



การตรวจวัดระดับผิวน้ำด้วยวิธีการประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพ

DETECTION OF WATER SURFACE ELEVATION BY AN IMAGE PROCESSING AND ANALYSIS APPROACH

ชัยยุทธ ชินณะราศรี¹ และคมสัน วิริยกิจจา²

¹ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

โทรศัพท์ 02-470-9132, อีเมล: chaiyuth.chi@kmutt.ac.th

²นักวิจัย ศูนย์วิจัยวิศวกรรมและการจัดการน้ำ (วาริ) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปการตรวจวัดระดับผิวน้ำทั้งในภาคสนามและห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์นั้น จะใช้เครื่องมือ วัดแบบดั้งเดิม เช่น เครื่องมือวัดแบบ ตัวเก็บประจุ (Capacitance type) ตัวต้านทาน (Resistance type) และ ตัวเหนี่ยวนำ (Conductivity type) เป็นต้น ซึ่งเครื่องมือดังกล่าวเป็นการตรวจวัดแบบล่วงล้ำหรือมีรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์รบกวนต่อการเคลื่อนที่ของคลื่น การศึกษาที่ประยุกต์ใช้วิธีการประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพโดยใช้การหาขอบของภาพแบบแคนนี่ (Canny edge detection) และอัลกอริทึมการเทียบค่าระดับผิวน้ำจากโปรแกรม Matlab จากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงระดับผิวน้ำจำนวน 5 กรณีศึกษา ในรางจำลองคลื่นขนาดกว้าง 0.60 เมตร ยาว 18 เมตร และสูง 0.75 เมตร พบว่า ค่าความสูงคลื่นและคาบคลื่นเฉลี่ยที่เก็บวัดได้จากวิธีการแบบดั้งเดิมกับวิธีประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพมีความแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 9.26 และ 0.49 ตามลำดับ นอกจากนี้ความสัมพันธ์เชิงสถิติของการเปลี่ยนแปลงระดับผิวน้ำเทียบกับเวลาด้วยดัชนี MSE, RMSE และ R² ยืนยันว่าวิธีการตรวจวัดดังกล่าวสามารถใช้ได้เทียบเท่าวิธีการวัดแบบดั้งเดิมและสามารถนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: การประมวลผลด้วยภาพ, การวิเคราะห์คลื่น, แบบจำลองทางกายภาพ, วิศวกรรมชายฝั่ง

ABSTRACT

Normally, free surface elevation measurements, both in the coastal field and laboratory, mostly use traditional wave gauges such as capacitance, resistance, and conductivity types. These types of equipment take intrusive measurements, as they disturb the wave propagation. This study focuses on an alternative technique, namely an image processing and analysis approach based on the canny edge detection and water elevation comparing algorithm in Matlab. Five experimental case studies of water surface elevation changes were carried out in a wave flume 0.60 m wide, 18 m long, and 0.75 m high. The results showed that the average wave heights and wave periods measured using both methods are different by not more than 9.26% and 0.49%, respectively. Moreover, the statistical agreement of water surface elevations in term of MSE, RMSE, and R² confirmed that image processing is as good as the conventional method and can be used in the laboratory as well.

KEYWORDS: Image Processing, Wave Analysis, Physical Model, Coastal Engineering.

Chaiyuth Chinnarasri¹ and Khomsan Viriyakijja²

¹ Professor, Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

² Researcher, Water Resources Engineering & Management Research Center (WAREE),

King Mongkut's University of Technology Thonburi.

1. บทนำ

คลื่นในทะเลและมหาสมุทรส่วนใหญ่เกิดจากการส่งผ่านพลังงานจากกระแสลมสู่ผิวน้ำอิสระ โดยกระบวนการเปลี่ยนแปลงคลื่นนั้นเป็นปรากฏการณ์ที่ค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นการวิเคราะห์คลื่นจึงมีความสำคัญต่อวิศวกรรมชายฝั่ง ทั้งในด้านการศึกษาความสัมพันธ์ของคุณลักษณะต่างๆ ของคลื่น รวมถึงการออกแบบโครงสร้างเพื่อป้องกันชายฝั่งด้วย โดยตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการตรวจวัดคลื่นนั้นคือ ระดับผิวน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ณ จุดใดๆ ที่เก็บวัดค่า [1,2] ในอดีตนักวิจัยส่วนมาก [3-7] จะศึกษาคูสมบัติของคลื่นในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ด้วยเครื่องมือตรวจวัดคลื่นแบบดั้งเดิม (Traditional wave gauge) ได้แก่ เครื่องมือวัดแบบ ตัวเก็บประจุ (Capacitance type) ตัวต้านทาน (Resistance type) และ ตัวเหนี่ยวนำ (Conductivity type) เป็นต้น ซึ่งเครื่องมือดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูง อีกทั้งยังมีระบบการติดตั้งและบำรุงรักษาที่ยุ่งยากด้วย [8]

ในปัจจุบันความก้าวหน้าของเทคโนโลยีและประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์สูงขึ้นทำให้มีการเสนอทางเลือกสำหรับการตรวจวัดด้วยวิธีอื่นๆ หลากหลายมากขึ้น การประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพ (Image Processing and Analysis) เป็นวิธีที่เริ่มมีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แนวคิดการตรวจวัดระดับผิวน้ำด้วยวิธีการประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพอาศัยหลักการเทียบมาตราส่วนอ้างอิงในภาพกับระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงในหน่วยของจุดภาพ (Pixel) โดยกระบวนการดังกล่าวประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ 1) การประมวลผลภาพ (Image processing) เช่น การปรับปรุงคุณภาพ กรองสัญญาณรบกวน (Noise filter) การแปลงภาพเป็นภาพลักษณะฐานสอง (Binary image) และการหาขอบของภาพ (Edge detection) เพื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ มาอธิบายข้อมูลภาพ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลภาพต่อไป และ 2) การวิเคราะห์ผลภาพ (Image analysis) เช่น การเทียบมาตราส่วนและแปรผลลัพธ์เป็นค่าใดๆ ที่ต้องการออกมาเพื่อนำไปใช้ต่อไป [9-12]

การประยุกต์การตรวจวัดคลื่นโดยใช้วิธีการประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพ ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง สามารถอธิบายโดยย่อได้ดังนี้ Bonmarin, et al. (1989) ศึกษาคุณลักษณะของคลื่นที่มีความชันสูง (Steep wave) ในรางจำลองคลื่น ผ่านการวัดมิติต่างๆ จากการแปรผลภาพจำนวน 45 ตัวแปร หลังจากนั้นใช้การประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยอัลกอริทึมเพื่อหาคุณลักษณะของคลื่นหลัก ได้แก่ ความสูงและความยาวคลื่น ผลการทดลองให้ค่าความสอดคล้องที่มากถึงร้อยละ 96 แต่อย่างไรก็ตามค่าความสอดคล้องดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการวัดค่าคุณลักษณะคลื่นที่วัดในกระดาศกราฟและค่าที่ได้จากการประมวลผลและวิเคราะห์ผลภาพด้วยอัลกอริทึม [13] Foote and Horn (1999) ศึกษาและเสนอแนวทางการตรวจวัดคลื่นบริเวณใกล้ชายฝั่ง (Swash zone) ซึ่งเกิดคลื่นซัดท่วมขึ้นและถอยกลับจากฝั่งในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ โดยใช้การประมวลผลภาพเพื่อเป็นข้อมูลนำเข้าสู่การวิเคราะห์ผลผ่านการเทียบค่าด้วยระบบสารสนเทศภูมิประเทศ (GIS) หรือ โปรแกรม Arc view จำนวน 162 กรณี พบว่าค่าระดับน้ำที่ได้จากการวิเคราะห์ อาจให้ค่าความแตกต่างจากค่าที่วัดได้จากเครื่องมือแบบดั้งเดิมถึง 1 เซนติเมตรหรือคิดเป็นค่าความแตกต่างสูงสุดร้อยละ 13 [14]

Lee and Kwon (2003) ศึกษารูปร่างคลื่น 2 มิติ ด้วยการแปรผลภาพจากวิดีโอ โดยเสนออัลกอริทึม Mexican hat wavelet ในการตรวจวัดรูปตัดคลื่นทั้งกรณีคลื่นปกติและไม่ปกติ รวมถึงการจำลองการรบกวนของคลื่นที่เกิดจากโครงสร้างจมน้ำ [15] Yao and Wu (2005) นำเสนออัลกอริทึม Gradient vector flow snake (GVF) ในการตรวจวัดรูปตัดคลื่น กรณีคลื่นแตกตัว (Breaking wave) ทั้ง 3 ลักษณะ ได้แก่ คลื่นแตกตัวแบบ Spiller และแบบ Plunging ทั้งที่ปะทะและไม่ปะทะกับโครงสร้างทรงกระบอกแนวตั้ง [16] Umeyama and Shintani (2004) ศึกษาแบบจำลองทางชลศาสตร์เพื่อหาความสัมพันธ์ของความสูงคลื่นซัด (Wave run-up) และจุดแตกตัวของคลื่น (Wave breaking point) โดยใช้วิธีประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพตรวจวัดของเหลวที่แยกชั้นความหนาแน่น

ระหว่างชั้นน้ำจืดและชั้นน้ำเค็ม โดยการใส่สีในน้ำเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผล พบว่าค่าจากการทดลองและการคำนวณมีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกัน [17]

