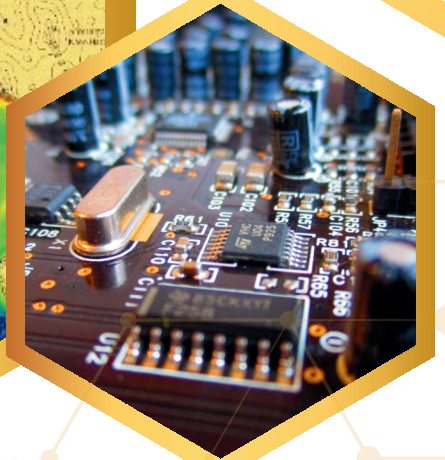
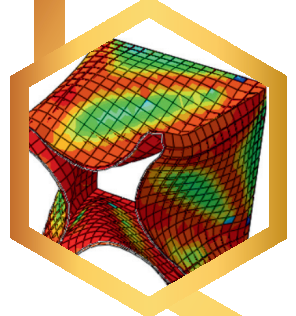
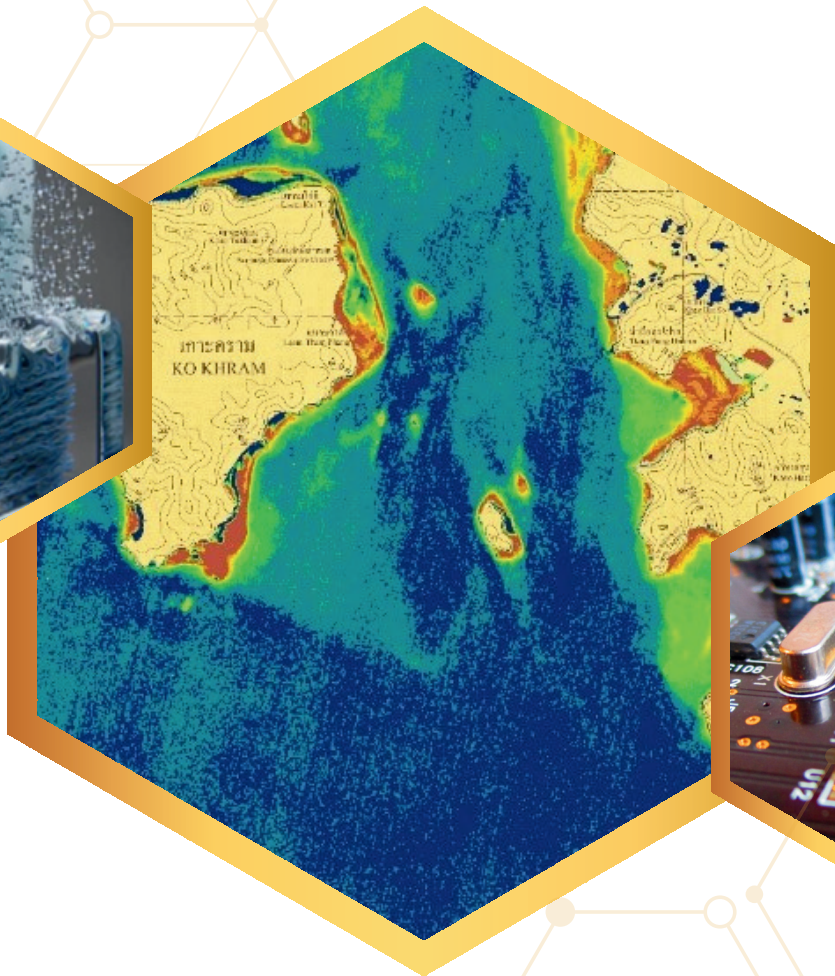




วารสารวิชาการ โรงเรียนนายเรือ

ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

Royal Thai Naval Academy Journal of Science and Technology



ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 มกราคม - ธันวาคม 2567

Vol.7 No.1 January - December 2024



ISSN : 2985-2897 (Print)

ISSN : 2985-2773 (Online)

Available online at www.rtna.ac.th

พระราชหัตถเลขา

วันที่ ๒๐ พฤษภาคม พ.ศ. ๒๔๖๕
ใน กทม. ลงนาม จ.ร. ใต้ลายมือชื่อ
เรื่อง ที่ มีดอกลีลาวดี ซึ่งได้ในพทอ
ทนายเรือที่ปากน้ำคลองเตย ๐๖/๕/๖๕
สั่งให้ไปออกทำ



คณะที่ปรึกษาวารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

พลเรือโท ประวุฒิ รอดมณี
พลเรือตรี ปรีดิวัฒน์ ทิลกนรนาท
พลเรือตรี ธงสรรค์ แดงจีน
พลเรือตรี จักรชัย น้อยหิวดา
พลเรือตรี รองศาสตราจารย์ นเรศ เพ็ชรนิบ
พลเรือตรี สุชาติ บุชนารถ
นาวาเอก เทวัญ สุขเกษม

บรรณาธิการ

กองบรรณาธิการ (ภายใน)

นาวาเอก รองศาสตราจารย์ ไกรสิทธิ์ มหิวรรณ
นาวาเอก ชัยยศ คงขวัญ
นาวาเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัยรัตน์ นกาคักดิ์ศรี
นาวาเอกหญิง รองศาสตราจารย์ ศิริรัตน์ บุญโสภิต
นาวาเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วีระ บุญพุด
นาวาเอก รองศาสตราจารย์ จิตติ สัมภักตะกุล
เรือเอก จักริน มาลัยโรจน์ศิริ
เรือโทหญิง จิราพร แก้วหิรัญทรัพย์

กองบรรณาธิการ (ภายนอก)

นาวาเอก จัตรชัย เหลืองทองคำ
นาวาโท รชต โอศิริ
นาวาเอก ปริญวัฒน์ ตันติพุดธิโรจน์
นาวาเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศุภสิทธิ์ คงดี
นาวาเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมาน ได้รายรัมย์
พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อดิทัต สุขแสงพนมรุ่ง
พันเอกหญิง รองศาสตราจารย์ สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา
พันเอก ดร.นพพงศ์ อันสุริย์
นาวาอากาศโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วัชรพงศ์ เทตูปาน
นาวาอากาศตรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จิรภัทร ลดาวัลย์
เรืออากาศโท วิริยะ บริสุทธิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรทิพย์ แก่งอินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรชัย บำรุงศรี
รองศาสตราจารย์ ดร.เวคิน ปิยรัตน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วันวิสา ชัชวงษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงษ์ เวศพันธุ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธพงศ์ เพียรโรจน์

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

นาวาเอก รองศาสตราจารย์ ไกรสิทธิ์ มหิวรรณ
ผู้อำนวยการกองวิชาวิศวกรรมศาสตร์
ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

บรรณาธิการ
กองบรรณาธิการ
กองบรรณาธิการ
กองบรรณาธิการและผู้อ่านระบบ
กองบรรณาธิการ
กองบรรณาธิการและเลขานุการ
กองบรรณาธิการ
กองบรรณาธิการ

กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ
กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ
กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ
กรมยุทธศึกษาทหารเรือ
กรมยุทธศึกษาทหารเรือ
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่ผลงานบทความวิจัยและบทความวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แก่ผู้สนใจทั่วไป
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ทั้งด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เพื่อเป็นเอกสารรวบรวมบทความวิจัยที่น่าสนใจและมีคุณค่าทางวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วาระการเผยแพร่
สถานที่ติดต่อ

ปีละ 1 ฉบับ (มกราคม – ธันวาคม)
กองบรรณาธิการวารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือ
ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โรงเรียนนายเรือ
เลขที่ 204 ถ.สุขุมวิท ต.ปากน้ำ อ.เมืองสมุทรปราการ
จ.สมุทรปราการ 10270
โทรศัพท์ : 0-2475-3986

ออกแบบ - พิมพ์ที่

บริษัท แอดวานซ์ กราฟ จำกัด
503 ถ.อิสรภาพ แขวงบ้านช่างหล่อ เขตบางกอกน้อย
กรุงเทพฯ 10700
โทรศัพท์ : 062-456-4855
E-mail : suwaboot.adg@gmail.com

บทความหรือข้อคิดเห็น ในวารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
เป็นทรัพย์สินส่วนตัวของผู้เขียน โรงเรียนนายเรือและกองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วย

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีได้ดำเนินการเผยแพร่ผลงานวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทั้งในรูปแบบบทความวิจัยและบทความทางวิชาการอย่างต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลา 6 ปี โดยในปีนี้ได้ตีพิมพ์เป็นปีที่ 7 ฉบับที่ 1 มกราคม – ธันวาคม 2567 ซึ่งได้มีวัตถุประสงค์สำคัญในการเผยแพร่แลกเปลี่ยนความรู้ ความก้าวหน้าและพัฒนาการทางวิชาการให้กับนักเรียน นักศึกษา ครูอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ และผู้ที่มีความสนใจอื่นๆ

ในปีที่ทางทีมงานกองบรรณาธิการวารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือได้รวบรวมและคัดเลือกบทความที่มีความน่าสนใจทั้งสิ้นจำนวน 11 บทความ โดยมีความหลากหลาย ทั้งในเรื่องของผลงานการสื่อสาร วัสดุศาสตร์ เทคโนโลยีและองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องและเป็นประโยชน์ทั้งทางด้านพื้นที่เขตแดน ด้านการแพทย์ ด้านสุขภาพ และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพื่อประโยชน์ในทางทหาร

กองบรรณาธิการ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือฉบับนี้ จะร่วมเป็นอีกก้าวเล็กๆ ในเส้นทางที่ยิ่งใหญ่ของการเรียนรู้โดยการส่งผ่านองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทั้งในรูปแบบออนไลน์และแบบรูปเล่มสู่สายตาผู้อ่านเพื่อประโยชน์ในการสร้างความรับรู้และพัฒนาการความก้าวหน้าทางด้านวิชาการ ท้ายสุดนี้ขอขอบคุณนักวิชาการ นักวิจัย ครูอาจารย์ นักเรียน นักศึกษาทุกท่านที่ได้มีส่วนร่วมในการแบ่งปันความรู้ และขอขอบคุณทีมงานจัดทำวารสารทุกท่านที่เสียสละเวลาอันมีค่าพร้อมทั้งทุ่มเทแรงกายแรงใจให้กับกองบรรณาธิการในการผลิตวารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีฉบับนี้เป็นอย่างดี ขอขอบคุณครับ

นาวาเอก รองศาสตราจารย์ ไกรสิทธิ์ นพวิวรรณ
บรรณาธิการ วารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือ
ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

สารบัญ

An Integrated System of
Electricity and Potable Water
Production for Naval Cadets
by Solar Concentration on
POLYSUN

1

จักริน มาลัยโรจน์ศิริ และ ภาณุกร วัฒนจิง

เทคนิคการหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเล
ไทย-กัมพูชา ด้วยวิธี General
Direction of the Coast และ
Coastal Front

18

สมาน ได้รายรัมย์

การประยุกต์ใช้คลื่นสัญญาณเทระเฮิรตซ์
ในการควบคุมทางทะเล

31

อรณิชา คงวุฒิ, พัฒน์ศรัยญ์ เลาฬไฟบูลย์
และ วุฒิรงค์ คงวุฒิ

ความสัมพันธ์ของรูปร่างพื้นที่หน้าตัด
กับความสามารถดูดซับพลังงานของ
ท่อหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสภายใต้
สภาวะโบนเมนต์บิด

47

สมญา ภูนะยา และ รัชดา โสภาคะยัง

การออกแบบและพัฒนาเครื่องตัดถุง
สเตอร์ไรต์อัตโนมัติ

63

ปราโมทย์ สุขศิริศักดิ์, วิริยะ บริสุทธิ์
และ ประยูร กันอยู่

Using Machine Learning
(Multiple Regression Model)
to Conduct Satellite Derived
Bathymetry with Sentinel-2
in Sattahip Bay, Thailand.

72

สัณห์วิชญ์ อีสมาแอล

สารบัญ

พลังงานคลื่น: ศักยภาพและโอกาส
ในการผลิตไฟฟ้าเพื่ออนาคตที่ยั่งยืน
ของไทย 88

ปวริศ ทองดอนเหมือน, วุฒิรงค์ คงวุฒิ,
พัฒนศิริชัย เลหาไฟบูลย์ และ
อรณิชา คงวุฒิ

การสำรวจและวิเคราะห์ปริมาณ
คาเฟอีนในเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีน
ที่จำหน่ายในโรงเรียนนายร้อย
พระจุลจอมเกล้า 104

ปวีณา วัถบัว

การพัฒนาชุดทดลองการเคลื่อนที่
แบบวงกลมโดยใช้แอปพลิเคชัน
บนมือถือ 118

นุชนาฏ สุชาติพงศ์

ต้นแบบระบบตรวจจับและติดตาม
ใบหน้าด้วยการประมวลผลภาพ
ดิจิทัลประกอบแบบกล 129

พิศณุ คูมิชัย และ จักริน นาลัยโรจน์ศิริ

การพัฒนาระบบ GNSS ของ
ประเทศไทยสำหรับภารกิจทางทหาร 149

ปาณิสรา อีระรัตน์, อรณิชา คงวุฒิ,
พัฒนศิริชัย เลหาไฟบูลย์ และ
วุฒิรงค์ คงวุฒิ

An Integrated System of Electricity and Potable Water Production for Naval Cadets by Solar Concentration on POLYSUN

จักริน มาลัยโรจน์ศิริ¹ ภาณุกร วัฒนจั่ง²

Jakrin Malairojsiri¹ Panukorn Wattanajung²

Received: October 19, 2023

Revised: November 6, 2023

Accepted: November 19, 2023

Abstract

The POLYSUN software was developed to design and simulate sustainable energy systems: Photovoltaic system (PV), Photovoltaic Thermal system (PVT), Concentrated Photovoltaic Thermal system (CPVT). In this study, the CPVT system is proposed to be operated with Direct Contact Membrane Distillation (DCMD) to produce both electricity and clean water from seawater to match the requirements of a naval-cadet regiment in Royal Thai Naval Academy (RTNA), Thailand. The system will utilise heat waste from the CPVT system to desalinate seawater via the DCMD.

The aims of this project are to design and simulate this hybrid system on POLYSUN to match the requirements of 100 units: 400 cadets in the regiment with the available area of 100 m x 100 m by supporting of literature reviews. The concentration tracking system of 100 collectors with nominal power at 1,878 W/collector is designed to cover the annual consumption electricity at 13,308 kWh and daily water consumption at 2,000 litres or 5 litres/person/day. The specific requirements of the DCMD are to feed seawater at 70°C and permeate water at 25°C into the DCMD with flow rate of feeding heat and permeate at 1,689 litres/hour. Furthermore, the financial assessment needs to be considered including the Levellised Cost of Electricity (LCOE) and the Return on Investment (ROI) as well as the Feed-in-Tariff (FiT) for 25-year lifetime. All in all, although the hybrid system can support both electricity and potable water for naval cadets, this system cannot make a profit within 25 years to have the ROI. The feasible reason is the daily electric consumption of naval cadets is different from

other departments. Namely, the routine of daily electric consumption usually requires after sunset. In summary, this system has high-cost investment when calculated from the naval-cadet daily electric consumption and a recent policy: an electric fee of bureaucratic departments and a FiT at 3.10 Bath/kWh and 2.20 Bath/kWh, respectively.

Keywords: Potable Water Production, Naval Cadets, Solar Concentration, POLYSUN

¹อาจารย์ ฝ้ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

Lecturer, Academic Branch, Royal Thai Naval Academy

E-mail: jakrin.m@navy.mi.th

²อาจารย์ ฝ้ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

Lecturer, Academic Branch, Royal Thai Naval Academy

E-mail: Panukorn.w@navy.mi.th

1. Introduction

1.1 Multijunction Cells and Solar Concentration

Solar energy, derived from photons, is harnessed using photovoltaic technology from solar spectrum levels. Materials' conductivity depends on the energy band gap; The energy band gap is exemplified in Figure 2 including GaAs, Si, and Ge. Advancements in solar tech have considerably increased efficiency by more than 20% up to 47.6% [1], achieved through stacked solar cells and concentration methods, as exemplified in Figure 1 [2, 3].

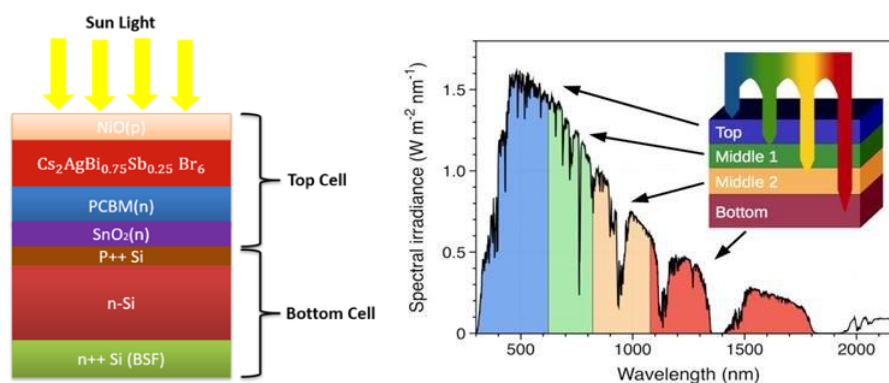


Figure 1 Solar Energy is Collected by Stacking Different Semiconducting Materials [2, 3].

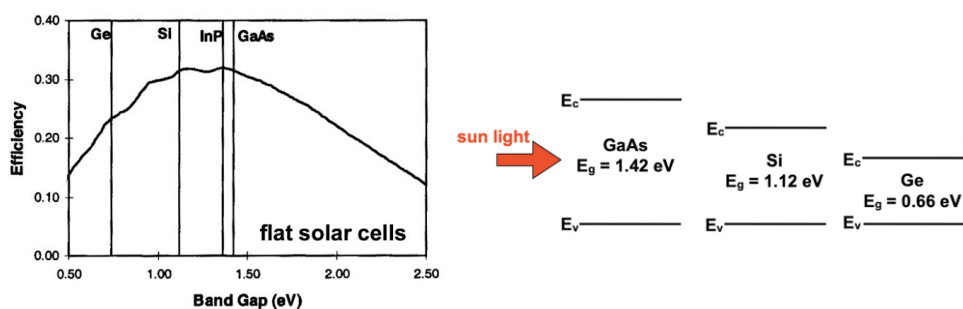


Figure 2 Multiple Bandgap Cells of GaAs, Si and Ge [4, 5].

With regards to Concentrated Photovoltaic Thermal system (CPVT), concentrated units could be numeral suns such as 1 sun and 100 suns, depending on how much of the concentrated density. Moreover, Solar concentration techniques normally focus sunlight onto either a single point or a line, using mirrors or lenses. Point focus systems concentrate sunlight for tasks like generating heat or electricity, while line focus systems broaden the concentration area, enabling applications such as producing steam for electricity generation. These methods

optimize solar energy utilization, playing a crucial role in renewable energy solutions. However, these systems typically require liquid to cool down the solar cells from the high temperature of concentration which can damage cells. Hence, cooling the cell is inevitably required to keep the system secure. The maximum power density ($P_{\max}$) could be calculated from V_m and J_m . Efficiency is calculated from electrical power out, which is $P_{\max}$ and optical power in (P_{opt}). Moreover, efficiency can be computed from the fill factor (FF), as expressed in Figure 3 and equations (1) – (3) [4, 5].

$$P_{\max} = V_m J_m \quad (1)$$

$$P_{\text{opt}} = \text{Concentration} \times \text{Power Density} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{opt}}} = \frac{V_m J_m}{P_{\text{opt}}} = \frac{J_{PV} V_{oc} FF}{P_{\text{opt}}} \quad (3)$$

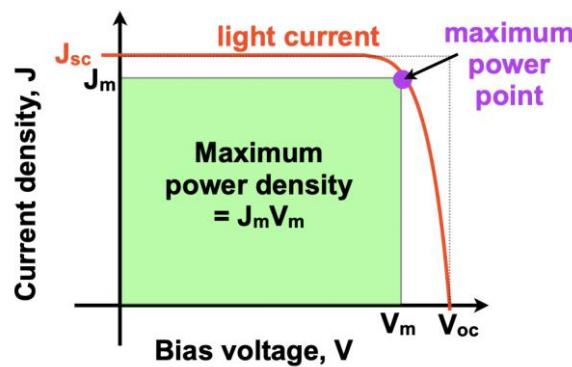


Figure 3 The Maximum Power Density [4, 5].

1.2 Membrane Distillation

Membrane Distillation (MD) is a thermal process that uses specialized hydrophobic membranes to separate saltwater and freshwater. Advanced MD membranes with micro-porous structures, like those made through co-axial electrospinning, enable efficient vapor transport, creating a temperature gradient and allowing water vapor to pass through the membrane, as illustrated in Figure 4 [6]. This process results in freshwater on one side and helps reduce the need for frequent membrane replacements due to the degradation of the MD.

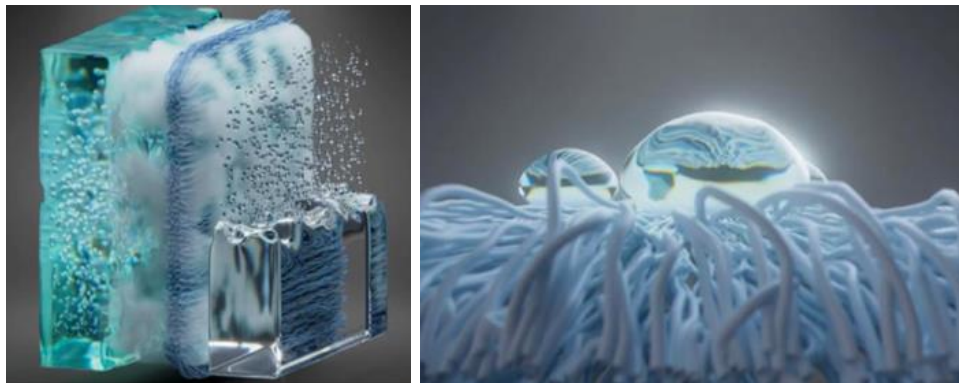


Figure 4 The Characteristic of Membrane Distillation [6].

However, membrane distillation has various types, which can be mainly classified into four types including Direct Contact Membrane Distillation (DCMD), Air Gap Membrane Distillation (AGMD), Sweeping Gas Membrane Distillation (SGMD), and Vacuum Membrane Distillation (VMD). Notably, DCMD Configuration is considered to provide the highest flux with lowest cost compared to other types [7, 8].

1.3 Harnessing Heat Waste to A Hybrid System

Membrane Distillation (MD) can utilize heat waste with specific temperature requirements, relying on temperature differences between feeding and permeate sides; The gap temperature will encourage the process of water production. Hence, the chosen DCMD, which can operate with feed temperatures of 40-70°C and permeate temperatures of 20-25°C, suits coastal regions like Thailand. This is because sea water can be used to cool down the cells, preventing cells burning. Moreover, heat waste can be harnessed for the DCMD process. The system's temperature is regulated by an auxiliary boiler and a three-way valve to maintain the desired levels. In addition to this, an auxiliary boiler is proposed to back up the temperature of the tank when the temperature is lower than the expectation. Meanwhile, a three-way valve is prepared in the case that the temperature passed the collectors are beyond the expected temperature. This is because the sunlight during a day fluctuates.

1.4 Financial Investment

The financial investment is a crucial contemplation in systems to be proven whether they are worthwhile to be invested. In the consideration of total costs, the total costs are yearly calculated which is called annuitised capital cost (A). The annuitised capital cost can be divided by total energy production to have the LCOE. Remarkably, discounting and interest are not

the same since discounting implies that the summary of money in the future which is used to calculate the present value of the future cash flow, while real interest rate is monetary interest rate minus rate of inflation. In addition to this, inflation is the increase of prices with time eroding the real value of money [9]. The present value, net present value and present value of annuity can be observed in Equations (4) – (7):

$$V_p = \frac{V_n}{(1+r)^n} \quad (4)$$

$$NPV = \frac{V_1}{(1+r)^1} + \frac{V_2}{(1+r)^2} + \frac{V_3}{(1+r)^3} + \dots + \frac{V_n}{(1+r)^n} \quad (5)$$

$$A = V_p \frac{r}{1 - (1+r)^{-n}} \quad (6)$$

$$NPV = NPV (\text{benefit/income}) - NPV (\text{costs}) \quad (7)$$

Where V_p is the present value, V_n is the value in n year, r is the discount rate, A is an annuity, and n is the number of years. If amount V_p is borrowed from the bank now, a summary of A must be paid back every year for n years [9]. In terms of investment, if NPV of the whole project is higher than zero, profit is made, and the project is worth doing.

In the process of financial assessment, total costs need to be analysed with the benefit of Net Present Value (NPV_B) and the costs of Net Present Value (NPV_C). NPV_B normally receives from the selling electricity to the grid system, while NPV_C is calculated from the system costs. The system costs can be distributed into two categories: capital costs and annual costs. In addition, Capital Costs (CC) are installation, site improvement, and components [10], while Annual Costs (AC) are Annual Cost Fixed Charged (AC_{fixed}), Annual Cost Maintenance (AC_{MT}), Annual Cost of Replacement (AC_{MR}), Annual Cost Operation and Maintenance ($AC_{\text{O\&M}}$) [11]. The amortization factor (a) can be calculated from equation (8), where i is the interest rate, while n is the lifetime [12]

$$a = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (8)$$

Moreover, discount rate, interest rate, inflation, and project lifetime are to be considered. Hence, the literature reviews are used to support database using in this project. In this project, the discount rate of the system is proposed to be 3% [13], while the inflation rate

is computed as 3% from the average inflation over 20 years in Thailand [14]. Considering the grid system, Feed in Tariff (FIT) policy is promoted to encourage people to use power generation from renewable energy including wind, solar, and hydro energy. Typically, the FIT is determined on the basis of the LCOE produced from renewable energy in order to have the ROI. The LCOE and the ROI as well as the capacity of the system can be calculated from equations (9) and (10) below [9].

$$\text{LCOE} = \frac{A + \gamma}{\text{Actual Energy to Grid System}} \quad (9)$$

$$\text{Capacity Factor (\%)} = \frac{\text{Actual Energy to Grid System}}{\text{Optimal Energy Generation}} \times 100\% \quad (10)$$

Where A is the annuitised capital cost (Baht/year), γ is the annual running cost (Baht/year) and n is the number of the payback. According to the Metropolitan Electricity Authority (MEA), the average rate of the electricity power price for bureaucratic departments and FIT are 3.10 Baht/kWh and 2.20 Baht/kWh, respectively [15].

2. Objectives

To design and simulate a hybrid system for electrical generation and producing potable water for 400 naval cadets with an available area of 100 m x 100 m at the RTNA, Thailand by the Concentrated Photovoltaics Thermal (CPVT) system on POLYSUN.

To design a Multiphysics simulation model of the CPVT system that will be used to power a membrane distillation (MD) water purification system and choose the appropriate MD configuration. The system will be simulated to examine whether the ROI can be achieved within 25 years. The electrical fee and the FIT will be analysed.

3. The Methods of Research

To begin with the design process, selecting a suitable membrane configuration is the first step, followed by designing the hybrid system for electricity and clean water production. Databases need to be set up according to consumption requirements. Before choosing thermal and electrical components in POLYSUN, each component must be calculated for proper choices. The number of collectors will be calculated based on the available area of 100 m x 100 m, and then the system will be simulated to meet both thermal and electrical requirements. Finally, the hybrid system will be proven whether this system can undergo the financial assessment from the LCOE and the ROI as well as Grid's electrical fee.

3.1 The CPVT for the RTNA, Thailand

The RTNA, a part of the Samutprakarn province, where seawater temperatures range from 27 to 30 degrees Celsius, is conducive for desalination. Solar irradiation values range between 1,300 and 1,400 kWh/m²/year [16], thereby providing ample sunlight for solar systems, as shown in Figure 5.

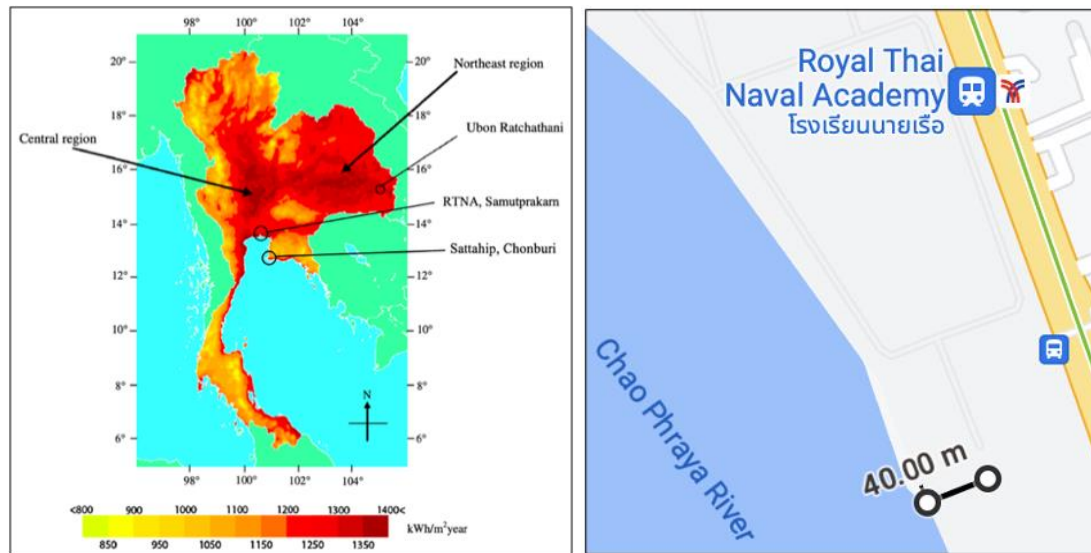


Figure 5 Solar Irradiation of Thailand (Left) and The Location of the RTNA (Right) [16].

With regards to electricity and water demand, 400 cadets in a naval regiment in the RTNA are proposed to be a criterion in this project. To begin with, drinking water consumption over a year is highly estimated from an athlete (5 litres/person/day), while the annual electricity consumption is calculated based on the MEA. The electricity demand, as illustrated in Figure 6, for 400 cadets is approximately 13,308 kWh/year, while water demand is 2,000 litres/day, calculated from 5 litres/person/day.

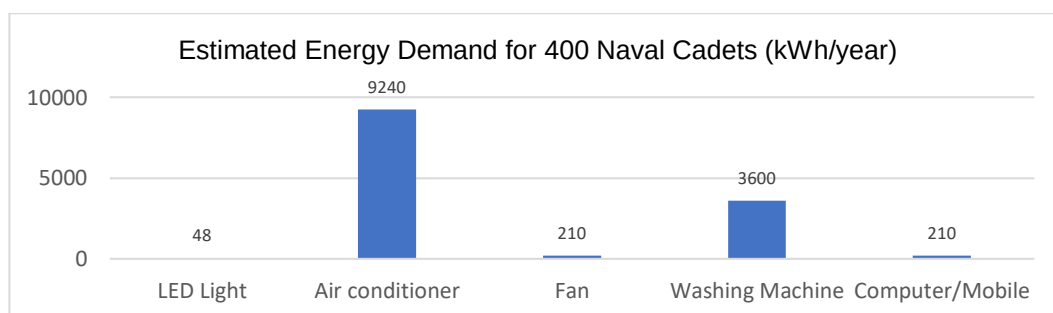


Figure 6 Estimated Electricity Consumption in a Year of the RTNA.

3.2 Choosing an Appropriate MD Configuration

Due to the high amount of potable water requirement for a naval unit and the advantages of high permeate flux produced in the membrane, DCMD is an appropriate MD configuration for designing in this project [11, 12, 15]. The requirement for electricity and drinking water can be observed in Table 1.

Table 1 The Criteria of the Design in this Project.

The Location of the RTNA, Thailand (Lat 13°36.72'N, Long 100°35.4'E)		
Average Seawater Temperature (Min. – Max.)	°C	27-30
Naval Cadets	Number	400
Electricity Demand	kWh _e /year	13,308
Daily Consumable Water Demand	Litres/day	2,000

Regarding the clean water production rate, the spiral-wound DCMD module from AquaStill (Sittard, The Netherlands) will be chosen for this project in accordance with the literature review. The specific characteristics of the spiral-wound DCMD membrane module can be observed in Table 2 [16].

Table 2 The Specific Characteristics of The Spiral-Wound DCMD Membrane Module.

Total Membrane Surface Area	m ²	36
Total Height of The Module	m	6
Total Length of Envelope	m	45
Total Width of Envelope	m	12
Total Channels of The Feed and Distillate	Units	30

According to Duong et al. [17], two modes can be operated: co-current and counter-current; The counter-current mode and 25°C are chosen due to higher rate of water flux and feasible heat temperature, as shown in Figure 7.

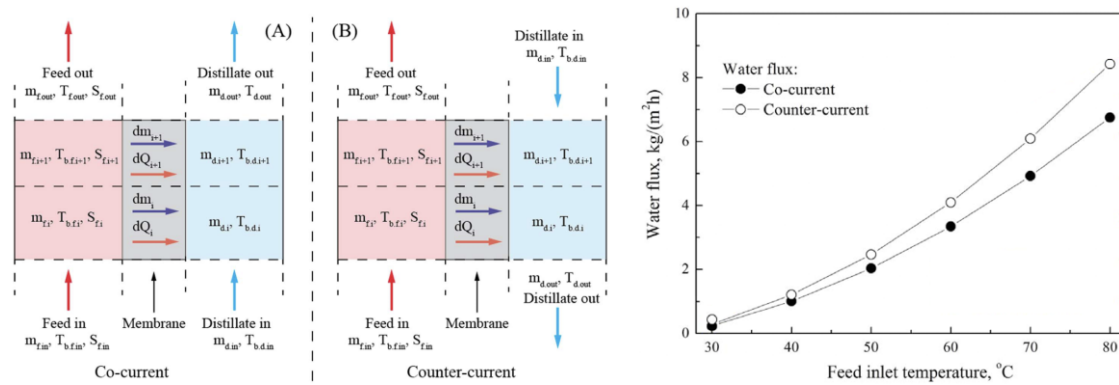


Figure 7 DCMD Modes: Co-Current and Counter-Current (Left), and Water Flux Rate (Right) [17].

3.3 Design A Hybrid System

To begin with, a hybrid system must meet the conditions of electricity and freshwater, according to Table 1. Because seawater is expected to be heated by the CPVT before sending to DCMD at 70°C , seawater will be pumped into the tank to absorb heat and then passed to DCMD. However, the temperature of the tank depends on the temperature of the CPVT collectors, which might be fluctuated. Namely, it can be higher or lower than 70°C according to the weather condition. Therefore, an auxiliary boiler is required to heat the tank temperature in case the temperature is lower than 70°C . Meanwhile, a three-way valve is required to mix the temperature of the water with cold water if the temperature is higher than 70°C . Moreover, since the required MD configuration is DCMD, another permeate tank is required in the process. The basic summary of a hybrid design can be observed in Figure 8. The flow rate can be calculated from size of pipe and velocity, as shown in equations (11) and (12).

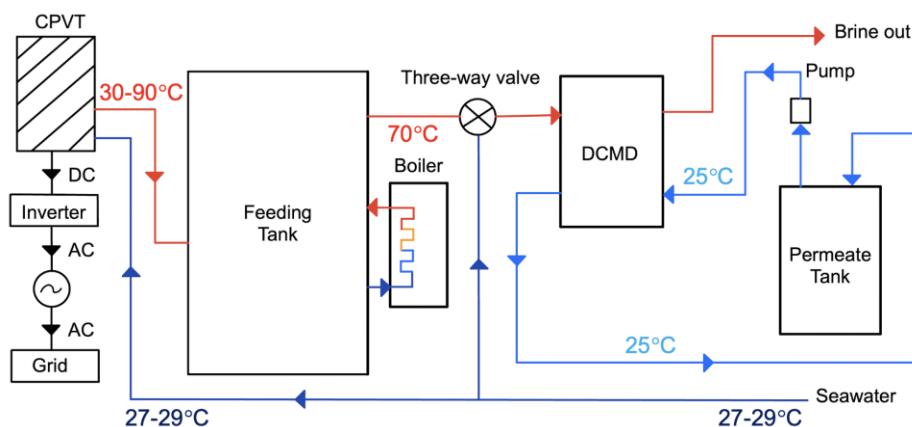


Figure 8 The Design of The CPVT System with DCMD Membrane.

$$\Omega = vA \quad (11)$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (12)$$

Where Ω is the flow rate (m^3/s), v is velocity (m/s), A is area of the cross section (m^2), π is the ratio of a circle's circumference to its diameter, and D is the diameter [18]. The flow rate of pipes can be calculated as $1.689 \text{ m}^3/\text{h}$, where D is 2 inches/0.048 m and an acceptable velocity is 0.5 m/s . A permeate tank is indispensable for DCMD since the cold feed, which is seawater, cannot be used as a coolant. The head of permeate tank is designed as 2 m. The flow rate of hot side and feeding permeate is 1,689 litres/hour. The size of a pump is required to be calculated, as expressed in equation (13).

$$P = \frac{\rho g h \Omega}{\eta (3.6 \times 10^3)} \quad (13)$$

Where P is a pump power (W), η is efficiency, ρ is density of liquid (kg/m^3), g is the gravity (m^2/s), h is head (m), and Ω is the flow rate (m^3/s). The size of a pump is approximately 20 W computed from η is 60%, Density of seawater is $1,023.6 \text{ kg/m}^3$, g is $9.82 \text{ m}^2/\text{s}$, h is 2 m, and the flow rate is $1.689 \text{ m}^3/\text{h}$ [19].

The design is proposed to operate by feeding seawater at 70°C for 11 hours (6 am to 5 pm) during the daytime to utilise heat from solar radiation. According to Figure 7 (right), it can produce clean water at about 66 litres/m^2 from $6 \text{ litres/m}^2\text{h}$, which is around 475.2 litres/day. However, daily consumable water demand is 2,000 litres/day which is higher than the ability of water production. As a result, the design needs to be reconsidered at about five modules to have the specific requirements at 2,376 litres/day, which can cover the consumable water demand at 2,000 litres/day.

Pumping a large volume of seawater out of the small tank in short time can affect the temperature of the boiler. Therefore, the chosen size of tank should be feasible. In this case, a 10,000L insulated water tank is chosen. Moreover, an electric boiler is required to heat and maintain an appropriate temperature of the tank storage before passing through the three-way valve at 70°C . Notably, a three-way valve will mix hot and cold water to maintain a setting temperature of 70°C at the DCMD. Hot water at 70°C and permeate water at 25°C are used for feeding the membrane. The power requirement of boilers can be calculated from an equation below:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{mc\Delta T}{t} \quad (14)$$

Where E is energy (J), m is the mass of the substance (kg), c is the specific heat which depends on each material and phase (J/kg°C), t is time (s) and ΔT is the different temperatures [18]. The total power requirement of boilers can be given as 83.18 kW, where m is 1,728.58 kg/h, c is 3,850 J/kg°C, ΔT is 75-25°C. In the case of the CPVT specifications, point-focus type of concentration, which is Polycrystalline, is chosen; Nominal power STC is 1,878 W; Gross area is 16.38 m²/module with biaxial tracking. Soiling, Cable losses and mismatching losses are calculated at 2%. In this study, the proposed design is 100 modules of collectors according to the available area of the RTNA, 100 m x 100 m.

4. Results

4.1 Electricity and Potable Water Production

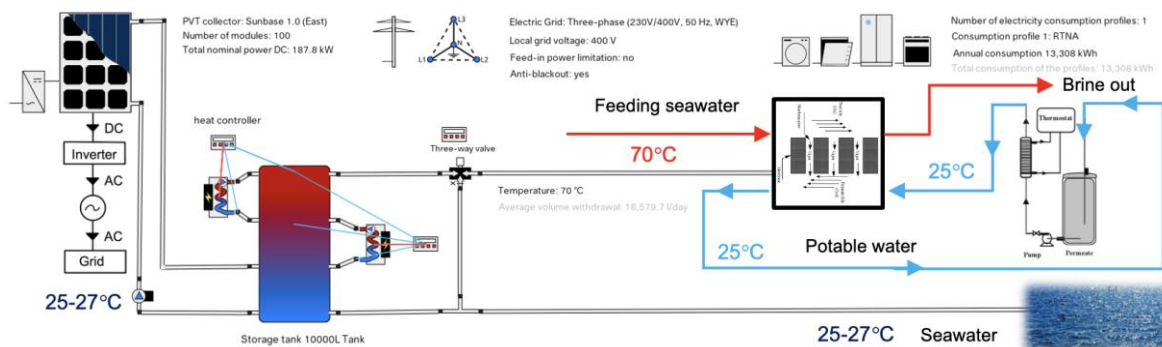


Figure 9 The Hybrid System Designed by the POLYSUN.

Figure 9 illustrates the schematic of the hybrid system in accordance with naval-cadet requirements, while Figure 10 shows the results after simulating the system; Own AC production (E_{acp}) exceeds the total electricity consumption (E_{cs}) and covers the requirement of thermal system (Q_{aux}), which requires feeding at 70°C for 11 hours.

