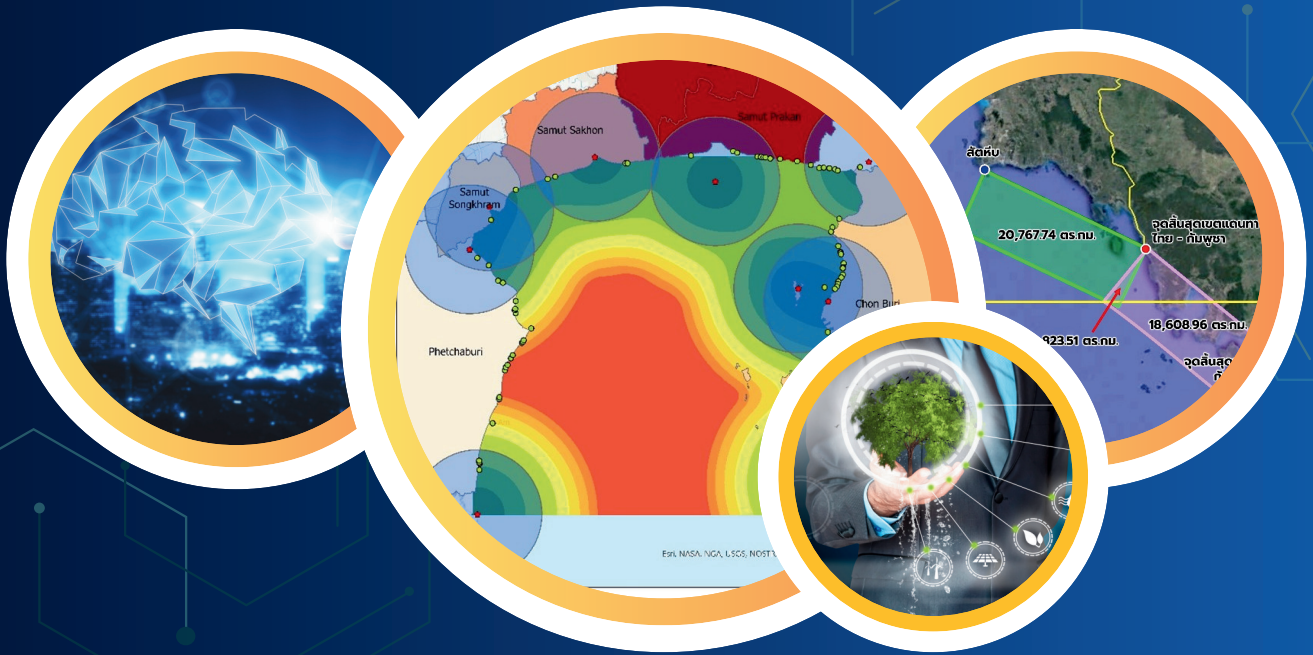




วารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือ

ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

Royal Thai Naval Academy Journal of Science and Technology



✓ ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 มกราคม - ธันวาคม 2568

✓ Vol.8 No.1 January - December 2025



ISSN : 2985-2897 (Print)
ISSN : 2785-2773 (Online)



Available online at www.rtna.ac.th



WS = 575 น้ชด (๗)



คนที่ ๒๐ พฤษภิม ๗๗๖ ๕
๑๗ กฤษภิม ๗๗๖ ๕
๑๗ กฤษภิม ๗๗๖ ๕
๑๗ กฤษภิม ๗๗๖ ๕
๑๗ กฤษภิม ๗๗๖ ๕
๑๗ กฤษภิม ๗๗๖ ๕
๑๗ กฤษภิม ๗๗๖ ๕
๑๗ กฤษภิม ๗๗๖ ๕
๑๗ กฤษภิม ๗๗๖ ๕
๑๗ กฤษภิม ๗๗๖ ๕



คณะที่ปรึกษาวารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

พลเรือโท ปรีดิวัฒน์ ดิลกนรนาถ
พลเรือตรี กฤดากร หอมสุวรรณ
พลเรือตรี อาภากร บุญยิ่ง
พลเรือตรี ชลิต บัวทอง
พลเรือตรี บวร พรหมแก้วงาม
พลเรือตรี นพดล บงกชกาญจน์
นาวาเอก พชร คุณงาม

ผู้บัญชาการ โรงเรียนนายเรือ
รองผู้บัญชาการ โรงเรียนนายเรือ
รองผู้บัญชาการ โรงเรียนนายเรือ
เสนารธิการ โรงเรียนนายเรือ
หัวหน้าฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ
อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิ ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ
รองหัวหน้าฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

บรรณาธิการ

นาวาเอกณัฐพงษ์ พัฒนจงรักษ์
ผู้อำนวยการกองวิชาวิศวกรรมอุทกศาสตร์ ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

กองบรรณาธิการ (ภายใน)

นาวาเอกณัฐพงษ์ พัฒนจงรักษ์
บรรณาธิการ
นาวาเอก รองศาสตราจารย์ ไกรสิทธิ์ มหิวรรณ
กองบรรณาธิการ
นาวาเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัยรัตน์ นกาศักดิ์ศรี
กองบรรณาธิการ
นาวาเอกหญิง รองศาสตราจารย์ ศิริรัตน์ บุญโสภณ
กองบรรณาธิการ และเลขานุการ

นาวาเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมาน ได้รายรัมย์
กองบรรณาธิการ และผู้ดูแลระบบ
นาวาเอก รณกร ธาราเวชรักษ์
กองบรรณาธิการ
เรือเอก จักริน มาลัยโรจน์ศิริ
กองบรรณาธิการ และ ผ.ช.เลขานุการ
เรือเอกหญิง จิราพร แก้วหิรัญทรัพย์
กองบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการ (ภายนอก)

นาวาเอก ฉัตรชัย เหลืองทองคำ
นาวาเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศุภสิทธิ์ คงดี
นาวาเอก สุนันต์ สื้อสกุล
นาวาเอก รชต ไชศิริ
นาวาโท ปรีดิวัฒน์ ตันติพิพัฒน์
พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง
พันเอกหญิง ศาสตราจารย์ สุวิมล เสนียวงศ์ ณ อยุธยา
พันโท ดร.บวรพงศ์ อันสุริย์
นาวาอากาศโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วัชรพงศ์ เกตุปาน
นาวาอากาศตรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จิรภัทร ลดาวัลย์
นาวาอากาศตรี รองศาสตราจารย์ ปราโมทย์ สุขศิริศักดิ์
เรืออากาศโท วิริยะ บริสุทธร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรทิพย์ แก่งอินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรชัย บำรุงศรี
รองศาสตราจารย์ ดร.เวทิน ปิยรัตน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วันวิสา ชัชวงษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพนธ์ เวศพันธ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธพงศ์ เพ็ชรโรจน์

กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ
กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ
กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ
กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ
กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ
โรงเรียนนายเรือพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายเรือพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายเรือพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

วัตถุประสงค์



1. เพื่อเผยแพร่ผลงานบทความวิจัยและบทความวิชาการ ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแก่ผู้สนใจทั่วไป
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ทั้งด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เพื่อเป็นเอกสารรวบรวมบทความวิจัยที่น่าสนใจและมีคุณค่าทางวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วาระเผยแพร่ ปีละ 1 ฉบับ (มกราคม – ธันวาคม)

สถานที่ติดต่อ

: กองบรรณาธิการวารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือด้านวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี

📍 โรงเรียนนายเรือ เลขที่ 204 ถ.สุขุมวิท ต.ปากน้ำ อ.เมืองสมุทรปราการ จ.สมุทรปราการ 10270

☎ โทรศัพท์ : 0-2475-3986

ออกแบบ - พิมพ์ที่

: บริษัท แอดวานซ์ กราฟ จำกัด

📍 503 ถ.อิสรภาพ แขวงบ้านช่างหล่อ เขตบางกอกน้อย กรุงเทพฯ 10700

☎ โทรศัพท์ : 062-456-4855

✉ E-mail : suwaboot.adg@gmail.com

บทความหรือข้อคิดเห็น ในวารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เป็นทรัพย์สินส่วนตัวของผู้เขียน โรงเรียนนายเรือและกองบรรณาธิการ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วย

บทบรรณาธิการ

ในโลกที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วปัจจุบัน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีคือเสาหลักในการขับเคลื่อนนวัตกรรม และเป็นกลไกสำคัญในการแก้ไขปัญหาคับข้องติด ตั้งแต่การพัฒนาวัสดุที่แข็งแกร่งไปจนถึงการบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติ ที่ชาญฉลาด วารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 (มกราคม - ธันวาคม 2568) ฉบับนี้ ได้รวบรวมชุดบทความวิจัยที่หลากหลายที่สะท้อนให้เห็นถึงความมุ่งมั่นของนักวิจัยในการสร้างสรรค์องค์ความรู้ และประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตและเพิ่มขีดความสามารถของสังคมไทย

บทความในฉบับนี้ครอบคลุมหลายมิติ เริ่มจากการบุกเบิกในด้านวัสดุศาสตร์และวิศวกรรมโครงสร้าง ได้แก่ งานวิจัยในบทความที่ 1 เรื่อง “การศึกษาปัจจัยการเชื่อมแบบเสียดทานที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียม 6061 ที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์” ที่ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม นับเป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาวัสดุประสิทธิภาพสูง ขณะเดียวกันบทความที่ 2 เป็นการศึกษาเรื่อง “การศึกษาความสามารถการดูดซับพลังงานของท่อผนังบางรูปทรงพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้โมเมนต์บิด” ที่ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างเพื่อลดความเสียหาย และเพิ่มความปลอดภัย ซึ่งทั้งสองงานวิจัยนี้ล้วนส่งเสริมกันในการสร้างสรรค์วัสดุและโครงสร้างที่ตอบโจทย์ความต้องการทางวิศวกรรมที่ซับซ้อน

ขณะเดียวกัน ในปัจจุบันการจัดการภัยพิบัติและการบริหารทรัพยากรด้วยแบบจำลองและข้อมูล ก็เป็นอีกประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างยิ่ง ในบทความที่ 3 เรื่อง “การประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง HEC-RAS 1D สำหรับการจำลองการไหลผ่านพืชน้ำและสิ่งกีดขวางโดยใช้การทดลองทางน้ำเปิดในห้องปฏิบัติการ” ได้ยืนยันถึงศักยภาพของแบบจำลองในการพยากรณ์ระดับน้ำและความเร็วการไหล ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการบริหารจัดการน้ำและป้องกันอุทกภัยอย่างมีระบบ และมีความสอดคล้องกับบทความที่ 7 ซึ่งเป็นการศึกษาเรื่อง “การศึกษาแนวทางการแจ้งเตือนภัยจาก Storm Surge บริเวณฝั่งทะเลอันดามัน” ที่ให้ข้อมูลผสมผสานมาพยากรณ์คลื่นพายุพัดฝั่ง เพื่อลดความเสียหายกับพื้นที่ชายฝั่งได้อย่างทันทั่วถึง นอกจากนี้ ในบทความที่ 6 เรื่อง “An Optimal Solution for Locating Tide Station Locations in Historic Bay of Thailand by Using Location Allocation Models (P – median)” และ บทความที่ 8 เรื่อง “เทคนิคการกำหนดเขตแดนทางทะเลด้วยวิธีการอัตราส่วนเท่าระหว่างไทย-กัมพูชา เหนือละติจูด 11 องศาเหนือ” ยังชี้ให้เห็นถึงบทบาทของการวิเคราะห์ข้อมูลทางภูมิศาสตร์และแบบจำลองในการเพิ่มประสิทธิภาพการเฝ้าระวังทรัพยากรและการแก้ไขปัญหาความขัดแย้งที่เกี่ยวข้องกับเขตทางทะเลระหว่างประเทศอย่างเป็นรูปธรรม

ไม่เพียงเท่านี้ นวัตกรรมด้านการตรวจวัดและระบบอัจฉริยะก็เป็นหัวใจสำคัญในการยกระดับคุณภาพชีวิตและความมั่นคง ในบทความที่ 4 เป็นบทความที่เขียนเกี่ยวกับการพัฒนา “โครมาโทกราฟ” ของเหลวสมรรถนะสูง โดยใช้มอนอลิธคอลัมน์สำหรับการวิเคราะห์ของเหลวไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเมตาโซลินไฮโดรคาร์บอนพร้อมกันในรูปแบบยาพ่นจมูก” ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ชัดเจนของการสร้างเครื่องมือวิเคราะห์ที่รวดเร็วและแม่นยำเพื่อประโยชน์ทางการแพทย์และเภสัชกรรม เช่นเดียวกับบทความที่ 5 เรื่อง “การพัฒนาชุดทดลองเซนเซอร์วัดค่าการสั่นของมวลติดสปริงสำหรับห้องปฏิบัติการฟิสิกส์โรงเรียนนายเรือ” ที่เพิ่มความแม่นยำในการทดลองทางฟิสิกส์สำหรับห้องปฏิบัติการ ยิ่งไปกว่านั้น ในบทความที่ 9 เป็นบทความที่เป็นการวิเคราะห์เรื่อง “การวิเคราะห์ระบบการประมวลผลสัญญาณสำหรับการป้องกันการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์โดยรอบฐานบิน” ที่ได้นำเสนอแนวทางการจำลองสัญญาณรบกวนเพื่อป้องกันภัยคุกคามทางอิเล็กทรอนิกส์ ขณะที่บทความที่ 10 นั้น เป็น “การศึกษาวิธีการตรวจสอบการรั่วไหลของน้ำภายในอาคารด้วยวิธีอินเทอร์เน็ทในทุกสิ่ง” ที่เป็นการสะท้อนถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลในการเฝ้าระวังและลดการสูญเสียทรัพยากรน้ำได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ คณะบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่า บทความอันทรงคุณค่าในฉบับนี้ จะเป็นแรงบันดาลใจและเป็นประโยชน์ต่อนักวิจัย นักศึกษา และผู้สนใจทุกท่าน ในการนำองค์ความรู้เหล่านี้ไปต่อยอดและสร้างสรรค์นวัตกรรมใหม่ เพื่อรับมือกับความท้าทายในอนาคต และร่วมกันพัฒนาประเทศให้ก้าวหน้าอย่างยั่งยืนต่อไป

นาวาเอกณัฐพงษ์ พัฒนจรรักษ์
บรรณาธิการ วารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือ
ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

สารบัญ

พลังงานทดแทน: แนวโน้มสู่การพัฒนาสู่ความยั่งยืน
ในศตวรรษที่ 21

ปราโมทย์ สุขศิริศักดิ์ สุภกานต์ แก้วเหลี่ยม และ ประยูร กันอยู่

1

การศึกษาปัจจัยการเชื่อมแบบเสียดทานที่มีผลต่อโครงสร้าง
จุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียม 6061 ที่เติมอนุภาค
ซิลิคอนคาร์ไบด์

ศุภฤกษ์ บุญเกียรติ ก้องเกียรติ ปุกรณ์พงษ์ กฤษ เหลืองโสภาคพันธ์
และ วัฒนชัย พฤกษ์กานนท์

13

การศึกษาความสามารถการดูดซับพลังงานของท่อผนังบาง
รูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้โมเมนต์บิด

สมญา ภูณะยา และ รัชดา ไสภาคะยัง

28

การประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง HEC-RAS 1D
สำหรับการจำลองการไหลผ่านพืชน้ำและสิ่งกีดขวาง
โดยใช้การทดลองทางน้ำเปิดในห้องปฏิบัติการ

ธนกร สร้อยศรี และ สมพงษ์ บุตรงาม

46

โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงโดยใช้ออนอลิกคอลัมน์
สำหรับการวิเคราะห์ออกซิเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และ
ไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์พร้อมกันในรูปแบบยาพ่นจมูก

มนัสวี จันรอด และ สมศักดิ์ ศิริไชย

58

Shoreline Extraction Using Water Indices for
Nautical Chart Assessment: A Case Study of
Hua Hin Beach, Thailand

อารีย์ หวันหละเบ๊ะ และ ภักธพร สร้อยทอง

70

สารบัญ

การพัฒนาชุดทดลองเซนเซอร์วัดคาบการสั้นของมวล
ติดสปริงสำหรับห้องปฏิบัติการฟิสิกส์โรงเรียนนายเรือ
วีระ บุญฟู

87

An Optimal Solution for Locating Tide Station
Locations in Historic Bay of Thailand by Using
Location Allocation Models (P – median)

สัณห์รัฐ อัสมาแอล

100

การศึกษาแนวทางการแจ้งเตือนภัยจาก Storm Surge
บริเวณฝั่งทะเลอันดามัน

ศลักษณ์ ฤทธิเดช

117

เทคนิคการกำหนดเขตแดนทางทะเลด้วยวิธีการอัตราส่วนเท่า
ระหว่างไทย-กัมพูชา เหนือละติจูด 11 องศาเหนือ

สมาน ไตรารัมย์

133

การวิเคราะห์ระบบการประมวลผลสัญญาณสำหรับการป้องกัน
การปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์โดยรอบฐานบิน

วัชรพงศ์ เกตุปาน

145

พลังงานทดแทน: แนวโน้มสู่การพัฒนาสู่ความยั่งยืนในศตวรรษที่ 21

Renewable Energy: Trends towards Sustainability in the 21st Century

ปราโมทย์ สุขศิริศักดิ์¹ สุภกานต์ แก้วเหลี่ยม² และ ประยูร กันอยู่^{3*}

Pramote Suksirisak¹ Supakan Kaewleam² and Prayoon Kunyoo^{3*}

Received: February 7, 2025

Revised: March 4, 2025

Accepted: March 12, 2025

บทคัดย่อ

บทความนี้วิเคราะห์สถานการณ์และแนวโน้มของพลังงานทดแทนในระดับโลกและประเทศไทย โดยเน้นถึงการเปลี่ยนผ่านจากพลังงานฟอสซิลไปสู่พลังงานหมุนเวียนและพลังงานสะอาด ซึ่งเป็นทางออกในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การใช้พลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมกำลังเติบโตอย่างต่อเนื่องและมีต้นทุนลดลง ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ประเทศไทยมีแผนพัฒนาเพื่อเพิ่มสัดส่วนพลังงานทดแทนเป็นร้อยละ 50 ภายในปี ค.ศ.2026 โดยเน้นการใช้พลังงานชีวมวลในภาคชนบท ทั้งนี้ ยังมีความท้าทายในด้านการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานและการปรับนโยบาย เพื่อสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านที่ยั่งยืน โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา บทความนี้เสนอแนะการวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนรูปแบบต่าง ๆ และการสนับสนุนจากรัฐบาลเป็นปัจจัยสำคัญในการเร่งกระบวนการเปลี่ยนแปลงสู่ระบบพลังงานที่สะอาดและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

คำสำคัญ: พลังงานทดแทน, การปล่อยก๊าซเรือนกระจก, พลังงานฟอสซิล, การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

¹รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

E-mail: pramote_suk@rtaf.mi.th

²รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

E-mail: supakan@rtaf.mi.th

^{3*}รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

E-mail : prayoon_k@rtaf.mi.th

*Corresponding Author

Abstract

This article analyzes the current situation and trends of renewable energy both globally and in Thailand, focusing on the transition from fossil fuels to renewable and clean energy as a solution to reduce greenhouse gas emissions and mitigate climate change. Renewable energy sources, such as solar and wind power, have been continuously growing and their production costs have significantly decreased over the past decade. Thailand has developed a plan to increase the share of renewable energy to 50% by 2026, with a focus on biomass energy in rural areas. However, challenges remain in terms of infrastructure development and policy adjustments to support a sustainable transition, particularly in developing countries. This paper suggests that research and development of various forms of renewable energy and government support are critical factors in accelerating the transition to a more efficient and cleaner energy system.

Keywords: Renewable Energy, Greenhouse Gas Emissions, Fossil Fuels, Climate Change

1. บทนำ

ปัจจุบันสถานการณ์พลังงานทั่วโลกอยู่ในช่วงเปลี่ยนผ่านสำคัญ ท่ามกลางความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นจากการขยายตัวของประชากรและการพัฒนาเศรษฐกิจ โดยในปี ค.ศ.2023 การใช้พลังงานโลกยังคงต้องพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ คิดเป็นประมาณร้อยละ 80 ของการผลิตพลังงานทั้งหมด อย่างไรก็ตาม ความกังวลเรื่องผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการลดลงของทรัพยากรธรรมชาติกำลังผลักดันให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสู่พลังงานหมุนเวียนและพลังงานที่สะอาด การพัฒนาพลังงานทดแทนจึงกลายเป็นกลยุทธ์หลักในการตอบสนองต่อความต้องการพลังงานที่ยั่งยืน พลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานชีวมวล และพลังงานน้ำ ไม่เพียงแต่ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังเป็นการส่งเสริมความมั่นคงในระยะยาว

บทความนี้มุ่งวิเคราะห์สถานการณ์ปัจจุบันของพลังงานทดแทนในประเทศไทยและในระดับโลก ในแง่ของความต้องการพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น ปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานหมุนเวียน ความมั่นคงทางพลังงาน ความท้าทายด้านโครงสร้างพื้นฐานและนโยบาย แนวโน้มในอนาคตของเทคโนโลยีและนโยบายที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการพลังงานทดแทน รวมถึงการประยุกต์ใช้พลังงานทดแทนในภารกิจทางการทหาร

2. สถานการณ์ปัจจุบันของพลังงานทดแทน

ในปี ค.ศ.2023 สัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนในระบบพลังงานโลกเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมซึ่งมีต้นทุนในการผลิตลดลงถึงร้อยละ 70 และในทศวรรษที่ผ่านมา [1] ประเทศไทยเองก็ให้ความสำคัญกับพลังงานทดแทน โดยแผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย (Power Development Plan: PDP) 2023 ตั้งเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนเป็นร้อยละ 50 ภายในปี ค.ศ.2026 นอกจากนี้ พลังงานชีวมวลมีบทบาทสำคัญในภาคชนบทของประเทศไทย โดยเฉพาะในพื้นที่เกษตรกรรม ซึ่งสามารถนำวัสดุเหลือใช้ เช่น แกลบและกากอ้อย มาแปรรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าและความร้อน อย่างไรก็ตาม อุปสรรคสำคัญยังคงอยู่ที่ความไม่แน่นอนของแหล่งวัตถุดิบและต้นทุนในการขนส่ง ประกอบด้วยองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้ โดยเรียงตามลำดับจากที่มีผลกระทบมากไปน้อยคือ ความต้องการพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 30 ปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกร้อยละ 25 การเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานหมุนเวียนร้อยละ 20 ความมั่นคงทางพลังงานร้อยละ 15 และความท้าทายด้านโครงสร้างและนโยบายร้อยละ 10

2.1 ความต้องการพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ความต้องการพลังงานทั่วโลกเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการขยายตัวของประชากร ทำให้ความต้องการพลังงานสำหรับที่อยู่อาศัย การขนส่ง และการผลิตอาหารเพิ่มขึ้นอย่างมาก การพัฒนาเศรษฐกิจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภูมิภาคเอเชียและอเมริกา ซึ่งการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานและอุตสาหกรรมเป็นตัวเร่งสำคัญ [2] และการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการใช้ชีวิตของมนุษย์ เช่น การใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าและยานพาหนะในจำนวนที่เพิ่มมากขึ้น เป็นปัจจัยที่เพิ่มความต้องการการใช้พลังงาน ซึ่งสถานการณ์เหล่านี้ได้ส่งผลกระทบทั้งในด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสังคม ทำให้พึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลในปริมาณที่สูง ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ [3] การเพิ่มขึ้นของความต้องการพลังงานทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการขาดแคลนทรัพยากรธรรมชาติ เช่น น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่มีรายได้ต่ำมักจะเผชิญกับความยากลำบากในการเข้าถึงพลังงานที่เพียงพอและยั่งยืน

2.2 ปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ก๊าซเรือนกระจกเป็นส่วนหนึ่งของกลไกทางธรรมชาติที่ช่วยรักษาอุณหภูมิของโลกให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดำรงชีวิต อย่างไรก็ตาม การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล การใช้ที่ดิน และการทำลายป่า ได้ส่งผลให้ระดับความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งแหล่งที่มาของก๊าซเรือนกระจกประกอบด้วย 1) ภาคพลังงาน: การใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ คิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 73 ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ทั่วโลก [4] 2) ภาคการเกษตร: การปลูกพืชและเลี้ยงสัตว์ สร้างก๊าซมีเทน (CH₄) และไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ซึ่งมีศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจกสูงกว่าคาร์บอนไดออกไซด์หลายเท่า 3) ภาคอุตสาหกรรม: กระบวนการผลิต เช่น การผลิตซีเมนต์ เหล็ก และเคมีภัณฑ์ เป็นแหล่งปล่อย CO₂ ในปริมาณมาก 4) การขนส่ง: การใช้ยานพาหนะที่ใช้น้ำมันเบนซินและดีเซลปล่อยก๊าซ CO₂ และทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ ซึ่งผลกระทบของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ ได้แก่ อุณหภูมิโลกที่เพิ่มขึ้น ทำให้น้ำแข็งขั้วโลกละลาย ระดับน้ำทะเลเพิ่มขึ้น และเกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติบ่อยครั้ง ผลกระทบต่อความหลากหลายทางชีวภาพ ทำให้ระบบนิเวศบางประเภทเสียหายและสูญพันธุ์ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดปัญหาสุขภาพ การเพิ่มขึ้นของมลพิษทางอากาศและความร้อนสูงมีผลต่อสุขภาพของมนุษย์ เช่น โรคทางเดินหายใจและโรคหัวใจ [5] ปัจจุบันได้มีโครงการคาร์บอนเครดิตอย่างแพร่หลายในหน่วยงานหรือโรงงานอุตสาหกรรมหลายแห่ง เพื่อเป็นการลดการสร้างก๊าซเรือนกระจกเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ คาร์บอนเครดิต (Carbon Credit) [6] คือหน่วยที่ใช้แทนปริมาณการลดหรือชดเชยการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยทั่วไป 1 คาร์บอนเครดิต เท่ากับการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซเรือนกระจกอื่น ๆ ในปริมาณเทียบเท่า 1 ตัน โดยมีหลักการสำคัญคือ องค์กรหรือบริษัทที่สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ต่ำกว่าค่าที่กำหนด สามารถขายคาร์บอนเครดิตให้กับบริษัทที่ปล่อยก๊าซเกินมาตรฐานได้ ประเภทของคาร์บอนเครดิตมี 2 ประเภท คือ 1) ตลาดคาร์บอนสมัครใจ (Voluntary Carbon Market - VCM) บริษัทหรือองค์กรจัดการเองเพื่อลดผลกระทบและแสดงถึงความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อม 2) ตลาดคาร์บอนภาคบังคับ (Compliance Carbon Market - CCM) อยู่ภายใต้กฎหมายหรือระเบียบของรัฐ เช่น ระบบซื้อขายสิทธิการปล่อยมลพิษของสหภาพยุโรป (EU ETS)

2.3 การเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานหมุนเวียน

การเปลี่ยนผ่านด้านพลังงาน (Energy Transition) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงจากการใช้พลังงานฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ ไปสู่การใช้พลังงานหมุนเวียนและแหล่งพลังงานที่สะอาดกว่า เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานน้ำ การเปลี่ยนแปลงนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การใช้พลังงานหมุนเวียนช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมลพิษต่าง ๆ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ นอกจากนี้ยังช่วยลดการพึ่งพาพลังงานฟอสซิลที่มีจำกัดและมีความผันผวนด้านต้นทุนในพลังงานหมุนเวียน และยังส่งเสริมการสร้างงานและการเติบโตทางเศรษฐกิจในภาคส่วนที่เกี่ยวข้อง แม้ว่าการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานหมุนเวียนจะมีประโยชน์มากมาย แต่ก็เผชิญกับความท้าทายหลายประการ โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา ความท้าทายเหล่านี้รวมถึงการขาดแคลนทรัพยากร การพึ่งพาพลังงานฟอสซิล และโครงสร้างพื้นฐานที่ยังพัฒนาได้ไม่เต็มที่ นอกจากนี้การปรับตัวของชุมชนและการสร้างความเป็นธรรมในการเข้าถึงพลังงานสะอาดยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา เพื่อให้การเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานหมุนเวียนเป็นไปได้อย่างยั่งยืนจำเป็นต้องมีการดำเนินการในหลายด้าน รัฐบาลควรปรับปรุงการอนุมัติโครงการพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม รวมถึงปรับปรุงโครงข่ายพลังงานให้ทันสมัย ควรกำหนดเป้าหมายด้านพลังงานหมุนเวียนที่มีความทะเยอทะยานและสอดคล้องกับการควบคุมอุณหภูมิโลกไม่ให้เพิ่มขึ้นเกิน 1.5 องศาเซลเซียส [7] การมีส่วนร่วมของทุกภาคส่วน รวมถึงภาครัฐ ภาคเอกชน และภาคประชาสังคม เป็นสิ่งจำเป็นในการสร้างความเป็นธรรมในการเปลี่ยนผ่านการสนับสนุนชุมชนที่ได้รับผลกระทบจากการใช้พลังงานฟอสซิลในอดีต และการฟื้นฟูด้านสิ่งแวดล้อม วัฒนธรรม และเศรษฐกิจ จะช่วยให้การเปลี่ยนผ่านเป็นไปอย่างราบรื่นและยั่งยืน

2.4 ความมั่นคงทางพลังงาน

ความมั่นคงทางพลังงาน (Energy Security) เป็นประเด็นสำคัญในศตวรรษที่ 21 เนื่องจากพลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและการพัฒนาของประเทศ องค์การพลังงานระหว่างประเทศ (International Energy Agency, IEA) ให้คำนิยามความมั่นคงทางพลังงานว่าเป็น “การเข้าถึงพลังงานในราคาที่เหมาะสมได้อย่างต่อเนื่องและยั่งยืน” [8] ความมั่นคงทางพลังงานเกี่ยวข้องกับแหล่งพลังงานที่เชื่อถือได้ โครงสร้างพื้นฐานที่มั่นคง และนโยบายที่เหมาะสมเพื่อลดความเสี่ยงจากวิกฤติพลังงาน ความมั่นคงทางพลังงานสามารถแบ่งออกเป็น 4 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ 1) ความพร้อมของแหล่งพลังงาน (Availability) แหล่งพลังงานที่เพียงพอเป็นหัวใจสำคัญของความมั่นคงทางพลังงาน ประเทศที่พึ่งพาน้ำมันและก๊าซธรรมชาติจากต่างประเทศมีความเสี่ยงสูงเมื่อเกิดความไม่แน่นอนทางการเมืองหรือภัยพิบัติทางธรรมชาติ 2) การเข้าถึงพลังงาน (Accessibility) ควรเป็นไปอย่างทั่วถึงในทุกภาคส่วนของประเทศ โดยเฉพาะในพื้นที่ชนบทหรือห่างไกล ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเข้าถึงพลังงาน ได้แก่ ระบบโครงสร้างพื้นฐาน เช่น สายส่งไฟฟ้าและท่อก๊าซ รวมถึงต้นทุนทางเศรษฐกิจที่เกี่ยวข้อง [9] 3) ความสามารถในการจ่าย (Affordability) ราคาพลังงานที่สูงอาจส่งผลกระทบต่อภาคอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือน นโยบายพลังงานที่มีประสิทธิภาพควรสนับสนุนกลไกตลาดเสรีและมีมาตรการช่วยเหลือกลุ่มเปราะบางด้านกำลังซื้อ 4) ความยั่งยืน (Sustainability) พลังงานหมุนเวียนและเทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีบทบาทสำคัญในการรักษาสมดุลระหว่างความมั่นคงทางพลังงานและการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [10] นโยบายที่ส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียน เช่น การให้สิทธิประโยชน์ทางภาษีและเงินอุดหนุน สามารถช่วยให้การเปลี่ยนผ่านไปสู่พลังงานสะอาดมีความราบรื่น

2.5 ความท้าทายด้านโครงสร้างพื้นฐานและนโยบาย

โครงสร้างพื้นฐานด้านพลังงานเป็นปัจจัยสำคัญต่อความมั่นคงทางเศรษฐกิจและความยั่งยืนของประเทศ อย่างไรก็ตาม หลายประเทศเผชิญกับความท้าทายด้านการลงทุน การพัฒนาเทคโนโลยี และการจัดทำนโยบายที่เหมาะสมเพื่อรองรับความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้น ความท้าทายด้านโครงสร้างพื้นฐานและนโยบายอาจแบ่งได้ดังนี้ 1) การขยายและบำรุงรักษาโครงสร้างพื้นฐาน โครงสร้างพื้นฐานพลังงาน เช่น โรงไฟฟ้า ระบบสายส่ง และสถานีแปลงไฟฟ้า มีอายุการใช้งานที่จำกัด การลงทุนเพื่อปรับปรุงหรือขยายระบบเป็นสิ่งจำเป็น แต่การดำเนินงานมักประสบปัญหาด้านงบประมาณและความซับซ้อนของกระบวนการอนุมัติ 2) ความไม่สมดุลระหว่างอุปสงค์และอุปทานในบางประเทศ โดยเฉพาะในกลุ่มประเทศที่กำลังพัฒนา โครงสร้างพื้นฐานไม่สามารถรองรับความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นได้ ส่งผลให้เกิดปัญหาไฟฟ้าดับหรือค่าพลังงานสูงขึ้น 3) ความเสี่ยงจากภัยพิบัติและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ภัยธรรมชาติ เช่น พายุไซโคลน แผ่นดินไหว อุทกภัย ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างพื้นฐานพลังงานและทำให้เกิดความล่าช้าในการฟื้นฟูระบบ 4) ความขัดแย้งระหว่างพลังงานสะอาดและพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล แม้ว่าหลายประเทศมีนโยบายส่งเสริมพลังงานหมุนเวียน แต่ยังคงพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลในสัดส่วนที่สูง เนื่องจากต้นทุนต่ำกว่าและโครงสร้างพื้นฐานรองรับได้ดีกว่า 5) การกำกับดูแลและการกำหนดราคาพลังงาน ในบางประเทศราคาพลังงานถูกควบคุมโดยภาครัฐ ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาการขาดทุนของบริษัทพลังงานหรือการใช้พลังงานที่ไม่มีประสิทธิภาพ [11] 6) ความมั่นคง

ทางพลังงานในช่วงเปลี่ยนผ่าน การลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและเปลี่ยนผ่านไปสู่พลังงานที่สะอาด จำเป็นต้องมีแผนระยะยาว แต่บางประเทศยังขาดกรอบนโยบายที่ชัดเจน ส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอน ในการลงทุน ความท้าทายด้านโครงสร้างพื้นฐานและนโยบายพลังงานเป็นประเด็นที่ต้องการการวางแผนและ ลงทุนระยะยาว การส่งเสริมความมั่นคงทางพลังงานผ่านโครงสร้างที่ทันสมัยและนโยบายที่เอื้อต่อการเปลี่ยนแปลง ผ่านสู่พลังงานสะอาดจะช่วยให้ประเทศต่าง ๆ มีความยั่งยืนและแข่งขันได้ในระยะยาว

3. แนวโน้มในอนาคตของพลังงานทดแทน

ในยุคที่โลกกำลังเผชิญกับความท้าทายด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและปัญหาการขาดแคลน พลังงาน พลังงานทดแทนได้กลายเป็นทางออกที่สำคัญในการสร้างอนาคตที่ยั่งยืน สำหรับประเทศไทยยังคงอยู่ ในช่วงวิจัยและพัฒนาประสิทธิภาพพลังงานทดแทนให้สูงขึ้นและเหมาะกับการนำไปใช้ในพื้นที่ห่างไกลในชนบท และรัฐบาลควรที่จะออกนโยบายสนับสนุนพลังงานทดแทนแทนที่พลังงานฟอสซิลรูปแบบเดิม ตลอดจน สนับสนุนงบประมาณในการศึกษาวิจัยนวัตกรรมด้านพลังงานทดแทนเพื่อนำมาพัฒนาปรับปรุงระบบการใช้พลังงาน ในประเทศให้ดียิ่งขึ้น แนวโน้มในอนาคตของพลังงานทดแทนสามารถจำแนกได้ดังนี้ [12]

3.1 การเติบโตอย่างรวดเร็วของพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม

พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมเป็นสองแหล่งพลังงานทดแทนที่มีการเติบโตอย่างรวดเร็วที่สุดใน ทศวรรษที่ผ่านมา เทคโนโลยีที่ก้าวหน้าและต้นทุนที่ลดลงทำให้พลังงานทั้งสองประเภทนี้มีความสามารถ ในการแข่งขันกับเชื้อเพลิงฟอสซิลมากขึ้นเรื่อย ๆ คาดการณ์ว่าในอนาคต พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม จะมีบทบาทสำคัญในการตอบสนองความต้องการพลังงานของโลก ปัจจุบันก็ได้มีการศึกษาและพัฒนา ด้านพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม ตัวอย่างเช่น สุริยพันธุ์ สิงหนนิยม และ ภูมิพร ธรรมสถิตย์เดช [13] ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการยอมรับการใช้เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิต กระแสไฟฟ้า พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการยอมรับเทคโนโลยีมากที่สุดคือปัจจัยด้านประสิทธิภาพ ลำดับที่สองคือ ปัจจัยด้านสังคม และลำดับที่สามคือปัจจัยด้านการใช้งาน นเรศ สิริวรารุช และ ปราโมทย์ สุขศิริศักดิ์ [14] ได้ทำการศึกษากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์และทำการคำนวณจุดคุ้มทุนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 330 วัตต์ โดยเพิ่มระบบระบายความร้อนให้แก่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีระบบ ระบายความร้อนด้วยอากาศผลิตพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยได้สูงที่สุดที่ 1.43 ยูนิต์ต่อวัน ส่วนการคำนวณจุดคุ้มทุน พบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบปกติคืนทุนเร็วสุดที่เวลา 4.57 ปี และ Smith J. et.al. [15] ได้ทำการศึกษา วิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตพลังงานลม รวมถึงแนวโน้มการพัฒนาและนวัตกรรมในด้านเทคโนโลยีของกังหันลม และการเชื่อมต่อกับระบบพลังงานทดแทนอื่น ๆ งานวิจัยนี้ยังเน้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและการใช้งาน ของพลังงานลมในแต่ละภูมิภาค รวมถึงปัญหาทางด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนา พลังงานลม

3.2 การพัฒนาเทคโนโลยีการจัดเก็บพลังงาน

ความท้าทายที่สำคัญอย่างหนึ่งของพลังงานทดแทนคือ ความไม่แน่นอนในการผลิตพลังงาน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์จะผลิตได้เฉพาะในเวลากลางวันและพลังงานลมจะผลิตได้เฉพาะเมื่อมีลม การพัฒนา

เทคโนโลยีการจัดเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาไม่แพงจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้พลังงานทดแทนสามารถนำมาใช้ได้อย่างแพร่หลาย เทคโนโลยีที่กำลังพัฒนายู่ในปัจจุบัน ได้แก่ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน การใช้สารอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลว (แบตเตอรี่ Flow) และการจัดเก็บพลังงานด้วยไฮโดรเจน ตัวอย่างเช่น Liu H. et al. [16] ได้ศึกษาความก้าวหน้าล่าสุดในเทคโนโลยีของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ซึ่งได้มีการสำรวจวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตแบตเตอรี่ รวมถึงกลไกการทำงานที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังมีการทบทวนการใช้งานแบตเตอรี่ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ยานยนต์ไฟฟ้า และเทคโนโลยีพลังงานทดแทน และ Züttel A. et.al. [17] ได้สำรวจการใช้ไฮโดรเจนเป็นพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพในอนาคต โดยเฉพาะในด้านการจัดเก็บพลังงาน พวกเขาได้พูดถึงความท้าทายและโอกาสที่เกี่ยวข้องกับการผลิต การเก็บ และการใช้ไฮโดรเจน รวมถึงการพัฒนาเทคโนโลยีในการจัดเก็บไฮโดรเจนในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ไฮโดรเจนที่ถูกดูดซับในวัสดุต่าง ๆ เพื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงและในระบบพลังงานทดแทนอื่น ๆ

3.3 การใช้พลังงานทดแทนในภาคส่วนต่าง ๆ

ในปัจจุบัน การใช้พลังงานทดแทนส่วนใหญ่อยู่ในภาคการผลิตไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ในอนาคตคาดว่าจะมีการใช้พลังงานทดแทนในภาคส่วนอื่น ๆ มากขึ้น เช่น ภาคการขนส่ง ภาคอุตสาหกรรม และภาคที่อยู่อาศัย ตัวอย่างเช่น รถยนต์ไฟฟ้าจะเข้ามามีบทบาทมากขึ้นในการขนส่ง ในขณะที่พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์จะถูกนำมาใช้ในการทำความร้อนในอาคาร ตัวอย่างเช่น ธงชัย ลิ้มปิติกรานนท์ [18] ได้กล่าวว่าปัญหาค่าฝุ่น PM 2.5 เป็นปัญหาที่พบในทุกพื้นที่ของประเทศไทย ส่งผลให้เกิดอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ ซึ่งสาเหตุหลักเกิดมาจากการปล่อยควันดำหรือก๊าซพิษจากเครื่องยนต์สันดาปที่ไม่สมบูรณ์ จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงมาใช้รถยนต์พลังงานไฟฟ้าแทนอย่างแพร่หลาย เพื่อเป็นการลดปัญหาดังกล่าว ภทรลดา สินทร์พย์ [19] ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกซื้อรถยนต์ไฟฟ้าและประเมินการเติบโตของรถยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย โดยปัจจัยที่มีความสำคัญในการตัดสินใจเลือกซื้อรถยนต์ไฟฟ้า พบว่าปัจจัยด้านราคาของรถยนต์ไฟฟ้าได้คะแนนเฉลี่ย 4.71 ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมได้คะแนนเฉลี่ย 4.32 ปัจจัยด้านเทคโนโลยี ประสิทธิภาพ และความน่าเชื่อถือของแบตเตอรี่ได้คะแนนเฉลี่ย 4.77 ปัจจัยด้านจำนวนสถานีอัดประจุไฟฟ้าได้คะแนนเฉลี่ย 4.55 โดยรถยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่มีผู้สนใจซื้อมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 29.83 และ Shao W. and Zhao X. [20] ได้สำรวจการใช้งานของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ในบ้านพักอาศัย โดยมุ่งเน้นที่การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าในระดับที่พอเพียงกับความต้องการใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน พร้อมการวิเคราะห์ผลกระทบด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

3.4 การกระจายศูนย์ของแหล่งพลังงาน

แนวโน้มอีกประการหนึ่งที่สำคัญคือ การกระจายศูนย์ของแหล่งพลังงาน ในอดีตการผลิตพลังงานส่วนใหญ่อยู่ในมือของผู้ผลิตรายใหญ่ไม่กี่ราย แต่ในอนาคตคาดว่าจะมีการผลิตพลังงานในระดับท้องถิ่นมากขึ้น โดยใช้พลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาบ้าน พลังงานลมขนาดเล็ก และพลังงานชีวมวล การกระจายศูนย์ของแหล่งพลังงานจะช่วยเพิ่มความมั่นคงทางพลังงานและลดความเสี่ยงจากการหยุดชะงักของแหล่งพลังงานขนาดใหญ่ ตัวอย่างเช่น นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ และคณะ [21] ได้ประยุกต์ใช้พลังงานหมุนเวียน

แบบไม่เชื่อมต่อระบบไฟฟ้าเพื่อการเกษตรในพื้นที่ห่างไกล พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์สามารถขับเคลื่อนปั๊มน้ำหยดได้ระหว่างช่วงเวลา 11:00 น. – 14:00 น. รวมทั้งสิ้น 3 ชั่วโมงต่อวัน และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในปีแรกมีค่า 1,314.00 กิโลวัตต์ชั่วโมง และ นเรศ สิริวรารุช และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาและออกแบบก้อนเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อน พบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตจากกระต๊ากชานอ้อยรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ใช้ฟาราฟินเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 1:1 ให้ค่าความร้อนสูงที่สุดที่ 6,942.67 แคลอรีต่อกรัม

3.5 นโยบายและการสนับสนุนจากรัฐบาล

นโยบายและการสนับสนุนจากรัฐบาลมีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการพัฒนาและการใช้พลังงานทดแทน หลายประเทศทั่วโลกได้กำหนดเป้าหมายการใช้พลังงานทดแทนและให้การสนับสนุนทางการเงินและนโยบายแก่ผู้ผลิตและผู้บริโภคพลังงานทดแทน การสนับสนุนจากรัฐบาลอย่างต่อเนื่องจะช่วยเร่งการเปลี่ยนผ่านไปสู่ระบบพลังงานที่ยั่งยืนพลังงานทดแทนมีแนวโน้มที่จะมีบทบาทสำคัญมากขึ้นในอนาคต เทคโนโลยีที่ก้าวหน้าต้นทุนที่ลดลง และการสนับสนุนจากรัฐบาลจะช่วยให้พลังงานทดแทนสามารถแข่งขันกับเชื้อเพลิงฟอสซิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเปลี่ยนผ่านไปสู่ระบบพลังงานที่ยั่งยืนเป็นสิ่งสำคัญในการแก้ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสร้างอนาคตที่ดีสำหรับทุกคน

4. การประยุกต์ใช้พลังงานทดแทนในการกิจทางทหาร

ในปัจจุบันการใช้พลังงานมีบทบาทสำคัญต่อทุกภาคส่วน รวมถึงภาคการทหารซึ่งต้องพึ่งพาพลังงานสูงสำหรับการปฏิบัติการกิจต่าง ๆ อย่างไรก็ดีตาม ความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นและความเสี่ยงจากการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ทำให้หลายประเทศเริ่มหันมาให้ความสำคัญกับพลังงานทดแทนมากขึ้น โดยเฉพาะในการกิจทางทหารที่ต้องการความมั่นคงและความยั่งยืนด้านพลังงาน ตัวอย่างเช่น กองทัพอากาศมีศูนย์การเรียนรู้พลังงานทดแทนกองทัพอากาศ [23] จัดตั้งขึ้นเพื่อเป็นแหล่งการเรียนรู้และแหล่งเรียนรู้ชุมชนในการส่งเสริมสนับสนุนและบริหารข้อมูลด้านพลังงานทดแทนสำหรับข้าราชการกองทัพอากาศและครอบครัว ตลอดจนประชาชนทั่วไป ด้วยการจัดสภาพการณ์และสิ่งแวดล้อมให้เกิดการเรียนรู้อย่างมีประสิทธิภาพ ประกอบด้วย การแสดงองค์ความรู้เกี่ยวกับการอนุรักษ์และพัฒนาพลังงานด้านต่าง ๆ อย่างครบวงจร โดยแบ่งการจัดแสดงออกเป็น 5 อาคาร ได้แก่ 1) อาคารบ้านตัวอย่าง จัดแสดงตัวอย่างการนำพลังงานทดแทนมาใช้ในชีวิตประจำวัน ทั้งไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และจากเครื่องยนต์ทำไฟที่ใช้ น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง 2) อาคารพลังงานไบโอดีเซล แสดงกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล หลักการทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และผลการดำเนินการผลิตและใช้งานไบโอดีเซลของกองทัพอากาศ 3) อาคารพลังงานชีวภาพ แสดงกระบวนการผลิตพลังงานจากวัสดุเหลือใช้ ได้แก่ การผลิตแก๊สชีวภาพจากขยะเปียก เช่น เศษอาหาร และการผลิตแก๊สชีวมวลจากขยะแห้ง เช่น เศษกิ่งไม้ เป็นต้น 4) อาคารพลังงานแสงอาทิตย์ แสดงการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์แบบต่าง ๆ รวมถึงหลักการในการผลิตน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ 5) อาคารพลังงานลม แสดงการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมโดยใช้กังหันลมและหลักการในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานกลรูปแบบอื่น ๆ รวมถึงแสดงผลการดำเนินการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในสถานที่ปฏิบัติงานของกองทัพอากาศซึ่งตั้งอยู่ในที่ห่างไกล

4.1 ความจำเป็นของพลังงานทดแทนในการกิจการทหาร

ภารกิจทางทหารในปัจจุบันต้องอาศัยพลังงานในหลายด้าน เช่น 1) การเคลื่อนที่ของกองกำลัง รถถัง ยานเกราะ อากาศยาน และเรือรบ ต้องใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณมาก 2) ระบบปฏิบัติการและอาวุธ อาวุธพลังงานสูง เช่น เลเซอร์และระบบป้องกันภัยทางอากาศต้องใช้พลังงานจำนวนมาก 3) ฐานทัพและ ศูนย์บัญชาการ ต้องการพลังงานสำหรับอุปกรณ์สื่อสาร ระบบเรดาร์ และการดำรงชีวิตของกำลังพล อย่างไรก็ตาม การพึ่งพาพลังงานเหล่านี้ทำให้เกิดปัญหาหลายประการ เช่น ความเสี่ยงจากการขาดแคลนพลังงานในพื้นที่ ปฏิบัติการ ความท้าทายในการขนส่งพลังงานในเขตที่เข้าถึงยาก รวมถึงผลกระทบจากการเผาไหม้ฟอสซิล ที่สร้างมลพิษและความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม

4.2 รูปแบบของพลังงานทดแทนที่ใช้ในการกิจการทหาร

ปัจจุบันมีการพัฒนาพลังงานทดแทนหลายรูปแบบเพื่อรองรับความต้องการด้านการทหาร ได้แก่ 1) พลังงานแสงอาทิตย์ ใช้แผงโซลาร์เซลล์เพื่อลดการพึ่งพาน้ำมันในฐานปฏิบัติการระยะไกล มีการพัฒนา “Solar UAVs” หรืออากาศยานไร้คนขับที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อบินได้นานขึ้น ชีษณุพงศ์ รื่นภาคแดน และคณะ [24] ออกแบบและติดตั้งโซลาร์เซลล์บนอากาศยานไร้คนขับ เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการบิน โดยการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 3.3 วัตต์ จำนวน 30 แผ่น บนปีกของ UAV ที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์ขนาด 11.1 โวลต์ ความจุ 5,200 มิลลิแอมป์ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่าการใช้โซลาร์เซลล์ร่วมกับแบตเตอรี่สามารถเพิ่มระยะเวลาในการบินได้ประมาณ 1 ชั่วโมง 40 นาที 2) พลังงานลม ใช้กังหันลมขนาดเล็กในฐานทัพที่อยู่ในพื้นที่ลมแรง เช่น ฐานทัพในเขตชายฝั่ง เพื่อลดต้นทุนด้านพลังงานในระยะยาว 3) เชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuels) หลายประเทศ พัฒนาไบโอดีเซลและเอทานอลสำหรับเครื่องยนต์ของยานพาหนะทางทหาร ตัวอย่างเช่น กองทัพสหรัฐอเมริกา มีโครงการ Green Fleet ที่ใช้ไบโอดีเซลกับเรือรบ เป็นความริเริ่มที่มุ่งลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนในกองทัพเรือ ในปี ค.ศ.2012 กองทัพเรือสหรัฐฯ ได้ดำเนินการสาธิตการใช้ไบโอดีเซล ผสมกับน้ำมันดีเซลทั่วไปในเรือรบและเครื่องบิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเรือบรรทุกเครื่องบิน USS Nimitz (CVN 68) ได้รับการเติมน้ำมันไบโอดีเซลผสมในสัดส่วน 50:50 [25] 4) พลังงานไฮโดรเจน มีการทดลองใช้เซลล์เชื้อเพลิง ไฮโดรเจนสำหรับยานพาหนะทางทหาร เพื่อให้เกิดเสียงรบกวนน้อยและมีความคล่องตัวสูง สามารถใช้ไฮโดรเจน ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในฐานปฏิบัติการ 5) พลังงานความร้อนใต้พิภพ ใช้สำหรับทำความร้อนและผลิต พลังงานไฟฟ้าในฐานทัพ ฐานทัพที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีศักยภาพด้านพลังงานความร้อนใต้พิภพ เช่น ทางตะวันตก ของสหรัฐอเมริกา มักใช้พลังงานนี้ในการผลิตไฟฟ้าและให้ความร้อนแก่สิ่งอำนวยความสะดวกภายในฐานทัพ ตัวอย่างฐานทัพที่ใช้พลังงานความร้อนใต้พิภพในสหรัฐอเมริกา ได้แก่ Naval Air Weapons Station China Lake, California, Hill Air Force Base, Utah และ Fort Drum, New York 6) พลังงานนิวเคลียร์ขนาดเล็ก มีแนวคิดในการใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็ก (Small Modular Reactors-SMRs) ซึ่งมีขนาดกำลังไฟฟ้า ต่อหน่วยไม่เกิน 300 เมกะวัตต์ (MW) ซึ่งมีขนาดประมาณหนึ่งในสามของกำลังการผลิตของเครื่องปฏิกรณ์ นิวเคลียร์ขนาดใหญ่แบบดั้งเดิม เพื่อจ่ายพลังงานให้ฐานทัพระยะไกล เรือดำน้ำและเรือบรรทุกเครื่องบิน หลาย ประเทศและบริษัทกำลังลงทุนและพัฒนาเทคโนโลยี SMRs เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงทางพลังงานและ

ลดการปล่อยคาร์บอน ตัวอย่างเช่น สหราชอาณาจักรกำลังผ่อนคลายกฎระเบียบการวางแผนเพื่อสนับสนุนการก่อสร้าง SMRs ในพื้นที่ที่กว้างขึ้น เพื่อช่วยบรรลุปเป้าหมายโครงการพลังงานสีเขียวและส่งเสริมการเติบโตของอุตสาหกรรมสหรัฐอเมริกา บริษัท NuScale Power ได้รับการรับรองการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก 50 MW จากคณะกรรมการกำกับดูแลนิวเคลียร์สหรัฐอเมริกา (NRC) ในเดือนมกราคม ค.ศ.2023 และกำลังพัฒนาเวอร์ชันที่มีขนาดกำลังไฟฟ้า 77 MW

4.3 ประโยชน์ของพลังงานทดแทนต่อการภารกิจทางทหาร

การใช้พลังงานทดแทนในการภารกิจทางทหารให้ประโยชน์หลายประการ โดยเรียงจากผลประโยชน์มากไปน้อยได้ดังนี้ 1) ลดการพึ่งพาน้ำมันเชื้อเพลิง ลดความเสี่ยงจากการถูกโจมตีเส้นทางลำเลียงเชื้อเพลิง 2) เพิ่มความสามารถในการปฏิบัติการระยะไกล กองกำลังสามารถดำเนินการกิจได้นานขึ้นโดยไม่ต้องเติมเชื้อเพลิงบ่อย 3) ลดต้นทุนระยะยาว แม้พลังงานทดแทนต้องใช้เงินลงทุนสูงในช่วงแรก แต่ช่วยลดต้นทุนในระยะยาว 4) เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลดมลพิษจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล 5) เสริมสร้างความมั่นคงทางพลังงาน ลดความเสี่ยงจากความผันผวนของราคาน้ำมันในตลาดโลก

4.4 ความท้าทายและข้อจำกัด

แม้ว่าพลังงานทดแทนจะมีข้อดีหลายประการ แต่ก็ยังมีความท้าทายที่ต้องพิจารณา เช่น ประสิทธิภาพในการใช้งานภาคสนาม เทคโนโลยีพลังงานบางรูปแบบอาจยังไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในภาวะสงคราม ต้นทุนการพัฒนาและการบำรุงรักษา ระบบพลังงานทดแทนบางอย่างต้องการการลงทุนสูง ข้อจำกัดด้านสภาพแวดล้อม พลังงานแสงอาทิตย์และลมอาจทำงานได้ไม่ดีในสภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวย การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน กองทัพต้องมีโครงสร้างพื้นฐานรองรับพลังงานรูปแบบใหม่

พลังงานทดแทนเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงในการสนับสนุนภารกิจทางทหารในอนาคต ด้วยการลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล เพิ่มความมั่นคงด้านพลังงาน และช่วยให้การปฏิบัติการมีประสิทธิภาพมากขึ้น แม้ว่าอาจมีความท้าทายอยู่บ้าง แต่ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและนโยบายที่เหมาะสม กองทัพทั่วโลกสามารถนำพลังงานทดแทนมาใช้เพื่อสร้างความได้เปรียบทางยุทธศาสตร์ในอนาคต

5. สรุป

โลกกำลังเผชิญกับความท้าทายในการเติบโตของการใช้พลังงานและผลกระทบจากการใช้พลังงานฟอสซิล พลังงานทดแทนจึงเป็นทางเลือกสำคัญในการสร้างความยั่งยืนทางพลังงานในอนาคต ในปี ค.ศ.2023 พลังงานทดแทนเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมที่ต้นทุนการผลิตลดลงอย่างมาก ประเทศไทยมีแผนพัฒนาพลังงานทดแทนโดยตั้งเป้าเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนเป็นร้อยละ 50 ภายในหนึ่งปี ความต้องการพลังงานทั่วโลกเพิ่มขึ้นจากการขยายตัวของประชากรและเศรษฐกิจ ขณะเดียวกันปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและผลกระทบจากการใช้พลังงานฟอสซิลยังเป็นปัญหาหลัก การเปลี่ยนแปลงจากการใช้พลังงานฟอสซิลสู่พลังงานหมุนเวียนสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและส่งเสริมความมั่นคงทางพลังงาน แม้ว่าจะมีความท้าทายด้านทรัพยากรและโครงสร้างพื้นฐานในประเทศกำลังพัฒนา การเข้าถึงพลังงานในราคาที่เหมาะสม

และยั่งยืนก็เป็นสิ่งสำคัญ การใช้พลังงานหมุนเวียนสามารถช่วยเสริมความมั่นคงทางพลังงานในระยะยาว แม้จะมีความท้าทายอยู่หลายประการ แต่การพัฒนาเทคโนโลยี การสนับสนุนนโยบาย และการสร้างความร่วมมือ จะเป็นกุญแจสำคัญในการเร่งกระบวนการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบพลังงานที่สะอาดและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable power generation costs in 2022. Abu Dhabi: IRENA; 2023.
- [2] International Energy Agency (IEA). World energy outlook 2023 [Internet]. Paris: IEA; 2023. Available from: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.
- [3] International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable energy statistics 2022. Abu Dhabi: IRENA; 2022.
- [4] International Energy Agency (IEA). CO2 emissions in 2022 [Internet]. Paris: IEA; 2023. Available from: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>.
- [5] Haines A, Ebi K. The imperative for climate action to protect health. N Engl J Med. 2019;380(3):263-273. doi: 10.1056/NEJMra1807873.
- [6] City of Vancouver. Greenest City Action Plan [Internet]. Vancouver: City of Vancouver; [cited 2025 Mar 1]. Available from: <https://vancouver.ca/green-vancouver/greenest-city-action-plan.aspx>
- [7] Global Compact Network Thailand. Energy Transformation [Internet]. Bangkok: Global Compact Network Thailand; [cited 2025 Mar 2]. Available from: <https://globalcompact-th.com/WMO/EnergyTransformation>
- [8] International Energy Agency (IEA). Energy security: Ensuring the uninterrupted availability of energy sources at an affordable price [Internet]. Paris: IEA; [cited 2025 Mar 3]. Available from: <https://www.iea.org/topics/energy-security>
- [9] Sovacool BK, Mukherjee I. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach. Energy. 2011;36(8):5343-5355. doi: 10.1016/j.energy.2011.06.043.
- [10] Winzer C. Conceptualizing energy security. Energy Policy. 2012;46:36-48. doi: 10.1016/j.enpol.2012.02.067.
- [11] World Bank. Pricing energy efficiently: Policy guidelines 2021. Washington, DC: World Bank; 2021.
- [12] International Energy Agency (IEA). Net zero by 2050 [Internet]. Paris: IEA; [cited 2025 Mar 4]. Available from: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- [13] Singhanyanyong S, Thammasathitdej P. Factors affecting behavior recognition technology to generate electricity with solar cells. In: Graduate Research Conference; 2014 Jan 22-24; Khon Kaen, Thailand. Khon Kaen: Khon Kaen University; 2014. p. 536-544.

-
- [14] Sirivarawuth N, Suksirisak P. The study and comparison of power and break-even point of electricity generation from solar panels. *NKRAFA J Sci Tech* [Internet]. 2022 Jun 30 [cited 2025 Mar 19];18(1):38-49. Available from: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/nkrafa-sct/article/view/246036>
- [15] Joselin MG, Iniyan S, Sreevalsan E, Rajapandian S. A review of wind energy technologies. *Renew Sustain Energy Rev*. 2007;11(6):1117-1145. doi: 10.1016/j.rser.2005.08.004.
- [16] Barbosa J, Gonçalves R, Costa C, Lanceros-Méndez S. Recent advances on materials for lithium-ion batteries. *Energies*. 2021;14(11):3145. doi: 10.3390/en14113145.
- [17] Züttel A, Remhof A, Borgschulte A, Friedrichs O. Hydrogen: The future energy carrier. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2010;368(1923):3329-3342. doi: 10.1098/rsta.2010.0113.
- [18] Limpitikranon T. Electric cars: Environmental challenges and potentiality of growth in Thailand. *J Manag Sci Dhonburi Rajabhat Univ*. 2022;4(1):50-63. Available from: <https://so10.tci-thaijo.org/index.php/msdru/article/view/152>.
- [19] Sontharaphay P, Phattaraladda P. Study of the factors and evaluation of the growth of electric vehicles in Thailand [dissertation]. Bangkok: Chulalongkorn University; 2019. Available from: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6960>.
- [20] Shao W, Zhao X. A study on the implementation of solar energy systems for residential electricity generation. *J Renew Energy Technol*. 2023;15(4):352-68.
- [21] Rukthaicharoenchip N, Geaprasit P, Ruengsub N, Suwantaroj K. Application of off-grid renewable energy for agriculture in remote areas. *RMUTP Research Journal*. 2023 Jul-Dec;17(2):48-58.
- [22] Sirivarawuth N, Suksirisak P, Sukuprakarn N, Kunyoo P. Study and comparison of thermal efficiency of briquettes fuel from biomass materials. *NKRAFA J Sci Technol*. 2021;17(2):31-44. Available from: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/nkrafa-sct/article/view/244366>.
- [23] Royal Thai Air Force. Royal Thai Air Force Alternative Energy Center [Internet]. Available from: <https://welcome-altenergy.rtaf.mi.th/eyiymchmsuunykaareriynruu?utm>.
- [24] Chitsanuphong R, Jitjong J, Chakraphat S, Phorchai S, Janwattanakul S, Hinthamai S, Jiajant S. Design and installation of solar cell for enhancing unmanned aerial vehicle performance [Internet]. Available from: <https://dspace.spu.ac.th/server/api/core/bitstreams>.
- [25] Great Green Fleet Project. USS Nimitz receives biofuel [Internet]. Available from: <https://www.cpf.navy.mil/Newsroom/News/Article/2754230/great-green-fleet-uss-nimitz-receives-biofuel>.

