

การทดลองเชิงแนวคิดเกี่ยวกับการลดทอนของคลื่นเนื่องจากระบบรากของต้นโกงกาง Conceptual experiment on wave attenuation due to mangrove root systems

ธรรมณูญ รัศมีมาสเมือง^{1,*} ฐาปนีย์ ทอมจำปา² เอกลักษณ์ โอตสะอาด³
พนัชพล วัชรพงศ์ธนาสาร⁴ ธนชล อางทวิกุล⁵ ปฏิพล วงษ์พระจันทร์⁶ สิริชล คามิศักดิ์⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

*Corresponding author; E-mail address: thamnoon@eng.buu.ac.th

บทคัดย่อ

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ป่าชายเลน พลังงานของคลื่นจะถูกลดทอนลงเนื่องจากสาเหตุที่สำคัญคือ แรงเสียดทานที่พื้น และแรงลากจากลำต้นและรากของต้นไม้ป่าชายเลน โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบรากค้ำยัน (prop roots) ของต้นโกงกาง (Rhizophora) บทความนี้นำเสนอการทดลองเชิงแนวคิดในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาปัจจัยทางอุทกพลศาสตร์และปัจจัยทางพลศาสตร์ที่มีผลต่อการลดทอนของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านระบบรากค้ำยันของกลุ่มต้นโกงกางจำลอง การทดลองถูกดำเนินการในรางจำลองคลื่นขนาดความยาว 16 เมตร หน้าตัดกว้าง 60 เซนติเมตร ลึก 80 เซนติเมตร กำเนิดคลื่นแบบปกติ (regular waves) ลำต้นและรากของต้นโกงกางถูกจำลองด้วยเหล็กเส้น ตัวแปรอิสระที่สนใจ ได้แก่ ความชันคลื่น ความลึกน้ำสัมพันธ์กับความสูงราก ความกว้างของแนวราก ความหนาแน่นของต้นโกงกาง และตัวแปรตาม คือ ร้อยละการลดทอนคลื่น จากการทดลองพบว่า เมื่อความชันคลื่น ความกว้างของแนวราก และความหนาแน่นของต้นโกงกางเพิ่มขึ้น ร้อยละการลดทอนคลื่นจะเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่เมื่อความลึกน้ำสัมพันธ์กับความสูงรากเพิ่มขึ้น ร้อยละการลดทอนคลื่นจะลดลง การศึกษานี้ยังนำเสนอสมการเพื่อทำนายร้อยละการลดทอนคลื่นจากปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นด้วย

คำสำคัญ: การลดทอนของคลื่น, การส่งผ่านของคลื่น, ต้นโกงกาง, หาดโคลน, ความชันคลื่น

Abstract

As waves propagate into a mangrove forest, the waves energy will be reduced due to two main factors, i.e. the bed friction and the drag force from the trunks and roots of mangrove trees, particularly in case of prop root system of Rhizophora. This paper presents a conceptual experiment in the laboratory to study the hydrodynamic and botanical factors affecting wave attenuation when moving through prop root system of Rhizophora models. The experiment was carried out in a 16-m long, 60-cm wide, 80-cm deep wave flume, in which

regular waves were generated. The stems and roots of Rhizophora models were made with steel bar. The independent variables of interest were the wave steepness, the water depth relative to root height, the width of root line and the density of mangrove trees, as well as the dependent variable was the wave reduction. As the wave steepness, the width of root line and the density of mangroves increased, the wave reductions also increased. While as the water depth relative to the root height increased, the wave reduction decreased. This study also presents an empirical formula to predict the wave reduction from the aforementioned factors.

Keywords: wave reduction, wave transmission, Rhizophora, muddy coast, wave steepness.

1. บทนำ

ต้นโกงกาง (Rhizophora) เป็นต้นไม้ที่พบได้ในบริเวณป่าชายเลนซึ่งเป็นชายฝั่งทะเลแบบโคลน (Muddy coasts) และเป็นพื้นที่ราบน้ำขึ้น-น้ำลง (Tidal flats) [1, 2] ต้นโกงกางจึงมีลักษณะพิเศษ 2 ประการ คือ (1) ความสามารถอยู่ในสภาวะแห้งและจมในน้ำทั้งน้ำทะเลและน้ำจืดได้ และ (2) ระบบรากและลำต้นของต้นไม้ที่มีความสลัดซับซ้อนและยึดโยงกับพื้นโคลนอย่างเหนียวแน่น ด้วยลักษณะเหล่านี้ทำให้แนวต้นโกงกางเป็นแนวกำบังชายฝั่งตามธรรมชาติ ช่วยสลายพลังงานคลื่นและกระแสน้ำด้วยความเสียดทานระหว่างน้ำกับรากและลำต้น ส่งเสริมให้เกิดการตกตะกอน และป้องกันชายฝั่งทะเลถูกกัดเซาะได้ด้วย