Erikson and Hanson (2005) นำเสนอวิธีการประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพด้วยโปรแกรม MATLAB ในการตรวจวัดค่าคุณสมบัติเชิงปริมาตร ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพของเนินทราย คลื่นและหน้าตัดท้องน้ำ ในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ โดยเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างเครื่องมือวัดคลื่นแบบดั้งเดิมกับการประมวลผลด้วยภาพจากอัลกอริทึม พบว่า ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลมีความสอดคล้องกันอย่างมาก กล่าวคือ เนินทรายและคลื่นมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 3 และ 4 มิลลิเมตร ส่วนหน้าตัดท้องน้ำมีความผิดพลาดเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ [18]

Ibáñez, et al. (2006) ศึกษาการประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพ ในการตรวจวัดข้อมูลคลื่นในรางจำลองคลื่น โดยใช้กล้องวิดีโอที่มีความถี่ 25 เฟรมต่อวินาที บันทึกระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา แล้วแปลงข้อมูลวิดีโอเป็นภาพเพื่อใช้ในการประมวลผลผ่านอัลกอริทึมด้วยโปรแกรม C++ และ Open CV ซึ่งเมื่อนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากเครื่องมือวัดคลื่นชนิดตัวเก็บประจุ (Capacitance wave gauge) ที่มีความถี่การเก็บวัด 30 เฮิร์ต พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R square) เท่ากับ 0.994 [19] Iglesias, et al. (2009) ประยุกต์ใช้เทคนิคคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer vision) ภายใต้การประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพ เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของคลื่นปกติ (Regular wave) และคลื่นไม่ปกติ (Irregular wave) ผ่านท่อนลายน้แบบ Oil boom ในรางจำลองคลื่น ซึ่งเมื่อนำข้อมูลคลื่นที่ตรวจวัดได้จากวิธีการประมวลผลด้วยภาพเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดคลื่นแบบดั้งเดิม พบว่าข้อมูลทั้งสองมีความสอดคล้องกันอย่างมาก โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R square) สูงถึง 0.997 และมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (Mean square error) เพียง 0.000027 อีกทั้งวิธีดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้วิเคราะห์ข้อมูลคลื่นได้ที่ละหลายๆ จุดพร้อมกันด้วย [20] Wang, et al. (2012) ศึกษาการประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพและประยุกต์ใช้กล้อง CCD (Charge couple device camera) ในการเก็บวัดข้อมูลในรางจำลองคลื่น (Wave flume) โดยทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของท้องน้ำ (Sea bed) และรูปแบบของคลื่น (Wave form) จากกล้อง CCD และ เครื่องมือวัดคลื่นแบบดั้งเดิม พบว่ามีรากของค่าผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square error) น้อยกว่า 1 มิลลิเมตร [21]

จากการทดลองข้างต้นทำให้เกิดแรงจูงใจในการศึกษาและพัฒนาแนวทางการตรวจวัดคลื่นในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ เพื่อเสนอทางเลือกสำหรับการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงระดับผิวน้ำ โดยใช้วิธีการประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพ ด้วยเทคนิคการหาขอบของภาพ (Edge detection) และพัฒนาอัลกอริทึมการเทียบค่าระดับผิวน้ำจากโปรแกรม Matlab

2. หลักการประมวลผลภาพ

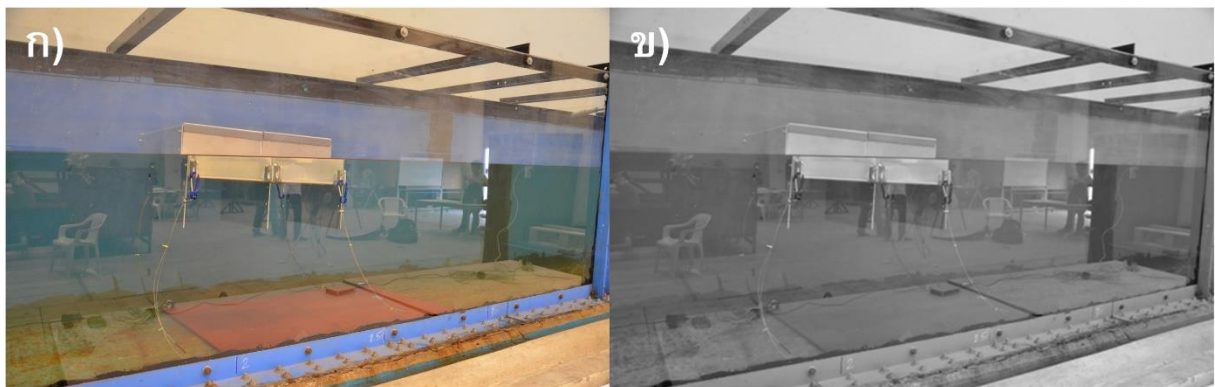
ภาพ (Image) เกิดจากจุดสีจำนวนมากที่มีหน่วยนับเป็นพิกเซล (pixel) เรียงต่อกันทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ ดังรูปที่ 1 สามารถบ่งบอกถึงเนื้อหาของภาพนั้นๆ ได้ ซึ่งมุมมองของมนุษย์จะเข้าใจเนื้อหาจากภาพด้วยความพึงพอใจ ความน่าสนใจและความรู้สึกจากภาพ แต่ในทางกลับกันคอมพิวเตอร์จะรับรู้ข้อมูลภาพในรูปแบบดิจิทัลเป็นเพียงจุดสีหลายๆ จุดที่เรียงต่อกัน โดยในทางทฤษฎีนั้น คือ พังก์ชัน 2 มิติของค่าความเข้มของแสงหรือ $F(x,y)$ โดยค่า x และ y จะระบุตำแหน่งในระบบพิกัดฉาก ซึ่งแต่ละตำแหน่งจะมีสัดส่วนความสว่างของแสงที่แตกต่างกันไป ลักษณะทั่วไปของข้อมูลภาพจะมีการกำหนดตำแหน่งเหมือนเมตริกโดยมีจำนวนคอลัมน์ (Column) และแถว (Row) แทนจำนวนจุดภาพในภาพนั้นๆ [9-10, 22]



รูปที่ 1 จุดสีที่รวมกันเป็นภาพ ก) ภาพถ่ายปกติ และ ข) ภาพที่ประกอบจากจุดสีจำนวนมาก

2.1 การแปลงภาพสีเป็นภาพระดับเทา

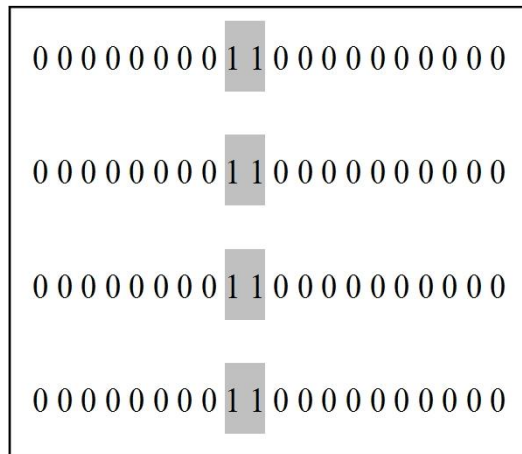
ภาพสี (RGB image) ประกอบด้วยแม่สีหลัก ได้แก่ สีแดง (Red) เขียว (Green) และน้ำเงิน (Blue) ทำให้ในการวิเคราะห์ข้อมูลภาพสีด้วยการประมวลผลด้วยภาพมีความยุ่งยากและซับซ้อน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของแสงจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลักของแม่สีทั้งสาม ดังนั้นจึงแปลงภาพสี (RGB image) เป็นภาพระดับเทา (Gray scale image) กล่าวคือ จุดสี (Pixel) แต่ละจุดจะมีสีระดับเทาที่มีค่าความสว่างมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 255 ดังตัวอย่างในรูปที่ 2 ซึ่งจะช่วยให้การประมวลผลง่ายและสะดวกมากขึ้น [9]



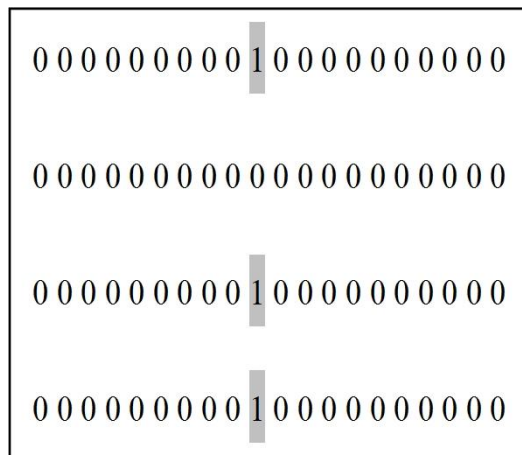
รูปที่ 2 การแปลงภาพสีเป็นภาพระดับเทา ก) ภาพถ่ายสี และ ข) ภาพระดับเทา

