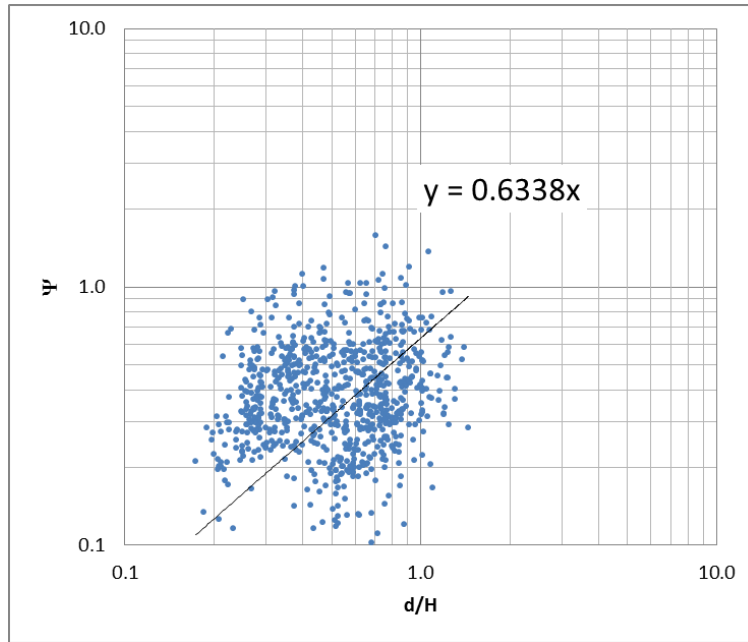
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ )  
สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวถูทรายจากสมการที่ 4.7



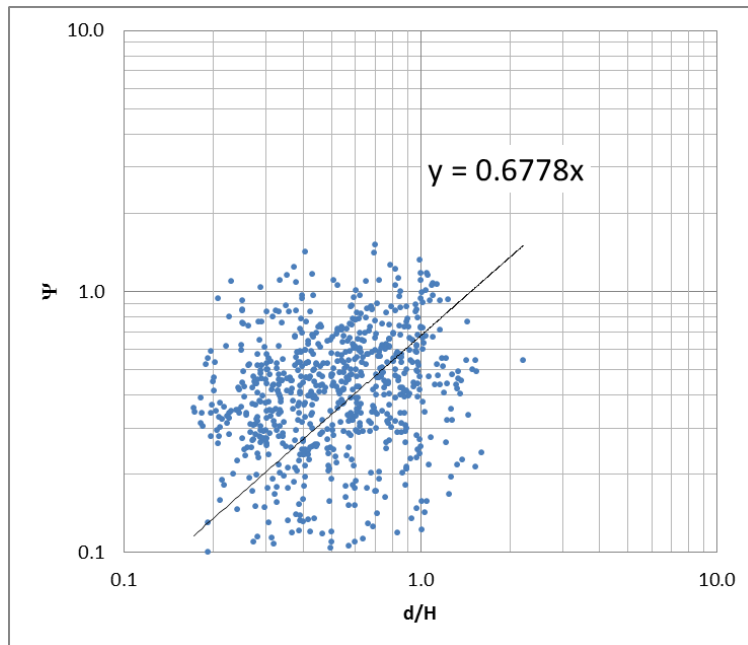
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ ( $d/H$ ) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ ) สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวหินเรียงจากสมการที่ 4.7



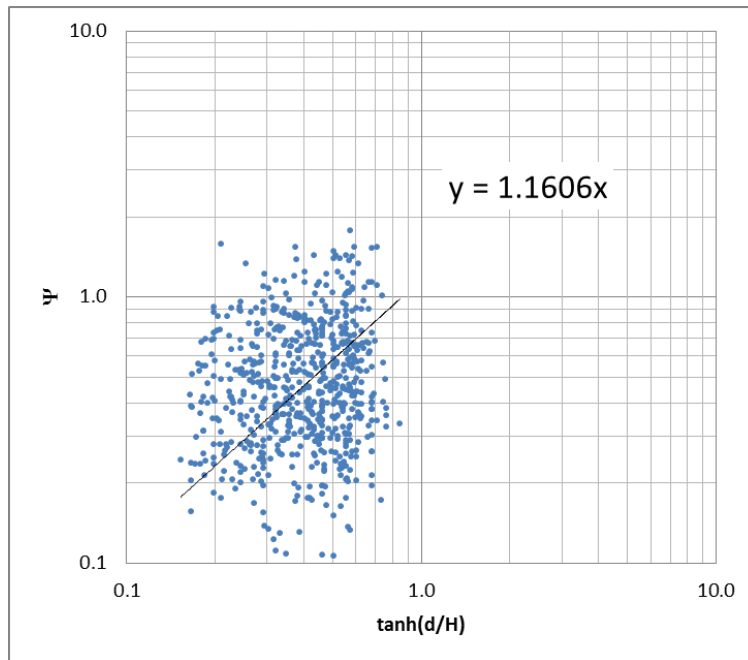
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ ( $d/H$ ) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ ) สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวชั้นบันไดจากสมการที่ 4.8



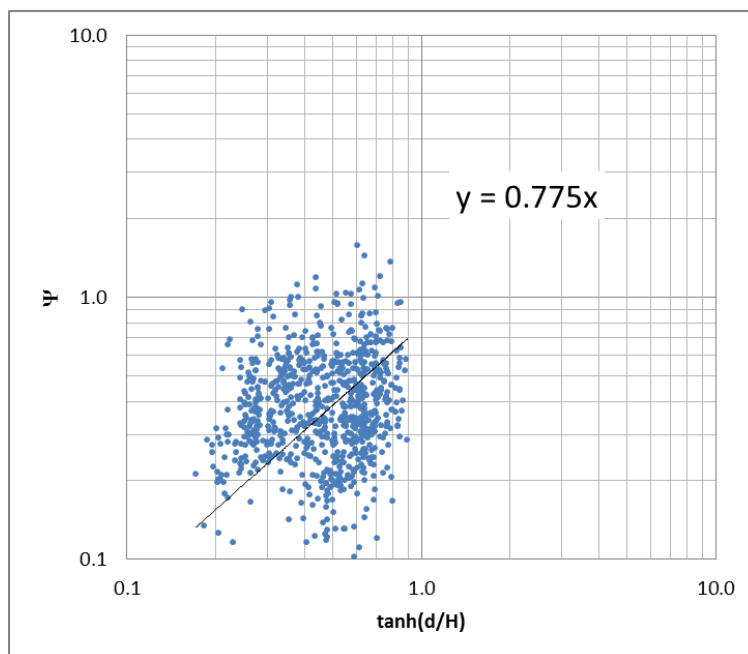
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ ( $d/H$ ) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ ) สำหรับกรณีของพื้นที่เชิงผิวดงทรายจากสมการที่ 4.8



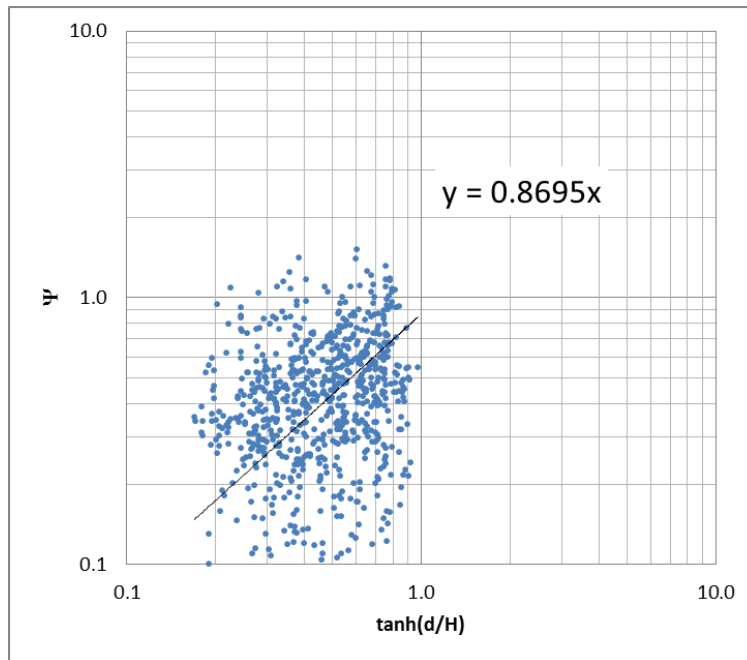
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ ( $d/H$ ) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ ) สำหรับกรณีของพื้นที่เชิงผิวดินเรียงจากสมการที่ 4.8



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ )  
สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวขรุขระได้จากสมการที่ 4.9



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ )  
สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวถูทรายจากสมการที่ 4.9



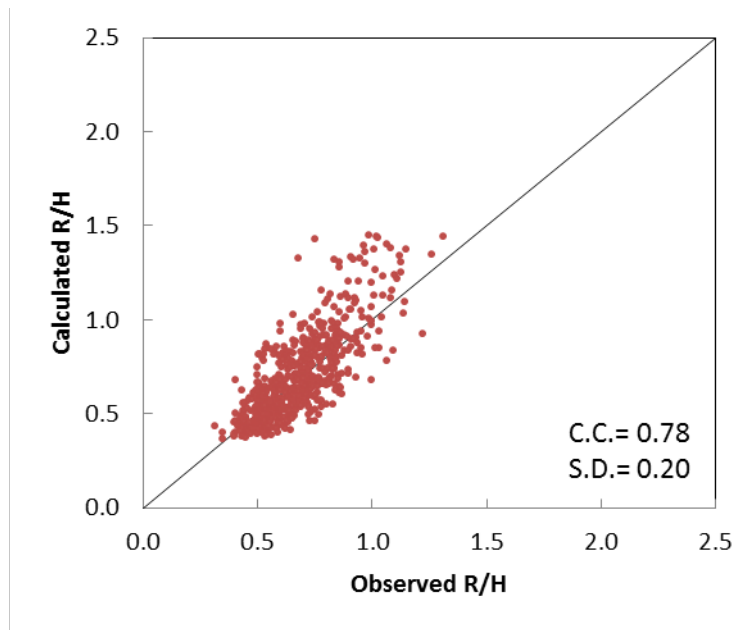
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ( $\Psi$ ) สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวนหินเรียงจากสมการที่ 4.9

จากกราฟความสัมพันธ์ทั้ง 12 กรณีที่ได้กล่าวไปนั้น เห็นได้ชัดว่าสมการที่ 4.8 และ 4.9 นั้น มีการกระจายตัวของข้อมูลที่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับอีก 2 สมการ คือ สมการที่ 4.6 และ 4.7 โดยเมื่อดูโดยภาพรวมแล้วนั้นกราฟความสัมพันธ์จากสมการที่ 4.6 มีการเกาะกลุ่มกันของข้อมูลสูงที่สุด และสมการรูปแบบที่ 1 ตามสมการที่ 4.6 เป็นรูปแบบทั่วไปสำหรับสมการที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงมิติอีกด้วย

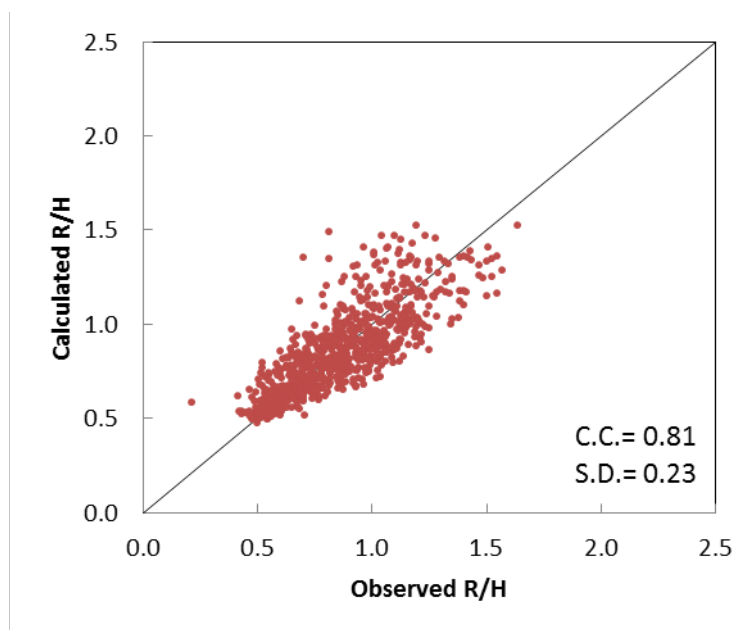
#### 4.2.4 การตรวจสอบความแม่นยำของสมการ

สมการที่ได้ถูกสร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องมีทั้งความแม่นยำและความถูกต้อง การตรวจสอบความแม่นยำของสมการทำได้ พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $R/H$  ที่ได้จากการทดลองและ  $R/H$  ที่ได้จากการทำนายโดยสมการต่างๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าทั้งสอง รวมทั้งเพื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation : S.D.) และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient : C.C.) อีกด้วย ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงความแม่นยำในการทำนายเมื่อเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยกราฟความสัมพันธ์ทั้ง 12 กรณี มีดังนี้

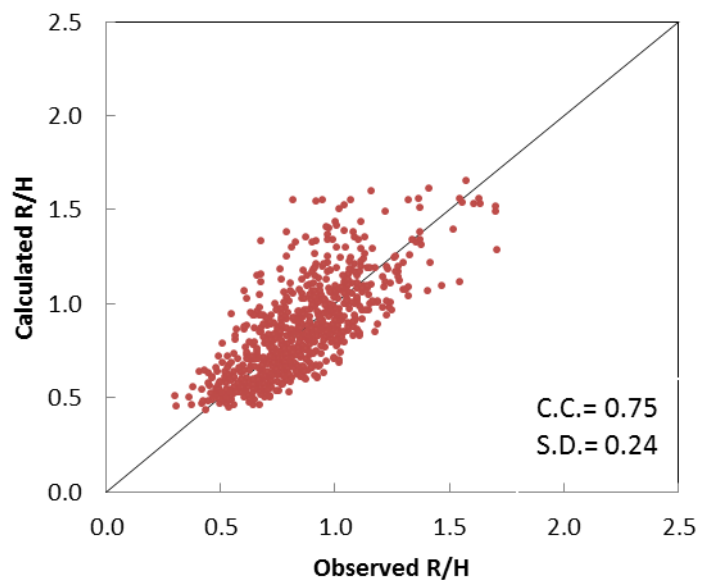




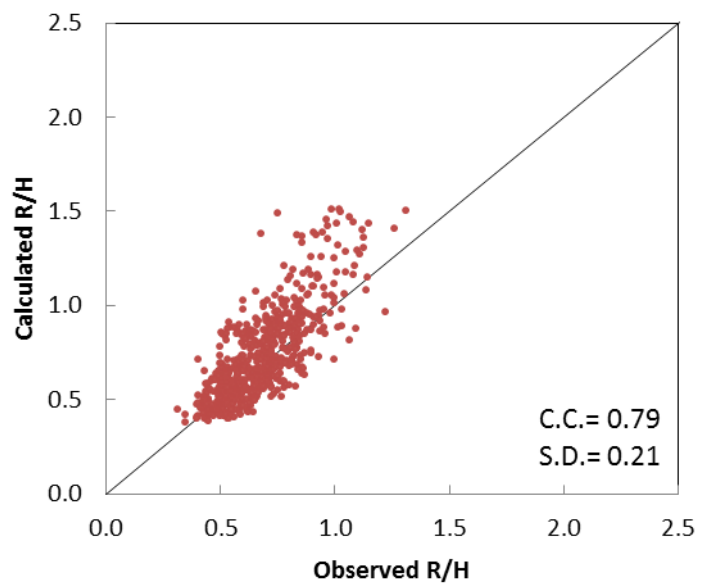
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.6 สำหรับกรณีของพื้นที่เชิงผิวนับบันได



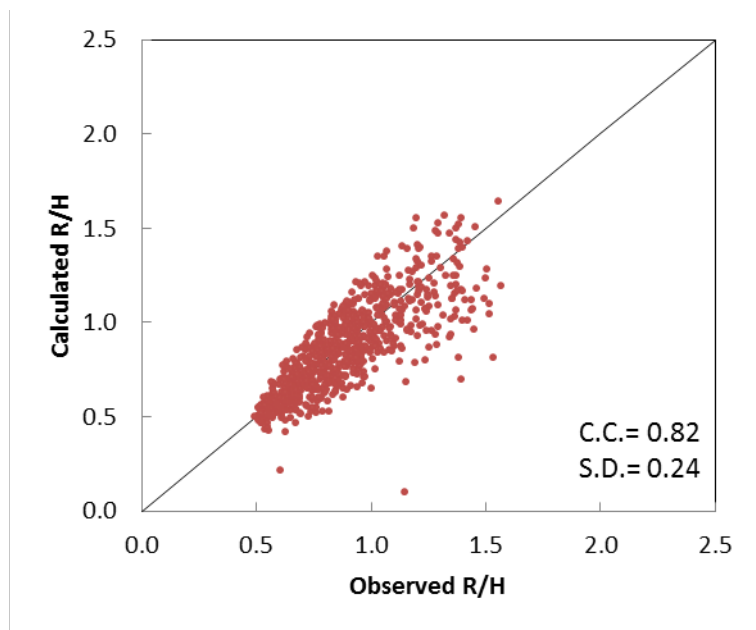
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.6 สำหรับกรณีของพื้นที่เชิงผิวกงทราย



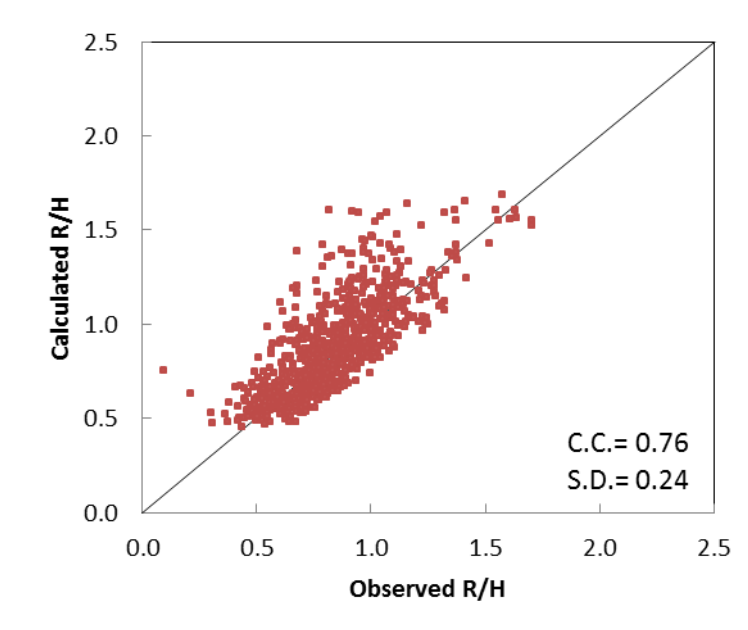
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.6 สำหรับกรณีของพื้นที่เชิงผิวนหินเรียง