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ป่าชายเลนจะเกิดการลดทอน (ความลึกน้ำน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น) พื้นท้องทะเลส่งผลกระทบต่อเคลื่อนที่ของคลื่น คลื่นจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยมีแนวโน้มที่ความสูงเพิ่มขึ้นและความยาวคลื่นลดลง ด้วยปรากฏการณ์หลัก คือ การเข้าสู่น้ำตื้นของคลื่น (Wave shoaling) และการหักเหของคลื่น (Wave refraction) [3] จนถึงจุดลิมิตค่าหนึ่ง คลื่นจะแตกตัวและกระจายพลังงานออกมา แต่อย่างไรก็ตาม ในบทความนี้เน้นเฉพาะการลดทอนของคลื่นหรือการที่พลังงานของคลื่นถูก

สลายไป เมื่อคลื่นเคลื่อนผ่านป่าชายเลน โดยสมมติว่าตลอดแนวป่าชายเลน ค่าความลึกของน้ำคงที่ และไม่พิจารณาผลกระทบเนื่องจากกระแสน้ำ

กลไกการลดทอนของคลื่นในป่าชายเลนแสดงในรูปที่ 1 สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลัก [4] ได้แก่

1) พลังงานคลื่นถูกสลายด้วยแรงต้านเนื่องจากลำต้นและราก เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าไปในป่าชายเลนที่มีชั้นน้ำอยู่ในช่วงระดับลำต้นและราก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รากที่มีลักษณะเป็นรากค้ำยันของต้นโกงกาง อนุภาคของน้ำจะเคลื่อนที่กระทบกับลำต้นและราก ทำให้เกิดเป็นแรงต้านหรือแรงลาก ทำให้พลังงานของคลื่นค่อย ๆ สลายไป

2) พลังงานคลื่นถูกสลายด้วยแรงเสียดทานที่พื้น พื้นดินบริเวณป่าชายเลนมีรากของต้นไม้ป่าชายเลนแบบต่าง ๆ เช่น รากหายใจ รากพูพอน [2] ทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าพื้นดินเลนเปล่าที่ไม่มีต้นไม้ป่าชายเลน [5] แรงเสียดทานที่พื้นที่มีขนาดมากเป็นปัจจัยที่ทำให้พลังงานคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านป่าชายเลนสลายตัวลง นอกจากลักษณะพิเศษของระบบรากของต้นไม้ป่าชายเลนแล้ว ลักษณะพื้นดินโคลนยังสลายพลังงานคลื่นได้เป็นอย่างดี เนื่องจากลักษณะที่เป็นชั้นโคลนของไหล (Fluid mud layer) มีความสามารถในการหน่วงการเคลื่อนที่ของคลื่นและทำให้พลังงานคลื่นสลายตัวไป [6]

3) แรงลมเสริมถูกคิดขวางด้วยกิ่งก้านและใบ ลมสามารถพัดสร้างคลื่นหรือเสริมแรงคลื่นที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ให้มีความสูงเพิ่มขึ้นได้ แต่ในป่าชายเลน ต้นไม้ป่าชายเลนที่มีกิ่งก้านและใบจำนวนมากทำหน้าที่เป็นเกราะกำบังลม ไม่ว่าจะเป็ลมที่กำลังสร้างคลื่นใหม่หรือลมที่กำลังพัดเสริมก็ตาม โดยป้องกันไม่ให้แรงลมถ่ายทอดพลังงานไปยังผิวน้ำหรือคลื่นที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ได้ กลไกนี้ไม่ใช่กลไกการลดทอนของคลื่นโดยตรง แต่เป็นกลไกที่สำคัญที่ทำให้คลื่นในบริเวณป่าชายเลนมีความสูงหรือมีพลังงานน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นบริเวณรอบนอกป่าชายเลน