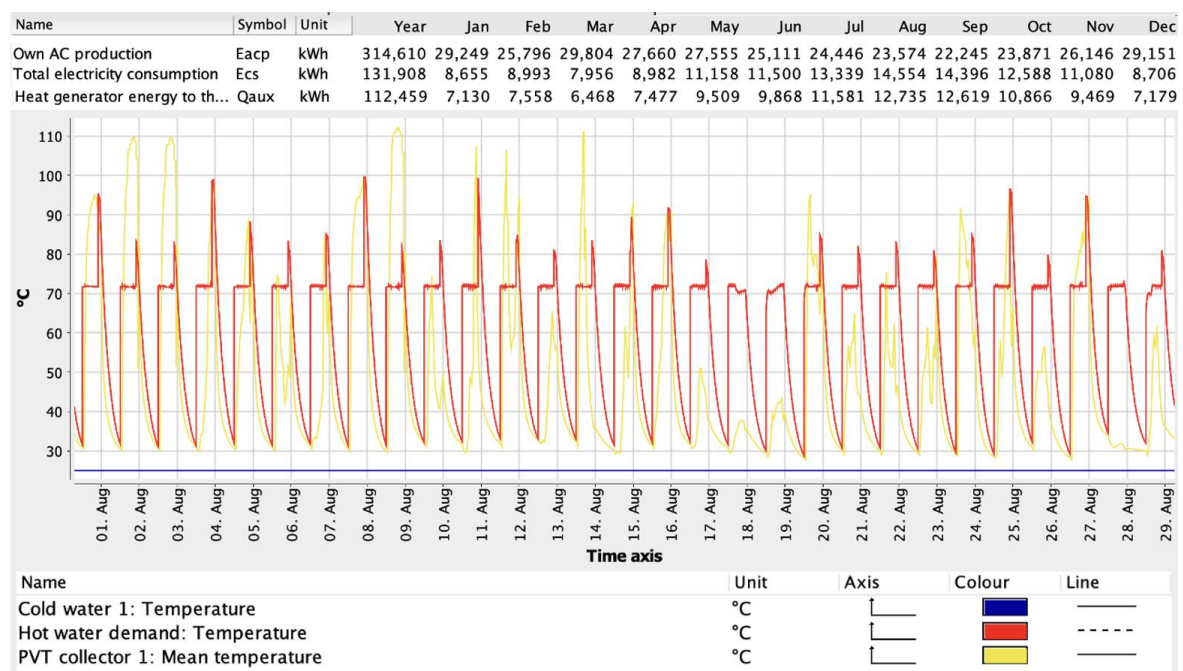


Figure 10 The Temperatures of Collectors (Yellow), MD (Red) and Seawater (Blue) by Times with the amount of Qaux, Eacp and Ecs over a Year.

4.2 System Costs

Table 3 The Estimated System Costs of the 100-CPVT System.

Item	Unit	Size	Cost Unit	Estimated Cost	Thai Baht
The system cost of components					
Freshwater	m ³	25	\$21/m ³	\$525	18,375
10,000L Tank	Unit	1	\$10,000	\$10,000	350,000
1,000L Tank	Unit	1	\$1,000	\$1,000	35,000
Pumps	Unit	2	\$40/unit	\$80	2,800
Pipes	m	70	\$0.55/m	\$39	1,348
Electric boiler 80kW	Unit	1	\$3,500	\$3,500	122,500
Total Cost of Components		\$15,765 or 551,775 Baht			

Table 4 The Estimated System Costs of the 100-CPVT System. (Continued)

The system cost of the DCMD					
Membrane	m ²	36	\$36/m ²	\$1,296	45,360
MD Equipment	Unit	1	\$2,500	\$2,500	87,500
Total Cost of MD			\$3,175 or 111,108 Baht		
Installation (25% of total cost of MD)			\$949 or 33,215 Baht		
Total Capital Costs			\$4,124 or 144,323 Baht		
Plant life (n) = 25 years, Discount rate (i) = 3%, Amortization factor (a) = 0.057 per year					
AC _{fixed} (a x CC)			9,466.27 Baht/year		
AC _{MT} (20% of AC _{fixed})			1,893.25 Baht/year		
AC _{MR} (20% of total cost MD)			26,572 Baht/year		
AC _{O&M} (AC _{MT} + AC _{MR})			28,465.25 Baht/year		
Total AC of DCMD (AC _{fixed} + AC _{O&M})			\$1,083.75 or 37,931.52 Baht/year		
The system cost of the CPVT over a year					
Solar Collection	m ²	1,638	\$150/m ²	\$245,700	8,599,500
Site Improvement	m ²	1,638	\$25/m ²	\$40,950	1,433,250
Plant System	kW	187.8	\$90/kW _e	\$16,920	591,570
Inverter	W _{dc}	187,800	\$0.06/W _{dc}	\$11,268	394,380
Soft Cost	W _{dc}	187,800	\$0.41/W _{dc}	\$76,998	2,694,930
Total Capital Costs	\$391,818 or 13,713,630 Baht				
AC _{MT}	kW	37.64	\$66/kW _{year}	\$2,484.2	86,948
Total AC of CPVT	\$2,484.2 or 86,948 Baht/year				
Total Capital Costs of system		\$411,707 or 14,409,728 Baht			
Total Annual Costs of System		\$3,568 or 124,880 Baht/year			

According to the estimated system costs [20, 21, 22] of the DCMD with the 100-CPVT system in Table 3, the system cannot amortize within 25 years for a recent policy: LCOE and FiT at 3.10 Bath/kWh and 2.20 Bath/kWh, respectively, as presented in Figure 11.

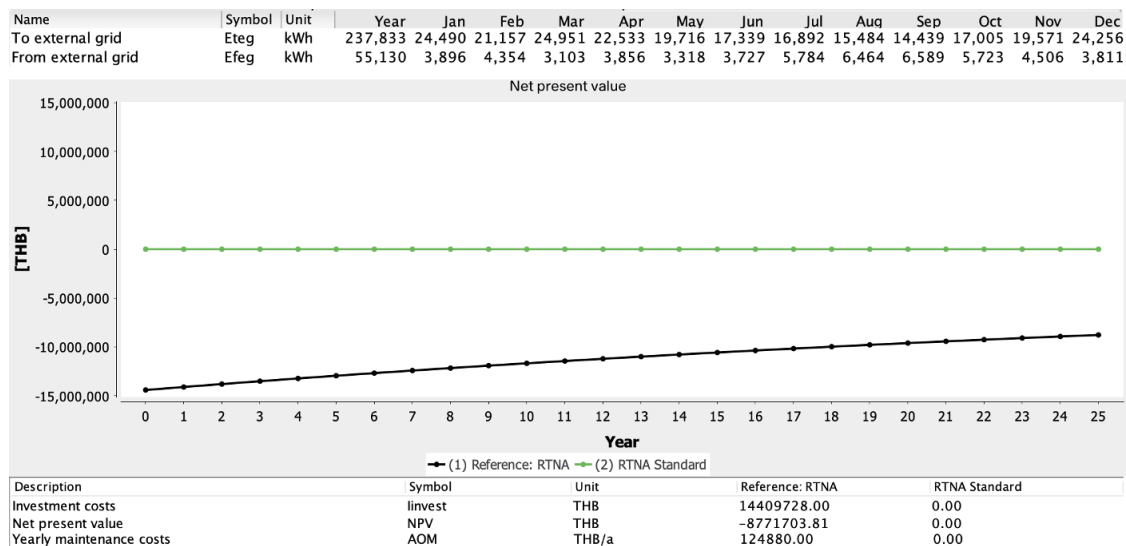


Figure 11 The 100-CPVT systems: NPV (Black) and Standard (Green).

5. Conclusions

In capsulation, this project is proposed to be designed and simulated on POLYSUN to match the requirements of electricity and potable water for 400 cadets in a naval regiment. The tracking solar concentration with nominal power at standard condition of 1,878 W is chosen to operate at the RTNA, Samutprakarn due to the advantage of high efficiency. Nonetheless, the concentrated collectors are to be cooled down so that cells would not be burned. Hence, the RTNA, where closed to sea water, can utilise sea water to cool this system. As a result, heat waste from this system should be took merits. An advisable solution is to produce pure water through membrane distillations. Hence, the DCMD is selected to be designed in this project due to the high amount of water flux production and cost saving. However, the specific requirements for this system are calculated to support electricity and clean water production based on the number of naval cadets. In addition, the temperatures between high side and clow side are imposed at 70°C and 25°C for DCMD, both flowing into the system at a rate of 1,689 litres/hour. The simulation shows that the available area of 100 collectors can cover the annual consumption electricity at 13,308 kWh and daily water consumption at 2,000 litres or 5 litres/person/day. However, the system is unable to achieve profitability within a 25-year period necessary for the ROI. This is primarily because the electricity consumption patterns among naval cadets markedly diverge from other departments. Specifically, their customary utilization of electricity commences post-sunset, setting them apart from the standard routines prevalent in other units. On the other hand, the profitability will be made at 2.20 Bath/kWh if the daily electric

consumption of the cadets requires only on the day-time, which is different from 0.9 Bath/kWh from the current policy rates: an electrical fee of 3.10 Bath/kWh and a FiT of 2.20 Bath/kWh. Finally, the calculation of LCOE for 25 years is 4.00 Baht/kWh, and therefore the FiT should be at least 4.00 Baht/kWh to have the ROI within 25 years.

References

- [1] NREL. Best Research-Cell Efficiency Chart. [Internet]. [place unknown]: [National Renewable Energy Laboratory]; 2023 [updated 2023 Sep 31]. Available from: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [2] Roser M. Why did renewables become so cheap so fast? [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2020 [updated 2020 Dec 1]. Available from: <https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth>
- [3] Ikeri HI, Onyia AI, Asogwa Pu. Investigation Of Optical Characteristics of Semiconductor Quantum Dots For Multi Junction Solar Cells Applications. *Int J Innov Sci Res Technol*. 2019 Feb;10(8):3532.
- [4] Letcher T, Fthenakis VM. A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems: With Special Focus on Photovoltaic Systems. 1st ed. London: Academic Press; 2018.
- [5] Ioannou A. Solar Generation Thermal and Photovoltaic. [place unknown]: [publisher unknown]; 2022.
- [6] Sorokin S. Membrane Distillation Explain 3D Animation. 2022. In: Behance [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2022 – [cited 2023 Sep 2]. [about 1 screen]. Available from: <https://www.behance.net/gallery/134585055/Membrane-distillation-Explain-3D-animation>.
- [7] El-Bourawi MS, Ding Z, Ma R, Khayet M. A framework for better understanding membrane distillation separation process. *J Memb Sci*. 2006 Nov 15;285(1-2):4-29.
- [8] Eykens L, Reyns T, De Sitter K, Dotremont C, Pinoy L, Van der Bruggen B. How to select a membrane distillation configuration: Process conditions and membrane influence unraveled. *Desalination*. 2016 Dec 1;399:105-15.
- [9] Ioannou A. Economics, Environmental & Social Issue. [place unknown]: [publisher unknown]; 2022.
- [10] Fernandes M, Schaefer LA. Levelized cost of energy of hybrid concentrating photovoltaic-thermal systems based on nanofluid spectral filtering. *Solar Energy*. 2021 Oct;227:126-36.

-
- [11] Soomro MI, Kim WS, Kim CN. Performance and cost comparison of different concentrated solar power plants integrated with direct-contact membrane distillation system. *Energy Convers Manag.* 2020 Oct;221:113193.
- [12] Banat F, Jwaied N. Economic evaluation of desalination by small-scale autonomous solar-powered membrane distillation units. *Desalination.* 2008 Mar;220(1-3):566-73.
- [13] Yoomak S, Patcharoen T, Ngaopitakkul A. Performance and economic evaluation of solar rooftop systems in different regions of Thailand. *Sustainability.* 2019;11(23):6647.
- [14] Thailand Inflation Rate. In: Indices BoTaE, editor. 2022. Available from: <https://tradingeconomics.com/thailand/inflation-cpi>
- [15] Metropolitan Electricity Authority (MEA) [Internet]. Bangkok: Metropolitan Electricity Authority (MEA); 2023. Tariff Calculation: Type 4 Large General Service; 2023 [cited 2023 Sep 5]; [about 1 screen]. Available from: <https://www.mea.or.th/en/our-services/tariff-calculation/other>
- [16] Kengpol A, Rontlaong P, Tuominen M. A Decision Support System for Selection of Solar Power Plant Locations by Applying Fuzzy AHP and TOPSIS: An Empirical Study. *J Softw Eng Appl [Internet]*. 2013 Sep [cited 2023 Oct 1];6(9):470-81. Available from: <http://dx.doi.org/10.4236/jsea.2013.69057>
- [17] Duong H, Xia L, Ma Z, Cooper P, Ela W, Nghiem LD. Assessing the performance of solar thermal driven membrane distillation for seawater desalination by computer simulation. *J Memb Sci.* 2017;542:133-42.
- [18] Urone PP, Hinrichs R. *College Physics*. Houston, Texas: OpenStax; 2012.
- [19] Falcone G. *Fluid Flow, Wind, Hydroelectric, Wave & Tidal Generation*. [place unknown]: [publisher unknown]; 2022.
- [20] Fernandes M, Schaefer LA. Levelized cost of energy of hybrid concentrating photovoltaic-thermal systems based on nanofluid spectral filtering. *Solar Energy.* 2021 Oct;227:126-36.
- [21] Soomro MI, Kim WS, Kim CN. Performance and cost comparison of different concentrated solar power plants integrated with direct-contact membrane distillation system. *Energy Convers Manag.* 2020 Oct;221(7):113193.
- [22] Banat F, Jwaied N. Economic evaluation of desalination by small-scale autonomous solar-powered membrane distillation units. *Desalination.* 2008;220(1-3):566-73.

เทคนิคการหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลไทย-กัมพูชา ด้วยวิธี General Direction of the Coast และ Coastal Front Overlapping Maritime Areas between Thailand-Cambodia by General Direction of the Coast and Coastal Front

สมาน ไร่รัมย์¹

Samharn Dairairam¹

Received: November 22, 2023

Revised: March 6, 2024

Accepted: March 7, 2024

บทคัดย่อ

สภาวะแวดล้อมทางกายภาพที่ไทยและกัมพูชามีส่วนร่วมในการแบ่งเขตแดนทางทะเล มิได้ทำให้ไหล่ทวีปหรือเส้นมัธยະที่แต่ละฝ่ายทำการประกาศฝ่ายเดียวเป็นเส้นเดียวกัน พื้นที่ทับซ้อนทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชาเกิดขึ้นจากความแตกต่างระหว่างการประกาศเขตไหล่ทวีปที่มีพื้นฐานของเส้นมัธยະทั้งแบบเคร่งครัดและแบบปรับแต่ง โดยเหตุผลและปัจจัยที่แต่ละฝ่ายนำมาประกอบการพิจารณานั้น มีทั้งความเป็นนามธรรมและรูปธรรม จุดประสงค์ของบทความทางวิชาการนี้เพื่อหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชาด้วยวิธี General Direction of the Coast และ Coastal Front ภายใต้หลักการของ Land Dominates the Sea โดยต้องการให้พื้นที่อ้างสิทธิ์ทับซ้อนทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชานั้น มีความเป็นรูปธรรมมากยิ่งขึ้น และสามารถนำไปสู่ขั้นตอนการแบ่งเขตทางทะเลด้วยวิธีการต่าง ๆ ทั้งนี้ขอบเขตของการศึกษาจะจำกัดอยู่เหนือแลตติจูด 11 องศาเหนือ อีกทั้งเป็นการพิจารณาและข้อคิดเห็นของผู้แต่งเท่านั้น

คำสำคัญ: เขตแดนทางทะเล, การประกาศฝ่ายเดียว, พื้นที่ทับซ้อนทางทะเล, Land Dominates the Sea

¹นักศึกษาวิทยาลัยการทัพเรือ กรมยุทธศึกษาทหารเรือ กองทัพเรือ

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

E-mail: samharn92@yahoo.com

Abstract

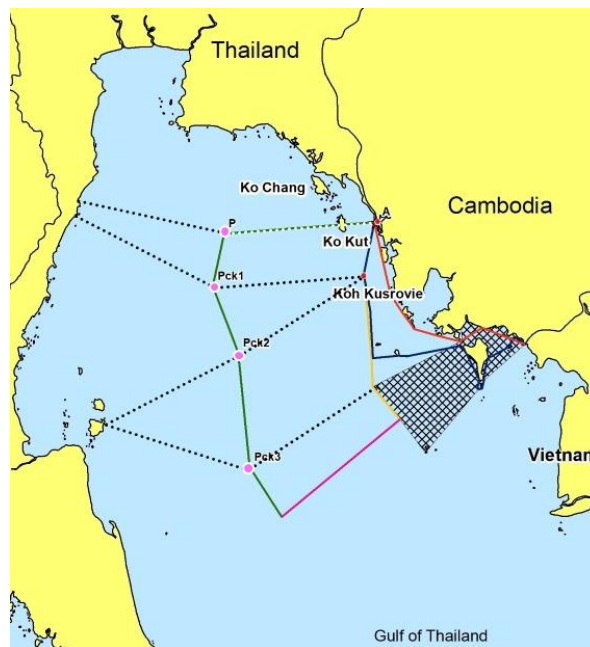
Thailand and Cambodia have the same geographical circumstances for maritime boundary, but Thailand's continental shelf claim is different from Cambodia's continental shelf claim. All are unilaterally claim. The overlapping claimed areas between Thailand and Cambodia is from difference of median line either strict or modified median line. Relevant circumstances for median line delineation from Thailand and Cambodia are both subjective and objective. This article aims at making the overlapping claimed area more objective by General Direction of the Coast and Coastal Front regarding Land Dominates the Sea and it's results guiding for delimitation. The study area will be delimited above latitude 11-degree north only. The results of study and opinion are from the author.

Keywords: Maritime Boundary, Unilaterally Claim, Overlapping Claimed Areas, Land Dominates the Sea

1. บทนำ

ไหล่ทวีปที่ทั้งไทยและกัมพูชาต่างฝ่ายต่างประกาศนั้น ต่างก็มีพื้นฐานอยู่บนหลักการของเส้นมัธยะ แต่ปัจจัยสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ มีทั้งที่เป็นรูปธรรมและนามธรรม สำหรับรูปธรรม เช่น ลักษณะทางกายภาพที่มีร่วมกัน อันได้แก่ ลักษณะของชายฝั่ง เกาะ หิน ที่เรียงรายตามแนวชายฝั่ง และที่เป็นนามธรรม เช่น สภาพแวดล้อมทางเศรษฐกิจ สังคม การเมือง สนธิสัญญาเกี่ยวกับเขตแดนในอดีตที่มีผลผูกพันมาถึงปัจจุบัน ที่แต่ละฝ่ายนำมาเป็นองค์ประกอบในการสร้างเส้นมัธยะนั้นมีความแตกต่างกัน โดยเส้นมัธยะ (Equidistance Line) คือวิธีการแบ่งเขตแดนทางทะเลระหว่างรัฐ หากชายฝั่งของรัฐคู่กรณีมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดแนวชายฝั่งของฝั่งทั้ง 2 ฝ่าย เส้นมัธยะจะเป็นเส้นตรงที่อยู่กึ่งกลางระหว่างรัฐ แต่หากลักษณะทางกายภาพของชายฝั่งนั้นมีความเว้าแหว่ง คดเคี้ยว มีเกาะและหินเรียงรายตามแนวชายฝั่ง เส้นมัธยะจากเดิมที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดแนว ก็จะมี ความคดเคี้ยวไปตามลักษณะทางกายภาพชายฝั่งของทั้งสองฝ่าย

1.1 กัมพูชาประกาศไหล่ทวีปเมื่อ 1 กรกฎาคม 2515 กัมพูชาอ้างอิงเหตุผลในการประกาศไหล่ทวีป (เส้นมัธยะ) ประกอบด้วยสภาวะแวดล้อมทางประวัติศาสตร์และสภาวะแวดล้อมทางกายภาพ หลักฐานทางประวัติศาสตร์ที่กัมพูชาอ้างอิงคือ สนธิสัญญาสยาม-ฝรั่งเศส ค.ศ.1907 ที่สำคัญคือการกล่าวอ้างว่าเส้นอ้างอิงจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกที่พาดผ่านพื้นที่ทางทะเลจากบกมายังเกาะกูดคือเส้นแบ่งเขตแดนทางทะเล กัมพูชาเชื่อมต่อเส้นดังกล่าวไปในทิศทางเดิมกับเส้นอ้างอิงเขตแดนออกไปในทะเลจนถึงบริเวณกึ่งกลางอ่าวไทย แล้วใช้จุดควบคุมทั้งจากแผ่นดิน เกาะ หิน ในการสร้างเส้นมัธยะลงไปตามกลางอ่าวไทย [1] เพื่อนำมาประกาศไหล่ทวีปตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ไหล่ทวีป (เส้นมัธยะ) กัมพูชา (จุดควบคุมเส้นมัธยะสร้างจากสมมติฐานของผู้แต่ง)

1.2 ไทยประกาศไหล่ทวีปเมื่อ 18 พฤษภาคม 2516 วิธีการที่ใช้คือเส้นแบ่งครึ่งมุมหรือเส้นมัธยะแบบปรับแต่งจากจุดที่ 1 ซึ่งอยู่บนแผ่นดินมายังกลางอ่าวไทย จากนั้นสร้างเส้นมัธยะแบบครึ่งวงกลมโดยใช้แผ่นดินหรือเกาะ จากทั้งของไทยและกัมพูชาเป็นจุดควบคุมในการสร้างเส้นมัธยะ [2] ตามรูปที่ 2

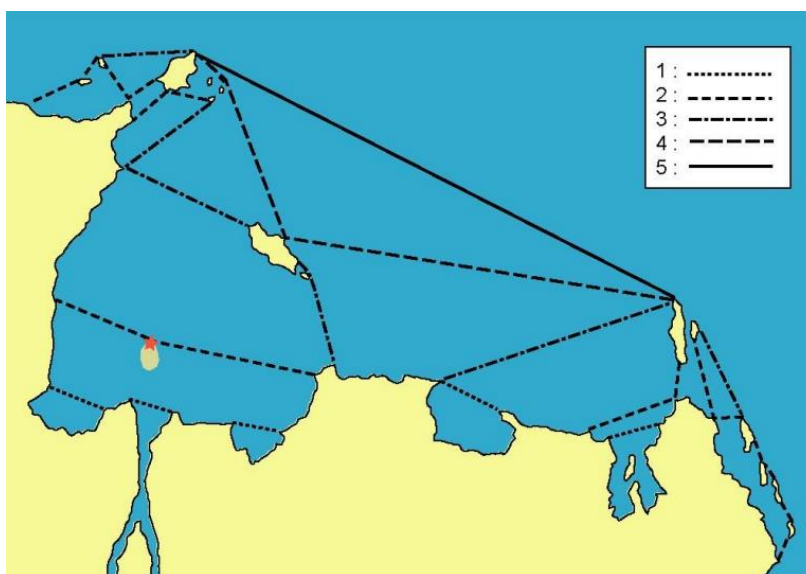


รูปที่ 2 ไหล่ทวีป (เส้นมัธยะ) ไทย (จุดควบคุมเส้นมัธยะสร้างจากสมมติฐานของผู้แต่ง)

เส้นมัธยะทั้งของไทยและกัมพูชานั้นต่างมีปัจจัยที่สนับสนุนด้วยกันทั้งสองฝ่าย ปัจจัยที่สำคัญคือปัจจัยทางลักษณะทางกายภาพ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีความเป็นรูปธรรม ดังนั้นจึงไม่ควรมีความแตกต่างกันจนเกิดเป็นพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลถึง 26,000 ตร.กม. พื้นที่ทับซ้อนทางทะเลดังกล่าวเกิดจากความแตกต่างของการกำหนดเส้นมัธยะที่แตกต่างกันอันเนื่องจากปัจจัยที่นำมาพิจารณาประกอบต่างกัน เช่น การให้น้ำหนักของเกาะหรือหินที่แตกต่าง ฝ่ายหนึ่งใช้แผ่นดินกับแผ่นดินในการสร้างเส้นมัธยะ ในขณะที่อีกฝ่ายหนึ่งใช้แผ่นดินกับเกาะหรือหินในการสร้างเส้นมัธยะ การนำหลักการ Land Dominates the Sea มาหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชา ซึ่งหลักการ Land Dominates the Sea จะอ้างอิงกับแผ่นดินเท่านั้น เมื่อได้พื้นที่ทับซ้อนทางทะเลที่แท้จริงและมีความเป็นรูปธรรม ขั้นตอนต่อไปคือการแบ่งเขตทางทะเลระหว่างกันโดยเส้นเขตทางทะเลนั้นจะต้องอยู่ภายในพื้นที่ทับซ้อนและสามารถทำการปรับแต่งเส้นเขตทางทะเลตามองค์ประกอบหรือปัจจัยที่นำมาร่วมพิจารณา หากแต่ละฝ่ายต้องการนำเกาะหรือหินมาเป็นองค์ประกอบในการแบ่งเขตทางทะเล เส้นเขตทางทะเลใด ๆ ที่เกิดจากการปรับแต่งนั้นจะอยู่ในพื้นที่ดังกล่าว

2. การหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลไทย-กัมพูชา ด้วย Land Dominates the Sea

2.1 ทิศทางทั่วไปของชายฝั่ง (General Direction of the Coast: GD) การหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลด้วยหลักการ Land Dominates the Sea นั้น จำเป็นต้องใช้ GD ในการหาพื้นที่ทางทะเลที่ทับซ้อนหรือเกี่ยวข้องในการแบ่งเขตทางทะเล สำหรับ GD นั้นมีความหลากหลายในการพิจารณา ตัวอย่าง GD ของชายฝั่งในบริเวณเดียวสามารถมี GD ได้ถึง 5 แบบ [3, น.41] ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 การพิจารณาทิศทางทั่วไปของชายฝั่ง ณ บริเวณเดียวสามารถพิจารณาได้ถึง 5 แบบ [3, น.41]

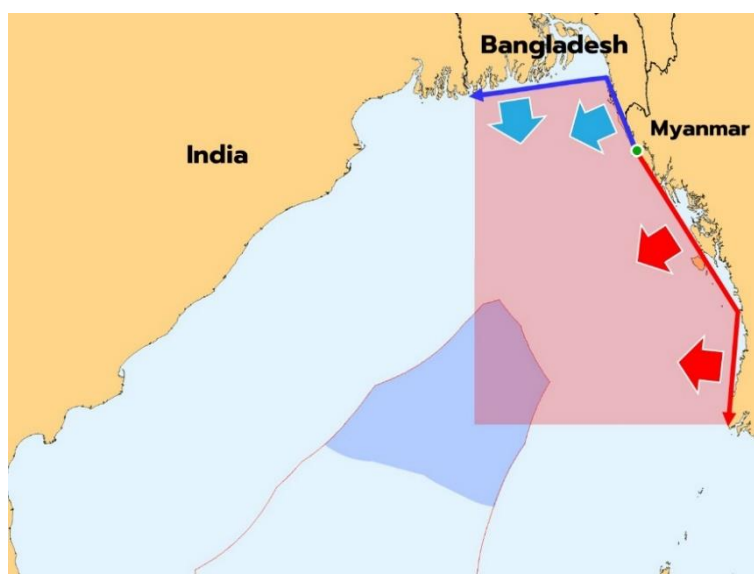
คณะที่ปรึกษาด้านเทคนิคกฎหมายทะเล (Advisory Board for the Law of the Sea: ABLOS) ภายใต้องค์การอุทกศาสตร์สากล (International Hydrographic Organization: IHO) ได้แนะนำเกี่ยวกับการนำทิศทางทั่วไปของชายฝั่งมาพิจารณาประกอบการแบ่งเขตแดนทางทะเลไว้ว่า “ทิศทางทั่วไปของชายฝั่งคือชุดของเส้นตรงที่ต่อเชื่อมระหว่างชายฝั่งธรรมชาติและความยาวของเส้นตรงแต่ละส่วนจะถ่วงน้ำหนักกันเพื่อใช้เป็นความยาวของทิศทางทั่วไปของชายฝั่ง ซึ่งสามารถพิจารณาได้ 2 รูปแบบคือ แบบที่ 1 คือ GD แบบเป็นส่วนย่อย ๆ ส่วนรวมกัน หรือ แบบที่ 2 คือการใช้เส้นตรงแทนทิศทางทั่วไปของชายฝั่งในภาพรวม โดย GD จะสะท้อนเฉพาะทิศทางของชายฝั่งที่ ‘หันหน้า’ ไปยังพื้นที่ที่กำหนด” [3, น.113]

2.2 การนำ GD แบบเป็นส่วน ๆ มาพิจารณาร่วมกับ Land Dominates the Sea เพื่อหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลนั้น ปรากฏในกรณีระหว่างโรมาเนีย-ยูเครน ที่ระบุว่า “the principle that the land dominates the sea through the projection of the coasts or the coastal fronts” [4] การหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลระหว่างโรมาเนีย-ยูเครน นั้น เป็นการใช้ GD แบบเป็นส่วน ๆ [3, น.18] ตามรูปที่ 4



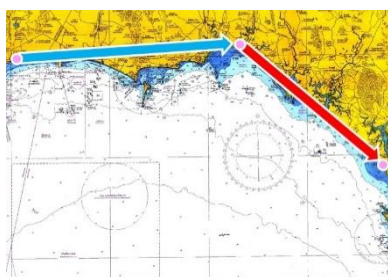
รูปที่ 4 การหาพื้นที่ที่เกี่ยวข้องในการแบ่งเขตแดนทางทะเลระหว่าง โรมาเนีย-ยูเครน ตามหลักการ Land Dominates the Sea [5]

การใช้ GD แบบที่ 2 คือการใช้เส้นตรงแทน GD ในภาพรวม ซึ่งปรากฏในการแบ่งเขตแดนทางทะเลระหว่างบังคลาเทศ-เมียนมา ตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 การหาพื้นที่ที่เกี่ยวข้องในการแบ่งเขตทางทะเลระหว่างบังกลาเทศ-เมียนมา ด้วยหลักการ Land Dominates the Sea จาก GD แบบภาพรวม [5]

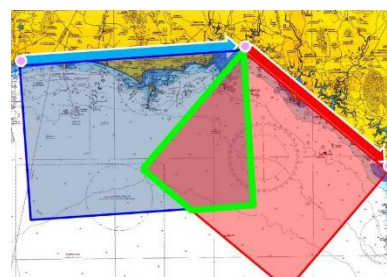
John Brown, Head of Law of the Sea กรมอุทกศาสตร์อังกฤษ และ Robin Cleverly, Director Marbdy Consulting Ltd. ได้กล่าวถึงพื้นฐานทางกฎหมายในการได้มาซึ่งอาณาเขตทางทะเลประกอบด้วย 1) Land Dominates the Sea – by the Intermediary of the Coastal Front. 2) Rights to Maritime Space are Derived from the Sovereignty Over the Landmass. และ 3) The Maritime Front (Coastline), Rather than the Landmass. [6] การหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลด้วยหลักการ Land Dominates the Sea สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ตามรูปที่ 6



ขั้นที่ 1 การหาทิศทางทั่วไปของชายฝั่ง



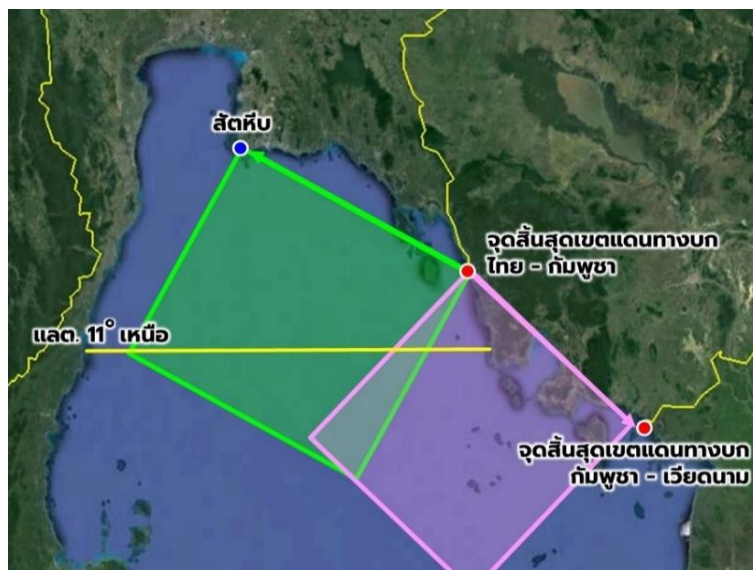
ขั้นที่ 2 อาณาเขตทางทะเลที่เกิดจาก Maritime front ที่ Projection ออกไปในทะเล



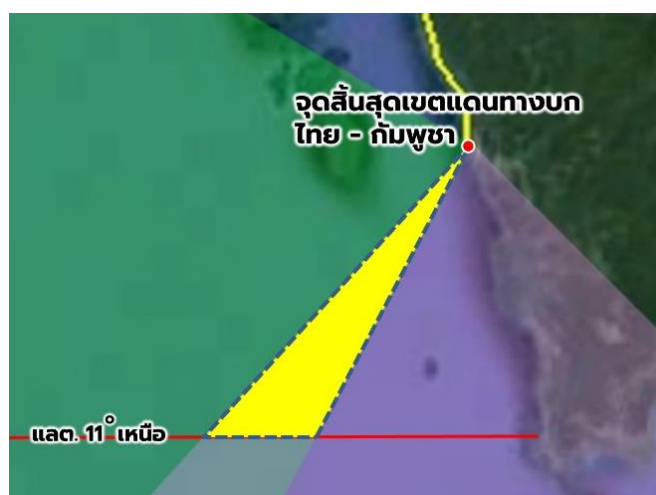
ขั้นที่ 3 พื้นที่ทับซ้อนทางทะเลที่เกิดจาก Land Dominates the Sea

รูปที่ 6 ขั้นตอนการหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลด้วยวิธีการ Land Dominates the Sea

2.3 การหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลไทย-กัมพูชา ในบริเวณพื้นที่ทับซ้อนทางทะเล (เหนือแลตติจูด 11 องศาเหนือ) ที่เป็นผลจากความแตกต่างของเส้นมัธยฐานนั้น เกิดในลักษณะของชายฝั่งหรือรัฐประชิด มิใช่เกิดจากลักษณะของชายฝั่งหรือรัฐตรงข้าม ดังนั้นการหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลระหว่างไทย-กัมพูชา ด้วยหลักการ Land Dominates the Sea จะเป็นการพิจารณาเฉพาะชายฝั่งประชิดหรือรัฐประชิดเท่านั้น โดยแนวชายฝั่งที่เกี่ยวข้องนั้น จะพิจารณาตั้งแต่จุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกกัมพูชา-เวียดนาม จนถึงบริเวณ อ.สตึบ จว.ชลบุรี หรือ จุดที่ 1 ตามประกาศสำนักนายกรัฐมนตรี เรื่อง อ่าวไทยตอนใน เมื่อ 22 กันยายน 2502 [7] การหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลไทย-กัมพูชา ตามหลักการ Land Dominates the Sea โดยใช้ GD และ Coastal Front เป็นองค์ประกอบนั้น ได้แบ่ง GD และ Coastal Front ออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนแรกอยู่ระหว่างจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกกัมพูชา-เวียดนาม ถึง จุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกไทย-กัมพูชา และส่วนที่สองจากจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกไทย-กัมพูชา มาถึง จุดที่ 1 ของเส้นปิดอ่าวไทยตอนใน การเลือก GD และ Coastal Front ทั้ง 2 ส่วนพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพของชายฝั่งที่สามารถใช้เส้นตรงแทนทิศทางทั่วไปของชายฝั่งแบบเฉลี่ย [3] นอกจากนี้การเลือกจุดสำหรับสร้างเส้นตรงสำหรับแทนลักษณะทางกายภาพของชายฝั่งนั้น ปรากฏในผลการพิจารณาแบ่งเขตแดนทางทะเลระหว่าง Nicaragua และ Honduras โดยศาลยุติธรรมระหว่างประเทศ (International Court of Justice : ICJ) พิจารณาว่า “The macro-geography of a coastline as represented by a line drawn between two points on the coast” [8, น.92] เมื่อทำการสร้าง GD และถ่ายทอด Coastal Front ทั้ง 2 ส่วนออกไปจนถึงแลตติจูดที่ 11 องศาเหนือ จะได้พื้นที่ทางทะเลของแต่ละส่วนตามรูปที่ 7 และส่งผลให้เกิดเป็นพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชาตามรูปที่ 8



รูปที่ 7 การหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลไทย-กัมพูชา ด้วย GD และ Coastal Front



รูปที่ 8 พื้นที่ทับซ้อนทางทะเลไทย-กัมพูชา เหนือแลตติจูด 11 องศาเหนือ

3. การแบ่งพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลไทย-กัมพูชา

พื้นที่ทับซ้อนทางทะเลไทย-กัมพูชา ที่ได้ตามข้อ 2 มิได้เกิดจากเส้นมัธยະที่แตกต่างกันระหว่างเส้นมัธยະที่สร้างโดยฝ่ายไทยและเส้นมัธยະที่สร้างโดยฝ่ายกัมพูชา แต่เกิดจากหลักการของ Land Dominates the Sea ซึ่งเป็นการลดความเห็นที่แตกต่างกันเกี่ยวกับเส้นมัธยະที่แต่ละฝ่ายได้สร้างขึ้น เมื่อได้พื้นที่ทับซ้อนทางทะเลแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการแบ่งพื้นที่ทับซ้อนออกเป็น 2 ส่วน โดยสามารถนำวิธีการต่าง ๆ ในการแบ่งพื้นที่ทับซ้อนมาประยุกต์ใช้ โดยเส้นในการแบ่งเขตทางทะเลที่แบ่งพื้นที่ทับซ้อนออกเป็น 2 ส่วน นั้น จะต้องอยู่ภายในพื้นที่ที่เกิดจาก Land Dominates the Sea ตามรูปที่ 8 ซึ่งสามารถประยุกต์ได้ด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

3.1 เส้นมัธยະ (Equidistance Line) เป็นการสร้างเส้นแบ่งเขตแดนทางทะเลด้วยวิธีการของเส้นมัธยະ โดยจุดควบคุมที่นำมาสร้างเส้นมัธยະนั้น สามารถประกอบด้วยแผ่นดิน เกาะ หรือหินใด ๆ ตามที่แต่ละฝ่ายต้องการโดยไม่จำกัดด้วยเงื่อนไขใด ๆ ทั้งสิ้น เช่น ขนาด ระยะห่างจากแผ่นดิน (ไม่จำเป็นต้องอยู่ภายในพื้นที่ทับซ้อนทางทะเล) มาเป็นจุดควบคุมในการสร้างเส้นมัธยະ หากเส้นมัธยະที่สร้างขึ้นนั้นอยู่ภายในพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลที่เกิดจาก Land Dominates the Sea ก็ถือว่าเส้นมัธยະดังกล่าวมีความเหมาะสม แต่หากเส้นมัธยະที่สร้างขึ้นนั้น มีส่วนใดส่วนหนึ่งไม่อยู่ในพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลที่เกิดจาก Land Dominates the Sea ก็ถือว่าเส้นมัธยະดังกล่าวไม่มีความเหมาะสม สามารถทำการปรับแต่งเส้นมัธยະดังกล่าวได้ด้วยวิธีการดังนี้

3.1.1 พิจารณาดัดเกาะหรือหินที่ส่งผลให้ส่วนใดส่วนหนึ่งของเส้นมัธยະอยู่นอกพื้นที่ทับซ้อนที่เกิดจาก Land Dominates the Sea ออกจากการใช้เป็นจุดควบคุมในการสร้างเส้นมัธยະ

3.1.2 ปรับแต่งเส้นมัธยະโดยการให้น้ำหนัก 75 เปอร์เซ็นต์ 50 เปอร์เซ็นต์ หรือ 25 เปอร์เซ็นต์ หรือเท่าใดก็ตามต่อเกาะหรือหินที่ส่งผลให้ส่วนใดส่วนหนึ่งของเส้นมัธยະอยู่นอกพื้นที่ทับซ้อนที่เกิดจาก Land Dominates the Sea จนกว่าเส้นมัธยະที่ปรับแต่งนั้นจะอยู่ในพื้นที่ทับซ้อน

3.2 เส้นมัธยະแบบปรับแต่ง (Adjusted Equidistance Line) เส้นเขตแดนทางทะเลที่ได้ตามข้อ 3.1 จะมีความสลับซับซ้อนเนื่องจากมีความคลเคลื่อนไปมาตามตำแหน่งของเกาะหรือหินที่นำมาเป็นจุดควบคุมในการสร้าง

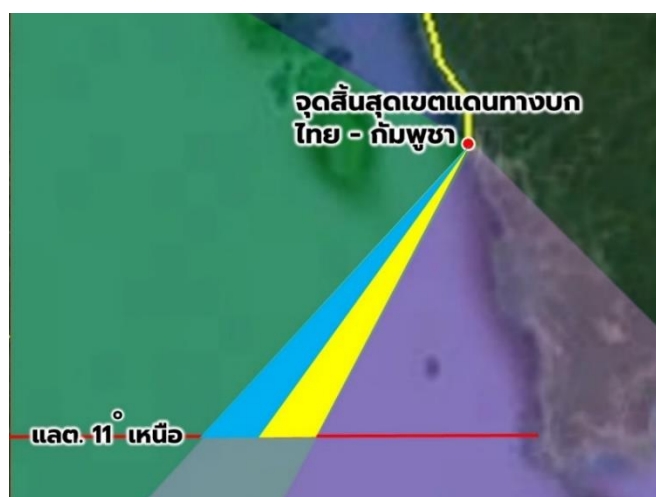
เส้นมัธยะ ส่งผลให้เกิดความยุ่งยากในการนำไปใช้งาน เพื่อเป็นการลดความสลับซับซ้อนดังกล่าวสามารถทำการปรับแต่งเส้นมัธยะได้ด้วยการปรับเส้นมัธยะให้เป็นเส้นตรงโดยการเชื่อมต่อระหว่างจุดเริ่มต้นของเส้นมัธยะกับตำแหน่งที่เส้นมัธยะตัดกับเส้นแลตติจูดที่ 11 องศาเหนือ

3.3 เส้นแบ่งครึ่งมุม (Bi-Sector) โดยการใช้เส้นตรงแบ่งครึ่งมุม ณ จุดที่เกิดการเปลี่ยนทิศของทิศทางทั่วไปของชายฝั่งหรือจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกออกไปยังบริเวณแลตติจูด 11 องศาเหนือ ตามรูปที่ 9



รูปที่ 9 การแบ่งพื้นที่ทับซ้อนที่ได้จาก Land Dominates the Sea ด้วยเส้นแบ่งครึ่งมุม โดยมุม A มีขนาดเท่ากับมุม B

3.4 เส้นแบ่งพื้นที่เท่า (Equal Area) เป็นการแบ่งพื้นที่ทับซ้อนออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน ตามรูปที่ 10