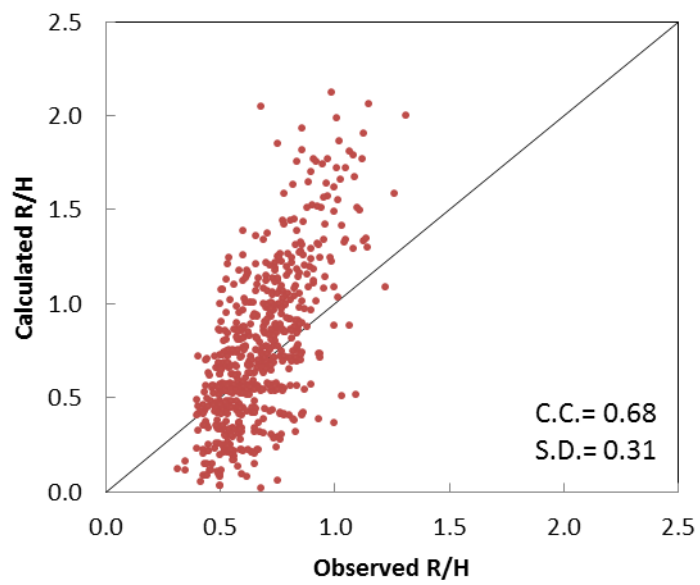
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.7 สำหรับกรณีของพื้นที่เชิงผิวนชั้นบันได



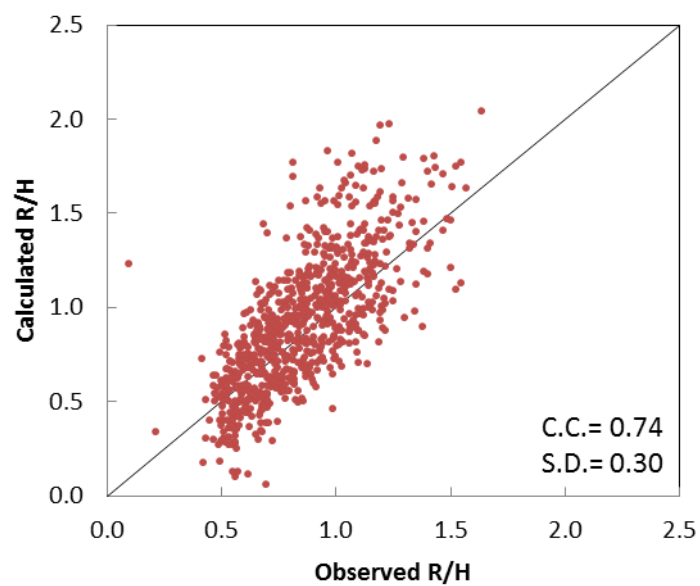
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.7 สำหรับกรณีของพื้นที่ยางพารา



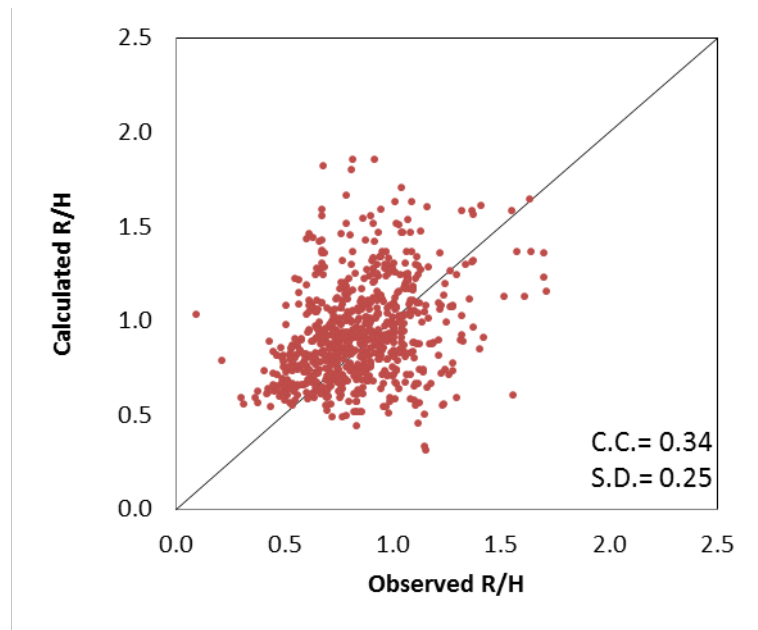
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.7 สำหรับกรณีของพื้นที่ยางพารา



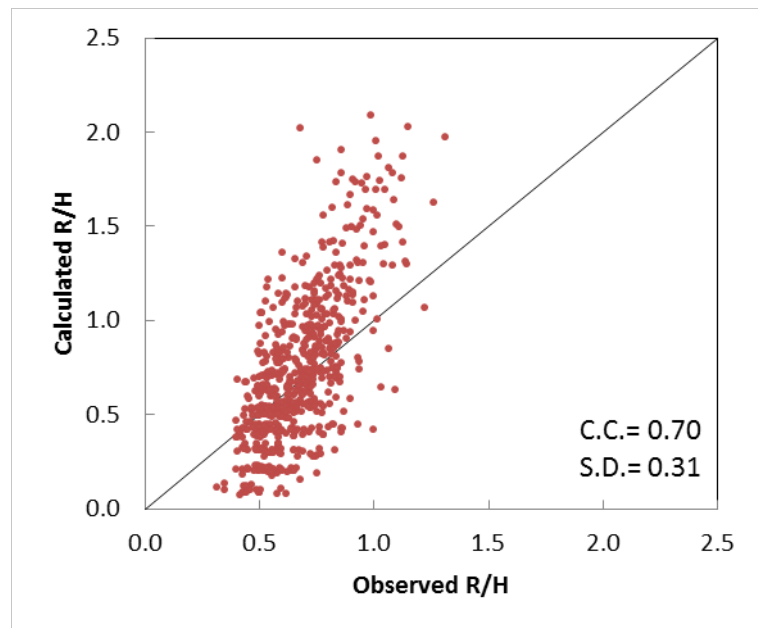
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.8 สำหรับกรณีของพื้นที่เชิงผิวนับบันได



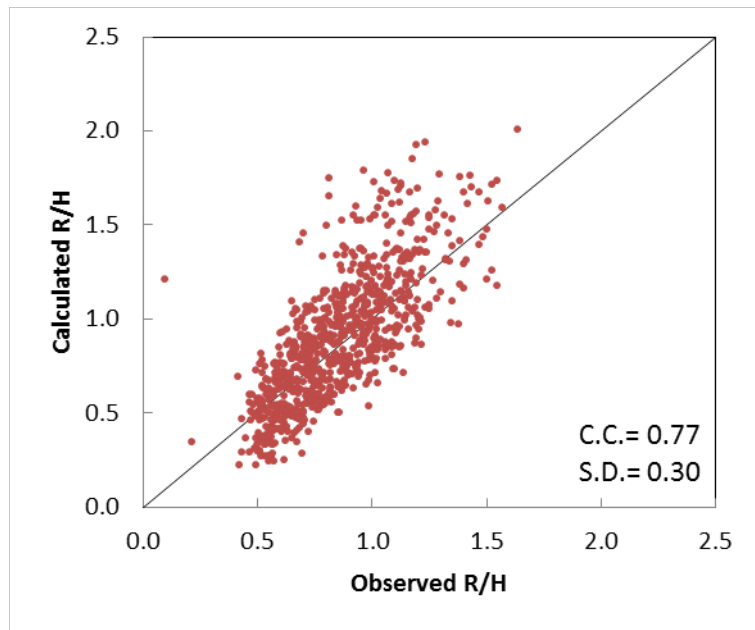
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.8 สำหรับกรณีของพื้นที่เชิงผิวดงทราย



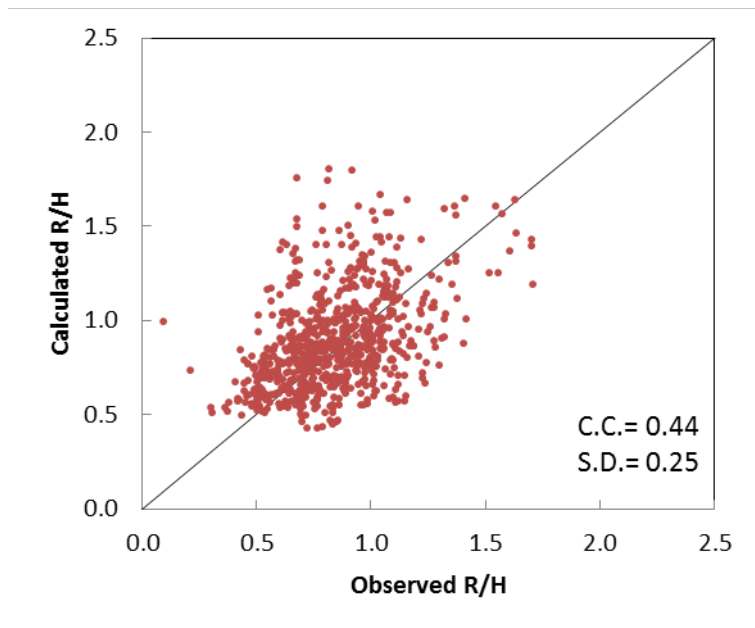
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.8 สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวหินเรียง



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.9 สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวชั้นบันได



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.9 สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวกวู่ทราย



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H ที่ได้จากการทดลองและ R/H ที่ได้จากสมการที่ 4.6 สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวนูนเรียบ

จากรูปที่ 4.15, 4.16 และ 4.17 เป็นกราฟความสัมพันธ์จากสมการที่ 4.6 จะเห็นได้ว่ากลุ่มข้อมูลมีการเกาะกลุ่มกันที่ดีมาก สังเกตได้จากค่า SD = 0.20, 0.23 และ 0.24 ตามลำดับ มีการกระจายของกลุ่มข้อมูลน้อย โดยเฉพาะในกรณีพื้นเอียงผิวชั้นบันไดและผิวถูทราย ส่วนในกรณีพื้นเอียงผิวหินเรียงมีการกระจายตัวมากกว่า ซึ่งแนวโน้มการกระจายตัวจะมากเมื่อค่า R/H มาก