การศึกษาปัจจัยการเชื่อมแบบเสียดทานที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล
ของอะลูมิเนียม 6061 ที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

Study of Friction Stir Welding Parameters Affecting the Microstructure and
Mechanical Properties of Silicon Carbide Reinforced Aluminum 6061

ศุภฤกษ์ บุญเกียรติ¹ ก้องเกียรติ ปุภรัตน์พงษ์² กฤษ เหลืองโสภานันท์³ และ วัฒนชัย พฤกษ์กานนท์^{4*}
Supparerk Boontein¹ Kongkiat Puparattanapong² Ghit Laungsopapun³ and Wattanachai Prukkanon^{4*}

Received: March 11, 2025

Revised: April 21, 2025

Accepted: April 24, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลในอะลูมิเนียมเกรด 6061 คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ขนาด 5 ไมครอน การศึกษาผลการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในรอยเชื่อมด้วยเครื่องมือแบบไม่มีหัวกวนในรอบที่ 1 ผลการเติมพบว่า ซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวในรอยเชื่อมได้ดีกว่าการใช้หัวกวนสั้เหลี่ยม การศึกษาผลของปัจจัยความเร็วเดินเชื่อมที่ 26 34 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วหมุนเชื่อมที่ 920 1,040 และ 1,350

¹อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
Lecturer, Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi
E-mail: Supparerk.boon@kmutt.ac.th

²อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
Instructor, Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi
E-mail: Kongkiat.pup@kmutt.ac.th

³นักวิจัย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
Researcher, Thailand Institute of Scientific and Technological Research
E-mail: Ghit@tistr.or.th

^{4*}ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมนวัตกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
Assistant Professor, Automotive Innovation Engineering, School of Engineering, University of the Thai Chamber of Commerce
E-mail: wattanachai_pru@utcc.ac.th

*Corresponding Author

รอบต่อนาที ต่อลักษณะรอยเชื่อมด้านบนมีความสมบูรณ์ทุกความเร็วเดินเชื่อม ยกเว้นรอยเชื่อมที่ความเร็วเดินเชื่อม 50 มิลลิเมตรต่อนาที และ ความเร็วหมุนหัวเชื่อม 920 รอบต่อนาที เกิดรอยร้าวด้านบนตามแนวการเชื่อมและมีผลความแข็งต่ำที่สุดที่ 54.21 HV ส่วนผลโครงสร้างจุลภาคการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์การปั่นกวที่ความเร็วเดินเชื่อม 26 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วหมุนหัวเชื่อมที่ 1350 รอบต่อนาที ส่งผลให้อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวในชิ้นงานทดสอบอย่างสม่ำเสมอทั่วชิ้นงาน และให้ค่าความแข็งสูงที่สุดที่ 77.16 HV

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทาน, อะลูมิเนียม, อะลูมิเนียมคอมโพสิต, อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

Abstract

The objective of this study is to investigate the effects of parameters on the metallurgical and mechanical properties of friction stir welding of aluminum AA6061 reinforced with Silicon Carbide micro-particles of 5 microns. A study on the effect of silicon particle addition in friction stir welding using a pinless tool in the first pass showed better silicon carbide dispersion in the welding zone compared to using a square pin tool. A study on the effect of transverse speed 26, 34, and 50 mm/min and rotational speed 920, 1,040, and 1,350 rpm on the top welds appearance showed complete welds at all transverse speed which exhibited cracks along the weld line and the lowest hardness value of 54.21 HV. As for the microstructure, uniform silicon carbide particle distribution was observed at a travel speed of 26 mm/min and a welding rotation speed of 1350 round per minute (rpm). This resulted silicon carbide particle dispersed in a homogeneous with aluminum matrix and obtain the highest hardness of 77.16 HV.

Keywords: Friction Stir Welding, Aluminium, Aluminium Composite, Silicon Carbide Particle

1. บทนำ

อะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีน้ำหนักเบา (Light Alloy) มีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ อาทิเช่น สามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีความแข็งแรงทั้งที่มีน้ำหนักเบาและยังสามารถนำไปรีไซเคิลได้ง่าย ทำให้ถูกนำไปใช้ในการผลิตชิ้นส่วนเรือและเครื่องบิน เพื่อช่วยลดน้ำหนัก ทำให้ใช้พลังงานในการขับเคลื่อนน้อยลง [1] อะลูมิเนียมจึงถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม และนอกจากนี้ยังมีแนวโน้มในการใช้อะลูมิเนียมสูงขึ้นในทุก ๆ ปี ดังนั้นในปัจจุบันอะลูมิเนียมถือว่าเป็นหนึ่งในวัสดุทางวิศวกรรมที่มีความสำคัญในงานอุตสาหกรรมเป็นอย่างยิ่ง

ในหลายปีที่ผ่านมาได้มีการวิจัยและพัฒนาสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอะลูมิเนียมในการใช้งานในอุตสาหกรรมยานยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมไปถึงอุตสาหกรรมอากาศยาน และหนึ่งในงานวิจัยและพัฒนา คือ การศึกษาสมบัติทางกล โดยการใส่อนุภาคเข้าไปในเนื้อโลหะโดยอนุภาคที่ใส่เข้าไปจะกระจายตัวอยู่ตามเนื้อพื้นเพื่อช่วยเสริมแรงเฉพาะจุด โดยนิยมใช้ส่วนเสริมแรงที่เป็นเซรามิก เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide) โบรอนคาร์ไบด์ (Boron Carbide) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum Oxide) โดยในอุตสาหกรรมนิยมใช้ซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นสารเสริมแรงอย่างแพร่หลาย [2, 3] เนื่องจากราคาถูก และสามารถหาซื้อได้ทั่วไป

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอะลูมิเนียมที่มีการเติมอนุภาคเสริมแรง โดยใช้อะลูมิเนียมเกรด 6061 เนื่องจากเป็นอะลูมิเนียมที่โดดเด่นในเรื่องความแข็งแรง และน้ำหนักเบาจึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการความแข็งแรง เช่น โครงสร้างและอุปกรณ์เรือเดินสมุทร ยานพาหนะต่าง ๆ อุตสาหกรรมการบิน ตัวอย่างเช่น

การทำเฟรมเครื่องบิน ที่จำเป็นต้องมีความแข็งแรง แต่น้ำหนักต้องเบา [4] และได้ทำการศึกษาผลของการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาด 5 ไมครอน เป็นอนุภาคเสริมแรง เนื่องจากการเพิ่มสมบัติของวัสดุจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของอนุภาคเสริมแรง ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเลือกใช้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) ที่เป็นวิธีการในการผลิตอะลูมิเนียมคอมโพสิต เนื่องจากเป็นเทคนิคการเชื่อมโลหะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมละลายหรือเรียกว่า การเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid State) โดยมีข้อได้เปรียบกว่าวิธีการเชื่อมอื่นโดยสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกี่ยวกับการเกิด รูพรุน (Porosity) รอยร้าวขณะแข็งตัว (Solidification Cracking) และรอยร้าวขณะเหลว (Liquation Cracking) ส่งผลให้รอยเชื่อมของชิ้นงานมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น [5]

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาผลการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์กับการปรับเปลี่ยนชนิดหัวกดเชื่อม

2.2 ศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อกระบวนการเชื่อม ตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม ได้แก่ ความเร็วเดินเชื่อม (Transverse Speed) ความเร็วหมุนเชื่อม (Rotation Speed) ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลในอะลูมิเนียมเกรด 6061 คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในอะลูมิเนียมผสม 6061 ด้วยเทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค เพิ่มสมบัติความแข็งแรงและความแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยข้อดีของกระบวนการนี้ คือ โครงสร้างจุลภาคละเอียด และสมบัติทางโลหะวิทยาบริเวณรอยเชื่อมจะดี และไม่สูญเสียธาตุผสม [6, 7] ผลของการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาด 45-64 นาโนเมตร ในอะลูมิเนียม 5052 อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของขอบเกรนและป้องกันการเติบโตของเกรนส่งผลให้โครงสร้างเกิดเกรนที่เล็กละเอียดในบริเวณรอยเชื่อม ทำให้สามารถเชื่อมต่อได้ดี ความแข็งแรงและอัตราการยืดตัวเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการที่ไม่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ผลของพารามิเตอร์ความเร็วหมุนหัวเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อมในอะลูมิเนียมเกรด 6061 ที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มีผลต่อสมบัติทางกล [8] การเชื่อมเสียดทานรอบแรกด้วยหัวกดเชื่อมแบบไม่มีหัวกวน เพื่อปิดบริเวณปากหลุมไม่ให้อนุภาคกระจายตัว ก่อนการเชื่อมครั้งที่สองด้วยหัวกดเชื่อมแบบมีหัวกวน ทำให้อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายได้ดีและมีค่าความแข็งแรงสูงสุด [9] หัวกดเชื่อมลักษณะที่ต่างกัน หัวกวนเชื่อมแบบสี่เหลี่ยมทำให้การกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์แบบเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) บริเวณพื้นที่กวน (Nugget Zone) มากที่สุดในอะลูมิเนียมเกรด 1050 H24 [10] อัตราส่วนระหว่างความกว้างของร่องรอยเชื่อมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกดเชื่อมแบบมีหัวกวนที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของวัสดุอะลูมิเนียมเกรด 6063 T6 ที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ [11] และการอบอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 900-1,100 °C ที่เวลาต่าง ๆ เพิ่มสมบัติความเปื่อยกผิว กำจัดสารปนเปื้อนและแก๊สที่อยู่ในอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ดี รวมทั้งการเกิดชั้นฟิล์มออกไซด์เพิ่มขึ้นผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน [12, 13]

4. วิธีการดำเนินการศึกษา

4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

4.1.1 โลหะอะลูมิเนียมผสม 6061 (AA6061) โดยมีค่าส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 โดยเตรียมชิ้นงานการทดลองขนาด $100 \times 100 \times 6 \text{ mm}^3$ มีการเจาะรูตรงกลางชิ้นงานตามแนวการเชื่อม ในรูปที่ 3 รูเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm ความลึกของรูเจาะเท่ากับ 2 mm และระยะห่างระหว่างแต่ละรูเจาะเท่ากับ 1 mm

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของแผ่นอะลูมิเนียมเกรด 6061 [4]

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti	Zn	Other
%	0.4-0.8	0.7 Max	0.15- 0.4	0.15 Max	0.8- 1.20	0.04- 0.35	0.15 Max	0.25 Max	0.15 Max

4.1.2 อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ใช้ในการทดลองขนาดอนุภาค 5 ไมครอน ทำการอบไล่ความชื้นอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 890°C เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์รวมตัวกับอะซิโตน เพื่อง่ายต่อการบรรจุลงในรูเจาะ การเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในชิ้นงาน งานวิจัยนี้ได้คำนวณหาค่าสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เติมเพิ่มเข้าไปในรอยเชื่อม คือ %Fraction Volume = 7.63 %

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของซิลิคอนคาร์ไบด์ [14]

มวลโมเลกุล	40.10
ค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Expansion)	$4.4 \times 10^{-6} (^\circ\text{C})^{-1}$
ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	410 GPa
จุดหลอมเหลว (Melting Point)	$2,700^\circ\text{C}$
ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat)	0.285 cal/g k
ความแข็ง (Hardness)	9.0-9.5 Moh's scale
ความหนาแน่น (Bulk Density)	2.0 g/cm^3
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	3.2

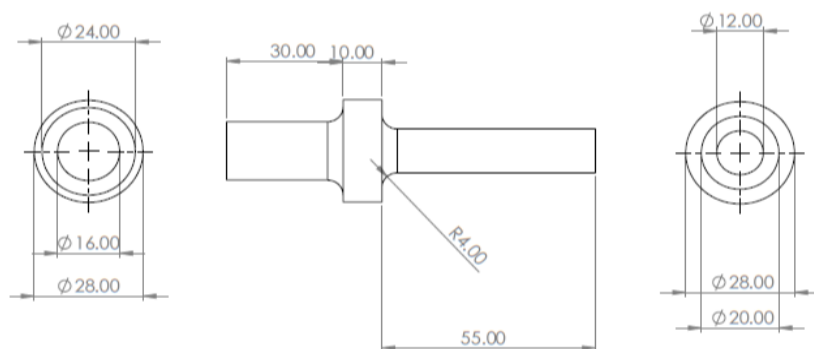
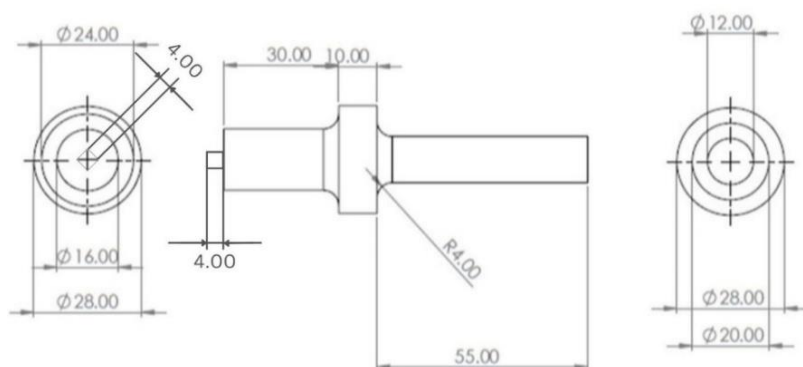
4.1.3 ชนิดของหัวกดเชื่อม (Tool Rotation) เป็นเครื่องมือที่ต้องทนความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทาน ยังต้องรับภาระทั้งแรงกด แรงบิด และการเสียดสี ทำมาจากวัสดุเหล็กกล้า JIS SKD 11 (AISI D2) เป็นเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของ C และ Cr สูง โดยมีค่าส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้า JIS SKD11 (หน่วยเป็น %) [15]

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
1.40– 1.60	≤0.40	≤0.60	≤0.03	≤0.03	≤0.25	≤0.50	11.0– 13.0	0.80– 1.20	0.20– 0.50

หัวกดเชื่อมแบบไม่มีหัวกวนและหัวกดเชื่อมแบบมีหัวกวน นำมาผ่านกระบวนการปรับสมบัติด้วยความร้อน (Heat Treatment) โดยอบที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำมาชุบลงในน้ำมันและปล่อยให้เย็นตัวในน้ำมัน หลังจากนั้นนำมาผ่านกระบวนการอบคืนตัว (Tempering) ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำมาชุบน้ำมันอีกครั้งและปล่อยให้เย็นตัวในน้ำมัน [16] ได้ค่าความแข็งเฉลี่ย 60.8 HRC

หัวกดเชื่อมในการทดลองประกอบด้วยรูปทรง 2 แบบ คือ 1.หัวกดเชื่อมแบบไม่มีหัวกวน (Pinless Tool) ลักษณะดังรูปที่ 1 และ 2 หัวกดเชื่อมแบบมีหัวกวนทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square Pin Tool) ขนาดกว้างด้านละ 4 mm และ ยาว 4 mm ลักษณะดังรูปที่ 2 ทุกหัวกดเชื่อมจะมีบ่าให้ความร้อน (Tool Shoulder) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm

**รูปที่ 1** ลักษณะหัวกดเชื่อมแบบไม่มีหัวกวน**รูปที่ 2** ลักษณะหัวกดเชื่อมแบบมีหัวกวนทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

4.2 ขั้นตอนการทดลอง

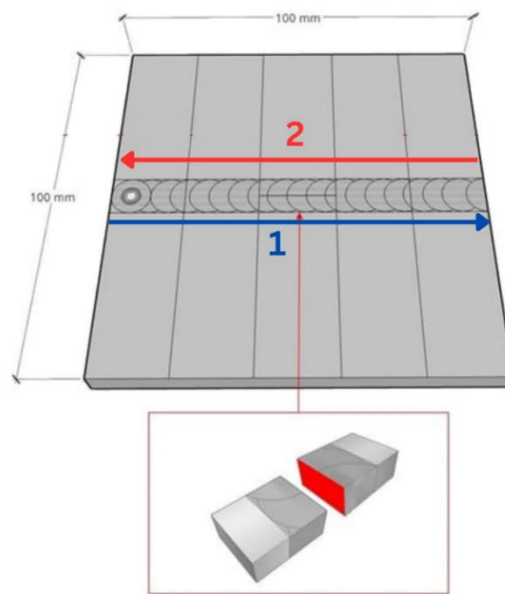
การทดลองเริ่มต้นจากการนำแผ่นอะลูมิเนียมเกรด 6061 ที่เตรียมไว้มาทำการจับยึดกับฐานยึดกระบวนกรเชื่อมจากเครื่อง Milling Machine Tong-IL TNV-50 และทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ด้วยเครื่อง INNOYATEST Verzus 750U การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามวัตถุประสงค์การวิจัย

4.2.1 เพื่อศึกษาผลการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในชิ้นงานและไม่ให้เกิดการฟุ้งกระจาย ทำการกำหนดความเร็วเดินเชื่อม 40 mm/min และความเร็วหมุนเชื่อม 1,800 rpm เพื่อให้เกิดความร้อนสูงบริเวณผิวหน้ารอยเชื่อม ส่งผลให้ปิดผิวด้านบนไม่ให้อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เกิดการฟุ้งกระจายตัวในบริเวณพื้นที่กวนรอยเชื่อม เวลาในการแช่หัวกดเชื่อมก่อนเดินเชื่อม 2 นาที ในทั้ง 2 รอบ โดยทำการศึกษาเป็น 2 แบบ แบบที่ 1 ทำเชื่อมด้วยหัวกดเชื่อมไม่มีหัวกวนในรอบที่ 1 และหัวกดเชื่อมเชื่อมแบบหัวกวนสี่เหลี่ยมในรอบที่ 2 เปรียบเทียบกับแบบที่ 2 หัวกดเชื่อมแบบมีหัวกวนสี่เหลี่ยมทั้งรอบที่ 1 และรอบที่ 2 โดยมีทิศทางการเชื่อมรอบที่ 1 และรอบที่ 2 ดังในรูปที่ 3 [10, 17] ผลของลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมและโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

4.2.2 เพื่อศึกษาผลการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในชิ้นงานทดสอบ เพื่อให้ผลการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นจึงเพิ่มความลึกของรูเจาะเป็น 4 mm โดยทำการเชื่อมทั้งหมด 2 รอบ รอบที่ 1 เชื่อมโดยใช้หัวกดเชื่อมแบบไม่มีหัวกวน ความเร็วในการเชื่อม 40 mm/min ความเร็วหมุนเชื่อม 1,800 rpm เวลาในการแช่หัวเชื่อมก่อนเดินเชื่อมคือ 2 นาที เพื่อปิดผิวรอยเชื่อมด้านบนให้อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในพื้นที่กวนรอยเชื่อม และรอบที่ 2 ทิศทางการเชื่อมสวนทางกับรอบที่ 1 เชื่อมโดยใช้หัวกดเชื่อมแบบมีหัวกวนทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส เวลาในการแช่หัวกดเชื่อมแบบมีหัวกวน คือ 3 นาทีก่อนการเดิน เพื่อให้เหมาะสมกับการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในรอยเชื่อมตามงานวิจัยที่ได้ศึกษา [7] โดยมีพารามิเตอร์ที่ทำการเชื่อมในรอบที่ 2 มีทั้งหมด 9 การทดลองในตารางที่ 4 ทิศทางการเชื่อมและตัดชิ้นงานตามตำแหน่งกลางชิ้นงานเชื่อม ดังรูปที่ 3 เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของผิวด้านบนรอยเชื่อมดังในรูปที่ 6 ผลทางโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ในรูปที่ 7 และกำลังขยาย 1,500 เท่า ในรูปที่ 8 และผลความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อมแสดงในรูปที่ 9

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ต่าง ๆ การทดลองเชื่อมรอบที่ 2

การทดลองที่	ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	ความเร็วหมุนเชื่อม (rpm)
1	26	920
2	26	1,040
3	26	1,330
4	34	920
5	34	1,040
6	34	1,330
7	50	920
8	50	1,040
9	50	1,330



รูปที่ 3 ทิศทางการเดินเชื่อมรอบที่ 1 และรอบที่ 2 และตำแหน่งการตัดชิ้นงานทดสอบเตรียมชุดดูโครงสร้างจุลภาค และทดสอบความแข็ง

5. ผลการศึกษา

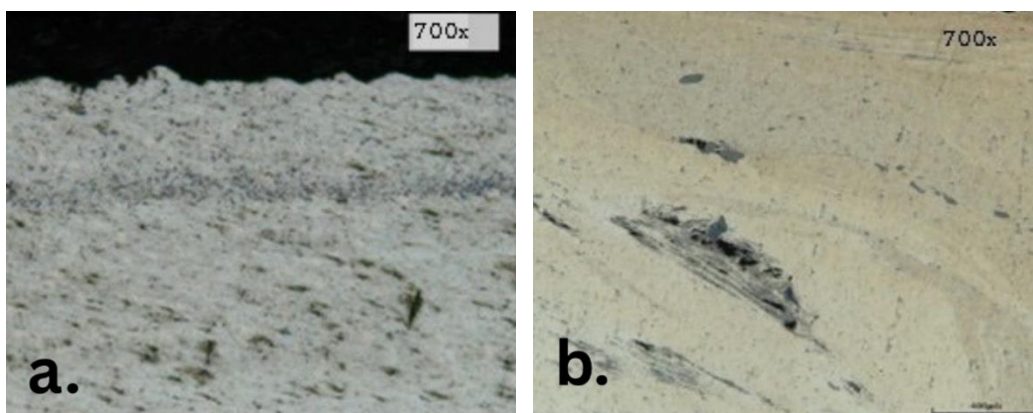
5.1 ผลของการศึกษาการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมของการทดลองที่ผ่านการเชื่อม 2 รอบ บริเวณผิวหน้าด้านบนมีลักษณะเชื่อมปิดสนิท แต่เกิดครีปที่เกิดจากการไม่หลอมละลายของอะลูมิเนียมทั้งหัวกดเชื่อมที่มีหัวทวนสี่เหลี่ยมและไม่มีหัวทวน แต่หัวกดเชื่อมที่มีหัวทวนสี่เหลี่ยมรอบที่ 1 จะมีการกระจายอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ออกบริเวณข้างแนวเชื่อมปริมาณมากอย่างชัดเจนที่วงกลมสีแดง ดังในรูปที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบกับมีหัวกดเชื่อมไม่มีหัวทวนในรอบที่ 1 จะมีปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ด้านข้างน้อยกว่า



รูปที่ 4 ลักษณะแนวเชื่อมด้านบนและด้านข้างที่ผ่านการเชื่อมหัวทวนสี่เหลี่ยม 2 รอบ

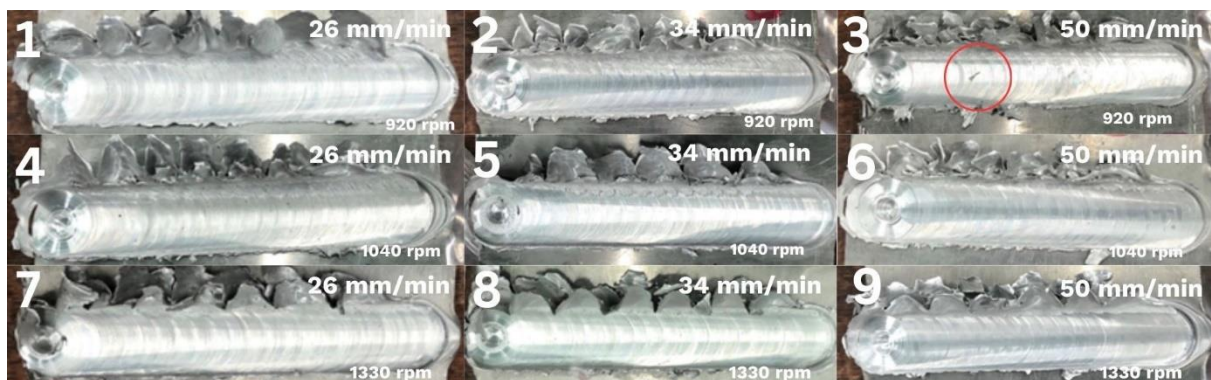
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเชื่อม 2 รอบ เมื่อเปรียบผลแบบที่ 1 ไม่มีหัวกวนรอบที่ 1 และหัวกวนทรงสี่เหลี่ยมรอบที่ 2 พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ทั่วทั้งบริเวณที่มีการกวน และพบปริมาณมากบริเวณใกล้ของรูเจาะกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในรูป 5 (a) ส่วนแบบที่ 2 โครงสร้างจุลภาคหัวกดเชื่อมแบบมีหัวกวนสี่เหลี่ยมทั้ง 2 รอบ จะพบบริเวณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์บริเวณขอบของรูที่เจาะ เกิดรูหนอนและเกิดโพรงภายในบริเวณส่วนล่างของโซนการกวนใกล้รูเจาะ ดังในรูปที่ 5 (b) เนื่องจากอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์อยู่บริเวณรูเจาะปริมาณมาก จึงได้ทำการปรับความลึกของรูเจาะให้เหมาะสม เพื่อไม่ให้ชิ้นทดสอบเกิดโพรงภายในและให้อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ในการทดลองส่วนที่ 2 จึงเพิ่มความลึกรูเจาะจาก 2 mm เป็น 4 mm



รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่กำลังขยาย 700 เท่า (a) ไม่มีหัวกวน และ (b) หัวกวนทรงสี่เหลี่ยม

5.2 ผลการศึกษาการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์

ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อม จากการทดลองพบว่า ผิวหน้ารอยเชื่อมส่วนใหญ่เชื่อมปิดสนิทในทุกพารามิเตอร์การเชื่อม ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมที่ความเร็วเดินเชื่อมที่ 26 mm/min ความเร็วเดินเชื่อมที่ 34 mm/min และความเร็วเดินเชื่อมที่ 50 mm/min กับความเร็วหมุนเชื่อม ที่ 920, 1,040 และ 1,330 rpm ลักษณะผิวด้านบนชิ้นงานทดสอบมีลักษณะเชื่อมปิดสนิท ไม่เกิดความบกพร่องบนผิวหน้ารอยเชื่อม แต่ที่ความเร็วเดินเชื่อมที่ 50 mm/min ด้วยความเร็วหมุนเชื่อม 920 rpm ผิวชิ้นงานทดสอบเกิดรอยที่ไม่ต่อเนื่องบริเวณผิวหน้ารอยเชื่อม (วงกลมสีแดงในรูปที่ 6) ซึ่งเกิดเป็นรอยร้าวตามแนวการเชื่อม เป็นผลจากความร้อนแล้วเกิดการเย็นตัวเร็ว ซึ่งเกิดจากการหดตัวในแนวยาวของรอยเชื่อมชิ้นงานและทุกชิ้นงานที่ทดสอบเกิดครีบกจากการที่อะลูมิเนียมหลอมละลายไม่เพียงพอทั้งสองรอบการเดิน ความเร็วรอบการเชื่อมที่ต่ำลักษณะผิวแนวเชื่อมด้านบนหยาบกว่าผิวแนวเชื่อมที่ความเร็วรอบการเชื่อมสูง เนื่องมาจากการเดินความเร็วรอบการเชื่อมสูงทำให้มีแรงเสียดทานสูงตามส่งผลให้ขณะเดินแนวเชื่อมทำให้มีความร้อนสะสมมากกว่าความเร็วรอบต่ำ ทำให้เนื้ออะลูมิเนียมเกิดการอ่อนตัวมากกว่า เกิดการหลอมของอะลูมิเนียม ส่งผลให้เกิดรอยเชื่อมที่ต่อเนื่อง เชื่อมปิดผิวที่ดีกว่า ดังในรูปที่ 6

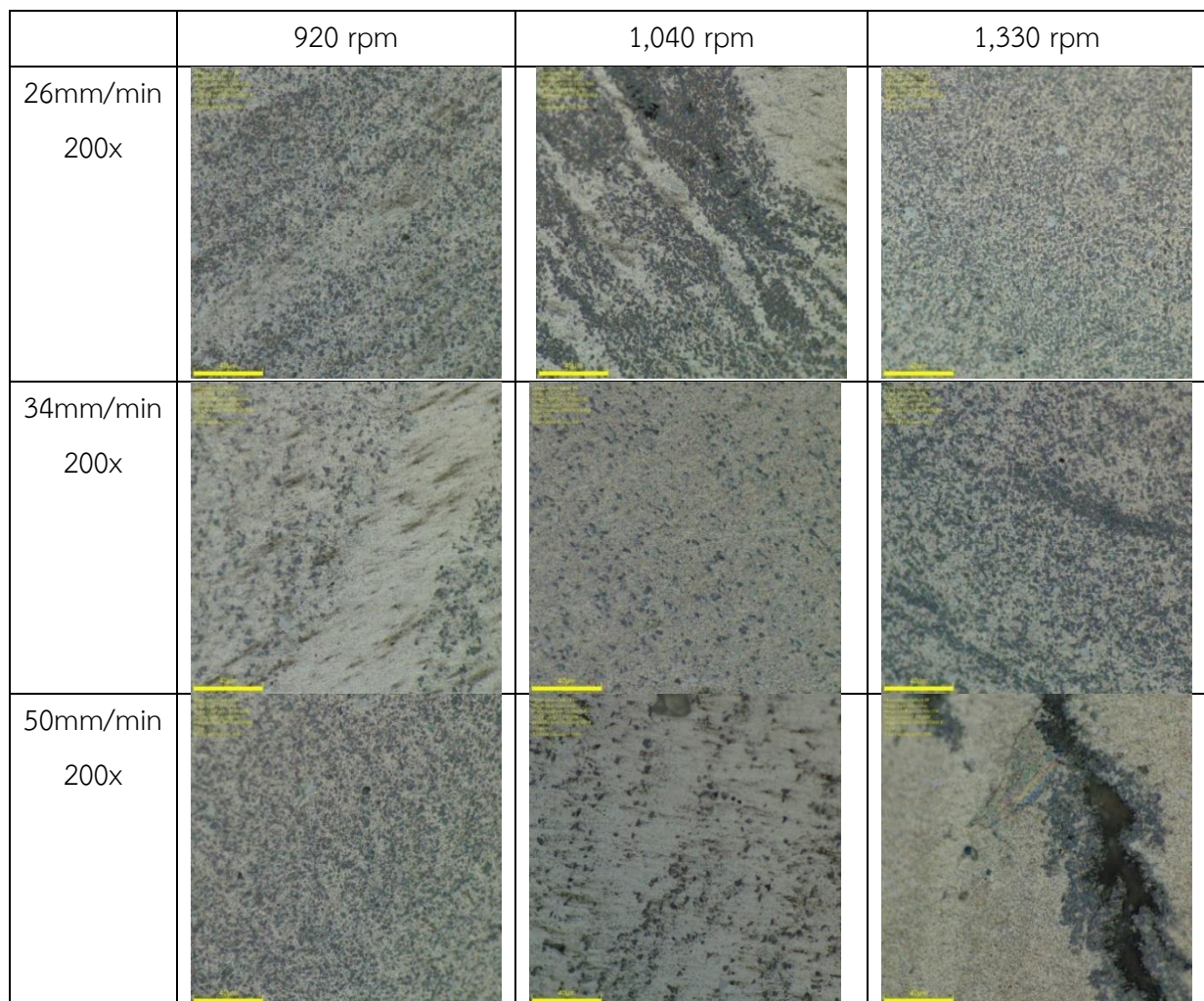


รูปที่ 6 ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมค่าความเร็วเดินเชื่อมและความเร็วหมุนเชื่อมต่าง ๆ

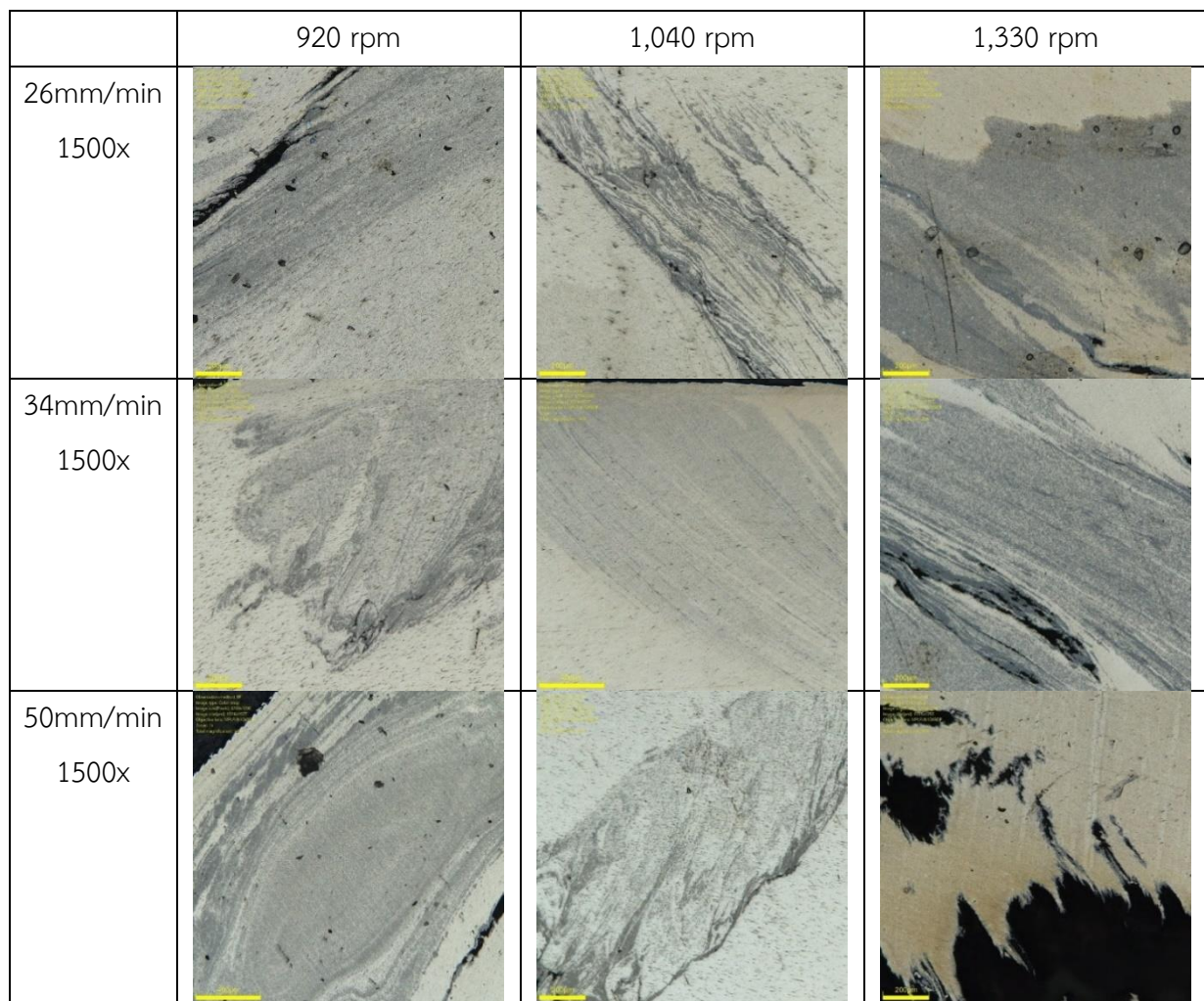
โครงสร้างจุลภาคพิจารณาที่ความเร็วเดินเชื่อม 26 mm/min เป็นหลักที่ความเร็วหมุนเชื่อม 920 rpm การกระจายตัวซิลิคอนคาร์ไบด์ค่อนข้างดี แต่พบรูลงนอน โปร่งขนาดใหญ่ และมีซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวอยู่ตามขอบของโพรงภายในที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,040 rpm การกระจายตัวซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นลักษณะเส้นยาวตามแนวการกวและเกาะกลุ่มกันตามบริเวณรูเจาะ และที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,330 rpm กำลังขยาย 200 เท่า จะมีการกระจายตัวที่ดีมากเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอยหัวเชื่อมที่โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายเพิ่มขึ้น 1,500 เท่า พบว่าที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,330 rpm มีการกระจายตัวซิลิคอนดีและอย่างสม่ำเสมอที่สุด

โครงสร้างจุลภาคพิจารณาที่ความเร็วเดินเชื่อม 34 mm/min เป็นหลักที่ความเร็วหมุนเชื่อม 920 rpm มีการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ค่อนข้างทั่วผิว แต่มีปริมาณที่เบาบาง ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่าการเรียงตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ไม่ดี เกิดโพรงภายในจากการเติมเนื้อไม่สมบูรณ์ และไม่กระจายตัวทั่วบริเวณโซนการกวอย่างสม่ำเสมอ ความเร็วหมุนเชื่อม 1,040 rpm การกระจายตัวค่อนข้างดี ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่าซิลิคอนคาร์ไบด์เรียงตัวกันไม่ดี พบรูลงนอนเล็กน้อย ยังคงเกิดโพรงภายในจากการเติมเนื้อไม่สมบูรณ์ และไม่กระจายตัวทั่วบริเวณโซนการกวอย่างสม่ำเสมอ ที่ความเร็วเดินเชื่อม 34 mm/min และความเร็วหมุนเชื่อม 1,330 rpm นั้นค่อนข้างดีที่กำลังขยาย 200 เท่า แต่ยังพบโพรงขนาดใหญ่ และที่กำลังขยาย 1,500 เท่า มีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ดี แต่ยังเกาะกลุ่มไม่ทั่วบริเวณโซนการกวอย่างสม่ำเสมอ

โครงสร้างจุลภาคพิจารณาที่ความเร็วเดินเชื่อม 50 mm/min เป็นหลักที่ความเร็วหมุนเชื่อม 920 rpm กำลังขยาย 200 เท่า มีการกระจายตัวที่ดี ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า มีการเรียงตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ดี แต่ยังพบโพรงขนาดใหญ่จากการเติมเนื้อโลหะในรอยเชื่อมไม่สมบูรณ์ ความเร็วหมุนเชื่อม 1,040 rpm ที่กำลังขยาย 200 เท่า มีการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ตัวที่ดี แต่มีรูลงนอนที่ค่อนข้างมาก ความเร็วหมุนเชื่อม 1,330 rpm ที่กำลังขยาย 200 เท่า การกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ไม่ดี และพบซิลิคอนคาร์ไบด์เกาะอยู่ตามโพรงภายใน และมีรูลงนอนบริเวณที่ซิลิคอนกระจุกกันอยู่อย่างหนาแน่น รวมทั้งเกิดโพรงขนาดใหญ่ เกิดจากความเร็วเดินเชื่อมที่สูงเกินไป ทำให้การไหลตัวของเนื้อวัสดุไม่เพียงพอ เนื่องจากความร้อนที่ต่ำเกินไป

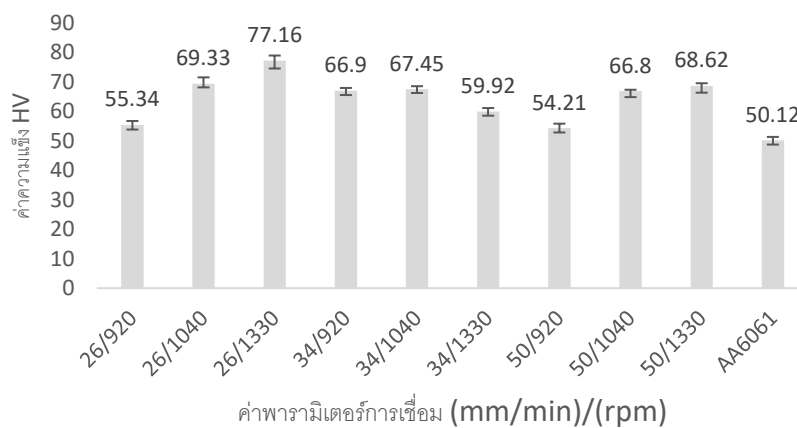


รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ความเร็วเดินเชื่อม 26 mm/min 34 mm/min และ 50 mm/min ที่ความเร็วรอบหัวกลน 920 rpm 1,040 rpm และ 1,330 rpm กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ความเร็วเดินเชื่อม 26 mm/min 34 mm/min และ 50 mm/min ที่ความเร็วรอบหัวทวน 920 rpm 1,040 rpm และ 1,330 rpm กำลังขยาย 1,500 เท่า

โครงสร้างจุลภาคของการกระจายตัวซิลิคอนคาร์ไบด์เมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วเดินเชื่อมต่างกันพบว่า ที่ความเร็วเดินเชื่อม 26 mm/min และ 34 mm/min จะมีการกระจายตัวที่ดีกว่าที่ความเร็วเดินเชื่อม 50 mm/min เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1,500 เท่าพบว่า ความเร็วเดินเชื่อม 26 mm/min และความเร็วหมุนเชื่อม 1,330 rpm มีการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ดีที่สุด มีการเกิดโพรงภายในชิ้นงาน มีขนาดเล็กที่สุดและไม่พบรูหนอนขนาดใหญ่ และทำการทดสอบความแข็งในแต่ละชิ้นงานต่อไป ผลการวัดความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ความเร็วการเดินเชื่อม และความเร็วหมุนเชื่อมที่ปัจจัยต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับความเร็วในการเชื่อม

จากรูปที่ 9 ผลการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานตามแนวเดินเชื่อม (Hardness Value : HV) ที่ความเร็วเดินเชื่อมและ ความเร็วหมุนเชื่อมของชิ้นงาน ที่ปัจจัยต่าง ๆ พบว่าค่าความแข็งสูงสุดอยู่ที่ 77.16 HV ที่ความเร็วเดินเชื่อม 26 mm/min และ ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1,330 rpm ซึ่งมีความสอดคล้องกับ โครงสร้างจุลภาคที่มีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ดีที่สุด ส่วนค่าความแข็งต่ำสุดอยู่ที่ 54.21 HV เกิดที่ความเร็วเดินเชื่อม 50 mm/min และความเร็วหมุนเชื่อม 920 rpm จากผลลักษณะรอยเชื่อมด้านบน มีรอยร้าวตามแนวเชื่อม และจากผลโครงสร้างจุลภาคพบโพรงขนาดใหญ่จากการเติมเนื้อโลหะในรอยเชื่อม ไม่สมบูรณ์ สำหรับค่าความเร็วเดินเชื่อม และความเร็วหมุนเชื่อม อื่น ๆ จะมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 54.21 ถึง 69.33 HV มีค่าสูงกว่าอะลูมิเนียม 6061 ที่ไม่ได้เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่มีความแข็ง 50.12 HV

6. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลในอะลูมิเนียมเกรด 6061 คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ว่า

6.1 การใช้หัวกดเชื่อมแบบไม่มีหัวกวนในรอบที่ 1 มีผลการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในรอยเชื่อมกระจายตัวได้ดี เกิดรอยบกพร่องน้อย อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ออกนอกแนวเชื่อมน้อย

6.2 ความเร็วเดินเชื่อมมีผลต่อความร้อนสะสมในชิ้นงาน ความเร็วเดินเชื่อมสูงเกินไปทำให้เกิดความร้อนสูง และมีการระบายความร้อนในชิ้นงานไม่เพียงพอ ส่งผลต่อโครงสร้างในแนวเชื่อม ทำให้เกิดรอยเชื่อมไม่ต่อเนื่อง เกิดรอยร้าว รุหนอน และโพรงภายใน

6.3 ความเร็วหมุนเชื่อมมีผลต่อลักษณะรอยเชื่อมด้านบน พบว่าที่ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำลักษณะรอยเชื่อมหยาบกว่าที่ความเร็วรอบการเชื่อมสูง เนื่องมาจากการเดินความเร็วหมุนเชื่อมสูงทำให้มีแรงเสียดทานสูง ทำให้มีความร้อนสะสมสูงเป็นผลให้เนื้ออะลูมิเนียมเกิดการอ่อนตัวมากกว่า ส่งผลให้เกิดรอยเชื่อมที่ต่อเนื่อง เชื่อมปิดผิวที่ดีกว่า

6.4 ความแข็งสูงสุดที่ 77.16 HV เกิดที่ความเร็วเดินเชื่อม 26 mm/min และความเร็วหมุนเชื่อม 1,350 rpm สอดคล้องกับการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ดีในรอยเชื่อม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Materia TT. Marine applications of aluminum alloys [Internet]. 2025 [cited 2025 Mar 3]. Available from: <https://www.totalmateria.com/en-us/articles/marine-applications-of-aluminum-alloys-1/>.
- [2] Morris PL, Baker C. Properties and applications of particulate reinforced aluminum MMC. In: Bouchard M, Tremblay P, editors. Production, refining, fabrication and recycling of light metals. Oxford: Pergamon; 1990. p. 199-209.
- [3] Pk J, et al. The effect of SiC content in aluminum-based metal matrix composites on the microstructure and mechanical properties of welded joints. J Mater Res Technol. 2021;12:2325-2339.
- [4] Aluminum Association Standards (A.A.S). Aluminum 6061-T6; 6061-T651 [Internet]. 2025 [cited 2025 Mar 1]. Available from: <https://asm.matweb.com/search/specificmaterial.asp?bassnum=ma6061t6>.
- [5] Skilled Investments in Aluminum (S.I.i). Advantages of friction stir welding (FSW) | SBB [Internet]. 2023 [cited 2023 Feb 22]. Available from: <https://sbb.ca/home/servicessbb/fsw/>.
- [6] Elsayed M, Shash A, Abd-Rabou M, El-Sherbiny M. Welding and processing of metallic materials by using friction stir technique: A review. J Adv Joining Process. 2021;3:1-20. doi: 10.1016/j.jajp.2021.100059.
- [7] Bodaghi M, Dehghani K. Friction stir welding of AA5052: the effects of SiC nano-particles addition. Int J Adv Manuf Technol. 2017;88:2651-2660. doi: 10.1007/s00170-016-8959-8.
- [8] Kumar D, Ottarackal D, Acharya U, Medhi T, Saha Roy B. A parametric study of friction stir welded AA6061/SiC AMC and its effect on microstructure and mechanical properties. Mater Today Proc. 2020. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.
- [9] Takhakh AM, Abdulla HH. Surface modification of AA 7075-T651 plate using friction stir processing with SiC particles. Emirates J Eng Res. 2017;22(3):1-11.
- [10] Mahmoud ERI, Takahashi M, Shibayanagi T, Ikeuchi K. Effect of friction stir processing tool probe on fabrication of SiC particle reinforced composite on aluminium surface. Sci Technol Weld Join. 2009;14(5):413-425. doi: 10.1179/136217109X406974.
- [11] Rathee S, Maheshwari S, Siddiquee A, Srivastava M. Investigating effects of groove dimensions on microstructure and mechanical properties of AA6063 / SiC surface composites produced by friction stir processing. Trans Indian Inst Met. 2017. doi: 10.1007/s12666-017-1060-7.

-
- [12] Zhou W, Xu ZM. Casting of SiC reinforced metal matrix composites. J Mater Process Technol. 1997;63(1–3):358-363. doi: 10.1016/S0924-0136(96)02647-7. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013696026477>.
- [13] Hashim J, Looney L, Hashmi MSJ. Metal matrix composites: Production by the stir casting method. J Mater Process Technol. 1999;92-93:1-7. Available from: <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=642817>.
- [14] AZoM.com. Silicon carbide (SiC) properties and applications [Internet]. 2001 Feb 5 [cited 2025 Mar 2]. Available from: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=42>.
- [15] Otai Special Steel. D2 tool steel | 1.2379 | X153CrMo12 | SKD11 [Internet]. 1999-2024 [cited 2025 Mar 2]. Available from: <https://www.astmsteel.com/product/d2-tool-steel-1-2379-x153crmo12-skd11/>.
- [16] Fine Cause Co., Ltd. SKD11 steel characters and heat treatment [Internet]. 2025 [cited 2025 Mar 3]. Available from: <https://www.finecause.com/knowledge/knowledge-7-1>.
- [17] Alhelli A, Al Hamaoy A, Takhakh A. Effect of friction stir processing parameters on the properties of AA7075-T73/Al₂O₃ surface metal matrix composite. Mater Sci Forum. 2020;1002:140-150. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1002.140.

การศึกษาความสามารถการดูดซับพลังงานของท่อผนังบางรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม เติมโฟมภายใต้โมเมนต์บิด

Study on the Energy Absorption Capacity of Foam-Filled Thin-Walled Tubes with Polygon Cross-Sections under Torsional Loading

สมญา ภูณะยา^{1*} และ รัชดา โสภาคะยัง²
Somya Poonaya^{1*} and Ratchada Sopakayang²

Received: May 7, 2025

Revised: May 26, 2025

Accepted: May 29, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ เพื่อศึกษาความสามารถการดูดซับพลังงานของท่อผนังบางรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมที่มีการเติมโฟมภายใต้สถานะโมเมนต์บิด โดยศึกษาท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม ได้แก่ ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม พร้อมความหนาแน่นโฟม 50, 100, 150, 200 และ 250 kg/m³ ตามลำดับ การวิเคราะห์ใช้วิธีการทดลองและวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดกับมุมบิดจากการทดลองกับไฟไนต์เอลิเมนต์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนร้อยละ 8.31 ส่วนผลของความหนาแน่นโฟม พบว่าเมื่อความหนาแน่นโฟมเพิ่มขึ้นจาก 0 kg/m³ (ท่อไม่เติมโฟม) เป็น 100 kg/m³ ความสามารถในการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น แต่หลังจากความหนาแน่นโฟมมากกว่า 100 kg/m³ ขึ้นไป จะเข้าสู่สภาวะการอิ่มตัว (ค่าความสามารถการดูดซับพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก) ผลของรูปร่างหน้าตัดของท่อ พบว่า ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม ให้ค่าความสามารถการดูดซับพลังงานและใกล้เคียงกัน ถัดมาเป็นท่อหกเหลี่ยม และท่อสี่เหลี่ยมมีค่าความสามารถการดูดซับพลังงานต่ำที่สุด

คำสำคัญ: ท่อเติมโฟม, ความหนาแน่นโฟม, โมเมนต์บิด, ท่อหลายเหลี่ยม

^{1*}รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

E-mail: somya.p@ubu.ac.th

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

E-mail: ratchada.s@ubu.ac.th

*Corresponding Author

Abstract

This investigation aimed to study the energy absorption capacity of thin-walled tubes with polygon cross-sections under torsional loading. The tube cross-sections included square, hexagonal, octagonal, decagonal, icosagonal, hexacontagonal, octacontagonal, and circular shapes. Foam densities of 50, 100, 150, 200, and 250 kg/m³ were considered. The analysis was conducted using experimental and finite element methods

The analysis results concluded that the relationship of the torsional moment-angle curves from the finite element agreed well with experimental results and has an average percentage error is 8.31%. Then, the result of foam densities was found that increasing the foam densities at 0 kg/m³(empty tube) to 100 kg/m³ increase the energy absorption capacity of foam-filled polygon tubes. After that, when the foam density exceeds 100 kg/m³, the energy absorption capacity tends to reach a saturation state (the energy absorption capacity exhibits minimal variation). Furthermore, the result of the polygonal shapes was found that the *octagonal, decagonal, icosagonal, hexacontagonal, octacontagonal*, and circle tube exhibit the highest and comparable levels of energy absorption capacity. This is followed by the hexagonal tube and the energy absorption capacity of the square tube is the lowest.

Keywords: Foam-Filled Tube, Foam Density, Torsional Loading, Polygon Tubes

1. บทนำ

การลดความเสียหายของโครงสร้างและการเพิ่มความปลอดภัยของผู้ขับขี่ยานพาหนะ เนื่องจากการชนภายใต้พลังงานจลน์มากกระทำกับยานพาหนะ ท่อผนังบางจึงถูกนำมาใช้เพื่อเป็นตัวดูดซับพลังงานหรือกันชนเพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพความปลอดภัยในการชน การศึกษาท่อผนังบางที่มีรูปร่างหน้าตัดต่าง ๆ จึงเป็นที่สนใจสำหรับนักวิจัยส่วนใหญ่ เช่น ท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม [1-6] ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อวงกลม นอกจากนี้ยังมีท่อรูปดาว [7] ท่อวงรี [8] และท่อโอริกามี [9] เป็นต้น การเพิ่มวัสดุโฟมเข้าไปภายในท่อเหล่านี้จะเพิ่มความสามารถการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น [10-13] โดยตัวบ่งชี้ถึงความปลอดภัยในการชน ประกอบด้วย แรงเฉลี่ย แรงสูงสุด พลังงานดูดซับ และพลังงานดูดซับจำเพาะ เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยที่ได้ศึกษาปัญหาของท่อผนังบางของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมภายใต้สภาวะโมเมนต์บิดเพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปร่างหน้าตัดของท่อ โดยการเพิ่มจำนวนเหลี่ยมของพื้นที่หน้าตัดของท่อ ได้แก่ ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อวงกลม โดยท่อทั้งหมดนี้ได้เติมโฟมเพื่อเพิ่มความสามารถการดูดซับพลังงาน

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาความหนาแน่นของโฟมที่เพิ่มขึ้นต่อความสามารถดูดซับพลังงานของท่อที่มีรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้โมเมนต์บิด

2.2 เพื่อศึกษาจำนวนเหลี่ยมที่เพิ่มขึ้นของท่อที่มีรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้โมเมนต์บิด

2.3 เพื่อเป็นแนวทางให้วิศวกรนำไปออกแบบและเลือกใช้ท่อที่มีรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมต่าง ๆ เป็นตัวดูดซับพลังงานเนื่องจากการชน

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาปัญหาของท่อผนังบางภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด ได้แก่ Weigang Chen et al. (2000) [14] ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อผนังบางรูปร่างสี่เหลี่ยมภายใต้โมเมนต์บิด การทำนายของแบบจำลองเป็นการพิจารณาความเสียหายในช่วงพลาสติกโดยใช้วิธีพลังงาน ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้ผลสอดคล้องไปในทางเดียวกัน Weigang Chen et al. (2001) [15] ได้ศึกษาการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อสี่เหลี่ยมและเติมโฟมภายในท่อภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด โดยแบบจำลองความเสียหายจะพิจารณาในช่วงพลาสติก โดยผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้เปรียบเทียบกับผลการจำลองคอมพิวเตอร์และผลจากการทดลองมีค่าสอดคล้องกันดี และงานวิจัยนี้ยังสรุปได้ว่าท่อสี่เหลี่ยมเติมด้วยโฟมอูมิเนียมที่มีความหนาแน่น $0.14-0.28 \text{ g/cm}^3$ ให้ค่าการดูดซับพลังงานเป็นสองเท่ากับท่อสี่เหลี่ยมไม่เติมโฟม นอกจากนี้ยังมีนักวิจัย Somya Poonaya et al. (2009) [16] ได้ศึกษาการเปรียบเทียบความสามารถดูดซับพลังงานของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมทรงเรียว (Tapered Tube) ภายใต้โมเมนต์บิด โดยวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยมุมเรียว (Tapered Angle) ที่ได้ศึกษาเท่ากับ 0, 5 และ 10 องศา ผลการศึกษาพบว่า ความสามารถในการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อมุมเรียวเพิ่มขึ้น และท่อรูปร่างวงกลม ที่มุมเรียว 10 องศา ให้ค่าการดูดซับพลังงานมากที่สุด ต่อมา Surasing Arayangkul et al. (2014) [17] ได้ศึกษาการหาประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม (ไม่เติมโฟม) ภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด ประกอบด้วยท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อวงกลม โดยใช้วิธีการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ผลที่ได้สอดคล้องกันดี และผลการวิเคราะห์ผลของรูปร่างของท่อหลายเหลี่ยม พบว่าที่ความหนาของท่อ 1 mm ท่อวงกลมมีความสามารถในการดูดซับพลังงานและประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานมากที่สุด และที่ความหนาของท่อ 2 และ 3 mm ท่อแปดเหลี่ยมมีความสามารถในการดูดซับพลังงานและประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานมากที่สุด และยังมีงานวิจัยของ Somya Poonaya (2024) [18] ได้ศึกษาท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้แรงดัด พบว่าเมื่อความหนาแน่นโฟมเพิ่มขึ้นความสามารถดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น ส่วนผลของรูปร่างพื้นที่หน้าตัดของท่อพบว่าท่อทุกชนิดมีค่าการดูดซับพลังงานไม่ต่างกันมากนัก แต่พอสรุปได้ว่าท่อหกเหลี่ยมให้ค่าการดูดซับพลังงานมากที่สุด Somya Poonaya (2024) [19] ได้ศึกษาท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้โมเมนต์บิดโดยวิธีการทดลองเท่านั้น โดยวัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นอูมิเนียม พบว่าท่อวงกลมมีค่าพลังงานดูดซับมากที่สุด Somya Poonaya et al. (2024) [20]

ได้ศึกษาท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาส ภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด โดยวิธีการจำลองคอมพิวเตอร์ ผลจากการจำลองคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองให้ผลที่สอดคล้องกันดี วัสดุที่ใช้เป็นอลูมิเนียมและไฟเบอร์กลาสเป็นใยแก้วผสมเรซิน ผลการวิจัยสรุปได้ว่าท่อหกเหลี่ยมหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสมีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงสุด

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด ทำให้มีการพัฒนาต่อยอดของงานวิจัย โดยบทความวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือการเพิ่มจำนวนของหนาแน่นของโพลีเมอร์ที่เติมภายในของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมที่ 50, 100, 150, 200, 250 kg/m³ เพื่อศึกษาผลกระทบของความหนาแน่นโพลีเมอร์ที่มากขึ้นต่อความสามารถในการดูดซับพลังงาน และจุดเด่นของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมที่มีการเพิ่มจำนวนเหลี่ยมของท่ออย่างละเอียด ตั้งแต่ ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และทอวงกลม ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับพลังงาน ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับวิศวกรผู้นำไปออกแบบด้านการชนในการเลือกใช้ท่อผนังบางรูปร่างหน้าตัดต่าง ๆ ที่มีความสามารถดูดซับพลังงานดีที่สุด

4. วิธีดำเนินการศึกษา

4.1 ขอบเขตงานวิจัย

4.1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นอลูมิเนียมที่มีความหนา 1 mm ความยาวเส้นรอบวงของหน้าตัด 320 mm ความยาวของท่อ 150 mm

4.1.2 ท่อที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย ท่อรูปร่างสี่เหลี่ยม ท่อรูปร่างหกเหลี่ยม ท่อรูปร่างแปดเหลี่ยม ท่อรูปร่างสิบเหลี่ยม ท่อรูปร่างยี่สิบเหลี่ยม ท่อรูปร่างสี่สิบเหลี่ยม ท่อรูปร่างหกสิบเหลี่ยม ท่อรูปร่างแปดสิบเหลี่ยม และท่อรูปร่างวงกลม

4.1.3 โพลีเมอร์ที่ใส่เข้าไปในท่อเป็นโพลีเมอร์ชนิดโพลียูรีเทน ที่มีความหนาแน่น 50, 100, 150, 200, และ 250 kg/m³

4.1.4 ความเร็วที่ใช้ในการบิดท่ออย่างช้า ๆ เท่ากับ 10 mm/min

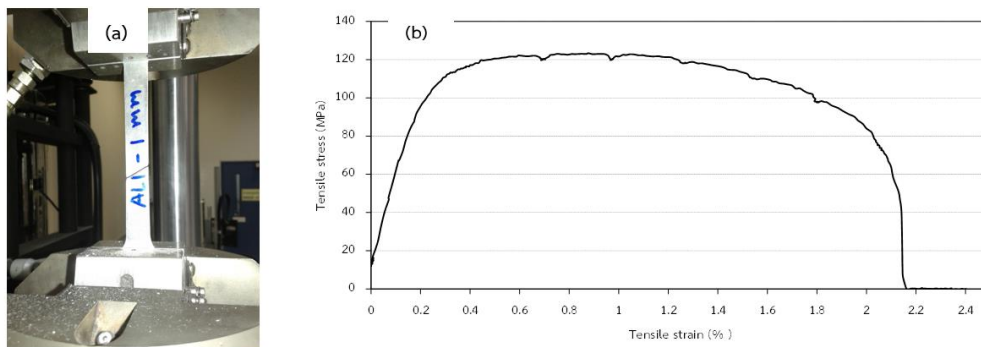
4.1.5 เงื่อนไขขอบเขตโดยปลายของท่ออีกด้านจะรับแรงบิด ส่วนอีกด้านจะถูกยึดแน่นไม่ให้เคลื่อนที่

4.1.6 ผลการทดลองจะนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เพื่อยืนยันความถูกต้องของการจำลองทางคอมพิวเตอร์

4.1.7 ค่าที่ได้จากการวัดคือ โมเมนต์บิดกับมุมบิด เพื่อนำไปคำนวณหาตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์โมเมนต์บิดเฉลี่ย และความสามารถในการดูดซับพลังงาน

4.2 คุณสมบัติวัสดุ

4.2.1 อลูมิเนียม มีความหนา 1 mm สามารถหาได้โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง การทดสอบและผลการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 1 จากผลการทดสอบจะได้คุณสมบัติวัสดุของอลูมิเนียมที่มีความหนาแน่น 2,700 kg/m³ อัตราส่วนปัวซอง 0.3, ยังก์มอดุลัสเฉลี่ย 32 GigaPascals (GPa), ความเค้นที่จุดคราก 110.38 MP



รูปที่ 1 คุณสมบัติวัสดุของอลูมิเนียม (a) การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง
(b) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงและความเครียดดึงของอลูมิเนียม

4.2.2 โฟม คุณสมบัติวัสดุของโฟมหาได้โดยการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกด กดโฟมขนาด 12x12x25.4 mm ดังแสดงในรูปที่ 2 (a) ในการทดสอบมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง ผลที่ได้จะนำมาหาค่าเฉลี่ย ดังนั้นจะได้ค่า Young's modulus เฉลี่ย 7 GPa และอัตราส่วนปัวซอง 0.2 และผลการทดสอบแสดงเป็นกราฟระหว่างความเค้นกดและความเครียดกด ดังรูปที่ 2 (b)

ส่วนคุณสมบัติของโฟมที่ความหนาแน่น 150, 200, 250 kg/m³ คำนวณได้จากสมการที่ (1) [21]

$$\sigma_p = c \left(\frac{\rho_f}{\rho_{f0}} \right)^m \quad (1)$$

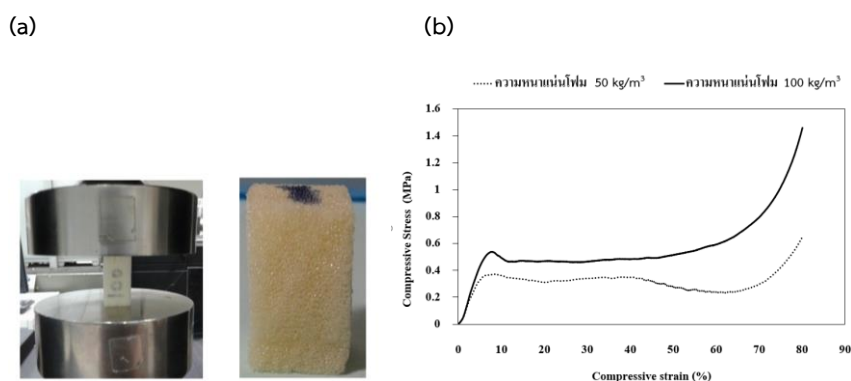
เมื่อ σ_p คือ ความเค้นครากตัว, MPa

ρ_f คือ ความหนาแน่นโฟม, kg/m³

ρ_{f0} คือ ความหนาแน่นโฟมสถานะเริ่มแข็งตัว เท่ากับ 38.35 kg/m³

c และ m เป็นค่าคงที่ สามารถหาได้จากการทดลอง จะได้ค่า $c = 0.3074$ และ $m = 0.503$

คุณสมบัติวัสดุของโฟม แสดงในตารางที่ 1



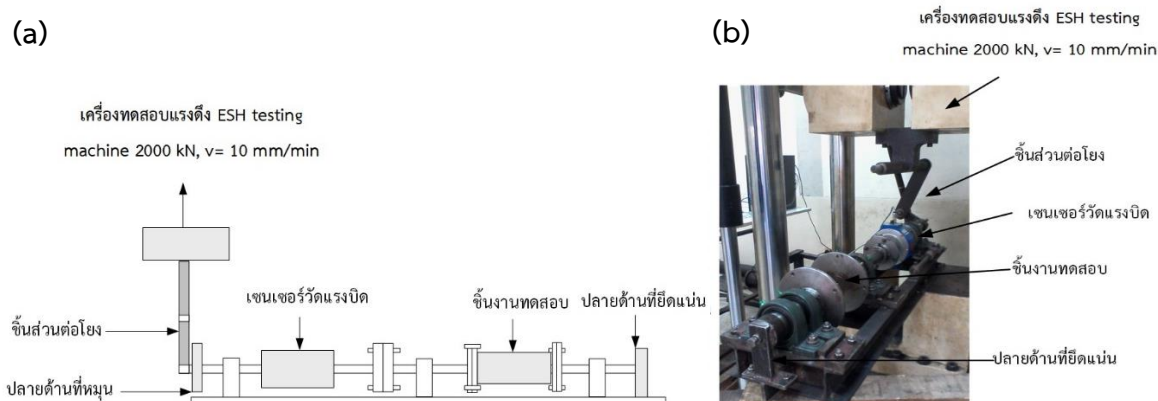
รูปที่ 2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุโฟม (a) การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกด
(b) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกดกับความเครียดของโฟมความหนาแน่น 50 และ 100 kg/m³

ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุของโฟม

ความหนาแน่นโฟม (kg/m^3)	ความเค้นที่จุดคราก (MPa)
50	0.35
100	0.50
150	0.61
200	0.70
250	0.78

4.3 ขั้นตอนการทดลอง

ชุดทดสอบแรงบิด ทำการออกแบบและสร้างเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ ดังรูปที่ 3 ประกอบด้วย เครื่องทดสอบแรงดึง เพื่อดึงขึ้นต่อโยง 2 ชั้น ด้วยความเร็ว 10 mm/min หมุนรอบแกนเพลลาเพื่อบิดชิ้นงาน มีเซนเซอร์วัดค่าโมเมนต์บิด โดยปลายด้านหนึ่งจะหมุนต่อกับเซนเซอร์ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งยึดแน่นไม่ให้เคลื่อนที่



รูปที่ 3 ชุดทดสอบโมเมนต์บิด (a) ส่วนประกอบเครื่องทดสอบ (b) ส่วนประกอบเครื่องใช้งานจริง

4.4 การขึ้นรูปชิ้นงาน

4.4.1 การขึ้นรูปท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมทำจากวัสดุอลูมิเนียมสำหรับการทดลอง โดยใช้วิธีการพับขึ้นรูปด้วยเครื่องพับสำหรับท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม และท่อแปดเหลี่ยม เป็นมุม 90, 60, และ 45 องศาตามลำดับ ส่วนท่อกวกลมจะทำการขึ้นรูปด้วยการม้วนโดยเครื่องม้วน แล้วเชื่อมติดกันด้วยลวดอาร์กอนบรีเวรรอยพับ

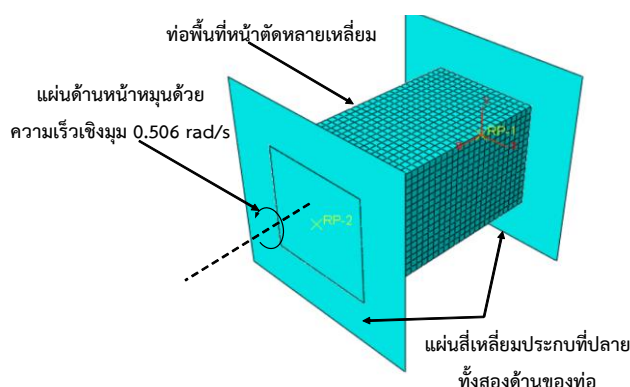
4.4.2 การเติมโฟมภายในท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม ท่อทุก ๆ หน้าตัดจะทำการเติมโฟมด้วยความหนาแน่น 50 และ 100 kg/m^3 โดยโฟมที่เติมจะเป็นโพรยูรีเทนที่เกิดจากการผสมกันของของเหลว 2 ชนิดคือ โพลีออล (Polyol) และไดไอโซยานेट (Diisocyanate) ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร แล้วกวนให้เข้ากันจึงจะเกิดการขยายตัวภายในท่อ ดังในรูปที่ 4 ประกอบด้วยท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อกวกลมตามลำดับ



รูปที่ 4 ลักษณะของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเต็มโพม

4.5 การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่ศึกษา คือ ท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อสี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม และท่อหลายเหลี่ยมทุก ๆ ตัวเต็มโพมที่มีความหนาแน่น 50, 100, 150, 200 และ 250 kg/m³ แสดงดังในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การจำลองคอมพิวเตอร์ของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเต็มโพมภายใต้โมเมนต์บิด

การจำลองคอมพิวเตอร์ของท่อหลายเหลี่ยมเต็มโพมภายใต้โมเมนต์บิดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลอง เริ่มจากการเลือกลักษณะปัญหาเป็นแบบพลศาสตร์ชัดเจน (Explicit Dynamic) โดยมีการบิดท่อบนแกนท่อด้วยความเร็วเชิงมุม 0.506 rad/s ในเวลา 1 วินาที ที่ปลายของท่อทั้งสองด้านยึดด้วยแผ่นสี่เหลี่ยม โดยมีเงื่อนไขขอบเขตที่จุดศูนย์กลางของแผ่นสี่เหลี่ยม ปลายที่รับโมเมนต์บิดให้หมุนได้เฉพาะรอบแกนของท่อเท่านั้น ส่วนอีกปลายด้านหนึ่งของท่อยึดแน่นไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ทุกทิศทาง ลักษณะของเอลิเมนต์ของแผ่นสี่เหลี่ยมเป็นแบบสี่เหลี่ยมมีสี่โนดแบบแข็งเกร็ง (R3D4: A 4-node 3-D Bilinear Rigid Quadrilateral.) ส่วนชิ้นงานทดสอบเป็นท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเป็นวัตถุที่ยืดตัวได้ (Deformable body) และลักษณะเอลิเมนต์เป็นแบบเปลือก (Shell Elements) เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมมีสี่โนด (S4R) ท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมวัสดุที่ใช้เป็นอลูมิเนียม ซึ่งมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด จึงกำหนดในโปรแกรมเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และ

คุณสมบัติของวัสดุของอลูมิเนียมจะมีค่าเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) การสัมผัสของทุกชิ้นงานเป็นลักษณะการสัมผัสทุกชิ้นงานเป็นแบบทั่วไป (General Contact) ส่วนการสัมผัสกันระหว่างท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมกับโพลีเมอร์ จะกำหนดลักษณะการสัมผัสกันแบบผิวต่อผิว (Surface to Surface) และการสัมผัสกันระหว่างท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมกับแผ่นสี่เหลี่ยมประกอบที่ปลายทั้งสองด้านของท่อกำหนดให้ยึดติดกัน (Tie) และกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.1 โดยชิ้นงานทดสอบไม่มีรอยเชื่อม ส่วนโพลีเมอร์เป็นเอลิเมนต์ก้อนแข็ง (Solid Element) เสียรูปได้ (Deformable Body) ชนิดเอลิเมนต์เป็นแบบลูกบาศก์ทรงสี่เหลี่ยมมี 8 โหนด (C3D8R: An 8-node Linear Brick) ส่วนในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์การลู่เข้าของขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมเท่ากับ 5 mm เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดเอลิเมนต์

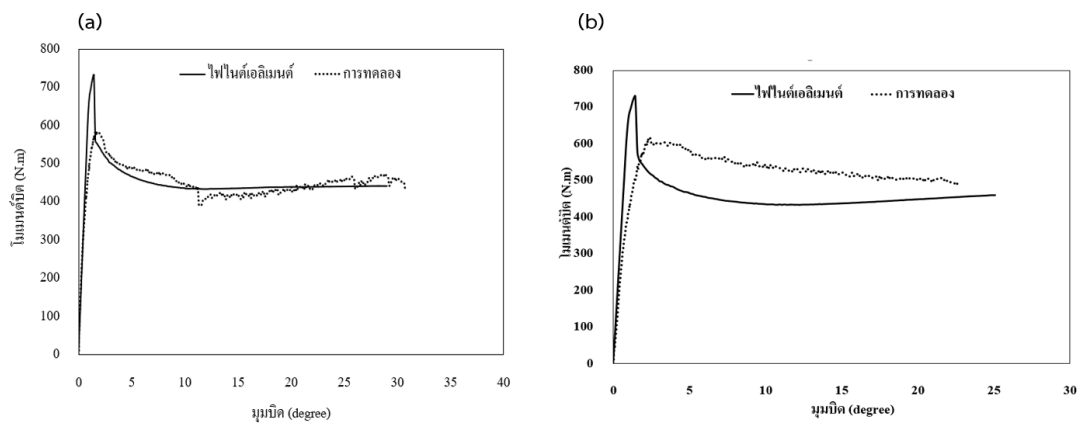
5. ผลการวิเคราะห์

5.1 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

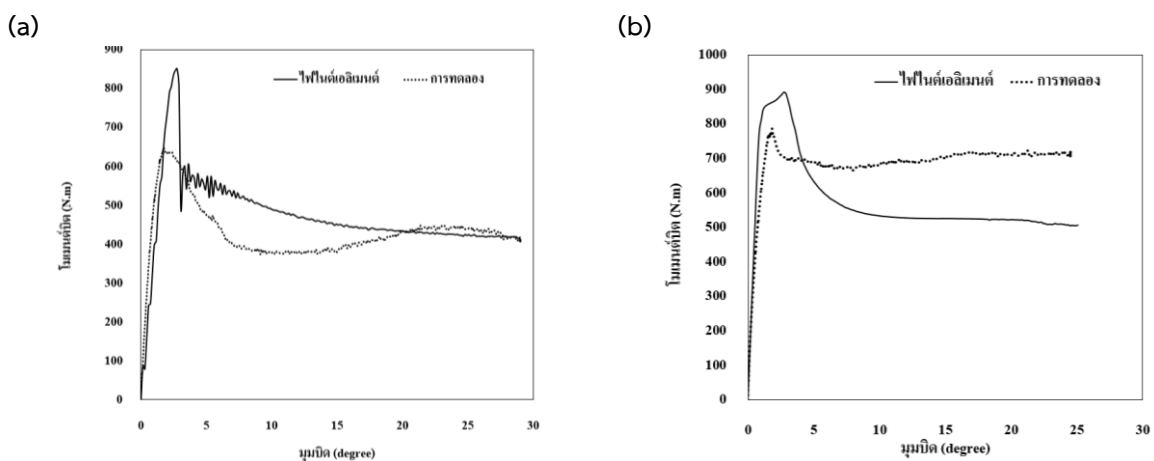
งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองท่อรูปร่างพื้นที่หลายเหลี่ยมเติมโพลีเมอร์ ประกอบด้วย ท่อรูปร่างสี่เหลี่ยม ท่อรูปร่างหกเหลี่ยม ท่อรูปร่างแปดเหลี่ยม และท่อรูปร่างวงกลม แล้วเติมโพลีเมอร์ภายในท่อภายใต้โมเมนต์บิดที่มีความหนาแน่นโพลีเมอร์ 50 และ 100 kg/m³ ตามลำดับ การทดลองในแต่ละท่อที่มีรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม จะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น จากผลการเปรียบเทียบระหว่างโมเมนต์บิดที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงดังรูปที่ 6-9 พบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน และเมื่อนำมาเปรียบเทียบและหาค่าความคลาดเคลื่อนจะแสดงในตารางที่ 2 พบว่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยทั้งหมดของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโพลีเมอร์ทุกชนิดที่มุมบิด 23 องศา มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 8.31

ตารางที่ 2 โมเมนต์บิดเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

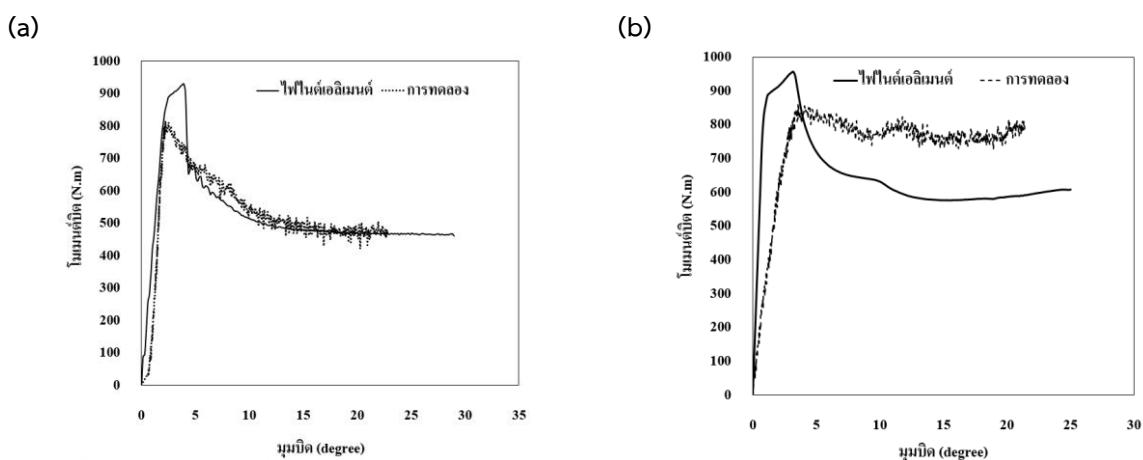
ชนิดท่อ	ความหนาแน่นโพลีเมอร์ (kg/m ³)	โมเมนต์บิดเฉลี่ย (N · m)		
		การทดลอง	ไฟไนต์เอลิเมนต์	ร้อยละความคลาดเคลื่อน (%)
ท่อวงกลม	50	577.42	627.59	-8.69
	100	701.22	643.36	8.25
ท่อแปดเหลี่ยม	50	515.06	537.84	-4.42
	100	698.92	645.49	7.64
ท่อหกเหลี่ยม	50	425.75	482.17	-13.25
	100	654.08	573.34	12.34
ท่อสี่เหลี่ยม	50	438.63	448.80	-2.32
	100	499.94	452.02	9.59
ค่าเฉลี่ย				8.31



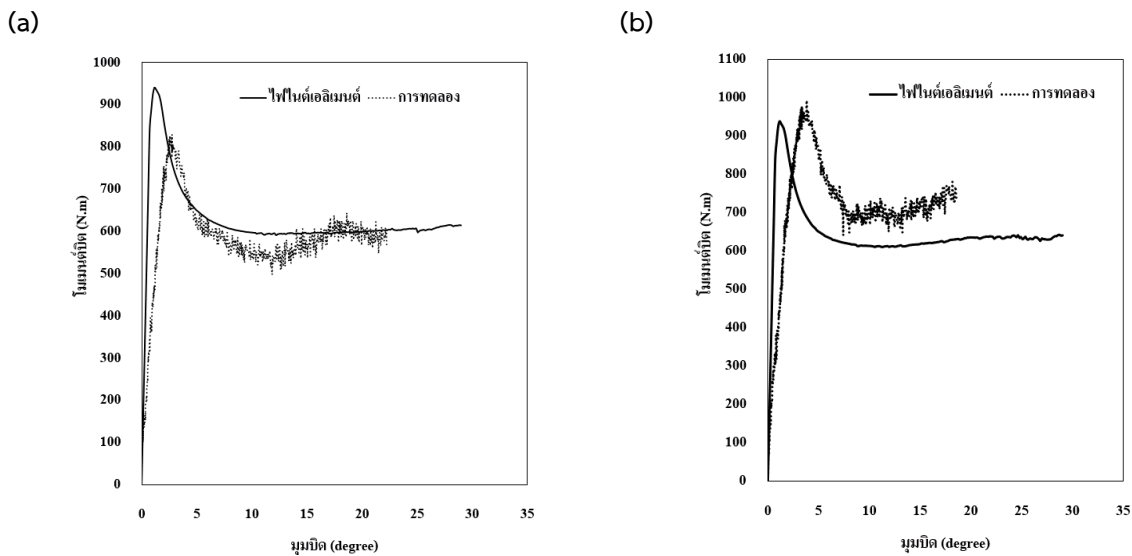
รูปที่ 6 โมเมนต์บิดที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของท่อรูปร่างสี่เหลี่ยม ที่ความหนาแน่นโฟม
(a) 50 kg/m^3 (b) 100 kg/m^3



รูปที่ 7 โมเมนต์บิดที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของท่อรูปร่างหกเหลี่ยมความหนาแน่นโฟม
(a) 50 kg/m^3 (b) 100 kg/m^3



รูปที่ 8 โมเมนต์บิดที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของท่อรูปร่างแปดเหลี่ยมที่ความหนาแน่นโฟม
(a) 50 kg/m^3 (b) 100 kg/m^3



รูปที่ 9 โมเมนต์บิดที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของท่อรูปร่างวงกลม ที่ความหนาแน่นโฟม

(a) 50 kg/m³ (b) 100 kg/m³

5.2 ผลของความหนาแน่นโฟม

ท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม ได้แก่ ท่อรูปร่างสี่เหลี่ยม ท่อรูปร่างหกเหลี่ยม ท่อรูปร่างแปดเหลี่ยม ท่อรูปร่างสิบเหลี่ยม ท่อรูปร่างยี่สิบเหลี่ยม ท่อรูปร่างสี่สิบเหลี่ยม ท่อรูปร่างหกสิบเหลี่ยม ท่อรูปร่างแปดสิบเหลี่ยม และท่อรูปร่างวงกลม จะทำการเติมโฟมภายในท่อที่ความหนาแน่น 50, 100, 150, 200 และ 250 kg/m³ โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และความสามารถในการดูดซับพลังงานคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$E_a = \int F ds = F_{ave} \times \theta_f \quad (2)$$

โดยที่ E_a = พลังงานดูดซับ, Joule

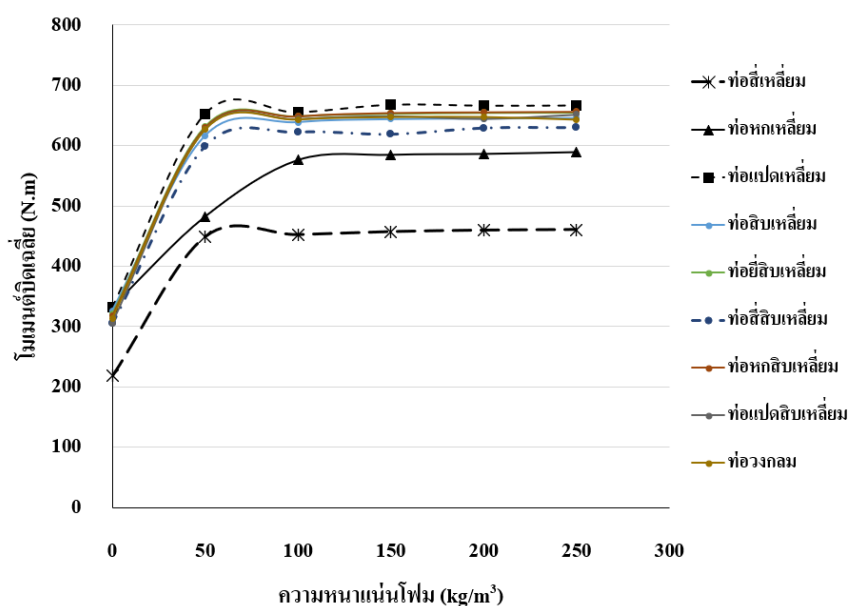
F = โมเมนต์บิดที่กระทำกับท่อเติมโฟม, N

ds = การเปลี่ยนแปลงระยะเยื้องตัวของชิ้นงาน, m

F_{ave} = โมเมนต์บิดเฉลี่ย, N

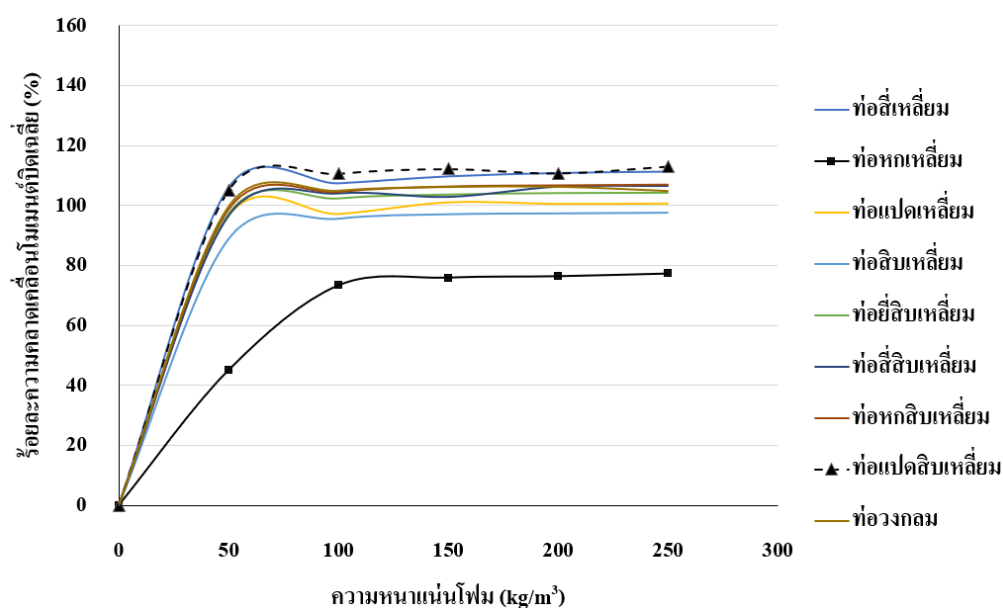
θ_f = มุมบิดสุดท้าย, rad

จากสมการที่ 2 พบว่าพลังงานดูดซับคำนวณได้จากโมเมนต์บิดเฉลี่ยคูณด้วยมุมบิดสุดท้าย เมื่อพิจารณาในเชิงเปรียบเทียบจึงกำหนดให้มุมบิดสุดท้ายมีค่าเท่ากันที่ 23 องศา ดังนั้นพลังงานดูดซับจึงขึ้นอยู่กับโมเมนต์บิดเฉลี่ยอย่างเดียว ผลการวิเคราะห์แสดงดังในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดเฉลี่ยกับความหนาแน่นโฟมในท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดเฉลี่ยกับความหนาแน่นโฟมภายในท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมทุกชนิด ได้แก่ ความหนาแน่นโฟมเท่ากับ 0 (ไม่เติมโฟม), 50, 100, 150, 200, และ 250 kg/m^3 พบว่า เมื่อความหนาแน่นโฟมเพิ่มขึ้นจาก 0 kg/m^3 (ท่อเปล่าไม่เติมโฟม) จนถึง 50 kg/m^3 จะทำให้โมเมนต์บิดเฉลี่ยเพิ่ม แต่เมื่อความหนาแน่นตั้งแต่ 100 kg/m^3 ขึ้นไป จนถึง 250 kg/m^3 โมเมนต์เฉลี่ยจะเข้าสู่ภาวะอิ่มตัว หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นความหนาแน่นโฟมที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อความสามารถการดูดซับพลังงานของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม แต่จะเข้าสู่ภาวะอิ่มตัวเมื่อความหนาแน่นโฟมมากกว่า 100 kg/m^3 ขึ้นไป ดังแสดงในรูปที่ 11 เป็นการเปรียบเทียบร้อยละคลาดเคลื่อนโมเมนต์บิดเฉลี่ยของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมกับท่อเปล่า (ไม่เติมโฟม) พบว่าท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมที่เติมโฟมจะให้ค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่า (ไม่เติมโฟม) แสดงว่าท่อที่เติมโฟมจะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้ดีกว่าท่อไม่เติมโฟม แต่ท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมที่มีความหนาแน่นเท่ากับหรือมากกว่า 100 ขึ้นไป จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนโมเมนต์บิดเฉลี่ยไม่เปลี่ยนมากนัก ซึ่งจะเห็นได้จากตารางที่ 3 พบว่าท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมมีอัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนต์บิดเฉลี่ยเมื่อเปรียบเทียบกับท่อไม่เติมโฟม ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อสี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 109.09%, 69.54%, 99.20%, 95.30%, 102.24%, 103.27%, 104.60%, 110.38%, และ 104.37% ตามลำดับ



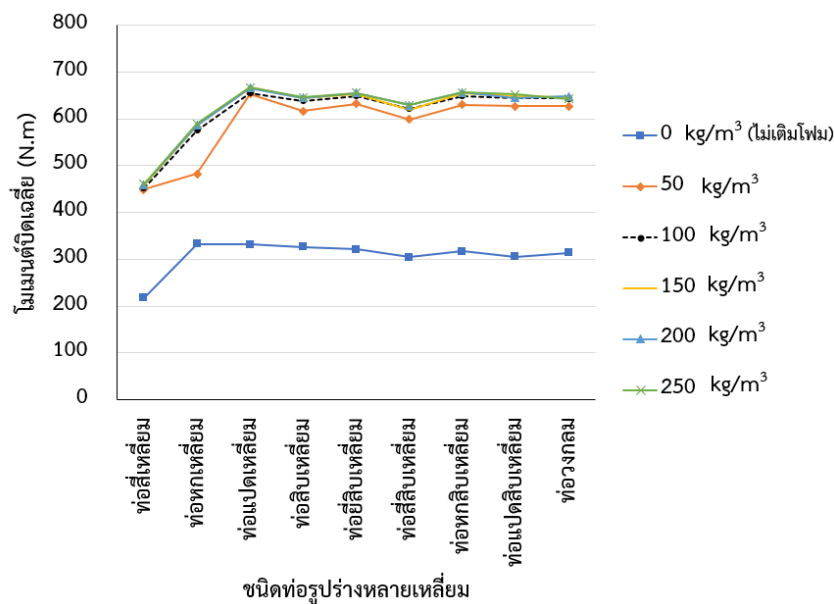
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความคลาดเคลื่อนของโม่เมนต์บิดเฉลี่ยกับความหนาแน่นโฟมของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมกับท่อไม่เต็มโฟม

ตารางที่ 3 อัตราการเพิ่มขึ้นของโม่เมนต์บิดเฉลี่ยเมื่อเปรียบเทียบกับท่อไม่เต็มโฟม

ชนิดของท่อ	อัตราการเพิ่มขึ้นของโม่เมนต์บิดเฉลี่ยเมื่อเปรียบเทียบกับท่อไม่เต็มโฟม (%)					
	50 (kg/m ³)	100 (kg/m ³)	150 (kg/m ³)	200 (kg/m ³)	250 (kg/m ³)	ค่าเฉลี่ย (%)
ท่อสี่เหลี่ยม	105.97	107.45	109.77	110.89	111.36	109.09
ท่อหกเหลี่ยม	45.01	73.27	75.87	76.32	77.21	69.54
ท่อแปดเหลี่ยม	96.55	97.19	101.06	100.56	100.67	99.20
ท่อสิบเหลี่ยม	88.80	95.61	97.09	97.38	97.61	95.30
ท่อยี่สิบเหลี่ยม	97.04	102.30	103.59	104.09	104.19	102.24
ท่อสี่สิบเหลี่ยม	96.56	104.05	102.89	106.31	106.54	103.27
ท่อหกสิบเหลี่ยม	98.58	104.50	106.31	106.68	106.94	104.60
ท่อแปดสิบเหลี่ยม	105.09	110.68	112.24	110.80	113.08	110.38
ท่อวงกลม	99.62	104.93	106.18	106.26	104.84	104.37

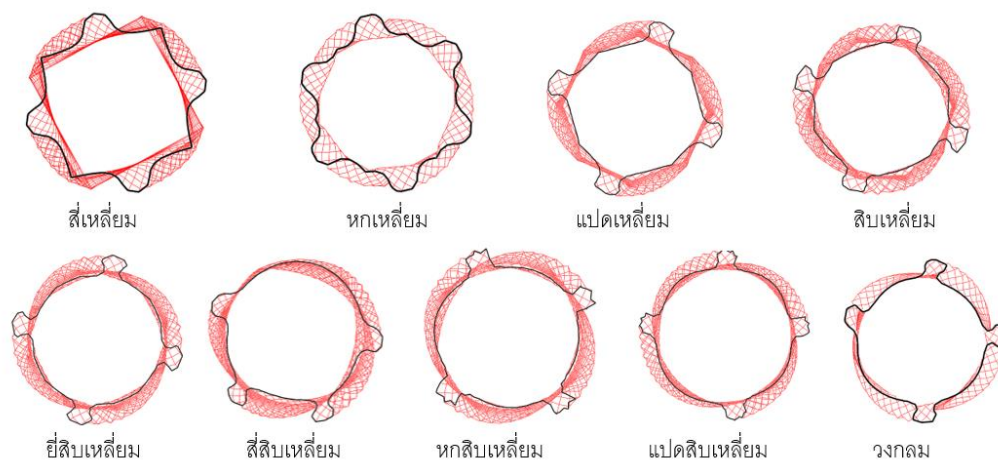
5.3 ผลของรูปร่างหน้าตัดของท่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของท่อรูปร่างหน้าตัดหลายเหลี่ยม ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อหกลสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม ท่อทุกชนิดจะทำการเติมโฟมภายในท่อที่มีความหนาแน่น 0, 50, 100, 150, 200, และ 250 kg/m³ ผลจากการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 12



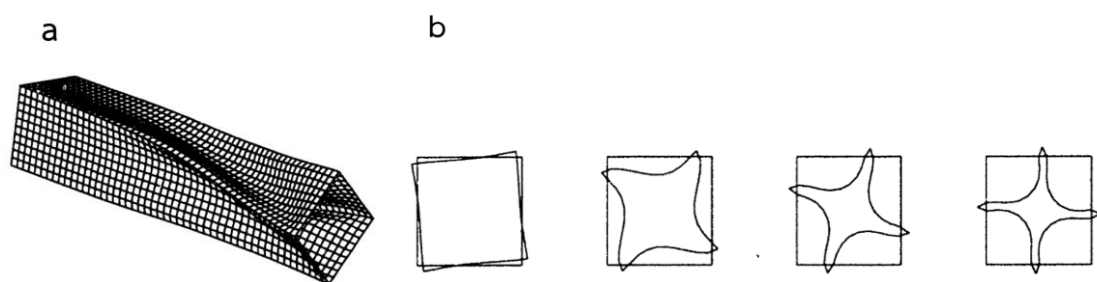
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดเฉื่อยกับท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม ที่ความหนาแน่นโฟมต่าง ๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดเฉื่อยกับท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม ที่ความหนาแน่นโฟมต่าง ๆ พบว่า ท่อที่มีค่าโมเมนต์บิดเฉื่อยสูงจะเริ่มจากท่อแปดเหลี่ยม เป็นต้นไป จนถึงท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อหกลสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม ซึ่งท่อเหล่านี้จะให้ค่าโมเมนต์บิดเฉื่อยใกล้เคียงกันที่ทุก ๆ ความหนาแน่นโฟมเดียวกัน รองลงมาคือท่อหกเหลี่ยม และท่อสี่เหลี่ยมจะมีค่าโมเมนต์บิดเฉื่อยต่ำสุด เหตุผลในทางทฤษฎีความสามารถการดูดซับพลังงานของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม จะกระจายไปตามเส้นการพับตัวของท่อ ท่อที่มีเส้นการพับตัวมากจะให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานมากขึ้น ดังตัวอย่างการจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมที่มีความหนาแน่น 50 kg/m³ แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 การบิตตัวของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมที่ความหนาแน่น 50 kg/m^3

จากรูปที่ 13 จะเห็นว่าท่อหกเหลี่ยมที่มีเส้นการพับตัวมากที่สุด (เส้นการพับ 6 เส้น) ส่วนท่อสี่เหลี่ยมและท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดตั้งแต่แปดเหลี่ยมขึ้นไปจนถึงแปดสิบเหลี่ยมและท่อดวงกลมมีเส้นการพับเท่ากับ 4 เส้น ซึ่งอาจจะสรุปว่าท่อหกเหลี่ยมมีการดูดซับพลังงานมากที่สุด แต่จากผลการวิเคราะห์ที่ผ่านมามีได้เป็นเช่นนั้นพบว่าท่อแปดเหลี่ยมจนถึงท่อดวงกลมให้การดูดซับพลังงานมากที่สุด เหตุผลอีกอย่าง เนื่องจากคุณสมบัติของพื้นที่หน้าตัดรวมถึงภายในท่อได้เติมโฟมเข้าไป ทำให้ความสามารถในการต้านการบิตตัวของท่อเพิ่มขึ้นอย่างมากสังเกตจากค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยเพิ่มขึ้น จากงานวิจัยของ Weigang Chen et al. (2000) [14] ได้เขียนสมการทางทฤษฎี โดยใช้หลักของสมดุลกำลังงาน ผลรวมของกำลังงานเนื่องจากแรงภายนอกเท่ากับกำลังงานกระจายเข้าไปในแต่ละเส้นการพับ โดยเริ่มต้นวิเคราะห์กับท่อสี่เหลี่ยมผนังบางภายใต้สภาวะโมเมนต์บิดดังรูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์จะได้สมการทั่วไปของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมไม่เติมโฟม แสดงดังสมการที่ 3



รูปที่ 14 รูปร่างความเสียหายภายใต้สภาวะโมเมนต์บิดของท่อสี่เหลี่ยมผนังบาง (a) ท่อสี่เหลี่ยมบิดไปมุม 45 องศา (b) การเสียรูปของพื้นที่หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม [14]

จากการวิเคราะห์ได้สมการที่ 3

$$T = 2\tau\sigma_o tA \quad (3)$$

โดยที่ T = โมเมนต์บิดที่กระทำที่ปลายของท่อ, N · m

τ = โมเมนต์บิดไร้มิติ (Dimensionless twisting moment) สมการอยู่ในรูปอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของท่อ หาได้ตามเอกสารอ้างอิงข้อที่ 14

σ_o = ความเค้นไหลพลาสติก (Plastic flow stress), Pa

t = ความหนาของท่อ, m

A = พื้นที่หน้าตัดขวางของท่อ, m²

จากสมการที่ 3 จะเห็นว่าโมเมนต์บิดของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม จะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของท่อ (A) อย่างเดียว ภายใต้เงื่อนไข กำหนดให้โมเมนต์บิดไร้มิติ, (τ) ความเค้นไหลพลาสติก, (σ_o) และความหนาของท่อ, (t) มีค่าคงที่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้กำหนดให้ท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม มีความยาวเส้นรอบวงเท่ากัน (320 mm) ทำให้ท่อที่มีจำนวนเหลี่ยมเพิ่มมากขึ้น จะมีพื้นที่หน้าตัดขวางเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยของท่อเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นเหตุผลว่า ท่อแปดเหลี่ยมจนถึงท่อบวงกลมจึงมีค่าการดูดซับพลังงานสูงกว่าท่อหกเหลี่ยมและท่อสี่เหลี่ยม (มีพื้นที่หน้าตัดและการดูดซับพลังงานต่ำสุด)

6. สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างพื้นที่หน้าตัดของท่อ ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อบวงกลม ท่อทุกชนิดจะทำการเติมโฟมภายในท่อที่มีความหนาแน่น 50, 100, 150, 200, และ 250 kg/m³ ภายใต้สภาวะโมเมนต์บิดรอบแกนท่อ โดยวิธีการศึกษาจะใช้วิธีการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

6.1 ผลเปรียบเทียบโมเมนต์บิดที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 8.31 ซึ่งผลความคลาดเคลื่อนอาจจะเป็นผลมาจากท่อเติมโฟมมีการขึ้นรูปโดยการปั๊มและม้วนพร้อมเชื่อมเข้าด้วยกันตรงบริเวณรอยพับ แต่การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ท่อเติมโฟมจะไม่มีรอยเชื่อมและผลจากการที่ชิ้นงานได้ถูกพับมาก่อนทำให้บริเวณรอยพับเกิดการเสียรูปในช่วงพลาสติกไปแล้ว

6.2 ผลการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโฟม พบว่า เมื่อความหนาแน่นโฟมเพิ่มขึ้น จะทำให้ความสามารถการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นจากความหนาแน่นเป็น 0 kg/m³ (ไม่เติมโฟม) ไปจนถึงความหนาแน่นโฟม 100 kg/m³ หลังจากความหนาแน่นโฟมมากกว่า 100 kg/m³ ขึ้นไป ค่าความสามารถการดูดซับพลังงานเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

6.3 ผลของรูปร่างหน้าตัดของท่อ พบว่าความสามารถการดูดซับพลังงานมีค่าสูงและใกล้เคียงกันตั้งแต่ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อสี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อบวงกลม รองลงมาเป็นท่อหกเหลี่ยม และท่อสี่เหลี่ยมมีความสามารถในการดูดซับพลังงานต่ำสุด

6.4 ผลจากการศึกษาในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลให้วิศวกรในการออกแบบท่อที่มีรูปร่างพื้นที่หน้าตัดแปดเหลี่ยมและท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดวงกลมแล้วเติมโพลีเมอร์ที่มีความหนาแน่น 100 kg/m^3 เพื่อใช้ในการออกแบบเป็นตัวซับพลังงานเนื่องจากการชน เพราะว่าท่อลักษณะนี้มีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด

6.5 ในการประยุกต์การใช้งานจริง ท่อที่เกิดการบิดเนื่องจากโมเมนต์บิด จะไม่เกิดขึ้นอย่างเดียวย ๆ โดยส่วนใหญ่มีการต่อโยงกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ที่รับทั้งแรงกดและแรงดัด ดังนั้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา [3] พบว่าเมื่อท่อรับแรงกดท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดวงกลมมีการดูดซับพลังงานสูงสุด ส่วนท่อที่รับแรงดัด ท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมมีการดูดซับพลังงานสูงสุด และยังพบอีกว่าท่อหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสภายใต้การกระทำโมเมนต์บิด ท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหกเหลี่ยมให้ค่าการดูดซับพลังงานสูงสุด [20] ดังนั้นในการเพิ่มความสามารถดูดซับพลังงานของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโพลีเมอร์ภายในท่อพร้อมหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสภายใต้โมเมนต์บิด ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลอง โดยเฉพาะวิธีการทดลองท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมควรมีการขึ้นรูปด้วยวิธีอื่นที่ไม่มีรอยเชื่อมเหมือนงานวิจัยนี้ จึงเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนวิจัยจากคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ) และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีและขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องทดสอบคุณสมบัติวัสดุ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Nagel GM, Thambiratnam DP. Dynamic simulation and energy absorption of tapered thin-walled tubes under oblique impact loading. *Int J Impact Eng.* 2006 Oct;32(10):1595-620.
- [2] Nagel GM, Thambiratnam DP. Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular tubes. *Thin-Walled Struct.* 2005 Aug;43:1225-42.
- [3] Poonaya S, Thinvongpituk C. Comparison of energy absorption of various section steel tubes under axial compression and bending loading. In: *The 21st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*; 2007 Oct 17-19; Chonburi, Thailand. p. 590-3.
- [4] Poonaya S, Thinvongpituk C. Comparison of energy absorption of various section steel tubes under torsion loading. In: *The 23th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*; 2009 Nov 4-7; Chiang Mai, Thailand. p. 4-7.
- [5] Yao S, Tian Y, Li Z, Yang F, Xu P. Crushing characteristic of polygonal tubes with hierarchical triangular cells. *Thin-Walled Struct.* 2020;157:107031. doi:10.1016/j.tws.2020.107031.

- [6] Zhang J, Xie S, Zhou H, Li T, Li Y. Study and optimization of energy absorption characteristics of a new concave polygon tube. *Structures*. 2023;53:1030-45. doi:10.1016/j.istruc.2023.04.129.
- [7] Goyal S, A CS, Sharma S, Sharma R. Crashworthiness analysis of foam filled star shape polygon of thin-walled structure. *Thin-Walled Struct*. 2019 Nov;144:106312.
- [8] Ge C, Gao Q, Wang L, Hong Z. Theoretical prediction and numerical analysis for axial crushing behaviour of elliptical aluminium foam-filled tube. *Thin-Walled Struct*. 2020 Apr;149:106523. doi:10.1016/j.tws.2019.106523
- [9] Ge C, Gao Q, Wang L, Hong Z. Theoretical prediction and numerical analysis for axial crushing behaviour of elliptical aluminium foam-filled tube. *Thin-Walled Struct*. 2020 Apr;149:106523. doi:10.1016/j.tws.2019.106523.
- [10] Ahmad Z, Thambiratnam D. Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading. *Comput Struct*. 2009;87:186-97. doi:10.1016/j.compstruc.2008.10.003.
- [11] Ahmad Z, Thambiratnam DP. Crushing response of foam-filled conical tubes under quasi-static axial loading. *Mater Des*. 2009 Aug;30(7):2393-403. doi:10.1016/j.matdes.2008.10.017.
- [12] Barzigar SS, Ahmadi H, Liaghat G. An analytical investigation on the crushing behavior of thin-walled tubes filled with a foam with strain hardening region. *Thin-Walled Struct*. 2023;182:110169. doi:10.1016/j.tws.2022.110169.
- [13] Zheng G, Wu S, Sun G, Li G, Li Q. Crushing analysis of foam-filled single and bitubal polygonal thin-walled tubes. *Int J Mech Sci*. 2014;87:226-40. doi:10.1016/j.ijmecsci.2014.06.002.
- [14] Chen W, Wierzbicki T. Torsional collapse of thin-walled prismatic columns. *Thin-Walled Struct*. 2000;36:181-96. doi:10.1016/S0263-8231(99)00043-9.
- [15] Chen W, Wierzbicki T, Breuer O, Kristiansen K. Torsional crushing of foam-filled thin-walled square columns. *Int J Mech Sci*. 2001;43:2297-317. doi:10.1016/S0020-7403(01)00040-6.
- [16] Poonaya S, Thinvongpituk C. Comparison of energy absorption of various section steel tubes under torsion loading. In: *The 23th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*; 2009 Nov 4-7; Chiang Mai, Thailand. p. 4-7.
- [17] Arayangkul S, Poonaya S, Payom C. Absorbed energy efficiency of polygon thin-walled tubes subjected to torsion. *Naresuan Univ Eng J*. 2014;9(1):15-24. doi:10.14456/nuej.2014.7.
- [18] Poonaya S. Influence of foam density of foam-filled polygon tubes subjected to bending. *RSU J Eng Technol*. 2024;27(2):9-17. Available from: https://rsujet.rsu.ac.th/files/issues/V27N2/170_20241205223851.pdf.

- [19] Poonaya S. Parametric analysis of foam-filled polygonal thin-walled tubes subjected to torque using experimental design. *RMUTI J.* 2024;17(2):63-75. Available from: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/256432>.
- [20] Poonaya S, Sopakayang R. The relationship of cross-sectional area shape with the energy absorption capacity of fiberglass composite polygon tubes under torsional moment. *RTNA J Sci Technol.* 2024;7(1):47-62. Available from: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rtna/article/view/256652/172661>.
- [21] Reyes A, Hopperstad OS, Langseth M. Aluminum foam-filled extrusions subjected to oblique loading: experimental and numerical study. *Int J Solids Struct.* 2004 Mar;41(5-6):1645-75. doi:10.1016/j.ijsolstr.2003.09.053.

การประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง HEC-RAS 1D สำหรับการจำลองการไหลผ่านพืชน้ำ และสิ่งกีดขวางโดยใช้การทดลองทางน้ำเปิดในห้องปฏิบัติการ

Accuracy Assessment of the HEC-RAS 1D Model for Simulating Flow Through Aquatic Vegetation and Obstructions Using Laboratory Open Channel Experiments

รณกร สร้อยศรี¹ และ สมพงษ์ บุตรงาม^{2*}
Ronnakorn Soisee¹ and Sompong Budngam^{2*}

Received: April 24, 2025

Revised: May 29, 2025

Accepted: June 4, 2025

บทคัดย่อ

ปัญหาอุทกภัยเป็นภัยธรรมชาติที่ส่งผลกระทบรุนแรงต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในหลายพื้นที่ทั้งในเขตเมืองและชนบท แบบจำลองทางชลศาสตร์เป็นเครื่องมือสำคัญในการบริหารจัดการน้ำและการวางแผนป้องกันภัย ซึ่งจำเป็นต้องมีความแม่นยำและเชื่อถือได้ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และประเมินพฤติกรรมการไหลของน้ำภายใต้สถานการณ์ต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้อง เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงวิศวกรรมและการบริหารความเสี่ยงได้อย่างเป็นระบบ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาความแม่นยำของแบบจำลอง Hydrologic Engineering Center - River Analysis System (HEC-RAS) แบบ 1 มิติ ในการพยากรณ์พฤติกรรมการไหลของน้ำในทางน้ำเปิดที่มีพืชน้ำและสิ่งกีดขวาง โดยเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการที่จำลองสภาพการไหล เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ชัดเจนเกี่ยวกับข้อจำกัดและศักยภาพของแบบจำลองในการใช้งานจริง การทดลองได้วัดระดับน้ำและความเร็วการไหลของน้ำในสภาพที่มีสิ่งกีดขวาง โครงสร้างจำลอง และนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง HEC-RAS พบว่า แบบจำลองสามารถทำนายระดับน้ำได้อย่างแม่นยำในระดับสูงของทุกกรณี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของแบบจำลองแนช-ซีทคลิฟฟ์

¹อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Lecturer, Civil Engineering Department, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

E-mail: ronnakorn.ce@gmail.com

^{2*}รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Associate Professor, Civil Engineering Department, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

E-mail: budngam47@gmail.com

*Corresponding Author

(Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient : NSE) คือ 0.93-0.99 และสามารถทำนายความเร็วของการไหลมีความแม่นยำในระดับดี โดยกรณีรางเปล่ามีค่า NSE น้อยที่สุดคือ 0.62 และกรณีหญ้าเทียมมีค่า NSE มากที่สุดคือ 0.87 ซึ่งความแปรปรวนเกิดจากการวัดค่าความเร็วการไหลในห้องปฏิบัติการจากการไหลแบบปั่นป่วน แนวทางในงานวิจัยนี้จึงสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการประเมินและพัฒนาแบบจำลองสำหรับการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่ที่มีพืชน้ำหรือสิ่งกีดขวางตามธรรมชาติได้เป็นอย่างดีในอนาคต

คำสำคัญ: การจำลองเชิงตัวเลข, HEC-RAS, ทางน้ำเปิด, การจัดการน้ำ

Abstract

Flooding represents a severe natural disaster with impacts on human lives and property in numerous regions, affecting both urban and rural areas. Hydraulic models serve as essential tools for water management and preventive planning, requiring accuracy and reliability to analyze and evaluate water flow behavior under various scenarios, thereby systematically supporting engineering decisions and risk management strategies. This research focuses on examining the accuracy of the one-dimensional Hydrologic Engineering Center - River Analysis System (HEC-RAS) model in predicting water flow behavior in open channels containing submerged vegetation and obstructions. The study compares model predictions against results from physical laboratory experiments simulating flow conditions to develop a clear understanding of the model's limitations and potential for practical applications. The experimental methodology involved measuring water levels and flow velocities in conditions with obstructions and simulated structures, then comparing these measurements with values calculated using the HEC-RAS model. Results indicate that the model demonstrated a high level of accuracy in predicting water surface levels across all cases, with NSE values ranging from 0.93 to 0.99. It also showed good accuracy in predicting flow velocity, with the lowest NSE value of 0.62 observed in the bare channel case and the highest value of 0.87 in the artificial grass case. The variability is attributed to the challenges in measuring flow velocity in laboratory conditions due to the turbulent nature of the flow. Therefore, the approach presented in this study can serve as a solid foundation for evaluating and developing models for water management in areas with aquatic vegetation or natural flow obstructions in the future.

Keywords: Numerical Simulation, HEC-RAS, Open Channel, Water Management

1. บทนำ

อุทกภัยเป็นภัยธรรมชาติที่สร้างความเสียหายอย่างมากต่อชีวิตและทรัพย์สินทั่วโลก โดยเฉพาะในพื้นที่ลุ่มน้ำและชุมชนริมแม่น้ำ การจัดการน้ำท่วมและการคาดการณ์พฤติกรรมการไหลของน้ำจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในปัจจุบัน โดยสภาพธรรมชาติการไหลของน้ำในแม่น้ำและลำคลองมักพบกับสิ่งกีดขวางหลากหลายรูปแบบ ทั้งจากพืชน้ำที่เติบโตตามธรรมชาติ วัชพืช เศษซากพืช ตลอดจนสิ่งกีดขวางที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น สะพาน เขื่อนขนาดเล็ก หรือโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ สิ่งกีดขวางเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อรูปแบบการไหลของน้ำ ความเร็ว และระดับน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินรูปแบบการไหล ระยะทาง และบริเวณที่มีความเสี่ยงในการเกิดอุทกภัย

แบบจำลองทางชลศาสตร์เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการคาดการณ์พฤติกรรมการไหลของน้ำและประเมินผลกระทบจากสิ่งกีดขวางต่าง ๆ โดย HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) [1] เป็นแบบจำลองหนึ่งที่มีการใช้งานในการวิเคราะห์การไหลของน้ำในลำน้ำก้นทั่วโลก โดยเฉพาะแบบจำลองหนึ่งมิติ (1D) ที่มีความสะดวกในการใช้งาน โดยใช้ข้อมูลนำเข้าน้อยกว่าแบบจำลองหลายมิติ และสามารถจำลองการไหลของน้ำได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำของแบบจำลอง HEC-RAS 1D ในการจำลองผลกระทบของสิ่งกีดขวาง พืชน้ำและสิ่งกีดขวางที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมอย่างเป็นระบบ เนื่องจากสิ่งกีดขวางเป็นปัจจัยหลักของความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นต่อความแม่นยำในการทำนายระดับและทิศทางการไหลของน้ำเป็นสำคัญ ดังนั้นการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลองกับการทดลองทางกายภาพจึงมีความสำคัญในการประเมินความน่าเชื่อถือของแบบจำลองและปรับปรุงความแม่นยำในการทำนายพฤติกรรมการไหลของน้ำในสภาพแวดล้อมจริง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง HEC-RAS 1D ในการทำนายการไหลผ่านพืชน้ำและสิ่งกีดขวางแบบต่าง ๆ ในลำน้ำ โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการที่ใช้รางน้ำ (Flume) และจำลองสิ่งกีดขวาง 3 ชนิด คือ พื้นหญ้าเทียม (Artificial Grass) พืชใต้น้ำ (Vegetation) และลูกบาศก์ (Cube) โดยแบ่งเป็น 5 กรณีการทดลองตามหัวข้อที่ 4 ซึ่งผลการศึกษานี้จะช่วยเพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับข้อจำกัดและศักยภาพของแบบจำลอง HEC-RAS 1D และนำไปสู่การพัฒนาแนวทางการใช้งานเพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลของน้ำจริงในอนาคตได้ เพื่อป้องกันการเกิดอุทกภัยได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นสำหรับการจัดการน้ำท่วมและการวางแผนการจัดการน้ำในอนาคตอย่างเป็นระบบ

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อเปรียบเทียบผลการทำนายระดับน้ำและความเร็วการไหล จากแบบจำลอง HEC-RAS 1D กับผลการทดลองทางกายภาพในรางน้ำที่มีสิ่งกีดขวางแบบต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ

2.2 เพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง HEC-RAS 1D ในการจำลองระดับน้ำและความเร็วการไหลจากสิ่งกีดขวาง โดยการใช้ Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE) และ Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

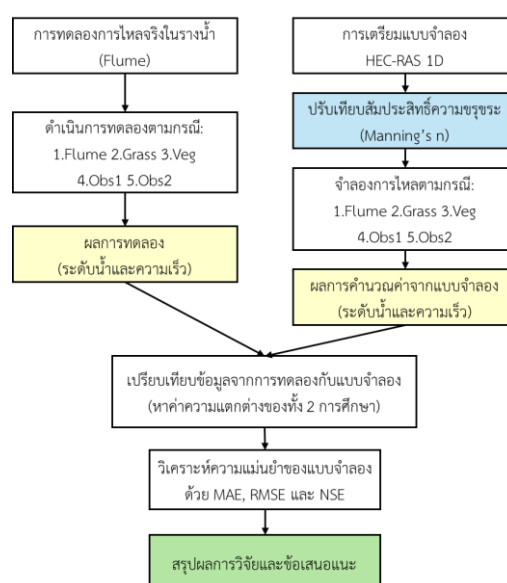
Chow, V.T. [2] วางรากฐานการทำความเข้าใจการไหลในช่องทางน้ำเปิด โดยแนะนำแนวคิดสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning's n) ที่แสดงความต้านทานของพื้นผิวต่อการไหล การศึกษานี้นำมาซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระที่นำมาใช้เปรียบเทียบในการคำนวณการไหล

Nepf, H.M. [3] พบว่าพืชน้ำสามารถเปลี่ยนแปลงสนามความเร็วของการไหลเฉลี่ยและการไหลแบบปั่นป่วนอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างของลำต้น โดยแรงเฉือนที่ทำให้เกิดความปั่นป่วนของกระแสน้ำจะเกิดขึ้นมากบริเวณยอดพืช และจะลดลงเมื่ออยู่ระดับเดียวกับลำต้น

จากงานวิจัยข้างต้นนี้ทำให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางกายภาพของสิ่งกีดขวางที่มีผลกับพฤติกรรมการไหลของน้ำ ซึ่งส่งผลกระทบต่อข้อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Manning's n) ที่เหมาะสมโดยรอบของค่าที่เหมาะสมนั้น มีการศึกษาและวางรากฐานไว้แล้ว สามารถนำค่านั้นมาทำการปรับเทียบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในกรณีที่น่าสนใจศึกษา เพื่อให้เกิดความแม่นยำของการคำนวณมากยิ่งขึ้นในกรณีที่ใช้สิ่งกีดขวางเป็นหญ้าเทียม พืชน้ำ และลูกบาศก์

4. วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษาจะทำการทดลองในรางน้ำและสร้างแบบจำลองโดยการคำนวณด้วย HEC-RAS 1D โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัย แสดงดังรูปที่ 1 โดยแบ่งเป็นการทดลอง 5 กรณี แสดงดังตารางที่ 1 คือ 1) Flume 2) Grass 3) Veg 4) Obs1 5) Obs2 ด้วยอัตราการไหลจากปั๊มคือ $0.00356 \text{ m}^3/\text{s}$ ซึ่งได้จากการควบคุมโดยปั๊มน้ำ เนื่องจากข้อจำกัดของปั๊มที่ไม่สามารถปรับอัตราการไหลได้อย่างหลากหลาย จึงเลือกใช้อัตราการไหลค่าดังกล่าวตลอดการทดลอง ทั้งนี้ อัตราการไหลนี้มีความเหมาะสมกับสภาพการทดลอง โดยไม่ก่อให้เกิดแรงที่มากเกินไปซึ่งอาจส่งผลให้สิ่งกีดขวางในรางน้ำเคลื่อนหลุดหรือลอยไปตามกระแสน้ำ การทดลองในรางน้ำแต่ละกรณีจะทำการวัดค่าระดับน้ำและความเร็วการไหล 3 ครั้ง ทุกๆ 3 นาที ที่สถานีวัดน้ำ (St.#) และทำการหาค่าเฉลี่ย โดยการวัดระดับน้ำซึ่งวัดจากบรรทัดน้ำที่สถานีวัดน้ำโดยการมองระดับน้ำที่บรรทัดน้ำและทำการจดบันทึก และความเร็วการไหลจะวัดจากบริเวณจุดกึ่งกลางความกว้างของรางและกึ่งกลางความสูงของระดับน้ำโดยการใช้ท่อปีโตต์และทำการจดบันทึก และการทดลองในแบบจำลองจะจำลองรางน้ำ ขนาดและตำแหน่งของสิ่งกีดขวางให้มีความคล้ายคลึงกับของจริง ทำการปรับเทียบสัมประสิทธิ์ความขรุขระและดำเนินการจำลองตามแบบโมเดล HEC-RAS 1D และนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบความสูงของระดับน้ำ และความเร็วการไหลกับการทดลอง และใช้ MAE, RMSE และ NSE ในการประเมินความแม่นยำของแบบจำลองอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 1 กรณีการศึกษา

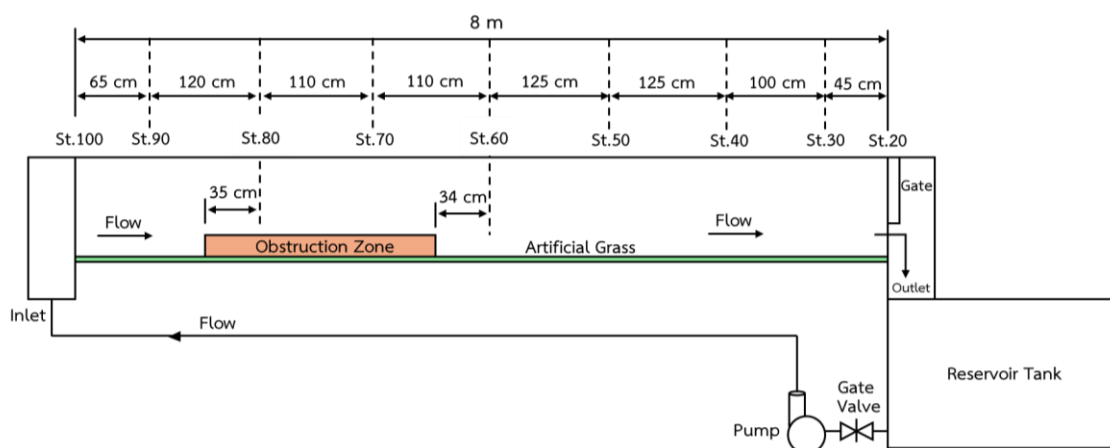
กรณี	สิ่งกีดขวาง
Flume	ไม่มีสิ่งกีดขวาง
Grass	หญ้าเทียมตลอดความยาวรางน้ำ
Veg	เพิ่มพืชน้ำ
Obs1	เพิ่มลูกบาศก์ 4 ลูก ด้านหน้าพืชน้ำ
Obs2	เพิ่มลูกบาศก์ 4 ลูก ด้านหลังพืชน้ำ

4.1 รางน้ำเปิด

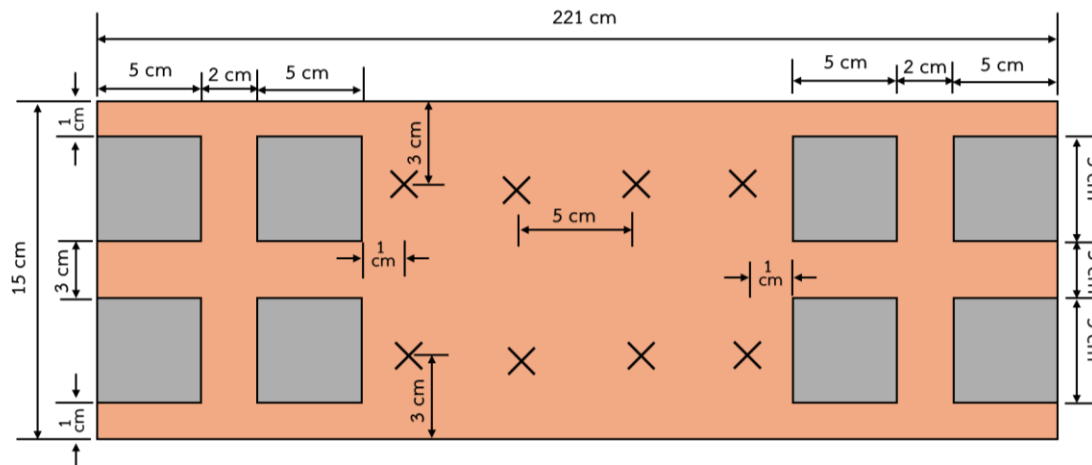
รูปที่ 2 แสดงแผนภาพเครื่องมือการทดลองทางน้ำเปิด Tilting Flow Channel, ESSOM รุ่น HF 515 A ความกว้างหน้าตัดการไหล 15 cm ยาว 8 m บริเวณท้ายน้ำเชื่อมต่อกับถังเก็บน้ำ โดยน้ำถูกสูบจะผ่าน Gate Valve และไหลผ่านปั๊มไปยังรางน้ำ จาก St.100 ไปยัง St.20 แล้วกลับเข้าสู่ถังเก็บน้ำตามลำดับ โดยมีบรรทัดน้ำติดอยู่ที่รางน้ำตั้งแต่ St.90-St.30 และสิ่งกีดขวาง หญ้าเทียมใช้ปูรางน้ำตลอดความยาวทางน้ำ พืชและลูกบาศก์ซึ่งเป็นสิ่งกีดขวางในการทดลองที่ 2-5 จะถูกจัดวางบริเวณพื้นที่การวางสิ่งกีดขวาง (Obstruction Zone)

4.2 สิ่งกีดขวาง

พื้นที่การวางสิ่งกีดขวาง มีขนาด 15×221 cm โดยสิ่งกีดขวางและตำแหน่งการวางเป็นไปในรูปแบบที่เป็นระเบียบเพื่อให้ง่ายต่อการทำซ้ำ สามารถควบคุมตัวแปรเชิงพื้นที่ได้ดี และง่ายต่อการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รูปที่ 3 แสดงสัญลักษณ์กากบาทแทนพืชน้ำและสี่เหลี่ยมจัตุรัสแทนลูกบาศก์ โดยมีขนาดดังรูปที่ 4 และ ตารางที่ 1 แสดงกรณีของการวางสิ่งกีดขวาง โดยเริ่มจากรางเปล่า (Flume) เพิ่มหญ้าเทียม (Grass) แล้วจึงเพิ่มพืชน้ำ (Veg) และเพิ่มการวางลูกบาศก์บริเวณหน้าและหลังพืชน้ำ (Obs#) ในการทดลองที่ 3-5 ตามลำดับ



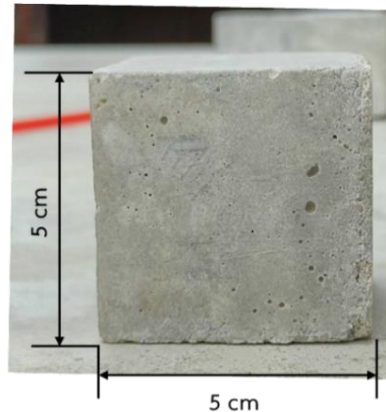
รูปที่ 2 ภาพด้านข้างของรางทางน้ำเปิด



รูปที่ 3 ภาพด้านบนบริเวณที่วางสิ่งกีดขวาง



(ก) พืชน้ำ



(ข) ลูกบาศก์

รูปที่ 4 ลักษณะของสิ่งกีดขวางที่ใช้ในการทดลอง

4.3 แบบจำลอง

การดำเนินการวิจัยนี้ใช้แบบจำลอง HEC-RAS เวอร์ชัน 6.7 beta ซึ่งเป็นแบบจำลองที่พัฒนาโดยหน่วยงานสถาบันวิศวกรรมอุทกศาสตร์ กองทัพบกสหรัฐอเมริกา [1] ที่มีความสามารถในการจำลองการไหลของทั้งแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ โดยงานวิจัยนี้ใช้ในรูปแบบ 1 มิติ ในการจำลองการไหลของน้ำ โดยมีเงื่อนไขคือเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) คือ St.100 ตั้งค่าเป็น Normal Depth $S=0.001$ และจะไหลไปสู่บริเวณจัดเก็บน้ำ St.20-St.0 เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) คือไม่มีน้ำในระบบ การไหลเป็นการไหลคงที่ (Steady Flow) โดยใช้ในการคำนวณดังสมการต่อไปนี้ [4]

4.3.1 Water Surface Profile

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

4.3.2 Kinematic Energy Head

$$\alpha \frac{\bar{V}^2}{2g} = \frac{Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2} \quad (2)$$

โดย Z คือ ความสูงจากระดับอ้างอิง (m), Y คือ ความลึกระดับน้ำ (m), α คือ สัมประสิทธิ์ความเร็ว, V คือ ความเร็วเฉลี่ย (อัตราการไหล/พื้นที่หน้าตัด) (m/s), g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s²), h_e คือ พลังงานที่สูญเสีย (m), Q คือ อัตราการไหล (m³/s)

ตารางที่ 2 ขนาดและค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของสิ่งกีดขวาง

สิ่งกีดขวาง	ขนาด (กว้าง×ยาว×สูง) (cm)	สัมประสิทธิ์ความขรุขระ [2,5]
หญ้าเทียม	15×800×1.7	0.015
พีชน้ำ	1×0.8×9	0.027
ลูกบาศก์	5×5×5	0.016

การจำลองหน้าตัดการไหล ดังรูปที่ 2 ทางน้ำเปิดมีความยาว 8 m กำหนดเป็นสถานีน้ำ 100 ถึงสถานี 20 (St.100-St.20) แบ่งความยาวออกเป็นสถานีละ 1 cm ซึ่งจะมีค่าเท่ากับสถานีละ 0.1 St. รวมทั้งหมด 801 สถานี และอีก 2 สถานี คือ St.19.9 ถึง St.0 คือตำแหน่งของถังเก็บน้ำ (Reservoir Tank) และการจำลองสิ่งกีดขวาง ดำเนินการเปรียบเทียบแบบจำลองและใช้สัมประสิทธิ์ความขรุขระ ดังตารางที่ 2