รูปที่ 10 การแบ่งพื้นที่ทับซ้อนที่ได้จาก Land Dominates the Sea ด้วยวิธีการพื้นที่เท่า โดยพื้นที่สีฟ้ามีขนาดเท่ากับพื้นที่สีเหลือง

3.5 เส้นแบ่งความยาว ณ แลตติจูด 11 องศาเหนือเท่า เป็นการแบ่งพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลที่ได้จาก Land Dominates the Sea ด้วยการลากเส้นจากจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกมายังแลตติจูด 11 องศาเหนือ โดยแบ่งความยาว ณ แลตติจูด 11 องศาเหนือออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กันตามรูปที่ 11



รูปที่ 11 การแบ่งพื้นที่ทับซ้อนที่ได้จาก Land Dominates the Sea โดยความยาวของ A เท่ากับ B ณ แลตติจูด 11 องศาเหนือ

3.6 การแบ่งพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลตามอัตราส่วนที่เกี่ยวข้อง (Relevant Ratio) ที่สัมพันธ์กับพื้นที่ที่เกี่ยวข้องในการแบ่งเขตทางทะเลอันเกิดจาก Land Dominates the Sea ตามที่ได้อธิบายการหาพื้นที่ที่เกี่ยวข้องในการแบ่งเขตทางทะเลไว้ในหัวข้อ 2.1 และ 2.2 นั้น สามารถนำอัตราส่วนปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการแบ่งเขตแดนทางทะเลหรือปัจจัยอื่น ๆ ตามแต่ที่รัฐชายฝั่งคู่กรณีจะเห็นพ้องต้องกันมาเป็นตัวกำหนดอัตราส่วนพื้นที่ที่แต่ละฝ่ายจะได้รับ โดยมีอัตราส่วนเป็นไปตามอัตราส่วนของปัจจัยที่นำมาพิจารณาตัวอย่าง เช่น พื้นที่ทับซ้อนทางทะเลคือ 100 ตร.กม. อัตราส่วนที่นำมาพิจารณาในการแบ่งพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลคือ อัตราส่วนความยาวชายฝั่ง โดยมีอัตราส่วนความยาวชายฝั่งคือ 3 : 1 ดังนั้นการแบ่งพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลที่เป็นไปตามอัตราส่วน 3 : 1 คือ 75 ตร.กม. : 25 ตร.กม. โดยเส้นเขตแดนทางทะเลที่ทำการแบ่งพื้นที่ให้ได้ตามอัตราส่วนดังกล่าวจะอยู่ในพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลที่ได้จาก Land Dominates the Sea สำหรับกรณีระหว่างไทย-กัมพูชาสามารถแบ่งเขตทางทะเลตามอัตราส่วนที่เกี่ยวข้องด้วยปัจจัยดังนี้

3.6.1 ความยาวชายฝั่งที่เกี่ยวข้องในการหาพื้นที่ที่เกี่ยวข้องในการแบ่งเขตทางทะเลจาก Land Dominates the Sea โดยในส่วนของฝ่ายไทยจะประกอบด้วยความยาวชายฝั่งจากจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกไทย-กัมพูชา ไปถึงบริเวณด้านใต้ของ อ.สตึก ฝ่ายกัมพูชาประกอบด้วยความยาวชายฝั่งจากจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกไทย-กัมพูชา ไปยังจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกกัมพูชา-เวียดนาม โดยการแบ่งพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลไทย-กัมพูชา นั้น สามารถแบ่งพื้นที่ที่แต่ละฝ่ายได้รับนั้นให้มีอัตราส่วนสอดคล้องกับอัตราส่วนความยาวชายฝั่ง

3.6.2 ความยาวทิศทางทั่วไปของชายฝั่ง วิธีการดังกล่าวนี้เหมือนกับวิธีการในข้อ 3.6.1 แต่อัตราส่วนที่เกี่ยวข้องนั้นเป็นการพิจารณาจากอัตราส่วนความยาวของทิศทางทั่วไปของชายฝั่ง สำหรับฝ่ายไทย ได้แก่ ความยาวที่วัดเป็นเส้นตรงจากจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกไทย-กัมพูชา ไปยัง อ.สตึก ฝ่ายกัมพูชา ได้แก่ ความยาวของเส้นตรงที่วัดจากจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกไทย-กัมพูชา ไปยังจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกกัมพูชา-เวียดนาม

3.7 การแบ่งพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลแบบเฉลี่ย (Averaged Area) จากวิธีการแบ่งเขตทางทะเลตามข้อ 3.1 – 3.5 นั้น ย่อมส่งผลให้พื้นที่ที่แต่ละฝ่ายได้รับไม่เท่ากัน บางวิธีฝ่ายไทยอาจจะได้มากกว่า บางวิธีฝ่ายกัมพูชาอาจจะได้มากกว่า ซึ่งจะนำไปสู่ความเห็นที่แตกต่างกันที่แต่ละฝ่ายย่อมจะเลือกวิธีที่เป็นคุณกับฝ่ายของตนและไม่สามารถหาข้อยุติที่ยอมรับได้ ทั้งนี้วิธี Averaged Area คือการนำพื้นที่ทางทะเลที่แต่ละฝ่ายได้รับตามวิธีการในข้อ 3.1 – 3.5 มาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งจะช่วยให้เกิดการยอมรับมากขึ้นเนื่องจากการนำผลลัพธ์จากทุกวิธีมาเป็นส่วนหนึ่งในการแบ่งเขตทางทะเล

วิธีตามข้อ 3.1 (เส้นมัธยะ) เป็นวิธีพื้นฐานที่ถูกนำไปใช้กับการแบ่งเขตแดนทางทะเลระหว่างรัฐ วิธีการตามข้อ 3.2 คือการตรวจสอบความได้สัดส่วนเพื่อให้เกิดความเที่ยงธรรมในการแบ่งเขตแดนทางทะเล ซึ่งปรากฏในการพิจารณาทั้งจาก ICJ และ ITLOS สำหรับวิธีการตามข้อ 3.3 – 3.7 เป็นการประยุกต์การแบ่งเขตทางทะเลในแนวทางต่าง ๆ โดยยึดหลักการของคำว่า “Equal” ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้ง Equal Angle (Bi-Sector) Equal Area หรือ Equal Relevant Ratio โดยแต่ละวิธีนั้นจะมีความเหมาะสมแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัจจัยสถานะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ความสะดวกในการนำไปใช้งานหรือการไม่ส่งผลกระทบต่อการค้าทางชีวิตประจำวันของประชาชนในพื้นที่ที่มีการแบ่งเขตแดนทางทะเล

4. บทวิเคราะห์และข้อพิจารณา

4.1 ไทยและกัมพูชาสร้างเส้นมัธยะที่แตกต่างกัน ถือเป็นเรื่องปกติของการสร้างเขตทางทะเลและการประกาศฝ่ายเดียวที่ย่อมมีองค์ประกอบต่าง ๆ ที่แต่ละฝ่ายนำมาพิจารณาแตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นสถานะแวดล้อมทั้งทางด้านประวัติศาสตร์ สังคม การเมือง ลักษณะทางกายภาพของชายฝั่ง ตำแหน่งของเกาะหรือหิน (ใกล้ ไกล จากแผ่นดิน) หรือขนาดของเกาะหรือหินที่เรียงรายตามแนวชายฝั่ง ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ส่งผลให้เส้นมัธยะที่แต่ละฝ่ายสร้างขึ้นนั้นแตกต่างกัน เช่น กรณีการประกาศไหล่ทวีปของกัมพูชาที่ก่อนการประกาศไหล่ทวีปเมื่อ 1 กรกฎาคม 2515 นั้น ได้เคยมีการศึกษาแนวทางการประกาศไหล่ทวีปไว้แล้วถึง 4 แบบ ซึ่งปัจจัยที่นำมาประกอบการพิจารณานั้น มีทั้งการนำหลักฐานทางประวัติศาสตร์ ลักษณะทางกายภาพ และการให้สัมพันธกับบริษัทน้ำมันมาประกอบการพิจารณา [9, น.218] ซึ่งเป็นมุมมองของกัมพูชาฝ่ายเดียว หรือกรณีของฝ่ายไทยที่ใช้เส้นตรงจากจุดที่ 1 มายังบริเวณกลางอ่าวไทยนั้น ฝ่ายไทยก็มีเหตุผลประกอบเช่นกัน Land Dominates the Sea จึงเป็นวิธีที่ช่วยลดความเห็นต่างเกี่ยวกับองค์ประกอบที่ไม่เหมือนกันมาเป็นส่วนหนึ่งของการแบ่งเขตแดนทางทะเล เนื่องจากอาณาเขตทางทะเลที่ได้มานั้น จะต้องเกิดจากแผ่นดินที่แผ่ขยายออกไปในทะเลตามหลักการของ Land Dominates the Sea มิใช่เกิดจากเส้นมัธยะที่มีปัจจัยในการสร้างแตกต่างกัน

4.2 พื้นที่ทับซ้อนที่เกิดจาก Land Dominates the Sea สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบได้ว่าเส้นมัธยະที่แต่ละฝ่ายสร้างขึ้นมานั้นมีความถูกต้องหรือไม่ หากเส้นมัธยະนั้นอยู่ในพื้นที่ทับซ้อนที่เกิดจาก Land Dominates the Sea ก็ย่อมถือได้ว่าเส้นมัธยະดังกล่าวมีความเหมาะสม แต่หากมิได้อยู่ก็ต้องทำการปรับเส้นมัธยະให้อยู่ภายในพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลที่เกิดจาก Land Dominates the Sea โดยการปรับนั้น สามารถทำการปรับได้ทั้งแบบการให้น้ำหนักแบบบางส่วนกับเกาะหรือหินหรือการไม่นำเกาะหรือหินที่เป็นเหตุให้เส้นมัธยະไม่อยู่ในพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลมาเป็นส่วนหนึ่งในการสร้างเส้นมัธยະ

4.3 การแบ่งเขตแดนทางทะเลด้วย Land Dominates the Sea ที่เริ่มต้นด้วยการหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลนั้น จะช่วยให้พื้นที่ทับซ้อนทางทะเลสำหรับการแบ่งเขตแดนทางทะเลนั้นมีความเป็นเหตุเป็นผลและความเป็นรูปธรรมมากยิ่งขึ้น

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 การกำหนดเขตแดนทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชาเมืองค้ประกอบการพิจารณาร่วมกันที่เด่นชัด 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยด้านหลักฐานทางประวัติศาสตร์และปัจจัยด้านสภาวะแวดล้อมทางกายภาพ สำหรับปัจจัยด้านประวัติศาสตร์ แม้จะเป็นประวัติศาสตร์ที่มีร่วมกันแต่การตีความที่ต่างมุมมองกันย่อมส่งผลให้เกิดความแตกต่างกันได้ เช่น การนำจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกตามหมวดหลักเขตหรือจุดสิ้นสุดเขตแดนทางบกที่อ้างอิงกับยอดสูงของเกาะกูด ตามสนธิสัญญาสยาม-ฝรั่งเศสฯ มาเป็นองค์ประกอบในการประกาศไหล่ทวีปส่งผลให้ไหล่ทวีปที่แต่ละฝ่ายประกาศแตกต่างกัน ไทยและกัมพูชาใช้ปัจจัยด้านสภาวะแวดล้อมทางกายภาพในการกำหนดเขตแดนทางทะเลร่วมกัน ดังนั้นเขตแดนทางทะเลหรือพื้นที่อ้างสิทธิ์ทางทะเลในส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องกับปัจจัยด้านหลักฐานทางประวัติศาสตร์ที่แต่ละฝ่ายประกาศจึงควรเหมือนกันหรือสอดคล้องกัน แต่ปรากฏว่าพื้นที่อ้างสิทธิ์ทางทะเลเกิดการทับซ้อนกันอันเนื่องจากการนำปัจจัยทางกายภาพมาพิจารณาสร้างเส้นเขตแดนทางทะเลแตกต่างกัน Land Dominates the Sea จึงเป็นหลักการในกำหนดเขตแดนทางทะเลระหว่างไทยและกัมพูชาที่สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการหาพื้นที่ทับซ้อนทางทะเลที่แท้จริงอย่างเป็นรูปธรรมเกิดการยอมรับทั้งสองฝ่าย

5.2 การแบ่งเขตแดนทางทะเล หลังจากได้พื้นที่ทับซ้อนทางทะเลจากหลักการ Land Dominates the Sea แล้ว มีวิธีอย่างน้อย 7 วิธี ในข้อ 3 ให้เลือกใช้ สำหรับวิธีที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ก่อให้เกิดความสับสนคือวิธีการแบ่งที่เส้นเขตแดนมีลักษณะเป็นเส้นตรง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Cambodian Kret No. 439-72/PRK, 1 July 1972
- [2] ประกาศ กำหนดไหล่ทวีปของประเทศไทยด้านอ่าวไทย. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 90 ตอนที่ 60 หน้า 1 (ลงวันที่ 18 พฤษภาคม 2516).

- [3] 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 2023 Dec 25]. Available from: https://iho.int/uploads/user/pubs/cb/c-51/C_51_Ed600_052020.pdf
- [4] Wikipedia [Internet]. [place unknown]: [publisher unknown]; 2023. Maritime Delimitation in the Black Sea case; 2023 [updated 2023 Jul 9; cited 2023 Dec 26]; [about 1 screen]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Maritime_Delimitation_in_the_Black_Sea_case
- [5] Cleverly R. The Disproportionality Test: Myth or Method. Advisory Board for the Law of the Sea Conference; 2015 Oct; Monaco. [place unknown]: [publisher unknown]; 2015.
- [6] Brown J, Cleverly R. Maritime Limits and Boundaries. International Foundation for the Law of the Sea: Summer Academy; 2015 Jul 30-31; Hamburg. [place unknown]: [publisher unknown]; 2015.
- [7] ประกาศสำนักนายกรัฐมนตรี เรื่อง อ่าวไทยตอนใน. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 76 ตอนที่ 91 ฉบับพิเศษ หน้า 1 (ลงวันที่ 22 กันยายน 2502).
- [8] International Court of Justice [Internet]. The Hague: International Court of Justice; c2024. Case Concerning Territorial and Maritime Dispute between Nicaragua and Honduras in the Caribbean Sea (Nicaragua v. Honduras); 2007 [cited 2023 Nov 15]; [about 1 screen]. Available from <https://www.icj-cij.org/case/120>
- [9] Schofield, Clive Howard. Maritime boundary delimitation in the gulf of Thailand [master's thesis on the Internet]. Durham: Durham University; 1999 [cited 2023 Nov 1]. Available from: <http://etheses.dur.ac.uk/4351/>

การประยุกต์ใช้คลื่นสัญญาณเทระเฮิรตซ์ในการควบคุมทางทะเล

Applications of Terahertz Wave in Maritime Surveillance

อรณิชา คงวุฒิ¹ พัฒน์ศรีญ์ เลหาไพบูลย์² และ วุฒิรงค์ คงวุฒิ³

Ornnicha Kongwut¹ Phatsaran Laohhapaibon² and Wuttirong Kongwut³

Received: February 20, 2024

Revised: April 4, 2024

Accepted: April 5, 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันและเฝ้าระวังทางทะเล โดยมุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีคลื่นสัญญาณเทระเฮิรตซ์ (Terahertz) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีล้ำสมัยที่กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในวงการทหารและความมั่นคง ในส่วนแรกของบทความผู้เขียนได้อธิบายถึงความสำคัญของการเฝ้าระวังทางทะเลในบริบทของโลกปัจจุบันที่มีความซับซ้อนและหลากหลายมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นในแง่ของการจัดตั้งหน่วยงานเฉพาะทางของแต่ละประเทศ การสร้างความร่วมมือระหว่างชาติ ไปจนถึงบทบาทของกองทัพเรือในการลาดตระเวนเพื่อปกป้องและสนับสนุนกิจกรรมทางทะเลทั้งในยามสงครามและสันติภาพ ต่อมาผู้เขียนได้นำเสนอศักยภาพและประโยชน์ของการนำคลื่นสัญญาณเทระเฮิรตซ์มาใช้ในการทหาร โดยชี้ให้เห็นว่าคุณสมบัติพิเศษของคลื่นชนิดนี้ เช่น ความถี่สูง ความยาวคลื่นสั้น และความสามารถในการทะลุทะลวงวัตถุได้ดีจะสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการสำรวจตรวจการณ์ให้กับกองกำลังทางเรือได้เป็นอย่างมาก ซึ่งจะนำไปสู่การป้องกันที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นต่อการกระทำผิดกฎหมายหรือการรุกรานน้ำของชาติอื่น ในส่วนสรุปของบทความผู้เขียนได้ย้ำถึงผลกระทบเชิงบวกที่จะเกิดขึ้นจากการประยุกต์ใช้

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี

Department of Physics, Faculty of science and technology, Kanchanaburi Rajabhat University

E-mail: ornnicha.k@kru.ac.th

²หจก.บุญพาวาสนาสง 84 เขตบางแค กรุงเทพมหานคร

Boonpawassanasong Partnership, 84 Bangkae, Bangkok

E-mail: wirinwinu4289@gmail.com

³นักบินประจำกองฝูงบิน 203 กองบิน 2 กองทัพอากาศไทย ลพบุรี

203 Squadron Wing Royal Thai Air Force Lopburi

E-mail: wuttirong_k@rtaf.mi.th

คลื่นสัญญาณทะเลเอิร์ธในการลาดตระเวนและสำรวจตรวจการณ์ทางทะเลทั้งในแง่ของการเพิ่มประสิทธิภาพ การลดความเสี่ยง การสร้างความปลอดภัย และการยกระดับการปฏิบัติงานโดยรวมของกำลังพลและ ยุทโธปกรณ์ในกองทัพเรือ ซึ่งจะส่งผลดีอย่างมหาศาลต่ออุตสาหกรรมทางทะเลในภาพรวม นอกจากนี้ผู้เขียน ยังมองว่าการพัฒนาเทคโนโลยีคลื่นสัญญาณทะเลเอิร์ธให้ก้าวหน้าและแพร่หลายมากขึ้น จะเป็นความท้าทาย และโอกาสสำคัญที่ทุกฝ่ายควรจับตามองในอนาคตเพื่อการยกระดับการป้องกันและรักษาความมั่นคงทางทะเล ที่เข้มแข็งและทันสมัยอย่างแท้จริง โดยสรุปบทความนี้ได้นำเสนอแนวคิดที่น่าสนใจเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ เทคโนโลยีคลื่นสัญญาณทะเลเอิร์ธ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันและเฝ้าระวังทางทะเลผ่านการ วิเคราะห์บริบทความท้าทายในปัจจุบัน ชี้ให้เห็นถึงประโยชน์และความเป็นไปได้ในการนำมาใช้งานตลอดจน ผลกระทบเชิงบวกที่จะเกิดขึ้นต่อการปฏิบัติการและอุตสาหกรรมทางทะเลในภาพรวม ทั้งหมดนี้จึงเป็นประเด็น ที่น่าสนใจและสมควรแก่การศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมต่อไปในอนาคตเพื่อพัฒนาศักยภาพการป้องกันและรักษา ผลประโยชน์ทางทะเลให้มั่นคงและเจริญก้าวหน้าอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: ทะเลเอิร์ธ, ลาดตระเวนทางทะเล, กองทัพเรือ

Abstract

The objective of this article is to present strategies to enhance efficiency in sea surveillance and monitoring, focusing on the application of Terahertz wave technology, a cutting-edge technology gaining wide interest in military and security sectors. In the first part of the article, the author discusses the importance of maritime surveillance in today's complex and diverse global context, whether in terms of establishing specialized agencies by each country, fostering international cooperation, or the role of naval forces in patrolling to protect and support maritime activities in both war and peacetime. The author then presents the potential and benefits of using Terahertz wave technology in military applications, highlighting its unique properties such as high frequency, short wavelength, and excellent penetrative abilities, which significantly enhance reconnaissance capabilities for naval forces, leading to more efficient protection against illegal activities or incursions into the territorial waters of other nations. In the concluding part of the article, the author emphasizes the positive impact of applying Terahertz wave technology in maritime surveillance and reconnaissance, aiming to increase efficiency, reduce risks, enhance security, and overall improve the operational capabilities of personnel and equipment in naval forces, which will greatly benefit the maritime industry as a whole. Furthermore, the author views the development of Terahertz wave technology as both a challenge and a significant opportunity that all parties should closely monitor in the future to elevate maritime security and ensure sustainable prosperity. In summary, this article presents intriguing ideas regarding the application of Terahertz wave technology to enhance efficiency in sea surveillance and monitoring, analyzing current challenges and potential benefits, which deserve further study and exploration to develop the potential of maritime security and prosperity sustainably in the future.

Keywords: Terahertz, Seaside Promenade, Navy

1. บทนำ

การลาดตระเวนทางทะเลของทหารเรือใช้ระบบหลายระบบที่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพ เช่น

1.1 ระบบนำทางและควบคุม ระบบนำทางเป็นส่วนสำคัญของการลาดตระเวนทางทะเล เรือทหารใช้ระบบ GPS (Global Positioning System) หรือ GLONASS (Global Navigation Satellite System) [1] เพื่อให้เกิดการนำทางและการควบคุมเรือได้อย่างแม่นยำ รวมถึงระบบ AIS (Automatic Identification System) สำหรับติดตามและรับรู้สารสนเทศของเรืออื่นในพื้นที่

1.2 ระบบสื่อสาร ระบบสื่อสารทำให้สามารถติดต่อและสื่อสารกับฐานทหารหรือหน่วยงานอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงระบบโทรคมนาคมแบบดาวเทียมและวิทยุ

1.3 ระบบตรวจจับและติดตาม เรือทหารมักมีระบบตรวจจับและติดตามช่วยให้เรือสามารถตรวจจับเรือรบหรือเรือรบพิเศษของฝ่ายตรงข้าม และติดตามการเคลื่อนไหวของเรือที่เป็นเป้าหมาย [2]

1.4 ระบบป้องกันทางอากาศ เรือทหารมักมีระบบป้องกันทางอากาศที่ช่วยให้เรือสามารถป้องกันตัวเองจากการโจมตีทางอากาศและทางทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ระบบป้องกันอากาศที่ใช้เรือเสมือน ระบบป้องกันโจมตีด้วยอาวุธ และระบบป้องกันการระเบิดใต้น้ำ

1.5 ระบบสัญญาณเตือนและการแผ่ระวัง เรือทหารมีระบบสัญญาณเตือนและการแผ่ระวังที่ช่วยให้เรือสามารถตรวจจับและตอบสนองต่อความเสี่ยงได้อย่างรวดเร็ว เช่น ระบบเรดาร์เตือนอันตราย ระบบสัญญาณเตือนสีแดงและระบบแผ่ระวังด้านโทรคมนาคม

1.6 ระบบการจำลองและการวางแผน เรือทหารบางแห่งมีระบบการจำลองและการวางแผนที่ช่วยให้สามารถวางแผนการดำเนินงานและการทำภารกิจได้อย่างมีประสิทธิภาพรวมถึงระบบสนับสนุนการตัดสินใจ โดยระบบเหล่านี้มีความสำคัญสำหรับการปฏิบัติการของเรือทหารและช่วยให้สามารถดำเนินการในสภาวะที่ปลอดภัย [3] และมีประสิทธิภาพได้อย่างสำเร็จ โดยมีการใช้งานผ่านระบบคลื่นโซนาร์ (Sonar) ซึ่งเป็นคำศัพท์ทางทะเลที่เกี่ยวข้องกับการใช้เทคโนโลยีเสียงเพื่อตรวจจับและติดตามวัตถุในทะเล [4] โดยเทคโนโลยีนี้จะถูกนำมาใช้ในการลาดตระเวนทางทะเลโดยเรือทหารหรือเรือดำน้ำ เพื่อการถ่ายภาพรวมของสภาพทะเลรอบตัว โดยคลื่นโซนาร์จะส่งสัญญาณเสียงออกไปทางทะเลและรับสัญญาณที่เกิดจากวัตถุต่าง ๆ ในน้ำกลับมาที่ตัวเครื่อง การใช้เทอร์เร็กซ์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการลาดตระเวนทางทะเลเป็นเรื่องที่มีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมทางทะเล เนื่องจากเทอร์เร็กซ์มีบทบาทสำคัญในการประมงเชิงพาณิชย์ การสำรวจทางทะเล และการปฏิบัติการทางทหาร

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบขีดความสามารถของคลื่นเทอร์เร็กซ์กับคลื่นโซนาร์

ลักษณะ	คลื่นเทอร์เร็กซ์	คลื่นโซนาร์
การใช้งาน	ใช้ส่งและรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (Ultrasonic) ความถี่: 20 kHz ถึง 10 MHz (20,000 Hz ถึง 10,000,000 Hz)	ใช้ส่งและรับคลื่นเสียงเฉพาะความถี่ (Acoustic) ความถี่: 20 Hz ถึง 20 kHz (20,000 Hz)
	ความละเอียด: สามารถตรวจจับวัตถุขนาดเล็กถึง 0.1 มิลลิเมตร และสามารถตรวจจับระยะทางได้ไกลถึง 10 เมตร	ความละเอียด: สามารถตรวจจับวัตถุขนาดเล็กถึง 1 มิลลิเมตร และสามารถตรวจจับระยะทางได้ไกลถึง 1 เมตร

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบขีดความสามารถของคลื่นทะเลเชิร์ชกับคลื่นโซนาร์ (ต่อ)

สภาพอุณหภูมิและสภาพแวดล้อม	1. เดินทางผ่านน้ำที่มีอุณหภูมิสูงได้ดี โดยถูกดูดกลืนหรือสะท้อนกลับน้อย เหมาะสำหรับการตรวจสอบหรือวิเคราะห์วัสดุในสภาวะอุณหภูมิสูง 2. ทะลุผ่านวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่ำได้ดี ไข่มองทะลุหรือถ่ายภาพภายในวัตถุได้ 3. มีความยาวคลื่นสั้นมาก (0.03-3 มิลลิเมตร) เมื่อเทียบกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่น ๆ ทำให้โต้ตอบกับวัตถุขนาดเล็กระดับโมเลกุลหรืออะตอมได้ดี เหมาะสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างในระดับจุลภาค	1. เดินทางผ่านน้ำได้ดี: คลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านน้ำได้เร็วและไกลกว่าในอากาศ ทำให้โซนาร์เหมาะสำหรับการสำรวจใต้น้ำ ตรวจจับวัตถุ และหาระยะทางใต้ผิวน้ำ 2. สะท้อนกลับเมื่อกระทบวัตถุ: เมื่อคลื่นโซนาร์ปะทะวัตถุ มันจะสะท้อนกลับมายังต้นกำเนิดคลื่น ซึ่งสามารถนำมาคำนวณระยะทางและทิศทางของวัตถุได้จากเวลาและความแรงของคลื่นสะท้อนที่ได้รับ 3. ทะลุผ่านตะกอนและสิ่งปนเปื้อนในน้ำได้ดี: ความยาวคลื่นโซนาร์อยู่ในช่วง 0.75 ถึง 7.5 เซนติเมตร คลื่นโซนาร์สามารถทะลุผ่านตะกอนและสิ่งปนเปื้อนในน้ำได้ดี ช่วยให้สามารถสำรวจพื้นท้องน้ำหรือชั้นตะกอนใต้ผิวน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ
การควบคุมและความแม่นยำ	มีความแม่นยำสูงและสามารถควบคุมได้ดีในการตรวจจับและติดตามวัตถุใต้น้ำ	มีความแม่นยำและความสามารถในการตรวจจับและติดตามวัตถุใต้น้ำอย่างเหมาะสม [5]
การใช้ในการกิจการทางทหาร	มักถูกใช้ในการกิจการทางทหารเพื่อตรวจจับเรือรบหรือเรือรบพิเศษ ของฝ่ายตรงข้ามและค้นหาวัตถุใต้น้ำ	มักถูกใช้ในการกิจการทางทหารเพื่อตรวจจับเรือรบหรือเรือรบพิเศษของฝ่ายตรงข้ามและค้นหาวัตถุใต้น้ำ แต่สามารถใช้งานได้ทั้งการกิจการทางทหารและการวิจัยทางทะเล
ความละเอียดเชิงพื้นที่ (ระยะใกล้)	0.1-1 มิลลิเมตร	1-10 เซนติเมตร
ระยะทางและความลึกในน้ำ	มิลลิเมตร ถึง เซนติเมตร	เมตร ถึง กิโลเมตร
การลดทอนสัญญาณในน้ำ	100-1,000 เดซิเบล/เมตร	0.1-1 เดซิเบล/เมตร

จากตารางเปรียบเทียบขีดความสามารถของคลื่นเทอเรเฮิรตซ์และคลื่นโซนาร์

1. การใช้งาน

1.1 คลื่นเทอเรเฮิรตซ์ใช้ส่งและรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (Ultrasonic) มีความถี่ 20 kHz ถึง 10 MHz สามารถตรวจจับวัตถุขนาดเล็กถึง 0.1 มิลลิเมตร และระยะไกลถึง 10 เมตร

1.2 คลื่นโซนาร์ใช้ส่งและรับคลื่นเสียงเฉพาะความถี่ (Acoustic) มีความถี่ 20 Hz ถึง 20 kHz สามารถตรวจจับวัตถุขนาดเล็กถึง 1 มิลลิเมตร และระยะไกลถึง 1 เมตร

2. สภาพแวดล้อม

2.1 คลื่นเทอเรเฮิรตซ์เดินทางผ่านน้ำอุณหภูมิสูงได้ดี ทะลุผ่านวัสดุที่สะท้อนต่ำ และมีความยาวคลื่นสั้นมาก เหมาะสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

2.2 คลื่นโซนาร์เดินทางผ่านน้ำได้ดี สะท้อนกลับเมื่อปะทะวัตถุ ทะลุผ่านตะกอนได้ มีความยาวคลื่น 0.75-7.5 เซนติเมตร เหมาะสำหรับสำรวจใต้น้ำ

3. ความละเอียดและระยะทาง

3.1 คลื่นเทอเรเฮิรตซ์มีความละเอียดเชิงพื้นที่สูงกว่า (0.1-1 มิลลิเมตร) แต่ระยะทางและความลึกในน้ำสั้นกว่า (มิลลิเมตร ถึง เซนติเมตร) เนื่องจากสัญญาณลดทอนมากในน้ำ (100-1,000 เดซิเบล/เมตร)

3.2 คลื่นโซนาร์มีความละเอียดต่ำกว่า (1-10 เซนติเมตร) แต่ใช้ได้ระยะไกลและลึกกว่า (เมตร ถึง กิโลเมตร) เพราะสัญญาณลดทอนน้อยในน้ำ (0.1-1 เดซิเบล/เมตร)

4. การใช้ทางทหาร ทั้งสองใช้ตรวจจับเรือและวัตถุใต้น้ำได้ แต่คลื่นโซนาร์ใช้ได้ทั้งทางทหารและการวิจัยทางทะเล

สรุปได้ว่า คลื่นเทอเรเฮิรตซ์เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูงในระยะใกล้ ส่วนคลื่นโซนาร์เหมาะกับการสำรวจระยะไกลใต้น้ำและทะเล

2. ทฤษฎีและหลักวิชาการ

2.1 คลื่นสัญญาณเทอเรเฮิรตซ์

นับตั้งแต่รังสีเอ็กซ์ได้ถูกค้นพบและนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มุมมองของของมนุษย์ได้เปลี่ยนไปจากเดิมอย่างสิ้นเชิง กระเป๋าเดินทางใบน้อยใหญ่เมื่อถูกกล่าเสียงผ่านเครื่องฉายรังสีเอ็กซ์ สามารถเห็นได้ทะลุปรุโปร่งว่ามีการแอบซ่อนอาวุธหรือของมีคมหรือไม่ การตรวจวินิจฉัยโครงกระดูกหรืออวัยวะภายในไม่ว่าจะเป็นกระเพาะ ลำไส้ ปอด ตับ โดยการใช้อัลตราซาวด์มาช่วยได้แต่คลื่นเทอเรเฮิรตซ์จะสามารถนำไปสู่การมองเห็นที่น่าสนใจยิ่งกว่า โดยคลื่นเทอเรเฮิรตซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ครอบคลุมในย่านความถี่ตั้งแต่ 0.3-10 เทระเฮิรตซ์ [6] และมีสมบัติเช่นเดียวกับคลื่นวิทยุที่สามารถทะลุผ่านวัสดุต่าง ๆ ได้อย่างหลากหลายชนิด เช่น พลาสติก ไวนิล กระดาษ ไขมัน ไม้ หิน เซรามิก หมอก เมฆ คิวบิก และวัตถุเป็นผงคล้ายแป้ง แต่ก็มีวัสดุบางประเภทที่คลื่นวิทยุไม่สามารถทะลุผ่านได้ เช่น โลหะต่าง ๆ และน้ำ นอกจากนี้เทอเรเฮิรตซ์ยังสามารถแสดงภาพ (Images) ของวัตถุสิ่งของที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านได้อีกด้วยซึ่งมีคุณสมบัติเดียวกับรังสีเอ็กซ์ [7] ข้อแตกต่างจากรังสีเอ็กซ์คือเทอเรเฮิรตซ์

ไม่มีผลต่อสิ่งของที่เคลื่อนที่ผ่านด้วยการกระตุ้นด้วยรังสี (Irradiation) [8] คลื่นสัญญาณเทระเฮิรตซ์ (Terahertz Waves) เป็นช่วงความถี่ของคลื่นอิเล็กทริกที่ต่อเนื่องกับช่วงความถี่ระหว่างความถี่มิลลิเมตร (เรียกว่ามิลลิเมตรเทระเฮิรตซ์) และความถี่ในช่วงนิวเคลียสเฮิรตซ์ (เรียกว่าเทระเฮิรตซ์เทรนซิชัน) ซึ่งอยู่ระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) ในสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum) ดังรูปที่ 1 สามารถใช้ในการสร้างภาพถ่ายตรวจวัดความผิดปกติในวัตถุ เช่น การสร้างภาพเอกซเรย์โดยไม่ทำให้เกิดความเสี่ยงของรังสีต่อสุขภาพของมนุษย์ที่อยู่ในระดับเดียวกันกับการใช้รังสีเอ็กซ์และกัมมันตภาพรังสี การวิจัยทางการแพทย์และอุตสาหกรรมได้ให้ความสนใจกับการใช้คลื่นเทระเฮิรตซ์ในการเปลี่ยนแปลงวิธีการทำงานในหลายด้าน เช่น การพัฒนาเทคโนโลยีการสร้างภาพและการสแกนทางการแพทย์ นอกจากนี้การใช้คลื่นเทระเฮิรตซ์ยังสามารถใช้ในการสื่อสารและในด้านพลังงานได้อีกด้วย เช่น การตรวจสอบความปลอดภัยที่สนับสนุนโดยการสร้างภาพด้วยการสแกนเทระเฮิรตซ์ในสนามการแข่งขันวิชาการ และการตรวจสอบความปลอดภัยทางด้านการทหาร และการตรวจค้นความปลอดภัยในสนามบิน โดยปัจจุบันเทคโนโลยีการสร้างภาพด้วยคลื่นเทระเฮิรตซ์อยู่ในขั้นตอนการพัฒนาและการวิจัยอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีศักยภาพในการใช้งานหลายสาขาด้านอุตสาหกรรมและการวิจัยต่าง ๆ อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ คลื่นเทระเฮิรตซ์มีลักษณะทางฟิสิกส์และมีความถี่ที่แตกต่างจากคลื่นอื่น ๆ ในสเปกตรัมของคลื่น Electromagnetics อย่างชัดเจน

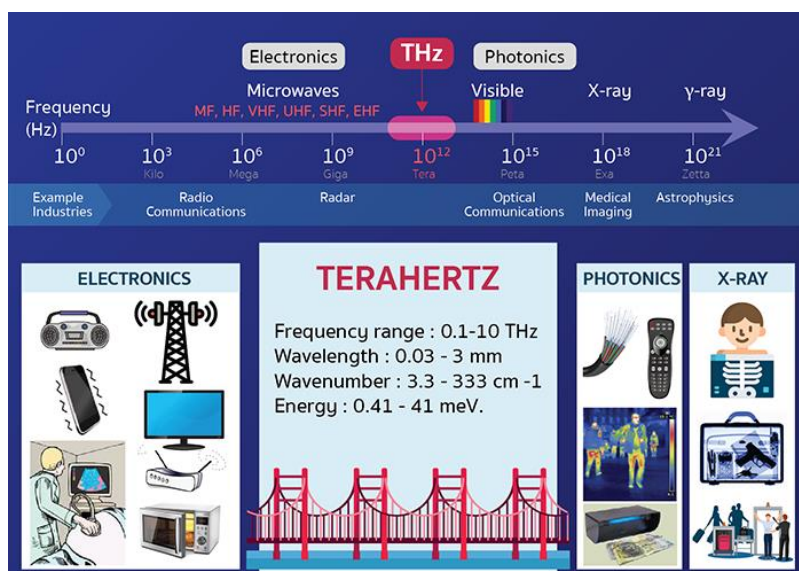
2.1.1 ลักษณะของคลื่นเทระเฮิรตซ์ มีดังนี้ [9, 10]

2.1.1.1 ความถี่สูง คลื่นเทระเฮิรตซ์มีความถี่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นอื่น ๆ ในสเปกตรัมอยู่ในช่วงระหว่างคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) และคลื่นอินฟราเรด (Infrared) ซึ่งทำให้ความสามารถแสดงผลข้อมูลหรือส่งข้อมูลที่มีความละเอียดสูงได้

2.1.1.2 การสะท้อนและการซึมผ่าน การซึมผ่านของคลื่นเทระเฮิรตซ์ไม่ได้หมายถึงการทะลุทะลวงอย่างสมบูรณ์เสมอไป แต่เป็นความสามารถในการเดินทางผ่านวัสดุได้ในระดับหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุและความถี่ของคลื่นโดยทั่วไป เมื่อความถี่ของคลื่นสูงขึ้นจะเกิด Attenuation หรือการสูญเสียพลังงานมากขึ้นเมื่อคลื่นเดินทางผ่านตัวกลาง อย่างไรก็ตามในบางกรณีคลื่นความถี่สูงอาจสามารถแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคของวัสดุบางชนิดได้ดีกว่าคลื่นความถี่ต่ำ ทำให้เกิดการซึมผ่านได้มากกว่าเมื่อคลื่นเทระเฮิรตซ์เดินทางมาถึงวัสดุอาจเกิดปรากฏการณ์ได้หลายอย่าง เช่น

- 1) การสะท้อน (Reflection) คลื่นบางส่วนถูกสะท้อนกลับเมื่อกระทบกับผิววัสดุ
- 2) การซึมผ่าน (Transmission) คลื่นบางส่วนสามารถเดินทางผ่านวัสดุไปได้
- 3) การดูดซึม (Absorption) คลื่นบางส่วนถูกดูดซึมโดยวัสดุ ทำให้พลังงานลดลง

ปรากฏการณ์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) ค่าการนำไฟฟ้า และความหนาแน่น เป็นต้น ข้อมูลเกี่ยวกับการสะท้อน การซึมผ่าน และการดูดซึมของคลื่นเทระเฮิรตซ์ในวัสดุต่าง ๆ มีประโยชน์ในการวิเคราะห์โครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุ รวมถึงการประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบวัสดุแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing) แต่ก็สามารถถูกสะท้อนหรือถูกดูดซึมได้กับวัสดุบางชนิด



รูปที่ 1 ความถี่ของสัญญาณคลื่นเทระเฮิรตซ์และการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในภาคต่าง ๆ [11]

โดยข้อมูลเหล่านี้มีความสำคัญในการใช้งานเพื่อสำรวจโครงสร้างของวัสดุหรือสำหรับการตรวจวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ

2.1.1.3 การใช้งานในการสร้างภาพ คลื่นเทระเฮิรตซ์สามารถใช้ในการสร้างภาพที่มีความละเอียดสูงของวัตถุอย่างเช่นในการสแกนภาพด้านการแพทย์ การตรวจวัดมะเร็ง หรือในการทดสอบวัสดุเพื่อหาคุณสมบัติทางฟิสิกส์

2.1.1.4 ความปลอดภัย คลื่นเทระเฮิรตซ์ไม่มีความเป็นอันตรายต่อมนุษย์หรือสิ่งแวดล้อม และถูกใช้ในงานวิจัยและประยุกต์ในหลาย ๆ ด้านโดยไม่มีผลกระทบที่สำคัญต่อสุขภาพ

2.1.2 การสร้างคลื่นเทระเฮิรตซ์

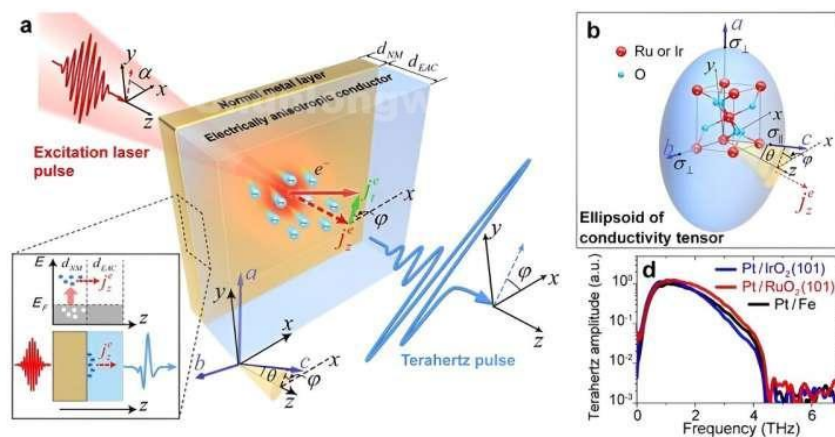
การสร้างคลื่นเทระเฮิรตซ์สามารถทำได้โดยใช้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยมีวิธีการสร้างคลื่นเทระเฮิรตซ์ในปัจจุบันดังรูปที่ 2 ดังนี้

