



วารสารวิชาการ โรงเรียนนายเรือ

ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

Royal Thai Naval Academy Journal of Science and Technology



ปีที่ 6 ฉบับที่ 1 มกราคม – ธันวาคม 2566
Vol.6 No.1 January – December 2023



Available online at www.rtna.ac.th

ISSN 2985-2897 (Print)

ISSN 2985-2773 (Online)





ปณิธาน โรงเรียนนายเรือ

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

คณะที่ปรึกษาวารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

พลเรือโท ประวุฒิ รอดมณี
พลเรือตรี ปรีดิวัฒน์ ตีลกนรนาถ
พลเรือตรี รังสรรค์ แท่งจิม
พลเรือตรี จักรชัย น้อยหัวหาด
พลเรือตรี กิตติพงษ์ จันทรสมบูรณ์
พลเรือตรี สมมาตร ภูบกระนี้
นาวาเอก รัฐศักดิ์ รักชื่น

ผู้บัญชาการ โรงเรียนนายเรือ
รองผู้บัญชาการ โรงเรียนนายเรือ
รองผู้บัญชาการ โรงเรียนนายเรือ
เสนาธิการ โรงเรียนนายเรือ
หัวหน้าฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ
อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิ ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ
รองหัวหน้าฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

บรรณาธิการ

นาวาเอก ชัยยศ คงขวัญ
ผู้อำนวยการกองวิชาวิศวกรรมอุทกศาสตร์
ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

กองบรรณาธิการ (ภายใน)

นาวาเอก ชัยยศ คงขวัญ
นาวาเอกหญิง รองศาสตราจารย์ ศิริรัตน์ บุญโสภณ
นาวาเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศุภสิทธิ์ คงดี
นาวาเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมาน ไตรารัมย์
นาวาโท พงศ์พัฒน์ อิศรกุล
เรือโทหญิง จิราพร แก้วศิริวิทยุ
จ่าโทหญิง สุนันท์ หวานแก้ว

บรรณาธิการ
กองบรรณาธิการและผู้ดูแลระบบ
กองบรรณาธิการและเลขานุการ
กองบรรณาธิการ
กองบรรณาธิการ
กองบรรณาธิการ
กองบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการ (ภายนอก)

พลเรือโท ปฐมพจน์ แก่นจันทร์
นาวาเอก จัตรชัย เหลืองทองคำ
นาวาเอก สุขสันต์ สือสกุล
นาวาเอกหญิง ลลิตา สวัสดิชัย
นาวาเอก ประโยชน์ พรหม
พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง
พันเอกหญิง รองศาสตราจารย์ สุวิมล เสนียวงศ์ ณ อยุธยา
พันโท นวพงศ์ อันสุริย์
นาวาอากาศตรี จิรภัทร ลดาวัลย์
นาวาอากาศตรีหญิง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เอื้อมพร รัตนสิงห์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรทิพย์ แก่งอินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย บำรุงศรี
ดร.ปรัชญ์ สง่างาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วันวิสา ชัชวงษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพจน์ เวศพันธุ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธพงศ์ เพียรโรจน์

กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ
กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ
กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ
กรมสรรพาวุธทหารเรือ
กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยมหิดล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่ผลงานบทความวิจัยและบทความวิชาการ ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแก่ผู้สนใจทั่วไป
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ทั้งด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เพื่อเป็นเอกสารรวบรวมบทความวิจัยที่น่าสนใจและมีคุณค่าทางวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วาระการเผยแพร่

ปีละ 1 ฉบับ (มกราคม – ธันวาคม)

สถานที่ติดต่อ

กองบรรณาธิการวารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือ
ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โรงเรียนนายเรือ
เลขที่ 204 ถ.สุขุมวิท ต.ปากน้ำ อ.เมืองสมุทรปราการ
จ.สมุทรปราการ 10270
โทรศัพท์ : 0-2475-3986

ออกแบบ – พิมพ์

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

วารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้นำเสนอบทความวิจัยและบทความวิชาการของคณาจารย์ นักวิจัย และนักศึกษา ทั้งภายในและภายนอกโรงเรียนนายเรือ มาตลอดระยะเวลา 5 ปี โดยการคัดสรรบทความที่มีคุณภาพผ่านระบบการจัดการ และตีพิมพ์วารสารวิชาการในรูปแบบวารสารออนไลน์อิเล็กทรอนิกส์ [E-Journal] โดยใช้ platform ของระบบ Open Journal System [OJS] ซึ่งอยู่ในระบบฐานข้อมูลวารสารอิเล็กทรอนิกส์กลางของประเทศไทย [Thai Journals Online: ThaiJo] และได้ผ่านการพิจารณาความถูกต้องตามหลักวิชาการจากผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความรู้ ความสามารถ ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในแต่ละสาขา ซึ่งในปีนี้เป็นการจัดทำวารสารปีที่ 6 โดยรวบรวมบทความที่มีคุณภาพมานำเสนอต่อผู้อ่านทุกท่าน จำนวนทั้งสิ้น 12 บทความ เป็นบทความวิจัย 9 บทความ และบทความวิชาการ 3 บทความ ประกอบด้วยบทความหลากหลายสาขา เช่น วิทยาศาสตร์ทางทะเล เคมีประยุกต์ และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เป็นต้น

กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารวิชาการฉบับนี้จะทำให้ผู้อ่านทุกท่านได้รับความรู้ และก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อผู้อ่าน ทั้งนี้ขอขอบคุณผู้นิพนธ์ ผู้ทรงคุณวุฒิ และผู้อ่านทุกท่านที่ร่วมกันทำให้เกิดบทความมีคุณภาพในวารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา โดยกองบรรณาธิการจะรักษาและพัฒนาคุณภาพของวารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือ เพื่อประโยชน์สูงสุดต่อผู้อ่านและเพื่อพัฒนางานด้านวิชาการของโรงเรียนนายเรือต่อไป

นาวาเอก ชัยยศ คงขวัญ
บรรณาธิการ

สารบัญ

1

ข้อจำกัดด้านเทคนิคของจุดเริ่มต้น
ในการแบ่งเขตแดนทางทะเล
ระหว่างไทย-กัมพูชา

*Technical Aspects of the Starting Point
for Maritime Delimitation between
Thailand-Cambodia*
สมาน ใต้รายรัมย์

15

Using Single Beam Echo Sounder
to Recheck Shipwreck Location

Boonyarit Sukmuang

30

การหาค่าตัวเกณฑ์สำหรับการปรับแก้
ค่าระดับน้ำทำนาย

*Determination of the Threshold for
Correcting the Astronomical Tide*
ศุภสิทธิ์ คงดี และ พันิช จินชัย

46

การจัดสรรทรัพยากรในการวางกำลัง
สำหรับการกักค้นหาและช่วยเหลือ
อากาศยานประสบภัยครอบคลุมพื้นที่
ทางบกของประเทศไทย

*Allocating Resources to Deploy Forces
for Search and Rescue Missions
Covering Land Areas of Thailand*
กาญพจน์ กลิ่นเฟื่อง, เกียนสิริ เหลืองวิไล,
เกียรติกุลไชย จิตต์เอื้อ และ ปัญญารักษ์ โคศลวัฒน์

64

ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการให้
น้ำพืชผัก

*Automated Control Systems for Plant
Watering*
ศุภกานต์ แก้วเหลี่ยม, สุคนธ์ พันธุแสง และ
ปราโมทย์ สุขศิริศักดิ์

76

ขบวนการกระทบแตกโ/ถ่วงเวลา
สำหรับลูกระเบิดยิงจากเครื่องยิง
ลูกระเบิด

*Point Detonating Quick/Delay Fuze of
Mortar*
ทวี ตีจะมาลา และ นักรบ วาณิชบุณยเรศ

92

การสังเคราะห์ลิแกนด์ N, N'-โพรพิล
ลีนบิส-เบนโซไฮดรอกซามาไมด์และ
การเกิดพันธะโคออร์ดิเนชันกับ
ไอออนทองแดง (II)

*The Synthesis of N, N'-Propylene Bis-
Benzohydroxamamide Ligands and
Coordination with Copper(II) Ions*
สมศักดิ์ ศิริไชย และ ขจิตกัญ ทิพย์พ่อง

101

การพัฒนาสารเคลือบกันน้ำเพื่อ
รักษาสภาพกระดาษโดยใช้อนุภาค
นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตและ
เอทิลเซลลูโลส

*Development of Water-Resistant
Coating for Paper Preservation Using
Calcium Carbonate Nanoparticles and
Ethyl Cellulose*
ชลิตา เมฆมุกดา

สารบัญ

114

Using GIS and Logistic Regression Model for Locating Suitable Anchoring Sites in Sattahip Bay and Approaches, Thailand.

สัณห์วิฐ อัสมาแอ

134

การหาเส้นทางที่เหมาะสมในสภาพแวดล้อมที่มีอันตรายด้วยแผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay

Optimal Path in a Hostile Environment by Using Delaunay Triangulation
รณนพ ลิ้มสุวรรณโรจน์, เกียรติสิริ เหลืองวิไล, วีระพล วิลามาศ, สมภูมิจ มีชาวนา, สุภาวดี สีลายุทธ และ วิศรุต คล้ายแจ้ง

149

การคำนวณความลึกวิกฤติของการถ้ำทะเลกอนสุกรี (Depth of Closure) สำหรับพื้นที่ชายฝั่งทะเลอ่าวไทย

Calculating Depth of Closure for the Gulf of Thailand Coastline
วันชัย จันทรละเอียต

161

การสืบค้นหาสูตรการคำนวณค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่น

Investigation on The Formula for Calculating Local Gravity
บัญชา คังตระกูล และ สายชล สิริพิพงศ์

ข้อจำกัดด้านเทคนิคของจุดเริ่มต้นในการแบ่งเขตแดนทางทะเลระหว่างไทย-กัมพูชา

Technical Aspects of the Starting Point

for Maritime Delimitation between Thailand-Cambodia

สมาน ไตรารัมย์¹

Samharn Dairairam¹

Received: October 1, 2022

Revised: November 21, 2022

Accepted: December 13, 2022

บทคัดย่อ

ผลงานทางวิชาการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายปัจจัยด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับงานด้านอุทกศาสตร์ เช่น เทคนิคการสำรวจและการสร้างแผนที่ที่ส่งผลต่อจุดเริ่มต้นในการประกาศอาณาเขตทางทะเลหรือการกำหนดเขตแดนทางทะเลทั้งของไทยและกัมพูชา โดยศึกษาความเป็นมาเกี่ยวกับคำพิพากษาของจุดเริ่มต้นในการประกาศเขตไหล่ทวีปของทั้งสองประเทศว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร จากนั้นเป็นการนำข้อมูลทางด้านเทคนิคเช่น มุลฐานทางราบ มาตราส่วนแผนที่ มาวิเคราะห์ร่วมกับการตีความในการระบุตำแหน่งของจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกระหว่างไทยและกัมพูชา และหาความเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องในการระบุคำพิพากษาของแต่ละฝ่ายเพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องในการกำหนดตำแหน่ง ทั้งนี้ผลงานทางวิชาการนี้จะจำกัดขอบเขตไว้เพียงคำพิพากษาของจุดเริ่มต้นที่ใช้ในการแบ่งเขตแดนทางทะเลเท่านั้น จะไม่กล่าวถึงการแบ่งเขตแดนทางทะเลแต่อย่างใด

คำสำคัญ: ปัจจัยด้านเทคนิค การสำรวจ การสร้างแผนที่ เขตแดนทางทะเล

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กองวิชาวิศวกรรมอุทกศาสตร์ ฝายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

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

Email: samharn92@yahoo.com

Abstract

This article aims at explaining the technical aspects of survey and cartography regarding land terminus point between Thailand and Cambodia. The case study will be the starting point which is occupied by Thailand and Cambodia for delineating maritime boundary. The analysis would scrutinize the technical aspects, such as scales and Datum, regarding the details of land terminus point between Thailand and Cambodia. The related technical aspects would help to understand reasons why the land terminus point was defined differently by Thailand and Cambodia. This article would not go further about maritime boundary between Thailand and Cambodia.

Key words: Technical Aspects, Survey, Cartography, Maritime Delimitation

1. บทนำ

เมื่ออนุสัญญากรุงเจนีวาว่าด้วยกฎหมายทะเล ค.ศ.1958 (UNCLOS 1958) มีผลบังคับใช้ ประเทศไทยได้ประกาศใช้อนุสัญญานี้มาตั้งแต่ปี 2501 [1] และได้ประกาศอาณาเขตทางทะเลตามบทบัญญัติใน UNCLOS 1958 การประกาศเขตทางทะเลของรัฐชายฝั่งด้านอ่าวไทย ได้แก่ ไทย เวียดนาม กัมพูชาและมาเลเซียเป็นไปในลักษณะต่างฝ่ายต่างประกาศ ทำให้เกิดเป็นพื้นที่เหลื่อมทับกันทางทะเล ซึ่งพื้นที่เหลื่อมทับทางทะเลถือเป็นเรื่องปกติเนื่องจากสถานะแวดล้อมที่นำมาพิจารณาย่อมแตกต่างกันไปตามเหตุผลของแต่ละฝ่าย แต่สิ่งหนึ่งที่ไม่ควรจะมี ความแตกต่างกันก็คือจุดเริ่มต้นในการประกาศเขตทางทะเล ซึ่งปกติแล้วถ้าไม่มีการตกลงกันเป็นอย่างอื่น รัฐชายฝั่งที่มีแนวชายฝั่งในลักษณะของรัฐประชิดจะใช้จุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกที่อยู่บนแนวชายฝั่งทะเลเป็นจุดเริ่มต้นในการแบ่งเขตแดนทางทะเล สำหรับประเทศไทยและกัมพูชาที่มีลักษณะของชายฝั่งเป็นรัฐประชิด ต่างใช้ตำแหน่งของจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกเป็นจุดเริ่มต้นในการประกาศเขตทางทะเล แต่สิ่งที่น่าสนใจคือค่าพิกัดของตำแหน่งที่ใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการประกาศนั้นมีความแตกต่างกัน โดยมีข้อเท็จจริงเพื่อพิจารณาดังนี้

1.1 ประเทศไทยประกาศเขตไหล่ทวีปเมื่อ 1 กรกฎาคม 2515 จุดเริ่มต้นในการประกาศกำหนดให้เป็นจุด “A” บนแผนที่เดินเรือฝรั่งเศสหมายเลข 1972 มาตราส่วน 1:1,096,000 ไม่ปรากฏว่ามีการระบุมูลฐานทางราบ ค่าพิกัดของจุด A คือ

ละติจูด $11^{\circ} 38' 88''$ N ลองจิจูด $102^{\circ} 54' 81''$ E [2]

นอกจากนี้กัมพูชาได้ระบุพิกัดเขตแดนไทย-กัมพูชา ไว้ในประกาศเส้นฐานตรงอีก 2 ครั้ง ได้แก่

- ประกาศเส้นฐานตรงครั้งที่ 2 เมื่อ ค.ศ.1972 กำหนดค่าพิกัดจุดที่ 1 ซึ่งเป็นเขตแดนไทย-กัมพูชา คือ

ละติจูด $11^{\circ} 39' N$ ลองจิจูด $102^{\circ} 54.06' E$ [3]

- ประกาศเส้นฐานตรงครั้งที่ 3 เมื่อ ค.ศ.1982 กำหนดค่าพิกัดจุดที่ 1 ซึ่งเป็นเขตแดนไทย-กัมพูชา คือ

ละติจูด $11^{\circ} 38' 8'' N$ ลองจิจูด $102^{\circ} 54' 3'' E$ [3]

ต่อมาเมื่อ 13 กรกฎาคม 2525 ประเทศกัมพูชาได้ประกาศเส้นฐานตรง ซึ่งประกอบด้วยจุดฐาน (base points) สำหรับเชื่อมต่อเส้นฐานตรง จำนวน 5 จุด ค่าพิกัดของจุดที่ 1 คือ

ละติจูด $11^{\circ} 38.8' N$ ลองจิจูด $102^{\circ} 54.3' E$ [4]

รายละเอียดเกี่ยวกับจุดที่ 1 ในการประกาศกำหนดเส้นฐานตรงเมื่อ 13 กรกฎาคม 2525 ระบุว่า “border point on low-water mark between Thailand and the People's Republic of Kampuchea according to treaty of 23 March 1907” [4] แปลได้ว่า “จุดดังกล่าวคือพรมแดนระหว่างไทย-กัมพูชา ซึ่งอยู่บนแนวน้ำลงต่ำตามสนธิสัญญา 23 มีนาคม 2450 (ค.ศ.1907)” หากพิจารณาจุด A ของการประกาศไหล่ทวีปและจุดที่ 1 ในการประกาศเส้นฐานตรงของกัมพูชา คือจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกตามสนธิสัญญา สยาม-ฝรั่งเศส หรือไทย-กัมพูชา ในปัจจุบัน พบว่าจุดเริ่มต้นทั้งในการประกาศไหล่ทวีปและเส้นฐานตรงของกัมพูชาที่มีตำแหน่งเดียวกันบนภูมิประเทศกลับมีค่าพิกัดต่างกัน

1.2 ประเทศไทยได้ประกาศกำหนดเส้นฐานตรงตามประกาศสำนักนายกรัฐมนตรี เรื่องเส้นฐานตรงและน่านน้ำภายในของประเทศไทย เมื่อ 11 มิถุนายน 2513 โดยเส้นฐานตรงบริเวณที่ 1 มีจุดฐานในการเชื่อมต่อเส้นฐานตรงทั้งสิ้นจำนวน 8 จุด ประกอบด้วย แหลมสิง เกาะช้างน้อย หินราบ หินลูกบาตร เกาะรัง หินบางเบา เกาะกูด และหลักเขตแดนไทย-เขมร ทั้งนี้จุดฐานทั้งหมดได้มีการระบุค่าพิกัดไว้ทุกจุดฐานยกเว้นจุดสุดท้ายที่ระบุไว้เพียงว่า “หลักเขตแดนไทย-เขมร” [5] ที่มิได้ระบุค่าพิกัดไว้แต่อย่างใด ต่อมาประเทศไทยได้ประกาศไหล่ทวีปด้านอ่าวไทยเมื่อ 18 พฤษภาคม 2516 การประกาศดังกล่าวมีแผนที่แนบท้ายระบุมาตราส่วน 1:3,500,000 ไม่ปรากฏข้อมูลเกี่ยวกับมูลฐานทางราบ ค่าพิกัดของจุดเริ่มต้นหรือจุดที่ 1 ในการประกาศคือ

ละติจูด $11^{\circ} 39.0' N$ ลองจิจูด $102^{\circ} 55.0' E$ [6]

เมื่อพิจารณาจุดสุดท้ายของเส้นฐานตรงบริเวณที่ 1 ของการประกาศเส้นฐานตรงของไทยที่ไม่มีการระบุค่าพิกัด และจุดที่ 1 ของการประกาศไหล่ทวีปของไทยที่มีการระบุค่าพิกัด พบว่ามีวัตถุประสงค์ให้เป็นตำแหน่งเดียวกันคือจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกระหว่างไทยและกัมพูชา

1.3 จากข้อมูลข้างต้นพบว่าจุด A ของการประกาศไหล่ทวีป และจุดที่ 1 ของการประกาศเส้นฐานตรงของกัมพูชา มีความคลุมเครือ ไม่ชัดเจนและขัดแย้งกันเองของค่าพิกัดในส่วนของลิปดาและฟิลิปดา สำหรับจุดสุดท้ายของการประกาศเส้นฐานตรงบริเวณที่ 1 และจุดที่ 1 ของการประกาศไหล่ทวีปของไทย แม้มิได้ระบุว่าคือจุดสิ้นสุดของเขตแดนทางบกระหว่างไทยและกัมพูชา แต่อนุมานได้ว่าจุดดังกล่าวคือจุดเดียวกับจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกระหว่างไทย-กัมพูชา ตำบลที่หรือตำแหน่ง และค่าพิกัดของตำแหน่งที่แต่ละฝ่ายประกาศนั้น แท้จริงแล้วคือตำแหน่งเดียวกันนั่นก็คือจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกตามสนธิสัญญาสยาม-ฝรั่งเศสฯ ซึ่งทั้งไทยและกัมพูชาได้ใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการแบ่งเขตแดนทางทะเลเหมือนกัน แต่ต่างกันรายละเอียดและเหตุผลประกอบ ซึ่งจะได้อธิบายปัจจัยทางด้านทางกายภาพและเทคนิคการสร้างและสำรวจแผนที่ที่เป็นเหตุให้เกิดความแตกต่างดังกล่าวขึ้น

2. บทวิเคราะห์

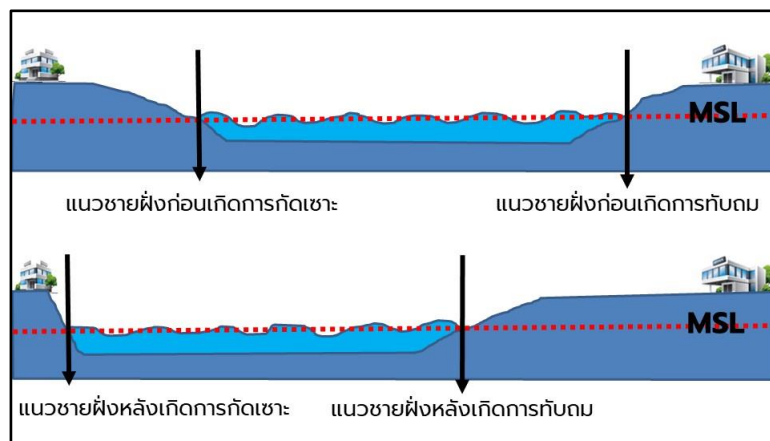
เทคนิคทางอุทกศาสตร์ด้านการสำรวจและการสร้างแผนที่นั้นมีความสำคัญต่อการระบุจุดเริ่มต้นในการกำหนดเขตแดนทางทะเล ไทยและกัมพูชาได้ประกาศเขตไหล่ทวีปฝ่ายเดียว (ต่างฝ่ายต่างประกาศ: Unilateral Claim) ทำให้เกิดเป็นพื้นที่เหลื่อมทับทางทะเล ซึ่งเกิดจากการนำสถานะแวดล้อมต่างๆ เช่น สภาพภูมิศาสตร์ตามที่ได้มีการระบุไว้ในสนธิสัญญาฯ มาพิจารณาเป็นเหตุผลในการกำหนดอาณาเขตทางทะเล โดยการพิจารณานั้นก็เป็นไปในลักษณะที่ต่างฝ่ายต่างพิจารณาทำให้เขตทางทะเลที่แต่ละฝ่ายกำหนดขึ้นมีความแตกต่างกัน สิ่งหนึ่งที่ปรากฏชัดถึงความแตกต่างคือจุดเริ่มต้นในการกำหนดไหล่ทวีปของแต่ละฝ่าย หรือแม้แต่กัมพูชาเองที่ใช้เป็นจุดเริ่มต้นทั้งในการกำหนดเส้นฐานตรงและไหล่ทวีปก็ยังคงแตกต่างกันภายในตัวเอง ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยเทคนิคอุทกศาสตร์ด้านการสำรวจและการสร้างแผนที่

2.1 แนวน้ำลงต่ำที่ถูกกำหนดให้เป็นจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกตามสนธิสัญญาฯ

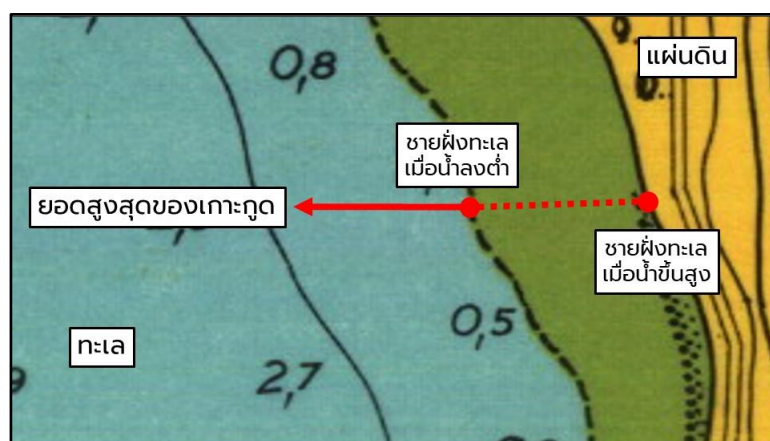
สนธิสัญญาระหว่างสยามและฝรั่งเศสว่าด้วยการปักปันเขตแดนเมื่อ 23 มีนาคม พ.ศ.2450 ระบุเกี่ยวกับจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกว่า “เขตแดนในระหว่างกรุงสยามกับอินโดจีนของฝรั่งเศสนั้น ตั้งแต่ชายฝั่งทะเลที่ตรงข้ามจากยอดเขาสูงที่สุดของเกาะกูด” [7] หากพิจารณาจากข้อความดังกล่าวพบว่า จุดสิ้นสุดหรือตำแหน่งสุดท้ายของเขตแดนทางบกคือจุดที่แผ่นดินบรรจบกับน้ำทะเลและอยู่ในแนวเส้นละติจูดเดียวกัน หรือทิศ 090 วัดจากยอดสูงสุดของเกาะกูดไปตามเข็มนาฬิกา ทั้งนี้สนธิสัญญามีได้ระบุค่าพิคัดไว้ ดังนั้นหากเวลาน้ำขึ้นบริเวณชายฝั่งทะเลก็จะถอยร่นเข้าไปในแผ่นดิน หากเป็นเวลาน้ำลงบริเวณชายฝั่งทะเลจะเลื่อนออกไปในทะเล ดังนั้นตำแหน่งของจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกระหว่างไทยและกัมพูชาจึงเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา ตามการขึ้นลงของน้ำทะเลที่ส่งผลให้ชายทะเลมีการเปลี่ยนแปลงในทิศตะวันออก - ตะวันตก หากมีการนำไปใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการแบ่งเขตแดนทางทะเลย่อมส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอน

เส้นเกณฑ์การขึ้น-ลงของน้ำจะถูกใช้สำหรับเป็นเส้นเกณฑ์ในการอ้างอิงความสูงเท่านั้น จะไม่ใช่อ้างอิงในทางราบหรือทางระยะ สำหรับเส้นเกณฑ์ระดับน้ำที่คุ้นเคยและเป็นที่ยอมรับคือ ระดับน้ำทะเลปานกลาง (Mean Sea Level : MSL) และ MSL นี้จะถูกใช้เพื่อเป็นเส้นเกณฑ์ในการอ้างอิงความสูง เช่น ดอยอินทนนท์ อยู่สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง ไม่ใช่ดอยอินทนนท์อยู่ห่าง (เชิงระยะ) จากระดับทะเลปานกลาง การอ้างอิงเชิงระยะจากชายฝั่งทะเลสามารถทำได้แต่ต้องมีการระบุเวลาเนื่องจากชายทะเลมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเนื่องจากการขึ้น-ลงของน้ำทะเล นอกจากนี้ชายฝั่งมีการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้ชายฝั่งมีพื้นที่ขยายออกไปในทะเลทั้งตามธรรมชาติเช่นการทับถมของตะกอน หรือการกระทำของมนุษย์ เช่น การก่อสร้างตามแนวชายฝั่งทำให้ระยะห่างของวัตถุหรือสถานที่ที่ต้องการอ้างอิงจากชายทะเลมีระยะห่างจากชายทะเลเพิ่มมากขึ้น ในทางตรงข้ามหากชายทะเลมีลักษณะที่ถอยร่นเข้าไปในแผ่นดินที่เกิดจากการกัดเซาะการอ้างอิงจากชายทะเลย่อมมีระยะห่างจากชายทะเลลดลง [8] ดังรูปที่ 1 ทั้งนี้เส้นเกณฑ์อ้างอิงระดับการขึ้น-ลงของน้ำนั้นมิได้มีเฉพาะ MSL เท่านั้น แต่ยังมีเส้นเกณฑ์ในรูปแบบอื่นๆ แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการนำเส้นเกณฑ์แต่ละแบบไปใช้งาน สำหรับแผนที่เดินเรือที่ต้องการความปลอดภัยในการเดินเรือจะใช้น้ำลงต่ำสุด (Lowest Low Water : LLW) เป็นเกณฑ์ หมายความว่าความลึกของน้ำที่ขึ้น-ลงตลอดเวลา

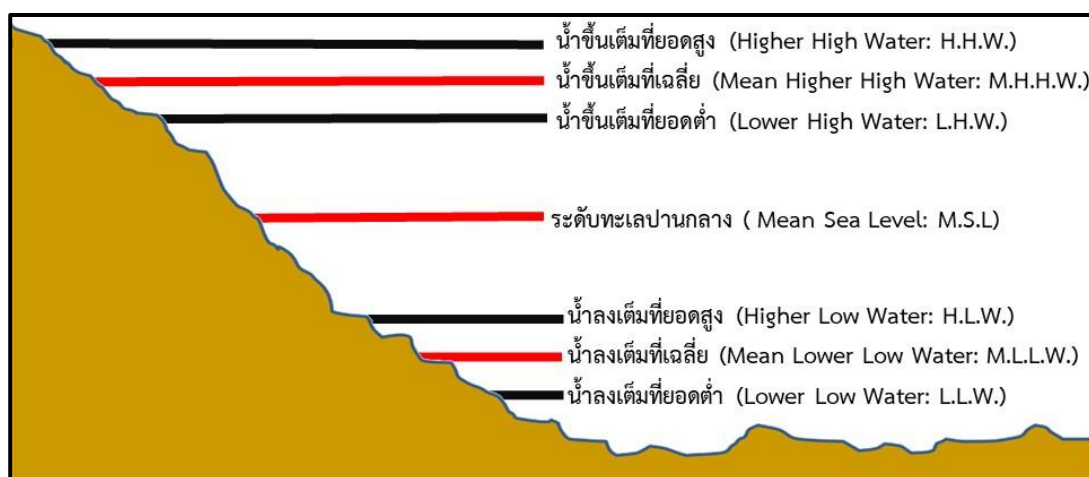
ในพื้นที่หนึ่งจะไม่ขึ้นไปกว่าที่แสดงบนแผนที่เดินเรือ เส้นเกณฑ์การขึ้น-ลงของน้ำไม่มีผลเชิงระยะเพราะเป็นการใช้อ้างอิงในแนวตั้ง ทั้งนี้ชายฝั่งทะเลตามที่ระบุในสนธิสัญญาฯ จึงไม่มีผลกระทบในแนวตั้ง แต่จะได้รับผลกระทบในทางระยะก็ต่อเมื่อชายฝั่งทะเลมีการเปลี่ยนแปลง ระดับน้ำจะส่งผลให้จุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกเปลี่ยนแปลงในแนวตะวันออก-ตะวันตก เมื่อบริเวณดังกล่าวมีลักษณะเป็นชายหาดทำให้การขึ้น-ลงของน้ำมีการเคลื่อนตัวในแนวราบ แต่จะไม่ส่งผลในบริเวณที่เป็นหน้าผา ดังนั้นตำแหน่งของจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกจะยังคงยึดแนวเส้นในทิศตะวันออก-ตะวันตก ที่วัดจากยอดสูงสุดของเกาะกูดเช่นเดิม ดังรูปที่ 2 และเส้นเกณฑ์ความสูงแบบต่างๆ ที่ใช้การขึ้น-ลงของน้ำทะเลในการอ้างอิง ดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของชายทะเล (น้ำบรรจุบนแผ่นดิน) ที่มีการเปลี่ยนแปลงจากการกัดเซาะ และทับถมของตะกอน ส่งผลให้ระยะทางเชิงแนวราบระหว่างวัดกับชายทะเลมีการเปลี่ยนแปลง แต่ความสูงที่อ้างอิงจากระดับน้ำทะเลเช่น ระดับน้ำทะเลปานกลาง (Mean Sea Level: MSL) ไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเลเมื่อน้ำขึ้นสูงสุด (HHW) – ลงต่ำสุด (LLW) โดยทิศทางของเส้นเขตแดนไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ (ภาพบางส่วนจากแผนที่เดินเรือของกรมอุทกศาสตร์)



รูปที่ 3 เส้นเกณฑ์ทางดิ่งแบบต่างๆ

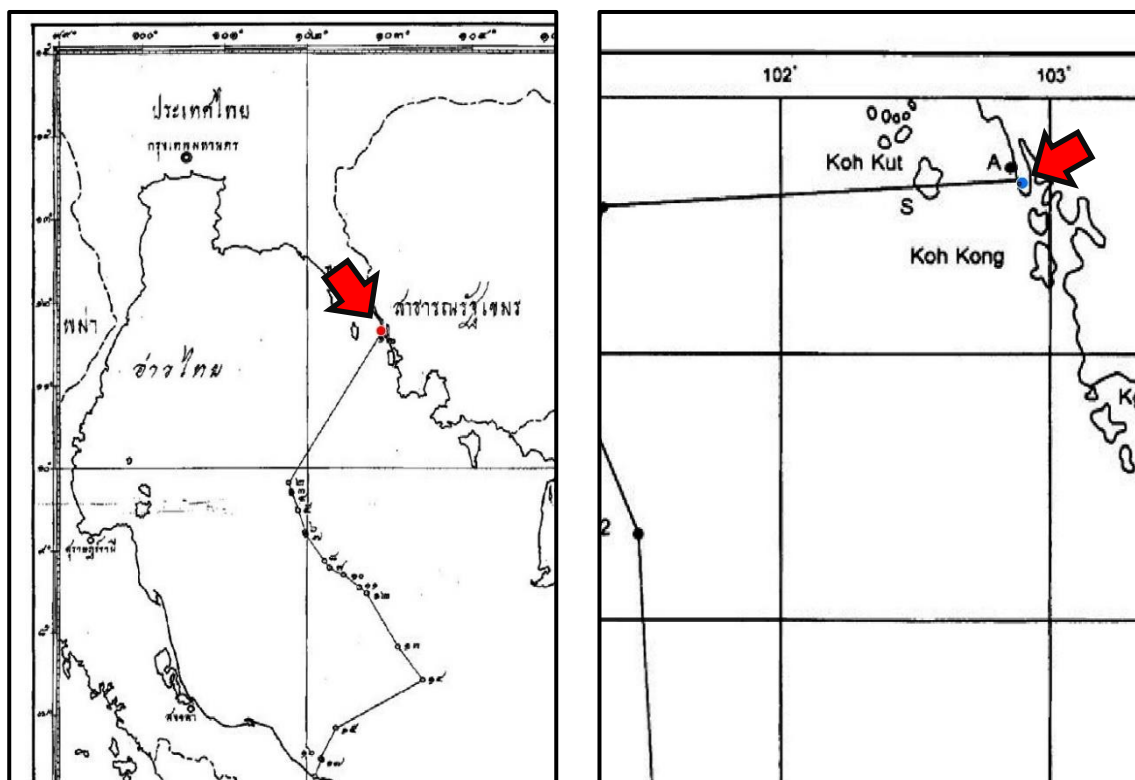
2.2 มาตราส่วน (Scale) และมูลฐานทางราบของแผนที่ (Datum)

จุดประสงค์ของแผนที่คือการแสดงลักษณะทางกายภาพ ภูมิศาสตร์และวัตถุต่างๆ บนพื้นโลกลงบนพื้นราบ เช่น กระดาษหรือจอแสดงผลโดยยังคงรักษาไว้ซึ่งคุณสมบัติต่างๆ เช่น ทิศทาง รูปร่าง ขนาดและพื้นที่ตามลักษณะโครงสร้างของแผนที่แต่ละประเภท ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการถ่ายทอดตำแหน่งและลักษณะทางกายภาพบนพื้นโลกลงบนแผ่นกระดาษประกอบด้วย มาตราส่วน (Scale) และมูลฐานทางราบ (Datum) กรณีของมาตราส่วนมีผลต่อการกำหนดขนาดของวัตถุที่ถูกถ่ายทอดลงบนแผ่นกระดาษ เช่น การแสดงอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิหรือถนนบนแผนที่ที่มาตราส่วนใหญ่ จะสามารถแสดงเป็นพื้นที่และเห็นรายละเอียดได้อย่างชัดเจน แต่หากแสดงบนแผนที่ที่มาตราส่วนเล็ก อนุสาวรีย์ฯ จะถูกแสดงเป็นเพียงจุด และถนนแสดงได้เป็นเพียงเส้นเท่านั้น ในส่วนของมูลฐานทางราบคือการจำลองโครงสร้างของโลกที่มีลักษณะเกือบทรงกลมลงบนกระดาษที่มีลักษณะแบน การเลือกมูลฐานทางราบที่เหมาะสมย่อมส่งผลต่อความถูกต้องของการถ่ายทอดพื้นผิวของโลกลงบนกระดาษ ซึ่งส่งผลต่อวิธีการระบุตำแหน่งของวัตถุบนพื้นโลกด้วย ยกตัวอย่างเช่น การแสดงตำบลที่ของอนุสาวรีย์ฯ สามารถแสดงได้ทั้งในลักษณะของการอ้างอิงแบบแกน X, Y หรือแสดงเป็นค่าพิกัดในลักษณะขององศาและระยะเช่น ระยะ 100 เมตร ในทิศ 45 องศา จากจุดอ้างอิง มูลฐานทางราบที่แตกต่างกันย่อมมีจุดกำเนิดที่แตกต่างกัน ดังนั้น ค่าพิกัดของวัตถุใดๆ บนพื้นโลกจึงมีค่าแตกต่างกันตามแต่ละมูลฐานทางราบ แต่อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าจะใช้มูลฐานทางราบใด หรือวิธีบอกพิกัดเป็นอย่างไร ตำแหน่งของอนุสาวรีย์ฯ หรือวัตถุใดๆ ก็ยังคงอยู่ที่เดิมบนผิวโลกจริง

2.2.1 มาตราส่วนแผนที่แนบท้ายประกาศเขตไหล่ทวีปของไทยมีมาตราส่วน 1:3,500,000 ซึ่งหมายความว่าหากทำการวัดระยะบนแผนที่ได้ 1 มิลลิเมตร ระยะทางจริงบนภูมิประเทศจะเท่ากับ 3,500,000 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 3.5 กิโลเมตร หรือหากนำแผนที่ที่มาตราส่วน 1:1,096,000 ที่กัมพูชาใช้เป็นแผนที่แนบท้ายประกาศไหล่ทวีป มาทำการพล็อตจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกระหว่างไทยและกัมพูชา ด้วยดินสอที่มีความหนาขนาดประมาณ 0.5 มิลลิเมตร จะมีความคลาดเคลื่อนบนภูมิประเทศได้ถึง 548 เมตร

ทั้งนี้การระบุตำแหน่งของวัตถุบนแผนที่นั้นสามารถทำการแปลงค่าพิกัดระหว่างมูลฐานทางราบได้ สำหรับการแปลงค่าพิกัดตำบลที่ระหว่างมูลฐานทางราบในกรณีระหว่าง Indian 1975 กับ WGS84 (โดยตั้งสมมติฐานว่าแผนที่แนบท้ายประกาศฯ ได้ถูกสร้างขึ้นบนมูลฐานทางราบ Indian 1975) มีค่าพารามิเตอร์ตามแนวแกน X คือ 206 เมตร และค่าพารามิเตอร์ตามแนวแกน Y คือ 837 เมตร [9] (ตามประกาศ ผท.ทหารล่าสุด dX 201.5 ม. dY 837.9 ม. dZ 294.8 ม.) เมื่อเปรียบเทียบขนาดหรือระยะของค่าพารามิเตอร์กับความคลาดเคลื่อนในการพล็อตค่าพิกัดบนแผนที่พบว่า ค่าพารามิเตอร์ไม่มีผลกระทบใดๆ ในการนำค่าพิกัดจากแผนที่หนึ่งไปแสดงบนอีกแผนที่หนึ่งเนื่องจากมาตราส่วนของแผนที่มีขนาดเล็กมาก การเลือกใช้งานแผนที่แนบท้ายประกาศฯ ใหญ่หรือของกรมแผนที่ทหารหรือของกรมแผนที่ทหารบกเพื่อแสดงค่าพิกัดที่ต่างฝ่ายต่างกำหนดขึ้นร่วมกัน จึงสามารถกระทำได้เนื่องจากมาตราส่วนที่ใช้มีขนาดเล็กมากไม่ส่งผลกระทบในเชิงระยะบนแผนที่ จุดต่างๆ ที่ทำการพล็อตจึงไม่จำเป็นต้องมีการแปลงค่าพิกัดระหว่างมูลฐานทางราบ แต่ต้องพึงระมัดระวังเกี่ยวกับข้อจำกัดด้านเทคนิคว่า การนำค่าพิกัดจากแผนที่แนบท้ายของทั้งสองฉบับไปพล็อตลงบนแผนที่ ที่มีการระบุมูลฐานทางราบหรือพล็อตลงบนแผนที่ที่มีมาตราส่วนใหญ่กว่าต้องคำนึงถึงข้อจำกัดด้านเทคนิค เนื่องจากแผนที่มาตราส่วนใหญ่จะมีความละเอียดมากกว่าแผนที่มาตราส่วนเล็ก การถ่ายทอดข้อมูลจากสิ่งที่จะละเอียดน้อยกว่าไปสู่สิ่งที่ละเอียดมากกว่าจึงต้องคำนึงถึงข้อจำกัดดังกล่าวด้วย

2.2.2 มูลฐานทางราบที่ใช้ในแผนที่มาตราส่วนเล็ก (Overview) มักจะมีได้มีการกำหนดมูลฐานทางราบเนื่องจากการสร้างแผนที่มาตราส่วนเล็กนั้นจะเป็นการนำแผนที่มาตราส่วนใหญ่หลายๆ แผนที่มีการกำหนดมูลฐานทางราบที่แตกต่างกันมาประกอบเป็นแผนที่มาตราส่วนเล็กหนึ่งแผ่น เทคนิคการประกอบระวางแผนที่ในลักษณะดังกล่าวได้มีการกล่าวไว้ในคู่มือเทคนิคกฎหมายทะเลว่า “non-geocentric geodetic datums used ellipsoids of various shapes and sizes, positioned and oriented with respect to the Earth in some well-defined manner” ซึ่งแปลได้ความว่าการประกอบระวางแผนที่ที่มีข้อมูลหลากหลายทั้งรูปร่างและขนาด การกำหนดตำแหน่งและทิศทางจึงดำเนินการด้วยวิธีการที่เหมาะสมเพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะภูมิประเทศจริง [10] ดังนั้นแผนที่แนบท้ายประกาศฯ ใหญ่หรือของกรมแผนที่ทหารและของไทยที่ต้องการแสดงภาพรวมของพื้นที่ทั้งหมดของไหล่ทวีปจึงมีความเหมาะสม แต่ค่าพิกัดบนแผนที่แนบท้ายดังกล่าวไม่สามารถทำการพล็อตลงบนแผนที่แผ่นอื่นได้ด้วยเหตุผลตามที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น นอกจากนี้หากทำการเปรียบเทียบค่าพิกัดเชิงตำบลที่ของจุดเริ่มต้น โดยไม่คำนึงถึงมูลฐานทางราบของแผนที่แนบท้ายประกาศฯ ของทั้งสองประเทศ พบว่าความแตกต่างในแนวเหนือ-ใต้ระยะทางบนภูมิประเทศจริงคือ 0.2 ลิปดา หรือประมาณ 370.4 เมตร ในแนวตะวันออก-ตะวันตกคือ 0.7 ลิปดา หรือประมาณ 1,296.4 เมตร (1 ลิปดา เท่ากับ 1,852 เมตร) ซึ่งพบว่าความแตกต่างดังกล่าวเมื่อนำมาพล็อตลงบนแผนที่แนบท้ายแผ่นเดียวกันจะมีตำบลที่เดียวกัน เนื่องจากแผนที่ที่มีมาตราส่วนที่เล็กมากจนความแตกต่างเชิงระยะไม่มีผลกระทบต่อการพล็อต ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 เปรียบเทียบค่าพิกัดของจุดเริ่มต้นในการประกาศไหล่ทวีปของไทยและกัมพูชา ทำการพล็อตค่าพิกัดและโยงยึดแผนที่บนมูลฐานทางราบ WGS84 [2][6]

ซ้าย พิกัดจุดที่ 1 ในการประกาศไหล่ทวีปของกัมพูชาพล็อตบนแผนที่แนบท้ายประกาศไหล่ทวีปของไทย ขวา พิกัดจุดที่ 1 ในการประกาศไหล่ทวีปของไทยพล็อตบนแผนที่แนบท้ายประกาศไหล่ทวีปของกัมพูชา (ด้วยข้อจำกัดของขนาดกระดาษจึงไม่สามารถแสดงแผนที่ได้ทั้งฉบับเนื่องจากต้องการคงมาตราส่วนของแผนที่ไว้)

2.3 ความแตกต่างค่าพิกัดของจุดเริ่มต้นในการประกาศไหล่ทวีปและเส้นฐานตรงของกัมพูชา

ความละเอียดเชิงพิกัดสำหรับการระบุตำแหน่งที่บนแผนที่เดินเรือ นั้น ขึ้นกับมาตราส่วนของแผนที่ เนื่องจากการระบุค่าพิกัดจะอ้างอิงจากข้อความและมาตราส่วนที่ระบุไว้ที่ขอบระวางแผนที่ หากเป็นแผนที่มาตราส่วนเล็กการแบ่งขีดย่อยของขอบระวางแผนที่จะทำได้ในหน่วยขององศา หากเป็นแผนที่มาตราส่วนใหญ่ก็สามารถแบ่งขีดย่อยได้จนถึงระดับฟิลิปดา ตัวอย่างเช่นค่าพิกัด 10.511° บนแผนที่เดินเรือสามารถกำหนดได้ 3 แบบคือ

2.3.1 ทศนิยมขององศาเช่น 10.511° สำหรับแผนที่มาตราส่วนเล็ก

2.3.2 ทศนิยมของลิปดาเช่น $10^\circ 30.66'$ สำหรับแผนที่มาตราส่วนเล็กถึงมาตราส่วนกลาง (0.511×60)

2.3.3 ทศนิยมของฟิลิปดาเช่น $10^\circ 30' 39.6''$ สำหรับแผนที่มาตราส่วนใหญ่ (0.66×60)

$$\text{โดย } 10.511^\circ = 10^\circ 30.66' = 10^\circ 30' 39.6''$$

กัมพูชาใช้เหตุผลในการกำหนดจุดเริ่มต้นของประกาศไหล่ทวีปและเส้นฐานตรงว่าจุดเริ่มต้นดังกล่าวเป็นไปตามสนธิสัญญาสยาม-ฝรั่งเศส [2] สิ่งที่ยกมาดำเนินการเพิ่มเติมคือ การกำหนดค่าพิกัดให้กับจุดดังกล่าว ซึ่งในสนธิสัญญาฯ มิได้มีการระบุค่าพิกัดไว้ นอกจากนี้ค่าพิกัดที่ระบุไว้ในคำประกาศไหล่ทวีปที่ระบุว่า “ละติจูด $11^{\circ} 38'88''$ N ลองจิจูด $102^{\circ} 54'81''$ E” [2] เป็นค่าพิกัดที่ได้มาจากแผนที่เดินเรือฝรั่งเศสไม่มีความชัดเจนในส่วนของลิปดาและฟิลิปดา เนื่องจากค่าของ “38'88” และ “54'81” วิธีการอ่านค่าพิกัดบนแผนที่เดินเรือที่ถูกต้องควรจะต้องเป็น 38.88' และ 54.81' เพราะค่าของลิปดาและฟิลิปดาจะมีค่าไม่เกิน 60 การระบุสัญลักษณ์ดังกล่าวจึงส่งผลให้เกิดความคลุมเครือในการตีความ ซึ่งหากต้องการกำหนดให้ค่าของ 0.88' และ 0.81' เป็นค่าของฟิลิปดาที่สามารถทำได้ด้วยการคูณด้วย 60 และเมื่อทำการแปลงค่าพิกัดจะได้ค่าพิกัดคือ ละติจูด $11^{\circ} 38' 52.8''$ N ลองจิจูด $102^{\circ} 54' 48.6''$ E แต่เมื่อพิจารณามาตราส่วนของแผนที่เดินเรือที่ใช้ระบุค่าพิกัดคือ 1:1,096,000 ซึ่งเป็นแผนที่มาตราส่วนเล็กไม่สามารถทำการแบ่งสเกลที่ขอบระวางแผนที่ในระดับฟิลิปดาได้ จากการค้นคว้าข้อมูลเพิ่มเติมพบว่ากัมพูชาได้นำค่าพิกัดของตำแหน่งดังกล่าวมากำหนดเป็นค่าพิกัดของจุดเริ่มต้นในการประกาศเส้นฐานตรงคือ

ละติจูด $11^{\circ} 38.8' N$ ลองจิจูด $102^{\circ} 54.3' E$ [4]

จุดเริ่มต้นของการประกาศไหล่ทวีปและเส้นฐานตรงของกัมพูชานั้นแม้จะอยู่ที่เดียวกัน แต่ค่าพิกัดแตกต่างกันได้หากมูลฐานทางราบต่างกัน แต่การประกาศไหล่ทวีปและเส้นฐานตรงของกัมพูชาได้มีการระบุมูลฐานทางราบไว้ในคำประกาศแต่อย่างใด ทั้งนี้หากพิจารณาว่าค่าพิกัดทั้งสองอยู่บนมูลฐานทางราบเดียวกันและยึดถือว่าค่าพิกัดของจุดที่ 1 ของไหล่ทวีปที่กัมพูชาประกาศมีค่าพิกัดคือละติจูด $11^{\circ} 38.88' N$ ลองจิจูด $102^{\circ} 54.81' E$ พบว่าจุด A และจุดที่ 1 มีความแตกต่างเชิงระยะในแนวละติจูดคือ 148.16 เมตร ($38.88' - 38.8'$) ความแตกต่างแนวลองจิจูดคือ 944.52 เมตร ($54.81' - 54.3'$) ความแตกต่างดังกล่าวหากทำการพล็อตบนแผนที่แนบท้ายประกาศไหล่ทวีปของกัมพูชาที่มีมาตราส่วน 1:1,096,000 ด้วยการใช้หัวดินสอดขนาด 0.5 มิลลิเมตรบนแผนที่จะเท่ากับ 548 เมตรบนภูมิประเทศจริง จะพบว่าไม่สามารถหาค่าความแตกต่างเชิงระยะบนแผนที่ได้เนื่องจากแผนที่ที่มีมาตราส่วนที่เล็กมากจนทำให้จุดที่พล็อตสองจุดกลายเป็นจุดเดียวกันบนแผนที่

2.4 มาตราส่วนแผนที่กับงานด้านเขตแดนทางทะเล

UNCLOS 1982 กำหนดเกี่ยวกับคุณลักษณะของแผนที่สำหรับอาณาเขตทางทะเลไว้ในมาตรา 15 (เส้นฐานปกติ) ว่าเส้นฐานปกติสำหรับวัดความกว้างของทะเลอาณาเขตคือแนวน้ำลงต่ำตามแนวชายฝั่งที่แสดงบนแผนที่มาตราส่วนใหญ่ที่ได้รับการยอมรับอย่างเป็นทางการโดยรัฐชายฝั่ง [11] ซึ่งมีได้มีการระบุอย่างชัดเจนว่ามาตราส่วนใหญ่นั้นจะต้องมีมาตราส่วนตั้งแต่เท่าใดขึ้นไป การระบุว่าเป็นแผนที่ที่ได้รับการยอมรับอย่างเป็นทางการหมายความว่าแผนที่ดังกล่าวจะต้องทำการสำรวจและจัดสร้างโดยหน่วยงานที่เป็นที่ยอมรับจากรัฐชายฝั่งนั้นๆ สำหรับประเทศไทยหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบในการสำรวจและสร้างแผนที่เดินเรือในน่านน้ำไทย คือ กรมอุทกศาสตร์ อนึ่งแผนที่เดินเรือที่จัดสร้างและเผยแพร่ขึ้น เป็นไปตามมาตรฐานขององค์การอุทกศาสตร์สากล (International Hydrographic Organization : IHO) ที่มีกรมอุทกศาสตร์

เป็นสมาชิกในฐานะผู้แทนของประเทศไทย ทั้งนี้ กรมอุทกศาสตร์ ได้กำหนดมาตราส่วนแผนที่เดินเรือที่อ้างอิงจากมาตรฐานของ IHO สำหรับการใช้งานด้านการเดินเรือไว้คือ [12]

ประเภทและมาตราส่วนแผนที่เดินเรือ

วัตถุประสงค์การใช้งาน	มาตราส่วน	ขนาดมาตราส่วน
เดินเรือทั่วไป (Overview)	เล็กกว่า 1:1,499,999	เล็ก
เดินเรือในทะเลลึก (General)	1:350,000 – 1:1,499,999	เล็ก
เดินเรือชายฝั่ง (Coastal)	1:90,000 – 1:349,000	กลาง
เดินเรือใกล้ฝั่ง (Approach)	1:22,000 – 1 : 89,999	กลาง
เดินเรือบริเวณท่าเรือ (Harbor)	1:4,000 – 1:21,999	ใหญ่
เทียบเรือ (Berthing)	ใหญ่กว่า 1:4,000	ใหญ่

การเลือกใช้มาตราส่วนแผนที่ในการใช้งานด้านอาณาเขตทางทะเลและเขตแดนทางทะเลนั้น สามารถพิจารณาเลือกใช้แผนที่ ที่มีมาตราส่วนสอดคล้องกับจุดประสงค์ของการใช้งานและขนาดของพื้นที่ เช่นแผนที่มาตราส่วนเล็กจะเหมาะสมสำหรับการแสดงอาณาเขตทางทะเลในภาพรวม แผนที่มาตราส่วนใหญ่ก็จะเหมาะสมกับการระบุค่าพิกัดของตำบลที่ ที่ต้องการความถูกต้องและมีความละเอียดสูง ทั้งนี้การถ่ายโอนค่าพิกัดต่างๆ ระหว่างแผนที่ต้องใช้ความรู้ทางด้านเทคนิคเนื่องจากค่าพิกัดบนแผนที่ ที่มีมูลฐานทางราบต่างกัน แม้ว่าจะอยู่ตำแหน่งหรือตำบลที่เดียวกันจะมีค่าพิกัดต่างกัน นอกจากนี้การระบุค่าพิกัดของตำบลที่บนแผนที่มาตราส่วนต่างกันความละเอียดในการระบุค่าพิกัดก็จะต่างกันซึ่งจะต้องใช้การแปลงหน่วยเพื่อให้การแสดงค่าพิกัดมีความถูกต้องและเหมาะสมกับมาตราส่วนของแผนที่

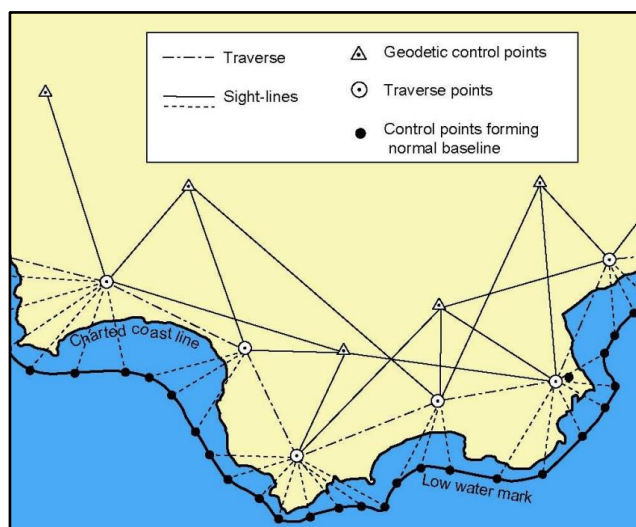
3. ข้อพิจารณา

จากข้อมูลที่ได้ทำการศึกษาพบว่า ค่าพิกัดของจุดที่ 1 ในการประกาศไหล่ทวีปของประเทศไทย ค่าพิกัดของจุด A และจุดที่ 1 ในการประกาศไหล่ทวีปและเส้นฐานตรงของประเทศกัมพูชา องค์ประกอบด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องและสถานะแวดล้อมทางประวัติศาสตร์ พบว่าจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกระหว่างสยาม-ฝรั่งเศส ได้มีการกำหนดเมื่อ 23 มีนาคม 2450 (ค.ศ.1907) ณ ช่วงเวลาดังกล่าวการสำรวจเป็นการสำรวจรังวัดด้วยวิธีการรังวัดมุมหรือวัดระยะ ปรากฏจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นเครื่องช่วย การกำหนดเขตแดนจะใช้ลักษณะตามภูมิประเทศที่เด่นชัด เช่น สันปันน้ำ แม่น้ำ เป็นต้น การปักปันเขตแดนมิได้มีจุดประสงค์เพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการแบ่งเขตแดนลงไปในทะเลแต่อย่างใด สำหรับจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกตามที่ระบุไว้ในสนธิสัญญาสยาม-ฝรั่งเศส ก็ใช้ลักษณะตามธรรมชาติเป็นจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกโดยมีการระบุว่า “เขตแดนในระหว่างกรุงสยามกับอินโดจีนของฝรั่งเศสนั้น ตั้งแต่ชายฝั่งทะเลที่ตรงข้ามจากยอดเขาสูงที่สุดของเกาะกูด” [7] เข้าใจว่าเมื่อการสำรวจปักปันเขตแดนดำเนินการมาถึงบริเวณชายฝั่งทะเล ซึ่งไม่มีลักษณะทางธรรมชาติที่โดดเด่น หรือไม่มีความมั่นคงเพียงพอต่อการใช้เป็นหลักเขตแดน หรือหลักอ้างอิงเขตแดนได้

การกำหนดจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกจึงได้ทำการอ้างอิงกับลักษณะตามธรรมชาติที่มีความมั่นคงถาวร ได้แก่ ยอดสูงสุดของเกาะกูด ดังนั้นไม่ว่าชายฝั่งจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรทั้งในลักษณะการทับถมของตะกอนหรือพังทลายของชายฝั่ง จุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกระหว่างไทยและกัมพูชาก็ยังอ้างอิงได้จากยอดสูงสุดของเกาะกูดเช่นเดิม ทั้งนี้หากต้องการระบุพิกัดที่ชัดเจนเกี่ยวกับจุดสิ้นสุดเขตแดนก็สามารถทำได้เช่นกัน

3.1 การกำหนดค่าพิกัดของแนวน้ำลงต่ำ

ชายฝั่งทะเลตามระบุในสนธิสัญญามีได้มีการระบุค่าพิกัดไว้อย่างชัดเจน เป็นเพียงการอ้างอิงจากยอดสูงสุดของเกาะกูด การที่ได้ระบุค่าพิกัดไว้อย่างชัดเจนจึงเกิดการตีความและการระบุค่าพิกัดที่แตกต่างกันของแต่ละฝ่าย ดังนั้นหากต้องการลดปัญหาความไม่แน่นอนเกี่ยวกับชายฝั่งทะเลที่ใช้เป็นเขตแดนระหว่างไทยและกัมพูชาที่สามารถกระทำได้คือการกำหนดค่าพิกัดของแนวน้ำลงต่ำร่วมกันโดยกำหนดตำบลที่ให้อยู่ในแนวเดียวกับยอดสูงสุดของเกาะกูด เมื่อได้ตำบลที่แน่นอนก็ให้ทำการสร้างหมุดอ้างอิง ณ ตำแหน่งที่ไม่ได้รับผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของชายฝั่งสำหรับอ้างอิงตำบลที่และพิกัดของจุดสิ้นสุดเขตแดนตามสนธิสัญญา



รูปที่ 5 การสร้างหมุดอ้างอิงตามแนวชายฝั่งสำหรับการอ้างอิงแนวน้ำลงต่ำ [10]

3.2 ความสำคัญของจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกและแผนที่ประกอบในการระบุค่าพิกัดของจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบก

จุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกตามที่ระบุไว้ในสนธิสัญญาสยาม-ฝรั่งเศส มิได้กำหนดว่าจุดดังกล่าวจะเป็นจุดเริ่มต้นในการแบ่งเขตแดนทางทะเลแต่อย่างใด แต่ทั้งไทยและกัมพูชาได้นำจุดดังกล่าวมาเป็นจุดเริ่มต้นในการประกาศกำหนดไหล่ทวีป ฝ่ายไทยกำหนดให้เป็นจุดที่ “1” ส่วนกัมพูชากำหนดให้เป็นจุด “A” ในการประกาศ จุดที่ 1 ของไทยและจุด A ของกัมพูชา ควรจะเป็นจุดเดียวกัน หากต้องการให้การแบ่งเขตแดนทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชาเป็นไปด้วยความเรียบร้อย ทั้งสองฝ่ายควรร่วมกันในการกำหนดจุดเริ่มต้นในการกำหนดเขตแดนทางทะเลระหว่างกันโดยคำนึงถึงข้อมูลทางด้านเทคนิคต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง คือ

3.2.1 มาตราส่วนแผนที่ การกำหนดค่าพิกัดจุดเริ่มต้นเพียงจุดเดียวเป็นการกำหนดแบบจำเพาะเจาะจง มิได้มีจุดประสงค์ในลักษณะการแสดงผลภาพรวม ดังนั้นมาตราส่วนแผนที่จึงควรมีขนาดใหญ่ เนื่องจากสามารถถ่ายทอดค่าพิกัดจากแผนที่มาตราส่วนใหญ่ไปยังแผนที่มาตราส่วนเล็กได้ หากต้องการนำค่าพิกัดดังกล่าวไปใช้แสดงร่วมกับแผนที่เขตทางทะเลอื่นๆ ในภาพรวมที่มีมาตราส่วนเล็กกว่า

3.2.2 มูลฐานทางราบ ปัจจุบันมูลฐานทางราบที่ใช้กับเครื่องหาตำแหน่งด้วยสัญญาณดาวเทียม GPS คือ WGS84 การกำหนดมูลฐานทางราบให้กับจุดเริ่มต้นในการกำหนดเขตแดนทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชาจะช่วยให้การถ่ายโอนค่าพิกัดระหว่างแผนที่ที่มีมูลฐานทางราบต่างกัน มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นและเป็นที่ยอมรับร่วมกันทั้งสองฝ่าย

3.2.3 ค่าพิกัดจุดเริ่มต้น เมื่อได้ข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญได้แก่มาตราส่วนแผนที่และมูลฐานทางราบ ขั้นตอนต่อไปคือการระบุค่าพิกัดเริ่มต้น เนื่องจากสนธิสัญญาสยาม-ฝรั่งเศส กำหนดจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกด้วยการอ้างอิงกับยอดสูงสุดของเกาะกูด ดังนั้นค่าพิกัด “ละติจูด” ของจุดเริ่มต้นจะต้องมีค่าเดียวกับยอดสูงสุดของเกาะกูด สิ่งที่ไทยและกัมพูชาจะต้องพิจารณาร่วมกันก็คือค่าพิกัดลองจิจูดว่าจะให้อยู่ ณ ที่ใดบนเส้นละติจูดเดียวกับยอดสูงสุดของเกาะกูด การกำหนดค่าพิกัดลองจิจูดจะไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่แต่อย่างใด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของลองจิจูดยังคงอยู่บนเส้นละติจูดเดิม การเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่จะส่งผลกระทบในแนวละติจูดเท่านั้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในแนวเหนือ-ใต้ ที่ส่งผลให้เกิดความได้เปรียบเสียเปรียบเชิงพื้นที่ สิ่งที่สำคัญคือการตกลงร่วมกันว่าค่าพิกัดลองจิจูดเท่าใดที่อยู่บนเส้นละติจูดเดียวกับยอดสูงสุดของเกาะกูด ทั้งนี้การระบุพิกัดที่แน่นอนนั้นได้มีการกล่าวไว้ใน MOU 2544 ว่า “PtA (จุดเริ่มต้นในการประกาศไหล่ทวีปของกัมพูชา) & T1 (จุดเริ่มต้นในการประกาศไหล่ทวีปของไทย) – location of land border with coastline at low water to be verified” [7] โดยข้อเท็จจริงที่ต้องพิจารณาร่วมกันคือ ตำแหน่งบนโลกจริงจะคงเดิม จะเปลี่ยนแปลงเฉพาะพิกัดที่เป็นไปตามมูลฐานทางราบ

4. สรุป

จุดประสงค์ของการกำหนดจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกตามสนธิสัญญาสยาม-ฝรั่งเศส เมื่อร้อยกว่าปีที่ผ่านมาเป็นไปเพื่อปักปันเขตแดนทางบกเท่านั้น เทคนิคและวิธีการในการรังวัดสำรวจก็เป็นไปตามยุคสมัยเพื่อหาจุดสิ้นสุดเขตแดน ทั้งการใช้สันปันน้ำ หรือลักษณะทางกายภาพทางธรรมชาติที่ชัดเจน เพื่อใช้เป็นจุดเขตแดนหรือจุดอ้างอิงเขตแดน เช่น การใช้แนวน้ำลงต่ำเป็นจุดเขตแดนโดยอ้างอิงกับจุดอ้างอิงเขตแดนคือยอดสูงสุดของเกาะกูด โดยมิได้คำนึงว่าจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกดังกล่าวจะถูกนำมาเกี่ยวข้องกับเขตแดนทางทะเลแต่อย่างใด เมื่อวันเวลาผ่านไปความถูกต้องของเครื่องมือในการสำรวจรังวัดมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น แต่การตีความเนื้อหาในสนธิสัญญาฯ ที่นำไปสู่การระบุตำแหน่งของจุดเริ่มต้นมีความต่างกัน ส่งผลให้เกิดพื้นที่เหลื่อมทับทางทะเลระหว่างกันขึ้น ไทยและกัมพูชาได้ร่วมกันหาทางแก้ปัญหาอย่างสันติวิธีด้วยการจัดทำบันทึกความเข้าใจระหว่างไทยและกัมพูชาว่าด้วยพื้นที่ที่ไทยและกัมพูชาอ้างสิทธิในไหล่ทวีปเหลื่อมทับกันเมื่อ 18 มิถุนายน 2544 ทั้งนี้การแก้ปัญหาเกี่ยวกับจุดเริ่มต้นในแบ่งเขตแดนทางทะเลหรือ

จุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกได้ถูกระบุไว้ในบันทึกความเข้าใจไว้ด้วย ปัจจุบันเทคโนโลยีและอุปกรณ์ในการสำรวจและรังวัดในการหาตำแหน่งพิกัดของตำบลที่ใดๆ เพื่อการสร้างแผนที่ที่มีความทันสมัยและให้ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องสูงกว่าในอดีตเป็นอย่างมาก การระบุค่าพิกัดของจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบก ซึ่งจะถูกใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการประกาศอาณาเขตทางทะเลทั้งของไทยและของกัมพูชา มีความพร้อมมากกว่าในอดีต ดังนั้นสิ่งสำคัญในการระบุค่าพิกัดจึงขึ้นอยู่กับความเจตนาของทั้งสองฝ่ายว่าจะนำข้อมูลทางด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องมาพิจารณาอย่างไรเพื่อให้เกิดความถูกต้องสูงสุดและเป็นที่ยอมรับของทั้งสองฝ่าย นอกจากนี้หากทั้งสองฝ่ายสามารถตกลงร่วมกันได้เกี่ยวกับมาตราส่วนของแผนที่และมูลฐานทางราบที่เกี่ยวข้องกับค่าพิกัดของตำบลที่ของจุดเริ่มต้นในการแบ่งเขตแดนทางทะเลได้ ก็จะเป็นจุดเริ่มต้นในการพิจารณาพิกัดเขตแดนทางทะเลอื่นๆ ที่ต้องมีการกำหนดตามที่ได้มีการระบุไว้ใน MOU 2544 ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] ประกาศ เรื่อง ใช้อนุสัญญากรุงเจนีวาว่าด้วยกฎหมายทะเล พ.ศ. 2512. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 86, ตอนที่ 44 หน้า 450 (ลงวันที่ 29 เมษายน 2501).
- [2] Cambodian Kret No. 439-72/PRK, 1 July 1972
- [3] Schofield, Clive Howard. Maritime boundary delimitation in the gulf of Thailand [master's thesis on the Internet]. Durham: Durham University; 1999 [cited 2022 Aug 1]. Available from: <http://etheses.dur.ac.uk/4351/>
- [4] Division for Ocean Affairs and the Law of the Sea. Decree of the Council of State of 13 July 1982 [Internet]. New York [cited 2022 Aug 19]. Available from: https://www.un.org/Depts/los/LEGISLATIONANDTREATIES/PDFFILES/KHM_1982_Decree.pdf
- [5] ประกาศสำนักนายกรัฐมนตรี เรื่อง เส้นฐานตรงและน่านน้ำภายในของประเทศไทย พ.ศ. 2534. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 87 ตอนที่ 52 หน้า 4 (ลงวันที่ 11 มิถุนายน 2513).
- [6] ประกาศ กำหนดไหล่ทวีปของประเทศไทยด้านอ่าวไทย. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 90 ตอนที่ 60 หน้า 1 (ลงวันที่ 18 พฤษภาคม 2516).
- [7] สุรเกียรติ์ เสถียรไทย. พื้นที่ทับซ้อนทางทะเล ไทย-กัมพูชา : ทางเลือกและข้อเสนอแนะ: จุลสารความมั่นคงศึกษา ฉบับที่ 93. กรุงเทพฯ: สถาบันการข่าวกรอง, สำนักข่าวกรองแห่งชาติ; 2554.
- [8] สมาน ใต้รายรัมย์. การกำหนดเส้นฐานตรงในน่านน้ำไทย. วารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือด้านสังคมศาสตร์ มนุษยศาสตร์ และศึกษาศาสตร์. 2564;9(1):67–80.
- [9] ฤชงค์ วงษ์เกิด, ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ. การแปลงพื้นหลักฐานแผนที่สำหรับประเทศไทย. วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา. 2543;1:51.
- [10] International Hydrographic Organization (IHO). A Manual on Technical Aspects of the United Nations Convention on the Law of the Sea-1982 (TaLOS): (C-51 Edition 6.0.0) [Internet]. 2020 [cited 2022 Aug 25]. Available from: https://iho.int/uploads/user/pubs/cb/c-51/C_51_Ed600_052020.pdf

- [11] International Maritime Organization (IMO) [Internet]. London: International Maritime Organization; c2019. United Nations Convention on the Law of the Sea; 2019 [cited 2022 Aug 29]; [about 1 screen]. Available from <https://www.imo.org/en/ourwork/legal/pages/unitednationsconventiononthelawofthesea.aspx>
- [12] กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ. หนังสือที่ระลึกวันคล้ายวันสถาปนากรมอุทกศาสตร์ ครบรอบ 94 ปี วันที่ 16 มกราคม พ.ศ.2558. กรุงเทพฯ: กรมฯ; 2558.



Using Single Beam Echo Sounder to Recheck Shipwreck Location

Boonyarit Sukmuang¹

Received: October 11, 2022

Revised: November 14, 2022

Accepted: December 1, 2022

Abstract

The research aimed to ensure the searching capability of Single-Beam Echo Sounder (SBES) as same as Multi Beam Echo Sounders (MBES). The testing was about rechecking shipwreck on the Clyde River floor. If the solution from SBES technology is suitable for positioning shipwreck, it will save time and budget. The experiment was with five main objectives. GIS Software was the tool for processing and analyzing data. After the experiment was completed, the result showed that the map from the MBES dataset (2014) could find the location and measure the dimension of the shipwreck while the map of SBES (2019) neither found the location nor measured the dimension. SBES (2019) and MBES (2014) could be separately displayed on the river floor in different colours representing different depths. Moreover, the collected data by SBES (2019) on the fieldwork met Order 1b of the specific requirements (S-44) of IHO. Furthermore, the feature and contour lines from the SBES (2019) and MBES (2014) dataset presented quite the same feature of the river floor, but the map of SBES dataset (2019) from fieldwork showed a few differences in contour lines because the dataset did not cover the entire study area. Finally, the SBES dataset (2019) could not be used for identifying or rechecking the location and dimension of the shipwreck, but it could be used for generating the map of the river floor or seafloor. Although this research achieved most of the tasks, SBES still has some limitations and cannot achieve the main objective. The conclusion was that the capability of SBES was not suitable for searching and locating shipwreck.

Keywords: Single-Beam Echo Sounder, Multi-beam Echo Sounder, Shipwreck, seafloor

¹ประจำ กรมกำลังพลทหารเรือ

Attached to Naval Personnel Department

E-mail: boonyarit.tazz@gmail.com

1. Introduction

The hydrographic survey has the principal purpose to determine the data related to bodies of water [1]. It is a technique of surveying mapping to determine the seafloor. The collected dataset is processed to create an ocean map or navigation chart which benefits navigation or checking the features of the seafloor. The Single-Beam Echo Sounder (SBES) is a technology system used to survey mapping. It can reach sub-decimetres in terms of accuracy in shallow water [2]. The SBES system may use different equipment which has different frequencies to determine the depth of the seafloor compared to the MBES (ibid). However, the MBES system uses several beams technique to determine the depths of the seafloor and provide an accurate raw dataset, resolution, and the total seafloor (ibid). Therefore, this research compared the dataset from different sources; The United Kingdom Hydrographic Office (UKHO) [3] and collected on the fieldwork. Moreover, there are two datasets from the UKHO (ibid) which is MBES and SBES. Then the MBES dataset was surveyed in 2014 and the SBES dataset was surveyed in 1997. Furthermore, the surveying area was surveyed by SBES. Two techniques were used in this research including the Single Beam Echo Sounder (SBES) and the Multibeam Echo Sounder (MBES). The first system is the Single Beam Echo Sounder (SBES) which uses a single beam to determine the depths on the seafloor. While the Multibeam Echo Sounder (MBES) use several beams to determine the depths on the seafloor. The survey was performed in the Greenock west area to investigate the dangerous wreck near the riverside. This shipwreck ID is 4124 which is approximately 500 metres from the shipwreck to the Cruise Terminal (riverside) and then this shipwreck is 22 metres of depth. The dataset from MBES and SBES which cover the shipwreck was extracted to prepare for processing. Next, all dataset was processed by GIS Software to generate the map. Then the map of MBES and SBES from UKHO (ibid) and fieldwork was compared to find the difference between these maps.

2. Objective

The MBES is a system which is quite expensive and consumes a lot of time for processing. Moreover, this research would help several companies or countries who have limited budgets to purchase the MBES. Therefore, this research aimed to use SBES for rechecking shipwreck location on the seafloor.

2.1 The shipwreck was investigated by GIS Software. This process required both MBES and SBES dataset from the UKHO (ibid) to analyse and plan to survey by SBES.

2.2 The MBES and SBES dataset from UKHO (ibid) were processed and generated to the map then these maps were compared to find the difference between MBES and SBES dataset.

2.3 The SBES dataset was investigated so that it could meet Order 1b of the specific requirements (S-44) from IHO.

2.4 The SBES dataset from fieldwork was compared with MBES dataset to find the difference on the maps.

2.5 The map of SBES dataset was analysed that it could use for identifying the location and feature or independent check of the shipwreck on the river floor.

3. Methodology

This research processed the dataset by using GIS Software. The dataset was brought from the UKHO (ibid) and collected on fieldwork. The area of the dataset was nearby Greenock West and this dataset had to cover the shipwreck 4124 which is a dangerous wreck. The research compared two datasets, so the suitable generated surface was the Inverse Distance Weighting (IDW). This might generate a surface which can compare different surveying techniques. However, this method was still limited in prediction to generate the contour line on the surface because it was insufficient contour point in that area. The calculation was still limited by using various algorithms [4]. However, there was a new method which based on the triangulation interpolation using Delaunay tessellations (Deltri Analysis) which was superior to existing methods (ibid). This method could fulfill the gap in the original calculation and provide the most accurate and objective measurement. It displayed the contour on the surface. This technique was calculated by estimating the rough data of the surface and analysing the direction to the surrounding triangles of each contour point. Therefore, this new method is currently able to provide the most accuracy in the predicted point on the surface. Furthermore, this research generated not only the IDW surface but also Hillshade and Slopes. These surfaces helped the surveyor to analyse the shipwreck to determine the location and dimension of the shipwreck before surveying the fieldwork

4. Results and Discussion

4.1 Analysis of the surveying area and shipwreck before surveying

4.1.1 Analysis of the shipwreck area

The survey area was nearby Helensburgh. There were many shipwrecks in this area.