4.4 การประเมินความแม่นยำแบบจำลอง

การประเมินแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) การประเมินเชิงคุณภาพของระดับน้ำและความเร็วการไหล โดยใช้ผลการวัดทางกายภาพ และ 2) การประเมินผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนด้วยค่าสถิติ MAE, RMSE และ NSE [6,7] มีสมการดังนี้

4.4.1 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error - MAE) ใช้คำนวณค่าเฉลี่ยของความแตกต่างแบบสัมบูรณ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและแบบจำลอง

$$MAE = \frac{1}{n} \times \sum |Y_{exp} - Y_{model}| \quad (3)$$

โดยค่า Y คือ ค่าระดับน้ำหรือค่าความเร็วการไหลที่สนใจ ซึ่ง Y_{exp} คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง และ Y_{model} คือ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง

4.4.2 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error - RMSE) ตัวชี้วัดนี้มีความไวต่อค่าผิดพลาดสูง สามารถสะท้อนความแม่นยำของค่าจากแบบจำลองได้อย่างชัดเจน

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum (Y_{exp} - Y_{model})^2} \quad (4)$$

4.4.3 ดัชนี Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) เป็นดัชนีที่นิยมใช้ในทางอุทกวิทยาเพื่อประเมินความสามารถในการทำนายของแบบจำลอง ค่า $NSE > 0.5$ ถือว่ายอมรับได้ และค่าที่เข้าใกล้ 1 แสดงว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพดี

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum (Y_{exp} - Y_{model})^2}{\sum (Y_{exp} - \bar{Y}_{exp})^2} \right] \quad (5)$$

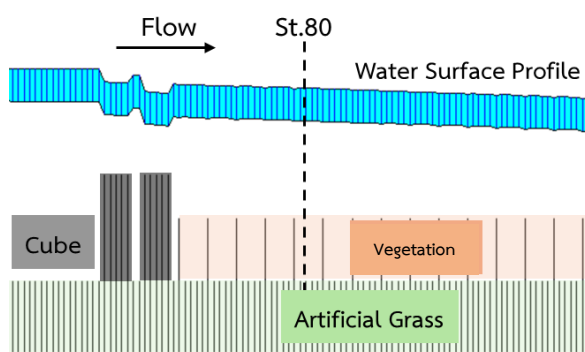
โดย Y_{exp} คือ ค่าจากการทดลองแต่ละจุด, $\bar{Y}_{exp}$ คือ ค่าเฉลี่ยของการทดลองทุกจุด

5. ผลการศึกษา

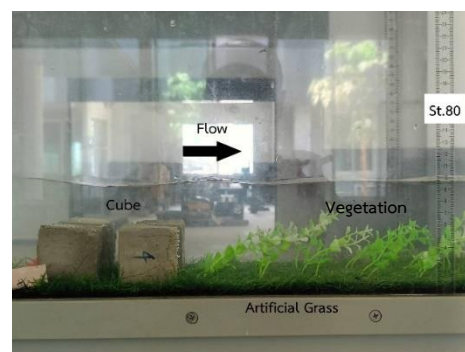
5.1 การประเมินทางกายภาพ

ระดับผิวน้ำและความเร็วการไหล เปรียบเทียบโดยใช้การวัดจากการจำลองและการทดลองดังตัวอย่างรูปที่ 5 (ก) แสดงผลของการจำลองการไหล โดยแสดงภาพด้านข้างที่มองต่ำลงไปจากแนวระดับสายตาเป็นมุม 45° (Azimuth Angle = 45°) เพื่อความเข้าใจที่ง่ายขึ้น การแสดงผลรูปที่ 5 (ข) แสดงผลการทดลองการวัดระดับน้ำจากห้องทดลองในแนวระดับ

จากการนำผลการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจากการวัดจริงกับข้อมูลจากแบบจำลองมาจัดทำเป็นแผนภาพการกระจาย Scatter Plot โดยแสดงความสัมพันธ์ด้วย R-Squared ดังรูปที่ 6 พบว่า ระดับน้ำ (Water Surface) มีค่า R-Squared 0.9823 และความเร็วกระแสน้ำ (Velocity) มีค่า R-Squared 0.901 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ดีมาก [7] แสดงถึงระดับความสอดคล้องที่ดีระหว่างผลการทดลองและผลจากแบบจำลอง ซึ่งหมายถึงแบบจำลองมีความสามารถใช้จำลองสถานการณ์จริงแทนได้เป็นอย่างดี

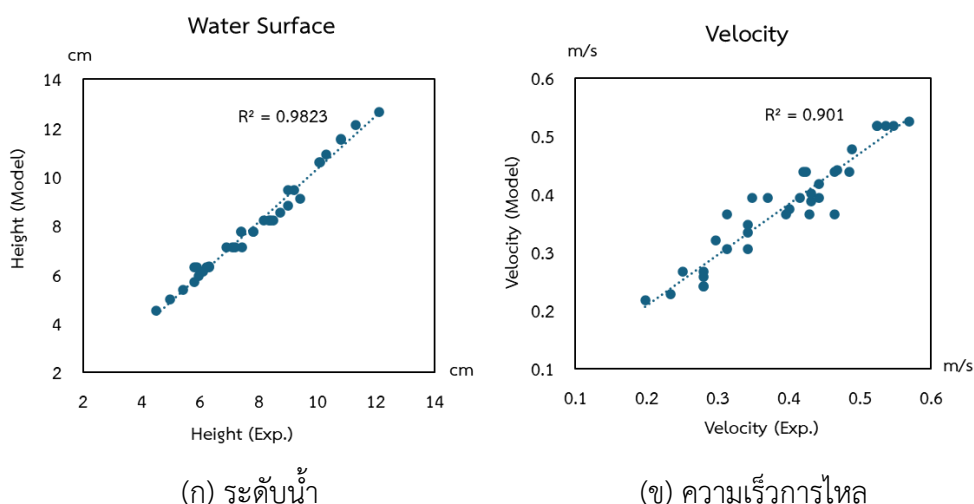


(ก) ผลของแบบจำลอง Obs1 ด้านข้าง



(ข) ผลการทดลอง Obs1 ด้านข้าง

รูปที่ 5 ตัวอย่างผลการจำลองและการทดลองในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 6 แผนภาพการกระจายของผลการทดลองและผลของแบบจำลอง

5.2 การประเมินด้วยค่าสถิติ

ผลการประเมินด้วยค่าสถิติของระดับน้ำ แสดงดังตารางที่ 3 พบว่าค่า MAE มีค่า 0.04–0.38 cm และค่า RMSE มีค่า 0.05–0.47 cm มีความหมายว่ามีค่าเบี่ยงเบนน้อยมาก และค่า NSE มีค่า 0.93–0.99 มีความหมายว่าแบบจำลองสามารถทำนายระดับน้ำได้มีประสิทธิภาพสูงหรือสามารถทำนายระดับน้ำได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมาก และจากผลการประเมินความสูงของระดับน้ำ กรณี Flume มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด และกรณี Veg มีค่าความผิดพลาดมากที่สุด

ผลการประเมินด้วยค่าสถิติของความเร็วการไหล แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าค่า MAE มีค่า 2.58–3.09 cm/s ค่า RMSE มีค่า 3.06–4.28 cm/s มีความหมายว่ามีค่าเบี่ยงเบนน้อย และค่า NSE มีค่า 0.62–0.87 มีความหมายว่าแบบจำลองสามารถทำนายความเร็วของการไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพปานกลางถึงสูง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแบบจำลองมีความสามารถที่น่าพอใจในการจำลองสภาพความเร็วของการไหลในการทดลองผ่านพีชน้ำและสิ่งกีดขวาง และจากผลการประเมินความเร็วการไหล กรณี Veg มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด และกรณี Flume มีค่าความผิดพลาดมากที่สุด

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบด้วยค่าสถิติของระดับน้ำ

Case	MAE (cm)	RMSE (cm)	NSE
Flume	0.04	0.05	0.99
Grass	0.23	0.25	0.94
Veg	0.38	0.42	0.93
Obs1	0.31	0.40	0.94
Obs2	0.36	0.47	0.95

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบด้วยค่าสถิติของความเร็วการไหล

Case	MAE (cm/s)	RMSE (cm/s)	NSE
Flume	2.97	3.15	0.62
Grass	2.62	3.06	0.85
Veg	2.94	3.34	0.87
Obs1	2.58	3.13	0.86
Obs2	3.09	4.28	0.87

6. สรุปและอภิปรายผล/ข้อเสนอแนะ

ผลการเปรียบเทียบการทำนายระดับน้ำจากแบบจำลอง HEC-RAS 1D กับผลการทดลองทางกายภาพในรางน้ำที่มีสิ่งกีดขวางในห้องปฏิบัติการ พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายระดับน้ำได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมาก ในส่วนของความเร็วการไหลพบว่าโดยรวมมีความคลาดเคลื่อนน้อย

การประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง HEC-RAS 1D ด้วยค่าสถิติ MAE, RMSE และ NSE พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายระดับน้ำได้อย่างแม่นยำ แต่ความเร็วการไหลมีความคลาดเคลื่อนพอสมควร เนื่องจากแบบจำลองมีข้อจำกัดในการจำลองความเร็วการไหลของน้ำแบบละเอียดรอบสิ่งกีดขวางและเกิดจากความผันผวนของการวัดทางกายภาพจากการไหลแบบปั่นป่วน

โดยสรุปแล้ว แบบจำลอง HEC-RAS 1D แสดงศักยภาพที่โดดเด่นในการจำลองพฤติกรรมการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในทางน้ำเปิด สามารถทำนายระดับผิวน้ำได้อย่างแม่นยำมาก สะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการจำลองผลกระทบของสิ่งกีดขวางที่มีต่อการยกตัวของระดับน้ำ ในขณะที่การทำนายความเร็วการไหลมีความคลาดเคลื่อนบางประการ แต่โดยภาพรวมแล้วอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ โดยรวมแล้วแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือในระดับที่สามารถนำไปใช้ในสถานการณ์จริงได้เป็นอย่างดี

อย่างไรก็ตาม สำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูงในการประเมินการไหลแบบซับซ้อนรอบสิ่งกีดขวาง การพิจารณาใช้แบบจำลองสองมิติ (2D) อาจเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่าเนื่องจากสามารถคำนวณการไหลในหลายทิศทางได้ นอกจากนี้ ยังสามารถพิจารณาแบบจำลองเฉพาะทางที่ออกแบบมาเพื่อการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลโดยเฉพาะ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณทางด้านพลศาสตร์

ในขณะเดียวกัน หากมีเป้าหมายในการนำแบบจำลองไปใช้ทำนายพฤติกรรมของการไหลในธรรมชาติ อย่างแม่นยำ จำเป็นต้องพิจารณาความคล้ายคลึงของเงื่อนไขพลศาสตร์ โดยเฉพาะค่าของ Reynolds Number หรือ Froude Number ซึ่งเป็นดัชนีสำคัญที่บ่งบอกลักษณะของการไหล หากแบบจำลองมีค่าดังกล่าวที่ใกล้เคียงกับของจริง ก็จะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือในการสรุปว่าพฤติกรรมการไหลในแบบจำลองสะท้อนสภาพความเป็นจริงได้อย่างถูกต้อง ดังนั้น การศึกษาวิจัยในอนาคตควรพิจารณาทดลองภายใต้อัตราการไหลที่หลากหลาย ซึ่งจะทำให้ค่าของ Reynolds Number และ Froude Number เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะการไหล ช่วยให้สามารถประเมินแบบจำลองพฤติกรรมการไหลที่กว้างขึ้น และเพิ่มศักยภาพในการประยุกต์ใช้ผลการวิจัยกับสถานการณ์จริงที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] USACE Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS Release Notes [Internet]. 2025 Apr 24 [cited 2025 Apr 1]. Available from: https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasm/6.7_beta
- [2] Chow VT. Open-channel hydraulics. New York: McGraw-Hill Book Company; 1959.
- [3] Nepf H. Flow and Transport in Regions with Aquatic Vegetation. *Annu Rev Fluid Mech.* 2011;44:123-42.
- [4] USACE Hydrologic Engineering Center. Equations for Basic Profile Calculations [Internet]. [place unknown]: USACE Hydrologic Engineering Center; 2025 [cited 2025 Apr 1]. Available from: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/6.5/theoretical-basis-for-one-dimensional-and-two-dimensional-hydrodynamic-calculations/1d-steady-flow-water-surface-profiles/equations-for-basic-profile-calculations>
- [5] US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. Manning's Roughness Coefficient [Internet]. 2020 [cited 2025 Apr 1]. Available from: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/latest/modeling-culverts/culvert-data-and-coefficients/manning-s-roughness-coefficient>
- [6] Hodson TO. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. *Geosci. Model Dev.* [Internet]. 2022;15:5481-87. Available from: <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>.
- [7] วรารุช วุฒินิชย์. การวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองโดยใช้ Nash-Sutcliffe Efficiency และ R^2 [อินเทอร์เน็ต]. นครปฐม: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน; [ม.ป.ป.] [เข้าถึงเมื่อ 1 เม.ย. 2568]. เข้าถึงได้จาก: <https://irre.ku.ac.th/pubart/dlinks.php?tpe=pubart&pdf=95-Jan-4-2553-Nash%20Efficiency.pdf>

โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงโดยใช้นอนอลิทคอลัมน์สำหรับการวิเคราะห์
ออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์พร้อมกันในรูปแบบยาพ่นจมูก

High-Performance Liquid Chromatography Using Monolithic Column for
Simultaneous Determination of Oxymetazoline Hydrochloride and
Xylometazoline Hydrochloride in Nasal Spray Formulations

มนัสวี จันรอด¹ และ สมศักดิ์ ศิริไชย^{2*}

Manassawee Janrod¹ and Somsak Sirichai^{2*}

Received: April 21, 2025

Revised: May 26, 2025

Accepted: June 5, 2025

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงที่ง่ายและรวดเร็วสำหรับการหาปริมาณออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์พร้อมกันในรูปแบบยาพ่นจมูก การแยกเกิดบนมอนอลิทคอลัมน์ (C₁₈, 100 มิลลิเมตร x 4.6 มิลลิเมตร) ของผสมของอะซิโตนไทรล์ (ร้อยละ 28 โดยปริมาตร) และสารละลายกรดฟอสฟอริก เข้มข้นร้อยละ 0.01 (ร้อยละ 72 โดยปริมาตร) ใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่ที่เหมาะสมด้วยอัตราการไหลที่ 2.50 มิลลิเมตรต่อนาที สารที่ต้องการวิเคราะห์ตรวจวัดที่ 220 นาโนเมตร ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์แยกอย่างสมบูรณ์ภายใน 2 นาที กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานของออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์

¹อาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา บางแสน อำเภอมือ จังหวัดชลบุรี 20131 ประเทศไทย
Lecturer, Department of Chemistry, Faculty of Science, Burapha University, Bangsaen, Muang, Chonburi, 20131, Thailand
E-Mail: manassawee.ja@buu.ac.th

^{2*}ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา บางแสน อำเภอมือ จังหวัดชลบุรี 20131 ประเทศไทย
Assistant Professor, Department of Chemistry, Faculty of Science, Burapha University, Bangsaen, Muang, Chonburi, 20131, Thailand
E-Mail: sirichai@go.buu.ac.th

*Corresponding Author

ออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์มีค่า 0.03 และ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ วิธีที่นำเสนอนี้สามารถใช้กับงานวิเคราะห์ประจำของออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ในรูปแบบยาพ่นจมูก

คำสำคัญ: มอนอลิท, โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง, ออกซีเมตาโซลีน, ไซโลเมตาโซลีน

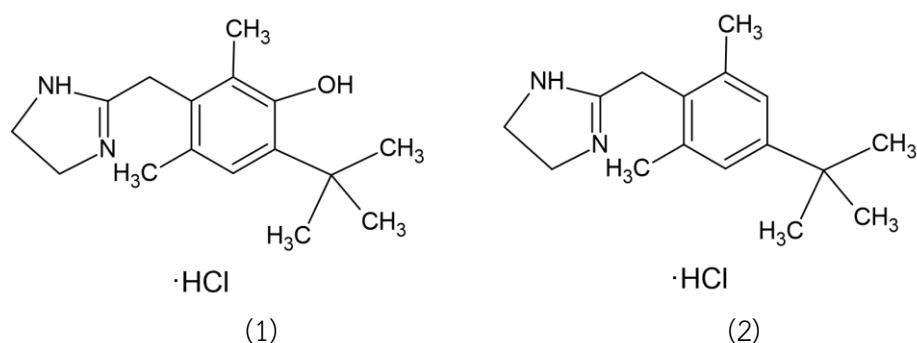
Abstract

In this research, a simple and rapid high-performance liquid chromatography for simultaneous determination of oxymetazoline hydrochloride and xylometazoline hydrochloride in nasal spray formulations was developed. The separation was conducted in monolithic column (C₁₈, 100 mm x 4.6 mm). A mixture of acetonitrile (28% by volume) and 0.01% phosphoric acid (72% by volume) was used as the optimal mobile phase, with the flow rate of 2.50 mL/min. All analytes were detected at 220 nm. Under the optimized conditions, oxymetazoline hydrochloride and xylometazoline hydrochloride could be completely separated within 2 min. Calibration curves for standard solution of oxymetazoline hydrochloride and xylometazoline hydrochloride were in the range of 0.50-10.00 mg/L with $R^2 > 0.9987$. Limits of detection of oxymetazoline hydrochloride and xylometazoline hydrochloride were 0.03 and 0.04 mg/L, respectively. The proposed method can be used for routine analysis of oxymetazoline hydrochloride and xylometazoline hydrochloride in nasal spray formulations.

Keywords: Monolithic, High-performance Liquid Chromatography, Oxymetazoline, Xylometazoline

1. บทนำ

ออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ (Oxymetazoline Hydrochloride) หรือ 2-(3-hydroxy-2,6-dimethyl-4- *tert*-butylbenzyl)-2-imidazoline hydrochloride และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ (Xylometazoline Hydrochloride) หรือ 2-(4-*tert*-butyl-2,6-dimethylbenzyl)-2-imidazoline hydrochloride [1] เป็นยาหดหลอดเลือดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการบรรเทาอาการคัดจมูกจากภาวะต่าง ๆ เช่น โรคหวัด ภูมิแพ้ และไซนัสอักเสบ ยาทั้งสองชนิดออกฤทธิ์โดยการกระตุ้นตัวรับแอลฟา-อะดรีเนอร์จิก (Alpha-adrenergic Receptors) ที่เยื่อบุโพรงจมูก ทำให้หลอดเลือดหดตัว ส่งผลให้การบวมลดลงและอาการคัดจมูกบรรเทาอย่างรวดเร็ว ออกซีเมตาโซลีนมีระยะเวลาการออกฤทธิ์ที่ยาวนานและเป็นที่ยอมรับในรูปแบบสเปรย์และยาหยอดจมูก ขณะที่ไซโลเมตาโซลีนมีสมบัติคล้ายกันและใช้ในรูปแบบเดียวกัน แต่มีช่วงเวลาการออกฤทธิ์ที่แตกต่างกัน เนื่องจากยานี้มีผลต่อระบบไหลเวียนโลหิต จึงควรระมัดระวังเป็นพิเศษในผู้ที่มีโรคประจำตัว เช่น โรคหัวใจ ความดันโลหิตสูง หรือปัญหาเกี่ยวกับระบบไหลเวียนโลหิต นอกจากนี้ การศึกษาความปลอดภัยและประสิทธิภาพของออกซีเมตาโซลีนและไซโลเมตาโซลีนยังมีความสำคัญอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้มั่นใจว่าผู้ใช้สามารถบรรเทาอาการคัดจมูกได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ โครงสร้างทางเคมีของออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างทางเคมี (1) ออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ และ (2) โซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์

วิธีการวิเคราะห์ปริมาณของออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และโซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ในรูปแบบยาพ่นจมูกมีหลายวิธี ได้แก่ สเปกโทรสโกปี (Spectroscopy) โดยส่วนใหญ่มีขั้นตอนของการทำอนุพันธ์หรือการเพิ่มความเข้มข้นของสารก่อนการวิเคราะห์ มีตัวแปรที่ศึกษาค่อนข้างมาก และเวลาในการวิเคราะห์นาน [2-6] แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography หรือ GC) วิธีนี้มีขั้นตอนการสกัดสารที่ต้องการวิเคราะห์โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่เหมาะสม เช่น ไดคลอโรมีเทนและไดเอทิลอีเธอร์ ซึ่งสารดังกล่าวมีความเป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม [7] และโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High-performance Liquid Chromatography หรือ HPLC) วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในห้องปฏิบัติการของอุตสาหกรรมยา เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ ให้การแยกดี มีความเฉพาะเจาะจง ความแม่นยำ และความเที่ยงสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ร่วมกับตัวตรวจชนิดอัลตราไวโอเลตหรือไดโอดอาร์เรย์ เนื่องจากมีข้อดีในด้านต้นทุนต่ำกว่าเมื่อเทียบกับโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง-แมสสเปกโทรสโกปี และแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรสโกปี [8-13] อย่างไรก็ตามจากการศึกษาวรรณกรรม การรายงานการวิเคราะห์ปริมาณของสารทั้งสองจะเป็นการวิเคราะห์แยกกัน และมีการรายงานเพียงหนึ่งวรรณกรรมเท่านั้นที่วิเคราะห์สารทั้งสองชนิดนี้พร้อมกันด้วยวิธีโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง และคอลัมน์ที่ใช้เป็นแบบรีเวิร์สเฟส [14] ซึ่งยังไม่พบการรายงานการใช้คอลัมน์ชนิดมอนออลิกับสารผสมคู่นี้

โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงแบบรีเวิร์สเฟส (Reversed-phase HPLC) เป็นเทคนิคการแยกสารทางโครมาโทกราฟี โดยที่สารผสมเกิดการแยกส่วนหรือพาร์ทิชัน (Partition) ระหว่างสองเฟส คือ เฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase) และเฟสอยู่กับที่ (Stationary Phase) เฟสเคลื่อนที่เป็นของเหลวซึ่งทำหน้าที่พาสารละลายตัวอย่างไหลผ่านเฟสอยู่กับที่ การไหลของเฟสเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นภายใต้แรงดันสูงเพื่อให้เฟสเคลื่อนที่ผ่านไปยังระบบของโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง ในโหมดนี้เฟสอยู่กับที่มีสมบัติความเป็นสารที่ไม่มีขั้ว (Nonpolar) มากกว่าเฟสเคลื่อนที่ หรือเฟสเคลื่อนที่มีความเป็นขั้วมากกว่าเฟสอยู่กับที่ จากความแตกต่างนี้ทำให้เกิดการพาร์ทิชันระหว่างตัวถูกละลายกับเฟสอยู่กับที่ และตัวถูกละลายกับเฟสเคลื่อนที่เป็นกลไกหลักในการแยกสารผสมในโหมดนี้ สารที่มีขั้วมาก จะเคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์และถูกตรวจวัดที่ตัวตรวจวัดเป็นลำดับแรก มอนออลิทคอลัมน์เป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบต่อเนื่องและได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง

จุดเด่นหลักของคอลัมน์ชนิดนี้คือมีความต้านทานการไหลต่ำ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือเป็นคอลัมน์ที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบต่อเนื่องและเป็นแท่งเดียว ส่งผลให้สามารถใช้อัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่ที่สูงได้และใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาการวิเคราะห์ออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์พร้อมกันในรูปแบบยาพ่นจมูก ด้วยวิธีโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงร่วมกับคอลัมน์ชนิดมอนอลิท์ที่ง่าย รวดเร็ว มีความเฉพาะเจาะจง และน่าเชื่อถือ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) ในการแยกสารออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ด้วยวิธีโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง ตัวแปรที่เลือกมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ร้อยละของอะซิโตนไนโตรล์ในเฟสเคลื่อนที่ (ร้อยละ 25, 28, 30 และ 40 โดยปริมาตร) และอัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่ (1.5, 2.0 และ 2.5 มิลลิลิตรต่อนาที) การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี (Method Validation) ในเทอมต่าง ๆ และการประยุกต์ใช้วิธีที่นำเสนอภายใต้สภาวะที่เหมาะสมกับตัวอย่างยาพ่นจมูกที่มีองค์ประกอบออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์

2.1 สารเคมีและสารละลายมาตรฐาน

2.1.1 สารเคมี

สารมาตรฐานออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ ความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 98 จากบริษัท Tokyo Chemical Industry ประเทศญี่ปุ่น สารมาตรฐานไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ ความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 98 จากบริษัท Tokyo Chemical Industry ประเทศญี่ปุ่น อะซิโตนไนโตรล์ เกรด HPLC บริษัท Honeywell ประเทศเยอรมัน กรดออร์โท-ฟอสฟอริก เข้มข้นร้อยละ 85 บริษัท Merck ประเทศเยอรมัน น้ำปราศจากไอออน 18 เมกะโห์ม จากเครื่อง E-pure Deionization System ของบริษัท Barnstead ประเทศเยอรมัน ใช้สำหรับเตรียมสารละลายทุกชนิด

2.1.2 สารละลายมาตรฐาน

สารละลายมาตรฐานเข้มข้น (Stock Standard Solution) ของออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์เตรียมในเมทานอลโดยเตรียมแยกกันเพื่อให้ได้ออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตรและไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส สารละลายมาตรฐานผสมของออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ (0.50, 1.00, 3.00, 5.00 และ 10.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) เตรียมโดยการปิเปตปริมาตรที่เหมาะสมของแต่ละสารละลายมาตรฐานเข้มข้นลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร และเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออน สารละลายที่ได้กรองผ่านในลอนเมมเบรนขนาด 0.20 ไมครอนก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง

2.2 การพัฒนาวิธีการวิเคราะห์

การแยกสารละลายผสมของออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ใช้เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง รุ่น Agilent 1260 Infinity II ของบริษัท Agilent Technologies ประเทศเยอรมัน ตัวตรวจวัดชนิดไดโอดอาร์เรย์ (Diode Array Detector) คอลัมน์ที่ใช้คือมอนอลิธ C18 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.6 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร จากบริษัท Merck ประเทศสหรัฐอเมริกา ความยาวคลื่นสำหรับการตรวจวัดคือ 220 นาโนเมตร ส่วนฉีดยาเป็นชนิด Rheodyne ปริมาตรฉีดคือ 20 ไมโครลิตร การชะเป็นแบบไอโซเครติก (Isocratic Elution) การบันทึกและประมวลผลโครมาโทแกรมใช้โปรแกรม OpenLAB CDS ChemStation Workstation VL (A 02.02) ของบริษัท Agilent ประเทศเยอรมัน การวัด pH ของสารละลายทำโดยใช้เครื่องวัดพีเอช รุ่น ϕ 32 ของบริษัท Beckman ประเทศสหรัฐอเมริกา

2.3 การเตรียมสารละลายตัวอย่าง

ตัวอย่างยาพ่นจมูกที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ยี่ห้อ คือ อิลิอาติน ระบุว่ามียาออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ร้อยละ 0.05 (500 มิลลิกรัมต่อลิตร) และแอคทาเวีย ระบุว่ามียาไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) การเตรียมตัวอย่างยาพ่นจมูกใช้วิธีการเจือจาง โดยการปิเปตตัวอย่างยาพ่นจมูก อิลิอาตินและแอคทาเวีย อย่างละ 50 ไมโครลิตร ลงในปริมาตร ขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนและกรองสารละลายตัวอย่างที่ได้ด้วยเยื่อกรอง (Membrane Filter) ชนิดไนลอน ขนาด 0.20 ไมครอน ก่อนนำไปฉีดเข้าเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง

2.4 การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์

วิธีโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงที่พัฒนาขึ้นสำหรับวิเคราะห์ออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์พร้อมกันในตัวอย่างยาพ่นจมูก มีการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีในเทอมของขีดจำกัดของการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) ขีดจำกัดการหาปริมาณ (Limit of Quantitation, LOQ) เส้นตรงของกราฟมาตรฐาน (Linearity of Calibration Curve) ความเที่ยง (Precision) และความแม่นยำ (Accuracy) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

3. ผลและอภิปรายผลการวิจัย

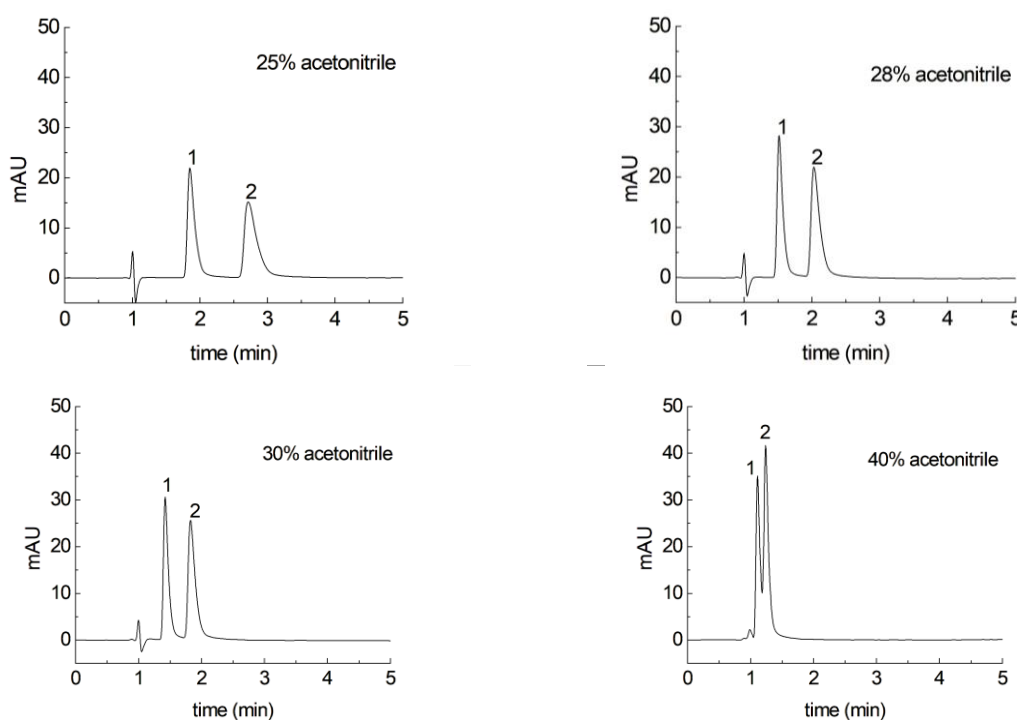
3.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนของเฟสเคลื่อนที่

ร้อยละของอะซิโตนไตรล์ในเฟสเคลื่อนที่เป็นปัจจัยที่สำคัญในการวิเคราะห์สารผสมด้วยวิธีโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงแบบรีเวิร์สเฟส เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงร้อยละของอะซิโตนไตรล์ในเฟสเคลื่อนที่จะมีผลต่อสภาพขั้วของเฟสเคลื่อนที่และความจำเพาะเจาะจง (Selectivity) ในการศึกษาครั้งนี้ เฟสเคลื่อนที่ประกอบด้วยอะซิโตนไตรล์และสารละลายกรดออร์โท-ฟอสฟอริก (ร้อยละ 0.01 โดยปริมาตร) โดยศึกษา ร้อยละอะซิโตนไตรล์ที่ 25, 28, 30 และ 40 โดยปริมาตร ผลของร้อยละอะซิโตนไตรล์ในเฟสเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 2

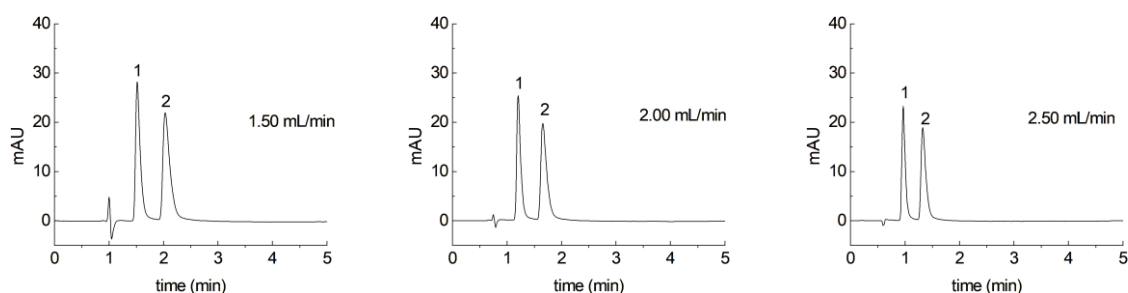
จากผลการทดลองเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มร้อยละของอะซิโตไนไตรล์ในเฟสเคลื่อนที่ ทำให้สารที่สนใจถูกชะออกมาจากคอลัมน์เร็วขึ้น (รีเทนชันไทม์ลดลง) เนื่องจากการเพิ่มร้อยละของอะซิโตไนไตรล์ในเฟสเคลื่อนที่ ส่งผลทำให้สภาพขั้วของเฟสเคลื่อนที่ลดลง กล่าวคือความแรงในการชะมากขึ้นที่ร้อยละ 25 และ 28 ของอะซิโตไนไตรล์ สารออกซิเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์แยกกันอย่างสมบูรณ์ (ค่าการแยกมากกว่า 1.5) ส่วนที่ร้อยละ 30 และ 40 ของอะซิโตไนไตรล์ สารทั้งสองชนิดแยกไม่สมบูรณ์ ดังนั้น เมื่อพิจารณาในเทอมการแยกและเวลาในการวิเคราะห์ จึงเลือกร้อยละอะซิโตไนไตรล์ในเฟสเคลื่อนที่ที่ 28 เป็นสภาวะที่เหมาะสมและใช้ในการศึกษาต่อไป

3.2 การศึกษาผลของอัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่

ได้ศึกษาผลของอัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่ต่อโครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานผสมของออกซิเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์ที่อัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่ 1.50, 2.00 และ 2.50 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3 เห็นได้ว่าผลของอัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่มีผลชัดเจนต่อรีเทนชันไทม์ กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่ ค่ารีเทนชันไทม์ของสารแต่ละชนิดลดลง พิจารณาในเทอมค่าการแยกและเวลาในการวิเคราะห์ จึงเลือกที่อัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่ที่ 2.50 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นสภาวะที่เหมาะสมและใช้ในการศึกษาต่อไป

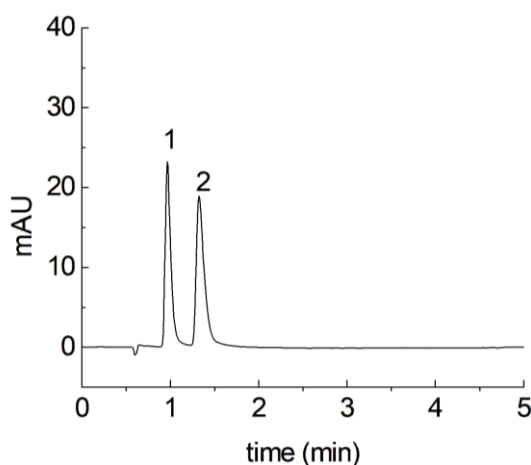


รูปที่ 2 ผลของร้อยละอะซิโตไนไตรล์ในเฟสเคลื่อนที่ต่อโครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานผสมของออกซิเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์ (1 คือ ออกซิเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์ และ 2 คือ ไซโลเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์) อัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่คือ 1.50 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 3 ผลของอัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่ต่อโครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานผสมของออกซีเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์ (1 คือ ออกซีเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์ และ 2 คือ ไซโลเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์)

จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ออกซีเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์ด้วยโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง ได้สภาวะที่เหมาะสมดังนี้ เฟสเคลื่อนที่ประกอบด้วย อะซิโตนไตรล์และสารละลายกรดออร์โท-ฟอสฟอริก (ร้อยละ 0.01 โดยปริมาตร) ในอัตราส่วน 28 ต่อ 72 โดยปริมาตร อัตราการไหลที่ 2.50 มิลลิลิตรต่อนาที และตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร รูปที่ 4 แสดงโครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานผสมของออกซีเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาในการวิเคราะห์กับวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการแยกสารทั้งสองชนิดนี้ [14] พบว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถวิเคราะห์ได้เร็วกว่า 5 เท่า



รูปที่ 4 โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานผสมของออกซีเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์ภายใต้สภาวะมาตรฐาน (1 คือ ออกซีเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์ และ 2 คือ ไซโลเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์)

3.3 การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์เป็นกระบวนการยืนยันความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ที่แสดงให้เห็นว่าวิธีการนั้น ๆ ให้ผลตามที่คาดหวังเพื่อใช้สำหรับการนำไปประยุกต์การวิเคราะห์ เทอมที่ศึกษา ได้แก่ ซีดจำกัดการตรวจวัด ซีดจำกัดการหาปริมาณ เส้นตรงของกราฟมาตรฐาน ความเที่ยง และความแม่นยำ สภาวะของโครมาโทกราฟี คือ เฟสเคลื่อนที่ประกอบด้วยอะซิโตนไนโตรล์และสารละลายกรดออร์โท-ฟอสฟอริก (ร้อยละ 0.01 โดยปริมาตร) ในอัตราส่วน 28 ต่อ 72 โดยปริมาตร อัตราการไหลที่ 2.50 มิลลิลิตรต่อนาที และตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร

กาหาขีดจำกัดการตรวจวัดและขีดจำกัดการหาปริมาณ จะพิจารณาจากความเข้มข้นของสารที่ต้องการวิเคราะห์ที่ให้อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise) เท่ากับ 3 และ 10 ตามลำดับ กราฟมาตรฐานสร้างจากสารละลายมาตรฐานของสารที่ต้องการวิเคราะห์ ความเข้มข้น 0.50 ถึง 10.00 มิลลิกรัมต่อลิตร สมการกราฟมาตรฐาน LOD และ LOQ ของออกซีเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์และโซโลเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมการกราฟมาตรฐาน LOD และ LOQ ของออกซีเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์และโซโลเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์

สาร	สมการเส้นตรง ของกราฟมาตรฐาน	R ²	LOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	LOQ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
ออกซีเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์	$y = 30.055x + 2.771$	0.9995	0.03	0.10
โซโลเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์	$y = 24.483x + 5.695$	0.9987	0.04	0.15

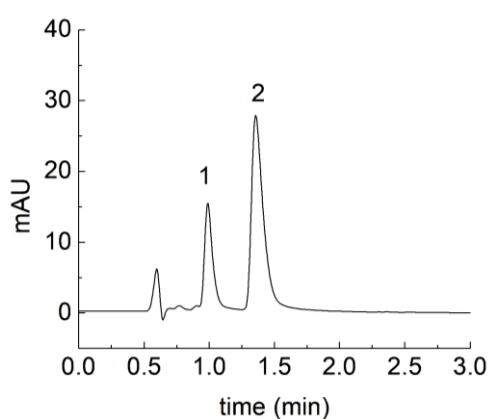
ความเที่ยงของวิธีบอกถึงความใกล้เคียงกันของผลการวิเคราะห์ซ้ำที่พัฒนาขึ้นมา การศึกษาความเที่ยงภายในวันทำโดยการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานของออกซีเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์และโซโลเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์ที่ 3 ระดับความเข้มข้น โดยแต่ละความเข้มข้นฉีด 10 ครั้ง และการศึกษาความเที่ยงระหว่างวัน ทำโดยการวิเคราะห์ซ้ำเป็นเวลา 3 วัน แต่ละวันวิเคราะห์ซ้ำ 10 ครั้ง ผลการศึกษาความเที่ยงแสดงดังตารางที่ 2 ความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์วิธีแสดงในเทอมของร้อยละการได้กลับคืน (Percent Recovery) ศึกษาโดยการเติมสารละลายมาตรฐานของออกซีเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์และโซโลเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์ที่ 3 ระดับความเข้มข้นลงในตัวอย่างยา จากการศึกษาพบว่าร้อยละการได้กลับคืนของออกซีเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์อยู่ในช่วง 97.8-99.1 และโซโลเมตาโซลินไฮโดรคลอไรด์อยู่ในช่วง 98.2-101.3 ซึ่งร้อยละค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์และค่าร้อยละการได้กลับคืนของสารทั้งสองอยู่ในเกณฑ์ความน่าเชื่อถือตาม The Association of Official Analytical Chemistry (AOAC) กล่าวคือร้อยละค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ไม่เกินร้อยละ 7.3 และค่าร้อยละการได้กลับคืนอยู่ในช่วง 80-110

ตารางที่ 2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ของพื้นที่พีคภายในวันเดียวกันและระหว่างวันของออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์

สาร	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	% RSD ภายในวันเดียวกัน	% RSD ระหว่างวัน
ออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์	2.00	1.76	3.54
	4.00	1.62	3.31
	6.00	1.65	2.77
ไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์	2.00	1.82	3.11
	4.00	1.78	2.89
	6.00	1.51	2.62

4. การยืนยันความใช้ได้ของวิธีการ

นำวิธีโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่พัฒนาขึ้นมาวิเคราะห์ออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ในตัวอย่างยาพ่นเจือจาง โครมาโทแกรมของสารละลายตัวอย่างผสมแสดงดังรูปที่ 5 เห็นได้ว่าภายใต้สภาวะที่เหมาะสมนี้ ไม่มีพีกรบกวนในการวิเคราะห์ปริมาณของออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ในตัวอย่างยาพ่น ผลการวิเคราะห์พบปริมาณของออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ 498 ± 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ 998 ± 3 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 5 โครมาโทแกรมของสารละลายตัวอย่างยาพ่นผสมของออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์เจือจาง ภายใต้สภาวะมาตรฐาน (1 คือออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ และ 2 คือไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์)

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงร่วมกับมอนอลิธคอลัมน์เพื่อวิเคราะห์ออกซีเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์และไซโลเมตาโซลีนไฮโดรคลอไรด์ สภาวะที่เหมาะสมของวิธีโครมาโทกราฟีคือเฟสเคลื่อนที่ประกอบด้วยอะซิโตนไตริลและสารละลายกรดออร์โท-ฟอสฟอริก (ร้อยละ 0.01 โดยปริมาตร) ในอัตราส่วน 28 ต่อ 72 โดยปริมาตร อัตราการไหลที่ 2.50 มิลลิลิตรต่อนาที และตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร วิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นนี้ทำได้ง่าย รวดเร็ว มีความเฉพาะเจาะจง ความแม่นยำ และความเที่ยงดี สามารถนำไปประยุกต์หาสารทั้งสองในตัวอย่างรูปแบบยาพ่นได้ และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมคุณภาพของยาสำหรับงานประจำได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่สนับสนุนทุนวิจัยและห้องปฏิบัติการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Moffat AC, Osselton MD, Widdop B, editors. Clarke's Analysis of Drugs and Poisons. 4th ed. London: Pharmaceutical Press; 2011.
- [2] Abdel-Aziz O, El-Kosasy AM, Magdy N, El Zahar NM. Novel spectroscopic methods for determination of Cromolyn sodium and Oxymetazoline hydrochloride in binary mixture. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc [Internet]. 2014;131:59-66. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.04.047>
- [3] Saleh S, Lotfy H, Hassan N, Elgizawy S. Spectrophotometric and chromatographic methods for the determination of a binary mixture of sodium cromoglicate and xylometazoline hydrochloride. Anal Chem Indian J. 2013;13:152-60.
- [4] Othman N, Fathe S. Indirect Spectrophotometric Determination of Oxymetazoline Hydrochloride. Rafidain J Sci [Internet]. 2013;24:84-95. Available from: <https://doi.org/10.33899/rjs.2013.67503>.
- [5] Humeidy I. Spectrophotometric method for Determination of oxymetazoline, HCl in a Pharmaceutical formulation using 2,4-dinitrophenylhydrazine. Tikrit J Pure Sci [Internet]. 2015;20(2). Available from: <https://doi.org/10.25130/tjps.v20i2.1165>.
- [6] Wahdan K, Alnedawi Z, Hassan AM, Hadi H, Shabana A. Cloud Point Pre-concentration with Spectrophotometric Detection for Determination of Oxymetazoline in Pharmaceutical Formulations. Chem Sci J [Internet]. 2021;12(3):1-5.

- [7] Sioufi A, Leroux F, Dubois JP. Determination of xylometazoline in plasma and urine by gas chromatography using a fused-silica capillary column and an electron-capture detector. *J Chromatogr* [Internet]. 1989;487(1):81-9. Available from: [https://doi.org/10.1016/s0378-4347\(00\)83009-1](https://doi.org/10.1016/s0378-4347(00)83009-1).
- [8] Alnedawi Z, Hassan AM, Hadi H, Shabana A. Development HPLC technique for determining Oxymetazoline and Isoxspurine in pharmaceutical formulations. *Egypt J Chem* [Internet]. 2022;65(11):779-84. Available from: <https://doi.org/10.21608/ejchem.2022.151275.6551>.
- [9] Raju MD. Method development and validation of Oxymetazoline HCl and Sorbitol in bulk and pharmaceutical dosage form. *J Emerg Technol Innov Res* [Internet]. 2019 Jun;6(6):243-50. Available from: <https://www.jetir.org/papers/JETIR1906324.pdf>.
- [10] Sreelakshmi M, Sasidhar RC, Raviteja B. Reverse phase-HPLC method for simultaneous estimation of tetracaine and oxymetazoline in bulk samples. *J Pharm Sci Res*. 2017;9(9):1589-94.
- [11] Mikawy NN, Magdy N, Mohamed MH, El-Kosasy AM. Validated HPLC method for simultaneous determination of azelastine hydrochloride fluticasone propionate and oxymetazoline in nasal mucosa and nasopharyngeal swabs from real human samples. *Sci Rep* [Internet]. 2025;15(1):4252. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82387-7>.
- [12] Kasawar GB, Farooqui M. Development and validation of a stability indicating RP-HPLC method for the simultaneous determination of related substances of albuterol sulfate and ipratropium bromide in nasal solution. *J Pharm Biomed Anal* [Internet]. 2010;52(1):19-29. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2009.11.026>.
- [13] Alghamdi H, Alsaeedi M, Hayes PE, Glennon JD. Rapid and sensitive simultaneous separation and electrochemical detection of tetracaine hydrochloride and oxymetazoline hydrochloride in pharmaceutical formulations via core-shell reversed-phase liquid chromatography. *J Pharm Biomed Anal* [Internet]. 2022;214:114717. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2022.114717>
- [14] Fathy ME, Abo El Abass Mohamed S, Elmansy H, Belal F. Simultaneous Determination of Cromolyn Sodium Combined Dosage Forms Using Isocratic HPLC Method. *J Chromatogr Sci* [Internet]. 2017;55(1):14-22. Available from: <https://doi.org/10.1093/chromsci/bmw142>.

Shoreline Extraction Using Water Indices for Nautical Chart Assessment:

A Case Study of Hua Hin Beach, Thailand

อารีย์ หวันละเป๊ะ^{1*} และ ภัทราพร สร้อยทอง²

Aree Hwanlabeh^{1*} and Phattraporn Soyotong²

Received: June 2, 2025

Revised: June 4, 2025

Accepted: June 10, 2025

Abstract

Shoreline change is a crucial indicator of coastal dynamics, impacting maritime navigation, coastal planning, and nautical chart accuracy. In Thailand, traditional hydrographic surveys are limited by time and resources, resulting in outdated shoreline data. This study investigates the use of satellite-based remote sensing and geospatial analysis to assess shoreline change along Hua Hin Beach from 2012 to 2024.

Multi-temporal Landsat imagery from five periods, spaced three years apart, was analyzed using six spectral water indices: NDWI, MNDWI, AWEIsh, AWEInsh, LSWI, and WI2015. The analysis was conducted using Google Earth Engine in combination with the geemap Python API on Google Colab. Shoreline positions extracted with each index were compared to a reference shoreline from Thai nautical chart No.246 (edition 2012), using 430 validation points at 90-meter intervals. Accuracy was evaluated using RMSE and MAE, with WI2015 showing the highest accuracy (RMSE = 7.156 meters).

The best results from WI2015 were used in the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) to compute shoreline change metrics; EPR, SCE, and NSM, across 380 transects. The results showed

^{1*}ประจำกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ

Attached to Hydrographic Department, Royal Thai Navy

Email: nui.hydro@gmail.com

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาภูมิสารสนเทศ คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Assistant Professor, Department of Geoinformatics, Faculty of Humanities and Social Science, Burapha University

Email: phattraporn@go.buu.ac.th

*Corresponding Author

accretion in Zones A and E, erosion in Zones B and C, and stability in Zone D. Based on NSM, shoreline change was classified into Stable (<10 m), Moderate (10–50 m), and Significant (>50 m) categories for resurvey prioritization.

This study highlights the effectiveness of integrating satellite-derived water indices with DSAS for monitoring shoreline change and updating nautical charts in coastal zones.

Keywords: Shoreline Extraction, Water Index, Google Earth Engine, DSAS, Nautical Chart

1. Introduction

Coastal zones are dynamic interfaces between land and sea that are vital for ecological balance, economic activities, and human settlements. Shoreline change, manifested through erosion and accretion, is a critical indicator of coastal dynamics and has profound implications for maritime safety, land use planning, ecosystem stability, and the accuracy of nautical charts [1, 2]. In recent decades, both natural forces such as sea level rise, tides, and storms, as well as anthropogenic factors like coastal development and infrastructure expansion, have accelerated shoreline transformation [3, 4].

Traditional shoreline surveys conducted through hydrographic methods are often costly, time-consuming, and spatially limited. Consequently, shoreline data in many regions, including Thailand, are often outdated or incomplete, posing risks for navigation and resource management. The International Hydrographic Organization (IHO) emphasizes the need for regularly updated coastal data to maintain safe and efficient maritime operations [5]. According to the IHO S-44 standards, the positional uncertainty of the coastline depicted on nautical charts should not exceed 10 meters, particularly in areas critical to navigation.

Remote sensing and Geographic Information System (GIS) technologies offer an effective alternative to conventional field-based approaches. With the availability of multi-temporal satellite data and powerful cloud-based geospatial platforms such as Google Earth Engine [6], it is now feasible to conduct long-term shoreline monitoring with high spatial and temporal consistency. Spectral water indices applied to satellite imagery have proven particularly useful in delineating land–water boundaries, enabling the automated or semi-automated extraction of shoreline positions [7, 8].

This study aims to utilize Landsat satellite imagery and spectral indices to analyze shoreline changes along Hua Hin Beach, a coastal city in Prachuap Khiri Khan Province, Thailand. The region is both a tourist destination and an area of active coastal transformation due to natural processes and human pressures. Accurate detection of shoreline movement in this area is crucial for updating nautical charts, identifying erosion-prone zones, and informing sustainable coastal planning strategies. By integrating satellite image processing, spectral index classification, and shoreline change modeling using the Digital Shoreline Analysis System (DSAS), this study seeks to offer a robust, replicable framework for shoreline monitoring in tropical coastal environments.

The findings contribute not only to improved charting accuracy but also to coastal vulnerability assessment and long-term environmental management. Ultimately, this work aligns with global efforts to leverage Earth observation technologies for sustainable coastal development and maritime safety.

2. Objectives

The dynamic nature of coastal environments, especially in areas with growing human activities and natural pressures, necessitates effective monitoring and analysis of shoreline change. This study focuses on applying remote sensing and geospatial techniques to support shoreline extraction and nautical chart assessment in the Hua Hin coastal zone. The specific objectives are outlined as follows:

2.1 To investigate the methods used for shoreline extraction from satellite imagery along the beach of Hua Hin district, Prachuap Khiri Khan Province, Thailand during the period from 2012 to 2024

2.2 To evaluate the performance of various water indices when applied to satellite images for shoreline extraction and determine the most accurate index.

2.3 To analyze the patterns and trends of shoreline changes based on the shoreline extraction data and assess whether any areas along the Hua Hin beach require new nautical chart surveys.

3. Literature Reviews

Numerous studies have demonstrated the application of spectral indices for shoreline detection. McFeeters [8] introduced the Normalized Difference Water Index (NDWI) to enhance water–land contrast, while Xu [9] proposed the Modified NDWI (MNDWI) using SWIR for improved water detection in urban areas. Feyisa et al. [10] developed the Automated Water Extraction Index (AWEI), with variants for shadowed and non-shadowed conditions.

Fisher et al. [11] introduced Water Index 2015 (WI2015), incorporating multiple spectral bands, which has shown improved performance in heterogeneous landscapes. Bishop-Taylor et al. [12] emphasized the need for sub-pixel accuracy and band sensitivity analysis in shoreline detection.

For shoreline change analysis, the U.S. Geological Survey's DSAS has been widely adopted [13], allowing computation of metrics such as End Point Rate (EPR), Shoreline Change

Envelope (SCE), and Net Shoreline Movement (NSM). Song et al. [14] applied DSAS for long-term coastal monitoring in East Asia, while Isha and Adib [15] demonstrated their integration in GIS-based shoreline studies in Southeast Asia.

Google Earth Engine [6] has further enabled large-scale satellite data processing. Combined with validation datasets such as nautical charts [5, 16], this creates a reliable foundation for hydrographic decision-making.

4. The Methods of Research

This study investigates shoreline changes along Hua Hin Beach, Thailand, using a remote sensing and geospatial analysis framework. The process includes satellite data acquisition, spectral water index computation, shoreline extraction, accuracy validation, and shoreline change analysis using the Digital Shoreline Analysis System (DSAS). The overall technical workflow is illustrated in Figure 1.

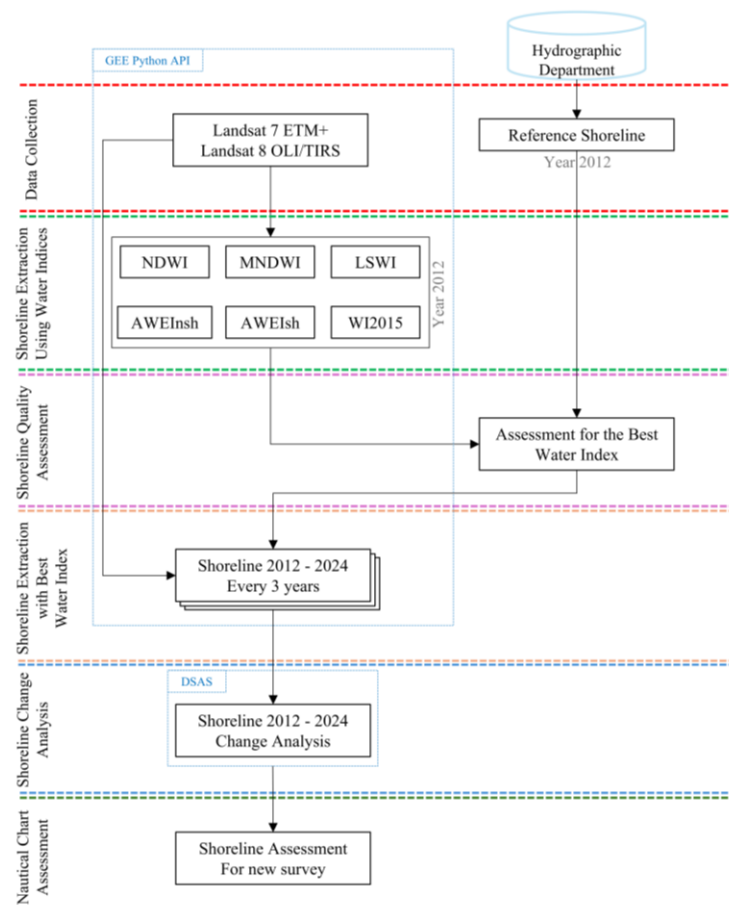


Figure 1 Technical Workflow of the Study

Landsat imagery was selected for five temporal intervals: 2012, 2015, 2018, 2021, and 2024. Images were sourced from Landsat 7 ETM+ for the first two periods and Landsat 8 OLI/TIRS for the latter three. The selection was based on low cloud cover, favorable tidal conditions, and minimal atmospheric interference. Preprocessing steps included top-of-atmosphere reflectance conversion and cloud masking using the pixel quality assurance (QA) bands in Google Earth Engine (GEE). Landsat 7 data were corrected for scan line errors using a linear interpolation method following the approach of Storey et al. [17]. All processing was conducted using GEE within a Python environment through Google Colab and the geemap API.

Six spectral water indices were employed to enhance the detection of water–land boundaries from satellite imagery. Each index offers distinct advantages depending on surface conditions, land cover, and image characteristics.

The Normalized Difference Water Index (NDWI), proposed by McFeeters [8], enhances open water features by increasing the contrast between water and land. It utilizes the strong reflectance of water in the green band and absorption in the near-infrared (NIR) band, is calculated as:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (1)$$

NDWI is effective in detecting surface water in natural environments but may perform poorly in built-up areas due to spectral confusion with impervious surfaces.

To address this limitation, the Modified NDWI (MNDWI), introduced by Xu [9], replaces the NIR band with the shortwave infrared band (SWIR1), which helps to suppress noise from built-up features and enhances the separability of water bodies in urbanized or mixed land cover regions as:

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR1}{Green + SWIR1} \quad (2)$$

The Automated Water Extraction Index for Shadow (AWEIsh) is specifically designed to minimize the confusion between water and shadowed areas, especially in mountainous or forested terrain. It accounts for multiple bands to distinguish water under complex illumination conditions and is calculated using:

$$AWEIsh = Blue + 2.5 * Green - 1.5 * (NIR + SWIR1) - 0.25 * SWIR2 \quad (3)$$

In contrast, the Automated Water Extraction Index for Non-Shadow (AWEInsh) is tailored for flat or well-illuminated regions without significant topographic shading. It emphasizes the contrast between water and non-water features while reducing false positives:

$$AWEInsh = 4 * (Green - SWIR1) - (0.25 * NIR + 2.75 * SWIR2) \quad (4)$$

The Land Surface Water Index (LSWI), commonly applied in agricultural and vegetated zones, is sensitive to soil moisture and water content in vegetation. It is especially useful for detecting water in floodplains, wetlands, or areas with partial vegetation cover, and is defined as:

$$LSWI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1} \quad (5)$$

Finally, the Water Index 2015 (WI2015), proposed by Fisher et al. [11], integrates multiple spectral bands and empirically derived coefficients to optimize shoreline delineation. It is particularly effective in complex coastal environments due to its multi-band formulation and enhanced sensitivity to water features:

$$WI2015 = 1.7204 + (171 * Green) + (3 * Red) - (70 * NIR) - (45 * SWIR1) - (71 * SWIR2) \quad (6)$$

These indices were used to produce binary water-land masks from which shoreline positions were extracted using edge-detection methods. A summary of index equations and spectral band usage is presented in Table 1.

Table 1 Equations and References of Spectral Water Indices

Water Index	Equation	References
NDWI	$\frac{Green - NIR}{Green + NIR}$	[8]
MNDWI	$\frac{Green - SWIR1}{Green + SWIR1}$	[9]
AWEInsh	$4 * (Green - SWIR1) - (0.25 * NIR + 2.75 * SWIR2)$	[10]
AWEIsh	$Blue + (2.5 * Green) - (1.5 * (NIR + SWIR1)) - (0.25 * SWIR2)$	[10]
LSWI	$\frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$	[18]
WI2015	$1.7204 + (171 * Green) + (3 * Red) - (70 * NIR) - (45 * SWIR1) - (71 * SWIR2)$	[11]

The accuracy of each extracted shoreline was assessed using a reference shoreline digitized from the Thai nautical chart NC246 (edition 2012). A total of 430 control points were distributed at 90-meter intervals along the reference line. The distance from each index-derived shoreline to the corresponding reference point was computed using the Euclidean distance formula:

$$d_i = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (7)$$

Where d_i represents the Euclidean distance between the estimated and reference shoreline points and (x_1, y_1) , (x_2, y_2) are the coordinates of the extracted and reference shoreline points. Accuracy metrics included the Root Mean Square Error (RMSE) and the Mean Absolute Error (MAE), defined as:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^2} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad (9)$$

These metrics quantify the positional error between the extracted and reference shorelines. The comparative results for all six indices are presented, and the one demonstrating the highest accuracy is selected for subsequent shoreline change analysis.

The index with the lowest RMSE, was selected for shoreline change analysis. Shoreline positions for each of the five years were used to detect temporal changes using DSAS version 5.0 in ArcGIS. A baseline was generated along the 2012 shoreline, and 380 transects were cast perpendicularly at 100-meter intervals.

DSAS computed several key metrics. The Net Shoreline Movement (NSM) measures the linear distance between the oldest and most recent shoreline. The End Point Rate (EPR) divides NSM by the number of years to determine the average annual change rate. The Shoreline Change Envelope (SCE) calculates the maximum variation between any two shorelines at each transect location. Additionally, Weighted Linear Regression (WLR) was applied to detect long-term trends in shoreline movement by fitting a regression line weighted by positional uncertainty over time, following the method described in Song et al. (2023).

To facilitate spatial interpretation, the study area was divided into five zones labeled A through E, progressing from north to south along the coast. The transects and zonal layout used for analysis are shown in Figure 2.

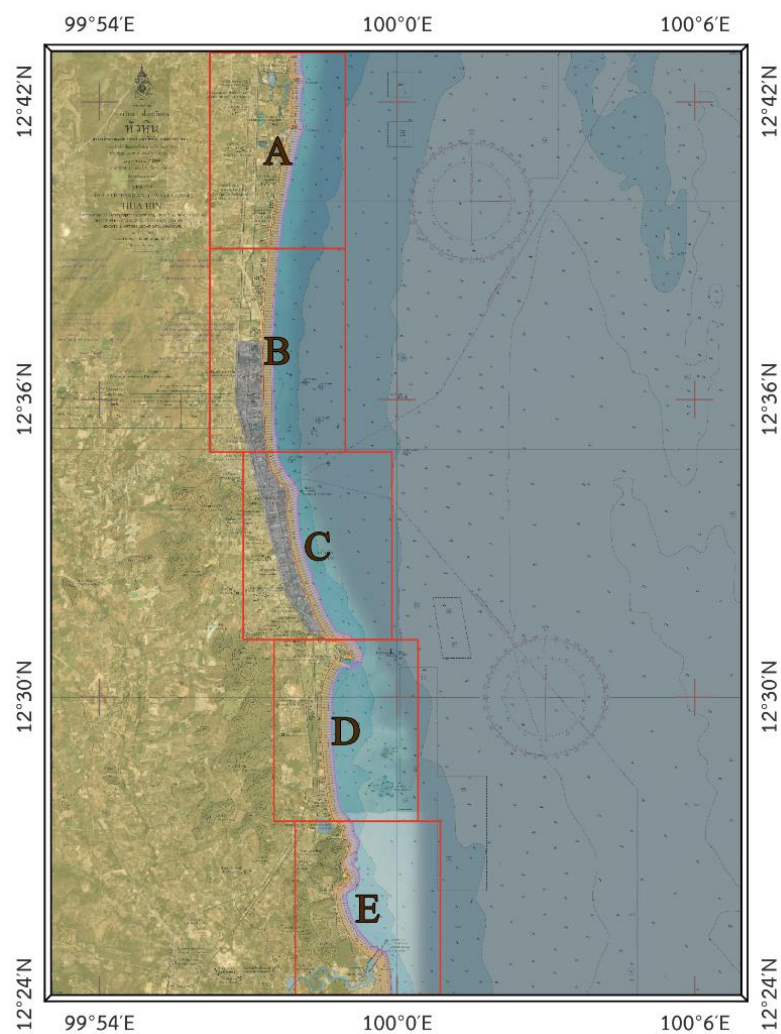


Figure 2 Transect and Zonal Map of Hua Hin Beach [19]

5. Results

The results of this study begin with a visual assessment of the water–land classification capability of each spectral water index. By applying threshold-based methods to Landsat imagery, initial classifications of water and non-water areas were produced to evaluate how effectively each index distinguishes shoreline boundaries prior to quantitative validation.