2.1.2.1 การใช้เลเซอร์ที่เก็บเอนเนอร์ตรงข้าม วิธีนี้ใช้เลเซอร์ในการสร้างคลื่นเทระเฮิรตซ์โดยใช้หลักการของการเก็บเอนเนอร์ตรงข้าม (Optical Rectification) โดยคลื่นเลเซอร์จะถูกส่งผ่านวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษในการสร้างคลื่นเทระเฮิรตซ์เมื่อได้รับแสงเลเซอร์ เมื่อแสงเลเซอร์เข้าสัมผัสกับวัสดุชนิดนี้ จะเกิดปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนในวัสดุและส่งออกมาในรูปแบบของคลื่นเทระเฮิรตซ์ [12-13]

2.1.2.2 การใช้ทรานซิสเตอร์เพอร์รอร์มาลิน (Trans-Exclusionary Radical Feminist) นี้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงสัญญาณคลื่นอินฟราเรดเป็นคลื่นเทระเฮิรตซ์ได้ โดยจะการใช้การส่งและรับสัญญาณอย่างแม่นยำเพื่อสร้างคลื่นเทระเฮิรตซ์

2.1.2.3 การใช้เฟมโทเซกกันต์ (Femtosecond) เลเซอร์ เลเซอร์ที่มีระยะเวลาของแต่ละช่วงเฟมโทเอมิเตอร์สามารถสร้างคลื่นเทระเฮิรตซ์ได้ โดยใช้การสั่นสะเทือนของอิเล็กตรอนในวัสดุเพื่อสร้างคลื่นเทระเฮิรตซ์ [14-15]

2.1.2.4 การใช้ตัวส่งสัญญาณคลื่นเทระเฮิรตซ์ มีเครื่องมือที่สามารถสร้างคลื่นเทระเฮิรตซ์ได้โดยตรงมักใช้เทคโนโลยีของไอซี (Integrated Circuit; IC) หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานในช่วงความถี่เทระเฮิรตซ์



รูปที่ 2 ตัวอย่างรูปแบบในการสร้างคลื่นเทระเฮิรตซ์ [16]

2.2 การนำคลื่นเทระเฮิรตซ์มาใช้ประโยชน์ทางทหาร

ปัจจุบันการลาดตระเวนแผ่ระวังสำรวจทางทะเลในด้านทางทหารนั้นการใช้คลื่นสัญญาณโซนาร์กับทุ่นใต้น้ำเป็นหลักในการตรวจสอบวัตถุแปลกปลอม โดยคลื่นโซนาร์เป็นเทคโนโลยีที่ใช้คลื่นเสียงในการตรวจจับและติดตามวัตถุใต้น้ำ เช่น ในทะเล แม่น้ำ หรือบ่อน้ำ หลักการทำงานของคลื่นโซนาร์ดังรูปที่ 3

2.2.1 หลักการทำงานของคลื่นโซนาร์มีขั้นตอน [17] ดังนี้

2.2.1.1 การส่งสัญญาณ อุปกรณ์คลื่นโซนาร์จะส่งสัญญาณเสียงในรูปแบบของคลื่นเสียงไปยังสิ่งต่าง ๆ ในน้ำ สัญญาณเสียงนี้จะมีค่าและความเร็วที่ต่างกันขึ้นอยู่กับการใช้งานและสภาพแวดล้อม

2.2.1.2 การสะท้อน เมื่อคลื่นเสียงกระทบกับวัตถุใต้น้ำ เช่น ปะการัง กำแพงน้ำ หรือเรือ จะเกิดการสะท้อนของคลื่นกลับมาถึงอุปกรณ์โซนาร์ อุปกรณ์จะบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณเสียงนี้

2.2.1.3 การวิเคราะห์ข้อมูล อุปกรณ์คลื่นโซนาร์จะวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับมาประมวลผลและสร้างภาพของสิ่งของที่อยู่ในน้ำ ภาพนี้จะแสดงให้เห็นรูปร่างและตำแหน่งของวัตถุต่าง ๆ ในน้ำ เช่น ปะการัง สัตว์น้ำ หรือเรือ

2.2.1.4 การแสดงผล ภาพที่ได้รับจากการวิเคราะห์ข้อมูลจะถูกแสดงผลในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ในรูปของภาพแผนที่ หรือแผนภาพที่บอกตำแหน่งของวัตถุที่ตรวจจับได้ในน้ำดังรูปที่ 3

2.2.1.5 การติดตามและการจำแนกแยก คลื่นโซนาร์สามารถใช้ในการติดตามและจำแนกแยกวัตถุต่าง ๆ ในน้ำ อุปกรณ์สามารถติดตามการเคลื่อนไหวของวัตถุนี้ตลอดเวลาและสามารถแยกแยะวัตถุที่ต่างกันอย่างชัดเจนได้ ซึ่งเป็นประโยชน์สำคัญในการตรวจจับและติดตามเรือหรือสำรวจสภาพทรัพยากรทางทะเล

คลื่นโซนาร์มีความสำคัญในการนำเสนอข้อมูลในน้ำที่สำคัญ โดยเฉพาะในการนำไปใช้ในงานทางทหาร เช่น ในการค้นหาเรือซึ่งจมอยู่ใต้ผิวน้ำ การติดตามเครื่องบินหรือเรือของศัตรู หรือการค้นหาวัตถุระเบิดใต้น้ำ นอกจากนี้คลื่นโซนาร์ยังมีการใช้ในงานทางภูมิทัศน์ทะเลและการวิจัยทางทะเลอื่น ๆ อีกด้วย

2.2.2 การนำสัญญาณคลื่นทะเลเรดาร์มาใช้ในงานทางทหารมีการใช้ในหลายแง่หลายรูปแบบ เช่น

2.2.2.1 การสื่อสาร คลื่นทะเลเรดาร์สามารถใช้ในการสื่อสารทางทหารได้โดยใช้เทคโนโลยีการส่งข้อมูลแบบไร้สาย ซึ่งสามารถใช้งานในการสื่อสารระยะไกล และการสื่อสารระยะไกลก็เคียงกับในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน เช่น ในการสื่อสารระหว่างหน่วยทหารบนสนามรบ หรือการสื่อสารในสถานการณ์ที่มีการขัดจังหวะทางเทคนิคอื่น ๆ [18]

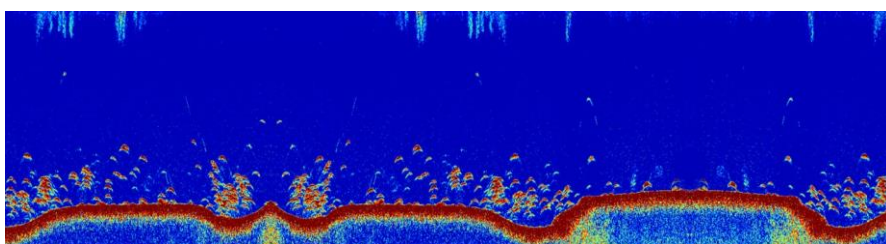
2.2.2.2 การร้องเรียนทางกฎหมาย คลื่นทะเลเรดาร์สามารถใช้ในการร้องเรียนได้โดยใช้เทคโนโลยีการสร้างภาพด้วยคลื่นทะเลเรดาร์เพื่อช่วยในการตรวจสอบ และระบุตำแหน่งของศัตรูหรือสถานการณ์ที่เกิดขึ้นในพื้นที่ที่ซับซ้อน

2.2.2.3 การตรวจค้นและการนำค้น ในการทหารการใช้คลื่นทะเลเรดาร์สามารถนำมาใช้ในการตรวจค้นและการนำค้นในสภาพแวดล้อมที่เข้มงวด เช่น การตรวจค้นอาวุธ การตรวจค้นวัตถุต้องสงสัย หรือการค้นหาบุคคล

2.2.2.4 การตรวจวัดและการสร้างภาพ คลื่นทะเลเรดาร์ใช้ในการตรวจวัดและการสร้างภาพในสถานการณ์ที่ทหารต้องการข้อมูลเพิ่มเติมหรือข้อมูลที่ลึกซึ้งเพื่อการตัดสินใจ เช่น ในการตรวจวัดทรัพยากรธรรมชาติ การตรวจสอบโครงสร้างสำคัญ หรือการทำการกิจที่ต้องการข้อมูลในสภาพแวดล้อมที่มีการปกป้องที่สูง [19]

2.2.2.5 การสำรวจและการตรวจค้น: คลื่นทะเลเรดาร์ใช้ในการสำรวจพื้นที่โดยไม่ต้องมีการสัมผัส ซึ่งเหมาะสำหรับการตรวจค้นในสถานที่อันตรายหรือภายใต้เงื่อนไขที่เป็นอันตรายต่อการสัมผัสโดยร่างกายมนุษย์

2.2.2.6 การค้นหาและการกำจัดอุปกรณ์รบของฝ่ายตรงข้าม คลื่นทะเลเรดาร์ใช้ในการค้นหาและติดตามอุปกรณ์รบของฝ่ายตรงข้าม เช่น การติดตามการเคลื่อนไหวของศัตรูหรือการตรวจจับเครื่องบินที่ไม่ใช่ของเราในพื้นที่อากาศ



รูปที่ 3 เทคโนโลยี Compressed High-Intensity Radiated Pulse เป็นเทคโนโลยีโซนาร์ที่มีความก้าวหน้าที่สุดสำหรับการประมงและการเดินเรือทั่วไป การส่งสัญญาณเสียงแบบกวาดทำให้ได้ข้อมูลมากกว่า ทำให้ภาพเป้าหมายที่สูงละเอียดและชัดเจนบนหน้าจอ [20]

การใช้คลื่นเทระเฮิรตซ์ในงานด้านการทหารมีศักยภาพสูงในการเพิ่มประสิทธิภาพและขีดความสามารถในการปฏิบัติการทางทหารภายใต้สถานการณ์ที่หลากหลายและท้าทาย แม้ว่าเทคโนโลยีนี้ยังอยู่ในขั้นตอนของการพัฒนาและการวิจัยเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้จริงในภาคสนาม แต่ก็มีแนวโน้มที่จะถูกนำมาใช้ในการแผ่รังสีทางทะเลในอนาคตอันใกล้ ตามรายงานของนิตยสารเอเซียไทม์ในเดือนกันยายน คณะนักวิจัยจากประเทศจีนได้พัฒนานวัตกรรมเทคโนโลยีการตรวจจับเรือดำน้ำด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ระดับเทระเฮิรตซ์ (Terahertz-Based Submarine Detection Technology) ซึ่งถือเป็นความก้าวหน้าครั้งสำคัญในการยกระดับขีดความสามารถของการทำสงครามใต้น้ำ [21] นอกจากนี้ เทคโนโลยีดังกล่าวยังมีศักยภาพในการทำหยาการปฏิบัติการด้านเรือดำน้ำของสหรัฐอเมริกาอีกด้วย ระบบตรวจจับรุ่นใหม่ทำงานในย่านความถี่ระดับเทระเฮิรตซ์และมีความสามารถในการตรวจจับการเคลื่อนไหวของผิวน้ำที่มีขนาดเพียง 10 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดเสียงความถี่ต่ำในทะเลเปิดการระบุตำแหน่งของการเคลื่อนไหวเหล่านี้ทำให้สามารถระบุที่ตั้งของเรือดำน้ำและยังเป็นประโยชน์ในการรวบรวมข้อมูลข่าวกรองเพื่อวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเสียง (Noise Signatures) ซึ่งใช้ในการระบุรุ่นและประเภทของเรือดำน้ำ เทคโนโลยีนี้สามารถติดตั้งบนโดรนใต้น้ำ แสดงให้เห็นถึงความก้าวหน้าอย่างก้าวกระโดดของจีนในด้านการตรวจจับเรือดำน้ำของสหรัฐฯ รวมถึงมีศักยภาพในการตอบโต้ปฏิบัติการลับเพื่อหลบหลีกการตรวจจับของเรือดำน้ำสหรัฐฯ

นอกจากนี้ เอเซียไทม์ยังรายงานในเดือนสิงหาคมว่า นักวิจัยจีนได้ใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ในการระบุฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดจากเรือดำน้ำพลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งก่อนหน้านี้แทบไม่เคยถูกนำมาใช้ในการตรวจจับ [22] พวกเขาค้นพบคลื่นสัญญาณความถี่ต่ำมาก (Extremely Low Frequency - ELF) ที่เกิดจากฟองอากาศเหล่านี้ มีความชัดเจนมากกว่าสัญญาณที่ตรวจจับได้ด้วยเครื่องตรวจจับสนามแม่เหล็กผิดปกติ (Magnetic Anomaly Detector) ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ฟองอากาศเหล่านี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระหว่างพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ขณะที่เรือดำน้ำเคลื่อนที่ ก่อให้เกิดการปั่นป่วนและลายเซ็นเฉพาะทางแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านปรากฏการณ์แมกนีโตไฮโดรไดนามิกส์ (Magnetohydrodynamics) แม้ว่าเทคนิคการตรวจจับเรือดำน้ำแบบไม่อาศัยการดักฟังเสียงจะเป็นที่รู้จักมานานแต่เพิ่งจะสามารถนำมาใช้ได้จริงเนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีต่าง ๆ การพัฒนาเซ็นเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น การประมวลผลและการทำงานอัตโนมัติของอุปกรณ์ ช่วยขยายขอบเขตของสัญญาณที่สามารถตรวจจับและแยกแยะได้ซึ่งในอดีตไม่สามารถทำได้

2.3 การนำคลื่นสัญญาณเทระเฮิรตซ์ไปประยุกต์ใช้ในการแผ่ลาดตระเวนทางทะเลของกองทัพเรือ

2.3.1 การนำคลื่นสัญญาณเทระเฮิรตซ์มาประยุกต์ใช้ในการลาดตระเวนทางทะเลของกองทัพเรือ มีศักยภาพในการเพิ่มขีดความสามารถและประสิทธิภาพในการปฏิบัติการกิจสำคัญอย่างมาก [23-25] ดังนี้

2.3.1.1 การตรวจจับและติดตามเรือ เทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์ช่วยให้สามารถตรวจจับและติดตามการเคลื่อนไหวของเรือในพื้นที่ปฏิบัติการได้อย่างแม่นยำ ทำให้กองทัพเรือสามารถแผ่รังสีการรบกวนหรือกิจกรรมที่นำสงสัยในน่านน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

2.3.1.2 การตรวจหาสารเคมีและวัตถุอันตราย คลื่นเทระเฮิรตซ์มีความสามารถในการทะลุทะลวงและจำแนกสารต่าง ๆ ในน้ำ ทำให้สามารถตรวจพบสารเคมีอันตรายหรือวัตถุระเบิดที่อาจถูกลักลอบนำเข้ามาในน่านน้ำ ช่วยป้องกันภัยคุกคามที่อาจเกิดขึ้นต่อความมั่นคงทางทะเล

2.3.1.3 การระบุพฤติกรรมที่ผิดปกติ ด้วยความละเอียดสูงของคลื่นทะเลเรดาร์ในการตรวจจับ ทำให้สามารถสังเกตการเคลื่อนไหวของเรือและอาวุธที่ผิดปกติไปจากรูปแบบปกติ ช่วยให้กองทัพเรือคาดการณ์และตอบสนองต่อภัยคุกคามที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างทันที่

2.3.1.4 การค้นหาและกู้ภัย ในสถานการณ์ฉุกเฉิน เช่น เรือล่ม หรือคนตกทะเล คลื่นทะเลเรดาร์สามารถช่วยค้นหาผู้ประสบภัยที่อยู่ในน้ำได้อย่างรวดเร็วเพิ่มโอกาสในการช่วยชีวิตและลดการสูญเสีย

2.3.1.5 การวิเคราะห์ข้อมูลสภาพแวดล้อมทางทะเล คลื่นทะเลเรดาร์สามารถรวบรวมข้อมูลสำคัญ เช่น อุณหภูมิ น้ำ ลักษณะพื้นทะเล และสภาพอากาศ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการวางแผนยุทธศาสตร์และปฏิบัติการทางเรือให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

2.3.1.6 การรักษาความปลอดภัยในพื้นที่สำคัญ ระบบตรวจจับด้วยคลื่นทะเลเรดาร์สามารถควบคุมการเข้าถึงพื้นที่หวงห้ามหรือฐานทัพเรือ ด้วยการระบุตัวตนและตรวจจับวัตถุที่ไม่ได้รับอนุญาต ช่วยเสริมความมั่นคงปลอดภัยให้กับกองทัพเรือ

การประยุกต์ใช้คลื่นทะเลเรดาร์ในการลาดตระเวนทางทะเลจะช่วยยกระดับศักยภาพของกองทัพเรือในการปฏิบัติการกิจรักษาอธิปไตยทางทะเล การต่อต้านการกระทำผิดกฎหมาย และการให้ความช่วยเหลือมนุษยธรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ตลอดจนสร้างความมั่นคงให้กับผลประโยชน์ของชาติทางทะเลในภาพรวม นับเป็นการเพิ่มขีดความสามารถเชิงยุทธศาสตร์ที่สำคัญยิ่งให้กับกองทัพเรือ ในปัจจุบันการนำคลื่นทะเลเรดาร์มาใช้ในการแผ่ระยะลาดตระเวนทางทะเลของกองทัพมีเพียงเล็กน้อย ในการใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพในการแผ่ระยะ และควบคุมสถานการณ์พื้นที่ทะเลและน้ำในบริเวณใกล้เคียง โดยในบทความนี้ผู้เขียนมีความเห็นว่าการเปลี่ยนจากคลื่นโซนาร์ที่ใช้อยู่เดิมพัฒนาให้เป็นคลื่นทะเลเรดาร์ เพื่อช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในทางทะเลให้กับกองทัพเรือประเทศไทย

2.3.2 การดัดแปลงคลื่นโซนาร์ให้เป็นคลื่นทะเลเรดาร์สามารถทำได้โดยใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม โดยมีวิธีการดังนี้

2.3.2.1 การใช้การแปลงความถี่ (Frequency Conversion) คลื่นโซนาร์สามารถถูกแปลงเป็นคลื่นทะเลเรดาร์โดยการใช้อุปกรณ์ที่สามารถแปลงความถี่ของคลื่นได้ เช่น การใช้การส่งผ่านสัญญาณไปยังอุปกรณ์ที่สามารถทำงานในช่วงความถี่ทะเลเรดาร์ หรือการใช้การเพิ่มหรือลดความถี่ของคลื่นโซนาร์โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสม

2.3.2.2 การใช้เลเซอร์ที่สร้างคลื่นทะเลเรดาร์ เลเซอร์สามารถถูกใช้ในการสร้างคลื่นทะเลเรดาร์โดยตรงโดยการใช้หลักการของการส่งและรับแสงเลเซอร์ที่มีความถี่สูงพอที่จะสร้างคลื่นทะเลเรดาร์

2.3.2.3 การสร้างคลื่นโดยตรง มีเครื่องมือที่สามารถสร้างคลื่นทะเลเรดาร์โดยตรง โดยใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น วัสดุชนิดหนึ่งที่เรียกว่าไพเร็น (Pyrene) ซึ่งเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงอินฟราเรดสามารถสร้างคลื่นทะเลเรดาร์ได้

การดัดแปลงคลื่นโซนาร์เพื่อให้เป็นคลื่นทะเลเรดาร์ต้องใช้อุปกรณ์และเทคโนโลยีที่มีความสามารถในการทำงานในช่วงความถี่ทะเลเรดาร์และการสร้างคลื่นที่มีความถี่สูงพอที่จะเป็นคลื่นทะเลเรดาร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การดัดแปลงนี้ต้องใช้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนและความละเอียดสูง

3.บทวิจารณ์และสรุป

การใช้คลื่นทะเลอิตซ์ในการค้นหาทางทะเลสามารถเป็นทางเลือกที่น่าสนใจและมีประโยชน์ต่อกองทัพเรือ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คลื่นโซนาร์ คลื่นทะเลอิตซ์สามารถให้ข้อมูลที่มีความละเอียดและความคมชัดที่สูงกว่า ซึ่งสามารถช่วยในการตรวจจับภัยคุกคามทางทะเลได้ดีขึ้น ความสามารถในการแสดงภาพทะเลอิตซ์สามารถสร้างภาพที่มีความละเอียดสูง และมีความสามารถในการแสดงภาพที่ชัดเจนและระบุรายละเอียดได้ดี การทำงานในเงื่อนไขที่ซับซ้อนทะเลอิตซ์อาจมีความสามารถในการทำงานในเงื่อนไขที่ซับซ้อนมากขึ้น เช่น ในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม หรือมีการมีสิ่งกีดขวางต่าง ๆ หากต้องการใช้คลื่นทะเลอิตซ์แทนคลื่นโซนาร์ จะต้องใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณที่สามารถรองรับคลื่นทะเลอิตซ์ อุปกรณ์เหล่านี้สามารถประสานกับระบบเซนเซอร์และซอฟต์แวร์ในเรือเพื่อแปลงและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับ ในประเทศไทยมีบริษัทผู้ผลิตและจำหน่ายอุปกรณ์ทางการเรือที่สามารถปรับปรุงและปรับใช้เทคโนโลยีคลื่นทะเลอิตซ์ได้ อาจมีการนำเข้าหรือผลิตเครื่องมือและอุปกรณ์ที่สามารถใช้กับคลื่นทะเลอิตซ์ในราคาที่ไม่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์โซนาร์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณทะเลอิตซ์ เช่น Ultrasonic Receivers หรือตัวรับคลื่นอัลตราโซนิก เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับรับคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Waves) ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง (ซึ่งมักจะเป็นคลื่นที่มีความถี่มากกว่า 20 kHz) อุปกรณ์นี้สามารถใช้งานในหลายแอปพลิเคชัน Ultrasonic Transducers คือ อุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ใช้แปลงพลังงานระหว่างคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Waves) และพลังงานไฟฟ้า อุปกรณ์นี้สามารถทำหน้าที่ในทางที่ตรงกันข้ามได้คือ ในการแปลงคลื่นอัลตราโซนิกเป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณไฟฟ้ากลับมาเป็นคลื่นอัลตราโซนิก

เอกสารอ้างอิง

- [1] Boudehenn C, Cexus JH, Abdelkader R, Lannuzel M, Jacq O, Brosset D, et al. Holistic approach of integrated navigation equipment for cybersecurity at sea. In: Proceedings of the International Conference on Cybersecurity; 2023 Mar 08; Wales. Wales: HAL openscience; 2022. p. 75-86.
- [2] ฝ่ายวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ. แนวโน้มเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence) ด้านความมั่นคงและการป้องกันประเทศ [อินเทอร์เน็ต]. [ม.ป.ท.]: [ม.ป.พ.]; 2566 [เข้าถึงเมื่อ 12 ม.ค. 2567]. เข้าถึงได้จาก: <http://dtd.dti.or.th/xmlui/handle/123456789/4424?show=full>
- [3] ชนัตถพงศ์ เสื่องงามเอี่ยม, ศิริวิไล ธีระโรจนรัตน์. การหยังความลึกน้ำทะเลจากการรับรู้ระยะไกลในอ่าวไทยด้วยภาพถ่ายดาวเทียมแลนด์แซท 8. วารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ม.ค. – ธ.ค. 2565;5(1):121-35.
- [4] Vadivel M, Vimal SP, Sivakumar VG, Baskar VV, Selvi M. Internet based defence surveillance robot to prevent intruder activities and auto combat system using sonar technology. In: Proceedings of the International Conference on Innovative Data Communication Technologies and Application (ICIDCA); 2023 Mar 14-16; Uttarakhand. [place unknown]: IEEE; 2023.

- [5] อัครนัย ไทรบุญจันทร์. การกำเนิดเสียงของโซনারที่ส่งผลต่อการตรวจจับวัตถุใต้น้ำ. วารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ม.ค. – ธ.ค. 2564;4(1):107-23.
- [6] Chen Y, He Y, Liu L, Tian Z, Zhang XC, Dai J. Plasma-based terahertz wave photonics in gas and liquid phases. Photonics Insights [Internet]. 2023 [cited 2023 Aug 14];2(3). Available from: <https://www.researching.cn/ArticlePdf/m00099/2023/2/3/R06.pdf> [DOI: 10.3788/PI.2023.R06]
- [7] สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติ [อินเทอร์เน็ต]. [ม.ป.ท.]: [ม.ป.พ.]; [ม.ป.ป.]. เทระเฮิร์ตซ์: การเห็นที่ไม่ธรรมดา; 2553 [เข้าถึงเมื่อ 11 ม.ค. 2567]; [ประมาณ 1 น.]. เข้าถึงได้จาก: <http://nkc.tint.or.th/nkc53/content/nstkc53-004.html>
- [8] Wang Y, Xiong Y, Chen M, Liu F, He H, Ma Q, et al. The biological effects of terahertz wave radiation-induced injury on neural stem cells. iScience [Internet]. 2023 Jul 18 [cited 2023 Aug 14];26(10):107418. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37771661/>
- [9] Lee YS. Principles of Terahertz Science and Technology. New York, NY: Springer; 2009.
- [10] Pawar A, Sonawane DD, Erande KB, Derle DV. Terahertz technology and its applications. Drug Invention Today [Internet]. 2013 Jun [cited 2023 Sep 15];5(2):157–63. Available from: https://www.researchgate.net/publication/259139674_Terahertz_technology_and_its_applications
- [11] ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ [อินเทอร์เน็ต]. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ; 2563. “เทคโนโลยีเทระเฮิร์ตซ์” กับการประยุกต์ใช้งานในประเทศไทย; 2562 [เข้าถึงเมื่อ 21 ม.ค. 2567]; [ประมาณ 1 น.]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.nectec.or.th/research/research-project/terahertz-for-thailand.html>
- [12] Kristensen MH, Hérault E, Zhai D, Skovsen E, Coutaz JL. Terahertz generation through optical rectification in reflection. J Appl Phys [Internet]. 2023 May [cited 2023 Sep 18];133(17). Available from: https://www.researchgate.net/publication/370439269_Terahertz_generation_through_optical_rectification_in_reflection
- [13] Guiramand L, Edouard J, Ropagnol X, Ozaki T, Blanchard F. Near-optimal intense and powerful terahertz source by optical rectification in lithium niobate crystal. Photonics Res [Internet]. 2021 Nov [cited 2023 Sep 31];10(2):340-6. Available from: <https://opg.optica.org/prj/fulltext.cfm?uri=prj-10-2-340&id=468399>
- [14] Tonouchi M. Simplified formulas for the generation of terahertz waves from semiconductor surfaces excited with a femtosecond laser. J Appl Phys [Internet]. 2020 Jun [cited 2023 Oct 8];127(24):245703. Available from: https://www.researchgate.net/publication/342376635_Simplified_formulas_for_the_generation_of_terahertz_waves_from_semiconductor_surfaces_excited_with_a_femtosecond_laser

- [15] Déchard J, Davoine X, Gremillet L, Bergé L. Terahertz emission from submicron solid targets irradiated by ultraintense femtosecond laser pulses. *Physics of Plasmas* [Preprint] 2020 May. https://www.researchgate.net/publication/341342329_Terahertz_emission_from_submicron_solid_targets_irradiated_by_ultraintense_femtosecond_laser_pulses
- [16] Zhang S, Cui Y, Wang S, Chen H, Liu Y, Qin W, et al. Nonrelativistic and nonmagnetic terahertz-wave generation via ultrafast current control in anisotropic conductive heterostructures. *Advanced Photonics* [Internet]. 2023 Sep [cited 2023 Oct 31];5(05). Available from: https://www.researchgate.net/publication/373888353_Nonrelativistic_and_nonmagnetic_terahertzwave_generation_via_ultrafast_current_control_in_anisotropic_conductive_heterostructures
- [17] Shi Q, He Z, Xu H, Gao J, Zhao P. Research on information transmission technology through the water-air interface combining a sonar and a radar. *IEEE Sens J* [Internet]. 2023 Apr [cited 2023 Nov 5];99(1). Available from: https://www.researchgate.net/publication/368618892_Research_on_Information_Transmission_Technology_through_the_Water-air_Interface_Combining_a_Sonar_and_a_Radar
- [18] Huang Y, Shen Y, Wang J, From terahertz imaging to terahertz wireless communication. *Eng* [Internet]. 2023 Mar [cited 2023 Nov 13];22:106-24. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809922006361>
- [19] Niu X, Gu M, Zhu Y. Application and outlook of terahertz in various areas. In *Proceeding: Earth and space: From Infrared to Terahertz (ESIT 2022)* 2022; 2022 Sep 17-19; Nantong, China. Washington: SPIE; 2023.
- [20] Garmin [อินเทอร์เน็ต]. [ม.ป.ท.]: [ม.ป.พ.]; [ม.ป.ป.]. โซนาร์สแกน Chirp; 2567 [เข้าถึงเมื่อ 28 สิงหาคม 2566]; [ประมาณ 1 น.]. เข้าถึงได้จาก <https://discover.garmin.com/th-TH/minisite/marine/chirp-technology/#chirp-scanning>
- [21] Janz C. Waving for the voice. *The Guardian* [Internet]. 2023 Sep 25 [cited 2023 Nov 15];2071: [about 1 p.]. Available from: <https://cpa.org.au/guardian/issue-2071/waving-for-the-voice/>
- [22] Asia Times [Internet]. Richmond: Asia Times. China claims breakthrough in US nuke sub detection. 2023 [updated 2023 Aug 16; cited 2023 Dec 2]; [about 1 p.]. Available from: <https://asiatimes.com/2023/08/china-claims-breakthrough-in-us-nuke-sub-detection/>
- [23] Keith, G. THZ imaging for nondestructive evaluation of coated metallic surfaces of naval system [Master's Thesis]. Monterey, CA: Naval postgraduate school Monterey; 2022.

- [24] Gamage C, Dinalankara DR, Samarabandu J, Subasinghe A. A comprehensive survey on the applications of machine learning techniques on maritime surveillance to detect abnormal maritime vessel behaviors. *WMU journal of maritime affairs* [Internet]. 2023 Jun [cited 2023 Nov 30];22(6): p.447-77. Available from: https://www.researchgate.net/publication/371914812_A_comprehensive_survey_on_the_applications_of_machine_learning_techniques_on_maritime_surveillance_to_detect_abnormal_maritime_vessel_behaviors
- [25] Ardi FC. Implementation of integrated maritime surveillance system (IMSS) technology for the Indonesian navy in increasing the security of the jurisdictional marine area. *International journal of social and management studies*. 2023 Aug;4(4).

ความสัมพันธ์ของรูปร่างพื้นที่หน้าตัดกับความสามารถดูดซับพลังงานของท่อหุ้ม

ด้วยไฟเบอร์กลาสภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด

The Relationship of Cross-Sectional Area Shape with the Energy Absorption Capacity of Fiberglass Composite Polygon Tubes Under Torsional Moment.

สมญา ภูณะยา¹ และ รัชดา โสภาคะยัง²

Somya Poonaya¹ and Ratchada Sopakayang²

Received: May 7, 2024

Revised: May 16, 2024

Accepted: May 17, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจำนวนเหลี่ยมที่เพิ่มขึ้นของพื้นที่หน้าตัดของท่อหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาส ที่มีผลต่อความสามารถดูดซับพลังงานภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อสี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อกกลม ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์บิดระหว่างการทดลองและไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ส่วนผลของโมเมนต์บิดสูงสุดพบว่า ท่อสี่เหลี่ยมจะมีค่าโมเมนต์บิดสูงสุดต่ำสุดและจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนเหลี่ยมที่เพิ่มขึ้นจนถึงท่อกกลมจะให้ค่าโมเมนต์บิดสูงสุดมากที่สุด ผลของโมเมนต์บิดเฉลี่ย พบว่า ท่อสี่เหลี่ยมจะมีค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยต่ำสุดและท่อหกเหลี่ยมมีค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยสูงสุด ส่วนท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดอื่น ๆ มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์บิดเฉลี่ยไม่มากนัก ส่วนผลของประสิทธิภาพ พบว่า ท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาส

คำสำคัญ: ท่อหลายเหลี่ยม, การดูดซับพลังงาน, โมเมนต์บิด, ไฟไนต์เอลิเมนต์

¹รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

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

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

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

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

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

ความหนา 1 และ 2 mm เมื่อเทียบกับท่อเปล่าไม่หุ้มไฟเบอร์กลาส จะให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 73.77% และ 73.29% ตามลำดับ และยังพบอีกว่าท่อหุ้มใยแก้วไฟเบอร์กลาสความหนา 1 และ 2 mm มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นในการออกแบบควรเลือกใช้ท่อหุ้มใยแก้วไฟเบอร์กลาสเพราะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานดีที่สุด

Abstract

This research aims to study on the increase the number of sectional sides on the energy absorption capacity of fiberglass composite polygon tubes under torsional moment. The fiberglass composite polygon tubes include square, hexagonal, octagonal, decagonal, icosagonal, tetracontagonal, hexacontagonal, octacontagonal, and circle tubes. The results can be concluded that the comparisons between experimental results are good agree with finite element results. Then, it can find that the value of the maximum torsional moment of empty and fiberglass composite square tubes have the lowest, next the maximum torsional moment increases with the number of sectional sides of tube increase and that of circle tubes have the highest. The results of the average torsional moment of all square tubes have the lowest and all hexagonal tubes have the highest, but other polygonal tubes have slightly change of average torsional moment. The value of torsional moment efficiency of fiberglass composite hexagonal tubes has higher than empty tube equal to 73.77% and 73.29%. It can also be found that the value of torsional moment efficiency of fiberglass composite hexagonal tubes at thickness 1 mm and 2 mm have similar values. Hence, in the design, the fiberglass composite hexagonal tubes should be chosen to increase the energy absorption capacity.

Keywords: Polygon Tube, Energy Absorption, Torsional Moment, Finite Element

1. บทนำ

การเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานของโครงสร้างและชิ้นส่วนภายในโครงสร้าง เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงและมีความปลอดภัยมากขึ้น ภายใต้พลังงานจลน์ที่มากระทำกับโครงสร้าง ได้แก่ กันชนของรถยนต์ แผงกันตามบริเวณขอบทางโค้ง แผงกันบริเวณขอบสะพาน และตัวดูดซับพลังงานป้องกันการกระแทก เป็นต้น เพื่อลดความสูญเสียการบาดเจ็บและเสียชีวิตของผู้ขับขี่ให้เบาบางลง วิศวกรผู้ออกแบบด้านการกระแทก โครงสร้างต้องคำนึงถึงตัวแปรสำคัญที่จะใช้ในการวิเคราะห์ ประกอบด้วย แรงเฉื่อย แรงสูงสุด พลังงานดูดซับ พลังงานดูดซับจำเพาะ และประสิทธิภาพการรับแรงของโครงสร้าง เป็นต้น ในการออกแบบสิ่งที่ต้องการคือ ค่าแรงเฉื่อยที่สูงเพื่อจะได้พลังงานดูดซับสูงขึ้นและแรงสูงสุดต่ำ ๆ เพื่อที่จะให้ตัวดูดซับพลังงานเกิดความเสียหาย ก่อนที่โครงสร้างหลักจะเกิดการเสียหาย ทำให้ผู้ขับขี่มีความปลอดภัย ส่วนพลังงานดูดซับจำเพาะจะใช้พิจารณาเกี่ยวกับน้ำหนักของโครงสร้าง พลังงานดูดซับจำเพาะควรมีค่าสูงเพื่อจะช่วยลดปัญหาการสิ้นเปลืองน้ำมันของยานพาหนะได้

การพัฒนาประสิทธิภาพของตัวดูดซับพลังงาน ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเกี่ยวกับรูปร่างหน้าตัดของท่อ พร้อมกับหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาส โดยรูปร่างหน้าตัดที่จะทำการศึกษาจะเป็นการเพิ่มจำนวนเหลี่ยมบริเวณหน้าตัด

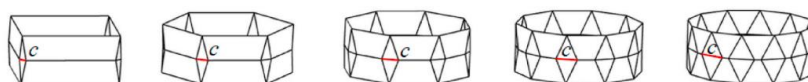
ของท่อตั้งแต่ ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม โดยใช้วิธีการจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปพลังงานดัดของท่อหุ้มไฟเบอร์กลาสเปรียบเทียบกับพลังงานดัดของท่อเปล่า ที่สำคัญงานวิจัยนี้จะมีจุดเด่นคือ เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมเสริมแรงด้วยการหุ้มไฟเบอร์กลาสภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด งานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเฉพาะแรงแนวแกน [1, 4-7] และโมเมนต์ดัด [2] วัสดุที่ใช้ทำท่อเป็นอลูมิเนียมที่มีจุดเด่นในการช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้างและประโยชน์ของงานวิจัยนี้คือ การนำตัวดัดพลังงานไปติดตั้งไว้กับชิ้นส่วนโครงสร้างหรือยานพาหนะที่รับแรงกระแทกภายใต้โมเมนต์บิด เนื่องจากโมเมนต์บิดจะเกิดจากการต่อโยงกับชิ้นส่วนอื่น ๆ เพื่อทำให้เกิดการบิด [8] เช่น นำไปติดตั้งกับโครงสร้างช่วงล่างของรถยนต์ การนำไปยึดกับตัวดัดพลังงานที่รับแรงกดและโมเมนต์ดัด เพื่อเพิ่มความสามารถการดัดพลังงานและสร้างความปลอดภัยของผู้ขับขี่ได้มากยิ่งขึ้น

2. วัตถุประสงค์

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มขึ้นของจำนวนเหลี่ยม ของพื้นที่หน้าตัดที่มีผลต่อความสามารถดัดพลังงานของท่อหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด

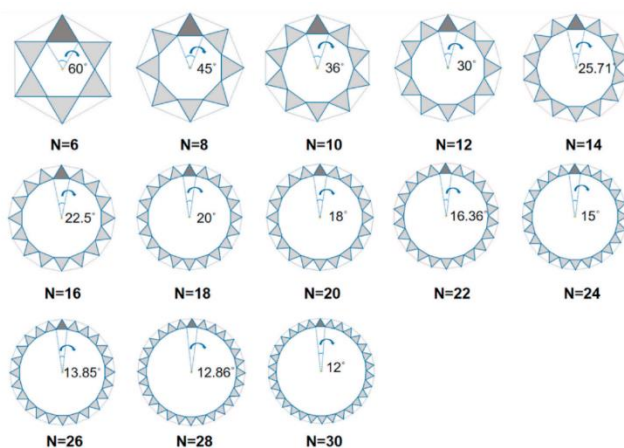
3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวดัดพลังงานให้มีความสามารถในการดัดพลังงานของโครงสร้างได้เนื่องจากพลังงานจลน์ที่มากระทำ เป็นการเพิ่มความปลอดภัยและป้องกันการสูญเสียชีวิตเนื่องจากอุบัติเหตุ วิธีการหนึ่งที่ได้ทำการศึกษาคือ การพัฒนาลักษณะรูปร่างหน้าตัดของท่อ เป็นการวิเคราะห์ในเชิงเปรียบเทียบค่าพลังงานดัดของตัวดัดพลังงาน เช่น ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อวงกลม ภายใต้แรงกระทำในแนวแกน โมเมนต์ดัด หรือ โมเมนต์บิด จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ท่อวงกลมจะให้พลังงานดัดสูงสุดสำหรับแรงกระทำในแนวแกนของท่อของ Somya Poonaya (2007) [1] ท่อสี่เหลี่ยมจะให้พลังงานดัดสูงสุดจากการกระทำด้วยโมเมนต์ดัด Somya Poonaya (2009) [2] และท่อวงกลมจะให้พลังงานดัดสูงสุดภายใต้สภาวะโมเมนต์บิดของ Surasing Arayakul et al. (2014) [3] นอกจากนั้นยังมีการพัฒนาตัวดัดพลังงานเป็นท่อที่มีรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม โดยท่อจะมีลักษณะรูปโอริกามิ (Origami) อยู่บริเวณเหลี่ยมด้านข้าง ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม และท่อบีสองเหลี่ยม ภายใต้แรงในแนวแกนท่อของ Shuguang Yao et al. (2020) [4] ดังรูปที่ 1 จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของโอริกามิจะทำให้แรงสูงสุดลดลง ส่วนแรงเฉลี่ยจะขึ้นอยู่กับโมดความเสียหายที่แตกต่างกัน



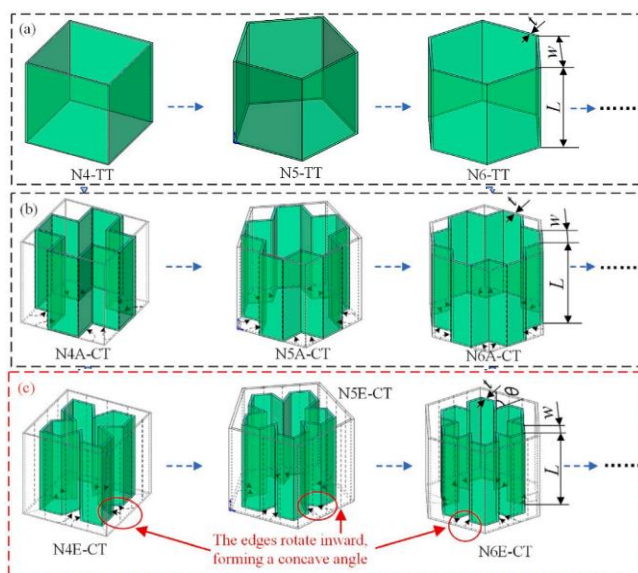
รูปที่ 1 ท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมแบบโอริกามิ [4]

มีการพัฒนาตัวดูดซับพลังงานของท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมโดยการเพิ่มเซลล์รูปสามเหลี่ยมบริเวณเหลี่ยมตามแนวเส้นรอบวงของท่อที่มีจำนวนตั้งแต่ 6 จนถึง 30 เหลี่ยม ภายใต้แรงกดในแนวแกนของ Shuguang Yao et al. (2020) [5] ดังรูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์พบว่าท่อที่มีด้าน $N=24$ เหลี่ยม จะให้ค่าพลังงานดูดซับดีที่สุดและมีค่าพลังงานดูดซับจำเพาะเพิ่มขึ้น 110.37% เมื่อเทียบกับตัวที่มีค่าน้อยที่สุด $N=6$