Each shipwreck was suitable for surveying because it was not too deep. If it is deep, it would make an effect on the dimension of the footprint from the SBES. Therefore, the suitable shipwreck should be less than seventy-five metres due to the limited specification of the BTX/SPX software. Finally, the shipwreck was the dangerous wreck (ID: 4124) which was 22 metres deep and was selected. The result showed that the diameter of the footprint was 3.07 metres so this shipwreck was suitable to survey by SBES. Another considerate factor was that the location of the shipwreck (Shipwreck ID: 4124) had to be in the MBES dataset because there was no MBES equipment to survey on the fieldwork. Moreover, the shipwreck should be in the SBES dataset because the surveyor could download the SBES dataset from the UKHO [3]. Therefore, this shipwreck was in the SBES dataset and then it was processed to create the map. This map was analysed to explore the feature of the shipwreck.

4.1.2 Analysis of the shipwreck from the MBES dataset

The results of the MBES process were in three different surfaces; Hillshade, Depth, and Slopes. According to Figure 1, the shipwreck noticed two large hills on this map. One hill was large and the feature or dimension was like a ship. Moreover, this hill was found that the location was the same as the shipwreck (Shipwreck ID: 4124). This location was 390,034.45 m. of the easting and 6,203,218.59 m. of the northing and the datum was WGS 1984 UTM Zone 30N. The dimension of this hill which was measured by GIS Software was 25 m. in length, 7.5 m. in width, 22 m. of depth and 1 m. in height. The depth after processing by GIS Software matched the official dimensions in the UKHO (ibid). Therefore, it might assume that this hill was a shipwreck (Shipwreck ID: 4124)

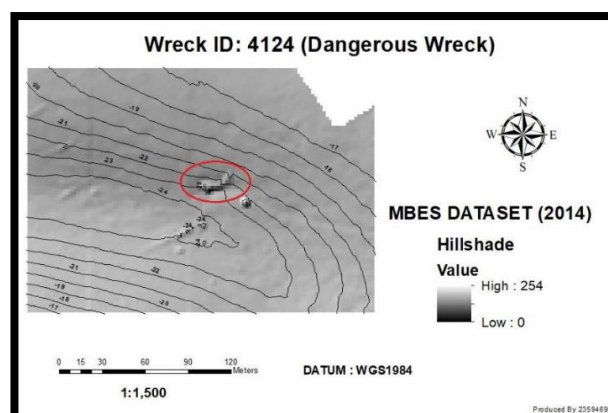


Figure 1 The profile of shipwreck (Shipwreck ID: 4124) from MBES dataset (2014) in Hillshade surface.

According to Figure 2, it was a map in which the depths were represented by colours. It could notice that the area which was the same location as the shipwreck presented suddenly changed in different colours and contour lines. Therefore, it could support that it was a wreck (ID: 4124).

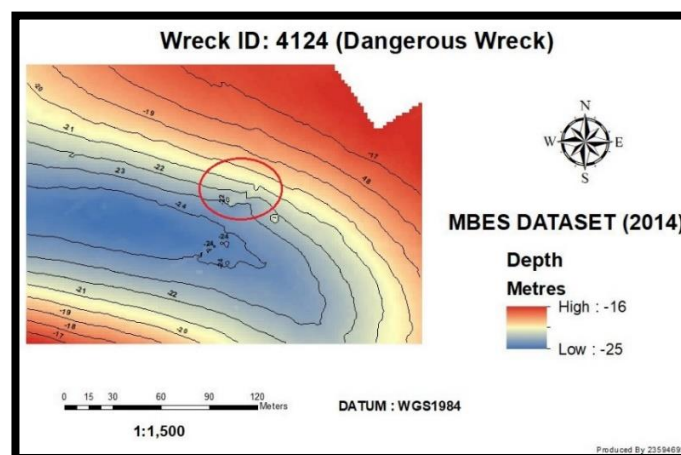


Figure 2 The profile of shipwreck (Shipwreck ID: 4124) from MBES dataset (2014) in Depth surface

Moreover, it could support the location of the ship by using the slope Toolbox in GIS Software. According to Figure 3, the area of the shipwreck was noticed that the angles of slopes were higher than in the other area. It is presented in red colour and the slope was from 16 to 24 degrees. Therefore, this could assume that the high slopes were the shipwreck (Shipwreck ID: 4124).

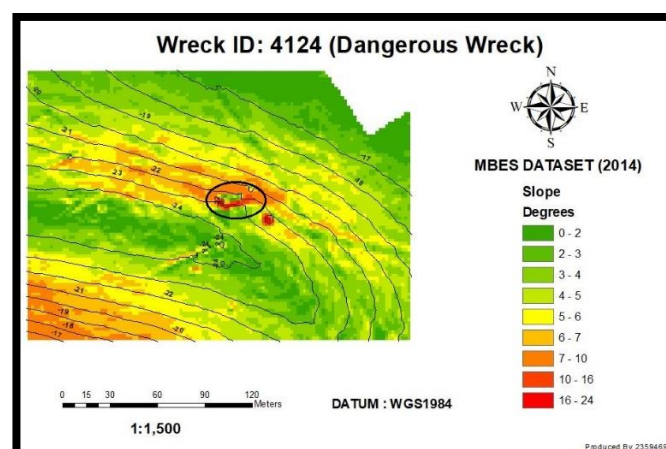


Figure 3 The profile of shipwreck (Wreck ID: 4124) from MBES dataset (2014) in Slope surface

4.1.3 Analysis of the shipwreck from the SBES dataset

Although the map of the MBES dataset could locate the location of the shipwreck, the SBES dataset in the area of the shipwreck should be processed. The SBES dataset from the UKHO [3] was extracted and processed to generate the map of the SBES dataset. There are two SBES datasets which were in 1993 and 1997. According to Figure 4, the contour was generated by depth. There was no feature or any of the suddenly changed. Moreover, the SBES dataset (1993) did not cover the entire map so it could not investigate the shipwreck on this map since it was unclearly representing the river floor. However, Figure 5 shows the map which was generated in different colours depending on the depth. It could represent clearly on the river floor. Although the map from Figure 5 was completely covered by many datasets more than Figure 4, it could not investigate the shipwreck on these maps because no feature suddenly changed on this map.

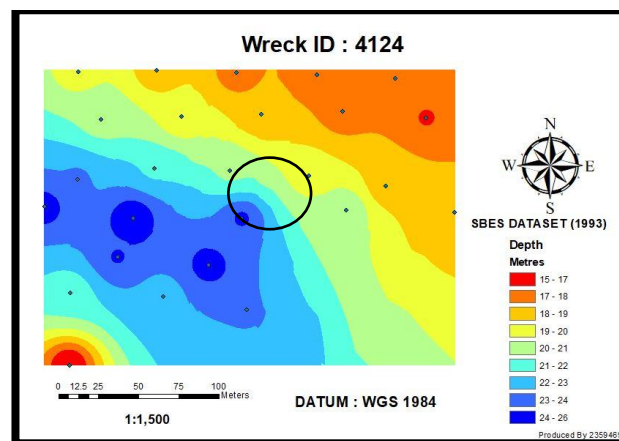


Figure 4 The IDW surface from SBES dataset (1993)

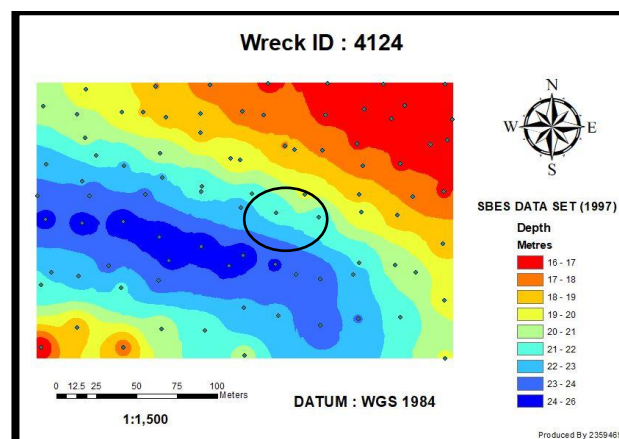


Figure 5 The IDW surface from SBES dataset (1997)

4.1.4 Analysis for designing line layout

Before surveying, the surveyor prepared the line layout which helped the surveyor to sail a boat in the right direction. The map which was generated was 1: 1500 in scale. Moreover, the shipwreck dimension was 25 m. in length and 7.5 m. in width. It lays in from the North to South direction. Therefore, the gap between the line layouts should be 5 m. and the directions were the North-South and East-West. Each line was 100 m. and was designed in GIS and AutoCAD Software.

4.2 The comparison of the results between MBES and SBES from UKHO

The map of MBES and SBES which were extracted from the UKHO (ibid) were generated by IDW interpolation. Then the surfaces of these maps were created to be analysed in terms of the depth. Moreover, the main point was to analyse the difference in the maps between the MBES and SBES from UKHO (ibid).

The MBES was extracted from the UKHO (ibid) which was surveyed in 2014. The raw data could be generated to the surface. The MBES dataset could cover the entire area and the grid was 2 metres. Therefore, this map of MBES dataset could generate the map and analysis the shipwreck. According to Figure 6, the map is from -16 to -24 metres in depth, the deepest was the dark blue colour and the shallowest was in red colour. Moreover, the datum was UTM Zone 30N in WGS 1984 with a scale of 1: 1500. The shipwreck 4124 was noticed by three different contour lines which suddenly changed in the same feature. Therefore, this MBES dataset could provide dense datasets to generate the high - resolution map. This map did not provide only the location of the shipwreck but also shows the rough dimension of the shipwreck. Therefore, the surveyor might estimate the dimension and location of the shipwreck from this map.

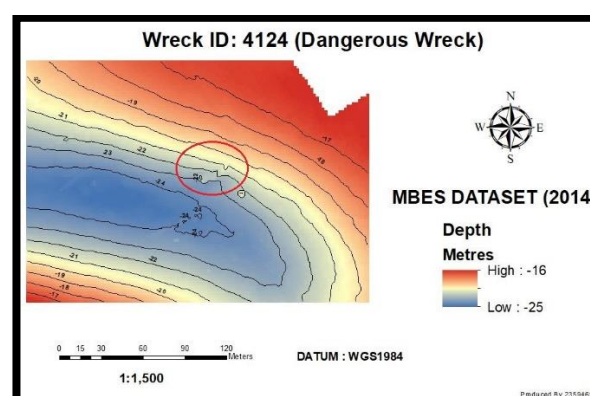


Figure 6 The profile of shipwreck (Wreck ID: 4124) from MBES dataset (2014)

The SBES dataset from the UKHO (ibid) could generate the map by IDW interpolation. This was surveyed in 1997. The gap between each point was approximately from 5 to 25 metres. Moreover, the raw data was likely to follow the surveying line and the depth of this map was from 16 to 26 metres. The deepest was in dark blue and the shallowest was in red. Therefore, the SBES dataset could generate the map which was quite the same as fieldwork. However, this dataset could not generate the map which could analyse to estimate the dimension and location of the shipwreck (Shipwreck ID: 4124).

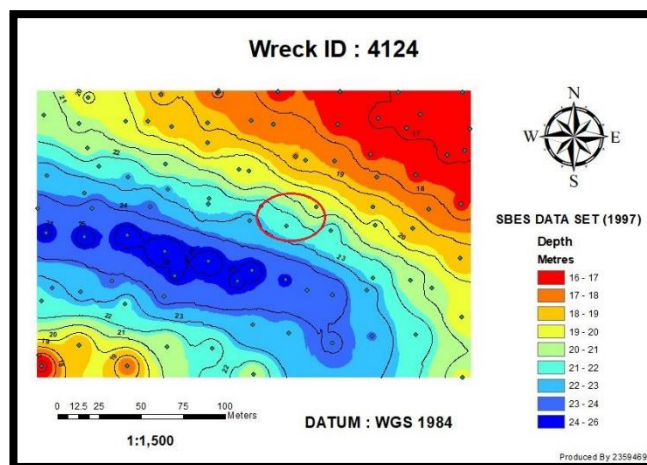


Figure 7 The IDW surface from SBES dataset (1997)

According to Figures 6 and 7, there was quite the same pattern, but there were some points which were different. The dataset of the MBES and SBES were scattered to cover the surveying area. However, the gaps between the MBES and SBES were different because the grid of the MBES dataset was two metres. The SBES dataset was approximately from 25 to 50 metres. Therefore, the MBES dataset was denser than the SBES dataset to cover the surveying area. The map from MBES dataset was quite better than the map from the SBES dataset. Next, the map from MBES dataset could analyse the shipwreck to determine the location and dimension of this shipwreck, but the SBES dataset could generate the map. It could not analyse and determine the location and dimension of the shipwreck. In conclusion, the Multibeam Echo Sounder (MBES) dataset could generate the map which could analyse and determine the location and dimension of the shipwreck. However, the Single Beam Echo Sounder (SBES) dataset from UKHO (ibid) could generate the map but this map could not analyse and determine the location and dimension of the shipwreck.

4.3 Analysis of the SBES dataset from fieldwork

The shipwreck (Shipwreck ID: 4124) was surveyed by SBES and generated to the map. It was analysed to investigate that this survey met the Order 1b of the specific requirements (S-44) from IHO. Furthermore, this map was compared to SBES dataset from the UKHO (ibid). According to Figure 8, the line layout was designed over the shipwreck. It was imported to set the waypoints of the boat to ensure that the SBES collected the data over the shipwreck. However, the line layout was unable to import to RTK screen. As a result, it sailed without presenting the line layout. Nevertheless, the surveyor solved this problem by setting the location of the shipwreck. Then the boat could be sailed over the shipwreck in North to South and East to West direction. Moreover, the surveyor also concerned about the safety of the other ships which sailed in that area. According to Figure 8, the boat track was in the green dot line. However, this track does not present as the line layout due to the limitation to import information. Therefore, it might affect to the location of raw data of this surveying.

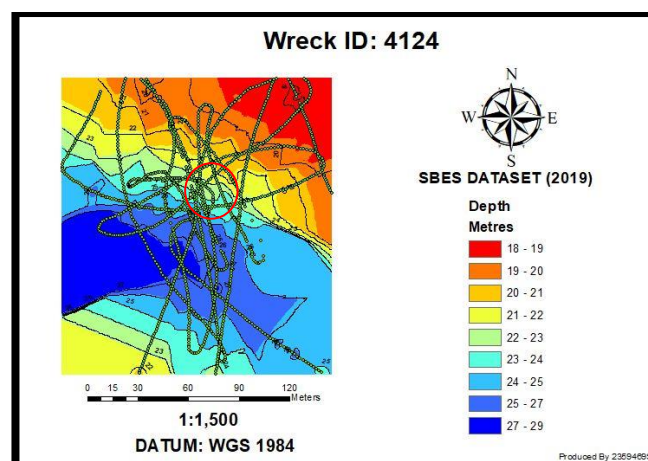


Figure 8 The surveying track was over the shipwreck (Shipwreck ID: 4124)

After surveying, the surveyor conducted the quality test of the quality of SBES to check the difference in depth between SBES and Secchi disc. This quality test repeated the quality test for three times. Moreover, the surveyors checked Order 1b of the specific requirements (S-44) from IHO and found that the maximum allowable total vertical uncertainty was 0.5 metres of a and 0.013 of b [5]. According to the measurement in depth between SBES and Secchi disc, TVU was calculated by using the formula to confirm that the SBES met Order 1b. It was the result of the measurement between SBES and Secchi disc. The Order 1b of the specific requirements (S-44) was calculated to check the maximum

allowable TVU (ibid). The result showed that the SBES met Order 1b of the specific requirements (S-44) in term of TVU because the differences between SBES and Secchi disc were within the maximum allowable TVU. Additionally, the accuracy of the SonarMite BTX/SPX Specifications is ± 0.025 metres (RMS). Therefore, the SBES also met Order 1b of the specific requirements (S-44) in term of TVU.

The measurement in depth between SBES and Secchi disc [5]

Types Times	SBES (Metres)	Secchi disc (Metres)	The Order 1b of TVU (S-44) (Metres)
First	1.10	1.10	± 0.50
Second	1.05	1.00	± 0.50
Third	1.06	1.00	± 0.50

Furthermore, the maximum allowable Total Horizontal Uncertainty (THU) of the Order 1b of the specific requirements (S-44) was five metres plus 5% of depths. This SBES used the RTK Smartnet, which could limit the error within 0.02 metres in good satellite coverage, good geometry, and low multipath environments [6]. After the data was extracted using Leica Infinity software, the report showed the coordinate quality in three dimensions (CQ 3D) which were the indicator to represent the accuracy of the current RTK location in the x, y, and z-axis [7]. The CQ 3D was less than 0.025 metres while the CQ 2 D was less than 0.015 metres. Therefore, the SBES met Order 1b of the specific requirements (S-44) in terms of TVU and THU since the error of THU was within 6.10 ($5 + (0.05 \times 22)$) metres. Then, the error of THU was not affected by 3.07 m. of SBES footprint because this error was calculated by many uncertainty sources such as all instruments, measurements, and environment [5].

According to Figure 9, the SBES dataset was collected from fieldwork and the map was generated by using GIS Software. Moreover, another map was generated by using SBES dataset from the UKHO (Figure 10) (ibid). Even though these maps had several differences, the overall feature was placed in the same direction. The contour lines and the feature of the river floor between these maps were likely to be similar, but the contour lines of Figure 9 were not smooth. These contour lines were not systematic because the contour line suddenly changed. It led to many errors in the depths of this map depending on the distance from the location of surveying data.

The surface in the template was affected from the nearest of the dataset. Therefore, the real depths would be different from depths of the IDW surface. According to Figure 7, there were some differences in contour lines because the locations of surveying datasets between these two maps were different. Moreover, the change in contour lines in Figure 9 came from a lack of information in some areas. However, these changing contour lines could be improved by making a line layout and the surveyors should keep the boat on the line. Thus, it could obtain the data to cover the survey area. Although the SBES dataset (2019) could not provide the high resolution of the MBES map, it could fill the gap and generate a map which was similar to the SBES dataset (1997) in Figure 10. Therefore, it might conclude that these two maps are different because the SBES dataset (2019) did not cover the entire area which led to the changes in the contour line.

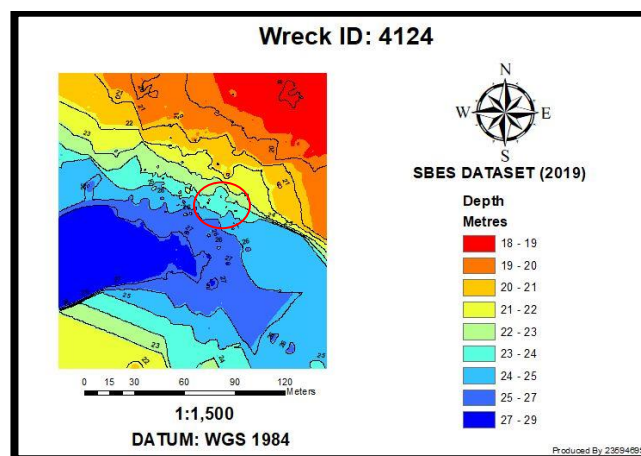


Figure 9 The map of SBES dataset (2019) from fieldwork

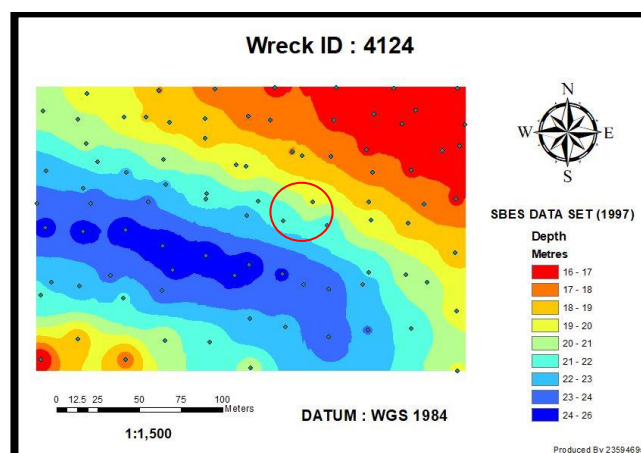


Figure 10 The map of SBES dataset (1997) from UKHO (ibid)

Although the SBES dataset (2019) did not cover the entire area (Figure 9) and it might cause an error on the contour lines, the raw data over the shipwreck area was completely collected. Therefore, the shipwreck area (as presented in the red circle) of Figure 11 was similar to the area in Figure 10. However, the map of the SBES dataset (1997) from UKHO [3] and fieldwork could not identify the shipwreck (Shipwreck ID: 4124) on the surveying area. According to Figure 11, the red circle was over the shipwreck location. The location of the red circle was not from identifying the shipwreck from the map of the SBES dataset, but the location of the shipwreck was from the map of the MBES dataset. It might conclude that the maps from the SBES dataset from both UKHO (ibid) and fieldwork could not be identified in term of the location the dimension of the shipwreck.

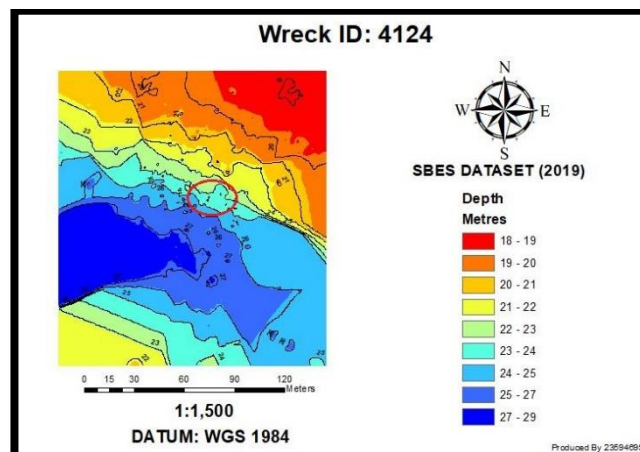


Figure 11 The profile of shipwreck (Shipwreck ID: 4124) was in the red circle on the map

4.4 The comparison between MBES dataset (2014) from UKHO (ibid) and SBES dataset (2019) from fieldwork

The map of the MBES dataset (2014) from the UKHO [3] and the map of the SBES dataset (2019) from the UKHO (ibid) and fieldwork were compared and analysed the similarities and differences. Although the maps of the SBES dataset from the UKHO (ibid) and fieldwork showed differences in some points, the features of the river floor in these maps showed the same direction. Moreover, there was a similarity in several map features between the SBES and the MBES data set including the river floor, the direction of contour, and the depth. Even though the contour lines over the shipwreck area were not straight, these highly bent back and forth in the shipwreck area. Therefore, it might be assumed that many differences in the level of the shipwreck area might be a shipwreck (Shipwreck ID: 4124).

According to Figure 2, the location and dimension of the shipwreck were detected and measured by using GIS Software. However, the shipwreck in the red circle in Figures 7 and 10 could not identify the location and measure the dimension. Nevertheless, the SBES dataset (2019) might improve the quality of surveying by reducing the gap between line layouts to provide high resolution and detect more features of the shipwreck. Therefore, it might conclude that the shipwreck (ID: 4124) could be identified in terms of the location and dimension by using the MBES dataset (2014).

4.5 Analysis of SBES for the independent check of the shipwreck on the seafloor

The map from the SBES dataset still had gaps that limit the possibility to identify the shipwreck. However, the map from the SBES dataset could not identify the shipwreck in this research. The SBES dataset might be able to identify the larger shipwreck. As the SBES used one beam to survey and it led to a large gap between surveying lines. There were two methods to use SBES for surveying the shipwreck to gain a better result. The first one was to use the same space between lines, but it required surveying in the larger shipwreck than this research. Another one was to reduce the gap between the surveying lines to detect more features of this shipwreck. Therefore, it might be concluded that it should reduce the distance of the gap between surveying lines to detect more features of this shipwreck (Shipwreck ID: 4124). Although the result of this research showed that the SBES was unable to point to the location and measure the dimension of the shipwreck, the map of SBES could generate the map of the river floor and seafloor. This map of SBES could be similar to the MBES, but the SBES dataset could not provide the high resolution which was equal to the MBES dataset. When there were some changes on the seafloor, the surveyor would use the MBES to resurvey the seafloor in order to update the map on changing areas. Therefore, the SBES could not be used for identifying the location and dimensions of the shipwreck. Moreover, the surveyor was unable to use it for rechecking the shipwreck because there were many gaps between surveying lines. Furthermore, it could not provide the high resolution which might detect the shipwreck on the seafloor. Therefore, the SBES might not be suitable for identifying and rechecking the shipwreck on the river floor or seafloor.

5. Conclusion

This research aimed to use the SBES instead of MBES for rechecking the location of a shipwreck on the river floor. This research had five main points to investigate by using SBES dataset. However, it met the third objective because the map of SBES from fieldwork met the Order 1b

of the specific requirements (S-44) from IHO. Therefore, the error of this map was within the Maximum Allowable TVU and THU. Additionally, it met the fourth objective to compare the maps of the MBES dataset and SBES from fieldwork. The result showed that the overall features and contour lines were quite similar. However, there were different points because the contour lines of the SBES map from fieldwork were suddenly changed. This change in contour lines resulted from missing information in the surveying area. Therefore, it led to the suddenly changed contour lines in that area. However, it was able to be used for rechecking the shipwreck on the river floor or seafloor. Although the map of the SBES dataset could not identify and recheck the location and dimension of the shipwreck, it might be used for generating the map of the seafloor. The information from this research may be useful for several companies or countries which have responsibility for many important areas. Then these areas need to be surveyed by MBES to cover 100%. However, the SBES was still unable to solve the problem because SBES had many limitations which differed from MBES. Therefore, it could not identify or recheck the shipwreck on the river floor or the seafloor.

References

- [1] INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION. Hydrographic Dictionary: Part I. 5th ed. Monaco: International Hydrographic Bureau; 1994.
- [2] INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION. Manual on Hydrography: Publication C-13. Monaco: International Hydrographic Bureau; 2005.
- [3] Seabed mapping data from the UK's authoritative source [Internet]. Taunton: UK Hydrographic Office; c2022 [cited 2022 Aug 11]. Available from: <https://www.admiralty.co.uk/access-data/seabed-mapping>
- [4] Philip GM, Watson DF. A PRECISE METHOD FOR DETERMINING CONTOURED SURFACES. The APPEA Journal [Internet]. 1982 [cited 2022 Aug 5];22(1), 205-12. Available from: <https://doi.org/10.1071/aj81016>
- [5] INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION. IHO Standard for Hydrographic Surveys [Internet]. 6th ed. Monaco: International Hydrographic Bureau; 2020 [cited 2022 Nov 5]. Available from: <https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44>
- [6] Leica Geosystems. Leica SmartNet UK & Ireland Network RTK User Guide [Internet]. Milton Keynes: Leica Geosystems Limited; 2019 [cited 2022 Aug 3]. Available from https://www.sunbeltsales.co.uk/legacy/survey/media/vortex_resources/assets/user-guide-leica-smartnet.pdf

- [7] Leica Geosystems. GLONASS only and BeiDou only RTK Locationing [Internet]. Schweiz: Leica Geosystems AG Switzerland; 2019 [cited 2022 Aug 3]. Available from https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/white-papers/glonass_beidou_rtk_positioning_wpa.ashx?la=fr-ma&hash=C0A0E5B63871A6410C195B52587A01DA

การหาค่าตัวเกณฑ์สำหรับการปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายนาย

Determination of the Threshold for Correcting the Astronomical Tide

ศุภสิทธิ์ คงดี¹ และ พินัย จินชัย²

Supasit Kongdee¹ and Pinai Jinchai²

Received: Jan 12, 2023

Revised: Feb 15, 2023

Accepted: Feb 23, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาค่าตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายนายและแนวทางในการนำตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายนายมาใช้สำหรับหนังสือมาตราน้ำ โดยดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลระดับน้ำจริงและข้อมูลระดับน้ำทำนายนายในช่วงเวลา 1 รอบของวัฏจักรน้ำขึ้น – น้ำลง ตั้งแต่ พ.ศ.2540 – 2559 โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) เพื่ออธิบายลักษณะของผลต่างระหว่างน้ำจริงกับน้ำทำนายนาย (Residual Levels) แล้วนำมาสังเคราะห์เป็นตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายนาย

ผลการศึกษาพบว่า ผลต่างระหว่างระดับน้ำจริงกับระดับน้ำทำนายนาย (Residual Levels) ของสถานีวัดระดับน้ำอ่าวสัตหีบ ช่วงเวลาน้ำเกิด มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 13 เซนติเมตร ช่วงเวลาน้ำตาย มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 19 เซนติเมตร และช่วงเวลาระหว่างน้ำเกิดกับน้ำตาย มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 14 เซนติเมตร สถานีวัดระดับน้ำสงขลา ช่วงเวลาน้ำเกิด มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 12 เซนติเมตร ช่วงเวลาน้ำตาย มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 16 เซนติเมตร และช่วงเวลาระหว่างน้ำเกิดกับน้ำตาย มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 17 เซนติเมตร สถานีวัดระดับน้ำอ่าวทับละมุ ช่วงเวลาน้ำเกิด มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 18 เซนติเมตร ช่วงเวลาน้ำตาย มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 16 เซนติเมตร และช่วงเวลาระหว่างน้ำเกิดกับน้ำตาย มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 16 เซนติเมตร ซึ่งได้สังเคราะห์เป็นตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายนายตามช่วงเวลาได้ดังนี้ ช่วงเวลาน้ำเกิด 1–18 เซนติเมตร ช่วงเวลาน้ำตาย 3 –16 เซนติเมตร และช่วงเวลาระหว่างน้ำเกิดกับน้ำตาย 0–16 เซนติเมตร และจากการนำตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายนายที่ได้มาใช้ในการเปรียบเทียบกับ

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กองวิชาวิศวกรรมอุทกศาสตร์ ฝ้ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

Assistant Professor, Department of Hydrographic Engineering, Academic Branch, Royal Thai Naval Academy
E-Mail: sukong@gmail.com

²ประจำกรมกำลังพลทหารเรือ กองทัพเรือ

Attached to Naval Personnel Department, Royal Thai Navy
E-mail: pjinchai@gmail.com

ระดับน้ำจริงที่สถานีวัดระดับน้ำอ่าวทับละมุ ของปี พ.ศ.2557 ได้ค่าเฉลี่ยของผลต่างอยู่ในช่วง (-6) - 44 เซนติเมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน มีค่า 5 – 11 เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าการนำตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายน มาใช้สำหรับสถานีวัดระดับน้ำอ่าวทับละมุ ของปี พ.ศ.2557 สามารถทำให้ค่าระดับน้ำทำนายนมีความใกล้เคียงกับ ระดับน้ำจริงมากขึ้น

คำสำคัญ: ระดับน้ำจริง ระดับน้ำทำนายน น้ำเกิด น้ำตาย Residual Levels

Abstract

This research aims to determine the threshold for correcting the astronomical tide and to study the guidelines for applying the threshold for correcting the astronomical tide in the tide table by analyzing the observed water level and the astronomical tide over a tide cycle during 1997-2016 to characterize the differences between the observed water level and the astronomical tide (Residual Levels) and then synthesized as the threshold for correcting the astronomical tide.

The results showed that Residual Levels of the Sattahip Bay tide gauge station during spring tide the highest mean was 13 centimeters, during neap tide the highest mean was 19 centimeters and during the interval between spring tide and neap tide the highest average was 14 centimeters. At Songkhla tide gauge station, during spring tide the highest mean was 12 centimeters and during neap tide the highest mean was 16 centimeters, during the interval between spring tide and neap tide the highest average was 17 centimeters. At Thap Lamu Bay tide gauge station, during spring tide the highest mean was 18 centimeter, during neap tide the highest mean was 16 centimeters and during the interval between spring tide and neap tide the highest average was 16 centimeters. The Residual Levels was synthesized as the threshold for correcting the astronomical tide according to the following period: during spring tide was 1–18 centimeters, during neap tide was 3–16 centimeters, and during the interval between spring tide and neap tide was 0–16 centimeters. Then applying the threshold for correcting the astronomical tide was used to compare with the observed water level at Thap Lamu Bay tide gauge station in 2014. The results showed that the mean difference was in the range of (-6) - 44 centimeters, the standard deviation was 5 – 11 centimeters. It shows that using the threshold for correcting the astronomical tide at Thap Lamu Bay tide gauge station in 2014 can make the astronomical tide more close to the observed water level.

Key words: Observed Water Level, Astronomical Tide, Spring Tide, Neap Tide, Residual Levels

1. บทนำ

ข้อมูลระดับน้ำทำนายเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญนอกจากจะใช้ประโยชน์เพื่อการเดินเรือแล้วยัง มีการนำข้อมูลระดับน้ำทำนายไปใช้สนับสนุนกิจกรรมต่างๆ ในทะเล เช่น การประมง การท่องเที่ยว งานด้านวิศวกรรมชายฝั่ง เป็นต้น ตลอดจนการนำไปใช้ประกอบการศึกษาทางวิทยาศาสตร์ทางทะเล สำหรับการทำนายระดับน้ำในน่านน้ำไทย เพื่อสนับสนุนการเดินเรือ จะทำนายโดยวิธีการฮาร์โมนิค (Harmonic Method) คือการคำนวณค่า

ระดับน้ำจากอิทธิพลของแรงดึงดูดของดวงจันทร์และดวงอาทิตย์ที่กระทำต่อมวลน้ำบนผิวโลกเป็นหลัก โดยจะทำนายล่วงหน้าประมาณ 1 ปี ซึ่งการทำนายน้ำโดยการคำนวณจากแรงดึงดูดของดวงดาวที่กระทำต่อมวลน้ำบนผิวโลกนั้น มีความถูกต้องค่อนข้างสูงในช่วงที่สภาพอุตุนิยมวิทยาปกติ แต่ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของสภาพอุตุนิยมวิทยา ที่ไม่สามารถทำนายหรือพยากรณ์ล่วงหน้าได้เป็นเวลานานๆ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงความกดอากาศสถานะคลื่นลมแรงที่เกิดจากพายุหรือลมมรสุมตามช่วงฤดูกาล ปริมาณและช่วงเวลาที่ฝนตก จะมีผลให้ค่าระดับน้ำทำนายมีความแตกต่างจากค่าระดับน้ำที่ตรวจวัดได้จริงค่อนข้างมาก ดังนั้นเพื่อให้การให้บริการข้อมูลระดับน้ำทำนาย มีความถูกต้องใกล้เคียงกับระดับน้ำจริงมากที่สุด จึงต้องมีการศึกษาหาค่าตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายและแนวทางในการนำข้อมูลตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายมาใช้สำหรับหนังสือมาตรฐานน้ำ

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อหาค่าตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายบริเวณฝั่งอ่าวไทยจำนวน 2 สถานี คือสถานีวัดระดับน้ำอ่าวสัตหีบและสถานีวัดระดับน้ำสงขลา และบริเวณฝั่งทะเลอันดามันจำนวน 1 สถานี คือสถานีวัดระดับน้ำอ่าวทับละมุ

2.2 เพื่อศึกษาแนวทางในการนำข้อมูลตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายมาใช้สำหรับหนังสือมาตรฐานน้ำ

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 การวิเคราะห์และทำนายน้ำขึ้น - น้ำลง วิธีฮาร์โมนิกเป็นวิธีการทำนายความสูงของระดับน้ำ โดยใช้สมมุติฐานว่าระดับน้ำจริงที่ตรวจวัดได้ คือ ผลรวมของระดับน้ำย่อยๆ จำนวนมาก ซึ่งระดับน้ำย่อยแต่ละตัวจะมีคาบแอมพลิจูดและเฟสที่ต่างกัน กล่าวคือคาบตอบสนองต่ออิทธิพลทางดาราศาสตร์ที่เป็นสาเหตุของแรงที่ทำให้เกิดน้ำขึ้นน้ำลง โดยมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งสัมพันธ์ระหว่างโลก - ดวงจันทร์ และดวงอาทิตย์ และแอมพลิจูด หรือความสูงโดยเฉลี่ย และเฟส หรือเวลาระหว่างอิทธิพลทางดาราศาสตร์ ผ่านตำบลที่อ้างอิงกับเวลาน้ำขึ้นเต็มที่ของระดับน้ำย่อยนั้นๆ โดยแอมพลิจูดและเฟสของระดับน้ำย่อยแต่ละตัวจะมีค่าเฉพาะในแต่ละตำบลที่ ดังนั้นการหาค่าแอมพลิจูด และเฟส ของระดับน้ำย่อย ณ ตำบลที่ใดๆ ต้องการการตรวจวัดระดับน้ำเป็นระยะเวลานาน เมื่อเทียบกับคาบของระดับน้ำย่อย [1] ปัจจุบันได้ค้นพบระดับน้ำย่อยแล้วกว่า 400 ค่า แต่ระดับน้ำย่อยหลักดังตารางที่ 1 เป็นระดับน้ำย่อยที่มีอิทธิพลมากที่สุด

ตารางที่ 1 ระดับน้ำย่อยหลัก [2]

ชื่อของระดับน้ำย่อย	สัญลักษณ์	คาบ (ชั่วโมง)	ขนาด (เปรียบเทียบกับ M2)
Principal Lunar	M2	12.42	1.00
Principal Solar	S2	12.00	0.466
Luni - Solar Diurnal	K1	23.93	0.584
Principal Lunar Diurnal	O1	25.82	0.415

3.2 ความคลาดเคลื่อนของการทำนายน้ำ ในช่วงที่มีการเปลี่ยนของสภาพอุตุนิยมวิทยา ที่ไม่สามารถทำนายหรือพยากรณ์ล่วงหน้าได้เป็นเวลานานๆ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงความกดอากาศ ซึ่งทุกๆ นึ่งมิลลิบาร์จะทำให้ระดับน้ำเปลี่ยนแปลงในทางตรงกันข้ามหนึ่งเซนติเมตร และสภาวะคลื่นลมแรงที่เกิดจากพายุหรือลมมรสุมตามช่วงฤดูกาล จะส่งผลให้ค่าระดับน้ำที่ตรวจวัดได้มีความแตกต่างจากค่าระดับน้ำที่ได้ทำนายไว้ล่วงหน้า 1 ปี [3]

3.3 มาตรฐานน้ำ (Tide Tables) คือ ตารางที่แสดงเวลาและระดับความสูงของระดับน้ำ ที่ได้จากการทำนายล่วงหน้าของตำบลที่หนึ่งๆ ซึ่งรูปแบบของเวลาและค่าระดับความสูงของระดับน้ำจะแตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

3.3.1 มาตรฐานน้ำของประเทศไทย ที่ทำนายโดยกรมอุทกศาสตร์ นั้น มีรูปแบบแสดงการขึ้นลงของระดับน้ำเป็นรายชั่วโมงและค่าความสูงของระดับน้ำวัดจากค่าระดับน้ำลงต่ำสุด ซึ่งเป็นเส้นเกณฑ์ในแผนที่เดินเรือ [4] ดังรูปที่ 1

อ่าวสัตหีบ (ชลบุรี)																									83
Ao Sattahip (Chon Buri)																									
ละติจูด (Lat) 12° 38' 42" น(0)												ลองจิจูด (Long) 100° 52' 55" อ(E)													
พายุภัยิกาน ๒๕๕๙												November 2016													
วัน/ปี	เวลา	HOURS																							
DATE	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
สูงจากน้ำขึ้นน้ำลง																									
HEIGHTS OF WATER IN METERS																									
1	15	16	19	22	24	27	28	29	28	27	26	25	24	25	25	26	26	26	24	22	19	17	15	13	
2	13	15	17	20	23	26	28	29	29	28	27	26	25	25	26	26	26	26	25	23	20	17	15	13	
3	12	13	15	18	21	24	27	29	29	29	28	27	26	26	26	26	26	26	25	23	21	18	15	13	
4	12	12	14	16	20	23	26	28	29	29	29	27	26	26	26	26	26	26	25	24	22	19	16	14	
5	12	12	13	15	18	21	24	27	29	29	29	28	27	26	26	26	26	26	26	24	23	20	17	15	
6	13	12	12	13	16	19	22	25	27	29	29	29	28	27	27	26	26	26	25	25	23	21	19	16	
7	14	13	12	13	15	17	20	23	26	28	29	29	29	28	27	27	26	26	25	25	24	22	20	18	
8	16	14	13	13	14	16	18	21	24	26	28	29	29	29	28	27	26	26	25	24	23	22	21	20	
9	18	16	15	14	14	16	17	20	22	24	27	28	29	29	29	28	27	25	24	24	23	22	22	21	
10	20	19	18	17	16	16	17	19	20	23	25	27	28	29	29	28	27	25	24	23	22	21	21	21	
11	21	21	21	20	19	19	18	19	20	21	23	25	27	28	28	28	27	25	23	21	20	20	20	21	
12	21	22	23	23	23	22	21	21	20	21	22	24	25	27	28	28	27	25	23	20	19	18	18	19	
13	20	22	24	25	26	26	25	24	23	22	23	23	25	26	27	27	26	25	22	20	17	16	15	16	
14	18	21	23	26	27	28	28	27	26	24	24	24	25	26	27	27	26	25	23	20	17	14	13	14	
15	15	18	21	24	27	29	30	30	29	27	26	26	26	26	26	27	27	27	25	23	20	17	14	12	
16	13	15	18	22	26	29	31	31	31	30	29	28	27	27	28	27	26	24	22	18	15	12	11		
17	11	12	15	19	23	26	29	31	32	31	31	29	29	28	28	28	28	27	26	23	20	17	13	11	
18	10	10	12	16	19	23	27	30	32	32	32	31	30	29	29	28	28	27	25	22	19	15	13		
19	11	10	11	13	17	20	24	28	30	32	32	31	31	30	29	29	28	28	27	26	24	21	18	15	
20	13	11	11	12	15	18	22	25	28	30	31	31	31	30	29	28	28	28	27	26	25	23	20	18	
21	15	13	13	13	14	17	20	23	26	29	30	31	31	30	29	28	27	27	26	25	24	23	22	20	
22	18	16	15	15	15	17	19	22	25	27	29	30	30	30	29	28	27	26	25	24	24	23	22	21	
23	20	19	18	17	17	18	19	21	24	26	28	29	30	30	29	27	26	25	23	23	22	22	21	21	
24	21	21	20	20	20	21	22	23	25	27	28	29	29	29	27	26	24	22	21	20	20	20	21		
25	21	22	22	22	22	22	23	24	25	26	27	28	28	28	27	26	24	22	20	19	18	19	19		
26	20	22	23	24	25	25	25	25	25	26	27	27	28	28	27	26	24	21	19	18	17	17	18		
27	19	21	23	25	26	27	27	27	26	26	26	26	27	27	27	26	24	21	19	17	16	15	16		
28	18	20	22	25	27	28	29	28	28	27	27	27	27	27	27	26	24	22	19	17	15	14	14		
29	16	18	21	24	27	28	29	30	29	28	28	27	27	27	27	26	24	22	19	17	15	13	13		
30	14	17	19	23	25	28	30	30	30	29	28	28	28	27	27	26	25	23	20	17	15	13	12		

สูงจากน้ำขึ้นน้ำลงเป็นเมตรหรือคิดเป็นนิ้วเท่ากับที่สูง

HEIGHTS OF WATER PREDICTED IN METERS ABOVE THE LOWEST LOW WATER

ความสูงน้ำขึ้น น้ำลงตามเวลาที่พยากรณ์

รูปที่ 1 มาตรฐานน้ำของประเทศไทย บริเวณอ่าวสัตหีบ [4]

3.3.2 มาตรฐานน้ำของประเทศออสเตรเลียแสดงการขึ้นลงของระดับน้ำตามเวลาของน้ำขึ้นสูง (High Water) และน้ำลงต่ำ (Low Water) ความสูงของระดับน้ำวัดจากค่าระดับน้ำลงต่ำสุดทางดาราศาสตร์ (Lowest Astronomical Tide: LAT) รวมทั้งมีค่าชี้แจงเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนของระดับน้ำทำนายที่มีผลมาจากความกดอากาศ ความเร็วลม พายุซัดฝั่ง (Storm Surge) ค่าแก้ไขเนื่องจากความตื้นของน้ำ (Shallow Water Corrections) และการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของระดับน้ำเฉลี่ย (Seasonal Changes in Mean Level) โดยอธิบายการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาลในภาพรวม ไม่มีค่าแก้ไขให้ตามช่วงเวลา [5] ดังรูปที่ 2

AUSTRALIA, TORRES STRAIT - GOODS ISLAND											
LAT 10° 34'						LONG 142° 09'					
TIME ZONE -1000											
TIMES AND HEIGHTS OF HIGH AND LOW WATERS											
YEAR 2007											
JANUARY				FEBRUARY				MARCH			
Time	m	Time	m	Time	m	Time	m	Time	m	Time	m
1 0332 2.3	16 1206 3.7	1 1252 3.7	16 1229 3.7	1 0508 2.7	16 0412 2.8	1 0502 2.7	16 0418 2.7	1 0502 2.7	16 0418 2.7	1 0502 2.7	16 0418 2.7
0903 2.2	TU 2021 1.0	1 2330 1.0	FR 16 2049 1.1	0631 2.7	16 0501 2.8	0631 2.7	16 0501 2.8	0631 2.7	16 0501 2.8	0631 2.7	16 0501 2.8
1543 3.8				1511 3.5		1511 3.5		1511 3.5		1511 3.5	
2106 0.9				2016 1.1		2016 1.1		2016 1.1		2016 1.1	
2 1307 3.8	17 1228 3.7	2 1322 3.5	17 1315 3.6	2 0618 2.8	17 1207 3.4	2 0618 2.8	17 1207 3.4	2 0618 2.8	17 1207 3.4	2 0618 2.8	17 1207 3.4
2201 0.8	17 1201 1.0	2 1322 3.5	17 1315 3.6	0715 2.8	17 1207 3.4	0715 2.8	17 1207 3.4	0715 2.8	17 1207 3.4	0715 2.8	17 1207 3.4
				1210 3.3		1210 3.3		1210 3.3		1210 3.3	
				2211 1.3		2211 1.3		2211 1.3		2211 1.3	
3 1338 3.7	18 1228 3.7	3 0048 1.0	18 1510 3.4	3 0706 2.9	18 0606 2.7	3 0706 2.9	18 0606 2.7	3 0706 2.9	18 0606 2.7	3 0706 2.9	18 0606 2.7
2343 0.8	18 1210 1.0	3 0048 1.0	18 1510 3.4	0804 2.9	18 0606 2.7	0804 2.9	18 0606 2.7	0804 2.9	18 0606 2.7	0804 2.9	18 0606 2.7
		3 0048 1.0	18 1510 3.4	1207 3.1	18 0606 2.7	1207 3.1	18 0606 2.7	1207 3.1	18 0606 2.7	1207 3.1	18 0606 2.7
		3 0048 1.0	18 1510 3.4	1430 2.7	18 0606 2.7	1430 2.7	18 0606 2.7	1430 2.7	18 0606 2.7	1430 2.7	18 0606 2.7
		3 0048 1.0	18 1510 3.4	1645 2.8	18 0606 2.7	1645 2.8	18 0606 2.7	1645 2.8	18 0606 2.7	1645 2.8	18 0606 2.7
4 1423 3.6	19 1338 3.6	4 0143 1.1	19 0050 1.1	4 0926 1.3	19 0629 2.8	4 0926 1.3	19 0629 2.8	4 0926 1.3	19 0629 2.8	4 0926 1.3	19 0629 2.8
		4 0143 1.1	19 0050 1.1	0926 1.3	19 0629 2.8	0926 1.3	19 0629 2.8	0926 1.3	19 0629 2.8	0926 1.3	19 0629 2.8
		4 0143 1.1	19 0050 1.1	1430 2.7	19 0629 2.8	1430 2.7	19 0629 2.8	1430 2.7	19 0629 2.8	1430 2.7	19 0629 2.8
		4 0143 1.1	19 0050 1.1	1645 2.8	19 0629 2.8	1645 2.8	19 0629 2.8	1645 2.8	19 0629 2.8	1645 2.8	19 0629 2.8
5 0100 0.7	20 0926 1.0	5 0223 1.1	20 0132 1.2	5 0917 1.4	20 0033 1.4	5 0917 1.4	20 0033 1.4	5 0917 1.4	20 0033 1.4	5 0917 1.4	20 0033 1.4
0859 3.1	20 1433 3.6	5 0223 1.1	20 0132 1.2	0917 1.4	20 0033 1.4	0917 1.4	20 0033 1.4	0917 1.4	20 0033 1.4	0917 1.4	20 0033 1.4
1501 3.1		5 0223 1.1	20 0132 1.2	1430 2.7	20 0033 1.4	1430 2.7	20 0033 1.4	1430 2.7	20 0033 1.4	1430 2.7	20 0033 1.4
1549 3.3		5 0223 1.1	20 0132 1.2	1611 2.8	20 0033 1.4	1611 2.8	20 0033 1.4	1611 2.8	20 0033 1.4	1611 2.8	20 0033 1.4
		5 0223 1.1	20 0132 1.2		20 0033 1.4		20 0033 1.4		20 0033 1.4		20 0033 1.4
6 0156 0.8	21 0125 0.9	6 0252 1.2	21 0204 1.3	6 0155 1.5	21 0048 1.8	6 0155 1.5	21 0048 1.8	6 0155 1.5	21 0048 1.8	6 0155 1.5	21 0048 1.8
0859 3.1	21 0125 0.9	6 0252 1.2	21 0204 1.3	0155 1.5	21 0048 1.8	0155 1.5	21 0048 1.8	0155 1.5	21 0048 1.8	0155 1.5	21 0048 1.8
1154 3.1		6 0252 1.2	21 0204 1.3	1430 2.7	21 0048 1.8	1430 2.7	21 0048 1.8	1430 2.7	21 0048 1.8	1430 2.7	21 0048 1.8
1708 3.3		6 0252 1.2	21 0204 1.3	1611 2.8	21 0048 1.8	1611 2.8	21 0048 1.8	1611 2.8	21 0048 1.8	1611 2.8	21 0048 1.8
		6 0252 1.2	21 0204 1.3		21 0048 1.8		21 0048 1.8		21 0048 1.8		21 0048 1.8
7 0240 0.8	22 0206 0.9	7 0314 1.3	22 0224 1.4	7 0222 1.6	22 0123 1.8	7 0222 1.6	22 0123 1.8	7 0222 1.6	22 0123 1.8	7 0222 1.6	22 0123 1.8
0859 3.1	22 0206 0.9	7 0314 1.3	22 0224 1.4	0222 1.6	22 0123 1.8	0222 1.6	22 0123 1.8	0222 1.6	22 0123 1.8	0222 1.6	22 0123 1.8
1307 3.0		7 0314 1.3	22 0224 1.4	1430 2.7	22 0123 1.8	1430 2.7	22 0123 1.8	1430 2.7	22 0123 1.8	1430 2.7	22 0123 1.8
1816 3.2		7 0314 1.3	22 0224 1.4	1611 2.8	22 0123 1.8	1611 2.8	22 0123 1.8	1611 2.8	22 0123 1.8	1611 2.8	22 0123 1.8
		7 0314 1.3	22 0224 1.4		22 0123 1.8		22 0123 1.8		22 0123 1.8		22 0123 1.8

รูปที่ 2 มาตรฐานน้ำของประเทศออสเตรเลีย [5]

3.3.3 มาตรฐานในหนังสือ Admiralty ที่ใช้สำหรับการเดินเรือสากลที่จัดทำโดยสำนักงานอุทกศาสตร์ประเทศสหราชอาณาจักร แสดงการขึ้นลงของระดับน้ำตามเวลาของน้ำขึ้นสูง (High Water) และน้ำลงต่ำ (Low Water) ความสูงของระดับน้ำวัดจากค่าระดับน้ำลงต่ำสุดทางดาราศาสตร์ (Lowest Astronomical Tide: LAT) รวมทั้งมีค่าชี้แจงเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนของระดับน้ำทำนายที่มีผลมาจาก ความกดอากาศ ความเร็วลม พายุซัดฝั่ง (Storm Surge) ค่าแก้ไขเนื่องจากความตื้นของน้ำ (Shallow Water Corrections) และการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของระดับน้ำเฉลี่ย (Seasonal Changes in Mean Level) โดยมีการกำหนดค่าแก้ไขรายเดือนของแต่ละตำบลที่ [6] ดังรูปที่ 3 และ 4

KALIMANTAN — KAMPUNGBARU											
LAT 3°25'S LONG 116°01'E						YEAR 2017					
TIMES AND HEIGHTS OF HIGH AND LOW WATERS											
OCTOBER				NOVEMBER				DECEMBER			
Time	m	Time	m	Time	m	Time	m	Time	m	Time	m
1 0607 1.9	16 0535 1.9	1 0517 1.9	16 0504 1.9	1 0454 1.8	16 0016 1.4	1 0607 1.9	16 0535 1.9	1 0454 1.8	16 0016 1.4	1 0607 1.9	16 0535 1.9
1333 1.1	17 1251 1.0	1 1204 0.7	17 1152 0.6	1 1144 0.5	16 0448 1.8	1333 1.1	17 1251 1.0	1 1144 0.5	16 0448 1.8	1333 1.1	17 1251 1.0
SU 1827 1.3	M 1832 1.4	W 1824 1.8	TH 1833 1.9	F 1841 2.1	SA 1140 0.4	SU 1827 1.3	M 1832 1.4	W 1841 2.1	SA 1140 0.4	SU 1827 1.3	M 1832 1.4
2250 1.1	2303 1.2	2344 1.1	2359 1.2		1847 2.2	2250 1.1	2303 1.2		1847 2.2	2250 1.1	2303 1.2
2 0552 2.0	17 0534 2.0	2 0533 2.0	17 0524 2.0	2 0015 1.3	17 0032 1.3	2 0552 2.0	17 0534 2.0	2 0015 1.3	17 0032 1.3	2 0552 2.0	17 0534 2.0
1240 1.0	17 1220 0.9	2 1208 0.6	17 1201 0.4	2 0518 1.9	17 0516 1.8	1240 1.0	17 1220 0.9	2 0518 1.9	17 0516 1.8	1240 1.0	17 1220 0.9
M 1800 1.5	TH 1813 1.6	TH 1834 2.0	F 1844 2.1	SA 1158 0.3	SU 1157 0.3	M 1800 1.5	TH 1813 1.6	TH 1834 2.0	F 1844 2.1	SA 1158 0.3	SU 1157 0.3
2320 1.0	2332 1.0			2 1853 2.3	1900 2.4	2320 1.0	2332 1.0			2 1853 2.3	1900 2.4
3 0557 2.1	18 0544 2.1	3 0009 1.0	18 0022 1.1	3 0037 1.2	18 0051 1.2	3 0557 2.1	18 0544 2.1	3 0037 1.2	18 0051 1.2	3 0557 2.1	18 0544 2.1
1228 0.9	18 1217 0.7	3 0551 2.1	18 0544 2.0	3 0541 2.0	18 0542 1.9	1228 0.9	18 1217 0.7	3 0541 2.0	18 0542 1.9	1228 0.9	18 1217 0.7
TU 1809 1.7	W 1822 1.9	3 1220 0.4	19 1833 1.9	3 1216 0.2	18 1217 0.1	TU 1809 1.7	W 1822 1.9	3 1216 0.2	18 1217 0.1	TU 1809 1.7	W 1822 1.9
2347 0.8	2358 0.9	3 1850 2.2	19 1901 2.3	3 1910 2.4	18 1917 2.5	2347 0.8	2358 0.9	3 1910 2.4	18 1917 2.5	2347 0.8	2358 0.9
4 0609 2.2	19 0600 2.2	4 0034 1.0	19 0046 1.1	4 0059 1.1	19 0111 1.1	4 0609 2.2	19 0600 2.2	4 0059 1.1	19 0111 1.1	4 0609 2.2	19 0600 2.2
1232 0.7	19 1225 0.5	4 0609 2.1	19 0605 2.1	4 0603 2.0	19 0606 2.0	1232 0.7	19 1225 0.5	4 0603 2.0	19 0606 2.0	1232 0.7	19 1225 0.5
W 1826 1.9	TH 1839 2.1	SA 1236 0.3	SU 1235 0.1	4 1235 0.1	19 1238 0.0	W 1826 1.9	TH 1839 2.1	SA 1236 0.3	SU 1235 0.1	4 1235 0.1	19 1238 0.0
		4 1911 2.3	19 1921 2.4	4 1930 2.5	19 1937 2.6			4 1930 2.5	19 1937 2.6		
5 0012 0.7	20 0022 0.9	5 0058 0.9	20 0110 1.0	5 0122 1.1	20 0133 1.1	5 0012 0.7	20 0022 0.9	5 0122 1.1	20 0133 1.1	5 0012 0.7	20 0022 0.9
0624 2.3	20 0616 2.2	5 0628 2.2	20 0625 2.1	5 0625 2.0	20 0630 2.0	0624 2.3	20 0616 2.2	5 0625 2.0	20 0630 2.0	0624 2.3	20 0616 2.2
TH 1244 0.6	20 1239 0.4	5 1255 0.1	M 1254 0.1	5 1256 0.0	20 1300 0.0	TH 1244 0.6	20 1239 0.4	5 1256 0.0	20 1300 0.0	TH 1244 0.6	20 1239 0.4
1847 2.1	20 1859 2.2	5 1933 2.4	20 1943 2.5	5 1951 2.6	20 1957 2.6	1847 2.1	20 1859 2.2	5 1951 2.6	20 1957 2.6	1847 2.1	20 1859 2.2
6 0037 0.7	21 0047 0.8	6 0121 0.9	21 0133 1.0	6 0145 1.1	21 0155 1.1	6 0037 0.7	21 0047 0.8	6 0145 1.1	21 0155 1.1	6 0037 0.7	21 0047 0.8
0640 2.3	21 0633 2.2	6 0647 2.2	21 0645 2.1	6 0647 2.0	21 0653 2.0	0640 2.3	21 0633 2.2	6 0647 2.0	21 0653 2.0	0640 2.3	21 0633 2.2
F 1259 0.4	SA 1256 0.3	M 1314 0.1	21 1315 0.0	6 1317 0.0	21 1321 0.0	F 1259 0.4	SA 1256 0.3	M 1314 0.1	21 1315 0.0	6 1317 0.0	21 1321 0.0
O 1910 2.2	21 1922 2.3	6 1956 2.5	21 2005 2.5	6 2013 2.6	21 2018 2.6	O 1910 2.2	21 1922 2.3	6 2013 2.6	21 2018 2.6	O 1910 2.2	21 1922 2.3

รูปที่ 3 มาตรฐานน้ำในหนังสือ Admiralty [6]

Extract from ATT Part II.									
PLACE	Lat	Long	TIME DIFFERENCES		HEIGHT DIFFERENCES (IN METRES)				
			HHW	LLW	MHHW	MLHW	MHLW	MLLW	
STANDARD HARBOUR	(see extract)				1.6	Δ	Δ	0.4	
	N	E							
Secondary Harbour	2 30	90 30	+0108	+0146	+0.5	Δ	Δ	+0.1	
SEASONAL CHANGES IN MEAN LEVEL									
No	Jan 1	Feb 1	Mar 1	Apr 1	May 1	June 1	July 1	Aug 1	Sep 1
STANDARD HARBOUR	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	+0.1	+0.1	-0.1	-0.2
Secondary Harbour	0.0	+0.1	+0.1	+0.1	+0.1	+0.1	0.0	0.0	0.0

Notes: (i) The data used in this example do not refer to the year of these tables.
(ii) Where only one HW and one LW height differences is tabulated in Part II, both HW and LW differences must be obtained by interpolation or extrapolation, using these values and the heights at the Standard Port.
(iii) For instructions on graphical interpolation of differences, see Example I on page xvii.

รูปที่ 4 ค่าแก้เป็นรายเดือน (Seasonal Changes in Mean Level) ในหนังสือ Admiralty [6]

3.4 สถิติความคลาดเคลื่อนของข้อมูลน้ำขึ้น - น้ำลง (Statistics of Tidal Residuals) พารามิเตอร์พื้นฐานที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลมีประโยชน์มากในการตรวจสอบข้อมูลระดับน้ำที่บันทึกไว้ในเบื้องต้น และวิธีที่ง่ายที่สุดในการวิเคราะห์ข้อมูลระดับน้ำทะเลที่บันทึกไว้ โดยการหาค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลระดับน้ำทะเลที่บันทึกไว้เป็นระยะเวลานาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดเป็นระดับอ้างอิง ซึ่งระดับอ้างอิงนี้มักใช้สำหรับการสร้างแผนที่เดินเรือหรือเป็นข้อมูลอ้างอิงในการตรวจวัดระดับน้ำทะเลต่อไป ส่วนการสำรวจทางยิออเดติกใช้ระดับทะเลปานกลาง (MSL) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของระดับน้ำทะเลที่ตรวจวัดได้ในแต่ละชั่วโมง ในช่วงเวลาอย่างน้อยหนึ่งปี และถ้าสามารถตรวจวัดได้เป็นระยะเวลานานก็ควรมากกว่า 19 ปี โดยทั่วไปการแสดงระดับน้ำทะเลที่ตรวจวัดได้ แทนค่าด้วย $X(t)$ ซึ่งแปรผันตามเวลา (t) ดังนี้

$$X(t) = Z_0(t) + T(t) + S(t)$$

เมื่อ $Z_0(t)$ คือ ระดับทะเลปานกลาง ซึ่งเปลี่ยนแปลงน้อยมากตามเวลา

$T(t)$ คือ น้ำขึ้น-น้ำลง ตามอิทธิพลทางดาราศาสตร์

$S(t)$ คือ ระดับน้ำที่เกิดจากสภาพอุตุนิยมวิทยา

ในการตรวจวัดระดับน้ำทะเลแต่ละชุดข้อมูล ค่า $S(t)$ จะรวมค่าความคลาดเคลื่อนจากการตรวจวัด สมมติว่าเรามีการตรวจวัดระดับน้ำจำนวน K ชุดของตัวแปร $S(t)$ ซึ่งแทนค่าด้วย $x_1, x_2, x_3, \dots, x_K$ ค่าเฉลี่ยจะหาได้จาก

$$\bar{x} = \frac{1}{K} (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_K)$$

การอธิบายการกระจายตัวของค่าต่างๆ ทางสถิติสำหรับชุดข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด สามารถคำนวณค่าความแปรปรวนเฉลี่ย (σ^2) ได้จากค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานยกกำลังสอง ดังนี้

$$\sigma^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (X_k - \bar{X})^2$$

ซึ่ง σ^2 จะมีค่าเป็นบวกเสมอ รากที่สองของความแปรปรวน (σ) เรียกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจง จากเทคนิคการวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ ซึ่งแสดงเป็นอนุกรมเวลาในเทอมของการกระจายความแปรปรวนที่ความถี่ต่างๆ องค์ประกอบของระดับน้ำทะเลที่ได้จากการตรวจวัดซึ่งรวมทั้งน้ำขึ้นน้ำลงตามอิทธิพลทางดาราศาสตร์และจากสภาพอุตุนิยมวิทยาจะเป็นอิสระซึ่งกันและกัน เนื่องจากมีสาเหตุทางกายภาพที่แตกต่างกันมาก ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าผลของความเป็นอิสระนี้ ทำให้ผลรวมของค่าระดับน้ำทะเลที่ตรวจวัดได้จำนวน K ค่า มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sum_{k=1}^K (X(t_k) - Z_0)^2 = \sum_{k=1}^K T^2(t_k) + \sum_{k=1}^K S^2(t_k)$$

Total variance = Tidal variance + Surge variance

โดย Z_0 คือ ระดับน้ำทะเลปานกลางในช่วงเวลาที่ทำกรตรวจวัดทั้งหมด เราสามารถหารทั้งสองข้างของสมการด้วยค่า K เพื่อให้ได้ค่าความแปรปรวนเฉลี่ยในแต่ละเทอมของสมการ [7]

4. วิธีดำเนินการศึกษา

การวิจัยเรื่อง “การหาตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายนาย” จากกรอบแนวความคิดที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรม ผู้วิจัยได้ดำเนินงานวิจัย เป็นแบบการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลระดับน้ำจริงบริเวณพื้นที่ศึกษา และข้อมูลสภาพอุตุนิยมวิทยาในบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง ทั้งแบบปฐภูมิ และทุติยภูมิ แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อกำหนดเป็นตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายนาย

4.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

4.1.1 รวบรวมข้อมูลระดับน้ำจริงบริเวณฝั่งอ่าวไทย จำนวน 2 สถานี คือสถานีวัดระดับน้ำอ่าวสัตหีบ และสถานีวัดระดับน้ำสงขลา และบริเวณฝั่งทะเลอันดามัน จำนวน 1 สถานี คือสถานีวัดระดับน้ำอ่าวทับละมุ ซึ่งมีการตรวจวัดและบันทึกไว้ช่วงเวลา 1 รอบของวัฏจักรน้ำขึ้นน้ำลงคือ ประมาณ 20 ปี ตั้งแต่ พ.ศ.2540 – 2559

4.1.2 รวบรวมข้อมูลสภาพอุตุนิยมวิทยาในบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงกับบริเวณสถานีวัดระดับน้ำจากกรมอุตุนิยมวิทยา และจากกองอุตุนิยมวิทยา กรมอุทกศาสตร์ ช่วงเวลา 1 รอบของวัฏจักรน้ำขึ้นน้ำลงคือ ประมาณ 20 ปี ตั้งแต่ พ.ศ.2540 – 2559

4.1.3 ตรวจสอบความถูกต้องและความสอดคล้องในเรื่องของเวลากับลักษณะการขึ้น - ลงของระดับน้ำของข้อมูลระดับน้ำจริงรวมทั้งข้อมูลสภาพอุตุนิยมวิทยาที่รวบรวมได้

4.1.4 แกไขข้อมูลระดับน้ำจริงและข้อมูลสภาพอุตุนิยมวิทยาที่มีความคลาดเคลื่อน ให้มีความถูกต้องมากที่สุด เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

4.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

ดำเนินการทางสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) โดยใช้ตารางแจกแจงความถี่ (Frequency Distribution) ค่าสูงสุด (Maximum) ค่าต่ำสุด (Minimum) ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เพื่ออธิบายลักษณะของผลต่างระหว่างน้ำจริงกับน้ำทำนาย (Residual Levels) โดยมีขั้นตอนดังนี้

4.2.1 นำข้อมูลระดับน้ำจริงที่ได้มาวิเคราะห์หาค่า Constituent หรือค่าตัวประจำ เพื่อใช้ในการทำนายน้ำ โดยใช้โปรแกรมทำนายน้ำของสถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเลและบรรยากาศ ฟลินเดอร์ (Flinders Institute of Atmospheric and Marine Science) ประเทศออสเตรเลีย โดยใช้ค่า Harmonic Constituents จำนวน 112 ค่า ในการทำนายน้ำ ทั้ง 3 สถานีวัดระดับน้ำ ย้อนหลังตั้งแต่ พ.ศ.2540 – 2559 เพื่อนำผลการทำนายมาใช้ในการเปรียบเทียบกับระดับน้ำจริง

4.2.2 เปรียบเทียบระดับน้ำจริงกับระดับน้ำทำนาย ทั้ง 3 สถานีวัดระดับน้ำ โดยการเปรียบเทียบเป็นรายชั่วโมงซึ่งสอดคล้องกับการทำนายน้ำในหนังสือมาตราน้ำ เพื่อหาผลต่างระหว่างน้ำจริงกับน้ำทำนาย (Residual Levels)

4.2.3 เปรียบเทียบระดับน้ำจริงกับข้อมูลสภาพอุตุนิยมวิทยابริเวณฐานทัพเรือของ ทร. ทั้ง 3 สถานีวัดระดับน้ำ เพื่อหาความสัมพันธ์ของระดับน้ำจริงกับข้อมูลสภาพอุตุนิยมวิทยา

4.2.4 กำหนดช่วงความถี่ของผลต่างระหว่างน้ำจริงกับน้ำทำนาย (Residual Levels) จากรายชั่วโมงเป็นช่วงเวลาน้ำเกิด (Spring Tide) คือช่วงตั้งแต่ก่อนเดือนเพ็ญหรือเดือนมืดหนึ่งวันจนถึงหลังเดือนเพ็ญหรือเดือนมืดสองวันตามดิถีของดวงจันทร์ในมาตราน้ำ (ระยะเวลา 4 วัน) กำหนดเป็นรหัส S1 – S25 ช่วงเวลาน้ำตาย (Neap Tide) คือช่วงตั้งแต่ก่อนถึงปักข์แรกหรือถึงปักข์หลังหนึ่งวันจนถึงหลังถึงปักข์แรกหรือถึงปักข์หลังสองวัน (ระยะเวลา 4 วัน) กำหนดเป็นรหัส N1 – N25 และช่วงเวลาระหว่างน้ำเกิดกับน้ำตาย กำหนดเป็นรหัส I1 – I25

4.2.5 นำค่าทางสถิติของผลต่างที่ได้ (Residual Levels) มาวิเคราะห์หาตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายของทั้ง 3 สถานีวัดระดับน้ำ

4.2.6 นำตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายที่ได้มาใช้ เพื่อเปรียบเทียบกับระดับน้ำจริงว่าข้อมูลระดับน้ำทำนายที่ทำการปรับแก้แล้วมีความแตกต่างกับระดับน้ำจริงอย่างไร

5. ผลการศึกษา

ผลต่างระหว่างระดับน้ำจริงกับระดับน้ำทำนาย (Residual Levels) ของสถานีวัดระดับน้ำอ่าวสัตหีบ ช่วงเวลาน้ำเกิด มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 13 เซนติเมตร ช่วงเวลาน้ำตาย มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 19 เซนติเมตร และช่วงเวลาระหว่างน้ำเกิดกับน้ำตาย มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 14 เซนติเมตร สถานีวัดระดับน้ำสงขลา ช่วงเวลาน้ำเกิด มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 12 เซนติเมตร ช่วงเวลาน้ำตาย มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 16 เซนติเมตร และช่วงเวลาระหว่างน้ำเกิดกับน้ำตาย มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 17 เซนติเมตร สถานีวัดระดับน้ำอ่าวทับละมุ ช่วงเวลาน้ำเกิด มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 18 เซนติเมตร

ช่วงเวลาน้ำตาย มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 16 เซนติเมตร และช่วงเวลาระหว่างน้ำเกิดกับน้ำตาย มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 16 เซนติเมตร ซึ่งได้สังเคราะห์เป็นตัวแทนการปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายตามช่วงเวลาได้ดังนี้ ช่วงเวลาน้ำเกิด 1-18 เซนติเมตร ช่วงเวลาน้ำตาย 3 -16 เซนติเมตร และช่วงเวลาระหว่างน้ำเกิดกับน้ำตาย 0-16 เซนติเมตร ดังตารางที่ 2 - 4 โดยที่สถานีวัดระดับน้ำอ่าวสัตหีบมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่าง 2 - 78 เซนติเมตร สถานีวัดระดับน้ำสงขลามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่าง 1 - 57 เซนติเมตร และสถานีวัดระดับน้ำอ่าวทับละมุมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่าง 2 - 186 เซนติเมตร ซึ่งในที่นี้ได้แสดงตัวอย่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Residual Levels เฉพาะในช่วงเวลาน้ำเกิด (Spring Tide) ช่วงแรกของปี (S1) ของสถานีวัดระดับน้ำอ่าวสัตหีบ ดังรูปที่ 5 และจากการนำตัวแทนการปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายที่ได้มาเพื่อเปรียบเทียบกับระดับน้ำจริงที่สถานีวัดระดับน้ำอ่าวทับละมุ ของปี พ.ศ.2557 ได้ค่าเฉลี่ยของผลต่างอยู่ในช่วง (-6) - 44 เซนติเมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่า 5 - 11 เซนติเมตร ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 2 ตัวแทนการปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายของสถานีวัดระดับน้ำสงขลา

ช่วงเวลา	ตัวแทน (Mean)	ช่วงเวลา	ตัวแทน (Mean)	ช่วงเวลา	ตัวแทน (Mean)	ช่วงเวลา	ตัวแทน (Mean)
S1	-0.03	N1	0.03	I1	0.01	I26	0.06
S2	0.00	N2	0.01	I2	0.02	I27	0.09
S3	0.05	N3	0.14	I3	0.05	I28	0.10
S4	0.06	N4	0.16	I4	0.02	I29	0.10
S5	0.08	N5	0.11	I5	0.03	I30	0.08
S6	0.02	N6	0.05	I6	0.06	I31	0.08
S7	0.04	N7	0.09	I7	0.06	I32	0.09
S8	0.12	N8	0.08	I8	0.09	I33	0.10
S9	0.10	N9	0.12	I9	0.10	I34	0.10
S10	0.09	N10	0.08	I10	0.10	I35	0.08
S11	0.10	N11	0.13	I11	0.08	I36	0.08
S12	0.10	N12	0.13	I12	0.08	I37	0.11
S13	0.07	N13	0.05	I13	0.09	I38	0.08
S14	0.06	N14	0.04	I14	0.03	I39	0.04
S15	-0.01	N15	0.06	I15	0.10	I40	0.06
S16	0.07	N16	0.10	I16	0.08	I41	0.08
S17	0.06	N17	0.11	I17	0.08	I42	0.17
S18	0.01	N18	0.07	I18	0.11	I43	0.12
S19	0.03	N19	0.06	I19	0.08	I44	0.11

ตารางที่ 2 ตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายของสถานีวัดระดับน้ำสงขลา (ต่อ)

S20	0.08	N20	0.09	I20	0.08	I45	0.11
S21	0.05	N21	0.11	I21	0.06	I46	0.13
S22	0.06	N22	0.10	I22	0.08	I47	0.13
S23	0.08	N23	0.09	I23	0.17	I48	0.13
S24	0.10	N24	0.15	I24	0.12	I49	0.11
S25	0.08	N25	0.07	I25	0.11	I50	0.04

ตารางที่ 3 ตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายของสถานีวัดระดับน้ำสัทหีบ

ช่วงเวลา	ตัวเกณฑ์ (Mean)	ช่วงเวลา	ตัวเกณฑ์ (Mean)	ช่วงเวลา	ตัวเกณฑ์ (Mean)	ช่วงเวลา	ตัวเกณฑ์ (Mean)
S1	0.04	N1	0.03	I1	0.03	I26	0.07
S2	0.10	N2	0.10	I2	0.05	I27	0.09
S3	0.12	N3	0.19	I3	0.08	I28	0.10
S4	0.07	N4	0.13	I4	0.06	I29	0.09
S5	0.07	N5	0.06	I5	0.01	I30	0.09
S6	0.05	N6	0.07	I6	0.07	I31	0.07
S7	0.05	N7	0.08	I7	0.07	I32	0.08
S8	0.13	N8	0.09	I8	0.09	I33	0.08
S9	0.05	N9	0.08	I9	0.10	I34	0.06
S10	0.04	N10	0.04	I10	0.09	I35	0.04
S11	0.06	N11	0.09	I11	0.09	I36	0.04
S12	0.05	N12	0.05	I12	0.07	I37	0.05
S13	0.05	N13	0.06	I13	0.08	I38	0.05
S14	0.03	N14	0.04	I14	0.02	I39	0.03
S15	0.12	N15	0.12	I15	0.06	I40	0.07
S16	0.10	N16	0.13	I16	0.04	I41	0.10
S17	0.03	N17	0.07	I17	0.04	I42	0.14
S18	0.04	N18	0.09	I18	0.05	I43	0.08
S19	0.05	N19	0.08	I19	0.05	I44	0.10
S20	0.07	N20	0.11	I20	0.05	I45	0.04
S21	0.04	N21	0.07	I21	0.07	I46	0.06

ตารางที่ 3 ตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายของสถานีวัดระดับน้ำสัดหีบ (ต่อ)

S22	0.04	N22	0.09	I22	0.10	I47	0.05
S23	0.06	N23	0.08	I23	0.14	I48	0.05
S24	0.05	N24	0.07	I24	0.08	I49	0.04
S25	0.03	N25	0.01	I25	0.10	I50	0.04

ตารางที่ 4 ตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายของสถานีวัดระดับน้ำทับละมู