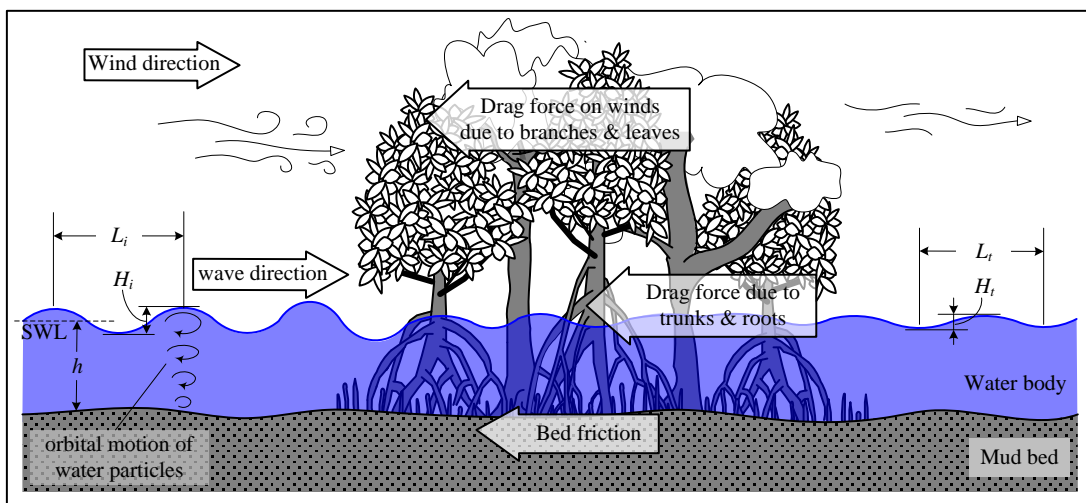
ด้วยทั้งสามกลไกหลักนี้ พลังงานคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่ป่าชายเลนถูกลดทอนลงไป ทำให้ลดการเคลื่อนที่ของตะกอน ส่งเสริมให้เกิดการตกตะกอนมากขึ้น และช่วยลดปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งทะเลได้

การศึกษาการลดทอนของคลื่นในป่าชายเลน รวมถึงการศึกษาศักยภาพของต้นไม้ป่าชายเลนในการทำหน้าที่เป็นเกาะกำบังคลื่นต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นคลื่นลม (Wind waves) คลื่นพายุซัดฝั่ง (Storm surges) หรือคลื่นสึนามิ (Tsunamis) สามารถจัดแบ่งได้เป็นสามกลุ่ม

กลุ่มแรกเป็นการศึกษาภาคสนามในป่าชายเลนจริง โดยมีทั้งการทดลองในภาคสนามและเก็บข้อมูลปฐมภูมิ [5, 7-12] และการรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิในภาคสนามมาวิเคราะห์ [11, 13-14] การศึกษาในภาคสนามทำให้ได้เห็นพฤติกรรมหรือร่องรอยจริงของคลื่นที่ถูกสลายพลังงานในพื้นที่และภายใต้สภาพแวดล้อมจริง แต่ไม่สามารถกำหนดปัจจัยที่มีผลกระทบได้ (ตัวแปรต้น) เช่น ความหนาแน่นของต้นไม้อัตโนมัติ ลักษณะของคลื่น ทำให้ข้อมูลหรือผลการศึกษาที่ได้มีความน่าเชื่อถือได้เฉพาะในพื้นที่ศึกษาเป็นหลัก

กลุ่มที่สองเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยสร้างคลื่นในรางจำลองคลื่น (Wave flume) หรืออ่างจำลองคลื่น (Wave basin) เคลื่อนที่ผ่านแบบจำลองต้นไม้อัตโนมัติทะเล [15-17] การศึกษากลุ่มนี้สามารถกำหนดหรือจำลองลักษณะหรือพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ตามความสนใจ เช่น ลักษณะคลื่นรูปลักษณะของต้นไม้อัตโนมัติ ความหนาแน่นของต้นไม้อัตโนมัติ เป็นต้น

การศึกษากลุ่มที่สาม คือ การศึกษาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการต่อเนื่อง (Continuity equation) และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equation) เป็นสมการควบคุมใช้ในการอธิบายกระบวนการเปลี่ยนแปลงของคลื่นและ/หรือกระแสน้ำ การสลายพลังงานของคลื่นเนื่องจากต้นไม้อัตโนมัติถูกพิจารณาในรูปของอัตราการสลายพลังงานหรือสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน [18-21] แม้ว่าการศึกษาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นวิธีที่มีความนิยมมากในปัจจุบันเนื่องจากเทคโนโลยีการคำนวณที่ก้าวหน้า และสามารถสร้างฉากทัศน์ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้จำเป็นต้องมีข้อมูลจากภาคสนามหรือการทดลองในห้องปฏิบัติการประกอบการกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง



รูปที่ 1 แผนภาพกลไกการลดทอนของคลื่นในป่าชายเลน [4]

การศึกษาที่ผ่านมาทั้งสามรูปแบบมุ่งเน้นความเข้าใจกระบวนการทางกายภาพในกรณีที่มีความเฉพาะเจาะจงตามสภาพแวดล้อมที่สนใจ การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การลดทอนคลื่นเนื่องจากต้นไม้ป่าชายเลนเชิงแนวคิด เพื่อนำไปสู่การสร้างสรรค์ สมการหรือแนวทางในการใช้แนวต้นไม้ป่าชายเลนในการลดทอนพลังงาน คลื่นและป้องกันชายฝั่งทะเลต่อไป