รูปที่ 2 ท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมที่เพิ่มเซลล์รูปสามเหลี่ยมตามแนวเส้นรอบวงของท่อ [5]

ยังมีการศึกษาท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมเว้า ภายใต้แรงกดในแนวแกนของ Jing Zeng et al. [6] โดยลักษณะการเว้าเข้าจะเป็นไปตามจำนวนด้านของท่อ ซึ่งจะแบ่งเป็นแบบ I และแบบ II เป็นการลบมุมเพื่อลดขนาดพื้นที่ ดังรูปที่ 3



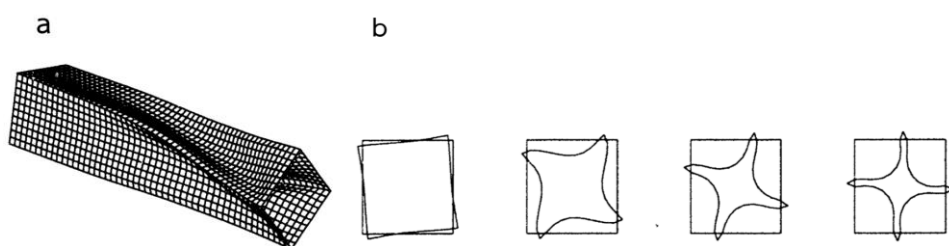
รูปที่ 3 ท่อรูปร่างหลายเหลี่ยม (a) ท่อรูปร่างหลายเหลี่ยม (b) ท่อหลายเหลี่ยมเว้า (c) ท่อหลายเหลี่ยมเว้าลบมุม [6]

การเพิ่มประสิทธิภาพความสามารถในการดูดซับพลังงานของตัวดูดซับพลังงานอีกทางเลือกหนึ่ง โดยการนำไฟเบอร์กลาสผสมเรซินไปหุ้มท่ออลูมิเนียมภายใต้แรงกระแทกแบบพลศาสตร์ของ M.A. Mansor et.al (2021) [7] โดยงานวิจัยได้ทำการจัดเรียงท่ออลูมิเนียมรูปทรงกระบอกวางซ้อนกันแล้วแทรกไฟเบอร์กลาสเข้าไปตรงช่องว่างระหว่างท่ออลูมิเนียม การจัดวางประกอบด้วยอลูมิเนียมวาง 2 และ 3 ชั้น ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มความหนาของชั้นอลูมิเนียมและไฟเบอร์กลาสจะทำให้พลังงานดูดซับจำเพาะสูงขึ้นและสามารถรับการกระแทกดีขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการศึกษาท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมมีความสำคัญมาก สามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานของท่อเหล่านี้ได้ ด้วยการใช้วัสดุอลูมิเนียมและหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาส นอกจากจะให้ประโยชน์เนื่องจากมีน้ำหนักเบาแล้วยังให้พลังงานดูดซับเพิ่มขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาท่ออลูมิเนียมรูปร่างหลายเหลี่ยมเสริมแรงด้วยการหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด จุดเด่นในการวิจัยนี้คือการศึกษากายใต้โมเมนต์บิด ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาความสามารถในการชนของท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมภายใต้โมเมนต์บิดน้อยมาก เช่น การหาคุณสมบัติทางกลภายใต้โมเมนต์บิดของท่อวงกลมที่ใช้วัสดุประกอบที่ประสานกันระหว่างไฟเบอร์กลาสกับปานรามิของ Jun Ke et al. (2023) [9] และการทำงานทางทฤษฎีความเสียหายของผนังบางภายใต้สภาวะโมเมนต์บิดของ Weigang Chen et al. (2000) [8] ได้วิเคราะห์ทฤษฎีความเสียหายของโครงสร้างที่เรียกว่า “วิธีเส้นการพับ (Hinge Line Method)” เมื่อโครงสร้างเกิดการเสียรูปในช่วงพลาสติก (Plastic Deformation) จะเกิดเส้นการพับรอบ ๆ โครงสร้าง โดยพลังงานงานภายในโครงสร้างที่เสียรูปแล้วหาได้จากผลรวมของพลังงานที่กระจายเข้าไปในแต่ละเส้นการพับ การศึกษาเป็นการวิเคราะห์กับท่อสี่เหลี่ยมผนังบางภายใต้สภาวะโมเมนต์บิดดังรูปที่ 4 และสมการทั่วไปแสดงในสมการที่ 1

$$T \cdot \dot{\theta} = \int_S N_{\alpha\beta} \cdot \dot{\epsilon}_{\alpha\beta} dS \quad (1)$$

เมื่อ T คือ โมเมนต์บิดที่กระทำที่ปลายของท่อ, $\dot{\theta}$ คือ ความเร็วเชิงมุม, S คือ พื้นผิวของเส้นการพับ, $N_{\alpha\beta}$ และ $\dot{\epsilon}_{\alpha\beta}$ คือ เทนเซอร์ของความเค้นแผ่นบาง (Membrane Stress Tensor) และเทนเซอร์ของอัตราความเครียด ตามลำดับ



รูปที่ 4 รูปร่างความเสียหายภายใต้สภาวะโมเมนต์บิดของท่อสี่เหลี่ยมผนังบาง (a) ท่อสี่เหลี่ยมบิดไปมุม 45 องศา (b) การเสียรูปของพื้นที่หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม [8]

4. วิธีดำเนินการศึกษา

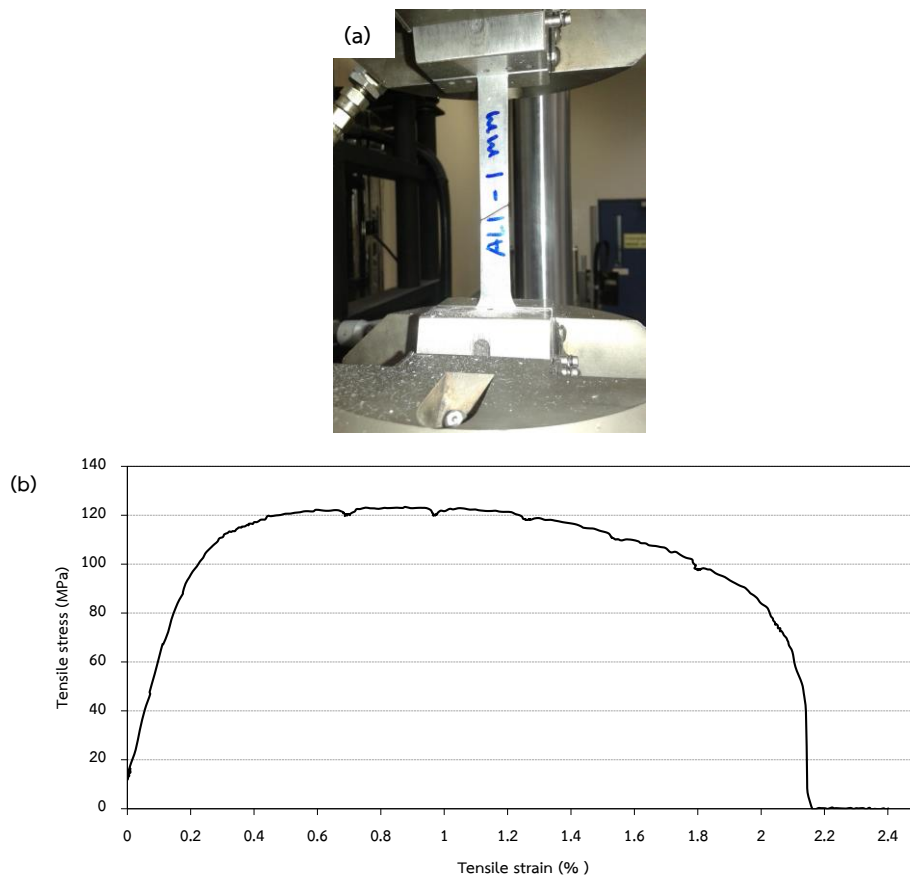
การวิเคราะห์การเพิ่มจำนวนเหลี่ยมของหน้าตัดท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสภายใต้การกระทำของโมเมนต์บิด มีวิธีดำเนินการศึกษา ดังนี้

4.1 วัสดุที่ใช้ทำท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมเป็นอลูมิเนียม ขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร ความยาวเส้นรอบวง 320 มิลลิเมตร และความยาวท่อ 150 มิลลิเมตร

4.2 ท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมที่จะทำการศึกษาคือ ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อสี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม และท่อกกลม

4.3 คุณสมบัติของวัสดุ

4.3.1 อลูมิเนียม มีความหนาแน่น $2,700 \text{ kg/m}^3$ ค่าอัตราส่วนปัวซอง 0.3 และคุณสมบัติอื่น ๆ สามารถหาได้จากเครื่องทดสอบแรงดึง ดังรูปที่ 5 จะได้ค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น $32,000 \text{ MPa}$ ความเค้นโหมดตัว 125.64 MPa และค่าความเค้นจริง (True Stress) และความเครียดพลาสติก (Plastic Strain) ที่ใช้ในโปรแกรมออบาคัส (ABAQUS) แสดงในตารางที่ 1

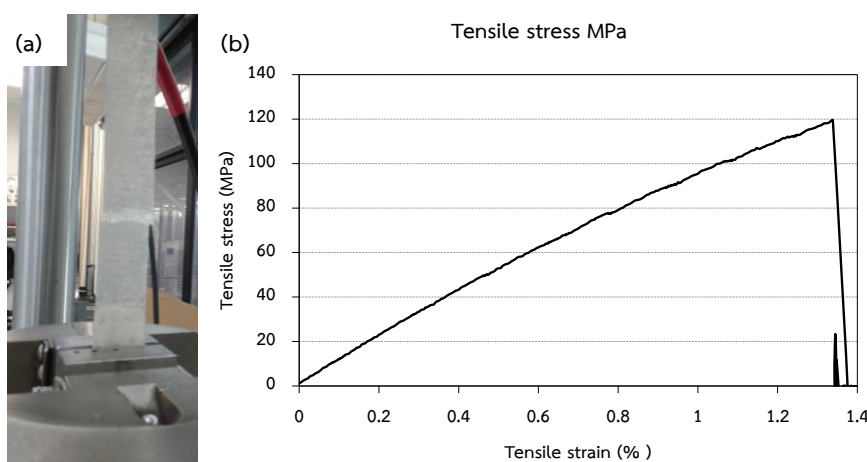


รูปที่ 5 คุณสมบัติวัสดุของอลูมิเนียม (a) การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง
(b) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของอลูมิเนียม

ตารางที่ 1 ค่าความเค้นจริงและความเครียดพลาสติกของอลูมิเนียมที่ใช้ในโปรแกรมอบาคัส

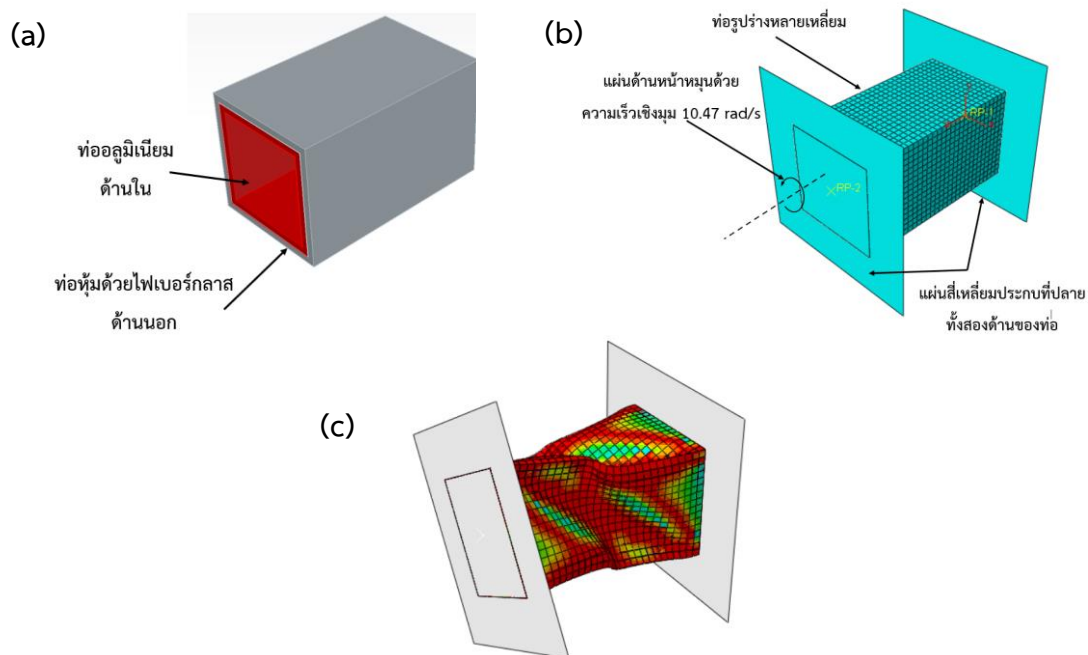
ความเค้นจริง (MPa)	ความเครียดพลาสติก
119.02	0.00000
120.75	0.00322
121.99	0.00366
122.47	0.00409
123.84	0.00508
124.02	0.00512
124.75	0.00656
125.64	0.00680

4.3.2 คุณสมบัติวัสดุของไฟเบอร์กลาส สามารถหาได้จากเครื่องทดสอบแรงดึง ที่แสดงดังรูปที่ 6 จะได้ความหนาแน่นของวัสดุ 112 kg/m^3 อัตราส่วนปัวซอง 0.2 และค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น $8,930 \text{ MPa}$ และค่าความเค้นครากตัว 121 MPa



รูปที่ 6 คุณสมบัติวัสดุของไฟเบอร์กลาส (a) การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (b) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของไฟเบอร์กลาส

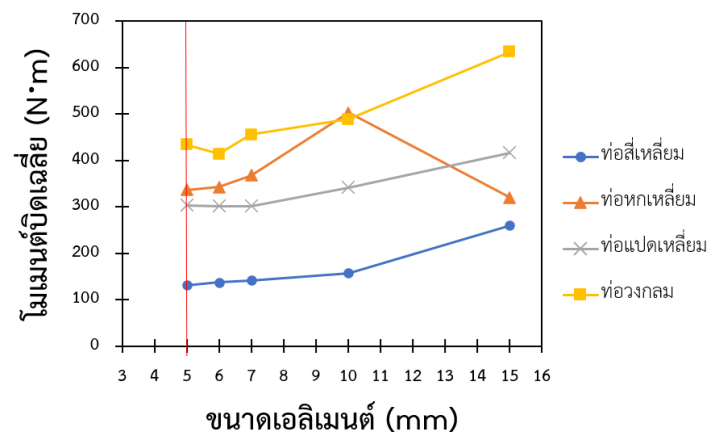
4.4 การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่จะศึกษา คือ การเปลี่ยนแปลงจำนวนเหลี่ยมของพื้นที่หน้าตัดท่อ ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อสี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม และทอวงกลม การจำลองทางคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (a) การวางชั้นของอลูมิเนียมกับไฟเบอร์กลาส (b) การสร้างแบบจำลอง (c) ลักษณะการเสียรูปของท่อ

รูปที่ 7 การจำลองคอมพิวเตอร์ของท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด การวิเคราะห์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้การจำลองในโปรแกรมออบาคัส (ABAQUS) การจำลองเริ่มจากการเลือกลักษณะปัญหาเป็นแบบพลศาสตร์ชัดเจน (Explicit Dynamic) โดยความเร็วเชิงมุมในการบิดของแผ่นประกอบด้านหน้า 5 rad/s ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ใช้เวลา 0.105 วินาที จะบิดไปเป็นมุม 30 องศา ส่วนแผ่นประกบอีกที่ปลายด้านหนึ่งของท่อ จะมีเงื่อนไขขอบเขตไม่ให้เคลื่อนที่ทุกทิศทาง ลักษณะเอลิเมนต์แผ่นประกบที่ปลายท่อทั้งสองเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมมีสี่โนดแบบแข็งเกร็ง (R3D4: A 4-node 3-D Bilinear Rigid Quadrilateral.) ส่วนชิ้นงานทดสอบเป็นท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมลักษณะเอลิเมนต์แบบเปลือก (Shell Elements) รูปสี่เหลี่ยมสี่โนดแบบเสียรูปได้ (S4R :Deformable Body) คุณสมบัติวัสดุเป็นแบบเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) เท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) ลักษณะการสัมผัสของทุกชิ้นงานเป็นแบบทั่วไป (General Contact) ส่วนการสัมผัสกันระหว่างอลูมิเนียมและไฟเบอร์กลาสเป็นแบบผิวต่อผิว (Surface to Surface) โดยทุกผิวสัมผัสกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.01 และที่ปลายท่อทั้งสองข้างจะเชื่อมติดกันกับแผ่นประกบด้วยคำสั่ง “Tie”

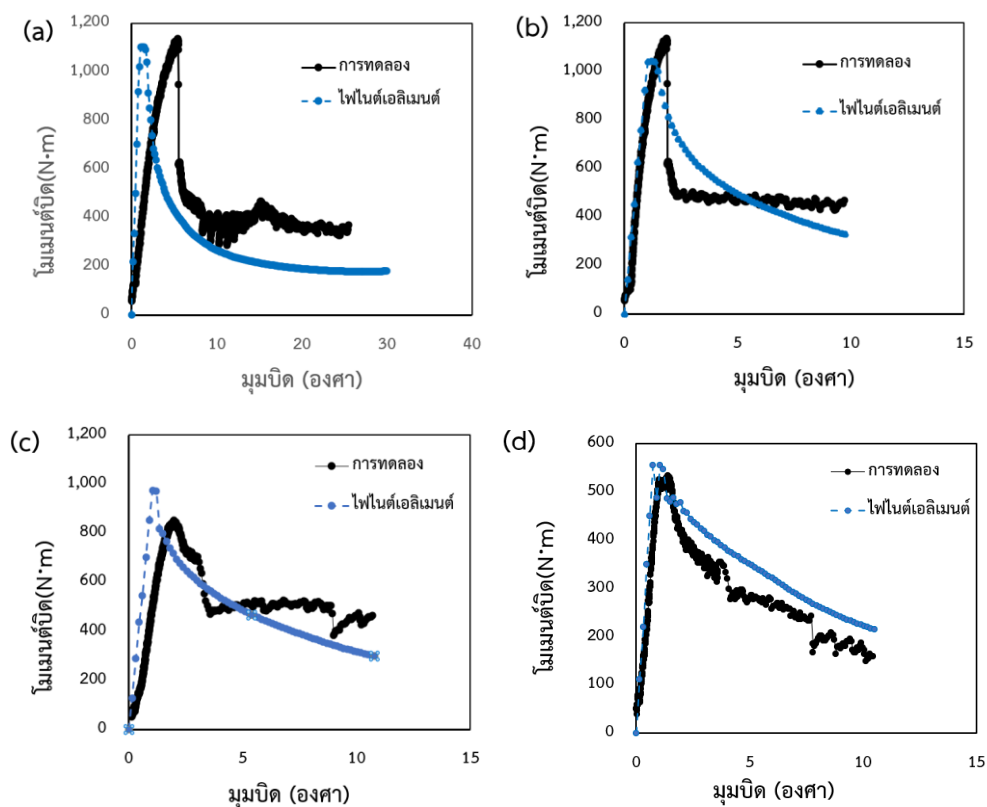
การหาค่าความอิสระของเอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 8 เป็นตัวอย่างแสดงการหาค่าความอิสระของเอลิเมนต์ของท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมที่มีความหนาอลูมิเนียม 1 mm จะเห็นว่าเอลิเมนต์เริ่มมีความเสถียรหรือมีการลู่เข้าของค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงน้อยมากที่ขนาดเอลิเมนต์ 5, 6 และ 7 mm ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้ขนาดเอลิเมนต์ เท่ากับ 5 mm



รูปที่ 8 ความอิสระของขนาดเอลิเมนต์ต่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมที่ความหนาอลูมิเนียม 1 mm

5. ผลการศึกษา

5.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองคอมพิวเตอร์กับผลการทดลอง เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยผลการทดลองที่จะนำมาเปรียบเทียบนี้ได้มาจากการวิจัยที่ผ่านมา[3] ผลการเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบผลไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง (a) ท่อวงกลม (b) ท่อแปดเหลี่ยม (c) ท่อหกเหลี่ยม และ (d) ท่อสี่เหลี่ยม

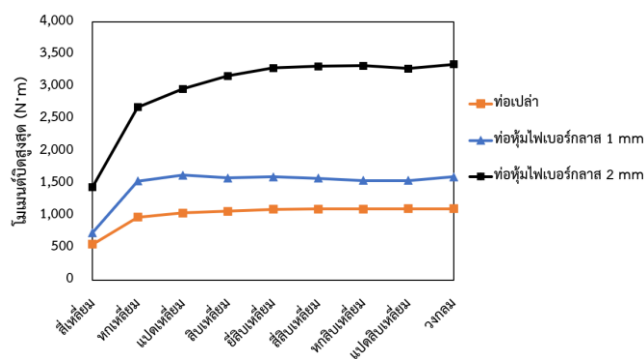
ในรูปที่ 9 (a) - (d) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดกับมุมบิดของท่อพบว่ากราฟมีทิศทางไปในทางเดียวกัน จากผลการทดลองในตารางที่ 2 พบว่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยทั้งหมดของท่อ มีความคลาดเคลื่อน 10.31% เนื่องจากการจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองของท่อจะไม่มีรอยเชื่อมที่มุมรอยพับ แต่ในการทดลองการขึ้นรูปท่อจะเป็นการพับขึ้นรูปสำหรับท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ส่วนท่่วงกลม จะเป็นการม้วนขึ้นรูป ซึ่งท่อที่ใช้ในการทดลองจะทำการเชื่อมที่บริเวณรอยพับ และในการทดลองในแต่ละกรณี จะทำการทดลองซ้ำกัน 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของข้อมูล เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

ตารางที่ 2 ค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยของท่อลักษณะต่าง ๆ

ชนิดท่อ	โมเมนต์บิดเฉลี่ย (N·m)		ร้อยละความคลาดเคลื่อน
	การทดลอง	ไฟไนต์เอลิเมนต์	
ท่่วงกลม	600.47	505.29	15.85
ท่อแปดเหลี่ยม	611.66	527.99	13.68
ท่อหกเหลี่ยม	542.32	499.02	7.98
ท่อสี่เหลี่ยม	331.93	344.25	-3.71
เฉลี่ย			10.31

5.2 ผลของการเพิ่มจำนวนเหลี่ยมของท่อรูปร่างหลายเหลี่ยม

5.2.1 โมเมนต์บิดสูงสุดคือ โมเมนต์บิดที่มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์ ท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมควรมีค่าโมเมนต์บิดสูงสุดที่ต่ำกว่าโครงสร้างหลัก เพื่อสามารถทำหน้าที่ดูดซับพลังงานจลน์ที่มากระทำกับโครงสร้างหลัก ไม่เช่นนั้นโครงสร้างหลักจะเกิดการเสียหายก่อนท่อได้ ผลการเปรียบเทียบระหว่างท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสที่ความหนา 1 mm และ ความหนา 2 mm กับท่อเปล่า (ไม่หุ้มไฟเบอร์กลาส) ดังแสดงในรูปที่ 10

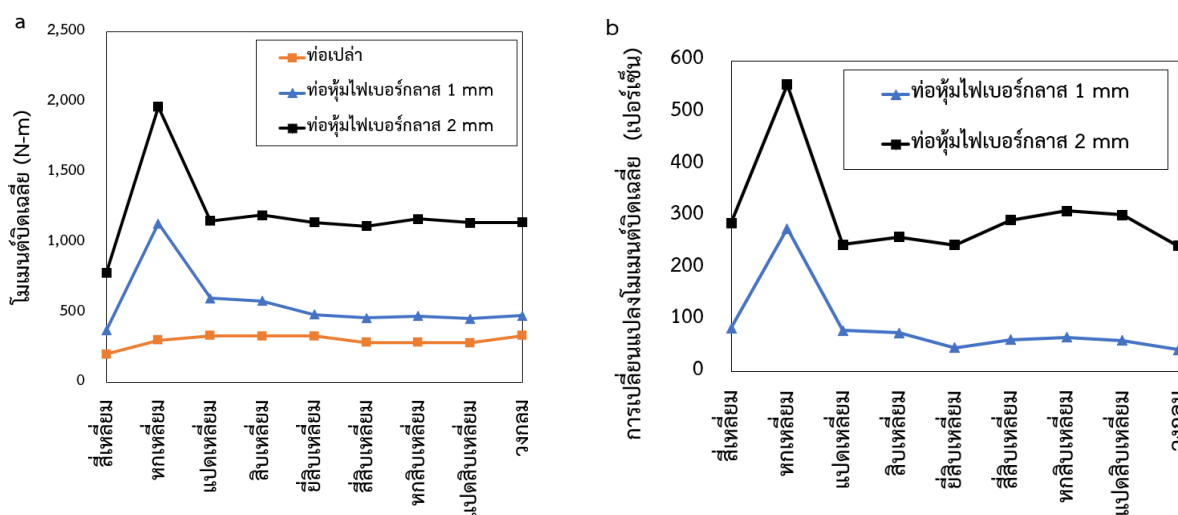


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดสูงสุดกับท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 1 และ 2 mm และท่อเปล่า (ไม่หุ้มไฟเบอร์กลาส)

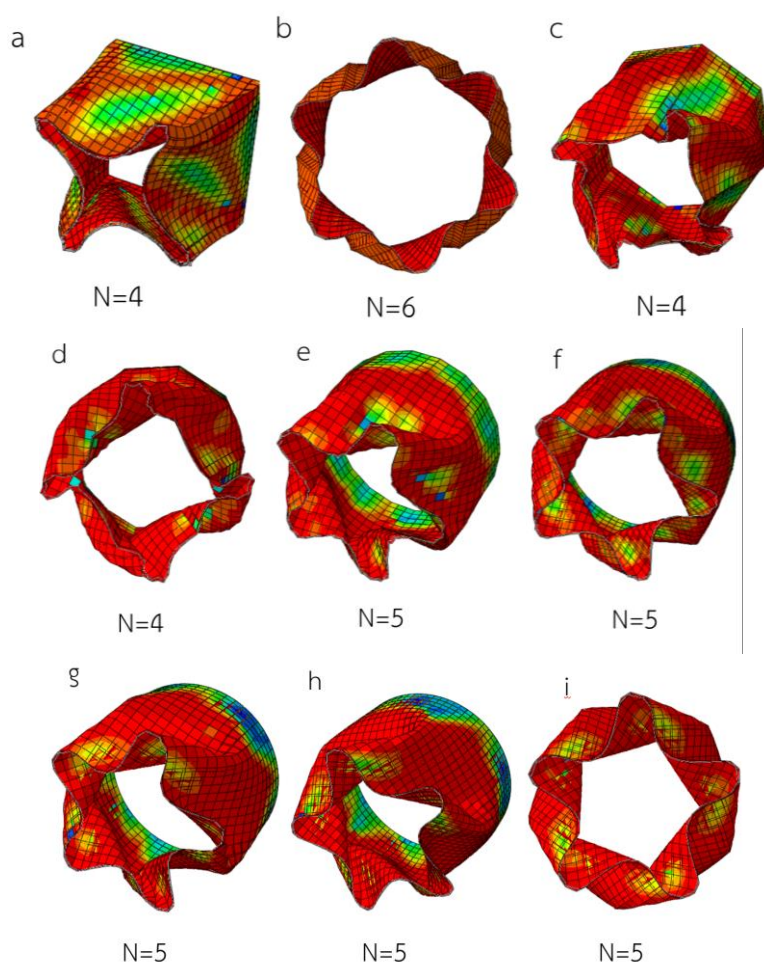
จากรูปที่ 10 พบว่าท่อสี่เหลี่ยมจะมีค่าโมเมนต์บิดสูงสุดต่ำสุดและท่อกกลมจะให้ค่าโมเมนต์บิดสูงสุดมากที่สุด และค่าโมเมนต์บิดสูงสุดจะเพิ่มขึ้นไปถึงท่อหกเหลี่ยม หลังจากนั้นค่าโมเมนต์บิดสูงสุดจากท่อหกเหลี่ยมจนถึงท่อกกลมจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนต์บิดสูงสุดของท่อกกลมกับท่อสี่เหลี่ยม พบว่าท่อเปล่า เพิ่มขึ้น 98.69% ท่อหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 1 mm เพิ่มขึ้น 118.41% และท่อหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 2 mm เพิ่มขึ้น 132.19% ตามลำดับ

5.2.2 โมเมนต์บิดเฉื่อย เป็นตัวแปรที่ใช้ในการพิจารณาความสามารถในการดูดซับพลังงานของท่อ พื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยม ท่อที่มีโมเมนต์บิดเฉื่อยสูงจะให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานที่สูง ผลการวิเคราะห์ท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมแสดงในรูปที่ 11

จากรูปที่ 11 (a) พบว่า ท่อเปล่า (ท่อไม่หุ้มไฟเบอร์กลาส) จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์บิดเฉื่อยไม่มากนักที่ทุก ๆ รูปร่างหน้าตัดของท่อ ส่วนท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสความหนา 1 และ 2 mm จะเห็นว่า ท่อสี่เหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสจะมีค่าโมเมนต์บิดเฉื่อยต่ำสุดและท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสมีค่าโมเมนต์บิดเฉื่อยสูงสุด ส่วนท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อสี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อกกลมมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์บิดเฉื่อยน้อยมาก ดังในรูปที่ 11 (b) ถ้าพิจารณาท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 1 mm และ 2 mm จะมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์บิดเฉื่อยเปรียบเทียบกับท่อเปล่าหกเหลี่ยมไม่หุ้มไฟเบอร์กลาส พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้น 276.67% และ 553.96% ตามลำดับ



รูปที่ 11 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดเฉื่อยกับท่อรูปร่างหลายเหลี่ยม (b) การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์บิดเฉื่อยของท่อหุ้มไฟเบอร์กลาส ความหนา 1 และ 2 mm เปรียบเทียบกับท่อเปล่า (ไม่หุ้มไฟเบอร์กลาส)

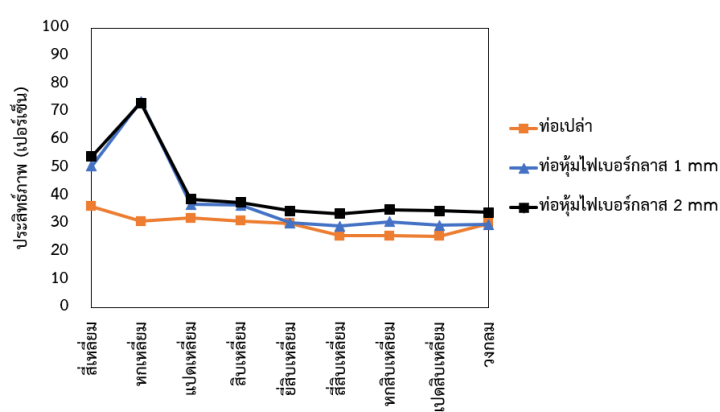


รูปที่ 12 การเสียรูปของท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสขนาดความหนา 1 mm
 (a) ท่อสี่เหลี่ยม (b)ท่อหกเหลี่ยม (c) ท่อแปดเหลี่ยม (d) ท่อสิบเหลี่ยม (e) ท่อยี่สิบเหลี่ยม (f) ท่อสี่สิบเหลี่ยม
 (g) ท่อหกสิบเหลี่ยม (h) ท่อแปดสิบเหลี่ยม (i) ท่อวงกลม

จากรูปที่ 12 เป็นการเสียรูปของท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยม พบว่า ท่อหกเหลี่ยมจะมีเส้นการพับมากที่สุด ($N = 6$) ส่วนท่อสี่เหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อกสิบเหลี่ยม มีเส้นการพับจำนวน 4 เส้น ($N = 4$) ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อสี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม มีเส้นการพับจำนวน 5 เส้น จะเห็นว่าท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสมีค่าโมเมนต์บิดเฉื่อยสูงสุด เพราะในทฤษฎีความเสียหายของโครงสร้างที่มีการเสียรูปในช่วงพลาสติก ความสามารถในการดูดซับพลังงานมีการกระจายตามเส้นการพับของโครงสร้าง [8] ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลว่าท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสมีค่าโมเมนต์บิดเฉื่อยสูงสุด เนื่องจากมีเส้นการพับมากที่สุด

5.2.3 ประสิทธิภาพการรับแรง เป็นการหาประสิทธิภาพความสามารถการดูดซับพลังงานของท่อรูปร่างหลายเหลี่ยม หาได้จากนำโมเมนต์บิดเฉื่อยหารด้วยโมเมนต์สูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่าท่อหกเหลี่ยม

หุ้มไฟเบอร์กลาสจะมีประสิทธิภาพสูงสุด ที่ความหนาไฟเบอร์กลาส 1 และ 2 mm เท่ากับ 73.77% และ 73.29 % ตามลำดับ รองลงมาคือ ท่อสี่เหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสมีประสิทธิภาพสูงสุด ที่ความหนาไฟเบอร์กลาส 1 และ 2 mm เท่ากับ 50.63% และ 54.06% ตามลำดับ ส่วนท่อหุ้มไฟเบอร์กลาสรูปร่างหลายเหลี่ยมชนิดอื่น ๆ จะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ที่ความหนาไฟเบอร์กลาส 1 และ 2 mm โดยเฉลี่ยมีประสิทธิภาพ 31.82% และ 35.48% ตามลำดับ และยังพบว่าท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาส 1 และ 2 mm มีประสิทธิภาพแตกต่างกันไม่นัก 11.50% ถ้าคำนึงถึงต้นทุน ควรเลือกใช้ท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 1 mm แต่ถ้าคำนึงถึงความปลอดภัยควรใช้ท่อที่มีพลังงานดูดซับสูง ดังในรูปที่ 10 ควรเลือกใช้ท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 2 mm



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับท่อรูปร่างหลายเหลี่ยม

6. สรุปและการอภิปราย/ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาจำนวนเหลี่ยมที่เพิ่มขึ้นของพื้นที่หน้าตัดของท่อ ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อสี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม สามารถสรุปผล ดังนี้

6.1 ผลการเปรียบเทียบกราฟค่าโมเมนต์บิดกับมุมบิดระหว่างการทดลองและไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยมีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย 10.31%

6.2 ผลของโมเมนต์บิดสูงสุด พบว่า ท่อสี่เหลี่ยมมีค่าโมเมนต์บิดสูงสุดต่ำสุด รองลงเป็นท่อหกเหลี่ยมและท่อวงกลมให้ค่าโมเมนต์บิดสูงสุดมากที่สุด ดังนั้นในการออกแบบควรใช้ท่อสี่เหลี่ยมและท่อหกเหลี่ยมที่มีค่าโมเมนต์บิดต่ำสุด

6.3 ผลของโมเมนต์บิดเฉลี่ย พบว่า ท่อสี่เหลี่ยมจะมีค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยต่ำสุด ท่อหกเหลี่ยมมีค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยสูงสุด ส่วนท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมอื่น ๆ มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์บิดเฉลี่ยไม่มากนัก ดังนั้นในการออกแบบควรใช้ท่อที่มีโมเมนต์บิดเฉลี่ยสูงสุดคือท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสหนา 2 mm จะให้ความปลอดภัยสูงต่อผู้ขับขี่

6.4 ผลของประสิทธิภาพการรับแรง พบว่า ท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 1 และ 2 mm จะให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าไม่หุ้มไฟเบอร์กลาส เนื่องจากท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสดังกล่าวจะมีค่าโมเมนต์บิดเฉื่อยสูงสุดและค่าโมเมนต์บิดสูงสุดต่ำ จึงทำให้มีประสิทธิภาพการรับแรงที่สูงขึ้น และยังพบว่าท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 1 และ 2 mm มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการออกแบบที่คุ้มทุนควรเลือกใช้ท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 1 mm แต่คำนึงถึงความปลอดภัยสูงควรใช้ท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 2 mm เนื่องจากมีค่าโมเมนต์เฉื่อยสูงทำให้มีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Poonaya S, Thinvongpituk C, Teebonma U. Comparison of absorption energy of various section steel tubes under axial compression and bending loading. In: Proceedings of the 21st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand; 2007 Oct 17-19; Chonburi, Thailand. Chonburi (Thailand): [Thai Society of Mechanical Engineers]; 2007. p. 32.
- [2] Poonaya S, Thinvongpituk C. Comparison of energy absorption of various section steel tubes under torsion loading. In: Proceedings of the 23rd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand; 2009 Nov 4-7; Chiang Mai, Thailand. Chiang Mai (Thailand): [Thai Society of Mechanical Engineers]; 2009. p. 75.
- [3] Arayangkul S, Poonaya S, Payom C. Absorbed energy efficiency of polygon thin-walled tubes subjected to torsion. Naresuan Univ Eng J. 2014;9(1):15-24.
- [4] Shuguang Y, Huifen Z, Mingyang L, Zhixiang L, Ping X. Energy absorption of origami tubes with polygonal cross-sections. Thin-walled Struct [Internet]. 2020 Dec [cited 2023 Aug 25];157:107013. Available from: https://www.researchgate.net/publication/343807602_Energy_absorption_of_origami_tubes_with_polygonal_cross-sections
- [5] Shuguang Y, Yuexing T, Zhixiang L, Fan Y, Ping X. Crushing characteristic of polygonal tubes with hierarchical triangular cells. Thin-walled Struct [Internet]. 2020 Dec [cited 2023 Sep 30];157(4):107031. Available from: https://www.researchgate.net/publication/343981628_Crushing_characteristic_of_polygonal_tubes_with_hierarchical_triangular_cells
- [6] Jing Z, Suchao X, Hui Z, Tao L, Yaxin L. Study and optimization of energy absorption characteristics of a new concave polygon tube. Structures [Internet]. 2023 July [cited 2023 Oct 10];53(1):1030-45. Available from: https://www.researchgate.net/publication/371977311_Study_and_optimization_of_energy_absorption_characteristics_of_a_new_concave_polygon_tube

- [7] Mansor MA, Ahmad Z, Abdullah MR. Crashworthiness capability of thin-walled fibre metal laminate tubes under axial crushing. *Eng Struct* [Internet]. 2022 Feb [cited 2023 Dec 3];252:113660. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029621017491>
- [8] Weigang C, Tomasz W. Torsional collapse of thin-walled prismatic columns. *Thin-Walled Struct* [Internet]. 2000 Mar [cited 2024 Jan 27];36(3) :181-96. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823199000439>
- [9] Jun K, Li-jie L, Zhen-yu W, Zhong-ping L, Luo B, Dong-wei L. Torsional mechanical properties and damage mechanism of glass fiber-ramie hybrid circular tube. *Compos Struct* [Internet]. 2024 Jan [cited 2024 Mar 29];327:117680. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822323010267/>

การออกแบบและพัฒนาเครื่องตัดถุงสเตอร์ไรต์อัตโนมัติ

Design and Development of Automatic Sterile Bag Cutting Machine

ปราโมทย์ สุขศิริศักดิ์¹ วิริยะ บริสุทธิ์² และ ประยูร กันอ้อย³

Pramote Suksirisak¹ Wiriya Borisut² and Prayoon Kunyoo³

Received: April 24, 2024

Revised: May 20, 2024

Accepted: May 24, 2024

บทคัดย่อ

ในอดีตที่ผ่านมา หากบุคลากรทางการแพทย์ต้องการใช้อุปกรณ์ในการตัดถุงสเตอร์ไรต์หรือของเวชภัณฑ์ปลอดเชื้อซึ่งเป็นของที่ใช้สำหรับบรรจุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำหัตถการทางการแพทย์ที่จำเป็นต้องให้ปราศจากเชื้อโรค มักจะใช้กรรไกรหรือแท่นตัดกระดาษด้วยแรงงานคน ซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายแก่ผู้ใช้งาน มีความล่าช้าในการตัดและขาดความแม่นยำในการตัด ทำให้สูญเสียทรัพยากรและค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น คณะผู้วิจัยจึงได้นำความรู้เรื่องกลไกเกนัวและระบบควบคุมอัตโนมัติมาออกแบบและสร้างเครื่องตัดถุงสเตอร์ไรต์อัตโนมัติขึ้นมา เพื่อลดภาระงานของบุคลากรทางการแพทย์และสามารถทำการตัดถุงสเตอร์ไรต์ได้ตามขนาดที่ต้องการ โดยตัดถุงสเตอร์ไรต์ขนาดความกว้าง 3 ขนาด คือ 5.5 เซนติเมตร, 7.5 เซนติเมตร และ 10 เซนติเมตร ผลการทดสอบพบว่าถุงสเตอร์ไรต์ที่ตัดได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดที่ 0.44% เมื่อตัดถุงสเตอร์ไรต์กว้าง 10 เซนติเมตร ที่ความยาว 9 เซนติเมตร

คำสำคัญ: ถุงสเตอร์ไรต์, กลไกเกนัว, ระบบควบคุมอัตโนมัติ

¹รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

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

E-mail: pramote_suki@rtaf.mi.th

²อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

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

E-mail: wiriya_bori@rtaf.mi.th

³รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

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

E-mail: prayoon_k@rtaf.mi.th

Abstract

In the recent past, medical personnel often used manual scissors or paper cutting boards to cut sterile bags or pouches containing sterile medical supplies. These bags are used to contain equipment necessary for medical procedures that must be free from pathogens. However, manual cutting methods posed risks to users, resulted in cutting delays, and lacked precision. This led to increased resource loss and expenses. Consequently, the research team designed and developed an automatic sterile bag cutter using knowledge of the Geneva mechanism and automated control systems. This innovation aims to reduce the workload of medical personnel and enable cutting of sterile bags to desired sizes. The sterile bag cutter can cut bags of three widths: 5.5 centimeters, 7.5 centimeters, and 10 centimeters. Test results revealed that the least deviation in cutting sterile bags was 0.44% when cutting a 10-centimeter-wide sterile bag with a length of 9 centimeters.