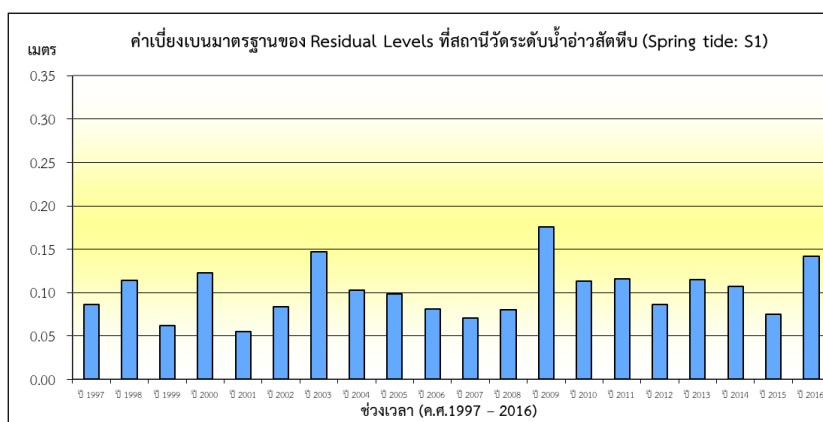
ช่วงเวลา	ตัวเกณฑ์ (Mean)	ช่วงเวลา	ตัวเกณฑ์ (Mean)	ช่วงเวลา	ตัวเกณฑ์ (Mean)	ช่วงเวลา	ตัวเกณฑ์ (Mean)
S1	0.10	N1	0.09	I1	0.10	I26	0.10
S2	0.09	N2	0.06	I2	0.16	I27	0.08
S3	0.05	N3	0.06	I3	0.13	I28	0.07
S4	0.08	N4	0.07	I4	0.13	I29	0.10
S5	0.12	N5	0.12	I5	0.13	I30	0.07
S6	0.13	N6	0.16	I6	0.11	I31	0.05
S7	0.07	N7	0.11	I7	0.10	I32	0.11
S8	0.07	N8	0.09	I8	0.08	I33	0.04
S9	0.06	N9	0.03	I9	0.07	I34	0.05
S10	0.01	N10	0.08	I10	0.10	I35	0.05
S11	0.07	N11	0.08	I11	0.07	I36	0.00
S12	0.10	N12	0.10	I12	0.05	I37	0.01
S13	0.11	N13	0.05	I13	0.11	I38	0.07
S14	0.18	N14	0.15	I14	0.03	I39	0.02
S15	0.07	N15	0.08	I15	0.05	I40	0.08
S16	0.09	N16	0.08	I16	0.05	I41	0.06
S17	0.11	N17	0.11	I17	0.00	I42	0.04
S18	0.17	N18	0.14	I18	0.01	I43	0.08
S19	0.12	N19	0.13	I19	0.07	I44	0.12
S20	0.10	N20	0.06	I20	0.08	I45	0.11
S21	0.04	N21	0.10	I21	0.08	I46	0.11
S22	0.05	N22	0.04	I22	0.06	I47	0.12
S23	0.05	N23	0.09	I23	0.04	I48	0.11

ตารางที่ 4 ตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายของสถานีวัดระดับน้ำห้วยตะลุง (ต่อ)

S24	0.09	N24	0.09	I24	0.08	I49	0.09
S25	0.08	N25	0.08	I25	0.12	I50	0.05

ตารางที่ 5 การนำตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายที่ได้มาไว้เพื่อเปรียบเทียบกับระดับน้ำจริงที่สถานีวัดระดับน้ำอ่าวห้วยตะลุง ของปี พ.ศ.2557

ผลต่างระดับน้ำจริง - น้ำทำนาย (Residual Levels)							
สถานีวัดระดับน้ำอ่าวห้วยตะลุง ประจำปี พ.ศ.2557							
เดือน	จำนวนชั่วโมง	จำนวนข้อมูล	จำนวนข้อมูลที่ขาด	MEAN	SD	MAX	MIN
ม.ค.	744	744	0.00	0.01	0.09	0.32	-0.24
ก.พ.	672	672	0.00	-0.01	0.05	0.12	-0.20
มี.ค.	744	744	0.00	-0.06	0.11	0.62	-0.66
เม.ย.	720	720	0.00	0.03	0.08	0.33	-0.17
พ.ค.	744	744	0.00	0.44	0.07	0.64	0.10
มิ.ย.	720	720	0.00	0.42	0.07	0.67	0.26
ก.ค.	744	744	0.00	0.44	0.08	0.66	0.19
ส.ค.	744	744	0.00	0.35	0.07	0.65	0.17
ก.ย.	720	720	0.00	0.29	0.07	0.53	0.12
ต.ค.	744	744	0.00	0.38	0.09	0.68	0.15
พ.ย.	720	720	0.00	0.44	0.06	0.61	0.28
ธ.ค.	744	744	0.00	0.43	0.07	0.97	0.21



รูปที่ 5 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Residual Levels ที่สถานีวัดระดับน้ำอ่าวห้วยตะลุงในช่วงเวลาน้ำเกิด (Spring Tide) ช่วงแรกของปี (S1)

แนวทางในการนำข้อมูลตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายนามาใช้

จากตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายนของสถานีวัดระดับน้ำสงขลา สถานีวัดระดับน้ำสัตหีบ และสถานีวัดระดับน้ำทับละมุ ตามตารางที่ 2 – 4 สามารถนำไปใช้ประกอบกับหนังสือมาตราน้ำ โดยมีวิธีการดังนี้

1. เพิ่มเติมตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายนเป็นลักษณะค่าชี้แจงในหนังสือมาตราน้ำ
2. อธิบายช่วงเวลาในการใช้ตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายน คือ ช่วงเวลาน้ำเกิด (Spring Tide) คือช่วงตั้งแต่ก่อนเดือนเพ็ญหรือเดือนมืดหนึ่งวันจนถึงหลังเดือนเพ็ญหรือเดือนมืดสองวันตามดิถีของดวงจันทร์ในมาตราน้ำ (ระยะเวลา 4 วัน) กำหนดเป็นรหัส S1 – S25 ช่วงเวลาน้ำตาย (Neap Tide) คือช่วงตั้งแต่ก่อนถึงปักข์แรกหรือถึงปักข์หลังหนึ่งวันจนถึงหลังถึงปักข์แรกหรือถึงปักข์หลังสองวัน (ระยะเวลา 4 วัน) กำหนดเป็นรหัส N1 – N25 และช่วงเวลาระหว่างน้ำเกิดกับน้ำตาย กำหนดเป็นรหัส I1 – I25 และค่าตัวเกณฑ์การปรับแก้ได้มาจากค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างระดับน้ำจริงกับระดับน้ำทำนายน (Residual Levels) ในรอบ 20 ปี (พ.ศ. 2540 – 2559)
3. นำค่าตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายน ไปรวมกับค่าระดับน้ำทำนายนตามช่วงเวลาแสดงในหนังสือมาตราน้ำ แล้วนำผลที่ได้จากการปรับแก้ไปใช้ประโยชน์
4. ตัวอย่างการนำค่าตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายนไปใช้ ถ้าต้องการทราบระดับน้ำทำนายนของวันที่ 10 มกราคม 2559 เวลา 0800 ดังรูปที่ 6 ได้ค่าระดับน้ำทำนายน 3.0 เมตร จากนั้นตรวจสอบว่าวันที่ 10 มกราคม 2559 ตรงกับช่วงใดของค่าตัวเกณฑ์การปรับแก้ ซึ่งในที่นี้ตรงกับช่วงน้ำเกิดครั้งแรกของปี (S1) ตามตารางที่ 3 ตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายนของสถานีวัดระดับน้ำ สัตหีบ ค่า S1 มีค่าเท่ากับ 0.04 เมตร ดังนั้น เมื่อนำค่าตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายนไปรวมกับค่าระดับน้ำทำนายนตามช่วงเวลาดังกล่าว (3.0 + 0.04) แล้ว จะได้ค่าระดับน้ำหลังจากการปรับแก้คือ 3.04 เมตร

อำเภอสัตหีบ (ชลบุรี)																							73	
Ao Sattahip (Chon Buri)																								
สถานีวัด (Lat) 12° 38' 42" N (N)																							สถานีวัด (Long) 100° 52' 55" E (E)	
มกราคม ๒๕๕๙																							January 2016	
วัน	เวลา	HOURS																						
DATE	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
สถานะน้ำขึ้นลง																							HEIGHTS OF WATER IN METERS	
1	17	16	16	17	18	21	24	26	28	29	30	29	28	27	26	25	24	24	24	23	23	22	21	20
2	19	18	17	18	20	21	24	26	28	29	30	29	28	27	26	25	24	23	22	22	22	21	21	21
3	20	19	19	20	21	22	24	26	27	28	29	28	27	26	26	25	24	23	22	21	21	21	21	21
4	21	21	21	22	22	24	25	26	27	28	28	28	27	26	26	25	24	23	21	20	19	19	20	20
5	21	22	22	24	25	26	27	28	28	28	28	27	26	26	25	24	23	21	19	17	17	18	19	
6	21	22	25	24	25	26	27	28	28	28	28	28	27	26	26	25	24	23	21	19	17	16	15	16
7	20	22	25	25	26	27	28	28	28	28	28	27	26	26	25	24	23	21	19	17	16	14	14	16
8	18	20	25	25	26	27	28	28	28	28	28	27	26	26	25	24	23	21	18	16	14	13	12	13
9	15	18	21	24	27	28	29	29	29	29	28	28	27	26	25	24	23	21	18	16	14	12	11	12
10	13	16	19	22	25	28	30	30	29	29	28	28	27	26	25	24	23	21	18	16	14	12	11	12
11	11	13	16	20	23	27	29	31	31	31	30	29	28	28	28	27	26	24	21	18	16	14	12	10
12	10	11	14	17	21	25	28	30	31	31	30	29	28	28	28	27	27	25	23	20	17	14	11	10
13	10	11	12	15	19	23	26	29	31	31	30	29	28	27	27	27	27	26	24	22	19	16	13	12
14	12	11	12	14	18	21	25	28	30	31	30	29	28	27	26	26	26	25	24	22	19	16	13	12
15	14	13	13	15	17	20	23	26	29	30	30	29	27	26	25	24	24	25	25	24	23	21	19	16
16	17	16	15	16	18	20	23	26	28	29	29	28	27	25	24	23	22	22	23	23	23	23	22	21
17	20	19	18	18	20	21	23	26	27	28	29	28	27	25	23	21	21	20	20	21	22	22	22	22
18	22	21	21	22	23	25	26	28	29	28	27	25	23	21	19	18	18	19	19	20	21	22	22	22
19	23	23	24	24	25	26	27	28	29	28	27	25	23	21	19	17	17	16	17	18	19	20	20	20
20	22	23	25	26	27	28	29	29	29	29	28	26	24	22	20	18	16	15	15	15	16	16	16	16
21	20	22	25	26	27	28	29	29	29	29	28	26	24	22	20	18	16	15	15	15	16	16	16	16
22	18	21	23	26	28	29	30	30	30	30	29	28	27	25	23	21	18	15	13	12	12	13	13	13
23	16	18	21	24	27	29	30	31	31	30	29	28	26	24	22	20	17	15	13	12	12	13	13	13
24	13	16	19	22	26	28	30	31	31	30	29	28	26	24	22	20	17	14	12	11	11	12	12	12
25	12	14	17	20	24	27	29	31	31	30	29	28	26	24	22	20	17	14	12	11	11	12	12	12
26	12	13	15	19	22	25	28	30	30	30	29	28	27	27	27	27	26	25	23	21	18	15	13	12
27	12	13	15	17	21	24	27	29	30	30	29	28	26	24	22	20	17	14	12	11	11	12	12	12
28	14	14	15	17	20	23	26	29	29	29	28	27	26	25	24	23	23	24	24	24	24	22	21	19
29	15	15	16	17	20	23	26	29	29	29	28	27	26	25	24	23	23	24	24	24	24	22	21	19
30	17	17	18	20	23	26	29	29	29	28	27	26	25	24	23	23	23	23	23	23	23	21	20	19
31	19	18	18	19	21	23	25	27	28	28	27	26	25	24	23	23	23	23	23	23	23	21	20	19
สถานะน้ำขึ้นลงและสถานะน้ำขึ้นลงต่ำที่สุด																							HEIGHTS OF WATER PREDICTED IN METRS ABOVE THE LOWEST LOW WATER	
สถานะน้ำขึ้นลงและสถานะน้ำขึ้นลงต่ำที่สุด																							สถานะน้ำขึ้นลงและสถานะน้ำขึ้นลงต่ำที่สุด	

รูปที่ 6 ระดับน้ำทำนายน 10 มกราคม 2559 เวลา 0800 ระดับความสูง 3.0 เมตร [4]

6. สรุปและอภิปรายผล/ข้อเสนอแนะ

จากการจัดทำตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายของทั้ง 3 สถานีวัดระดับน้ำ ซึ่งเป็นการปรับปรุงพัฒนาความถูกต้องของค่าระดับน้ำทำนายในหนังสือมาตราชั้น สามารถทำให้ค่าระดับน้ำทำนายของทั้ง 3 สถานีวัดระดับน้ำ มีความถูกต้องใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้นซึ่งจะเป็นประโยชน์กับเรือของกองทัพเรือในการวางแผนใช้ท่าเทียบเรือและการปฏิบัติการทางเรือ รวมทั้งเป็นการประหยัดงบประมาณในการจัดหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำมาใช้ในการทำนายน้ำให้ครอบคลุมทั้งจากอิทธิพลทางดาราศาสตร์และจากสภาพอุตุนิยมวิทยา

6.1 อภิปรายผล

6.1.1 ความถี่ของข้อมูลสภาพอุตุนิยมวิทยามีค่าน้อยกว่าความถี่ของข้อมูลระดับน้ำ และตำบลที่ของจุดตรวจวัดข้อมูลสภาพอุตุนิยมวิทยาไม่ตรงกับตำบลที่ของจุดตรวจวัดข้อมูลระดับน้ำจริง ทำให้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลสภาพอุตุนิยมวิทยาและข้อมูลระดับน้ำมีข้อจำกัด

6.1.2 การกำหนดช่วงเวลาของค่าตัวเกณฑ์การปรับแก้มีความแตกต่างกับวิธีการของสำนักงานอุทกศาสตร์ ประเทศสหราชอาณาจักร ที่แสดงในหนังสือมาตราชั้น Admiralty ซึ่งกำหนดค่าแก้เป็นรายเดือนเนื่องจากผู้วิจัยได้พิจารณาความต่อเนื่องของค่าตัวเกณฑ์ในช่วงระหว่างการเปลี่ยนเดือนจะส่งผลให้ค่ามีความแตกต่างกันมาก ดังนั้นจึงได้กำหนดช่วงเวลาของค่าตัวเกณฑ์การปรับแก้เป็นช่วงน้ำเกิด น้ำตาย และช่วงระหว่างน้ำเกิดกับน้ำตาย ซึ่งมีความต่อเนื่องของค่าตัวเกณฑ์มากกว่า

6.1.3 ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายที่ได้มาไว้เพื่อเปรียบเทียบกับระดับน้ำจริง เฉพาะที่สถานีวัดระดับน้ำอ่าวทับละมุ ของปี พ.ศ.2557 เท่านั้น ซึ่งไม่สามารถสรุปผลการนำตัวเกณฑ์ไปใช้ในภาพรวมได้

6.2 ข้อเสนอแนะในการนำไปใช้

6.2.1 จากผลการวิจัยในการจัดทำตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายของผู้วิจัยเชื่อว่าเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับข้อมูลระดับน้ำทำนายในปัจจุบันได้ และเป็นแนวทางที่จะสามารถนำไปปฏิบัติให้เกิดประโยชน์ได้จริง

6.2.2 การจัดทำตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายในครั้งนี้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการนำตัวเกณฑ์ที่ได้จากการศึกษามาใช้ประโยชน์จริงแล้วเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นให้ครบทั้ง 3 สถานีวัดระดับน้ำ คือ สถานีวัดระดับน้ำสงขลา สถานีวัดระดับน้ำทับอ่าวสตึก และสถานีวัดระดับน้ำอ่าวทับละมุ และครอบคลุมกับข้อมูลระดับน้ำที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ตั้งแต่ พ.ศ.2540 – 2559 เพื่อให้การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายมีความถูกต้องมากที่สุด

6.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

6.3.1 ดำเนินการจัดทำตัวเกณฑ์การปรับแก้ค่าระดับน้ำทำนายของสถานีวัดระดับน้ำอื่นๆ ที่ยังไม่ได้ศึกษา

6.3.2 ควรทำการศึกษาวิจัยโดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบอื่นมาเปรียบเทียบ เช่น การวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ (Spectrum Analysis) เพื่อให้ผลที่ได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับอุดหนุนทุนการวิจัย จาก สำนักงานวิจัยและพัฒนาการทางทหารกองทัพเรือ (สวพ.ทร.) ในโครงการการพัฒนางานประจำสำนักงานวิจัย (Routine to Research หรือ R to R) ประจำปีงบประมาณ 2560

เอกสารอ้างอิง

- [1] Doodson AT, Warburg HD. Admiralty Manual of Tides. Taunton: United Kingdom Hydrographic Office; 1966.
- [2] Simon B, Gonella J, Manley D, Shipman S. Coastal Tides. Monaco: Institut Océanographique de Paris; 2013.
- [3] กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ. ระดับน้ำในน่านน้ำไทย พ.ศ.2550. กรุงเทพฯ: กองสร้างแผนที่ กรมอุทกศาสตร์; 2550.
- [4] กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ. มาตราส่วนน้ำในน่านน้ำไทย พ.ศ.2559. กรุงเทพฯ: กองสร้างแผนที่ กรมอุทกศาสตร์; 2559.
- [5] Australian Hydrographic office [Internet]. New South Wales: Australian Hydrographic office; 2021. Australian National Tide Tables; 2007 [cited 2023 Jan 28]; [about 2 screens]. Available from: <https://www.hydro.gov.au/prodserv/publications/anttt.htm>
- [6] Admiralty Tide Tables: South China Sea and Indonesia. Taunton: United Kingdom Hydrographic Office; 2017.
- [7] Pugh D. Changing Sea Levels : Effects of Tides, Weather and Climate. Cambridge: Cambridge University Press; 2004.

การจัดสรรทรัพยากรในการวางกำลังสำหรับภารกิจค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัย ครอบคลุมพื้นที่ทางบกของประเทศไทย

Allocating Resources to Deploy Forces for Search and Rescue Missions Covering Land Areas of Thailand

ภาณุพงษ์ กลิ่นเฟื่อง¹ เทียนสิริ เหลืองวิไล² เกียรติกุลไชย จิตต์เอื้อ³ และ ปญญารักษ์ โกศลวัฒน์⁴
Phanuphong Klinfueang¹ Thiansiri Luangwilai² Kiatkulchai Jitt-Aer³ and Panyarak Kosanwat⁴

Received: January 26, 2023

Revised: March 5, 2023

Accepted: March 8, 2023

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้ คือการวิเคราะห์ขีดความสามารถในการครอบคลุมพื้นที่และการบริหารจัดการอากาศยานของกองทัพอากาศไทย ในการตอบสนองต่อภารกิจค้นหาและช่วยชีวิต โดยการวิเคราะห์ขีดความสามารถนี้ ได้ดำเนินการเขียนโปรแกรมทำแบบจำลองการทำงานแต่ละช่วงเวลาของอากาศยานใน MATLAB โดยใช้อัลกอริทึมของกฎเป็นพื้นฐานในการตัดสินใจภารกิจแต่ละช่วงเวลา

แบบจำลองนั้นจะเริ่มดำเนินการจากการพิจารณาค่าตัวแปรต่าง ๆ สำหรับสถานการณ์ตามคู่มือการค้นหาและช่วยชีวิตขององค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศและกฎระเบียบของกองทัพอากาศไทย โดยอากาศยาน

¹นักศึกษา สำนักบัณฑิต โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Student, Academic Faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Email: Phanuphong_k@rtaf.mi.th

²อาจารย์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Lecturer, Academic Faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Email: Thiansiri.L@gmail.com

³อาจารย์ สำนักบัณฑิต โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Lecturer, Graduation Faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Email: Kiatkulchai@rtaf.mi.th

⁴อาจารย์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Lecturer, Academic Faculty Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Email: Panyarak@rtaf.mi.th

ที่สูญหาย จะสมมติให้เป็นอากาศยานขนาดเล็กและมีความน่าจะเป็นที่วัตถุที่ต้องการค้นหาอยู่ในบริเวณนั้น (Probability of Containment (POC)) เป็นแผนที่ความน่าจะเป็นแบบจุด (Point Datum) สำหรับทุกการจำลอง ส่วนอากาศยานที่พิจารณาใช้ในการทำภารกิจมี 4 ประเภท คือ C130H, SAAB 340, EC725 และ BELL 412EP ตามที่กองทัพอากาศมีในปัจจุบัน ชีตความสามารถของอากาศยานแต่ละแบบนี้ จะพิจารณาจากระยะในการปฏิบัติการกิจและความสามารถในการค้นหาและช่วยชีวิตเมื่อเทียบกับเวลา ส่วนความสามารถในการครอบคลุมพื้นที่จะพิจารณาจากความสามารถในการกวาดพื้นที่และครอบคลุมแผนที่ความน่าจะเป็นที่วัตถุที่ต้องการค้นหาอยู่ในบริเวณนั้น (POC) จากนั้นชีตความสามารถเหล่านี้ จะถูกดำเนินการต่อในกระบวนการวิเคราะห์การบริหาร จัดสรรอากาศยานไปตามกองบินต่าง ๆ เพื่อตอบสนองในการครอบคลุมพื้นที่ทางบกมากที่สุดและตอบ วัตถุประสงค์ของกองทัพอากาศ

งานวิจัยชิ้นนี้ถือว่าเป็นก้าวแรกที่สำคัญในการวิเคราะห์ชีตความสามารถของกองทัพอากาศในการ ตอบสนองเร็วต่อภารกิจค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัย อีกทั้งยังสร้างความกระจำในการบริหาร จัดสรรทรัพยากร และหมุนเวียนอากาศยานไปยังกองบินต่าง ๆ ของกองทัพอากาศ

คำสำคัญ: ค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัย, แผนที่ความน่าจะเป็น, ความน่าจะเป็นที่วัตถุที่ต้องการ ค้นหาอยู่ในบริเวณนั้น

Abstract

The objective of this research is to scrutinize the coverage area of each aircraft type and aircraft allocation of The Royal Thai Air Force for responding search and rescue missions. The simulation built by MATLAB is the tool for analysis. For gathering data, the rule-based algorithm simulates flow of the aircraft task at each time step.

The simulation begins by evaluating the parameters of the simulation scenario according to the Search and Rescue manual of the International Civil Aviation Organization and the Royal Thai Air Force regulations. Assumed conditions for the lost aircraft, weight would be lightweight and size would be as small as point for all cases. The allocation area for searching is as Probability of Containment (POC). The aircrafts regarding search missions are C130H, SAAB 340, EC725, and BELL 412EP. Search and rescue capability of aircraft would be analyzed by distance, area and time relatively. The coverage area capability of aircraft would be the comparison between area covered by aircraft and a probability of containment (POC). Classifications of aircraft search capability would base on analyzed and scrutinized results. Regarding search capability, allocation and deployment aircrafts in suitable air force bases would cover land area and better suit the Royal Thai Air Force's purpose.

This research is the first crucial step for understanding Air Force capability in quick response to search and rescue missions. It also provides a crystal idea about available aircraft management among air force bases.

Keywords: Search and Rescue (SAR), Probability Map, Probability of Containment (POC)

1. บทนำ

การค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัยเป็นการดำเนินการเพื่อให้ความช่วยเหลือแก่บุคคลและทรัพย์สินที่กำลังตกอยู่ในอันตราย และยังเป็นการสร้างความมั่นใจกับผู้ประกอบการเดินอากาศที่ให้บริการขนส่งผู้โดยสารทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ หรือบริการขนส่งสินค้า รวมไปถึงอากาศยานส่วนบุคคลที่ทำการบินในอาณาเขตประเทศไทย ว่าหากเกิดกรณีอากาศยานประสบภัย หน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนที่เกี่ยวข้องจะดำเนินการให้ช่วยเหลืออย่างรวดเร็วและบูรณาการร่วมกันในการปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยประเทศไทยได้จัดตั้งศูนย์ประสานงานการค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัย (Aeronautical Rescue Coordination Center หรือ ARCC) ขึ้นกับกระทรวงคมนาคม เป็นผู้รับผิดชอบงานด้านการค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัยของประเทศไทย สามารถรับแจ้งเหตุได้ตลอด 24 ชั่วโมง และยังสามารถมอบหมายหน่วยงานภาครัฐและเอกชนที่มีบุคลากรและอุปกรณ์ เป็นหน่วยค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัย (Search and Rescue Unit หรือ SRU) เพื่อทำการค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัยต่อไป

ตามแผนการค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัยแห่งชาติ [1] กำหนดให้ศูนย์ประสานงานค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัย จะต้องพิจารณาแจ้งเหตุให้หน่วยค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัย ซึ่งอยู่ใกล้จุดที่เกิดเหตุประสบภัยมากที่สุด รวมทั้งพิจารณาความพร้อมในการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่และเครื่องบินที่ตามลำดับ ให้เป็นผู้ทำการค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัย ทั้งนี้เพื่อจะได้ปฏิบัติการได้ทันที ซึ่งกองทัพอากาศเป็นหนึ่งในหน่วยค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัยของประเทศไทย [2] ที่มีขีดความสามารถด้านการค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัย โดยกองทัพอากาศสามารถพิจารณาใช้อากาศยานและบุคลากรที่สังกัดอยู่ตามสนามบินต่าง ๆ เพื่อสนับสนุนงานด้านการค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัย

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อวิเคราะห์ขีดความสามารถในด้านระยะปฏิบัติการของอากาศยานกองทัพอากาศ ในการบินค้นหาอากาศยานขนาดเล็กครอบคลุมพื้นที่ทางบกเทียบกับเวลาในการปฏิบัติการกิจ

2.2 การวิเคราะห์ขีดความสามารถจัดสรรทรัพยากรในการวางกำลังตามสนามบินต่าง ๆ ของอากาศยานกองทัพอากาศ ให้ครอบคลุมพื้นที่ทางบกของประเทศไทย

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัยของกองทัพอากาศนั้น จะต้องดำเนินการตามมาตรฐานและกฎระเบียบขององค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (International Civil Aviation Organization) [5] และตามระเบียบกองทัพอากาศว่าด้วยการปฏิบัติการบิน พ.ศ.2561 ของกองทัพอากาศ [2] โดยการค้นหาและช่วยชีวิตประกอบไปด้วยงานสองส่วนหลัก ๆ ก็คือ การค้นหาและการช่วยเหลือ โดยการค้นหาจะเริ่มจากการสืบสวนอย่างจริงจังจากเบาะแสที่มีอยู่ทั้งหมด แล้วนำตำแหน่งที่คาดว่าจะจะเป็นตำแหน่งของผู้ประสบภัยกับปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมาคำนวณ จากนั้นนำไปสร้างเป็นแผนที่ความน่าจะเป็น (Probability Map) เพื่อนำไปวางแผนการบินค้นหาอากาศยานประสบภัยต่อไป สำหรับโอกาสในการรอดชีวิตของผู้ประสบภัยที่ได้รับบาดเจ็บจะลดลงมากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ในช่วง 24 ชั่วโมงแรก ในขณะที่โอกาสในการรอดชีวิตของผู้ประสบภัยที่ไม่ได้รับบาดเจ็บจะลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากผ่าน 3 วันแรกไปแล้ว [6] จะเห็นได้ว่าการค้นหาและช่วยเหลือเมื่อใช้เวลาเพิ่มมากขึ้นไปเท่าใดโอกาสในการรอดชีวิตของผู้ประสบภัยจะลดน้อยลงตามไปเท่านั้น

โดยกฎระเบียบขององค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (International Civil Aviation Organization) [5] นั้นจะมีการอัปเดตคู่มือการปฏิบัติการกิจ ซึ่งประกอบไปด้วย แนวทางการปฏิบัติ การวิเคราะห์ การคำนวณ การวางแผน และการประเมิน การค้นหาและช่วยชีวิต ไว้อย่างละเอียด โดยในงานวิจัยชิ้นนี้จะดำเนินการตามคู่มือปี พ.ศ.2561 [2] ที่กองทัพอากาศใช้ในปัจจุบัน

Cooper et al. (2003) [7] ได้อธิบายเพิ่มเติมถึงรายละเอียดของขั้นตอนการค้นหาและช่วยชีวิต และทฤษฎี แนวคิด ที่นำมาใช้ในการสร้างแผนการค้นหาและช่วยชีวิตทางบกไว้อย่างละเอียด โดย Robe & Frost (2002) [8] ได้อธิบายเพิ่มเติมในส่วนของการคำนวณวาระยะกวาดและการมองเห็นของอากาศยาน (Sweep Width) ในแต่ละแนวบินนั้น คำนวณอย่างไรและถ้าจะให้มีประสิทธิภาพจะได้ระยะกว้างเท่าใด

Čokorilo (2013) [9] และ Statheropoulos et al. (2015) [10] ได้อธิบายถึงปัจจัยเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของการปฏิบัติการกักกันและช่วยชีวิต โดยให้แนวทางในการปฏิบัติการให้มีประสิทธิภาพและปลอดภัย

Agbisssoh OTOTE et al. (2019) [11] ได้ดำเนินการวิจัยโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรแต่ละตัว จากนั้นได้ดำเนินการแก้สมการเหล่านั้นด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยได้นำเสนอแนวคิดและอัลกอริทึมแบบใหม่ในการวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาความน่าจะเป็นแบบต่าง ๆ ที่มีผลต่อการกักกันและช่วยชีวิต เช่น ความน่าจะเป็นที่จะมีอากาศยานอยู่ในแต่ละพื้นที่ของการค้นหา (Probability of Containment (POC)), ความน่าจะเป็นของการที่จะค้นหาพบอากาศยาน (Probability of Detection (POD)) และค่าความน่าจะเป็นในการประสบความสำเร็จการกักกันและช่วยชีวิต (Probability of Success (POS)) ซึ่งค่าความน่าจะเป็นเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อตัดสินใจในการวางแผนการค้นหาและช่วยชีวิต

Karatas et al. (2017) [12] ได้ทำการประยุกต์ใช้กระบวนการเชิงเส้นแบบจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming) และการจำลอง (Simulation) มาวิเคราะห์สถานการณ์การกักกันและช่วยชีวิต ในหลาย ๆ รูปแบบ จากนั้นวิเคราะห์หาแนวทางที่ดีที่สุด โดยกระบวนการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์สถานการณ์ในปัจจุบันนี้ได้รับความนิยมอย่างมาก เพราะมีต้นทุนที่ถูก สามารถทดสอบความเป็นไปได้ ได้หลากหลายรูปแบบ โดยไม่มีความเสี่ยง ทำให้ทราบผลหรือเหตุการณ์ที่มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้น

4. วิธีดำเนินการศึกษา

งานวิจัยชิ้นนี้จะดำเนินการสร้างแบบจำลอง (Simulation) และใช้อัลกอริทึมที่มีกฎเป็นพื้นฐาน (Rule Based Algorithm) [3] โดยกำหนดว่าเมื่อเกิดอุบัติเหตุทางอากาศขึ้นมาแล้ว สถานการณ์เป็นอย่างไร ค่าตัวแปรต่าง ๆ คืออะไร แล้วกระบวนการค้นหาและช่วยชีวิตแต่ละช่วงเวลาต้องทำอะไร มีข้อจำกัดใดบ้าง ตามกฎและมาตรฐานการปฏิบัติการ

แบบจำลองนี้จะถูกเขียนโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ขึ้นมาเอง โดยใช้ภาษา MATLAB [4] ซึ่งได้รับความนิยมอย่างสูงในทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ เพราะมีชุดคำสั่งข้อมูลที่ครบถ้วนและสามารถดำเนินการพัฒนาได้เร็วกว่าภาษา Python หรือภาษา C ในหลาย ๆ กรณี

จากนั้นแบบจำลองนี้ จะใช้ทดสอบความเป็นไปได้ในกรณีต่าง ๆ ซึ่งจะทำให้การจำลองการใช้อากาศยานกองทัพอากาศแบบต่าง ๆ ประกอบไปด้วย C-130H, SAAB 340B, EC725 และ BELL 412EP โดยมีรายละเอียดของกระบวนการวิจัยใน 2 ส่วน คือ 1) ขั้นตอนการค้นหาและช่วยชีวิต และ 2) ขั้นตอนการจำลองเหตุการณ์ค้นหาช่วยชีวิต

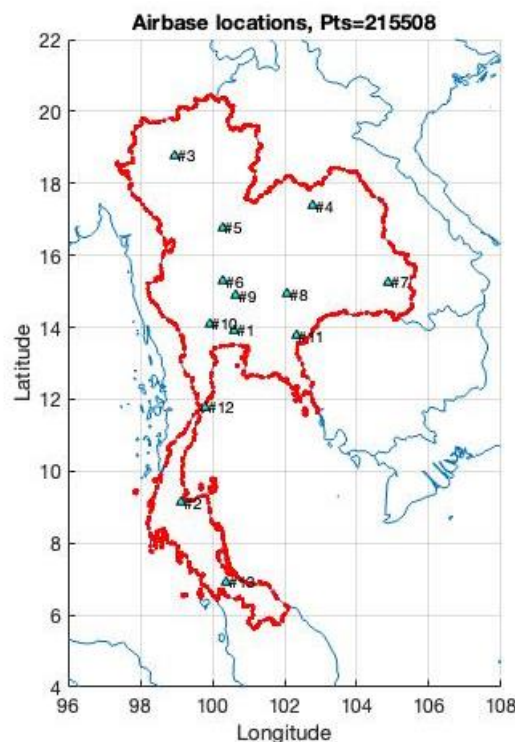
4.1 ขั้นตอนการค้นหาและช่วยชีวิต



รูปที่ 1 ขั้นตอนการปฏิบัติการกักกันช่วยชีวิต

ในกระบวนการค้นหาและช่วยชีวิตของกองทัพอากาศนั้น จะเริ่มต้นกระบวนการเมื่อได้รับแจ้งรายงานการเกิดอุบัติเหตุ รายละเอียดการเกิดเหตุ และตำแหน่งสุดท้ายของอากาศยานที่ประสบเหตุ จากนั้นในกระบวนการต่อไป คือการตรวจสอบอากาศยานที่สามารถใช้ได้และอยู่ในระยะปฏิบัติการจากที่เกิดอุบัติเหตุ ซึ่งกองทัพอากาศ มีเครื่องบินที่สามารถทำภารกิจค้นหาได้ 4 ชนิด คือ C-130H, SAAB 340B, EC725 และ BELL 412EP โดยจำนวนอากาศยานที่มีอยู่คือ C-130H จำนวน 1 ลำ, SAAB 340B จำนวน 1 ลำ, EC725 จำนวน 6 ลำ และ BELL 412EP จำนวน 3 ลำ ในบรรดาอากาศยานเหล่านี้ C-130H และ SAAB 340B เป็นอากาศยานปีกตรึงที่ต้องการใช้สนามบินในการขึ้นลง จึงไม่สามารถทำภารกิจในการช่วยเหลือนักบินที่ประสบอุบัติเหตุในภูมิประเทศได้ ดังนั้นภารกิจในการช่วยเหลือจึงสามารถทำได้เพียงแค่เฮลิคอปเตอร์แบบ EC725 และ BELL 412EP เท่านั้น

ซึ่งอากาศยานชนิด C-130H และ SAAB 340B จำเป็นที่จะต้องประจำการอยู่ที่ สนามบินดอนเมืองและสนามบินสุราษฎร์ธานีตามลำดับเท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านจำนวนอากาศยาน ภารกิจที่ได้รับมอบหมาย และการส่งกำลังบำรุง ส่วนอากาศยานชนิดปีกหมุน EC725 และ BELL 412EP นั้นสามารถผลิตเปลี่ยนไปประจำการได้ทุกสนามบิน โดยกองทัพอากาศจำเป็นต้องพิจารณาการจัดวางกำลังแต่ละช่วงให้เหมาะสมและครอบคลุมพื้นที่ทางบกของประเทศไทยมากที่สุด โดยสนามบินทั้ง 13 แห่ง คือ 1) ดอนเมือง 2) สุราษฎร์ธานี 3) เชียงใหม่ 4) อุตรธานี 5) พิษณุโลก 6) ตากสิน 7) อุบลราชธานี 8) โคราซ 9) โคกกระเทียม 10) กำแพงแสน 11) วัฒนานคร 12) ประจวบคีรีขันธ์ 13) หาดใหญ่ ตามรูปที่ 2



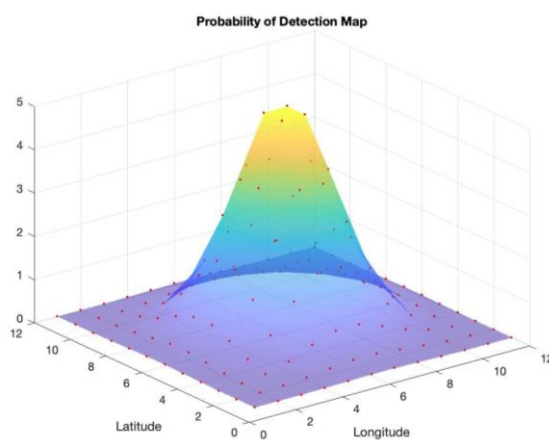
รูปที่ 2 ตำแหน่งที่ตั้งของสนามบินที่มีหน่วยของกองทัพอากาศตั้งอยู่

โดยสมรรถนะของอากาศยานทั้ง 4 แบบนั้นแตกต่างกันไป ซึ่งตารางที่ 1 แสดงขีดความสามารถในการบินเพื่อปฏิบัติการกิจ ประกอบไปด้วย 1) ความเร็วในการบินเดินทาง 2) ความเร็วในการบินค้นหา 3) ระยะเวลาในการบินปฏิบัติการกิจได้ และ 4) ระยะเวลาที่ใช้ในการเติมเชื้อเพลิงและเตรียมความพร้อมในการปฏิบัติการในรอบต่อไป ในตารางนี้ระยะเวลา (Endurance) นั้นจะถูกลดลงไป 45 นาที สำหรับอากาศยานปีกตรึง และ 30 นาที สำหรับอากาศยานปีกหมุน ตามระเบียบกองทัพอากาศว่าด้วยการปฏิบัติการบิน [2] ที่ระบุไว้ว่า อากาศยานต้องมีเชื้อเพลิงสำรอง (Fuel Reserve) เพื่อป้องกันกรณีฉุกเฉิน

ตารางที่ 1 สมรรถนะของอากาศยานหน่วยบินที่นำมาใช้ในการฝึกค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัย

A/C Type	Airspeed (Knots)		Endurance (ชั่วโมง)	Turnaround Time (ชั่วโมง)
	Navigation	Search		
EC725	150	90	3.0	0.58
BELL 412EP	120	80	1.5	0.5
C-130H	290	120	6.75	0.66
SAAB 340B	240	120	3.25	0.25

ในขั้นตอนต่อไป คือการคำนวณพื้นที่ ที่ต้องทำการบินเพื่อการค้นหาและช่วยชีวิต โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ตั้งสมมติฐานการของการเกิดอุบัติเหตุเป็นชนิดแบบจุด (Datum Point) หมายความว่า ทราบพิกัดสุดท้ายใกล้กับเวลาเกิดอุบัติเหตุ [5, 11] ซึ่งอากาศยานที่ประสบอุบัติเหตุของกองทัพอากาศส่วนใหญ่จะเป็นในรูปแบบนี้ เพราะอากาศยานที่ทำการฝึกจะมีการติดตามตำแหน่งตลอดเวลา ทำให้ลักษณะความเป็นไปได้ของตำแหน่งอากาศยานบนพื้นมีความน่าจะเป็นรูประฆังแบบวงกลมมาตรฐาน (Standard Normal Distributions (Bell Curve)) [5] ในรูปที่ 3(ก) โดยองค์กรการบินพลเรือนระหว่างประเทศได้คำนวณและให้ใช้มาตรฐานการตีตารางความน่าจะเป็นแบบ 12x12 โดยมีเปอร์เซ็นต์ความน่าจะเป็น (Probability of Containment) [5] ตามตารางที่ 3(ข)



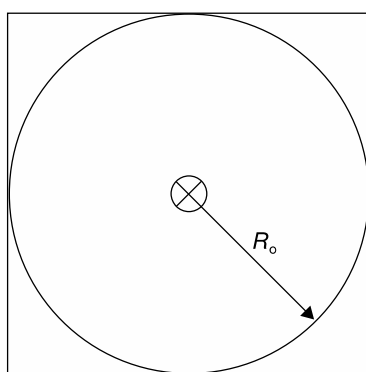
(ก)

0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.02%	0.03%	0.03%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%
0.00%	0.01%	0.02%	0.06%	0.12%	0.17%	0.17%	0.12%	0.06%	0.02%	0.01%	0.00%
0.00%	0.02%	0.09%	0.24%	0.47%	0.65%	0.65%	0.47%	0.24%	0.09%	0.02%	0.00%
0.01%	0.06%	0.24%	0.65%	1.28%	1.79%	1.79%	1.28%	0.65%	0.24%	0.06%	0.01%
0.02%	0.12%	0.47%	1.28%	2.51%	3.52%	3.52%	2.51%	1.28%	0.47%	0.12%	0.02%
0.03%	0.17%	0.65%	1.79%	3.52%	4.93%	4.93%	3.52%	1.79%	0.65%	0.17%	0.03%
0.03%	0.17%	0.65%	1.79%	3.52%	4.93%	4.93%	3.52%	1.79%	0.65%	0.17%	0.03%
0.02%	0.12%	0.47%	1.28%	2.51%	3.52%	3.52%	2.51%	1.28%	0.47%	0.12%	0.02%
0.01%	0.06%	0.24%	0.65%	1.28%	1.79%	1.79%	1.28%	0.65%	0.24%	0.06%	0.01%
0.00%	0.02%	0.09%	0.24%	0.47%	0.65%	0.65%	0.47%	0.24%	0.09%	0.02%	0.00%
0.00%	0.01%	0.02%	0.06%	0.12%	0.17%	0.17%	0.12%	0.06%	0.02%	0.01%	0.00%
0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.02%	0.03%	0.03%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%

J
(12 × 12)

(ข)

รูปที่ 3 การกระจายตัวของค่า POC บนแผนที่ความน่าจะเป็นแบบจุดและแผนที่ความน่าจะเป็นรูปแบบ 12 × 12 [5]



รูปที่ 4 รัศมีของพื้นที่ค้นหาและช่วงชีวิต ที่ยืนยันว่าจะมีอากาศยานที่ประสบอุบัติเหตุ
อยู่ในพื้นที่นี้อย่างแน่นอน [5]

จากนิตราความน่าจะเป็นในรูปที่ 3(ข) นั้น จะถูกไปวางทับบนลงแผนที่จริง ซึ่งขนาดของแผนที่จริงนั้น จะต้องคำนวณจากตัวแปรของอากาศยานที่ประสบอุบัติเหตุและอากาศยานที่ทำการค้นหา โดยจะดำเนินการคำนวณรัศมีของพื้นที่ค้นหาและช่วงชีวิต (R_0) ในรูปที่ 4 เสียก่อน ซึ่งจากมาตรฐานการค้นหาและช่วยชีวิตระยะของ R_0 [5] ที่เป็นการยืนยันว่าจะมีอากาศยานที่ประสบอุบัติเหตุอยู่ในพื้นที่ค้นหาอย่างแน่นอนคือระยะ R_0 ที่มีความยาวเท่ากับผลรวมของความเป็นได้ที่จะเกิดความผิดพลาดของตำแหน่งพื้นที่ทางบก (E) หรือ $R_0 = E$ นั่นเอง โดยค่าตัวแปร E นี้ มีค่าเท่ากับ

$$E = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

โดยที่ X คือ ความผิดพลาดของการระบุตำแหน่งเริ่มต้นของอากาศยานที่ต้องการค้นหา และ Y คือ ความผิดพลาดของการระบุตำแหน่งอากาศยานที่ใช้ในการค้นหา

จากตารางในคู่มือการค้นหาและช่วยชีวิตขององค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ [5] กำหนดค่าตัวแปรไว้ว่า ค่าความผิดพลาดของการระบุตำแหน่งเริ่มต้นของอากาศยานที่ต้องการค้นหา $X=15$ สำหรับกรณีอุบัติเหตุอากาศยานขนาดเล็กแบบหนึ่งเครื่องยนต์เป็นอากาศยานที่ต้องการค้นหา และความผิดพลาดมากที่สุดเนื่องจากอากาศที่ใช้ในการค้นหาเป็นอากาศยานแบบสองเครื่องยนต์ $Y=10$

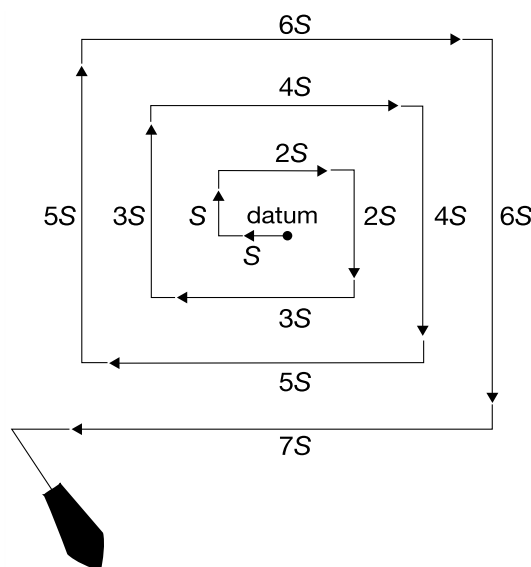
จากค่าตัวแปรเหล่านี้ทำให้พื้นที่สี่เหลี่ยมที่จำเป็นต้องดำเนินการค้นหาและช่วยชีวิตตามคู่มือการค้นหาและช่วยชีวิตขององค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ [5] มีขนาดดังนี้

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ค้นหาและช่วยชีวิต} &= (2R)^2 = 1,300 \text{ ตร.ไมล์ทะเล} \\ \text{เมื่อ } R &= E, X = 15 \text{ และ } Y = 10 \end{aligned}$$

จากตารางคู่มือการค้นหาและช่วยชีวิตขององค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ [5] และงานวิจัยของ Robe & Frost (2002) [8] กำหนดให้ในการค้นหาอากาศยานขนาดเล็กน้ำหนักน้อยกว่า 5,700 กิโลกรัม โดยมีทัศนวิสัย

มากกว่า 5 ไมล์ทะเล และใช้ความสูงในการบินค้นหาอยู่ที่ 1,000 ฟุต จะได้ ระยะเวลาของการกวาด (Sweep Width) เท่ากับ 1.5 ไมล์ทะเล

เมื่อทราบรายละเอียดของอุบัติเหตุ อากาศยานที่มีในการทำภารกิจ และค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการปฏิบัติการแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือการนำข้อมูลเหล่านั้นมาวางแผนเส้นทางการบิน โดยตามมาตรฐานการค้นหาและช่วยชีวิต [3] สำหรับเหตุการณ์ที่ทราบตำแหน่งสุดท้ายของอากาศยานอย่างแน่นอน (Pinpoint) รูปแบบการบินค้นหาที่เหมาะสมกับอากาศยานชนิดปีกหมุนมากที่สุด คือ วงจรการค้นหารูปแบบสี่เหลี่ยมกันหอย (Expanding Square Search (SS)) [5, 11] และรูปแบบการบินแบบนี้ก็ยังสามารถใช้ได้ด้วยกับอากาศยานปีกตรึง โดยจุดเริ่มต้นของวงจรการค้นหาก็เริ่มที่ตำแหน่งอ้างอิงหรือตำแหน่งที่มีความน่าจะเป็นที่จะมีอากาศยานอยู่ในแต่ละพื้นที่ของการค้นหา (POC) มากที่สุดก่อน และขยายออกจากจุดศูนย์กลางในลักษณะรูปสี่เหลี่ยมกันหอย ตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 วงจรการค้นหารูปแบบสี่เหลี่ยมกันหอย (Expanding Square Search (SS)) [5, 11]

4.2 ขั้นตอนการจำลองเหตุการณ์ค้นหาช่วยชีวิต



รูปที่ 6 ขั้นตอนเขียนแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ผล

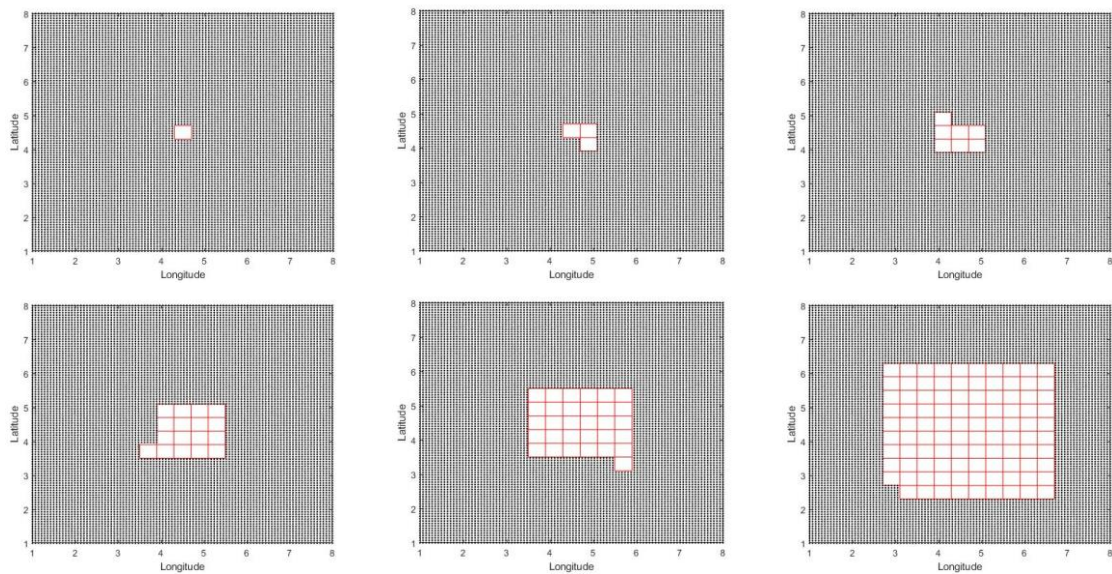
ขั้นตอนของกระบวนการจำลอง (Simulation) นั้น จะเริ่มจากนำเอาข้อมูลของสถานการณ์ค้นหาช่วยชีวิตที่วิเคราะห์ไว้แล้วจากหัวข้อที่แล้ว โดยมีรายละเอียดดังนี้

- การค้นหาเครื่องบินขนาดน้ำหนักน้อยกว่า 5,700 กิโลกรัม ประสบอุบัติเหตุ โดยทราบตำแหน่งก่อนเกิดเหตุชัดเจน โดยมี POC ตามรูปที่ 3
- ทดสอบขีดความสามารถในการค้นหาด้วยเครื่อง 4 แบบ คือ C-130H, SAAB 340B, EC725 และ BELL 412EP
- ทดสอบขีดความสามารถในการช่วยชีวิตด้วยเครื่อง 2 แบบ คือ EC725 และ BELL 412EP
- ข้อจำกัดของอากาศยานทั้ง 4 ตาม ตารางที่ 1 และระยะกว้างของการกวาด (Sweep Width) เท่ากับ 1.5 ไมล์ทะเล

จะใช้แนวคิดในการสร้างแบบจำลองเช่นเดียวกับการงานวิจัยของ Agbissah OTOTE et al. (2019) [11] และ Karatas et al. (2017) [12] โดยเป็นการใช้อัลกอริทึมที่มีกฎเป็นพื้นฐาน (Rule Based Algorithm) [3] โดยมาดำเนินการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา MATLAB [4] ว่าแต่ละช่วงเวลาอากาศยานทำอะไร และได้พื้นที่ของ POC สะสมไปเท่าใด

ในการจำลองการปฏิบัติการในการค้นหาอากาศยานประสบภัยนั้น จะจำลองตั้งแต่อากาศยานบินจากสนามบินที่อากาศยานวางกำลัง ไปยังตำแหน่งอ้างอิงที่คาดว่าจะจะเป็นตำแหน่งตกของอากาศยาน จากนั้นจึงดำเนินการบินวนเพื่อค้นหาเป้าหมายของอากาศยานที่ประสบอุบัติเหตุ โดยใช้วงจรการค้นหารูปแบบสี่เหลี่ยมกันหอย (Expanding Square Search (SS)) [5, 11] ดังตัวอย่างในรูปที่ 5 และตัวอย่างผลที่ได้จากแบบจำลองในโปรแกรมที่เขียนขึ้นในรูปที่ 7 จากนั้นเมื่ออากาศยานทำการบินค้นหาจนครบระยะเวลาการบินค้นหาแล้ว จะทำการบินกลับสนามบินที่อากาศยานวางกำลังเพื่อเติมเชื้อเพลิง โดยเมื่อกลับมาสนามบินจะมีการลบเวลาในการเติมเชื้อเพลิงและเตรียมความพร้อมปฏิบัติงานรอบใหม่ (Turnaround Time) ออกจากระยะเวลาการบินค้นหา ในทุก ๆ ครั้ง จากนั้นกลับไปทำการบินค้นหาที่ตำแหน่งสุดท้ายก่อนกลับสนามบินต่อไป โดยทำเช่นนี้เรื่อยไปจนการบินค้นหาครอบคลุมพื้นที่ความน่าเป็นที่จะมีอากาศยานอยู่ในแต่ละพื้นที่ของการค้นหา (POC) ตามที่กำหนด

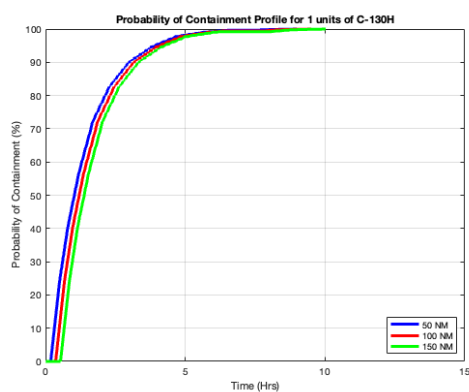
ในขั้นตอนการทดสอบด้วยแบบจำลองนี้ จะทำให้สามารถเก็บข้อมูลต่าง ๆ ว่า อากาศยานที่ดำเนินการค้นหาและช่วยชีวิตนั้น ได้ดำเนินการครอบคลุมพื้นที่ไปเท่าใดและได้ความน่าเป็นที่จะมีอากาศยานอยู่ในแต่ละพื้นที่ของการค้นหา (POC) ไปเท่าใดแล้ว ในแต่ละช่วงเวลา ทำให้สามารถนำค่าเหล่านี้ไปวิเคราะห์หาขีดความสามารถในการปฏิบัติการค้นหาและช่วยชีวิตของกองทัพอากาศและการครอบคลุมพื้นที่ได้ต่อไป



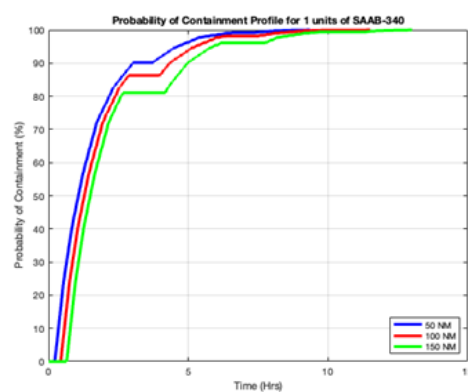
รูปที่ 7 ตัวอย่างการค้นหารูปแบบวงจรรูปแบบสี่เหลี่ยมกันหอย (Expanding Square Search (SS)) [5, 11] จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมา โดยเป็นพื้นที่ที่สำรวจไปแล้วในช่วงเวลา (Time Step) ที่ 1, 3, 7, 17, 31 และ 100 ตามลำดับ

5. ผลการศึกษา

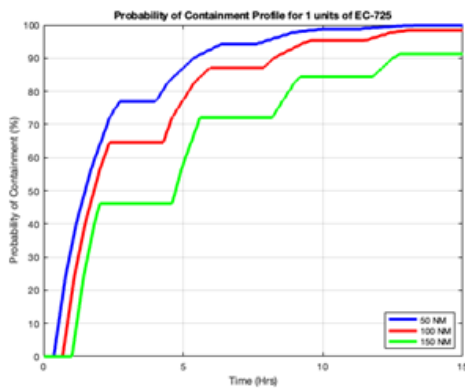
จากการจำลองการปฏิบัติการกิจค้นหาช่วยชีวิตที่กล่าวมานั้น จะสามารถทำให้ได้กราฟแสดงการเปรียบเทียบขีดความสามารถของอากาศยานแต่ละแบบในกองทัพอากาศที่สามารถทำการกิจค้นหาได้ โดยรูปที่ 8 แสดงค่าการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นที่จะมีอากาศยานอยู่ในแต่ละพื้นที่ของการค้นหา (Probability of Containment (POC)) แสดงในแกนแนวดิ่งและเวลาของการปฏิบัติการกิจเป็นแกนแนวนอน โดยแยกแสดงผลของอากาศยานทั้ง 4 แบบ ในรูปที่ 8(ก) C130H, 8(ข) SAAB-340, 8(ค) EC725 และ 8(ง) BELL 412EP โดยในทั้ง 4 รูปย่อยนี้ เส้นสีน้ำเงินแสดงผลการเปรียบเทียบ POC ต่อเวลา เมื่อจุดศูนย์กลางการค้นหาห่างจากฐานบิน 50 ไมล์ทะเล ส่วนเส้นสีแดง สำหรับ 100 ไมล์ทะเล และเส้นสีเขียวสำหรับ 150 ไมล์ทะเล



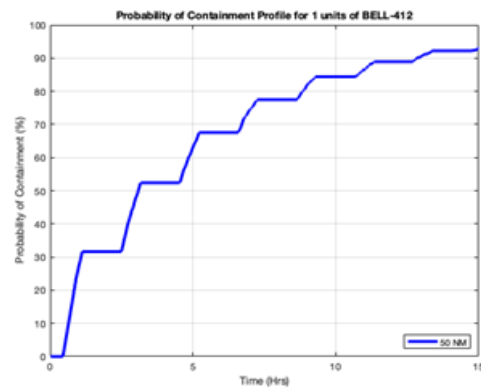
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 8 การเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นที่จะมีอากาศยานอยู่ในแต่ละพื้นที่ของการค้นหา (Probability of Containment (POC)) ที่อากาศยานแต่ละแบบครอบคลุมได้ในแต่ละช่วงเวลา ด้วยอากาศยานแบบ (ก) C130H, (ข) SAAB-340, (ค) EC725 และ (ง) BELL 412EP

จากรูปที่ 8(ก) จะเห็นได้ว่า C-130H นั้น ใช้เวลาในการปฏิบัติการกิจค้นหา ที่ระยะ 50, 100 และ 150 ไมล์ทะเลได้เร็วที่สุด เนื่องจากอากาศยานแบบ C-130H มีความเร็วในการบินเดินทางไปยังเป้าหมายที่ต้องการค้นหาได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งมีเชื้อเพลิงเพียงพอในการดำเนินการค้นหาได้อย่างเพียงพอ ไม่จำเป็นต้องกลับมาเติมเชื้อเพลิงจนเสร็จภารกิจ ส่วนในรูปที่ 8(ข) อากาศยานแบบ SAAB 340B สามารถบินครอบคลุมค่า POC ได้อย่างรวดเร็วทั้ง 3 ระยะปฏิบัติการจนได้ค่า POC อยู่ระหว่าง 80-90% จึงต้องกลับมาเติมเชื้อเพลิงแล้วกลับไปดำเนินการค้นหาต่อจนกระทั่งบินครอบคลุมค่า POC ได้เกิน 90% ทั้งสามระยะปฏิบัติการแล้วจึงต้องกลับมาเติมเชื้อเพลิงอีกครั้ง ส่วนในรูปที่ 8(ค) อากาศยานแบบ EC725 จำเป็นต้องกลับมาเติมเชื้อเพลิงบ่อยกว่าอากาศยานทั้งสองแบบที่กล่าวมาแล้ว แต่ถึงอย่างไรก็ตามก็สามารถปฏิบัติการกิจได้สำเร็จแม้จะใช้เวลาที่ยาวนานกว่า และในรูปที่ 8(ง) อากาศยานแบบ BELL 412EP ไม่สามารถปฏิบัติการกิจค้นหาช่วยชีวิตได้ที่ระยะ 100 และ 150 ไมล์ทะเล เพราะเมื่อบินไปแล้วจะไม่เหลือเชื้อเพลิงเพียงพอที่จะปฏิบัติการกิจจึงจำเป็นต้องบินกลับสนามบิน ดังนั้นจึงสามารถปฏิบัติการกิจได้เพียงแค่ระยะ 50 ไมล์ทะเลและจำเป็นต้องบินกลับมาเติมเชื้อเพลิงหลายครั้งจึงสามารถปฏิบัติการกิจได้สำเร็จ

ในขั้นตอนต่อไปเป็นการวิเคราะห์ขีดความสามารถในการครอบคลุมพื้นที่ของการปฏิบัติการกิจค้นหา และช่วยชีวิตจากทรัพยากรที่มีอยู่ โดยในขั้นตอนนี้จำเป็นต้องวิเคราะห์ว่าอากาศยานแต่ละแบบจะสามารถปฏิบัติการกิจได้ไกลแค่ไหนจากฐานบินที่ประจำการอยู่ในเวลาที่จำกัด จากข้อมูลของ Civil Aerospace Medical Institute [13] พบว่าหากผู้ประสบภัยได้รับการช่วยเหลือออกจากสภาพอากาศที่เลวร้ายหรืออันตรายได้ภายใน 3 ชั่วโมง จะมีโอกาสรอดชีวิตสูงหากได้รับการช่วยเหลือช้ากว่านี้โอกาสรอดชีวิตจะลดลงอย่างมาก และจากข้อมูลงานวิจัยของ Husain et al., (2020) [14] พบว่าผู้ประสบภัยที่ได้รับบาดเจ็บ (เมื่อค่า Injury Severity Score (ISS) มากกว่า 50) จะเสียชีวิตหากได้รับความช่วยเหลือช้ากว่า 6 ชั่วโมงหลังเกิดเหตุ ดังนั้น

ข้อจำกัดเวลาในการปฏิบัติการกิจที่ 3 ชั่วโมงและ 6 ชั่วโมง ถือว่าเป็นจุดสำคัญในการวิเคราะห์ขีดความสามารถในการปฏิบัติการกิจการบินค้นหาครอบคลุมพื้นที่ที่กำหนด

โดยการประเมินขีดความสามารถในครั้งนี้จะประเมินว่าในเวลาที่ยกาคือ 3 ชั่วโมงและ 6 ชั่วโมงนั้น ถ้าอากาศยานต้องการที่จะบินค้นหาครอบคลุม POC=79.86% จะสามารถปฏิบัติการกิจทางจากสนามบินที่ตั้งได้ไกลเพียงใด การกำหนดค่า POC=79.86% นี้เป็นไปตามมาตรฐานการปฏิบัติงานค้นหาและช่วยชีวิต ที่ต้องครอบคลุมพื้นที่ที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมสำหรับการค้นหาแบบสี่เหลี่ยมกันหอย (Expanding Square Search (SS)) [5, 11] ที่มีความน่าจะเป็นหนาแน่นในเวลาอันสั้น โดยจะครอบคลุมพื้นที่ที่มีค่าความน่าจะเป็นเกิน 0.5% ต่อ 9 ตารางกิโลเมตรให้ได้หมด ดังแสดงด้วยพื้นที่สีแดงในรูปที่ 9 โดยพื้นที่นอกตารางนี้โอกาสที่อากาศยานอยู่ในแต่ละช่องของตารางความน่าจะเป็นนั้นถือว่าน้อยมาก โดยเป็นไปตามหลักปฏิบัติของกองทัพอากาศ [2]

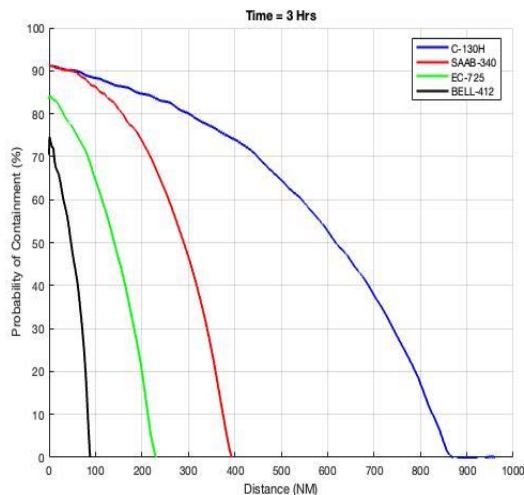
0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.02%	0.03%	0.03%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%
0.00%	0.01%	0.02%	0.06%	0.12%	0.17%	0.17%	0.12%	0.06%	0.02%	0.01%	0.00%
0.00%	0.02%	0.09%	0.24%	0.47%	0.65%	0.65%	0.47%	0.24%	0.09%	0.02%	0.00%
0.01%	0.06%	0.24%	0.65%	1.28%	1.79%	1.79%	1.28%	0.65%	0.24%	0.06%	0.01%
0.02%	0.12%	0.47%	1.28%	2.51%	3.52%	3.52%	2.51%	1.28%	0.47%	0.12%	0.02%
0.03%	0.17%	0.65%	1.79%	3.52%	4.93%	4.93%	3.52%	1.79%	0.65%	0.17%	0.03%
0.03%	0.17%	0.65%	1.79%	3.52%	4.93%	4.93%	3.52%	1.79%	0.65%	0.17%	0.03%
0.02%	0.12%	0.47%	1.28%	2.51%	3.52%	3.52%	2.51%	1.28%	0.47%	0.12%	0.02%
0.01%	0.06%	0.24%	0.65%	1.28%	1.79%	1.79%	1.28%	0.65%	0.24%	0.06%	0.01%
0.00%	0.02%	0.09%	0.24%	0.47%	0.65%	0.65%	0.47%	0.24%	0.09%	0.02%	0.00%
0.00%	0.01%	0.02%	0.06%	0.12%	0.17%	0.17%	0.12%	0.06%	0.02%	0.01%	0.00%
0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.02%	0.03%	0.03%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%

J
(12 × 12)

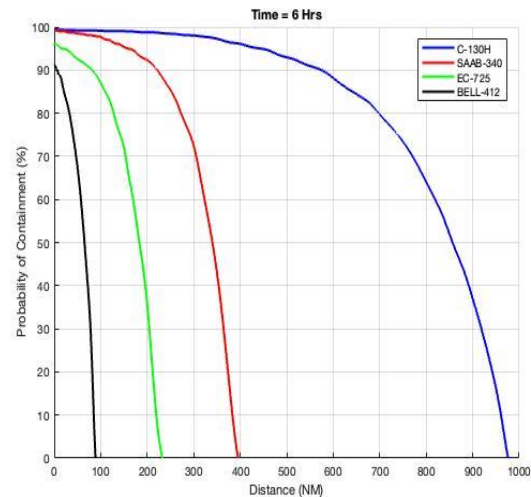
รูปที่ 9 พื้นที่สี่เหลี่ยมสีแดงแสดงค่าความน่าจะเป็นที่จะมีอากาศยานอยู่ในแต่ละพื้นที่ของการค้นหา (Probability of Containment (POC)) หนาแน่นเกิน 0.5% ต่อ 9 ตารางกิโลเมตร บนแผนที่ความน่าจะเป็นแบบจตุรรูปแบบ 12 × 12 [5]

ในรูปที่ 10 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่า POC สะสมที่ได้จากการปฏิบัติการกิจในการค้นหาอากาศยานประสบภัยของอากาศยานทั้ง 4 แบบต่อระยะทางระหว่างตำแหน่งที่อากาศยานวางกำลังถึงตำแหน่งอ้างอิง โดยรูปที่ 10(ก) และ รูปที่ 10(ข) เป็นผลลัพธ์ที่ได้เมื่อจำกัดเวลาปฏิบัติการไว้ที่ 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมงตามลำดับ จากผลการดำเนินการจำลองที่ได้ผลลัพธ์ตามรูปที่ 10 หากต้องการให้ได้ค่า POC อย่างน้อย 79.86% หมายความว่า

ถ้ามีเวลาปฏิบัติการกิจ 3 ชั่วโมง อากาศยานชนิด C-130H, SAAB 340B และ EC725 จะสามารถปฏิบัติการกิจได้ไกลสุดที่ระยะ 303.6, 159.3 และ 31.6 ไมล์ทะเลตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม BELL 412EP จะสามารถเก็บค่า POC สะสมได้มากที่สุดเพียง 74.5% แม้ว่าตำแหน่งอ้างอิงจะอยู่ตำแหน่งที่อากาศยานวางกำลัง ส่วนในกรณีที่มีเวลาปฏิบัติการกิจ 6 ชั่วโมง อากาศยานชนิด C-130H, SAAB 340B, EC725 และ BELL 412EP จะสามารถปฏิบัติการกิจได้ไกลสุดที่ระยะ 699.1, 273.3, 128.4 และ 32.8 ไมล์ทะเลตามลำดับ



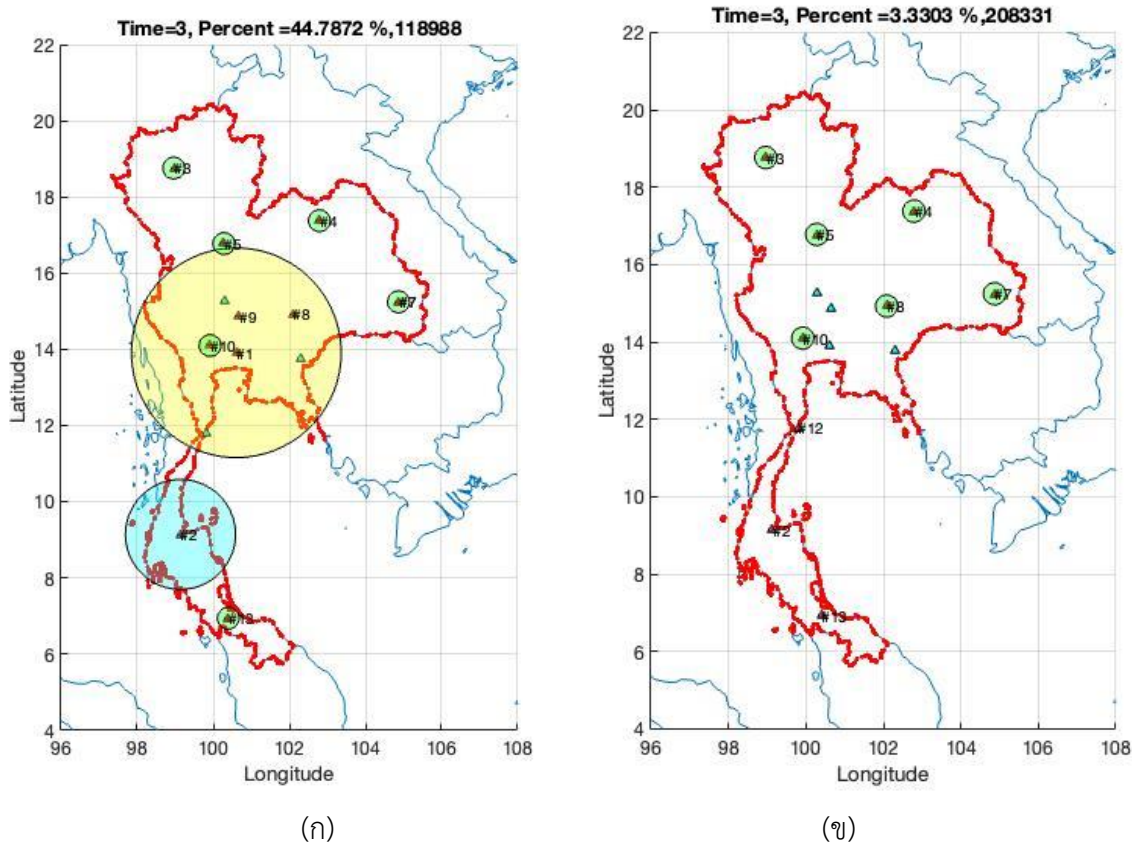
(ก)



(ข)

รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบขีดความสามารถด้านการค้นหาครอบคลุม POC ของ บ. แต่ละแบบ ที่ระยะปฏิบัติการต่าง ๆ ภายในเวลา (ก) 3 ชม. และ (ข) 6 ชม. (โดยที่: เส้นสีน้ำเงินแทนอากาศยานแบบ C-130H เส้นสีแดงแทนอากาศยานแบบ SAAB 340B เส้นสีเขียว แทนอากาศยานแบบ EC725 เส้นสีดำแทนอากาศยานแบบ BELL 412EP)

ในขั้นตอนต่อไปจะดำเนินการวิเคราะห์การครอบคลุมพื้นที่ทางบกในการปฏิบัติการกิจค้นหาอากาศยาน ประสพภัยจากทรัพยากรที่มีอยู่ ซึ่งในปัจจุบันการค้นหานี้สามารถปฏิบัติการได้โดยอากาศยานทั้ง 4 แบบ แต่มีข้อจำกัดคือ C-130H ต้องประจำการอยู่ที่สนามบินดอนเมืองและ SAAB 340B ต้องประจำการอยู่ที่สนามบินสุราษฎร์ธานี ส่วนเฮลิคอปเตอร์ที่เหลืออยู่ทั้ง 2 แบบนั้นสามารถผลัดเปลี่ยนหมุนเวียนไปประจำการในสนามบินต่าง ๆ ที่มีหน่วยของกองทัพอากาศตั้งอยู่ได้ทั้ง 13 สนามบิน ซึ่งกำหนดให้มีอากาศยานแบบ EC725 อยู่ 6 ลำ และ BELL 412EP อยู่ 3 ลำ

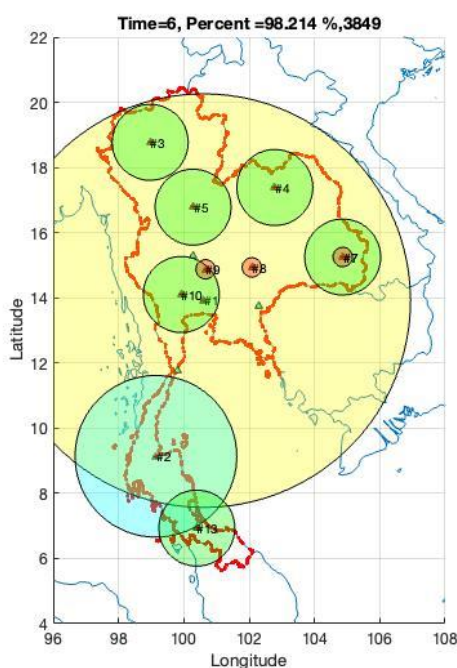


รูปที่ 11 แสดงระยะปฏิบัติการที่สามารถบินค้นหาครอบคลุมพื้นที่ได้ภายใน 3 ชั่วโมง จากอากาศยานที่มีอยู่โดย (ก) ระยะปฏิบัติการที่สามารถบินค้นหาครอบคลุมพื้นที่ของอากาศยานทั้ง 4 แบบ และ (ข) ระยะปฏิบัติการที่สามารถบินค้นหาและช่วยเหลือครอบคลุมพื้นที่ของเฮลิคอปเตอร์ (โดยที่: พื้นที่ครอบคลุมโดย C-130H, SAAB 340B, EC725 และBELL 412EP แสดงด้วยวงกลมสีเหลือง, ฟ้ำ, เขียว และแดง ตามลำดับ)

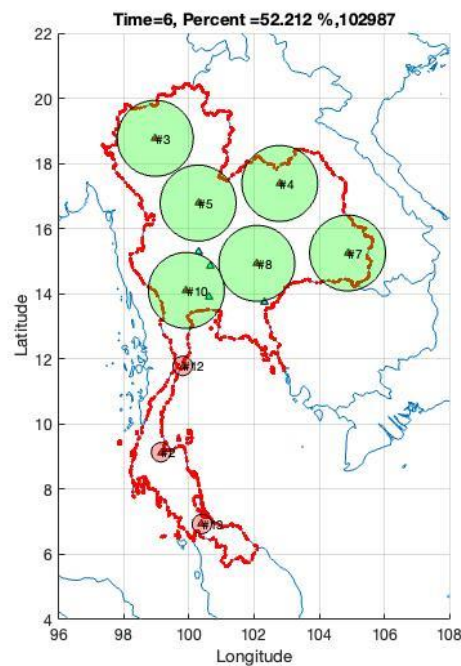
จากการวิเคราะห์การผลัดเปลี่ยนหมุนเวียนอากาศยานชนิดปีกหมุนแบบ EC725 และ BELL 412EP ไปตามสนามบินต่าง ๆ เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ทางบกของประเทศไทยให้มากที่สุดในการปฏิบัติการกิจค้นหาอากาศยานประสบภัย โดยการจัด EC725 ได้ทั้งหมด 1716 แบบที่ไม่ซ้ำกัน และการจัด BELL 412EP ได้ทั้งหมด 286 แบบที่ไม่ซ้ำกัน

ซึ่งเมื่อจำกัดเวลาปฏิบัติการ 3 ชั่วโมง ของอากาศยานทั้ง 4 แบบ โดยมี C-130H ประจำที่สนามบินดอนเมือง และ SAAB 340B ประจำที่สนามบินสุราษฎร์ธานี จะสามารถครอบคลุมพื้นที่ได้มากที่สุด ในภารกิจค้นหา เมื่อ EC725 ประจำการที่สนามบิน เชียงใหม่, อุดรธานี, พิษณุโลก, อุบลราชธานี และหาดใหญ่ ส่วน EC725 ที่เหลืออีก 1 ลำ และ BELL 412EP ที่เหลืออีก 3 ลำนั้น เมื่อจัดลงสนามบินใดก็ได้ที่เหลืออยู่ และไม่สามารถเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมได้ดังแสดงในรูปที่ 11(ก) ซึ่งในกรณีนี้ ทรัพยากรที่มีอยู่สามารถครอบคลุมพื้นที่ได้ 44.78% ของพื้นที่ทางบกของประเทศไทย

เมื่อกำหนดเวลาปฏิบัติการ 3 ชั่วโมง ในภารกิจช่วยชีวิตที่จำเป็นต้องใช้เฉพาะเฮลิคอปเตอร์พบว่าจัดลงเครื่องบิน EC725 ทั้ง 6 ลำ และ BELL 412EP ทั้ง 3 ลำ ลงสนามบินใดก็ได้ห้ามซ้ำกัน สามารถครอบคลุมพื้นที่ได้เพียง 3.33% ดังแสดงในรูปที่ 11(ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 12 แสดงระยะปฏิบัติการที่สามารถบินค้นหาครอบคลุมพื้นที่ได้ภายใน 6 ชั่วโมงจากอากาศยานที่มีอยู่โดย (ก) ระยะปฏิบัติการที่สามารถบินค้นหาครอบคลุมพื้นที่ของอากาศยานทั้ง 4 แบบ และ (ข) ระยะปฏิบัติการที่สามารถบินค้นหาและช่วยเหลือครอบคลุมพื้นที่เฉพาะเฮลิคอปเตอร์ (โดยที่: พื้นที่ครอบคลุมโดย C-130H, SAAB 340B, EC725 และ BELL 412EP แสดงด้วยวงกลมสีเหลือง, ฟ้ำ, เขียว และแดง ตามลำดับ)

รูปที่ 12 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์การจัดวางอากาศยาน EC725 และ BELL 412EP ลงในสนามบินต่าง ๆ เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ทางบกของประเทศไทยให้ได้มากที่สุดเมื่อกำหนดเวลาปฏิบัติการ 6 ชั่วโมง โดยในภารกิจค้นหานั้น จะเหมือนกับในกรณีที่แล้วคือ มี C-130H ประจำที่ดอนเมือง และ SAAB 340B ประจำที่สุราษฎร์ธานี ซึ่งผลที่ได้ในกรณีนี้พบว่า C-130H สามารถครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยได้เกือบทั้งประเทศ โดยการจะได้พื้นที่ครอบคลุมมากที่สุดนั้นต้องจัดเฮลิคอปเตอร์แบบ EC725 ลงที่สนามบินหาดใหญ่ 1 ลำ ส่วน EC725 ที่เหลืออีก 5 ลำ และ BELL 412EP ที่เหลืออีก 3 ลำ นั้นสามารถจัดลงสนามบินใดก็ได้ที่เหลืออยู่ ซึ่งทำให้สามารถบินค้นหาครอบคลุมพื้นที่ของประเทศไทยได้ 98.21% ดังแสดงในรูปที่ 12(ก)

ส่วนในภารกิจค้นหาและช่วยเหลือเมื่อกำหนดเวลาปฏิบัติการ 6 ชั่วโมง โดยตัดอากาศยานปีกตึง C-130H และ SAAB 340B ออก พบว่าต้องจัดลงเฮลิคอปเตอร์แบบ EC725 ทั้ง 6 ลำ ลงสนามบินเชียงใหม่, อุตรธานี,

พิษณุโลก, อุบลราชธานี, โคราช และกำแพงแสน ส่วน BELL 412EP ที่เหลืออีก 3 ลำนั้น ต้องจัดลงสนามบิน สุราษฎร์ธานี, ประจวบคีรีขันธ์ และหาดใหญ่ เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ทางบกให้ได้มากที่สุด โดยจะครอบคลุมได้ 52.21% ดังแสดงในรูปที่ 12(ข)

6. สรุปและอภิปรายผล/ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยชิ้นนี้ ในการวิเคราะห์ขีดความสามารถของกองทัพอากาศในด้านระยะปฏิบัติการของอากาศยานในการบินค้นหาอากาศยานขนาดเล็ก โดยเปรียบเทียบการครอบคลุมพื้นที่ทางบกเทียบกับเวลาในการปฏิบัติการ ทำให้เข้าใจ 1) ขีดความสามารถของอากาศยานแต่ละชนิดของกองทัพอากาศในการบิน ค้นหา และช่วยชีวิตมากยิ่งขึ้น 2) ทำให้เข้าใจขีดความสามารถในการครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของทั้งประเทศในการบิน ค้นหาและภารกิจช่วยชีวิต

โดยพบว่าในการบินการค้นหาอย่างเดียวที่สามารถใช้อากาศยานแบบปีกตรึงเข้าร่วมด้วยนั้น กองทัพอากาศสามารถครอบคลุมพื้นที่ทางบกของประเทศไทยได้ถึง 44.78% ในกรอบเวลา 3 ชั่วโมง และ 98.21% ในกรอบเวลา 6 ชั่วโมง

ส่วนในกรณีภารกิจค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัยครอบคลุมพื้นที่ทางบกของประเทศไทย ที่จำเป็นต้องใช้เพียงเฮลิคอปเตอร์เท่านั้น โดยจากการนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ขีดความสามารถมาทำการ จัดสรรทรัพยากรในการวางกำลัง พบว่า หากกำหนดเวลาสำหรับการปฏิบัติการบินค้นหาและช่วยเหลือไว้ที่ 3 ชั่วโมง การวางกำลังของเฮลิคอปเตอร์ทั้งสองแบบสามารถวางกำลังลงนามบินใดก็ได้ห้ามซ้ำกัน ซึ่งจะทำให้ ครอบคลุมพื้นที่ได้เพียงร้อยละ 3.33 ของพื้นที่ทางบกของประเทศไทย หากกองทัพบกเห็นความจำเป็นที่จะต้อง กำหนดเวลาไว้ที่ 3 ชั่วโมง ควรเพิ่มจำนวนเฮลิคอปเตอร์มากกว่าที่มีอยู่เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่มากกว่าเดิม หรือ อาจจะเพิ่มแนวทางในการจัดให้มีการสนับสนุนปัจจัยที่จำเป็นสำหรับเฮลิคอปเตอร์ ในบริเวณใกล้เคียงกับ จุดอ้างอิง แทนการบินไปกลับสนามบินที่ตั้ง

ส่วนในกรณีที่กำหนดกรอบเวลาไว้ 6 ชั่วโมง สำหรับภารกิจการบินค้นหาและช่วยเหลือ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ เฉพาะเฮลิคอปเตอร์เท่านั้น พบว่า การวางกำลังของเฮลิคอปเตอร์แบบ EC725 ทั้ง 6 ลำ ลงสนามบินเชียงใหม่, อุตรดิตถ์, พิษณุโลก, อุบลราชธานี, โคราช และ กำแพงแสน ส่วน BELL 412EP ทั้ง 3 ลำนั้น จัดลงสนามบิน สุราษฎร์ธานี, ประจวบคีรีขันธ์ และหาดใหญ่ จะทำให้ครอบคลุมพื้นที่ทางบกของประเทศไทยมากที่สุด เหมาะสม ที่จะใช้เป็นแนวทางในการวางกำลังของเฮลิคอปเตอร์ในกรณีที่มีทรัพยากรอยู่อย่างจำกัด

เอกสารอ้างอิง

- [1] คณะกรรมการค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัยแห่งชาติ. แผนการค้นหาและช่วยเหลืออากาศยานประสบภัยแห่งชาติ พ.ศ.2564. กรุงเทพฯ: กระทรวงคมนาคม; 2561.
- [2] กองทัพอากาศ. ระเบียบกองทัพอากาศว่าด้วยมาตรฐานการปฏิบัติการบิน พ.ศ.2564. กรุงเทพฯ: กองทัพอากาศ; 2564.