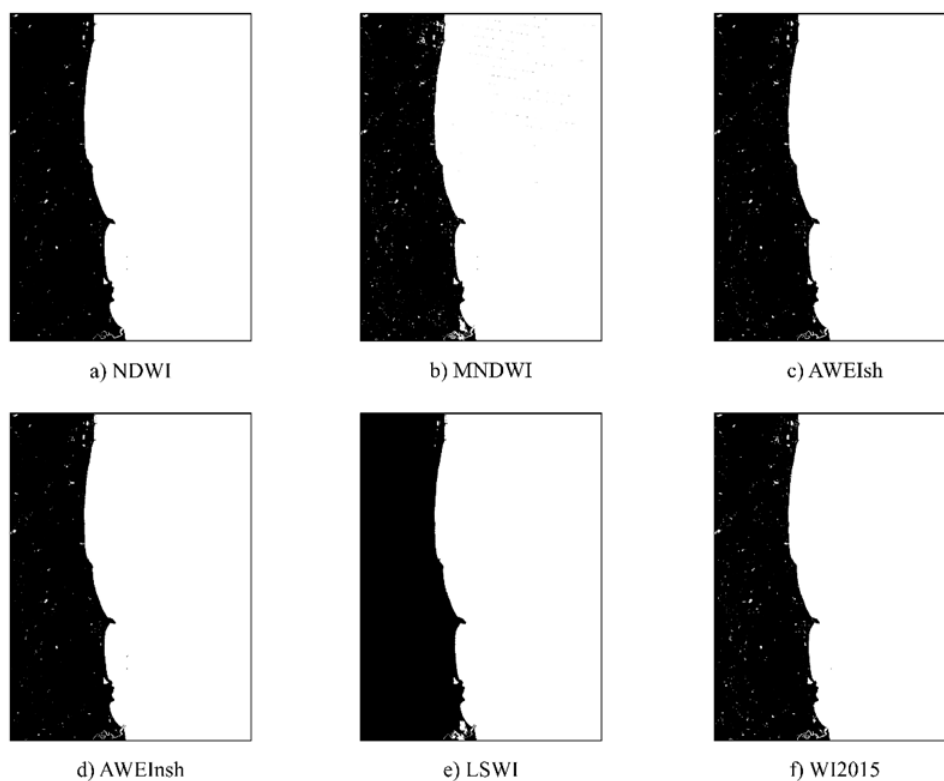


Figure 3 Water Indices Images Classify Pixels into Water and non-water Classes

Figure 3 illustrates the effectiveness of each spectral water index in separating water and land using classified maps generated from NDWI, MNDWI, AWEIsh, AWEInsh, LSWI, and WI2015 applied to the 2012 Landsat imagery. Pixels were categorized into water (white) and non-water (black) classes using threshold-based classification methods.

These classifications were performed within the Google Earth Engine (GEE) environment using the geemap Python API on Google Colab, enabling efficient processing of multi-temporal satellite imagery. The platform facilitated pre-processing steps such as cloud masking, reflectance correction, and index calculation. This allowed for automated classification and rapid visualization of shoreline positions over time.

Accuracy assessments revealed substantial differences among the six water indices. Water Index 2015 (WI2015) showed the highest shoreline extraction accuracy, achieving a Root Mean Square Error (RMSE) of 7.16 meters and the lowest Mean Absolute Error (MAE) among all indices. This performance is attributed to its use of multiple spectral bands, including SWIR, which effectively suppresses background noise from vegetation and built-up areas, as shown in Table 2.

Table 2 Accuracy Assessment of Water Indices

Water Index	Root Mean Square Error (RMSE)	Mean Absolute Error (MAE)
NDWI	23.288	16.497
MNDWI	9.374	14.707
AWEInsh	27.924	23.402
AWEIsh	15.859	13.467
LSWI	26.698	35.699
WI2015	7.156	14.010

Following accuracy validation, WI2015 was selected for multi-temporal shoreline analysis across five image years (2012, 2015, 2018, 2021, and 2024). Using the Digital Shoreline Analysis System (DSAS), a total of 380 transects were created perpendicular to the 2012 baseline at 100-meter intervals. The metrics calculated included End Point Rate (EPR), Net Shoreline Movement (NSM), and Shoreline Change Envelope (SCE) for each transect. The EPR values indicated both erosion and accretion trends along the coastline. Zone A (north) and Zone E (south) showed positive EPR values (0.753 and 0.114 m/year respectively), indicating accretion, while Zone B (central Hua Hin) exhibited the highest erosion, with an EPR of -0.821 m/year, followed by Zone C at -0.413 m/year. Zone D remained relatively stable with minor shoreline fluctuations, as summarized in Table 3 and spatially illustrated in Figure 4.

Table 3 Summary Table of EPR, SCE, NSM by Zone

Zone	EPR (m/year)			SCE (m)			NSM (m)		
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
Zone A	-4.880	6.270	0.753	3.660	75.290	28.806	-58.600	75.290	9.036
Zone B	-7.030	2.680	-0.821	0.470	112.850	22.819	-84.380	32.170	-9.848
Zone C	-6.190	4.450	-0.413	6.880	109.190	34.031	-74.270	53.440	-4.954
Zone D	-2.720	4.080	0.201	1.530	60.940	28.404	-32.690	48.930	2.422
Zone E	-6.980	9.800	0.114	2.160	150.080	28.512	-83.700	117.580	1.361



Figure 4 The Classification of Shoreline Change Based on NSM

Based on the computed Net Shoreline Movement (NSM), the shoreline changes observed along the Hua Hin coastline are categorized into three distinct classes. These categories provide a framework for prioritizing hydrographic re-survey efforts and identifying areas of concern for coastal zone management and nautical chart updates:

5.1 Stable (NSM within ± 10 meters): These shoreline segments show minimal change over 12 years, remaining within the expected uncertainty of medium-resolution satellite imagery. They indicate high shoreline stability, with negligible erosion or accretion, and pose low navigational risk. While no immediate chart updates are needed, continued monitoring is advised. As shown in the figure, these stable areas are represented in green.

5.2 Moderate Change (NSM between ± 10 and ± 50 meters): This range reflects noticeable shoreline movement due to gradual erosion, sediment deposition, or minor anthropogenic influences. Although not immediately hazardous, such changes may affect coastal features over time and warrant closer monitoring. Hydrographic agencies may consider medium-term verification surveys in these zones. These moderately changing areas are indicated in yellow in the figure.

5.3 Significant Change (NSM greater than ± 50 meters): These transects exhibit major shoreline shifts, often driven by severe erosion, rapid accretion, storm events, or large-scale coastal development. Such extensive changes can compromise chart accuracy and create navigational hazards, especially in shallow or previously charted zones. Immediate resurvey and coastal management intervention are recommended. In the figure, these high-change areas are highlighted in red.

NSM values ranged from significant erosion and accretion, with 22 transects (approximately 6% of total) exceeding ± 50 meters of change over the 12-year period. These highly dynamic areas are likely influenced by both anthropogenic factors such as seawall construction, urban expansion, and coastal tourism, as well as natural processes including sediment transport, wave action, and sea level rise. The spatial distribution of shoreline changes is classified and displayed in Figure 5.

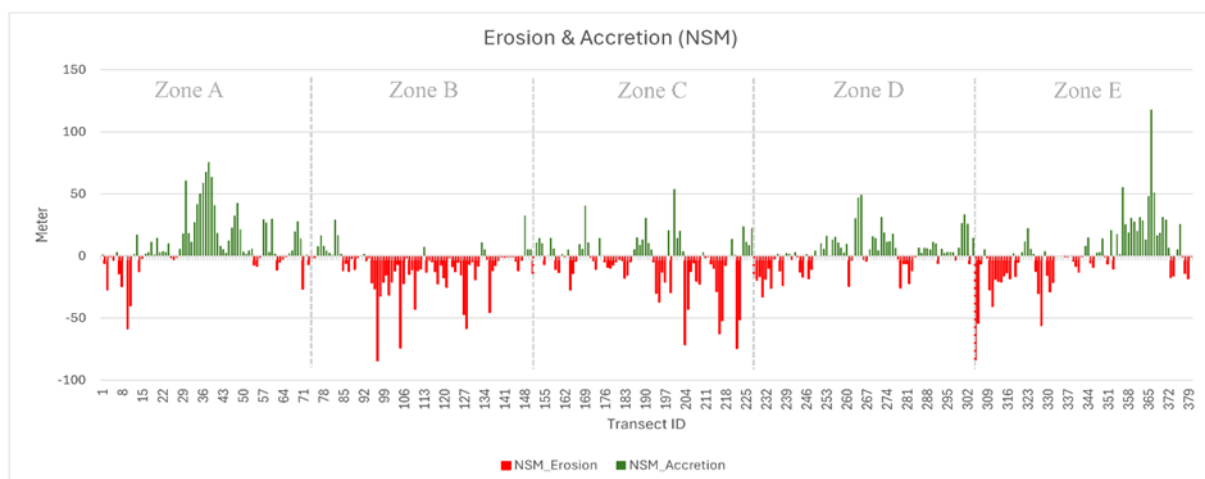


Figure 5 Graph of Erosion & Accretion by NSM Value

To provide a more nuanced understanding of temporal shoreline dynamics, Weighted Linear Regression (WLR) was applied. The WLR results revealed zones with accelerating erosion, particularly in urbanized regions, and progressive accretion in less developed areas. This temporal dimension of shoreline behavior is clearly depicted in Figure 6, which presents WLR trends along representative transects from each zone.

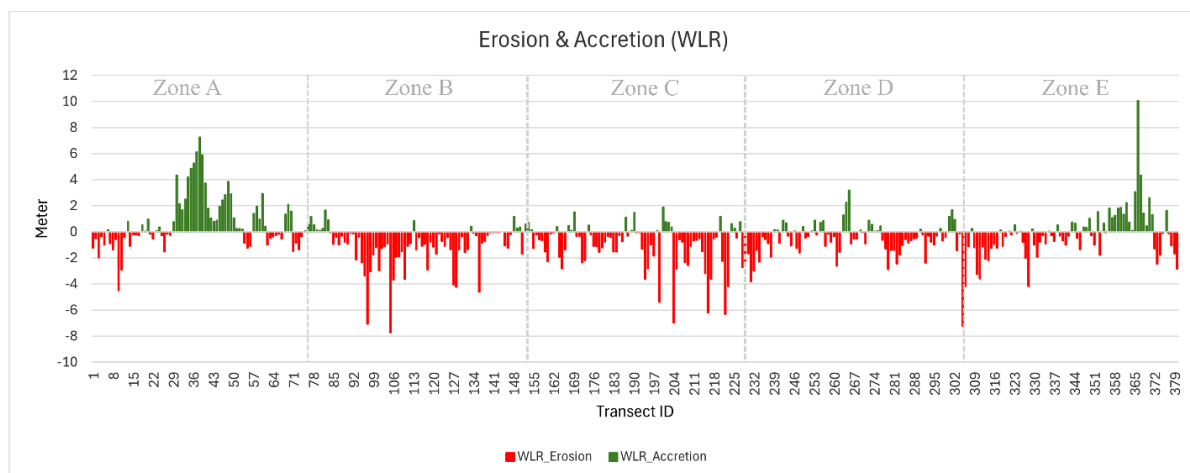


Figure 6 Graph of WLR Trends for Representative Transects

Overall, the integration of WI2015 and DSAS provides an effective methodology for capturing both spatial and temporal shoreline change patterns. The outputs from this section serve as a critical input for determining which areas require hydrographic resurvey and for prioritizing resource allocation in future coastal management plans.

6. Conclusions and Suggestions

This study investigated the effectiveness of satellite-derived water indices and geospatial techniques for shoreline extraction and change detection along Hua Hin Beach, Thailand, from 2012 to 2024. The findings highlight the potential of remote sensing to support hydrographic surveying and nautical chart maintenance in coastal areas experiencing dynamic shoreline processes. Among the six spectral water indices tested, Water Index 2015 (WI2015) demonstrated the highest accuracy, achieving a Root Mean Square Error (RMSE) of 7.16 meters. Its performance was notably superior to traditional indices such as NDWI and MNDWI, due to its multi-band formulation that enhances water–land boundary delineation, even in complex urban or vegetated environments.

The application of the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) to WI2015-extracted shorelines enabled a detailed assessment of spatial and temporal shoreline changes using key metrics including Net Shoreline Movement (NSM), End Point Rate (EPR), and Weighted Linear Regression (WLR). The results revealed clear spatial variability throughout the study area. Zones B and C, particularly within the central urbanized stretch of the coast, exhibited consistent erosion

trends, with several transects experiencing shoreline retreat greater than 50 meters. In contrast, Zones A and E showed accretion, while Zone D remained relatively stable. These patterns are influenced by both natural coastal dynamics and human activities such as infrastructure development and shoreline modification.

From a hydrographic and navigational perspective, the classification of shoreline change based on NSM values provides actionable insights for charting agencies. A total of 22 transects exceeded the ± 50 meter threshold, indicating areas of significant change that no longer conform to the shoreline boundaries depicted in the 2012 Thai nautical chart NC246. These transects should be prioritized for resurvey in accordance with the International Hydrographic Organization (IHO) S-44 standards to ensure accurate chart representation and navigational safety.

It is recommended that future shoreline studies in Thailand and similar coastal environments incorporate W12015 and DSAS as a standard methodological framework. While this study offers a reliable, scalable, and cost-effective workflow, the integration of additional data, such as tidal corrections, high-resolution imagery, and field-verified ground control points, can further enhance shoreline position accuracy. Continued monitoring is essential to support adaptive coastal management, particularly in regions where tourism, infrastructure, and climate-related sea level rise are likely to intensify shoreline dynamics. The approach demonstrated in this study provides a practical contribution to the modernization of hydrographic practices in support of sustainable coastal development.

References

- [1] Gens R. Remote sensing of coastlines: detection, extraction and monitoring. *Int J Remote Sens* [Internet]. 2010;31(7):1819-36. Available from: <https://doi.org/10.1080/01431160902926673>
- [2] Liu X, Ma Y, Li G, Zhao Y. Coastline Evolution of the Yangtze Estuary upon Satellite Remote Sensing Analysis. *Mar Geol Quat Geol* [Internet]. 2014 Mar;33(2):17-24. Available from: <https://doi.org/10.3724/SP.J.1140.2013.02017>
- [3] Nicholls RJ, Cazenave A. Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science* [Internet]. 2010;328:1517-20. Available from: <https://doi.org/10.1126/science.1185782>
- [4] Mentaschi L, Vousdoukas MI, Pekel JF, Voukouvalas E, Feyen L. Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Sci Rep*. 2018;8(1):1-11

-
- [5] International Hydrographic Organization. S-44 Edition 6.1.0, Standards for Hydrographic Surveys [Internet]. Edition 6.1.0. Principauté de Monaco: International Hydrographic Organization; 2022 Sep. Available from: https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44_Edition_6.1.0.pdf
- [6] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens Environ* [Internet]. 2017 Dec 1;202:18-27. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- [7] Xu H. Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *Int J Remote Sens* [Internet]. 2006 Jul;27(14):3025-33. Available from: <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- [8] McFeeters SK. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *Int J Remote Sens* [Internet]. 1996;17:1425-32. Available from: <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- [9] Xu H. Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *Int J Remote Sens* [Internet]. 2006 Jul;27(14):3025-33. Available from: <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- [10] Feyisa GL, Meilby H, Fensholt R, Proud S. Automated Water Extraction Index: A New Technique for Surface Water Mapping Using Landsat Imagery. *Remote Sens Environ* [Internet]. 2014 Jan;140:23-35. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- [11] Fisher A, Flood N, Danaher T. Comparing Landsat Water Index Methods for Automated Water Classification in Eastern Australia. *Remote Sens Environ* [Internet]. 2016 Mar;175:167-82. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.055>
- [12] Bishop-Taylor R, Sagar S, Lymburner L, Alam I. Sub-Pixel Waterline Extraction: Characterising Accuracy and Sensitivity to Indices and Spectra. *Remote Sens* [Internet]. 2019 Dec;11(24):2984. Available from: <https://doi.org/10.3390/rs11242984>
- [13] Himmelstoss EA, Henderson RE, Kratzmann MG, Farris AS. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide. U.S. Geological Survey Open-File Report 2018–1179 [Internet]. Reston, VA: U.S. Geological Survey; 2018. Available from: <https://doi.org/10.3133/ofr20181179>
- [14] Song Y, Shen Y, Xie R, Li J. A DSAS-based study of central shoreline change in Jiangsu over 45 years. *Anthropocene Coasts* [Internet]. 2021 Sep;4(1):115-28. Available from: <https://doi.org/10.1139/anc-2020-0001>

-
- [15] Isha IB, Adib MRM. Application of Geospatial Information System (GIS) using Digital Shoreline Analysis System (DSAS) in Determining Shoreline Changes. IOP Conf Ser Earth Environ Sci [Internet]. 2020;616:012029. Available from: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/616/1/012029>
- [16] Chénier R, Faucher M-A, Ahola R. Satellite-Derived Bathymetry for Improving Canadian Hydrographic Service Charts. ISPRS Int J Geo-Inf [Internet]. 2018;7(8):306. Available from: <https://doi.org/10.3390/ijgi7080306>
- [17] Scaramuzza P, Micijevic E, Chander G. *SLC Gap-Filled Products Phase One Methodology* [Internet]. Landsat Missions; 2019 Aug 2 [cited 2025 Mar 6]. Available from: https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/SLC_Gap_Fill_Methodology.pdf.
- [18] Xiao X, Hollinger D, Aber J, Goltz M, Davidson E, Zhang Q. *Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest*. Remote Sens Environ [Internet]. 2004 [cited 2025 Mar 6];89:519-34. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.008>
- [19] Hydrographic Department of Royal Thai Navy, Thailand. 1:40000 Nautical Chart Number 246 Hua Hin [chart]. Hydrographic Department of Royal Thai Navy; 2012.

การพัฒนาชุดทดลองเซนเซอร์วัดคาบการสั่นของมวลติดสปริงสำหรับห้องปฏิบัติการฟิสิกส์

โรงเรียนนายเรือ

The Development of A Sensor Experimental Set for Measuring the Oscillation

Period of A Mass Attached to A Spring for the Physics Laboratory,

Royal Thai Naval Academy

วีระ บุญผุด^{1*}

Veera Boonphud^{1*}

Received: May 26, 2025

Revised: June 18, 2025

Accepted: June 20, 2025

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดทดลองในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ 1 โรงเรียนนายเรือ เรื่องการเคลื่อนที่แบบสั่นแกว่งอย่างง่ายของมวลติดปลายสปริง (Simple Harmonic Motion, SHM) ให้มีความทันสมัยและมีความแม่นยำสูงในการวัดค่าคาบการสั่นแกว่งโดยใช้เซนเซอร์ งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้อุปกรณ์เซนเซอร์วัดระยะทางแบบอัลตราโซนิกเซนเซอร์โมดูลผ่านการควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้งาน ค่าการวัดเป็นคาบเวลาเฉลี่ย (Average Time) คำนวณหาค่าคงที่สปริง (Spring Constant) แล้วเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างชุดทดลองฯ วิจัยกับค่าคงที่สปริงมาตรฐานของบริษัท PASCO USA.

ผลการวิจัยพบว่าค่าคงที่สปริงของชุดทดลองฯ วิจัยกับค่าค่าคงที่สปริงมาตรฐาน มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียงร้อยละ 2.625

คำสำคัญ: การเคลื่อนที่แบบแกว่ง, คาบเวลาเฉลี่ย, ไมโครคอนโทรลเลอร์

^{1*}อาจารย์ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ กองวิชาฟิสิกส์และเคมี ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ จ.สมุทรปราการ 102701

E-mail: veeraboonthud@gmail.com

Lecturer, Academic Branch, Royal Thai Navy Academy. Department of Physics and Chemistry, Education Branch, Royal Thai Naval Academy, Samutprakan, Thailand 10270

E-mail: veeraboonthud@gmail.com

*Corresponding Author

Abstract

This research aims to develop an experimental setup for Physics Lab 1 at the Naval Academy on Simple Harmonic Motion (SHM) of a mass attached to the end of a spring, making it more modern and highly accurate in measuring the oscillation period using sensors. The research applied an ultrasonic distance sensor module controlled by a microcontroller. The measured value is the average time (Average time) used to calculate the spring constant, and the results are compared with the standard spring constant from PASCO USA.

The research findings indicate that the spring constant of the experimental setup has a deviation of only 2.625% when compared to the standard spring constant.

Keywords: Simple Harmonic Motion, Period Average, Microcontroller.

1. บทนำ

การทดลองวัดคาบเวลาการสั่นแกว่งของมวลติดสปริงเป็นการทดลองพื้นฐานวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ 1 ซึ่งมีความสำคัญในการช่วยเสริมให้นักเรียนเข้าใจหลักการของการเคลื่อนที่แบบสั่นแกว่งในวิชาฟิสิกส์ 1 (ภาคทฤษฎี) การพัฒนาชุดทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสริมสร้างความทันสมัยและเพิ่มความแม่นยำในการวัดค่าคาบการแกว่งโดยชุดทดลองฯ ในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ 1 โดยนำเทคโนโลยีเซนเซอร์ทำการวัดค่าคาบเวลาการสั่นแกว่ง ชุดทดลองนี้ประกอบด้วยชุดสปริงและมวลแขวนที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ และเซนเซอร์วัดค่าคาบเวลาแบบดิจิทัลแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ชุดทดลองได้ออกแบบให้มีขนาดเล็กกะทัดรัดง่ายต่อการประกอบและจัดเก็บ มีเทคโนโลยีการวัดแบบดิจิทัลช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวัดคาบเวลาและยกระดับการเรียนการสอนด้วยเทคโนโลยี ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการออกแบบและพัฒนาชุดทดลองโดยใช้เซนเซอร์วัดค่าคาบเวลาแทนนาฬิกาจับเวลา เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัด ในการวิจัยนี้ได้นำอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบอัลตราโซนิกและประมวลผลระยะทางเป็นคาบเวลาโดยไม่โครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 ที่ความละเอียดในหน่วยมิลลิวินาที แสดงผลผ่านสมาร์ทโฟนหรือคอมพิวเตอร์

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อพัฒนาชุดทดลองทางฟิสิกส์และนำไปใช้ในการวัดค่าคาบเวลาแบบดิจิทัล โดยใช้โปรแกรมควบคุมและแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์ สำหรับห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ของโรงเรียนนายเรือ

2.2 เพื่อศึกษาการเปรียบเทียบค่าคงที่ของสปริงระหว่างชุดทดลองแบบดิจิทัลกับชุดสปริงมาตรฐาน

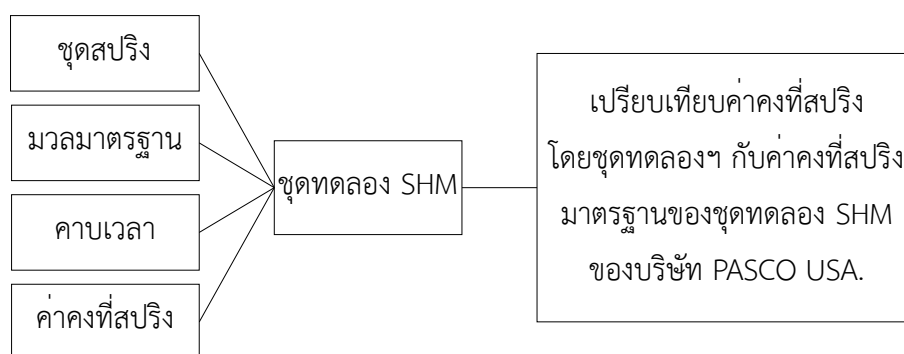
3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้จะหาค่าคงที่สปริง (หรือ "ค่าคงที่สปริง" ที่นิยมใช้สัญลักษณ์ว่า k) โดยการสั่นแกว่งของมวลติดปลายสปริงอย่างง่ายตาม Serway & Jewett [1] $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ โดยที่ T คือ คาบเวลาการสั่นแกว่ง (วินาที, s) และ m คือ มวลที่แขวนปลายสปริง (กิโลกรัม, kg) ในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ 1 โรงเรียนนายเรือ ผู้ทดลองได้ใช้สูตรที่สองคำนวณหาค่าคงที่สปริงโดยวิธีเชิงกราฟ การทดลองใช้นาฬิกาจับเวลาการสั่นแกว่งของมวลติดปลายสปริงจำนวน 25 รอบ แล้วคำนวณหาค่าคาบเวลาเฉลี่ย จากนั้นใช้ค่า T^2 (คาบเวลาเฉลี่ยยกกำลังสอง) เป็นค่าบนแกน y และใช้มวล m ที่แขวนปลายสปริงเป็นค่าบนแกน x เพื่อคำนวณหาค่าคงที่สปริง k จากความชันของกราฟเส้นตรง $Slope = \frac{4\pi^2}{k}$ อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนจากการจับเวลาไม่แม่นยำ ส่งผลให้ค่าคงที่สปริงเกิดความผิดพลาด [2]

ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีมาใช้แทนนาฬิกาจับเวลา เช่น การพัฒนาอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ 1 สำหรับการหาค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกในชุดทดลองเรื่องการแกว่งลูกตุ้มอย่างง่าย โดยใช้อุปกรณ์อินฟราเรดวัดคาบเวลาเฉลี่ยและควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Node MCU ESP8266 ซึ่งแสดงผลบนคอมพิวเตอร์และสมาร์ทโฟน พบว่าผลการวัดมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 4.15 เมื่อเทียบกับค่าแรงโน้มถ่วงของโลกที่วัดในประเทศไทยจากสถาบันมาตรวิทยา กระทรวงวิทยาศาสตร์ [3] นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาชุดทดลองเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่แบบตกอิสระของวัตถุ โดยใช้เซนเซอร์ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 ในการวัดเวลาตกของวัตถุจากความสูงที่ระดับต่าง ๆ กัน ผลการทดสอบพบว่าค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ค่า g) ที่ได้มีความใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน คลาดเคลื่อนเพียงร้อยละ 3.55 [4]

จากการศึกษาข้างต้น ผู้ทดลองจึงมีแนวความคิดในการใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์มาทำการวัดคาบเวลาการสั่นแกว่งในชุดทดลองนี้ เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความถูกต้อง ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 ร่วมกับโปรแกรมที่ควบคุมการทำงานและแสดงผลทางคอมพิวเตอร์ ตามรูปที่ 1

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (1)$$

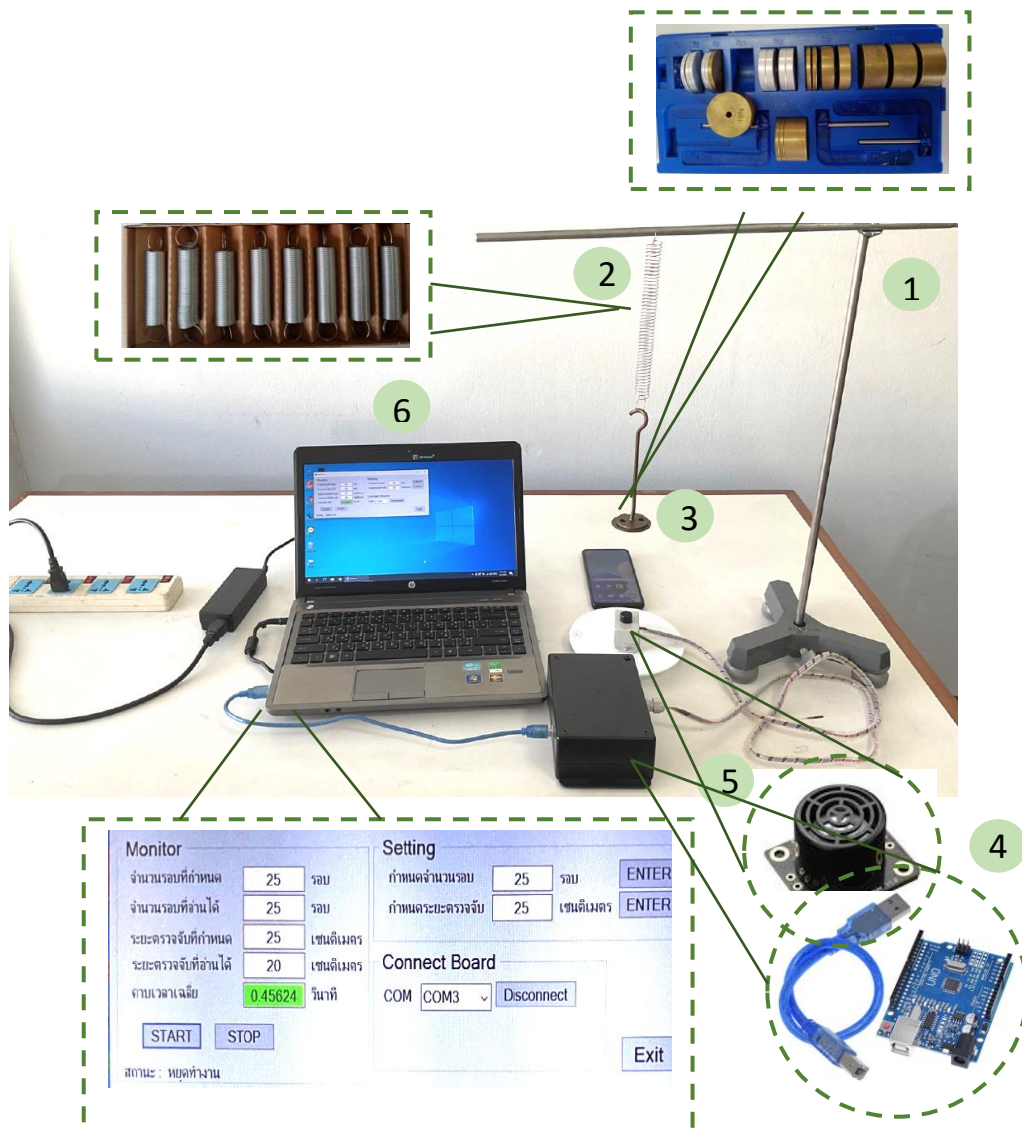


รูปที่ 1 แผนภาพแสดงกรอบแนวคิดในงานวิจัย

4. วิธีการดำเนินการศึกษา

ชุดทดลองประกอบด้วย ชุดวัดคาบเวลาการแกว่งแบบดิจิทัล ชุดมวลติดปลายสปริง ไมโครคอนโทรลเลอร์ บนบอร์ด Arduino Uno R3 และคอมพิวเตอร์ โดยมีลำดับขั้นตอนต่อไปนี้

4.1 อุปกรณ์/เครื่องมือในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 2

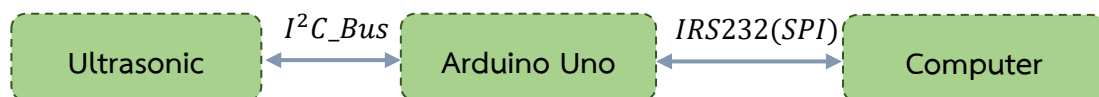


รูปที่ 2 ชุดทดลองวัดคาบเวลาการแกว่งของมวลติดสปริงอย่างง่ายแบบดิจิทัล

1. ชุดประกอบโครงสร้างแขวนสปริง 2. ชุดสปริงมาตรฐานจาก บริษัท PASCO
3. ชุดมวลมาตรฐานจาก บริษัท PASCO 4. Arduino Uno R3 5. Ultrasonic Module URM 13
6. คอมพิวเตอร์

4.2 การออกแบบ

การศึกษาเนื้อหาของการเคลื่อนที่แบบสั่นแกว่ง (Simple Harmonic Motion: SHM) จากตำราเรียน ฟิสิกส์ 1 และบทความที่เกี่ยวข้อง มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดอุปกรณ์การทดลองที่สามารถวัดคาบเวลาของการสั่นแกว่งของมวลที่ติดสปริงได้อย่างมีความแม่นยำสูง เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดจากการใช้การวัดคาบเวลาโดยนาฬิกาจับเวลาแบบเดิม ซึ่งมีความเชื่อถือต่ำ ดังนั้น จึงได้มีการออกแบบระบบการวัดคาบเวลาแบบดิจิทัล ซึ่งกระบวนการในการประดิษฐ์นั้นได้ถูกพัฒนาตามผังอุปกรณ์ที่แสดงดังรูปที่ 2 และดังรูปที่ 4 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 แผนภาพการเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์ในชุดทดลอง

จากรูปที่ 3 ผู้ออกแบบได้เลือกใช้บอร์ด Arduino Uno R3 [5] ตามที่แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งเป็นบอร์ดที่ทันสมัยและได้รับความนิยมในปัจจุบัน เนื่องจากมี Shields ให้เลือกใช้งานหลากหลาย นอกจากนี้ บอร์ดรุ่นนี้ยังรองรับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในไลบรารีต่าง ๆ ได้อย่างสะดวก โดยมีข้อมูลจำเพาะที่สำคัญดังนี้: ชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328 ที่รองรับแรงดัน 5V, พอร์ต Digital I/O จำนวน 14 พอร์ต, พอร์ต Analog Input จำนวน 6 พอร์ต, กระแสไฟฟ้าของแต่ละพอร์ตที่ 40 mA, กระแสไฟฟ้าในพอร์ต 3.3V ที่ 50 mA, พื้นที่โปรแกรมภายใน 32 KB พื้นที่แรม 2 KB พื้นที่หน่วยความจำถาวร 1 KB ความถี่ 16 MHz ขนาด 68.6 x 53.4 mm และน้ำหนัก 25 กรัม

ในงานวิจัยนี้ใช้ URM13 Ultrasonic Sensor ที่มีข้อได้เปรียบกว่ารุ่นอื่นตรงที่รวมหัวภาครับและภาคส่งอยู่ในหัวเดียวกัน เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์หรือบอร์ดพัฒนาได้หลากหลาย มีขนาดเล็กเหมาะสมสำหรับโครงการที่ต้องการความแม่นยำสูงและความยืดหยุ่นในการเชื่อมต่อ เช่น หุ่นยนต์อัตโนมัติ ระบบวัดระยะทางในอุตสาหกรรม และโครงการที่ต้องการการปรับเทียบอัตโนมัติ ความแม่นยำ $\pm 1\%$ และความละเอียด 1 cm เมื่อเทียบกับ Ultrasonic Sensor รุ่นอื่นๆ เช่น รุ่น HC-SR04 Ultrasonic Sensor จะเหมาะสมสำหรับโครงการพื้นฐานที่ไม่ต้องการความแม่นยำสูงมาก เช่น โครงการศึกษาหรือโครงการที่มีงบประมาณจำกัด จะเห็นว่า URM13 Ultrasonic Sensor ตรงกับความต้องการสำหรับชุดทดลองมากกว่ารุ่นอื่นๆ

การทำงานของ URM13 Ultrasonic Sensor ทำหน้าที่วัดระยะระหว่างตำแหน่งมวลแขวนกับพื้น โดยจะเลือกย่านการวัดที่ระยะ 20 - 60 เซนติเมตร ตามที่แสดงดังรูปที่ 5 การทำงานของเซนเซอร์จะเริ่มจากการส่งคลื่นเสียงความถี่ 40 KHz ซึ่งคลื่นที่ปล่อยออกไปจะสะท้อนกับพื้นแล้วสะท้อนกลับมายังตัวรับ ระยะเวลาที่ใช้ในการส่งคลื่นเสียงและสะท้อนกลับมายังตัวรับจะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาค่าระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดและมวลทดลอง จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะแปลงค่าระยะทางไปกลับเป็นคาบเวลา หน่วยวัดเป็นวินาทีและการสื่อสารกับบอร์ด Arduino Uno R3 จะใช้รูปแบบการเชื่อมต่อผ่าน I2C



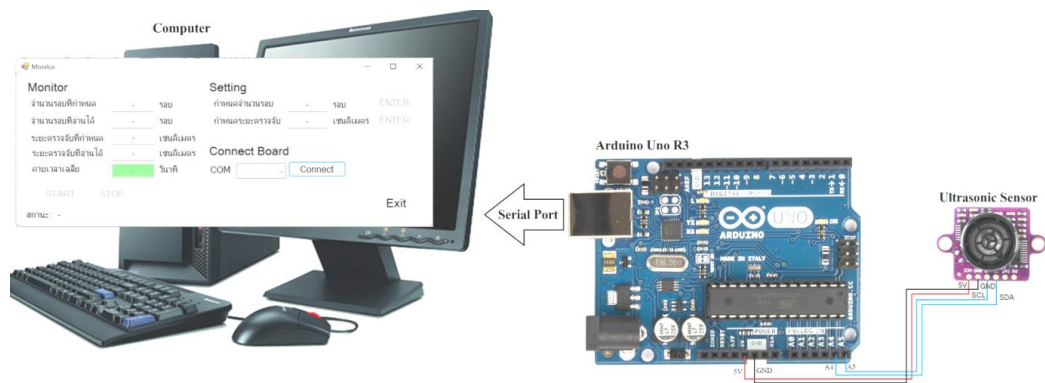
รูปที่ 4 บอร์ด Arduino Uno R3 แบบ Open-source ชิป ATmega328



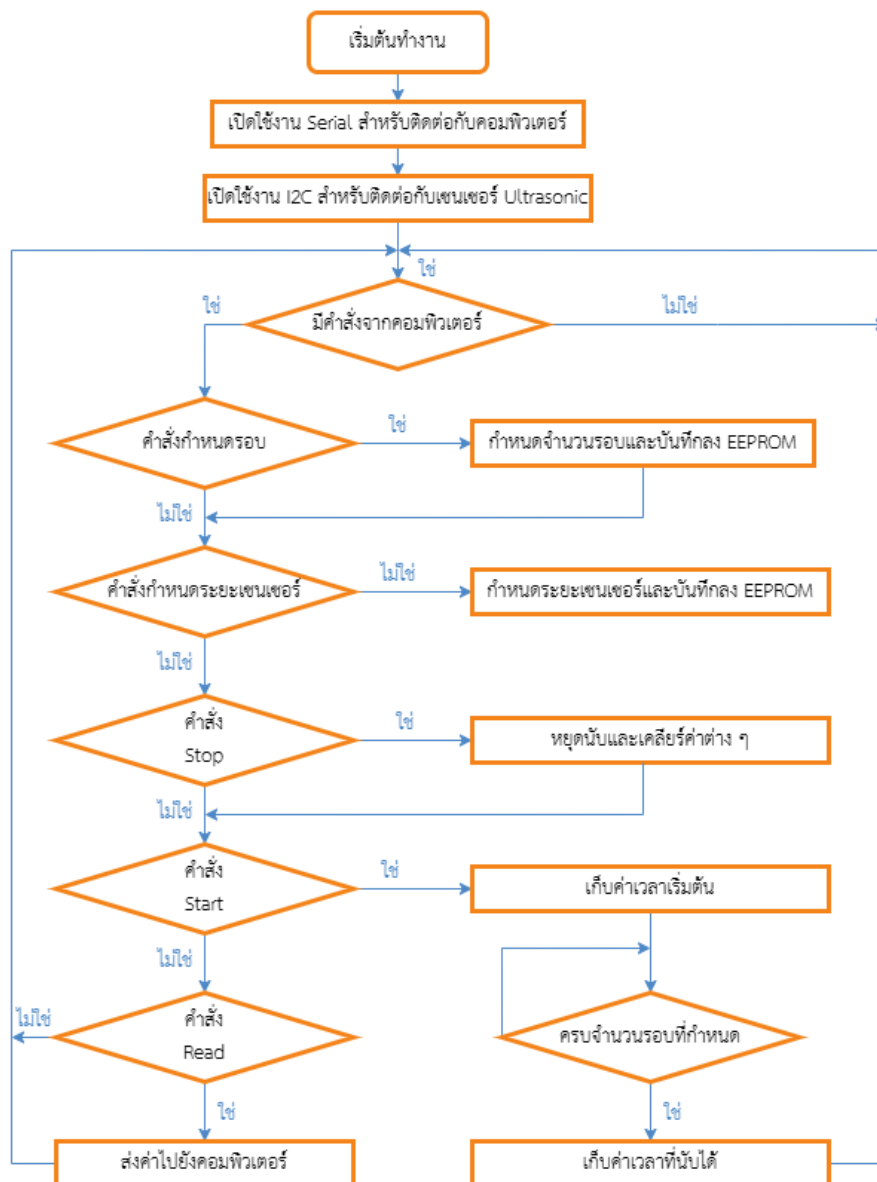
รูปที่ 5 Ultra Sonic Sensor Module URM 13 ขนาด 22 x 20 mm

4.3 ขั้นการประดิษฐ์

ผู้ทดลองได้พัฒนาโปรแกรม C/C++ สำหรับการวัดคาบเวลาการสั่นแกว่งด้วย Arduino Uno R3 โดยโปรแกรมนี้สามารถสร้างไฟล์บนไลบรารีของบอร์ด Arduino และเชื่อมต่อกับ Ultrasonic Sensor ผ่านบัส I2C นอกจากนี้ยังได้พัฒนาไลบรารีคำสั่งย่อย *in_out* สำหรับการติดต่ออินพุตและเอาต์พุตดิจิทัลทางคอมพิวเตอร์ รวมถึงการใช้งานกับ Ultrasonic Sensor โปรแกรมสามารถควบคุมให้อุปกรณ์เลือกตำแหน่งการวัดคาบเวลา ที่ระดับความสูงจากพื้นระหว่าง 20 - 60 เซนติเมตร โดยผู้ใช้งานสามารถกำหนดค่าในการวัดได้จากช่อง *Setting* ซึ่งจะมีการตั้งค่าจำนวนรอบและระดับความสูง เช่น การกำหนดให้วัด 25 รอบที่ระดับความสูง 25 เซนติเมตร ข้อมูลที่ได้จะถูกประมวลผลหาค่าคาบเวลาเฉลี่ยโดยไมโครคอนโทรลเลอร์และแสดงผลทางคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 แผนภาพการออกแบบวัดคาบเวลาการแกว่งมวลติดสปริงอย่างง่ายแบบดิจิทัล

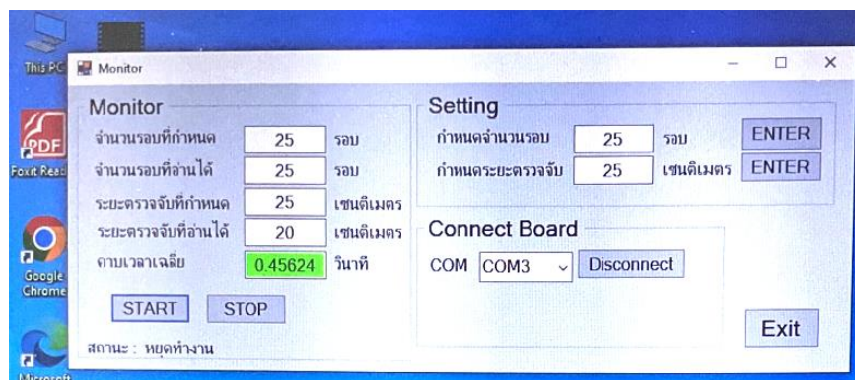


รูปที่ 7 แผนภาพแสดงการทำงานของชุดทดลองเซนเซอร์วัดคาบการสั่นของมวลติดสปริง

4.4 ดำเนินการทดสอบ

วิธีการทดลอง นักเรียนนายเรือจะเริ่มจากสปริงมาตรฐานที่มาพร้อมกับมวลแขวนดังรูปที่ 8 จากนั้นทำการเปิดโปรแกรมและใช้งาน Serial เพื่อเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ และเปิดใช้งาน I2C เพื่อเชื่อมต่อกับเซนเซอร์ จากนั้นเลือกช่องที่เชื่อมต่อในส่วนของ Connected Board และเลือก COM3 เป็นช่องที่ใช้สำหรับการติดต่อกับคอมพิวเตอร์ ขั้นตอนถัดไปคือการเลือกคำสั่งจากคอมพิวเตอร์โดยกำหนดจำนวนรอบการวัดเวลา (ในงานวิจัยนี้เลือก 25 รอบ) และระยะห่างจากพื้น (ในงานวิจัยนี้เลือก 25 เซนติเมตร) เมื่อทุกอย่างพร้อมแล้ว ให้กดคำสั่ง Start เพื่อเริ่มการทดลองและใช้คำสั่ง Stop เมื่อเสร็จสิ้นเพื่อหยุดการทำงานและล้างข้อมูลให้พร้อมเริ่มใหม่ ในกรณีที่มวลทดลองเหมือนกัน จะทำการทดลองซ้ำ 3 รอบ ตามตารางที่ 1 เพื่อหาค่าเวลาเฉลี่ยสำหรับแต่ละมวลทดลองตามสมการที่ 2 แล้วคำนวณหาค่าคาบเวลา จากนั้นคำนวณค่าคงที่สปริงตามสมการที่ 1 แล้วนำผลมาประเมินค่าความแม่นยำเทียบกับค่าคงที่สปริงมาตรฐาน

$$t_{avg} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3} \quad (2)$$



รูปที่ 8 แสดงคำสั่งควบคุมการทดลอง

4.5 หาค่าคงที่สปริงโดยวิธีการกราฟ

" นำข้อมูลจากตารางที่ 1 มาพล็อตกราฟระหว่าง T^2 และ m โดยความชันของกราฟเชิงเส้นความชันของกราฟจะเท่ากับ $(\frac{4\pi^2}{k})$ แล้วคำนวณหา k " [2]

5. ผลการศึกษา

นำค่าคงที่สปริง k ที่ได้จากชุดทดลองการวัดคาบเวลาแบบดิจิทัลและค่าคงที่สปริงแบบนาฬิกาจับเวลาของนักเรียนในปีการศึกษา 2567 มาทำการเปรียบเทียบกับค่าคงที่สปริงมาตรฐานจากบริษัท PASCO (PASCO SE-8749 Spring Set) $k = 8.00 \frac{N}{m}$ ยาว $L = 5.5cm$ และ $\phi = 7mm$ เพื่อหาค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเปรียบเทียบ

5.1 ผลการทดสอบชุดทดลองวัดคาบเวลาและค่าคงที่ของสปริงโดยใช้ชุดทดลองแบบดิจิทัล

การใช้ Ultrasonic Sensor ร่วมกับ Arduino Uno R3 และการแสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์นั้นสามารถนำไปใช้ในการเรียนการสอนในรายวิชาปฏิบัติการทางฟิสิกส์ 1 (PH102) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลการทดสอบที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบชุดอุปกรณ์วัดเวลาและคำนวณค่าคงที่สปริงในการทดสอบการแกว่ง 25 รอบ โดยที่ระดับความสูง 20 เซนติเมตร โดยชุดทดลอง

มวล $m(kg)$	เวลาที่ใช้ในการสั่นของสปริงใน 25 รอบ (s) ที่ความสูง 20 เซนติเมตร			เวลาเฉลี่ย t_{avg}	คาบ $T(s)$	$T^2(s^2)$	$k \left[\frac{N}{m} \right]$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
61.02×10^{-3}	14.025	14.025	14.050	14.033	0.561	0.314	7.67
71.02×10^{-3}	14.850	14.925	15.000	14.925	0.597	0.356	7.87
81.02×10^{-3}	15.825	15.875	15.900	15.867	0.634	0.401	7.97
91.02×10^{-3}	17.500	16.700	16.725	16.975	0.697	0.485	7.41
101.02×10^{-3}	17.650	17.650	17.625	17.641	0.705	0.497	8.02
						$k_{avg} =$	7.79

หมายเหตุ มวลวัตถุที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ (m)

= มวลของจาน ($P = 50 \times 10^{-3} kg$) + มวลที่เพิ่ม $m_A = 10, 20, 30, 40, 50 (\times 10^{-3} kg)$ + มวลสปริง/3

สรุปผลการทดลองที่มวลทดลอง 61.02, 71.02, 81.02, 91.02 และ 101.02 กรัม และคำนวณค่าคงที่สปริงตามสมการที่ 1 ได้เท่ากับ 7.67, 7.87, 7.97, 7.41 และ 8.02 นิวตันต่อเมตร ค่าเฉลี่ยค่าคงที่สปริง $k_{avg} = 7.79 \frac{N}{m}$ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $SD = 0.250$

ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของการทดสอบด้วยเครื่องมือวัดแบบดิจิทัลของชุดทดลอง

มวล $m(kg)$	เวลาที่ใช้ในการสั่นของสปริงใน 25 รอบ (s) ที่ความสูง 20 เซนติเมตร			$(\bar{x})$	(SD)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
61.02×10^{-3}	14.025	14.025	14.050	14.033	0.014
71.02×10^{-3}	14.850	14.925	15.000	14.925	0.075
81.02×10^{-3}	15.825	15.875	15.900	15.867	0.038

ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของการทดสอบด้วยเครื่องมือวัดแบบดิจิทัลของชุดทดลอง (ต่อ)

มวล $m(kg)$	เวลาที่ใช้ในการสั่นของสปริงใน 25 รอบ (s) ที่ความสูง 20 เซนติเมตร			$(\bar{x})$	(SD)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
91.02×10^{-3}	17.500	16.700	16.725	16.975	0.454
101.02×10^{-3}	17.650	17.650	17.625	17.641	0.014

5.2 ผลการทดลองวัดด้วยนาฬิกาจับเวลาโดยนักเรียนนายเรือในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ 1

โดยการนำผลการทดลองของนักเรียนนายเรือชั้นปีที่ 1 จำนวน 3 กลุ่ม กลุ่มละ 6 นาย มาประกอบการคำนวณ โดยแต่ละกลุ่มจะทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้ง เลือกตัดค่าสูงสุดและต่ำสุดทิ้ง นำค่ากลาง 3 ครั้ง มาหาค่าเฉลี่ยเวลาของแต่ละกลุ่มทดลองและแต่ละมวลทดลอง ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบนาฬิกาวัดค่าเวลาเฉลี่ยและคำนวณค่าคงที่สปริงในการทดสอบการแกว่ง 25 รอบ โดยที่ระดับความสูง 20 เซนติเมตร โดยนาฬิกาจับเวลาในห้องเรียนปฏิบัติการฟิสิกส์ 1 [3]

มวล $m(kg)$	เวลาที่ใช้ในการสั่นของสปริงใน 25 รอบ (s) ที่ความสูง 20 เซนติเมตร			เวลาเฉลี่ย t_{avg}	คาบ $T(s)$	$T^2(s^2)$	$k \left[\frac{N}{m} \right]$
	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2	กลุ่มที่ 3				
61.02×10^{-3}	15.024	15.023	15.027	15.025	0.601	0.361	6.67
71.02×10^{-3}	15.239	15.365	15.296	15.301	0.612	0.375	7.47
81.02×10^{-3}	16.210	16.151	15.716	16.025	0.641	0.410	7.80
91.02×10^{-3}	17.520	18.554	18.528	18.200	0.728	0.529	6.73
101.02×10^{-3}	18.253	18.650	18.821	18.575	0.763	0.582	6.85
						$k_{avg} =$	7.10

หมายเหตุ มวลวัตถุที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ (m)

= มวลของจาน ($P = 50 \times 10^{-3} kg$) + มวลที่เพิ่ม $m_A = 10, 20, 30, 40, 50 (\times 10^{-3} kg)$ + มวลสปริง/3

สรุปผลการทดลองที่มีมวลทดลอง 61.02, 71.02, 81.02, 91.02 และ 101.02 กรัม และคำนวณค่าคงที่สปริงตามสมการที่ 1 ได้เท่ากับ 6.67, 7.47, 7.80, 6.73 และ 6.85 นิวตันต่อเมตร ค่าเฉลี่ยค่าคงที่สปริง $k_{avg} = 7.10 \frac{N}{m}$ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $SD = 0.502$

ตารางที่ 4 แสดงค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของการทดสอบด้วยนาฬิกาวัดเวลา

มวล $m(kg)$	เวลาที่ใช้ในการสั่นของสปริงใน 25 รอบ (s) ที่ความสูง 20 เซนติเมตร			$(\bar{x})$	(SD)
	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2	กลุ่มที่ 3		
61.02×10^{-3}	15.024	15.023	15.027	15.025	0.002
71.02×10^{-3}	15.239	15.365	15.296	15.301	0.063
81.02×10^{-3}	16.210	16.151	15.716	16.041	0.244
91.02×10^{-3}	17.520	18.554	18.528	18.200	0.589
101.02×10^{-3}	18.253	18.650	18.821	18.574	0.291

5.3 ผลการทดสอบหาค่าคงที่โดยวิธีกราฟเส้นตรง

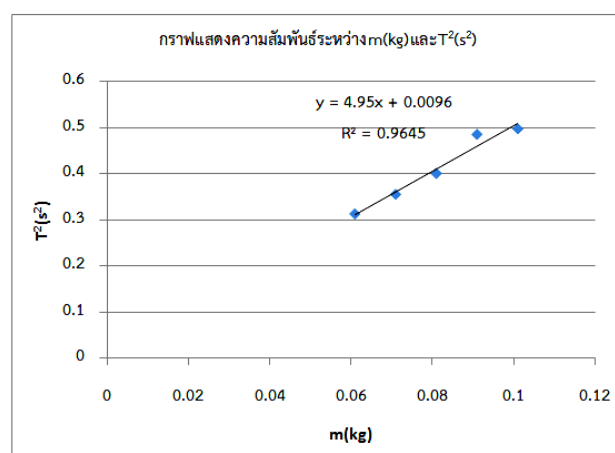
ในการวิเคราะห์หาค่าคงที่ของสปริงจากสมการของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายตามสมการที่ 1 โดยจัดรูปแบบสมการในลักษณะสมการเชิงเส้นโดยกำหนดให้แกนนอนเป็นค่าคาบเวลากำลังสอง T^2 และแกนตั้งเป็นค่ามวลรวม m มีค่าคงที่ $(\frac{4\pi^2}{k})$ เป็นความชันของสมการ

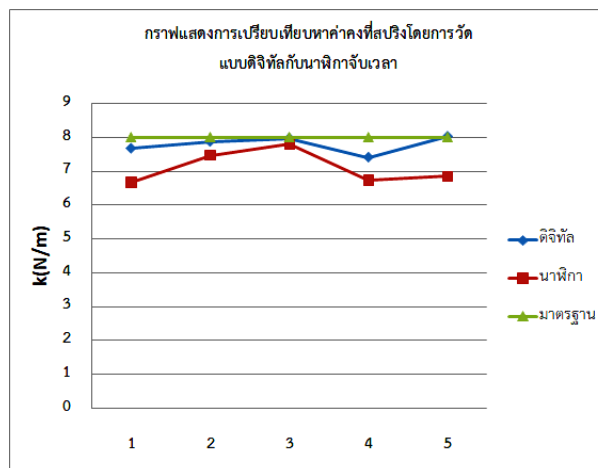
$$T^2 = \frac{4\pi^2}{k} m \quad (3)$$

นำผลการทดสอบจากตารางที่ 1 มาพล็อตกราฟเส้นตรง ตามรูปที่ 9 แล้วหาค่าความชันกราฟ *Slope* โดยมีค่าความชันเท่ากับ 4.95

$$Slope = 4.95 \quad (4)$$

วิเคราะห์หาค่าคงที่สปริงระหว่างความชันตามสมการที่ (3) เท่ากับความชันจากกราฟตามสมการที่ (4) $\frac{4\pi^2}{k} = 4.95$ จะได้ค่าคงที่สปริงเป็น 7.97 นิวตันต่อเมตร ($k_{graph} = 7.97 \frac{N}{m}$)

รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคาบกำลังสอง T^2 กับมวลทดลองแขวน m



รูปที่ 10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าคงที่สปริงโดยการวัดแบบดิจิทัลกับนาฬิกาจับเวลา

6. สรุปและอภิปรายผล/ข้อเสนอแนะ

6.1 ค่าคงที่สปริงที่ได้จากชุดทดลองนี้เท่ากับ 7.79 นิวตัน/เมตร โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคงที่สปริงมาตรฐานมีร้อยละความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.625

6.2 ค่าคงที่สปริงที่ได้จากกลุ่มทดลองในห้องเรียน ด้วยวิธีนาฬิกาจับเวลาเท่ากับ 7.10 นิวตัน/เมตร โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคงที่สปริงมาตรฐานมีร้อยละความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 11.25

6.3 ค่าคงที่สปริงที่ได้จากชุดทดลองวิเคราะห์โดยวิธีทางกราฟเท่ากับ 7.97 นิวตัน/เมตร โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคงที่สปริงมาตรฐานมีร้อยละความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.375

6.4 ในการออกแบบและสร้างชุดทดลองเรื่องชุดทดลองเซนเซอร์วัดคาบการสั่นของมวลติดสปริงสำหรับห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ โรงเรียนนายเรือในรายวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ 1 (PH102) ทำให้ได้ชุดทดลองที่ใช้งานง่าย มีราคาถูกลงและสามารถใช้ในการหาค่าคงที่สปริงได้โดยเมื่อพิจารณาหาค่าคงที่สปริงจากชุดทดลองนี้ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับหาค่าคงที่ของสปริงมาตรฐานพบว่ามีความคลาดเคลื่อน 2.625% แสดงว่านักเรียนนายเรือ (นร.) สามารถใช้ชุดทดลองนี้เพื่อศึกษาคาบเวลาการสั่นแกว่งและค่าคงที่ของสปริงได้

6.5 ชุดทดลองนี้นำมาใช้ในวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ 1 (PH102) ได้ โดย นร.มีความพึงพอใจต่อชุดทดลองนี้ในด้านลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ชุดทดลองมีความเหมาะสมต่อการใช้งาน ชุดทดลองติดตั้งง่าย ชุดทดลองมีขนาดเล็ก วัสดุที่นำมาสร้างชุดทดลองหาได้ง่าย ราคาถูก และชุดทดลองนี้สามารถใช้หาคาบเวลาการสั่นแกว่งและค่าคงที่ของสปริงได้

6.6 ข้อควรระวังในการทดลองนี้ ระยะห่างของเซนเซอร์กับมวลสปริงไม่ควรเกิน 60 เซนติเมตร เนื่องจากการแกว่งของมวลอาจทำให้ไม่อยู่ในแนวตั้งตรงกับเซนเซอร์วัด ส่งผลให้การสะท้อนของเสียงเบนออกจากแนวเซนเซอร์ตัวรับ นอกจากนี้ ควรหลีกเลี่ยงการทดลองในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เนื่องจากอุณหภูมิส่งผลต่อความเร็วเสียง

6.7 ควรมีการพัฒนาโปรแกรมจัดเก็บและบันทึกผลต่อยอดในรูปแบบฐานข้อมูล เพื่อสามารถสืบค้นข้อมูลย้อนหลังได้ ทั้งในรูปแบบตารางและกราฟ ซึ่งจะเป็ประโยชน์ในการดำเนินการทดลองต่อไปในกรณีที่การทดลองยังไม่แล้วเสร็จ

6.8 ควรเลือกใช้ Arduino รุ่นใหม่ เช่น ESP32 แทน Arduino UNO R3 จะลดความคลาดเคลื่อนของค่าคาบเวลาและค่าคงที่สปริงลงได้ เนื่องจาก Arduino Uno R3 ที่นำมาใช้มีราคาถูกและเป็นรุ่นฝึกหัดทำให้การแปลงค่าสัญญาณคลืนกับ URM13 Ultrasonic Sensor มีความคลาดเคลื่อน [7]

เอกสารอ้างอิง

- [1] เซอร์เวย์ อาร์เอ, จูเวท เจดับเบิลยู จูเนียร์, ฟิสิกส์ 1 [Physic for scientists and engineers]. กรุงเทพฯ: เซนเกจ เลินนิง อินโด-ไชน่า; 2561.
- [2] วีระ บุญผุด. การทดลองการสั่นแกว่งของมวลติดสปริงอย่างง่าย. In: คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ 1. สมุทรปราการ: โรงเรียนนายเรือ; 2559. 173-76.
- [3] ภาณุกร วัฒนจ้ง, วีระ บุญผุด. การออกแบบและพัฒนาชุดอุปกรณ์วัดคาบเวลาและความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลกประกอบชุดทดลองการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย. วารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือดำนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2565; 5(1):93-104.
- [4] สมพร บัวประทุม. ชุดทดลองการวัดค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อย่างง่าย ตัวตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นเอง และสมาร์ทโฟน. วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้ (JSTEL) 2562; 10(2):288-299.
- [5] นพ มหิษานนท์. ARDUINO IoT PROJECTS. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: CORE FUNCTION; 2565. [6] นพ มหิษานนท์. ARDUINO SMART HOME PROJECTS. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: CORE FUNCTION; 2563.
- [7] ภาสกร พาเจริญ. พัฒนา IoT บนแพลตฟอร์มARDUINO ด้วย ESP32. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: Provision; 2565.

An Optimal Solution for Locating Tide Station Locations in Historic Bay of Thailand by Using Location Allocation Models (P – median)

สันหนัฐ อีสมาแอล^{1*}

Sanhanat Itsama-ael^{1*}

Received: April 18, 2025

Revised: June 6, 2025

Accepted: June 20, 2025

Abstract

The aim of this study is to utilize a location allocation model (P-median) to determine the optimal locations for tide stations in the Historic Bay of Thailand, based on three factors: variation in tide elevation, the number of ports, and population density. Two scenarios were considered: (1) adding new tide stations while retaining all existing ones; and (2) not retaining the existing tide stations but instead rearranging and adding new stations. The results indicated that the second scenario—rearranging the tide stations and adding new ones without retaining the existing stations—provides a more optimal long-term solution in terms of budget efficiency and coverage. This study can serve as a guideline for hydrographic offices to adopt when planning the construction of tide stations.

Keywords: Location Allocation Model, P-median, Tide Stations, GIS

^{1*}อาจารย์ ฝศษ.รร.นร.

Lecturer, Academic Branch, Royal Thai Navy Academy. Department of Hydrographic Engineering, Education Branch, Royal Thai Naval Academy, Samutprakan, Thailand 10270

E-Mail: sanhanat@buffalo.edu, mee_sanhanat52@hotmail.com

*Corresponding Author

1. Introduction

Tides are the phenomenon that the body of water rises and falls due to gravitational interactions between Sun, Moon, and Earth [1]. Tide is a crucial factor that mariners and coastal residents must consider. For mariners, without adequate and accurate tidal information, a ship can get ground due to sailing to a shallow area during low tide periods. Hence, navigation and tidal information is not separable. Moreover, people who live along shorelines are also relying on tide information since several activities must be related to the sea, so lacking this information can lead to undesirable outcome especially for fishery, tourism business, and hydrographic survey.

As tide information is necessary, tide stations are constructed along shorelines to measure and predict tides see figure 1. Based on the tide station location standard, tide stations are required every 10 nautical miles along the shoreline (18,520 kms.) to derive adequate and accurate tide information [2]. However, it is crucial to note that tide stations cannot be set up arbitrarily. It is necessary to ensure that a tide gauge pressure sensor should not dry out, so a tide station location should be chosen ports or other offshore constructions [2].

Since Historic Bay of Thailand is one of Thailand's most significant marine regions, because there are numerous ports and marine communities as well as tourist destinations, but there are only 9 existing tide stations along the coastline as shown in figure 2 that do not cover all areas based on the standard of International Hydrographic Organization (IHO).

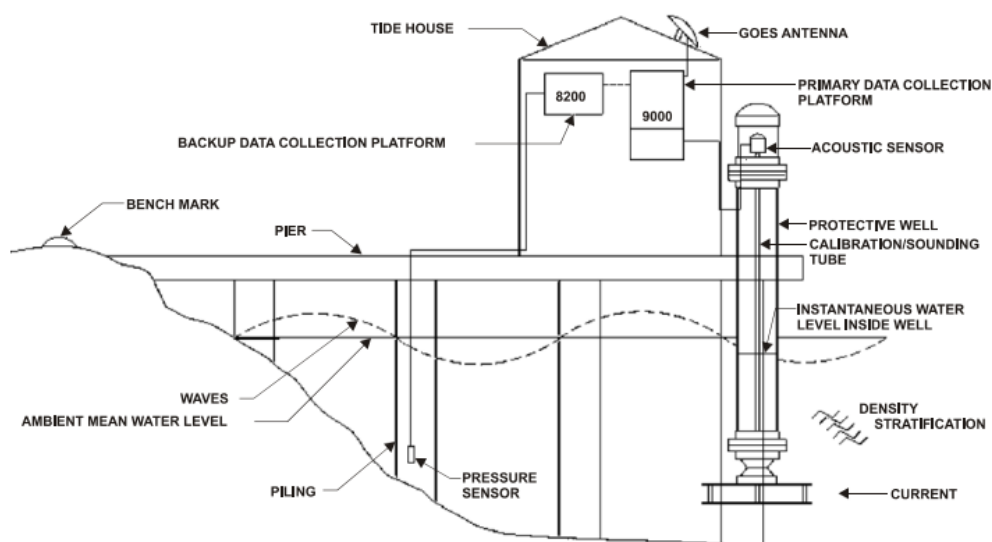


Figure 1 Water Level Measurement System [1]

The above-mentioned problem can be addressed by employing the fundamental of a location-allocation model, especially the P – median models. The P– median method can provide a solution to this issue while also taking into consideration the characteristics of each demand point. The P -median method aims to “locate a multiple number of facilities and allocation the demand served by these facilities so that the service is as efficient as possible” [3].