2.2 การแปลงภาพให้เป็นภาพลักษณะฐานสอง

ภาพลักษณะฐานสอง (Binary image) คือ ภาพที่ทุกตำแหน่งในจุดภาพ (Pixel) แบ่งเป็น 2 ส่วนหลักคือ จุดภาพที่เราสนใจ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 และให้จุดภาพที่เป็นพื้นหลังมีค่าเท่ากับ 0 โดยการแปลงภาพดังกล่าวนิยมใช้การแบ่งด้วยค่าแบ่งขีด (Thresholding) เพื่อคัดแยกบริเวณที่สนใจออกจากพื้นหลัง กล่าวคือ จุดภาพที่มีค่าระดับความเข้มสูงกว่าค่าแบ่งขีดจะเป็นจุดภาพในบริเวณที่เราสนใจหรือขอบภาพนั่นเอง ส่วนจุดอื่นๆ ที่เหลือหรือจุดภาพที่มีค่าระดับความเข้มน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าแบ่งขีดจะเป็นจุดภาพพื้นหลัง แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3 และ 4



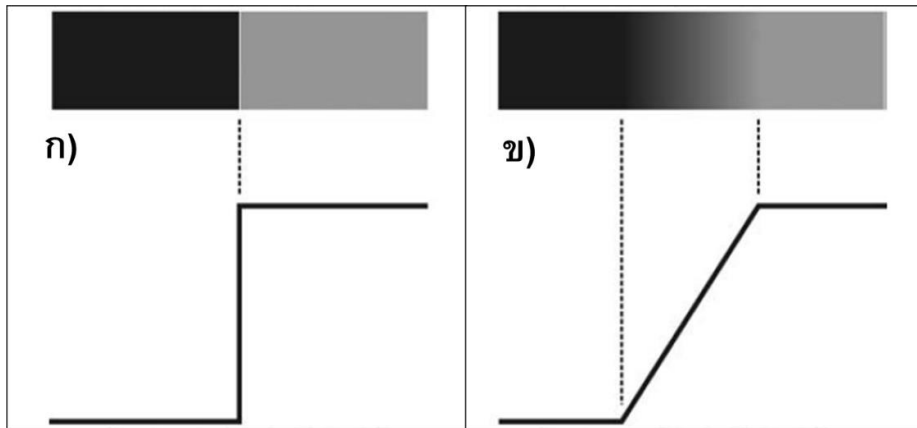
รูปที่ 3 ขอบภาพที่มีความหนากว้าง 2 จุดภาพ และมีความต่อเนื่อง



รูปที่ 4 ขอบภาพที่มีความหนากว้าง 1 จุดภาพ และไม่มีต่อเนื่อง

2.3 หลักการหาขอบของภาพ

ขอบภาพเกิดจากความแตกต่างกันระหว่างขอบเขตภาพ ซึ่งหากความแตกต่างของความเข้มของจุดภาพใดๆ และตำแหน่งใกล้เคียงมีค่ามากก็จะทำให้เห็นขอบภาพชัดเจน ซึ่งรูปแบบขอบภาพที่ปรากฏทั่วไปในรูปภาพจะประกอบด้วย 2 ลักษณะหลัก คือ ขอบภาพที่เปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดหรือขอบเขตภาพในอุดมคติมักเกิดจากภาพที่มนุษย์จำลองขึ้นและขอบภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มทีละน้อย ดังแสดงในรูปที่ 5 [9-11] โดยทั่วไปลักษณะขอบภาพที่ดีจะต้องมีลักษณะดังนี้ กล่าวคือ 1) ขอบภาพมีความบาง กล่าวคือ ขอบภาพควรมีความกว้างเพียง 1 จุดสี 2) ขอบภาพมีความต่อเนื่อง ไม่ขาดช่วงหรือมีสัญญาณรบกวนน้อยมาก และ 3) ตำแหน่งของจุดที่เป็นขอบภาพมีความถูกต้อง ชัดเจน



รูปที่ 5 ลักษณะของขอบภาพ [9-11] ก) ขอบภาพในอุดมคติ และ ข) ขอบภาพที่เกิดขึ้นจริง

2.4 วิธีการหาขอบภาพแบบแคนนี่

วิธีการหาขอบภาพแบบแคนนี่ (Canny edge detection) เป็นหนึ่งในอัลกอริทึมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพในการประมวลผลสูง คิดค้นโดย John Canny ในปีคริสต์ศักราช 1986 โดยมีแนวคิดการออกแบบอัลกอริทึมในการประมวลผลดังนี้ [11,12]

1. ให้การตรวจสอบขอบภาพมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุด ด้วยการกรองสัญญาณรบกวนภาพออกก่อนการประมวลผลด้วยตัวกรองเกาส์เซียน (Gaussian filter)

2. ให้ตำแหน่งขอบภาพมีความถูกต้องและแม่นยำ กล่าวคือ ตำแหน่งขอบภาพจริงกับขอบภาพที่ได้จากการประมวลผลมีความแตกต่างน้อยมาก

3. ขอบภาพที่ได้มีความบางกล่าวคือขอบภาพมีความกว้างเท่ากับ 1 – 2 จุดภาพจะทำให้ค่าที่ได้จากการประมวลผลถูกต้องชัดเจนมากขึ้น

วิธีการหาขอบภาพแบบแคนนี่ มีขั้นตอนการทำงาน แบ่งเป็น 4 ขั้นตอนหลัก [9,10] ดังนี้

1. การปรับภาพให้เรียบ (Smoothing) ด้วยการใส่ตัวกรองเกาส์เซียน (Gaussian filter) เพื่อลดสัญญาณรบกวน (Noise)

2. คัดเลือกตำแหน่งที่มีโอกาสเป็นขอบภาพ (Edge) หลังจากนั้นคำนวณค่าของขนาด (Magnitude) และทิศทาง (Direction) ของเกรเดียนต์ (Gradient) โดยใช้การหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง

3. ทำขอบภาพให้บางลง โดยใช้วิธี Non-maximum suppression ด้วยการหาตำแหน่งขอบภาพที่ให้ค่าสูงสุดเฉพาะที่และมีทิศทางเดียวกับเกรเดียนต์ (Gradient)

4. ระบุจุดสี (Pixel) ที่เป็นตำแหน่งขอบภาพและทำการเชื่อมขอบภาพ ด้วยการใช้ Hysteresis thresholding

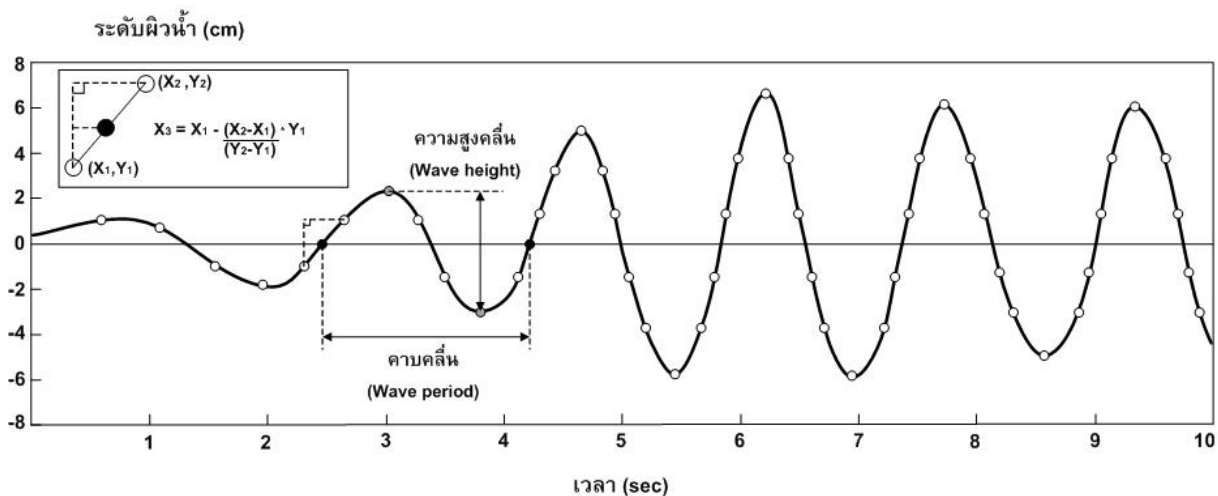
3. การวิเคราะห์คลื่นน้ำตัวแทน

คลื่นน้ำมีลักษณะและกระบวนการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นการใช้หลักการทางสถิติจะช่วยให้การวิเคราะห์คลื่นตัวแทนได้ง่ายและถูกต้องมากขึ้น โดยวิธีการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของคลื่นที่สำคัญ ได้แก่ ความสูงและคาบคลื่น จากความสัมพันธ์ของระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา ณ ตำแหน่งใดๆ เพื่อใช้เป็นตัวแทนคลื่นมี 2 วิธีหลัก คือ วิธี Zero-up

crossing และวิธี Zero-down crossing โดยทั้งสองวิธีมีกระบวนการวิเคราะห์ที่คล้ายคลึงกันและสามารถใช้แทนกันได้ [2,23] โดยการศึกษาครั้งนี้จะเลือกใช้วิธีการหาตัวแทนคลื่นแบบ Zero-up crossing โดยที่หลังจากขั้นตอนการประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพจะได้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำเทียบกับเวลา ณ ตำแหน่งนั้นๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 6 ในการวิเคราะห์มีขั้นตอน ดังนี้

1. กำหนดจุดที่ระดับน้ำเคลื่อนจากตำแหน่งที่ค่าระดับน้ำน้อยกว่าระดับอ้างอิง ผ่านจุดอ้างอิงขึ้นไปสู่ตำแหน่งที่ค่าระดับน้ำมากกว่าระดับอ้างอิง โดยกำหนดจุดที่บีสค่า 2 จุดเป็นจุด Zero-up crossing
2. หาค่าความสูงคลื่น โดยพิจารณาจากค่าความแตกต่างของระดับน้ำสูงสุดที่อยู่ระหว่างจุด Zero-up crossing ทั้งสองจุดที่ติดกัน
3. หาค่าคาบคลื่น โดยพิจารณาจากช่วงเวลาระหว่างจุด Zero-up crossing ทั้งสองจุดที่ติดกัน