- [3] Karatas M, Razi N, Gunal MM. An ILP and simulation model to optimize search and rescue helicopter operations. *J Oper Res Soc* [Internet]. 2017 Jan [cited 2023 Jan 8];68(11):1335-51. Available from: https://www.researchgate.net/publication/312179397_An_ILP_and_simulation_model_to_optimize_search_and_rescue_helicopter_operations
- [4] MATLAB version 9.12.0.1884302 (R2022a). Massachusetts: The MathWorks Inc; 2022.
- [5] International Civil Aviation Organization. International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual Volume 2. [Quebec]: ICAO; 2019.
- [6] Federal Aviation Administration [Internet]. Washington, DC: Federal Aviation Administration; 2022. Aeronautical Information Publication UNITED STATES OF AMERICA: GEN 3.6 Search and Rescue 9.2 Emergency and Overdue Aircraft 9.2.4. [cited 2023 Jan 5]; [about 1 paragraphs]. Available from https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aip_html/part1_gen_section_3.6.html
- [7] Cooper DC, Frost JR, Robe RQ. Compatibility of Land SAR Procedures with Search Theory. Washington, DC: POTOMAC MANAGEMENT GROUP; 2003.
- [8] Robe RQ, Frost JR. A method for determining effective sweep widths for land searches: Procedures for conducting detection experiments. Virginia: Potomac Management Group; 2002.
- [9] Čokorilo O. Aviation Safety Risks in Maritime Search and Rescue (SAR) Operations. Conference: 5th International Maritime Science Conference, IMSC; 2013; Split, Croatia. IMSC; 2013.
- [10] Statheropoulos M, Agapiou A, Pallis G, Mikedi K, Karma S, Vamvakari J, et al. Factors that affect rescue time in urban search and rescue (USAR) operations. *Nat Hazards*. 2015 Jan;75:57–69.
- [11] Otote D, Li B, Gao S, Ai B, Xu J, Lv G. A Decision-Making Algorithm for Maritime Search and Rescue Plan. *Sustainability*. 2019;11:7.
- [12] Karatas M, Razi N, Gunal MM. An ILP and simulation model to optimize search and rescue helicopter operations. *J Oper Res Soc*. 2017 Jan;68(11):1335-51.
- [13] Civil Aerospace Medical Institute. Basic Survival Skills for Aviation. Oklahoma: Civil Aerospace Medical Institute; 2020.
- [14] Husain BN, Vyawahare MS, Pate R. Correlation of Injury Severity Score with Survival time in Fatal Road Traffic Accidents in Central Indian Population. *MLU* [Internet]. 2020 May 22 [cited 2023 Mar. 13];20(2):37-41. Available from: <https://ijop.net/index.php/mlu/article/view/1057>

ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการให้น้ำพืชผัก

Automated Control Systems for Plant Watering

ศุภกานต์ แก้วเหลียม¹ สุคนธ์ พันธุนเณร² และ ปราโมทย์ สุขศิริศักดิ์³

Supakan Kaewleam¹ Sukon Phanthunen² and Pramote Suksirisak³

Received: April 6, 2023

Revised: April 19, 2023

Accepted: April 24, 2023

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการเพาะปลูกทางการเกษตรนั้นมีหลายหลายรูปแบบ แต่ปัจจัยสำคัญในการเพาะปลูกทางการเกษตรนั้นก็คือการรดน้ำให้กับพืชผักต่าง ๆ เดิมวิธีการรดน้ำแบบใช้แรงงานคนและระบบรดน้ำแบบสปริงเกอร์โดยไม่มีการควบคุมทำให้การรดน้ำไม่มีความสม่ำเสมอ อาจทำให้น้ำท่วมพื้นที่และพืชผักได้รับปริมาณน้ำมากเกินไปจนความจำเป็น คณะผู้วิจัยจึงได้ออกแบบระบบรดน้ำแปลงผักอัตโนมัติผ่านเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน และส่งสัญญาณข้อมูลกลับไปยังตัวรับสัญญาณโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (บอร์ดอาดูโน) ในการควบคุมการทำงานโดยการติดตั้งเซนเซอร์ในบริเวณแปลงเพาะปลูกจำลอง 2 แปลง สำหรับตรวจวัดค่าความชื้นในดิน จากนั้นส่งค่าการตรวจวัดผ่านโมดูลสื่อสารแบบมีสายไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการประมวลผลว่าควรจ่ายน้ำหรือไม่ โดยผ่านเงื่อนไขของค่าความชื้น 70% ในการควบคุมให้ระบบจ่ายน้ำเพื่อรดน้ำ หากความชื้นต่ำกว่า 70% ระบบจะจ่ายน้ำเพื่อรดน้ำ แปลงผักอัตโนมัติ และเมื่อความชื้นมากกว่า 70% ระบบจะหยุดจ่ายน้ำ โดยค่าความชื้นที่วัดได้จะถูกส่งไปเก็บที่โมดูลเอสดีการ์ดเพื่อไปวิเคราะห์ผลการทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบพบว่าระบบที่สร้างขึ้น สามารถควบคุมความชื้นในดินได้ดีที่สุดที่ 69.99% มีความคลาดเคลื่อน 0.000948% และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.04

คำสำคัญ: ไมโครคอนโทรลเลอร์, โมดูลเอสดีการ์ด, ระบบควบคุมอัตโนมัติ, ฟาร์มอัจฉริยะ

¹รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

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

E-mail: supakan@rtaf.mi.th

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Assistant Professor, Graduate School, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

E-mail: sukon_p@rtaf.mi.th

³รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

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

E-mail: nueng_rtafa56@hotmail.com

Abstract

Presently, there are many forms of agricultural cultivation, but an important factor in agricultural cultivation is the watering of various vegetables. Traditional watering either manual or sprinkler system without control causing the uneven watering makes area flood and vegetables receive water more than necessary. The researchers therefore design an automatic watering system for vegetable plots through soil moisture sensors. The automatic watering system transmits the data, soil moisture, back to the receiver using a microcontroller (Arduino board) to control the watering system. There are 2 simulated planting plots for collecting and analyzing data. The measurement value is then sent through a wired communication module to the microcontroller for processing whether water should be supplied or not. By passing the conditions of 70% humidity to control the water supply system for watering, if the humidity is below 70%, the system will supply water automatically to the vegetable plot. And, when the humidity is more than 70%, the system will stop supplying water. The measured moisture value will be sent to the SD card module for analyzing. The test results show that the built system is able to control soil moisture the best at 69.99% with an error of 0.000948% and a standard deviation of 1.04.

Keywords: Microcontroller, SD Card Module, Automated Control Systems, Smart Farm

1. บทนำ

มนุษย์ได้พยายามหาวิธีการลดการใช้แรงงานของมนุษย์มาเป็นเวลานาน ไม่ว่าจะเป็นการใช้แรงงานสัตว์ หรือการใช้เครื่องจักรกล จนมาถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่ทันสมัยอย่างต่อเนื่อง เช่น การใช้ประโยชน์จากระบบควบคุม, หุ่นยนต์ หรือกลไกอัตโนมัติต่าง ๆ ในด้านเกษตรกรรม คมนาคม การศึกษา ฯลฯ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทยที่เป็นประเทศเกษตรกรรม ประชากรส่วนใหญ่ยังประกอบอาชีพเกษตรกรรม เป็นอาชีพหลัก ได้มีการเริ่มนำระบบควบคุมอัตโนมัติมาประยุกต์ใช้ในการทำฟาร์มอัจฉริยะ (Smart Farm) เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนและเวลาที่จะต้องเสียไปกับการจ้างบุคลากรในฟาร์มในการดูแลพืชผัก จึงนำซอฟต์แวร์มาแจ้งเตือนหรือนำฮาร์ดแวร์เข้ามาร่วมใช้ในฟาร์ม โดยปกติการทำฟาร์มอัจฉริยะจะต้องใช้เทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อนมาก ส่วนใหญ่จะเป็นการตั้งเวลาและติดตามสภาพอากาศภายในโรงเรือนให้เหมาะสมกับการเพิ่มผลผลิต [1]

เพื่อเป็นการแก้ปัญหาค่าใช้จ่ายค่าน้ำที่สูงเนื่องจากการรดน้ำพืชผักเกินความจำเป็น และลดปริมาณแรงงานการรดน้ำโดยเกษตรกรเอง คณะผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและสร้างระบบรดน้ำแปลงผักอัตโนมัติ โดยมีจุดประสงค์เพื่อการรักษาระดับความชื้นของดินไว้ที่ 70% ซึ่งเป็นระดับความชื้นเฉลี่ยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพืชผักในการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิต และเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับฟาร์มอัจฉริยะที่สร้างขึ้น

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โปรแกรมอาดูโน (Arduino) เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติที่มีการพัฒนาแบบโอเพนซอร์ส (Open Source) คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ตัวบอร์ดอาดูโนถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย จึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา ทั้งนี้ผู้ใช้งานยังสามารถดัดแปลง เพิ่มเติม พัฒนาทั้งตัวบอร์ดหรือโปรแกรมต่อได้อีกด้วย ความง่ายของบอร์ดอาดูโนในการต่ออุปกรณ์เสริม คือผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขาของบอร์ด เพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่าง ๆ มาเสียบบอร์ดอาดูโนแล้วเขียนโปรแกรมพัฒนาต่อ บอร์ดอาดูโนประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์ คือบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) เป็นชิ้นส่วนหลัก ถูกนำมาใช้ประกอบกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ซึ่งมีหลายรุ่นให้เลือกใช้ โดยแต่ละรุ่นจะมีความแตกต่างในเรื่องขนาดของบอร์ด จำนวนขารับส่งสัญญาณ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ ประสิทธิภาพของไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นต้น [2]

2.2 เซนเซอร์วัดความชื้นในดิน (Soil Moisture Sensor) ใช้วัดความชื้นในดินหรือใช้เป็นเซนเซอร์น้ำ สามารถทำงานกับไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้แอนาล็อกอินพุต (Analog Input) อ่านค่าความชื้น หรือเลือกใช้สัญญาณดิจิทัลที่ส่งมาจากโมดูล สามารถปรับค่าความไวได้ด้วยการปรับ Trim Pot การใช้งานจะต้องเสียบแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับวัดลงดิน เพื่อให้วงจรแบ่งแรงดันทำงานได้ครบวงจร จากนั้นจึงใช้วงจรเปรียบเทียบแรงดันโดยใช้ไอซี ออปแอมป์เบอร์ LM393 เพื่อวัดแรงดันเปรียบเทียบระหว่างแรงดันที่วัดได้จากความชื้นในดินกับแรงดันที่วัดได้จากวงจรแบ่งแรงดัน ปรับค่าโดยใช้ Trim Pot หากแรงดันที่วัดได้จากความชื้นในดินมีค่ามากกว่าก็จะทำให้วงจรปล่อยลอจิก “1” ไปที่ขาดิจิทัล “0” แต่หากความชื้นในดินมีน้อย ลอจิก “0” จะถูกปล่อยไปที่ขาดิจิทัล “0” ขาแอนาล็อก “0” เป็นขาที่ต่อโดยตรงกับวงจรที่ใช้วัดความชื้นในดินซึ่งให้ค่าแรงดันออกมาตั้งแต่ 0 ถึง 5 โวลต์ (ในทางอุดมคติ) โดยหากความชื้นในดินมาก แรงดันที่ปล่อยออกไปก็จะน้อยตามไปด้วย [3]

2.3 โซลินอยด์วาล์ว (Solenoid Valve) คือวาล์วควบคุมทิศทางการไหลของลมโดยใช้คอยล์ไฟฟ้าสั่งการร่วมกับสปริงหรือคอยล์ไฟฟ้าอีกตัวเมื่อต้องการให้วาล์วอยู่อีกตำแหน่ง โซลินอยด์วาล์วประกอบด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับทำหน้าที่ปิด - เปิดวาล์วเมื่อเปิดและปิดสวิตช์ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะดูดเดือยวาล์วเพื่อเปิดวาล์ว และเมื่อปิดสวิตช์ตัดกระแสไฟฟ้า เดือยวาล์วจะกลับสู่ตำแหน่งเดิมโดยน้ำหนักของตัวเองเพื่อเปิดวาล์ว เช่น โซลินอยด์วาล์วน้ำ โซลินอยด์วาล์วแก๊ส โซลินอยด์วาล์วไฮดรอลิก โซลินอยด์วาล์วลม

2.4 โมดูลบันทึกข้อมูล (Micro SD Card Module) ยี่ห้อ Catalexes สำหรับเพิ่มความสามารถในการบันทึกข้อมูลต่าง ๆ จากบอร์ดอาดูโนลงบน Micro SD Card มีอินเตอร์เฟสแบบ SPI ใช้งานง่าย มีไลบรารี (Library) สำเร็จรูปให้พร้อมใช้งาน มีวงจรทำงานที่ 3.3 โวลต์ มาให้ในตัวบอร์ดสามารถใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง 4.5 ถึง 5.5 โวลต์

2.5 โครงสร้างของดิน คือ รูปแบบการคงตัวของดินในสถานะหนึ่ง ๆ ถูกแบ่งเป็นชั้น ๆ ได้แก่ ชั้นผิวดิน ชั้นดินกลาง และชั้นดินลึก ส่วนใหญ่การเพาะปลูกหารากสั้นก็จะอยู่ในชั้นผิวดิน (ประมาณ 30 เซนติเมตร จากผิวดิน) หากเป็นไม้ยืนต้นรากพืชจะอยู่จะอยู่ในดินชั้นกลาง และชั้นดินลึก (1.5 เมตร) ในแต่ละชั้นดินการก่อ

โครงสร้างดินจะแตกต่างกันไปตามวัตถุกำเนิดดิน สภาพอากาศ และบริบทการเกษตร เช่น พืชกรรมและรอบการให้น้ำ การไถพรวน การคลุมดิน การใส่ปุ๋ย เป็นต้น โครงสร้างและกลไกการสร้างตัวของชั้นดินนั้นก่อเกิดได้ตลอดเวลา บางพื้นที่มีสัณฐานขนาดเล็กอย่างไส้เดือนมาก ช่องว่างรูพรุนในดินมาก ดินจะมีลักษณะโปร่ง หรือบางพื้นที่เป็นดินร่วนแต่ขาดสารอาหาร ไม่มีกิจกรรมของจุลินทรีย์ ดินก็อาจมีรูพรุนหรือช่องอากาศน้อยกว่า ดินจึงมีโครงสร้างเฉพาะตัวแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ส่งผลโดยตรงต่อการซึมน้ำและการกักเก็บน้ำของดิน [4]

2.6 การคำนวณความชื้นในดิน สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1 [5]

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ W_w คือ มวลน้ำในดิน (กรัม)

W_s คือ มวลดินแห้ง (กรัม)

W คือ ความชื้นในดิน (เปอร์เซ็นต์)

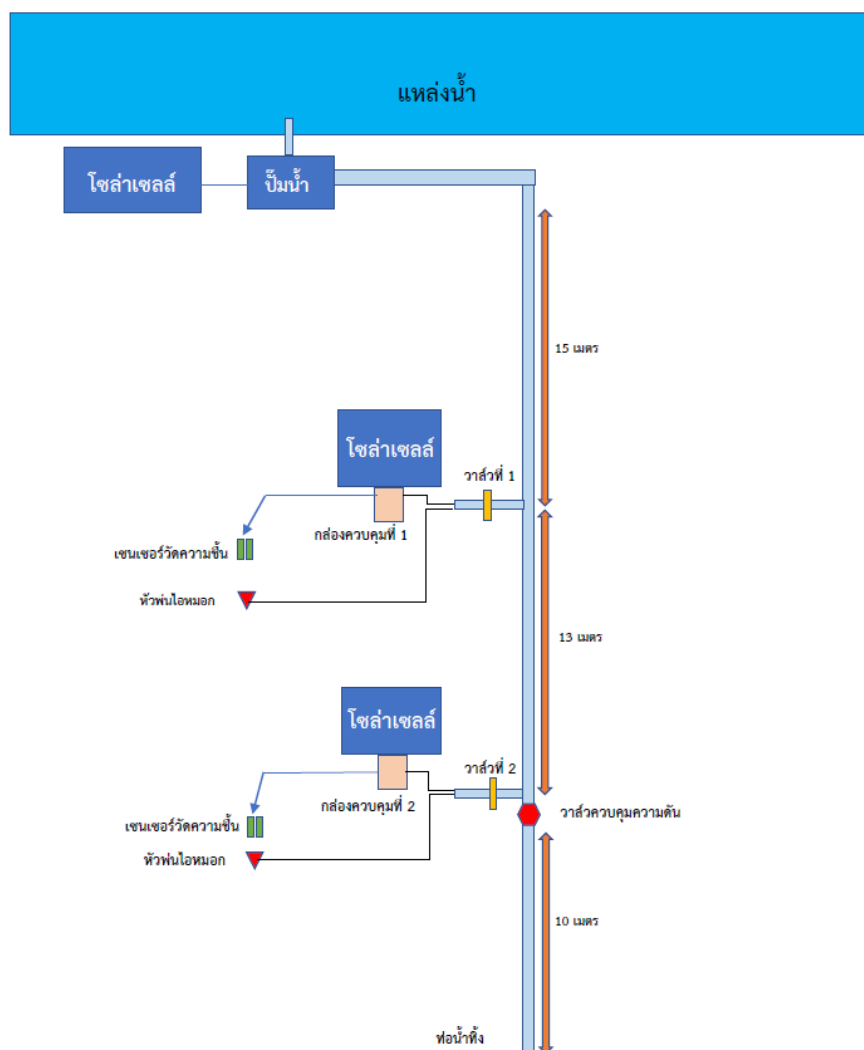
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกรัตน์ ศรีไทย และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาขนาดและรูปร่างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมกับการสูบน้ำเพื่อการเกษตร ได้ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 100 วัตต์ และปั้มน้ำขนาด 12 โวลต์ พบว่าแรงดันและปริมาณน้ำที่มากที่สุดในช่วงเวลา 11.00 – 15.00 น. และปริมาณน้ำที่ได้เฉลี่ย 4,107 ลิตรต่อวัน, คุณุตม์ แซ่ม้า และ สุรัชย์ แซ่จ้าว [7] ได้ใช้เซนเซอร์วัดความชื้นในดินและส่งข้อมูลกลับไปคอนโทรลเลอร์แบบไร้สาย เพื่อทำการประมวลผลว่าจะจ่ายน้ำหรือไม่และทำการควบคุมระบบจ่ายน้ำให้รดแบบอัตโนมัติ พบข้อจำกัดที่ระยะ 30 เมตร ถ้าไกลกว่าระยะนี้จะไม่สามารถควบคุมระบบได้, สายันต์ ท้ายเมือง [8] สร้างเครื่องมือช่วยในการรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติในพื้นที่กว้าง 14 นิ้ว ยาว 11 นิ้ว โดยใช้ Node MCU ควบคุมรีเลย์โดยสั่งให้รีเลย์ต่อวงจรจ่ายไฟให้ปั้มน้ำทำงานในกรณีที่ความชื้นในดินต่ำ, เขมรัฐ มองเชิง และ ดวงนภา ทองเกิด [9] ได้สร้างและออกแบบระบบการให้น้ำในสวนทุเรียนอัตโนมัติ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2017 ในการตรวจจับเซนเซอร์วัดความชื้นในดินและควบคุมโซลินอยด์วาล์วในการจ่ายน้ำไปยังท่อส่งน้ำเมื่อระบบวัดค่าความชื้นได้ต่ำกว่าที่กำหนดไว้, ภาคิน มณีโชติ และคณะ [10] ได้ศึกษาระบบรดน้ำอัตโนมัติด้วยเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน และนำไปประยุกต์ใช้ในชุมชนผู้สูงอายุ โดยใช้โปรแกรม Arduino IDE ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้น และสภาพอากาศ และสามารถควบคุมการทำงานของระบบผ่านโทรศัพท์มือถือ โดยความพอใจสำหรับผู้ใช้งานอยู่ในระดับดีมาก

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 คณะผู้วิจัยทำการสำรวจพื้นที่ด้านหน้าอาคารทดสอบเครื่องยนต์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช และแหล่งน้ำบริเวณโรงฝึกงาน เพื่อเตรียมการติดตั้งตู้ควบคุม เซลล์แสงอาทิตย์

และวาล์วน้ำ จากนั้นทำการออกแบบเส้นทางเดินของน้ำสำหรับการทดสอบโดยใช้เครื่องสูบน้ำและแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งที่แหล่งน้ำ และติดตั้งท่อส่งน้ำผ่านบริเวณที่มีต้นไม้ และต่อเข้าด้วยตัวขึ้นงานที่แปลงที่ 1, แปลงที่ 2 และจุดทิ้งน้ำ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เส้นทางเดินน้ำภายในระบบ

3.2 เลือกขนาดของวาล์วน้ำ โดยการคำนวณจากกำลังเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ยี่ห้อ MTEC รุ่น DCPM21-14-72-750 มี Max Head ที่ 14 เมตร จะได้แรงดันน้ำขนาด 0.137 เมกะพาสคาล (Mega Pascal) คณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้โซลินอยด์วาล์ว 12 VDC แรงดันใช้งานระหว่าง 0.02 ถึง 0.8 เมกะพาสคาล, เลือกขนาดเซลล์แสงอาทิตย์จากการคำนวณการใช้ไฟฟ้าต่อวันของโซลินอยด์วาล์วที่เลือกใช้ โดยมีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 3.6 วัตต์ แรงเคลื่อนไฟฟ้า 12 โวลต์ จะได้กระแสไฟฟ้า 0.3 แอมแปร์ และกำหนดระยะเวลาการทำงานของวาล์วต่อวันไม่เกิน 2 ชั่วโมง จึงใช้งานไฟฟ้า 7.2 วัตต์·ชั่วโมง คณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้เซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10 วัตต์ 18 โวลต์

จากนั้นทำการคำนวณขนาดความจุแบตเตอรี่ จากการเปิดใช้งานระบบในเวลา 08.30 น. ถึง 17.30 น. (9 ชั่วโมงต่อวัน) โดยที่โซลिनอยด์วาล์วใช้กระแสไฟฟ้า 0.3 แอมแปร์ (300 มิลลิแอมแปร์) จะได้ความจุแบตเตอรี่ที่ต้องการเป็น 2,700 มิลลิแอมแปร์·ชั่วโมง ซึ่งเป็นความต้องการน้อยสุดที่ใช้ทำงานในเวลากลางวันโดยไม่ต้องชาร์จไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ คณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้แบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์ขนาด 3,000 มิลลิแอมแปร์·ชั่วโมง 12 โวลต์ ขนาด 3 เซลล์ แต่ในการทดสอบจริงโซลिनอยด์วาล์วไม่เปิดใช้งานตลอดเวลา เนื่องจากการรดน้ำถ้าความชื้นเกิน 70 เปอร์เซ็นต์ รีเลย์จะไม่จ่ายไฟให้โซลिनอยด์วาล์ว และจะใช้ไฟฟ้ากับบอร์ดอาดูโนเท่านั้น

3.3 ทำการหาค่าความชื้นในดินเป็นร้อยละจากการเปรียบเทียบเซนเซอร์ เนื่องจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโนสามารถอ่านค่าที่รับมาจากเซนเซอร์วัดความชื้นที่ขา A0 ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าแอนาล็อกที่มีความละเอียด 10 บิต ซึ่งจะอ่านได้ทั้งสิ้น 2^{10} เท่ากับ 1,024 ค่า โดยเป็นตัวเลขระหว่าง 0 – 1,023 คณะผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบเซนเซอร์เพื่อให้ได้ค่าร้อยละของความชื้นในดิน โดยทำการเปรียบเทียบมวลของดินที่ชุ่มน้ำและดินที่ตมจนแห้งจากตัวอย่างดิน 5 บริเวณ ได้ผลแสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 2 การตมดินให้แห้งเพื่อหามวลที่หายไป

ตารางที่ 1 ค่าร้อยละความชื้นในดินจากการเปรียบเทียบเซนเซอร์

ตัวอย่างดินที่	ก่อนตม		หลังตม		มวลน้ำในดิน (กรัม)	ความชื้นของดิน (%)
	มวล (กรัม)	ค่าแอนาล็อก	มวล (กรัม)	ค่าแอนาล็อก		
1	91.12	352	49.20	1,023	41.91	85.18
2	75.60	667	52.10	1,023	23.50	45.11
3	74.36	596	48.25	1,023	26.11	54.11
4	81.89	532	50.32	1,023	31.57	62.74
5	85.78	492	51.28	1,023	34.50	67.28

เมื่อได้ค่าความชื้นของตัวอย่างดินทั้ง 5 ตัวอย่าง แล้วนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอนาล็อกและเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินเป็นสมการเชิงเส้น (Linearization) [11] จะได้ดังสมการที่ 2

$$y = -7.894x + 1023 \quad (2)$$

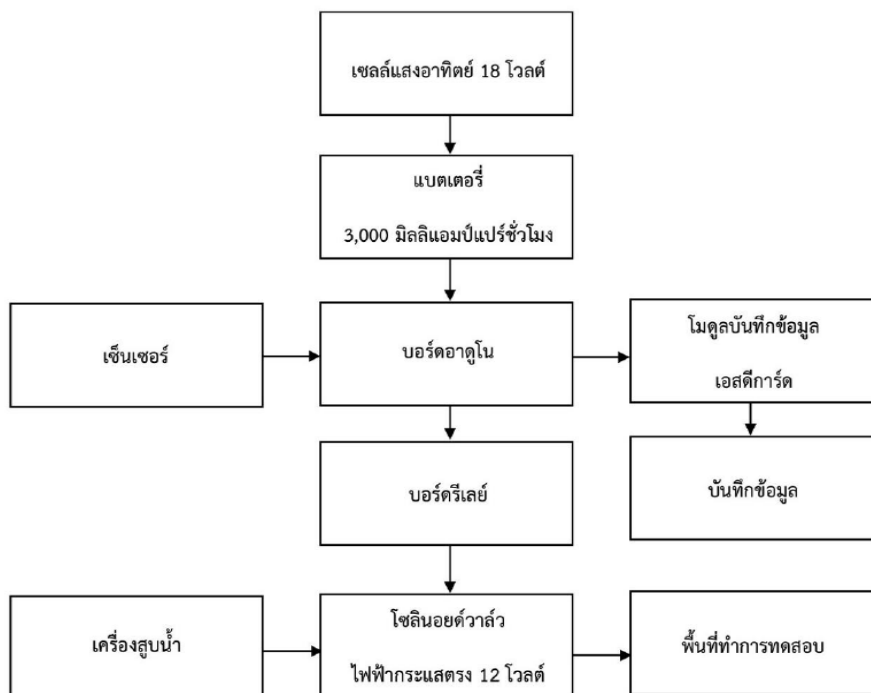
เมื่อ x คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นในดิน

y คือ ค่าแอนาล็อกของเซนเซอร์

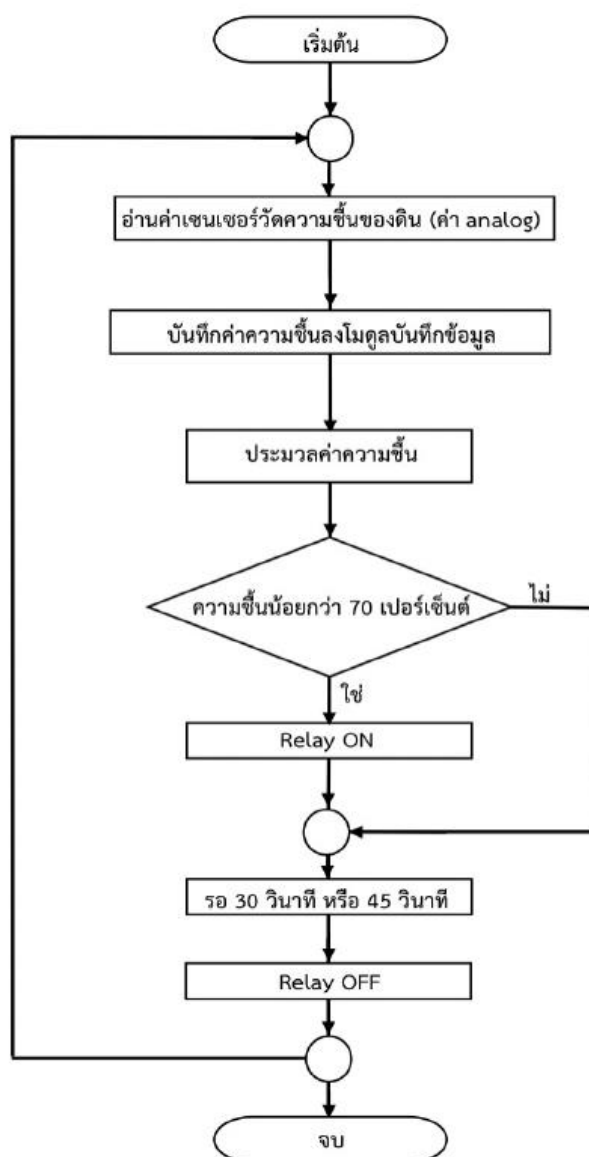
คณะผู้วิจัยต้องการความชื้นในดินที่ 70 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจะมีค่าแอนาล็อก $y = -7.894(70) + 1023 = 470$

3.4 ทำการคำนวณแรงดันไฟฟ้าโดยอ้างอิงจากค่าแอนาล็อก แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ อาดูโนที่จ่ายไฟให้กับเซนเซอร์วัดความชื้นที่ขา VCC คือ 3.3 โวลต์ โดยที่ค่าแอนาล็อก 0 แปลงได้เป็น 0 โวลต์, ค่าแอนาล็อก 1023 แปลงได้เป็น 3.3 โวลต์ ทำการคำนวณอัตราส่วนจะได้ว่าที่ความชื้น 70 เปอร์เซ็นต์ ค่าแอนาล็อก 470 จะได้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ $(470 \div 1023) \times 3.3 = 1.52$ โวลต์

3.5 ทำการออกแบบโปรแกรมให้ทำงานได้อัตโนมัติ โดยใช้โปรแกรมอาดูโนซึ่งเป็นโปรแกรมฟรี ผู้วิจัยจึงสามารถใช้โปรแกรมและสามารถเผยแพร่ผลงานได้แบบไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ ประกอบด้วยการวัดความชื้น ปรับค่าความชื้น ประมวลผล และออกคำสั่งให้จ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังโซลินอยด์วาล์วเพื่อทำการรดน้ำที่แปลงทั้งสอง คณะผู้วิจัยจึงเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งการให้ตัวระบบประมวลผลค่าแอนาล็อกของความชื้นที่วัดได้ โดยใช้เกณฑ์ความชื้น 70 เปอร์เซ็นต์ หรือค่าแอนาล็อกที่ 470 ในการปิดและเปิดวาล์ว ทำการบันทึกค่าความชื้นที่วัดได้ลงโมดูลบันทึกข้อมูล โดยกำหนดเวลาในการวนซ้ำของคำสั่ง แปลงที่ 1 หน่วงเวลา 30 วินาที และคำสั่งแปลงที่ 2 หน่วงเวลา 45 วินาที ดังแสดงดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4



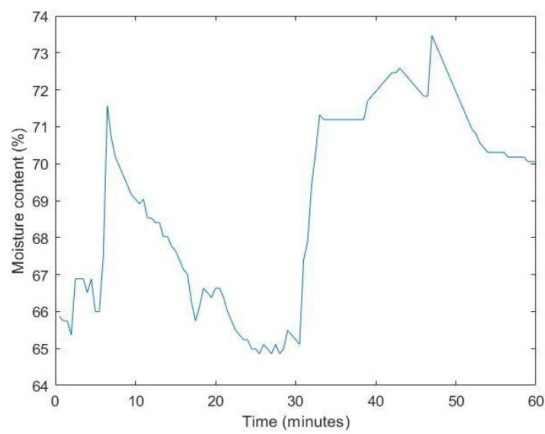
รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบ



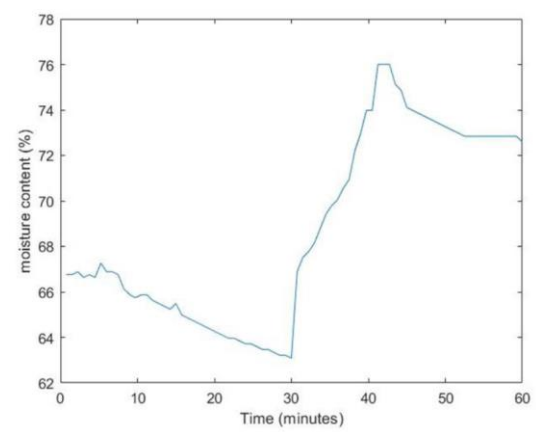
รูปที่ 4 แผนภาพการทำงานของระบบ

4. ผลการวิจัย

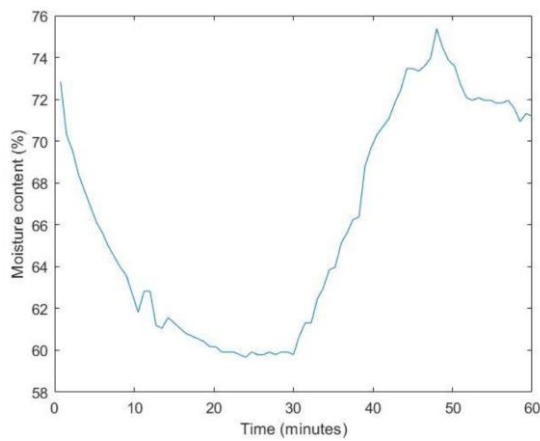
4.1 คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบและบันทึกผลโดยทำการวัดค่าความชื้นในดิน 2 พื้นที่คือ แปลงที่ 1 และแปลงที่ 2 โดยทำการวัดทั้งหมด 4 ครั้งต่อแปลง แบ่งเป็นวัดความชื้นก่อนการใช้งานเข้ากับโซลินอยด์วาล์ว 30 นาที และวัดหลังการใช้งานกับโซลินอยด์วาล์วอีก 30 นาที รวมเป็น 1 ชั่วโมงต่อวัน รวมใช้เวลาดำเนินการทั้งสิ้น 4 ชั่วโมง ได้ผลการทดสอบ ดังรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 12



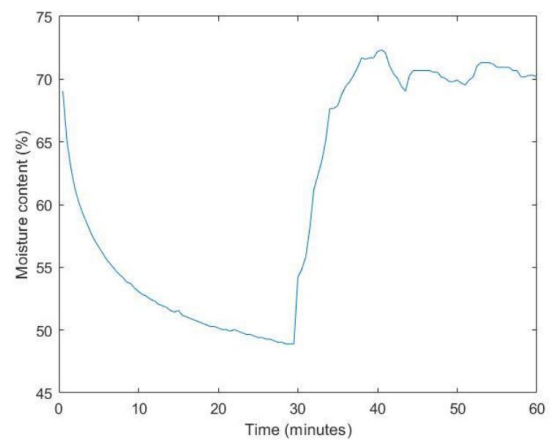
รูปที่ 5 ผลการทดสอบครั้งที่ 1 ของแปลงที่ 1



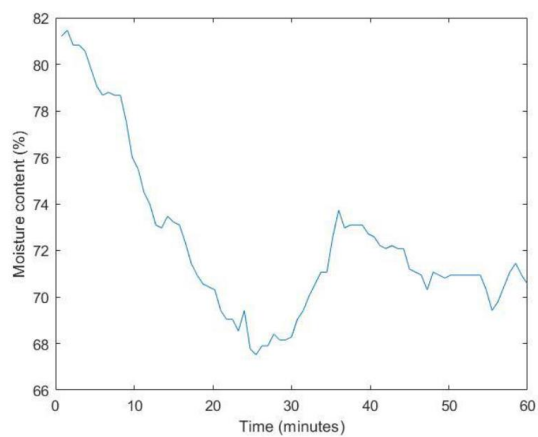
รูปที่ 6 ผลการทดสอบครั้งที่ 1 ของแปลงที่ 2



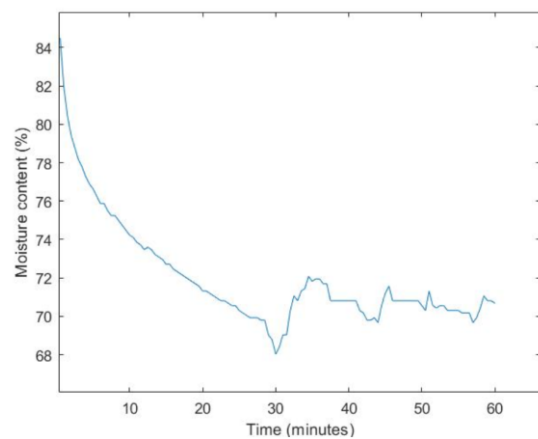
รูปที่ 7 ผลการทดสอบครั้งที่ 2 ของแปลงที่ 1



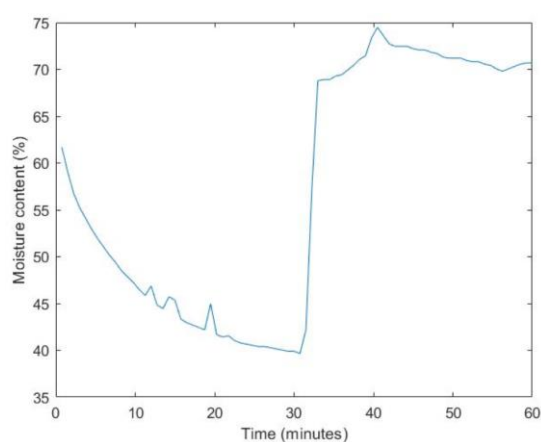
รูปที่ 8 ผลการทดสอบครั้งที่ 2 ของแปลงที่ 2



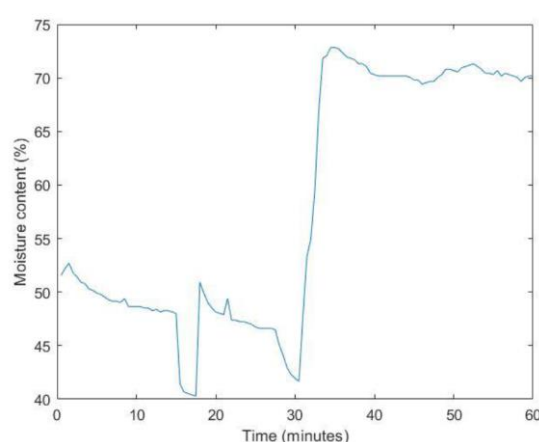
รูปที่ 9 ผลการทดสอบครั้งที่ 3 ของแปลงที่ 1



รูปที่ 10 ผลการทดสอบครั้งที่ 3 ของแปลงที่ 2



รูปที่ 11 ผลการทดสอบครั้งที่ 4 ของแปลงที่ 1



รูปที่ 12 ผลการทดสอบครั้งที่ 4 ของแปลงที่ 2

จากผลการทดสอบในทุก ๆ ครั้ง พบว่าในช่วงเวลา 0 – 30 นาที ค่าความชื้นในดินจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเหมือนกัน คือลดลงอย่างสม่ำเสมอเนื่องจากพืชผักมีการดูดน้ำในดินไปใช้ และหลังจากนั้นในช่วงเวลา 30 – 60 นาที ทำการต่อการใช้งานเข้ากับโซลินอยด์วาล์ว พบว่าความชื้นในดินจะมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีความชื้นสูงสุดที่วัดได้มีค่าสูงกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ เล็กน้อย จากนั้นจะลดต่ำลงมาใกล้เคียง 70 เปอร์เซ็นต์

4.2 คณะผู้วิจัยได้นำผลการทดสอบทั้ง 4 ครั้งของทั้ง 2 แปลง มาวิเคราะห์เพื่อหาประสิทธิภาพของการทำงานของระบบควบคุมความชื้นอัตโนมัติ โดยการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความชื้นของแต่ละครั้ง แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าความชื้นที่คณะผู้วิจัยได้กำหนดไว้คือ 70 เปอร์เซ็นต์ โดยหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพของแปลงทดสอบระบบควบคุมร่น้ำอัตโนมัติ

แปลงร่น้ำ	ค่าเฉลี่ยความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	เปอร์เซ็นต์ความคลาด เคลื่อน	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
แปลงที่ 1	69.99	0.000948	1.04
แปลงที่ 2	70.70	0.996688	1.45

5. สรุปผลการวิจัย

คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการให้น้ำพืชผัก จากการทดสอบหาค่าความชื้นก่อนและหลังใช้งานระบบร่น้ำอัตโนมัติด้วยเซนเซอร์วัดความชื้น โดยบันทึกค่าความชื้นจากเซนเซอร์ในเงื่อนไขความชื้นที่ 70 เปอร์เซ็นต์ เพื่อที่จะนำนํ้ามารดให้กับแปลงที่ทำการทดลอง และบันทึกค่าความชื้นที่วัดได้ลงในโมดูลไมโครเอสดีการ์ด หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการรักษาความชื้นให้ใกล้เคียงความต้องการของพืชทั่วไปคือ 70 เปอร์เซ็นต์ โดยเครื่องร่น้ำหมายเลข 1 ทำการวัด

ความชื้นก่อนเข้าเงื่อนไขการรดน้ำ 30 วินาที และเครื่องรดน้ำหมายเลข 2 ใช้เวลาในการเข้าเงื่อนไข 45 วินาที ผลที่ได้พบว่าเครื่องรดน้ำหมายเลข 1 สามารถรักษาความชื้นได้ใกล้เคียง 70 เปอร์เซ็นต์ (ค่าเฉลี่ยที่ 470) มากที่สุดภายในเวลาการเปิดใช้งาน 30 นาที โดยมีค่าความชื้นหลังการเปิดใช้งานเฉลี่ย 69.99 เปอร์เซ็นต์ มีความคลาดเคลื่อน 0.000948 เปอร์เซ็นต์ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.04

จากผลการวิจัยนี้ทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำการเกษตร สามารถลดค่าใช้จ่ายในการรดน้ำพืชผัก และลดต้นทุนค่าแรงงานคนในการรดน้ำ ทำให้เกษตรกรได้ผลกำไรมากขึ้น และอาจมีการนำองค์ความรู้นี้ไปพัฒนาต่อยอดในวงกว้าง อาจจะวิจัยเพิ่มขึ้นเฉพาะเจาะจงในพืชผักแต่ละชนิด หรือทำการศึกษาดินในพื้นที่ต่าง ๆ ในภูมิภาคที่ต่างกัน ทำให้ระบบควบคุมอัตโนมัติมีความน่าสนใจมากยิ่งขึ้นสำหรับบุคคลทั่วไป

6. ข้อเสนอแนะ

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาระบบควบคุมการรดน้ำอัตโนมัติแทนที่วิธีการรดน้ำแบบใช้แรงงานคน เพื่อใช้ในการลดค่าใช้จ่ายในการรดน้ำพืชผลทางการเกษตรซึ่งเป็นการศึกษาต้นแบบเท่านั้น สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดได้ โดยการขยายพื้นที่ทำการให้มากขึ้น เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร แต่จะต้องคำนึงถึงกำลังของเครื่องสูบน้ำ และประสิทธิภาพของระบบควบคุม ตลอดจนความคุ้มค่าในการลงทุนกับระบบควบคุมเมื่อเทียบกับมูลค่าของผลผลิตทางการเกษตรที่จะได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] จักรกฤษณ์ หมั่นวิชา. เทคโนโลยีฟาร์มอัจฉริยะ = Smart Farms Technology. วารสารหาดใหญ่วิชาการ. ก.ค.-ธ.ค. 2559;14(2):201-210.
- [2] สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กระทรวงศึกษาธิการ. IoT ฝีมือคนไทย [ออนไลน์]. กรุงเทพฯ: กระทรวงศึกษาธิการ; c2022 [เข้าถึงเมื่อ 15 ธ.ค. 2565]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.scimath.org/article-technology/item/9815-Arduino>
- [3] พรนรินทร์ ดันกระหาต, ทรงวุฒิ แสงจันทร์. โครงข่ายเซนเซอร์ความชื้นในดินสำหรับควบคุมการให้น้ำพืช = Soil moisture sensor network for controlling plant watering. ประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 14 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 6; 1-4 เม.ย. 2556; โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์พลาซ่า. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก; 2556.
- [4] วราพล เกษมสันต์, อติรัฐ มากสุวรรณ. รูปแบบการใช้เครื่องมือทางการเกษตรเพื่อผ่อนแรงทางกิจกรรมทางการเกษตรสำหรับปรับโครงสร้างกายภาพของดิน = A Pattern of Using Agricultural Tools to Relieve Effort in Agricultural Activity in the Improvement of the Physical Soil Structure. วารสารวิชาการสถาบันการอาชีวศึกษาเกษตร. ก.ค.-ธ.ค. 2565;6(2);30-46.
- [5] กุลดิ สุทธาวาส. วิธีการหาความชื้นในดินภาคสนาม (ทฤษฎี+ปฏิบัติการ) [ออนไลน์]. กรุงเทพฯ: สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 10; c2022 [เข้าถึงเมื่อ 10 พ.ย.65]. เข้าถึงได้จาก: www.r10.idd.go.th/knowledgeR10_1/krn6.pdf

- [6] เอกรัตน์ ศรีไทย, อนุรัฐ วรรณะเลิศวานิช, ณัฐพงศ์ พุ่มมี. การวิเคราะห์เพื่อหาขนาดและรูปแบบแผงโซลาร์เซลล์ที่เหมาะสมสำหรับการสูบน้ำเพื่อการเกษตร = Analysis to Obtain the Optimum Sizing and Typing for Agriculture Solar Water Pump [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม; 2556.
- [7] คณุตม์ แซ่ม้า, สุรชัย แซ่จำว. ระบบรดน้ำแปลงผักอัตโนมัติ = Automatic Plant Watering System [วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ; 2561.
- [8] สายันต์ ท้ายเมือง. แบบจำลองเครื่องรดน้ำอัตโนมัติ [ออนไลน์]. กรุงเทพฯ: โรงเรียนอิเล็กทรอนิกส์ กองวิทยาการ กรมอิเล็กทรอนิกส์เรือ; c2022 [เข้าถึงเมื่อ 18 ธ.ค.2565]. เข้าถึงได้จาก: <https://elecschool.navy.mi.th/pro /doc62/07.pdf>
- [9] เขมรัฐ มอชิง, ดวงนภา ทองเกิด. ระบบควบคุมการให้น้ำสวนทุเรียนอัตโนมัติ = The Automatic Watering Controller for Durian Farms [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต]. ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา; 2561.
- [10] ภาคิน มณีโชติ, เทพ เกื้อทวีกุล, ณัฐพงศ์ ศิลาจันทร์, ณัฐปรกรณ์ พลใหญ่, จารุกิตต์ พิบูลนฤดม. การพัฒนาระบบให้น้ำชะอมพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมกับผู้สูงอายุด้วย IoT สำหรับชุมชน = Development of Suitable Watering System with Solar Energy for Senior by Using IoT in Community. ประชุมวิชาการระดับชาติ สำหรับนักศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ครั้งที่ 1; 22 ก.พ. 2564; ผ่านระบบออนไลน์; 2564.
- [11] Stroud KA, Booth DJ. Engineering Mathematics. 6th ed. London: Palgrave; 2007.

ชนวนหัวกระแทกแตกไว/ถ่วงเวลา สำหรับลูกระเบิดยิงจากเครื่องยิงลูกระเบิด

Point Detonating Quick/Delay Fuze of Mortar

ทวี ดีจะมาลา¹ และ นักรบ วานิชนุเคราะห์²

Thawee Deejamala¹ and Nakrob Wanichnukhro²

Received: April 27, 2023

Revised: May 11, 2023

Accepted: May 16, 2023

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้เพื่อ 1) สร้างองค์ความรู้และเทคโนโลยีในการพัฒนาชนวนหัวกระแทกแตกไว ถ่วงเวลา สำหรับลูกระเบิดยิงจากเครื่องยิงลูกระเบิด (ลย./ค.) 2) พัฒนาและสร้างชนวนหัวกระแทกแตกไว ถ่วงเวลา สำหรับ ลย./ค. 3) เป็นแนวทางในการสร้างชนวนหัวกระแทกแตกไว ถ่วงเวลา สำหรับ ลย./ค. ที่มีคุณลักษณะ และ ชีตความสามารถตามเกณฑ์มาตรฐานทางทหารและนำเข้าสู่สายการผลิตต่อไป โดยการวิจัยนี้จะใช้วิธีวิศวกรรม ย้อนรอยตรวจสอบข้อมูลทางเทคนิคและข้อมูลอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับชิ้นส่วนอุปกรณ์กลไกการทำงานหลักอยู่ 2 ส่วน ส่วนแรกทำหน้าที่ด้านความปลอดภัย และส่วนที่สองทำหน้าที่จุดระเบิดให้ทำงานเมื่อชนวนกระแทกเป้าหมาย และ นำปัญหาข้อบกพร่องต่าง ๆ จากการศึกษาความเป็นไปได้ในอดีตมาปรับปรุงแก้ไข โดยได้เน้นเรื่องการพัฒนา ชิ้นส่วนกลไกทางกล ให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและได้แบบรูปที่ถูกต้องแม่นยำเนื่องจากชิ้นส่วนต่าง ๆ ของกลไกทางกลมีขนาดค่อนข้างเล็กจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรที่เหมาะสมมีความเที่ยงตรงสูงในการผลิต เพื่อนำมา กำหนดกระบวนการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ของชนวนหัวขึ้นเองโดยใช้วัสดุที่จัดหาภายในประเทศเป็นหลัก นอกจากนี้ ยังได้พัฒนาชนวนหัวลูกระเบิดที่มีอำนาจการระเบิดที่เหมาะสมกับ ลย./ค. ชนิดต่าง ๆ ซึ่งจากการดำเนินการวิจัย สามารถสร้างองค์ความรู้ให้กำลังพลของ ศอว.ศอพท. ผลิตชนวนหัวกระแทกแตกไว ถ่วงเวลา สำหรับ ลย./ค. ได้ และ ผ่านการทดสอบตามเกณฑ์มาตรฐานทางทหารที่กำหนด ชนวนหัวสามารถทำงานได้ดีคิดเป็นร้อยละ 97

คำสำคัญ: ชนวนหัว, ชนวนหัวลูกปืน ลย./ค., ชนวนหัวกระแทกแตกไว, ชนวนหัวกระแทกแตกไวถ่วงเวลาสำหรับ ลย./ค.

¹กองวิชาฟิสิกส์และเคมี ฝ้ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

¹Department of Physics and Chemistry, Academic Branch, Royal Thai Naval Academy.

E-mail: taweemala@hotmail.com

²กองวิจัยพัฒนาและเทคโนโลยี, ศูนย์อำนวยการสร้างอาวุธ, ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร

²Research Development and Technology, Division Weapon Production Centre, Defence Industry and Energy Centre. E-mail: nakrob110@gmail.com

Abstract

The objectives of this research are 1) to create knowledge and technology for developing point detonating quick/delay fuze of Mortar 2) to develop and produce point detonating quick/delay fuze of Mortar 3) a guideline for producing point detonating quick/delay fuze of Mortar. The features and capabilities of point detonating quick/delay fuze of Mortar would be qualified military standards and to be brought into the production line. In this research, reverse engineering is method for analyzing technical data and other information. There are two main related mechanical parts. The function of the first part is for safety and the second part is for detonator when impacting the target and leading to various defects from the feasibility study in the past to improve. The development focuses on mechanical components to be able to work efficiently and accurately. Regarding the various parts of the mechanical mechanism relatively small, the high accuracy and precision machine is very important for determine production process of various parts. The fuzes are made domestically In addition, it has developed explosive convoys with explosive power suitable for various type of mortar. From the research, knowledge is to enable the personnel of Weapon Production Centre, Defence Industry and Energy centre to produce point detonating quick/delay fuze of Mortar. The result reveals that the fuze performs well accounting for 97 percent of success.

Keywords: Fuze, Mortar Fuze, Point Detonating Fuze, Point Detonating Quick Delay Fuze of Mortar.

1. บทนำ

ขบวนเป็นอุปกรณ์ หรืออาวุธยุทธโธปกรณ์ที่บรรจุวัตถุระเบิดไว้ภายใน เพื่อใช้สำหรับจุดวัตถุระเบิดตามเงื่อนไขที่กำหนด นอกจากนี้ขบวนยังมีอุปกรณ์นิรภัยที่มีกลไกด้านความปลอดภัยเพื่อปกป้องผู้ใช้งานจากการระเบิดก่อนเวลาอันควร หรือโดยไม่ได้ตั้งใจ ตัวอย่าง เช่น ลูกปืนใหญ่ ขบวนพร้อมทำงาน (Arms) [1], [2] โดยอาศัยความแรงของลูกปืนใหญ่ หรือการหมุนรอบตัวเองเพื่อปลดล็อกกลไกภายในขบวนที่แยกตัวจุดระเบิดออกจากส่วนบรรจุหลักจนกระทั่งลูกปืนถูกยิง [3]

1.1 ขบวนปืนใหญ่ (Artillery Fuze) [4] เป็นขบวนหัวที่ใช้กับลูกกระเบิดยิงจากเครื่องยิงลูกกระเบิด (ลย/ค.) หรือปืนใหญ่ ขบวนบางชนิดอาจมีเฉพาะองค์ประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์ หรือทางกลที่จำเป็นในการส่งสัญญาณหรือกระตุ้นการระเบิด แต่มีขบวนบางตัวที่มีวัตถุระเบิดปฐมภูมิจำพวกดินเริ่มจำนวนเล็กน้อยเพื่อเริ่มต้นการระเบิด ขบวนสำหรับลูกปืนขนาดใหญ่อาจมีดินระเบิดที่เป็นตัวขยายการระเบิดรวมอยู่ด้วยเพื่อสนับสนุนการระเบิดให้สมบูรณ์ ขบวนปืนใหญ่ [5], [6], [7] เป็นอุปกรณ์กลไกประกอบเข้ากับเรือนหัวลูกปืนเพื่อให้ทำงานตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยทั่วไปแล้วจะจำแนกขบวนตามเงื่อนไขการจุดระเบิดดังนี้

1.1.1 เมื่อกระทบเป้า (Impact Fuze) จะทำการจุดระเบิดซึ่งจะมี 2 ตำแหน่ง คือ จุดที่ส่วนปลายหัวลูกปืน (Point Detonating: PD) หรือจุดที่ส่วนท้ายหัวลูกปืน (Base Detonating: BD) เรียกชว่นแบบนี้ว่า ชว่นกระทบแตก

1.1.2 เมื่อถึงเวลาที่กำหนดไว้หลังจากการยิง ซึ่งจะมีกลไกแบบลานนาฬิกาหรือมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เรียกว่า ชว่นเวลา (Time Fuze)

1.1.3 จุดระเบิดเมื่อส่งสัญญาณตรวจพบเป้าในระยะใกล้กับพื้น โครงสร้าง หรือเป้าหมายอื่น ๆ เรียกว่า ชว่นคลื่นวิทยุ (Proximity Fuze) [8], [9]

1.2 ชว่นทุกประเภทจะมีการออกแบบให้มีอุปกรณ์นิรภัยเพื่อความปลอดภัยในการเก็บรักษาหรือนำไปใช้งาน ซึ่งคุณลักษณะด้านความปลอดภัยของชว่นจะเป็นดังนี้

1.2.1 เป็นลักษณะลวดนิรภัยขัดเสียบขัดอุปกรณ์ภายในชว่นไม่ให้กลไกเกิดการเคลื่อนที่

1.2.2 เป็นลักษณะกลไกการทำงานขัดขวางหรือเอียงหลบชว่นการวัดระเบิดไม่ให้อยู่ในแนวเดียวกัน โดยทั่วไปชว่นที่ผลิตสำหรับใช้กับลูกปืนจะปลดล็อกเพื่อให้ชว่นพร้อมทำงาน (Arms) ตามคุณลักษณะของอาวุธปืนที่ใช้ทำการยิงมี 2 ประเภท ดังนี้

1) ชว่นที่ใช้กับปืนที่ไม่มีเกลียวในลำกล้อง เช่น เครื่องยิงลูกระเบิด (Mortars) ชว่นชนิดนี้จะอาศัยหลักการปลดล็อกเพื่อให้ชว่นพร้อมทำงาน โดยอาศัยแรงเฉื่อยถอยหลัง (Setback Forces) ที่เกิดจากความเร่งในการเคลื่อนที่ของลูกปืนภายในลำกล้องปืน

2) ชว่นที่ใช้กับปืนที่มีเกลียวในลำกล้องปืน เช่น ปืนใหญ่ (Artillery) ชว่นชนิดนี้จะอาศัยหลักการปลดล็อกเพื่อให้ชว่นพร้อมทำงาน โดยอาศัยแรงเฉื่อยถอยหลังที่เกิดจากความเร่งในการเคลื่อนที่ของลูกปืนภายในลำกล้องปืน และแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Forces) ที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองเมื่อหัวลูกปืนเคลื่อนที่ตามเกลียวลำกล้องปืน

ศูนย์อำนวยการสร้างอาวุธ ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร (ศอว.ศอพท.) มีขีดความสามารถและประสบการณ์ในการประกอบรวมนว่นหัวของกระสุนปืนใหญ่และลูกระเบิดยิงมากกว่า 100,000 นว่นหัว โดยในปี พ.ศ.2527 ศอว.ศอพท.ได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีในการประกอบและทดสอบชว่นหัวสำหรับกระสุนปืนใหญ่ และ ลย./ค. จากสาธารณรัฐเกาหลี ซึ่งองค์ประกอบของชว่นหัวมีความจำเป็นต้องจัดหาจากต่างประเทศ ซึ่งใช้ระยะเวลาในการจัดหาค่อนข้างนาน และราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องบางกรณีไม่สามารถจัดหาองค์ประกอบของชว่นหัวจากต่างประเทศได้ เนื่องจากประเทศผู้ผลิตไม่ขายให้ ศอว.ศอพท.จึงได้ดำเนินการศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาชว่นหัวกระทบแตกไว/ถ่วงเวลา ร่วมกับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสถาบันไทย - เยอรมัน โดยได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากกรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกลาโหม ผลการศึกษาวิจัยได้ต้นแบบ และองค์ความรู้ทางเทคนิคต่าง ๆ สำหรับนำมาต่อยอด และต่อมาได้ดำเนินการวิจัยและพัฒนาชว่นหัวกระทบแตกไว/ถ่วงเวลา สำหรับ ลย./ค. โดยได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เพื่อสร้างองค์ความรู้และเทคโนโลยีในการพัฒนาชนวนหัวกระแทกไวถ่วงเวลา สำหรับ ลย./ค.
- 2.2 เพื่อพัฒนาและสร้างชนวนหัวกระแทกไว ถ่วงเวลา สำหรับ ลย./ค.
- 2.3 เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างชนวนหัวกระแทกไว ถ่วงเวลา สำหรับ ลย./ค. ที่มีคุณลักษณะ และขีดความสามารถตามเกณฑ์มาตรฐานทางทหารและนำเข้าสู่สายการผลิตต่อไป

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- 3.1 ในทางการทหาร ชนวนเป็นส่วนหนึ่งของอาวุธ ที่มีอุปกรณ์กลไกการทำงานหลักอยู่ 2 ส่วน คือ
 - 3.1.1 ส่วนที่ทำหน้าที่ด้านความปลอดภัย ซึ่งจะป้องกันการทำงานของชนวนก่อนเวลาอันควร เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน หรือความปลอดภัยในการเก็บรักษา รวมถึงความปลอดภัยในการขนส่ง ซึ่งกลไกจะเป็นลักษณะประเภทเชิงกล หรือไฟฟ้า หรือทั้งสองอย่างรวมกัน
 - 3.1.2 ส่วนที่ทำหน้าที่จุดระเบิดให้ทำงาน [10], [11] แบบกระแทกแตก (Point Detonating: PD) ชนวนจะทำงานเมื่อชนวนหัวกระแทกเป้าหมาย พลังงานจลน์ที่เกิดจากการกระแทก จะถูกส่งไปยังเข็มแทงชนวน พลังงานจากเข็มแทงชนวนจะส่งต่อไปกับวัตถุระเบิดประเภทดินเริ่มที่ไวต่อการเสียดสี เช่น Lead Styphnate [12] เกิดการจุดตัวขึ้น ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะได้ในรูปของแรงดันและความร้อนส่งต่อไปตามขบวนการวัตถุระเบิด ชนวนลูกปืน ลย./ค. ที่ใช้ตามเหล่าทัพของไทยส่วนใหญ่เป็นแบบกระแทกแตกไว ถ่วงเวลา รุ่น PD DM 111 A5 [13]
- 3.2 ชุดนิรภัยชนวนลูกปืน ลย./ค. PD DM 111 A5 ประกอบด้วยชุดนิรภัยจิ้งหะ (Pulse Safety) และสลักนิรภัย (Safety Pin) ตัวสลักนิรภัยจะขัดอยู่ในชุดนิรภัยจิ้งหะ ซึ่งจะทำหน้าที่ ยึดล็อกตัวโรเตอร์ (Rotor) ที่มีเชื้อประทุ (Detonator) อยู่ 2 ตัว และยังทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ส่วนประกอบต่าง ๆ หลุดออกจากตำแหน่ง ตัวโรเตอร์ ของชนวนจะถูกยึดล็อกเยื้องแนวอยู่ในตำแหน่งปลอดภัย ป้องกันขบวนการจุดตัวของวัตถุระเบิด ยิ่งไปกว่านั้นตัวเข็มแทงชนวน (Firing Pin) ยังถูกวางอยู่ในตำแหน่งรูช่องว่างของโรเตอร์อีกด้วย เมื่อถอดสลักนิรภัยออก และมีแรงเฉื่อยถอยหลังมากกว่าหรือเท่ากับ 650g เมื่อทำการยิงลูกปืน ชุดจิ้งหะนิรภัยจะปลดล็อกโรเตอร์ ทำให้โรเตอร์หมุนเคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่งแนวขบวนการวัตถุระเบิดพร้อมทำงาน (Armed) ซึ่งระบบนี้จะถูกหน่วงเวลาไว้ให้ลูกปืนเคลื่อนที่จากปากลำกล้องเป็นระยะมากกว่า 40 เมตร ชนวนจะยังไม่พร้อมทำงาน จนกว่าลูกปืนจะพ้นระยะ 40 เมตร ห่างจากปากลำกล้อง ชุดความปลอดภัยของชนวนนี้จะประกันความปลอดภัยทั้งในระหว่างการบรรจุ การยิง การเก็บ และการเคลื่อนย้ายขนส่งด้วย โดยเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ MIL STD 331C [14] และ MIL STD 1316C [15]
- 3.3 มาตรฐานการทดสอบ MIL STD 331C เป็นมาตรฐานทางทหารที่นำเสนอการทดสอบและประเมินความปลอดภัย ความน่าเชื่อถือ และประสิทธิภาพของชนวน และส่วนประกอบ โดยจำแนกชนิดการทดสอบเป็น 6 กลุ่ม ดังนี้
 - 3.3.1 กลุ่ม A การทดสอบความทนทานต่อการกระแทกทางกล (Mechanical Shock Test) เป็นการทดสอบชนวนโดยการควบคุมการกระแทกแบบครั้งเดียว หรือแบบกระแทกซ้ำ ซึ่งเป็นการทดสอบความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นขณะทำการขนส่ง หรือในการใช้งาน

3.3.2 กลุ่ม B การทดสอบความต้านทานการสั่นสะเทือน (Vibration Test) เป็นการทดสอบชนวนโดยการควบคุมการสั่นสะเทือนที่ความถี่แอมพลิจูด และสภาพความคงทนที่คาดว่าจะเกิดขึ้นขณะขนส่ง หรือขณะการใช้งาน

3.3.3 กลุ่ม C การทดสอบความต้านทานต่อสภาพภูมิอากาศ (Climatic Test) เป็นการทดสอบชนวนโดยให้ชนวนสัมผัสกับสภาพภูมิอากาศที่สุดขั้วในช่วงเวลาที่กำหนด

3.3.4 กลุ่ม D การทดสอบความปลอดภัย และความพร้อมในการทำงาน (Safety, Arming and Functioning Test) เป็นการทดสอบสมรรถนะของชนวน เช่น ความปลอดภัยในการระเบิด (Explosive Safety) ระยะในการพร้อมทำงาน (Arming Distance) หรือเวลาพร้อมทำงาน (Arming Time) และผลการจุดระเบิดหลัก

3.3.5 กลุ่ม E การทดสอบความต้านทานการส่งทางอากาศ (Aircraft Munition Test) เป็นการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งทางอากาศของชนวนทั้งการกระแทก และการรับแรงที่อาจจะเกิดขึ้นขณะทำการบินขึ้น และขณะทำการลงจอด รวมถึงอุบัติเหตุที่อาจจะเกิดจากเครื่องบิน หรือจากการโยนโดยเจตนา

3.3.6 กลุ่ม F การทดสอบความต้านทานต่อไฟฟ้า และอิทธิพลของแม่เหล็ก (Electric and Magnetic Test) เป็นการทดสอบความต้านทานต่อไฟฟ้าสถิต (ESD) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EMR) และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแรงสูง (EMP) แสง และในสภาพอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

3.4 มาตรฐาน MIL STD 1316C เป็นมาตรฐานทางทหารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ความปลอดภัยในการออกแบบชนวน อุปกรณ์สำหรับความปลอดภัย และการพร้อมทำงานของชนวน ซึ่งเป็นระเบียบย่อยของชนวน การกำหนดเกณฑ์ความปลอดภัยที่จำเป็นสำหรับการออกแบบชนวน มีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 มีระบบความปลอดภัยของชนวน เพื่อเป็นการสร้างความมั่นใจในการใช้งานชนวน ไม่ให้ชนวนพร้อมทำงานโดยไม่ตั้งใจ

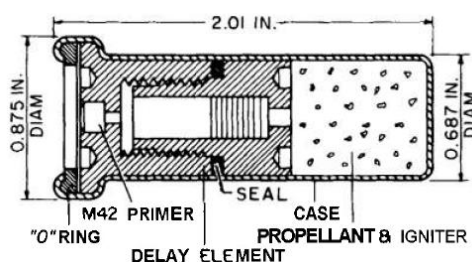
3.4.2 มีการขัดจังหวะลำดับการทำงานของวัตถุระเบิด (Explosive Train Interruption) โดยลำดับการทำงานของวัตถุระเบิด โดยเริ่มจากวัตถุระเบิดที่มีความไวในการจุดตัวมาก ไปยังวัตถุระเบิดที่มีความไวในการจุดตัวน้อย (ขบวนการวัตถุระเบิด, Explosive Train) [16],[17] มีดังนี้

3.5 ขบวนการวัตถุระเบิดแรงต่ำ (Low Explosive Train) มีองค์ประกอบสำคัญหลักอยู่ 2 ส่วน

3.5.1 ส่วนบรรจุประเภดินเริ่ม อยู่ในไพรเมอร์ หรือตัวจุดระเบิด

3.5.2 ดินขับ หรือตัวสร้างแก๊สอื่นๆ

อาจจะมีส่วนประกอบอื่นรวมอยู่ด้วย เช่น ตัวถ่วงเวลา ตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขบวนการวัตถุระเบิดแรงต่ำ

3.6 ขบวนการวัตถุระเบิดแรงสูง (High Explosive Train) มีองค์ประกอบสำคัญดังนี้

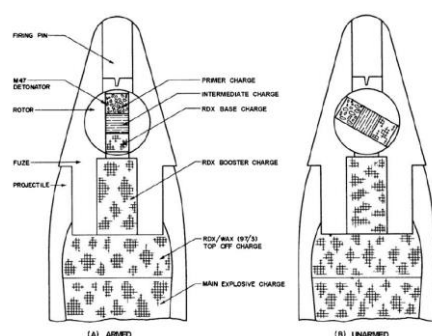
3.6.1 ส่วนบรรจุดินระเบิด (Primer) ซึ่งจะทำงานเมื่อได้รับพลังงานกล หรือพลังงานไฟฟ้า จะเกิดปฏิกิริยาให้ก๊าซร้อนออกมา

3.6.2 ส่วนวัตถุระเบิดที่แรงระดับกลาง (Detonator) จะเปลี่ยนจากการลุกไหม้เป็นการระเบิด

3.6.3 ส่วนวัตถุระเบิดประเภทดินขยายการระเบิด (Booster) จะสร้างคลื่นกระแทกออกมา

3.6.4 ส่วนบรรจุดินระเบิดหลัก (Main Charge)

อาจมีองค์ประกอบอื่นอีกเพื่อวัตถุประสงค์พิเศษ เช่น ตัวถ่วงเวลาการระเบิด ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขบวนการวัตถุระเบิดแรงสูง

การทำงานของชนวนอาศัยการระเบิดแบบต่อเนื่องของวัตถุระเบิด ภายในชนวนมีการทำงานของอุปกรณ์เชิงกล หรือไฟฟ้า หรือทั้งสองอย่างรวมกัน สำหรับจุดดินระเบิดในขบวนการวัตถุระเบิด สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ ประกอบรวมอยู่ในเรือนชนวน ประกอบด้วย ดินระเบิด ดินนำระเบิด ดินขยายการระเบิด สำหรับชนวนถ่วงเวลาจะมีดินถ่วงเวลาคั่นอยู่ระหว่างดินระเบิดกับดินนำระเบิด การทำงานเริ่มต้นจากเข็มแทงชนวนกระแทกที่จอกกระแทก (Primer) หรือพลังงานไฟฟ้าจุดวัตถุระเบิด แรงระเบิดจากจอกกระแทกแตกจะส่งพลังงาน ทำให้เกิดการระเบิดที่เชื้อปะทุ (Detonator) ตามด้วยดินระเบิดนำ (Lead Charge) และส่งต่อพลังงานไปยังดินขยายการระเบิด (Booster) เกิดการระเบิดไปจุดดินระเบิดหลัก (Main Charge) ตามลำดับ

4. วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

ชนวนหัวลูกปืนที่จะศึกษาวิจัยในครั้งนี้จะเป็นชนวนหัวชนิดกระแทกแตกไว (Point Detonating) ถ่วงเวลา (Delay) สำหรับลูกปืน ลย./ค. โดยใช้วิธีวิศวกรรมย้อนรอยตรวจสอบข้อมูลทางเทคนิคและข้อมูลอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับชิ้นส่วนอุปกรณ์กลไกการทำงานหลักอยู่ 2 ส่วน ส่วนแรกทำหน้าที่ด้านความปลอดภัย และส่วนที่สองทำหน้าที่จุดระเบิดให้ทำงานเมื่อชนวนกระแทกเป้าหมาย และนำปัญหาข้อบกพร่องต่าง ๆ จากการศึกษาความเป็นไปได้ในอดีตมาปรับปรุงแก้ไข โดยเริ่มศึกษาคุณลักษณะในส่วนของอุปกรณ์ชิ้นส่วนด้านความปลอดภัย อุปกรณ์ชิ้นส่วนชุดจุดระเบิด และขบวนการวัตถุระเบิด จากนั้นดำเนินการออกแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ ของชนวน

หัวลูกปืน โดยใช้วัสดุที่สามารถจัดหาในประเทศเป็นหลัก ชิ้นส่วนอุปกรณ์ทั้งหมดของชนวนจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานด้านสรรพาวุธ

4.1 ศึกษาหลักการทำงาน : ชนวนหัวชนิดกระทบแตกไว/ถ่วงเวลา สำหรับลูกปืน ลย./ค. จะพร้อมทำงานเมื่อถอดสลักนิรภัย และลูกปืนถูกยิงออกจากลำกล้องปืนด้วยความแรง โดยแรงเฉื่อยถอยหลังของแกนแท่งขัดจังหวะนิรภัยจะทำให้สปริงเคลื่อนที่ยุบตัวลง และปลดล็อกชุดชิ้นส่วนกลไกภายในชุดนิรภัยจังหวะของชนวนให้โรเตอร์หมุนมายังตำแหน่งพร้อมทำงาน เรียกตำแหน่งนี้ว่าตำแหน่ง อาร์ม โดยมีอุปกรณ์ดังนี้

4.1.1 อุปกรณ์นิรภัย มีระบบความปลอดภัย 2 เงื่อนไขตามมาตรฐานที่กำหนด ทำงานดังนี้

เงื่อนไขที่ 1 ระบบป้องกันแรง และการเคลื่อนตัวของชิ้นส่วนอุปกรณ์ภายในชนวนที่จะให้ไพโรเมอร์จุดตัว มีสลักนิรภัยขัดอยู่ในชุดนิรภัยจังหวะ ซึ่งจะทำหน้าที่ยึดล็อกตัวโรเตอร์ที่มีเชื้อประทุอยู่ และยังทำหน้าที่ป้องกันไม่ไห้ส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในชนวนเคลื่อนตัวหลุดออกจากตำแหน่ง เพื่อป้องกันแรงเฉื่อยที่จะเกิดขึ้นจากอุบัติเหตุต่าง ๆ โดยจะต้องผ่านเกณฑ์การทดสอบด้วยวิธีการ Drop Test ตามมาตรฐานที่กำหนด

เงื่อนไขที่ 2 ขบวนการวัฏธะระเบิดจัดเรียงแนวแบบเอียงศูนย์กัน

1) อาศัยแรงเฉื่อยถอยหลังมากกว่าหรือเท่ากับ 340g เพื่อปลดล็อกสลัก ซึ่งเป็นระบบป้องกันที่ดีที่สุดเนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นจากอุบัติเหตุจากการหยิบยกขนย้ายโดยทั่วไปจะไม่สูงพอ สลักที่อยู่ภายในชนวนจะไม่ปลดล็อก ไม่อาร์ม

2) มีโรเตอร์เพื่อหมุนหน่วงเวลาและเอียงเอียงหลบขบวนการวัฏธะระเบิด เมื่อสลักปลดล็อกจะทำให้โรเตอร์เป็นอิสระในการเคลื่อนที่เป็นจังหวะ ซึ่งโรเตอร์จะใช้เวลาประมาณ 0.8 วินาที ในการหมุนเพื่อให้ตำแหน่งแนวของดินเริ่มมาอยู่ในแนวเข็มแทงชนวนเมื่อหัวลูกปืนเคลื่อนที่ห่างจากปากลำกล้องมากกว่า 50 เมตร เป็นเกณฑ์ระยะความปลอดภัยที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานการทดสอบ

4.1.2 การทำงานเมื่อกระทบเป้าแบบระเบิดเร็ว (Super Quick) เมื่อหัวลูกปืนกระทบเป้าจะส่งพลังงานไปยังเข็มแทงชนวนไปกระทบดินเริ่มในชุดของหลอดดินปะทุชนิดระเบิดไว เปลวไฟจากดินเริ่มไปจุดดินนำ ดินขยายการระเบิด และดินระเบิดหลัก ตามลำดับ

4.1.3 การทำงานเมื่อกระทบเป้าแบบถ่วงเวลา (Delay) เมื่อหัวลูกปืนกระทบเป้าจะส่งพลังงานไปยังเข็มแทงชนวนไปกระทบดินเริ่มในชุดของหลอดดินเชื้อปะทุชนิดระเบิดหน่วงเวลาประมาณ 0.05 วินาที เปลวไฟจากดินเริ่มไปจุดดินนำ ดินขยายการระเบิด และดินระเบิดหลัก ตามลำดับ

ชนวนหัวชนิดกระทบแตกไว/ถ่วงเวลา สำหรับลูกปืน ลย./ค. ตามรูปที่ 3 รุ่นนี้เป็นรุ่นแรกที้ออกแบบให้ถ่ายทอดการผลิต มีกลไกการทำงานไม่ซับซ้อนมาก เน้นความปลอดภัยในการใช้งานเป็นหลัก ตัวเรือนทำจากอะลูมิเนียมแข็งแบบขึ้นเดียวและมีฐานเกลียวที่สามารถประกอบเข้ากับส่วนปลายเรือนหัวลูกปืน ลย./ค. ขนาดต่าง ๆ ได้ มีช่องบรรจุชิ้นส่วนชุดนิรภัยกลไกด้านความปลอดภัยและชุดกลไกการจุดระเบิดพร้อมชุดดินขยายการระเบิด



รูปที่ 3 ขนวนหัวชนิดกระแทกแตกไว ถ่วงเวลา สำหรับลูกปืน ลย./ค.