Keywords: Sterile Bag, Geneva Mechanism, Automated Control Systems

1. บทนำ

ปัจจุบันบุคลากรทางการแพทย์มีความจำเป็นในการใช้อุปกรณ์การตัดของเวชภัณฑ์ปลอดเชื้อ (ถุงสเตอร์ไรต์) ซึ่งเป็นซองที่ใช้ในการบรรจุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำหัตถการทางการแพทย์หรือเครื่องมือที่ใช้ในการรักษาพยาบาลผู้ป่วยที่ต้องการให้ปราศจากเชื้อ โดยทั่วไปมักจะใช้อุปกรณ์อย่างง่ายในการตัดด้วยแรงงานคน เช่น กรรไกรหรือแท่นตัดกระดาษ ซึ่งมีความอันตรายต่อผู้ใช้งาน มีความล่าช้า และขาดความแม่นยำ ทำให้ได้ถุงสเตอร์ไรต์ที่ไม่สมบูรณ์ ไม่ได้ขนาดตามต้องการ ตลอดจนทำให้สูญเสียทรัพยากรและงบประมาณในการผลิตเพิ่มขึ้น

เพื่อให้เกิดความสะดวกในการใช้งานและลดระยะเวลาในการตัด ประกอบกับปัจจุบันมีความก้าวหน้าทางด้านระบบควบคุมอัตโนมัติ คณะผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องตัดถุงสเตอร์ไรต์อัตโนมัติ โดยมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องตัดถุงสเตอร์ไรต์ให้สามารถตัดได้หลายขนาด สามารถนับและแสดงผลจำนวนถุงสเตอร์ไรต์ที่ถูกตัดได้ สามารถถอดและเปลี่ยนใบมีดได้ตามระยะการใช้งานของใบมีดและสามารถกำหนดจำนวนถุงในการตัดต่อเนื่องได้

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถุงสเตอร์ไรต์ (Sterile Bag) คือ ถุงที่ใช้ในงานทางการแพทย์และเภสัชกรรม เป็นถุงที่มีความสะอาดและป้องกันการติดเชื้อจากภายนอกเข้าสู่สิ่งของภายในถุง ทำให้ถุงนี้เหมาะสำหรับใช้ในการเก็บสิ่งของที่ต้องการความสะอาดและป้องกันการติดเชื้อ เช่น เครื่องมือทางการแพทย์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการผ่าตัด หรือสิ่งของที่ต้องการความสะอาดเพื่อการใช้งานทางการแพทย์และเภสัชกรรมอื่น ๆ อย่างปลอดภัย มักมีการใช้วัสดุที่ไม่ทำให้เกิด

ภาวะแพ้ต่อผิวหนังและมักมีการทำลายเชื้อโรคด้วยการฆ่าเชื้อด้วยการอบไอน้ำโดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตหรือ กลิ่นกลุ่มออกซิเดชัน [1]

2.2 กลไกเจนีวา (Geneva Mechanism) เป็นกลไกที่ใช้ในการแปลงการหมุนของเครื่องจักรที่ทำงานเป็นรอบต่อเนื่อง (Continuous) ให้เป็นทำงานแบบเป็นช่วง ๆ (Intermittent) เป็นประโยชน์ให้สามารถออกแบบการหน่วงเวลาการทำงานของเครื่องจักรได้ กลไกลักษณะนี้นิยมใช้ในระบบของสายพานลำเลียงที่ต้องการให้มีการหยุดการทำงานเป็นช่วง ๆ ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยระบบทางกลศาสตร์เพียงอย่างเดียวโดยไม่จำเป็นต้องใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติเข้าช่วย ข้อดีคือ ทำงานได้แม่นยำ ทนทาน และเสียงเงียบ ข้อเสียคือ มีขนาดใหญ่ และราคาแพง [2]

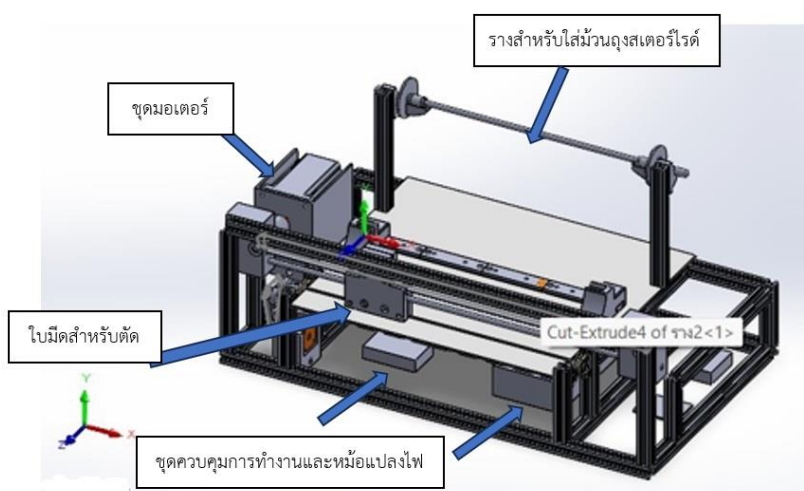
2.3 โปรแกรมอาร์ดูโน (Arduino) เป็นแพลตฟอร์มการพัฒนาฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการสร้างโปรเจกต์อิเล็กทรอนิกส์และโปรเจกต์ IoT (Internet of Things) โดยมีบอร์ดพัฒนาอยู่ในรูปแบบต่าง ๆ สามารถโปรแกรมด้วยภาษา C/C++ และมี IDE (Integrated Development Environment) ที่ใช้งานง่ายในการเขียนโปรแกรมและอัปโหลดลงบอร์ด Arduino ตัวอย่างบอร์ดที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ Arduino Uno, Arduino Mega และ Arduino Nano ซึ่งมีความสามารถต่าง ๆ ในการใช้งานตามความต้องการของโปรเจกต์ต่าง ๆ อาทิเช่น การควบคุมอุปกรณ์ด้วยเซ็นเซอร์ต่าง ๆ การเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต เป็นต้น โดย Arduino มีความนิยมในการใช้ในโปรเจกต์ที่ต้องการความยืดหยุ่นและการพัฒนาที่รวดเร็วในด้านอิเล็กทรอนิกส์และ IoT อย่างเฉพาะโดยนักพัฒนาและนักศึกษาในวงการเทคโนโลยีและการสร้างโปรเจกต์ต่าง ๆ ทั่วโลก [3]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sara Aidrais et.al. [4] ได้ทำการศึกษาและสร้างเครื่องตัดกระดาษต้นแบบ ขนาดทอร์ค 0.084 นิวตันเมตร ความเร็วรอบมอเตอร์ 100 รอบต่อนาที แรงเคลื่อนไฟฟ้า 12 โวลต์ โดยพิจารณาผลการทดสอบในด้านความปลอดภัย ความถูกต้อง ความเร็วในการตัด ความหนาของกระดาษที่ตัดได้ และความสะดวกในการซ่อมบำรุง ผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพเครื่องตัดอยู่ที่ 97% Ragavendiran R et. al. [5] ได้นำกลไกเจนีวา มาสร้างเครื่องตัดกระดาษและนำไปทดสอบใช้ในงานเครื่องเขียนและร้านขายกระดาษ พบว่าสามารถประหยัดเวลาในการตัดกระดาษได้ดีกว่าการตัดกระดาษด้วยแรงงานคน และพบว่าความผิดพลาดในการตัดมีร้อยละความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่า Praveen Kumar et. al. [6] ได้ออกแบบและวิเคราะห์เครื่องตัดกระดาษขนาดเล็กโดยใช้กลไกเจนีวาพบว่าสามารถลดแรงงานในการตัดกระดาษได้และยังใช้ค่าใช้จ่ายที่ถูกลงด้วย แต่ยังไม่สามารถตัดกระดาษขนาดใหญ่และหนาได้ Veeresh Kumar et. al. [7] ได้มีการพัฒนาต่อยอดเครื่องตัดขนาดเล็กและได้เพิ่มระบบการตัดแบบอัตโนมัติ ซึ่งช่วยเพิ่มความสะดวกในการใช้งานได้มากขึ้น Syed Tajuddin et. al. [8] ได้นำโปรแกรมอาร์ดูโนมาเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องตัดกระดาษโดยให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องในเวลาที่กำหนด พบว่าเครื่องตัดกระดาษสามารถทำงานได้ดีกว่าเครื่องตัดที่ใช้ระบบไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ทำการออกแบบโครงสร้างและชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องตัดถุงสโตโรตันแบบตามหลักของกลไกเจนิวา โดยใช้โปรแกรม Solidworks ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การออกแบบโครงสร้างเครื่องต้นแบบ

3.2 จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับประกอบเป็นเครื่องตัดต้นแบบ

3.2.1 สเต็ปเปอร์มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการขับเคลื่อนระบบการตัดและระบบการป้อน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้สเต็ปเปอร์มอเตอร์รุ่น Nema 34 ขนาด 6 แอมแปร์ แรงบิด 8.5 นิวตันเมตร เพลาขนาด 14 มิลลิเมตร และรุ่น Nema 17 ขนาด 1.7 แอมแปร์ แรงบิด 42 นิวตันเซนติเมตร เพลาขนาด 5 มิลลิเมตร

3.2.2 ใบมีดตัดเตอร์นิรภัยเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการตัดถุงสโตรีไรต์ให้ขาดออกจากกัน ซึ่งใบมีดที่ติดตั้งในงานวิจัยนี้คือ Martor หมายเลข 5232.70 มีความหนาใบมีด 0.63 มิลลิเมตร

3.2.3 สายพานเป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อระบบส่งกำลังจากมอเตอร์ให้กับระบบป้อนและระบบตัด ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สายพานหมายเลข HTD 3M ความกว้าง 10 มิลลิเมตร ความหนา 2.4 มิลลิเมตร ความสูงฟัน 1.17 มิลลิเมตร ระยะห่างของฟัน 3 มิลลิเมตร

3.2.4 รอกสายพานเป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อระบบส่งกำลังจากมอเตอร์ให้กับระบบป้อนและระบบตัด ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้รอกสายพานโมเดล 3M-20T-8B จำนวนฟันรอก 20 ฟัน เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 มิลลิเมตร, รอกสายพานโมเดล 30M-15T-8B จำนวนฟันรอก 15 ฟัน เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 มิลลิเมตร และรอกสายพานโมเดล 3M-20T-5B จำนวนฟันรอก 20 ฟัน เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 มิลลิเมตร

3.2.5 เพลาคือวัสดุโครงสร้างของระบบป้อนและระบบตัด ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้เพลาคำจากเหล็กผสมโครเมียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ขนาดความยาว 500 มิลลิเมตร สำหรับระบบการป้อน และขนาดความยาว 800 มิลลิเมตร สำหรับระบบการตัด

3.2.6 ลูกปืนสไลด์เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้กล่องใบมีดที่ใช้ในระบบการตัดสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างไม่ติดขัด ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ลูกปืนสไลด์หมายเลข LM8UU เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 15 มิลลิเมตร ความยาว 24 มิลลิเมตร

3.2.7 เฟลามอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ส่งกำลังต่อจากแกนมอเตอร์ที่ใช้ในระบบการตัด ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้เฟลามอเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร รูเชื่อมต่อขนาด 8x14 มิลลิเมตร

3.2.8 แบร้งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้แกนเฟลาที่ใช้ในระบบการป้อนเคลื่อนที่ได้อย่างไม่ติดขัด ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แบร้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 มิลลิเมตร

3.2.9 ชุดอุปกรณ์ควบคุม ในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์ควบคุมยี่ห้อ Arduino MEGA ควบคุมการทำงานของเครื่องตัดถุงสเตอร์ไรต์อัตโนมัติ

3.2.10 วงจรลดแรงดันไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์ควบคุมยี่ห้อ CC/CV DC Step-Down ลดแรงดันไฟฟ้าที่ส่งไปยังชุดอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องตัดถุงสเตอร์ไรต์อัตโนมัติ

3.2.11 สเต็ปไดรเวอร์ ในงานวิจัยนี้ใช้สเต็ปไดรเวอร์รุ่น HB-860H สำหรับการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ Nema 34 และรุ่น DM542S สำหรับการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ Nema 17

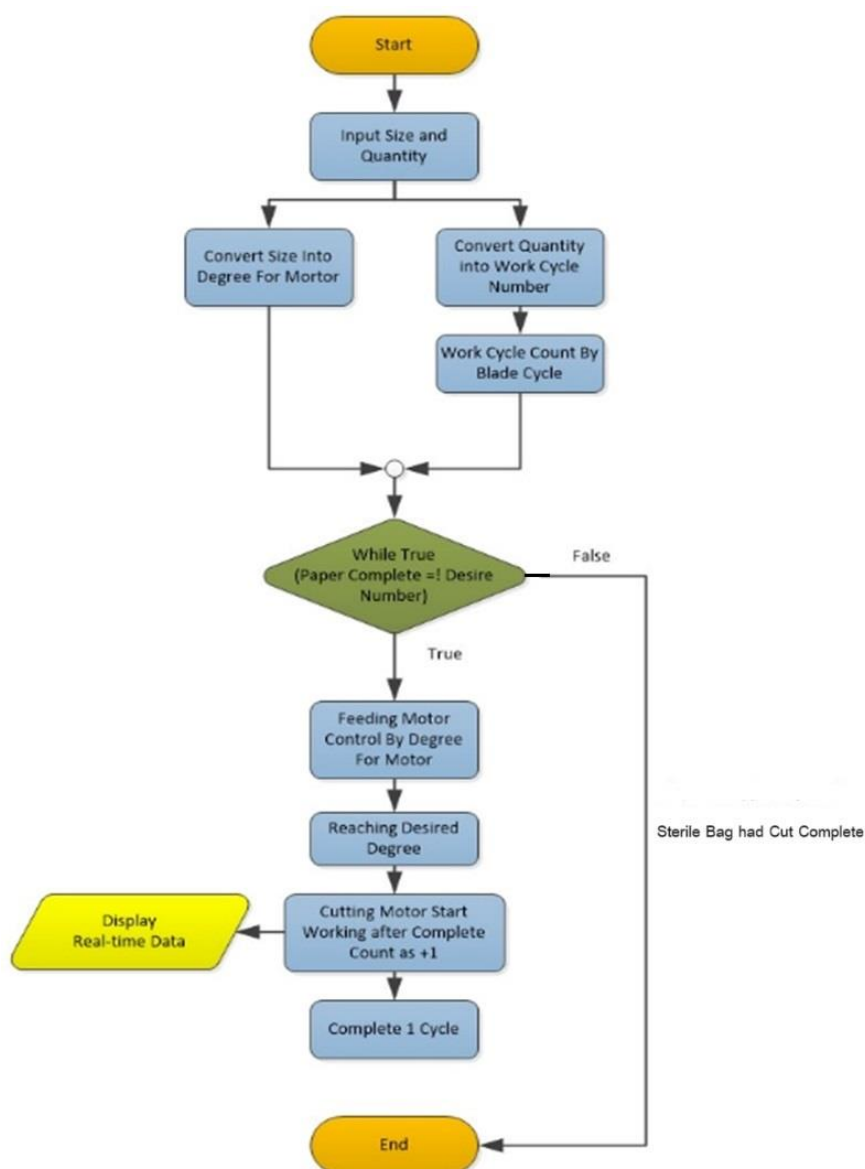
3.2.12 สวิตช์ชิงเฟาเวอร์ซัพพลาย ในงานวิจัยนี้ใช้สวิตช์ชิงสัพพลายขนาด 40 โวลต์ ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับสเต็ปไดรเวอร์ทั้ง 2 ตัว ที่ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ Nema 17 และ Nema 34

เมื่อจัดเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว ทำการประกอบเป็นเครื่องตัดถุงสเตอร์ไรต์อัตโนมัติต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่องตัดถุงสเตอร์ไรต์อัตโนมัติต้นแบบ

3.3 ทำการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ [9] หลังจากที่ได้ทำการประกอบเครื่องต้นแบบเรียบร้อยแล้ว คณะผู้วิจัยได้ทำการเขียนโปรแกรมควบคุมอัตโนมัติด้วยโปรแกรม Arduino IDE จากนั้นทำการทดสอบอุปกรณ์ในรูปแบบที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติ เพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องตัดแล้วจึงนำค่าความยาวถุงสเตอร์ไรต์ที่ตัดได้มาปรับปรุงระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องตัดให้มีความเสถียรมากที่สุด ดังแสดงดังรูปที่ 3



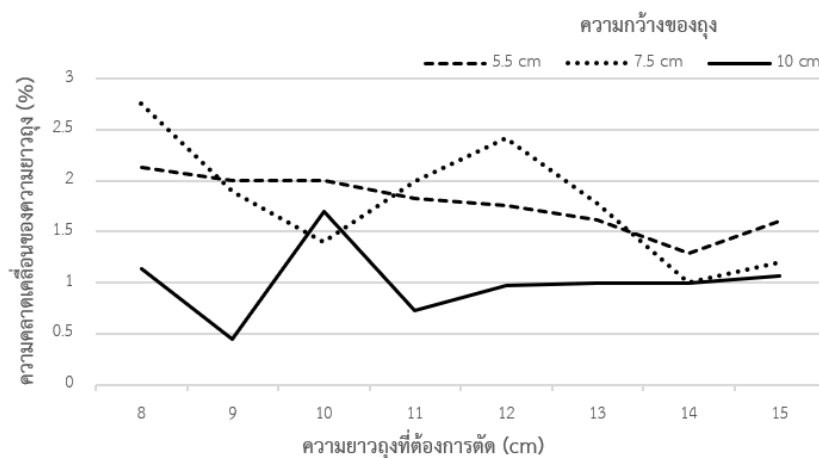
รูปที่ 3 แผนภาพการทำงานของเครื่องตัดถุงสเตอร์ไรต์อัตโนมัติ

4. ผลการวิจัย

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเครื่องตัดถุงสเตอร์ไรต์อัตโนมัติ โดยตัดถุงสเตอร์ไรต์ขนาดความกว้าง 3 ขนาด คือ 5.5 เซนติเมตร, 7.5 เซนติเมตร และ 10 เซนติเมตร ที่ความยาว 8 – 15 เซนติเมตร ขนาดละ 30 ครั้ง แล้วทำการคำนวณค่าเฉลี่ยและความคลาดเคลื่อนของความยาวถุงที่ตัดได้ ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 4

ตาราง ความยาวเฉลี่ยและความคลาดเคลื่อนของการตัดถุงสเตอร์ไรด์ขนาดต่าง ๆ

ความยาว ในการ ตัดถุง (ซม.)	ความกว้างถุง 5.5 ซม.		ความกว้างถุง 7.5 ซม.		ความกว้างถุง 10 ซม.	
	ความยาว เฉลี่ยที่ตัดได้ (ซม.)	ความคลาด เคลื่อน	ความยาว เฉลี่ยที่ตัดได้ (ซม.)	ความคลาด เคลื่อน	ความยาว เฉลี่ยที่ตัดได้ (ซม.)	ความคลาด เคลื่อน
8	8.17	2.13%	8.22	2.75%	8.09	1.13%
9	9.18	2.00%	9.17	1.89%	9.04	0.44%
10	10.20	2.00%	10.14	1.40%	10.17	1.70%
11	11.20	1.82%	11.22	2.00%	11.08	0.73%
12	12.21	1.75%	12.29	2.42%	12.11	0.97%
13	13.21	1.62%	13.23	1.77%	13.13	1.00%
14	14.18	1.29%	14.14	1.00%	14.14	1.00%
15	15.24	1.60%	15.18	1.20%	15.16	1.07%



รูปที่ 4 ความคลาดเคลื่อนในการตัดถุงสเตอร์ไรด์ขนาดต่าง ๆ

จากผลการทดสอบ พบว่า ค่าของความยาวถุงสเตอร์ไรด์ที่ตัดได้จะมีความคลาดเคลื่อนในทุก ๆ ค่าความยาวที่กำหนด โดยการตัดถุงสเตอร์ไรด์ที่ขนาดความกว้างถุง 5.5 เซนติเมตร มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่ากับ 1.29% ที่ความยาวถุง 14 เซนติเมตร การตัดถุงสเตอร์ไรด์ที่มีความกว้างถุง 7.5 เซนติเมตร มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่ากับ 1.00% ที่ความยาวถุง 14 เซนติเมตร และการตัดถุงสเตอร์ไรด์ความกว้างถุง 10 เซนติเมตร มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่ากับ 0.44% ที่ความยาวถุง 9 เซนติเมตร

5. สรุปผลการวิจัย

คณะผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องตัดถุงสเตอร์ไรต์อัตโนมัติ โดยสามารถตัดถุงสเตอร์ไรต์ได้หลายขนาด สามารถนับและแสดงผลจำนวนถุงที่ตัดได้ สามารถกำหนดจำนวนถุงสเตอร์ไรต์ในการตัดต่อเนื่องได้ สามารถถอดและเปลี่ยนใบมีดได้ตามระยะเวลาการใช้งาน ผลการทดสอบพบว่ายังมีความคลาดเคลื่อนของความยาวในการตัดถุงทุกขนาด ซึ่งอาจจะเกิดจากการวัดหรือความคลาดเคลื่อนของมนุษย์ โดยมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดที่ 0.44% เมื่อตัดถุงสเตอร์ไรต์กว้าง 10 เซนติเมตร ที่ความยาว 9 เซนติเมตร และความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่ 2.75% เมื่อตัดถุงสเตอร์ไรต์กว้าง 7.5 เซนติเมตร ที่ความยาว 8 เซนติเมตร

จากผลการวิจัยนี้ พบว่า ขนาดของถุงที่ได้จากการตัดมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือไม่เกิน 3% ซึ่งสามารถลดความคลาดเคลื่อนนี้ได้โดยใช้วิธีการวัดที่ได้มาตรฐานมากกว่าคนวัด เพิ่มจำนวนถุงที่ตัดได้ในจำนวนที่มากขึ้น หรือออกแบบโปรแกรมควบคุมอัตโนมัติให้มีความเสถียรมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้สามารถสร้างเครื่องตัดถุงสเตอร์ไรต์อัตโนมัติต้นแบบที่สามารถลดภาระงานของบุคลากรทางการแพทย์ได้อีกทั้งยังสามารถนำองค์ความรู้นี้ไปพัฒนาต่อยอดในวงกว้าง อาจจะศึกษาเพิ่มขึ้นในเรื่องการลดความร้อนของตัวเครื่อง ความเร็วในการตัดถุง หรือเพิ่มกระบวนการปิดซีลถุง เป็นต้น

6. ข้อเสนอแนะ

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการนำระบบควบคุมอัตโนมัติมาใช้สร้างและพัฒนาเครื่องตัดถุงสเตอร์ไรต์อัตโนมัติ เพื่อใช้ในการลดภาระงานของบุคลากรทางการแพทย์ซึ่งเป็นการศึกษาต้นแบบเท่านั้น ยังสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดให้เครื่องตัดมีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ โดยอาจจะเป็นการลดความร้อนของเครื่องที่เกิดจากการทำงานเป็นเวลานาน เพิ่มความเร็วในการตัด เพิ่มกระบวนการปิดซีลถุง ลดเสียงดังของการทำงานเครื่องตัด ในส่วนของความคลาดเคลื่อนในการตัดนั้น พบว่าเกิดจากความแม่นยำของมอเตอร์ที่ทำการจ่ายถุงสเตอร์ไรต์จึงทำให้ความคลาดเคลื่อนลดลงเมื่อความยาวของถุงเพิ่มมากขึ้น โดยวิธีแก้ไขสามารถทำได้โดยใช้รูปแบบของเซ็นเซอร์มาตรวจสอบความยาวของถุงสเตอร์ไรต์ที่ถูกจ่ายออกมาก่อนทำการตัด แต่การพัฒนาต่อยอดนั้นควรจะคำนึงถึงงบประมาณที่ใช้และคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Benefit of Sterile Bag [Internet]. Bangkok: Rak Mor Medical Company Limited (Head Office); c2024 [cited 2024 Apr 22]. Available from: <https://rakmor.com/product-category/impulse-sealing-and-accessories/sterileright-flat/>
- [2] Britannica, The Editors of Encyclopaedia. Geneva mechanism. Encyclopedia Britannica [Internet]. 1998 Jul 20 [cited 2024 Apr 22]. Available from: <https://www.britannica.com/technology/Geneva-mechanism>.

- [3] ศุภกานต์ แก้วเหลียม, สุคนธ์ พันธุ์เนร, ปราโมทย์ สุขศิริศักดิ์. ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการให้น้ำพืชผัก [Automated Control Systems for Plant Watering]. วารสารวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โรงเรียนนายเรือ. ม.ค.-ธ.ค. 2566;6(1);64-75.
- [4] Sara A, Fatmah Al, Nourah A, Ali M. Design of an automated paper cutting machine. In: Proceedings of the 2nd South American Conference on Industrial Engineering and Operations Management; 2021 Apr 5-8; Sao Paulo, Brazil. Sao Paulo: Springer; 2022. p. 811-7.
- [5] Ragavendiran R, Kumar CM, Sarath A, Babu MM. Design and Fabrication of Automatic Paper Cutting Machine. Int J Res Cult Soc [Internet]. 2018 Jul 31 [cited 2024 Apr 24];2(7):68-71. Available from: <https://ijrcs.org/wp-content/uploads/201807014.pdf>
- [6] Kumar S, Pragatheesan K, Ramachandran M, Ramu P, Sanjay G. Design and fabrication of paper cutting machine using Geneva mechanism. Int J Adv Res Innov Ideas Educ [Internet]. 2019 [cited 2024 Apr 24];5(2):559-65. Available from: https://ijariie.com/AdminUploadPdf/Design_and_Fabrication_of_Paper_Cutting_Machine_Using_Geneva_Mechanism_ijariie9670.pdf
- [7] Kumar KS, Kumar MY, Prasad MH, Vinayaka D, Kumar AR. Design and development of automatic paper cutting machine with mechanism of Geneva. Int J Eng Res Technol (IJERT) [Internet]. 2022 [cited 2024 Apr 25];10(11). Available from: <https://www.ijert.org/design-and-development-of-automatic-paper-cutting-machine-with-mechanism-of-geneva>
- [8] Syed TV, Irfan HD, Jagadeesha S, Prathibha K. Automatic Paper Cutting and Counting Machine. Int J Adv Res Innov Ideas Educ [Internet]. 2023 [2024 Apr 25];9(3):762-7. Available from: https://ijariie.com/AdminUploadPdf/AUTOMATIC_PAPER_CUTTING_AND_COUNTING_MACHINE_ijariie20160.pdf
- [9] Farid G, Benjamin CK. Automatic Control Systems. 10th ed. New York: McGraw-Hill; 2017.

Using Machine Learning (Multiple Regression Model) to Conduct Satellite Derived Bathymetry with Sentinel-2 in Sattahip Bay, Thailand.

สันหนัฐ อีสมาแอล¹

Sanhanat Itsama-ael¹

Received: April 26, 2024

Revised: May 27, 2024

Accepted: May 28, 2024

Abstract

The aim of this study is to utilize machine learning (Multiple Regression Model) to perform Satellite Derived Bathymetry (SDB) with six image bands, namely blue, green, red, near-infrared, NDWI, and NDVI, from Sentinel-2 in Sattahip Bay, Thailand. The results demonstrated that the multiple regression model achieved higher accuracy (48.27%) compared to the ratio algorithm approach with the same areas and datasets. However, the depth values from the multiple regression model cannot meet the standard set by the International Hydrographic Organization (IHO). Nonetheless, they can serve as an initial identifying underwater objects, enhancing the safety of hydrographic surveyors, and reducing survey time.

Keywords: Machine Learning, Satellite Derived Bathymetry, Multiple Regression Model, GIS, SDB

¹ประจำ กพ.ทร.

Attached to Naval Personnel Department

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

1. Introduction

Bathymetric information is crucial for mariners and shoreline residents alike. For seafarers, this data ensures the safety of navigation at sea, aiding in the development of effective sailing plans to reach destinations safely. Additionally, coastal topography along the shorelines assists in determining location, preventing sailors from getting lost. Moreover, bathymetric information is necessary for preserving marine ecosystems. For instance, mangrove forests, acting as nurseries for marine life, provide protection against storm surges. Coral reefs also play a vital role, serving as homes and shelters for various marine species. These ecosystems, in turn, contribute to the economy, especially in maritime shipping, a key mode of transportation for import and export products. Accurate and adequate hydrographic information is essential for safe navigation of ships at sea. Additionally, coastal areas, including beaches, islands, and coral reefs, contribute to the tourism industry. Therefore, bathymetric information is undeniably important.

Bathymetric surveys are conducted on a large scale, requiring significant budgets and time when using SONAR and GNSS equipment on survey ships or when surveyors walk along shorelines collecting positions with GNSS. Furthermore, some areas are inaccessible due to being dangerous for survey ships and teams to reach, posing obstacles to obtaining bathymetric and shoreline information.

Nowadays, there is a method called satellite derived bathymetry (SDB) that is used by many countries globally because satellite images from reliable platforms such as Landsat 8 and Sentinel-2 are freely accessible. In terms of satellite derived bathymetry algorithm, Stumpf et al (2003) introduced the algorithm using fundamental of the ratio transform or empirical method, which is popular and accurate [1]. However, there is another SDB method that uses machine learning approaches that are able to give high accuracy such as multiple regression model.

With the advancement in remote sensing, the challenges above can be overcome by some remote sensing techniques because remote sensing is able to obtain large scales of information without in contact those survey areas. Therefore, the objective of this project is to conduct SDB with the machine learning approach in Sattahip Bay, Thailand, using reference bathymetric data from Hydrographic Department of Royal Thai Navy (HDRTN) and satellite images from Sentinel-2, and validate the results whether they can meet International Hydrographic Organization (IHO) standard or not.

2. Literature Review

SDB is a remote sensing technique that uses satellite images to measure depth values. This technique has been developed since 1978 with a standard algorithm employing a linear transform [2]. The equation is shown in Equations (1) and (2)

$$Z = a_0 + a_i X_i + a_j X_j \quad (1)$$

$$X_i = \ln[R_w(\lambda_i) - R_\infty(\lambda_i)] \quad (2)$$

where z is the depth; a_0 , a_i , and a_j are coefficients determined from multiple regression [2]. In terms of X_i and X_j , they are derived from Equation (2), where R_w is the reflectance of the water and R_∞ is the water column reflectance if the water is optically deep [2].

As can be seen from the standard algorithm, there are five variables that require tuning that are a_0 , a_i , a_j , R_w , and R_∞ , making this equation more complicated and less effective in areas with a seafloor that has an extremely low albedo [1]. The main reason why the linear transform algorithm struggles in low albedo areas is that if A_d (bottom albedo) is lesser than R_∞ in Equation (3)

$$R_w = (A_d - R_\infty)\exp(-gz) + R_\infty \quad (3)$$

this causes R_w to be a negative value. Thus, the Equation (2) will fail, because the inside logarithm cannot be negative. Consequently, a simpler and more accurate algorithm was developed by using the ratio transform, which required only two bands, blue and green, as shown in Equation (4) [1].

$$Z = m_1 \frac{\ln(\text{band blue})}{\ln(\text{band green})} + m_0 \quad (4)$$

It is evident that this equation is the same as the linear regression equation $y = ax + b$. The ratio transform utilizes the fundamental concept that blue and green bands can penetrate through shallow water, but the green band decays faster than the blue band, resulting in an algorithm that increases with depth.

The ratio algorithm was applied to IKONOS images with spatial resolution of 4 meters to compare the results with the linear transform algorithm. The result showed that the ratio algorithm can obtain depth values in area up to 25 meters with clear water, while the linear transform algorithm only distinguishes depth up to 15 meters. Moreover, the ratio transform can be used in extremely low albedo areas, whereas the linear transform algorithm cannot, given a spatial resolution of four meters or more [1].

In addition, the ratio algorithm was compared with the regression kriging algorithm using satellite images from Landsat 8, RapidEye, and Pleiades. The result showed all sources of satellite images provide satisfactory results, but Landsat 8 demonstrated more accuracy with linear regression than regression kriging. Meanwhile, the results with linear regression than regression kriging from Pleiades showed high accuracy. Overall, regression kriging performed better than linear regression [3].

In terms of the machine learning approach, it utilizes the relationships between the satellite images and bathymetric depths from the training data, and the training model is used to derive the rest of the depth values in the study area [4]. There are many machine learning models that have been used for SDB such as random forest regressors, Convolution Neural Networks, Support Vector Machine, U-Net, etc. [4]. However, a multiple regression model was used in this study. In multiple regression, there is one dependent variable and several independent variables instead of one independent variable in linear regression as shown in the Equation (5) [5].

$$y' = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (5)$$

Where y' is the dependent variable in this case, which is depth values, $x_1, x_2, \dots, x_k$ are independent variable that are image bands for SDB, $b_1, b_2, \dots, b_k$ are coefficients for each independent variables, and a is intercept.

From the previous studies above, the ratio algorithm has been used with various kinds of satellite images because it is less complex and highly accurate as compared to other methods. However, it is interesting to use the machine learning approach for SDB with Sentinel-2 since the multiple number of image bands can be included in the multiple regression model, resulting in more accurate and flexible predictions. Therefore, the multiple regression model was utilized with Sentinel-2 in this research.

3. Study Area and Data

The Sattahip Bay, Thailand, was selected as the study area because its proper topographic and hydrographic characteristics. As depicted on the Thai nautical chart no. 115 [6] in Figure 1, there are various depth areas and dangerous objects (e.g., underwater rocks, wrecks, and shallow areas), making it particularly useful for testing whether SDB can detect them or not. Furthermore, all required data, especially bathymetric data, can be obtained in this area.

Firstly, Thai nautical chart no. 115 [6] was used as background as well as topographic and hydrographic reference. Secondly, bathymetric data in point cloud format in the study area from HDRTN was used as the reference depth to compute SDB and validate the results [7]. Next, satellite images from Sentinel-2 in 2023 were used, as shown in Table 1. Finally, ArcGIS Pro, Microsoft Office Excel, and Python were used to conduct SDB, multiple regression model and compute statistics.

Table 1 Satellite Bands Used.

Spectrum	Sentinel 2
Blue	Band 2
Green	Band 3
Red	Band 4
NIR	Band 8

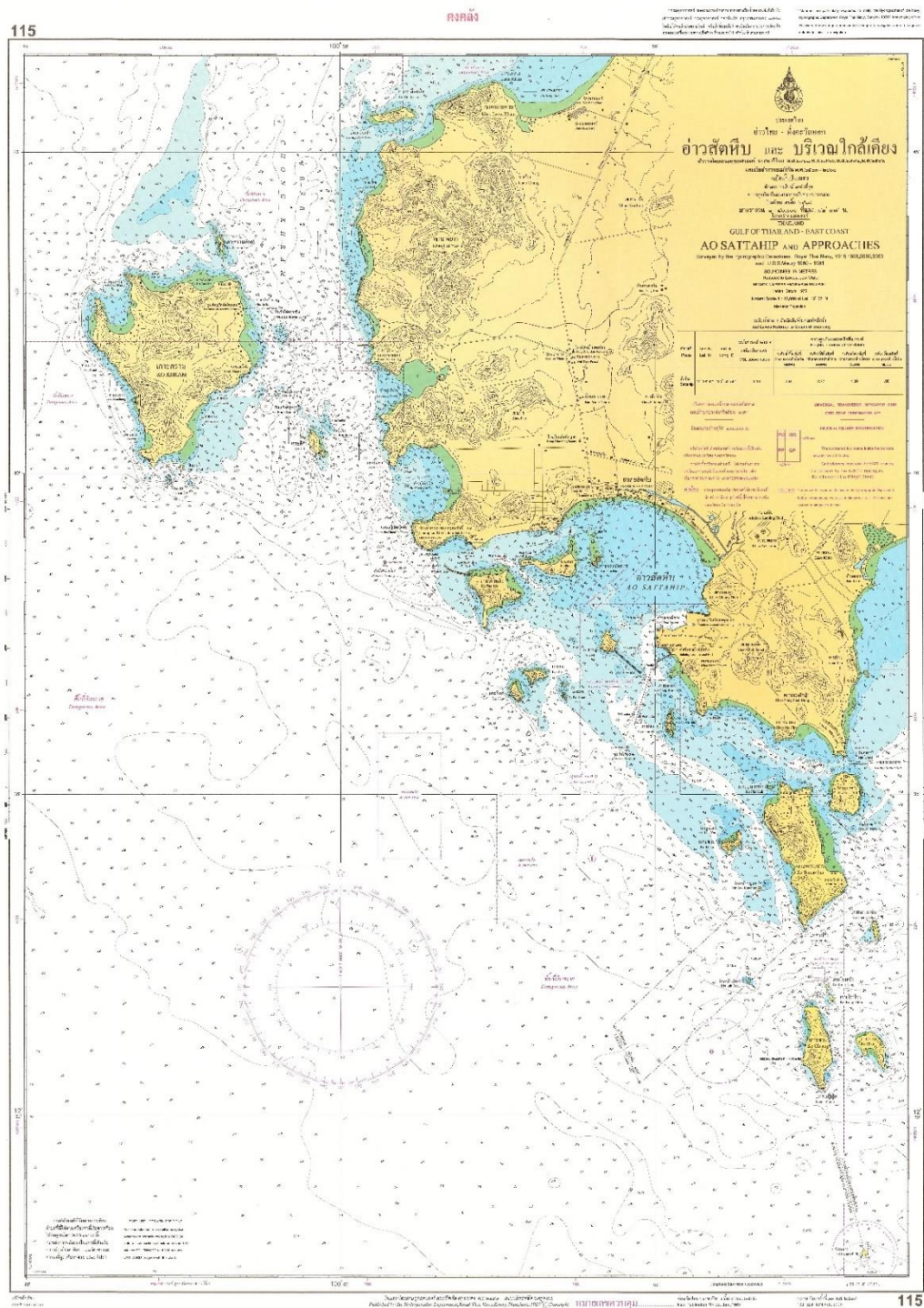


Figure 1 Thai Nautical Chart No.115, Sattahip Bay [6]

4. Methods

According to chapter 11 of the IHO-IOC GEBCO Cook Book, “LANDSAT 8 Satellite-Derived Bathymetry” demonstrates how to conduct SDB using Landsat 8 [8], which was used as reference for the methodology in this project. However, some steps were adjusted to suit this project, such as using a machine learning approach instead of the empirical method, utilizing a Normalized Difference Water Index (NDWI) and an NDWI threshold to remove the land area. Additionally, the images from Sentinel-2 were used in this project due to its higher spatial resolution, which is 10-meter spatial resolution. The SDB method with machine learning approaches can be divided into five steps below.

4.1 Download and Filter Data

As discussed in the previous section, Sentinel-2 bands blue, green, red and NIR were downloaded from European Space Agency (ESA), as well as bathymetric data in point cloud format in the study area were provided by HDRTN. Afterward, each pixel value was converted into a floating – point representation for finer resolution. Then, all bands were filtered with the low pass filter tool to obtain smoother images that mitigate outlines in images.

4.2 Remove Land Areas

Since water areas are only required for the SDB algorithm, the water areas were extracted using the Normalized Difference Water Index (NDWI) and NDWI threshold, as shown in Equation (6) and (7).

$$NDWI = \frac{(Green-IR)}{(Green+IR)} \quad (6)$$

$$T = (mean_w + mean_L)/2 \quad (7)$$

where *Green* is green band, *IR* is infrared band, *T* is NDWI threshold, *mean_w* is mean of NDWI value on the water, and *mean_L* is mean of NDWI value on the land. Firstly, an NDWI surface was generated using Equation (6), as depicted in Figure 2. Then, a sample area was taken using the coastline on the nautical chart as a reference for computing the NDWI threshold to obtain means of water and land areas, as shown in Figure 2. After that, the NDWI threshold was computed based on Equation (7). Lastly, the land areas of each image band were removed, as presented in Figure 2.

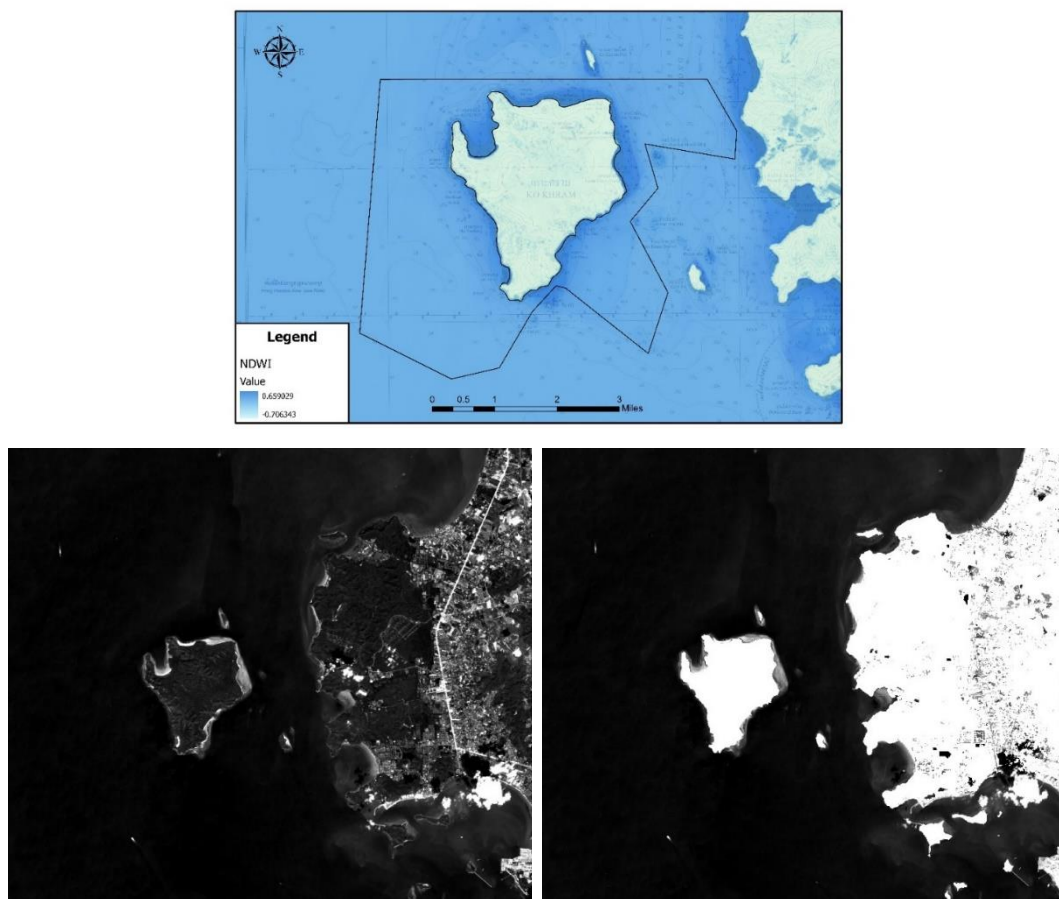


Figure 2 The Sample Area for the NWDI Threshold (Top), before Remove Land Areas (Bottom Left), after Remove Land Areas (Bottom Right)

4.3 Generate the Multiple Regression Model

As multiple regression models require several independent variables, six image bands were introduced to the model: blue, green, red, near infrared (NIR), NDWI, and NDVI. In the case of NDVI, red and NIR bands were applied with Equation (8) to obtain the NDVI layer.