ในกรณีที่ข้อมูลระดับน้ำที่ตรวจวัดไม่ได้อยู่ในตำแหน่งระดับอ้างอิงพอดี ให้นำข้อมูลที่อยู่ด้านบนและล่างตำแหน่งระดับศูนย์หรืออ้างอิงที่สุด มาคำนวณหาจุด Zero-up crossing ด้วยความสัมพันธ์ของสามเหลี่ยมคล้าย ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การวิเคราะห์คลื่นด้วยวิธี Zero-up crossing

ในการคำนวณหาความสูงคลื่นและคาบคลื่นที่จะใช้เป็นตัวแทนของกลุ่มคลื่นนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แสดงในตารางที่ 1 สำหรับการศึกษานี้เลือกใช้ตัวแทนคลื่นเฉลี่ยซึ่งจะเป็นตัวแทนที่ดีที่สุดสำหรับกรณีคลื่นแบบปกติ (Regular wave) [24]

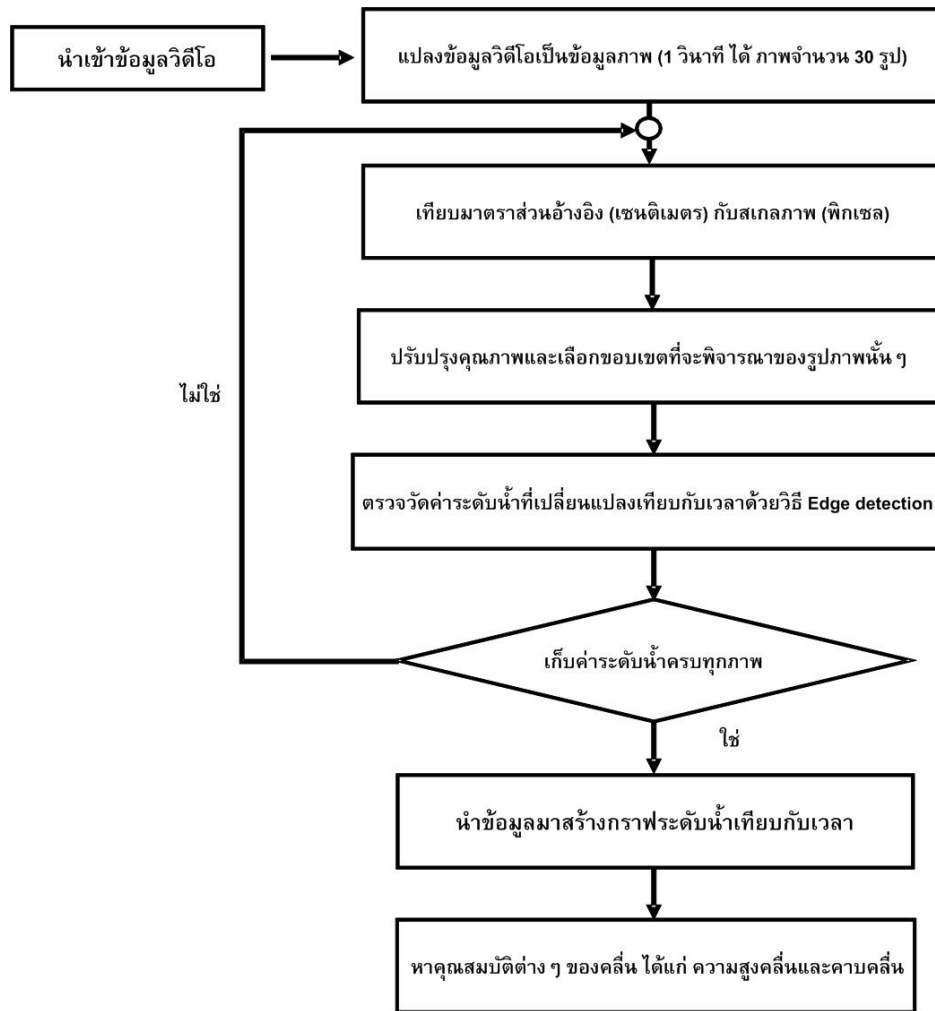
ตารางที่ 1 ชนิดของความสูงคลื่นและคาบคลื่นตัวแทน

ชนิดของคลื่นตัวแทน (Representative wave)	สัญลักษณ์	คำอธิบาย
1. คลื่นสูงสุด (Highest wave)	H_{max}	คลื่นที่สูงสุดในจำนวนข้อมูลคลื่นทั้งหมด
	T_{max}	คาบคลื่นที่ยาวนานที่สุดในจำนวนข้อมูลคลื่นทั้งหมด
2. คลื่นเฉลี่ย (Mean wave)	\bar{H} หรือ H_{avg}	ค่าเฉลี่ยของความสูงคลื่นทั้งหมดที่ได้จากการตรวจวัด
	\bar{T} หรือ T_{avg}	ค่าเฉลี่ยของคาบคลื่นทั้งหมดที่ได้จากการตรวจวัด
3. คลื่นสูงสุด 1 ใน 10 (Highest one-tenth wave)	$H_{1/10}$	ค่าเฉลี่ยของความสูงคลื่นที่อยู่ในกลุ่มที่สูงเป็น 1 ใน 10 ของจำนวนข้อมูลคลื่นทั้งหมดที่ได้จากการตรวจวัด
	$T_{1/10}$	ค่าเฉลี่ยของคาบคลื่นที่อยู่ในกลุ่มที่สูงเป็น 1 ใน 10 ของจำนวนข้อมูลคลื่นทั้งหมดที่ได้จากการตรวจวัด
4. คลื่นนัยสำคัญ (Significant wave)	$H_{1/3}$ หรือ H_s	ค่าเฉลี่ยของความสูงคลื่นที่อยู่ในกลุ่มที่สูงเป็น 1 ใน 3 ของจำนวนข้อมูลคลื่นทั้งหมดที่ได้จากการตรวจวัด
	$T_{1/3}$ หรือ T_s	ค่าเฉลี่ยของคาบคลื่นที่อยู่ในกลุ่มที่สูงเป็น 1 ใน 3 ของจำนวนข้อมูลคลื่นทั้งหมดที่ได้จากการตรวจวัด

4. การประยุกต์ใช้วิธีการประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพในการตรวจวัดระดับผิวน้ำ

4.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การเก็บวัดข้อมูลคลื่นในการทดลองได้ใช้กล้องดิจิทัลความละเอียดสูงที่มีความถี่ 30 เฟรมต่อวินาที ในการบันทึกวิดีโอการเคลื่อนที่ของคลื่นเทียบกับเวลา ณ ตำแหน่งตรวจวัดค่าในแนวด้านข้างของรางจำลองคลื่น หลังจากนั้นจึงนำวิดีโอที่บันทึกได้มาสู่กระบวนการประมวลผลและวิเคราะห์ผลภาพ ตามขั้นตอนดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ขั้นตอนการดำเนินงาน

4.2 ขั้นตอนเชิงอัลกอริทึม

คลื่นในรางจำลองคลื่นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำเทียบกับเวลา ดังนั้นจึงใช้แนวคิดการออกแบบอัลกอริทึมซึ่งเป็นกระบวนการเชิงตรรกะ เพื่อตรวจวัดคลื่นด้วยการหาขอบของรูปภาพระดับผิวน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ในการศึกษาครั้งนี้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการออกแบบอัลกอริทึม ภายใต้ข้อจำกัดการตรวจวัดค่าในแนวด้านข้าง หรือในแนวแกน XZ เมื่อ แกน X คือ แกนในแนวราบ และ แกน Z คือ แกนในแนวดิ่ง โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนการประมวลผล ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: กำหนดขนาดมาตราส่วนจริงเทียบกับมาตราส่วนในภาพด้วยไม้วัดสเกลที่มีระดับอ้างอิง เพื่อใช้เป็นอัตราส่วนในการคำนวณหาระยะจริงจากภาพ เช่น ระยะจริง 10 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 25 พิกเซลในรูปภาพ เป็นต้น ดังรูปที่ 8

```

ref_elev_cm = 10;
ref_elev_pix = 25;
    
```

รูปที่ 8 ขั้นตอนเชิงอัลกอริทึมขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 2: นำเข้าไฟล์ข้อมูลวิดีโอที่บันทึกการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำเทียบกับเวลา ณ ตำแหน่งตรวจวัดข้อมูลคลื่น ดังรูปที่ 9

```
obj = mmreader('wave03.avi');  
vid = read(obj);  
frames = obj.NumberOfFrames;  
ST='.jpg';
```

รูปที่ 9 ขั้นตอนเชิงอัลกอริทึมขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 3: ทำการแปลงไฟล์วิดีโอที่นำเข้าเป็นรูปภาพและทำการเก็บข้อมูลรูปภาพดังกล่าว โดย 1 วินาทีจะได้รูปภาพจำนวน 30 รูป เช่น ไฟล์วิดีโอ 1 นาที จะถูกแปลงเป็นรูปภาพเท่ากับ 1,800 รูป เป็นต้น ดังรูปที่ 10

```
for frameID = 1:frames,  
    Sx=num2str(frameID);  
    Strc=strcat(Sx,ST);  
    Vid=vid(:,:, :, frameID);  
    imwrite(Vid,Strc);  
end
```