4.2 ออกแบบและเขียนแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ ของขนวน

การออกแบบชิ้นส่วนขนวนหัวลูกปืน ลย./ค. จะอ้างอิงองค์ความรู้จากหน่วยงานที่ได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากต่างประเทศ และเอกสารเกี่ยวกับคุณลักษณะเฉพาะของขนวน ลย./ค. ชนิดต่างๆ ตามรูปที่ 4 โดยเน้นการใช้วัสดุที่สามารถจัดหาได้ในประเทศ ที่มีคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐานทางทหารที่กำหนด ดังนี้

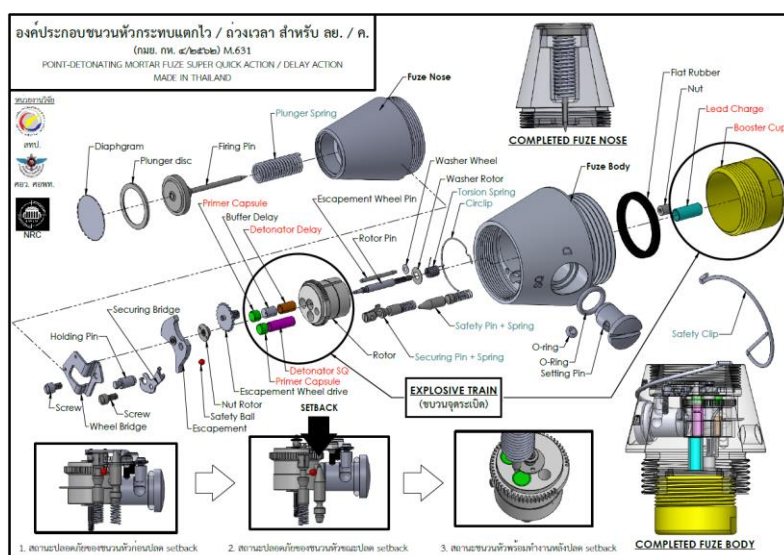
4.2.1 ชุดขนวนส่วนบน ประกอบด้วย

- 1) เรือนส่วนปลาย (Fuze Nose) ทำจาก อลูมิเนียม AL7075
- 2) แผ่นปิดส่วนปลาย (Diaphragm) ทำจาก อลูมิเนียม AL6061
- 3) แหวนรับเข็มแทงขนวน (Plunger Disc) ทำจาก อลูมิเนียม AL7075
- 4) เข็มแทงขนวน (Firing Pin) ทำจาก สแตนเลส SUS303Cu
- 5) สปริงรับเข็มแทงขนวน (Plunger Spring) ทำจาก สแตนเลส SUS304

4.2.2 ชุดขนวนส่วนล่าง ประกอบด้วย

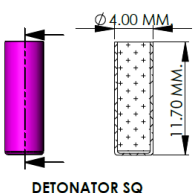
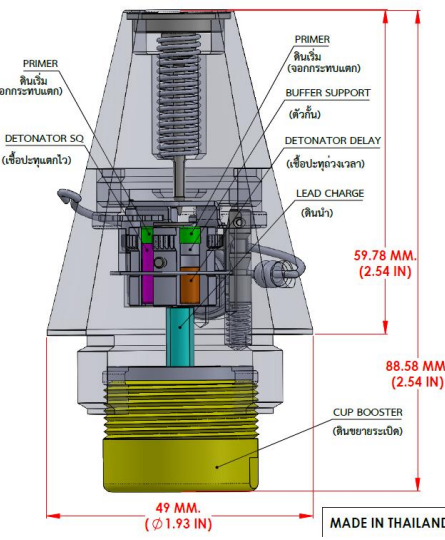
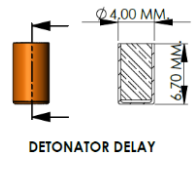
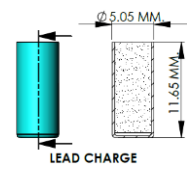
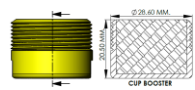
- 1) เรือนส่วนล่าง (Fuze Body) ทำจาก อลูมิเนียม AL7075
- 2) ชุดเลือกการทำงาน
 - (1) แกนตั้งการทำงาน (Setting Pin) ทำจาก อลูมิเนียม AL7075
 - (2) แหวนยาง (O Ring) ทำจาก ยาง NBR
 - (3) เข็มล็อก (Holding Pin) ทำจาก สแตนเลส SUS303Cu
- 3) ชุดโรเตอร์
 - (1) แกนโรเตอร์ (Rotor Pin) ทำจาก เหล็ก 12L14
 - (2) แหวนโรเตอร์ (Washer Rotor) ทำจาก ทองเหลือง C3604
 - (3) น็อตยึดแกนโรเตอร์ (Nut) ทำจาก ทองเหลือง C3604
 - (4) โรเตอร์ (Rotor) ทำจาก อลูมิเนียม AL6061
 - (5) หลอดดินระเบิดไว (Detonator SQ) ทำจาก อลูมิเนียม AL7075
 - (6) หลอดดินระเบิดถ่วงเวลา (Detonator Delay) ทำจาก อลูมิเนียม AL7075

- (7) สปริงโรเตอร์ (Torsion Spring) ทำจาก สแตนเลส SUS304
- (8) น็อตโรเตอร์ (Nut Rotor) ทำจาก ทองเหลือง C3604
- (9) หมุดหยุด (Stopper Pin) ทำจาก สแตนเลส SUS303Cu
- 4) ชุดนิรภัย
 - (1) สลักนิรภัย (Safety Clip) ทำจาก สแตนเลส SUS304
 - (2) แกนขัดโรเตอร์ (Securing Pin) ทำจาก สแตนเลส SUS303Cu
 - (3) สปริงแกนขัดโรเตอร์ (Securing Pin Spring) ทำจาก สแตนเลส SUS304
 - (4) แกนนิรภัย (Safety Pin) ทำจาก สแตนเลส SUS303Cu
 - (5) สปริงแกนนิรภัย (Safety Pin Spring) ทำจาก สแตนเลส SUS304
 - (6) ลูกบอล (Ball) ทำจาก เหล็ก K510
 - (7) แผ่นล็อกแกน (Securing Bridge) ทำจาก สแตนเลส SUS304
 - (8) น็อต (Screw) ทำจาก สแตนเลส SUS303Cu
 - (9) แหวนล็อก (Circlip) ทำจาก สแตนเลส SUS304
- 5) ชุดความคุมจังหวะการหมุนของโรเตอร์
 - (1) แกนเฟืองควบคุมจังหวะ (Escapement Wheel Pin) ทำจาก เหล็ก SKS3
 - (2) แหวนแกนเฟือง (Washer Wheel) ทำจาก ทองเหลือง C3604
 - (3) เฟืองควบคุมจังหวะ (Escapement Wheel) ทำจาก สแตนเลส SUS303Cu
 - (4) แผ่นควบคุมจังหวะ (Escapement) ทำจาก ทองเหลือง C2680
 - (5) แผ่นล็อก (Wheel Bridge) ทำจาก สแตนเลส SUS304
 - (6) น็อต (Screw) ทำจาก สแตนเลส SUS303Cu



รูปที่ 4 ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของขบวนหัวชนิดกระสุนแตกไว/ถ่วงเวลา สำหรับลูกปืน ลย./ค.

4.3 ออกแบบขบวนการวัดระเบิด

รายการ	ส่วนประกอบ (%)		รูปประกอบรวม
 DETONATOR SQ	เลทสติฟเนท (Lead Styphnate)	20	
	เททราซีน (Tetrazene)	30	
 DETONATOR DELAY	แบเรียมไนเตรท (Barium Nitrate)	5	
	แอนติโมนีซัลไฟด์ (Antimony Sulfide)	5	
 LEAD CHARGE	อลูมิเนียมพาวเดอร์ (Aluminium Powder)	15	
	PETN	25	
	เลทสติฟเนท (Lead Styphnate)	30	
	เททราซีน (Tetrazene)	30	
 CUP BOOSTER	PETN	40	
	PETN	100	

4.4 สร้างชิ้นส่วนต่าง ๆ ของขบวน ตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของขบวนหัวชนิดกระแทกไว/ถ่วงเวลา สำหรับลูกปืน ลย./ค.

4.5 ทดสอบขบวน

4.5.1 การทดสอบยอมรับงานชิ้นการทดสอบภาคโรงงาน (ห้องปฏิบัติการ) เป็นการทดสอบขบวนที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว

ตารางที่ 1 การทดสอบชนวนหัว

ลำดับ	ประเภทการทดสอบ	วัตถุประสงค์	เกณฑ์การทดสอบ
1.	การตรวจสอบความเรียบร้อย การประกอบทางกายภาพ ของชนวนหัว แบบสุ่มตัวอย่าง	เพื่อตรวจสอบขนาดมิติและ ความเรียบร้อยของการ ประกอบรวม	AQL = 0.1 - ขนาดของชนวนหัวเป็นไปตามแบบ AQL = 1.0 - เกิดการสึกกร่อนที่เรือนชนวน AQL = 2.5 - ความถูกต้องของการพันสี
2.	การทดสอบการกระแทก (Jolt Test) จำนวน 10 ชุด	เพื่อตรวจสอบความปลอดภัย ขณะขนย้ายในการบรรทุก ด้วยรถยนต์	AQL = 0.1 - ชิ้นส่วนดินระเบิดของเชื้อประทุ ไม่หลุด, หลวม หรือ หายไป - วัตถุระเบิดต้องไม่มีการระเบิด
3.	การทดสอบการกลิ้งกระทบ (Jumble Test) จำนวน 10 ชุด	เพื่อตรวจสอบความปลอดภัย ขณะขนย้ายด้วยรถยนต์	AQL = 0.1 - ชิ้นส่วนดินระเบิดของเชื้อประทุ ไม่หลุด, หลวม หรือ หายไป - ชนวนหัวอยู่ในสภาพที่ปลอดภัย
4.	Drop 12 เมตร จำนวน 10 ชุด	เพื่อจำลองการเกิดอุบัติเหตุ ในกรณีที่มีการขนย้ายขึ้นที่ สูง เช่น การยกชนวนหัวขึ้น เรือ	AQL = 0.1 - เมื่อทดสอบแล้ว ชนวนหัวจะต้อง อยู่ในสภาพปลอดภัย - ชิ้นส่วนดินระเบิดของเชื้อประทุ ไม่หลุด, หลวม หรือ หายไป
5.	การทดสอบ Transportation Vibration จำนวน 10 ชุด	เพื่อจำลองการสั่นเหือน ในขณะขนย้าย	AQL = 0.1 - ชิ้นส่วนดินระเบิดของเชื้อประทุ ไม่หลุด, หลวม หรือ หายไป - ไม่มีชิ้นส่วนหลุดออกมา
6.	การทดสอบรอยรั่ว (Leak Detection) แบบ Bubble Method จำนวน 10 ชุด	เพื่อทดสอบการรั่วซึมของ ชนวนหัว	AQL = 1.0 - ต้องไม่พบฟองอากาศที่ออกจาก ชนวนหัวขณะทำการทดสอบ
7.	Salt Fog จำนวน 10 ชุด	เพื่อจำลองเหตุการณ์การ เก็บรักษาในสภาวะแวดล้อม ที่ใกล้กับทะเล	AQL = 0.1 - ชนวนหัวอยู่ในสภาพที่ปลอดภัย

4.5.2 การทดสอบความปลอดภัย (Arming Safety) และ การทดสอบการทำงาน (Functioning)

ตารางที่ 2 ยิงทดสอบกระบอกปืน

ลำดับ	ประเภทการทดสอบ	วัตถุประสงค์	เกณฑ์การทดสอบ
1.	การทดสอบความปลอดภัย (Arming Safety) จำนวน 10 นัด	เพื่อทดสอบการทำงานของ ชนวนหัวเมื่อกระบอกปืนหมายถึง ชนวนหัวจะต้องไม่ทำงาน	AQL = 0.1 - ชนวนหัวระเบิดก่อนถึงเป้าหมาย AQL = 1.0 - ชนวนทำงานที่เป้าหมาย
2.	การทดสอบการทำงาน (Functioning) จำนวน 10 นัด	เพื่อทดสอบการทำงานของ ชนวนหัวเมื่อกระบอกปืนหมายถึง ชนวนหัวจะต้องทำงาน	AQL = 0.1 - ชนวนหัวระเบิดก่อนถึงเป้าหมาย

4.5.3 การทดสอบภาคสนาม จำนวน 30 นัด

ตารางที่ 3 ยิงทดสอบภาคสนาม

ลำดับ	ประเภทการทดสอบ	วัตถุประสงค์	เกณฑ์การทดสอบ
1.	การทดสอบเมื่อกระบอกปืนหมายถึงแบบกระบอกแตกไว	เพื่อทดสอบการทำงานของชนวนหัวเมื่อกระบอกปืนหมายถึงเป็นพื้นที่โล่งง่ายต่อการตรวจการณ์ ไม่มีสิ่งกีดขวาง เมื่อชนวนหัวกระบอกปืนหมายถึง ชนวนหัวจะต้องทำงาน	AQL = 0.1 - ชนวนหัวระเบิดก่อนถึงเป้าหมาย
2.	การทดสอบการทำงานเมื่อกระบอกปืนหมายถึงแบบถ่วงเวลา	เพื่อทดสอบการทำงานของชนวนหัวเมื่อกระบอกปืนหมายถึงเป็นพื้นที่โล่งง่ายต่อการตรวจการณ์ ไม่มีสิ่งกีดขวาง เมื่อชนวนหัวกระบอกปืนหมายถึง ชนวนหัวจะต้องทำงาน	AQL = 0.1 - ชนวนหัวระเบิดก่อนถึงเป้าหมาย

5. ผลการศึกษา

การตรวจสอบความเรียบร้อยการประกอบทางกายภาพของชนวนหัว ใช้แผนการชักตัวอย่างระดับการตรวจสอบทั่วไป (Level II) แบบเชิงเดี่ยว (Single Sampling Plan) ตรวจสอบด้วยสายตา และตรวจวัดขนาดมิติชิ้นส่วนต่าง ๆ ของชนวน ตามแบบพิมพ์เขียว ทดสอบภาคโรงงาน ตามรูปที่ 6 ถึง 11 และยิงทดสอบตามรูปที่ 12 ถึง 13 ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานที่กำหนด

5.1 ผลการทดสอบภาคโรงงาน ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานที่กำหนด



รูปที่ 6 ทดสอบการกระแทก (Jolt Test)



รูปที่ 7 ทดสอบการกลิ้งกระทบ (Jumble Test)



รูปที่ 8 ทดสอบสั่นสะเทือน
(Transportation Vibration Test)



รูปที่ 9 ทดสอบการตกกระทบ (Drop test) ที่
ความสูง 1.5 เมตร และ 12 เมตร



รูปที่ 10 ทดสอบการกันน้ำ (Waterproofness)



รูปที่ 11 ทดสอบผลกระทบจากละอองน้ำเกลือ
(Salt Spray Test)

5.2 การทดสอบความปลอดภัยที่ระยะ 50 เมตร ห่างจากปากลำกล้อง (Non Arming) และชนวนพร้อมทำงานที่ระยะ 120 เมตร ห่างจากปากลำกล้อง (Arming) ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานที่กำหนด



รูปที่ 12 ทดสอบยิงเป้าระยะ 50 เมตร และ 120 เมตร

5.3 การยิงทดสอบการทำงานของชนวนหัวกับ ลย./ค.60 (Function Test) ชนวนทำงานสมบูรณ์จำนวน 29 นัด ทำงานไม่สมบูรณ์จำนวน 1 นัด ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานที่กำหนด



รูปที่ 13 ทดสอบยิงภาคสนาม

6. สรุป

ชนวนหัวกระแทกแตกไว ถ่วงเวลา สำหรับ ลย./ค. ที่ศึกษาวิจัยมีคุณลักษณะ และขีดความสามารถตามเกณฑ์มาตรฐานทางทหาร โดยการวิจัยนี้จะใช้วิธีวิศวกรรมย้อนรอยตรวจสอบข้อมูลทางเทคนิคและข้อมูลอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับชิ้นส่วนอุปกรณ์กลไกการทำงานหลักอยู่ 2 ส่วน ส่วนแรกทำหน้าที่ด้านความปลอดภัย และ

ส่วนที่สองทำหน้าที่จุดระเบิดให้ทำงานเมื่อชนวนกระทบเป้าหมาย และนำปัญหาข้อบกพร่องต่าง ๆ จากการศึกษาความเป็นไปได้ในอดีตมาปรับปรุงแก้ไข โดยได้เน้นเรื่องการพัฒนาชิ้นส่วนกลไกทางกล ให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและได้แบบรูปที่ถูกต้องแม่นยำ เพื่อนำมากำหนดกระบวนการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ของชนวนหัวขึ้นเองโดยใช้วัสดุที่จัดหาภายในประเทศเป็นหลัก นอกจากนี้ยังได้พัฒนาชนวนวัตถุระเบิดที่มีอำนาจการระเบิดที่เหมาะสมกับ ลย./ค. ชนิดต่าง ๆ ซึ่งจากการดำเนินการวิจัยสามารถสร้างองค์ความรู้ให้กำลังพลของ ศอว.ศอพท. ผลิตชนวนหัวกระทบแตกไว ถ่วงเวลา สำหรับ ลย./ค. ได้ และจากการยิงทดสอบการทำงานของชนวนหัวกระทบแตกไว ถ่วงเวลา สำหรับ ลย./ค. 60 มม. จำนวน 30 หัว พบว่าชนวนไม่ทำงาน 1 หัว พิจารณาในภาพรวมชนวนมีประสิทธิภาพ 97 เปอร์เซ็นต์ ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานการทดสอบของศูนย์อำนวยการสร้างอาวุธ ผลงานวิจัยนี้ได้นำไปขยายผลสู่การผลิตแล้ว จำนวน 10,000 ชุด มีคุณภาพตามเกณฑ์ที่คณะกรรมการมาตรฐานยุทธโธปกรณ์กระทรวงกลาโหมกำหนด โดย ศอว.ศอพท. แต่ยังไม่มีความพร้อมประสิทธิภาพจากหน่วยผู้ใช้

กิติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับงบประมาณจากสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) ดำเนินการขยายผลงานวิจัยสู่สายการผลิตโดย ศอว.ศอพท. และผ่านการรับรองมาตรฐานจากคณะกรรมการมาตรฐานยุทธโธปกรณ์กระทรวงกลาโหม (กมย.กท.) กมย.กท. 4/2562

เอกสารอ้างอิง

- [1] U.S. Army. Technical manual, Army ammunition data sheets artillery, Ammunition guns, Howitzers, Mortars, Recoilless Rifles, Grenade launchers, and Artillery fuzes. Washington, DC, Department of the Army; 2003.
- [2] Global Security. Safing, arming, fuzing, and firing (SAFF) [Internet]. Virginia: Global Security ; c2000-2023 [cited 2022 May 9]. Available from: <http://www.globalsecurity.org/wmd/intro/safe.htm>
- [3] United States Naval Academy. Weapons and systems engineering department: Fundamentals of naval weapons systems [Internet]. Maryland: United States Naval Academy; (date unknown) [cited 2022 May 9]. Available from: <http://www.fas.org/man/dod-101/navy/docs/fun/part14.htm>
- [4] Authority of the Chief of the Defence Staff. Field artillery Volume 6: Ballistics and ammunition [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 1992 [cited 2022 May 9]. Available from: <https://web.archive.org/web/20100209173804/http://armyapp.dnd.ca/ael/pubs/B-GL-371-006-FP-001.PDF>
- [5] Bethel CHA. Modern artillery in the field. London: Macmillan; 1911.

- [6] Hogg OFG. Artillery: its origin, heyday and decline. Hamden: Archon Books; 1970.
- [7] Hogg IV, Thurston LF. British artillery weapons & ammunition 1914-1918. London: Ian Allan; 1972.
- [8] Department of the Army. Ammunition, general. 5th ed. Washington DC; 1969.
- [9] Wali A. Delta M137 Mod 3: Next generation electronic Fuze [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; c2023 [cited 2022 May 9]. Available from: https://www.academia.edu/34860350/DELTA_M137_MOD_3_Next_Generation_Electronic_Fuze_Chapter_1_AN_INTRODUCTION_TO_MECHANICAL_AND_ELECTRONIC_FUZES
- [10] Ness L, Williams AG. Jane's ammunition handbook 2007-2008. 16th ed. Croydon: Janes Information Group; 2007.
- [11] Ness L, Williams AG. IHS Jane's weapons ammunition. Croydon: Janes Information Group; 2012.
- [12] Department of the Army. Military explosive. 4th ed. Washington, DC: [publisher unknown]; 1984.
- [13] Junghans Defence. DM111A5 Point-Detonating Mortar Fuze [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; c2023 [cited 2022 May 9] Available from: <https://www.defenceprocurementinternational.com/Content/Profiles/junghans-defence/mortarfuze-dm111a5-datasheet.pdf>
- [14] Department of Defense Test Method Standard. MIL-STD-331C: Fuze and fuze components, Environmental and performance tests for department of defense United States of America. [place unknown]: [publisher unknown]; 2005.
- [15] Safety Criteria for Department of Defense United States of America. Military standard: Fuze design. [place unknown]: [publisher unknown]; 1991.
- [16] Department of the Army Headquarters United States Army Materiel Command. Engineering design handbook: Explosives series explosive trains. Alexandria (VA): [publisher unknown]; 1974.
- [17] NAVAL ORDNANCE LAB WHITE OAK MD. Ordnance explosive train designers' handbook. [place unknown]: [publisher unknown]; 1952.

การสังเคราะห์ลิแกนด์ N, N'-โพรพิลีนบิส-เบนโซไฮดรอกซามาไมด์

และการเกิดพันธะโคออร์ดิเนชันกับไอออนทองแดง (II)

The Synthesis of N, N'-Propylene Bis-Benzohydroxamamide Ligands and Coordination with Copper(II) Ions

สมศักดิ์ ศิริไชย¹ และ ขจิตภัย ทิพย์พ่อง²

Somsak Sirichai¹ and Khajadpai Thipyapong²

Received: April 8, 2023

Revised: May 11, 2023

Accepted: May 16, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการสังเคราะห์ลิแกนด์เตตระเดนเตทจากไบเดนเตทลิแกนด์เบนโซไฮดรอกซามาไมด์ ด้วยขั้นตอนที่ง่ายเพียงสองขั้นตอน การสังเคราะห์เริ่มจากเปลี่ยนเบนซาลโดซิมเป็นเบนซาลดีไฮด์ไฮดรอกซิมิโนอัลกอฮอล์ แล้วนำไปทำปฏิกิริยากับ 1,3-โพรพิลีนไดเอมีน ได้ลิแกนด์เตตระเดนเตทที่ประกอบด้วยเบนโซไฮดรอกซามาไมด์สองหน่วยที่เชื่อมต่อกันด้วยโพรพิลีนและได้ร้อยละผลผลิตทั้งหมดเท่ากับ 65.01 สารประกอบโคออร์ดิเนชันของลิแกนด์นี้กับคอปเปอร์ (II) ไอออนศึกษาด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี และแมสสเปกโทรสโกปี พบว่ามีอัตราส่วนโลหะต่อลิแกนด์เป็น 1:1 วิธีที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเตรียมอนุพันธ์ของเบนโซไฮดรอกซามาไมด์ที่อาจนำไปใช้เป็นอาหารเสริมหรือใช้ประโยชน์อื่น ๆ ทางเภสัชวิทยาได้

คำสำคัญ: อะมิโดออกซิม, เบนโซไฮดรอกซามาไมด์, เอ็น,เอ็น'-โพรพิลีน บิส-เบนโซไฮดรอกซามาไมด์

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา บางแสน อำเภอมือ จังหวัดชลบุรี 20131 ประเทศไทย
Assistant Professor, Department of Chemistry, Faculty of Science, Burapha University, Bangsarn, Mueang, Chonburi, 20131, Thailand
E-Mail: sirichai@go.buu.ac.th

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา บางแสน อำเภอมือ จังหวัดชลบุรี 20131 ประเทศไทย
Assistant Professor, Department of Chemistry, Faculty of Science, Burapha University, Bangsarn, Mueang, Chonburi, 20131, Thailand
E-Mail: khajadpa@go.buu.ac.th

Abstract

In this research, the synthesis of tetradentate ligand from benzohydroxamamide bidentate ligand was developed by using a simple two-step protocol. Firstly, Benzaldoxime was converted to benzaldehyde hydroximinoyl chloride. Then, Benzaldehyde hydroximinoyl chloride was reacted with 1,3-propylenediamine to obtain the tetradentate ligand. This ligand consisted of two units of benzohydroxamamide connecting by propylene. The overall yield of a tetradentate ligand was 65.01 percents. The coordination compound of this ligand with copper (II) ion was characterized by UV-Visible spectroscopy, Infrared spectroscopy, and Mass spectroscopy. It was found that the metal to ligand ratio was 1:1. The developed method was applied to prepare ligands containing derivative of benzohydroxamamide, and the ligands can be used as food supplement or medical use.

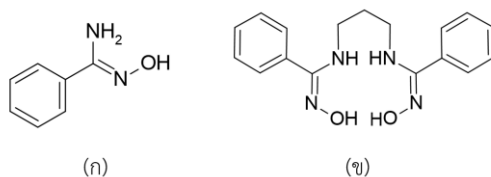
Keywords: Amidoximes, Benzohydroxamamide, N, N'-propylene bis-benzohydroxamamide

1. บทนำ

ทองแดงเป็นธาตุที่จำเป็นต่อร่างกาย และมีบทบาทสำคัญในกระบวนการชีวภาพหลายอย่าง ในร่างกายมีทองแดงประมาณ 100 มิลลิกรัม ทองแดงเป็นปัจจัยร่วมของเอนไซม์รีดอกซ์หลายชนิด พบว่าทองแดงช่วยให้ร่างกายดูดซึมธาตุเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้ระดับเฮโมโกลบินในเลือดเป็นปกติ นอกจากนั้นทองแดงยังช่วยในการทำงานของวิตามินซีให้มีประสิทธิภาพเช่นกัน รวมถึงควบคุมการเผาผลาญกลูโคสและการปรับระดับอินซูลินในร่างกายให้มีความสมดุล [1] ถ้าร่างกายขาดทองแดงทำให้เกิดโรคหลายชนิด ได้แก่ โรคโลหิตจาง อากาบริวม โรคของกระดูก โรคข้ออักเสบรูมาตอยด์ และโรคอัลไซเมอร์ [2] ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของภาวะสมองเสื่อมและทำให้การตอบสนองต่ออินซูลินลดลง การนำกลูโคสเข้าสู่เซลล์ลดลงและเกิดอาการของโรคเบาหวานได้ [3] แต่ทองแดงก็มีข้อเสียคือ หากร่างกายได้รับทองแดงปริมาณมากเป็นเวลานานจะเป็นพิษกับตับและทำให้เสียชีวิตได้ ทองแดงปริมาณมากเกินไปก่อให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลและเป็นสาเหตุของโรควิลสัน (Wilson's Disease) โดยทั่วไปร่างกายรับทองแดงจากการรับประทานอาหาร ได้แก่ ถั่วลิสงเตา ถั่วเมล็ดแห้งชนิดต่าง ๆ โฮลวีต ลูกพรุน เครื่องในสัตว์ อาหารทะเล และกุ้งทะเล เป็นต้น คอปเปอร์คีเลตมีบทบาทสำคัญในการควบคุมปริมาณทองแดงในร่างกาย การลดเซียมการขาดทองแดงทำได้โดยการรับประทานคอปเปอร์คีเลตเป็นอาหารเสริม โดยทั่วไปมักอยู่ในรูปสารประกอบไกลซีนคอปเปอร์ (II) ที่มีความเป็นพิษต่ำกว่าทองแดงในรูป Cu^{2+} ไอออน ในทางกลับกันมีการใช้คอปเปอร์คีเลตในการกำจัดทองแดงส่วนเกินออกจากร่างกาย เรียกว่าคีเลชันบำบัด (Chelation Therapy) โดยใช้ลิแกนด์ ดี-เพนิซิลลามีน (D-Penicillamine) หรือลิแกนด์อื่นๆ ที่ไม่เป็นพิษต่อร่างกายจับกับ Cu^{2+} ไอออนด้วยพันธะโคออร์ดิเนชัน เมื่อเกิดเป็นคอปเปอร์คีเลตแล้วทองแดงจะถูกขับถ่ายออกจากร่างกายต่อไป [4]

สารประกอบอะมิโดออกซิม (Amidoximes) [5] เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน และไฮดรอกซีอิมิโนอยู่บนอะตอมคาร์บอนเดียวกัน และอาจมีหมู่ฟังก์ชันที่สามเป็นหมู่ไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ เช่น หมู่อะลิฟาติกหรืออะโรมาติก จึงทำให้เกิดโครงสร้างที่แตกต่างกันได้มากมาย สารประกอบที่มีหมู่แทนที่ฟังก์ชันที่สามเป็นวงเบนซีน (รูปที่ 1 (ก.)) คือ เบนโซไฮดรอกซามาไมด์ (Benzohydroxamamide; BHam) สารประกอบนี้เป็นที่สนใจของนักเคมี นักชีวเคมี และนักชีววิทยาเพื่อนำมาพัฒนาสารที่มีฤทธิ์ทางยา [6,7] โดย BHam หรือ เบนซามาไมโดออกซิม (Benzamidoxime) หรือ เอ็น-ไฮดรอกซีเบนซามิดีน (N-Hydroxybenzamidine) หรือ เบนซามาไมด์ออกซิม (Benzamideoxime) เกิดอนุพันธ์ที่ตำแหน่งออกซิเจนได้ อนุพันธ์ที่เตรียมนี้ได้มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ คือ ใช้เป็นยาต้านวัณโรค ต้านแบคทีเรีย ต้านไวรัส ต้านการอักเสบ สารต้านอนุมูลอิสระ และอื่นๆ มีการนำอนุพันธ์ของเบนซามาไมโดออกซิมจำนวนหนึ่งมาใช้เป็นยาแล้ว และอีกหลายชนิดอยู่ระหว่างการทดลองทางคลินิก [8] โครงสร้างโมเลกุล BHam ที่ประกอบด้วยอะตอมผู้ให้อิเล็กตรอน คือ ไนโตรเจน และออกซิเจน ทำให้ BHam มีสมบัติเป็นลิแกนด์ชนิดไบเดนเตตที่เกิดพันธะโคออร์ดิเนชันได้สองพันธะกับไอออนของธาตุทรานสิชันหลายชนิด เช่น Co^{2+} Co^{3+} Ni^{2+} และ UO^{2+} [9,10] และยังพบว่า BHam เกิดเป็นสารประกอบโคออร์ดิเนชันกับไอออนของ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (เทคนิคซีเอ็ม-99m) ได้ดีและมีความเสถียรสูง โดยเทคนิคซีเอ็มเป็นธาตุทรานสิชันที่มีเลขอะตอมเท่ากับ 43 และทุกไอโซโทปเป็นไอโซโทปรังสี โดยไอโซโทปรังสีของ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ สลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 140 keV มีค่าครึ่งชีวิต 6.01 ชั่วโมง เป็นไอโซโทปที่นิยมนำมาใช้ในทางการแพทย์เพื่อสร้างรูปถ่ายรังสีในการวินิจฉัยโรค มีการศึกษาการเตรียม $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -BHam เพื่อใช้เป็นสารถ่ายภาพด้วยรังสี [11] และเพื่อเพิ่มความเสถียรจึงมีการสังเคราะห์เตตระเดนเตตลิแกนด์จากลิแกนด์ BHam โดย L. Xu, และคณะ ทำการสังเคราะห์สารประกอบโคออร์ดิเนชัน $^{99\text{m}}\text{Tc}$ กับลิแกนด์ เอ็น, เอ็น'-โพรพิลีน บิส-เบนโซไฮดรอกซามาไมด์ (N,N'-propylene bis-benzohydroxamamide; $\text{C}_3(\text{BHam})_2$) โดยสังเคราะห์ลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ (รูปที่ 1 (ข.)) โดยเริ่มจากนำลิแกนด์ BHam มาสังเคราะห์เป็น Potassium 3-phenyl- Δ^2 -1,2,4-oxadiazolin-5-one แล้วต่อเชื่อมกับ 1,3-ไดโพรโมโพรเพน โดยมีขั้นตอนการสังเคราะห์รวมทั้งหมด 6 ขั้นตอน จึงได้ลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ ที่ต้องการ [12] ทำให้ได้ร้อยละผลผลิตรวมต่ำเนื่องจากมีหลายขั้นตอนและยังต้องใช้เวลานานในการสังเคราะห์

ในงานวิจัยนี้รายงานวิธีการสังเคราะห์ลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ วิธีใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง ใช้เวลาน้อย มีขั้นตอนน้อยลง ให้ผลผลิตที่สูงขึ้น และนำลิแกนด์ที่ได้มาศึกษาการเกิดสารประกอบโคออร์ดิเนชันกับ Cu^{2+} ไอออน เพื่อสังเคราะห์สารประกอบ $\text{Cu-C}_3(\text{BHam})_2$ ที่อาจนำไปประยุกต์ใช้เป็นอาหารเสริมหรือใช้ประโยชน์อื่น ๆ ทางทางการแพทย์ได้



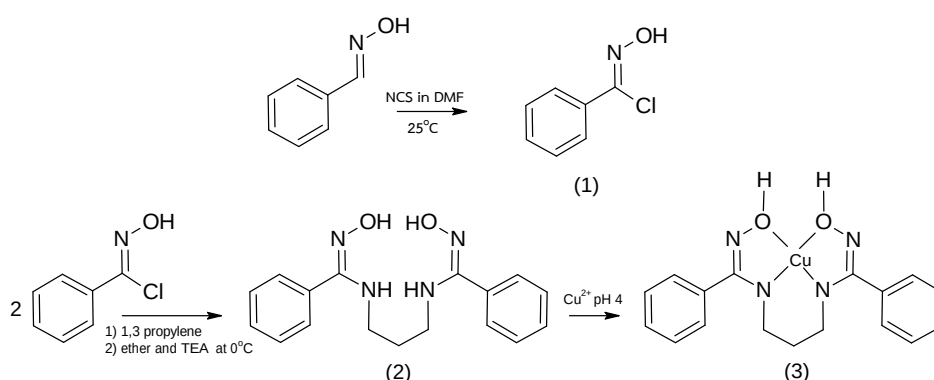
รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของลิแกนด์ BHam (ก) และลิแกนด์ N,N'-propylene bis-benzohydroxamamide ($\text{C}_3(\text{BHam})_2$) (ข)

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เพื่อพัฒนาวิธีการใหม่ในการสังเคราะห์ลิแกนด์ $C_3(BHam)_2$
- 2.2 ศึกษาการเกิดสารประกอบโคออร์ดิเนชันของ Cu^{2+} ไอออนกับลิแกนด์ $C_3(BHam)_2$ ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Visible Spectroscopy) อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared Spectroscopy) และแมสสเปกโทรสโกปี (Mass Spectroscopy)

3. วิธีดำเนินการวิจัย

สังเคราะห์ลิแกนด์ $C_3(BHam)_2$ โดยการเตรียมเบนซาลดีไฮด์ไฮดรอกซิมิโนอีลคลอไรด์ (Benzaldehyde Hydroximinoyl Chloride) จากเบนซาลโดซิม (Benzaldoxime) และเอ็น-คลอโรซักซินาไมด์ (N-Chlorosuccinimide) แล้วนำมาสังเคราะห์ลิแกนด์ $C_3(BHam)_2$ โดยเชื่อมต่อเบนซาลดีไฮด์ไฮดรอกซิมิโนอีลคลอไรด์สองโมเลกุลกับ 1,3-โพรพิลีนไดเอมีน จากนั้นนำลิแกนด์ $C_3(BHam)_2$ ที่ได้มาศึกษาการเกิดเป็นสารประกอบโคออร์ดิเนชันในสารละลายกับ $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 – 1000 นาโนเมตร แล้วจึงทำการสังเคราะห์สารประกอบโคออร์ดิเนชันของ $Cu-C_3(BHam)_2$ ขั้นตอนการสังเคราะห์ลิแกนด์ $C_3(BHam)_2$ และไอออนเชิงซ้อนระหว่าง Cu^{2+} ไอออนกับลิแกนด์ $C_3(BHam)_2$ แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ลิแกนด์ $C_3(BHam)_2$ และไอออนเชิงซ้อนระหว่าง Cu^{2+} ไอออนกับลิแกนด์ $C_3(BHam)_2$

3.1 เครื่องมือและสารเคมี

เครื่องยูวี-วิสิเบิล ไดโอด อาร์เรย์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Diode Array Spectrophotometer) รุ่น 8453 UV-Vis ของบริษัท Agilent Technologies ประเทศสหรัฐอเมริกา เครื่องวัดพีเอช รุ่น PHI 34 ของบริษัท Beckman ประเทศสหรัฐอเมริกา สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ของบริษัท Tokyo Chemical Industry ประเทศญี่ปุ่น แผ่น TLC ที่ใช้ตัวดูดซับชนิดซิลิกาเจล (NH Modified) ของบริษัท FUJIFILM Wako Pure Chemical Corporation ประเทศญี่ปุ่น

3.2 การสังเคราะห์ เบนซาลดีไฮด์ ไฮดรอกซีมีโนล คลอไรด์ (1)

ละลาย 9.08 กรัม (0.08 Mole) ของเบนซาลโดซิม ในไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) ที่ปราศจากน้ำ 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25 - 30 องศาเซลเซียส เติม 10.01 กรัม (0.08 โมล) ของเอ็น-คลอโรซึกซินาไมด์ ลงในสารละลายเบนซาลโดซิม คนสารละลายตลอดเวลา อ่านอุณหภูมิของสารละลาย จะเห็นว่าอุณหภูมิของสารละลายเบนซาลโดซิมลดต่ำลง ที่ไว้ประมาณ 10 - 15 นาที เพื่อให้ปฏิกิริยาเริ่มต้น โดยสังเกตจากอุณหภูมิของสารละลาย เมื่อเห็นว่าอุณหภูมิเริ่มเพิ่มขึ้นจึงเติมเอ็น-คลอโรซึกซินาไมด์เพิ่มอีก 13.35 กรัม (0.10 โมล) โดยเติมทีละน้อยเพื่อควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 25 องศาเซลเซียส (ทำในอ่างน้ำเย็น) หลังจากเติมเอ็น-คลอโรซึกซินาไมด์จนหมด รอให้ปฏิกิริยาสิ้นสุดประมาณ 1 - 2 ชั่วโมง ติดตามปฏิกิริยาด้วยแผ่น TLC N-H กับตัวชะ 5% เมทานอลในคลอโรฟอร์ม หรือสังเกตจากอุณหภูมิของสารละลายคงที่และเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้ว เทสารละลายทั้งหมดลงในน้ำเย็น 250 มิลลิลิตร แล้วสกัดด้วยไดเอทิลอีเธอร์ 50 มิลลิลิตร 2 ครั้ง รวมชั้นอีเธอร์ นำไปล้างด้วยน้ำครั้งละ 10 มิลลิลิตร ล้างจนน้ำล้างมี pH เท่ากับ 4 กำจัดน้ำออกจากชั้นอีเธอร์ด้วยแมกนีเซียมซัลเฟตแอนไฮดรัส กรองแล้วระเหยอีเธอร์ออก ทำให้แห้งภายใต้สุญญากาศ 4 - 6 ชั่วโมง ได้ของเหลวหนืดใสไม่มีสี น้ำหนัก 10.94 กรัม ร้อยละผลิตภัณฑ์เท่ากับ 91.5 พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย ^1H NMR ใน CDCl_3 δ 7.80m (3H, Ar), 7.31m (2H, Ar) และ 11.34 (1H, OH)

3.3 การสังเคราะห์ลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ (2)

ละลายเบนซาลดีไฮด์ ไฮดรอกซีมีโนล คลอไรด์ 2.00 กรัม (0.0129 โมล) ในไดเอทิลอีเธอร์ 20 มิลลิลิตร แฉ่เย็นที่ 0 องศาเซลเซียส แล้วเติมสารละลายผสมของ 1,3-โพรพิลีนไดเอมีน 0.50 มิลลิลิตร (0.45 กรัม 0.0061 โมล) กับไตรเอทิลเอมีน 2.50 มิลลิลิตร (1.81 กรัม 0.0162 โมล) ในไดเอทิลอีเธอร์ 2 มิลลิลิตร ทีละหยด คนสารละลายตลอดเวลาและควบคุมอุณหภูมิที่ 0 องศาเซลเซียสในอ่างน้ำแข็ง หลังจากเติมสารละลายผสมหมดแล้ว คนต่อที่อุณหภูมิห้องอีก 2 ชั่วโมง ติดตามการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ด้วยแผ่น TLC N-H กับตัวชะ 5% เมทานอลในคลอโรฟอร์ม เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดแล้วแยกชั้นอีเธอร์และล้างด้วยน้ำจน pH เป็นกลาง ทำให้แห้งด้วยแมกนีเซียมซัลเฟตแอนไฮดรัส กรองแล้วระเหยให้แห้ง นำของแข็งสีขาวที่ได้มาตกผลึกใหม่ด้วยตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ อัตราส่วน 1:10 ได้ของแข็งสีขาว 1.35 กรัม (0.0043 โมล) จุดหลอมเหลว 146 - 148 องศาเซลเซียส ร้อยละของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 71.05 พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี ได้ผลดังนี้ ^1H -NMR ($\text{DMSO}-d_6$) : δ 9.669 (s, 2H, OH), 7.416-7.317 (m, 10H, Ar), 5.729-5.696 (t, 2H, NH), 2.840-2.891 (q, 4H, $\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{N}$), 1.390-1.356 (m, 2H, $\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{N}$). IR (KBr) 3,377.0 cm^{-1} OH (bonded O-H stretch), 1,634.7 cm^{-1} C=N (stretch) และ 1,164.4 cm^{-1} C-N (stretch)

3.4 ศึกษาการเกิดสารประกอบโคออร์ดิเนชันจากอิเล็กทรอนิกส์เปกตรา

วัดค่าการดูดกลืนแสงสารละลายความเข้มข้น 5×10^{-4} โมลาร์ของ $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และสารละลายความเข้มข้น 5×10^{-4} โมลาร์ของลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ เทียบกับสารละลายผสมความเข้มข้น 5×10^{-4} โมลาร์ ของ $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ กับ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ ที่ละลายในตัวทำละลายเอทานอลกับน้ำ ในอัตราส่วน 1:1 ที่ความยาวคลื่น 200 - 900 นาโนเมตร ได้สเปกตราแสดงในรูปที่ 3

3.5 การสังเคราะห์ไอออนเชิงซ้อน Cu^{2+} ไอออนกับลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ (3)

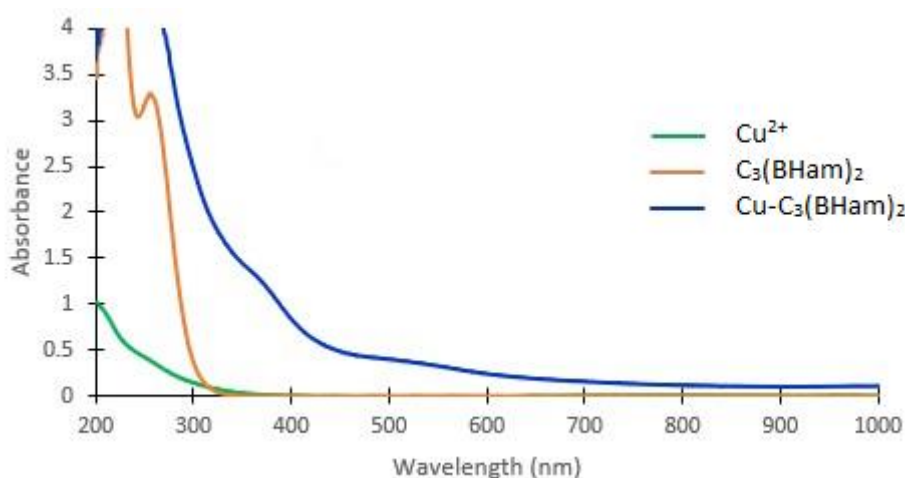
ละลายลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ น้หนัก 0.100 กรัม (0.0320 mmol) ด้วยน้ำกลั่น 2 mL ในขวดก้นกลม โดยเติม 1 M HCl ที่ละลายคนจนละลายหมด จากนั้นเติม $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ น้หนัก 0.0282 กรัม (0.0165 mmol) แล้วปรับ pH เป็น 4 ด้วย 5% NaOH แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 12 ชั่วโมง เมื่อได้ตะกอนสีน้ำตาล นำไปกรองและทำให้แห้งภายใต้สุญญากาศ ได้ของแข็งสีน้ำตาลหนัก 0.0316 กรัม จุดหลอมเหลว 144 - 146 องศาเซลเซียส ร้อยละของผลิตภัณฑ์ 51.04 และพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีได้ผลดังนี้ IR (KBr) 3,367.1 cm^{-1} OH (bonded O-H stretch) 1,635.5 cm^{-1} C=N (stretch) 1,088.4 cm^{-1} C-N (stretch) ESI MS+ for $\text{C}_{17}\text{H}_{18}\text{N}_4\text{O}_2\text{Cu}$: found: m/z^+ 375.19

4. ผลและอภิปรายผลการทดลอง

การสังเคราะห์ลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ ตามวิธีการใหม่นี้ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์รวมเท่ากับ 65.01 สูงกว่างานวิจัยที่ L. Xu, 1998 [12] ประมาณสองเท่า เนื่องจากมีขั้นตอนการสังเคราะห์ลดลงเหลือเพียง 2 ขั้นตอน และในการสังเคราะห์เบนซาลดีไฮด์ไฮดรอกซิมิโนอัลคาลอยด์ ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่สูงถึง 91.5 เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดได้ดี การควบคุมสภาวะในการเกิดปฏิกิริยาไม่ยุ่งยาก เพราะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่ไม่สูงมาก ควบคุมได้ง่ายจากอัตราการเติมเอ็น-คลอโรซึกซินาไมด์ ปฏิกิริยานี้ยังมีข้อดี คือ เอ็น-คลอโรซึกซินาไมด์ ที่ใช้เป็นสารเติมคลอไรด์เป็นของแข็งสลายตัวช้าและเสถียรในบรรยากาศ จึงไม่จำเป็นต้องทำในสภาวะเฉื่อยหรือภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน ทั้งยังมีราคาถูกและเป็นสารเคมีที่ไม่ต้องขออนุญาตนำเข้าที่ยุ่งยาก แตกต่างจากสารเคมีที่ใช้ในการทำคลอรีนชัน (Chlorination) อื่นๆ [13] จึงเป็นปฏิกิริยาที่นิยมนำมาใช้เตรียมอนุพันธ์ของเบนซาลโดซิม [13 - 16] หลังจากนั้นจึงทำการสังเคราะห์ลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ โดยการจับคู่เบนซาลดีไฮด์ไฮดรอกซิมิโนอัลคาลอยด์ กับ 1,3 ไดอะมินโพรเพน อัตราส่วน 2 ต่อ 1 ในสภาวะที่เป็นเบส ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยหมู่เอมีนที่ตำแหน่งคลอไรด์ของเบนซาลดีไฮด์ไฮดรอกซิมิโนอัลคาลอยด์ ซึ่งสามารถจับคู่กับหมู่เอมีนทั้งสองตำแหน่งได้ในครั้งเดียว การทดลองในครั้งนี้ พบว่าการควบคุมสัดส่วนโมลของเบนซาลดีไฮด์ไฮดรอกซิมิโนอัลคาลอยด์ เมื่อเทียบกับ 1,3 ไดอะมินโพรเพนให้มากเกินไปประมาณร้อยละ 5 ทำให้ได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงที่สุดและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูงผลึกเป็นแผ่นสีขาว ช่วงการหลอมเหลวแคบจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 146 - 148 องศาเซลเซียส เมื่อพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี พบว่าตำแหน่งและรูปร่างการแยกของพีคที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทั้งสองใกล้เคียงกับงานวิจัยที่เคยมีรายงานไว้ก่อนหน้านี้ [12]

การศึกษาการเกิดสารประกอบโคออร์ดิเนชันของ Cu^{2+} ไอออนกับลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ ทำโดยการเปรียบเทียบสเปกตราระหว่างสารละลาย $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ สารละลายลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ และ สารละลายผสมได้สเปกตราดังรูปที่ 3 พบว่าสเปกตรัมของสารละลายผสมมีการดูดกลืนแสงแตกต่างจากสารตั้งต้นทั้ง 2 ในช่วงความยาวคลื่น 350 - 700 นาโนเมตร แสดงถึงการเกิดพันธะโคออร์ดิเนชันระหว่าง Cu^{2+} กับลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ และจากยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัมของสารละลายผสม พบบริเวณที่อาจเกิดการดูดกลืนสูงสุด 2 ตำแหน่ง

จากสเปกตรัมที่มีค่าการดูดกลืนแสงลดลงเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นนั้น มีการลดลงไม่ต่อเนื่อง พบการเปลี่ยนความชันของแถบสเปกตรัมที่มีลักษณะราบแต่ไม่เป็นพีคชัดเจนที่ความยาวคลื่นประมาณ 365 และ 509 นาโนเมตร การดูดกลืนแสงที่พบนี้ น่าจะสอดคล้องกับการดูดกลืนแสงจากโครงสร้างสี่เหลี่ยมแบนราบหรือเตตระโกนอล สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็นได้ของสารประกอบโคออร์ดิเนชันที่มีอะตอมกลางเป็น Cu^{2+} ที่มีโครงสร้างแบบสี่เหลี่ยมแบนราบ ที่ปรากฏพีคสองพีคในสเปกตรัม โดยพีคทั้งสองเกิดจากการทรานสิชันของอิเล็กตรอนภายใน d-orbitals ของ Cu^{2+} ไอออน โดยตำแหน่งและความเข้มของแต่ละพีคของสเปกตรัมขึ้นอยู่กับโครงสร้างและชนิด ของลิแกนด์ที่เกิดพันธะโคออร์ดิเนชันไอออนทองแดง [17]



รูปที่ 3 สเปกตรัมของสารละลาย Cu^{2+} สารละลายลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ และสารประกอบ $\text{Cu-C}_3(\text{BHam})_2$

ตารางแสดงเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันจากอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

หมู่ฟังก์ชัน	$\text{C}_3(\text{BHam})_2$ (cm^{-1})	$\text{Cu-C}_3(\text{BHam})_2$ (cm^{-1})
OH (bonded O-H stretch)	3377.0	3367.1
NH (bonded N-H stretch)	3190.9	3062.7
C=N stretch	1634.7	1635.7
C-N	1164.4	1088.4

ผลการสังเคราะห์สารประกอบโคออร์ดิเนชันระหว่าง Cu^{2+} ไอออนกับลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ ได้ของแข็งสีน้ำตาล ได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ 51.04 นำสารประกอบที่ได้มาพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จากตาราง พบเลขคลื่นการสั่นพันธะของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในสารประกอบโคออร์ดิเนชัน $\text{Cu-C}_3(\text{BHam})_2$ คือหมู่ OH, NH, C=N และ C-N มีตำแหน่งเลขคลื่นที่ใกล้เคียงกับที่พบในสเปกตรัมของลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ แสดงว่าสารประกอบที่เตรียมได้มีลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ เป็นองค์ประกอบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการ

วิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสเปกโตรเมตรี ไอออนไนเซชันแมสสเปกโตรสโกปี (Electrospray Ionization Mass Spectroscopy, ESI MS) ได้ค่า m/z^+ ที่มีความเข้มสูงสุดคือ 375.19 เท่ากับผลรวมมวลของ Cu^{2+} ไอออนกับลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ อัตราส่วน 1:1 โครงสร้างที่อาจเป็นไปได้ของสารประกอบ $\text{Cu-C}_3(\text{BHam})_2$ แสดงในรูปที่ 2 (3)

5. สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้สามารถลดขั้นตอนในการสังเคราะห์ลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ จากเดิม 6 ขั้นตอน เหลือเพียงสองขั้นตอน ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์รวมเท่ากับ 65.01 ลิแกนด์ที่ได้นำมาศึกษาการเกิดสารประกอบโคออร์ดิเนชันระหว่าง Cu^{2+} ไอออนกับลิแกนด์ $\text{C}_3(\text{BHam})_2$ ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรสโกปี อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี และแมสสเปกโตรสโกปี พบว่ามีอัตราส่วนโลหะต่อลิแกนด์เป็น 1:1 สารประกอบที่ได้ อาจมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ประโยชน์เป็นอาหารเสริมในทางการแพทย์ได้ หลังจากการนำไปศึกษาความเสถียรของสารประกอบโคออร์ดิเนชัน อัตราการปลดปล่อย Cu^{2+} ไอออน ความปราศจากพิษ และอื่นๆตามมาตรฐานของการนำไปใช้เป็นอาหารเสริมหรือยา

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bost M, Houdart S, Oberli M, Kalonji E, Huneau, J, Margaritis I. Dietary copper and human health: Current evidence and unresolved issues. *J Trace Elem Med Biol.* 2016 May;35:107–15.
- [2] Klevay LM. Alzheimer's disease as copper deficiency. *Med Hypotheses.* 2008;70(4):802–7.
- [3] Siddiqui K, Bawazeer N, Scaria SJ. Variation in Macro and Trace Elements in Progression of Type 2 Diabetes. *The Scientific World Journal.* 2014 Aug 5:1–9.
- [4] Kim JJ, Kim YS, Kumar V. Heavy metal toxicity: an update of chelating therapeutic strategies. *J Trace Elem Med Biol.* 2019 Jul;54:226–31.
- [5] Eloy F, Lenaers R. The Chemistry of Amidoximes and Related Compounds. *Chem Rev.* 1962 Apr 1;62(2):155–183.
- [6] Clement B. Reduction of N-hydroxylated compounds: Amidoximes (N-hydroxyamidines) as pro-drugs of amidines. *Drug Metab Rev.* 2002 Aug;34(3):565–79.
- [7] Clement B, Christiansen K, Girreser U. Phase 2 Metabolites of N-Hydroxylated Amidines (Amidoximes): Synthesis, in Vitro Formation by Pig Hepatocytes, and Mutagenicity Testing. *Chem Res Toxicol.* 2001 Mar;14(3):319–26.
- [8] Fylaktakidou KC, Hadjipavlou LDJ, Litinas KE, Varella EA, Nicolaidis DN. Recent Developments in the Chemistry and in the Biological Applications of Amidoximes. *Curr Pharm Des.* 2008;14(10):1001–47.

- [9] Bolotin DS, Bokach NA, Kukushkin VY. Coordination chemistry and metal- involving reactions of amidoximes: Relevance to the chemistry of oximes and oxime ligands. *Coord Chem Rev.* 2015 Nov;313:62–93.
- [10] Witte EG, Schwochau KS, Henkel G. Krebs B. Uranyl complexes of acetamidoxime and benzamidoxime. Preparation, characterization, and crystal structure. *Inorganica Chimica Acta*, 1984 Jun;94(6):323–31.
- [11] Nakayama M, Xu LC, Koga Y, Harada K, Sugii A, Nakayama H, Okabayashi I. Hydroxamamide as a chelating moiety for the preparation of ^{99m}Tc -radiopharmaceuticals III. Characterization of various ^{99m}Tc -hydroxamamides. *Appl Radiat Isot.* 1997 May;48(5):571–7.
- [12] Xu LC, Nakayama M, Harada K, Nakayama H, Tomiguchi S, Kojima A, Arano Y. Synthesis and Evaluation of Hydroxamamide-Based Tetradentate Ligands as a New Class of Thiol-Free Chelating Molecules for ^{99m}Tc Radiopharmaceuticals. *Nucl Med Biol.* 1998 Apr;25(3):295-303.
- [13] Mccarroll A, Walton JC. Exploitation of aldoxime esters as radical precursors in preparative and EPR spectroscopic roles. *J Chem Soc Perkin 1.* 2000 Dec;2(12):2399–2409.
- [14] Gennet D, Zard SZ, Zhang H. Amidinyl radicals: new and useful intermediates for the synthesis of imidazolines and imidazoles. *Chem Commun (Camb).* 2003 Aug 7;(15):1870-1.
- [15] Kumar V, Kaushik MP. A novel one- pot synthesis of hydroximoyl chlorides and 2-isoxazolines using N- tert- butyl- N- chlorocyanamide. *Tetrahedron Lett.* 2006 Feb 27; 47(9):1457–60.
- [16] Shang Y, Hu M, He X, Niu Z, Yan Z, Zhou F. Synthesis of 3,4,5-Trisubstituted Isoxazoles by the 1,3- Dipolar Cycloaddition Reaction of α - Azido Acrylates and Aromatic Oximes. *Synthesis.* 2014;46(04):510–4.
- [17] Nishida Y, Kida S. A Study of Electronic Spectra of Square Planar Copper(II) and Nickel(II) Complexes by Circular Dichroism. *Bull Chem Soc Jpn.* 1970;43(12):3814–9.

การพัฒนาสารเคลือบกันน้ำเพื่อรักษาสภาพกระดาษโดยใช้

อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตและเอทิลเซลลูโลส

Development of Water-Resistant Coating for Paper Preservation Using

Calcium Carbonate Nanoparticles and Ethyl Cellulose

ชลิตา เมฆมุกดา¹

Chalita Mekmukda¹

Received: April 8, 2023

Revised: May 16, 2023

Accepted: May 18, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนาสารเคลือบป้องกันน้ำเพื่อรักษาสภาพกระดาษในรูปแบบจดหมายเหตุและหนังสือที่มีความสำคัญทางประวัติศาสตร์ โดยใช้วัสดุผสมเอทิลเซลลูโลสและอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปแบบคอลลอยด์ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่า วิธีการที่พัฒนานี้ทำให้อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตฝังตัวลงในเส้นใยของกระดาษอย่างสม่ำเสมอ โดยไม่ส่งผลต่อลักษณะภายนอกของกระดาษ จากการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำบนกระดาษแสดงให้เห็นว่า สารเคลือบกระดาษนี้ทำให้กระดาษมีสมบัติการกันน้ำเพิ่มขึ้นมาก กระดาษกรองมีมุมสัมผัสหยดน้ำเพิ่มขึ้นจาก 0 องศา เป็น 100 องศา และกระดาษจากหนังสือเก่ามีมุมสัมผัสหยดน้ำเพิ่มขึ้นจาก 75 องศา เป็น 80 ถึง 100 องศา โดยสมบัติกันน้ำเกิดขึ้นจากฟิล์มเอทิลเซลลูโลสบนกระดาษมีความไม่ชอบน้ำจากหมู่เอทิลซึ่งมีขั้วต่ำ นอกจากนี้อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตยังช่วยให้สมบัติการกันน้ำของกระดาษเพิ่มขึ้นจากความขรุขระบนพื้นผิว ปัจจัยสุดท้ายที่ทำให้สมบัติการกันน้ำเพิ่มสูงขึ้นอีกระดับคือการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดสเตียริกที่มีสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว จึงทำให้พื้นผิวของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต เกิดอันตรกิริยากับน้ำลดลง โดยสรุปแล้ววิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสำหรับการเคลือบป้องกันน้ำเพื่อรักษาสภาพกระดาษ

คำสำคัญ: อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต, เอทิลเซลลูโลส, กระดาษ, กันน้ำ

¹อาจารย์ กองวิชาเคมี ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

Lecturer, Department of Chemistry, Academic Division, Chulachomklao Royal Military Academy

E-mail: mkchalita@gmail.com

Abstract

This research has developed a water-resistant coating material to preserve the condition of paper in the form of archives, documents, and books with historical importance. A mixture of ethyl cellulose and calcium carbonate (CaCO_3) nanoparticles in a colloid form was developed and used for paper coating. The analysis with an infrared spectrometer and a scanning electron microscope revealed that this developed method allowed CaCO_3 nanoparticles to be evenly embedded in the paper fibers without affecting the external appearance of paper. The results of measuring the contact angle of water droplets on paper showed that the coating material increased the water resistance of paper. After coating, the water contact angle of filter paper increased from 0 to 100° , while the water contact angle of paper from an old book increased from 75 to $80\text{-}100^\circ$. The factors that contributed to making paper more water-resistant were ethyl cellulose film coated on paper, which was hydrophobic due to the ethyl groups. Additionally, CaCO_3 nanoparticles could enhance the water-resistance of paper due to the increased roughness of the paper surface. Lastly, the water-resistance of paper could be further improved by modifying the surface of CaCO_3 nanoparticles with stearic acid, which had a hydrocarbon chain that reduced the interaction between water and the surface of nanoparticles coated on paper. In summary, this developed method was an effective and straightforward approach to coat and protect paper from water damage.