จากรูปที่ 4.18, 4.19 และ 4.20 เป็นกราฟความสัมพันธ์จากสมการที่ 4.7 ซึ่งจะพบว่ามีความคล้ายคลึงกับกราฟความสัมพันธ์จากสมการที่ 4.6 ก่อนหน้านั้นมาก คือ กลุ่มของข้อมูลมีการเกาะกลุ่มกันที่ดี และมีการกระจายตัวน้อย แต่จะมีการกระจายตัวมากขึ้นเมื่อค่า R/H มีค่ามากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากทั้ง 3 รูปว่ามีการกระจายมากที่ส่วนปลายของกลุ่มข้อมูลซึ่งเป็นบริเวณที่ค่า R/H มีค่ามากนั่นเอง

จากรูปที่ 4.21, 4.22 และ 4.23 จะเป็นกราฟความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.8 โดยจะพบว่ากลุ่มข้อมูลมีการกระจายกันมากโดยเฉพาะในกรณีพื้นเอียงผิวชั้นบันไดและผิวหินเรียง ซึ่งในกรณีของพื้นเอียงผิวหินเรียงนั้นแทบมีการเกาะกลุ่มกันรอบเส้นน้อยมาก จะมีการกระจายตัวเป็นกลุ่มในลักษณะวงกลมบริเวณค่า R/H = 0.5-1.0 จะสังเกตได้ดังรูปที่ 4.23 และในกรณีพื้นเอียงผิวถูทรายจะมีการกระจายตัวที่น้อยกว่า

จากรูปที่ 4.24, 4.25 และ 4.26 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์จากสมการที่ 4.9 พบว่ากลุ่มข้อมูลมีการกระจายตัวมากและมีแนวโน้มของการกระจายตัวคล้ายกับกราฟความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.8 ที่ได้กล่าวผ่านมาแล้ว นั่นอาจเพราะว่ารูปแบบของสมการที่ 4.8 และ 4.9 นั้นมีความคล้ายคลึงกันนั่นเองทำให้แนวโน้มของผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก

จากภาพรวมของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า R/H จากการทดลองกับค่า R/H จากสมการทั้ง 12 กรณี พบว่ากราฟความสัมพันธ์ที่มีแนวโน้มดีที่สุด 2 อันดับแรก คือ กราฟความสัมพันธ์จากสมการที่ 4.6 และ 4.7 ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination :  $R^2$ ) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation : S.D.) และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient : C.C.) ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณาความแม่นยำของทั้งสมการที่ 4.6 และ 4.7

สมการ	ชนิดของพื้นเอียง	พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณา		
		$R^2$	S.D.	C.C.
$\frac{R}{H} = a\xi\left(\frac{d}{H}\right)^b$	ชั้นบันได	0.0043	0.20	0.78
	ถูทราย	0.0106	0.23	0.81
	หินเรียง	0.0411	0.24	0.75
$\frac{R}{H} = \xi\left[1 - a\left(\frac{d}{H}\right)^b\right]$	ชั้นบันได	0.0043	0.21	0.79
	ถูทราย	0.0079	0.24	0.82
	หินเรียง	0.0358	0.24	0.76

จากตารางที่ 4.11 จะเห็นว่าในสมการที่ 4.6 ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (C.C.) ของทั้ง 3 พิกัดการทดลอง มีค่าอยู่ระหว่าง 0.75 – 0.81 ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแม่นยำของสมการเมื่อเปรียบเทียบกับค่าซึ่งได้จากการทดลอง และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.20 – 0.24 ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของผลจากสมการ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ 4.7 ที่มีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (C.C.) ของทั้ง 3 พิกัดการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 0.76 – 0.82 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.21 – 0.24 นั้นพบว่ามีคุณภาพใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อพิจารณาถึงสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ซึ่งบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมการกับข้อมูลการทดลองพบว่าค่าจากสมการที่ 4.6 มีแนวโน้มที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ 4.7 ดังนั้น การศึกษาจึงเสนอสมการรูปแบบที่ 1 หรือ สมการที่ 4.6 สำหรับสมการความสูงคลื่นระดับบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวไม่เรียบ โดยมีค่าแนะนำสำหรับพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 สมการความสูงคลื่นระดับบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวไม่เรียบและพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์

สมการ	ชนิดของพื้นเอียง	$a$	$b$
$\frac{R}{H} = a\xi \left(\frac{d}{H}\right)^b$	ขั้นบันได	0.56	-0.03
	ถูทราย	0.66	-0.04
	หินเรียง	0.69	0.08

จากการทดลองพบว่าพจน์ของความขรุขระสัมพันธ์ที่เป็นตัวลดทอนความสูงคลื่น  $a(d/H)^b$  นั้น มีค่าอยู่ระหว่าง 0.55 – 0.59 สำหรับกรณีพื้นเอียงผิวขั้นบันได, 0.65 – 0.71 สำหรับกรณีพื้นเอียงผิวถูทราย 0.59 – 0.73 สำหรับกรณีพื้นเอียงผิวหินเรียง ซึ่งหมายความว่า ความสูงคลื่นระดับบนพื้นเอียงผิวไม่เรียบสามารถมีค่าประมาณ 55 – 73 เปอร์เซ็นต์ ของความสูงคลื่นในกรณีพื้นเอียงผิวเรียบนั่นเอง



## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา

#### 5.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นระดับบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวไม่เรียบ และสร้างสมการเชิงประสพการณ์ในการทำนายความสูงคลื่นระดับดังกล่าว โดยสมการต้องพิจารณาความสูงขรุขระของวัสดุผิวของโครงสร้างพื้นเอียงด้วย โครงสร้างพื้นเอียงแบบผิวไม่เรียบที่สนใจในการศึกษานี้มีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด ได้แก่ แบบหินเรียง แบบชั้นบันได และแบบถุทราย ข้อมูลแบบชั้นบันได และแบบถุทราย เป็นข้อมูลที่มีอยู่แล้วโดยโครงการวิจัยที่ผ่านมา สำหรับกรณีโครงสร้างแบบหินเรียง มีการทำการทดลองเพิ่มเติมในส่วนนี้

การทดลองความสูงคลื่นระดับบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบหินเรียงถูกดำเนินการในรางจำลองคลื่นความยาว 16 เมตร ความกว้าง 0.6 เมตร และความลึก 0.8 เมตร คลื่นที่ใช้ในการทดลองถูกสร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นแบบสม่ำเสมอ ที่สร้างคลื่นด้วยความถี่ 0.83, 1.00, 1.17, 1.33, 1.50 และ 1.67 เฮิรตซ์ ระยะคันชักข้อเหวี่ยงของใบพัดคลื่น 80, 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 มิลลิเมตร การตั้งความถี่ของคลื่นและระยะคันชักข้อเหวี่ยงของใบพัดคลื่นเช่นนี้ทำให้ได้คลื่นที่มีความชันของคลื่น ครอบคลุมระหว่าง 0.01 ถึง 0.15 ระดับความลึกของน้ำคงที่ตลอดหน้าตัดที่ 35 เซนติเมตร ทำการทดสอบที่มุมลาดเอียง 15.0, 17.5, 20.0, 22.5 และ 25.0 องศา หินเรียงทำมาจากหินก่อสร้าง ซึ่งมีขนาดประมาณ 20, 30, 40 และ 50 มิลลิเมตร

ผลการศึกษา พบว่า ความสูงคลื่นระดับสัมพันธ์กับความลาดชันของโครงสร้าง ความชันของคลื่น และความสูงขรุขระสัมพันธ์ชัดเจนมาก ความสูงคลื่นระดับจะมีค่าลดลง เมื่อความลาดชันของโครงสร้างลดลง หรือความชันของคลื่นเพิ่มขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า โครงสร้างที่มีความลาดชันน้อยสามารถสลายพลังงานได้มากกว่า และทำให้ความสูงคลื่นระดับลดลง และคลื่นที่มีความชันของคลื่นมากหรือคลื่นสั้นจะแตกตัวและสลายพลังงานมากกว่าคลื่นที่มีความชันของคลื่นน้อยหรือคลื่นยาว ทำให้ในกรณีของคลื่นสั้น ความสูงคลื่นระดับลดลง

สำหรับอิทธิพลของความสูงขรุขระสัมพันธ์นั้น การศึกษานี้ได้ใช้ขนาดตัวแทนของวัสดุผิวแทนการหาความสูงขรุขระโดยตรง เนื่องจากในความเป็นจริง เป็นเรื่องยากที่เราจะวัดความสูงขรุขระจริงของโครงสร้าง ดังนั้นการใช้ขนาดตัวแทนของวัสดุผิวเป็นเรื่องที่สะดวกกว่ามาก ความสูงขรุขระสัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเสียหายของผิวโครงสร้างเพิ่มขึ้น คลื่นถูกสลายพลังงานได้มากขึ้น และความสูงคลื่นระดับจึงลดลงตาม ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นทั้งกรณีของพื้นเอียงแบบถุทรายและแบบชั้นบันได แต่สำหรับกรณีของหินเรียง เนื่องจากการศึกษานี้ได้มีการเรียงหินให้มีลักษณะเรียบ ขนาดตัวแทนของวัสดุผิวจึงไม่สะท้อนความสูงขรุขระโดยตรง ในทางกลับกันวัสดุที่มีขนาดตัวแทนใหญ่กว่า เมื่อเรียงกันแล้วจะมีความพรุนน้อย

กว่ากรณีของวัสดุที่มีขนาดตัวแทนเล็กกว่า ความพรุนที่น้อยกว่าทำให้การสลายพลังงานเกิดขึ้นน้อย และผลที่ตามมาคือความสูงคลื่นซัดมีค่าสูงกว่ากรณีของวัสดุที่มีขนาดตัวแทนเล็กกว่า