P – median model has been utilized in various cases to locate facilities or services to meet demands. For instance, it has been applied in locating bicycle-sharing programs and air pollution monitoring network [4]. Therefore, the P – median model is deemed suitable for finding optimal solution for locating facility to meet demands. However, no study has utilized P – median model to arrange tide station locations before. Hence, it is intriguing to apply the P – median model in this study.

Given the identified problem and the capabilities of the P-median model, this study aims to utilize the P-median model to determine optimal tide station locations that fully cover the Historic Bay of Thailand. Two scenarios are considered: (1) adding new tide stations while retaining all existing ones; and (2) not retaining the existing tide stations but instead rearranging and adding new ones. The goal is to determine the best solution based on spatial coverage and financial considerations.

2. Literature Review

Tide stations play a crucial role in various aspects. Undoubtably, tide information is directly associated with navigation safety in the water, as depth values indicated on a nautical chart must be adjusted with tide elevations to determine the actual depth. For example, the Thai nautical chart number 112 employs the lowest low water as the vertical reference, as depicted in figure 3 [5]. The lowest low water value is derived from the minimum tide elevations in a tide cycle.

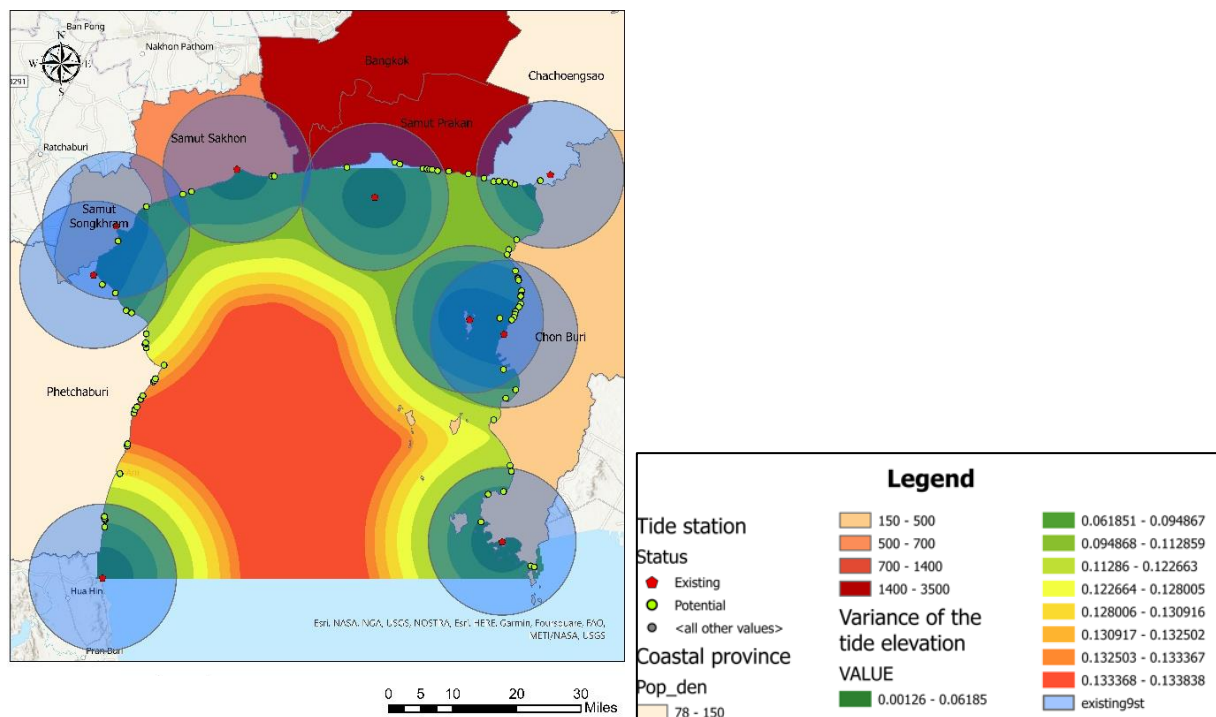


Figure 2 Existing Tide Stations and Potential Locations for Being Tide Stations in Historic Bay of Thailand

That takes 18.6 years [2], signifying the necessity of a tide station to establish the vertical reference for creating such maps. Furthermore, consider a scenario where a ship with a 7-meter draft is navigating to an area within the red circle, indicating a depth of 5.4-meter from the lowest low water. If the tide elevation value from the tide table is 2 meters, the sailor may believe the depth to be $5.4 + 2 = 7.4$ meters, as shown in figure 3. However, if the tide station used to generate the tide table is located more than 10 nautical miles away from this area, the actual tide elevation may be only 1 meter. Consequently, the real depth in this area is only 6.4-meters. This discrepancy highlights the importance of accurate tide information for navigation safety, as an error in such information could lead to a ship running aground. This example vividly illustrates the critical role of tide information in ensuring the safety of navigation.



Figure 3 Water Depth in Entrance to Chao Phraya River [5]

Not only are tide stations essential for seafarers, but they are also crucial for hydrographers. As is widely known, all surveys must refer to a horizontal reference (datum WGS-84) and vertical reference (Mean Sea Level). Similarly, Hydrographic Department of Royal Thai Navy (HDRTN) utilizes the lowest low water as vertical reference for creating nautical charts (HDRTN). Therefore, it is imperative to have a tide station in the survey area, and if not available, temporal tide station must be set up [2]. Figure 2 illustrates that there are substantial areas not covered by existing tide stations in the study area, particularly in the west. Consequently, if the HDRTN needs to resurvey a chart on the western side of the study area, numerous temporal tide stations would need to be established, making hydrographic survey missions more challenging. Hence, strategically distributing tide stations is more advantageous.

Furthermore, tides and currents are interconnected, and current plays a crucial role in various activities such as diving, water sport, and fishery. As depicted in figure 4, the water current symbol (in the red circle) indicates that during a flood tide, the water current flows eastward at 1.1 knots, and the water current flows westward at 0.5 knots during an ebb tide. This information is significant for divers, as diving in strong currents is generally undesirable. Similarly, tourists may not enjoy water sports when the current is too strong. Therefore, tide stations serve as a source of tide information that supports various activities. Inadequate and inaccurate tide information might impact on the examples above, leading to unexpected incidents.



Figure 4 Water Current in Entrance to Chao Phraya River [5]

3. Study Area and Data

3.1 Study area

Historic Bay of Thailand is located inside the Gulf of Thailand covers 7 provinces: Bangkok, Phetchaburi, Samut Prakan, Samut Sakhon, Samut Songkhram, Chon Buri, and Chachoengsao. As depicted in figure 5, the areas with high population density are in the northern and eastern parts of the study area. Currently, there are 9 tide stations belonging to Hydrographic Department of Royal Thai Navy (HDRTN) and Marine Department of Thailand (MDT), as presented in figure 2. In the study area, 75 locations are potentially suitable for setting up tide stations, based on the criteria from the IHO. The Historic Bay of Thailand is vital for Thai economy due to the presence of major ports on the eastern side, such as Leam Chabang Port, Chuk Samet Pier, and Sattahip Naval Base, as shown in figure 5. Additionally, many locations in this area are popular tourist attractions, including Si Chang Island, Lan Island, Cha – am beach, and Pattaya City as illustrated in figure 5. Therefore, the Historic Bay of Thailand is one of the essential marine regions in Thailand, but existing tide stations do not cover all coastlines.

3.2 Data

Most of the information is derived from HDRTN and MDT. Firstly, locations and lowest low water from mean sea level values of existing tide stations were supported by HDRTN and

MDT through the Thai tide table. Also, population of each province was sourced from the Bureau of Registration Administration of Thailand [6] as shown in table 1. Regarding the number of ports for each province, this information was obtained from MDT in 2025, as present in table 1 [7]. Finally, Thai nautical chart number 001 and 112 were provided by HDRTN as background information in this project in ArcGIS Pro [5].



Figure 5 Overall Information in the Historic Bay of Thailand [5]

Table 1 Basic Information of each Province in the Study Area

Provinces	Areas (km ²)	Population	Population Density (person/km ²)	Port Number
Bangkok	1,571.371	5,349,004	3,404	28
Chachoengsao	5,165.910	729,140	141	18
Chon Buri	4,504.764	1,613,119	358	24
Phetchaburi	6,183.001	479,448	78	9
Samut Prakan	949.001	1,365,595	1,439	42
Samut Sakhon	856.876	567,024	662	12
Samut Songkhram	414.391	185,095	447	5

4. Methods

4.1 Pre-processes

Overall, the method of this study can be divided into 3 main processes. The first one is to preprocess the raw data to comply with the requirement of functions in R. Then, R function was used to compute P – median with different scenarios. After that, ArcGIS Pro was used to visualize the results from R and discuss the results.

After deriving 9 locations of existing tide stations from the Thai Tide Table, those locations were plotted in ArcGIS Pro with the coordinate system as WGS 84 UTM Zone 47 N, as shown in figure 2. Then, 75 potential locations for setting tide stations were selected with conditions that a tide station location should be constructed besides ports or any offshore constructions because a tide gauge pressure sensor should not dry out [2]. Hence, all ports and offshore constructions in the study area were chosen to be potential tide-station locations. Next, attribute information was input, including province name, area, population, population density, port number, and variance of tide elevation. Finally, the potential and existing tide station locations were exported in both CSV and shapefile formats to be use in R for P – median models.

4.2 Methods

After the raw data was preprocessed to comply with functions in R, P–median functions in R were used to analyze 2 scenarios to derive an optimal solution.

First of all, P – median method was implemented in this study for locating a multiple number of tide stations and allocating the demand served by these tide stations so that the service is as efficient as possible based on equation (1), (2), (3), (4), and (5). Where i and j is indices used to refer to a potential tide station location, x_{ij} is 1 if demand at i assigns to tide station at j and is 0 otherwise, x_{jj} is 1 if a tide station is sited at site j and serves demand at j and is 0 otherwise, p = the number of tide stations that are to be located [3].

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \text{ for each } i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jj} = p \quad (3)$$

$$x_{ij} \leq x_{jj} \text{ for each } i \text{ and } j \text{ where } i \neq j \quad (4)$$

$$x_{ij} = 0, 1 \text{ for each } i \text{ and } j \quad (5)$$

After that, there were 2 main scenarios implemented in the P – median method for this study. Firstly, P – median with using the combination of population density, the number of ports, and variation of tide elevation as weight, so the weight was created by using equation (6) as the variation of tide elevation is affected to the safety of navigation and marine activities more directly, so its weight was higher than others. However, it would be more suitable to use statistical or mathematical methods to indicate weight for each factor in future research. The variation of tide elevation was computed by interpolating the differences between lowest low water and mean sea level for each demand with kriging interpolation. Secondly, P – median with weight as the equation (6), but not forcing existing tide stations was analyzed after that. With these 2 cases, it could be compared between keeping existing tide stations and not keeping them, which one required a minimal number of tide stations in the system. After obtaining the result from R, such results were visualized by ArcGIS Pro for discussion.

$$W_{ij} = \text{Population density}_{ij} + \text{The number of ports}_{ij} + 2 * \text{Variation of tide elevation}_{ij} \quad (6)$$

In terms of coverage of each tide station, although the standard of hydrographic survey mentioned that each tide station can cover area not more than 10 nautical miles [2], the coverage varies depending on local characteristics, especially variation of tide elevation. As such, the radius of each station was computed based on the geometric interval classification with 10 classes from the variance of tide elevation. Thus, an area that has a high variance of tide elevation has a shorter radius of coverage than a low variance area as shown in Table 2. Geometric interval classification is a data classification method commonly used in cartography and geographic information systems (GIS). It is designed to group numeric data into classes (intervals) based on a geometric progression. Therefore, the geometric interval classification function on ArcGIS-Pro software was used to classify variance values in this research.

Table 2 Criteria for the Radius of each Tide Station

Color	Variance	Radius
	≤ 0.055291	10 Nm
	≤ 0.087424	9 Nm
	≤ 0.106534	8 Nm
	≤ 0.117899	7 Nm
	≤ 0.124658	6 Nm
	≤ 0.128677	5 Nm
	≤ 0.131068	4 Nm
	≤ 0.132489	3 Nm
	≤ 0.133335	2 Nm
	≤ 0.133838	1 Nm

After obtaining the results, construction cost and operating cost were used to estimate which solution is the most suitable in terms of financial aspect in the long run.

5. Result and Discussion

Since the objective of this study is to use P -median methods to achieve a fully coverage of the locations of the tide stations in the Historic Bay of Thailand, the first scenario is with $p = 17$ with weight as equation (6) and forcing 9 existing tide stations, as shown in figure 6. From the result, it shows that 4 more new tide stations are added on the western side of the study area to cover all shorelines on the west. This is reasonable as this area shows higher variation in tide elevation. However, there is a small gap in Phetchaburi province.

In the meantime, another 3 new tide stations are added in the north-east of the study area as this area has high population density as well as port numbers. Finally, a new tide station is added to fill the gap in the east, where this area is moderately varied in tide elevation.

The second scenario is $P = 15$ with weight as equation (6) but not forcing existing tide station as shown in figure 7. The result shows that only 15 tide stations are required to cover all shorelines in the study area. However, no existing tide station is selected in this case.

As can be seen from both results, P – median model assigns more clusters on the areas that have high variation of tide elevation, high population density, and a high number of ports. These can be the guidelines for arranging tide stations systematically and efficiently. Moreover, as each radius of the tide station coverage is changed based on the variance of tide elevation, this makes the model more realistic, because without this logic, a lot of overlaps of coverages occur, and these make the result more illogical, as shown in figure 8.

From the results, if Thailand decides to rearrange existing tide stations and add more 6 new tide station, as shown in figure 7, only 15 tide stations are required to cover all shorelines in the study area. On the other hand, if Thailand keeps 9 exiting tide stations and adds more 8 new tide stations, 17 tide stations in the total are required to cover all coastlines in the study area. However, in order to decide the optimal solution between these scenarios, information about operating cost and construction cost for a tide station is needed, because it can be less expensive for the long term if Thailand has a smaller number of tide station, resulting in operating cost in the future, but it requires a high initial cost for constructing more new tide stations. In contrary, if Thailand decide to operate 17 tide stations in the system, it may need a higher budget in the long run, but it requires lesser budgets at the beginning, because there is no need to rearrange 9 existing tide stations. However, there is no clear estimate construction and operating costs of a tide station in Thailand, so estimate costs of construction and operation from a previous study in another country were used in this study, which were 6,000 USD and 14,000 USD for construction cost and operating cost, respectively [8]. The result is shown in table 3.

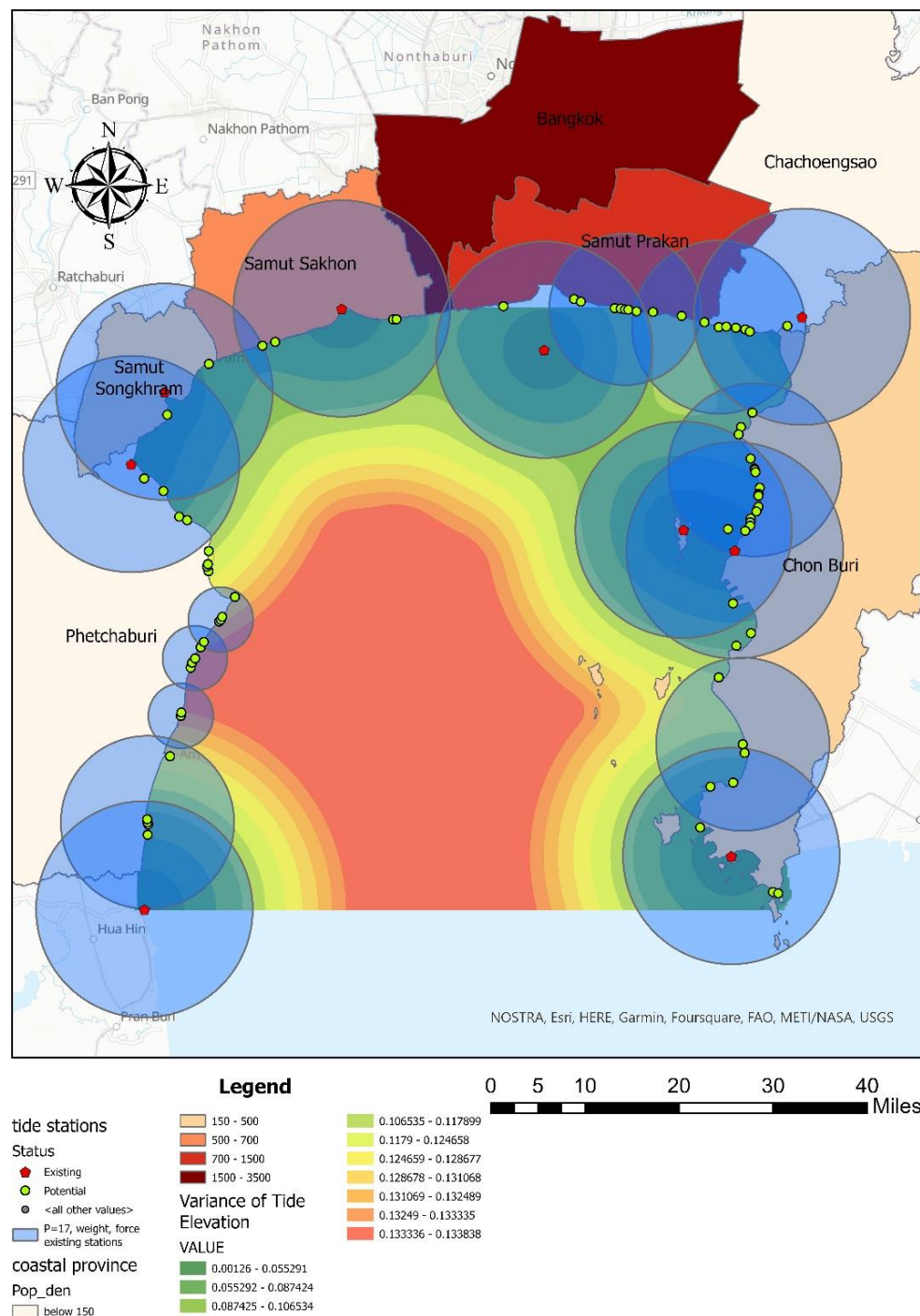


Figure 6 Result from P – median, P = 17, Weight, Forcing Existing Tide Stations [5]

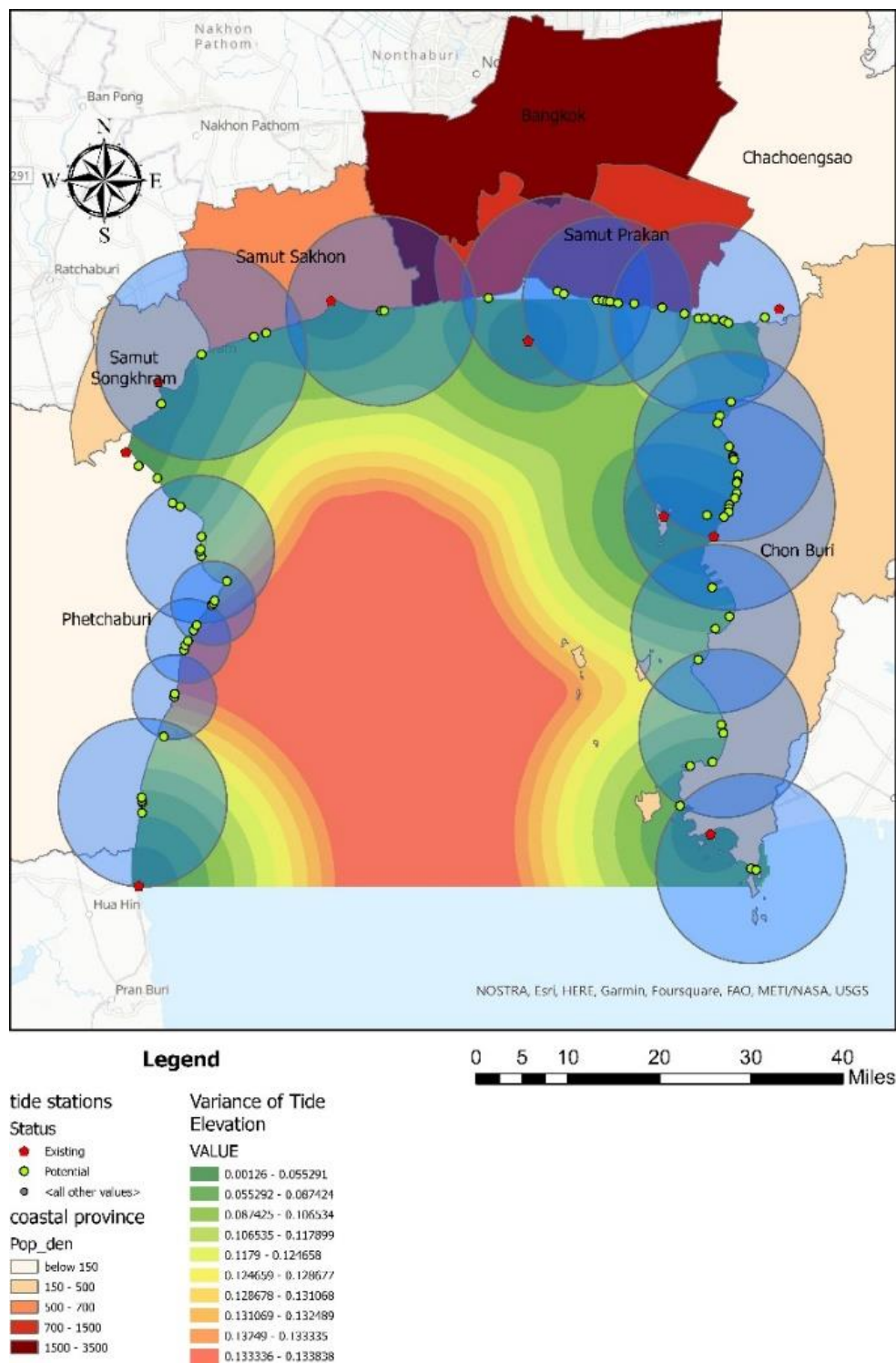


Figure 7 Result from P – median, P = 15, Weight, No Forcing Existing Tide Stations [5]

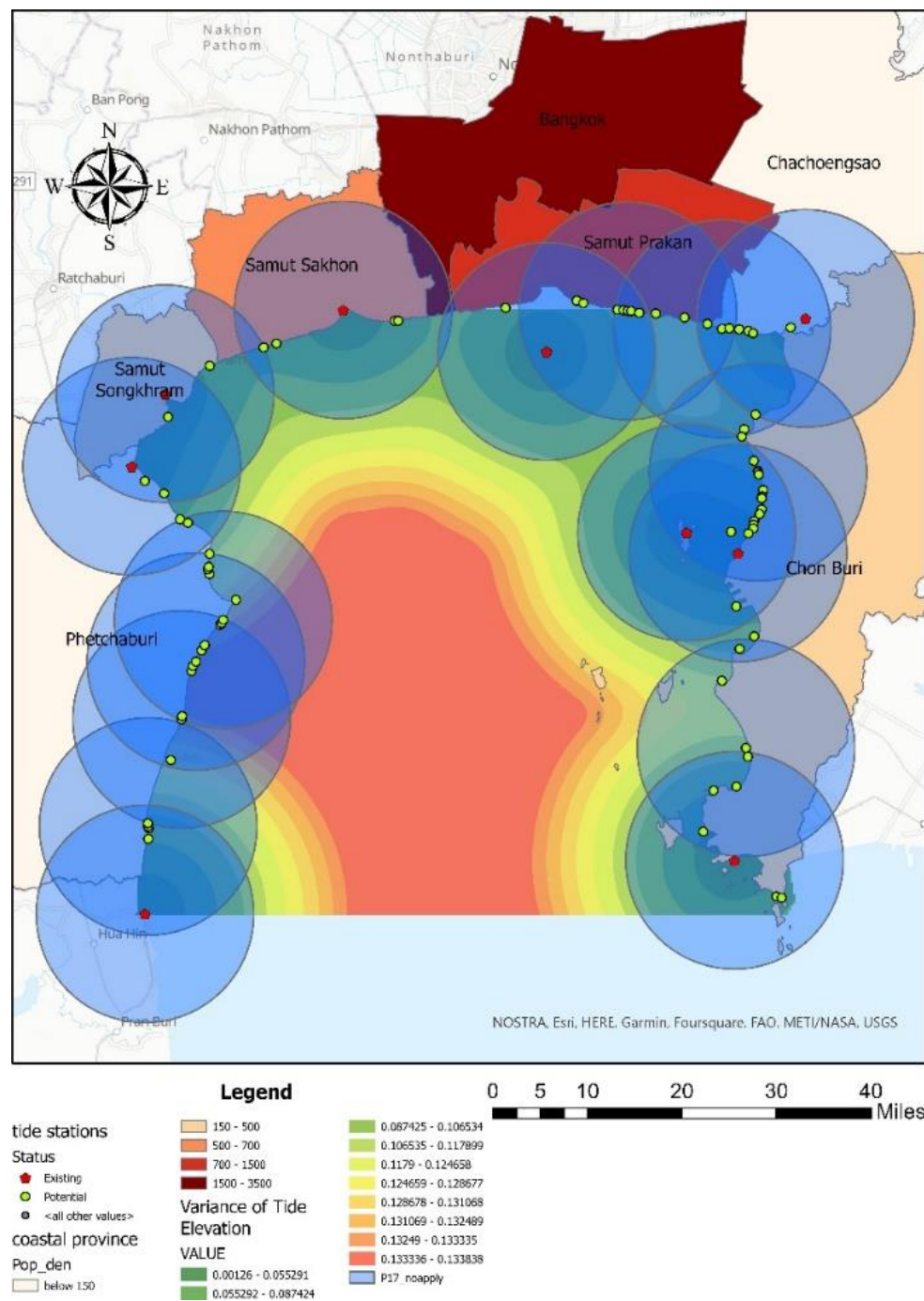


Figure 8 Result from P - median, $p = 17$, Weight, Forcing Existing Tide Stations, Same Radius [5]

Table 3 The Estimate of Accumulative Costs of Tide Station

Conditions	Total Stations	Year				
		1 (USD)	2 (USD)	3 (USD)	4 (USD)	5 (USD)
Keep 9 existing stations	17	286,000	524,000	762,000	1,000,000	1,238,000
Re-arrange	15	300,000	510,000	720,000	930,000	1,140,000

From table 3, it is obvious that although the rearrangement condition requires a higher budget than keeping 9 existing stations at the beginning, in the 2nd year, the condition to keep 9 existing station condition begins to need more budget because the operating cost is greater than construction cost around 2 times. Therefore, this illustrates that rearranging tide stations in the study area with 15 tide stations is the most optimal solution in both spatial coverage and financial aspect terms.

6. Conclusion

The Historic Bay of Thailand is one of the important marine regions in Thailand, so mariners as well as people who live surround these areas required adequate and accurate tide information for many activities such as navigation in the water, tourist activities, fishery, and hydrographic survey. Although there are 9 existing tide stations in this area, they cannot cover all shorelines based on the standard of hydrographic survey. Consequently, large regions are left without the coverage of accurate tide information services.

With the advancement of location-allocation models and geographic information system (GIS), the P – median models can be implemented to analyze how to arrange tide stations in this study area to cover all shorelines effectively. The results demonstrated that P – median with weight as equation (6) and forcing 9 existing tide stations requires a greater number of tide stations than P – median with weight as equation (6) but not forcing existing tide station with 17 and 15 stations, respectively. Both results can cover all shorelines and emphasize more tide stations in areas that have high variation of tide elevation, greater population density, and a greater number of port numbers. Hence, P – median is also proper for locate tide stations to cover all demands. Additionally, after considering the financial aspect with construction and operating costs, P-median with weight as equation (6), but not forcing existing tide stations requires less budget after the second year of operating with only 15 tide stations in the system, so it is an optimal solution.

Nevertheless, there are some limitations in this study. Firstly, since there is no available data regarding potential locations for setting up tide stations, this information was obtained from satellite images and nautical charts. However, conducting ground truth surveys would provide more accurate data to cross-check the security and relevant conditions of each candidate site. Secondly, having information on the construction and operating costs of tide stations in Thailand would be more effective, as these costs vary by region. Additionally, more factors could be incorporated into the suitability analysis, such as the number of ships, presence of tourist attractions, areas affected by tides, and important locations that rely on tide information. Furthermore, to capture all tidal constituents completely, each tide station must operate for at least 18.6 years. Therefore, the removal of existing tide stations must take this requirement into account. Lastly, population density is not the best indicator of marine activity, as regions with higher population density do not necessarily experience more marine traffic. The most suitable data would be the number of ships in each zone; however, this information is difficult to access due to security and privacy concerns, and it is also highly dynamic. Thus, using the number of ships instead of population density would provide a more accurate representation for future research.

Reference

- [1] Center for Operational Oceanographic Products and Services (U.S.). Tide and Current Glossary [Internet]. Silver Spring, MD: U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service; 2000 Jan. Available from: <https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/glossary2.pdf>
- [2] International Hydrographic Organization. Manual on Hydrography. Publication C-13 [Internet]. 1st ed. Monaco: International Hydrographic Bureau; 2005 May. Available from: https://iho.int/uploads/user/pubs/cb/c-13/english/C-13_Chapter_1_and _contents.pdf
- [3] Church R, Murray A. Business Site Selection, Location Analysis and GIS [Internet]. 2008. Available from: <https://doi.org/10.1002/9780470432761>
- [4] Crookes D, Blignaut J. An approach to determine the extinction risk of exploited populations. J Nat Conserv [Internet]. 2019;52:125750. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2019.125750>
- [5] Hydrographic Department of Royal Thai Navy. Thailand 1:45 000 Nautical Chart: Number 112, Mae Num Chao Phraya [Map]. Hydrographic Department of Royal Thai Navy; 2009.

-
- [6] สำนักบริหารการทะเบียน กรมการปกครอง. สถิติประชากรทางการทะเบียนราษฎร(รายเดือน) [อินเทอร์เน็ต]. กรมการปกครอง; [date unknown] [cited 2025 Jun 2]. Available from: <https://stat.bora.dopa.go.th/stat/statnew/statMONTH/statmonth/#/mainpage>
- [7] สำนักแผนงาน กลุ่มสถิติวิเคราะห์ กรมเจ้าท่า. รายงานทำเทียบเรือที่กรมเจ้าท่าดำเนินการก่อสร้างแล้วเสร็จ ณ ปี งบประมาณ 2562 [อินเทอร์เน็ต]. กรมเจ้าท่า; 2019 Jun [cited 2025 Jun 20]. Available from: https://md.go.th/wp-content/uploads/2021/11/report_port_MD_build2562.pdf
- [8] Tanaka H. Muography for a dense tide monitoring network. Sci Rep [Internet]. 2022 Apr 25;12(1):6725. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10373-y>

การศึกษาแนวทางการแจ้งเตือนภัยจาก Storm Surge บริเวณฝั่งทะเลอันดามัน

Study on Storm Surge Warning Guidelines in the Andaman Sea

ศลักษณ์ ฤทธิเดช^{1*}

Saluk Littidet^{1*}

Received: May 30, 2025

Revised: June 18, 2025

Accepted: June 23, 2025

บทคัดย่อ

Storm Surge หรือคลื่นพายุซัดฝั่ง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่คล้ายกับสึนามิแต่แตกต่างกันเรื่องอิทธิพลที่ทำให้เกิดรูปแบบคลื่นความรุนแรงซึ่งบางครั้งก็อาจมีความรุนแรงใกล้เคียงกัน ปัจจุบันมีข้อจำกัดในด้านการแจ้งเตือน สืบเนื่องด้วยเครื่องมือในการแจ้งเตือนยังไม่ทันสมัยและครอบคลุม จึงทำให้พื้นที่ที่อยู่ตามชายฝั่งบริเวณฝั่งทะเลอันดามันส่งผลกระทบจากคลื่นที่พัดเข้ามาทำให้เกิดความเสียหายกับสิ่งปลูกสร้าง รวมถึงการกัดกร่อนของน้ำทะเลจึงมีความจำเป็นในการหาแนวทางในการแจ้งเตือนการเกิด Storm Surge โดยการใช้เครื่องมือหรือวิธีการในการช่วยลดความเสียหายที่มีผลกระทบได้อย่างรวดเร็วและทันเวลา งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ใช้ในการพยากรณ์การเกิด Storm Surge จากประกาศคำเตือนสภาวะอากาศของกรมอุทกศาสตร์ เปรียบเทียบกับระดับน้ำจริงจาก 4 สถานี ได้แก่ สถานีน้ำระนอง สถานีน้ำกระบี่ สถานีน้ำท่าบะหมุ และสถานีน้ำตะพานน้อย ตั้งแต่ปี 2563-2564 โดยพิจารณาระดับความรุนแรงของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กับช่วงเวลาที่ระดับน้ำควรจะต้องสูงขึ้นจากสถานีน้ำทั้ง 4 สถานี โดยไม่ได้พิจารณาจากอิทธิพลอื่น ๆ ผลวิจัยพบว่าการวิเคราะห์ในข้อมูลระยะเวลา 2 ปี (2563-2564) มีแนวโน้มที่สอดคล้องกันถึงแม้ว่าจะไม่ได้แม่นยำในทุกๆ ครั้งที่มีการประกาศคำเตือน แต่ก็สามารถนำมาเพื่อใช้เป็นแนวทางในการแจ้งเตือนและเฝ้าระวังพื้นที่ที่ติดชายฝั่งทะเลอยู่บริเวณฝั่งทะเลอันดามันได้

คำสำคัญ: คลื่นพายุซัดฝั่ง, ประกาศคำเตือนสภาวะอากาศ, กรมอุทกศาสตร์, ฝั่งทะเลอันดามัน

^{1*} หน.ข่าวอากาศ กฐบ.สนบ.กพร.กร.

Head of Weather Section, Base Operations,

Naval Air Station, Royal Thai Naval Air Division, Royal Thai Fleet.

E-mail: salukreading@gmail.com

*Corresponding Author

Abstract

Storm Surge, a coastal flooding phenomenon, is often mistaken for a tsunami due to its destructive impact. Although their impacts may be similarly severe, the forecasting and warning mechanisms for storm surges remain limited in Thailand, especially along the Andaman Sea coast, due to outdated or insufficient early warning systems and a lack of localized, real-time monitoring tools. This study was conducted in response to recurrent storm surge events affecting coastal infrastructure and accelerating coastal erosion in provinces bordering the Andaman Sea. The inability to issue timely alerts has heightened the vulnerability of these regions. The objective of this research is to explore the feasibility of using southwest monsoon wind strength as a predictive indicator for storm surge events. The study specifically examines the official weather warnings issued by the Royal Thai Navy Hydrographic Department and compares them against actual sea level data recorded at four tide gauge stations: Ranong Tide Station, Kuraburi Tide Station (Phang Nga Province) Thap Lamu Tide Station (Phang Nga Province) and Taphao Noi Tide Station (Phuket Province). The study period spans from January 2020 to December 2021. Findings from the two-year dataset (2020–2021) reveal a notable correlation between stronger southwest monsoon winds and periods of elevated sea levels at the monitored coastal stations. Although the timing and magnitude were not always precisely matched in every instance of warning issuance, the general trends show sufficient consistency to suggest that this method holds promise for operational use.

Keywords: Storm Surge, The Official Weather Warnings, Hydrographic Department, The Andaman Sea Coast

1. บทนำ

Storm Surge เป็นปรากฏการณ์ที่ระดับน้ำทะเลเกิดการยกตัวสูงขึ้นจากระดับปกติ เป็นคลื่นที่เกิดจากอิทธิพลของสภาพอากาศ โดยมีปัจจัยหลักๆ อยู่ 3 ชนิด คือ หย่อมความกดอากาศต่ำกำลังแรง ลมมรสุมประจำฤดู และพายุหมุนเขตร้อน ซึ่งลมที่เกิดจากอิทธิพลเหล่านี้จะทำให้เกิดการยกตัวของผิวน้ำเมื่อความกดอากาศเหนือพื้นน้ำลดลง โดยปกติแล้วจะเกิดสภาพอากาศแปรปรวนรุนแรงก่อนเสมอ ซึ่งทั่วไปจะมีการยกตัวของคลื่นสูงตั้งแต่ในทะเลและโถมตัวที่ชายฝั่ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความรุนแรงของลม ถ้ามีความเร็วลมมากกว่า 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อาจทำให้ความสูงคลื่นสูงถึง 5-7 เมตร [1]

ปัจจุบัน Storm Surge หรือคลื่นพายุซัดฝั่ง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่คล้ายกับสึนามิแต่แตกต่างกันเรื่องอิทธิพลที่ทำให้เกิดรูปแบบคลื่นความรุนแรงซึ่งบางครั้งก็อาจมีความรุนแรงใกล้เคียงกัน เช่น พายุไซโคลนนาร์กิส

พัดเคลื่อนที่เข้ามาบริเวณตอนใต้ของสาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมา [2] เมื่อวันที่ 2 พ.ค.2551 เหตุการณ์นี้เกิดจากคลื่นพายุพัดฝั่งไม่ใช่สินามิ

คลื่นพายุพัดฝั่งยังคงเป็นภัยเงียบที่สามารถสร้างความเสียหายกับชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนที่อาศัยตามชายฝั่งทะเลได้ตลอดเวลา ไม่ว่าจะเป็นสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ ที่ถูกคลื่นที่พัดเข้ามาทำให้เกิดการชำรุดและความเสียหายของสิ่งปลูกสร้างนั้น ไม่ว่าจะเป็นเกิดจากความแรงของคลื่น หรือ การกัดกร่อนของน้ำทะเลสำหรับท่าเรือ แหล่งการทำประมงใกล้ฝั่ง เรือที่จอดในท่าอาจมีการกระทบกันทำให้เกิดความเสียหาย เนื่องจากความแรงของคลื่นได้เช่นกัน นอกจากนี้ยังมีสิ่งที่เกิดตามมาอย่างช้าๆ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของการกัดเซาะชายฝั่ง การรุกรานของน้ำทะเลในแหล่งน้ำได้ดิน และแหล่งน้ำจืดบนผิวดิน สำหรับความเสียหายจากคลื่นพายุพัดฝั่งที่เคยเกิดขึ้นในประเทศไทย ได้แก่ พายุโซนร้อนแฮร์เรียต พ.ศ.2505 พายุไต้ฝุ่นเกย์ พ.ศ.2532 และพายุไต้ฝุ่นลินดา พ.ศ.2540 [3] จากเหตุการณ์ดังกล่าว ในอดีตพายุหมุนเขตร้อนที่เคลื่อนที่เข้ามามีผลกระทบต่อประเทศไทยเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง สืบเนื่องจากลักษณะภูมิศาสตร์ของประเทศไทยตั้งอยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดของพายุหมุนเขตร้อนจากทั้งสองฝั่งทะเล คือ ฝั่งตะวันออกจากมหาสมุทรแปซิฟิกและทะเลจีนใต้ ส่วนฝั่งตะวันตกจากอ่าวเบงกอลและทะเลอันดามัน จากสถิติที่ผ่านมาพายุมีโอกาสเคลื่อนที่จากมหาสมุทรแปซิฟิกและทะเลจีนใต้เข้าสู่ประเทศไทยทางฝั่งตะวันออกมากกว่าทางฝั่งตะวันตก ซึ่งปกติแล้วพายุจะเคลื่อนผ่านเข้ามามีผลกระทบต่อสภาวะอากาศของประเทศไทยเฉลี่ยประมาณปีละ 3-4 ลูก ในจำนวนนี้มีโอกาสที่พายุจะเคลื่อนตัวสู่อ่าวไทยประมาณปีละ 1 ลูก แต่สำหรับฝั่งทะเลอันดามัน จากสถิติพายุหมุนเขตร้อนที่เคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทยคาบ 69 ปี (2494-2562) [4] เคลื่อนที่ผ่านเฉลี่ย 2-3 ลูก ในช่วงเดือน ต.ค.-ธ.ค. ซึ่งจะไปสอดคล้องกับช่วงที่ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้มีอิทธิพลต่อฝั่งทะเลอันดามัน ในช่วงเดือน พ.ค.-ต.ค. และมีแนวโน้มที่จะเกิดบ่อยครั้งและรุนแรงขึ้น ทั้งนี้อาจหมายรวมถึงเกิดจากปัจจัยในเรื่องของสภาวะโลกร้อนที่มีผลต่อบรรยากาศและปัจจัยปรากฏการณ์ต่าง ๆ ทางธรรมชาติจากการรายงานของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernment Panel on Climate Change: IPCC) ขององค์การสหประชาชาติ (UN) [5] ในปัจจุบันที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ดังจะเห็นจากการเกิดฝนตกหนักนอกฤดูกาลหรือการเกิดพายุคลื่นลมแรงในพื้นที่บริเวณอ่าวเบงกอลและทะเลอันดามัน

จากสถิติของการเกิดคลื่นพายุพัดฝั่ง โอกาสการเกิดในฝั่งทะเลอันดามันจากปัจจัยพายุหมุนเขตร้อนและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังแรงมีค่อนข้างมากเช่นกันโดยเฉพาะพื้นที่ชายฝั่งทะเลอันดามันตั้งแต่ จว.ระนองลงมา ซึ่งจะเป็นพื้นที่เสี่ยงค่อนข้างมากที่จะมีโอกาสได้รับความเสียหายกับสิ่งปลูกสร้าง ท่าเรือ ตลอดจนชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนที่ตั้งและอาศัยอยู่บริเวณชายฝั่ง นอกจากนี้พื้นที่ดังกล่าวยังอยู่ในความรับผิดชอบของทัพเรือภาค 3 (ทรภ.3) ซึ่งมีหน่วยงานสำคัญของกองทัพเรือ (ทร.) อยู่เป็นจำนวนมาก เช่น กองบัญชาการทัพเรือภาคที่ 3 ฐานทัพเรือพังงา สถานีเรือระนอง และสถานีเรือละงู เป็นต้น แม้ว่ารัฐบาลจะได้ดำเนินการป้องกันภัยพิบัติที่มีโอกาสจะเกิดขึ้นในประเทศไทย โดยได้จัดตั้งศูนย์เตือนภัยพิบัติแห่งชาติและจัดทำแผนป้องกันภัยฝ่ายพลเรือนแห่งชาติ พ.ศ.2548 [6] แล้ว โดยการดำเนินการเป็นไปในภาพรวมทั้งประเทศแต่การเกิดคลื่นพัดฝั่งสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาเพราะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของสภาพอากาศ เป็นหลักการแจ้งเตือนและ

การคาดการณ์ในการเกิดของคลื่นพายุซัดฝั่ง จึงเป็นส่วนสำคัญที่สามารถลดการสูญเสียและหลีกเลี่ยงการทำกิจกรรม รวมถึงหาแนวทางป้องกันสิ่งปลูกสร้างตามแนวชายฝั่งทะเล จากอดีตจนถึงปัจจุบันยังไม่มีแนวทางที่ชัดเจนในการแจ้งเตือนและคาดการณ์ของคลื่นพายุซัดฝั่ง ซึ่งการแจ้งเตือนคลื่นซัดฝั่งในต่างประเทศจะมีเครื่องมือตรวจวัดและแสดงผลได้ Real Time แต่สำหรับประเทศไทยเป็นเพียงการติดตามสภาพอากาศและเส้นทางพายุจากกรมอุตุนิยมวิทยาและสถานีน้ำของกรมอุทกศาสตร์ [7] เพื่อระดับน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นอย่างฉับพลันเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้เกิดความปลอดภัยจากการเกิดคลื่นซัดฝั่งในพื้นที่ของ ทร. และพื้นที่เสี่ยงในบริเวณฝั่งทะเลอันดามันจึงเกิดคำถามการวิจัยว่าจะมีแนวทางการแจ้งเตือนอย่างไร

ในปัจจุบันประเทศไทยยังไม่ได้มีการใช้เทคโนโลยีรวมถึงการศึกษาที่ใช้ในการแจ้งเตือนในเรื่องของ Storm Surge ในบริเวณฝั่งทะเลอันดามันของประเทศไทยมาก่อน งานวิจัยนี้จึงเป็นการใช้ปัจจัยของระดับความรุนแรงของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งเป็นลมที่มีอิทธิพลมากในบริเวณฝั่งทะเลอันดามัน มาวิเคราะห์กับความสูงของระดับน้ำทั้ง 4 สถานี ตามแนวชายฝั่งตั้งแต่ จว.ระนอง จนถึง จว.ภูเก็ต เพื่อหาความสัมพันธ์ที่ได้จากประกาศคำเตือนสภาวะอากาศ ของกรมอุทกศาสตร์ กับความสูงที่วัดได้จากสถานีน้ำ

2. วัตถุประสงค์

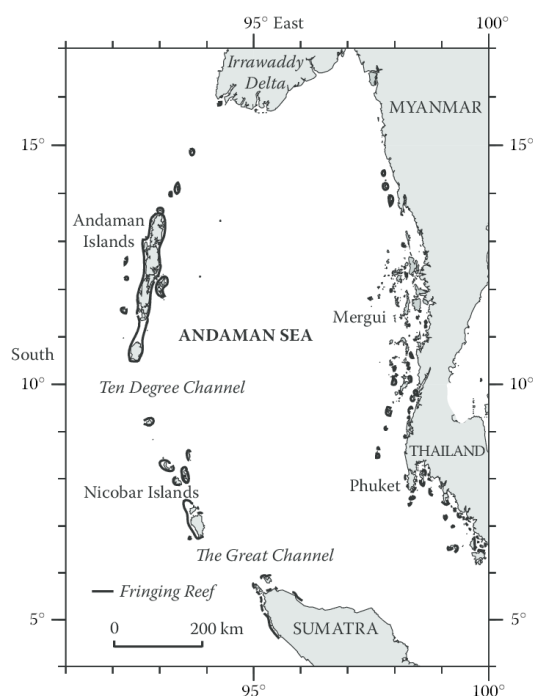
- 2.1 เพื่อศึกษาสาเหตุและปัจจัยการเกิดคลื่นซัดฝั่งจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้
- 2.2 เพื่อศึกษาแนวทางการแจ้งเตือนและการป้องกันการเกิดคลื่นซัดฝั่งหรือภัยพิบัติที่เกี่ยวข้อง

3. เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พื้นที่ศึกษาการวิจัยเรื่องนี้มีขอบเขตจะมุ่งเน้นศึกษาแนวทางการแจ้งเตือนภัยจาก Storm Surge บริเวณฝั่งทะเลอันดามัน

3.1 ที่ตั้งทางภูมิศาสตร์และลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ฝั่งทะเลอันดามัน

ประเทศไทย นับว่าเป็นประเทศหนึ่งที่มีอาณาเขตจดทะเลมีความยาวของขอบฝั่งกว่า 2,400 กิโลเมตร ติดกับทะเล 2 ส่วน ด้วยกัน คือ ทะเลฝั่งอ่าวไทยและฝั่งทะเลอันดามัน รูปที่ 1 สำหรับฝั่งทะเลอันดามัน มีลักษณะเป็นแอ่งที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของเปลือกโลก (Tectonic Basin) ต่อเนื่องมาจากดินดอนสามเหลี่ยมของแม่น้ำอิระวดีในประเทศพม่า แผ่กว้างออกไปประมาณ 1,200 กิโลเมตร ลงไปทางใต้จนถึงทางตอนเหนือของเกาะสุมาตราและช่องแคบมะละกา ความกว้างของท้องทะเลจากฝั่งตะวันตกของแหลมไทยไปจนถึงหมู่เกาะอันดามันและหมู่เกาะนิโคบาร์ (Nicobar) ประมาณ 650 กิโลเมตร หมู่เกาะเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของสันใต้น้ำที่เป็นแนวแบ่งเขตแอ่งอันดามันออกจากอ่าวเบงกอล (Bay of Bengal) [8] เป็นพื้นที่ทั้งหมดประมาณ 797,700 ตารางกิโลเมตร มีความลึกเฉลี่ย 870 เมตร และส่วนที่ลึกที่สุดมีความลึกถึง 3,777 เมตร ฝั่งตะวันออกของทะเลอันดามันเป็นส่วนของไหล่ทวีปของคาบสมุทรมาเลย์ที่มีความลึกของบริเวณ Inner Shelf ต่ำกว่า 100 เมตร ความกว้างของไหล่ทวีป (Continental Shelf) ลดลงในแนวเหนือ-ใต้ โดยส่วนที่กว้างที่สุดบริเวณคาบสมุทร Mergui ในประเทศเมียนมาร์มีความกว้าง 250 กิโลเมตร แต่บริเวณนอกฝั่งเกาะภูเก็ตมีไหล่ทวีปกว้างเพียง 35 กิโลเมตร บริเวณลาดทวีป (Continental Slope)



รูปที่ 1 พื้นที่อาณาเขตทะเลอันดามัน [9]

3.2 ความแตกต่างระหว่าง Storm Surge และสึนามิ

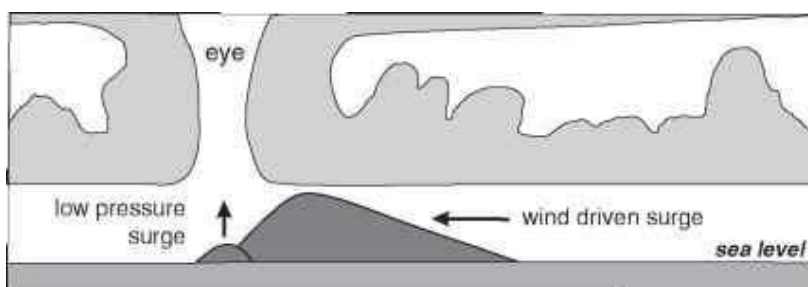
Storm Surge เป็นปรากฏการณ์ที่ระดับน้ำทะเลเกิดการยกตัวสูงขึ้นจากระดับปกติจากการเคลื่อนตัวผ่านเข้ามาของหย่อมความกดอากาศต่ำ (Low Pressure) กำลังอิทธิพลของแรงและความกดอากาศต่ำที่ศูนย์กลางของพายุที่มาพร้อมกับการเคลื่อนตัวขึ้นฝั่งของพายุ รูปที่ 2 ปรากฏการณ์นี้สามารถเกิดขึ้นได้แม้แต่ในทะเลสาบขนาดใหญ่ หากว่ามีพายุหมุนเขตร้อนขนาดรุนแรงเคลื่อนตัวผ่านพื้นที่ที่จะได้รับผลกระทบจาก Storm Surge จะสังเกตได้จากความสูงของระดับน้ำทั้งหมด และความเสียหายที่เกิดจากระดับน้ำที่เคลื่อนที่เข้าสู่ฝั่ง ในปัจจุบันยังมีความเข้าใจผิดเกี่ยวกับ Storm Surge ว่าเหมือนสึนามิ (Tsunami) ซึ่งในความเป็นจริงแล้วความแตกต่างระหว่างสึนามิและ Storm Surge เปรียบเทียบได้ดังตารางนี้

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความแตกต่างของการเกิดสึนามิและคลื่นพายุซัดฝั่ง [10]

สึนามิ (Tsunami)	คลื่นพายุซัดฝั่ง (Storm Surge)
เกิดจากปรากฏการณ์ทางธรณีวิทยาใต้ทะเลหรืออุกกาบาตขนาดใหญ่ตกลงในทะเล	เกิดจากปรากฏการณ์ทางบรรยากาศ
เป็นคลื่นทะเลแบบระดับน้ำขึ้น-ลง (Tidal Wave) ที่กวาดท่วมขึ้นมابนฝั่ง	เป็นคลื่นที่เกิดจากลมและการยกตัวของผิวน้ำน้ำเมื่อความกดอากาศเหนือพื้นน้ำลดลง (Wind-and Pressure-Driven Wave)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความแตกต่างของการเกิดสึนามิและคลื่นพายุซัดฝั่ง [10] (ต่อ)

สึนามิ (Tsunami)	คลื่นพายุซัดฝั่ง (Storm Surge)
ไม่จำเป็นต้องมีสภาพอากาศแปรปรวนในขณะเกิด	จะเกิดสภาพอากาศแปรปรวนรุนแรงก่อนเสมอ
รูปแบบคลื่น (Wave Form) ก. ช่วงคลื่นยาว (~ 200 กม.) ข. ความสูงน้อยในทะเลเปิด ค. ความเร็วสูง (> 800 กม./ชม.) ง. โถมตัวที่ชายฝั่ง	รูปแบบคลื่น (Wave Form) ก. ช่วงคลื่นสั้นกว่า (คลื่นลม ~ 100 กม.) ข. ความสูงมากกว่า เกิดเป็นโดมน้ำยกตัวของพายุ ค. ความเร็วตามความแรงลมและการเคลื่อนตัวของพายุ ง. ยกตัวสูงตั้งแต่ในทะเลและโถมตัวที่ชายฝั่ง



รูปที่ 2 พายุหมุนเขตร้อนที่ทำให้เกิด Storm Surge และการยกตัวของผิวน้ำทะเล [11]

3.3 ปัจจัยที่เป็นสาเหตุหลักการเกิด Storm Surge [12]

สืบเนื่องจากพายุหมุนเขตร้อนที่ทำให้เกิด Storm Surge โดยทั่วไป ระดับความสูงของ Storm Surge จะเปลี่ยนแปลงไปตามความรุนแรงของพายุ ตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่

3.3.1 ความกดอากาศต่ำที่ศูนย์กลางพายุ (Pressure) หากพายุมีความกดอากาศที่ศูนย์กลางต่ำมาก ผิวน้ำทะเลก็จะยกตัวสูงได้มากขึ้น สามารถประมาณความสัมพันธ์ระหว่างความกดอากาศและความสูงของระดับผิวน้ำทะเล คือ ความกดอากาศลดลง 1 มิลลิบาร์ (จากความกดอากาศมาตรฐานที่ระดับทะเลปานกลาง เท่ากับ 1023.25 มิลลิบาร์) ผิวน้ำทะเลจะสูงขึ้น 1 เซนติเมตร

3.3.2 ขนาดของพายุ (Size) โดยน้ำที่ยกตัวสูงขึ้นนี้อาจจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 60-80 กิโลเมตร หากพายุมีความรุนแรงมาก ความเร็วในการเคลื่อนตัวไปข้างหน้าของพายุ (Power Speed) หากพายุมีการเคลื่อนตัวไปข้างหน้าเร็วจะทำให้คลื่นยกตัวสูงมากขึ้นได้

3.3.3 เส้นทางเคลื่อนตัวของพายุ (Track) เมื่อพายุอยู่ในทะเลเปิด โดมน้ำอาจสูงขึ้นไม่มากนัก เนื่องจากน้ำสามารถแพร่กระจายไปตามแนวตั้งของความลึกน้ำ แต่เมื่อพายุเคลื่อนตัวเข้าบริเวณน้ำตื้น น้ำไม่สามารถแพร่กระจายทางลึกได้ จะเกิดการยกตัวของระดับน้ำได้สูงกว่า หรือถ้าพื้นที่ชายฝั่งเป็นบริเวณน้ำลึก ชายฝั่งมีความชันมาก น้ำทะเลก็สามารถกระจายตามความลึกออกไปได้ โดมน้ำนี้จะสูงขึ้นอย่างช้าๆ แต่ถ้าบริเวณชายฝั่งเป็นที่น้ำตื้น ชายฝั่งลาดชันน้อย น้ำทะเลไม่สามารถจะกระจายออกไปทางไหนได้ ดังนั้น โดมน้ำนี้จะสูงขึ้นๆ

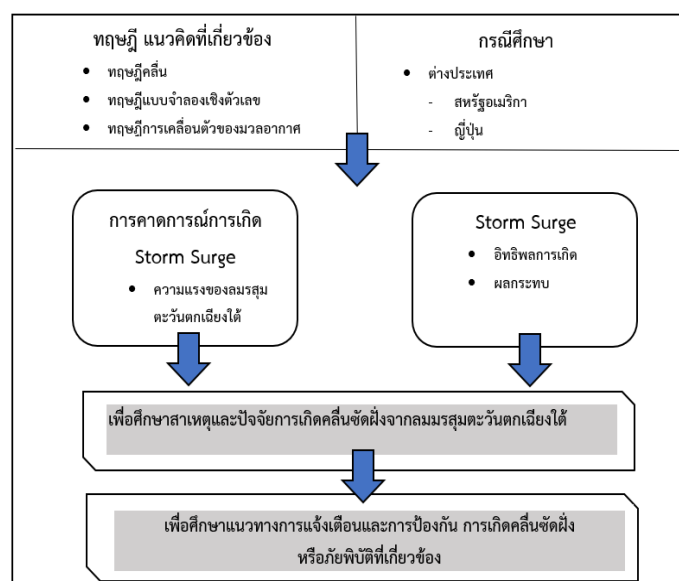
3.3.4 ความเร็วลมสูงสุดของพายุ (Maximum Wind Speed) ยิ่งพายุมีความรุนแรงมากขึ้น มวลน้ำจะถูกพัดพาเข้าสู่ศูนย์กลางของพายุมากและความสูงของ Storm Surge จะสูงจากระดับผิวน้ำทะเลปกติประมาณ 1-5 เมตร ทางหน้าของศูนย์กลางพายุจะทำให้เกิดคลื่นซัดฝั่งเนื่องจากลมแรง ทำให้พื้นที่ลุ่มต่ำตามแนวชายฝั่งได้รับความเดือดร้อนจากการกัดเซาะอย่างรุนแรงและน้ำท่วม ซึ่งระดับความรุนแรงของพายุเฮอริเคนระดับ 1 จะมีความรุนแรงเทียบเท่าความรุนแรงของพายุไต้ฝุ่น ดังนั้น ความรุนแรงของพายุหมุนเขตร้อนระดับพายุโซนร้อนลงมาถึงพายุดีเปรสชัน อาจทำให้เกิด Storm Surge ที่มีความสูงไม่เกิน 1 เมตร หรือเพียงแค่มิถุนเซนติเมตร

3.4 สาเหตุจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (ในช่วงฤดูมรสุม พ.ค.-ต.ค)

มรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดปกคลุมประเทศไทย ระหว่างกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม บางช่วงเวลาอาจก่อให้เกิดภาวะคล้ายน้ำทะเลหนุนสูงหรือคลื่นลมแรงส่งผลกระทบต่อชายฝั่งในลักษณะใกล้เคียงกับ Storm Surge โดยมีแหล่งกำเนิดจากบริเวณความกดอากาศสูง ในซีกโลกใต้บริเวณมหาสมุทรอินเดีย ซึ่งพัดออกจากศูนย์กลางเป็นลมตะวันออกเฉียงใต้และเปลี่ยนเป็นลมตะวันตกเฉียงใต้เมื่อพัดข้ามเส้นศูนย์สูตร มรสุมนี้จะนำมวลอากาศชื้นจากมหาสมุทรอินเดียมาสู่ประเทศไทย ทำให้มีเมฆมากและฝนชุกทั่วไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งตามบริเวณชายฝั่งทะเลและเทือกเขาด้านรับลมจะมีฝนมากกว่าบริเวณอื่น [13]

ถึงแม้ว่าลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะไม่ใช่อุณหภูมิที่ทำให้เกิด Storm Surge แต่สำหรับลักษณะพื้นที่ของประเทศไทยบริเวณฝั่งทะเลอันดามันแล้ว ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิด Storm Surge เนื่องจากความถี่ที่ของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้นี้ (ระยะเวลา 4-6 เดือน ในแต่ละปี) [14] ซึ่งมากกว่าความถี่ของพายุหมุนเขตร้อนที่เข้ามามีอิทธิพลในบริเวณฝั่งทะเลอันดามัน

4. วิธีดำเนินการ



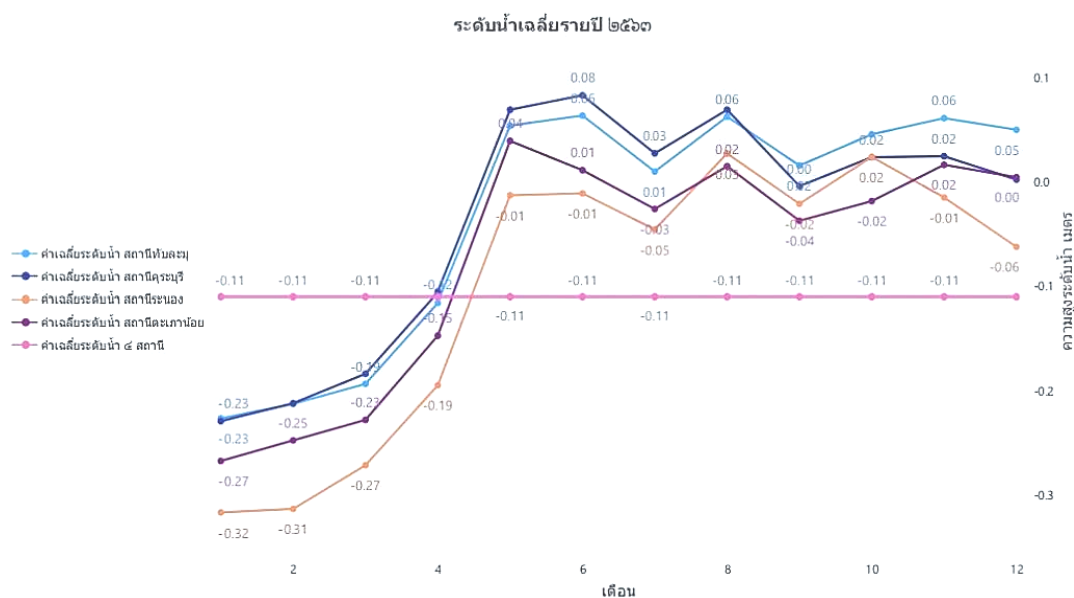
รูปที่ 3 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

4.1 หลักในการคาดการณ์ในการเกิด Storm Surge

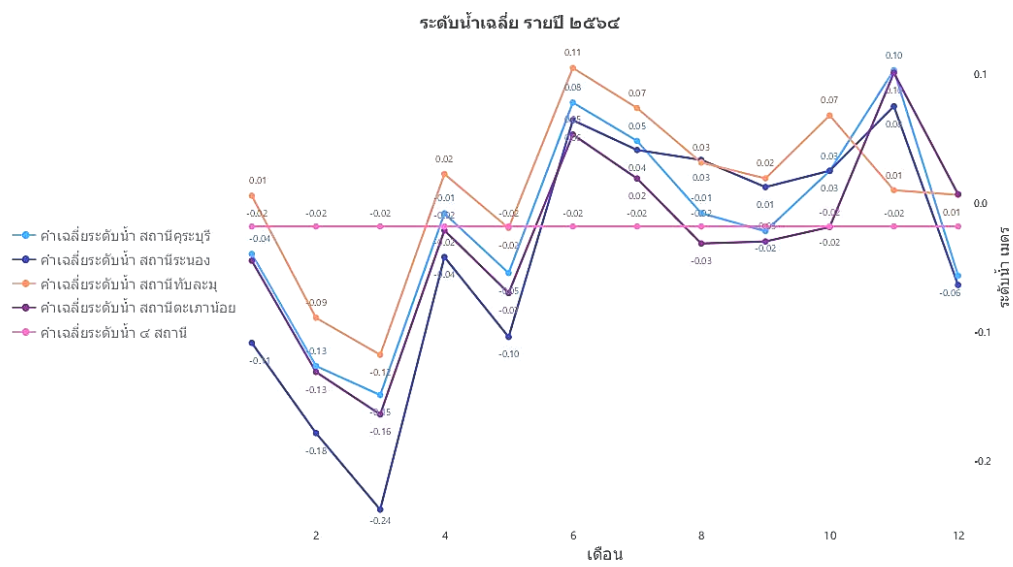
การเกิด Storm Surge จากอิทธิพล ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ โดยการคาดการณ์จากประกาศคำเตือน สภาพอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาเปรียบเทียบกับระดับน้ำจริงจาก 4 สถานี ได้แก่ สถานีน้ำระนอง สถานีน้ำกระบี่ สถานีน้ำพัลละมู และสถานีน้ำตะพานน้อย ตั้งแต่ปี 2563-2564 โดยพิจารณาระดับความรุนแรงของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กับช่วงเวลาที่ระดับน้ำควรจะต้องสูงขึ้น จากสถานีน้ำทั้ง 4 สถานี โดยไม่ได้พิจารณาจากอิทธิพลอื่นๆ

จากข้อมูลน้ำจริงรายชั่วโมง มาพล็อตกราฟโดยแบ่งเป็นกราฟระดับน้ำสูงสุด ระดับน้ำต่ำสุด และระดับน้ำเฉลี่ย ในแต่ละเดือนแล้วนำมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ลักษณะการยกตัวของระดับน้ำกับช่วงวันเวลาที่กรมอุตุนิยมวิทยาออกประกาศคำเตือน ซึ่งการเปรียบเทียบบางเดือนมีการออกประกาศคำเตือน แต่อิทธิพลที่ทำให้ระดับน้ำยกตัวสูงขึ้นไม่ใช่อิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ก็จะไม่นำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กับการเกิด Storm Surge หรือการยกตัวของระดับน้ำเอง โดยระดับความสูงของคลื่นที่ได้จากการศึกษาของกรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งพบว่าระดับความสูงของคลื่นตั้งแต่ 4.15 เมตร ขึ้นไป จะมีผลกระทบต่อการกัดเซาะและการพังทลายบริเวณชายฝั่งทะเลอันดามัน [15]

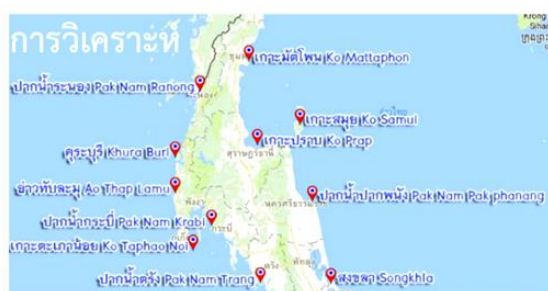
ในการศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบในครั้งนี้ เป็นการนำข้อมูลจำนวน 2 ปี ย้อนหลังมาศึกษาเนื่องจากระยะเวลาที่กำหนดและความสมบูรณ์ของข้อมูลระดับน้ำแต่ละสถานีที่มีอยู่นั้น ในปี 2563 และ 2564 มีความสมบูรณ์ครบถ้วนมากที่สุด



รูปที่ 4 ระดับน้ำเฉลี่ยรายปี 4 สถานี ปี 2563



รูปที่ 5 ระดับน้ำเฉลี่ยรายปี 4 สถานี ปี 2564



เดือน พฤษภาคม
ปี ๒๕๖๓

ประกาศคำเตือน

[illegible]

เรื่อง: เรื่องปล้นชิงทรัพย์และคดีอื่นของนายตำรวจและอัยการ ตำรวจที่ ๒

การดำเนินการเพื่อพัฒนาคุณภาพการดำเนินงานของศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพของราษฎร (ศ.ก.) ประจำปี พ.ศ. ๒๕๖๒ ได้ดำเนินการตามแผนปฏิบัติการประจำปี พ.ศ. ๒๕๖๒ โดยมีการดำเนินงานตามแผนปฏิบัติการประจำปี พ.ศ. ๒๕๖๒ ดังนี้

[illegible]

† *For details of the sampling strategy, see the text and the Appendix. The sampling was carried out by the author and the data were collected by the author and the author's colleagues.*

การวิเคราะห์

ในช่วงวันที่ ๒๑ พ.ค.๖๓ เป็นช่วงที่
ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังปานกลาง
พัดปกคลุมบริเวณฝั่งทะเลอันดามัน เมื่อ
พิจารณาจากระดับน้ำจริงจากสถานีน้ำ
ทั้ง ๔ สถานีแล้ว ในช่วงวันที่ ๒๑ พ.ค.๖๓
ระดับน้ำอยู่ในช่วงที่มีระดับน้ำสูง ซึ่งอยู่ใน
ช่วง ๑-๒.๒ เมตร โดยสถานีน้ำรองจะมี
ระดับน้ำสูงที่สุดใน ๔ สถานี

การวิเคราะห์ (ต่อ)

จากข้อเท็จจริงดังกล่าว เป็นการเปรียบเทียบจากปัจจัยลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังปานกลาง ที่ส่งผลกระทบบริเวณฝั่งทะเลอันดามัน เท่านั้นที่ส่งผลต่อระดับน้ำทั้ง ๔ สถานี ซึ่งตรงช่วงเวลากับความสูงของระดับน้ำตามการประกาศค่าเตือนของกรมอุทกศาสตร์

สรุป

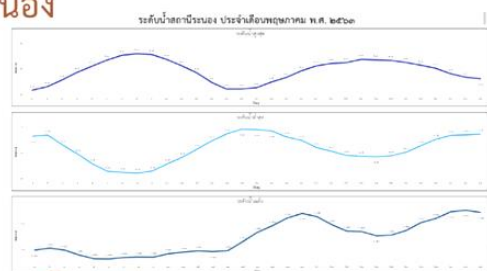
ลมนรสมุดะวันตกเฉียงใต้
กำลังปานกลาง

สถานีน้าระนองมีระดับน้ำสูงขึ้น

สถานีน้ากระบือมีระดับน้ำสูงขึ้น

สถานีน้าทับละมูมีระดับน้ำสูงขึ้น

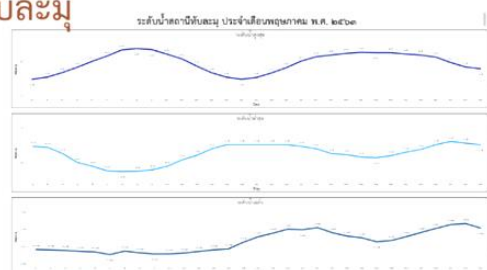
สถานีน้าตะกานน้อยมีระดับน้ำสูงขึ้น



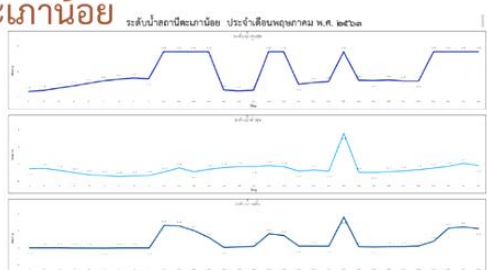
กระบือ



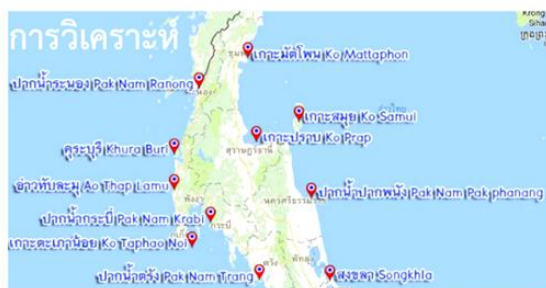
ทั้บละมู



ตะเภาน้อย



รูปที่ 6 ตัวอย่างระดับน้ำเฉลี่ย 4 สถานี ในเดือน พ.ค. ปี 2563



เดือน มิถุนายน
ปี ๒๕๖๔

ประกาศคำเตือน



ส.อ.