Keywords: Calcium Carbonate Nanoparticles, Ethyl Cellulose, Paper, Water Resistance

1. บทนำ

มนุษย์ได้คิดค้นวัสดุเพื่อนำมาทำเป็นกระดาษ ไม่ว่าจะเป็นวัสดุจากธรรมชาติหรือสารเคมี กระดาษมีประโยชน์มากมายและได้นำไปใช้ในด้านต่าง ๆ นั้นเป็นเพราะคุณสมบัติเฉพาะของกระดาษที่แตกต่างจากวัสดุอื่น เช่น กระดาษมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับโลหะและแก้ว อีกทั้งยังมีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก จึงนำมาใช้เป็นวัสดุในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างอย่างแพร่หลาย เช่น วัสดุบรรจุภัณฑ์ และวัสดุในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับสุขอนามัย นอกจากนี้กระดาษยังมีค่าความสว่าง และความทึบแสงสูง มนุษย์จึงนำมาใช้บันทึกข้อมูลในรูปแบบต่าง ๆ เช่น เอกสาร, จดหมายเหต และหนังสือ แต่เมื่อใช้เป็นระยะเวลานาน กระดาษจะมีการเสื่อมสลาย ซึ่งเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น ความเป็นกรดในกระดาษ, ความร้อน และความชื้น สำหรับประเทศไทยที่มีสภาพอากาศแบบร้อนชื้นนั้น น้ำและความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญในการเสื่อมสลายของกระดาษ โดยนอกจากจะเร่งให้กระดาษเสื่อมสภาพ โดยการกระตุ้นการทำงานของสารที่มีความเป็นกรดในกระดาษแล้ว ยังทำให้เกิดการก่อตัวของเชื้อราบนกระดาษอีกด้วย การเสื่อมสภาพของกระดาษนี้ทำให้ข้อมูลความรู้ต่าง ๆ เกิดการสูญหาย ซึ่งเอกสารที่มีความสำคัญทางประวัติศาสตร์จำนวนมากกำลังประสบปัญหานี้

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาสารเคลือบป้องกันน้ำเพื่อรักษาสภาพกระดาษโดยใช้วัสดุผสมเอทิลเซลลูโลสและอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตให้อยู่ในรูปแบบของคอลลอยด์โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำไปเคลือบกระดาษโดยการจุ่มแช่และทิ้งให้แห้ง ศึกษาผลของการเคลือบต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของกระดาษด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามลำดับ สุดท้ายศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันน้ำของกระดาษด้วยการวัดมุมสัมผัสผิวน้ำ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาต่อเนื่องจากงานวิจัยศึกษาผลของสารเคลือบในการชะลอการเสื่อมสภาพของกระดาษด้วยกระบวนการเร่งอายุ [1] ซึ่งยังไม่มีการศึกษาการใช้งานสารเคลือบนี้ในการเพิ่มสมบัติกันน้ำให้กระดาษ ซึ่งจะนำไปสู่การใช้งานได้กว้างขวางมากขึ้น นอกจากจะใช้ในการอนุรักษ์เอกสารและหนังสือเก่าแล้วยังนำไปเคลือบบรรจุภัณฑ์กระดาษทดแทนสารเคลือบจากพลาสติกได้อีกด้วย

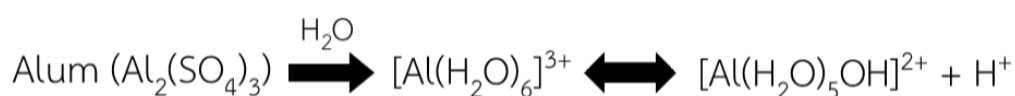
2. วัตถุประสงค์

2.1 พัฒนาสารเคลือบป้องกันน้ำเพื่อรักษาสภาพกระดาษโดยใช้วัสดุผสมเอทิลเซลลูโลสและอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวให้ไม่ชอบน้ำด้วยกรดสเตียริก

2.2 ศึกษาวิเคราะห์ผลของสารเคลือบต่อสมบัติและประสิทธิภาพการป้องกันน้ำของกระดาษ

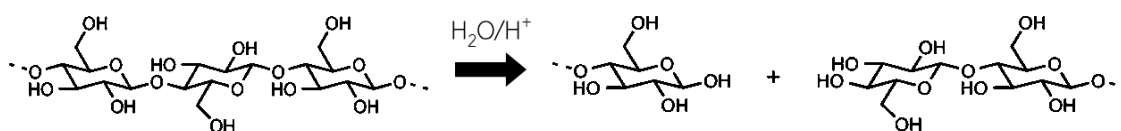
3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเสื่อมสลายของกระดาษเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น ความเป็นกรดในกระดาษ, ความร้อน, และความชื้น โดยความเป็นกรดในกระดาษเป็นสาเหตุหนึ่งของการเสื่อมสลาย โดยเฉพาะกระดาษที่ผลิตขึ้นก่อนปี ค.ศ.2000 ความเป็นกรดในกระดาษนี้เกิดขึ้นจากสารจำพวก Alum และ Rosin ที่ถูกใช้เป็น สารด้านการซึมน้ำ (Sizing Agent) ในการผลิตกระดาษ [2] สารประกอบของอะลูมิเนียม เช่น อะลูมิเนียมซัลเฟต ที่ใช้เป็น Sizing Agent สามารถเกิดการปลดปล่อยของอะลูมิเนียมไอออนในสถานะที่มีน้ำ โดยจับตัวกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งแตกตัวและปลดปล่อยความเป็นกรดออกมา [3] ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กลไกการปลดปล่อยความเป็นกรดของ Alum ภายใต้สภาวะที่มีน้ำ

ความเป็นกรดในกระดาษนี้ ทำให้เกิดกระบวนการ Depolymerisation ของเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเยื่อกระดาษ สายโซ่โมเลกุลที่ยาวของเซลลูโลสสามารถตัดให้สั้นลงด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส [4] โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ในสภาวะที่มีน้ำหรือความชื้นโดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงลดลง ฉีกขาดได้ง่าย และมีสีเหลืองมากขึ้น



รูปที่ 2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสโดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เนื่องจากความเป็นกรดคือปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเสื่อมสลายของกระดาษ จึงได้พัฒนาวิธีการเพื่อขจัดความเป็นกรด (Deacidification) โดยอาศัยหลักการคือ การทำให้สารที่มีฤทธิ์เป็นกรดในกระดาษมีฤทธิ์เป็นกลาง (Neutralization) และอีกเป้าหมายที่สำคัญคือ การนำสารที่มีฤทธิ์เป็นด่างเกาะติดลงบนกระดาษ เพื่อให้สารซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดเปลี่ยนเป็นมีฤทธิ์เป็นกลางได้ นอกจากนี้ยังมีอีกหลายวิธีที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ลดความเป็นกรดของกระดาษและชะลอการเสื่อมสลายของกระดาษ โดยแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันที่ชนิดของสารมีฤทธิ์เป็นด่าง โดยเฉพาะการใช้วัสดุนาโนซึ่งมีขนาดเล็ก ที่สามารถแทรกซึมลงในเนื้อกระดาษเพื่อขจัดความเป็นกรดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น อนุภาคนาโนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สามารถยับยั้งการเสื่อมสลายของกระดาษได้ [5 - 7] จากการทดสอบด้วยการเร่งอายุ (Accelerated Aging Test) จากนั้นได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้คอลลอยด์ของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ในสารละลายประเภทเซลลูโลสที่ดัดแปลงขึ้น (Trimethylsilyl Cellulose) โดยใช้ตัวทำละลาย คือ เฮกซะเมทิลไดไซลอกเซน (HMDSO) ในการขจัดความเป็นกรดของกระดาษ และเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษในเวลาเดียวกัน งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์สามารถแทรกซึมเข้าไปชั้นในของกระดาษได้ [8, 9]

นอกจากความเป็นกรดในกระดาษแล้ว น้ำและความชื้นยังเป็นปัจจัยสำคัญทำให้เกิดการเสื่อมสลายของกระดาษ โดยนอกจากจะเร่งให้กระดาษเสื่อมสภาพโดยกระตุ้นการทำงานของสารที่มีความเป็นกรดในกระดาษแล้ว ยังทำให้เกิดการก่อตัวของเชื้อราบนกระดาษอีกด้วย จึงได้มีการพัฒนาสารเคลือบป้องกันน้ำสำหรับกระดาษ โดยการใช้อนุภาคนาโนทำให้เกิดความขรุขระบนพื้นผิวของกระดาษ ทำให้หยดน้ำไม่สามารถซึมลงไปบนกระดาษได้ หลักการนี้คือหลักการ Lotus Effect ที่น้ำสามารถกลิ้งบนใบบัวได้ โดยมีงานวิจัยที่ใช้น้ำยาเคลือบจากอนุภาคนาโนซิลิกาที่กระจายตัวในตัวทำละลายแอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ เคลือบลงบนผิวกระดาษ ทำให้กระดาษกันน้ำได้โดยมุมสัมผัสหยดน้ำบนกระดาษเพิ่มขึ้นจาก 0 องศา เป็น 150 องศา

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาสารเคลือบป้องกันน้ำเพื่อรักษาสภาพกระดาษโดยใช้วัสดุผสมเอทิลเซลลูโลสและอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปแบบของคอลลอยด์ โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย ซึ่งยังไม่มีเคยมีรายงานการใช้ส่วนผสมนี้สำหรับการพัฒนาสารเคลือบป้องกันน้ำสำหรับกระดาษ โดยเอทิลเซลลูโลสเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่มีการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันจากไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งมีสมบัติที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เป็นหมู่เอทิล (-CH₂CH₃) ซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) [10] นอกจากนี้ยังได้มีการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยการใส่กรดสเตียริกที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ [11] เพื่อเสริมสมบัติกันน้ำให้กระดาษมากยิ่งขึ้น

4. วิธีดำเนินการศึกษา

4.1 การปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดสเตียริก

เตรียมสารละลายกรดสเตียริกอิ่มตัวปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยการเติมกรดสเตียริก (Reagent Grade 95% จาก Sigma Aldrich) ปริมาณ 12 กรัม ลงในตัวทำละลายไอโซโพรพานอล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นกวนส่วนผสมด้วยแท่งแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 30 นาที จนทำให้สารละลายใสของกรด สเตียริก อิ่มตัว ขั้นตอนต่อไปเติมอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (ขนาด 50 นาโนเมตร, 98% จาก SSNANO) ปริมาณ 10 กรัม ลงในสารละลายกรดสเตียริกอิ่มตัว กวนส่วนผสมด้วยแท่งแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำส่วนผสมไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที นำสารละลายส่วนบนออก และเก็บส่วนตะกอนไว้ จากนั้นเติมไอโซโพรพานอลลงในตะกอน เพื่อชะล้างกรดสเตียริกที่เป็นส่วนเกินจากการทำปฏิกิริยา และนำไปปั่นเหวี่ยงอีกครั้ง ขั้นตอนสุดท้ายนำตะกอนไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จนได้ผงอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปรับปรุงสมบัติพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก

4.2 การเตรียมคอลลอยด์อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในสารละลายเอทิลเซลลูโลส

เตรียมสารละลายเอทิลเซลลูโลสความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยการเติมเอทิลเซลลูโลส (48 - 49.5% (w/w) Ethoxyl Basis จาก Sigma Aldrich) ปริมาณ 4 กรัม ลงในตัวทำละลายเอทานอล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นกวนส่วนผสมด้วยแท่งแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จนได้สารละลายใสของเอทิลเซลลูโลส ขั้นตอนต่อไป เติมอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ปริมาณต่าง ๆ (0.1, 0.5, 1 และ 2 กรัม) ลงในสารละลายเอทิลเซลลูโลส จากนั้นนำส่วนผสมไปทำการกระจายอนุภาคด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที จนได้คอลลอยด์อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ (0.1, 0.5, 1 และ 2 กรัมโดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ในสารละลายเอทิลเซลลูโลส

4.3 การเตรียมตัวอย่างกระดาษเคลือบด้วยคอลลอยด์อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในสารละลายเอทิลเซลลูโลส

นำกระดาษที่ตัดเป็นชิ้นขนาดประมาณ 2x5 เซนติเมตร จุ่มแช่ในคอลลอยด์ที่เตรียมไว้ กวนสารละลายช้า ๆ ด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 15 นาที แล้วนำกระดาษขึ้นมาตากให้แห้ง ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 15 นาที ในงานวิจัยนี้ทดลองโดยใช้ตัวอย่างกระดาษ 2 ชนิด คือกระดาษกรอง (เกรดห้องปฏิบัติการ) และกระดาษจากหนังสือเก่าที่มีอายุประมาณ 40 ปี (นับจากปีที่ตีพิมพ์) เป็นหนึ่งในตัวอย่างของเอกสารเก่าจากห้องสมุดโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าซึ่งเริ่มมีการเสื่อมสภาพในขั้นต้น (มีสีเหลืองอ่อนและมีความเปราะหักง่ายกว่ากระดาษกรอง)ฯ

4.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตและตัวอย่างกระดาษเคลือบ

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA1 Module, Mettler-Toledo, Switzerland) โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที ช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 800 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที

วิเคราะห์ลักษณะเชิงโมลกุลของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตและตัวอย่างกระดาษเคลือบด้วย

เครื่อง ATR FT-IR Spectrometer (Nicolet iS5 with iD7 ATR accessory, Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, USA) ช่วงการสแกน 4000 ถึง 650 cm^{-1} จำนวน 32 การสแกน ที่ความละเอียด 4 cm^{-1}

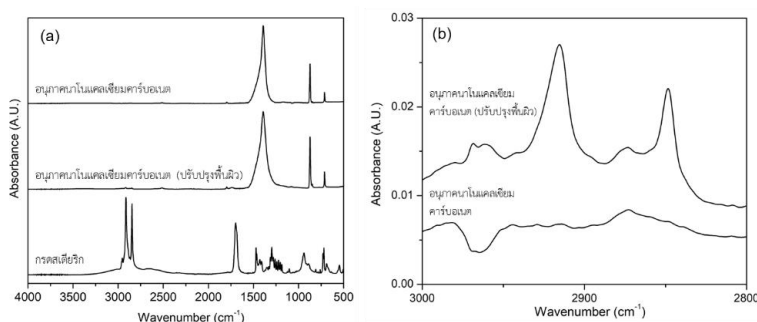
วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างกระดาษเคลือบด้วยกลีโกลทอร์คีนอเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM Model JSM-6510A from JEOL Ltd., Tokyo, Japan) โดยนำตัวอย่างกระดาษติดลงบนแผ่นรองรับอลูมิเนียมโดยใช้ Carbon Tape ก่อนนำไปวิเคราะห์

วิเคราะห์สมบัติการกักน้ำของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตและตัวอย่างกระดาษเคลือบด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสหยดน้ำ (DME-210 Contact Angle Meter, Kyowa, Japan) โดยใช้หยดน้ำปริมาตร 5 ไมโครลิตร วัดมุมสัมผัสหยดน้ำด้วยโปรแกรม FAMAS Software ทำการวัด 5 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่างและคำนวณค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสหยดน้ำ

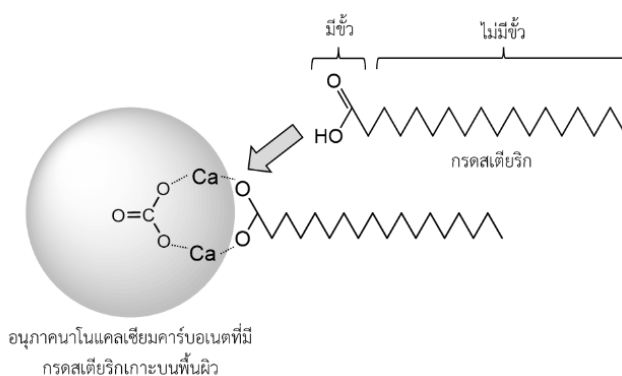
5. ผลการศึกษา

5.1 ลักษณะเชิงโมเลกุล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการกักน้ำของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปรับปรุงสมบัติพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก

ผลจากการวิเคราะห์ลักษณะเชิงโมเลกุลของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยเครื่อง ATR FT-IR Spectrometer แสดงให้เห็นอินฟราเรดสเปกตรัมที่มีพีคการดูดกลืนหลักที่ตำแหน่ง 1400 และ 880 cm^{-1} (รูปที่ 3(a)) ซึ่งเป็นการสั่นแบบ Asymmetric Stretching และ Out-of-Plane Bending ของหมู่คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ตามลำดับ [12] พีคการดูดกลืนเหล่านี้ยืนยันองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต หลังจากนำอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตไปปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก พบว่าเกิดพีคการดูดกลืนที่ตำแหน่งประมาณ 2800 ถึง 2900 cm^{-1} (รูปที่ 3(b)) ซึ่งเป็นการสั่นแบบ Stretching ของพันธะ C-H [12] ถึงแม้ว่าสัญญาณการดูดกลืนอยู่ในระดับต่ำเนื่องจากสัดส่วนปริมาณสารที่เกาะบนพื้นผิวมีน้อยเมื่อเทียบกับองค์ประกอบสารของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต พีคการดูดกลืนที่ตำแหน่งนี้บ่งบอกว่ามีกรดสเตียริกซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนเกาะบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต โดยการเกาะบนพื้นผิวนั้นเกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างส่วนที่มีขั้วของกรดสเตียริกและไอออนของแคลเซียม [11] ดังแสดงใน รูปที่ 4

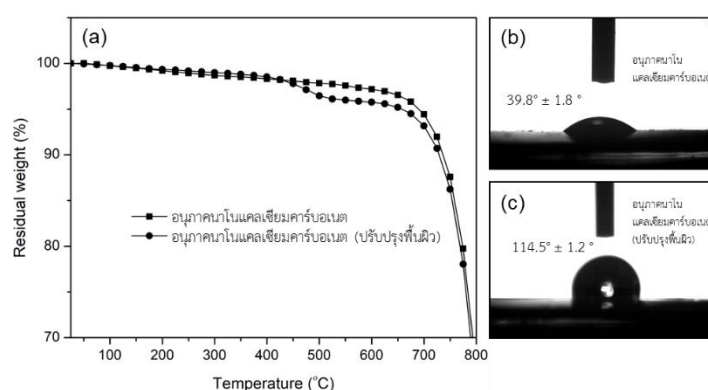


รูปที่ 3 อินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (a) การสั่นแบบ Asymmetric Stretching และ Out-of-Plane Bending ของหมู่คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และ (b) การสั่นแบบ Stretching ของพันธะ C-H



รูปที่ 4 ลักษณะการเกาะของกรดสเตียริกบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

การวิเคราะห์ลักษณะเชิงโมเลกุลสามารถบ่งบอกถึงการเกาะของกรดสเตียริกบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต แต่ไม่สามารถบ่งบอกปริมาณของกรดสเตียริกได้ ในขั้นถัดไปจึงได้นำตัวอย่างไปวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer ผลการวิเคราะห์ (รูปที่ 5(a)) แสดงให้เห็นว่าในช่วงอุณหภูมิ 450 ถึง 600 องศาเซลเซียส อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปรับปรุงพื้นผิวนั้นมีการสลายตัวด้วยความร้อนมากกว่าอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว โดยความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์โดยมวลที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ระหว่างตัวอย่างสารทั้ง 2 ชนิดนั้น เท่ากับ 1.42 % ซึ่งเป็นปริมาณของกรดสเตียริกที่เกาะบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต [13] เนื่องจากกรดสเตียริกเป็นสารอินทรีย์ที่สลายตัวด้วยความร้อนได้ง่ายกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในกรณีที่มีการปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวดัวยกรดสเตียริก โดย (a) การสลายตัวทางความร้อนของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในกรณีที่มีการปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวดัวยกรดสเตียริก (b) มุมสัมผัสหยดน้ำบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว และ (c) มุมสัมผัสหยดน้ำบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงพื้นผิว

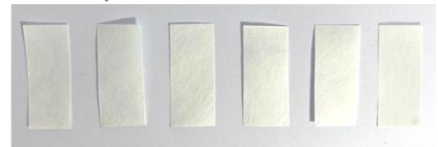
ผลจากการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปรับปรุงสมบัติพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกมีสมบัติการกันน้ำสูงกว่าอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติพื้นผิว โดยมีมุมสัมผัสของหยดน้ำเพิ่มขึ้นจาก 39.8° เป็น 114.5° หลังจากปรับปรุงสมบัติพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก ดังแสดงในรูปที่ 5 (b)-(c) ทั้งนี้เนื่องจากกรดสเตียริกมีสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว (รูปที่ 4) จึงเกิดอันตรกิริยากับน้ำ (มีขั้ว) ลดลง [14]

5.2 สมบัติทางกายภาพ ลักษณะเชิงโมเลกุล และสมบัติการกันน้ำของกระดาษเคลือบด้วยคอลลอยด์อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในสารละลายเอทิลเซลลูโลส

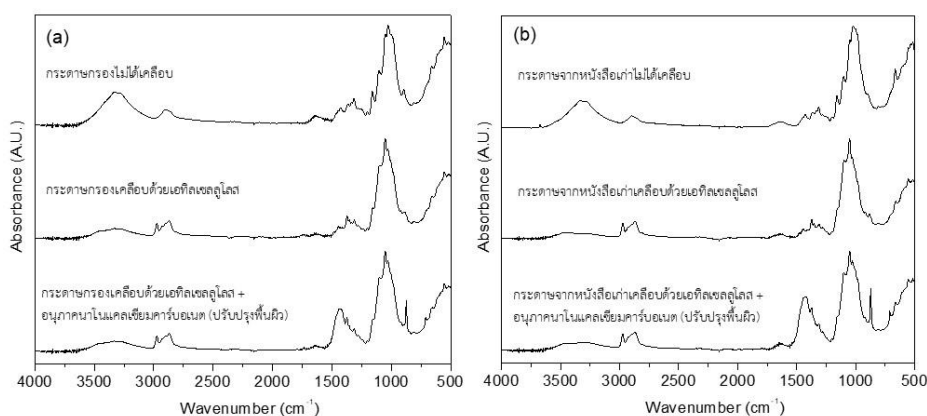
จากข้อมูลตาราง แสดงภาพถ่ายของกระดาษที่เคลือบด้วยคอลลอยด์อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ สังเกตได้ว่าสารเคลือบนี้ไม่ได้ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของกระดาษ โดยเฉพาะกระดาษจากหนังสือเก่านั้นยังคงสามารถมองเห็นตัวหนังสือได้ชัดเจนเท่ากับกระดาษที่ไม่ได้เคลือบ อย่างไรก็ตามกระดาษที่เคลือบด้วยคอลลอยด์อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 2% นั้นทำให้เกิดฟิล์มบางสีขาวขุ่นบนกระดาษ เนื่องจากเข้มข้นที่สูงมากเกินไปของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตอาจทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนบนเนื้อกระดาษ

รูปที่ 6 แสดงผลจากการวิเคราะห์ลักษณะเชิงโมเลกุลของกระดาษด้วยเครื่อง ATR FT-IR Spectrometer โดยอินฟราเรดสเปกตรัมของกระดาษที่ยังไม่ได้ผ่านการเคลือบ (ทั้งกระดาษกรองและกระดาษจากหนังสือเก่า) แสดงพีการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1000 ถึง 1100 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ C-O-C และพีการดูดกลืนแบบช่วงกว้างที่ตำแหน่ง 3300 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ O-H พีการดูดกลืนเหล่านี้บ่งบอกลักษณะเชิงโมเลกุลของกระดาษที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก [15] หลังจากนำกระดาษไปผ่านกระบวนการเคลือบด้วยคอลลอยด์อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (ความเข้มข้น 1%) ในสารละลายเอทิลเซลลูโลส อินฟราเรดสเปกตรัมแสดงพีการดูดกลืนเพิ่มที่ตำแหน่ง 1400 และ 880 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบ Asymmetric Stretching และ Out-of-Plane Bending ของหมู่คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ตามลำดับ [12]

ตาราง แสดงภาพถ่ายของกระดาษที่เคลือบด้วยคอลลอยด์อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ

	กระดาษกรอง	กระดาษจากหนังสือเก่า
	ปริมาณอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (%)	ปริมาณอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (%)
อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต	ไม่เคลือบ เคลือบเอทิลเซลลูโลสเท่านั้น 0.1 % 0.5 % 1 % 2 % 	ไม่เคลือบ เคลือบเอทิลเซลลูโลสเท่านั้น 0.1 % 0.5 % 1 % 2 % 
อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (ปรับปรุงพื้นผิว)	ไม่เคลือบ เคลือบเอทิลเซลลูโลสเท่านั้น 0.1 % 0.5 % 1 % 2 % 	ไม่เคลือบ เคลือบเอทิลเซลลูโลสเท่านั้น 0.1 % 0.5 % 1 % 2 % 

ผลการดักกลืนเหล่านี้ยืนยันการเคลือบลงบนกระดาษของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต สำหรับการบ่งบอกถึงการเคลือบลงบนกระดาษของเอทิลเซลลูโลสนั้น ทำการวิเคราะห์ที่ได้ยากเนื่องจากเอทิลเซลลูโลสเป็นวัสดุที่คล้ายกับเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของกระดาษ อย่างไรก็ตาม อินฟราเรดสเปกตรัมของกระดาษที่ผ่านกระบวนการเคลือบแสดงผลการดักกลืนสูงขึ้นเล็กน้อยที่ตำแหน่ง 2900 cm^{-1} เนื่องมาจากการสั่นแบบ Stretching ของพันธะ C-H ซึ่งสอดคล้องกับอินฟราเรดสเปกตรัมของเอทิลเซลลูโลส [15] จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงโมเลกุลนี้ สามารถสรุปได้ว่าอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตและเอทิลเซลลูโลสได้ถูกเคลือบลงบนกระดาษ

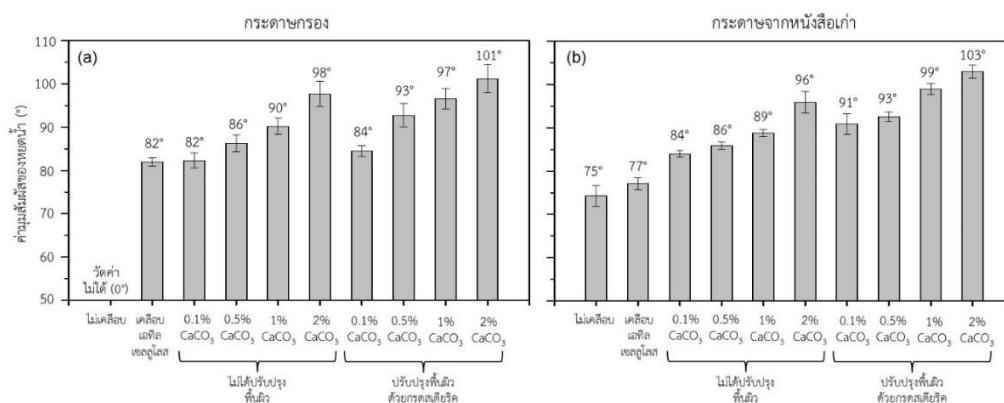


รูปที่ 6 อินฟราเรดสเปกตรัมของกระดาษเคลือบด้วยอนุภาคนาโนแคลเซียมในสารละลายเอทิลเซลลูโลส

(a) กระดาษกรอง และ (b) กระดาษจากหนังสือเก่า

ผลจากการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนกระดาษแสดงให้เห็นว่าการเคลือบด้วยคอลลอยด์อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในสารละลายเอทิลเซลลูโลสทำให้กระดาษมีสมบัติการกันน้ำเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะกระดาษกรองที่ปกติแล้วไม่ได้มีสมบัติกันน้ำและมีมุมสัมผัสหยดน้ำเท่ากับ 0° สามารถกันน้ำได้หลังจากเคลือบด้วยวัสดุดังกล่าวโดยมีมุมสัมผัสหยดน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 80 ถึง 100° ดังแสดงใน รูปที่ 7 (a) โดยมีมุมสัมผัสหยดน้ำบนพื้นผิวกระดาษเพิ่มสูงมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้เคลือบ เช่นเดียวกับกระดาษจากหนังสือเก่าที่ปกติแล้วมีสมบัติกันน้ำน้อยและมีมุมสัมผัสหยดน้ำเท่ากับ 75° สามารถกันน้ำได้หลังจากเคลือบด้วยวัสดุดังกล่าว โดยมีมุมสัมผัสหยดน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 80 ถึง 100° ดังแสดงใน รูปที่ 7 (b) ในกรณีของกระดาษจากหนังสือเก่าที่ไม่ได้เคลือบนั้นมีสมบัติกันน้ำอยู่แล้วบางส่วนเนื่องจากการมีอยู่ของสารที่มีสมบัติกันน้ำ เช่น ลิกนินหรือสารตัวเติม (Sizing Agent) ที่ใช้ในการผลิตกระดาษ [8] สมบัติการกันน้ำจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของสารเหล่านี้ที่มีในกระดาษซึ่งจะส่งผลต่อค่ามุมสัมผัสหยดน้ำบนพื้นผิวกระดาษโดยรวมแล้วสมบัติการกันน้ำที่เพิ่มขึ้นของกระดาษทั้ง 2 ประเภทนี้ มาจากลักษณะเชิงโมเลกุลของเอทิลเซลลูโลสที่มีความไม่ชอบน้ำจากการที่หมู่ฟังก์ชัน $-OH$ ที่มีขั้วถูกเปลี่ยนเป็นหมู่เอทิล ($-CH_2CH_3$) ซึ่งมีขั้วต่ำ [10]

นอกจากนี้ การเติมอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตยังช่วยทำให้สมบัติการกันน้ำของกระดาษเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากความขรุขระของพื้นผิวกระดาษที่เพิ่มมากขึ้น [14] และปัจจัยสุดท้ายที่ช่วยทำให้สมบัติการกันน้ำของกระดาษเพิ่มสูงขึ้นอีกระดับคือการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดสเตียริก กรดสเตียริกมีสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว จึงทำให้พื้นผิวของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดอันตรกิริยากับน้ำลดลง



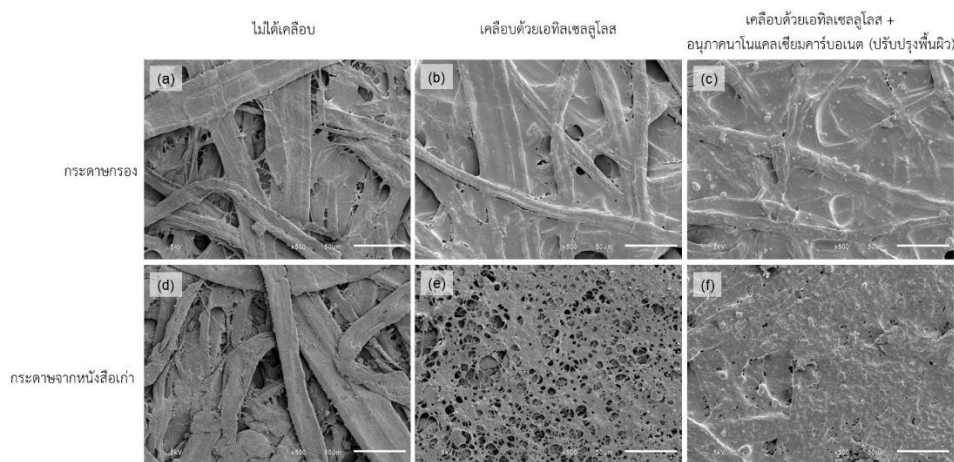
รูปที่ 7 ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำบนพื้นผิวกระดาษเคลือบด้วยอนุภาคนาโนแคลเซียมในสารละลายเอทิลเซลลูโลส

(a) กระดาษกรอง และ (b) กระดาษจากหนังสือเก่า

รูปที่ 8 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นถึงลักษณะที่เป็นเส้นใยระดับไมโครเมตรของพื้นผิวกระดาษทั้งสองประเภท หลังจากเคลือบกระดาษด้วยสารละลายเอทิลเซลลูโลส สามารถสังเกตเห็นฟิล์มเอทิลเซลลูโลสที่เคลือบปิดรูพรุนระหว่างเส้นใยกระดาษ โดยความสม่ำเสมอของการเคลือบเอทิลเซลลูโลสบนกระดาษกรองมีมากกว่ากระดาษจากหนังสือเก่า อาจเนื่องมาจากความขรุขระบนพื้นผิวของกระดาษกรองน้อยกว่า ความต่อเนื่องของฟิล์มเอทิลเซลลูโลสจึงมีมากกว่า หลังจากเคลือบกระดาษด้วยคอลลอยด์อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในสารละลายเอทิลเซลลูโลส ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตบนพื้นผิวกระดาษ นอกจากนี้การใช้อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ยังช่วยแก้ปัญหาความไม่สม่ำเสมอของฟิล์มเอทิลเซลลูโลส เนื่องจากอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตช่วยเติมเต็มช่องว่างบนฟิล์ม และทำให้พื้นผิวกระดาษมีความขรุขระมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้สมบัติการกันน้ำสูงขึ้น สนับสนุนคำอธิบายในส่วนผลการวิเคราะห์สมบัติการกันน้ำด้วยการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำ

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณการเคลือบที่เหมาะสมที่ทำให้กระดาษมีสมบัติกันน้ำได้ดี และยังมีสภาพที่ใกล้เคียงเดิมมากที่สุดคือ การใช้อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 1% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ในสารละลายเอทิลเซลลูโลสความเข้มข้น 4% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) เนื่องจากค่ามุมสัมผัส

หยดนํ้าบนพื้นผิวกระดาษมีค่าสูงที่สุดโดยไม่เกิดคราบสีขาวบนพื้นผิวกระดาษ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้คำนวณปริมาณของสารเคลือบบนพื้นผิวกระดาษโดยใช้ค่านํ้าหนักของกระดาษก่อนและหลังการเคลือบ เบื้องต้นสามารถคำนวณปริมาณการเคลือบของสารได้ประมาณ 5 กรัม/พื้นที่กระดาษ 1 ตารางเมตร และได้คำนวณต้นทุนของสารเคลือบโดยประมาณจากราคาของส่วนประกอบหลักของสารเคลือบที่อยู่บนพื้นผิวกระดาษ ได้แก่ เอทิลเซลลูโลส (ราคา 3 บาท/กรัม) และอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (ราคา 8 บาท/กรัม) พบว่าต้นทุนการเคลือบต่อกระดาษพื้นที่ 1 ตารางเมตร เท่ากับ 20 บาท (ด้วยปริมาณของเอทิลเซลลูโลสและอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณ 4 กรัม และ 1 กรัม ตามลำดับ) ต้นทุนนี้มาจากการคำนวณตามระดับการใช้งานในห้องปฏิบัติการซึ่งสามารถลดต่ำลงได้ หากมีการใช้งานปริมาณมากขึ้นในระดับอุตสาหกรรมหรือเชิงพาณิชย์



รูปที่ 8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ที่กำลังขยาย 500 เท่า) โดย (a) กระดาษกรองที่ไม่ได้เคลือบ (b) กระดาษกรองเคลือบด้วยสารละลายเอทิลเซลลูโลส (c) กระดาษกรองเคลือบด้วยสารละลายเอทิลเซลลูโลสและอนุภาคนาโนแคลเซียม (d) กระดาษเก่าที่ไม่ได้เคลือบ (e) กระดาษเก่าเคลือบด้วยสารละลายเอทิลเซลลูโลส และ (f) กระดาษเก่าเคลือบด้วยสารละลายเอทิลเซลลูโลสและอนุภาคนาโนแคลเซียม

6. สรุป

จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าสามารถพัฒนาสารเคลือบป้องกันน้ำเพื่อรักษาสภาพกระดาษได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้วัสดุผสมเอทิลเซลลูโลสและอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปแบบคอลลอยด์โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ พบว่าวิธีการที่พัฒนาขึ้นนี้ทำให้อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตฝังตัวลงในเส้นใยของกระดาษอย่างสม่ำเสมอโดยไม่ส่งผลต่อลักษณะภายนอกของกระดาษ ผลจากการวัดมุมสัมผัสของหยดนํ้าบนกระดาษแสดงให้เห็นว่าสารเคลือบทำให้กระดาษมีสมบัติการกันน้ำเพิ่มมากขึ้น โดยกระดาษกรองที่ปกติแล้วไม่ได้มีสมบัติกันน้ำและมีมุมสัมผัสหยदनํ้าเท่ากับ 0° สามารถกันน้ำได้หลังจากเคลือบด้วยวัสดุดังกล่าวโดยมีมุมสัมผัสหยदनํ้าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 80 ถึง 100° และกระดาษจากหนังสือเก่าที่ปกติแล้วมีสมบัติกันน้ำน้อยและมีมุมสัมผัสหยदनํ้าเท่ากับ 75° สามารถกันน้ำได้หลังจากเคลือบด้วยวัสดุ

ดังกล่าวโดยมีมุมสัมผัสหยดน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 80 ถึง 100° โดยปัจจัยที่ช่วยเพิ่มสมบัติกันน้ำให้กระดาษคือฟิล์มเอทิลเซลลูโลสที่เคลือบบนกระดาษมีความไม่ชอบน้ำจากการที่หมู่ฟังก์ชัน -OH ที่มีขั้วถูกเปลี่ยนเป็นหมู่เอทิล ซึ่งมีขั้วต่ำ นอกจากนี้การเติมอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตยังช่วยทำให้สมบัติการกันน้ำของกระดาษเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากความขรุขระของพื้นผิวกระดาษที่เพิ่มมากขึ้น และปัจจัยสุดท้ายที่ช่วยทำให้สมบัติการกันน้ำของกระดาษเพิ่มสูงขึ้นอีกระดับคือ การปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดสเตียริกที่มีสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว จึงทำให้พื้นผิวของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดอันตรกิริยากับน้ำลดลง โดยสรุปแล้ววิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสำหรับการเคลือบป้องกันน้ำเพื่อรักษาสภาพกระดาษ อย่างไรก็ตามมีข้อเสนอแนะในการใช้งานกับกระดาษเอกสารต่าง ๆ ควรจะต้องมีการทดสอบเบื้องต้นว่าตัวทำละลายเอทานอลไม่ส่งผลต่อการละลายของหมึกหรือสีบนเอกสารก่อนนำไปใช้งานจริง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณ ศ.ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และ ดร. ลัญจกร อมรกิจบำรุง ที่ให้คำปรึกษาตลอดการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนกำลังพลกองวิชาเคมี ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ที่ให้ความช่วยเหลือ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชลิตา เมฆมุกดา. การศึกษาวิเคราะห์ผลระยะยาวของวัสดุเคลือบอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตและเซลลูโลสพอลิเมอร์ต่อสมบัติและการเสื่อมสภาพของกระดาษด้วยกระบวนการเร่งอายุ. วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า. 2565;20(1):22-30.
- [2] Baty JW, Maitland C, Minter W, Hubbe M, Jordan-Mowery S. Deacidification for the conservation and preservation of paper-based works: a review. Bioresources. 2010 Aug; 5(3):1955-2023.
- [3] Chamberlain D. Anion mediation of aluminium-catalysed degradation of paper. Polym Degrad Stab. 2007;92:1417-20.
- [4] Moiseev YV, Khalturinskii NA, Zaikov GE. The mechanism of the acid-catalysed hydrolysis of glucosides. Carbohydr Res. 1976 Oct;51(1):23-37.
- [5] Poggi G, Toccafondi N, Melita LN, Knowles JC, Bozec L, Giorgi R, Baglioni P. Calcium hydroxide nanoparticles for the conservation of cultural heritage: new formulations for the deacidification of cellulose-based artifacts. Appl Phys A Mater Sci Process. 2014 Mar;114(3):685-93.
- [6] Giorgi R, Dei L, Ceccato M, Schettino C, Baglioni P. Nanotechnologies for conservation of cultural heritage: paper and canvas deacidification. Langmuir. 2002;18(21):8198-203.

- [7] Rodriguez-Navarro C, Suzuki A, Ruiz-Agudo E. Alcohol dispersions of calcium hydroxide nanoparticles for stone conservation. *Langmuir*. 2013 Sep 10;29(36):11457-70.
- [8] Amornkitbamrung L, Marnul M, Thirvengadam P, Hribernik S, Kovalcik A, Kargl R, et al. Strengthening of paper by treatment with a suspension of alkaline nanoparticles stabilized by trimethylsilyl cellulose. *Nano-Struct Nano-Objects*. 2018 Oct;16:363-70.
- [9] Amornkitbamrung L, Mohan T, Hribernik S, Reichel V, Faivre D, Gregorova A, Engel P, Kargl R, Ribitsch V. Polysaccharide stabilized nanoparticles for deacidification and strengthening of paper. *RSC Adv*. 2015;5:32950-61.
- [10] Shi J, Liu W, Jiang X, Liu W. Preparation of cellulose nanocrystal from tobacco-stem and its application in ethyl cellulose film as a reinforcing agent. *Cellulose*. 2020;27:1393-1406.
- [11] Cao Z, et al. Chemical surface modification of calcium carbonate particles with stearic acid using different treating methods. *Appl Surf Sci*. 2016 Aug 15;378:320-9.
- [12] Nguyen DM, et al. Synergistic influences of stearic acid coating and recycled pet microfibers on the enhanced properties of composite materials. *Mater*. 2020 Mar 23; 13(6):1461.
- [13] Rahmani M, Ashenai Ghasemi F, Payganeh GH. Effect of surface modification of calcium carbonate nanoparticles on their dispersion in the polypropylene matrix using stearic acid. *Mech Ind*. 2014 Jan;15(1):63-7.
- [14] Costa V, Simões RMS. Hydrophobicity improvement of cellulose nanofibrils films by stearic acid and modified precipitated calcium carbonate coating. *J Mater Sci*. 2022 Jun; 57(11):11443–59.
- [15] Abdel-Halim ES. Chemical modification of cellulose extracted from sugarcane bagasse: preparation of hydroxyethyl cellulose. *Arab J Chem*. 2014 Jul;7(3):362-71.

Using GIS and Logistic Regression Model for Locating Suitable Anchoring Sites in Sattahip Bay and Approaches, Thailand.

สันหนัฐ อีสมาแอล¹

Sanhanat Itsama-ael¹

Received: May 9, 2023

Revised: May 26, 2023

Accepted: June 2, 2023

Abstract

Sattahip Bay is one of the important maritime regions in Thailand. Consequently, tons of ships port-in and port-out in this area including some ships also anchor in the bay as well. However, selecting the wrong anchoring location led to unexpected incidents. In order to mitigate those issues, the aim of this project is to locate suitable anchoring sites by using Geographic Information System (GIS) and Logistic Regression Model (LRM) to generate a model with 5 main factors, which are water depth, seafloor type, current speed, the availability of communication signal, and clearance from dangerous object. The results from the model imply that the middle area of Sattahip Bay is the most suitable for anchoring since all criteria are met that neither too deep and too shallow water depth, proper holding force from sand and clay, low current speed, average accessibility of communication signal, and no dangerous object. This model is useful to serve as a cross check tool for navigators to mitigate man errors in anchoring.

Keywords: Suitable Anchoring Location, Logistic Regression Model, GIS

¹ประจำกรมกำลังพล ทหารเรือ

Attached to Naval Personnel Department, Royal Thai Navy

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

1. Introduction

Since there are 3 main harbors, which are Laem Thian Naval Base, Chuk Samet Naval Base, and Sattahip Commercial Port located in Sattahip Bay, Thailand as shown in figure 1 [1], so this bay is considered as the one of the most ship-massive regions in Thailand. Although 3 major ports are located, it does not have enough capacity and spaces for all ships. Consequently, some ships that reach those ports ahead of time must save fuel and relax their crews by anchoring nearby and waiting for their turn to dock in those harbors.

However, selecting a right location to drop an anchor is not an easy task for seafarers, because there are several factors to consider, and choosing a wrong one let to an expected incident such as getting ground on an underwater rock, damaging the anchor, etc. Therefore, it is necessary for mariners to choose anchoring locations wisely and carefully. There are 4 main factors related to topography and hydrography that play a significant role in anchoring [2]. Firstly, suitable water depth must be considered to match with anchor chain and under-keel clearance. Secondly, different seabed types, different holding ground levels, so a bottom type is necessary. Then, current and wind are the main causes of scouring, so calm wind and slow current speed is perfect for anchoring. Finally, clearance from dangerous objects (e.g., underwater rocks, shipwrecks, islands) must be considered as well.

In term of communication, the availability of telephone and internet signals is important for selecting an anchoring location as well, because it will be more convenient that crews on the ship can contact to people on the land by using telephone and internet.

As there are powerful techniques in the Geographic Information System (GIS) and statistical method that are suitability index model and logistic regression model, which are useful for decision making, so it is interesting to apply this technology in anchoring tasks. Furthermore, with integration between supported data from Hydrographic Department of Royal Thai Navy (HDRTN) (e.g., Thai nautical charts, historical anchoring locations and bathymetric data) and Geographic Information System software, which is ArcGIS Pro in this case, the suitability location for anchoring in Sattahip Bay and approaches, Thailand can be implemented. Hence, the objective of this project is to locate suitable sites for anchoring in Sattahip Bay and approaches, Thailand using GIS techniques and statistical methods to create and validate the model, respectively. This model can make an anchoring mission safer and faster. Also, this can be used as a cross check tool to mitigate man errors and reduce unexpected accidents in anchoring. Finally, challenges in this project and future research opportunities will be discussed.

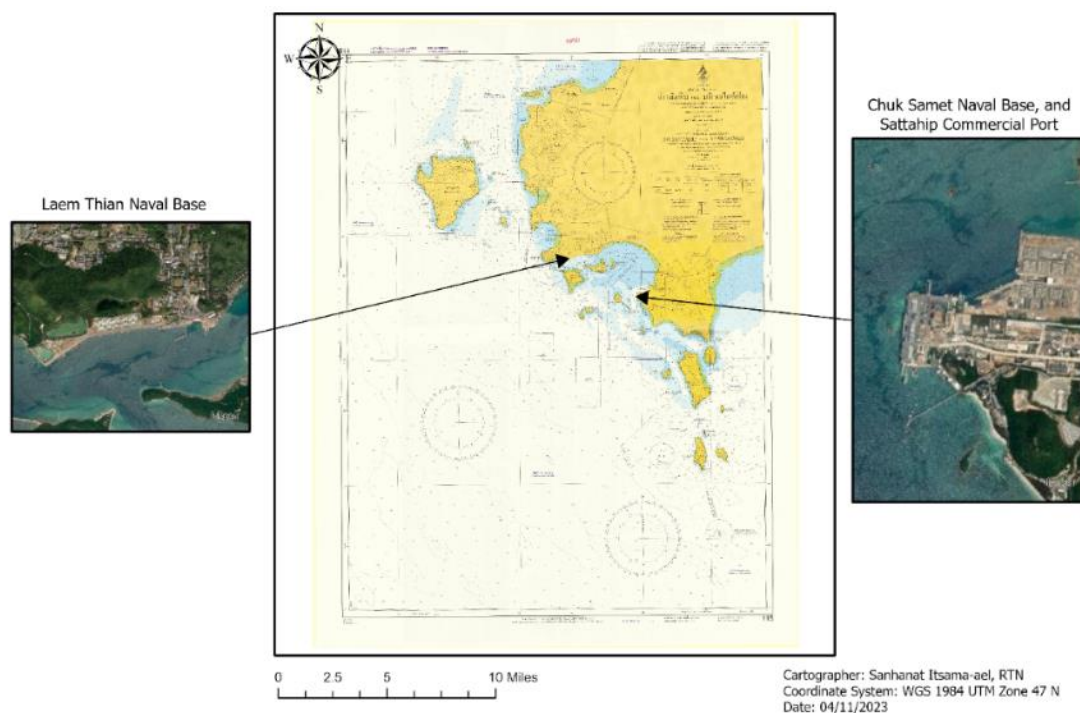


Figure 1 Overview of Sattahip Bay and Approaches, Thailand [1]

2. Literature Review

Fundamental and Considered Factors in Anchoring

Anchoring is a common task that seafarers do routinely. A ship drops an anchor to hold its position in the sea like parking a car. There are several circumstances that a ship has to anchor, for example, when they reach destinations a head of time, so anchoring is the best way to save fuel and rest their crews. Also, when they have technical issues, dropping an anchor to fix those problems is required. However, finding an appropriate site to anchor requires several factors to consider such as water depth, under-keel clearance, bottom types, current speed, weather forecast, traffic, clearance from dangerous objects, etc. [2]. Thus, it is necessary to consider those factors thoroughly before anchoring.

First of all, water depth and length of anchor chain are significantly related. Since water depth is a main parameter to compute the length of anchor chain to be released. There are official formulas that categorized by types of anchor chains that if the anchor chain is forged steel cable,” the anchor chain length in shackles (1 shackle is 27.432 meters) will be released 1.5 times the square root of water depth in meters according to Equation (1) [3]. In case of

“copper-based cable”, length of anchor chain in shackle is the square root of water depth in meters as presented in Equation (2) [3]. However, a common equation that is practically used in Royal Thai Navy (RTN) is that the length of anchor chain is equal to 5 times of water depth, but if a ship anchors less than 24 hours, 3 times of water depth is used instead [4]. Therefore, 3 times of depth is reasonably used, because the typical reason that ships anchor in Sattahip Bay is to wait for berthing in ports, and it is usually less than a day. Consequently, if water depth is greater than 35 meters, it is not preferable for mariners, because 105-meter anchor chain must be released, and it takes a long time to operate.

$$L = 1.5\sqrt{d} \quad (1)$$

L = the length of anchor chain (shackle)

d = Water depth (meter)

$$L = \sqrt{d} \quad (2)$$

L = the length of anchor chain (shackle)

d = Water depth (meter)

In order to indicate a minimum water depth, a safety depth equation as shown in Equation (3) is broadly considered [5]. Firstly, average draft of ships that port-in/port-out in Sattahip Bay is lesser 7 meters, as such 7 meter is used as “Maximum Draft(static)”. Next, under-keel clearance (UKC) can be a fixed value, for example, 1 meter or a percentage of draft [6], so 1 meter is considerably used in this area. In term of squat parameter, squat is the phenomenal that is occurred when the draft increases with ship’s speed [7]. Also, the popular formula is “Squat = speed(knots) / 100 (meter)” (Barres’s Formula). However, squat does not affect an anchoring ship, so this variable can be eliminated. Finally, “Height of Tide” is out of scope, because the chart datum (vertical datum) of the Thai nautical chart is “Lowest Low Water” meaning no tide related. Therefore, safety depth = 7 + 1 = 8 meters and mariners do not normally drop anchors in the areas that shallower than 8 meters.

$$\text{“Safety Depth = Maximum Draft(static) + UKC (Company’s Policy) + Squat (Maximum) – Height of Tide”} \quad (3)$$

As bottom types play a key role in a holding force, it is important to know characteristics of seafloor types. The holding force is efficiently high when seabed types are “clay, soft chalk, sand, sand/shingle and heavy mud,” while an anchor is dragged in “softer seabed such as soft mud, shingle and shell” [3]. Hence, an anchor needs neither too soft nor too hard bottom types. Thus, it is obvious that sand and clay give proper holding force [8], while rocky seabed causes damage to anchor’s metal parts [9]. In addition, the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) was used to study anchor penetration in clay, the result showed that the anchor can penetrate deeper in clay more than loose sand [10],[11]. Therefore, it can be ranked the suitable bottom types from low to high levels as rock, shall, mud, sand, and clay.

Since the main forces that cause anchor dragging are current and wind speeds, those factors should be accounted. The maximum current and wind speeds that a ship can be held by an anchor are different based on ship’s characteristics. If a ship anchors in harbored and shelter areas, 4.8 and 48 knots for current and wind speeds respectively are maximum, while in the opened sea 3 and 22 knots for current and wind speeds respectively are maximum acceptances [9]. According to basic understanding and fundamentals, it can be concluded that the lesser current and wind speeds, the better location for anchoring. Additionally, the clearance from dangerous objects is generally used in Royal Thai Navy is 700 - 1000 yards [4].

Communication is also another factor that is considered, because without the availability of telephone and internet services, a ship is isolated. Since line-of-sight propagation of communication wave can be blocked by topography such as hills that created a shadow zone [12]. In this case, the obstruction can be mountains and islands, so with digital elevation model (DEM), locations of communication towers on Google Map and visibility analysis tool in ArcGIS Pro, those shadow zones in the Sattahip Bay can be identified.

In term of statistical method, the logistic regression has been used to generate the model when a dependent variable is downgraded from a ratio scale and independent variables can be ratio, interval, ordinal, and nominal scales. A similar case of using logistic regression is the habitat of red squirrel in the Mt. Graham area [13], which is the same conditions with locating suitable anchoring sites.

Most previous research about anchoring focused on anchor penetration and environmental effects. For example, studying how anchor penetrates through seabed to reduce damages on submarine pipeline using models [14]. In case of environmental effects, research focused on scouring effects of anchoring to underwater environment [15]. However, it

does not have a study on locating suitable sites for anchoring, so it is interesting to use the suitability index model technique in GIS and logistic regression model with factors above (e.g., water depth, bottom types, current speed, communication, clearance from dangerous objects) to implement the model.

3. Data and Methodology

3.1 Data and Pre-processes.

As 5 factors, which are water depth, seabed type, current speed, clearance from dangerous object, and the availability of communication signals were used to generate suitable anchoring location model, so water depth, seabed type, current speed, and clearance from dangerous object were obtained by Hydrographic Department of Royal Thai Navy (HDRTN). In case of the location of communication towers were derived from Google Map and digital elevation model (DEM) in Sattahip Bay was derived from Shuttle Radar Topography Mission (STRM), USGS for visibility analysis. Then, those raw data needed to be pre-processed to comply with GIS software in order to generate the model by using logistic regression.

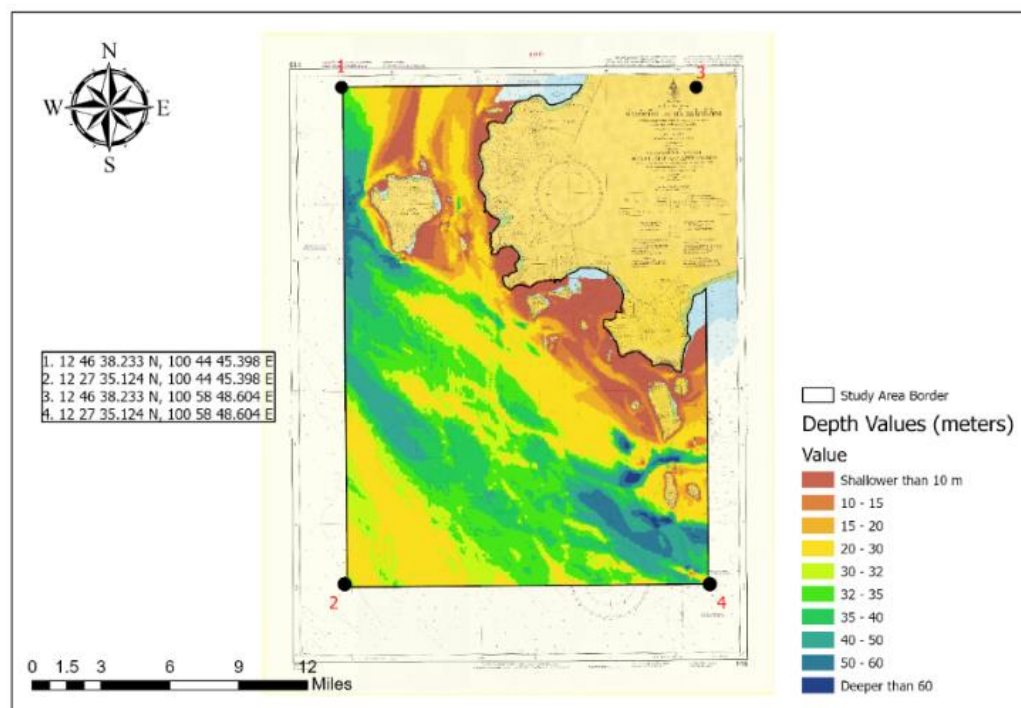


Figure 2 Study Area and Depth Values [1]

Firstly, the original format of water depth data was a point cloud format (in .XYZ with UTM Zone 47 N), but the model needed the raster format. Hence, the point cloud data was interpolated by using inverse distance weighted (IDW) to be a raster layer as shown in figure 2 [1].

Secondly, Thai nautical chart no.115, “Sattahip Bay, Thailand” was also derived from HDRTN in raster format with WGS 1984 UTM Zone 47 N. This was the source for other factors (seabed type, current speed, and clearance from dangerous object). In terms of current speed, there are current speed and direction shown on the map, so all those current symbols were digitized. After that, it is interpolated by using IDW to be a raster layer as shown in figure 3 [1]. In the same way, seafloor type can be seen on the map, so all those seabed symbols were digitized by ranking the seabed types based on unsuitability to suitability for anchoring as shown on the table 1. Then, it was interpolated by using IDW to be a raster layer as presented in figure 4 [1]. Finally, all dangerous objects that are land, islands, rocks, wrecks, etc. were digitized from the Thai nautical chart no.115.

Table 1 Seabed Type Ranks

Seabed types	Mud and Gravel	Mud and Gravel	Sand and Gravel	Sand and Shell	Clay and Sand
Rank	1	2	3	4	5

In terms of the availability of communication signal, five communication stations in point vector format as well as its attribute table were generated as shown in figure 5 [1].

To implement the logistic regression model, the reference data is required to be the dependent variable that is dichotomous in this case presence means it is suitable for anchoring and absence means unsuitable for anchoring. Thus, 32 historical anchoring locations from 4 ships, which is H.T.M.S. Phraruehatsabodi, H.T.M.S. Suk, H.T.M.S. Suriya, and H.T.M.S. Janthara, were supported by HDRTN, which are presence locations. Also, the other 32 locations are randomly generated to be absence locations by using GIS, so the total is 64 locations as can be seen on the figure 6 [1].

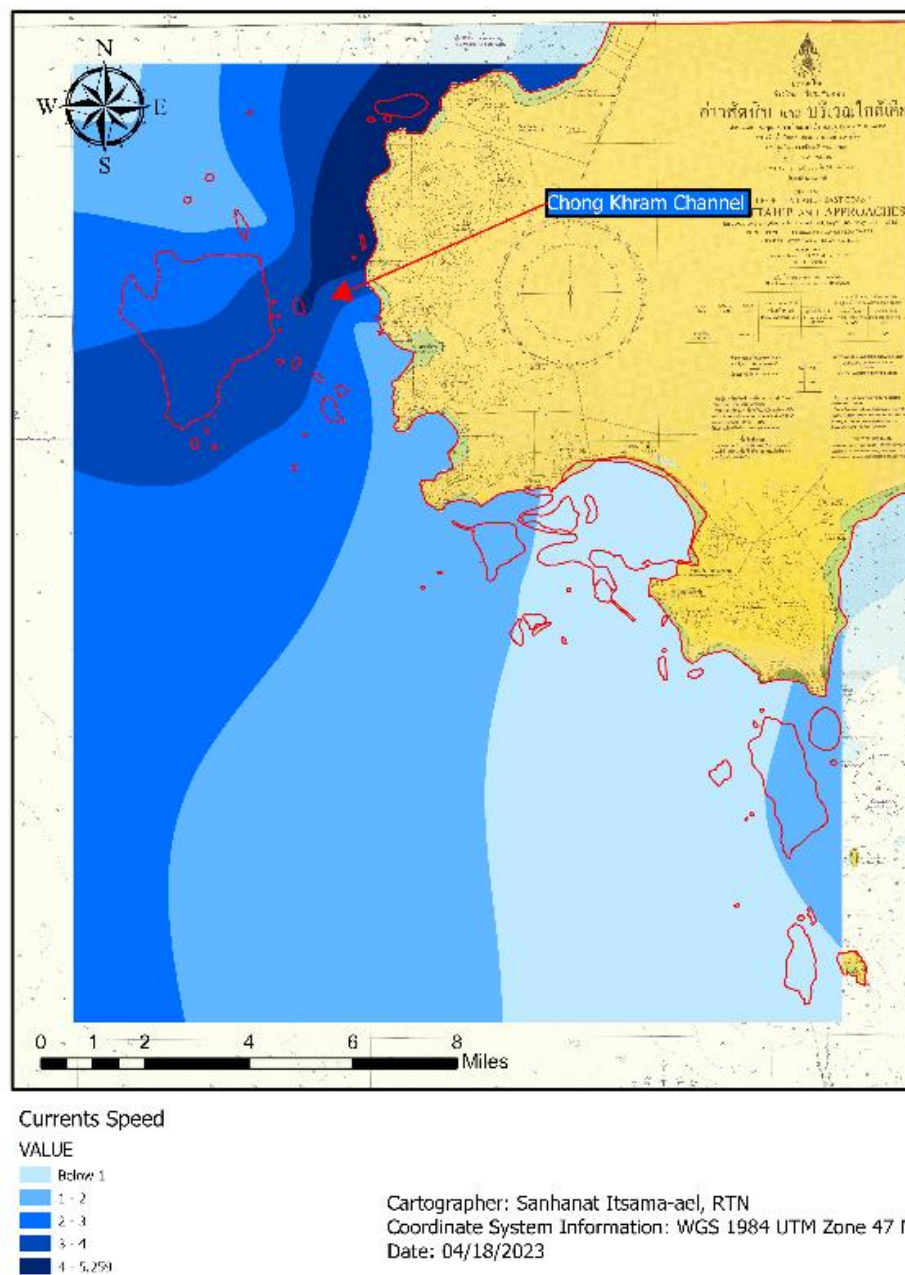


Figure 3 Current Speed (knots) [1]

3.2 Processes

After all data were pre – processed, the availability and shadow zones of communication signals had to be done first, because it is one of the 4 variables (water depth, seabed type, current speed, and communication signal), so it must be implemented before generating the logistic regression model. The main reason that clearance from dangerous object was not included in the model at the beginning is because the complication of topography in Sattahip Bay and

approaches that resulting low accuracy of the overall model, so it was applied later. This is the challenge for the further research. In order to do that, the visibility analysis tool in GIS was used to create those zones with the 5 locations of communication towers, which are 80-meter height. The reason 80 meters was chosen is that the common height of a communication tower is 40, 60, and 80 meter [16], so in the future research, the exact height of each pole should be measured.

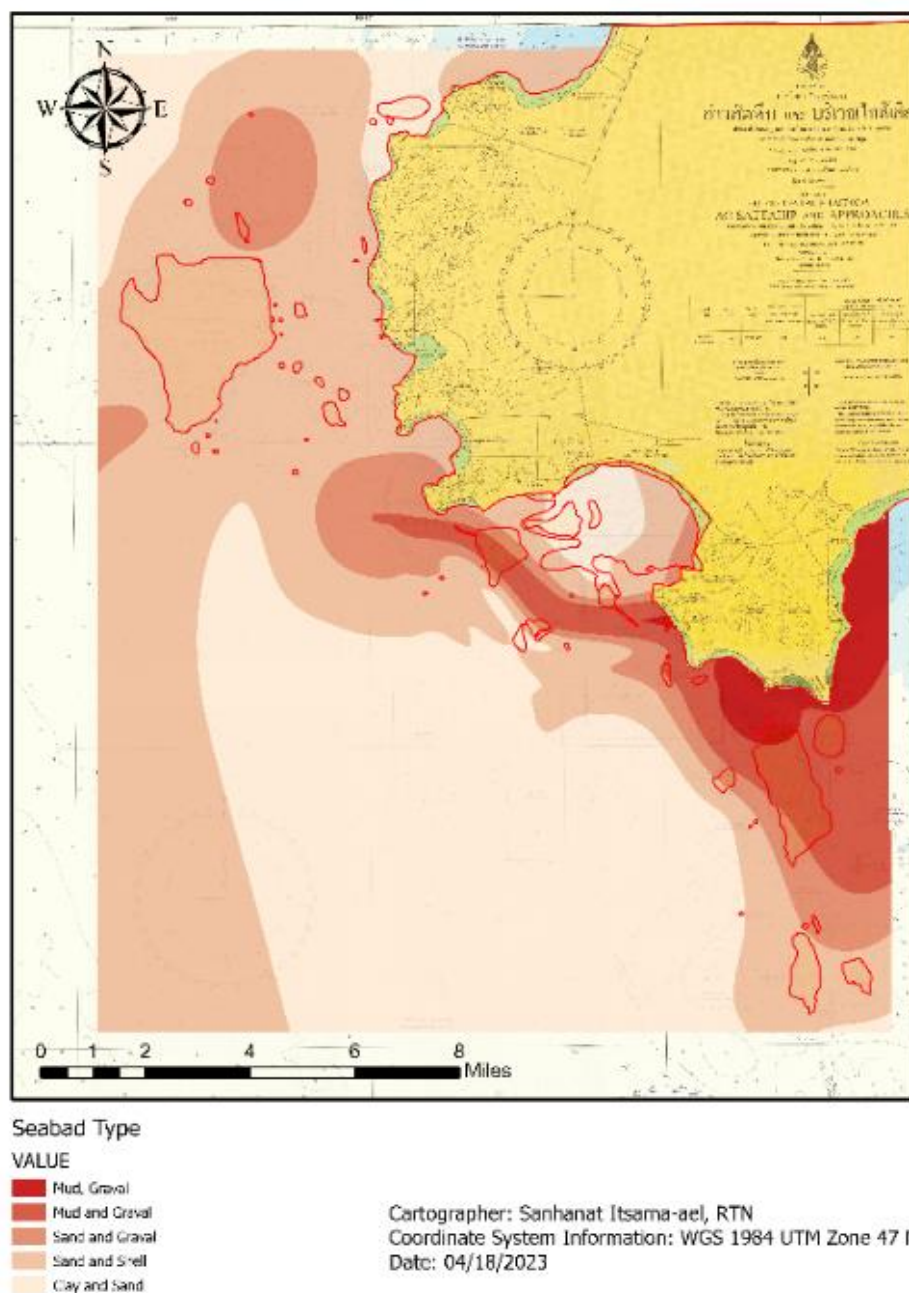


Figure 4 Seabed Types [1]

As 4 factor layers were already prepared, so 64 reference data were used to extracted values from each raster layer by using extract value to point tool in GIS. In this way, the 64 reference locations had all raster values from each layer.

Next step was to generate the logistic regression model from 4 factors (water depth, seabed type, current speed, and communication signal) in this case all factors were ratio scale except the communication signal that was a dummy variable. In order to build the logistic regression model, the generalized Linear Regression tool in GIS was used with those 4 factors as explanatory variables and the presence/absence historical anchoring locations as dependent variable. Then each slope for all independent variables as well as intercept were obtained according to Equation (4), so the model was already generated. Then, the model was applied in raster calculator tool in GIS to obtain the Y value layer. Finally, the probability of suitable anchoring location was received from applying logistic regression equation as shown in Equation (5) in raster calculator tool again.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \times \text{water depth} + \beta_2 \times \text{seabed type} + \beta_3 \times \text{current speed} + \beta_4 \times \text{communication} \quad (4)$$

$$P(Y) = \frac{1}{1+e^Y} \quad (5)$$

From this point, the raster layer of the popularity of suitable anchoring location $P(Y)$ was obtained, but the suitable and unsuitable anchoring sites were not categorized yet. Therefore, the raster layer of the popularity of suitable anchoring location $P(Y)$ needed to be reclassified with 0.5 as a threshold ($P(Y) < 0.5$ is unsuitable, $P(Y) \geq 0.5$ is suitable).

The last step was to create buffers surrounding all dangerous objects with 1000 yards. Finally, the suitable anchoring areas layer from the model was clipped with the dangerous object buffers to be the final result.

4. Result and Discussion

The first result of the process is the availability of communication signal in Sattahip Bay and approaches that is shown in figure 5 [1]. It is obvious that the communication is organized for serving the users on the land, because there are many shadow zones on the sea. For instance, the north part of the bay (zone number 1) is the largest shadow zone, because the line-of-sight

propagation from the communication stations are blocked by the mountains along the western coastline. Furthermore, Ko Khram Island also obstructs the line-of-sight propagation, if any ship selects to anchor surround the Ko Khram Island especially on the western side, the probability of receiving the communication signals is very low. In zone number 2, most locations can receive communication signals, because no high mountain or hill on the shoreline obstructs the line-of-sight propagation. However, some shadow zones are occurred, because some islands blocked the propagation, so anchoring too close to the islands may cause losing communication. In the third zone, since mountains and islands limit the line-of-sight propagation, only the eastern part can access the signals.

After the available communication zone was created, four raster layers (water depth, seabed type, current speed, and communication signal) were used to generate the logistic regression model. The result of model with 4 factors and the Y value are shown in figure 6 [1] and Equation (6), respectively. As can be seen from figure 6 [1], the suitable anchoring areas are mostly located on the depth range from 10 – 35 meters if compared with figure 2 [1]. This complies with the real situation that mariners do not anchor their ships in too deep or too shallow water depth. However, there are some sites that water depth is lesser than 8 meters, but they are classified as suitable anchoring areas. This is because the dangerous object factor is not included in the model. Nevertheless, those will be eliminated by clipping with dangerous object buffer in the last step.

$$Y = -15.689652 + 0.192456 \times \text{water depth} - 2.480281 \times \text{seabed type} + 8.490783 \times \text{current speed} - 3.946946 \times \text{communication} \quad (6)$$

In terms of seafloor type, the model result with 4 factors was overlayed with the seabed type layer as shown in figure 7 [1], it can be noticed that the suitable anchoring areas are mostly the combination between clay and sand that gives the most appropriate holding force. However, some locations that are the mixing of sand and shell also indicated as suitable sites, but sand and shell also give a proper holding force even lesser than clay and sand. Therefore, the initial result from the model is reasonable with the theory that clay and sand give the most suitable holding force [8]

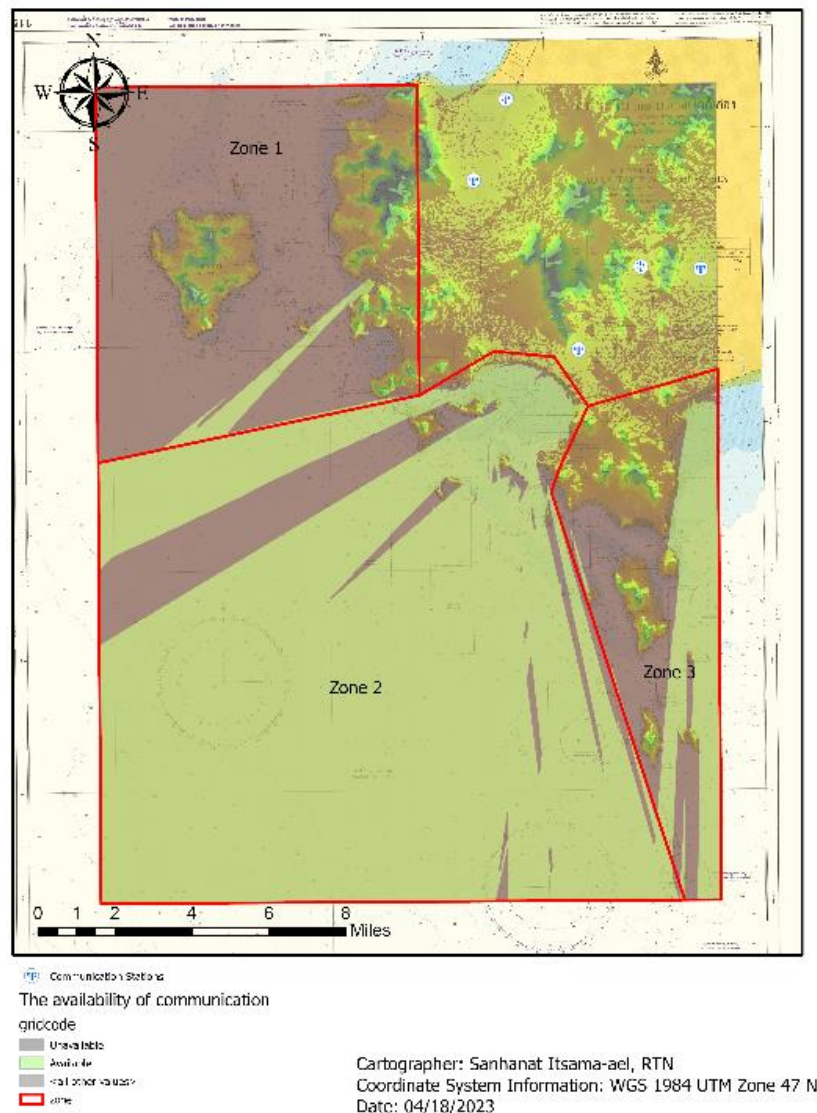


Figure 5 The Availability of Communication Signal in Sattahip Bay and Approaches, Thailand [1]

The overlay between the initial result and the current speed layer also implies that the most suitable anchoring sites are low current speed, ranging from below 1 to 2 knots as shown in figure 8 [1]. Only a few areas that have current speed higher than 2 knots are predicted as suitable anchoring sites. Hence, this model highly complies with the practical instruction that strong current speed is not appropriate for anchoring. After deriving the model from 4 factors (water depth, seabed type, current speed, and communication signal), the last factor that is the clearance from dangerous objects with 1000- yard buffer was used to clip the result from the logistic regression model. The result is shown in figure 9 [1]. As can be seen from the result, all shallow areas (less than 8 meters) that were classified as suitable anchoring locations were eliminated. Similarly, the suitable areas surrounding the dangerous objects were clipped as well.

This led to a more reasonable result. However, there are some locations in the northern part of the bay that are predicted to be suitable anchoring areas, but it is enclosed with dangerous objects, this is because that area meets almost all criteria with combination between clay and sand, locating in approximately 10-meter depth, and low speed current location. In this case, it may be fixed by adding the clearance from dangerous objects in the model at the first place, so it is an interesting point to develop this model in the next phase. Also, the north-west corner location is also located to be a suitable area, but it does not have communication signals in that area. The reason that such a location is predicted to be a suitable area is that it is also clay and sand seafloor and current speed is lower than 1 knot as well as the water depth is ranging between 10 – 30 meters. Consequently, such an area meets most criteria.

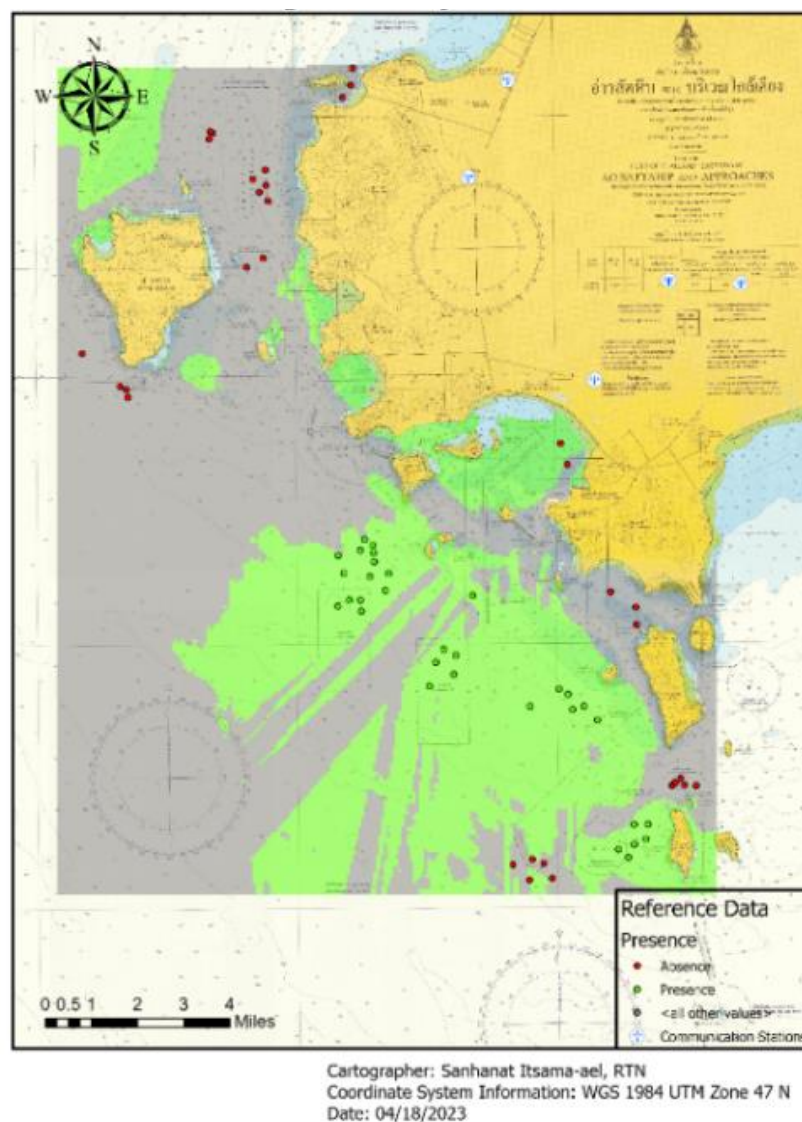


Figure 6 The Suitable Anchoring Location Without the Dangerous Object Factor [1]

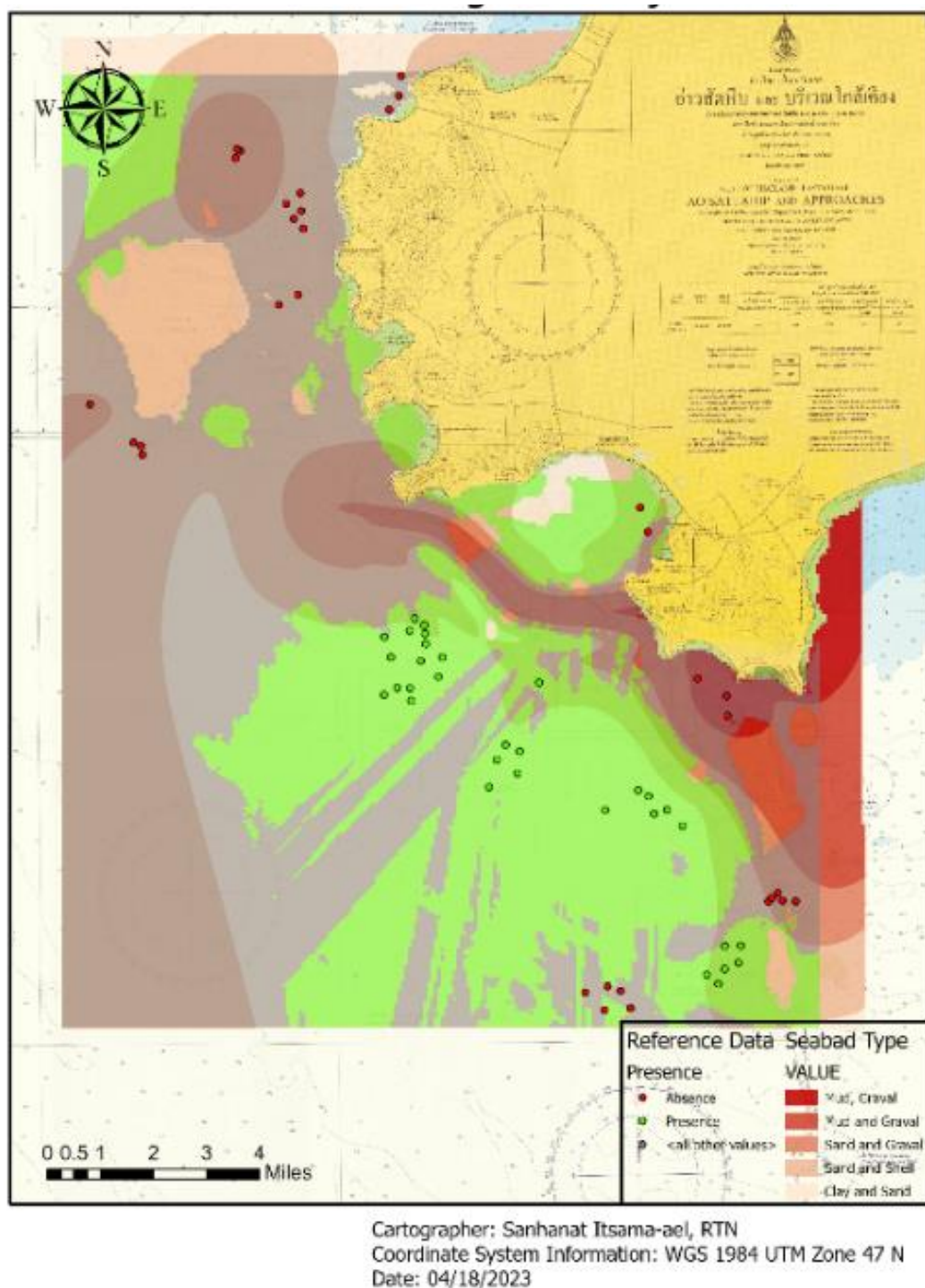


Figure 7 The Overlaying Between the Initial Result and Seabed Type Layers [1]

In addition, there are two recommended anchoring locations on the Thai nautical chart no. 115. Clearly, most of the suitable anchoring locations from the model cover the recommended anchoring locations on the map. Only some parts are considered unsuitable because those

areas are in the shadow zone of communication signals. This implied that the recommended anchoring locations might not be created with consideration of a communication factor

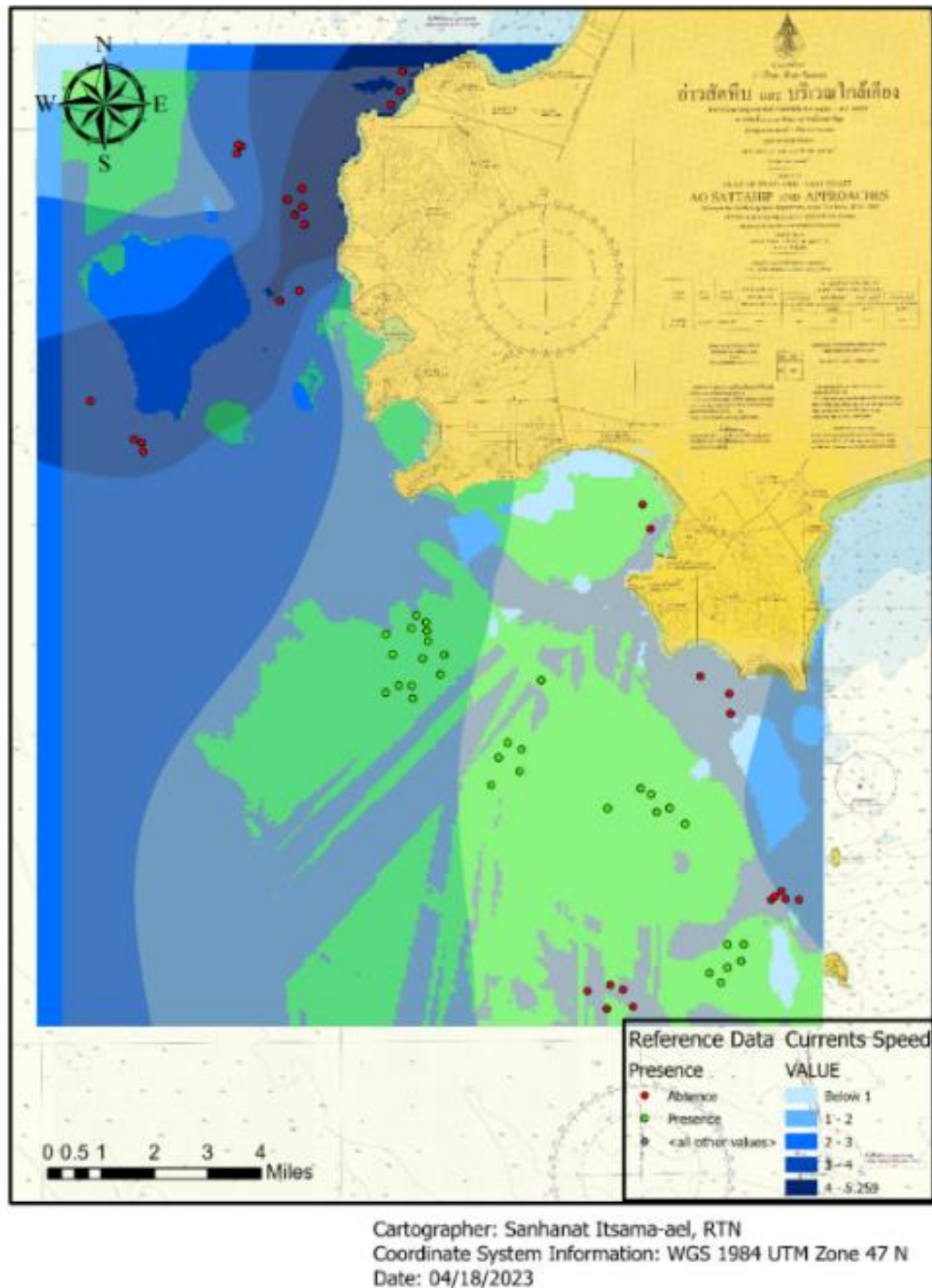
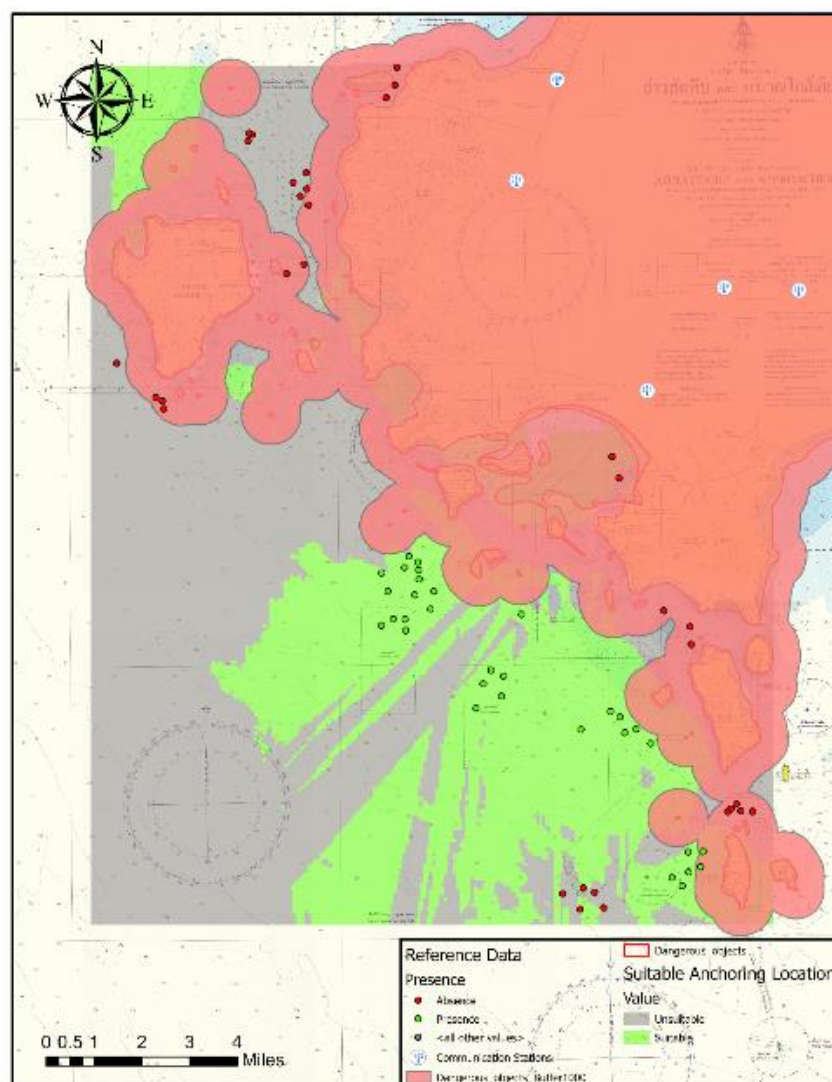


Figure 8 The Overlaying Between the Result and Current Speed [1]

From the summary of generalized linear regression (GLR) result as shown in table 2, all variance inflation factors (VIF) are about to 1, meaning that no significantly perfect multicollinearity among independent variables. In the same way, all p-values are lesser than significant value ($\alpha = 0.05$), except the seabed type factor that has 0.058622 for p-value. However, seabed type is well known to be significant for anchoring, so it was still forced to be a variable in the model. To validate the model, confusion matrix and overall accuracy are implemented, which is displayed in table 3. Therefore, the overall accuracy is $((32 + 29)/64) \times 100 = 95.3125 \%$.