การศึกษาได้นำเสนอสมการเชิงประสพการณ์ที่มีพจน์ของความลาดชันของโครงสร้าง ความชันของคลื่น และเพิ่มพจน์ของความสูงขรุขระสัมพันธ์เข้าไปในสมการ โดยพิจารณารูปแบบของสมการจำนวน 4 รูปแบบ พบว่า สมการรูปแบบที่ 1 ซึ่งเป็นสมการเลขยกกำลังของตัวแปรแต่ละตัว ให้ความแม่นยำมากที่สุด สมการรูปแบบนี้เป็นรูปแบบที่ใช้มากในงานชลศาสตร์ทั่วไป จึงเป็นที่คุ้นเคย เรียบง่าย และมีความแม่นยำที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม สมการมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถใช้ร่วมกับกรณีของพื้นเรียบได้ ในกรณีของพื้นเรียบจำเป็นต้องใช้สมการรูปแบบเดิมที่มีอยู่ การศึกษานี้ยังได้สรุปค่าแนะนำของพารามิเตอร์เชิงประสพการณ์สำหรับทั้งโครงสร้างพื้นเอียงทั้งสามแบบด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

การศึกษานี้มีข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในอนาคต ดังต่อไปนี้

(1) ควรมีการศึกษาปัจจัยเรื่องของการจัดเรียงวัสดุผิว ว่า มีผลต่อความสูงคลื่นซัดอย่างไร เช่น การจัดเรียงวัสดุผิวให้มีลักษณะเรียบ การจัดเรียงวัสดุผิวให้มีลักษณะไม่เรียบ และการจัดเรียงวัสดุผิวแบบสุ่ม เป็นต้น

(2) ควรมีการทำการศึกษาภาคสนาม ตรวจสอบวัดคลื่นเข้ากระทบและความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างในพื้นที่จริง แล้วนำข้อมูลภาคสนามมาตรวจสอบความถูกต้องของสมการเชิงประสพการณ์ที่ได้ต่อไป

## บรรณานุกรม

- ธรรมนุญ รัศมีมาสเมือง. (2554). สมการเชิงประสพการณ์อย่างง่ายสำหรับหาความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวเรียบและผิวหยาบ. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16* (จำนวน 11 หน้า).
- ธรรมนุญ รัศมีมาสเมือง, เอกพล คำชมภู และภาณุ แสงเพชร. (2553). ความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวขรุขระ. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15* (จำนวน 6 หน้า).
- Ahrens, J. P. (1979). Irregular Wave Runup. In *Proceedings of the Conference on Coastal Structures 79<sup>th</sup>* (pp. 998-1019). American Society of Civil Engineers.
- Ahrens, J. P. (1981). *Irregular Wave Runup on Smooth Slopes*. Virginia: Department of the Army Coastal Engineering Research Center Kingman Building.
- Ahrens, J.P., & Seelig, W.N. (1996). Wave Runup on Beaches. In *Proceeding of the 25<sup>th</sup> Coastal Engineering Conference* (pp. 981-993). American Society of Civil Engineers.
- Battjes, J.A. (1974). *Computations of Set-Up, Longshore Currents, Run-Up and Overtopping due to Wind-Generated Waves. Report No. 74-2*. Communications on Hydraulics, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology.
- Battjes, J.A., & Roos, A. (1975). *Characteristics of Flow in Run-up of Periodic Waves. Report No. 75-3i*. Communications on Hydraulics, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology.
- CIRIA/CUR. (1991). *Manual on the Use of Rock in Coastal and Shoreline Engineering*. London: Construction Industry Research and Information Association.
- David, A.L., Andre, S., & Ann, R.S. (1992). *Automated Coastal Engineering System*. Mississippi: Department of Army, Waterways Experiment Station.
- Douglass, S.L. (1990). *Estimating Runup on Beaches: A Review of the State of the Art*. Vicksburg, MS: U.S. Army, Waterways Experiment Station.
- Fuhrboter, A., Sparboom, U., & Witte, H. H. (1989). Hannover Large Wave Flume: Experimental Results Regarding Wave Runup on Smooth and Rough Dike Banks with 1:6 Slope. *Die Kiiste* (pp. 155-195). Germany: Heft

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- Granthem, K.N. (1953). Wave Run-up on Sloping Structures. *American Geophysical Union*, 34(5).
- GUNT (2001a). *Instruction Manual HM161 Large Flow Channel*. Germany: G.U.N.T. Gerätebau GmbH.
- GUNT (2001b). *Instruction Manual HM161.41 Wave Generator Flap-Type*. Germany: G.U.N.T. Gerätebau Gerätebau GmbH.
- GUNT (2001c). *Technical Information HM161.74 Paddle and Blocking Plate*. Germany: G.U.N.T. Gerätebau Gerätebau GmbH.
- Hedges, T.S., & Mase, H. (2004). Modified Hunt's Equation Incorporating Wave Setup. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers*, 130(3), 109-113.
- Holman, R.A. (1986). Extreme Value Statistics for Wave Run-Up on a Natural Beach. *Coastal Engineering*, 9(6), 527-544.
- Hunt, I.A. (1959). Design of Seawalls and Breakwaters. *Journal of Waterways and Harbours Division, American Society of Civil Engineers*, 85, 123-152.
- Iribarren, C.R. & Nogales, C. (1947). Protection of Ports, Section II, Communication 4, Ocean Navigation. In *Association of Navigation 17<sup>th</sup> Congress*. Lisbon.
- Janaka, J.W. (2008). Wave run-up and overtopping over smooth and rock slopes of coastal structures without crown walls. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, 36(2), 157-164.
- Kamphuis, J.W., & Mohamed, N. (1978). Runup on Irregular Waves on Plane, Smooth Slope. *Journal of the Waterway, Port, Coastal, and Ocean Division*, 104(WW2).
- Mase, H. (1989). Random Wave Runup Height on Gentle Slope. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers*, 115, 649-661.
- Miche, M. (1944). Undulatory Movements of the Sea. *Annals des Ponts et Chaussees*, 114e Annee.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- Miche, M. (1951). The Reflection Power of Maritime Works Exposed to Action of the Swell. *Annals des Ponts et Chaussees, 121e Annee*, 285-319.
- Na, S.J., Do, K.D., & Suh, K.-D. (2011). Forecast of wave run-up on coastal structure using offshore wave forecast data. *Coastal Engineering, 58*, 739-748.
- Neelamani, S., & Sandhya, N. (2004). Wave reflection, run-up, run-down and pressures on plane, dentated and serrated seawalls. *Coastal Engineering Journal, 46(2)*, 141-169.
- Nielsen, P. & Hanslow, D.J. (1991). Wave Runup Distribution on Natural Beaches. *Journal of Coastal Research, 7*, 1139-1152.
- Owen, M.W. (1980). *Design of seawalls allowing for wave overtopping. Report No. 924.* Wallingford, UK: Hydraulics Research Station.
- Roos, A., & Battjes, J.A. (1976). Characteristics of flow in runup from periodic waves. In *Proceedings 15<sup>th</sup> International Conference Coastal Engineering* (pp.781-795). Hawaii
- Ruggiero, P., Komar, P.D., McDougal, W.G., Marra, J.J., & Beach, R.A. (2001). Wave Runup, Extreme Water Levels and the Erosion of Properties Backing Beaches. *Journal of Geophysical Research, 17*, 407-419.
- Saville, T., Jr. (1956). Wave Runup on Shore Structures. *Journal of the Waterways and Harbors Division, American Society of Civil Engineers, 82(WW2)*, 925.
- Shankar, N.J., & Jayaratne, M.P.R. (2003). Wave run-up and overtopping on smooth and rough slopes of coastal structures. *Ocean Engineering, 30*, 221-238.
- Swenson, M. (n.d.). *Bluff recession and Wave Impact Height Along the Wisconsin Shoreline of Lake Superior*. Retrieved from <http://homepages.cae.wisc.edu/~chinwu/GLE401/web/Mike/Wave%20runup.htm>
- Technical Advisory Committee on Flood Defence (TAW). (2002). *Technical Report: Wave run-up and wave overtopping at dikes*. Netherlands: Delft.
- U.S. Army Coastal Engineering Research Center. (1984). *Shore Protection Manual (Vol. 2)*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- U.S. Army Corps of Engineers. (2002). Coastal Engineering Manual. *Engineer Manual* (Vol. 6) 1110-2-1100. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers.
- Van der Meer, J.W. (1996). Conceptual design of rubble mound breakwaters, In: Ed. (Philip L.-F. Liu) *Advances in Coastal and Ocean Engineering*, 1, 221-315.
- Van der Meer, J.W., & Stam, C.J.M. (1992). Wave run-up on smooth and rock slopes of coastal structures. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 118(5), 534-550.
- Van Hijum, E., & Pilarczyk, K.W. (1982). Gravel Beaches: Equilibrium Profile and Longshore Transport of coarse Material under Regular and Irregular Wave Attack. *Delft Hydraulic Laboratory Pub. (No. 272)*. Netherlands: Delft.
- Van Oorschot, J.H., & D'Angeremond, K. (1968). The Effect of Wave Energy Spectra on Wave Runup. In *Proceedings of the 11<sup>th</sup> Conference on Coastal Engineering* (pp. 888-900). American Society of Civil Engineers.
- Ward, D.L. & Ahrens, J.P. (1992). *Laboratory Study of a Dynamic Berm Revetment. Technical Report CERC-92-1*. Vicksburg, MS: U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station

## ภาคผนวก ก ผลผลิต (Output)

บทความวิจัยในการประชุมวิชาการระดับชาติ จำนวน 1 เรื่อง

ณัฐพงษ์ ลิ้มกุล, ฝากฝัน ชัยงาม, วณิชย์ ชื่นใจ และธรรมนุญ รัศมีมาสเมือง. สมการเชิง  
ประสพการณ์สำหรับหาความสูงคลื่นชดบนกำแพงกันคลื่นริมฝั่งแบบหินเรียง. เอกสารการ  
ประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ ๑๙, ๑๔-๑๖ พฤษภาคม ๒๕๕๗, จังหวัด  
ขอนแก่น. หน้า ๒๗๒๐-๒๗๒๔.