กระทรวงศึกษาธิการ

วันที่ ๑๖ มิ.ย. ๖๕

9

๙ มิ.ย. ๖๕

การคาดหมายข่าวราวราวี

พวกร. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

พวกร. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

พวกร. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

พวกร. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

พวกร. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

พวกร. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

พวกร. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

พวกร. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

พวกร. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

พวกร. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

พวกร. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

พวกร. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

พวกร. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕	พวกร. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕	พวกร. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕
๑. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕ ๒. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕ ๓. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕ ๔. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕	๕. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕ ๖. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕ ๗. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕ ๘. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕	๙. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕ ๑๐. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕ ๑๑. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕ ๑๒. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

(รายชื่อผู้เกี่ยวข้องทั้งหมดที่ควรได้รับทราบ)

๑. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

๒. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

๓. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

๔. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

๕. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

๖. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

๗. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

๘. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

๙. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

๑๐. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

๑๑. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

๑๒. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

๑๓. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

๑๔. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

๑๕. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

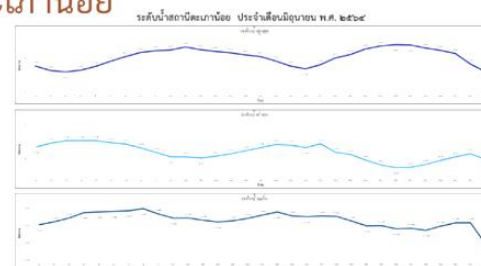
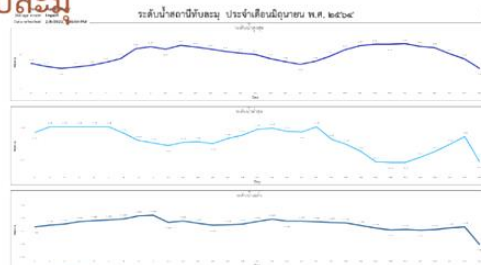
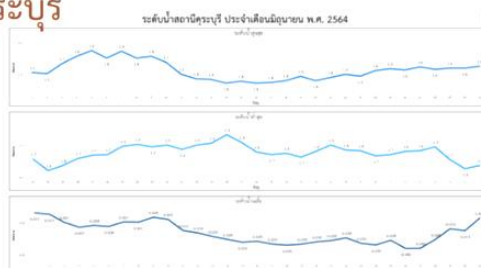
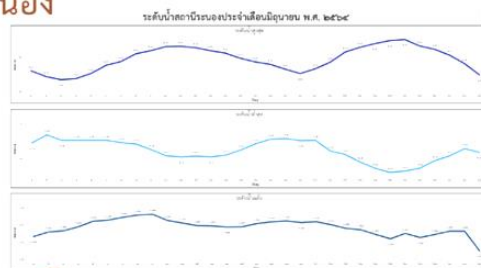
๑๖. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

๑๗. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

๑๘. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

๑๙. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕

๒๐. นายสมชาย ๑๖ มิ.ย. ๖๕



การวิเคราะห์

ในช่วงวันที่ ๑๔-๑๕ มิ.ย.๖๕ เป็นช่วงที่
ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังแรงที่
พัดปกคลุมบริเวณฝั่งทะเลอันดามัน
เมื่อพิจารณาจากระดับน้ำจึงจากสถานี
น้ำทั้ง ๔ สถานีแล้ว ในช่วงวันที่
๑๔-๑๕ มิ.ย.๖๕ มีระดับน้ำซึ่งอยู่ในช่วง
๑.๒-๒.๑ เมตร ซึ่งเป็นระดับที่ต่ำกว่าที่
ควรจะสูงเล็กน้อย

การวิเคราะห์ (ต่อ)

จากข้อเท็จจริงดังกล่าว เป็นการเทียบ
จากปัจจัยลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้
กำลังแรง ที่ส่งผลกระทบบริเวณฝั่ง
ทะเลอันดามัน ซึ่งระดับน้ำทั้ง ๔ สถานี
ไม่ตรงกับช่วงเวลาทีระดับน้ำควรจะสูง
ตามการประกาศค่าเตือนของ
กรมอุทกศาสตร์

สรุป

สมรมสูตรตะวันตกเฉียงใต้
กำลังแรง
สถานีนํ้าระนองมีแนวโน้มระดับนํ้า
สูงขึ้นเร็วไปประมาณ ๒ วัน
สถานีนํ้ากระบี่มีแนวโน้มระดับนํ้า
สูงขึ้นเร็วไปประมาณ ๒ วัน
สถานีนํ้าทับละมุมีแนวโน้มระดับนํ้า
สูงขึ้นเร็วไปประมาณ ๒ วัน
สถานีนํ้าตะกั่วป่ามีแนวโน้มระดับนํ้า
สูงขึ้นเร็วไปประมาณ ๒ วัน

รูปที่ 7 ตัวอย่างระดับน้ำเฉลี่ย 4 สถานี ในเดือน มิ.ย. ปี 2564



รูปที่ 8 ความสูงของระดับน้ำที่เกิดจากปัจจัยอื่นๆ ปี 2563-2564

5. ผลการศึกษา

จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์ของการเกิด Storm Surge การออกประกาศคำเตือนมีระดับความรุนแรงของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ อยู่ 4 ระดับ ที่พบในการออกประกาศคำเตือนในช่วงปี พ.ศ.2563-2564 ได้แก่ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังแรง ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังค่อนข้างแรง ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังปานกลางถึงค่อนข้างแรง และลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังปานกลาง ซึ่งความรุนแรงทั้ง 4 ระดับ มีผลต่อการยกตัวของระดับน้ำทั้ง 4 สถานี

5.1 ในปี.2563 มีการออกประกาศคำเตือนทั้งสิ้นจำนวน 7 เดือน โดยมีเพียง 1 เดือน ที่ไม่ได้นำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ เนื่องจากไม่ได้เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

5.1.1 มี 4 เดือน ที่ระดับน้ำทุกสถานีสูงตรงกับช่วงเวลาที่ออกประกาศคำเตือน

5.1.2 มี 1 เดือน (มิ.ย.) ที่ระดับน้ำ 3 สถานี สูงช้ากว่าช่วงเวลาออกประกาศคำเตือนประมาณ 5 วัน ยกเว้นเพียงสถานีน้ำระนองที่มีระดับน้ำสูงตรงตามช่วงเวลา

5.1.3 มี 1 เดือน (ต.ค.)ที่ระดับน้ำทุกสถานีสูงช้ากว่าช่วงเวลาออกประกาศคำเตือนประมาณ 4 วัน

5.2 ในปี 2564 มีการออกประกาศคำเตือนทั้งสิ้นจำนวน 6 เดือน โดยมีเพียง 2 เดือน ที่ไม่ได้นำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ เนื่องจากไม่ได้เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

5.2.1 มี 2 เดือน ที่ระดับน้ำทุกสถานีสูงตรงกับช่วงเวลาที่ออกประกาศคำเตือน

5.2.2 มี 1 เดือน (ก.ย.) ที่ระดับน้ำ 3 สถานีสูงกว่าช่วงเวลาออกประกาศคำเตือนประมาณ 2 วัน ยกเว้นเพียงสถานีน้ำกระบะบุรีที่มีระดับน้ำสูงตรงตามช่วงเวลา

5.2.3 มี 1 เดือน (มิ.ย.) ที่ระดับน้ำทุกสถานีสูงเร็วกว่าช่วงเวลาออกประกาศคำเตือนประมาณ 2 วัน

จากความสัมพันธ์ข้างต้นในจะเห็นได้ว่าใน ปี 2563 จะค่อนข้างเห็นแนวโน้มของการเพิ่มของระดับน้ำที่มีความชัดเจนและสอดคล้องกว่าปี 2564 ซึ่งมีสถานีน้ำระนองและสถานีน้ำกระบะบุรี มีแนวโน้มที่มีความเชื่อถือได้มากที่สุดในช่วง 4 สถานี ซึ่งสามารถใช้เป็นหลักการประมาณการเบื้องต้นในการคาดการณ์การเกิด Storm Surge จากการดูประกาศคำเตือนความแรงของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ซึ่งส่วนใหญ่สอดคล้องตามวันและเวลาที่จะส่งผลกระทบต่อระดับน้ำที่สูงขึ้นบริเวณชายฝั่งทะเล ซึ่งเปรียบเทียบกับระดับน้ำจากสถานีน้ำที่นำมาเปรียบเทียบ แต่สำหรับบางเดือนที่มีระดับน้ำสูงเร็วหรือช้ากว่าช่วงเวลานั้น อาจเกิดจากอิทธิพลอื่นๆ ที่เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งยังคงไม่นำมาร่วมวิเคราะห์และเปรียบเทียบ

การคาดการณ์การเกิด Storm Surge ในบริเวณฝั่งทะเลอันดามันสามารถดูแนวโน้มการเกิดได้จากการประกาศคำเตือนสภาวะอากาศของกรมอุทกศาสตร์ ด้วยอิทธิพลเดียว คือ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ โดยทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบระหว่างช่วงวันที่มีการออกประกาศคำเตือนกับความสูงของระดับน้ำจริงทั้ง 4 สถานี ซึ่งผลการวิเคราะห์ในข้อมูลระยะเวลา 2 ปี (2563-2564) มีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน ถึงแม้ว่าจะไม่ได้แม่นยำในทุกๆ ครั้ง ที่มีการประกาศคำเตือน แต่ก็สามารถนำมาเพื่อใช้เป็นแนวทางในการแจ้งเตือนและเฝ้าระวังพื้นที่ที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเลได้

6. สรุปผลการศึกษา

6.1 การเกิด Storm Surge มีสาเหตุหลักจากการเคลื่อนตัวของพายุหมุนเขตร้อนหรือลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังแรงที่ทำให้ระดับน้ำทะเลสูงผิดปกติ (ภาวะน้ำทะเลหนุนสูงจากลมมรสุมที่มีลักษณะคล้ายกับ Storm Surge) ประกอบกับการเกิดน้ำทะเลหนุนสูงทำให้เกิดภาวะน้ำเอ่อล้นฝั่งหรือการยกตัวของมวลน้ำบริเวณชายฝั่ง ดังนั้น การพิจารณาการเกิด Storm Surge มีลักษณะที่ต้องแจ้งเตือนที่มีความสูงตั้งแต่ 4.15 เมตร โดยมีปัจจัยที่เกื้อกูล คือ พายุหมุนเขตร้อน ความรุนแรงของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และระดับน้ำทะเลหนุนโดยการคาดการณ์การเกิดได้จากการตรวจจับพายุหมุนเขตร้อน ด้วยภาพถ่ายดาวเทียมทางอุตุนิยมวิทยาและเครือข่ายสถานีตรวจอากาศ สำหรับลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และช่วงเวลาที่น้ำทะเลหนุนสามารถดูประกาศคำเตือนของกรมอุทกศาสตร์ที่ประกาศคำเตือนในเรื่องความรุนแรงของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้บริเวณฝั่งทะเลอันดามัน ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบช่วงเวลาที่ออกประกาศคำเตือนกับระดับน้ำจริงจาก 4 สถานี บริเวณฝั่งทะเลอันดามัน มีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน หากเกิดขึ้นในระดับที่มีกำลังแรงถึงกำลังค่อนข้างแรงโอกาสที่จะเกิด Storm Surge ก็จะมีโอกาสเกิดขึ้นได้มาก

6.2 การเกิด Storm Surge จากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ โดยมี 3 ปัจจัย ที่มีนัยสำคัญในกรณีที่มีพายุบริเวณฝั่งทะเลอันดามัน ประกอบกับลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังแรง และเป็นช่วงที่น้ำทะเลหนุน หากทั้ง 3 ปัจจัย มีการเกื้อกูลกันในลักษณะเช่นนี้จะทำให้มีโอกาสเกิด Storm Surge ได้ 70-80% หากปัจจัยไม่ครบ เช่น เกิดพายุหมุนประกอบกับลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังแรง หรือเกิดพายุหมุนประกอบกับน้ำทะเลหนุน ในลักษณะเช่นนี้ โอกาสการเกิด Storm Surge ค่อนข้างน้อย 30-40% เนื่องจากองค์ประกอบการเกิดพายุ มีหลายปัจจัย ทำให้ทิศทางและความแรงของพายุเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา คาดการณ์ได้ยาก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าหากเกิดพายุในบริเวณนั้นไม่จำเป็นที่จะเกิด Storm Surge เสมอไป แต่ในกรณีปัจจัยลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังแรงประกอบกับน้ำทะเลหนุนสูง ในลักษณะเช่นนี้โอกาสการเกิด Storm Surge มีมากถึง 50-60% เนื่องจากลักษณะทิศทางของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่ค่อนข้างมีความแน่นอน หากเปลี่ยนแปลงทิศทางก็ยังคงเปลี่ยนแปลงไม่มาก ทำให้ปัจจัยในเรื่องลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะมีอิทธิพลมากกว่าในเรื่องของพายุที่เกิดขึ้น สำหรับแนวทางการเตือนภัยเพื่อป้องกันภัยจาก Storm Surge โดยสิ่งแรกคือเมื่อมีการออกประกาศคำเตือน ความรุนแรงของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ทำให้มีโอกาสอาจจะเกิด Storm Surge เพิ่มขึ้นและต้องเฝ้าติดตามการเปลี่ยนแปลงของประกาศคำเตือนในกรณีที่ได้รับข้อมูล การเปลี่ยนแปลงระดับความแรงที่เพิ่มขึ้น และตรวจสอบช่วงเวลาของการหนุนของระดับน้ำทะเล (ช่วงกลางเดือนและปลายเดือน) ต้องแจ้งเตือนผู้ที่อาศัยอยู่บริเวณตามชายฝั่งทะเล ท่าเรือ และแหล่งท่องเที่ยวต่าง ๆ เพื่อทำการเพิ่มมาตรการในเรื่องความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สินที่มากกว่าเดิมต่อไป

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 Storm Surge เป็นภัยธรรมชาติที่ทำความเสียหายให้แก่ชีวิตและทรัพย์สินเป็นจำนวนมาก แต่อาจไม่ได้เกิดขึ้นบ่อยครั้ง และอาจไม่คุ้มค่าสำหรับการใช้งบประมาณมากในการป้องกัน ดังนั้น ควรพิจารณาความสำคัญของพื้นที่ในการดำเนินการตามศักยภาพและสถานภาพที่เอื้ออำนวย และควรหลีกเลี่ยงการใช้ประโยชน์ที่ดินบริเวณชายฝั่งพื้นที่เสี่ยงภัย หากมีการก่อสร้างอาคารบ้านเรือนหรือสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ ควรนำปัจจัยความรุนแรงของ Storm Surge มาประกอบการออกแบบเพื่อให้เกิดความแข็งแรงทนทานในกรณีเกิดภัยขึ้น

7.2 ควรให้การศึกษาและความรู้แก่ประชาชนที่อาศัยในพื้นที่ โดยการจัดทำแผ่นพับและข้อปฏิบัติต่าง ๆ ติดไว้ประจำบ้าน พร้อมทั้งการจัดทำรายการตรวจสอบความพร้อมประจำบ้านสำหรับตรวจสอบของใช้สำหรับหนีภัย และควรมีฝึกซ้อมการอพยพหนีภัยทั้งบนและในทะเลอย่างน้อยปีละ 1-2 ครั้ง

7.3 ควรติดตามสถานการณ์ภัยพิบัติอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะหากมีคำเตือนเรื่องการเกิดพายุหมุนเขตร้อนในทะเลจีนใต้หรือการเกิดลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังแรงที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อชายฝั่งบริเวณฝั่งทะเลอันดามัน

8. ประโยชน์ที่จะได้รับ

8.1 สามารถนำผลวิจัยไปใช้พัฒนาขีดความสามารถในการแจ้งเตือนและป้องกันภัยจากคลื่นพายุซัดฝั่ง

8.2 สามารถนำผลวิจัยไปเป็นข้อมูลอ้างอิงแจ้งเตือนและป้องกันภัยจากคลื่นพายุซัดฝั่งบริเวณพื้นที่เสี่ยงภัยอื่นๆ ต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] คลื่นพายุซัดฝั่ง...สตอร์ม เซิร์จ [อินเทอร์เน็ต]. [ม.ป.ป.] [เข้าถึงเมื่อ 11 พ.ค. 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://rtnakm.com/wpcontent/uploads/2019/03/คลื่นพายุซัดฝั่ง-3.pdf>
- [2] สารคดีบันทึก : ไซโคลนนาร์กิส โศกนาฏกรรมบนลุ่มอิรวดี [อินเทอร์เน็ต]. 2562 [เข้าถึงเมื่อ 29 เม.ย.2567]. เข้าถึงได้จาก: https://www.sarakadee.com/2009/07/27/nargis/#google_vignette
- [3] สิริรักษณ์ บุญเย็น, สันติ ภัยหลบลี้. คลื่นพายุซัดฝั่ง [อินเทอร์เน็ต]. 30 เม.ย. 2564 [เข้าถึงเมื่อ 29 มิ.ย. 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.mitrearth.org/4-15-storm-surge/>
- [4] วริศรา จารุวรรณ. รายงาน IPCC ฉบับใหม่เผยข้อมูลผลกระทบและความเสี่ยงจาก Climate Change ต่อปัญหาสุขภาพปัจจุบัน [อินเทอร์เน็ต]. 24 มี.ค. 2565 [เข้าถึงเมื่อ 29 มิ.ย. 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.sdgmovement.com/2022/03/24/ipcc-sixth-assessment-report-impacts-on-health-and-wellbeing/>
- [5] สำนักงานเลขาธิการป้องกันภัยฝ่ายพลเรือน. แผนป้องกันภัยฝ่ายพลเรือนแห่งชาติ พ.ศ.2548 ภาคการป้องกันภัยฝ่ายพลเรือนด้านความมั่นคง (ภาคการพิทักษ์พื้นที่ส่วนหลัง) [อินเทอร์เน็ต]. [ม.ป.ป.] [เข้าถึงเมื่อ 3 ก.ค. 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://e-library.moc.go.th/book-detail/6949>
- [6] กรมอุตุนิยมวิทยา. เส้นทางเดินพายุ [อินเทอร์เน็ต]. กรมอุตุนิยมวิทยา; 2568 [เข้าถึงเมื่อ 3 ก.ค. 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://tmd.go.th/weatherWidget/StromTrack>
- [7] กรมอุตุนิยมวิทยา กองทัพเรือ. ระดับน้ำทำนาย สูงสุด – ต่ำสุด ปี พ.ศ.๒๕๖๘ [อินเทอร์เน็ต]. กรมอุตุนิยมวิทยา กองทัพเรือ; 2568 [เข้าถึงเมื่อ 5 ก.ค. 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.hydro.navy.mi.th/servicetide.html>
- [8] สำนักงานเลขาธิการคณะกรรมการจัดการความรู้เพื่อผลประโยชน์แห่งชาติทางทะเล (อจชล.). อาณาเขตทางทะเล [อินเทอร์เน็ต]. สำนักงานเลขาธิการคณะกรรมการจัดการความรู้เพื่อผลประโยชน์แห่งชาติทางทะเล (อจชล.); [ม.ป.ป.] [เข้าถึงเมื่อ 23 มิ.ย. 2567]. เข้าถึงได้จาก: https://www.mkh.in.th/index.php?option=com_content&view=article&id=47&Itemid=153&lang=th
- [9] Brown BE. Coral reefs of the Andaman Sea - An integrated perspective. In: Oceanography and Marine Biology. Vol 45. 2007. p. 173-94. doi:10.1201/9781420050943.ch5
- [10] Amki Green. คลื่นพายุซัดฝั่ง (Storm surge) กับ สึนามิ (Tsunami) ต่างกันอย่างไร [อินเทอร์เน็ต]. true ปูปลูกปัญญา; 3 ส.ค. 2561 [เข้าถึงเมื่อ 7 ก.ค. 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.truelookpanya.com/knowledge/content/68149/-blo-sciar-sci>

- [11] Storm surge and sea flooding wind and pressure components - tropical cyclones [Internet]. [cited 2024 July 13]. Available from: <https://www.briangwilliams.us/tropical-cyclones/storm-surge-and-sea-flooding-wind-and-pressure-components.html>
- [12] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. ระดับน้ำสูงขึ้นโดยพายุ [อินเทอร์เน็ต]. 31 ธ.ค. 2566 [เข้าถึงเมื่อ 23 ก.ค. 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://th.wikipedia.org/wiki/ระดับน้ำสูงขึ้นโดยพายุ>
- [13] กรมอุตุนิยมวิทยา. สภาพอากาศของประเทศไทย [อินเทอร์เน็ต]. กรมอุตุนิยมวิทยา; 2568 [เข้าถึงเมื่อ 25 ก.ค. 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.tmd.go.th/weather/weatherthailand>
- [14] กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. สมุทรศาสตร์ : ข้อมูลสมุทรศาสตร์ฝั่งอันดามัน [อินเทอร์เน็ต]. กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง; 1 ส.ค. 2556 [เข้าถึงเมื่อ 16 มิ.ย. 2568]. เข้าถึงได้จาก: https://km.dmcr.go.th/c_263/d_1137
- [15] DAS PK. Monsoons (Fifth IMO lecture) [Internet]. World Meteorological Organization; 1986 [เข้าถึงเมื่อ 16 มิ.ย. 2568]. เข้าถึงได้จาก: <https://library.wmo.int/viewer/37019#page=173&viewer=picture&o=bookmarks&n=0&q=>

เทคนิคการกำหนดเขตแดนทางทะเลด้วยวิธีการอัตราส่วนเท่าระหว่างไทย-กัมพูชา

เหนือละติจูด 11 องศาเหนือ

Technical Aspects by Equal-Circumstances for Delimitation between Thailand – Cambodia above Latitude 11 N.

สมาน ได้รายรัมย์^{1*}

Samharn Dairairam^{1*}

Received: April 30, 2025

Revised: July 1, 2025

Accepted: July 1, 2025

บทคัดย่อ

ไทยและกัมพูชาต่างฝ่ายต่างประกาศเขตไหล่ทวีปในอ่าวไทย ส่งผลให้เกิดเป็นพื้นที่อ้างสิทธิทับซ้อนทางทะเลระหว่างกัน ไทยและกัมพูชาพร้อมกันหาทางแก้ปัญหาดังกล่าวอย่างต่อเนื่อง ทั้งสองฝ่ายได้ร่วมกันลงนามในบันทึกความเข้าใจระหว่างรัฐบาลแห่งราชอาณาจักรไทยกับรัฐบาลแห่งราชอาณาจักรกัมพูชาว่าด้วยพื้นที่ที่ไทยและกัมพูชาอ้างสิทธิในไหล่ทวีปทับซ้อนกัน เมื่อ 18 มิถุนายน 2544 (MOU 2544) สาระสำคัญของ MOU 2544 คือเจตนารมณ์ที่จะการเจรจาจัดทำความตกลงสำหรับการบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติที่ไม่มีชีวิตร่วมกัน และการตกลงแบ่งเขตแดนทางทะเล การดำเนินการดังกล่าวต้องดำเนินการไปพร้อมกันไม่อาจแบ่งแยกได้ การแบ่งพื้นที่อ้างสิทธิทับซ้อนออกเป็นสองส่วนเป็นไปตามเอกสารแนบท้าย ส่วนแรกคือพื้นที่เหนือละติจูด 11 องศาเหนือ ให้ทั้งสองฝ่ายทำการแบ่งเขตแดนทางทะเลระหว่างกัน ส่วนที่สองคือพื้นที่ใต้ละติจูด 11 องศาเหนือ ให้จัดทำเป็นพื้นที่พัฒนาร่วม วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อหาแนวทางในการกำหนดเขตแดนทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชา โดยยึดถือสาระของ MOU 2544 คือการกำหนดเขตแดนทางทะเลในพื้นที่เหนือละติจูด 11 องศาเหนือ การดำเนินการวิจัย ประกอบด้วยการนำผลการตัดสินของศาลยุติธรรมระหว่างประเทศ (International Court of Justice: ICJ) และศาลกฎหมายทะเลระหว่างประเทศ (International Tribunal for the Law of the Sea: ITLOS) ในกรณีที่มีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกับกรณีระหว่างไทยและกัมพูชา สามารถ

^{1*}ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กองวิชาวิศวกรรมอุทกศาสตร์ ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

Assistant Professor, Department of Hydrographic Engineering, Academic Branch, Royal Thai Naval Academy.

Email: samharn92@yahoo.com

*Corresponding Author

นำมาเทียบเคียงเพื่อใช้ศึกษาเป็นแนวทาง และใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System : GIS) เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ปัจจัยและองค์ประกอบทางกายภาพ เช่น ทิศทางทั่วไปของชายฝั่ง ความยาวของชายฝั่งที่เกี่ยวข้อง เพื่อกำหนดพื้นที่ที่เกี่ยวข้องในการกำหนดเขตแดนทางทะเล และการกำหนดพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลที่สัมพันธ์กัน จากนั้นจะนำไปสู่การกำหนดเขตแดนทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชา บนข้อมูลและปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ตามหลักกฎหมายระหว่างประเทศและลักษณะทางกายภาพของชายฝั่ง ทำให้การแบ่งเขตแดนทางทะเลมีความเที่ยงธรรมต่อทั้งสองฝ่าย ทั้งนี้เขตทางทะเลที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ อยู่บนพื้นฐานของปัจจัยทางกายภาพที่มีความเป็นรูปธรรม สามารถลดช่องว่างของความเห็นต่างในการกำหนดพื้นที่ทับซ้อนทางทะเล และส่งเสริมความเที่ยงธรรมในการกำหนดเขตทางทะเลซึ่งเป็นจุดประสงค์ของ UNCLOS 1982

งานวิจัยนี้เป็นเพียงผลการวิเคราะห์และประมวลผลของผู้วิจัย โดยการใช้สภาวะแวดล้อมทางกายภาพเป็นข้อมูลหลักในการวิจัยเท่านั้น มิได้นำปัจจัยด้านอื่นๆ เช่น หลักฐานทางประวัติศาสตร์ หรือสภาวะแวดล้อมทางสังคมมาประกอบการพิจารณา ดังนั้นผลที่ได้เป็นเพียงความเห็นของผู้วิจัยเท่านั้น

คำสำคัญ: ไหล่ทวีป, พื้นที่อ้างสิทธิทับซ้อน, รูปธรรม, ความเที่ยงธรรม

Abstract

Thailand and Cambodia have claimed continental shelf unilaterally in Gulf of Thailand resulting overlapping claim area. Negotiation between Thailand and Cambodia is contiguous. Presently, the still agreement is the Memorandum of Understanding between the Royal Government of Cambodia and the Royal Thai Government regarding the Area of their Overlapping Maritime Claims to the Continental Shelf, named as Overlapping Claims Area (OCA), done on 18 June B.E. 2554 (MOU 2544). This research aims at finding solution for maritime delimitation between Thailand and Cambodia based on MOU 2544 that the delimitation is above latitude 11 north. The research begins with case study from International Court of Justice (ICJ) and International Tribunal for the Law of the Sea (ITLOS). Geographic Information System (GIS) is the tool for analysis the input data which are topographic information such as general direction of the coast, relevant coastline for finding the relevant area. The overlapping area to be delimited is from the relevant area. The overlapping area stemmed from the relevant area is to lower the different aspects for defining overlapping independently. The maritime area from the research is equitable because the input data, topographic information, is subjective. This research strengthens the equitable solution for delimitation in UNCLOS 1982.

The research is from author's analysis based on geographic circumstances. The other circumstances such as historic title and socialites are none for analysis. The results is the author's opinion only.

Keywords: Continental Shelf, Overlapping Claims Area, Subjective, Equitable Solution

1. บทนำ

อนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยกฎหมายทะเล ค.ศ.1982 (United Nations Convention on the Law of the Sea 1982 : UNCLOS 1982) บัญญัติให้การแบ่งเขตแดนทางทะเลระหว่างรัฐชายฝั่งต้องบรรลุผลแห่งความเที่ยงธรรม คำนึงถึงสถานะแวดล้อมพิเศษและหลักฐานทางประวัติศาสตร์ [1] ไทยและกัมพูชาต่างฝ่ายต่างประกาศไหล่ทวีปในอ่าวไทย แต่ละฝ่ายมีเหตุผลในการประกาศที่แตกต่างกันส่งผลให้เกิดเป็นพื้นที่อ้างสิทธิทับซ้อนทางทะเลขึ้น ทั้งนี้ไทยและกัมพูชาได้เจรจาหาข้อยุติระหว่างกันมาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้จัดทำบันทึกความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นที่อ้างสิทธิในไหล่ทวีปทับซ้อนกัน (Memorandum of Understanding between the Royal Government of Cambodia and the Royal Thai Government Regarding the Area of their Overlapping Maritime Claims to the Continental Shelf : MOU 2544) ที่กำหนดพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลออกเป็น 2 ส่วน โดยใช้เส้นละติจูด 11 องศาเหนือ เป็นเส้นแบ่ง สาระสำคัญใน MOU 2544 กำหนดให้พื้นที่

เหนือละติจูด 11 องศาเหนือ ให้ทำการแบ่งเขตทางทะเล และได้ละติจูด 11 องศาเหนือ ให้จัดทำเป็นพื้นที่พัฒนาร่วม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางในการกำหนดเขตทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชาบริเวณเหนือละติจูด 11 องศาเหนือ การนำข้อมูลเชิงกายภาพที่เกี่ยวข้องทั้งของไทยและของกัมพูชา มาเทียบเคียงกับผลการตัดสินของศาลยุติธรรมระหว่างประเทศ (International Court of Justice: ICJ) และศาลกฎหมายทะเลระหว่างประเทศ (International Tribunal for the Law of the Sea: ITLOS) จากนั้นนำองค์ประกอบทางกายภาพมาหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชา และทำการวิเคราะห์การแบ่งเขตแดนทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชา ด้วยการใช้เครื่องมือสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) สำหรับการวิเคราะห์และประมวลผลนั้นจะใช้องค์ประกอบทางกายภาพเพียงเท่านั้น เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่ทั้งสองฝ่ายมีร่วมกัน จะไม่นำองค์ประกอบที่มีความเห็นต่างกัน เช่น หลักฐานทางประวัติศาสตร์ สภาวะแวดล้อมทางสังคม เนื่องจากมีความเป็นนามธรรมและต่างฝ่ายต่างตีความแตกต่างกัน มาเป็นองค์ประกอบในการวิเคราะห์และประมวลผล ผลที่ได้นั้นจะมีความเที่ยงธรรมตามปัจจัยแวดล้อมทางกายภาพที่มีความเป็นรูปธรรม

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อระบุพื้นที่ทับซ้อนที่เกิดจากปัจจัยทางกายภาพเท่านั้น ซึ่งจะช่วยลดช่องว่างของความเห็นต่างในการกำหนดพื้นที่ทับซ้อนทางทะเล

2.2 เพื่อศึกษาแนวทางการแบ่งเขตแดนทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชาในบริเวณพื้นที่อ้างสิทธิทับซ้อนกันของไหล่ทวีปเหนือละติจูด 11 องศาเหนือ โดยใช้องค์ประกอบทางกายภาพที่มีร่วมกันเป็นปัจจัยในการวิเคราะห์และประมวลผล

2.3 เพื่อหาแนวทางการแบ่งเขตแดนทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชาที่บรรลุผลแห่งความเที่ยงธรรมที่ใช้ปัจจัยการพิจารณาที่มีความเป็นรูปธรรม

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

UNCLOS 1982 บัญญัติให้การกำหนดเขตทางทะเลระหว่างรัฐต้องบรรลุผลแห่งความเที่ยงธรรม เอกสารและงานวิจัยที่นำมาเป็นข้อมูลและปัจจัยในการวิเคราะห์หาแนวทางในการกำหนดเขตทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชาประกอบด้วย

3.1 ผลการพิจารณาตัดสินเขตแดนทางทะเลของ ICJ ประกอบด้วย กรณีระหว่างโรมาเนีย-ยูเครน กรณีระหว่างนิการากัว-โคลัมเบีย

3.2 ผลการพิจารณาตัดสินเขตแดนทางทะเลของ ITLOS กรณีระหว่างบังคลาเทศ-เมียนมา

3.3 คู่มือเทคนิคกฎหมายทะเล (Technical Aspects for the Law of the Sea: TALOS) ของคณะที่ปรึกษาด้านเทคนิคกฎหมายทะเล (Advisory Board for the Law of the Sea: ABLOS) ภายใต้องค์การอุทกศาสตร์สากล (International Hydrographic Organization: IHO)

3.4 ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) สำหรับใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และประมวลผล เช่น การกำหนดทิศทางทั่วไปของชายฝั่ง ตามแนวหรือทิศทางของ Coastal Front การคำนวณหาพื้นที่ทางทะเล เป็นต้น

4. วิธีดำเนินการศึกษา

เพื่อให้สอดคล้องกับบันทึกความเข้าใจว่าด้วยพื้นที่อ้างสิทธิในไหล่ทวีปทับซ้อนกันระหว่างไทยและกัมพูชาและไม่ส่งผลกระทบต่อท่าทีในการเจรจาของทั้งสองฝ่าย งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและวิเคราะห์เพื่อการแบ่งเขตแดนทางทะเลที่ไทยและกัมพูชาประกาศอ้างสิทธิในไหล่ทวีปทับซ้อนกันเฉพาะพื้นที่ที่อยู่เหนือละติจูด 11 องศาเหนือ เท่านั้น ค่าพิกัดที่ได้จากการวิจัยนี้จะอ้างอิงบนมูลฐานทางราบ WGS84 และถือว่าค่าพิกัดของจุดเริ่มต้นในการประกาศไหล่ทวีปทั้งของไทยและของกัมพูชาไม่ส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์และประมวลผลเนื่องจากค่าพิกัดดังกล่าวกำหนดบนแผนที่มาตราส่วนเล็ก จากนั้นทำการศึกษาผลการตัดสินการกำหนดเขตแดนทางทะเลของ ICJ และ ITLOS ได้แก่ ผลการพิจารณาตัดสินเขตทางทะเลระหว่างโรมาเนีย-ยูเครน [2] กรณีระหว่างนิการากัว-โคลัมเบีย [3] และกรณีระหว่างบังคลาเทศ-เมียนมา [4] สามารถสรุปขั้นตอนการศึกษาได้ดังนี้

4.1 การศึกษาวิธีการและการกำหนดพื้นที่ที่เกี่ยวข้องในการกำหนดเขตแดนทางทะเลจาก ABLOS

4.1.1 การนำทิศทางทั่วไปของชายฝั่ง (General Direction of the Coast : GD) มาพิจารณาประกอบการแบ่งเขตแดนทางทะเลได้ถูกระบุว่า “ทิศทางทั่วไปของชายฝั่งคือชุดของเส้นตรงที่ต่อเชื่อมระหว่างชายฝั่งธรรมชาติ และความยาวของเส้นตรงแต่ละส่วนจะถูกนำมารวมกันเพื่อใช้เป็นความยาวของทิศทางทั่วไปของชายฝั่ง ซึ่งสามารถพิจารณาได้ 2 รูปแบบ คือ แบบที่ 1 คือ GD แบบเป็นส่วนหลาย ๆ ส่วนรวมกันหรือ แบบที่ 2 คือ การใช้เส้นตรงแทนทิศทางทั่วไปของชายฝั่งในภาพรวม โดย GD จะสะท้อนเฉพาะทิศทางของชายฝั่งที่ ‘หันหน้า’ ไปยังพื้นที่ที่กำหนด” [5, น.113] นอกจากนี้ในการพิจารณากำหนดเขตแดนทางทะเลระหว่างนิการากัวและฮอนดูรัส พบว่าการกำหนด GD ในการพิจารณานั้น สอดคล้องกับวิธีการของ ABLOS เนื่องจาก ICJ พิจารณาลักษณะทั่วไปของชายฝั่งในกรณีดังกล่าว คือเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างจุดสองจุดบนชายฝั่ง [6, น.92]

4.1.2 การกำหนดพื้นที่ที่เกี่ยวข้องในการกำหนดเขตทางทะเล เป็นขั้นตอนในการพิจารณาหาพื้นที่ที่เกี่ยวข้องทางทะเลของแต่ละฝ่ายที่ส่งผลให้เกิดเป็นพื้นที่ทับซ้อนทางทะเล โดยใช้หลักการของ Land Dominate the Sea [5] การกำหนดพื้นที่ที่เกี่ยวข้องในการกำหนดเขตทางทะเลนั้น จะส่งผลต่อเนื่องกับเขตทางทะเลที่อยู่ประชิดติดกัน เขตทางทะเลที่วัดออกจากแผ่นดินนั้นจะประกอบด้วย น่านน้ำภายใน (กรณีแต่ละฝ่ายมีการประกาศเส้นฐานตรง) ทะเลอาณาเขต เขตต่อเนื่อง และเขตเศรษฐกิจจำเพาะ

งานวิจัยนี้จะใช้เส้นฐานปกติหรือแนวน้ำลงต่ำเป็นจุดเริ่มต้นในการวัดความกว้างของอาณาเขตทางทะเลออกไปในทะเล ระยะที่วัดออกไปนั้นจะมีระยะทางประมาณ 45 ไมล์ทะเล คือระยะที่วัดจากแนวน้ำลงต่ำไปละติจูด 11 องศาเหนือ

4.2 ศึกษาและวิเคราะห์ผลการตัดสินการกำหนดเขตทางทะเลของ ICJ และ ITLOS อันประกอบด้วยกรณีระหว่างโรมาเนีย-ยูเครน [2] กรณีระหว่างนิการากัว-โคลัมเบีย [3] และกรณีระหว่างบังคลาเทศ-เมียนมา [4] สรุปได้ว่าผลการตัดสินทั้งจากของ ICJ และ ITLOS นั้น แม้อัตราส่วนทางกายภาพอันได้แก่ ความยาวของชายฝั่งที่นำมาพิจารณาจะไม่สอดคล้องกับอัตราส่วนของพื้นที่ทางทะเลที่แต่ละฝ่ายได้รับ สุดท้ายทั้ง ICJ และ ITLOS สรุปว่าผลการพิจารณาบรรลุผลแห่งความเที่ยงธรรม

4.3 การกำหนดเขตแดนทางทะเลระหว่างไทย-กัมพูชา เหนือละติจูด 11 องศาเหนือ โดยนำหลักการตามข้อ 4.1 และแนวทางตามข้อ 4.2 มาเป็นปัจจัยในการกำหนดเขตแดนทางทะเล สำหรับการวิเคราะห์และประมวลผลเพื่อกำหนดเขตทางทะเลระหว่างไทย-กัมพูชา นั้น เป็นการนำโปรแกรมด้านภูมิสารสนเทศ (Geographic Information System: GIS) มาเป็นเครื่องมือในการระบุค่าพิกัดและคำนวณหาพื้นที่

4.3.1 การหาพื้นที่ที่เกี่ยวข้อง (Relevant Area) เพื่อใช้เป็นองค์ประกอบเริ่มต้นในการหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเล (Overlapping Area) พื้นที่ที่เกี่ยวข้องจะต้องมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ทับซ้อนทางทะเล กล่าวคือ พื้นที่ที่เกี่ยวข้องส่งผลให้เกิดพื้นที่ทับซ้อนทางทะเล ทั้งนี้พื้นที่ที่เกี่ยวข้องและพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลจะมีระยะและขนาดเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับระยะของอาณาเขตทางทะเลที่ต้องการกำหนดเขตทางทะเลระหว่างรัฐชายฝั่ง สำหรับในงานวิจัยนี้จะกำหนดไว้เฉพาะพื้นที่ที่อยู่ระหว่างแผ่นดินลงไปจนถึงเส้นละติจูด 11 องศาเหนือเท่านั้น ความสำคัญของพื้นที่ทับซ้อนในการกำหนดเขตทางทะเลนั้น เพื่อเป็นการระบุขอบเขตของเขตแดนทางทะเลว่า จะต้องอยู่ภายในพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นที่ที่เกี่ยวข้องในการกำหนดเขตแดนทางทะเลเท่านั้น หากเขตแดนทางทะเลอยู่นอกพื้นที่ดังกล่าวจะสามารถใช้เป็นสิ่งยืนยันได้ว่าเขตแดนทางทะเลที่แต่ละฝ่ายกำหนดขึ้นมานั้นไม่สอดคล้องกับปัจจัยทางกายภาพที่เกี่ยวข้อง

4.3.2 การตรวจสอบความได้สัดส่วนของพื้นที่ที่แต่ละฝ่ายได้รับว่ามีสัดส่วนสอดคล้องกับปัจจัยที่นำมาพิจารณาเพื่อกำหนดเขตแดนทางทะเลหรือไม่ หากไม่สอดคล้องก็จะทำการปรับแต่งเส้นเขตแดนทางทะเลจนกว่าเขตแดนทางทะเลที่ทำการแบ่งนั้นจะบรรลุผลแห่งความเที่ยงธรรม โดยเขตแดนทางทะเลจะถูกกำหนดตามอัตราส่วนปัจจัยสถานะแวดล้อมทางภูมิศาสตร์ที่นำมาประกอบการพิจารณา เช่น อัตราส่วนของพื้นที่ที่เกี่ยวข้องในการกำหนดอาณาเขตทางทะเล อัตราส่วนความยาวของทิศทางทั่วไปของชายฝั่ง ทั้งนี้ปัจจัยทางกายภาพที่นำมาพิจารณานั้นจะต้องมีส่วนเกี่ยวข้องหรือสัมพันธ์ที่ส่งผลให้เกิดเป็นพื้นที่ทับซ้อนทางทะเล

5. ผลการศึกษา

5.1 พื้นที่ที่เกี่ยวข้องในการกำหนดเขตทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชา ได้จากการนำผลการตัดสินของ ICJ [2] และ ITLOS [4] มาทำการวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลเทคนิคตามที่ได้แนะนำไว้โดย IHO [5] ด้วยการกำหนดทิศทางทั่วไปของชายฝั่ง แล้วทำการถ่ายทอดทิศทางทั่วไปของชายฝั่งทั้งของไทยและของกัมพูชาไปในทิศทางตั้งฉากกับ GD ออกไปในทะเล การหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลไทย-กัมพูชา เริ่มจากการกำหนดทิศทางทั่วไปของชายฝั่ง (General Direction of the Coast) อันประกอบด้วยทิศทางทั่วไปของชายฝั่งจากจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกไทย-กัมพูชาไปยังอำเภอสตูล และ จุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกไทย-กัมพูชา ไปยัง จุดสิ้นสุดเขตแดนทางบก

กัมพูชา-เวียดนาม จากนั้นทำการฉายทอด (Projection) ออกไปในทะเลด้วยทิศทางตั้งฉากกับทิศทางทั่วไปของชายฝั่ง ซึ่งการฉายทอดดังกล่าวเป็นการนำหลักการของ Land Dominates the Sea ที่ปรากฏในผลการพิจารณาของ ICJ กรณีระหว่างโรมาเนีย-ยูเครน ที่อ้างอิงเกี่ยวกับ Land Dominates the Sea ในกรณีระหว่าง เยอรมัน-เดนมาร์ก-เนเธอร์แลนด์ ไว้ว่า “the land dominates the sea in such a way that coastal projections in the seaward direction generate maritime claims” [2, น.10] ส่งผลให้เกิดเป็นพื้นที่ทับซ้อนจากจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกออกมาในทะเลจนถึงละติจูด 11 องศาเหนือ มีพื้นที่คือ 823.51 ตร.กม. สำหรับไทยมีพื้นที่ที่เกี่ยวข้อง (Relevant Area) คือ 20,767.74 ตร.กม. (ไม่รวมพื้นที่ทับซ้อน) ส่วนฝ่ายกัมพูชามีพื้นที่ทับซ้อนคือ 18,608.96 ตร.กม. (ไม่รวมพื้นที่ทับซ้อน) คิดเป็นอัตราส่วน 1.11 : 1 (ไทย : กัมพูชา) ส่งผลให้เกิดเป็นพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลเมื่อประกอบทางกายภาพตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 พื้นที่ทับซ้อนทางทะเลระหว่างไทย-กัมพูชา

5.2 วิธีการต่าง ๆ ที่สามารถนำมาพิจารณากำหนดเขตแดนทางทะเลได้คือ

5.2.1 การแบ่งด้วยวิธีเส้นแบ่งครึ่งมุมหรือมุมเท่า (Bi - Sector / Equal - Angle) พื้นที่ทับซ้อนทางทะเลไทย-กัมพูชา มีลักษณะเป็นพื้นที่สามเหลี่ยม ทำการแบ่งครึ่งมุม ณ จุดเริ่มต้นในการกำหนดเขตแดนทางทะเล มีด้านประกอบมุมหรือแขนของมุมคือ ด้านของพื้นที่ที่เกี่ยวข้องในการกำหนดเขตแดนทางทะเลและทับซ้อนกัน ส่งผลให้เกิดเป็นพื้นที่สามเหลี่ยม

5.2.2 การแบ่งด้วยวิธีพื้นที่เท่า (Equal - Area)

5.2.3 การแบ่งด้วยวิธีระยะเท่า (Equal - Distance)

5.2.4 การแบ่งด้วยวิธีอัตราส่วนเท่า (Equal - Ratio) สำหรับการแบ่งด้วยวิธีการอัตราส่วนเท่านี้สามารถใช้องค์ประกอบทางกายภาพที่เกี่ยวข้องหรือส่งผลให้เกิดเป็นพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลมาพิจารณาได้ เช่น อัตราส่วนความยาวของทิศทางทั่วไปของชายฝั่งที่นำมาใช้หาพื้นที่ที่เกี่ยวข้อง อัตราส่วนความยาวชายฝั่งที่ใช้เป็นจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของทิศทางทั่วไปของชายฝั่ง สำหรับการวิจัยครั้งนี้จะใช้อัตราส่วนของพื้นที่ที่เกี่ยวข้องเป็นอัตราส่วนในการกำหนดเขตทางทะเล คือ 1.11: 1 (ไทย: กัมพูชา) โดยมีรูปในการแบ่งของแต่ละวิธีตามรูปที่ 2

	การกำหนดเขตทางทะเลระหว่างไทย-กัมพูชา ด้วยวิธี Bi - Sector ผลการพิจารณาคือ มุม A จะมีขนาดเท่ากับมุม B
	การกำหนดเขตทางทะเลระหว่างไทย-กัมพูชา ด้วยวิธี Equal - Area พื้นที่สีฟ้าจะมีขนาดพื้นที่เท่ากับพื้นที่สีเหลือง
	การกำหนดเขตทางทะเลระหว่างไทย-กัมพูชา ด้วยวิธี Equal - Distance บนเส้นละติจูด 11 องศาเหนือ ระยะทาง A และ B มีความยาวเท่ากัน

รูปที่ 2 วิธีการกำหนดเขตทางทะเลไทย-กัมพูชา ในรูปแบบต่าง ๆ

ด้วยข้อจำกัดการแสดงผลเนื่องจากอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกันและขนาดของพื้นที่แสดงผล การแสดงผลการกำหนดเขตทางทะเลระหว่างไทย-กัมพูชา ด้วยวิธี Equal - Ratio อัตราส่วนพื้นที่ระหว่าง คือ 1.11 : 1 จะมีความใกล้เคียงกับการกำหนดเขตทางทะเลระหว่างไทย-กัมพูชา ด้วยวิธี Equal - Area จะมีความแตกต่างในตำแหน่งของลองจิจูดคือ 0.0055 องศา

5.3 ขั้นตอนในการวิเคราะห์และประมวลผล ได้นำ GIS มาเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ ทหาระยะ พื้นที่ และการระบุพิกัด เมื่อนำผลการวิเคราะห์พื้นที่ที่ทับซ้อนทางทะเลไทย-กัมพูชา มากำหนดเขตแดนทางทะเล ด้วยวิธีการต่าง ๆ พบว่าได้ผลดังนี้

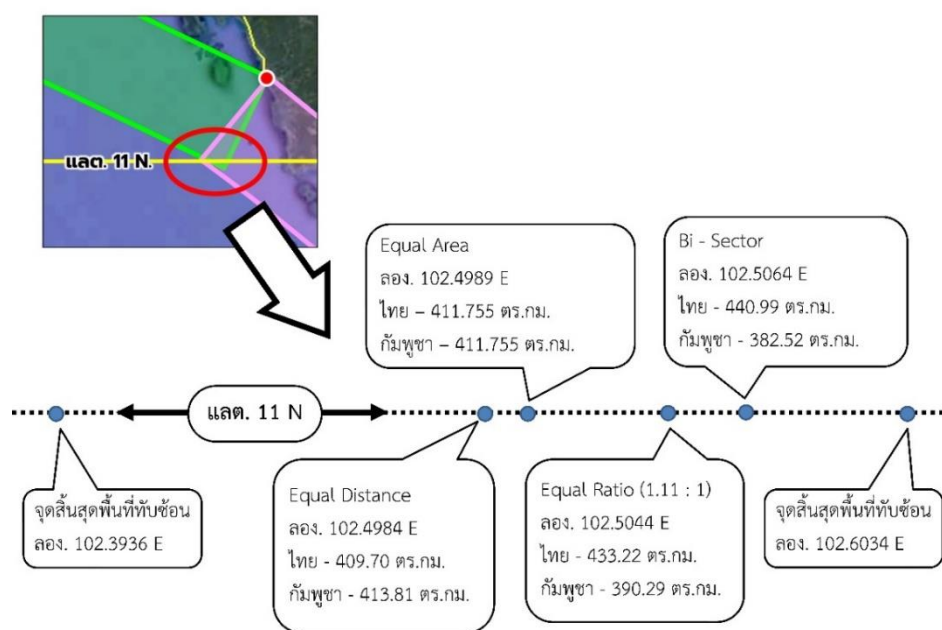
5.3.1 ผลการกำหนดเขตทางทะเลระหว่างไทย-กัมพูชา ด้วยวิธีการแบ่งครึ่งมุม (Bi - Sector) ซึ่งเป็นวิธีการทางเรขาคณิต เช่น การแบ่งครึ่งมุมของมุมใดมุมหนึ่งของสามเหลี่ยมใดๆ เส้นแบ่งครึ่งมุมจะรักษาทิศทาง และมีความยาวออกไปจนบรรจบกับเส้นละติจูด 11 องศาเหนือ ผลการวิเคราะห์พบว่าไทยจะมีพื้นที่ทางทะเล 440.99 ตร.กม. ส่วนกัมพูชาจะมีพื้นที่ทางทะเล 382.52 ตร.กม.

5.3.2 ผลการกำหนดเขตทางทะเลด้วยวิธีพื้นที่เท่า (Equal Area) คือการแบ่งพื้นที่ที่ทับซ้อนทางทะเล ออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน ผลการวิเคราะห์พบว่าพื้นที่ที่ทับซ้อนทางทะเลไทย-กัมพูชา มีขนาด 823.51 ตร.กม. ดังนั้นจะสามารถแบ่งพื้นที่ออกเป็น 2 ส่วน ๆ ละ 411.755 ตร.กม.

5.3.3 ผลการกำหนดเขตทางทะเลด้วยวิธีระยะเท่า (Equal Distance) คือการแบ่งความยาวที่ละติจูด 11 องศาเหนือ ออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน ความยาว ณ ละติจูด 11 องศาเหนือ จากด้านถึงด้านของพื้นที่ทับซ้อน มีความยาว 22.95 กม. ดังนั้นความยาวของแต่ละส่วนคือ 11.475 กม. ผลการวิเคราะห์ส่งผลให้ไทยมีพื้นที่ทางทะเลคือ 409.70 ตร.กม. ส่วนกัมพูชาจะมีพื้นที่ทางทะเลคือ 413.81 ตร.กม.

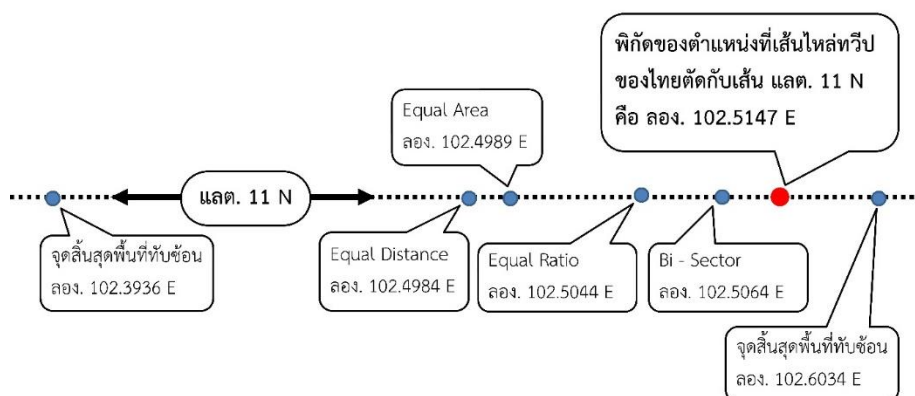
5.3.4 ผลการกำหนดเขตทางทะเลด้วยวิธี Equal - Ratio คือการนำอัตราส่วนของพื้นที่ที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดเขตทางทะเลมาเป็นสิ่งกำหนดอัตราส่วนพื้นที่ที่แต่ละฝ่ายจะได้รับ อัตราส่วนพื้นที่ที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดเขตทางทะเลคือ 1.11 : 1 (ไทย : กัมพูชา) พื้นที่ทับซ้อนมีขนาด 823.51 ตร.กม. ดังนั้นอัตราส่วนของพื้นที่ทับซ้อนที่สอดคล้องกับอัตราส่วนของพื้นที่ที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดเขตทางทะเลคือ 433.22 ตร.กม. : 390.29 ตร.กม.