Cartographer: Sanhanat Itsama-ael, RTN
 Coordinate System Information: WGS 1984 UTM Zone 47 N
 Date: 04/18/2023

Figure 9 The Suitable Anchoring Locations in Sattahip Bay, Thailand (Final Result) [1]

Table 2 Summary of GLR Results

Variable	Coefficient	StdError	z-Statistic	Probability	Odds Ratio	Wald's Low (95%)	Wald's High (95%)	VIF
Intercept	-15.689652	11.393336	-1.37709	0.168484	0	0	766.079384	0
Depth	0.192456	0.078621	2.447893	0.014369	1.212223	1.039104	1.414184	1.067152
Current	-2.480281	0.841986	-2.94575	0.003222	0.08372	0.016074	0.436054	1.095323
Seabed Type	8.490783	4.490058	1.891019	0.058622	4869.67898	0.733645	32323221.97	1.063304
Communication	-3.946946	1.933742	-2.04109	0.041242	0.019314	0.000436	0.854865	1.095241

Table 3 Confusion Matrix

		Modeled			
		Presence	Absence	total	accuracy
Truth	Presence	32	0	32	1
	Absence	3	29	32	0.90625
				64	

In conclusion, based on the result, the middle part of Sattahip Bay is the most suitable location for anchoring, because the water depth is between 10 – 35 meters, so ships are safe from getting ground as well as no need to release too long anchor chains. Moreover, most of the locations in the middle of the bay are clay and sand that yield a proper holding force. Also, there is low current speed (lower than 1 to 2 knots) in that location, because it is far enough from the Chong Khram Channel, which is the bottle neck that creates strong current. In the same way, there is no dangerous object found in the middle bay as well. However, the only problem is about a communication signal since some parts of the middle bay are in the shadow zone of communication. Although the accuracy of this model is high, some misclassification is still available. Hence, it is not recommended to only rely on the result of the model for selecting an anchoring location, but the model can be used as a cross check tool with human decision. In this way, unexpected incidents during anchoring can be reduced.

5. Conclusion

As Sattahip Bay, Thailand is one of the dense maritime regions, because 3 main harbors, which are Laem Thian Naval Base, Chuk Samet Naval Base, and Sattahip Commercial Port, are existed. When ships reach their destinations ahead of time, they can save fuel and rest their crews by anchoring their ships. However, selecting a right place to anchor is not an easy task since unsuitable anchoring locations led to unexpected incidents, for example, getting ground on the rock, because did not keep enough clearance from dangerous objects and did not have enough a holding force from the seafloor during the strong current. Furthermore, communication between ships and land is also important. Hence, it is important to locate suitable anchoring locations in Sattahip Bay, Thailand by using GIS and logistic regression model with 5 factors that are water depth, seabed type, current speed, clearance from dangerous object, and the availability of communication signal.

The result from the model shows that the middle part of Sattahip Bay and approaches is the most suitable area for anchoring, because all criteria is met such as not too deep and too shallow water depth (10 – 35 meters), suitable holding force with sand and clay, low current speed, no dangerous object, but only some parts of the central of Sattahip Bay are lack of line-of-sight communication propagation, because some islands block those signals. However, there are some parts of the bay that are not suitable, but they are classified as proper locations for anchoring, so it is necessary to always use human decision with the result from the model. Therefore, this model is useful for being a cross check tool to mitigate man errors in selecting the wrong location to drop an anchor.

For further research, some contexts in the model can be developed to make this model to be more accurate. For example, the exact height of communication towers should be measured, so the visibility analysis result will be more precise. Some interesting factors should be added such as weather based on seasons and monsoons, which require physical models and weather dataset. Finally, maritime traffic routes ought to be imported to the model since anchoring a ship on a traffic route led to ship collision that need more data and dynamic model.

References

- [1] Hydrographic Department of Royal Thai Navy. Thailand 1: 40000 Nautical Chart Number 115 Ao Sattahip. Bangkok: Hydrographic Department of Royal Thai Navy; 2006.
- [2] House, D. Ship Handling. London: Routledge; 2007.

- [3] Ministry of Defence (Navy). Admiralty Manual of Seamanship. [place unknown]: [publisher unknown]; 1995.
- [4] Royal Thai Navy. Seamanship. Bangkok: Royal Thai Navy; 2013.
- [5] Parker BB, Huff LC. Modern Under-Keel Clearance Management. International Hydrographic Review [Internet]. 1998 [cited 2023 Jan 16]; LXXV (2):145-6. Available from:<https://journals.lib.unb.ca/index.php/ihr/article/view/22959>
- [6] Galor W. Optimization of under-keel clearance during ship's maneuvering in port water areas. 2007 Jan; 3:2681-8.
- [7] Svetak J. Ship Squat. Promet - Traffic –Traffico [Internet]. 2001 [cited 2023 Jan 23];13(4):247-51. Available from: <https://www.scribd.com/doc/254552086/ship-squat>
- [8] Schatz Energy Research Center. California North Coast Offshore Wind Studies: Anchoring Technology Risk Assessment. Humboldt. CA: Schatz Energy Research Center; 2020.
- [9] Intertanko. Anchoring Guidelines: A Risk-Based Approach [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2019 [cited 2023 Jan 30]. Available from:https://www.maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2019/04/2019Intertanko_Anchoring_guidelines_a_risk-based-approach.pdf
- [10] Grabe J, Wu L. Coupled-Eulerian-Lagrangian simulation of the penetration and braking behavior of ship anchors in clay. Geotechnik. 2016 Mar;39(3): n/a-n/a.
- [11] Osthoff D, Heins E, Grabe J. Impact on submarine cables due to ship anchor – soil interaction. Geotechnik. 2017 May;40(4):265-70.
- [12] Richards JA. Radio Wave Propagation: An Introduction for the Non-Specialist [Internet]. Heidelberg: Springer; 2008 [cited 2023 Feb 13]. Available from: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/12332/1/270.pdf>
- [13] Pereira JMC, Itami RM. GIS-based habitat modeling using logistic multiple regression: a study of the Mt. Graham Red Squirrel. Photogramm Eng Remote Sensing. 1991 Jan;57(11):1475-86.
- [14] Li X, Hou Z, Lu J, Yang D, He Z, Cao Z, et al. Research on calculation model of penetration depth when anchor touches Seabed. J Phys Conf Ser. 2021 Aug;2006(1):012015.
- [15] Davis AR, Broad A, Gullett W, Reveley J, Steele C, Schofield C. Anchors away? The impacts of anchor scour by ocean-going vessels and potential response options. Mar Policy. 2016 Nov; 73:1-7.

- [16] Rasool AM, Ibrahim YE, Qureshi MU, Mahmood Z. Analysis of communication tower with different heights subjected to wind loads using TIA-222-G and TIA-222-H standards. Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2022 Nov;22(4).

การหาเส้นทางที่เหมาะสมในสภาพแวดล้อมที่มีอันตรายด้วยแผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay

Optimal Path in a Hostile Environment by Using Delaunay Triangulation

ชนานพ ลิ้มสุวรรณโรจน์¹, เทียนสิริ เหลืองวิไล², วีระพล วิลามาศ³, สมภูมิ มีชาวนา⁴, สุภาวดี ลีลาอุท⁵ และ
วิศรุต คล้ายแจ้ง⁶

Tananop Limsuwanroj¹, Thiansiri Luangwilai², Weerapol Welamas³, Sompoom Meechown⁴,
Supavadee Leelayuth⁵ and Witsarut Kraychang⁶

Received: May 10, 2023

Revised: June 16, 2023

Accepted: June 23, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้ มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอและแสดงตัวอย่างแนวทางการใช้แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay ในการวิเคราะห์เส้นทางที่เหมาะสมสำหรับการปฏิบัติการทางอากาศ เส้นทางที่เหมาะสมในงานวิจัยชิ้นนี้ คือ เส้นทางที่สั้นที่สุดที่สามารถหลีกเลี่ยงการบินเข้าไปยังบริเวณที่เสี่ยงต่อการถูกตรวจจับด้วยระบบเรดาร์ข้าศึก

¹อาจารย์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Lecturer, Academic Faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Email: Tananop.lims@gmail.com

²อาจารย์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Lecturer, Academic Faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Email: Thiansiri.L@gmail.com

³อาจารย์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Lecturer, Academic Faculty Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Email: Welamas@gmail.com

⁴อาจารย์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Lecturer, Academic Faculty Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Email: Sompoom96@gmail.com

⁵อาจารย์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Lecturer, Academic Faculty Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Email: Supavadee_k@rtaf.mi.th

⁶อาจารย์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Lecturer, Academic Faculty Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Email: Witsarut_popmath@hotmail.com

และการชนเข้ากับภูมิประเทศ โดยขอบเขตงานนี้จะอธิบายการประยุกต์ใช้แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay แต่ละขั้นตอนโดยละเอียด อีกทั้งยังอธิบายประสิทธิภาพและข้อจำกัดของแนวคิดนี้ด้วย ตัวอย่างของแนวคิดที่นำเสนอในงานวิจัยชิ้นนี้นั้น จะถูกประยุกต์บนแผนที่สามมิติที่จำลองสร้างขึ้นมา กระบวนการของแนวคิดที่นำเสนอ จะเริ่มต้นจากการสุ่มจุดยอดของสามเหลี่ยม Delaunay บนแผนที่สามมิติ จากนั้นดำเนินการสร้างโครงข่ายสามเหลี่ยม Delaunay ขึ้นมา โดยเส้นขอบของโครงข่ายสามเหลี่ยม Delaunay จะถูกพิจารณาเป็นเส้นทางที่สามารถใช้บินได้ของอากาศยานบนพื้นที่สามมิติ จากนั้นพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการถูกตรวจจับจากระบบเรดาร์ข้าศึกหรือการถูกโจมตีจากข้าศึกจะถูกตัดออกจากโครงข่ายสามเหลี่ยม Delaunay หลังจากนั้นโครงข่ายที่เหลืออยู่จะถูกนำมาคำนวณหาเส้นทางที่สั้นที่สุดจากจุดเริ่มต้นไปยังเป้าหมายด้วยอัลกอริทึมของไดจ์สตรา (Dijkstra's Algorithm) และในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการปรับเส้นทางการบินให้ราบเรียบขึ้นด้วยสมการพหุนาม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาชิ้นนี้ แสดงให้เห็นว่าแนวคิดการประยุกต์ใช้แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay ในการใช้หาเส้นทางการบินที่เหมาะสมในการปฏิบัติการกิจของอากาศยานนั้น มีประสิทธิภาพสูง อีกทั้งกระบวนการเหล่านี้ยังสามารถใช้สำหรับการวางแผนเส้นทางการบินได้อย่างดีและสามารถต่อยอดในปัญหาอื่น ๆ สำหรับการวางแผนเส้นทางของทหารเรือ ทหารบก หรือ แม้กระทั่งพลเรือนได้อีกด้วย

คำสำคัญ: ระบบเรดาร์, แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay, อัลกอริทึมของไดจ์สตรา, เส้นทางที่เหมาะสม

Abstract

This study aims to propose and illustrate the process of using the Delaunay triangulation to find an optimal path for aerial operation. The optimal path is defined as the shortest path when avoiding all risks of enemy radar detection and terrain collision. The scope of this study is to demonstrate details of this process step by step as well as its effectiveness and limitation. The demonstration is the applied synthesis 3d terrain. The proposed process begins with randomly locating the vertex of the Delaunay triangulation. Then selected vertexes are elements to generate the Delaunay triangulation. The edges of the Delaunay triangulation are considered as available fly paths for aircraft over the 3D terrain. Secondly, the edges regard a high risk of enemy radar detection and terrain collision to be removed from the available edge paths. Dijkstra's algorithm is the tool to analyze the remaining edges for the shortest path. The last step is to smoothen the shortest path by using polynomial interpolation of the vertexes from the previous step. The results have shown that the idea of using the Delaunay triangulation for the optimization path is effective and robust. It is possible for path planning for aerial operations in various cases. This study can also be extended to the Navy, Army and civilian path planning problems.

Keywords: Radar, Delaunay Triangulation, Dijkstra's algorithm, Optimal Path.

1. บทนำ

ในอดีตนั้นการตัดสินใจเลือกเส้นทางในสมรภูมินั้นจะขึ้นอยู่กับ การตัดสินใจของผู้บังคับบัญชาไม่ว่าจะเป็นการรบบนพื้นดิน การรบทางอากาศ หรือ การรบทางทะเล โดยการตัดสินใจเลือกเส้นทางนั้นจะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับความรู้และประสบการณ์ของผู้บังคับบัญชา แต่ในปัจจุบันนั้นสมรภูมิมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เพราะองค์ประกอบของสมรภูมินั้นมีเพิ่มมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นระบบเรดาร์ภาคพื้น สถานีจรวดต่อสู้อากาศยาน อากาศยานของฝ่ายศัตรู ระบบเตือนภัยล่วงหน้า ระบบเรดาร์เคลื่อนที่ ทำให้การตัดสินใจเลือกเส้นทางในการปฏิบัติการกิจจากประสบการณ์อย่างเดียวนั้นเป็นเรื่องที่ยากมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีแนวทางหรืออัลกอริทึมในการช่วยวิเคราะห์หาเส้นทางที่เหมาะสมในการปฏิบัติการกิจ [1-3] เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาในช่วงระยะเวลาคับขัน เพื่อลดความผิดพลาดในการปฏิบัติการกิจให้น้อยลง

โดยอัลกอริทึมในการหาเส้นทางที่เหมาะสมนั้น ได้มีการพัฒนาขึ้นมาหลายรูปแบบ [4] เพื่อให้เหมาะสมกับโจทย์ของแต่ละปัญหา ตัวอย่างเช่น อัลกอริทึมแบบเรียวไลทมิในงานวิจัยของ Bruce and Veloso (2002) [5] ในการหาเส้นทางเดินของหุ่นยนต์ แต่อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมแบบเรียวไลทมินั้นจะเป็นการตัดสินใจแบบเป็นระยะๆ ทำให้ไม่สามารถเห็นเส้นทางทั้งหมด อาจจะทำให้เกิดการผิดพลาดและนำอากาศยานไปในจุดที่ไม่มี

เส้นทางที่ปลอดภัยต่อไปได้ อัลกอริทึมอีกรูปแบบคือการวิเคราะห์เส้นทางทั้งหมดตั้งแต่ต้น เช่น อัลกอริทึมที่ใช้การประยุกต์ของแผนภาพไวโรนอย [6-7] ควบคู่กับอัลกอริทึมอย่างอื่นๆ โดยตัวอย่างการนำไปใช้ในการหาเส้นทางเดินให้หุ่นยนต์หรือเครื่องจักร เช่น งานวิจัยของ Garrido and Moreno (2015) [8], งานวิจัยของ Al-Dahhan and Schmidt (2019) [9] และงานวิจัยของ Özcan and Yaman (2019) [10] อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมแผนภาพไวโรนอยนั้น มีข้อจำกัดที่สามารถใช้ได้ทั้งสองมิติเท่านั้น ทำให้การประยุกต์ใช้ในการหาเส้นทางของอากาศยานในสามมิตินั้นเป็นไปได้ยาก

ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอแนวคิดในการประยุกต์ใช้แผนภาพโครงข่ายที่สร้างจากชั้นมาจากอัลกอริทึมสามเหลี่ยม Delaunay [11] ที่มีขีดความสามารถสร้างโครงข่ายรูปสามเหลี่ยมได้ทั้งในสองมิติและสามมิติ เพื่อมาประยุกต์ใช้ในการหาเส้นทางที่เหมาะสมของการปฏิบัติการกิจทางอากาศของอากาศยานในกองทัพอากาศต่อไป

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อวิเคราะห์และเสนอแนวทางการใช้แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay ในการสร้างโครงข่ายสมมุติสำหรับเส้นทางบินของอากาศยานในสามมิติ

2.2 เพื่อวิเคราะห์แนวทางหาเส้นทางการบินที่สั้นที่สุดของโครงข่ายแผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay จากการตัดพื้นที่เสี่ยงภัยต่อการถูกตรวจจับด้วยระบบเรดาร์และการชนเข้ากับภูมิประเทศ

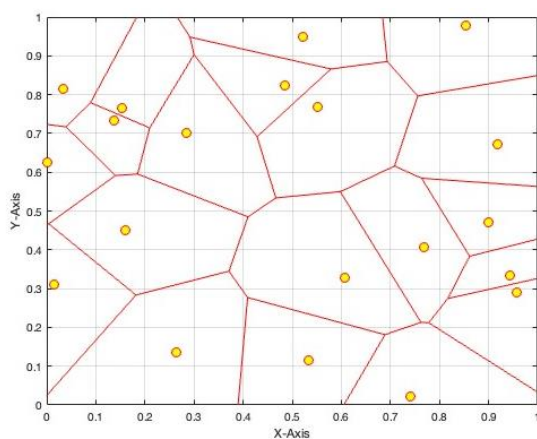
3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอขั้นตอนในการหาเส้นทางที่เหมาะสมในการปฏิบัติการกิจทางอากาศของอากาศยานในกองทัพอากาศในพื้นที่เสี่ยงภัยจากการตรวจจับของระบบเรดาร์ข้าศึกบนพื้นที่สามมิติ โดยแนวคิดที่นำเสนอในงานวิจัยชิ้นนี้นั้น จำเป็นจะต้องใช้องค์ความรู้สำคัญ 4 ส่วน เพื่อวิเคราะห์และสร้างเส้นทางที่เหมาะสมขึ้นมา โดยองค์ความรู้ทั้ง 4 ส่วนนั้น คือ

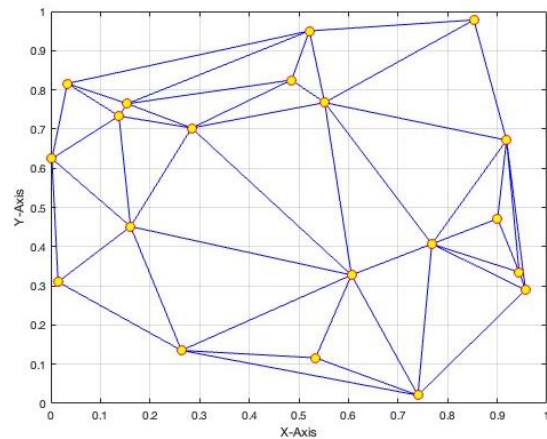
3.1 โครงข่ายสามเหลี่ยม Delaunay

ในทางคอมพิวเตอร์กราฟิกและการศึกษารูปทรงเรขาคณิตนั้น จะมีแนวทางการสร้างโครงข่ายที่เป็น การเชื่อมกันของจุดแต่ละจุดที่สามารถประยุกต์ใช้เป็นเส้นทางบินของอากาศยานอยู่หลายวิธี และวิธีที่นิยมอย่างมาก 2 แบบ คือ แผนภาพไวโรนอยและแผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay โดยกระบวนการทั้งสองแบบนี้จะเป็นการสร้างโครงข่ายที่ไม่มีเส้นทางเดินตัดกัน จากจุดยอดที่กำหนดขึ้นมา โดยข้อแตกต่างนั้น ในแบบของแผนภาพไวโรนอยนั้น เส้นทางเดินที่ถูกสร้างขึ้นมา จะเป็นเส้นทางเดินที่อยู่ระหว่างกลางของจุดที่กำหนดขึ้น (จุดสีเหลือง) ในรูปที่ 1(ก) ในขณะที่การสร้างโครงข่ายจากแผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay นั้นจะใช้จุดที่กำหนดขึ้น (จุดสีเหลือง) มาเป็นจุดยอดของสามเหลี่ยมของโครงข่ายนั้นๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 1(ข) โดยโครงข่ายจากแผนภาพของสามเหลี่ยม Delaunay นั้น จะมีความได้เปรียบในการสร้างที่รวดเร็วกว่า เพราะไม่จำเป็นต้องคำนวณหาจุดกึ่งกลางและหาแนวเส้นตัดของโครงข่ายตามแบบแผนภาพไวโรนอยที่จำเป็นต้องมีการคำนวณ

หลายขั้นตอน อีกทั้งแผนภาพโวโรนอยยังมีข้อจำกัดที่สามารถทำได้เฉพาะสองมิติเท่านั้น จึงทำให้เป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้กับสถานการณ์ที่มีพื้นที่เป็นสามมิติ ในทางตรงกันข้าม แผนภาพของสามเหลี่ยม Delaunay นั้นสามารถทำได้ดี โดยแสดงไว้ในตัวอย่างในรูปที่ 2 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำเสนอแนวทางการใช้แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay ที่ทีมผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมา มาประยุกต์ใช้ในการหาเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับอากาศยานต่อไป

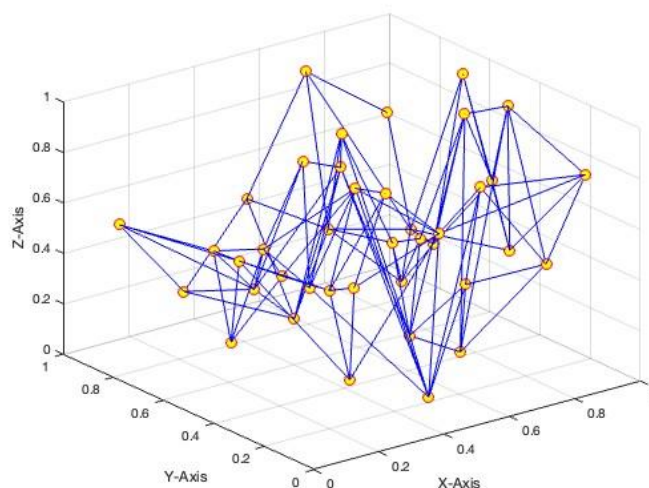


(ก)



(ข)

รูปที่ 1 ตัวอย่างโครงข่ายเส้นทางที่ถูกสร้างขึ้นจากจุดยอดที่กำหนด (จุดสีเหลือง) ด้วย (ก) แผนภาพโวโรนอย
(ข) แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay



รูปที่ 2 ตัวอย่างโครงข่ายเส้นทางที่ถูกสร้างขึ้นจากจุดยอดที่กำหนดด้วยแผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay
ในรูปแบบสามมิติ

3.2 การวิเคราะห์หาพื้นที่เสี่ยงภัยต่อการบิน

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้พิจารณาถึงพื้นที่เสี่ยงภัย เป็นพื้นที่ที่อากาศยานไม่สมควรบินเข้าไป เพราะมีโอกาสสูญเสียเกินกว่าระดับที่รับได้ โดยความเสี่ยงภัยนั้นมีด้วยกัน 2 รูปแบบ คือ พื้นที่ที่ถูกปิดด้วยภูมิประเทศหรือภูเขาจนทำให้อากาศยานไม่สามารถบินผ่านไปได้ และสองคือพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการถูกตรวจจับด้วยระบบเรดาร์ของข้าศึกและอาจถูกอาวุธโจมตีของข้าศึกได้ ซึ่งพื้นที่เสี่ยงต่อการถูกตรวจจับและเสี่ยงต่อการถูกโจมตีของข้าศึคนั้น จะพิจารณาได้จากการครอบคลุมของระบบเรดาร์ข้าศึก เพราะอาวุธปล่อยจากพื้นสู่อากาศนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้เรดาร์ในการตรวจจับเสียก่อน เพื่อให้ได้ความแม่นยำในการโจมตี โดยระยะตรวจจับนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการระบบเรดาร์ [12-16] ด้านล่าง

$$R_{max} = \left(\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_e B F (SNR)_{min}} \right)^{1/4} \quad (1)$$

ซึ่งสมการนี้จะอธิบายพฤติกรรมของระยะตรวจจับจากข้อมูลของระบบเรดาร์ โดยมีตัวแปรที่สำคัญดังนี้ คือ R_{max} เป็นระยะตรวจจับไกลสุดของระบบเรดาร์, P_t (Peak Power) เป็นค่าพลังงานสูงสุดของระบบเรดาร์ที่สามารถปล่อยออกไปได้, G (Gain) คือค่ากำลังขยายของระบบเรดาร์, λ คือความยาวคลื่นของระบบเรดาร์, σ (Radar Cross Section (RCS)) คือค่าเฉพาะที่สะท้อนจากเป้าหมายแต่ละชนิดหรือเรียกว่าพื้นที่หน้าตัดเรดาร์, k (Boltzman Constant) คือค่าคงที่ของบ็อลทซ์มัน, B (Bandwidth) คือ ความกว้างของช่วงคลื่นที่ถูกส่งออกแล้วในแต่ละครั้ง, T_e (Effective Temperature) คืออุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การทำงานของระบบเรดาร์, F (Number of Noise Figure) คืออัตราส่วนค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio (SNR)) ของสัญญาณฝั่งเข้ากับค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของสัญญาณฝั่งออกและตัวแปรตัวสุดท้ายคือ $(SNR)_{min}$ เป็นค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนน้อยที่สุดที่ยังสามารถตรวจจับเป้าหมายได้ ซึ่งค่า $(SNR)_{min}$ จะเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์พื้นที่ No Fly Zone เพราะเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นในการตรวจจับ (Probability of Detection (Pd)) กับความน่าจะเป็นในการแจ้งเตือนภัยผิดพลาดของระบบเรดาร์ (Probability of False Alarm (PFA))

3.3 เส้นทางเดินที่สั้นที่สุดของโครงข่าย

หลังจากตัดพื้นที่เสี่ยงภัยต่อการบินของอากาศยานเกินกว่าระดับที่รับได้ออกไปหมดแล้ว จะเหลือเพียงแต่พื้นที่ที่อากาศยานสามารถบินไปทำภารกิจและอยู่ในเกณฑ์ความเสี่ยงที่รับได้ โดยเส้นทางที่จะใช้ในการบินไปปฏิบัติภารกิจนั้น จำเป็นจะต้องเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดเพื่อลดความเสี่ยงโดยรวมในการปฏิบัติภารกิจ ประหยัดเวลาและทรัพยากรในการปฏิบัติภารกิจมากที่สุด ในงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นการนำเสนอแนวทางในการใช้อัลกอริทึมของไดจ์สตรา (Dijkstra's Algorithm) [17-18] มาประยุกต์ใช้ในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดจากโครงข่ายเส้นทางที่เหลืออยู่ โดยอัลกอริทึมนี้เป็นอัลกอริทึมที่ง่ายและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ ได้ เช่น การค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุดสำหรับการเดินทาง การวางแผนโครงข่าย การส่งสินค้า การจัดเส้นทางขนส่ง

อัลกอริทึมของไดจ์ยังมีความนิยมอย่างมากในหลายงานวิจัย เช่น ในงานวิจัยของ Broumi et al. (2016) [19] และ Qing et al. (2017) [20] อีกด้วย แม้ว่าอัลกอริทึมในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดนั้น มีอยู่ด้วยกันหลากหลาย แต่อัลกอริทึมของไดจ์สตรา (Dijkstra's Algorithm) [17-18] ยังเป็นหนึ่งในอัลกอริทึมที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้ง่ายและหาคำตอบได้เสมอในทุกกรณีที่มีคำตอบ ซึ่งงานวิจัยในอนาคตผู้วิจัยจะดำเนินการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมชนิดอื่นๆ ต่อไป

3.4 การปรับเส้นทางบินให้เรียบด้วยสมการพหุนาม

เส้นทางที่ได้จากแนวทางเดินของโครงข่ายที่สร้างขึ้นจากแผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay ในบางครั้งมีแนวเส้นทางที่มีมุมหักเลี้ยวแคบเกินไปหรืออาจจะบ่งบอกถึงความจำเป็น เพื่อให้เส้นทางการบินสามารถนำไปใช้ได้จริง ในงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นการดำเนินการปรับเส้นทางเหล่านั้นให้มีความราบเรียบมากยิ่งขึ้น จนสามารถนำไปใช้ในการบินได้จริงๆ โดยกระบวนการในการปรับเส้นทางการบินนั้น สามารถทำได้โดยใช้เส้นทางที่ได้จากการประมาณค่าด้วยสมการพหุนาม (Polynomial Interpolation) [21] ของจุดทางเดินของโครงข่ายสามเหลี่ยม Delaunay มาแทนเส้นทางเดิมของแผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay ซึ่งกระบวนการประมาณค่าด้วยสมการพหุนามนี้ เป็นที่นิยมและถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยหลากหลาย เช่น งานวิจัยของ Dai and Cochran (2010) [22] และงานวิจัยของ Artuñedo et al. (2017) [23]

4. วิธีดำเนินการศึกษา

หลังจากอธิบายองค์ความรู้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay มาหาเส้นทางการบินที่เหมาะสมในหัวข้อที่แล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำเสนอกระบวนการและขั้นตอนในการประยุกต์ใช้แนวคิดเหล่านี้ เพื่อให้สามารถหาเส้นทางที่เหมาะสมต่อการบินเพื่อปฏิบัติการกิจของกองทัพอากาศต่อไป โดยขั้นตอนนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ตามแผนภาพในรูปที่ 3

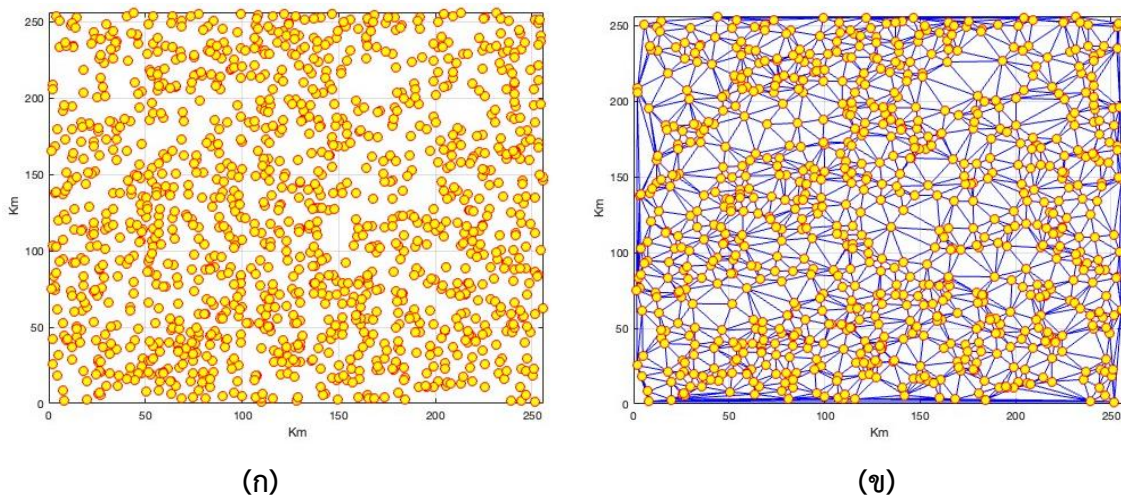


รูปที่ 3 ขั้นตอนในการประยุกต์ใช้แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay ในการหาเส้นทางที่เหมาะสมต่อการบินปฏิบัติการกิจในพื้นที่สามมิติ

โดยในขั้นตอนแรกนั้นจะเป็นการสุ่มตำแหน่งจุดยอด เพื่อที่จะใช้ในกระบวนการสร้างโครงข่ายเส้นทางการบินของอากาศยานต่อไป โดยจุดที่สุ่มขึ้นมาี้ ถ้ามีจำนวนน้อยก็จะทำให้การคำนวณสามารถเกิดขึ้นได้รวดเร็ว แต่จำนวนจุดที่เพิ่มมากขึ้นก็จะสามารถเพิ่มความละเอียดของเส้นทางได้ ดังนั้นการนำไปใช้สามารถ

ปรับแต่งได้ตามความต้องการของผู้ใช้ โดยตัวอย่างที่นำเสนอในรูปที่ 4(ก) ได้ดำเนินการสุ่มจำนวนจุดยอดมาจำนวน 800 จุด ให้กระจายตัวบนพื้นที่ 256×256 ตารางกิโลเมตร ที่ระดับความสูง 800 เมตร โดยในรูปที่ 4(ก) นั้นจะเป็นภาพที่มองจากมุมบน

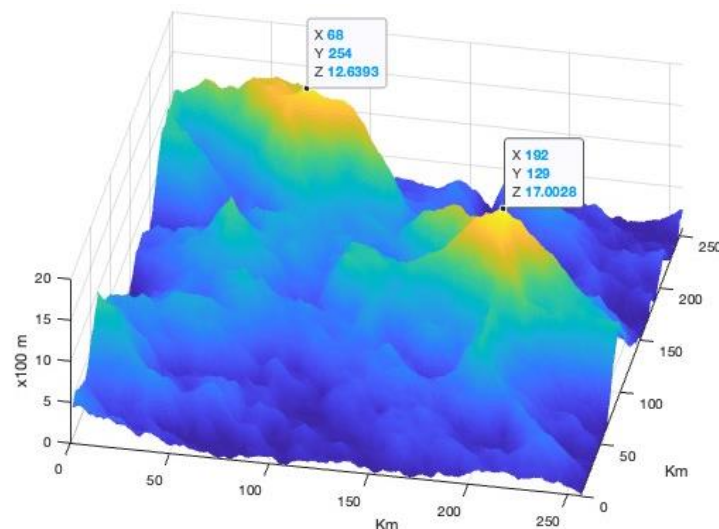
ขั้นตอนที่สองนั้น จะเป็นการสร้างโครงข่ายของเส้นทางจากจุดที่สุ่มมาจากขั้นตอนแรก ซึ่งจุดที่สุ่มขึ้นมา นั้นจะทำหน้าที่เป็นจุดยอดของอัลกอริทึมการสร้างรูปสามเหลี่ยม Delaunay และผลที่ได้นั้น ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4(ข) ซึ่งโครงข่ายนี้จะเป็นการจำลองเส้นทางการบินของอากาศยาน



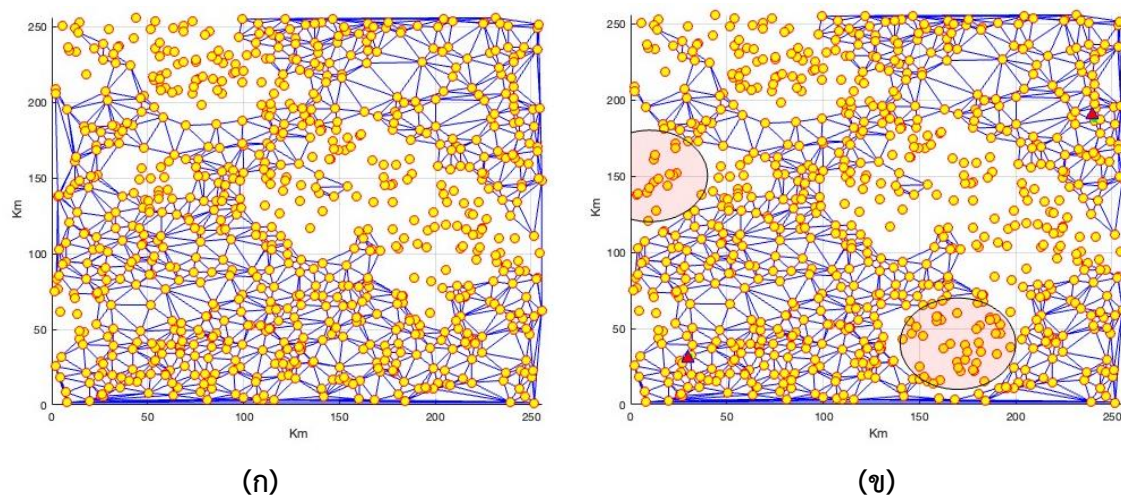
รูปที่ 4 ตัวอย่างโครงข่ายที่สร้างขึ้นจากอัลกอริทึมรูปสามเหลี่ยม Delaunay

ขั้นตอนที่สามนั้น จะเป็นการตัดเส้นทางของโครงข่ายที่สร้างขึ้นมาแล้วในขั้นตอนที่สอง โดยพิจารณาจากพื้นที่ที่ถูกบดบังด้วยภูมิประเทศในสามมิติทำให้อากาศยานไม่สามารถบินไปยังพื้นที่เหล่านั้นได้ นอกจากนี้แล้วยังพิจารณาตัดพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการถูกตรวจจับจากระบบเรดาร์และอาวุธต่อสู้อากาศยานของข้าศึกด้วย โดยขั้นตอนนี้ได้ดำเนินการสมมุติสร้างภูมิประเทศขนาด 256×256 ตารางกิโลเมตร โดยมีความสูงอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1,700 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยภูมิประเทศที่สุ่มสร้างขึ้นมานั้นจะมียอดเขาสูงอยู่สองยอด โดยยอดที่หนึ่งสูง 1,700 เมตร ส่วนยอดที่สองสูง 1,263 เมตร โดยภูเขาจำลองในภูมิประเทศนี้ จะบดบังทำให้อากาศยานไม่สามารถบินทะลุภูเขาได้ ดังนั้นโครงข่ายที่สร้างขึ้นมาในขั้นตอนที่สองที่ระดับความสูง 800 เมตร จะถูกตัดออก และผลที่ได้นั้นแสดงในรูปที่ 6(ก) จากนั้นในขั้นตอนต่อไปจะสาธิตการตัดพื้นที่เสี่ยงภัยออกจากโครงข่ายแผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay โดยในกรณีนี้ในสมมุติว่าฝ่ายข้าศึกนั้นมีเรดาร์และอาวุธปล่อยจากพื้นสู่อากาศ ตั้งอยู่ที่ พิกัด (10,150) และพิกัด (170,40) โดยทั้งสองพิกัดนั้นจะมีเรดาร์เคลื่อนที่ติดตั้งอยู่ โดยเรดาร์เหล่านี้มีค่าตัวแปรดังนี้ คือ $P_t = 3 \text{ kW}$, $f = 1 \text{ GHz}$, $\lambda = 0.3 \text{ m}$, $G = 20 \text{ dB}$, $B = 0.1 \text{ Mhz}$, $F = 0$ $L = 3 \text{ dB}$ และ $(\text{SNR})_{\min} = 12.2387 \text{ dB}$ (ซึ่งค่าตัวแปรเหล่านี้เป็นค่าที่สมมุติขึ้นมา แต่มีความใกล้เคียงกับค่าตัวแปรมาตรฐานที่พบได้ในเรดาร์เคลื่อนที่ที่มีการใช้งานอยู่ในกองทัพ) โดยค่าตัวแปรเหล่านี้ ทำให้สามารถคำนวณได้ว่า ระบบเรดาร์เหล่านี้

มีระยะในการตรวจจับอยู่ที่ระยะ 31.75 กิโลเมตร จากการแทนค่าในสมการที่ 1 ด้วยค่าความน่าจะเป็นในการตรวจพบเข้าคืออยู่ที่ 95% จากนั้นเมื่อได้ค่าระยะการตรวจจับของระบบเรดาร์และพิกัดของระบบเรดาร์ทั้งสองมาแล้ว จะมาดำเนินการตัดพื้นที่ของโครงข่ายออก เพื่อไม่ให้อากาศยานฝ่ายเราบินเข้าไปยังบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการถูกตรวจจับและถูกโจมตีจากอาวุธปล่อยจากพื้นสูงอากาศได้ โดยผลที่ได้นั้นแสดงอยู่ในรูปที่ 6(ข) โดยพื้นที่ครอบคลุมของระบบเรดาร์นั้น แสดงด้วยพื้นที่สีแดง



รูปที่ 5 ภูมิประเทศจำลอง ขนาด 256x256 ตารางกิโลเมตร ที่ใช้ในการทดสอบ



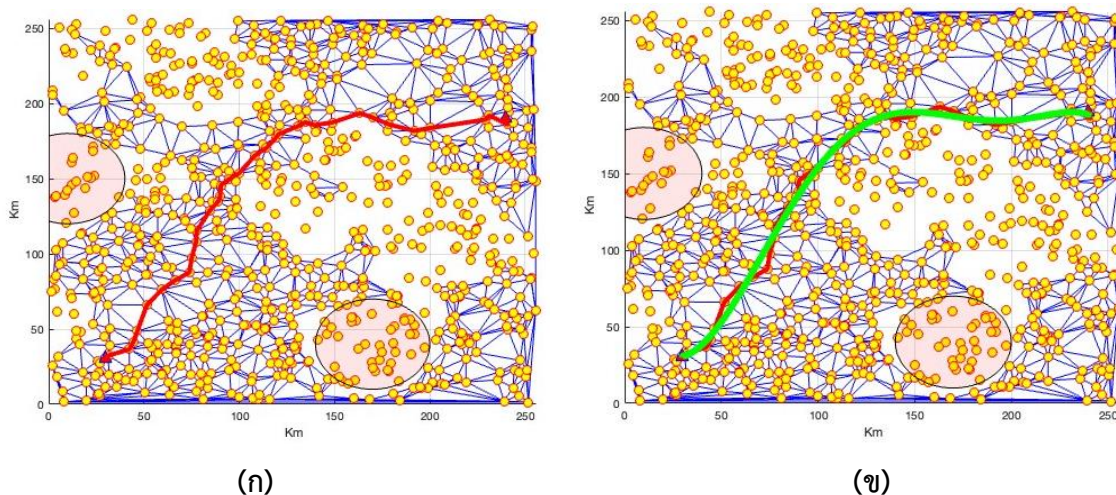
(ก)

(ข)

รูปที่ 6 แผนภาพโครงข่ายจากอัลกอริทึมสามเหลี่ยม Delaunay เมื่อตัดพื้นที่เสี่ยงภัยจาก (ก) การชนกับภูมิประเทศที่ความสูง 800 เมตร (ข) การชนกับภูมิประเทศและระบบเรดาร์

ขั้นตอนที่สี่นั้น จะเป็นการหาเส้นทางที่เหมาะสมหรือเส้นทางที่สั้นที่สุดสำหรับอากาศยานบินไปปฏิบัติภารกิจ จากโครงข่ายของเส้นทางบินที่เหลืออยู่หลังจากตัดพื้นที่เสี่ยงภัยที่เกินจากระดับความเสี่ยงที่รับได้ออกไปหมดแล้ว โดยตัวอย่างที่ใช้สาธิตการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมชนิดนี้นั้น ได้สมมติว่า อากาศยานอยู่ที่พิกัด (30,30) ต้องการที่จะบินไปโจมตีพิกัดเป้าหมายอยู่ที่ตำแหน่งพิกัด (240,190) โดยจำเป็นที่จะต้องบินอยู่ในระดับต่ำที่ความสูง 800 เมตร เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศยานของฝ่ายข้าศึกที่อยู่ด้านบนตรวจพบได้ โดยกระบวนการนี้จะต้องดำเนินการเพิ่มจุดเริ่มต้นของอากาศยานและตำแหน่งเป้าหมายเข้ากับโครงข่ายสามเหลี่ยม Delaunay เสียก่อน โดยการเพิ่มเส้นเชื่อมระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดเป้าหมายไปหาจุดยอดของโครงข่ายที่อยู่ใกล้ที่สุดและยังไม่ถูกตัดออกไปจากขั้นตอนก่อนหน้านี้ จากนั้นจึงใช้อัลกอริทึมของไดจ์สตรา (Dijkstra's Algorithm) เพื่อค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุดบนโครงข่ายที่เหลืออยู่นี้ และผลลัพธ์ที่ได้แสดงด้วยเส้นสีแดงในรูปที่ 7(ก) โดยมีระยะทางทั้งหมดเท่ากับ 319.18 กิโลเมตร

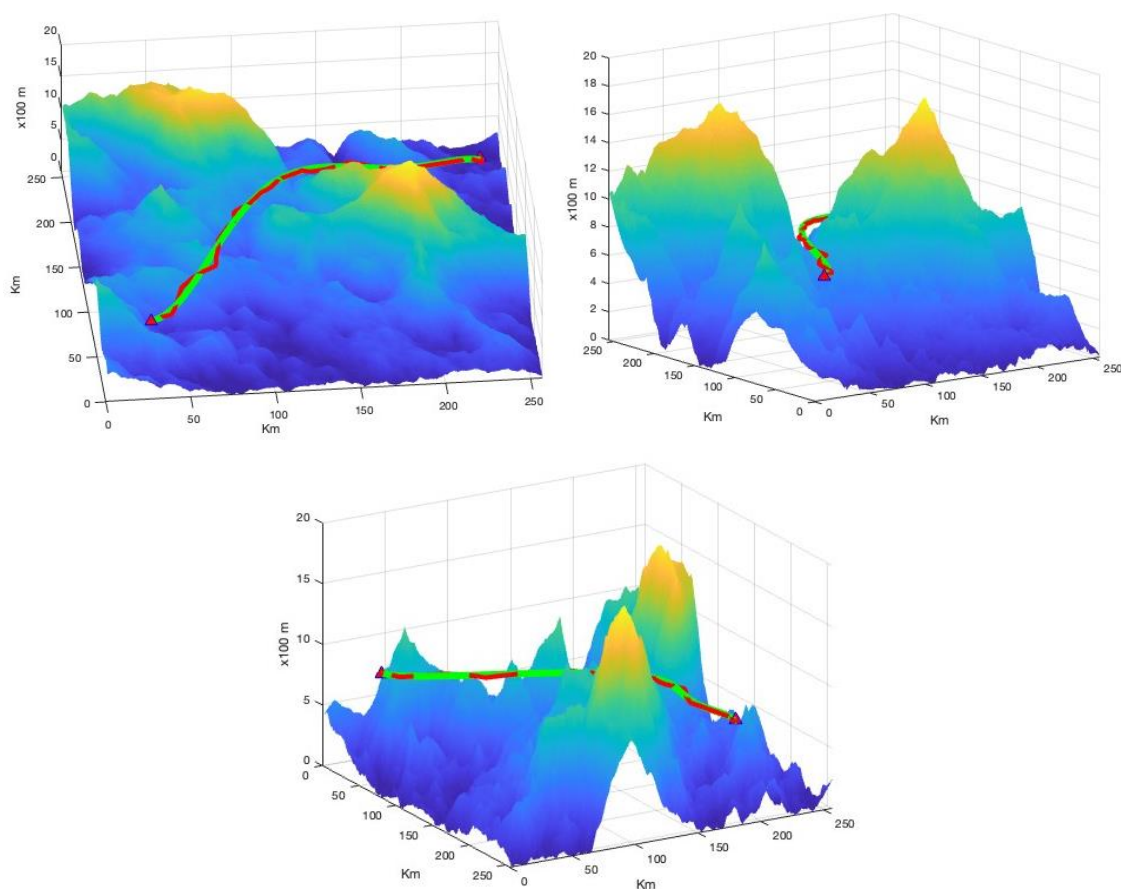
ในขั้นตอนสุดท้ายนั้น จะดำเนินการปรับเส้นทางที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่สี่ ในรูปที่ 7(ก) ที่มีการหักเลี้ยวที่เป็นมุมแคบอยู่หลายจุดและเป็นเรื่องที่น่าลำบากของการบินจริงของอากาศยาน ดังนั้นตำแหน่งพิกัดเหล่านี้จะถูกนำไปปรับให้เรียบขึ้นด้วยการประมาณค่าด้วยสมการพหุนามกำลัง 6 ในรูปแบบสมการ $y = ax^6 + bx^5 + cx^4 + dx^3 + ex^2 + fx + g$ โดยค่าสัมประสิทธิ์ $a - g$ สามารถหาได้จากกระบวนการ Least Square Linear Regression โดยผลลัพธ์ที่ได้นั้นแสดงด้วยเส้นสีเขียวในรูปที่ 7(ข) ในกรณีที่กำลังของพหุนามที่เลือกมานั้น ไม่เหมาะสมกับเส้นทางการบินที่วิเคราะห์ได้ในขั้นตอนที่สี่นั้น สามารถเพิ่มหรือลดกำลังของสมการพหุนามให้เหมาะสมกับเส้นทางได้



รูปที่ 7 เส้นทางการบินในการปฏิบัติภารกิจที่จำลองขึ้น (ก) คำนวณด้วยอัลกอริทึมของไดจ์สตรา (ข) ปรับความเรียบด้วยการประมาณสมการพหุนามกำลัง 6

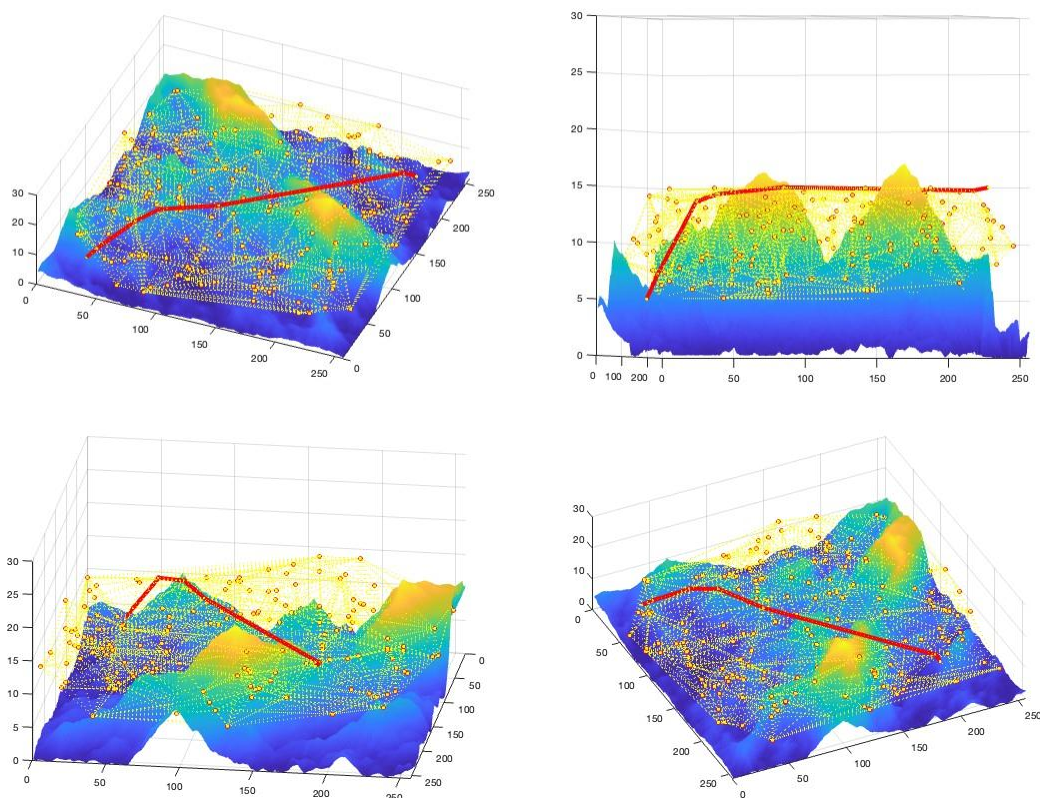
5. ผลการศึกษา

จากกรณีตัวอย่างและขั้นตอนในการประยุกต์ใช้แผนภาพโครงข่ายสามเหลี่ยม Delaunay ที่ทีมผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นมา ในการวิเคราะห์หาเส้นทางที่เหมาะสมในการบินไปปฏิบัติภารกิจทางอากาศของอากาศยานที่อธิบายมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ ทำให้เห็นได้ว่าขั้นตอนและอัลกอริทึมที่ผู้วิจัยนำเสนอในงานวิจัยชิ้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการหาเส้นทางการบินที่เหมาะสมได้จริง ในการปฏิบัติการกิจของอากาศยานบนภูมิประเทศที่มีลักษณะเป็นสามมิติ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนในหัวข้อที่แล้วนั้นสามารถแสดงลงบนแผนที่สามมิติ ดังตัวอย่างในรูปที่ 8 โดยในตัวอย่างนี้เส้นทางการบิน พิกัดเริ่มต้นอยู่ที่พิกัด (30,30) และพิกัดเป้าหมายอยู่ที่พิกัด (240,190) โดยอากาศยานนั้นจำมีเส้นทางการบินอยู่ที่ความสูงคงที่ที่ 800 เมตรตลอดเวลา



รูปที่ 8 ตัวอย่างเส้นทางการบินในการปฏิบัติการกิจจากพิกัด (30,30) ไปโจมตีเป้าหมายที่พิกัด (240,190) บนแผนที่สามมิติขนาด 256x256 ตารางกิโลเมตร

นอกจากนี้แล้วแผนภาพโครงข่ายสามเหลี่ยม Delaunay และขั้นตอนอัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยชิ้นนี้ ยังสามารถประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์หาเส้นทางการบิน ในสภาวะที่สามารถเปลี่ยนแปลงความสูงได้ดังในตัวอย่างในรูปที่ 9 โดยในตัวอย่างนี้กำหนดให้อากาศยานนั้นมีพิกัดเริ่มต้นอยู่ที่ (30,30) และมีความสูงอยู่ที่ 500 เมตร มีภารกิจที่จำเป็นต้องบินไปพิกัด (240,190) ที่ระดับความสูง 1,500 เมตร โดยระยะความสูงที่สามารถใช้นั้นอยู่ระหว่างความสูง 500 - 1,500 เมตร ซึ่งสามารถทำได้โดยการสุ่มกำหนดจุดยอดให้อยู่บนพื้นที่สมมุติขนาด 256x256 ตารางกิโลเมตร และมีความสูงกระจายไปในช่วงความสูง 500 - 1,500 เมตร กล่าวคือ มีการสุ่มทั้งพิกัด x , y และ z ในขอบเขตที่ต้องการ จากนั้นดำเนินการสร้างแผนภาพโครงข่ายสามเหลี่ยม Delaunay ในรูปแบบสามมิติ และดำเนินการตัดพื้นที่ที่เสี่ยงจากระบบเรดาร์และการชนเข้ากับภูมิประเทศออกเหมือนดังตัวอย่างก่อนหน้านี้ โดยพบว่าเส้นทางที่สั้นที่สุด หลังจากตัดระบบเรดาร์และภูมิประเทศออกไปแล้วนั้น คือการที่อากาศยานได้ความสูงไปที่ 1,500 เมตร จากจุดเริ่มต้นเลย จากนั้นบินที่ความสูงนี้ตรงข้ามภูเขาไปยังเป้าหมายได้เลย โดยระยะรวมทั้งหมดอยู่ที่ 270 กิโลเมตร



รูปที่ 9 ตัวอย่างเส้นทางการบินในการปฏิบัติการกิจจากพิกัด (30,30) ที่ความสูง 500 เมตร ไปโจมตีเป้าหมายที่พิกัด (240,190) ที่ความสูง 1,500 เมตร บนแผนที่สามมิติขนาด 256x256 ตารางกิโลเมตร

6. สรุปและอภิปรายผล/ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากสมรรถภูมิการรบทางอากาศในยุคใหม่นั้น มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ทำให้การตัดสินใจหาเส้นทางการบินที่เหมาะสมที่สุดนั้นเป็นเรื่องยากมากยิ่งขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงเป็นการนำเสนอแนวทางการใช้แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay มาสร้างโครงข่ายเส้นทางการบินที่สามารถใช้ได้ในพื้นที่ที่สนใจ จากนั้นใช้สมการเรดาร์คำนวณหาระยะเสี่ยงภัยต่อการถูกโจมตีและการถูกตรวจจับจากข้าศึก และความสูงของภูมิประเทศมาตัดพื้นที่การบินที่ไม่สามารถใช้ได้ออกจากโครงข่ายเส้นทางการบิน จากนั้นใช้อัลกอริทึมของโดิกส์ตรามาคำนวณหาเส้นทางการบินที่สั้นที่สุด บนโครงข่ายที่เหลืออยู่จากพิกัดเริ่มต้นไปยังพิกัดเป้าหมาย และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการทำให้เส้นทางการบินราบเรียบขึ้นด้วยการประมาณค่าเส้นทางการบินโดยใช้สมการพหุนาม

แนวคิดในการใช้คอมพิวเตอร์และอัลกอริทึมมาประเมินเส้นทางการบินนี้ จะช่วยสร้างข้อมูลพิจารณาให้กับนักบินในการตัดสินใจเลือกเส้นทางการบิน ในสถานะที่ซับซ้อนและในสมรรถภูมิที่มีความซับซ้อน ประกอบไปด้วยอากาศยานของฝ่ายข้าศึก สถานีเรดาร์ เรดาร์เคลื่อนที่ จรวดต่อสู้อากาศยาน และภูมิประเทศที่ซับซ้อนนั้น จะเป็นการลดภาระงานและสร้างโอกาสให้นักบินตัดสินใจได้ดีมากยิ่งขึ้น โดยขั้นตอนอัลกอริทึมนี้จะเห็นเส้นทางการบินทั้งหมดตั้งแต่ต้น ทำให้ได้เปรียบอัลกอริทึมชนิดเรียลไทม์ ที่พิจารณาเลือกเส้นทางเป็นระยะๆ

นอกจากนี้ อัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยชิ้นนี้ ยังสามารถนำไปประยุกต์ในงานวิจัยอื่นๆ ได้หลากหลาย เช่น การวางแผนเส้นทางการบินของอากาศยานไร้คนขับ การวางแผนเส้นทางเดินของหุ่นยนต์ การวางแผนเส้นทางเดินเรือรบ และการวางแผนเส้นทางเดินเรือสินค้า เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Murphy R, Uryasev S, Zabaranin M. Trajectory optimization in a threat environment. Research Report 9 [Internet]. Florida: University of Florida, Department of Industrial and Systems Engineering; 2003 Jan. Available from https://www.researchgate.net/publication/251451092_Trajectory_optimization_in_a_threat_environment_Research_report
- [2] Turnbull O, Lawry J, Lowenberg M, Richards A. A cloned linguistic decision tree controller for real-time path planning in hostile environments. Fuzzy Sets Syst. 2016 Jun 15;(293):1-29.
- [3] Banfi J, Campbell M. High-Level Path Planning in Hostile Dynamic Environments. In Proceedings of the 18th International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems [Internet]; 2019 Jan; Montreal, Canada. Montreal; Conference: AAMAS; 2019 [cited 2023 Jan 12]; p.1799-1801. Available from: https://www.researchgate.net/publication/335125982_High-Level_Path_Planning_in_Hostile_Dynamic_Environments
- [4] Yang L, Qi J, Xiao J, Yong X. A literature review of UAV 3D path planning. In Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation [Internet]; 2014 Jun 1; Shenyang, IEEE; 2014 [cited 2023 Feb 1]; p. 2376-81. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7053093> doi: 10.1109/WCICA.2014.7053093.

-
- [5] Bruce J, Veloso M. Real-time randomized path planning for robot navigation. In IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems [Internet]; 2002; Lausanne, Switzerland. [place unknown]; IEEE; 2002 [cited 2023 Feb 12]; p. 2383-88. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1041624> doi: 10.1109/IRDS.2002.1041624.
- [6] Aurenhammer F. Voronoi diagrams: A survey of a fundamental geometric data structure. *ACM Comput Surv.* 1991 Sep 1;23(3): 345-405.
- [7] Garrido S, Moreno LE, Blanco D. Voronoi diagram and Fast Marching applied to path planning. In Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation [Internet]; 2006 May 15-19; Orlando, Florida, USA. [place unknown]: DBLP; 2006 [cited 2023 Mar 3]; p.3049-54. Available from: https://www.researchgate.net/publication/221072916_Voronoi_Diagram_and_Fast_Marching_applied_to_Path_Planning doi:10.1109/ROBOT.2006.1642165
- [8] Garrido S, Moreno L. Mobile robot path planning using voronoi diagram and fast marching. In: Luo Z, editor. *Robotics, Automation, and Control in Industrial and Service Settings*. [place unknown]: IGI Global; 2015. p. 92-108.
- [9] Al-Dahhan M, Schmidt, K. Path Planning Based on Voronoi Diagram and PRM for Omnidirectional Mobile Robots. In: DTSS2019 international conference [Internet]; 2019 Oct; Ankara, Turkey.
- [10] Özcan M, Yaman U. A continuous path planning approach on Voronoi diagrams for robotics and manufacturing applications. *Procedia Manuf.* 2019;38:1-8.
- [11] Delaunay B. Sur la sphère vide. *Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS, Bull Acad Serbe Sci Cl Sci Math Nat Sci Nat.* 1934;6:793–800.
- [12] Skolnik M. *Radar Handbook*. 3rd ed. Boston: McGraw-Hill, 1990.
- [13] Mahafza B. *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*. 3rd ed. New York: CRC Press, 2013.
- [14] Skolnik M. *Introduction to Radar Systems*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill; 2001.
- [15] Mahafza BR, Elsherbeni A. *MATLAB Simulations for Radar Systems Design*. New York: Chapman & Hall/CRC; 2003.
- [16] Willis NJ. *Bistatic Radar*. Raleigh, NC: SciTech; 2005.
- [17] Dijkstra EW. A note on two problems in connexion with graphs. *Numer Math.* 1959;1: 269-71.
- [18] Cormen TH, Leiserson CE, Rivest RL, Stein C. *Introduction to Algorithms*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill; 2001.

-
- [19] Broumi S, Bakal A, Talea M, Smarandache F, Vladareanu L. Applying Dijkstra algorithm for solving neutrosophic shortest path problem. In: 2016 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS) [Internet]; 2016 Nov 30 – 2016 Dec 3; Melbourne, VIC, Australia; 2016 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS); 2017 [cited 2023 Mar 20]; p.412-6. Available from: IEEE doi: 10.1109/ICAMechS.2016.7813483
- [20] Qing G, Zheng Z, Yue X. In: Path-planning of automated guided vehicle based on improved Dijkstra algorithm [Internet]; 2017 May 28-30; Chongqing, China; 2017 29th Chinese control and decision conference (CCDC); 2017 [cited 2023 Apr 12]; p.7138-43. Available from IEEE doi: 10.1109/CCDC.2017.7978471.
- [21] Schatzman M. Numerical Analysis: A Mathematical Introduction. Oxford: Clarendon; 2002.
- [22] Dai R, Cochran JE. Path planning and state estimation for unmanned aerial vehicles in hostile environments. J Guid Control Dyn. 2010 Apr;33:595-601.
- [23] Artuñedo A, Godoy J, Villagra J. A comparison of local path-planning interpolation methods for autonomous driving in urban environments. Industriales research meeting 17.

การคำนวณความลึกวิกฤติของการถ่ายเทตะกอนสุทธิ (Depth of Closure)

สำหรับพื้นที่ชายฝั่งทะเลอ่าวไทย

Calculating Depth of Closure for the Gulf of Thailand Coastline

วันชัย จันทร์ละเอียด¹

Wanchai Chanla-iad¹

Received: June 2, 2023

Revised: June 19, 2023

Accepted: June 21, 2023

บทคัดย่อ

การแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมชายฝั่งโดยส่วนใหญ่แล้วมีความจำเป็นที่จะต้องทราบค่าความลึกวิกฤติของการถ่ายเทตะกอนสุทธิ (Depth of Closure: DoC) ซึ่งเป็นค่าความลึกน้ำ ณ จุดที่คลื่นสามารถพัดพาตะกอนไปตามพื้นท้องทะเลโดยมีการเคลื่อนที่ของตะกอนสุทธิน้อยที่สุด ซึ่งเป็นความลึกที่มีอัตราการถ่ายเทตะกอนเท่ากับศูนย์ และถือว่าตะกอนอยู่ในสภาวะสมดุล DoC เป็นตัวแปรสำคัญในงานวิศวกรรมชายฝั่ง เช่น การออกแบบท่าเทียบเรือ เขื่อนกันคลื่น การขุดลอก และการแก้ปัญหาการกัดเซาะชายฝั่ง ในบทความนี้จะนำเสนอการคำนวณหาค่าความลึกวิกฤติของการถ่ายเทตะกอนสุทธิ (DoC) สำหรับแนวชายฝั่งทะเลอ่าวไทย โดยใช้สถิติข้อมูลคลื่นจากแบบจำลองการพยากรณ์คลื่นในทะเล (WAM Model) และข้อมูลขนาดตะกอนเฉลี่ยของพื้นที่ชายฝั่งทะเลอ่าวไทยประกอบกับการใช้สมการแบบจำลองการคำนวณคลื่นเบื้องต้น (Simple Wave-Based Model) ผลการศึกษาพบว่าชายฝั่งทะเลบริเวณอ่าวไทยตอนบน (หัวหิน สัตหีบ ระยอง) มีค่า DoC อยู่ระหว่าง 1.95 – 3.83 เมตร บริเวณอ่าวไทยตอนล่าง (สงขลา นราธิวาส) มีค่า DoC อยู่ระหว่าง 3.87 – 6.70 เมตร จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าความลึกวิกฤติของการถ่ายเทตะกอนสุทธิไม่ใช่ค่าคงที่ จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของคลื่น ลักษณะของตะกอน และสัณฐานวิทยาของชายฝั่ง รวมทั้งรูปแบบสมการของแบบจำลองการคำนวณหา DoC ที่ใช้ในการคำนวณ ดังนั้น เพื่อให้การคำนวณหาค่าความลึกวิกฤติของการถ่ายเทตะกอนสุทธิมีความถูกต้องใกล้เคียงกับลักษณะตามธรรมชาติของระบบชายฝั่งทะเล จึงควรมีการประเมินการหาค่า DoC ตามช่วงเวลาเป็นระยะๆ โดยใช้ข้อมูลภาคสนามและแบบจำลองที่มีการปรับปรุงอยู่เสมอประกอบในการคำนวณ

คำสำคัญ: ความลึกวิกฤติของการถ่ายเทตะกอนสุทธิ แบบจำลองการพยากรณ์คลื่นในทะเล แบบจำลองการคำนวณคลื่นเบื้องต้น

¹นักศึกษาวิทยาลัยการทัพเรือ กรมยุทธศึกษาทหารเรือ กองทัพเรือ

Naval War College Student, Naval Education Department, Royal Thai Navy

E-mail: wanchaic25@hotmail.com

Abstract

Many coastal engineering problems require a measure for "the depth of closure" defined as the minimum water depth at which no measurable change in bottom elevation occurs. This depth can be thought of as separating the active cross-shore sediment transport zone from a deeper zone of negligible sediment movement, and is an important parameter in the design of jetties, breakwaters, and ocean outfalls, as well as for sediment budget computations. In this article, a depth of closure (DoC) analysis for the Gulf of Thailand Coastlines is presented. The DoC is calculated by using wave statistics from WAM model hindcast stations along the Gulf of Thailand Coastlines and simple wave-based model. Results show that the coastline at the upper Gulf of Thailand (Hua Hin, Sattahip, Rayong) has a DoC value between 1.95 - 3.83 meters, in the lower Gulf of Thailand (Songkhla, Narathiwat) has a DoC value between 3.87 - 6.70 meters. The depth of closure is not a constant. It will vary depending on wave condition, sediment characteristics, and coastal morphology including the equation model of the DoC calculation used in the calculations. The determination of the DoC over time should be periodically evaluated by using field data and constantly updated wave-based model in order that the calculation of the DoC is accurate, similar to the natural characteristics of the coastal system.