บทความวิจัยที่คาดว่าจะตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติหรือวารสารวิชาการระดับนานาชาติ  
เรื่อง

สมการเชิงประสพการณ์สำหรับหาความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวไม่เรียบ



## สมการเชิงประสพการณ์สำหรับหา ความสูงคลื่นซัดบนกำแพงกันคลื่นริมฝั่งแบบหินเรียง

### An empirical formula for wave run-up on rock revetments

ณัฐพงษ์ ลิ้มกุล<sup>1</sup> ผดุงสัน ชันงาม<sup>2</sup> วณิชย์ ชื่นใจ<sup>3</sup> และ ชรรมนุญ รัตมีมาสเมือง<sup>4\*</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทดลองความสูงคลื่นซัดของคลื่นสม่ำเสมอบนโครงสร้างหินเรียงที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ ที่ความลาดชัน 15, 17.5, 20, 22.5 และ 25 องศา ในรางจำลองคลื่นยาว 16 เมตร กว้าง 60 เซนติเมตร ลึก 80 เซนติเมตร มีความลึกของน้ำ 35 เซนติเมตร ผิวของหินเรียงถูกเรียงด้วยหินขนาด 2, 3, 4 และ 5 เซนติเมตร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความขรุขระของหินเรียงมีผลต่อความสูงคลื่นซัด ทำให้ความสูงคลื่นซัดลดลงเมื่อเทียบกับกรณีพื้นผิวเรียบ สมการเชิงประสพการณ์อย่างง่ายที่คำนึงถึงค่าความสูงขรุขระของผิวหินเรียงถูกนำเสนอเพื่อใช้ในการคำนวณหาความสูงคลื่นซัดด้วย

คำสำคัญ: ความสูงคลื่นซัด, กำแพงกันคลื่นริมฝั่งแบบหินเรียง, พารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัว, ความขรุขระสัมพัทธ์

#### Abstract

This article presents experiments on regular wave run-ups on impermeable rock slopes, of which the gradient was defined at 15, 17.5, 20, 22.5 and 25 degree. The experiments were conducted in a wave flume of 16 m long, 60 cm wide and 80 cm deep, with the uniform water depth of 35 cm. The surfaces of slopes were paved with rocks of which the representative sizes of 2, 3, 4 and 5 cm. The study results show that the roughness of the surface slope causes the wave run-up to decrease in comparison with the case of the wave run-up on the smooth slopes. A simple empirical formula accounting for the roughness of the slope surface was proposed for computing the wave run-up.

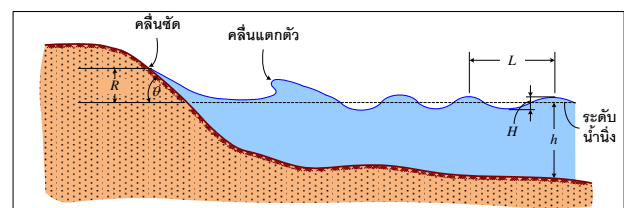
\* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

E-mail address: thamnoonr@buu.ac.th

Keywords: wave run-up, rock revetment, surf similarity parameter, relative roughness

#### 1. คำนำ

ความสูงคลื่นซัด (wave run-up:  $R$ ) คือ ระยะในแนวตั้งจากระดับน้ำนิ่ง (stilling water level) ถึงจุดสูงสุดที่คลื่นซัดขึ้นไปบนชายหาดหรือโครงสร้างชายฝั่งทะเล เช่น กำแพงกันคลื่นริมฝั่ง (revetments) หรือเขื่อนกันคลื่น (breakwaters) เป็นต้น (ดูรูปที่ 1 ประกอบ) คลื่นซัดนี้เกิดจากการที่คลื่นเคลื่อนที่จากน้ำลึกเข้าสู่แผ่นดิน คลื่นมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ความสูงคลื่นเพิ่มขึ้นจนถึงจุดจำกัดจุดหนึ่ง คลื่นจะแตกตัวและคลายพลังงานออกมา พลังงานส่วนที่เหลือจะแปลงเป็นพลังงานศักย์ในรูปของความสูงคลื่นซัด [1,2] ความสูงคลื่นซัดเป็นตัวแปรที่สำคัญในงานด้านวิศวกรรมชายฝั่งทะเล เช่น เป็นตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบความสูงของโครงสร้างชายฝั่งทะเล [3] และตัวกำหนดขอบเขตสูงสุดที่พลังงานคลื่นกระทำชายฝั่ง ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของตะกอนชายฝั่งทะเลและส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงธรณีสัณฐานของชายฝั่งทะเล – การกัดเซาะหรือการก่อกำเนิดของชายฝั่งทะเล [4] นอกจากนี้ความสูงคลื่นซัดยังเป็นตัวกำหนดขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมเนื่องจากคลื่นพายุซัดฝั่งและคลื่นสึนามิอีกด้วย ดังนั้น การพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดที่แม่นยำจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการจัดการพื้นที่ชายฝั่งทะเลและการเตือนภัยพิบัติบริเวณชายฝั่งทะเล [5]



รูปที่ 1 รูปแสดงนิยามความสูงคลื่นซัด



การศึกษาเรื่องความสูงคลื่นชั้บนโครงสร้างลาดเอียงส่วนใหญ่มักเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดลองในรางจำลองคลื่นและแบบจำลองโครงสร้างลาดเอียง Hunt [1] ได้ทำการทดลองความสูงคลื่นชั้ของคลื่นแบบสม่ำเสมอ (regular waves) บนโครงสร้างลาดเอียงผิวเรียบน้ำซึมผ่านไม่ได้ และนำผลการทดลองมาสร้างเป็นสมการเชิงประสพการณ์เพื่อคำนวณหาความสูงคลื่นชั้ สมการของ Hunt ทำนายความสูงคลื่นชั้สัมพันธ์กับความสูงคลื่นน้ำลึก ( $R/H_0$ ) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงของการแตกตัว ( $\xi = \tan \theta / \sqrt{H_0/L_0}$ ) Battjes and Roos [6] ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการที่คล้ายกับการศึกษาของ [1] และได้รับผลการทดลองที่สอดคล้องกับ [1] Huges and Mase [7] นำเสนอการปรับปรุงสมการของ Hunt ด้วยการพิจารณาผลกระทบเนื่องจากการยกตัวของคลื่น (wave setup) บริเวณหน้าโครงสร้างลาดเอียงซึ่งเป็นผลเนื่องจากการเคลื่อนแตกตัว นอกเหนือจากการศึกษาด้วยคลื่นแบบสม่ำเสมอแล้ว ยังมีการศึกษาจำนวนมากที่สนใจความสูงคลื่นชั้ของคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอบนพื้นเอียงผิวเรียบ เช่น การศึกษาของ [8] และ [3] เป็นต้น Ahrens [8] ได้เสนอสมการโพลีโนเมียลของความชันคลื่น (wave steepness:  $H/L$ ) เพื่อคำนวณหาความสูงคลื่นชั้ของคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอบนพื้นเอียงผิวเรียบ Mase [3] ได้ทำการทดลองความสูงคลื่นชั้ของคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอบนพื้นเอียงผิวเรียบที่มีความลาดชันน้อยและนำเสนอสมการเชิงประสพการณ์ในรูปของสมการเลขยกกำลังของ  $\xi$

ในกรณีของพื้นเอียงแบบหินเรียงก็มีการศึกษามาพอสมควร เช่น ในการศึกษาของ [9] มีการศึกษาผลกระทบของคลื่นชั้ต่อเสถียรภาพของโครงสร้างหินเรียงและนำเสนอสมการเชิงประสพการณ์ที่เป็นฟังก์ชันของ  $\xi$  และมีสัมประสิทธิ์เชิงประสพการณ์อีกสองตัว Van der Meer and Stam [10] ได้ทำการทดลองความสูงคลื่นชั้ของคลื่นแบบสุ่มบนโครงสร้างหินเรียงที่มีความลาดชันตั้งแต่ 1:1.15 ถึง 1:4 และมีหน้าตัดของโครงสร้าง 4 แบบ การศึกษาได้นำเสนอสมการคำนวณ  $R/H$  เป็นฟังก์ชันของ  $\xi$  โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่  $\xi < 1.5$  สมการเป็นแบบเส้นตรง และช่วงที่  $\xi > 1.5$  สมการเป็นแบบเลขยกกำลังเหมือน [3] นอกจากนี้ผลกระทบเนื่องจากความพรุนของพื้นผิวหินเรียงต่อความสูงคลื่นชั้ได้ถูกนำเสนอในการศึกษาของ [11] ด้วย

แม้มีการนำเสนอสมการคำนวณความสูงคลื่นชั้บนโครงสร้างผิวหินเรียงอยู่บ้าง แต่สมการทั้งหมดที่นำเสนอไม่คำนึงถึงขนาดของหินโดยตรง การศึกษานี้้นำเสนอการทดลองความสูงคลื่นชั้ของคลื่นสม่ำเสมอบนพื้นเอียงผิวหินเรียง และนำเสนอสมการเชิงประสพการณ์ที่พิจารณาขนาดของหินเรียงหรือความสูงขรุขระในสมการด้วย