รูปที่ 10 ขั้นตอนเชิงอัลกอริทึมขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 4: กำหนดขอบเขตในรูปภาพด้วยการใช้คำสั่งตัดภาพ เพื่อลดเวลาในการประมวลผลข้อมูลที่ไม่จำเป็น อีกทั้งยังเป็นการลดค่าความผิดพลาดจากความบิดเบี้ยวของเลนส์ด้วย ดังรูปที่ 11

```
Im2 = imcrop(Vid, [180, 240, 240, 90]);
```

รูปที่ 11 ขั้นตอนเชิงอัลกอริทึมขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 5: ทำการเปลี่ยนสีรูปภาพจากภาพสีให้เป็นภาพขาวดำ เพื่อให้ง่ายต่อการประมวลผล หลังจากนั้นกำหนดขนาดภาพขาวดำดังกล่าว ดังรูปที่ 12

```
ImGray = rgb2gray(Im2);  
[nr,nc] = size(ImGray);
```

รูปที่ 12 ขั้นตอนเชิงอัลกอริทึมขั้นตอนที่ 5

ขั้นตอนที่ 6: ทำการวิเคราะห์รูปภาพด้วยวิธีการหาขอบของภาพ (Edge detection) ดังรูปที่ 13

```
threshold = [0.1, 0.6];  
bw_ed = edge(ImGray, 'canny', threshold, sigma);
```

รูปที่ 13 ขั้นตอนเชิงอัลกอริทึมขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนที่ 7: แสดงผลภาพขาวดำและภาพที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการหาขอบของภาพ (Edge detection) เพื่อเปรียบเทียบการประมวลผลด้วยภาพ ดังรูปที่ 14

```
figure  
imshow(ImGray)  
hold on  
figure  
imshow(bw_ed)  
hold on
```

รูปที่ 14 ขั้นตอนเชิงอัลกอริทึมขั้นตอนที่ 7

ขั้นตอนที่ 8: นำข้อมูลที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการหาขอบของภาพ (Edge detection) มาประมวลผลต่อ เพื่อแสดงผลเป็นระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาโดยมีตัวอย่างอัลกอริทึม ดังรูปที่ 15

```
y_first_edge = -1;  
for y=nr:-1:1,  
    if bw_ed(y,measure_x_point) == 1,  
        y_first_edge = y;  
        break;  
    end  
end  
  
if y_first_edge == -1,  
    %disp('Error at frame# ');frameID  
    fprintf('Error at frame# %d\n', frameID);  
    water_elev_cm = -1;  
    error_img = [error_img; frameID];  
else  
    water_elev_cm = (nr-y)*ref_elev_cm/ref_elev_pix;  
end
```

รูปที่ 15 ขั้นตอนเชิงอัลกอริทึมขั้นตอนที่ 8

5. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

5.1 การทดลองในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์

การประยุกต์ใช้วิธีการประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพ สำหรับการวัดคลื่นในรางจำลองคลื่นจำเป็นต้องมีการปรับเทียบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำของกระบวนการดังกล่าว โดยทำการทดลองและเปรียบเทียบข้อมูลคลื่นที่เก็บวัดจากวิธีการ

ประมวลผลด้วยภาพ โดยกล้องวิดีโอ (Video camera) กับเครื่องมือวัดคลื่น (Wave gauge) ที่มีความถี่ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 30 และ 50 เฮิร์ต ตามลำดับ ณ ห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับรายละเอียดของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

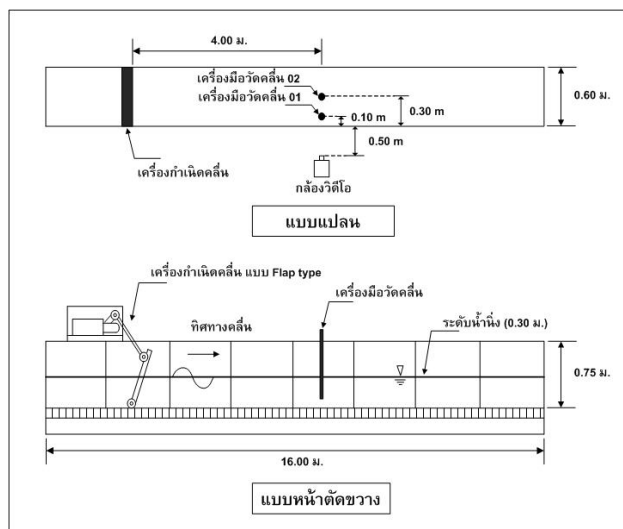
1. รางจำลองคลื่น (Wave flume) เป็นเครื่องมือที่ใช้จำลองการไหลและศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำ ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการไหลของน้ำและปรับความลาดชันของพื้นรางได้ โดยมีขนาดกว้าง 0.60 เมตร ยาว 18 เมตร และสูง 0.75 เมตร โดยเครื่องกำเนิดคลื่นควบคุมผ่านมอเตอร์ AC ที่ความถี่ที่และสามารถปรับระยะชักของกระดานผลักน้ำได้ในช่วงระหว่าง 1-10 เซนติเมตร

2. เครื่องมือวัดคลื่น (Wave gauge) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำเทียบกับเวลา ณ ตำแหน่งตรวจวัด โดยใช้หลักการวัดความจุไฟฟ้าบนเส้นลวดรับสัญญาณ (Capacitance wire) ที่เปลี่ยนแปลงตามระดับน้ำแล้วส่งสัญญาณไปยังเครื่องแสดงผลให้แปลงค่าสัญญาณเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) ซึ่งสามารถส่งสัญญาณไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ เพื่อบันทึกและประมวลผลข้อมูลผ่านโปรแกรม LabVIEW โดยช่วงข้อมูลค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เครื่องมือทำการประมวลผลได้อยู่ที่ระหว่าง ± 2.5 โวลต์

3. ระบบกล้องบันทึกข้อมูล (Video recording systems) ประกอบด้วยกล้องบันทึกผลยี่ห้อ AVTECH IP Camera มีความละเอียด 1280 x 720 pixel (HD) ความถี่ของจำนวนภาพเท่ากับ 30 เฟรมต่อวินาที และกล้องบันทึกข้อมูล Server AVTECH รุ่น AVH 306 HDD 2 Terabyte สามารถเชื่อมต่อกล้องได้สูงสุด 6 ตัว และรองรับการส่งผ่านข้อมูลแบบ USB port

เครื่องมือวัดคลื่น (Capacitance wave gauge) จำนวน 2 ตัว ได้แก่ WG01 และ WG02 ได้ถูกติดตั้งห่างจากเครื่องกำเนิดคลื่น (Wave generator) เป็นระยะ 4 เมตร โดยเครื่องมือวัดคลื่น WG01 และ WG02 วางห่างจากผนังรางจำลองคลื่นเท่ากับ 10 และ 30 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนกล้องบันทึกผลติดตั้งห่างจากผนังรางจำลองคลื่นด้านนอกเท่ากับ 50 เซนติเมตร รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 16

โดยข้อมูลจากการทดลองนั้นจะแสดงผลเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) ที่แปรเปลี่ยนตามเวลา การพิจารณาค่าระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาทำได้โดยการนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคูณกับค่าปรับแก้สัญญาณ (WG01 และ WG02 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 11.845 และ 11.699 เซนติเมตรต่อโวลต์ ตามลำดับ)



รูปที่ 16 รายละเอียดการทดลองในรางจำลองคลื่น

5.2 การลดสัญญาณรบกวนของภาพ

ปัญหาหลักของการประมวลผลด้วยภาพ คือ การพบสัญญาณรบกวนในภาพ (Image noise) เช่น ความแตกต่างของปริมาณแสง เงาสะท้อนและการรบกวนจากสิ่งภายนอก เป็นต้น สถานะดังกล่าวจะทำให้ภาพหยาบหรือมีความคมชัดลดลง ซึ่งส่งผลกระทบต่อความถูกต้องและแม่นยำในการวิเคราะห์ข้อมูลภาพ

การศึกษาครั้งนี้ทำการตรวจวัดข้อมูลคลื่นด้วยกล้องความละเอียดสูง ณ ห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ โดยติดตั้งกล้องห่างจากผนังรางจำลองคลื่นที่ทำจากแผ่นอะคริลิกใส เป็นระยะ 0.50 เมตร ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบผนังราง ซึ่งระยะดังกล่าวเป็นระยะที่เหมาะสมและครอบคลุมพื้นที่ตรวจวัดคลื่น กล่าวคือ หากติดตั้งห่างกว่าระยะ 0.50 เมตร จะมีภาพส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องติดอยู่ในเฟรมภาพ เมื่อติดตั้งใกล้เกินไปก็ส่งผลกระทบต่อความบิดเบี้ยวของเลนส์กล้องและไม่สามารถสังเกตภาพรวมการเคลื่อนที่ของคลื่นได้ จากการทดลองพบว่า ภาพที่ได้จากการเก็บวัดข้อมูลคลื่นมีสัญญาณรบกวน (Noise) ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากเงาสะท้อนและเมื่อนำภาพที่มีสัญญาณรบกวนไปประมวลผลด้วยวิธีการหาขอบของภาพ (Edge detection method) สังเกตพบว่าเส้นขอบพิกเซลในภาพไม่ราบเรียบ เกิดการขาดช่วงและไม่ต่อเนื่อง รวมถึงมีเส้นขอบที่เกิดจากเงาของวัตถุที่สะท้อนอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 17 และ 18 ดังนั้นในการทดลองจะใช้ฉากกันสะท้อนที่มีสีขาวทึบ วางไว้ด้านหลังตำแหน่งติดตั้งกล้องเพื่อลดสัญญาณรบกวนในภาพ และมีการควบคุมปริมาณแสงในบริเวณติดตั้งกล้องให้สม่ำเสมอด้วย ซึ่งพบว่า การประมวลผลด้วยภาพจากวิธีการหาขอบของพิกเซลมีประสิทธิภาพมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 19