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + red)} \quad (8)$$

Then, bathymetric information from HDRTN was used to be the dependent variable, and the area between the mainland and Ko Kham Island was chosen as the training area, as shown in Figure 3. This area was selected due to its various water depth ranges from 0 to 25 meters, which is the maximum depth that the ratio algorithm could survey based on the previous studies. Hence, 772 samples were selected in this area to build the model. Nevertheless, samples

deeper than 10 meters were removed from the model because, after 10 meters, the model began to saturate based on the ratio algorithm. This implies that based on the atmospheric and environmental conditions at that time the images were taken, the blue and green lights could penetrate through the water to a depth of 10 meters. Consequently, a ten-meter depth was set as the maximum depth prediction in this study.

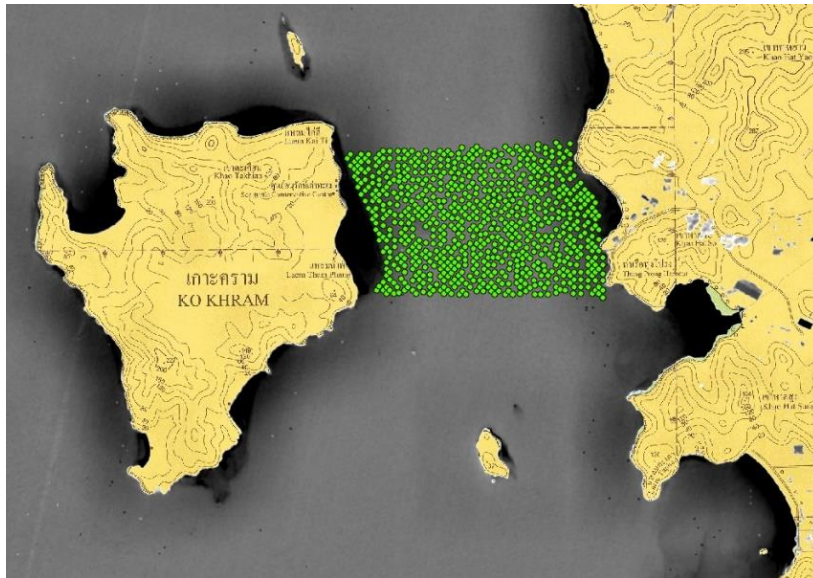


Figure 3 The Training Area and 772 Samples for Building the Model [6].

After all independent variables were prepared, each layer was extracted based on the bathymetric information points in the training area, resulting in a spreadsheet in CSV format containing independent and dependent variables. After that, those variables were fed into the machine learning model, which was a multiple regression model using Python programming language, based on the Equation (9), to obtain all coefficients ($b_1, b_2, \dots, b_6$) and intercept (a).

$$SDB\ Depth = a + b_1Blue + b_2Green + b_3Red + b_4NIR + b_5NDWI + b_6NDVI \quad (9)$$

4.4 Apply the Linear Formulas

After obtaining the model as depicted in Equation (9) from section 4.3, the results were obtained by applying these models back in ArcGIS Pro using the “Raster Calculator” tool. The results are the surface layers representing depth values, as shown in Figure 4.

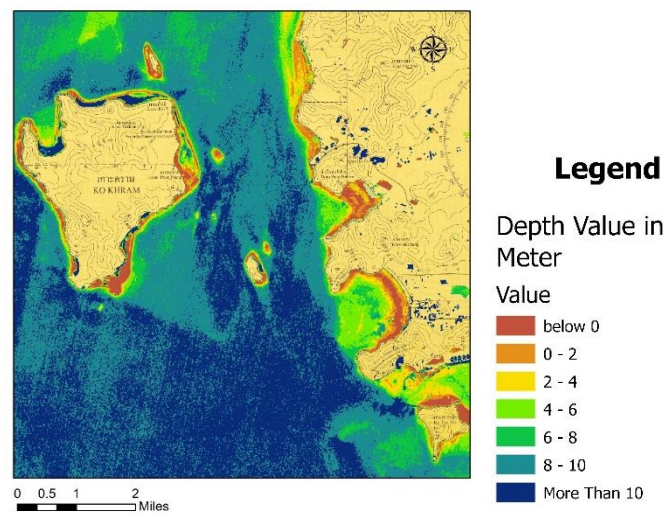


Figure 4 The Final Result from Sentinel-2 [6]

4.5 Validation

To validate the result, testing sets were selected from the areas where depth values ranged from 0 to 10 meters because the model was generated to predict depth less than 10 meters. There were 341 depth values in the testing sets chosen throughout the study area, as presented in Figure 5.

Then, “Extract Value to Point” tool in ArcGIS Pro was utilized to extract a set of paired values between reference depth and SDB depth values. This set of pair values was exported in CSV format for validation in Python.

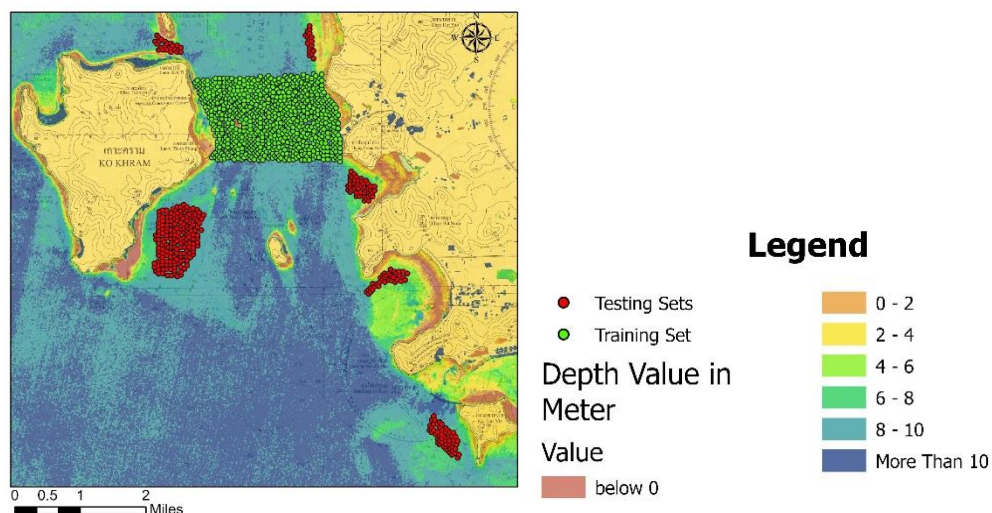


Figure 5 Training and Testing Sets [6]

Python was used to compute RMSE and a 95% confidence interval overall and for each range of depth value so that the trend of accuracy can be analyzed. Firstly, “Pandas” and “Math” packages were imported because Pandas is a powerful package for data manipulation, and “Math” is useful for complex computation. Then, the set of paired values between reference depth and SDB depth values was imported into Python to be a data frame using the Pandas package. After that, the data frame was converted into a dictionary. Lastly, the dictionary was input into the functions that compute RMSE and a 95% confidence interval overall and for each depth range such as 2 to 3 meters, 3 to 4 meters, 4 to 5 meters, and so on.

5. Results and Discussion

After the raw images were filtered with a low-pass filter, they became smoother, mitigating noises and outlines as compared to the result without the filter. Regarding the NDWI threshold, the means of NDWI values for water and land areas were 0.084 and -0.508, respectively, as shown in Table 2. Hence, the NDWI threshold as computed using Equation (7) was -0.212. As seen from the result in Figure 6, areas that experience low tide effects such as cliffs or high-slope shorelines, showed a higher accuracy of coastline delineation compared to beached areas or low-slope shorelines. This discrepancy may be due to tide effects since the shoreline in the nautical chart represents the coastline during the highest tide, particularly during spring tide. However, the images were not adjusted for tide elevation due to limitation in available information. Therefore, considering tide effects for coastline detection is an area of improvement for future research.

Table 2 Statistic Parameters of Water and Land Area Samples for Computing NDWI Threshold

Types	Min	Max	Mean	STD	Median
Water	-0.527	0.659	0.084	0.103	0.047
Land	-0.650	0.611	-0.508	0.151	-0.545



Figure 6 The Image after Remove Land in a High Slope Region (Left) [6], The Image after Remove Land in a Low Slope Region (Right) [6]

After applying the SDB algorithm, the training set of 722 samples was initially used to generate the multiple regression model. However, upon plotting 772 samples, it was found that the model trend saturated after a depth of 10 meters. Consequently, samples with depths greater than 10 meters were removed, leaving 143 samples for generating the model. This suggests that, based on environmental conditions such as transparency, atmosphere, and light attenuation at that time, the blue and green bands could penetrate through the water only up to 10 meters. Sattahip bay, Thailand, is located near four rivers that are Mae Klong, Tha Chin, Chao Phraya, and Bang Pakong, resulting in high sediment loads from the land, leading to low transparency in the study area. The result of multiple regression model is presented in Figure 4 and Equation (10) with $R^2 = 0.841$.

$$SDB\ Depth = 7.44221 + 0.03396Blue - 0.0002Green - 0.03986Red + 0.010112NIR - 130.79153NDWI - 139.35844NDVI \quad (10)$$

To validate the results, testing sets were chosen throughout the study area, as shown in Figure 5, considering a variety of water depth ranging from 0 to 10 meters in the testing areas based on the models that can predict depth between 0 and 10 meters. Thus, these areas were selected. After selecting these 341 samples, standard deviations, and Root Mean Square Error (RMSE) were computed, along with 95 % confidence intervals. Finally, the 95 % confidence intervals were compared with the Standard of Hydrographic Survey. The results indicate that the multiple regression model with Sentinel-2 cannot meet the Standard of

Hydrographic Survey because the 95 % confidence intervals from the results exceed the maximum 95 % confidence intervals allowed by the standard, as shown in Table 3.

Table 3 The Sentinel 2 Validation Results in Overall with Multiple Regression Model.

Observation		IHO Standard with 10-meter depth			
RMSE	95% Con	Order 2	Order 1b	Order 1a	Special Order
0.994	1.948	1.026	0.517	0.517	0.261

Additionally, 95 % confidence intervals by depth ranges were computed, and all depth ranges failed to meet the standard. The result demonstrated that high discrepancies occurred in depths below five meters, but the accuracy improved in the depths ranging from five to nine meters, as shown in Figure 7. However, the 95 % confidence interval from the multiple regression model gave higher accuracy than the linear regression model from the empirical method at 48.27 %, as shown in Table 4

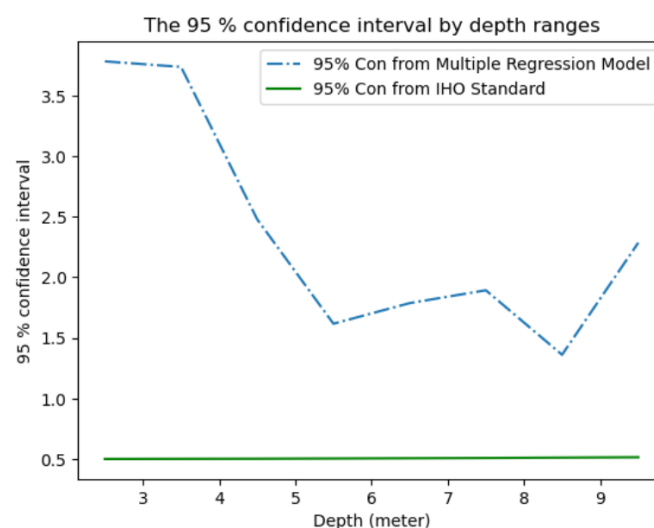


Figure 7 The 95 % confidence interval by depth ranges

Table 4 The Sentinel 2 Validation Results in Overall with Linear Regression Model.

Observation		IHO Standard with 10-meter depth			
RMSE	95% Con	RMSE	95% Con	RMSE	95% Con
1.921	3.766	1.921	3.766	1.921	3.766

Although the results cannot meet the Standard of Hydrographic Survey and cannot be used to create a nautical chart, there are some advantages that can be useful for hydrographic survey. Firstly, SDB can assist hydrographers in initially identifying underwater objects, as most underwater rocks can be detected by SDB, as presented in Figure 8. This capability can reduce the time and cost required to search for these objects from scratch, ultimately enhancing the safety of hydrographers, survey equipment, and survey ships.

In terms of “Search and Rescue” (SAR) for a sinking ship or plane crash, searching for underwater objects using survey ships can be a lengthy process, especially in large areas. Therefore, SDB can be used as an initial search to identify the most possible spots for a sinking ship or plane crash.

In remote areas that are not accessible by survey ships, SDB can serve as a tool for hydrographic surveying. Hydrographic offices can utilize SDB in such areas, but it should be noted on the map that the survey was conducted using SDB. While having some water values on the map is preferable for mariners compared to leaving it blank, clear communication about the survey method is crucial.

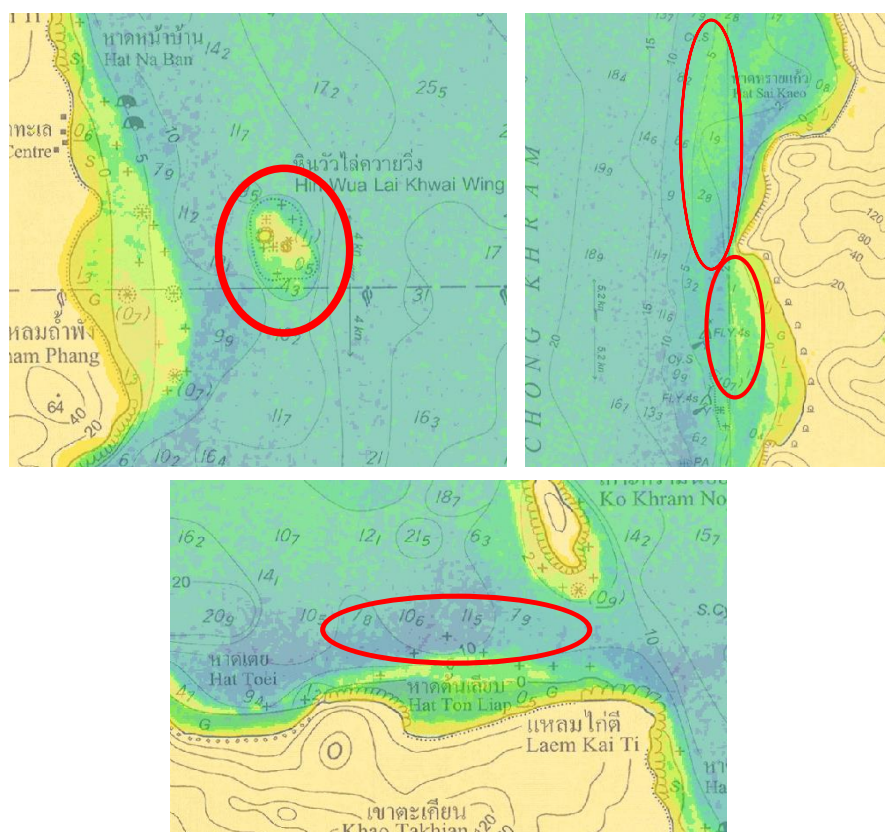


Figure 8 Underwater Rocks Detected by SDB [6].

6. Conclusions

Bathymetric information is fundamental for various activities such as water navigation, ecosystem preservation, maritime shipping, and the tourist industry. Inaccurate and insufficient bathymetric information can have significant effects on these activities, particularly for coastal countries that rely on these activities for economic purposes. Therefore, Bathymetric information is crucial for a country's prosperity.

However, on-site hydrographic survey methods require substantial budgets, and they are time consuming. Consequently, this is an area where remote sensing can bridge the gap by using satellite derived bathymetry (SDB) to obtain bathymetric information. Hence, the objective of this study is to apply the SDB technique with multiple regression model and Sentinel-2 images to measure depth values in Sattahip Bay, Thailand, and validate the results against the IHO standard.

From the results, it is observed that multiple regression model with Sentinel-2 images cannot meet the standard. However, they can be initially used to pre-identify underwater objects such as underwater rocks and wrecks, allowing hydrographers to save time in searching for them from scratch. In addition, SDB is useful for mapping unreachable areas and search and rescue (SAR) missions, such as sinking ships and plane crashes. In terms of accuracy, the multiple regression model performed higher accuracy than the ratio algorithm, which utilizes linear regression model at 48.27%.

For further study, it is recommended that water transparency in the study area should be considered in the result because transparency plays a significant role in SDB [8]. Additionally, other hydrographic survey standards, such as United Kingdom Hydrographic Office (UKHO) should be used for comparison with SDB results. Lastly, to enhance accuracy, tide information should be taken into account in the NDWI threshold and when subtracting the final depth values.

Reference

- [1] Stumpf RP, Holderied K, Sinclair M. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnol Oceanogr* [Internet]. 2003 [cited 2024 Jan 23];48(1):547-56. Available from: https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547
- [2] Lyzenga D. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and LANDSAT data. *Int J Remote Sens* [Internet]. 1981 Jan [cited 2024 Jan 27];2(1):71-82. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/233151938>

- [3] Cahalane C, Magee A, Monteys X, Casal G, Hanafin J, Harris P. A comparison of Landsat 8, RapidEye and Pleiades products for improving empirical predictions of satellite-derived bathymetry. *Remote Sens Environ* [Internet]. 2019 [cited 2024 Jan 30];233:111414. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111414>
- [4] International Hydrographic Organization. International Hydrographic Organization: Guidance to Satellite-Derived Bathymetry: B-13 Edition 1.0.0 [Internet]. Monaco: International Hydrographic Organization; 2024 [cited 2024 Feb 1]. Available from: https://iho.int/uploads/user/pubs/bathy/B_13_Ed100_032024.pdf
- [5] Bluman AG. ELEMENTARY STATISTICS: A STEP BY STEP APPROACH [Internet]. 9th ed. New York: McGraw-Hill; 2014 [cited 2024 Feb 2]. Available from: [https://students.aiu.edu/submissions/profiles/resources/onlineBook/w3Q8y4_Elementary%20Statistics_%20Step-By-Step%20Approach%209th%20ed%20\(2014\).pdf](https://students.aiu.edu/submissions/profiles/resources/onlineBook/w3Q8y4_Elementary%20Statistics_%20Step-By-Step%20Approach%209th%20ed%20(2014).pdf)
- [6] Hydrographic Department of Royal Thai Navy. Thailand 1: 40000 Nautical Chart Number 115 Ao Sattahip. Bangkok: Hydrographic Department of Royal Thai Navy; 2006.
- [7] Hydrographic Department of Royal Thai Navy. Thailand Bathymetric Data: Number 115. Bangkok: Hydrographic Department of Royal Thai Navy; 2006.
- [8] International Hydrographic Organization. The IHO-IOC GEBCO Cook Book: IHO Publication B-11: IOC Manuals and Guides 63 [Internet]. Monaco: International Hydrographic Organization; 2019 [cited 2024 Feb 5]. Available from: https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lsa/GEBCO_Cookbook/documents/CookBook_20191031.pdf
- [9] International Hydrographic Organization. International Hydrographic Organization: Standard for Hydrographic Surveys: S-44 Edition 6.0.0 [Internet]. Monaco: International Hydrographic Organization; 2020 [cited 2024 Feb 12]. Available from: https://repository.oceanbestpractices.org/bitstream/handle/11329/388.2/S-44_Edition_6.0.0_EN.pdf?sequence=5&isAllowed=y

พลังงานคลื่น: ศักยภาพและโอกาสในการผลิตไฟฟ้าเพื่ออนาคตที่ยั่งยืนของไทย

Wave Energy: Potential and Opportunities in Electricity Generation for Sustainable Thailand's Future

ปวริศ ทองดอนเหมือน¹ วุฒิรงค์ คงวุฒิ² พัฒน์ศรีบุญ เล้าหไพบุลย์³ และ อรณิชา คงวุฒิ⁴

Pawarit Thongdonmuen¹ Wuttirong Kongwut² Phatsaran Laohhapaibon³ and Ornnicha Kongwut⁴

Received: April 28, 2024

Revised: June 4, 2024

Accepted: June 5, 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานคลื่นในปัจจุบันตลอดจนศักยภาพและโอกาสในการประยุกต์ใช้ในบริบทของประเทศไทย โดยในส่วนแรกได้นำเสนอหลักการพื้นฐานทางฟิสิกส์ของคลื่นทะเล ประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคลื่น และกลไกการทำงาน รวมถึงเปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยกับการผลิตไฟฟ้าจากเขื่อนพลังน้ำ ต่อมาได้รวบรวมสถานภาพล่าสุดของโครงการโรงไฟฟ้าคลื่นในต่างประเทศ ทั้งในแง่ของขนาดกำลังการผลิต ประสิทธิภาพ ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และแผนการพัฒนาในอนาคต ผลการศึกษาพบว่า ณ สิ้นปี ค.ศ.2020 มีกำลังการผลิตติดตั้งรวมราว 60 เมกะวัตต์ (Megawatt : MW) คิดเป็นเพียงร้อยละ 0.00006 ของการผลิตไฟฟ้าทั่วโลก แต่มีแนวโน้มเติบโตสูง โดยคาดว่าจะในปี ค.ศ.2030 และ 2050 จะเพิ่มขึ้นเป็น 10 จิกะวัตต์ (Gigawatt : GW) และ 100 GW ตามลำดับ ประเทศไทยซึ่ง

¹นักเรียนสาขาไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยการอาชีพพนมทวน จว.กาญจนบุรี

Electrical Engineering Student, Phanomthuan Industrial and Community Education College

²นักบินประจำกอง กองบิน 2 กองทัพอากาศไทย ลพบุรี

Wing 2, Royal Thai Air Force, Lopburi

E-mail: wuttirong_k@rtaf.mi.th

³หจก.บุญพาวาสนาสง 84 เขตบางแค กรุงเทพมหานคร

Boonpawassanasong Partnership, 84 Bangkae, Bangkok

E-mail: wirinwinu4289@gmail.com

⁴ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี

Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Kanchanaburi Rajabhat University

E-mail: ornnicha.k@kru.ac.th

มีแนวชายฝั่งทะเลยาวกว่า 2,811 กิโลเมตร (kilometer : km) จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าพื้นที่ที่มีศักยภาพและความเหมาะสมสำหรับการติดตั้งโรงไฟฟ้าคลื่นอยู่หลายแห่ง โดยเฉพาะบริเวณอันดามันตอนล่างและชายฝั่งภาคตะวันออก การผลักดันโครงการนำร่องเหล่านี้จะช่วยสร้างประโยชน์ต่อประเทศในวงกว้าง อาทิ การเสริมความมั่นคงให้กับระบบไฟฟ้า การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การสร้างงานและกระตุ้นเศรษฐกิจท้องถิ่น รวมถึงการส่งเสริมวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีภายในประเทศ การจะบรรลุศักยภาพดังกล่าวได้ จำเป็นต้องอาศัยความร่วมมือจากทุกภาคส่วน โดยเฉพาะการกำหนดนโยบายและมาตรการสนับสนุนจากภาครัฐควบคู่ไปกับการมีส่วนร่วมของประชาชนในการบริหารจัดการพื้นที่ชายฝั่งอย่างสมดุลและยั่งยืน หากดำเนินการได้อย่างจริงจังในทศวรรษนี้ คาดว่าภายในปี ค.ศ.2040 ประเทศไทยจะมีโรงไฟฟ้าคลื่นที่ผลิตไฟฟ้าได้มากกว่า 500 MW

คำสำคัญ: พลังงานคลื่น, โรงไฟฟ้าคลื่น, พลังงานหมุนเวียน, ความมั่นคงทางพลังงาน, การพัฒนาที่ยั่งยืน

Abstract

This article aims to review the current literature on wave energy conversion technologies, as well as the potential and opportunities for their application in the context of Thailand. The first part presents the basic physics principles of ocean waves, types of wave energy converters and their working mechanisms, including a comparison of advantages and disadvantages with hydroelectric power generation. It then compiles the latest status of wave power projects abroad, in terms of installed capacity, efficiency, economic viability, and future development plans. The study found that as of the end of 2020, the total installed wave energy capacity was around 60 MW, accounting for only 0.00006% of global electricity generation, but with a high growth trend. It is projected to increase to 10 GW in 2030 and 100 GW in 2050. Thailand, with more than 2,811 km of coastline, has been preliminarily identified as having several potential and suitable areas for installing wave power plants, especially in the lower Andaman region and the eastern coast. Promoting these pilot projects would bring wide-ranging benefits to the country, such as enhancing the security of the electricity system, reducing greenhouse gas emissions, creating jobs and stimulating local economies, as well as promoting domestic research and technology development. To realize this potential, cooperation from all sectors is essential, particularly policy support and incentive measures from the government, coupled with public participation in balanced and sustainable coastal area management. If seriously implemented in this decade, it is expected that by 2040, Thailand will have wave power plants generating more than 500 MW of electricity.

Keywords: Wave Energy, Wave Power Plants, Renewable Energy, Energy Security, Sustainable Development

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญและความจำเป็นของการพัฒนาพลังงานทางเลือกในบริบทโลกปัจจุบัน

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและปัญหามลพิษเป็นความท้าทายระดับโลกที่ทวีความรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งหนึ่งในสาเหตุสำคัญคือการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล [1] องค์การสหประชาชาติจึงได้กำหนดเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals : SDGs) ข้อที่ 7 ว่าด้วยพลังงานสะอาดที่ทุกคนเข้าถึงได้ในราคาที่ซื้อหาได้ [2] ประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกจึงให้ความสำคัญกับการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียนเพื่อความมั่นคงทางพลังงานและการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยคาดว่าภายในปี ค.ศ.2050 พลังงานหมุนเวียนจะมีบทบาทถึงร้อยละ 35 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั่วโลก ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานสะอาดจึงเป็นแนวทางที่จำเป็นเพื่อการเติบโตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและยั่งยืนในระยะยาว

1.2 สถานการณ์พลังงานไฟฟ้าของไทยและการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล

ปัจจุบันประเทศไทยมีกำลังผลิตไฟฟ้ารวมราว 46,090 MW โดยพึ่งพาก๊าซธรรมชาติในสัดส่วนถึงร้อยละ 60 ของเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าทั้งหมด การนำเข้าก๊าซและถ่านหินในปริมาณสูงนำมาสู่ความเสี่ยงด้านความมั่นคงทางพลังงานและเสถียรภาพด้านราคาแม้จะมีการส่งเสริมพลังงานหมุนเวียนตามแผนพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan : AEDP) 2018 แต่สัดส่วนยังคงต่ำเพียงร้อยละ 10 รัฐบาลจึงต้องเร่งสร้างความหลากหลายของแหล่งผลิตไฟฟ้าเพิ่มเติมโดยให้ความสำคัญกับศักยภาพของพลังงานทดแทนในประเทศ เช่น แสงอาทิตย์ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ ลม และคลื่นทะเล [3] เพื่อลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลจากต่างประเทศและบรรเทาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1.3 แนวคิดการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานคลื่นทะเล ข้อดี และศักยภาพเบื้องต้น

คลื่นทะเลถือเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูง ด้วยความหนาแน่นพลังงานที่มากกว่าแสงอาทิตย์และลมถึง 5 เท่า อีกทั้งยังมีความสม่ำเสมอ คาดการณ์ได้ และเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง การนำคลื่นทะเลมาผลิตไฟฟ้าจะช่วยสนับสนุนการกระจายตัวของแหล่งผลิต สร้างงานในท้องถิ่น ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และไม่ส่งผลกระทบต่อชุมชนบนฝั่ง [4] เทคโนโลยีโรงไฟฟ้าคลื่นมีความก้าวหน้ามากขึ้นโดยมีการติดตั้งและทดสอบแล้วในหลายประเทศ เช่น อังกฤษ สหรัฐฯ ออสเตรเลีย จีน และเกาหลี ประเทศไทยมีแนวชายฝั่งทะเลยาวกว่า 2,811 km จึงมีศักยภาพสูงในการพัฒนาโรงไฟฟ้าคลื่นเพื่อผลิตไฟฟ้าให้กับภาคใต้และภาคตะวันออก [5]

1.4 วัตถุประสงค์ของบทความในการนำเสนอความก้าวหน้า ความเป็นไปได้ และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีผลิตไฟฟ้าจากคลื่น

บทความนี้มีเป้าหมายเพื่อทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบเกี่ยวกับความก้าวหน้าล่าสุดของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากคลื่นครอบคลุมตั้งแต่หลักการทํางาน ประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตัวอย่างโครงการ สถิติการผลิต ตลอดจนการวิเคราะห์ต้นทุนและความคุ้มค่าในการลงทุน นอกจากนี้ยังมุ่งประเมินความเหมาะสมและความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวในบริบทของไทยโดยพิจารณาจากสภาพคลื่น

พื้นที่ที่มีศักยภาพ ประโยชน์ต่อระบบไฟฟ้า เศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม ตลอดจนเสนอแนะแนวทางการวิจัยพัฒนาและการสนับสนุนจากภาครัฐเพื่อผลักดันให้การผลิตไฟฟ้าจากคลื่นกลายเป็นอีกทางเลือกสำคัญของการสร้างความมั่นคงทางพลังงานอย่างยั่งยืนสำหรับประเทศไทย [6, 7]

2. ทฤษฎีและหลักการทำงาน

2.1 พื้นฐานทางฟิสิกส์ของคลื่นทะเล ความสูง ความยาว คาบ และพลังงาน

คลื่นทะเลเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างลมกับผิวน้ำทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำในลักษณะเป็นคลื่นขึ้นลงและเคลื่อนที่ไปข้างหน้า พารามิเตอร์สำคัญที่ใช้อธิบายคุณลักษณะของคลื่น ได้แก่ ความสูงคลื่น (Wave Height) ความยาวคลื่น (Wavelength) คาบ (Period) และพลังงาน (Energy) [8, 9]

2.1.1 ความสูงคลื่น (H) คือ ระยะแนวตั้งจากจุดสูงสุด (ยอดคลื่น) ถึงจุดต่ำสุด (ท้องคลื่น) มีหน่วยเป็นเมตร (m)

2.1.2 ความยาวคลื่น (L) คือ ระยะห่างระหว่างยอดคลื่น 2 ลูกที่อยู่ติดกันวัดได้ในหน่วย m

2.1.3 คาบ (T) คือ เวลาที่คลื่นหนึ่งลูกเคลื่อนที่ผ่านจุดใดจุดหนึ่งมีหน่วยเป็นวินาที (s) โดยทั่วไปแล้วคาบของคลื่นในทะเลมักจะอยู่ในช่วงประมาณ 4-10 s ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของแหล่งกำเนิดคลื่น เช่น ลม พายุ หรือแผ่นดินไหว รวมถึงสภาพแวดล้อมทางกายภาพของพื้นที่นั้น ๆ เช่น ความลึกของน้ำ ความลาดชันของพื้นทะเล เป็นต้น อย่างไรก็ตามในบางกรณี คาบของคลื่นอาจสั้นหรือยาวกว่าช่วงดังกล่าวได้

2.1.4 พลังงานคลื่น (E) ต่อหน่วยพื้นที่ คำนวณได้จากสมการ $E = 1/16 \rho g H^2$ โดย ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำทะเลมีค่าประมาณ 1,025 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (kg/m^3), g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่า 9.81 เมตรต่อวินาที² (m/s^2) และ H คือ ความสูงคลื่น

การประเมินศักยภาพพลังงานคลื่นในแต่ละพื้นที่ทำได้โดยการวัดความสูง ความยาว และคาบของคลื่นเป็นระยะเวลานานแล้วนำมาคำนวณเป็นพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อหน่วยความยาวของแนวชายฝั่งซึ่งมีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ต่อเมตร (kilowatt/meter : kW/m) [6, 10] โดยบริเวณที่มีศักยภาพคลื่นสูงเหมาะแก่การติดตั้งโรงไฟฟ้า ได้แก่ พื้นที่ที่มีพลังงานคลื่นมากกว่า 20 kW/m พบมากบริเวณเส้นละติจูดกลางใกล้ขั้วโลก ส่วนในเขตร้อนรวมถึงทะเลในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้จะมีศักยภาพปานกลางประมาณ 10-20 kW/m [11]

2.2 หลักการแปลงพลังงานจลน์ของคลื่นให้เป็นพลังงานไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานคลื่นหรือ Wave Energy Converter (WEC) ทำหน้าที่แปลงพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบขึ้นลงของคลื่นให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการเบื้องต้น 3 ขั้นตอน ได้แก่ [4, 12-14]

2.2.1 ส่วนรับคลื่น (Primary Interface) ทำหน้าที่รับพลังงานจากคลื่นที่เคลื่อนที่ขึ้นลง อาจอยู่ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ทุ่นลอย แผ่นกั้นคลื่น หรือเสาโคลัมน์น้ำ

2.2.2 Power Take-Off (PTO) เป็นกลไกการแปลงพลังงานจากการเคลื่อนที่เชิงกลของส่วนรับคลื่นให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาจใช้ระบบนิวเมติกส์ (Pneumatic) หรือเชิงกล เช่น ใช้แรงดันของน้ำหรืออากาศขับเคลื่อนกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือใช้การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าโดยตรง

2.2.3 ระบบควบคุม (Control Systems) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของ WEC ให้สอดคล้องกับสภาพคลื่นและสภาพแวดล้อม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงสุดโดยอาศัยข้อมูลที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ต่าง ๆ เช่น ความสูงคลื่น แรงบิด ความเร็วรอบ แรงดัน [15]

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก WEC จะถูกแปลงให้มีคุณภาพที่เหมาะสมโดยอินเวอร์เตอร์ก่อนจ่ายเข้าสู่สายส่งใต้น้ำมายังระบบส่งจ่ายบนฝั่งหาก WEC จำนวนมากถูกติดตั้งเป็นกลุ่มหรืออาร์เรย์จะเรียกว่า Wave Farm คล้ายกับการติดตั้งกังหันลมนั่นเอง [16] ปัจจุบันมีแนวคิดการออกแบบ WEC ให้สามารถติดตั้งร่วมกับโครงสร้างชายฝั่งประเภทอื่น เช่น เขื่อนกันคลื่น (Breakwater) หรือฐานราก Offshore Wind Turbine ซึ่งจะเพิ่มความคุ้มค่าในการลงทุนสำหรับพลังงานทางทะเล [10, 14, 17]

2.3 ประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากคลื่นและกลไกการทำงาน

2.3.1 แบบทุ่นลอย (Point Absorber)

เป็น WEC ที่มีโครงสร้างขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นมักเป็นทุ่นหรือตัวลอยที่เคลื่อนไหวขึ้นลงตามการเคลื่อนที่ของคลื่นโดยเชื่อมต่อกับตัวดูดซับพลังงาน (PTO) ซึ่งอาจเป็นระบบไฮดรอลิกส์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยตรง ตัวอย่างเช่น [9, 10, 13]

2.3.1.1 Power Buoy ของบริษัท Ocean Power Technologies ประกอบด้วยทุ่นลอยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 m และ Spar ความยาว 35 m ที่ยึดติดกับพื้นทะเล PTO เป็นระบบไฮดรอลิกที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 150 kW ผ่านอินเวอร์เตอร์ควบคุมด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

2.3.1.2 Aqua Buoy 2.0 โดย Finavera Renewables มีทุ่นรูปทรงกระบอกที่ลอยอยู่บนผิวน้ำเชื่อมกับลูกสูบเรียงกัน 2 ชุดที่จมอยู่ใต้น้ำ ลูกสูบจะสูบน้ำเข้าเมื่อคลื่นขึ้นและปล่อยน้ำออกเมื่อคลื่นลงเพื่อขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 250 kW

2.3.2 แบบท่อพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Tube)

เป็น WEC ชนิดนี้ใช้ประโยชน์จากสมบัติของวัสดุพิโซอิเล็กทริกที่สามารถเปลี่ยนแรงกลที่กระทำเป็นไฟฟ้าโดยตรง โดยสร้างเป็นแผ่นบางหรือแท่งยาวที่สัมผัสเหือนได้ตามการเคลื่อนที่ของคลื่นสามารถติดตั้งใต้ผิวน้ำในแนวนอนหรือแนวตั้งก็ได้ [4, 11] ตัวอย่างเช่น The Wave Water Energy Converter (WWEC) เป็นท่อ PVDF ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร (Centimeter : cm) ยาว 50 เมตร (Meter : m) ภายในบรรจุแก๊สฮีเลียมไว้เมื่ออยู่ใต้ทะเลท่อจะสั่นและเกิดการผลิตไฟฟ้าจากชั้นวัสดุพิโซที่ห่อหุ้มและส่งไฟฟ้ากระแสตรงไปตามความยาวท่อ

2.3.3 แบบอัดอากาศ (Oscillating Water Column : OWC)

เป็น WEC แบบ OWC ประกอบด้วยโครงสร้างกล่องหรือท่อทรงกระบอกที่มีช่องเปิดด้านล่างให้น้ำเข้าออกได้และมีช่องอากาศด้านบนเชื่อมต่อกับเทอร์โบไน์อากาศ เมื่อคลื่นซัดเข้ากล่องจะเกิดแรงดันอัดอากาศให้หมุนเทอร์โบไน์และขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเมื่อคลื่นถอยกลับจะเกิดแรงดูดทำให้เทอร์โบไน์หมุนย้อนกลับโดยทั่วไปจะนิยมใช้เทอร์โบไน์แบบ Wells ที่หมุนทิศทางเดียวไม่ว่าลมจะเป่าจากทางใดก็ตาม [12, 13] ตัวอย่างเช่น

2.3.3.1 โรงไฟฟ้า Limpet ของ WaveGen บนเกาะ Islay สกอตแลนด์ ประกอบด้วยห้องอัดอากาศคอนกรีต 3 ช่อง ติดตั้งฝังอยู่ในหน้าผาริมฝั่งขนาดกำลังรวม 500 kW จากเทอร์โบ Wells ขนาด 250 kW 2 ตัว

2.3.3.2 Mighty Whale ของ JAMSTEC ประเทศญี่ปุ่นเป็นโครงสร้างลอยน้ำยึดด้วยสมอขนาด $50 \times 30 \times 12$ m มีห้องอัดอากาศ 3 ช่องติดตั้งเทอร์โบ Wells ช่องละ 1 ตัว ขนาดรวม 110 kW ทดสอบจริงบริเวณชายฝั่งทะเลญี่ปุ่น

2.3.4 แบบอื่น ๆ

นอกจากนี้ยังมี WEC อีกหลายประเภทที่มีรูปแบบการติดตั้งและกลไกการทำงานที่แตกต่างกันไป ได้แก่ [14- 16, 18]

2.3.4.1 Overtopping WEC ประกอบด้วยอาร์เรย์ของผนังหรือแผ่นกั้นคลื่นที่มีทางเอียงให้คลื่นไต่ขึ้นไปเหนือขอบ (Crest) เข้าสู่อ่างกักเก็บน้ำและปล่อยน้ำลงผ่านเทอร์โบความดันต่ำเพื่อผลิตไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น Wave Dragon ขนาด 7 MW

2.3.4.2 Attenuators เป็นหุ่นขนาดใหญ่ที่มีข้อต่อหลายส่วนเมื่อคลื่นมากระทำข้อต่อจะเกิดการงอโค้ง สามารถดูดซับพลังงานโดยใช้กลไกลูกสูบหรือไฮดรอลิก เช่น Pelamis P2 ความยาว 180 m. กำลังผลิตสูงสุด 750 kW

2.3.4.3 Submerged Pressure Differential เป็นแผ่นปีกจมอยู่ใต้น้ำเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านแผ่นจะเกิดความแตกต่างของความดันน้ำระหว่างด้านบนและด้านล่าง ขับเคลื่อนกลไกลูกสูบ เช่น CETO ขนาด 1 MW ที่ทดสอบในออสเตรเลีย

2.3.4.4 Rotating Mass ใช้การเคลื่อนที่ทางด้นข้างของคลื่นในการหมุนล้อเฟืองเพื่อผลิตไฟฟ้า เช่น Wello Penguin ลักษณะเป็นโครงสร้างลอยน้ำทรงไข่ขนาด 600 kW ที่มีฟลายวีลด้านในหมุนด้วยความเร็วคงที่

2.4 เปรียบเทียบข้อดีของการใช้คลื่นทะเลผลิตไฟฟ้ากับการสร้างเขื่อนผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบข้อดีของโรงไฟฟ้าคลื่นเทียบกับโรงไฟฟ้าประเภทอื่น ๆ ที่สำคัญของไทย

ประเด็น	โรงไฟฟ้าคลื่น	โรงไฟฟ้าถ่านหิน	โรงไฟฟ้าก๊าซ	โรงไฟฟ้าแสงอาทิตย์	โรงไฟฟ้าลม
การปล่อยก๊าซเรือนกระจก	ต่ำมาก (15-105 gCO ₂ /kWh)	สูงมาก (820 gCO ₂ /kWh)	ค่อนข้างสูง (490 gCO ₂ /kWh)	ต่ำ (48 gCO ₂ /kWh)	ต่ำมาก (12 gCO ₂ /kWh)
แหล่งพลังงานที่ใช้	คลื่นในทะเล (มีอย่างไม่จำกัด)	ถ่านหิน (ต้องนำเข้า)	ก๊าซธรรมชาติ (ต้องนำเข้า)	แสงอาทิตย์ (มีอย่างไม่จำกัด)	ลม (มีอย่างไม่จำกัด)