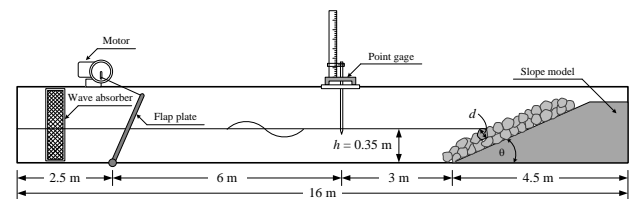
## 2. วิธีการศึกษา

ในการศึกษานี้ได้ดำเนินการทดลองความสูงคลื่นชั้บนพื้นเอียงผิวหินเรียงในรางจำลองคลื่น (Wave flume) ซึ่งมีความยาว 16 เมตรและมีขนาดหน้าตัดกว้าง 60 ซม. ลึก 80 ซม. พื้นเอียงผิวหินเรียงที่ใช้ทดสอบถูกติดตั้งเข้าไปในรางจำลองคลื่น ดังรูปที่ 2 และทำการทดสอบที่มุมลาดเอียง 15.0, 17.5, 20.0, 22.5 และ 25.0 องศา ผิวของพื้นเอียงถูกปูด้วยหินที่มีขนาดเฉลี่ย

2, 3, 4 และ 5 ซม. ระดับความลึกของน้ำคงที่ตลอดหน้าตัดที่ 35 ซม. คลื่นที่ใช้ในการทดลองถูกสร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นแบบสม่ำเสมอ ที่สร้างขึ้นด้วยความถี่ 0.83, 1.00, 1.17, 1.33, 1.50 และ 1.67 Hz. ความสูงของคลื่นที่ถูกสร้างขึ้นบริเวณน้ำลึกและความสูงคลื่นชั้บนพื้นเอียงถูกวัดด้วยเครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้ (Point gauge) สภาพการทดลองทั้งหมดในการศึกษานี้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สภาพการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ความลาดชันของพื้นเอียง, (องศา)	15, 17.5, 20, 22.5, 25
ความลึกของน้ำ, $h$ (cm)	35
ระยะกันชักข้อเหวี่ยง, (mm)	80, 100, 120, 140, 160, 180, 200
ความเร็วรอบของใบพัดน้ำ, (rpm)	50, 60, 70, 80, 90, 100
ความถี่ในการสร้างคลื่น, $f$ (Hz)	0.83, 1.00, 1.17, 1.33, 1.50, 1.67
คาบของคลื่น, $T$ (s)	1.20, 1.00, 0.86, 0.75, 0.67, 0.60
ความสูงขรุขระของพื้นผิว, $d$ (cm)	2, 3, 4, 5



รูปที่ 2 การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

## 3. ผลการทดลองและการพัฒนาสมการความสูงคลื่นชั้บนพื้นเอียงผิวหินเรียง

จากการดำเนินการทดลองตามเงื่อนไขดังอธิบายในหัวข้อที่ 2 ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 840 กรณี โดยมีช่วงค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ช่วงค่าของพารามิเตอร์จากการทดลองและการคำนวณ

พารามิเตอร์	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
ความสูงคลื่น, $H$ (cm)	1.24	11.76
ความสูงคลื่นชั้, $R$ (cm)	1.02	11.74
ความยาวคลื่น, $L$ (cm)**	56.13	186.03
ความสูงคลื่นชั้สัมพันธ์, $R/H$	0.304	2.019
ความชันของคลื่น, $H/L$	0.007	0.143
ความลาดชันของพื้นเอียง, $\tan \theta$	0.268	0.466
พารามิเตอร์ความคล้ายคลึงของการแตกตัว, $\xi$	0.710	5.454
ความสูงขรุขระสัมพันธ์, $d/H$	0.181	2.660

\*\* คำนวณจากทฤษฎีคลื่นแอมพลิจูดน้อย

จากการวิเคราะห์เชิงมิติของ [12] ความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงสามารถอธิบายได้ด้วย

$$\frac{R}{H} = f_1 \left( \frac{H}{L}, \tan \theta, \frac{h}{H}, \frac{d}{H}, \frac{\sqrt{K}}{H} \right) \quad (1)$$

เมื่อ  $R$  คือ ความสูงคลื่นชด,  $H$  คือ ความสูงคลื่น,  $L$  คือ ความยาวคลื่น,  $\tan \theta$  คือ ความลาดชันของหาดหรือโครงสร้าง,  $h$  คือ ความลึกของน้ำ,  $d$  คือ ความสูงขรุขระ และ  $K$  คือ ความสามารถในการซึมผ่านได้ในหน่วยของตารางเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความสามารถในการซึมผ่านได้จริง ( $k$ ) ในหน่วยของเมตรต่อวินาที ( $K = kv/g$  เมื่อ  $R$  คือ ความหนืดจลน์และ  $g$  คือ ค่าความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก)

ในการศึกษาของ [13] พบว่า เมื่อความลึกสัมพันธ์  $h/H > 3.0$  แล้วผลกระทบเนื่องจากความลึกของน้ำสามารถละทิ้งได้ และเนื่องจากการศึกษานี้ทำการทดลองกับพื้นเอียงที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ ดังนั้นสมการที่ (1) จึงเหลือเพียง

$$\frac{R}{H} = f_2 \left( \frac{H}{L}, \tan \theta, \frac{d}{H} \right) \quad (2)$$

การศึกษานี้นำเสนอรูปแบบสมการความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบหินเรียง โดยใช้พารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัว  $\xi$  ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถอธิบายความสูงคลื่นชดได้ [1, 3, 9, 10] และคำนึงถึงผลกระทบของขนาดหินเรียงในรูปของความสูงขรุขระสัมพันธ์  $d/H$  ดังสมการที่ (3)

$$\frac{R}{H} = \xi \left[ 1 - a \left( \frac{d}{H} \right)^b \right] \quad (3)$$

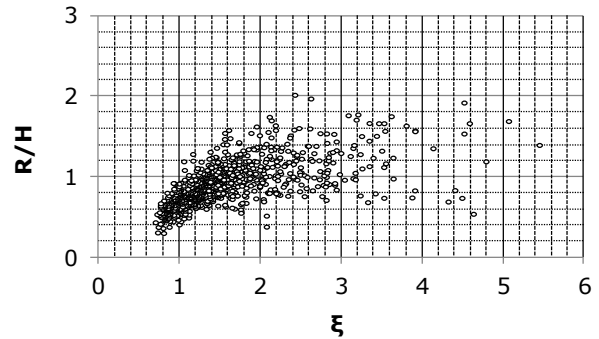
เมื่อ  $a$  และ  $b$  คือ พารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ที่ได้จากการทดลองสำหรับกรณีพื้นเรียบ ความสูงคลื่นชดสามารถหาได้จากสมการความสูงคลื่นชดของคลื่นแบบสมมาตรบนพื้นเอียงผิวเรียบของ Hunt [1] คือ

$$\frac{R}{H} = \xi \quad (4)$$

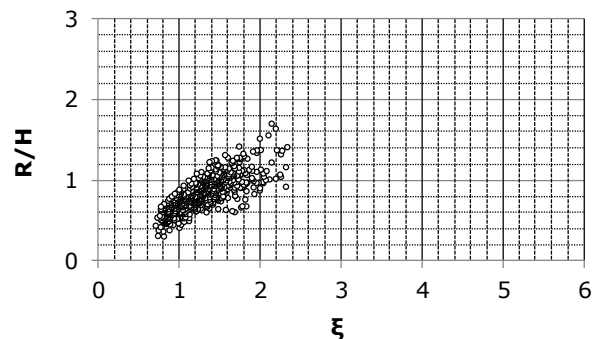
รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $R/H$  กับ  $\xi$  ของข้อมูลทั้งหมด จากกราฟจะเห็นว่า ค่า  $\xi$  มีความสัมพันธ์กับ  $R/H$  ดีพอสมควร โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ  $\xi$  มีค่าน้อย เมื่อ  $\xi$  มีค่ามาก ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองจะน้อยลง ในการศึกษาของ [1] และ [10] ก็พอปรากฏการณ์ในลักษณะนี้เช่นกัน และการศึกษาของ [3] ยังพบว่าเมื่อ  $H/L$  มีค่าน้อย ความสัมพันธ์ของ  $R/H$  กับ  $\xi$  จะลดลง เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า ในกรณีของ  $\xi$  มีค่ามาก อาจเป็นเพราะความลาดชันของพื้นเอียง ( $\tan \theta$ ) มีค่ามาก พื้นเอียงจึงมีลักษณะเข้าใกล้กำแพงแนวตั้ง ลักษณะพฤติกรรมของคลื่นที่ชดบนพื้นเอียงจึงมีความเด่นชัดน้อยลง ในทำนองเดียวกับกรณีที่  $H/L$  มีค่าน้อย คลื่นจะมีลักษณะเป็นคลื่นยาว เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ถึงพื้นเอียงจึงเป็นลักษณะการชนมากกว่าแสดงพฤติกรรมการชดไปบนพื้นเอียง ด้วยเหตุผลครั้งนี้ความสัมพันธ์ของคลื่น

ชดบนพื้นเอียงจึงมีความเด่นชัดน้อยลงเมื่อ  $\xi$  มีค่ามากและ  $H/L$  มีค่าน้อย

ในการศึกษานี้ทำการกรองช่วงข้อมูลที่แสดงพฤติกรรมคลื่นชดบนพื้นเอียงไม่เด่นชัดเหล่านี้คือ ช่วงข้อมูลที่  $\xi > 3.0$  และ  $H/L < 0.04$  จำนวนทั้งหมด 263 กรณี คงเหลือข้อมูล 577 กรณี รูปที่ 4 แสดงข้อมูล  $R/H$  และ  $\xi$  ภายหลังการกรองข้อมูลออก