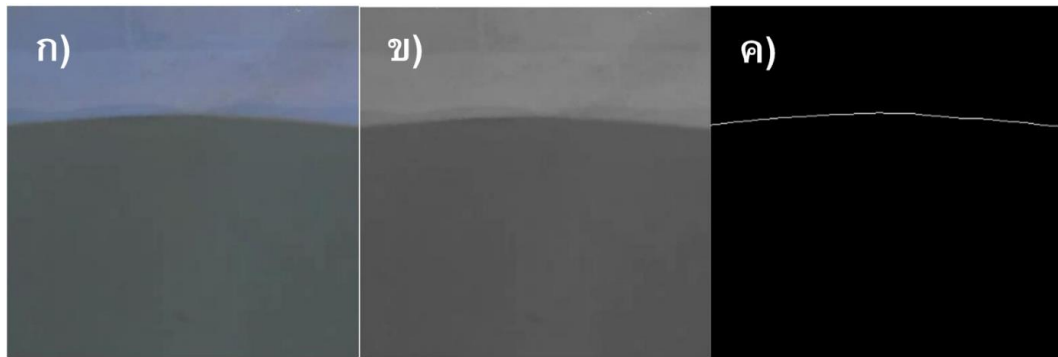
ก) ภาพสี ข) ภาพระดับเทา ค) ผลที่ได้จากการหาขอบภาพ

รูปที่ 17 ตัวอย่างขอบภาพที่ได้กรณีมีสัญญาณรบกวนที่ 1



ก) ภาพสี ข) ภาพระดับเทา ค) ผลที่ได้จากการหาขอบภาพ

รูปที่ 18 ตัวอย่างขอบภาพที่ได้กรณีมีสัญญาณรบกวนที่ 2



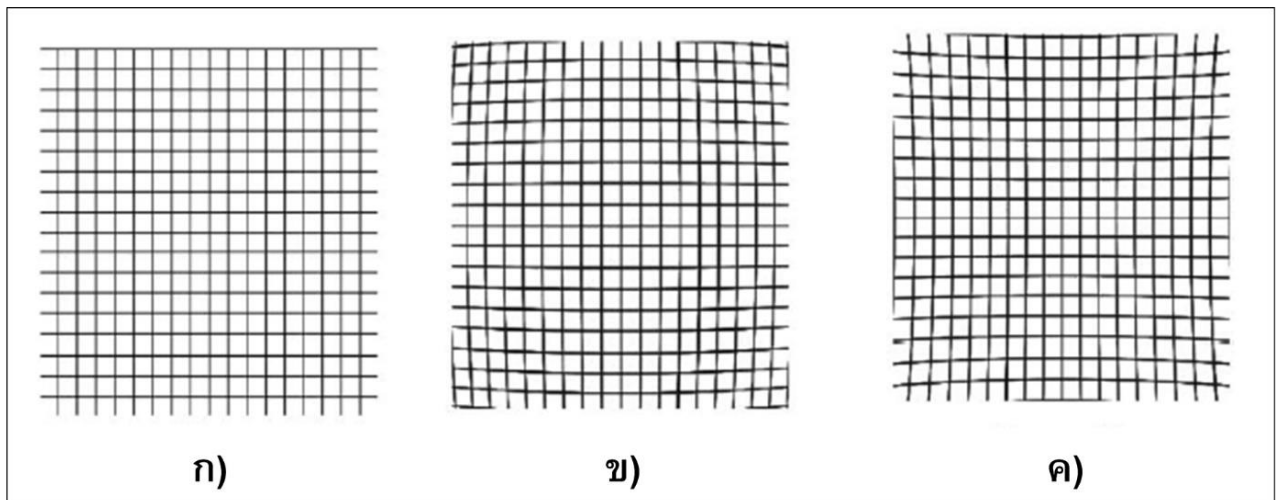
ก) ภาพสี ข) ภาพระดับเทา ค) ผลที่ได้จากการหาขอบภาพ

รูปที่ 19 ตัวอย่างขอบภาพที่ได้กรณีไม่มีสัญญาณรบกวน

5.3 การปรับแก้ความโค้งของภาพจากความบิดเบี้ยวของเลนส์

กล้องดิจิทัลหรือกล้องบันทึกข้อมูลโดยทั่วไป ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักได้แก่ เลนส์ (Lens) ตัวรับสัญญาณ (Sensor) และ กลไกการบันทึกข้อมูล (Recording mechanism) ซึ่งข้อมูลภาพหรือวิดีโอจะถูกส่งผ่านเลนส์กล้องเข้าสู่ตัวรับสัญญาณภายในกล้องด้วยความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน หลังจากนั้นสัญญาณดังกล่าวจะถูกประมวลผลเป็นข้อมูลภาพหรือวิดีโอ [18]

ความบิดเบี้ยวของเลนส์ (Lens distortion) เป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดกับกล้อง เนื่องจากความแตกต่างของการขยายภาพ ณ จุดต่างๆ บนภาพ โดยเฉพาะบริเวณขอบภาพทั้ง 4 ด้าน กล่าวคือ เส้นตรงในภาพจริงเปลี่ยนเป็นเส้น โค้งในภาพถ่ายจากกล้อง รูปแบบการบิดเบี้ยวของเลนส์มี 2 ชนิดคือ การบิดเบี้ยวแบบนูนเข้าสู่ศูนย์กลาง (Barrel distortion) และการบิดเบี้ยวแบบเว้าเข้าสู่ศูนย์กลาง (Pincushion distortion) ดังแสดงในรูปที่ 20 ดังนั้นการการปรับแก้ความบิดเบี้ยวของเลนส์ที่เป็นหนึ่งในสามส่วนประกอบหลักของกล้องจึงมีความสำคัญและจำเป็นต่อการประมวลผลด้วยภาพ [18]



ก) มุมมองภาพปกติ ข) การบิดเบี้ยวของภาพแบบที่เส้นตั้งนูนออก (Barrel distortion)

ค) การบิดเบี้ยวของภาพแบบที่เส้นตั้งลู่เข้าตรงกลาง (Pincushion distortion)

รูปที่ 20 การ โค้งของภาพจากการบิดเบี้ยวของเลนส์ [18]

ในการศึกษาและประยุกต์ใช้การประมวลผลด้วยภาพในรางจำลองคลื่นครั้งนี้ พบว่ามีแนวทางการปรับแก้ความโค้งของภาพจากความบิดเบี้ยวของเลนส์เพื่อความถูกต้องของข้อมูลคลื่นประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้

1. ตัดตั้งกล้องบันทึกข้อมูลให้อยู่ในแนวเดียวกับเส้นระดับน้ำนิ่งในรางจำลองคลื่น รวมถึงควบคุมระดับกล้องทั้งในแนวตั้งแนวราบและมุมเอียงด้วยตัววัดระดับน้ำ
2. ใช้ตารางกริดที่ทำจากแผ่นอะคริลิกใส ที่มีขนาดกริด เท่ากับ 2×2 เซนติเมตร ตรวจสอบความบิดเบี้ยวของเลนส์ก่อนทำการทดลอง ด้วยการนำภาพมาคำนวณความแตกต่างของจำนวนจุดภาพในแต่ละกริด
3. ออกแบบอัลกอริทึมในการประมวลผลด้วยภาพให้กำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ภาพเฉพาะตรงกลาง เนื่องจากบริเวณกลางภาพจะมีค่าความบิดเบี้ยวของเลนส์น้อยกว่าร้อยละ 1 หรือคิดเป็นจำนวน $1 - 3$ pixel [18]

5.4 การเปรียบเทียบวิธีการประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพ

การเปรียบเทียบวิธีการประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพของ 5 กรณีศึกษาคลื่นปกติ (Regular wave) ระหว่างการตรวจวัดด้วยกล้องวิดีโอ (Video camera) และเครื่องมือวัดคลื่น (Wave gauge) ทำโดยการเปรียบเทียบคุณลักษณะคลื่นปกติ ได้แก่ ความสูงคลื่นและคาบคลื่น พบว่าค่าความสูงคลื่นเฉลี่ยและคาบคลื่นเฉลี่ยที่ตรวจวัดด้วยวิธีการประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพด้วยความถี่ 30 Hz มีค่าความแตกต่างน้อยกว่าร้อยละ 9.26 และ 0.49 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดคลื่น (Capacitance wave gauge, 50 Hz) ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยช่วงค่าความผิดพลาดของความสูงคลื่นอยู่ในเกณฑ์เดียวกับการทดลองของ [13] ที่ระบุว่าคลื่นที่มีความสูงน้อยกว่า 10 เซนติเมตร จะให้ผลลัพธ์คลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ผลด้วยภาพน้อยกว่าร้อยละ 9.70