2. วิธีการทดลอง

การศึกษานี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางอุทกพลศาสตร์และพฤกษศาสตร์ต่อการลดทอนคลื่น เนื่องจากระบบรากของต้นไม้ป่าชายเลน การทดลองใช้รางจำลองคลื่นขนาด ความยาว 1,600 cm ขนาดหน้าตัดกว้าง 60 cm และลึก 80 cm ดังรูปที่ 2 ปลายด้านหนึ่งของรางมีเครื่องกำเนิดคลื่นแบบสม่ำเสมอ (Regular wave generator) สร้างคลื่นสม่ำเสมอที่มีความเร็วรอบจำนวน 6 ค่า คือ 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 รอบต่อนาที หรือแปลงเป็นความถี่ได้เท่ากับ 0.83, 1.00, 1.17, 1.33, 1.50 และ 1.67 Hz ด้วยใบพัดแบบบานพับ (Flap-type wave paddle) ซึ่งปรับระยะคันชักข้อเหวี่ยงจำนวน 6 ค่า คือ ระยะ 10, 12, 14, 16, 18 และ 20 cm จากจุดศูนย์กลางจานข้อเหวี่ยง ด้วยการปรับความถี่และระยะคันชักข้อเหวี่ยงในการสร้างคลื่นทำให้ได้คลื่นที่มีความสูงคลื่นและความยาวคลื่นแตกต่างกันจำนวน 36 กรณี

คลื่นจากเครื่องกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ไปตามรางผ่านแบบจำลองลำต้น และรากค้ำยันของต้นไม้ป่าชายเลน แบบจำลองต้นไม้ป่าชายเลนสร้างขึ้นเพื่อเลียนแบบ ต้นไม้ป่าชายเลนจริง โดยทำจากเหล็กเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3 ลำต้นใช้เหล็กข้อ อ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm (DB20) รากค้ำยันใช้เหล็กกลมขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 9 mm (RB9) ยึดกับลำต้นที่ระดับจาก 10 ถึง 50 cm จากพื้น ห่างกันระดับละ 4 cm ทั้งหมดมี 10 ระดับ ๆ ละ 2 ราก ทำให้หนึ่ง ต้นมีรากจำนวน 20 ราก

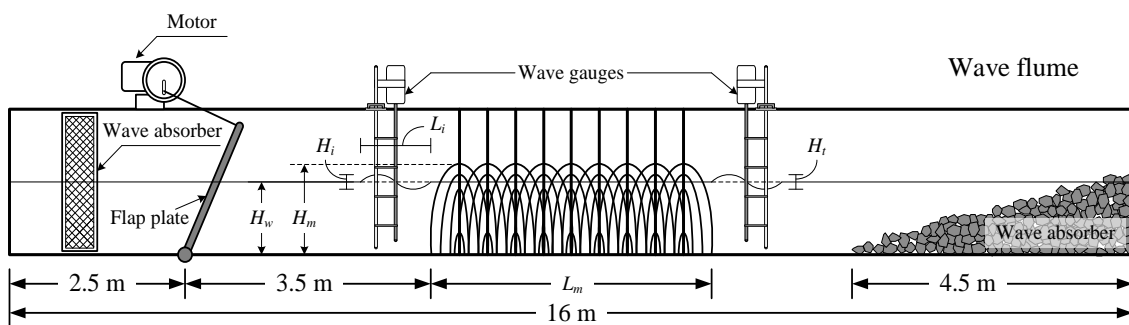
คลื่นที่เคลื่อนที่ก่อนเข้าและหลังจากจากแบบจำลองแนวต้นไม้ป่าชายเลนถูก วัดด้วยเครื่องวัดคลื่นแบบวัดความต้านทาน (Resistance wave gauges) ด้วยความช่วงระยะเวลาการบันทึกค่า 0.1 วินาที บริเวณปลายทั้งสองข้าง ของรางจำลองคลื่นมีตัวสลายคลื่น (Wave absorbers) ติดตั้งอยู่เพื่อสลาย คลื่นที่ผ่านการวัดและลดคลื่นสะท้อนภายในรางจำลองคลื่น

การทดลองประกอบด้วย 3 ส่วนที่มีสภาพจำลองแตกต่างกัน เพื่อ ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางอุทกพลศาสตร์และพฤกษศาสตร์กับ การลดทอนคลื่นเนื่องจากระบบลำต้นและรากของต้นไม้ป่าชายเลน ได้แก่

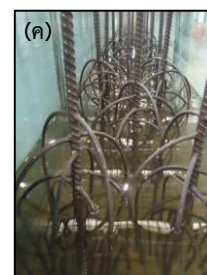
ส่วนที่ 1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกน้ำกับการลดทอน คลื่น ในส่วนนี้แบบจำลองต้นไม้ป่าชายเลนถูกวางด้วยความยาวทั้งหมด 400 cm ตามรางจำลองคลื่น โดยวางแบบจำลองด้วยความหนาแน่น 6 ต้นต่อ 100 cm ทำการทดลองที่ความลึกของน้ำนิ่ง (ยังไม่สร้างคลื่น) จำนวน 3 ค่า คือ 30, 40 และ 50 cm เมื่อสร้างคลื่นจำนวน 36 กรณีดังอธิบายข้างต้น ทำให้ ได้การทดลองส่วนนี้ทั้งหมด 108 กรณี