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $R/H$  กับ  $\xi$  ของข้อมูลทั้งหมด

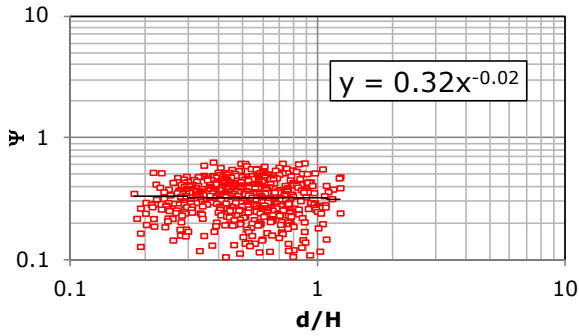


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $R/H$  กับ  $\xi$  ของข้อมูลภายหลังการกรองข้อมูล (ตัด  $\xi > 3.0$  และ  $H/L < 0.04$  ออก)

สำหรับค่าพารามิเตอร์  $a$  และ  $b$  หาได้โดยการเขียนสมการที่ (3) ใหม่เป็น

$$1 - \frac{R/H}{\xi} = \Psi = a \left( \frac{d}{H} \right)^b \quad (5)$$

จากนั้นวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\Psi$  และ  $d/H$  สเกล log-log ดังรูปที่ 5 แล้วหาค่า  $a$  และ  $b$  ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดของ  $a$  และ  $b$  สำหรับฟังก์ชันเลขกำลัง สมการความสูงคลื่นชดของคลื่นแบบสมมาตรบนพื้นเอียงแบบหินเรียง จากการศึกษานี้คือ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $d/H$  กับค่า  $\Psi$

$$\frac{R}{H} = \xi \left[ 1 - 0.32 \left( \frac{d}{H} \right)^{-0.02} \right] \quad (6)$$

สำหรับ  $0.040 < H/L < 0.143$ ,  $0.710 < \xi < 2.336$  และ  $0.181 < d/H < 1.238$

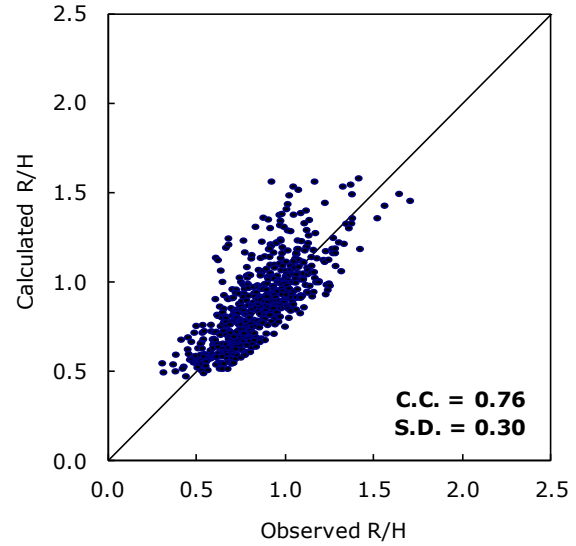
จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความขรุขระของผิวพื้นเอียงมีผลกระทบต่อความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงนั้น ทำให้ความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวหินเรียงมีค่าน้อยกว่าความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวเรียบประมาณร้อยละ 30 (เมื่อพิจารณาพจน์  $\left[ 1 - 0.32(d/H)^{-0.02} \right]$  ของข้อมูลจะมีค่าประมาณ 0.7) และจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลจะเห็นว่า เมื่อค่าความสูงขรุขระสัมพัทธ์  $d/H$  เพิ่มมากขึ้น อัตราลดของความสูงคลื่นซัดจะลดลง เนื่องจากในการทดลองเราพยายามเรียงหินให้มีความเรียบที่สุดเหมือนกับกำแพงกันคลื่นริมฝั่งที่พบได้ทั่วไป ทำให้หินก้อนใหญ่กว่าจะมีความเรียบมากกว่าและมีช่องว่างระหว่างก้อนหินน้อยกว่าเมื่อเทียบกับหินก้อนเล็ก ทำให้พื้นผิวหินเรียงก้อนเล็กสามารถสร้างความเสียดทานระหว่างมวลน้ำกับผิวพื้นเอียงได้มากกว่า ด้วยเหตุนี้ความสูงคลื่นซัดจึงลดลงมากกว่ากรณีหินก้อนใหญ่

ภาพที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์บนพื้นเอียงผิวขรุขระที่ได้มาจากการทดลองกับค่าที่ได้มาจากการคำนวณตามสมการที่ (9) โดยแสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงอย่างชัดเจน มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (C.C.) เท่ากับ 0.76 และมีความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.30

#### 4. บทสรุป

การศึกษานี้ได้นำเสนอสมการเชิงประสพการณ์อย่างง่ายในการทำนายความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบหินเรียง โดยสมการรวมผลกระทบเนื่องจากความขรุขระของผิวโครงสร้างเข้าไว้ในสมการด้วยการพัฒนาสมการเริ่มจากการพัฒนาสมการความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างผิวเรียบโดยใช้ข้อมูลการทดลอง จากนั้นพจน์ที่แสดงอิทธิพลของความสูงขรุขระของผิวโครงสร้างถูกรวมเข้าไปในสมการ และพารามิเตอร์เชิงประสพการณ์ของสมการหาค่าได้จากข้อมูลการทดลองในห้องปฏิบัติการสมการที่พัฒนาขึ้นสามารถประยุกต์ใช้กับช่วงความชันของคลื่น ( $H/L$ ) ตั้งแต่ 0.040 ถึง 0.143, ค่าพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัว ( $\xi$ )

ระหว่าง 0.710 ถึง 2.336 และค่าความสูงขรุขระสัมพัทธ์ ( $d/H$ ) ระหว่าง 0.181 ถึง 1.238



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวหินเรียง

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากเงินอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล มหาวิทยาลัยบูรพา

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] I. A. Hunt, "Design of seawalls and breakwaters", *Journal of Waterways and Harbours Division*, 1959, 85(3), 123-152.
- [2] U.S. Army Corps of Engineers, *Coastal Engineering Manual*, Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C., 2002, Part II, Chapter 4.
- [3] H. Mase, "Random wave run-up height on gentle slope", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1989, 115(5), 649-661.
- [4] J. P. Ahrens and W. N. Seelig, "Wave run-up on beaches", *Proceeding of the 25th Coastal Engineering Conference*, Florida, USA, 1996, pp. 981-993.
- [5] S. J. Na, K. D. Do and K. D. Suh, "Forecast of wave run-up on coastal structure using offshore wave forecast data", *Coastal Engineering*, 2011, 58, 739-748.
- [6] J. A. Battjes and A. Roos, "Characteristics of flow in run-up of periodic waves", *Report No. 75-3i Communications on Hydraulics*, 1975, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, the Netherlands.

- [7] Hedges, T.S., & Mase, H. (2004). "Modified Hunt's Equation Incorporating Wave Setup". *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 130(3), 109-113.
- [8] J. P. Ahrens, "Irregular wave run-up on smooth slopes", *CETA 81-17*, 1981, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Corps of Engineers, USA.
- [9] 14. J. P. Ahrens and B. L. McCartney, "Wave period effect on the stability of riprap", *Proceedings of Civil Engineering in the Oceans/III*, ASCE, Vol. 2, 1975, 1019-1034.
- [10] J. W. Van der Meer and C. J. M. Stam, "Wave run-up on smooth and rock slopes of coastal structures", *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 1992, 188(5), 534-550.
- [11] N. J. Shankar and M. P. R. Jayaratne, "Wave run-up and overtopping on smooth and rough slopes of coastal structures", *Ocean Engineering*, 2003, 30, 221-238.
- [12] Y. Tsuchiya, Y. Kawata and T. Yashita, "Effects of roughness and permeability on wave run-up", *Proceeding of the 25th Japanese Conference on Coastal Engineering*, 1978, pp. 164-169.
- [13] 16. T. Jr. Saville, "Wave run-up on shore structures", *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 1956, 82(2), 1-14.

**ภาคผนวก ข**  
**รายงานสรุปการเงิน**

เลขที่โครงการ (NRPM 13 หลัก): 2558A10802332 สัญญาเลขที่ 105/2558  
โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555  
มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ: การพัฒนาสมรรถนะสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวไม่เรียบ  
ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธรรมนุญ รัศมีมาสเมือง  
รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2557 ถึง วันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2558  
ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี

**รายรับ**

จำนวนเงินที่ได้รับ		
เงินงวดที่ 1 (50%)	เป็นจำนวนเงิน	209,000 บาท
เงินงวดที่ 2 (40%)	เป็นจำนวนเงิน	167,200 บาท
เงินงวดที่ 3 (10%)	เป็นจำนวนเงิน	41,800 บาท (ยังไม่ได้เบิก)
	รวม	<b>418,000 บาท</b>

**รายจ่าย**

หมวด	งบประมาณที่ตั้งไว้	งบประมาณที่ใช้จริง	จำนวนเงินคงเหลือ/เกิน
1. ค่าตอบแทน	5,000.00	3,500.00	1,500.00
2. ค่าจ้าง	90,000.00	90,000.00	0.00
3. ค่าวัสดุ	46,200.00	38,750.00	7,450.00
4. ค่าใช้สอย	235,000.00	243,950.00	-8,950.00
5. ค่าครุภัณฑ์	0.00	0.00	0.00
6. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ			
เงินค่าธรรมเนียม มหาวิทยาลัย	41,800.00	41,800.00	0.00
<b>รวม</b>	<b>418,000.00</b>	<b>418,000.00</b>	<b>0.00</b>

.....  
ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

.....  
ลงนามเจ้าหน้าที่การเงินโครงการ