Keywords: Depth of Closure, WAM Model, Simple Wave-based Model

1. บทนำ

พื้นที่ชายฝั่งทะเลมีประชากรหนาแน่นที่สุดในโลก ซึ่งมีประชากรทั่วโลกประมาณร้อยละ 10 ที่อาศัยอยู่ในเขตชายฝั่งทะเล ผลที่ตามมาคือมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานมหาศาลภายในเขตชายฝั่งทะเล ในขณะที่ชุมชนชายฝั่งเหล่านี้ และการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานถูกคุกคามด้วยภัยพิบัติจากธรรมชาติ เช่น พายุที่รุนแรง และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล ซึ่งคาดว่าจะทำให้เกิดการกัดเซาะชายฝั่งรุนแรงขึ้น ดังนั้นการพัฒนาที่เหมาะสมและกลยุทธ์ในการจัดการและป้องกันพื้นที่ชายฝั่งจะมีความสำคัญยิ่งขึ้นในอนาคตมากกว่าในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม การขาดความเข้าใจและวิธีการทำนายภัยพิบัติจากธรรมชาติในระยะยาวที่แม่นยำ การพัฒนากลยุทธ์เพื่อการปรับตัวให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ชายฝั่ง หรือการออกแบบโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ ในการพัฒนาพื้นที่ชายฝั่ง ให้สามารถป้องกันภัยพิบัติจากธรรมชาติได้มากที่สุดนั้น โดยส่วนใหญ่แล้วมีการดำเนินการโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และหนึ่งในพารามิเตอร์หลักในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือความลึกวิกฤติของการถอยเทะกอนสุทธิ (Depth of Closure) [1]

ในทางวิศวกรรมชายฝั่ง "ความลึกวิกฤติของการถอยเทะกอนสุทธิ (Depth of Closure: DoC)" หมายถึงระดับความลึกน้ำที่คลื่นสามารถพัดพาตะกอนไปตามพื้นที่ท้องทะเลโดยมีการเคลื่อนที่ของตะกอนสุทธิ

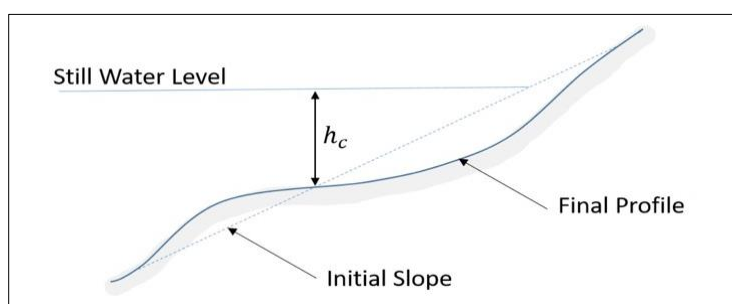
น้อยที่สุด ซึ่งเป็นความลึกที่มีอัตราการถ่ายเทตะกอนเท่ากับศูนย์ และถือว่าตะกอนอยู่ในสภาวะสมดุล กล่าวอีกนัยหนึ่ง คลื่นที่ซัดเข้าหาชายหาดหรือแนวชายฝั่งสามารถทำให้ตะกอนเคลื่อนที่ไปตามพื้นท้องทะเลได้ แต่จะมีความลึกในระดับหนึ่งเท่านั้น ณ ความลึกดังกล่าว ตะกอนโดยส่วนใหญ่จะมีน้ำหนักเกินกว่าที่คลื่นจะพัดพาได้ และเหนือระดับความลึกนั้น แรงจากคลื่นจะไม่เพียงพอต่อการเคลื่อนที่ของตะกอน [2] ดังนั้น DoC จึงเป็นจุดวิกฤติในระบบชายฝั่งที่ปริมาณตะกอนที่ถูกพัดพาเข้าหาฝั่งมีความสมดุลกับปริมาณตะกอนที่ถูกพัดพาออกไป DoC เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับวิศวกรชายฝั่ง เนื่องจาก DoC จะช่วยในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของสภาพคลื่น ที่อาจส่งผลกระทบต่อฐานวิทยาของชายฝั่งและการเคลื่อนตัวของตะกอน นอกจากนี้ยังสามารถช่วยในการตัดสินใจเกี่ยวกับการจัดการชายฝั่ง เช่น การขุดลอก และการแก้ปัญหาการกัดเซาะชายฝั่ง โดยทั่วไปจะหาค่า DoC ได้จากข้อมูลการสำรวจโปรไฟล์ของแนวชายฝั่ง หรือใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับบทความนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์หาค่า DoC บริเวณแนวชายฝั่งทะเลอ่าวไทย 5 พื้นที่ คือ บริเวณหัวสนามบินอู่ตะเภา อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง บริเวณอ่าวตงตาล อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี บริเวณหน้าสถานีอุทกศาสตร์หัวหิน อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ บริเวณหาดชลทัศน์ อำเภอมะนัง จังหวัดสงขลา และบริเวณหาดบ้านทอน อำเภอมะนัง จังหวัดนราธิวาส ดังรูปที่ 1 โดยใช้ข้อมูลสถิติคลื่นจากแบบจำลองการพยากรณ์คลื่นในทะเล (WAM Model) ในช่วงปี พ.ศ.2543 – 2559 และข้อมูลขนาดตะกอนของพื้นที่ชายฝั่ง จากกองอุทกนิยามวิทยา และกองสมุทรศาสตร์ ศูนย์ข้อมูลข่าวสารกองภูมิสารสนเทศทางอุทกศาสตร์ กรมอุทกศาสตร์ ตามลำดับ ประกอบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษา [3]

2. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สามารถคำนวณหาค่า DoC ได้หลายวิธี เช่น การใช้สูตรเชิงประจักษ์หรือแบบจำลองเชิงตัวเลข โดยส่วนใหญ่แล้วการคำนวณมักจะเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สภาพคลื่นและรูปแบบการเคลื่อนที่ของตะกอนในพื้นที่สมการที่ใช้คำนวณหาค่า DoC มีที่มาแตกต่างกัน เช่น การใช้ข้อมูลภาคสนามจากการสำรวจชายฝั่งทะเลและข้อมูลจากอ่างจำลองคลื่น [4],[5] กำหนดเป็นแนวทางในการคำนวณขอบเขตของระยะการเคลื่อนย้ายตะกอนออกนอกฝั่งทะเลจากอิทธิพลคลื่น ขอบเขต ณ จุดที่คำนวณได้เข้ามายังขอบฝั่งทะเล กำหนดให้เป็นพื้นที่ด้านในซึ่งคลื่นและกระแสน้ำที่เกิดจากคลื่นแตกตัวจะมีผลต่อการเคลื่อนย้ายตะกอนบริเวณพื้นที่ท้องทะเล และขอบเขต ณ จุดที่คำนวณได้ออกไปนอกฝั่งทะเล กำหนดให้เป็นพื้นที่ด้านนอกซึ่งคลื่นและกระแสน้ำที่เกิดจากคลื่นแตกตัวมีผลต่อการเคลื่อนย้ายตะกอนบริเวณพื้นที่ท้องทะเลอย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยมีนิยามของ DoC ดังรูปที่ 2 และมีรูปแบบของสมการ ดังนี้ [4]



รูปที่ 2 นิยามของความลึกวิกฤติของการถ่ายเทตะกอนสุทธิ (h_c) [2], [4]

$$h_c = 2.28H_e - 68.5 \left[\frac{H_e^2}{gT_e^2} \right] \quad (1)$$

เมื่อ H_e คือ ความสูงคลื่นที่มีประสิทธิภาพ (Effective Wave Height) หรือสภาวะคลื่นที่เกิดขึ้นนานกว่า 12 ชั่วโมง ในช่วงเวลา 1 ปี ซึ่งเป็นคลื่นที่เกิดขึ้นเพียงร้อยละ 0.137 ของช่วงเวลา

T_e คือ คาบคลื่นที่สัมพันธ์กับ H_e

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

โดยสามารถหาค่า H_e ได้ตามสมการที่ (2) คือ

$$H_e = \overline{H_s} + 5.6\sigma_s \quad (2)$$

เมื่อ $\overline{H_s}$ คือ ความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ยรายปี (Annual Mean Significant Wave Height)

σ_s คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สัมพันธ์กับ $\overline{H_s}$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (1) และ (2) แสดงเป็นรูปแบบสมการใหม่ได้ ดังนี้

$$h_c = 2\overline{H}_s + 11\sigma_s \quad (3)$$

และถ้าพิจารณาในเทอมของขนาดตะกอน (D) จะได้

$$h_c = (\overline{H}_s - 0.3\sigma_s)\overline{T}_s \left(\frac{g}{5000D}\right)^{0.5} \quad (4)$$

เมื่อ $\overline{T}_s$ คือ คาบคลื่นเฉลี่ยที่สัมพันธ์กับความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ย สำหรับเทอม $(\overline{H}_s - 0.3\sigma_s)$ ในสมการที่ (4) จะแทนค่ามัธยฐานรายปีของความสูงคลื่นนัยสำคัญ

และจากการประเมินความสัมพันธ์ของสมการที่ (1) – (3) โดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดภาคสนาม ในการหาค่า DoC จากการประเมินดังกล่าว ได้เป็นสมการคือ [5], [6]

$$h_c = 1.75H_e - 57.9 \left[\frac{H_e^2}{gT_e^2}\right] \quad (5)$$

และสามารถทำให้เป็นสมการอย่างง่ายได้ดังนี้

$$h_c = 1.57H_e \quad (6)$$

Nicholls, Birkemeier และ Hallermeier (1996) ได้เสนอแนวคิดในการพิจารณากรอบเวลาที่มากกว่า 1 ปี ในการคำนวณหา DoC ตามสมการ (1) ดังนี้ [4], [7], [8]

$$h_c(t) = 2.28H(t)_e - 68.5 \left[\frac{H(t)_e^2}{gT(t)_e^2}\right] \quad (7)$$

เมื่อตัวแปรทุกตัวเป็นฟังก์ชันของเวลาที่มีการตรวจวัดเป็นรายปี

$H(t)_e$ คือ ความสูงคลื่นนัยสำคัญที่เกิดขึ้นนานกว่า 12 ชั่วโมง ในช่วงเวลา t ปี

$T(t)_e$ คือคาบเวลาที่สัมพันธ์กัน

เนื่องจาก t เพิ่มขึ้นตลอดเวลาจึงส่งผลให้ค่าความสูงคลื่นนัยสำคัญและคาบเวลา รวมทั้งความถี่วิกฤติของการถ่ายเทตะกอนสุทธิเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

3. กรอบการวิเคราะห์

การคำนวณหาค่า DoC บริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวไทยมีแนวทางในการวิเคราะห์ ดังนี้

3.1 เตรียมข้อมูลคลื่นจากแบบจำลองการพยากรณ์คลื่นในทะเล (WAM Model) บริเวณพื้นที่ชายฝั่งทะเล 5 พื้นที่ คือ บริเวณหัวสนามบินอู่ตะเภา อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง บริเวณอ่าวดวงตาล อำเภอสัตหีบ

จังหวัดชลบุรี บริเวณหน้าสถานีอุทกศาสตร์หัวหิน อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ บริเวณหาดชลาลัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา และบริเวณหาดบ้านทอน อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส [9]

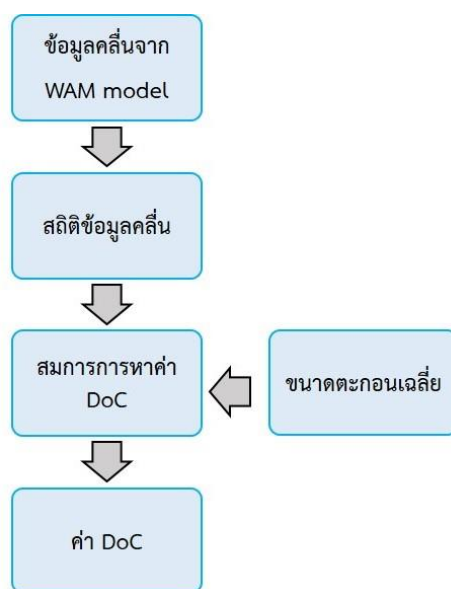
3.2 นำข้อมูลคลื่นจากแบบจำลองการพยากรณ์คลื่นในทะเล (WAM Model) มาวิเคราะห์เป็นค่าสถิติข้อมูลคลื่น (Wave Statistics) [10] เพื่อใช้สำหรับการสมการในการคำนวณหาค่า DoC

3.3 เตรียมข้อมูลขนาดตะกอนของพื้นที่ชายฝั่งทะเล 5 พื้นที่ คือ บริเวณหัวสนามบินอู่ตะเภา อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง บริเวณอ่าวตงตาล อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี บริเวณหน้าสถานีอุทกศาสตร์หัวหิน อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ บริเวณหาดชลาลัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา และบริเวณหาดบ้านทอน อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส [11]

3.4 นำข้อมูลขนาดตะกอนและสถิติข้อมูลคลื่นแทนค่าในสมการการคำนวณหาค่า DoC

3.5 ได้ค่า DoC สำหรับพื้นที่ชายฝั่งทะเล 5 พื้นที่ คือ บริเวณหัวสนามบินอู่ตะเภา อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง บริเวณอ่าวตงตาล อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี บริเวณหน้าสถานีอุทกศาสตร์หัวหิน อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ บริเวณหาดชลาลัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา และบริเวณหาดบ้านทอน อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส

ซึ่งแสดงเป็นกรอบการวิเคราะห์สำหรับการคำนวณความลึกวิกฤติของการถ่ายเทตะกอนสุทธิ (Depth of Closure) สำหรับพื้นที่ชายฝั่งทะเลอ่าวไทยดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กรอบการวิเคราะห์การคำนวณหาค่า DoC

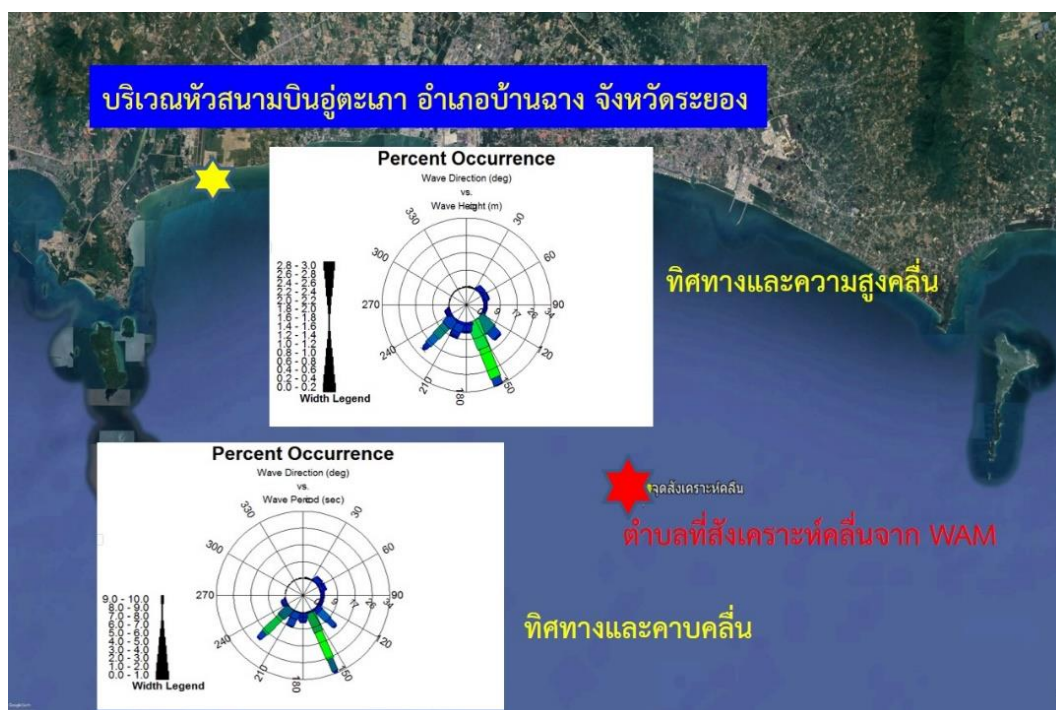
4. ผลการวิเคราะห์

สถิติข้อมูลคลื่นจากแบบจำลองการพยากรณ์คลื่นในทะเล (WAM Model) ของพื้นที่ชายฝั่งทะเลทั้ง 5 พื้นที่ มีค่าความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.3 – 0.6 เมตร คาบคลื่นนัยสำคัญอยู่ระหว่าง 3.6 – 5.0 วินาที

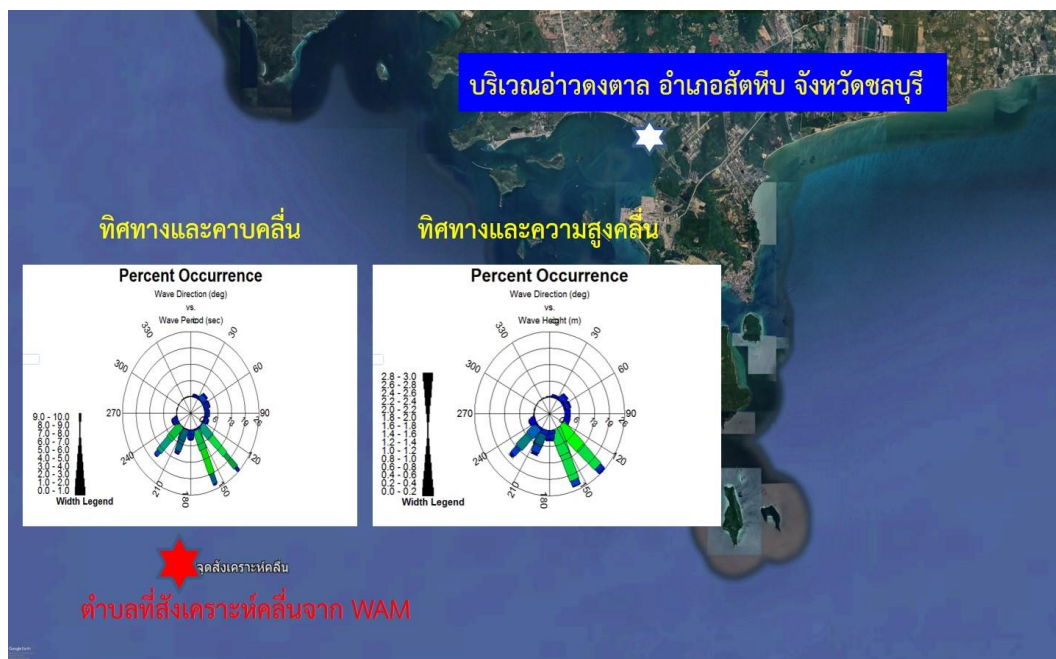
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.2 – 0.5 เมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของคาบคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.7 – 1.3 วินาที โดยบริเวณชายฝั่งอ่าวไทยฝั่งตะวันออก คลื่นส่วนใหญ่จะเข้ามาทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ และชายฝั่งอ่าวไทยฝั่งตะวันตก คลื่นส่วนใหญ่จะเข้ามาทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 4 – 8

ตารางที่ 1 ค่าสถิติข้อมูลคลื่น (Wave Statistics) บริเวณพื้นที่ศึกษา [9]

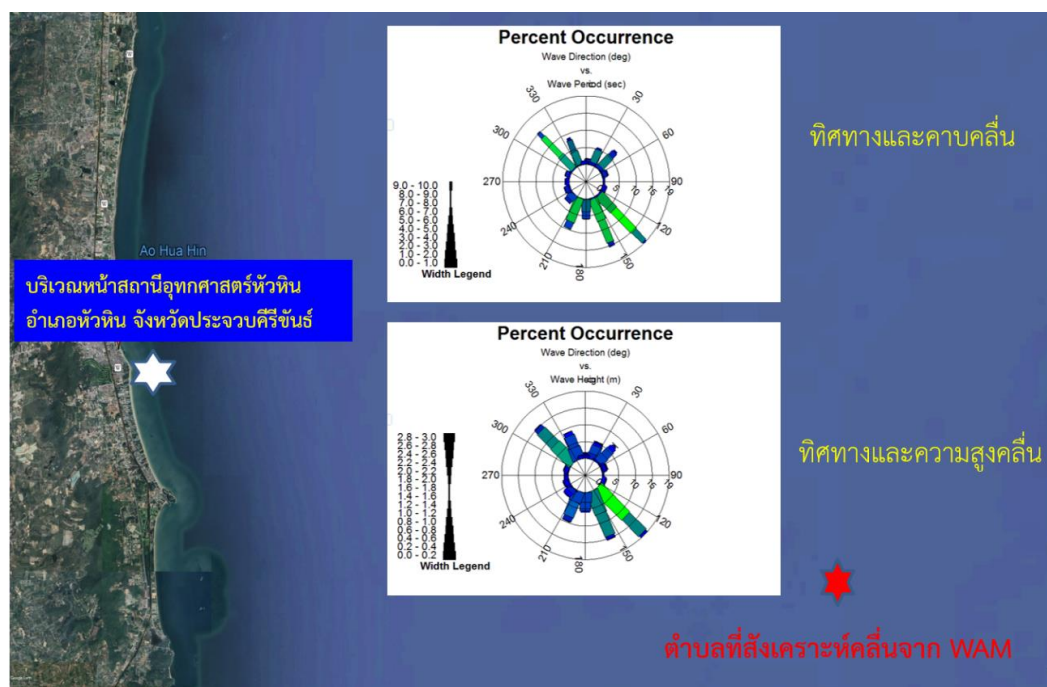
สถิติข้อมูลคลื่น	พื้นที่ชายฝั่ง				
	ระยอง	สัตหีบ	หัวหิน	สงขลา	นราธิวาส
Mean Significant Wave Height (เมตร)	0.4	0.3	0.3	0.5	0.6
Mean Significant Wave Period (วินาที)	3.6	3.6	3.7	4.7	5.0
Standard Deviation of HS (เมตร)	0.2	0.2	0.2	0.4	0.5
Standard Deviation of TP (วินาที)	0.7	0.8	0.7	1.2	1.3
Largest HS (เมตร)	2.7	2.8	2.7	3.5	3.9
Period band (วินาที) of Largest HS	7.0	6.8	7.0	8.3	8.9
Direction band (องศา) of Largest HS	202.5	202.5	22	67.5	67.5



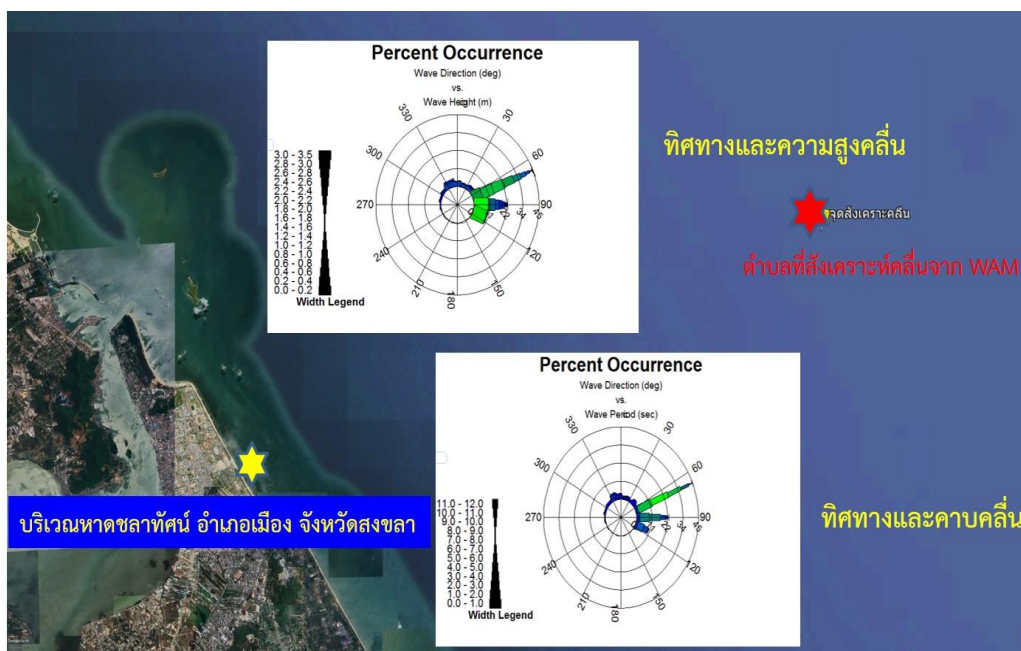
รูปที่ 4 ข้อมูลคลื่นและตำบลที่สังเกตคลื่นจาก WAM บริเวณหัวสนามบินอู่ตะเภา อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง



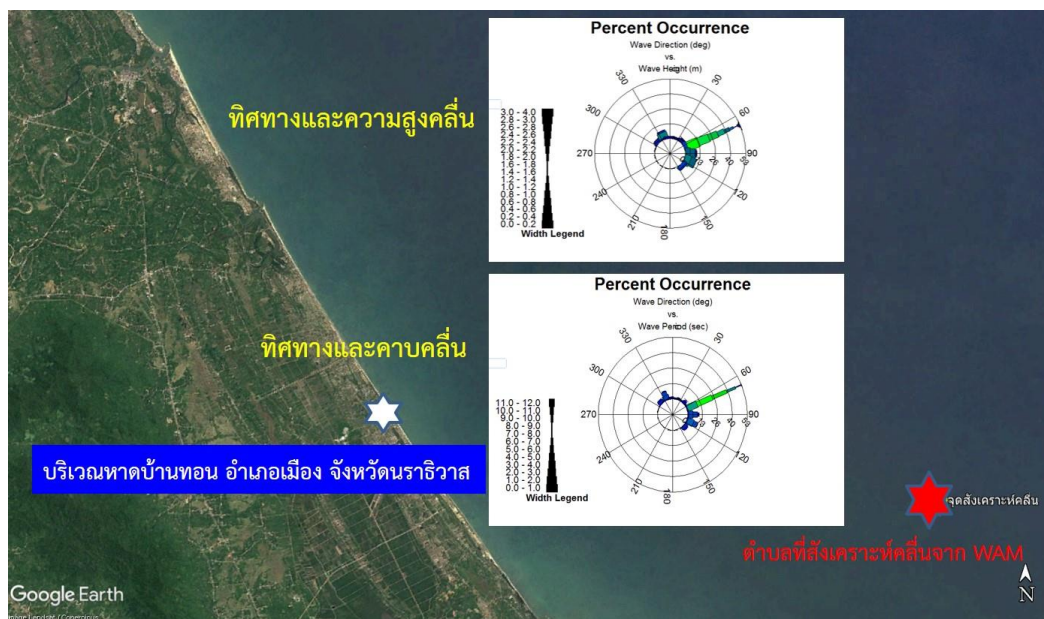
รูปที่ 5 ข้อมูลคลื่นและตำบลที่สังเกตคลื่นจาก WAM บริเวณอ่าวดวงตาล อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี



รูปที่ 6 ข้อมูลคลื่นและตำบลที่สังเกตคลื่นจาก WAM บริเวณหน้าสถานีอุทกศาสตร์หัวหิน อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์



รูปที่ 7 ข้อมูลคลื่นและตำบลที่สังเกตคลื่นจาก WAM บริเวณหาดชลาทัศน์ อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา



รูปที่ 8 ข้อมูลคลื่นและตำบลที่สังเกตคลื่นจาก WAM บริเวณหาดบ้านทอน อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส

จากการวิเคราะห์ข้อมูลตะกอนที่ได้จากการเก็บข้อมูลตะกอนในช่วงเวลาการสำรวจแนวโปรไฟล์ชายฝั่งของพื้นที่ศึกษาพบว่าขนาดตะกอนของพื้นที่ชายฝั่งทะเลทั้ง 5 พื้นที่ มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.10 – 0.36 มิลลิเมตร โดยบริเวณอ่าวดังตาลมีขนาดตะกอนเฉลี่ยต่ำสุด คือ 0.10 มิลลิเมตร และบริเวณหาดบ้านทอนมีขนาดตะกอนเฉลี่ยสูงสุด คือ 0.36 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ขนาดตะกอนเฉลี่ยของพื้นที่ศึกษา [11]

พื้นที่ชายฝั่ง	ขนาดตะกอน (มิลลิเมตร)
อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง (บริเวณหัวสนามบินอู่ตะเภา)	0.27
อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี (บริเวณอ่าวดวงตาล)	0.10
อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ (บริเวณหน้าสถานีอุทกศาสตร์หัวหิน)	0.21
อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา (บริเวณหาดขลาทัศน์)	0.15
อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส (บริเวณหาดบ้านทอน)	0.36

จากการคำนวณค่า DoC ด้วยสมการทั้ง 5 สมการ สำหรับพื้นที่ชายฝั่งทะเลอ่าวไทย ได้ค่า DoC ดังนี้ บริเวณหัวสนามบินอู่ตะเภา อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง มีค่าอยู่ระหว่าง 2.05 – 3.30 เมตร บริเวณอ่าวดวงตาล อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี มีค่าอยู่ระหว่าง 1.95 – 3.83 เมตร บริเวณหน้าสถานีอุทกศาสตร์หัวหิน อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ มีค่าอยู่ระหว่าง 1.97 – 2.80 เมตร บริเวณหาดขลาทัศน์ อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา มีค่าอยู่ระหว่าง 3.87 – 6.46 เมตร และบริเวณหาดบ้านทอน อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส มีค่าอยู่ระหว่าง 4.83 – 6.70 เมตร จะเห็นได้ว่าสมการ (1) (3) (5) และ (6) ค่า DoC จะแปรผันตรงกับค่าความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ย แต่สมการ (4) ค่า DoC จะแปรผันตรงกับค่าความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ย และแปรผกผันกับขนาดตะกอนเฉลี่ย กล่าวคือ ถ้าพื้นที่ชายฝั่งใดๆ มีค่าความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ยเท่ากันแต่มีขนาดตะกอนเฉลี่ยที่น้อยกว่าก็จะมีค่าความลึกวิกฤติของการถ่ายเทตะกอนสุทธิ (DoC) มากกว่า ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณค่าความลึกวิกฤติของการถ่ายเทตะกอนสุทธิ (Depth of Closure) สำหรับพื้นที่ชายฝั่งทะเลอ่าวไทย

พื้นที่ชายฝั่ง	ผลการคำนวณตามสมการการหาค่า Depth of Closure (เมตร)				
	(1)	(3)	(4)	(5)	(6)
ระยอง	2.74	3.0	3.30	2.05	2.39
สัตหีบ	2.60	2.8	3.83	1.95	2.23
หัวหิน	2.63	2.8	2.71	1.97	2.23
สงขลา	5.16	5.4	6.46	3.87	4.30
นราธิวาส	6.43	6.7	5.25	4.83	5.34

5. สรุปและอภิปรายผล

จากการใช้สถิติข้อมูลคลื่นจากแบบจำลองการพยากรณ์คลื่นในทะเลและข้อมูลขนาดตะกอนเฉลี่ยของพื้นที่ชายฝั่งทะเลอ่าวไทยในการคำนวณหาค่า DoC โดยใช้สมการแบบจำลองการคำนวณเบื้องต้น (Simple

Wave-based Model) พบว่าชายฝั่งทะเลบริเวณอ่าวไทยตอนบน (หัวหิน สัตหีบ ระยอง) มีค่า DoC อยู่ระหว่าง 1.95 – 3.83 เมตร บริเวณอ่าวไทยตอนล่าง (สงขลา นราธิวาส) มีค่า DoC อยู่ระหว่าง 3.87 – 6.70 เมตร

จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าความลึกวิกฤติของการถ่ายเทตะกอนสุทธิไม่ใช่ค่าคงที่ จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของคลื่น ลักษณะของตะกอน และสัณฐานวิทยาของชายฝั่ง รวมทั้งรูปแบบสมการของแบบจำลองการคำนวณหาค่า DoC ที่ใช้ในการคำนวณ ดังนั้น เพื่อให้การคำนวณหาค่าความลึกวิกฤติของการถ่ายเทตะกอนสุทธิมีความถูกต้องใกล้เคียงกับลักษณะตามธรรมชาติของระบบชายฝั่งทะเล จึงควรมีการประเมินการหาค่า DoC ตามช่วงเวลาเป็นระยะๆ โดยใช้ข้อมูลภาคสนามและแบบจำลองที่มีการปรับปรุงอยู่เสมอประกอบในการคำนวณ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้พิจารณาพื้นที่ศึกษาเพียง 5 พื้นที่ ซึ่งยังไม่ครอบคลุมพื้นที่ชายฝั่งทะเลอ่าวไทยทั้งหมด เนื่องจากข้อจำกัดของการสังเคราะห์คลื่นจากแบบจำลองการพยากรณ์คลื่นในทะเล (WAM Model) และการเก็บข้อมูลตะกอนในช่วงเวลาการสำรวจแนวโปรไฟล์ชายฝั่ง รวมทั้งค่าบดที่ในการสังเคราะห์คลื่นจาก WAM Model อยู่ห่างจากพื้นที่ชายฝั่งที่ศึกษาในระดับหนึ่ง ทำให้ไม่ได้ข้อมูลคลื่นที่เป็นตัวแทนของพื้นที่จริง หากมีข้อมูลคลื่นที่อยู่ในระยะใกล้ขอบฝั่งจะทำให้ได้ค่า DoC ที่ใกล้เคียงกับลักษณะตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นมากยิ่งขึ้น

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 การศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของระยะทางจากแนวขอบฝั่งไปยังจุดความลึกวิกฤติของการถ่ายเทตะกอนสุทธิ จะทำให้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้นในการนำค่าความลึกวิกฤติของการถ่ายเทตะกอนสุทธิไปใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมชายฝั่ง

6.2 ค่า Doc ที่ได้จากแต่ละสมการจะมีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ถ้าหากมีข้อมูลลักษณะแนวโปรไฟล์ของแต่ละพื้นที่จะสามารถเปรียบเทียบค่า DoC ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการแบบจำลองการคำนวณกับการใช้ข้อมูลการสำรวจแนวโปรไฟล์ของหาด จะทำให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้นในการนำสมการแบบจำลองการคำนวณหาค่า DoC ไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Udo K, Ranasinghe R, Takeda Y. An assessment of measured and computed depth of closure around Japan. Sci Rep [Internet]. 2020 Feb 19 [cited 2023 Apr 10];10(1): 2987. Available from: <https://www.nature.com/scientificreports>. doi: 10.1038/s41598-020-59718-5
- [2] Dean RG, Dalrymple RA. Coastal processes with engineering applications. [place unknown]: Cambridge University Press; 2001.
- [3] กองทัพเรือ, กรมอุทกศาสตร์. แผนที่เดินเรือ หมายเลข 045 บรรณานุกรม ครั้งที่ 7 ก.ย..2546. กรุงเทพฯ: กรมอุทกศาสตร์; 2526.

- [4] Birkemeier WA. Field data on seaward limit of profile change. J Waterw Port Coast Ocean Eng. 1985 May 1;111(3):598-602.
- [5] Hallermeier RJ. USES FOR A CALCULATED LIMIT DEPTH TO BEACH EROSION. Int Conf Coastal Eng. [Internet]. 1978 Jan. 29 [cited 2023 Apr 22];1(16):88. Available from: <https://icce-ojs-tamu.tdl.org/icce/article/view/3351>
- [6] Hallermeier RJ. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. Coastal Eng. 1981;4:253-77.
- [7] Nicholls RJ, Larson M, Capobianco, Birkemeier WA. Application of depth of closure: Improving understanding and prediction. Coastal Eng. 1996:3874-87.
- [8] Nicholls RJ, Larson M, Capobianco M, Birkemeier WA. DEPTH OF CLOSURE: IMPROVING UNDERSTANDING AND PREDICTION. Int. Conf. Coastal. Eng. [Internet]. 1998 Jan. 29 [cited 2023 Jun. 22];1(26). Available from: <https://icce-ojs-tamu.tdl.org/ice/article /view/5810>
- [9] กรมอุทกศาสตร์, กองอุตุนิยมวิทยา, ศูนย์ข้อมูลข่าวกรองภูมิสารสนเทศทางอุทกศาสตร์. รายงานการวิเคราะห์คลื่นจากข้อมูลลม (WAM) บริเวณอ่าวไทย. กรุงเทพฯ: กรมอุทกศาสตร์, กองอุตุนิยมวิทยา; 2560.
- [10] วันชัย จันทะละเอียด. การประเมินการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่ง ตั้งแต่บ้านตันหยกเปาว์ถึงบ้านบางตาва จังหวัดปัตตานี โดยแบบจำลอง Genesis. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2548.
- [11] กรมอุทกศาสตร์, กองสมุทรศาสตร์, ศูนย์ข้อมูลข่าวกรองภูมิสารสนเทศทางอุทกศาสตร์. รายงานการสำรวจและติดตามการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งบริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวไทย ระหว่างปี พ.ศ.2557 - 2565 กรุงเทพฯ: กรมอุทกศาสตร์, กองสมุทรศาสตร์; 2565.

การสืบค้นหาสูตรการคำนวณค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่น

Investigation on The Formula for Calculating Local Gravity

บัญชา คังตระกูล¹ และ สายชล สิทธิพงศ์²

Bancha Kongtragool¹ and Saichon Sithipong²

Received: May 1, 2023

Revised: June 29, 2023

Accepted: July 5, 2023

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ได้นำเสนอการสืบค้นหาสูตรต่าง ๆ สำหรับการคำนวณหาค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่น และผลลัพธ์ของการคำนวณหาค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นโดยเลือกใช้สูตรคำนวณที่สูตรสำหรับสถานที่ซึ่งตำแหน่งตั้งอยู่ที่เส้นรุ้ง $18^{\circ}39'43''$ N และอยู่ที่ระดับความสูง 300 m AMSL ผลลัพธ์จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสูตรที่เลือกใช้ในการคำนวณทั้งสี่สูตรให้ค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นที่มีความแตกต่างกันน้อยมาก ค่าเฉลี่ยของค่าความโน้มถ่วงที่ได้รับคือ $9.784\ 70 \pm 0.000\ 02\ \text{m/s}^2$ หรือ $9.784\ 70\ \text{m/s}^2 \pm 0.002\%$ โดยค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นที่ได้จากสูตรคำนวณทั้งสี่สูตรมีความคลาดเคลื่อนจากค่าเฉลี่ยประมาณ 0.0002%

คำสำคัญ: การคำนวณค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่น, ความโน้มถ่วงปกติ, ความโน้มถ่วงท้องถิ่นทางทฤษฎี

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Technology, North-Chiang University

Email: bancha@northcm.ac.th

²อาจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยียานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่

Lecturer, Department of Automotive Technology, Faculty of Engineering and Technology, North-Chiang University

Email: saichon@northcm.ac.th

Abstract

This paper aimed at investigating and presenting various formulas for the local gravity calculation. The studying of four selected formulas was at parallel latitude of $18^{\circ}39'43''$ N and elevation of 300 meters above MSL. The study revealed that, by using these formulas, the locally obtained gravity was very slightly different. The result was $9.784\ 70 \pm 0.000\ 02\ \text{m/s}^2$ or $9.784\ 70\ \text{m/s}^2 \pm 0.002\%$. The errors of the local gravity calculations, using these formulas, with respected to the mean value were approximately 0.0002%.

Keywords: Local Gravity Calculation, Normal Gravity, Theoretical Local Gravity

1. บทนำ

งานทางด้านวิศวกรรมที่ละเอียดอ่อนซึ่งต้องการค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นที่แท้จริง ไม่สามารถใช้ค่าความโน้มถ่วงมาตรฐาน $g_0 = 9.81\ \text{m/s}^2$ ได้ เพราะจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนออกไปจากความเป็นจริง เช่นในการทดลองต่าง ๆ ทางด้านวิศวกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการศึกษาเรื่องการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย (Simple Harmonic Motion) และการสั่นสะเทือนนั้น การคำนวณในการทดลองต่าง ๆ จะต้องใช้ค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นเสมอจึงจะได้ผลลัพธ์ที่เที่ยงตรง

จุดประสงค์บทความนี้คือการสืบค้นหาสูตรการคำนวณหาค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นที่มีความละเอียดเที่ยงตรงเป็นที่ยอมรับได้และเปรียบเทียบผลลัพธ์จากสูตรต่าง ๆ เพื่อหาสูตรที่ค่าคลาดเคลื่อน (Error) จากค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

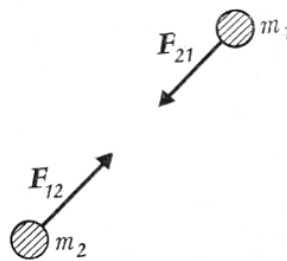
2.1 กฎแห่งความโน้มถ่วงสากล

วัตถุทั้งหลายถูกกระทำด้วยแรงดึงดูดซึ่งกันและกันที่เกิดขึ้นจากความโน้มถ่วง กฎพื้นฐานที่อธิบายแรงจากความโน้มถ่วงถูกระบุขึ้นโดยนิวตัน (Sir Isaac Newton, 1643-1727) เรียกว่ากฎความโน้มถ่วงสากลของนิวตัน

กฎนี้ระบุว่าระหว่างอนุภาคใดๆ สองอนุภาคซึ่งมีมวลเป็น m_1 กับ m_2 และอยู่ห่างกันเป็นระยะทาง R จะมีแรงดึงดูดระหว่างกันเกิดขึ้นเป็น F_{12} กับ F_{21} (ดูรูปที่ 1) มีทิศทางชี้จากอนุภาคหนึ่งพุ่งไปสู่อีกอนุภาคหนึ่ง และแรงทั้งสองนั้นมีขนาดเท่ากัน โดยขนาดของแรงจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับผลคูณของมวลทั้งสองและเป็นปฏิภาคผกผันกับกำลังสองของระยะห่างระหว่างมวลทั้งสอง คือ [1]

$$F_{12} = F_{21} = G \frac{m_1 m_2}{R^2} \quad (1)$$

เมื่อ G คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่เรียกว่าค่าคงที่ของความโน้มถ่วงสากล (Universal Gravitational Constant)



รูปที่ 1 แรงดึงดูดระหว่างวัตถุจากความโน้มถ่วง [1]

ถ้ากำหนดปัญหาเป็นลูกกลมที่มีเนื้อเป็นวัสดุเอกพันธ์ (Homogeneous) สองลูก การคำนวณตามทีกล่าวข้างต้นจะแสดงให้เห็นว่าแรงดึงดูดลัพธ์จะกระทำที่จุดศูนย์กลางของลูกกลมและมีขนาดเป็น

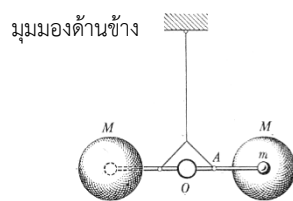
$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2} \quad (2)$$

เมื่อ m_1, m_2 คือ มวลของลูกกลมทั้งสอง, R คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของลูกกลมทั้งสอง และ G คือ ค่าคงที่ของความโน้มถ่วงค่าเดียวกับในสมการ (1)

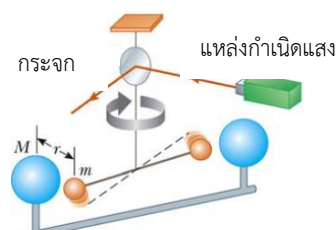
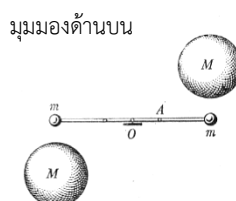
2.2 การวัดแรงจากความโน้มถ่วงโดยคาเวนดิช

การวัดแรงจากความโน้มถ่วงโดยตรงเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1798 โดยคาเวนดิช (Henry Cavendish, 1731-1810) [1] โดยใช้ตาชั่งแบบบิด (Torsion Balance) (ดูรูปที่ 2 (ก)) การตรวจสอบการวัดแรงดึงดูดจากความโน้มถ่วงในช่วงเวลาต่อมาโดยมีความเที่ยงตรงมากขึ้นก็ใช้วิธีการเดียวกันนี้ [1]

อุปกรณ์ในการทดลองของคาเวนดิช แสดงดังรูปที่ 2 (ก) มวลขนาด m เท่ากันสองก้อนถูกวางอยู่ที่ปลายของแขนแกว่ง (Rocker Arm, A) ซึ่งมีน้ำหนักน้อยมากตรึงกึ่งกลางของแขนแกว่งแขนด้วยเส้นด้าย มีกระจกเงาแผ่นหนึ่งติดไว้ตรงจุดกึ่งกลาง O ของแขนแกว่ง เมื่อแขนแกว่งหมุนกระจกทำหน้าที่สะท้อนแสง (ดูรูปที่ 2 (ข)) ทำให้สามารถสังเกตการหมุนได้ชัดเจน การเบี่ยงเบนของลำแสงทำให้วัดมุมบิดของแขนแกว่งและสามารถคำนวณหาแรงที่ทำให้เกิดการบิดได้



(ก) ภาพด้านข้างและด้านบน [1]



(ข) ภาพแหล่งกำเนิดแสงและกระจกเงา [2]

รูปที่ 2 อุปกรณ์การทดลองของคาเวนดิช

ทรงกลมใหญ่ทำจากตะกั่วสองลูกมีมวล M มาก ($M = 158 \text{ kg}$, โดยประมาณ [1]) ถูกทำให้เคลื่อนที่เข้าสู่แกนแกว่งทั้งสองด้าน แรงดึงดูดที่ทรงกลมใหญ่กระทำกับทรงกลมเล็กเป็นแรงคู่ควบซึ่งจะหมุนแกนแกว่ง A จนกระทั่งโมเมนต์ของแรงคู่ควบจากความโน้มถ่วงถูกสมดุลด้วยโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นในเส้นด้าย โมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นในเส้นด้ายสามารถคำนวณได้จากพารามิเตอร์ที่ทราบค่าแล้วของระบบและจากมุมในการหมุนของลำแสงที่สะท้อน โดยการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่าง M กับ m , คาเวนดิช สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงดูดกับระยะห่างได้ และผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองสามารถยืนยันความถูกต้องของกฎความโน้มถ่วงของนิวตัน

ผลลัพธ์จากการทดลองของคาเวนดิชถูกตรวจสอบหลายครั้งโดยนักวิทยาศาสตร์คนอื่นๆ โดยการใช้การทดลองที่ดัดแปลงปรับปรุงมากมาย [1] ในปัจจุบันผลลัพธ์ของการวัดที่เที่ยงตรงให้ค่าคงที่ความโน้มถ่วงเป็น [3]
 $G = 6.673 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2 (= \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2)$

2.3 การหาค่าความโน้มถ่วงจากกฎของนิวตัน

จากกฎแรงดึงดูดระหว่างมวลและกฎข้อที่สองของนิวตัน จะได้: $F = m g_a = G (m_E m / r^2)$ หรือ

$$g_a = G (m_E / r^2) \quad (3)$$

เมื่อ g_a คือ ค่าความโน้มถ่วงสัมบูรณ์ (m/s^2), r คือ รัศมีเฉลี่ยของโลก ($6,371 \text{ km}$) [3], m_E คือ มวลของโลก ($5.976 \times 10^{24} \text{ kg}$) [3] และ m คือ มวลของอนุภาค (kg)

เมื่อใช้กฎข้อที่สองของนิวตันกับการห้ำหั่น W ของมวล m จะได้ $W = mg$ หรือ $g = W/m$ โดย g คือค่าความโน้มถ่วงของโลก และที่จริงแล้ว W ก็คือแรงดึงดูดที่โลกกระทำกับมวล m ที่อยู่บนผิวโลก ดังนั้นความหมายที่แท้จริงของค่าความโน้มถ่วงก็คือแรงดึงดูดของโลกต่อมวลของวัตถุหนึ่งหน่วย ด้วยเหตุนี้ความโน้มถ่วงจึงควรมีหน่วยเป็น N/kg [4] แต่เนื่องจาก $\text{N} = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ คนส่วนใหญ่จึงใช้หน่วยของความโน้มถ่วงเป็น m/s^2

นอกจากนี้ ในหน่วยเมตริกเล็ก (CGS) ซึ่งใช้หน่วยมูลฐานของมวลเป็น g , ความยาวเป็น cm , และเวลาเป็น s , และมีหน่วยของแรงเป็น $\text{dyne} (= \text{g} \cdot \text{cm/s}^2)$ ซึ่งจะได้ความโน้มถ่วงมีหน่วยเป็น cm/s^2 และยังได้กำหนดหน่วยของค่าความโน้มถ่วงเป็น Gal (เป็นคำย่อของ Galileo) โดย $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$ [4]

ในเมื่อหน่วยของค่าความโน้มถ่วงเป็น m/s^2 เป็นที่ยอมรับและใช้กันโดยทั่วไป ในบทความนี้จึงใช้หน่วยของค่าความโน้มถ่วงทั้งหมดเป็น m/s^2

ค่าความโน้มถ่วงที่คำนวณได้จากสมการ (3) นี้เป็นค่าที่เกิดขึ้นบนผิวโลก และมีการเปลี่ยนแปลงค่าไปตามระดับความสูงที่วัดจากระดับน้ำทะเล การแปรเปลี่ยนค่าของความโน้มถ่วงตามระดับความสูงที่วัดจากระดับน้ำทะเลจะคำนวณได้จากกฎความโน้มถ่วงคือ

$$g_{ah} = g_a [r/(r + h)]^2 \quad (4)$$

เมื่อ g_{ah} คือ ค่าความโน้มถ่วงสัมพัทธ์ที่ระดับความสูง h , g_a คือ ค่าความโน้มถ่วงที่ระดับน้ำทะเลจากสมการ (3), r คือ รัศมีของโลก และ h คือ ความสูงที่วัดจากระดับน้ำทะเล

แทนค่า $G = 6.673 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$, $m_E = 5.976 \times 10^{24} \text{ kg}$ และ $r = 6.371 \times 10^6 \text{ m}$ ลงในสมการ (3) จะได้ค่าความโน้มถ่วงสัมบูรณ์ที่ระดับน้ำทะเล ($h = 0$) เป็น: $g_{a0} = 9.824\ 637 \text{ m/s}^2$

ค่าความโน้มถ่วง $g_{a0} \cong 9.825 \text{ m/s}^2$ ที่คำนวณได้จากสมการ (3) นี้เป็นค่าความโน้มถ่วงสัมบูรณ์ที่เกิดขึ้นบนผิวโลก, ที่ระดับความสูง 1 km ค่าความโน้มถ่วงจะลดลงเป็น 9.822 m/s^2 , ที่ระดับความสูง 100 km ค่าความโน้มถ่วงจะลดลงเป็น 9.523 m/s^2 , ที่ระดับความสูง 1,000 km ค่าความโน้มถ่วงลดลงเป็น 7.340 m/s^2 , และที่ระดับความสูง 6,371 km (ซึ่งเท่ากับรัศมีเฉลี่ยของโลก) ค่าความโน้มถ่วงลดลงเป็น 2.456 m/s^2 [3] ซึ่งจะสามารถคำนวณค่าความโน้มถ่วงสัมพัทธ์ g_{ah} ได้จากสมการ (4)

ค่าความโน้มถ่วงที่คำนวณได้จากสมการ (3) นั้นเป็นค่าสัมบูรณ์ ซึ่งควรจะเป็นค่าที่วัดได้จากกรอบอ้างอิงที่มีจุดกำเนิดติดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของโลกแต่ไม่หมุนไปพร้อมกับโลก ซึ่งถือว่าเป็นกรอบอ้างอิงที่หยุดนิ่ง และควรจะเป็นค่าความโน้มถ่วงที่วัดได้บนผิวโลกที่ไม่หมุนแต่ในความเป็นจริงนั้นโลกมีการหมุน ดังนั้นจึงทำให้ความโน้มถ่วงของวัตถุที่ตกอย่างอิสระซึ่งวัดจากตำแหน่งที่อยู่บนผิวโลกมีค่าน้อยกว่าค่าสัมบูรณ์เล็กน้อย ค่าความโน้มถ่วงสัมพัทธ์กับค่าสัมบูรณ์ต่างกันมากที่สุดที่เส้นศูนย์สูตรและมีค่าเท่ากันที่ขั้วโลก (รูปที่ 3)

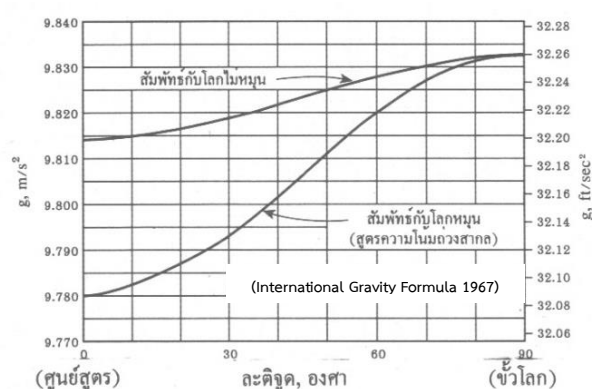
2.4 การคำนวณหาความโน้มถ่วงสัมพัทธ์

ค่าที่ละเอียดแม่นยำของความโน้มถ่วงเมื่อวัดเทียบกับผิวโลกจะต้องนำความจริงที่ว่าโลกเป็นทรงกลมที่แบนตรงขั้วโลกที่มีการหมุนเข้ามาร่วมในการพิจารณาด้วย ซึ่งจะหาได้จากสูตร International Gravity Formula 1967 (IGF 67) สำหรับการหาความเร่งจากความโน้มถ่วงสัมพัทธ์บนผิวโลก ($h = 0$) คือ [5, 6]

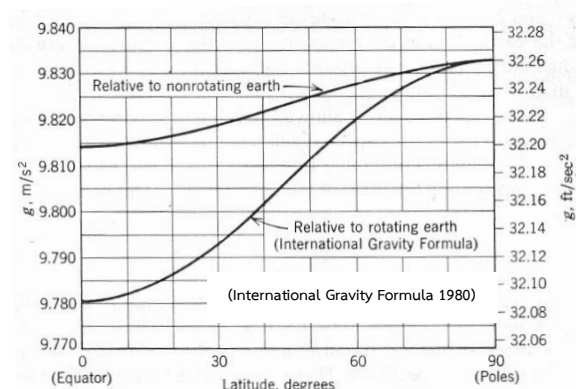
$$g_{r0} = 9.780\ 49 (1 + 5.2884 \times 10^{-3} \sin^2 \phi - 5.9 \times 10^{-6} \sin^2 2\phi) \quad (5)$$

เมื่อ ϕ คือ องศาเส้นรุ้ง (Latitude)

ค่าของความโน้มถ่วงจากสมการนี้เป็นค่าสัมพัทธ์เทียบกับโลกที่โดยรวมผลของการที่โลกไม่กลมจริงเอาไว้ด้วย ซึ่งถ้าบวกค่าความแตกต่าง $g_{ar0} = 3.387 \times 10^{-2} \cos \phi$ [5] เข้าไปในสมการ (5) ก็จะได้ค่าความโน้มถ่วงสัมบูรณ์ การเปลี่ยนแปลงค่าของความโน้มถ่วงตามเส้นรุ้งต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3 (ก)



(ก) แสดงความสัมพันธ์ของค่าแรงโน้มถ่วงและละติจูดในสูตรปี 1967



(ข) แสดงความสัมพันธ์ของค่าแรงโน้มถ่วงและละติจูดในสูตรปี 1980

รูปที่ 3 การแปรเปลี่ยนค่าความโน้มถ่วงสัมพันธ์กับโลกหมุนคำนวณจากสมการ (5) [5] และสมการ (6) [3]

ที่เส้นศูนย์สูตรค่าความโน้มถ่วงที่วัดได้หรือค่าความโน้มถ่วงสัมพันธ์มีค่าเป็น $9.780\,490\text{ m/s}^2$ โดยค่าความโน้มถ่วงสัมพันธ์เป็น $9.814\,360\text{ m/s}^2$ ที่ขั้วโลกค่าความโน้มถ่วงสัมพันธ์และค่าความเร่งสัมพันธ์เท่ากันคือ $9.832\,213\text{ m/s}^2$ ในปี 1980, สูตร IGF 80 อยู่ในรูปแบบ [3]

$$g_{ro} = 9.780\,327 (1 + 5.279 \times 10^{-3} \sin^2 \phi + 2.3 \times 10^{-5} \sin^4 \phi + \dots) \quad (6)$$

ซึ่งการแปรเปลี่ยนค่าตามเส้นรุ้ง ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3 (ข) และถ้าบวกค่าความแตกต่าง $g_{ar0} = 3.382 \times 10^{-2} \cos^2 \phi$ [3] เข้าไปในสมการก็จะได้ค่าของความโน้มถ่วงสัมพันธ์ ดังนั้นค่าความโน้มถ่วงสัมพันธ์ที่ระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลจึงสามารถประมาณได้จาก

$$g_{rh} = g_{ro} [r / (r + h)]^2 \quad (7)$$

2.5 การคำนวณหาความโน้มถ่วงท้องถิ่น

ในปี 1901, ในการประชุม General Conference on Weights and Measurement ครั้งที่ 3 กำหนดค่ามาตรฐานของความโน้มถ่วงบนผิวโลกเป็น [3, 4, 5] $g_0 = 9.806\,65\text{ m/s}^2$ เป็นค่าที่กำหนดสำหรับสถานที่ซึ่งไม่ทราบค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นหรือเมื่อค่าความโน้มถ่วงที่แท้จริงนั้นไม่มีความสำคัญ [13] ตรงกับค่าความโน้มถ่วงที่เส้นรุ้ง 45° N , และที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง [3, 4, 5] มีค่าโดยประมาณ: $g_0 = 9.81\text{ m/s}^2$

ค่าความโน้มถ่วงนี้เรียกว่าเป็นค่าความโน้มถ่วงมาตรฐาน (Standard Gravity) [14] ค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่น (Local Gravity) หรือค่าความโน้มถ่วงปกติ (Normal Gravity) [14] หรือค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นทางทฤษฎี (Theoretical Local Gravity) [8] เป็นการประมาณค่าความโน้มถ่วงที่แท้จริงบนผิวโลกโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงแทนโลก รูปแบบโดยทั่วไปคือ [9, 10]

$$g(\phi, h) = g(\phi) + GC(h)$$

เมื่อ $g(\phi, h)$ คือ ค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นทางทฤษฎีซึ่งขึ้นอยู่กับเส้นรุ้งและระดับความสูง, $g(\phi)$ คือ ค่าความโน้มถ่วงที่คำนวณจากสูตร IGF ซึ่งขึ้นอยู่กับเส้นรุ้งเพียงอย่างเดียว, และ $GC(h)$ คือ ค่าการปรับแก้ความโน้มถ่วง (Gravity Corrections) ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความสูง

ปี 1929, Carlo Somigliana (1860-1955) [7] ได้เสนอสูตรคำนวณค่าความโน้มถ่วงที่ระดับน้ำทะเลเป็น

$$g(\phi) = \frac{ag_e \cos^2 \phi + bg_p \sin^2 \phi}{\sqrt{a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi}} \quad (8)$$

เมื่อ g_e คือ ค่าความโน้มถ่วงที่เส้นศูนย์สูตร ($=9.780\,326\,771\,5\text{ m/s}^2$), g_p คือ ค่าความโน้มถ่วงที่ขั้วโลก ($=9.832\,184\,937\,8\text{ m/s}^2$), a คือ รัศมีของโลกที่เส้นศูนย์สูตร (Semi-major Axis), b คือ รัศมีของโลกที่ขั้วโลก (Semi-minor Axis), ϕ คือ เส้นรุ้งทางภูมิศาสตร์ สมการ (8) ในรูปที่ง่ายกว่าคือ [7]

$$g(\phi) = g_e \frac{1 + p \sin^2 \phi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \quad (9)$$

$$\text{เมื่อ } p = (b/a)(g_p/g_e) \text{ และ } e^2 = 1 - b^2/a^2$$

สมการของ Somigliana ถูกประมาณค่าโดยการกระจายอนุกรมอยู่ในรูปแบบ [7]

$$g(\phi) = g_e (1 + \beta \sin^2 \phi + \beta_1 \sin^2 2\phi + \dots) \quad (10)$$

2.6 IGF 30

ในปี 1930, The International Association of Geodesy ได้เสนอสูตรสำหรับการคำนวณค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นทางทฤษฎีเรียกว่า IGF 30 โดยมีรูปแบบทั่วไปของสูตรเป็น [8]

$$g(\phi) = g_e (1 + \beta \sin^2 \phi - \beta_1 \sin^2 2\phi) \quad (11)$$

เมื่อ $g(\phi)$ คือ ค่าความโน้มถ่วงขึ้นเส้นรุ้งทางภูมิศาสตร์ ϕ ณ ตำแหน่งที่จะหาค่าความโน้มถ่วง, g_e คือ ค่าความโน้มถ่วงที่เส้นศูนย์สูตร และ β, β_1 คือ พารามิเตอร์ที่จะต้องเลือกให้เหมาะกับโลกเพื่อให้ได้ค่าความโน้มถ่วงที่แท้จริง The International Association of Geodesy โดย Gino Cassinis [8] ได้ทำการหาค่าความโน้มถ่วงโดยใช้ $g_e = 9.78049\text{ m/s}^2$, $\beta = 5.2882 \times 10^{-3}$ และ $\beta_1 = -5.9 \times 10^{-6}$

พารามิเตอร์เหล่านี้ได้ถูกปรับปรุงด้วยความรู้ที่ใหม่ขึ้นและด้วยการวัดที่มีความเที่ยงตรงมากขึ้นในเวลาต่อมาในปี 1948, Harold Jeffreys [8] ปรับปรุงพารามิเตอร์เป็น $g_e = 9.780373\text{ m/s}^2$, $\beta = 5.2891 \times 10^{-3}$ และ $\beta_1 = -5.9 \times 10^{-6}$

2.7 IGF 67

สูตรคำนวณค่าความโน้มถ่วงของ Geodetic Reference System 1967 (GRS 67) [8] ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์เป็น $g_e = 9.780\,318\text{ m/s}^2$, $\beta = 5.3024 \times 10^{-3}$, และ $\beta_1 = -5.9 \times 10^{-6}$ เมื่อแทนในสมการ (11) จะได้ [7, 8]

$$g(\phi) = 9.780\,318 (1 + 5.3024 \times 10^{-3} \sin^2 \phi - 5.9 \times 10^{-6} \sin^2 2\phi) \quad (12)$$

ซึ่งแตกต่างกับสมการ (5) เพียงเล็กน้อย

2.8 IGF 80

เมื่อใช้ค่าตัวเลขของระบบอ้างอิง GRS 80 [9] คือ $a = 6\,378\,137\text{ m}$, $b = 6\,356\,752.3141\text{ m}$, $g_e = 9.780\,326\,771\,5\text{ m/s}^2$, และ $g_p = 9.832\,186\,368\,5\text{ m/s}^2$ สมการ (9) กลายเป็น

$$g(\phi) = 9.780\,327 (1 + 5.3024 \times 10^{-3} \sin^2 \phi - 5.8 \times 10^{-6} \sin^2 2\phi) \quad (13)$$

โดยมีความละเอียด (Accuracy) ประมาณ $\pm 10^{-6}\text{ m/s}^2$ [8] เมื่อใช้พื้นฐานทางตรีโกณมิติ จะได้สมการที่เทียบเท่ากับสมการ (13) เป็น [4, 8]

$$g(\phi) = 9.780\,327 (1 + 5.2792 \times 10^{-3} \sin^2 \phi + 2.32 \times 10^{-5} \sin^4 2\phi) \quad (13-1)$$

$$g(\phi) = 9.780\,327 (1.005\,302\,4 - 5.3256 \times 10^{-3} \cos^2 \phi + 2.32 \times 10^{-5} \cos^4 2\phi) \quad (13-2)$$

$$g(\phi) = 9.780\,327 (1.002\,645\,4 - 2.6512 \times 10^{-3} \cos 2\phi + 5.8 \times 10^{-6} \cos^2 2\phi) \quad (13-3)$$

ตาม GRS 80, ได้มีการใช้การกระจายอนุกรมในรูปแบบ [7, 8]

$$g(\phi) = g_e (1 + c_1 \sin^2 \phi + c_2 \sin^4 \phi + c_3 \sin^6 \phi + c_4 \sin^8 \phi + \dots) \quad (14)$$

ซึ่งพารามิเตอร์มีค่า $c_1 = 5.279\,041\,4 \times 10^{-3}$, $c_2 = 2.327\,18 \times 10^{-5}$, $c_3 = 1.262 \times 10^{-7}$, และ $c_4 = 7 \times 10^{-10}$ โดยมีความละเอียดประมาณ $\pm 10^{-9}\text{ m/s}^2$ [8]

ในกรณีที่ไม่ต้องการความละเอียดแม่นยำมากพจน์ท้ายๆ สามารถตัดทิ้งไปได้ ถ้าการกระจายคิดเพียงสองพจน์แรกก็จะมีรูปแบบเทียบได้กับสมการ (6)

2.9 IGF 84

สูตรความโน้มถ่วงปกติ IGF 84 ที่ World Geodetic System 1984 (WGS 84) สร้างขึ้นที่ค้นพบคือ [15]

$$g(\phi) = 9.780\,325\,335\,9 \times \left(\frac{1 + 0.001\,931\,850\,400 \sin^2 \phi}{\sqrt{1 - 0.006\,694\,384\,442 \sin^2 \phi}} \right) \quad (15)$$

และ [11]

$$g(\phi) = 9.780\,326\,771\,4 \times \left(\frac{1 + 0.001\,931\,851\,386\,39 \sin^2 \phi}{\sqrt{1 - 0.006\,694\,379\,990\,13 \sin^2 \phi}} \right) \quad (16)$$

2.10 ค่าปรับแก้ความโน้มถ่วง

Cassinis [8] ได้หาค่าความโน้มถ่วงขึ้นอยู่กับความสูง (Height Dependence) เป็น [8, 9]

$$g(\phi, h) = g(\phi) - (FAE - BME) h \quad (17)$$

เมื่อ FAE คือ ผลของอากาศอิสระ (Free Air Effect, ความสูงเหนือ Geoid) หรือเป็นค่าปรับแก้อากาศอิสระ (Free Air Correction, FAC [14] = 3.8086×10^{-6} m/s²/m), และ BME คือ ผลของมวล Bouguer (Bouguer Mass Effect, การดึงดูดของหินที่เพิ่มเติมเข้ามา = $4.19 \times 10^{-7} \rho$ m/s²/m โดย ρ คือ ความหนาแน่นเฉลี่ยของหิน, มีหน่วยเป็น kg/m³) และ h คือระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง (มีหน่วยเป็น m AMSL), สมการ (17) จึงสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการ

$$g(\phi, h) = g(\phi) - (3.8086 \times 10^{-6} - 4.19 \times 10^{-7} \rho) h \quad (18)$$

แต่ผลของมวล Bouguer ไม่นำมาพิจารณาอีกต่อไป เพราะว่าความโน้มถ่วงขึ้นอยู่กับระดับความสูงตาม GRS 67 ถูกกำหนดให้เป็น [7]

$$g(\phi, h) = g(\phi) - (3.0877 \times 10^{-6} - 4.3 \times 10^{-9} \sin^2 \phi) h + 7.2 \times 10^{-13} h^2 \quad (19)$$

สูตรความโน้มถ่วงในรูปแบบอื่นคือ [7]

$$g(\phi, h) = g(\phi) [1 - (k_1 - k_2 \sin^2 \phi) h + k_3 h^2] \quad (20)$$

โดยพารามิเตอร์ที่หาจาก GRS 80 [7] มีค่าเป็น: $k_1 = 3.157\,04 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$, $k_2 = 2.102\,69 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1}$, และ $k_3 = 7.375\,52 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2}$ สูตรนี้ใช้ได้กับการบินในระดับความสูงปกติแต่ระดับความสูงมากกว่า 100 km ขึ้นไปอยู่เหนือพิสัยของสูตรนี้ ในสำนักมาตรฐานของประเทศเยอรมันทั้งหมดจะใช้สูตร WELMEC [8] คือ

$$g(\phi, h) = 9.780\,318 (1 + 5.3024 \times 10^{-3} \sin^2 \phi - 5.8 \times 10^{-6} \sin^2 2\phi) - 3.085 \times 10^{-6} h \quad (21)$$

ซึ่งเป็นสูตรที่มีพื้นฐานบน IGF 67 ร่วมกับ FAC การสืบค้นยังได้พบสูตรที่สามารถหาค่าความโน้มถ่วงโดยรวมผลของเส้นรุ้งกับระดับความสูงจากระดับน้ำทะเล ในระบบหน่วยวัดมาตรา FPS คือ [14]

$$g(\phi, h) = 32.0894 (1 + 0.0052375 \sin^2 \phi) (1 - 0.0000000957 h), \text{ ft/sec}^2 \quad (22)$$

เมื่อเปลี่ยนหน่วยวัดเป็นระบบเมตริกจะได้

$$g(\phi, h) = 9.780\,849\,12 (1 + 5.2375 \times 10^{-3} \sin^2 \phi) (1 - 3.139\,763\,78 \times 10^{-7} h) \quad (23)$$

เมื่อ h คือ ระดับความสูงจากระดับน้ำทะเล มีหน่วยเป็น ft ในสมการ (21) และเป็น m ในสมการ (22) และยังคงพบสูตรความโน้มถ่วงอีกสูตรหนึ่งคือ [12]

$$g(\phi, h) = 9.780\,318\,4 (1 + 5.3024 \times 10^{-3} \sin^2 \phi - 5.9 \times 10^{-6} \sin^2 2\phi) - 3.086 \times 10^{-6} h \quad (24)$$

ซึ่งสมการ (24) ก็คือสมการ (12) ที่มี FAC ปรากฏอยู่ด้วยนั่นเอง จะสังเกตได้ว่าใกล้เคียงกับสมการ (21) มาก

จากปรับแก้ค่าแรงโน้มถ่วงสำหรับใช้คำนวณในแต่ละพื้นที่ ในสมการที่ (17) – (24) จะเห็นได้ว่าค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นมีค่าขึ้นกับหลายตัวแปร แต่ตัวแปรหลักคือพิกัดเส้นรุ้งและความสูงจากระดับน้ำทะเล ดังนั้นการคำนวณหาผลลัพธ์ที่เที่ยงตรงจะต้องนำค่าพิกัดเส้นรุ้งและความสูงจากระดับน้ำทะเลมาคำนวณด้วย

2.11 ความละเอียดของค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่น

ค่าความโน้มถ่วงบนผิวโลกแปรเปลี่ยนค่าไปขึ้นอยู่กับปัจจัยจำนวนมาก ผลกระทบที่สำคัญคือ [11]

2.11.1 การหมุนของโลกทำให้รู้สึกว่ายู่ที่เส้นศูนย์สูตรมีน้ำหนักเบากว่าอยู่ขั้วโลก ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง นอกจากนี้ยังทำให้โลกแบนลงโดยป่องออกที่เส้นศูนย์สูตรผลของทั้งสองประการนี้รวมกับการผันแปรตามเส้นรุ้งได้มีการปรับแก้ในสูตร IGF แล้วการเปลี่ยนแปลงค่าเนื่องจากการหมุนของโลกอยู่อันดับระหว่าง $\pm 0.03 \text{ m/s}^2$

2.11.2 ระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลเมื่ออยู่ระดับสูงมากก็ยิ่งไกลจากจุดศูนย์กลางของโลกมากขึ้น แรงดึงดูดของโลกจะน้อยลงที่ระดับความสูงประมาณ 1,000 m ค่าความโน้มถ่วงลดน้อยลงประมาณ 0.0001 m/s^2

2.11.3 ความหนาแน่นของโลกที่ตำแหน่งต่างๆ ไม่เท่ากัน เนื่องจากความโน้มถ่วงเป็นฟังก์ชันของมวล ความโน้มถ่วงจึงแปรเปลี่ยนไปด้วย การเปลี่ยนแปลงค่าเนื่องจากมวลของโลกไม่คงที่มีอันดับอยู่ระหว่าง $\pm 0.0006 \text{ m/s}^2$

2.11.4 แรงดึงดูดของดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความโน้มถ่วงประมาณ $\pm 0.000\,003 \text{ m/s}^2$

3. การทดสอบหาสูตรคำนวณค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นที่

การทดสอบหาสูตรคำนวณค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นที่ เลือกใช้ตำแหน่งที่ตั้ง ณ มหาวิทยาลัย นอร์ท-เชียงใหม่ อ.หางดง จ.เชียงใหม่ มีพิกัดอยู่ที่เส้นรุ้ง $18^\circ 39' 43'' \text{ N}$ และระดับความสูง 300 m AMSL สูตรคำนวณที่เลือกใช้คือสมการ (19), (20), (21) และ (24) ซึ่งเป็นสมการที่ได้มาจากการปรับแก้ค่าแรงโน้มถ่วงแล้ว

และมีผลลัพธ์การคำนวณค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นที่ใกล้เคียงกัน แต่การคำนวณในสมการ (19) และ (20) ต้องการค่า $g(\phi)$ จึงใช้ค่าจากสมการ (16) จะได้ $g_{(18.66194^\circ)} = 9.785\ 615\ 612\ \text{m/s}^2$

การคำนวณหาค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นขั้นต้นได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยด้วยค่าความแตกต่างเป็นร้อยละ คือ $\%Diff = (g_i / g_{Av} - 1) \times 100\%$ และค่าความคลาดเคลื่อน (Error) เป็นร้อยละคำนวณจาก $\%Error = |(g_i / g_{Av} - 1)| \times 100\%$

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์จากการคำนวณค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่น

สูตรที่ใช้	$g\ (18.6194^\circ, 300\ \text{m})\ \text{m/s}^2$	%Diff	%Error
สมการ (19)	9.784 726 546	-0.000 232	0.000 232
สมการ (20)	9.784 726 549	-0.000 232	0.000 232
สมการ (21)	9.784 681 126	0.000 232	0.000 232
สมการ (24)	9.784 681 227	0.000 231	0.000 231
ค่าเฉลี่ย	9.784 703 862		

4. ผลลัพธ์และการอภิปรายผลลัพธ์

ผลลัพธ์จากการคำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ของค่าความโน้มถ่วงที่อยู่ในตาราง เห็นได้ว่าค่าความโน้มถ่วงที่คำนวณได้ทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งเมื่อพิจารณาความละเอียดของตัวเลขเพียงห้าตำแหน่งก็จะได้ค่าเท่ากันทั้งหมด คือ $g_{(18.66194^\circ, 300\text{m})} = 9.784\ \text{m/s}^2$ แต่เมื่อพิจารณาความละเอียดของตัวเลขสี่ตำแหน่งขึ้นไปก็จะเห็นความแตกต่างนี้

ค่าคลาดเคลื่อนของค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งสี่สูตรเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยจะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก โดยค่าที่คำนวณได้จากสมการ (24) จะมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยสมการ(19), (20) และ (21) มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากันแต่มากกว่าสมการ (24) เล็กน้อย

ความไม่แน่นอนสัมบูรณ์ (Absolute Uncertainty) ของผลลัพธ์ คือ: $(9.784\ 726\ 549 - 9.784\ 681\ 126) / 2\ \text{m/s}^2 = \pm 0.000\ 02\ \text{m/s}^2$ ดังนั้นค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นจึงมีค่าเป็น: $g_{(18.66194^\circ, 300\text{m})} = 9.784\ 70 \pm 0.000\ 02\ \text{m/s}^2$ หรือในรูปของความไม่แน่นอนเป็นร้อยละ (Percentage Uncertainty) ได้เป็น: $g_{(18.66194^\circ, 300\text{m})} = 9.784\ 70\ \text{m/s}^2 \pm 0.002\%$

ในการคำนวณหาค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นนั้น มีความเป็นไปได้ที่จะได้ผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงเป็นที่ยอมรับได้ โดยควรจะต้องทำการคำนวณเปรียบเทียบกับสูตรที่มีความเหมาะสมหลายสูตร และเลือกใช้สูตรการคำนวณที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และควรจะต้องทำการทดลองเพื่อยืนยันค่าที่ได้จากการคำนวณในขั้นต่อไปโดยใช้มาตรฐานความโน้มถ่วง (Gravimeter) ที่เหมาะสม

ดังนั้นสำหรับมหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่ ซึ่งใช้เป็นสถานที่ทดสอบตั้งอยู่ที่เส้นรุ้ง $18^{\circ} 39' 43''$ N และมีระดับความสูง 300 m AMSL, โดยการใช้สมการ (19), (20), (21) และ (24) จะคำนวณหาค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นเฉลี่ยได้เป็น $g_{(18.66194^{\circ}, 300\text{m})} = 9.784\ 70 \pm 0.000\ 02\ \text{m/s}^2$ หรือ $g_{(18.66194^{\circ}, 300\text{m})} = 9.784\ 70\ \text{m/s}^2 \pm 0.002\%$ โดยสูตรในการคำนวณทั้งสี่มีความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยประมาณ 0.0002%

เอกสารอ้างอิง

- [1] Strelkov SP. Mechanics. Moscow: Mir; 1978.
- [2] Newton's Law of Gravitation – Introduction [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2022 [cited 2022 Sep 16]. Available from: <https://studylib.net/doc/18589864/newton-s-law-of-gravitation-gravitation-%E2%80%93-introduction>.
- [3] Meriam JL, Kraige LG. Engineering Mechanics Dynamics Volume 2. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons; 1987.
- [4] Oxford University Press. Oxford Reference [Internet]. New York: Oxford University Press ; c2023 [cited 2023 Jul 3]. Available from: <https://www.oxfordreference.com/display/10.1093/oi/authority.20110803095840601;jsessionid=073C785D5B71CA06125D30674B7A4D55>.
- [5] วัชรินทร์ วิทย์กุล. กลศาสตร์วิศวกรรม: พลศาสตร์. กรุงเทพฯ: ฟิสิกส์เซ็นเตอร์; 2536.
- [6] Meriam JL. Mechanics Part II: Dynamics, 2nd ed. New York: John Wiley and Sons; 1959.
- [7] Moritz H. Geodetic Reference System 1980. [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2022 [cited 2023 Jul 3]. Available from: http://geoweb.mit.edu/~tah/12.221_2005/grs80_corr.pdf
- [8] Wellenhof BH, Moritz H. Physical Geodesy. 2nd. New York: Springer; 2006.
- [9] The University of Edinburgh. School of Geosciences. Gravity Formulae [Internet]. Edinburgh: The University of Edinburgh; 2004 [cited 2022 Aug 16]. Available from: https://www.geos.ed.ac.uk/~whaler/gravity_lectures/Gravity%20Formulae.pdf
- [10] SensorsONE. Local Gravity Calculator [Internet]. Rutland: SensorsONE Limited; c2023 [cited 2022 Sep 16]. Available from: <https://www.sensorsone.com/local-gravity-calculator/>
- [11] Thorncroft G. How precise is Earth's gravity [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2022 [cited 2022 Apr 5]. Available from: <https://studylib.net/doc/18249161/how-precise-is-earth-s-gravity-%3F>.
- [12] The University of Sheffield. G1 Kater's Pendulum [Internet]. Sheffield: The University of Sheffield ; c2023 [cited 2022 Jul 20]. Available from: https://www.sheffield.ac.uk/polopoly_fs/1.142621/file/G1_Katers_script_V2.1.pdf

-
- [13] National Institute of Standards and Technology. Standard acceleration of gravity [Internet]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology; 2023 [cited 2023 Jul 3]. Available from: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?gn>.
- [14] University Collage of London. Gravity, the shape of the Earth, isostasy, moment of inertia [Internet]. London: University Collage of London; c2023 [cited 2023 Jul 3]. Available from: <https://www.ucl.ac.uk/EarthSci/people/lidunka/GEOL2014/Geophysics20-%20Gravity/gravity.htm>
- [15] International Civil Aviation Organization. World Geodetic System – 1984 (WGS-84) Manual. [Internet]. Québec: International Civil Aviation Organization; c2023 [cited 2023 Jul 3]. Available from: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2014/ECARAIM/REF08-Doc9674.pdf>

❀ พระราชหัตถเลขา ❀

วันที่ ๒๐ พฤษภาคม พ.ศ. ๒๔๖๕
ใน กุศลสงคราม จ. ต. ก. ก. ก. ก.
เรื่อง ที่ มีคนมาฟ้องว่า ได้ไปลัก
ขโมยของที่มีคนขายแล้ว และนำ
มาขายในที่สาธารณะ



Science and Technology