ส่วนที่ 2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของแนวต้นไม้ ป่าชายเลนกับการลดทอนคลื่น การทดลองส่วนนี้ใช้ความลึกน้ำนิ่งเท่ากับ 40 cm และใช้แบบจำลองต้นไม้ป่าชายเลนที่มีความหนาแน่น 6 ต้นต่อ 100 cm ที่มี ความยาวของแนวต้นไม้ป่าชายเลน จำนวน 4 ค่า คือ 100, 200, 300 และ 400 cm เมื่อสร้างคลื่นจำนวน 36 กรณี ทำให้การทดลองส่วนนี้มี 144 กรณี

ส่วนที่ 3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแบบจำลอง ต้นไม้ป่าชายเลนกับการลดทอนคลื่น การทดลองส่วนนี้ใช้ความลึกน้ำนิ่งเท่ากับ 40 cm และใช้แบบจำลองต้นไม้ป่าชายเลนที่มีความยาวแนวต้นไม้ป่าชายเลนเท่ากับ 400 cm ทำการแปรผันความหนาแน่นของแบบจำลองต้นไม้ป่าชายเลน จำนวน 4 ค่า คือ 3, 4, 5 และ 6 ต้นต่อ 100 cm สมมติให้ความหนาแน่นของแบบจำลอง ต้นไม้ป่าชายเลนมีค่าเท่ากับ 50%, 67%, 83% และ 100% ตามลำดับ เมื่อ สร้างคลื่น 36 กรณี ทำให้การทดลองส่วนนี้มี 144 กรณี



รูปที่ 2 การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง



รูปที่ 2 (ก) ต้นไม้ป่าชายเลนจริง (ข) แบบจำลองลำต้นและรากต้นไม้ป่าชายเลน และ (ค) แบบจำลองต้นไม้ป่าชายเลนที่ติดตั้งในรางจำลองคลื่น

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การสร้างคลื่นด้วยเครื่องกำเนิดแบบบานพับทำให้เกิดความสูงคลื่นและความยาวคลื่นแตกต่างกัน ณ ระดับความลึกน้ำนิ่ง (H_w) ที่แตกต่างกันด้วย ประกอบกับการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์และระยะคันชักข้อเหวี่ยงที่แตกต่างกันจำนวน 36 กรณีตั้งอธิบายข้างต้น ทำให้เกิดความสูงคลื่นเข้ากระทบ (Incident wave height, H_i) ความยาวคลื่นเข้ากระทบ (Incident wavelength, L_i) และความชันคลื่น (Wave steepness, H_i/L_i) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปรายละเอียดรูปแบบตัวอักษรสำหรับบทความของ NCCE28

H_w (cm)	H_i (cm)		L_i (cm)		H_i/L_i	
	max	min	max	min	max	min
30	11.0	1.0	177.0	56.0	0.160	0.006
40	12.5	3.9	193.6	56.2	0.182	0.020
50	15.9	5.6	204.9	56.2	0.193	0.027

ในการพิจารณาปริมาณการลดทอนคลื่นสามารถใช้ร้อยละของความสูงคลื่นที่ลดลงเมื่อคลื่นผ่านป่าชายเลน (Transmitted wave height, H_t) เทียบกับความสูงคลื่นก่อนเคลื่อนที่เข้าป่าชายเลน หรือเรียกว่า สัมประสิทธิ์การลดทอน (Wave reduction coefficient, R) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$R(\%) = \frac{H_i - H_t}{H_i} \times 100 \quad (1)$$

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาดังอ้างอิงในบทนำ การศึกษานี้นำเสนอสมมติฐานที่ว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนคลื่นเมื่อคลื่นผ่านแนวแบบจำลองต้นโกงกางเป็นฟังก์ชันของตัวแปรไร้มิติที่แสดงถึงสภาพอุทกพลศาสตร์และพฤกษศาสตร์ ได้แก่ ความชันคลื่น (Wave steepness, H_i/L_i) ความลึกของระดับน้ำนิ่งสัมพันธ์กับความสูงของรากแบบจำลองต้นโกงกาง (the water depth relative to the height of root model, H_w/H_m) ความยาวของแนวแบบจำลองต้นโกงกางสัมพันธ์กับความยาวคลื่น (the length of root models relative to the wavelength, L_m/L_i) และความหนาแน่น (ร้อยละ) ของแบบจำลองต้นโกงกาง (Density of root models, D_m) ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$R(\%) = f\left(\frac{H_i}{L_i}, \frac{H_w}{H_m}, \frac{L_m}{L_i}, D_m\right) \quad (2)$$