เมื่อพิจารณาผลการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ของระดับผิวน้ำเทียบกับเวลาทั้ง 2 วิธีมีความแตกต่างกันบางช่วง กล่าวคือ ณ วินาทีที่ 1 - 3 และ วินาทีที่ 11 - 15 ของกราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 21 และ 22 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าความผิดพลาดระหว่างการตรวจวัดจากวิธีการประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพน้อยกว่าเครื่องมือวัดคลื่นสูงสุดเท่ากับ 0.50 และ 1.00 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับการทดลองของ [18] ที่ได้ค่าความแตกต่างสูงสุดถึง 1.30 เซนติเมตร นอกจากนี้ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของชุดข้อมูลอาจมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. ตำแหน่งตรวจวัดคลื่น กล่าวคือ เครื่องมือวัดคลื่นแบบดั้งเดิม (Wave gauge) ตรวจวัดด้านในรางจำลองคลื่นทั้ง 2 ตัว ณ ตำแหน่งห่างจากผนังรางจำลองคลื่นเท่ากับ 10 และ 30 เซนติเมตร ตามลำดับ ในขณะที่กล้องวิดีโอตรวจวัดคลื่นด้านนอกรางจำลองคลื่นและห่างจากผนังรางเท่ากับ 50 เซนติเมตร ดังรูปที่ 16 แต่อย่างไรก็ตามตำแหน่งการประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพที่ได้อยู่ในรางจำลองคลื่นบริเวณใกล้ๆ ผนังรางจำลองคลื่น ภายใต้เงื่อนไขในการทดลองของคลื่นแบบปกติ นั้น คุณลักษณะของความสูงคลื่นควรจะมีค่าใกล้เคียงกันตลอดทั้งหน้าตัดขวาง แต่อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำของเครื่องกำเนิดคลื่นและการตรวจวัดแบบรูก้ำกิดขวางของเครื่องมือวัดคลื่นดั้งเดิมอาจส่งผลต่อคุณลักษณะดังกล่าวด้วย

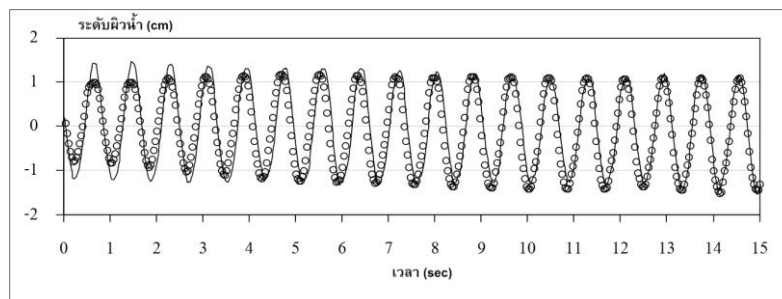
2. อัตราความถี่ที่ใช้ในการตรวจวัดคลื่น กล่าวคือ การตรวจวัดคลื่นของเครื่องมือวัดคลื่นแบบดั้งเดิมและกล้องวิดีโอใช้ความถี่เท่ากับ 30 Hz และ 50 Hz ตามลำดับ ซึ่งความถี่ที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากข้อจำกัดของเครื่องมือวัดทั้ง 2 นี้ส่งผลต่อความแปรผันของช่วงเวลาของข้อมูลทั้งสองชุด ดังนั้นการยืนยันความแม่นยำของชุดข้อมูล จะใช้ความสัมพันธ์เชิงสถิติ ได้แก่ ค่า Mean square error (MSE) ค่า Root mean square error (RMSE) และ ค่า Determination coefficient (R^2) ตามลำดับ ภายใต้การปรับแก้ข้อมูลของ

กราฟระดับการเปลี่ยนแปลงผิวน้ำเทียบกับเวลาของทั้ง 2 วิธีการตรวจวัด โดยการปรับอัตราความถี่การตรวจวัดของทั้ง 2 วิธีการให้ มีค่าเท่ากันที่ 10 Hz แสดงดังตารางที่ 2

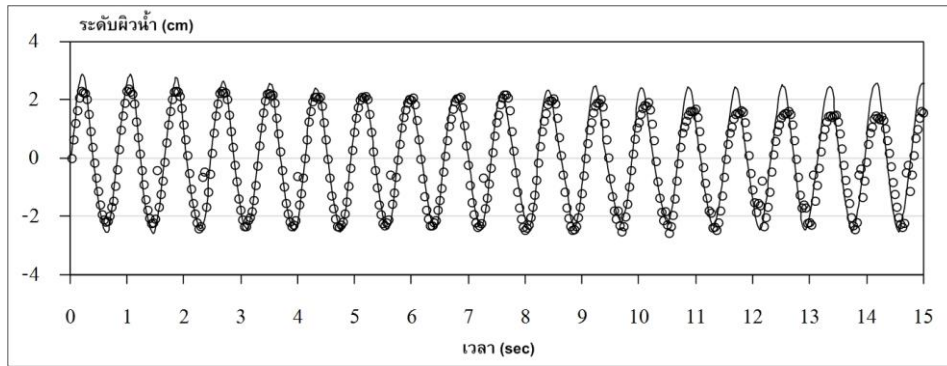
เมื่อพิจารณาข้อมูลหลังจากการปรับความถี่ให้เท่ากัน พบว่า ความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลค่อนข้างดีและมีความคลาดเคลื่อน เกิดขึ้นบางช่วงดังแสดงรูปที่ 23 โดยค่าความสอดคล้องของชุดข้อมูลมีค่ามากกว่าร้อยละ 87 ในทุกกรณี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการ ประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในรายงานจำลองคลื่นได้จริง แต่อย่างไรก็ตามการใช้คอมพิวเตอร์ประมวลผลภาพและวิเคราะห์ผลด้วยภาพสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในรายงานจำลองคลื่นได้จริง แต่อย่างไรก็ตามการใช้คอมพิวเตอร์ประมวลผลภาพและวิเคราะห์ผลด้วยภาพสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในรายงานจำลองคลื่นได้จริง แต่อย่างไรก็ตามการใช้คอมพิวเตอร์ประมวลผลภาพและวิเคราะห์ผลด้วยภาพสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในรายงานจำลองคลื่นได้จริง

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบความสูงคลื่นและคาบคลื่นเฉลี่ยจากการปรับเทียบค่า

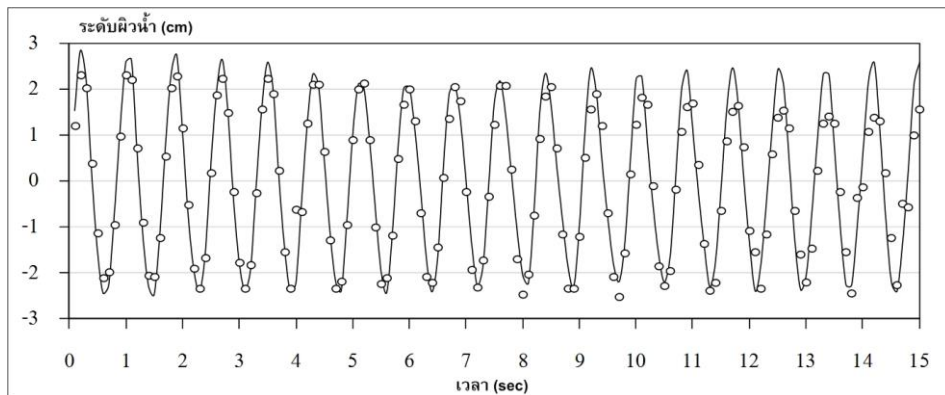
กรณีศึกษา	เครื่องมือวัดคลื่น (50 Hz)		การประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพ (30 Hz)		ความแตกต่าง (%)		การเปรียบเทียบระดับผิวน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (10 Hz)		
	H_{avg} (cm)	T_{avg} (s)	H_{avg} (cm)	T_{avg} (s)	H_{avg}	T_{avg}	MSE (cm)	RMSE (cm)	R ²
คลื่นปรับเทียบ 01 (ระยะชัก = 2 ซม.)	2.55	0.818	2.38	0.822	6.67	0.49	0.20	0.45	0.87
คลื่นปรับเทียบ 02 (ระยะชัก = 3 ซม.)	2.87	0.817	2.78	0.821	3.14	0.49	0.08	0.29	0.92
คลื่นปรับเทียบ 03 (ระยะชัก = 4 ซม.)	3.67	0.818	3.67	0.816	0.00	0.24	0.11	0.34	0.94
คลื่นปรับเทียบ 04 (ระยะชัก = 5 ซม.)	4.86	0.820	4.41	0.822	9.26	0.24	0.25	0.50	0.92
คลื่นปรับเทียบ 05 (ระยะชัก = 6 ซม.)	6.08	0.828	5.67	0.829	6.74	0.12	0.18	0.42	0.97



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเทียบกับเวลา กรณีศึกษาคลื่นปรับเทียบ 01 (เส้นทึบ คือ ข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดคลื่นแบบดั้งเดิมที่ความถี่ 50 Hz และจุดกลม คือ ข้อมูลที่ได้จากวิธีการประมวลผลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพที่ความถี่ 30 Hz)



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเทียบกับเวลา กรณีศึกษาคลื่นปรับเทียบ 04 (เส้นทึบ คือ ข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดคลื่นแบบดั้งเดิมที่มีความถี่ 50 Hz และจุดกลม คือ ข้อมูลที่ได้จากวิธีการประมวลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพที่มีความถี่ 30 Hz)