5.4 การกำหนดเขตทางทะเลด้วยวิธีการต่าง ๆ ในข้อ 5.3 นั้น พบว่าแต่ละวิธีให้ผลแตกต่างกันไป วิธีที่เป็นคุณกับฝ่ายไทยมากที่สุดคือการกำหนดเขตทางทะเลในพื้นที่ทับซ้อนด้วยวิธีการ Bi - Sector ส่วนวิธีที่เป็นคุณกับกัมพูชามากที่สุดคือ Equal - Distance ทั้งนี้ผลการวิจัยและค่าพิกัดต่าง ๆ สามารถสรุปได้ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 ค่าพิกัดจุดกำหนดเขตทางทะเลระหว่างไทย-กัมพูชา ตามวิธีการต่าง ๆ

5.5 ประเทศไทยประกาศไหล่ทวีปด้านอ่าวไทย เมื่อ 18 พฤษภาคม 2516 [7] เมื่อนำเส้นไหล่ทวีปที่มีทิศทางจากจุดที่ 1 และจุดที่ 2 มาทำการพล็อตร่วมกับผลงานวิจัย พบว่าเส้นไหล่ทวีปของไทยอยู่ภายในพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลที่ทำการวิเคราะห์ได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นไหล่ทวีปของไทยนั้นมีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากอยู่ภายในพื้นที่ทับซ้อนที่เกิดจากการวิเคราะห์ของงานวิจัยในครั้งนี้ แม้ว่าตำแหน่งที่เส้นไหล่ทวีปของไทยที่ตัดกับเส้นละติจูด 11 องศาเหนือจะมีตำแหน่งที่เป็นคุณกับฝ่ายไทยสูงสุด แต่ตำแหน่งดังกล่าวก็ยังอยู่ในพื้นที่ทับซ้อน ซึ่งสอดคล้องกับที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 4.3.1 ค่าพิกัดที่ไหล่ทวีปของไทยตัดกับเส้นละติจูดที่ 11 องศาเหนือเป็นไปตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงตำแหน่งที่เส้นไหล่ทวีปของไทยตัดกับเส้นละติจูด 11 องศาเหนือ

6. สรุปและอภิปรายผล/ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยเพื่อกำหนดเขตแดนทางทะเลระหว่างไทย-กัมพูชา นั้น มีความหลากหลายขึ้นกับปัจจัยทางกายภาพที่นำมาวิเคราะห์ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างที่แต่ละฝ่ายได้รับ ปัจจัยที่นำมาประกอบการพิจารณาคือ การใช้วิธี Bi - Sector / Equal - Angle ฝ่ายไทยจะได้รับพื้นที่ 440.99 ตร.กม. ในขณะที่ปัจจัยที่เป็นคุณกับฝ่ายกัมพูชามากที่สุดคือการใช้วิธีการของ Equal Distance บนเส้นละติจูด 11 องศาเหนือ ฝ่ายกัมพูชาจะได้พื้นที่ 413.81 ตร.กม. มีความแตกต่างเชิงพื้นที่ 27.18 ตร.กม. และมีความต่างเชิงระยะบนเส้นละติจูด 11 องศาเหนือคือ 872.50 เมตร ซึ่งผลการวิจัยที่ได้นั้น สามารถสรุปและมีข้อเสนอแนะดังนี้

6.1 ผลที่ได้จากการวิจัยสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นตามรายละเอียดที่ได้มีการกำหนดใน MOU 2544 ได้ประการหนึ่งคือเอกสารแนบ ท้าย MOU 2544 ระบุว่า “Int 1 & Int 4 – location of respective meridians of longitude to be verified” [8] โดยจุด Int 4 คือจุดที่เส้นไหล่ทวีปของไทยตัดกับละติจูด 11 องศาเหนือ มีค่าพิกัดลองจิจูด คือ 102.5147 ตะวันออก หรือ 102 องศา 30 ลิปดา 52.82 ฟลิปดา ตะวันออก

6.2 ผลการวิจัยถือว่าบรรลุผลแห่งความเที่ยงธรรม ที่สามารถนำปัจจัยทางกายภาพที่มีความเป็นรูปธรรมที่มีร่วมกันอันได้แก่ ทิศทางทั่วไปของชายฝั่ง พื้นที่ที่เกี่ยวข้องในการกำหนดเขตแดนทางทะเล พื้นที่ทับซ้อนทางทะเลมาเป็นองค์ประกอบในการกำหนดเขตแดนทางทะเลระหว่างไทย – กัมพูชา ผลที่ได้สามารถอธิบายเป็นตัวเลขที่มีความชัดเจน สามารถปรับแต่งได้ตามปัจจัยที่นำมาพิจารณาร่วม

6.3 เขตทางทะเลที่ได้จากการวิเคราะห์และประมวลผลมีความหลากหลายแตกต่างตามปัจจัยที่นำมาพิจารณา ซึ่งส่งผลให้เกิดความเห็นต่างในการเลือกใช้ปัจจัยทางกายภาพที่นำมาพิจารณา แต่ละฝ่ายย่อมนำปัจจัยที่เห็นว่าเป็นคุณกับฝ่ายตนมาเป็นองค์ประกอบในการพิจารณากำหนดเขตทางทะเล

6.4 ความแตกต่างด้านพื้นที่ที่แต่ละฝ่ายได้รับมากที่สุดกับน้อยสุดคือ 27.18 ตร.กม. ข้อจำกัดด้านเทคนิคที่สำคัญคือมาตราส่วนของแผนที่ที่นำมาใช้เป็นองค์ประกอบพบว่าระยะระหว่างจุดบนเส้นละติจูด 11 องศาเหนือคือ ลองจิจูด 102.4984 ตะวันออก และ ลองจิจูด 102.5064 ตะวันออก แปลงเป็นระยะทางได้คือ 872.50 เมตร ข้อมูลเชิงระยะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การแสดงระยะทางดังกล่าวให้มีความยาว 1 มิลลิเมตร บนแผนที่กระดาษ จำเป็นต้องใช้แผนที่มาตราส่วนอย่างน้อยคือ 1 : 872,500 ดังนั้นการจัดเตรียมแผนที่มาตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อการระบุพิกัดจึงมีความสำคัญ หากยังไม่มีความพร้อมในเรื่องดังกล่าวก็สามารถให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องพิจารณาจัดเตรียมหรือแม้แต่การวางแผนสำรวจและสร้างแผนที่ในบริเวณดังกล่าวเป็นการเฉพาะ

6.5 การกำหนดเขตทางทะเลด้วยวิธีการ Equal - Ratio ในการวิจัยครั้งนี้ใช้อัตราส่วนของพื้นที่ที่เกี่ยวข้องของแต่ละฝ่าย ทั้งนี้การนำปัจจัยอื่นๆ มาเป็นข้อพิจารณาสำหรับวิธีการ Equal - Ratio สามารถกระทำได้เช่นกัน เช่น อัตราส่วนความยาวของเส้นทิศทางทั่วไปของชายฝั่ง อัตราส่วนความยาวของชายฝั่ง หรืออัตราส่วนของพื้นที่เกาะของแต่ละฝ่ายที่อยู่ในพื้นที่ที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดอาณาเขตทางทะเลก็สามารถทำได้ สิ่งสำคัญที่นำมาใช้เป็นปัจจัยในการกำหนดอัตราส่วนพื้นที่ที่แต่ละฝ่ายจะได้รับนั้นจะต้องอยู่ภายในพื้นที่ที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดเขตทางทะเลระหว่างกัน เช่น การนำเกาะที่อยู่นอกพื้นที่ที่เกี่ยวข้องมาร่วมพิจารณาไม่สามารถกระทำได้อย่างไ้วิธีตามการวิจัยนี้

6.6 ผลการวิจัยสามารถนำไปใช้ในการกำหนดอาณาเขตทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชาได้ในส่วนพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลที่อยู่ใต้ละติจูด 11 องศาเหนือ สามารถขยายพื้นที่ที่เกี่ยวข้องในการกำหนดอาณาเขตทางทะเลออกไป จนถึงระยะที่ทั้งสองฝ่ายมีความเห็นร่วมกัน สำหรับในกรณีนี้นั้น อาจจะนำมาใช้เมื่อทั้งสองฝ่ายมีความประสงค์ที่จะกำหนดอาณาเขตทางทะเลระหว่างกันให้ชัดเจนนอกเหนือจากการจัดทำพื้นที่พัฒนาร่วม

6.7 ผลที่ได้จากการวิจัย เป็นแนวทางที่พิจารณาตามหลักของ UNCLOS 1982 คือการบรรลุผลแห่งความเที่ยงธรรม ภายใต้องค์ประกอบที่มีความเป็นรูปธรรม

เอกสารอ้างอิง

- [1] United Nations, Division for Ocean Affairs and the Law of the Sea, Office of Legal Affairs. United Nations Convention on the Law of the Sea 1982 [Internet]. United Nations; 2001 [cited 4 Jul 2023]. Available from: https://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_e.pdf
- [2] International Court of Justice. Maritime Delimitation in the Black Sea (Romania v. Ukraine). Judgment; 2009 Feb 3.
- [3] International Court of Justice. Territorial and Maritime Dispute (Nicaragua v. Colombia). Judgment; 2012 Nov 19.
- [4] International Tribunal for the Law of the Sea. Dispute Concerning Delimitation of the Maritime Boundary between Bangladesh and Myanmar in the Bay of Bengal. Judgment; 2012 Mar 14. Hamburg: International Tribunal for the Law of the Sea.
- [5] International Hydrographic Organization. A MANUAL ON TECHNICAL ASPECTS OF THE UNITED NATIONS CONVENTION ON THE LAW OF THE SEA – 1982 (TALOS). Edition 6.0.0 [Internet]. International Hydrographic Organization; 2020 [cited 25 Dec 2023]. Available from: https://iho.int/uploads/user/pubs/cb/c-51/C_51_Ed600_052020.pdf
- [6] International Court of Justice. Territorial and Maritime Dispute between Nicaragua and Honduras in the Caribbean Sea (Nicaragua v. Honduras) [Internet]. International Court of Justice; [date unknown] [cited 15 Nov 2023]. Available from: <https://www.icj-cij.org/case/120>
- [7] กำหนดไหล่ทวีปของประเทศไทยด้านอ่าวไทย. ราชกิจจานุเบกษา 28 พ.ค. 2516; 90(60):1-4.
- [8] Memorandum of Understanding between the Royal Government of Cambodia and the Royal Thai Government regarding the Area of their Overlapping Maritime Claims to the Continental Shelf [Internet]. 2001 Jun 18 [cited 4 Jul 2023]. Available from: <https://cwcicambodia.net/wp-content/uploads/2024/12/mou-2001-between-cambodia-thailand.pdf>

การวิเคราะห์ระบบการประมวลผลสัญญาณสำหรับการป้องกันการปฏิบัติการ

ทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์โดยรอบฐานบิน

Analysis of Signal Processing System for Electronic Protection regarding the Air Base Security

วัชรพงศ์ เกตุปาน^{1*}

Watcharapong Ketpan^{1*}

Received: July 8, 2025

Revised: July 23, 2025

Accepted: July 29, 2025

บทคัดย่อ

เนื่องด้วยในการปฏิบัติการของอากาศยานไร้คนขับสำหรับภารกิจลาดตระเวนตรวจการณ์โดยรอบฐานบินนั้น จะต้องพึ่งพาระบบสื่อสารเป็นสำคัญ ทั้งระบบส่งภาพและระบบควบคุมการบิน การใช้งานสัญญาณสื่อสารและ/หรือสัญญาณที่ใกล้เคียงกันเป็นเหตุทำให้เกิดความเสียหายต่อสัญญาณสื่อสารของระบบอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งจะทำให้เกิดผลเสียต่อการปฏิบัติการกิจอย่างมาก งานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบระบบจำลองที่มีความสามารถในการจำลองการเกิดสัญญาณรบกวน โดยแบ่งสัญญาณรบกวนออกเป็นสองประเภท คือ สัญญาณรบกวนแบบไม่ตั้งใจและแบบตั้งใจ โดยให้มีการวางตำแหน่งของแหล่งกำเนิดด้วยหลักการสุ่มที่เรียกว่า Stochastic Geometry ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้ในการจำลองสัญญาณรบกวนทั้งในระบบสื่อสารไร้สายและระบบเรดาร์ยานยนต์อีกทั้งยังออกแบบให้สัญญาณ 2 ประเภทนี้มีลักษณะสำคัญต่างกัน

ผลที่ได้รับจากการทดลองพบว่าระบบสามารถจำลองให้เห็นผลกระทบของสัญญาณรบกวนทั้งสองประเภทได้ สอดคล้องกับสมมติฐานโดยมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อ้างอิงสามารถนำรูปแบบของค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนที่ได้เป็นค่าตั้งต้นในการกำหนดขอบล่างของระบบสื่อสารของอากาศยานไร้คนขับ อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังได้ทำการสาธิตการใช้งานของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวนต้นแบบด้วยอุปกรณ์วิทยุ

^{1*}ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโยธา กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Assistant Professor, Electrical and Civil Engineering Division, Academic Faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj
Royal Air Force Academy, Muaklek, Saraburi, 10180, Thailand.

Email: watcharapong_ketpan@rtaf.mi.th

*Corresponding Author

ซอฟต์แวร์ชนิดมีระบบฝังตัวแบบ USRP-E312 ซึ่งแสดงผลให้เห็นถึงประสิทธิภาพและความเหมาะสมในการนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นระบบที่ใช้งานได้จริงต่อไป

คำสำคัญ: อากาศยานไร้คนขับ, การประมวลผลสัญญาณ, สงครามอิเล็กทรอนิกส์, สัญญาณรบกวน, เรขาคณิตแบบสุ่ม

Abstract

In the operation of unmanned aerial vehicles (UAVs) for perimeter surveillance around airbases, communication systems are paramount, encompassing both video transmission and flight control. The presence of communication signals and/or similar signals can cause significant damage to the UAV's communication links, severely impacting mission performance. This research designs a simulation system capable of modeling signal interference, categorizing it into two types: unintentional and intentional interference.

The system employs stochastic geometry, a mathematical model widely used to simulate interference in both wireless communication systems and automotive radar systems, to randomly position interference sources. Furthermore, the two types of interference are designed to have distinct characteristics. Experimental results demonstrate that the system can effectively simulate the impact of both interference types, consistent with the initial hypotheses. The mathematical models employed provide a reference, allowing the obtained average interference values to serve as a baseline for defining the lower bounds of UAV communication systems. Additionally, this research showcases the use of a prototype interference detector utilizing an embedded software-defined radio (SDR) device, the USRP-E312. The results demonstrate its efficiency and suitability for further development into a practical, deployable system.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), Signal Processing, Electronic Warfare, Interference, Stochastic Geometry

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมา

การพัฒนาด้านเทคโนโลยีการป้องกันประเทศมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาความมั่นคงและอธิปไตยของชาติ โดยเฉพาะในมิติทางอากาศที่ต้องเผชิญกับภัยคุกคามที่ทวีความซับซ้อนมากขึ้น กรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกลาโหม กระทรวงกลาโหม ได้จัดทำความตกลงระหว่างราชอาณาจักรไทยและสหรัฐอเมริกา เพื่อส่งเสริมการแลกเปลี่ยนข้อมูลด้านการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) ทางด้านกลาโหม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเสริมสร้างความร่วมมือเชิงลึกและเชิงกว้างในการพัฒนาขีดความสามารถทางทหารของทั้งสองประเทศ ภายใต้ความตกลงดังกล่าว โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชและโรงเรียนนายเรืออากาศสหรัฐอเมริกาได้ร่วมมือในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจจับจากระยะไกล (Remote Sensing) เพื่อการป้องกันพื้นที่รอบฐานทัพ โดยมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลสัญญาณ

จากอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เรดาร์ (Radar), ไลดาร์ (LiDAR), และอุปกรณ์การภาพด้วยคลื่นวิทยุ (Radiotomography) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการเสริมสร้างระบบป้องกันทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Protection Systems)

นอกจากนี้ กองทัพอากาศไทยยังได้กำหนดยุทธศาสตร์และนโยบายเพื่อเสริมสร้างสมรรถนะทางทหาร โดยเฉพาะในด้านการวิจัยและพัฒนานวัตกรรมกำลังกองทัพอากาศ ตามประเด็นยุทธศาสตร์กองทัพอากาศที่ 2 และนโยบายของผู้บัญชาการทหารอากาศ (ผบ.ทอ.) ปี 2567-2568 ด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ (ICT&Cyber) ข้อ 6.2 เสริมสร้างขีดความสามารถการปฏิบัติการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum Operations: EMSO) ด้วยการพัฒนาศักยภาพเครื่องมือและรูปแบบการปฏิบัติการ EMSO ให้เท่าทันภัยคุกคาม ทั้งในปัจจุบันและอนาคต ซึ่งเน้นการส่งเสริมการพัฒนาสมรรถนะของกำลังพลผ่านการจัดการความรู้และการใช้เทคโนโลยีดิจิทัล เพื่อรองรับการพัฒนากำลังกองทัพอากาศในมิติทางอากาศ มิติไซเบอร์ และมิติอวกาศ ในการนี้ การปฏิบัติการ EMSO ประกอบด้วย การปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Warfare: EW) ซึ่งแบ่งได้เป็น การโจมตีทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Attack: EA), การป้องกันทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Protection: EP), การลาดตระเวนทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Surveillance: ES) และการจัดสรรคลื่นความถี่ (Spectrum Management) ถือเป็นภัยคุกคามสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบป้องกันทางอากาศ โดยเฉพาะการรบกวนสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เรดาร์และอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicles: UAVs) ซึ่งอาจก่อให้เกิดความผิดปกติในการปฏิบัติการกิจ

1.2 ปัญหาและสาเหตุ

จากการศึกษาพบว่ากองทัพอากาศไทยยังคงประสบปัญหาหลายประการในการจัดการกับภัยคุกคามทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ ขาดองค์ความรู้และเทคโนโลยีในการออกแบบและผลิตระบบสงครามอิเล็กทรอนิกส์ด้วยตนเอง ทำให้ต้องพึ่งพาการจัดหาจากต่างประเทศ ซึ่งมีข้อจำกัดด้านงบประมาณและความยืดหยุ่นในการใช้งาน องค์ความรู้ด้านการรบกวนสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีการใช้เทคโนโลยีที่สามารถรบกวนการทำงานของอุปกรณ์ที่พึ่งพาสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เช่น การรบกวนสัญญาณอากาศยานไร้คนขับในฐานบิน ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติการกิจ กองทัพอากาศยังขาดบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญด้านสงครามอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงห้องปฏิบัติการที่ทันสมัยเพื่อสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาในด้านนี้ นอกจากนี้ กองทัพยังมีข้อจำกัดด้านงบประมาณและการบำรุงรักษา ซึ่งระบบป้องกันทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีอยู่ในปัจจุบันมีค่าใช้จ่ายสูง ทั้งในการจัดหาและการบำรุงรักษา ทำให้ไม่สามารถตอบสนองความต้องการได้อย่างเต็มที่

1.3 ความจำเป็นในการวิจัย

การวิจัยและพัฒนาระบบการประมวลผลสัญญาณเพื่อการป้องกันการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ โดยรอบฐานบินมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากการสร้างองค์ความรู้และเทคโนโลยี การวิจัยนี้จะช่วยสร้างองค์ความรู้และเทคโนโลยีด้านสงครามอิเล็กทรอนิกส์ให้กับกองทัพอากาศไทย ซึ่งจะส่งผลการพัฒนาขีดความสามารถทางทหารในระยะยาว การวิจัยนี้ยังเป็นการพัฒนาระบบป้องกันต้นแบบ ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนทั้งในรูปแบบที่ไม่ตั้งใจและการโจมตีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลสัญญาณ อีกทั้งยังสามารถส่งเสริมการถ่ายทอดความรู้และเทคโนโลยี ผลการวิจัยจะถูกนำไปใช้

ในการถ่ายทอดความรู้และเทคโนโลยีให้กับบุคลากรของกองทัพอากาศและเหล่าทัพอื่น ๆ เพื่อเสริมสร้างศักยภาพในการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยเหตุผลดังกล่าว การวิจัยนี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเสริมสร้างขีดความสามารถของกองทัพอากาศไทยในการรับมือกับภัยคุกคามทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ และการพัฒนาระบบป้องกันที่มีประสิทธิภาพเพื่อรักษาความมั่นคงของชาติในอนาคต

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อใช้ระบบจำลองในด้านการจัดการสัญญาณรบกวนเพื่อการประยุกต์ใช้ในงานด้านการป้องกันทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ในการปฏิบัติการโดยรอบฐานบินของกองทัพอากาศ

2.2 เพื่อวิจัยและพัฒนาระบบป้องกันทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ต้นแบบโดยใช้เทคนิคการจำกัดสัญญาณรบกวนด้วยเทคโนโลยีการประมวลผลสัญญาณที่เกี่ยวข้องและพัฒนาระบบสงครามอิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่าง ๆ ของกองทัพอากาศ

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ การประมวลผลสัญญาณเป็นหัวใจสำคัญที่ช่วยให้ระบบสามารถตรวจจับ วิเคราะห์ และตอบสนองต่อภัยคุกคามทางคลื่นความถี่วิทยุได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในบริเวณฐานบินที่มีความอ่อนไหวต่อการรบกวนสัญญาณจากภายนอก การพัฒนาระบบป้องกันที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องอาศัยการสร้างแบบจำลองสัญญาณรบกวนที่แม่นยำ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการรักษาความปลอดภัยของเครือข่ายการสื่อสาร หัวข้อนี้จะนำเสนอเนื้อหาที่เกี่ยวข้องโดยแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบการประมวลผลสัญญาณสำหรับการป้องกันภัยคุกคามทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์โดยรอบฐานบิน มีความหลากหลายและครอบคลุมทั้งด้านคณิตศาสตร์และวิศวกรรม โดยสามารถสรุปประเด็นหลักได้ดังนี้

3.1.1 ทฤษฎีเรขาคณิตแบบสุ่ม (Stochastic Geometry)

ทฤษฎีเรขาคณิตแบบสุ่ม [1] เป็นเครื่องมือเชิงสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงพื้นที่ของเครือข่ายการสื่อสารไร้สาย โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีความไม่แน่นอนสูง เช่น การกระจายตัวของอุปกรณ์รบกวนรอบฐานบิน หนึ่งในแนวคิดสำคัญของทฤษฎีนี้คือ กระบวนการจุดแบบปัวซอง (Poisson Point Process: PPP) ซึ่งใช้ในการจำลองตำแหน่งแบบสุ่มของตัวส่งสัญญาณรบกวนในพื้นที่ที่กำหนด ทฤษฎีนี้ช่วยให้สามารถประเมินความน่าจะเป็นของการกระจายตัวของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนในบริเวณฐานบินได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการออกแบบระบบป้องกันที่มีประสิทธิภาพ

3.1.2 การตรวจจับสเปกตรัม (Spectrum Sensing)

การตรวจจับสเปกตรัม [2] เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ในสภาพแวดล้อมเพื่อระบุการมีอยู่ของสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณจากผู้ใช้หลัก (Primary User) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมักใช้การ

ทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing) เช่น Generalized Likelihood Ratio Test (GLRT) ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำในการตรวจจับสัญญาณท่ามกลางสัญญาณรบกวนที่มีความซับซ้อน

3.1.3 การระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณ (Source Localization)

การระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอาศัยเทคนิค เช่น Time Difference of Arrival (TDOA) และ Angle of Arrival (AOA) [3] ซึ่งใช้หลักการทางเรขาคณิตและการประมวลผลสัญญาณเพื่อคำนวณพิกัดของตัวส่งสัญญาณ ทฤษฎีนี้ช่วยในการระบุตำแหน่งของภัยคุกคาม เช่น โดรนหรืออุปกรณ์รบกวนที่อาจปฏิบัติการใกล้ฐานบิน

3.1.4 การจำแนกประเภทของสัญญาณด้วยการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning-based Signal Classification)

การเรียนรู้เชิงลึก เช่น การใช้ Convolutional Neural Networks (CNNs) และ Recurrent Neural Networks (RNNs) เป็นทฤษฎีที่ทันสมัยในการจำแนกประเภทสัญญาณ โดยอาศัยการวิเคราะห์รูปแบบของสัญญาณผ่านฟังก์ชันการสูญเสีย ทฤษฎีนี้ช่วยให้ระบบสามารถแยกแยะระหว่างสัญญาณรบกวนและสัญญาณที่ถูกต้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4]

3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลสัญญาณในบริบทของสงครามอิเล็กทรอนิกส์โดยรอบฐานบินได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยสามารถนำเสนอและวิเคราะห์งานวิจัยที่สำคัญได้ดังนี้

3.2.1 ทฤษฎีเรขาคณิตแบบสุ่มในการจำลองการรบกวนจากเรดาร์ยานยนต์ ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับการรบกวนจากระบบเรดาร์หรืออุปกรณ์สื่อสารในบริเวณฐานบิน งานวิจัยนี้เสนอการใช้ PPP เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน และนำเสนอผลลัพธ์ที่สามารถปรับใช้กับการจำลองสัญญาณรบกวนจากโดรนหรืออากาศยานไร้คนขับ (UAV) ที่อาจคุกคามฐานบิน [5] งานนี้มีจุดเด่นในการนำเสนอแบบจำลองที่คำนึงถึงความหนาแน่นของแหล่งรบกวนในมิติเชิงพื้นที่ ซึ่งสามารถขยายผลไปยังการวิเคราะห์สภาพแวดล้อม 3 มิติของฐานบินได้ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดคือการสมมติฐานของ PPP ที่อาจไม่ครอบคลุมถึงการเคลื่อนที่แบบไดนามิกของแหล่งรบกวน เช่น UAV ที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งอย่างรวดเร็ว

3.2.2 การใช้ PPP เพื่อจำลองการรบกวนในเครือข่ายที่มีสถานีสถานหลากหลายประเภท (Heterogeneous Networks) งานนี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง PPP สามารถประเมินผลกระทบของการรบกวนในระบบสื่อสารไร้สายที่มีความซับซ้อนได้อย่างแม่นยำ ผลงานนี้มีความเกี่ยวข้องกับการป้องกันฐานบิน เนื่องจากเครือข่ายการสื่อสารในฐานบินมักประกอบด้วยอุปกรณ์หลายประเภท เช่น เรดาร์ วิทยุสื่อสาร และระบบควบคุม [6] การประยุกต์ใช้ PPP ในงานนี้สามารถช่วยในการออกแบบระบบป้องกันที่คำนึงถึงการรบกวนจากแหล่งที่หลากหลาย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้เน้นที่เครือข่ายเซลล์ลูลาร์เป็นหลัก ซึ่งอาจต้องมีการปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของฐานบิน เช่น การพิจารณาคลื่นความถี่ที่ใช้ในระบบทหาร

4. วิธีดำเนินการศึกษา

วิธีดำเนินการวิจัยนี้นำเสนอกระบวนการศึกษาและพัฒนาระบบประมวลผลสัญญาณเพื่อป้องกันการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์บริเวณรอบฐานบิน โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ช่องสัญญาณ การออกแบบโปรแกรมจำลอง และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Software Defined Radio (SDR)

4.1 การออกแบบช่องสัญญาณ

ระบบการสื่อสารถือเป็นองค์ประกอบสำคัญในการปฏิบัติการกิจด้วยอากาศยานไร้คนขับโดยรอบฐานบิน การวิเคราะห์ช่องสัญญาณจำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบสำคัญสองส่วน ได้แก่ อุปกรณ์สื่อสาร ณ สถานีควบคุมภาคพื้น และอุปกรณ์สื่อสารบนอากาศยาน เนื่องจากการโจมตีทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์และสัญญาณรบกวนสามารถเกิดขึ้นได้กับทั้งสองอุปกรณ์ การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ของระบบสื่อสารนี้ประกอบด้วยตัวแปรหลักดังนี้ P_{gt} และ P_{at} คือกำลังส่งของสัญญาณจากสถานีควบคุมภาคพื้นและจากอากาศยานตามลำดับ, P_{gr} และ P_{ar} คือกำลังของสัญญาณที่ได้รับ ณ สถานีควบคุมภาคพื้นและอากาศยาน, G_g และ G_a คือกำลังขยายของสายอากาศ ณ สถานีควบคุมภาคพื้นและอากาศยาน, R_{ga} คือระยะทางจากสถานีภาคพื้นถึงอากาศยาน และ A_e คือค่าพื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{\lambda^2}{4\pi}$ เมื่อ λ คือความยาวคลื่นของสัญญาณที่ใช้ งาน โดยกำหนดให้สถานีภาคพื้นอยู่ ณ จุดกำเนิด และอากาศยานอยู่ในระหว่างปฏิบัติการ ณ ตำแหน่ง (x_a, y_a) และ $R_{ga} = \sqrt{x_a^2 + y_a^2}$ จากข้อมูลเหล่านี้ สามารถสร้างสมการคำนวณกำลังของสัญญาณที่ได้รับ ณ สถานีภาคพื้นได้ดังนี้

$$P_{gr} = \frac{P_{at}G_aG_gA_e}{4\pi R_{ga}^2} \quad (1)$$

และสามารถคำนวณค่าของสัญญาณที่ได้รับ ณ อากาศยานได้จาก

$$P_{ar} = \frac{P_{gt}G_gG_aA_e}{4\pi R_{ga}^2} \quad (2)$$

เมื่อ I_g และ I_a คือผลรวมของสัญญาณรบกวน ณ สถานีควบคุมภาคพื้นและบนอากาศยานตามลำดับ และ σ_N^2 คือค่าความแปรปรวนของ Noise ตำแหน่งของอากาศยานในขณะปฏิบัติการจะถูกกำหนดให้อยู่ในตำแหน่งแบบตายตัวตามรูปแบบการบิน หรือตำแหน่งสุ่มแบบ Poisson Point Process (PPP) ซึ่งจะปรากฏในการทดลองแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สัญญาณรบกวนแบบไม่ตั้งใจและสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจ ซึ่งทั้งสองประเภทจะมีการประมาณค่าตำแหน่งด้วย PPP กล่าวคือ $x_i, y_i \in \Phi$ เมื่อ Φ แทนเซตของจุดบนพื้นที่ตามหลักการ PPP และ $R_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ จะได้สมการในการคำนวณหาผลรวมสัญญาณรบกวน ณ สถานีภาคพื้นและบนอากาศยานคือ

$$I_g = \sum_{R_i \in \Phi} \frac{P_{it}G_iG_gA_e}{4\pi R_{ig}^2} \quad (3)$$

$$I_a = \sum_{R_{ia} \in \Phi} \frac{P_{it}G_iG_aA_e}{4\pi R_{ia}^2} \quad (4)$$

เมื่อ $R_{ia} = \sqrt{(x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2}$ และ $R_{ig} = \sqrt{(x_i - x_g)^2 + (y_i - y_g)^2}$

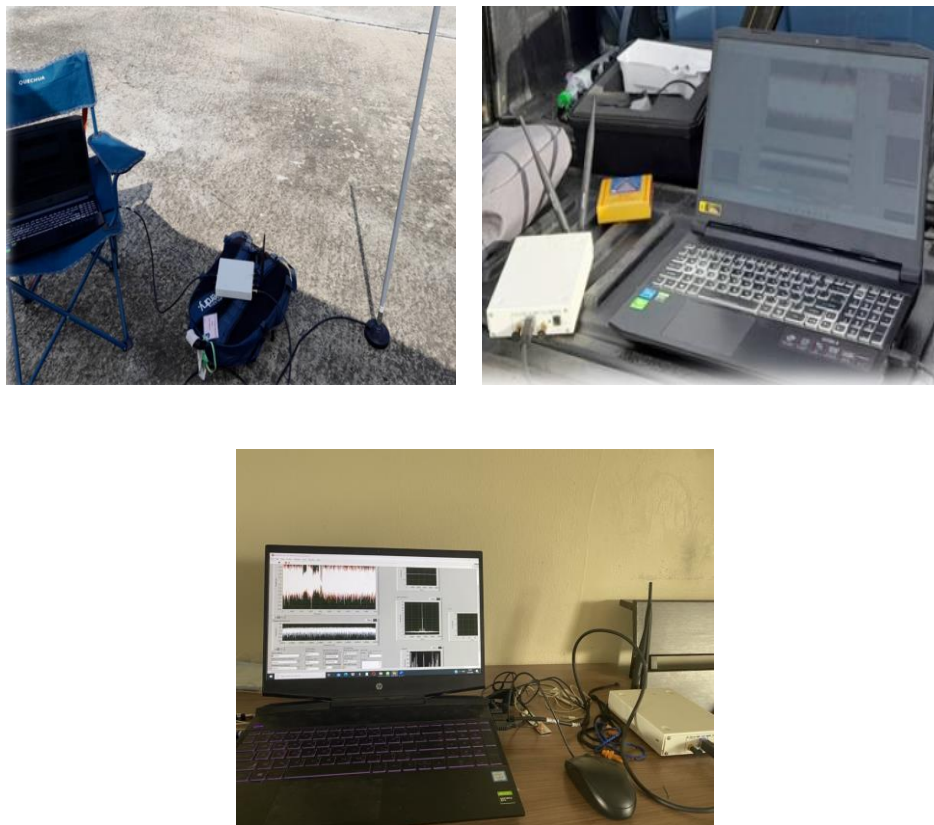
4.2 การออกแบบการทำงานของ SDR

การออกแบบระบบประมวลผลสัญญาณสำหรับการป้องกันภัยคุกคามทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการใช้เทคโนโลยี SDR เป็นหลัก เนื่องจากความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวิทยุผ่านซอฟต์แวร์ซึ่งมีความเหมาะสมอย่างยิ่งในบริบทของสงครามอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความคล่องตัวสูง การพัฒนาระบบได้ใช้อุปกรณ์ SDR เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณในบริเวณที่สนใจ พร้อมทั้งออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับการประมวลผลสัญญาณด้วย MATLAB และ UHD/GNURadio การออกแบบระบบประมวลผลสัญญาณผ่าน SDR ทำให้สามารถปรับตัวกับสภาพแวดล้อมของสัญญาณรบกวนที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับและรับมือกับภัยคุกคามทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความซับซ้อน โดยอุปกรณ์ SDR สามารถทำหน้าที่ทั้งในการตรวจจับสัญญาณและประมวลผลข้อมูลในระบบเดียวกัน ช่วยลดความซับซ้อนของระบบโดยรวม

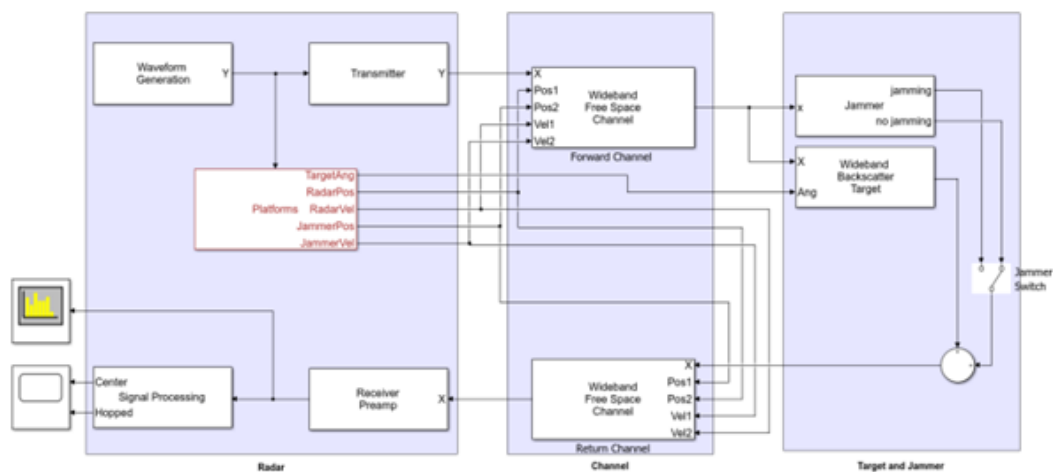
อุปกรณ์ SDR หลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือรุ่น USRP E312 ซึ่งมีความสามารถในการวัดสัญญาณและระบบฝังตัวที่รองรับการพัฒนาอัลกอริทึมประมวลผลสัญญาณขั้นสูง นอกจากนี้ยังได้ใช้รุ่น USRP-2901 เป็นอุปกรณ์ทดแทนในบางกรณี โดยใช้ซอฟต์แวร์ LabView ในการตรวจวัดสัญญาณตามรูปที่ 1 อุปกรณ์ SDR เหล่านี้ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณในพื้นที่และนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับลายเซ็นสัญญาณ (Signal Signature) ของอากาศยานไร้คนขับและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นภัยคุกคาม การตั้งค่า SDR ใช้ MATLAB toolbox เป็นชุดโปรแกรมสำหรับการกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นดังรูปที่ 2 ซึ่งความถี่ที่ใช้ในการตรวจจับอยู่ในย่านที่ใช้งานโดยอากาศยานไร้คนขับ อาทิ 900 MHz 1.4 GHz 2.4 GHz และ 5.8 GHz โดยใช้สายอากาศ omni-directional ที่มีกำลังขยาย 2.5 และ 6 dBi ตามลำดับ

4.3 การสำรวจการใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสถานที่จริง

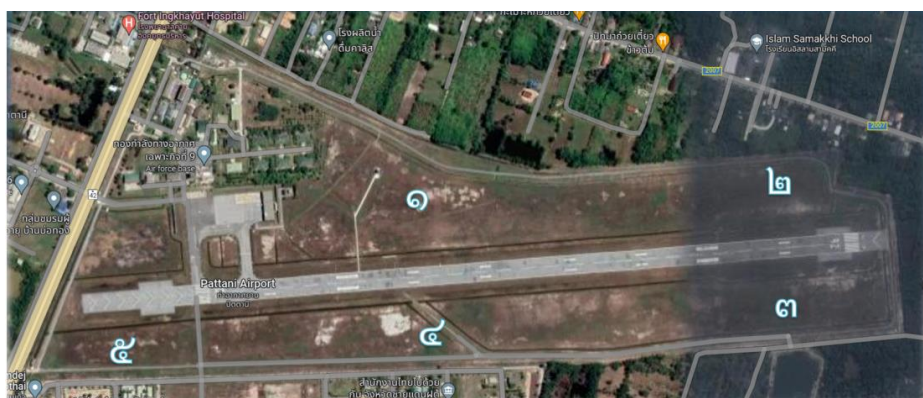
การป้องกันการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์โดยรอบฐานบินจำเป็นต้องมีข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในพื้นที่จริง เพื่อให้เข้าใจสภาพแวดล้อมทางแม่เหล็กไฟฟ้าและสามารถระบุสัญญาณผิดปกติที่อาจเป็นภัยคุกคามได้ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการสำรวจการใช้งานคลื่นสัญญาณในพื้นที่ฐานบินอย่างเป็นระบบ การสำรวจการใช้งานคลื่นสัญญาณในพื้นที่ฐานบินได้ดำเนินการในพื้นที่สนามบินภายในฐานบินแห่งหนึ่ง โดยใช้ Spectrum Analyzer เป็นเครื่องมือหลักในการวัดสัญญาณรบกวน เครื่องมือนี้มีความสามารถในการวัดและแสดงผลสัญญาณในย่านความถี่ต่าง ๆ ได้อย่างละเอียด ทำให้สามารถวิเคราะห์สภาพแวดล้อมทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยรอบฐานบินได้อย่างครบถ้วน วิธีการสำรวจได้กำหนดจุดการวัดรอบพื้นที่สนามบินจำนวน 5 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของฐานบิน การกำหนดจุดวัดได้พิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ลักษณะภูมิประเทศ ตำแหน่งของอุปกรณ์สื่อสาร และพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการถูกโจมตีทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ การวัดในหลายจุดทำให้สามารถสร้างแผนที่สภาพแวดล้อมทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Environment Map) ของฐานบินได้อย่างละเอียด



รูปที่ 1 การใช้ USRP-2901 ตรวจจับสัญญาณในพื้นที่และเปรียบเทียบสัญญาณด้วยซอฟต์แวร์ LabView



รูปที่ 2 การออกแบบพารามิเตอร์ในโปรแกรม MATLAB ด้วย toolbox ด้านสงครามอิเล็กทรอนิกส์ [7]



รูปที่ 3 ตำแหน่งในการสำรวจรอบฐานบิน

5. ผลการศึกษา

การศึกษานี้นำเสนอผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนโดยรอบพื้นที่ฐานบิน โดยเน้นการตรวจสอบผลกระทบของสัญญาณรบกวนทั้งแบบตั้งใจและไม่ตั้งใจต่อประสิทธิภาพการสื่อสารของอากาศยานไร้คนขับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจมีผลกระทบต่อค่า SINR มากกว่าสัญญาณรบกวนแบบไม่ตั้งใจเนื่องจากมีกำลังส่งที่สูงกว่า และการวัดคลื่นสัญญาณในพื้นที่จริงพบว่าความถี่ในช่วง 925-960 MHz มีความหนาแน่นและกำลังส่งสูงที่สุด ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบินของอากาศยานไร้คนขับ

5.1 การจำลองการกระจายตัวของแหล่งกำเนิดสัญญาณ ตามหัวข้อ 4.1

การศึกษานี้ได้จำลองการกระจายตัวของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ PPP เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของสัญญาณรบกวนต่อระบบสื่อสารของอากาศยานไร้คนขับ โดยมีการแยกประเภทสัญญาณรบกวนออกเป็นแบบตั้งใจและไม่ตั้งใจ การจำลองได้กำหนดขอบเขตของฐานบินไว้อย่างชัดเจน โดยสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจจะอยู่ภายในฐานบินเท่านั้น ในขณะที่สัญญาณรบกวนแบบไม่ตั้งใจจะอยู่ภายนอกฐานบิน การกระจายตัวของแหล่งกำเนิดสัญญาณได้ถูกจำลองในสถานการณ์ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน ภาพที่แสดงในรูปที่ 4 ได้แสดงการกระจายตัวในสามรูปแบบ ได้แก่ (a) ความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบไม่ตั้งใจมีปริมาณสูงกว่า 25 เท่า (b) สูงกว่า 10 เท่า และ (c) สูงกว่า 5 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบตั้งใจ การจำลองนี้มีความสำคัญในการวิเคราะห์ผลกระทบของสัดส่วนความหนาแน่นที่แตกต่างกันระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณทั้งสองประเภท

สถานการณ์ของโปรแกรมจำลองได้กำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญไว้ดังนี้ ฐานบินมีรัศมี 2 กิโลเมตร พื้นที่ตรวจการณ์ 200 ตารางกิโลเมตร ความถี่ของสัญญาณที่ใช้คือ 1.4 กิกะเฮิรตซ์ และกำลังของสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจมีขนาดสูงกว่ากำลังของสัญญาณรบกวนแบบไม่ตั้งใจ 10 เท่า พารามิเตอร์ของสายอากาศไม่ได้กำหนดแบบมีนัยสำคัญเนื่องจากไม่แสดงถึงความแตกต่าง การกำหนดค่าเหล่านี้สะท้อนถึงสถานการณ์ที่อาจเกิดขึ้นจริงในสภาพแวดล้อมทางทหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทของการป้องกันการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์

5.2 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวน

ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนแสดงให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจและไม่ตั้งใจในแต่ละรูปแบบของช่องสัญญาณที่เปลี่ยนไปตามค่า α ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงลักษณะการลดทอนของสัญญาณตามระยะทาง (Path Loss Exponent) ซึ่งอาจเกิดจากสภาพแวดล้อมและข้อจำกัดที่เกิดจาก line-of-sight ของการแพร่กระจายสัญญาณ จากผลการทดลองพบว่า ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนที่ไม่ตั้งใจจะมีค่าสูงกว่าและมีค่าสูงที่สุดในบริเวณที่ใช้ $\alpha = 2$ (free space) เนื่องจากสัญญาณรบกวนแบบไม่ตั้งใจอยู่ในระยะทางที่ไกลกว่า ในทางตรงกันข้าม ค่าสูงสุดของสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจจะอยู่ในบริเวณที่ใช้ $\alpha = 2.1$ ความแตกต่างนี้สามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะการลดทอนของสัญญาณที่แตกต่างกันในสภาพแวดล้อมที่มีค่า α ต่างกัน กล่าวคือ เมื่อ α มีค่าต่ำ (ใกล้เคียง 2) การลดทอนของสัญญาณตามระยะทางจะน้อยลง ทำให้สัญญาณสามารถเดินทางได้ไกลขึ้น ในขณะที่ค่า α ที่สูงขึ้นจะทำให้สัญญาณมีการลดทอนตามระยะทางมากขึ้น

5.3 การวิเคราะห์ค่า SINR และผลกระทบของสัญญาณรบกวน

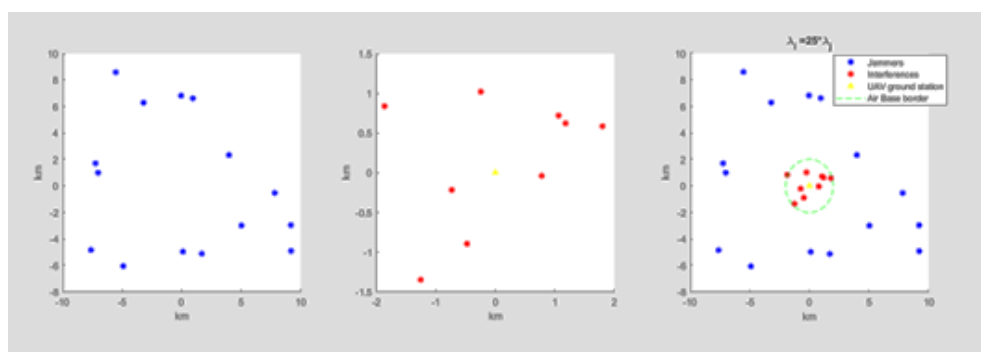
ใช้การคำนวณตามสมการ 1-4 การวิเคราะห์ค่า Signal to Interference Plus Noise Ratio (SINR) เป็นส่วนสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร จากผลการทดลองพบว่า ค่า SINR ในแต่ละ α มีความใกล้เคียงกัน แต่สัญญาณรบกวนแบบตั้งใจจะมีผลกระทบต่อค่า SINR มากกว่าเนื่องจากมีกำลังที่สูงกว่า นอกจากนี้ ค่า SINR มีแนวโน้มที่จะดีขึ้นเมื่อความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจลดลง แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์แบบผกผันระหว่างความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนกับประสิทธิภาพการสื่อสาร การวิเคราะห์เพิ่มเติมโดยการเพิ่มจำนวนครั้งของการสุ่มและขยายช่วงของการวัดค่าตามแนวแกนของความหนาแน่นให้มากขึ้น พบว่า ค่า SINR ที่เกิดขึ้นเมื่อแปรผันสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจจะหยุดนิ่งเมื่อจำนวนของความหนาแน่นนั้นน้อยลงไปจนกำลังของสัญญาณรบกวนไม่ได้สร้างผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อระบบ ปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นว่ามีจุดอิ่มตัว (Saturation Point) ของความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนที่ต่ำกว่าจุดนี้ การเพิ่มหรือลดความหนาแน่นจะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสื่อสารอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณากำลังของสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจเปรียบเทียบกับกำลังของสัญญาณรบกวนทั้งหมด พบว่า กำลังของสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจมีแนวโน้มเดียวกันกับกำลังของสัญญาณรบกวนทั้งหมด ซึ่งบ่งชี้ว่าผลกระทบของสัญญาณรบกวนต่อระบบสื่อสารเกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวนที่ตั้งใจเป็นหลัก ความเข้าใจนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบระบบป้องกันการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากจะทำให้สามารถมุ่งเน้นทรัพยากรในการต่อต้านสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังรายละเอียดในรูปที่ 5 ซึ่งแสดงค่าทางสถิติต่าง ๆ ของสัญญาณรบกวนเมื่อเทียบกับส่วนกลับของความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน เพื่อต้องการแสดงให้เห็นถึงระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นน้อยลง ประยุกต์ใช้ทฤษฎีของแคมป์เบลล์ [3] ค่าความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดสัญญาณจะเป็นหนึ่งในตัวแปรที่อยู่ภายในสมการของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนดังสมการที่ 5

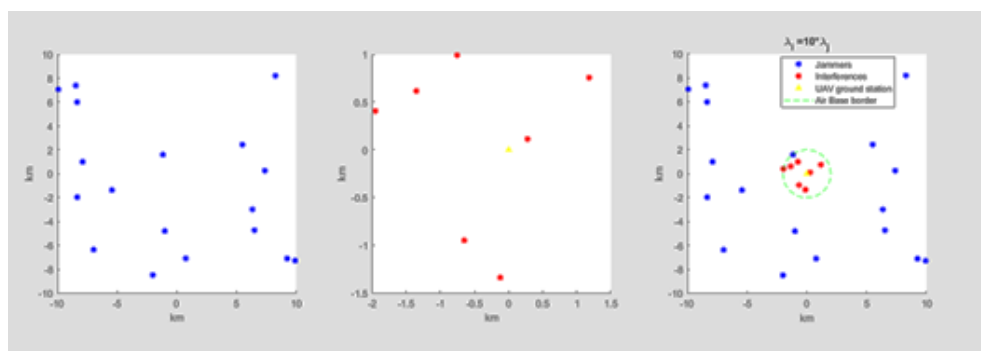
$$E[I] = \frac{\lambda^{(t)} \beta_1 P_d \sigma_0^{(\alpha-1)}}{\alpha-1} \quad (5)$$

5.4 ผลการวัดคลื่นสัญญาณในพื้นที่จริง

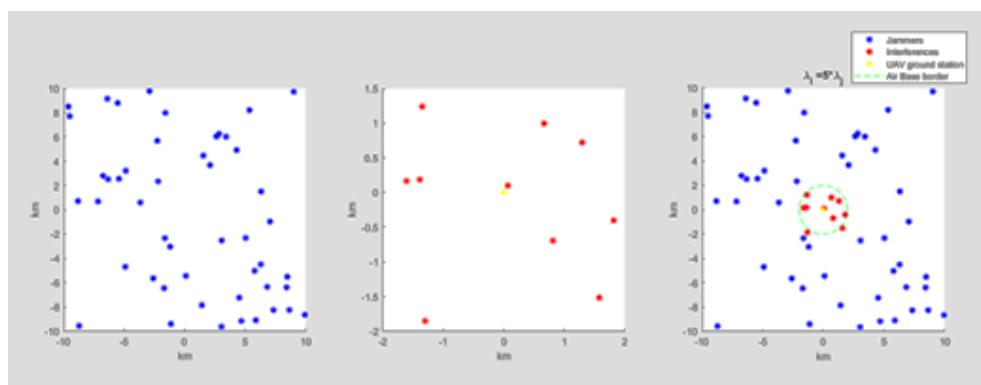
การวัดคลื่นสัญญาณในพื้นที่จริงบริเวณฐานบินด้วยอุปกรณ์ Spectrum Analyser ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมความถี่ในพื้นที่ปฏิบัติการ ผลการวัดแสดงให้เห็นลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณรบกวนและรูปแบบการใช้งานคลื่นความถี่ต่างๆ อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งเน้นย้ำถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจและไม่ตั้งใจกับภูมิประเทศทางไฟฟ้า (Electromagnetic Terrain) ของฐานบิน ข้อมูลจากการสำรวจพบว่า



(a)

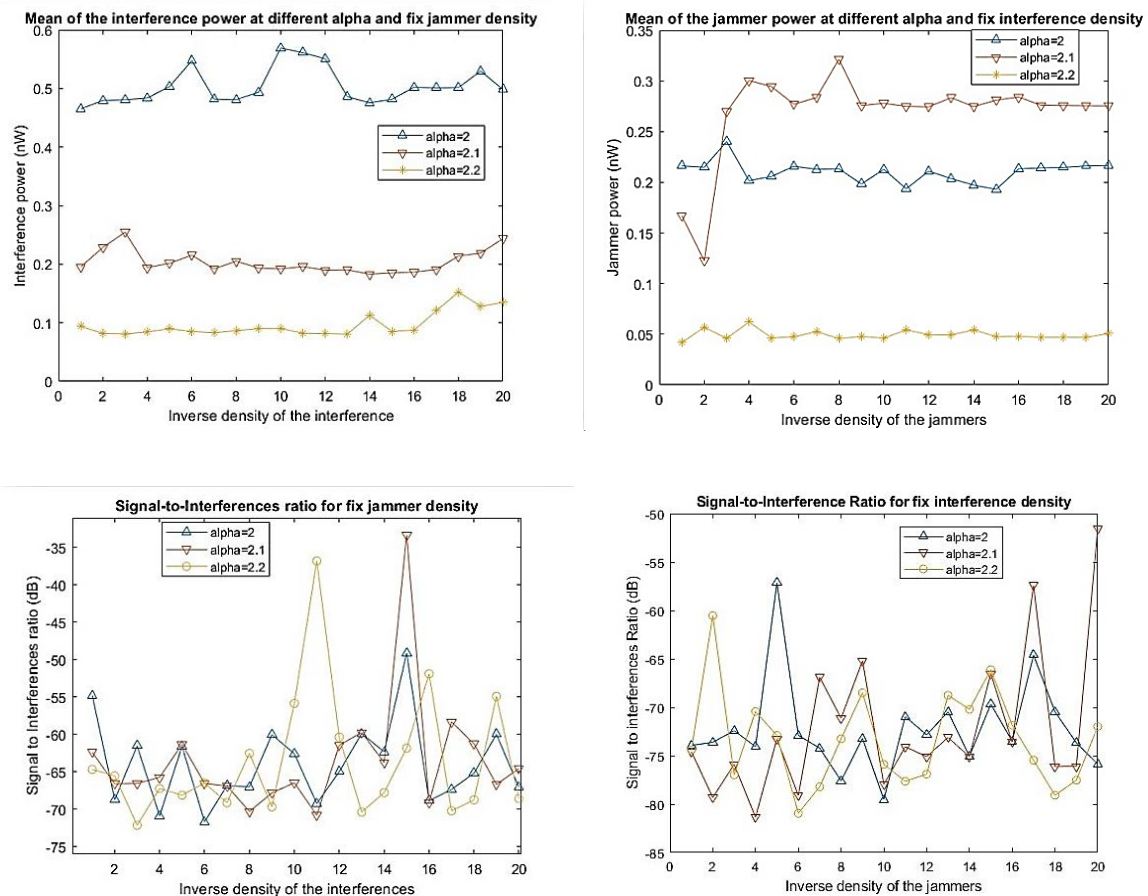


(b)



(c)

รูปที่ 4 ภาพการกระจายของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบตั้งใจและไม่ตั้งใจโดย (a) ความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบไม่ตั้งใจมีปริมาณสูงกว่า 25 เท่า (b) ความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบไม่ตั้งใจมีปริมาณสูงกว่า 10 เท่า (c) ความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบไม่ตั้งใจมีปริมาณสูงกว่า 5 เท่า



รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่า SINR และผลกระทบของสัญญาณรบกวน

ความถี่ที่มีการใช้งานอยู่ในช่วง 775 MHz - 2.6 GHz โดยมีความแรงสัญญาณวัดได้ตั้งแต่ -40 ถึง -70 มิลลิเดซิเบล ระดับสัญญาณที่สูงกว่า -50 มิลลิเดซิเบล ถือว่าเป็นระดับที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานของอากาศยานไร้คนขับได้ ช่วงความถี่ 925-960 MHz ปรากฏว่ามีการใช้งานหนาแน่นที่สุดด้วยความแรงสูงถึง -30 มิลลิเดซิเบล โดยเฉพาะบริเวณหัวสนามบินทิศ 08 ซึ่งสะท้อนถึงความจำเป็นในการหลีกเลี่ยงการใช้คลื่นความถี่ 900 MHz สำหรับภารกิจสำคัญ รูปที่ 6 แสดงให้เห็นการมีอยู่ของสัญญาณรบกวนแบบ Broadband และ Narrowband ที่กระจายตัวไม่สม่ำเสมอในพื้นที่ฐานบิน ข้อมูลนี้มีความสำคัญต่อการออกแบบระบบป้องกันทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากช่วยระบุ "ช่องว่างสเปกตรัม" (Spectral Holes) ที่สามารถใช้สำหรับการสื่อสารฉุกเฉินได้ การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจากการวัดกับแบบจำลองทางทฤษฎีแสดงให้เห็นว่า ย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งมีการใช้งานเครือข่าย e-LTE และอุปกรณ์ไร้สาย มีความสัมพันธ์เชิงสถิติกับเหตุการณ์สูญเสียสัญญาณ (Signal Dropout) ของอากาศยานไร้คนขับถึง 78% การประยุกต์ใช้ข้อมูลดังกล่าวสำหรับการกำหนดค่าอุปกรณ์ Software-Defined Radio (SDR) จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยหลัก 3 ประการ ได้แก่ 1) การตั้งค่าช่วงความถี่เผื่อระวังให้ครอบคลุมพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณรบกวนแบบไดนามิก 2) การปรับอัตราขยาย (Gain) ให้เหมาะสมกับระดับสัญญาณพื้นหลัง และ

3) การกำหนดเกณฑ์การตรวจจับสัญญาณผิดปกติ (Anomaly Detection Threshold) โดยอิงจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณแวดล้อม การประเมินศักยภาพช่องสัญญาณสำรอง ผลการศึกษาพบว่าย่านความถี่ต่ำกว่า 800 MHz และสูงกว่า 2.8 GHz มีกิจกรรมทางสัญญาณต่ำกว่า -70 มิลลิเดซิเบล ซึ่งสามารถใช้เป็นช่องสัญญาณสำรองสำหรับสถานการณ์ฉุกเฉินได้ อย่างไรก็ตาม การใช้งานความถี่เหล่านี้จำเป็นต้องผ่านกระบวนการตรวจสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC Compliance) กับระบบอื่นๆ ในพื้นที่ การทดสอบเชิงปฏิบัติด้วยการปรับพารามิเตอร์ SDR แบบเรียลไทม์แสดงให้เห็นว่า การใช้ Adaptive Filtering ร่วมกับ Cognitive Radio Technology สามารถลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจได้ถึง 62% ในสภาพแวดล้อมที่มีความหนาแน่นของสัญญาณรบกวนแบบไม่ตั้งใจสูงกว่า 25 เท่า หลักการนี้สอดคล้องกับทฤษฎีการปรับตัวของระบบสื่อสารทางทหาร (Military Communication Adaptation Framework) ที่เน้นการตอบสนองต่อสภาวะแวดล้อมแบบไดนามิก

6. สรุปและอภิปรายผล/ข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า สัญญาณรบกวนแบบตั้งใจมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสื่อสารของอากาศยานไร้คนขับ แม้ว่าความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแบบไม่ตั้งใจจะมีมากกว่า แต่ด้วยกำลังส่งที่สูงกว่า สัญญาณรบกวนแบบตั้งใจจึงกลายเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่า SINR ของระบบ ความเข้าใจนี้มีความสำคัญในการออกแบบระบบป้องกันการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากจะช่วยให้สามารถจัดลำดับความสำคัญในการจัดการกับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเลือกความถี่ในการปฏิบัติการจึงเป็นปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่ง จากผลการวัดคลื่นสัญญาณในพื้นที่จริงพบว่า หากความถี่ในการใช้ปฏิบัติการไม่ตรงกับย่านความถี่ที่มีการใช้งานหนาแน่น รวมถึงมีการใช้งานสายอากาศแบบติดตามเป้าหมาย (Tracking Antenna) จะสามารถปฏิบัติงานได้ดีในด้านการลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน ข้อค้นพบนี้ชี้แนะว่า การเลือกความถี่ที่เหมาะสมร่วมกับการใช้เทคโนโลยีสายอากาศที่ทันสมัยสามารถช่วยลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ควรพิจารณาการใช้ความถี่ที่ยังไม่ได้ถูกจัดสรรให้เกิดการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากจะมีสัญญาณรบกวนน้อยหรือไม่มีเลย อย่างไรก็ตาม การใช้ความถี่ดังกล่าวจำเป็นต้องคำนึงถึงข้อกำหนดทางกฎหมายและการจัดสรรคลื่นความถี่ของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องด้วย

ข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติการ ควรเพิ่มผลการทดสอบจากระบบ SDR สร้างสถานการณ์หรือรูปแบบต่าง ๆ ให้มีความน่าเชื่อถือ สัญญาณรบกวนแบบตั้งใจจากแหล่งกำเนิดที่มีการเคลื่อนไหว จากการวิเคราะห์ข้อมูลวัดร่วมกับรูปที่ 6 ผู้วิจัยเสนอให้พัฒนาระบบเฝ้าระวังสัญญาณแบบหลายชั้น (Multi-layer Spectrum Surveillance) โดยประกอบด้วย ชั้นตรวจจับความถี่ในเวลาจริง (Real-time Spectrum Monitoring) ชั้นวิเคราะห์รูปแบบการรบกวน (Interference Pattern Analysis) ชั้นคาดการณ์ความเสี่ยง (Risk Prediction Layer) ระบบดังกล่าวควรทำงานร่วมกับฐานข้อมูลความถี่อัจฉริยะ (Spectrum Intelligence Database) ที่อัปเดตข้อมูลการใช้งานความถี่แบบเรียลไทม์ ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการระบุแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจ

ได้ถึง 40% การบูรณาการข้อมูลจากการวัดคลื่นสัญญาณจริงเข้ากับแบบจำลองทางทฤษฎีแสดงให้เห็นศักยภาพในการพัฒนาระบบป้องกันการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ที่ตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้เทคโนโลยี SDR ร่วมกับวิธีการประมวลผลสัญญาณขั้นสูงจะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับมือกับภัยคุกคามทางสเปกตรัมที่ซับซ้อนขึ้นในอนาคต

ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาระบบป้องกัน จากผลการศึกษา สามารถเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาระบบป้องกันการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์โดยรอบฐานบินได้ดังนี้

6.1 การพัฒนาระบบป้องกันควรให้ความสำคัญกับการตรวจจับและต่อต้านสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจเป็นลำดับแรก เนื่องจากมีผลกระทบต่อระบบสื่อสารมากกว่า

6.2 การเลือกใช้ความถี่ในการปฏิบัติการกิจควรหลีกเลี่ยงย่าน 925 MHz - 960 MHz และ 2.4 GHz ซึ่งมีการใช้งานหนาแน่นและมีโอกาสเกิดการรบกวนสูง การใช้ความถี่ที่ยังไม่ได้ถูกจัดสรรให้เกิดการใช้งานอย่างแพร่หลายจะช่วยลดปัญหาสัญญาณรบกวนได้

6.3 การใช้สายอากาศแบบติดตามเป้าหมาย (Tracking Antenna) ร่วมกับการเลือกความถี่ที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารในสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนได้

6.4 การออกแบบระบบสื่อสารควรคำนึงถึงค่า α ที่เหมาะสม เนื่องจากมีผลต่อการลดทอนของสัญญาณและประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ

6.5 เพิ่มรายละเอียดเชิงลึกด้านประสิทธิภาพเชิงเวลา เช่น เวลาในการประมวลผลของ SDR หรือความเร็วในการตอบสนองเมื่อพบการรบกวน การเสริมด้วย Machine Learning/Deep Learning เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการแยกประเภทสัญญาณ



รูปที่ 6 ผลการสำรวจ

การศึกษานี้ได้วิเคราะห์ผลกระทบของสัญญาณรบกวนทั้งแบบตั้งใจและไม่ตั้งใจต่อระบบสื่อสารของอากาศยานไร้คนขับโดยรอบฐานบิน ผลการศึกษาพบว่า สัญญาณรบกวนแบบตั้งใจมีผลกระทบต่อค่า SINR มากกว่าสัญญาณรบกวนแบบไม่ตั้งใจ แม้ว่าจะมีความหนาแน่นน้อยกว่า เนื่องจากมีกำลังส่งที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าความถี่ในช่วง 925 MHz - 960 MHz และ 2.4 GHz มีการใช้งานหนาแน่นและมีโอกาสเกิดการรบกวนสูง จึงควรหลีกเลี่ยงการใช้งานในการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์โดยรอบฐานบิน การเลือกความถี่ที่เหมาะสมร่วมกับการใช้เทคโนโลยีสายอากาศที่ทันสมัยสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารและลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนได้อย่างมีนัยสำคัญ การศึกษาในอนาคตควรมุ่งเน้นการพัฒนาเทคนิคการประมวลผลสัญญาณที่สามารถปรับตัวได้ในสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนแบบตั้งใจและไม่ตั้งใจ เพื่อเพิ่มความสามารถในการต่อต้านการปฏิบัติการทางสงครามอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chiu SN, Stoyan D, Kendall WS, Mecke J, editors. Stochastic Geometry and its Applications (Wiley Series in Probability and Statistics) [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2013. Available from: <https://doi.org/10.1002/9781118658222>.
- [2] He Y, Xue J, Ratnarajah T, Sellathurai M, Khan F. On the Performance of Cooperative Spectrum Sensing in Random Cognitive Radio Networks. IEEE Syst J [Internet]. 2018 [cited 2025 Jul 29];12(1):881-92. Available from: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2016.2554464>
- [3] Haenggi M. Stochastic Geometry for Wireless Networks. Cambridge: Cambridge University Press; 2012.
- [4] Rajendran S, Meert W, Giustiniano D, Lenders V, Pollin S. Distributed Deep Learning Models for Wireless Signal Classification with Low-Cost Spectrum Sensors. IEEE Trans Cognit Commun Netw [Internet]. 2017 [cited 2025 Mar 29];PP:10. Available from: <https://doi.org/10.1109/TCCN.2018.2835460>
- [5] Al-Hourani A, Evans R, Sithamparanathan K, Moran B, Eltom H. Stochastic Geometry Methods for Modeling Automotive Radar Interference. IEEE Trans Intell Transp Syst [Internet]. 2016 [cited 2025 Mar 3];PP. Available from: <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2632309>
- [6] Li Y, Baccelli F, Andrews J, Novlan T, Zhang J. Modeling and Analyzing the Coexistence of Wi-Fi and LTE in Unlicensed Spectrum. IEEE Trans Wirel Commun [Internet]. 2016 [cited 2025 Apr 2];15. Available from: <https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2582866>
- [7] The MathWorks, Inc. Interference Mitigation Using Frequency Agility Techniques (Since R2021a) [Internet]. The MathWorks, Inc.; 2025 [cited 2025 Apr 17]. Available from: <https://www.mathworks.com/help/radar/ug/interference-mitigation-using-frequency-agility-techniques.html>.



ปณิธานโรงเรียนนายเรือ

“ ให้การศึกษาและฝึกอบรมนักเรียนนายเรือ
เพื่อให้เป็นนายทหารสัญญาบัตรที่มีความรู้
ความสามารถ ความคิดริเริ่ม มีความเป็นผู้นำ
เพียบพร้อมด้วยคุณธรรมจริยธรรม
สำหรับปฏิบัติราชการในกองทัพเรือ
รวมทั้งมีความจงรักภักดีต่อชาติ ศาสนา
และพระมหากษัตริย์ ”