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนคลื่น (R) กับความชันคลื่นเข้ากระทบ (H_i/L_i) สำหรับการทดลองที่ระดับน้ำนิ่ง 50 cm ความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่า คลื่นที่มีความชันมากกว่า (คลื่นสั้นกว่า) เกิดการลดทอนคลื่นมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นที่มีความชันน้อย

กว่า (คลื่นยาวกว่า) พฤติกรรมนี้เกิดเนื่องจากอนุภาคของน้ำบริเวณโคนผิวน้ำสำหรับคลื่นที่มีความชันมากหรือคลื่นสั้นเคลื่อนที่เป็นวงโคจร (orbital motion) ใกล้เคียงกับวงกลม ทำให้มีโอกาสเคลื่อนที่เข้าชนลำต้นและรากของต้นโกงกางจำลองมากกว่าอนุภาคของน้ำสำหรับคลื่นที่มีความชันน้อยหรือคลื่นยาวซึ่งมีการเคลื่อนที่คล้ายวงรีเสมือนการไหลผ่านแนวลำต้นและราก การชนกระแทกของอนุภาคน้ำของคลื่นที่มีความชันมากทำให้เกิดสลายพลังงานมากกว่าและการลดทอนคลื่นจึงมากขึ้นตามมาด้วย

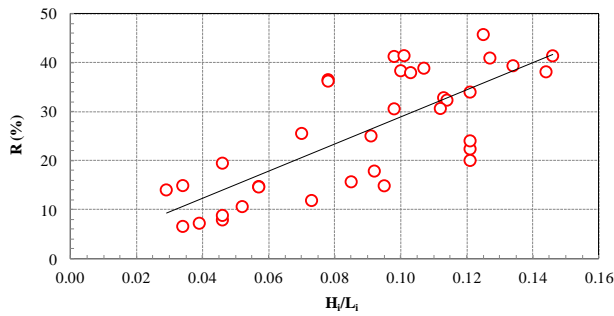
ผลการทดลองในส่วนที่ 1 ซึ่งเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนคลื่น (R) กับความลึกน้ำสัมพันธ์ (H_w/H_m) แสดงดังในรูปที่ 4 ความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าเมื่อความลึกน้ำสัมพันธ์เพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การลดทอนคลื่นจะลดลง เหตุผลที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากที่ความลึกน้ำตื้นกว่ามีความหนาแน่นของจำนวนรากค้ำยันมากกว่า เพราะรากทุกรากไม่ว่าจะงอกจากระดับใดทอดยาวลงมาถึงพื้นเพื่อค้ำยันต้นโกงกาง โอกาสที่คลื่นชนรากค้ำยันของต้นโกงกางจำลองที่ระดับน้ำตื้นกว่าจึงมีมากกว่ากรณีที่ระดับน้ำลึกกว่า นอกจากนั้นแล้ว เมื่อระดับน้ำตื้นกว่า อิทธิพลของพื้นส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของคลื่นมากกว่า แรงเสียดทานที่พื้นทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเพิ่มเติมจากการชนด้วย ด้วยเหตุนี้การลดทอนของคลื่นจึงมีค่าสูงกว่าเมื่อความลึกน้ำตื้นกว่า

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนคลื่น (R) กับความยาวแนวต้นโกงกางจำลองสัมพันธ์ (L_m/L_i) และรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนคลื่น (R) กับความหนาแน่นของต้นโกงกางจำลอง (D_m) ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ทั้งสองกรณีให้ความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อจำนวนต้นโกงกางจำลองเพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะเพิ่มตามจำนวนแถวหรือความยาวของแนวต้นโกงกางจำลองที่เพิ่มขึ้น หรือเพิ่มตามความหนาแน่นของต้นโกงกางต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่เท่ากันแล้ว ทั้งสองกรณีเพิ่มโอกาสที่คลื่นเคลื่อนที่เข้ามาชนการชนของอนุภาคน้ำของคลื่นกับลำต้นและรากของต้นโกงกางจำลองที่เพิ่มขึ้นนี้ ทำให้การสลายพลังงานของคลื่นที่ส่งผ่านแนวต้นโกงกางจำลองเพิ่มมากขึ้นด้วย การลดทอนคลื่นจึงเพิ่มขึ้น

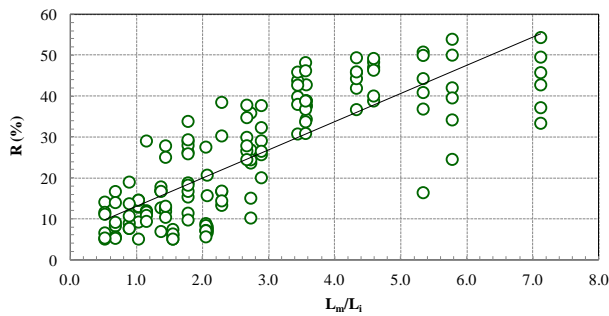
การศึกษานี้ยังนำเสนอสมการที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression) โดยกำหนดให้ R เป็นตัวแปรตาม และมีตัวแปรอิสระ ได้แก่ H_i/L_i , H_w/H_m , L_m/L_i , และ D_m ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$R(\%) = \beta_0 + \beta_1 \frac{H_i}{L_i} + \beta_2 \frac{H_w}{H_m} + \beta_3 \frac{L_m}{L_i} + \beta_4 D_m \quad (3)$$