(เส้นทึบ คือ ข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดคลื่นแบบดั้งเดิมที่มีความถี่ 10 Hz และจุดกลม คือ ข้อมูลที่ได้จากวิธีการประมวลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพที่มีความถี่ 10 Hz)

รูปที่ 23 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเทียบกับเวลา กรณีศึกษาคลื่น 04

6. สรุปผลการศึกษา

การตรวจวัดระดับผิวน้ำด้วยวิธีการประมวลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพโดยใช้อัลกอริทึมหรือกระบวนการเชิงตรรกะที่มีลำดับขั้นตอนอย่างชัดเจน เพื่อใช้ในการหาขอบภาพของระดับผิวน้ำที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา จากกรณีศึกษาพบว่าค่าความแตกต่างของข้อมูลคุณลักษณะของคลื่น (ความสูงและคาบคลื่น) ที่ได้จากการปรับเทียบกับเครื่องมือวัดคลื่นแบบดั้งเดิมมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 10 (กรณีใช้ความถี่ในการตรวจวัดต่างกันที่ 30 และ 50 Hz) ในขณะที่ค่าความสัมพันธ์เชิงสถิติได้แก่ ค่า MSE และ RMSE แสดงให้เห็นว่ามีความคลาดเคลื่อนของชุดข้อมูลการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเทียบกับเวลาสูงสุดเท่ากับ 0.25 และ 0.50 cm ตามลำดับ ในขณะที่ค่า R^2 แสดงความสอดคล้องของชุดข้อมูลการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเทียบกับเวลาสูงสุดถึงร้อยละ 97 (กรณีใช้ความถี่ในการตรวจวัดเท่ากันที่ 10 Hz)

วิธีการประมวลและวิเคราะห์ผลด้วยภาพมีข้อดีเมื่อเทียบกับเครื่องมือวัดคลื่นทั่วไป ได้แก่ ความง่ายต่อการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์และมีค่าใช้จ่ายต่ำ ความยืดหยุ่นต่อการใช้งานสูงและเป็นวิธีตรวจวัดที่ไม่รบกวนต่อคลื่น โดยเครื่องมือวัดคลื่นทั่วไปมัก

เป็นแบบกีดขวางการเคลื่อนที่ของคลื่น แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมปริมาณแสงเงาสะท้อนเพื่อลดสัญญาณกวนของภาพและการปรับลดค่าความบิดเบี้ยวของเลนส์เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อความถูกต้องและแม่นยำสำหรับวิธีดังกล่าว รวมถึงข้อจำกัดในการตรวจวัดคลื่นได้เฉพาะในแนวแกน XZ หรือในแนวด้านข้างเท่านั้น

ข้อเสนอแนะจากกรณีศึกษาคือวิธีการตรวจวัดนี้ยังเป็นแนวคิดที่เป็นประโยชน์และสามารถนำไปใช้กับงานอื่นๆ ในห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ในแนวแกน XZ ได้ เช่น การหาค่าความสูงคลื่นซัด (Wave run-up) การตรวจวัดคลื่นแบบไม่ปกติ (Irregular wave) เป็นต้น นอกจากนี้วิธีการนี้ยังมีแนวโน้มที่สามารถพัฒนาต่อยอดสำหรับการตรวจวัดค่า 3 มิติ หรือในแนวแกน XYZ ได้ เช่น การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของตะกอนท้องน้ำ (Sediment transport) การประเมินอัตราการกัดเซาะชายฝั่ง (Coastal erosion) โดยใช้กล้องบันทึกวิดีโอในการตรวจวัดค่าอย่างน้อย 2-3 เครื่อง ณ เวลาเดียวกันที่ตำแหน่งครอบคลุมทั้งแนวขอบน้ำและขอบของท้องน้ำเพื่อรวบรวมค่าดังกล่าวให้ครบทั้ง 3 แนวแกน ส่วนการนำไปประยุกต์ใช้ในงานภาคสนามอื่นๆ จำเป็นต้องใช้ร่วมกับการปรับปรุงอัลกอริทึมให้สามารถประมวลผลภาพที่ได้ในกรณีทำมุมใดๆ ซึ่งไม่ได้ตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วง ด้วยการสนับสนุนจากโครงการพัฒนามหาวิทยาลัยแห่งชาติ (NRU) และ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (Contract number CE-KMUTT-FTERO 5702) ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย รวมถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ นอกจากนี้ขอขอบคุณ ผศ.ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์ และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดคลื่นและสถานที่ในการทดลอง อีกทั้ง ผศ.ดร.ธรรมนุญ รัศมีมาสเมือง และ ดร.สุพรรณิ ตะนะทอง ที่ให้ปรึกษาและคำแนะนำอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kamphuis, J.W., *Introduction to coastal engineering and management*, Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 16, World Scientific, Singapore, 2000, pp. 54-59.
- [2] Holthuijsen, L.H., *Wave in oceanic and coastal waters*, Cambridge University Press, New York, 2007, pp. 3-7, 24-29, 68-75, 118-131.
- [3] Murali, K. and Mani, J.S., Performance of cage floating breakwater, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1997, Vol. 123 (4), pp. 172-179.
- [4] Koutandos, E., Prinos, P., and Gironella, X., Floating breakwater under regular and irregular wave forcing: reflection and transmission characteristics, *Journal of Hydraulic Research*, 2005, Vol. 43 (2), pp. 174-188.
- [5] Neelamani, S. and Gayathri, T., Wave interaction with twin plate wave barrier, *Ocean Engineering*, 2006, Vol. 33, pp. 495-516.
- [6] Dong, G.H., Zheng, Y.N., Li, Y.C., Teng, B., Guan, C.T., and Lin, D.F., Experiments on wave transmission coefficients of floating breakwaters, *Ocean Engineering*, 2008, Vol. 35 (8-9), pp. 931-938.
- [7] Chuenchai, W., Pholyeam, N., Phetchawang, S., and Rasmeeasmuang, T., Wave run-up on stepped slopes, *KMUTT Research and Development Journal*, 2013, Vol. 36 (3), pp. 329 - 340 (in Thai).
- [8] Hughes, S.A., *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*, Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 7, World Scientific, Singapore, 1993, pp. 51-80.
- [9] Gonzalez, R.C. and Woods, R.E., *Digital image processing*, Prentice-Hall, New Jersey, 2002, pp. 34-51, 282-294, 567-585.
- [10] Jain, R., Kasturi, R., and Schunck, B.G., *Machine vision*, McGraw-Hill, New York, 1995 pp. 1-14, 25-48, 168-181.

-
- [11] Marques, O., *Practical image and video processing using MATLAB*, Wiley/IEEE Press, New Jersey, 2011, pp. 335-338, 347-348, 357-358.
- [12] McAndrew, A., *Introduction to Digital Image Processing with MATLAB*, Thomson, Singapore, 2004, pp. 240-245.
- [13] Bonmarin, P., Rochefort, R., and Bourguel, M., Surface wave profile measurement by image analysis, *Experiments in Fluids*, 1989, Vol. 7, pp. 17 – 24.
- [14] Foote, M. and Horn, D., Video measurement of swash zone hydrodynamics, *Geomorphology*, 1999, Vol. 29 (1–2), pp. 59–76.
- [15] Lee, H.S. and Kwon, S.H., Wave profile measurement by wavelet transform, *Ocean Engineering*, 2003, Vol. 30 (18), pp. 2313–2328.
- [16] Yao, A. and Wu, C.H., An automated image-based technique for tracking sequential surface wave profiles, *Ocean Engineering*, 2005, Vol. 32 (2), pp. 157-173.
- [17] Umeyama, M. and Shintani, T., Visualization analysis of run-up and mixing of internal waves on an upper slope, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2004, Vol. 130 (2), pp. 89–97.
- [18] Erikson, L.H. and Hanson, H., A method to extract wave tank data using video imagery and its comparison to conventional data collection techniques, *Computers & Geosciences*, 2005, Vol. 31 (3), pp. 371–384.
- [19] Ibáñez, O., Rabuñal, J.R., Castro, A., Dorado, J., Iglesias, G., and Pazos, A., Artificial vision system for measuring waves level in a wave tank with a real time approach, *Proceedings of the 2nd WSEAS International Conference on Remote Sensing*, Tenerife, Canary Islands, Spain, December 16-18, 2006, pp. 49-54.
- [20] Iglesias, G., Ibáñez, O., Castro, A., Rabuñal, J.R., and Dorado, J., Computer vision applied to wave flume measurements, *Ocean Engineering*, 2009, Vol. 36 (14), pp. 1073–1079.
- [21] Wang, C.C., Chen, P.C., and Liao, C.Y., Application of CCD cameras as a versatile measurement tool for flume tank, *Ocean Engineering*, 2012, Vol. 42, pp. 71–82.
- [22] Phromfaiy, A. and Khlaichom, P., Use of image processing to classify ripeness level of long lub-lae durian via evaluation of its peel color, *KMUTT Research and Development Journal*, 2017, Vol. 40 (3), pp. 189 – 202 (in Thai).
- [23] Hunt, J.N., Direct solution of wave dispersion equation, *Journal of Waterways, Port, Coastal, and Ocean Division*, 1979, Vol. 105 (4), pp. 457–459.
- [24] Goda, Y., *Random seas and design of maritime structures*, 3rd edition, World Scientific, Hackensack, New Jersey, 2010, pp. 19-31.