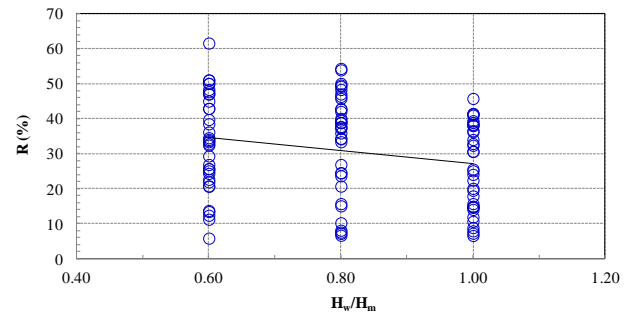
เมื่อ $\beta_0 = -5.67$, $\beta_1 = 193.71$, $\beta_2 = 22.76$, $\beta_3 = 2.66$ และ $\beta_4 = 0.27$ โดย $R(\%) \geq 0$ และให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจพหุคูณ (Coefficient of Multiple Determination, r^2) เท่ากับ 0.69 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เท่ากับ 7.66



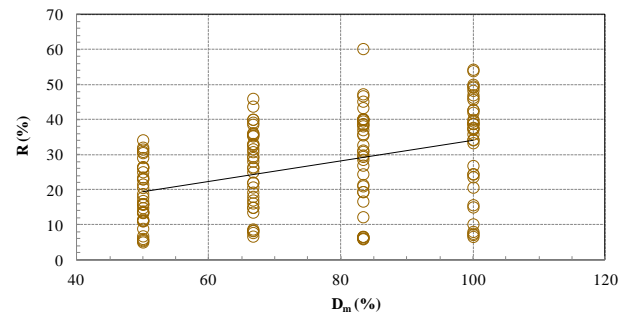
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนคลื่น (R)
กับความชันคลื่นเข้ากระทบ (H_i/L_i)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนคลื่น (R)
กับความยาวแนวต้นโคงงำลองสัมพัทธ์ (L_m/L_i)



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนคลื่น (R)
กับความลึกน้ำสัมพัทธ์ (H_w/H_m)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนคลื่น (R)
กับความหนาแน่นของต้นโคงงำลอง (D_m)

สมการที่ (3) เป็นเพียงสมการเชิงคุณภาพหรือสมการเชิงแนวคิดที่อธิบายอิทธิพลของปัจจัยทางอุทกพลศาสตร์และพฤกษศาสตร์ต่อการลดทอนคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านแนวต้นโคงงำ การศึกษาเพิ่มเติมยังมีความจำเป็นเพื่อสามารถเข้าใจปัจจัยเหล่านี้ในรายละเอียดให้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาที่จำลองสภาพตามธรรมชาติให้ได้ใกล้เคียงเพิ่มขึ้นหรือการศึกษาเปรียบเทียบกับการทดลองในภาคสนาม เพื่อทำการตรวจสอบสมมติฐานและนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงปฏิบัติหรือพัฒนาเป็นแนวทางการออกแบบทางวิศวกรรมต่อไป

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้นำเสนอการทดลองเชิงแนวคิดเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนคลื่นกับปัจจัยทางอุทกพลศาสตร์และปัจจัยทางพฤกษศาสตร์ ประกอบด้วย ความชันของคลื่นเข้ากระทบ ความลึกน้ำสัมพัทธ์ ความยาวแนวต้นโคงงำสัมพัทธ์ และความหนาแน่นของต้นโคงงำ ผลการศึกษาสรุปได้ว่า ปัจจัยทั้งสี่ส่งผลกระทบต่อความสัมพันธ์ที่เป็นระบบต่อการลดทอนคลื่น เมื่อความชันคลื่นเข้ากระทบเพิ่มขึ้น ความลึกน้ำสัมพัทธ์ลดลง ความยาวแนวต้นโคงงำสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น และความหนาแน่นของต้นโคงงำเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดโอกาสการชนระหว่างอนุภาคน้ำของคลื่นกับลำต้นและรากของต้นโคงงำจำลองมากขึ้น ส่งผลตามมาให้การสลายพลังงานและการลดทอนคลื่นเพิ่มตามไปด้วย การทดลองสนับสนุนให้องค์ความรู้ขั้นต้นเชิงคุณภาพที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยในอนาคตซึ่งอาจทำได้โดยการพัฒนาแบบจำลองต้นโคงงำให้มีลักษณะใกล้เคียงธรรมชาติมากขึ้น หรือการทำการทดลองลักษณะใกล้เคียงกันนี้ในภาคสนามจริงต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Robertson, A. I. (1992) In: Alongi, D. M. (Ed.), *Tropical Mangrove Ecosystem*. American Geophysical Union, Washington.
- [2] Bunyavejchewin, S., Buasalee, R. (2011). *Mangrove Forests: Ecology and Vegetations*. Amarin Printing & Publishing, Thailand (in Thai).
- [3] Kamphuis, J.W. (2001) *Introduction to coastal engineering and management*, World Scientific, Singapore.
- [4] Rasmeemasuang, T. (2012). Wave Attenuation in Mangrove Forests. *KKU Engineering Journal*. 39(2), pp. 203-212. (in Thai)
- [5] Quartel, S., Kroon, A., Augustinus, P.G.E.F., Van Santen, P., Tri, N.H. (2007) Wave attenuation in coastal mangroves in the Red River Delta, Vietnam. *Journal of Asian Earth Science*. 29, pp. 567-584.
- [6] Winterwerp JC, Van Kesteren WGM. (2004) *An introduction to the physical processes of cohesive sediment in the marine environment*. Elsevier, Developments in Sedimentology vol. 56.

- [7] Mazda Y, Magi M, Kogo M, Hong PN. (1997) Mangroves as a coastal protection from waves in the Tong King Delta, Vietnam. *Mangroves & Salt Marches*. 1. pp. 127-135.
- [8] Mazda Y, Magi M, Ikeda Y, Kurokawa T, Asano T. (2006) Wave reduction in a mangrove forest dominated by *Sonneratia* sp. *Wetlands Ecology and Mgmt*. 14, pp. 365-378.
- [9] Brickman RM, Massel SR, Ridd PV, Furukawa K. (1997) Surface wave attenuation in mangrove forest. *Proc. of the 13th Australasian Coastal & ocean Eng Conf*. pp. 941-946,
- [10] de Vos WJ. (2004) *Wave attenuation in mangrove wetlands, Red River Delta, Vietnam* [MSc Thesis]. Delft Univ of Technology.
- [11] Feagin RA, Möller JLI, Williams AM, Colón-Rivera RJ, Mousavi M. E. (2011) Short communication: Eng properties of wetland plants with application to wave attenuation. *Coastal Eng*. 58, pp. 251-255.
- [12] Möller I, Mantilla-Contreras J, Spencer T, Hayes A. (2011) Micro-tidal coastal reed beds: Hydro-morphological insights and observations on wave transformation from the southern Baltic Sea. *Estuarine, Coastal & Shelf Sci*. 92, pp. 424-436.
- [13] Kathiresan K, Rajendran N. (2005) Coastal mangrove forests mitigated tsunami. *Estuarine, Coastal & Shelf Sci*. 65, pp. 601-606.
- [14] Yanagisawa H, Koshimura S, Goto K, Miyagi T, Imamura F, Ruangrassamee A, Tanavud C. (2009) The reduction effects of mangrove forest on a tsunami based on field surveys at Pakarang Cape, Thailand & numerical analysis. *Estuarine Coastal & Shelf Sci*. 81, pp. 601-606.
- [15] Dubi AM, Tørum A. (1994) Wave damping by kelp vegetation. *Proc. of the 24th Intl Conf on Coastal Eng*. pp. 142-156.
- [16] Tuyen NB, Hung H.V. (2009) An experimental study on wave reduction efficiency of mangrove forests. *Proc. of the 5th Intl Conf on Asian and Pacific Coasts*.
- [17] Fernando HJS, Samarawickrama SP, Balasubramanian S, Hettiarachchi SSL, Voropayev S. (2008) Effects of porous barriers such as coral reefs on coastal wave propagation. *J of Hydro-Environment Res*. 1, pp. 187-194.
- [18] Suzuki T, Zijlema M, Burger B, Meijer MC, Narayan S. (2011) Wave dissipation by vegetation with layer schematization in SWAN, *Coastal Eng*. doi: 10.1016/j.coastaleng.2011.07.006.
- [19] Massel SR, Furukawa K, Brinkman RM. (1999) Surface wave propagation in mangrove forests. *Fluid Dyn. Res*. 24, pp. 219-249.
- [20] Teh SY, Koh HL, Liu PLF, Ismail AIM, Lee HL. (2009) Analytical and numerical simulation of tsunami mitigation by mangroves in Penang, Malaysia. *J of Asian Earth Sci*. 36, pp. 38-46.
- [21] Myrhaug D, Holmedal LE. (2011) Drag force on a vegetation field due to long-crested and short-crested nonlinear random waves. *Coastal Eng*. 58, pp. 562-566.