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบข้อดีของโรงไฟฟ้าคลื่นเทียบกับโรงไฟฟ้าประเภทอื่น ๆ ที่สำคัญของไทย (ต่อ)

ประเด็น	โรงไฟฟ้าคลื่น	โรงไฟฟ้าถ่านหิน	โรงไฟฟ้าก๊าซ	โรงไฟฟ้าแสงอาทิตย์	โรงไฟฟ้าลม
ความสม่ำเสมอในการผลิตไฟฟ้า	สม่ำเสมอตลอดทั้งวัน	สม่ำเสมอตลอด 24 ชั่วโมง	สม่ำเสมอตลอด 24 ชั่วโมง	ผลิตได้เฉพาะช่วงกลางวัน	ผลิตได้เฉพาะเวลาลมพัดแรง
ลักษณะการใช้พื้นที่	ใช้พื้นที่ทะเลไม่แย่งที่ดินบนฝั่ง	ใช้ที่ดินบนฝั่งค่อนข้างน้อย	ใช้ที่ดินบนฝั่งค่อนข้างน้อย	ใช้ที่ดินบนฝั่งปริมาณมาก	ใช้ที่ดินบนฝั่งปริมาณมากที่สุด
ความหนาแน่นของพลังงาน	สูงกว่าลมและแสงอาทิตย์ 5 เท่า	สูงมาก	สูงมาก	ค่อนข้างต่ำ	ค่อนข้างต่ำ

3. ความก้าวหน้าและการประยุกต์ใช้ในต่างประเทศ

3.1 โครงการผลิตไฟฟ้าคลื่นที่สำคัญ

3.1.1 Aguçadoura Wave Farm ในโปรตุเกสเป็นโครงการผลิตไฟฟ้าคลื่นเชิงพาณิชย์แห่งแรกของโลกเริ่มดำเนินการในปี ค.ศ.2008 ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ Pelamis P1 จำนวน 3 ชุด กำลังการผลิตรวม 2.25 MW แต่ปัจจุบันหยุดดำเนินการชั่วคราวเพื่อปรับปรุงซ่อมแซมและเปลี่ยนอุปกรณ์ [19, 20]

3.1.2 European Marine Energy Centre (EMEC) บนหมู่เกาะ Orkney ในสกอตแลนด์ เป็นศูนย์ทดสอบเทคโนโลยีพลังงานคลื่นที่ใหญ่ที่สุดในโลก ดำเนินการมาตั้งแต่ปี ค.ศ.2003 ปัจจุบันมีอาร์เรย์ของ WEC หลายหลายประเภทจากบริษัทต่าง ๆ ทั่วโลกมาทดสอบสมรรถนะมีข้อมูลสถิติคลื่นและกระแสน้ำนานกว่า 15 ปี [7, 21]

3.1.3 Mutriku Wave Power Plant ในแคว้นบาสก์ ประเทศสเปน เป็นโรงไฟฟ้าแบบ Oscillating Water Column (OWC) แห่งแรกของโลกที่เชื่อมต่อกับระบบสายส่งติดตั้งบนเขื่อนกันคลื่นความยาว 100 เมตร มีห้อง OWC ขนาด 18.5 kW จำนวน 16 ห้อง ให้กำลังการผลิตรวม 296 kW ดำเนินการตั้งแต่ปี ค.ศ.2011 จนถึงปัจจุบัน [22, 23]

3.1.4 Eco Wave Power Gibraltar เป็นโรงไฟฟ้าคลื่นแห่งแรกของยุโรปที่ติดตั้งบนเขื่อนกันคลื่นแบบลอยน้ำ ประกอบด้วยทุ่นลอยขนาด 100 kW จำนวน 8 ตัว กำลังการผลิตรวม 5 MW เชื่อมต่อกับระบบสายส่งของยิบรอลตาร์ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2016 [3, 5]

ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งมีสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศใกล้เคียงกับไทยก็มีความก้าวหน้าที่น่าสนใจในการพัฒนาโครงการนำร่องผลิตไฟฟ้าคลื่นหลายแห่ง อาทิ

3.1.5 โครงการ Wave Energy Converter (WEC) ที่เกาะ Panay ประเทศฟิลิปปินส์ ซึ่งติดตั้งทุ่นลอยผลิตไฟฟ้าจากคลื่นในทะเลอันดามันขนาดกำลังการผลิต 10 kW เพื่อจ่ายไฟให้ชุมชนชายฝั่งกว่า 500 ครัวเรือน ช่วยลดการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมาก [24]

3.1.6 บริษัท Wave Swell Energy ของออสเตรเลียร่วมมือกับ Meindo Elang Indah และ Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) ของอินโดนีเซีย ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคลื่นชนิด Oscillating Water Column (OWC) ขนาด 50 kW ที่เกาะ Bali ในทะเลบาห์ลี ซึ่งสามารถส่งไฟเข้าสู่ระบบจำหน่ายของ PLN แล้วตั้งแต่ปี ค.ศ.2020 [25]

3.1.7 ศูนย์วิจัยพลังงานทางทะเล (Marine Energy Research Centre) ของ Universiti Malaya ประเทศมาเลเซีย ได้ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคลื่นหลายรูปแบบในช่องแคบมะละกาตั้งแต่ปี ค.ศ.2015 และล่าสุดสามารถพัฒนาต้นแบบ Oscillating Wave Energy Converter (OWEC) สำหรับทะเลน้ำตื้นแบบ Point Absorber ขนาด 5 kW ได้สำเร็จ [26]

ความสำเร็จจากโครงการเหล่านี้ถือเป็นแรงบันดาลใจสำคัญที่จะช่วยผลักดันให้เกิดการพัฒนาพลังงานคลื่นในประเทศไทยซึ่งมีศักยภาพคลื่นและลักษณะทางกายภาพของชายฝั่งที่คล้ายคลึงกันมาก การแลกเปลี่ยนเรียนรู้ประสบการณ์และความร่วมมือในการวิจัยกับประเทศเพื่อนบ้านจะช่วยให้การพัฒนาเทคโนโลยีและบุคลากรของไทยก้าวหน้าไปได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ข้อมูลโครงการผลิตไฟฟ้าคลื่นในประเทศฟิลิปปินส์ อินโดนีเซีย และมาเลเซีย ที่มีที่ตั้งและสภาพแวดล้อมทางทะเลใกล้เคียงกับไทยมากกว่า จะช่วยเสริมให้ผู้อ่านเห็นภาพความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้สำหรับบริบทของไทยได้ชัดเจนยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงโอกาสในการสร้างความร่วมมือเพื่อพัฒนาพลังงานคลื่นร่วมกันในระดับภูมิภาคอีกด้วย

3.2 ขนาดกำลังการผลิตและสถิติพลังงานที่ผลิตได้ในแต่ละปี

จากรายงานสถานภาพพลังงานคลื่นโลกประจำปี ค.ศ.2021 โดยทำเนียบพลังงานหมุนเวียนระหว่างประเทศ (International Renewable Energy Agency : IRENA) ระบุว่า ณ สิ้นปี ค.ศ.2020 มีกำลังการผลิตติดตั้งรวมของโรงไฟฟ้าคลื่นทั่วโลกประมาณ 60 MW ผลิตไฟฟ้าได้กว่า 15 จิกะวัตต์ชั่วโมงต่อปี (GWh/y) [26, 27] โดยสถิติในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา (ค.ศ.2016-2020) พบว่าขนาดกำลังการผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้าคลื่นเติบโตขึ้นเล็กน้อยในอัตราเฉลี่ยราวร้อยละ 12 ต่อปี ส่วนการผลิตไฟฟ้ามีการเติบโตที่ผันผวนโดยค่าสูงสุดอยู่ที่ 18 GWh ในปี ค.ศ.2020 ถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานหมุนเวียนประเภทอื่น เช่น พลังงานลมนอกชายฝั่ง (Offshore Wind) ที่มีกำลังการผลิตสูงถึง 35,000 MW และผลิตไฟฟ้าได้ถึง 80,000 GWh ในปีเดียวกัน [2, 9] ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าเทคโนโลยีผลิตไฟฟ้าคลื่นยังอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนาสู่การใช้งานในวงกว้างและมีความท้าทายอีกมากที่ต้องเร่งดำเนินการทั้งในแง่ของประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน การลดต้นทุน ความมั่นคงและอายุการใช้งานของระบบเพื่อให้สามารถแข่งขันกับพลังงานหมุนเวียนประเภทอื่นได้

3.3 แนวทางการต่อยอดพัฒนาและการทดสอบเทคโนโลยีใหม่ ๆ

ปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานคลื่นรูปแบบใหม่ ๆ อย่างต่อเนื่องทั่วโลกที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ทั้งในส่วนของ การออกแบบเชิงกลไก การเลือกใช้วัสดุ และระบบควบคุมเช่น [28, 29]

3.3.1 การพัฒนา WEC แบบใหม่ที่มีโครงสร้างทนทานและใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตและการบำรุงรักษา

3.3.2 การใช้วัสดุคอมโพสิตและวัสดุเมตาที่มีคุณสมบัติพิเศษในการกันกร่อนและรับแรงทางกลเพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์

3.3.3 การพัฒนาระบบควบคุมแบบ AI เพื่อปรับสมรรถนะของ WEC ให้เหมาะสมกับสภาวะคลื่นที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

3.3.4 การออกแบบ WEC ให้เป็นแบบโมดูลาร์เพื่อความยืดหยุ่นในการขยายกำลังการผลิตและความสะดวกในการบำรุงรักษา

3.3.5 การบูรณาการ WEC เข้ากับโครงสร้างอเนกประสงค์อื่น ๆ เช่น เชื้อเพลิงคลื่น แท่นขุดเจาะน้ำมัน หรือฟาร์มลมนอกชายฝั่ง

นอกจากนี้ยังมีโครงการวิจัยร่วมระหว่างสถาบันและศูนย์ทดสอบขนาดใหญ่เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะและผลกระทบของระบบ WEC ในสภาวะใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น เช่น MARINER-i, MaRINET2, FORESEA และ US Navy WETS [16]

3.4 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และการลดต้นทุนต่อหน่วย

ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าพลังงานคลื่นยังอยู่ในระดับสูงมากเมื่อเทียบกับแหล่งพลังงานหมุนเวียนอื่น ๆ จากรายงานของ IRENA พบว่าในปี ค.ศ.2020 ต้นทุนถัวเฉลี่ยต่อหน่วย (Levelized Cost of Electricity: LCOE) ของโรงไฟฟ้าคลื่นอยู่ที่ 0.20-0.55 USD/kWh ซึ่งสูงกว่า Offshore Wind ที่มี LCOE เฉลี่ย 0.084 USD/kWh ถึงกว่า 2-6 เท่า และสูงกว่าโรงไฟฟ้าถ่านหินซึ่งมี LCOE เฉลี่ยราว 0.056 USD/kWh ถึงกว่า 3-9 เท่า [12]

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา LCOE ของโรงไฟฟ้าคลื่นมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องโดยเฉลี่ยลดลงกว่าร้อยละ 40 เมื่อเทียบระหว่างปี ค.ศ.2010 และ ค.ศ.2020 ซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าขึ้น การประหยัดต่อขนาด (Economy of Scale) และการเรียนรู้ผ่านการลงมือทำ (Learning-by-Doing) ของผู้พัฒนาโครงการ [5, 24] หากแนวโน้มการลดต้นทุนยังดำเนินต่อไปในอัตราเดิม คาดว่าภายในปี ค.ศ.2030 LCOE ของโรงไฟฟ้าคลื่นจะลดลงมาอยู่ในช่วง 0.10-0.20 USD/kWh ซึ่งจะสามารถแข่งขันกับ Offshore Wind และพลังงานลมบนบกได้ และหากเทคโนโลยีพัฒนาก้าวหน้าอย่างก้าวกระโดดต้นทุนอาจลดลงมาอยู่ในระดับ 0.05-0.10 USD/kWh ได้ภายในปี ค.ศ.2040 ซึ่งจะทำให้พลังงานคลื่นกลายเป็นหนึ่งในตัวเลือกหลักของการสร้างระบบไฟฟ้าคาร์บอนต่ำในอนาคต [13, 20]

3.5 ตัวอย่างแผนการติดตั้งเพิ่มเติมในอนาคต

หลายประเทศทั่วโลกโดยเฉพาะในยุโรปตะวันตก อเมริกา และเอเชียตะวันออก ได้กำหนดเป้าหมายการติดตั้งโรงไฟฟ้าคลื่นในแผนการพัฒนายพลังงานหมุนเวียนแห่งชาติ (National Renewable Energy Action Plan: NREAP) เพื่อเพิ่มการใช้ประโยชน์จากพลังงานทางทะเลในระยะกลางและระยะยาว ตัวอย่างเช่น

3.5.1 สหภาพยุโรป: เป้าหมาย 1 GW ภายในปี ค.ศ.2030 และ 40 GW ภายในปี ค.ศ.2050

3.5.2 สหราชอาณาจักร: เป้าหมาย 22-31 GW ภายในปี ค.ศ.2050

3.5.3 ฝรั่งเศส: เป้าหมาย 3 GW ภายในปี ค.ศ.2030

3.5.4 สหรัฐอเมริกา: เป้าหมายร้อยละ 15 ของพลังงานทั้งหมดมาจากคลื่นและกระแสน้ำภายในปี ค.ศ.2050

3.5.5 แคนาดา: เป้าหมาย 75 MW ภายในปี ค.ศ.2030 และ 250 MW ภายในปี ค.ศ.2050

3.5.6 ญี่ปุ่น: เป้าหมาย 2.7 GW ภายในปี ค.ศ.2030 จาก 6 โครงการนำร่อง ได้แก่ Kujukuri, Niigata East, Kashima North, Minamisoma North, Oshika Peninsula และ Goto Islands

3.5.7 เกาหลีใต้: เป้าหมาย 1.1 GW ภายในปี ค.ศ.2030 จากการทดสอบ WEC ยังสถานีวิจัย Jeju และ KRISO-Wave ในทะเลตะวันออก

3.5.8 ออสเตรเลีย: เป้าหมาย 1.8 GW ภายในปี ค.ศ.2040 โดยโครงการส่วนใหญ่อยู่ในรัฐแทสมาเนีย และเวสเทิร์นออสเตรเลีย

3.5.9 นิวซีแลนด์: เป้าหมาย 2 GW ภายในปี ค.ศ. 2050 ครอบคลุมทั้งเทคโนโลยีคลื่นและกระแสน้ำ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริงจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญหลายประการ เช่น ความพร้อมและความสมบูรณ์ของเทคโนโลยีในขณะนั้น ระดับความสนับสนุนทางนโยบายและการเงินจากรัฐบาล ภาวะตลาดและราคาของเชื้อเพลิงฟอสซิล รวมถึงการยอมรับของประชาชนในแต่ละพื้นที่ ซึ่งสิ่งเหล่านี้ย่อมมีการเปลี่ยนแปลงได้เสมอในอนาคต [18, 30]

4. แนวทางการสำรวจความเป็นไปได้ในการใช้คลื่นทะเลผลิตกระแสไฟฟ้า

4.1 การประเมินศักยภาพคลื่นตามแนวชายฝั่งทะเลไทย

จากการศึกษาของ Esteban & Leary [31] พบว่าพื้นที่ชายฝั่งทะเลของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ส่วนใหญ่มีศักยภาพพลังงานคลื่นอยู่ในระดับปานกลางประมาณ 10-20 kW/m สำหรับประเทศไทยซึ่งมีแนวชายฝั่งทะเลยาวถึง 2,811 km แบ่งเป็นอ่าวไทย 1,874 km และทะเลอันดามัน 937 km

จากการศึกษาของสุชาติ [32] โดยใช้ข้อมูลความสูงและคาบคลื่นจากหุ่นวัดคลื่นนอกชายฝั่งและแบบจำลองคอมพิวเตอร์ในช่วงปี พ.ศ.2554-2560 พบว่าชายฝั่งทะเลอันดามันมีศักยภาพพลังงานคลื่นเฉลี่ยต่อปีสูงกว่าอ่าวไทยประมาณ 2 เท่า ทั้งนี้ต้องพึงระลึกว่าสภาพคลื่นในน่านน้ำไทยมีความแปรปรวนตามฤดูกาลค่อนข้างมากเนื่องจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือในช่วงเดือนพฤศจิกายน-กุมภาพันธ์ และลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ในช่วงเดือนพฤษภาคม-กันยายน โดยบริเวณที่มีศักยภาพสูงสุดได้แก่ อ.ปะเหลียน จว.ตรัง อ.ท้ายเหมือง จว.พังงา และเกาะสิมิลัน ซึ่งมีความหนาแน่นกำลังคลื่นเฉลี่ย ณ ช่วงความสูงสุดของฤดูลมมรสุม (ประมาณเดือนกรกฎาคม-สิงหาคม) อยู่ที่ 12-15 kW/m แต่เมื่อเฉลี่ยตลอดทั้งปีแล้วจะอยู่ที่ประมาณ 6-8 kW/m

นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับการเลือกประเภทและการวางแผนการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เหมาะสมกับสภาพความแปรปรวนของคลื่นในแต่ละพื้นที่อีกด้วย ส่วนอ่าวไทยแม้มีศักยภาพที่ต่ำกว่าแต่ก็ยังพบบริเวณที่น่าสนใจ เช่น หาดบ้านเพ จว.ระยอง อ.แหลมงอบ จว.ตราด และอ่าวไม่รุต จว.ประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งมีความหนาแน่นกำลังคลื่นเฉลี่ยอยู่ที่ 4-5 kW/m สอดคล้องกับการศึกษาของ สุรเชษฐ์ [33] ที่พบว่าชายฝั่งทะเลภาคตะวันออกมีศักยภาพเป็นอันดับ 2 รองจากทะเลอันดามัน

4.2 ความเหมาะสมทางกายภาพและพื้นที่ที่น่าสนใจ

นอกจากค่าความหนาแน่นพลังงานคลื่นแล้วปัจจัยสำคัญอื่น ๆ ที่กำหนดความเหมาะสมของพื้นที่ติดตั้งโรงไฟฟ้าคลื่นยังได้แก่ ความลึกและสภาพพื้นทะเล ระยะห่างจากฝั่ง รวมถึงข้อจำกัดด้านการใช้ประโยชน์ที่ดิน และกฎหมาย [34]

สำหรับประเทศไทยพื้นที่ที่มีศักยภาพและความเหมาะสมสูง ได้แก่ บริเวณชายฝั่งทะเลอันดามัน ตอนล่าง เช่น อ.ตะกั่วป่า อ.ตะกั่วทุ่ง และ อ.ท้ายเหมือง จว.พังงา ซึ่งมีสภาพคลื่นและน้ำทะเลที่ดี มีแนวปะการัง และเกาะแก่งเป็นแนวกำบังคลื่นธรรมชาติ มีระบบสายส่งไฟฟ้าเชื่อมถึงและเป็นแหล่งท่องเที่ยวสำคัญ สำหรับบริเวณอ่าวไทยนั้นพื้นที่ที่น่าสนใจ ได้แก่ ชายฝั่งรอบอ่าวไทยตอนบน โดยเฉพาะจังหวัดที่มีศักยภาพคลื่นในระดับปานกลางควบคู่ไปกับการต้องการไฟฟ้าที่สูงจากภาคอุตสาหกรรมและชุมชนเมือง เช่น จว.ชลบุรี จว.ระยอง และ จว.สมุทรสาคร [5] นอกจากนี้ยังมีบางพื้นที่ของอ่าวไทยฝั่งตะวันตก เช่น บริเวณ อ.หัวหิน จว.ประจวบคีรีขันธ์ ที่มีลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสมต่อการติดตั้งโรงไฟฟ้าคลื่นเช่นกัน

4.3 ประโยชน์ต่อระบบไฟฟ้าและสิ่งแวดล้อม

การนำพลังงานคลื่นมาใช้ผลิตไฟฟ้าจะช่วยสร้างความมั่นคงและยืดหยุ่นให้กับระบบไฟฟ้าของไทย เนื่องจากเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้ากระจายศูนย์ที่ไม่ต้องพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล และไม่มีควมผันผวนตามช่วงเวลาเหมือนพลังงานหมุนเวียนชนิดอื่น เช่น ลมและแสงอาทิตย์

โรงไฟฟ้าคลื่นยังมีศักยภาพในการช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของภาคการผลิตไฟฟ้าซึ่งปัจจุบันมีส่วนถึง 1 ใน 3 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดของไทย [24] โดยจากการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) พบว่าค่าการปล่อย CO₂ ของโรงไฟฟ้าคลื่นจะอยู่ที่ 15-105 gCO₂/kWh ต่ำกว่าโรงไฟฟ้าก๊าซและถ่านหิน ประมาณ 3-8 เท่า [35]

4.4 การสร้างงานและกระตุ้นเศรษฐกิจท้องถิ่น

การพัฒนาโครงการโรงไฟฟ้าคลื่นจะก่อให้เกิดการจ้างงานทั้งทางตรงและทางอ้อมจำนวนมากทั้งในส่วนของการก่อสร้าง การติดตั้งและซ่อมบำรุง การให้บริการสนับสนุน และการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ โดยประเมินว่าโรงไฟฟ้าคลื่นขนาด 100 MW สามารถสร้างตำแหน่งงานได้ราว 1,000-1,500 ตำแหน่ง [34] ซึ่งส่วนใหญ่จะกระจายผู้คนในพื้นที่ชายฝั่งทะเลซึ่งจัดว่าเป็นกลุ่มเปราะบางทางเศรษฐกิจสังคม จากความไม่แน่นอนของรายได้ที่พึ่งพาการประมงและท่องเที่ยวเชิงฤดูกาล การสร้างทางเลือกอาชีพใหม่ ๆ ที่มั่นคงจะช่วยกระตุ้นเศรษฐกิจและยกระดับคุณภาพชีวิตของชุมชนได้อย่างยั่งยืน

4.5 การส่งเสริมการวิจัยและพัฒนา

ที่ผ่านมาหน่วยงานวิจัยของไทยทั้งในมหาวิทยาลัยและสถาบันเฉพาะทาง เช่น สวทช. พว. และ วว. ได้ดำเนินการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีพลังงานคลื่นมาพอสมควร [31] แต่ยังไม่ถึงขั้นพัฒนาเชิงพาณิชย์เนื่องจากข้อจำกัดทางงบประมาณและบุคลากร

การผลักดันให้เกิดโครงการนำร่องในระดับ MW ขึ้นไป จะช่วยเร่งการสั่งสมองค์ความรู้และการเรียนรู้ผ่านการปฏิบัติจริง (Learning by Doing) ทั้งในส่วนของ การออกแบบ การพัฒนาวัสดุและอุปกรณ์ การติดตั้ง

ไปจนถึงการปรับปรุงเทคโนโลยีให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของไทย [32] หากไทยสามารถพัฒนา Local Content ได้สูงเพียงพอจะช่วยลดต้นทุนนำเข้าเทคโนโลยีและสร้างความเข้มแข็งให้กับภาคอุตสาหกรรมของประเทศรวมถึงการสร้างรายได้จากการส่งออกไปยังประเทศที่มีศักยภาพพลังงานคลื่นในภูมิภาค [33]

4.6 ความเชื่อมโยงกับแผนพัฒนาฯ

แม้ว่าพลังงานคลื่นจะยังไม่ได้ถูกกำหนดเป็นเป้าหมายหลักไว้ในแผน AEDP 2018 แต่พบว่ามีมีการกล่าวถึงในฐานะเทคโนโลยีใหม่ที่น่าจับตามอง โดยตั้งเป้าจะมีการผลิตไฟฟ้าจากคลื่นในเชิงพาณิชย์ได้ภายในปี ค.ศ.2037 [24] ขณะเดียวกันกระทรวงพลังงานได้จัดทำแผนที่นำทางการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานคลื่น (Wave Energy Technology Roadmap) ภายใต้โครงการ Energy for All เพื่อส่งเสริมให้เกิดการพัฒนานวัตกรรมและการใช้ประโยชน์จากพลังงานทางทะเลอย่างจริงจังมากขึ้น [35]

นอกจากนี้พลังงานคลื่นยังสามารถเชื่อมโยงและตอบสนองต่อนโยบายชาติอื่น ๆ อาทิ แผนปฏิรูปประเทศ 20 ปี ด้านพลังงานที่ส่งเสริมความมั่นคงทางพลังงานด้วยแหล่งพลังงานทางเลือกภายในประเทศ [36] รวมถึงยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ 20 ปี ด้านพลังงานที่มุ่งเน้นการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทนสู่การใช้ในเชิงพาณิชย์ [32]

ข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพทั้งในแง่ทรัพยากรคลื่น พื้นที่ที่มีความเป็นไปได้ในการติดตั้ง และความพร้อมของหน่วยงานวิจัยในการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานคลื่น อีกทั้งยังมีโอกาสที่จะได้รับประโยชน์หลายด้าน ทั้งในแง่ความมั่นคงทางพลังงาน เศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม หากมีการส่งเสริมอย่างเป็นรูปธรรมและเชื่อมโยงกับยุทธศาสตร์ระดับชาติอย่างเหมาะสมแต่ยังมีอุปสรรคและความท้าทายอีกหลายประการ โดยเฉพาะในแง่ของต้นทุนเทคโนโลยีที่สูง การแข่งขันกับพลังงานหมุนเวียนประเภทอื่น ๆ กฎระเบียบด้านสิ่งแวดล้อม และการใช้พื้นที่ทางทะเลรวมถึงการยอมรับของสาธารณชน [23] ซึ่งภาครัฐและผู้มีส่วนได้เสียจำเป็นต้องร่วมมือกันแก้ไขอย่างเป็นระบบ

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบสมรรถนะและผลกระทบของโรงไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ

ประเภท	กำลังการผลิตติดตั้ง (GW)	สัดส่วนการผลิตไฟฟ้าทั่วโลก (ร้อยละ)	ปริมาณ CO ₂ ที่ปล่อย (gCO ₂ /kWh)	พื้นที่ที่ใช้ (km ² /TWh)
โรงไฟฟ้าถ่านหิน	2,080	36	820	1.7
โรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติ	1,650	23	490	0.5
โรงไฟฟ้าพลังน้ำ	1,330	16	24	20.0
โรงไฟฟ้านิวเคลียร์	393	10	12	2.4
โรงไฟฟ้าชีวมวล	136	2.4	230	543.4
โรงไฟฟ้าแสงอาทิตย์	708	3	48	39.2
โรงไฟฟ้าลม	743	5.3	12	72.1
โรงไฟฟ้าคลื่น	0.06	0.00006	17	5.0

สรุปข้อมูลจากตารางที่ 2 การเปรียบเทียบสมรรถนะและผลกระทบของโรงไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ พบว่า ณ ปัจจุบัน โรงไฟฟ้าพลังงานคลื่นยังมีการผลิตติดตั้งที่น้อยมาก เพียง 0.06 GW หรือคิดเป็นสัดส่วนเพียงร้อยละ 0.00006 ของการผลิตไฟฟ้าทั่วโลกเท่านั้น ต่างจากโรงไฟฟ้าประเภทอื่น ๆ โดยเฉพาะโรงไฟฟ้าฟอสซิล อย่างถ่านหินและก๊าซธรรมชาติที่กำลังการผลิตติดตั้งรวมกันกว่า 3,700 GW และคิดเป็นสัดส่วนมากถึงร้อยละ 59 ของการผลิตไฟฟ้าทั้งหมด

อย่างไรก็ตาม โรงไฟฟ้าพลังงานคลื่นกลับมีข้อได้เปรียบที่สำคัญในด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นั่นคือการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ต่ำเพียง $17 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$ ซึ่งต่ำกว่าโรงไฟฟ้าถ่านหินและโรงไฟฟ้าก๊าซถึง 48 เท่า และ 29 เท่า ตามลำดับ และยังต่ำกว่าพลังงานหมุนเวียนประเภทอื่น ๆ เช่น ชีวมวลและแสงอาทิตย์ อีกทั้งยังใช้พื้นที่ติดตั้งน้อยมากเพียง 5 km^2 ต่อหน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้ 1 เทระวัตต์-ชั่วโมง (Terawatt-hour : TWh) เทียบกับโรงไฟฟ้าชีวมวลและกังหันลมที่ใช้พื้นที่มากถึง 543 และ $72 \text{ km}^2/\text{TWh}$

ด้วยข้อดีหลายประการประกอบกับแนวโน้มการเติบโตของเทคโนโลยีและกำลังการผลิตที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วถึง 10 GW ภายในปี ค.ศ.2030 และอาจแตะ 100 GW ได้ในปี ค.ศ.2050 ทำให้พลังงานคลื่นกำลังกลายเป็นอีกหนึ่งทางเลือกด้านพลังงานสะอาดที่น่าสนใจสำหรับหลายประเทศในอนาคตอันใกล้

การขยายตัวของโรงไฟฟ้าพลังงานคลื่นจะช่วยเสริมความมั่นคงทางพลังงาน ลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนมากนัก ซึ่งการนำข้อดีเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสมกับบริบทของแต่ละพื้นที่จะช่วยผลักดันการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนของประเทศให้ก้าวหน้าอย่างยั่งยืนมากยิ่งขึ้นในอนาคต

5. บทสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอภาพรวมของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าพลังงานคลื่นอย่างรอบด้านทั้งในแง่ของหลักการทางฟิสิกส์ ประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตัวอย่างโครงการที่ประสบความสำเร็จในต่างประเทศ ตลอดจนความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและแนวโน้มการพัฒนาในอนาคต จากข้อมูลที่น่าเสนอจะเห็นได้ว่าพลังงานคลื่นกำลังก้าวขึ้นมาเป็นทางเลือกใหม่ที่น่าจับตามองในการผลิตไฟฟ้าสะอาดและยั่งยืนด้วยการคิดค้นเทคโนโลยีและรูปแบบใหม่ ๆ ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนต่อหน่วยอย่างต่อเนื่อง หลายประเทศจึงได้กำหนดเป้าหมายการใช้พลังงานคลื่นอย่างจริงจังเพื่อสร้างความมั่นคงทางพลังงานและตอบสนองต่อวิกฤตการณ์เปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

สำหรับประเทศไทยแม้ว่าศักยภาพพลังงานคลื่นโดยเฉลี่ยจะอยู่ในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับพื้นที่ชายฝั่งอื่น ๆ ของโลก แต่บริเวณทะเลอันดามันตอนล่างและอ่าวไทยตอนบนก็มีบางจุดที่มีความเข้มข้นและความสม่ำเสมอของคลื่นสูงกว่าค่าเฉลี่ยมาก ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กถึงปานกลาง หากได้รับการสนับสนุนที่เหมาะสมจากภาครัฐ เอกชน และมหาวิทยาลัยโดยอาศัยความร่วมมือจากทุกภาคส่วนทั้งในการวิจัยพัฒนาเทคโนโลยี การกำหนดนโยบายส่งเสริม และการบริหารจัดการพื้นที่ชายฝั่งอย่างสมดุล การผลักดันโครงการนำร่องเหล่านี้จะช่วยสร้างประโยชน์ต่อประเทศในวงกว้าง ไม่ว่าจะเป็นการเสริม

ความมั่นคงให้กับระบบไฟฟ้า การลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การสร้างอาชีพและรายได้ให้กับชุมชนชายฝั่ง รวมถึงการยกระดับขีดความสามารถด้านการวิจัยและพัฒนานวัตกรรมของประเทศ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chaiyapa, W., Esteban, M., & Kameyama, Y. (2018). Why go green? Discourse analysis of motivations for Thailand's oil and gas companies to invest in renewable energy. *Energy Policy*, 120, 448-459.
- [2] Energy Policy and Planning Office (EPPO), Ministry of Energy. (2020). *Energy Statistics of Thailand 2020*.
- [3] พืrganต์ บรรเจิดฤทธิ์. (2563). พลังงานคลื่นและเทคโนโลยีเครื่องกลเติมอากาศ. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC).
- [4] Falcão, A. F. O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 899-918.
- [5] กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. (2564). รายงานสถานการณ์ทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งของประเทศไทย พ.ศ. 2564.
- [6] REN21. (2020). *Renewables 2020 Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat.
- [7] United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. UN General Assembly, A/RES/70/1.
- [8] Esteban, M., & Leary, D. (2012). Current developments and future prospects of offshore wind and ocean energy. *Applied Energy*, 90(1), 128-136.
- [9] European Commission. (2020). *An EU Strategy to harness the potential of offshore renewable energy for a climate neutral future*. COM/2020/741.
- [10] Khan, N., Kalair, A., Abas, N., & Haider, A. (2017). Review of ocean tidal, wave and thermal energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 590-604.
- [11] HM Government. (2020). *The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution*.
- [12] IRENA. (2021). *Renewable Power Generation Costs in 2020*. Abu Dhabi.
- [13] OES. (2017). *An International Vision for Ocean Energy*.
- [14] IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press.
- [15] Magagna, D., & Uihlein, A. (2015). Ocean energy development in Europe. *International Journal of Marine Energy*, 11, 84-104.
- [16] IRENA. (2021). *Renewable Energy Statistics 2021*. Abu Dhabi.

- [17] OES. (2021). International LCOE for Ocean Energy Technologies. IEA Technology Collaboration Programme for Ocean Energy Systems (OES).
- [18] Liu, T., Yu, J., Yu, Y., Zhang, X., Zhou, B., & Yin, L. (2023) Characterization of wave power resources off the coast of Guangdong, Processes, 11(7) 2221.
- [19] Rusu, E., & Onea, F. (2018). A review of the technologies for wave energy extraction. Clean Energy, 2(1), 10-19.
- [20] Sgobbi, A., Simoes, S. G., Magagna, D., & Nijs, W.. (2016). Assessing the impacts of technology improvements on the deployment of marine energy in Europe with an energy system perspective. Renewable Energy, 89, 515-525.
- [21] Wave Swell Energy. (2020, November 10). Indonesians ride the wave to deliver energy roadmap. Retrieved from <https://www.waveswell.com/indonesians-ride-the-wave-to-deliver-energy-roadmap>
- [22] Zhao, X. L., Ning, D. Z., Zou, Q. P., & Cai, S. Q. (2019). Hybrid floating breakwater-WEC system: A review. Ocean Engineering, 186, 106126.
- [23] กระทรวงพลังงาน. (2562). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580.
- [24] สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2564). รายงานแห่งชาติฉบับที่ 3 การจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย.
- [25] Aderinto, T., & Li, H. (2019). Ocean wave energy converters: Status and challenges. Energies, 12(10), 1-26.
- [26] Astariz, S., & Iglesias, G. (2015). The economics of wave energy: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45, 397-408.
- [27] Ko, Chung, Lee, K., Park, D., Yi, Z., (2019) Current Policy and Technology for Tidal Current Energy in Korea. Energies. 12, 1-15
- [28] Satymov, R., Bogdanov, D., Dadashi, M., Lavidas, G., & Breyer, C. (2024) Techno-economic assessment of global and regional wave energy resource potentials and profiles in hourly resolution. Applied Energy. 364, 123119
- [29] O'Connell, R., Kamidelivand, M., Furlong, R., Guerrini, M., Cullinane, M., & Murphy, J. (2024) An advanced geospatial assessment of the Levelised cost of energy (LCOE) for wave farms in Irish and western UK waters. Renewable Energy. 221, 119864.
- [30] Quirapas, M. A., Lin, H., Abundo, M. L., Brahim, S. P., & Santos, D. D., (2015). Ocean renewable energy in Southeast Asia: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 799-817.

- [31] Esteban, M., & Leary, D. (2012). Current developments and future prospects of offshore wind and ocean energy. *Applied Energy*, 90(1), 128-136.
- [32] สุชาติ ไตรภพสกุล. (2561). การประเมินศักยภาพพลังงานคลื่นในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [33] สุรเชษฐ์ บุญลาโก. (2560). การศึกษาเบื้องต้นของศักยภาพพลังงานคลื่นนอกชายฝั่งภาคตะวันออกของประเทศไทย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 22, นครราชสีมา.
- [34] สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2561). ยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. 2561-2580.
- [35] สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม. (2563). ยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580).
- [36] Kerr, S., Watta, L., Calton, J., Conway, F., Hull, A., Johnson, K., Jude, S., Kannen, A., MacDougall, S., McLachlan, C., Potts, T. (2014). Establishing an agenda for social studies research in marine renewable energy. *Energy Policy*, 67, 694-702.

การสำรวจและวิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีนในเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีน

ที่จำหน่ายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

Survey and Analysis of Caffeine Content in Caffeinated Beverages

Sold in Chulachomklao Royal Military Academy

ปวีณา วัตบัว¹

Paweena Wadbua¹

Received: April 9, 2024

Revised: June 11, 2024

Accepted: June 12, 2024

บทคัดย่อ

เครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน สังเกตได้จากร้านกาแฟที่กระจายอยู่ตามชุมชนต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงในการบริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีน ได้แก่ การบริโภคในปริมาณที่เหมาะสม คือ ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อวัน เพื่อไม่ให้เกิดโทษต่อร่างกาย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจพฤติกรรมการบริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่จำหน่ายในร้านกาแฟ 4 ร้าน ในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย คือ นักเรียนนายร้อยและอาจารย์ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จำนวน 316 นาย และวิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีนในเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมตรี

ผลการสำรวจพบว่า กลุ่มตัวอย่างร้อยละ 96 บริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนอย่างน้อย 1 แก้วต่อวัน โดยเครื่องดื่มที่เป็นที่นิยม ได้แก่ คัปปูชชีโน (ร้อยละ 28) เอสเปรสโซ (ร้อยละ 20) อเมริกาโน (ร้อยละ 17) ลัตเต (ร้อยละ 11) มอคคา (ร้อยละ 8) โกโก้ (ร้อยละ 8) ชาเขียว (ร้อยละ 5) และชาไทย (ร้อยละ 3) ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีนในเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนพบว่า เครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนจากร้านกาแฟทั้ง 4 ร้าน ในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า มีปริมาณคาเฟอีนอยู่ในช่วง 14.49-183.35 มิลลิกรัมต่อแก้ว โดยปริมาณคาเฟอีนต่อแก้วของเครื่องดื่มประเภทกาแฟทั้ง 5 ชนิด คือ คัปปูชชีโน เอสเปรสโซ อเมริกาโน ลัตเต และมอคคา

¹อาจารย์ กองวิชาเคมี ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

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

E-mail: paweena.wa@crma.ac.th

มีค่ามากที่สุด (121.49-183.54 มิลลิกรัม) รองลงมาคือ ชาไทย (122.47-135.05 มิลลิกรัม) ชาเขียว (101.31-110.09 มิลลิกรัม) และโกโก้ (14.49-17.61 มิลลิกรัม) ตามลำดับ ดังนั้นปริมาณที่แนะนำในการบริโภคเครื่องดื่มประเภทกาแฟและชาไทยจากร้านกาแฟทั้ง 4 ร้าน คือ ไม่เกิน 2 แก้วต่อวัน และเครื่องดื่มประเภทชาเขียว คือ ไม่เกิน 3 แก้วต่อวัน

คำสำคัญ: ปริมาณคาเฟอีน, เครื่องดื่มที่มีคาเฟอีน, ร้านกาแฟ, โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี

Abstract

Beverages containing caffeine are highly popular nowadays, as evidenced by the proliferation of coffee shops in various communities. It is important to consume caffeine in moderation, ideally not exceeding 400 milligrams per day to avoid adverse health effects. This research aims to investigate the consumption behavior of caffeinated beverages sold in 4 coffee shops in Chulachomklao Royal Military Academy. The study sample consists of 316 cadets and instructors from the academy. The caffeine content in the beverages was analyzed using UV-visible spectrophotometry.

The survey results revealed that 96% of the sample consumed at least one caffeinated beverage per day, with popular choices being cappuccino (28%), espresso (20%), americano (17%), latte (11%), mocha (8%), cocoa (8%), green tea (5%), and Thai tea (3%). Upon analyzing the caffeine content, the results revealed that the caffeine content in the coffee shop beverages at the academy ranged from 14.49 to 183.35 milligrams per serving. The beverages with the highest caffeine content per serving were the 5 types of coffee: cappuccino, espresso, americano, latte, and mocha, ranging from 121.49 to 183.54 mg. Following those were Thai tea with 122.47 to 135.05 mg, green tea with 101.31 to 110.09 mg, and cocoa with 14.49 to 17.61 mg, respectively. Therefore, the recommended consumption limit for coffee and Thai tea from these coffee shops at the academy is not more than 2 cups per day, while for green tea, it is not more than 3 cups per day.

Keywords: Caffeine Content, Caffeinated Beverage, Coffee Shop, Chulachomklao Royal Military Academy, UV-visible Spectrophotometry

1. บทนำ

คาเฟอีน (Caffeine) เป็นสารอัลคาลอยด์ (Alkaloid) ธรรมชาติที่ไม่มีกลิ่นและมีรสขมเล็กน้อย เป็นสารสำคัญที่พบมากในเมล็ดกาแฟ เมล็ดโกโก้ ใบชา และพืชชนิดอื่น ๆ [1] เครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนเป็นเครื่องดื่มที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคอย่างแพร่หลาย เนื่องจากคาเฟอีนมีผลในการกระตุ้นระบบประสาทส่วนกลาง ทำให้รู้สึกกระปรี้กระเปร่า ช่วยให้การไหลเวียนของโลหิตในสมองดีขึ้น และลดอาการอ่อนเพลีย [2] ดังนั้นเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนจึงถูกใช้เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเรียนหรือการทำงาน นอกจากนี้ยังพบว่า ประชากรทั่วโลกกว่าร้อยละ 80 นิยมบริโภคคาเฟอีนเป็นประจำ [3] การบริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนของคนไทยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะกาแฟสดและชาจัดได้ว่าเป็นเครื่องดื่มที่ได้รับความนิยมอย่างมากในกลุ่มผู้บริโภคที่เป็นวัยรุ่นและวัยทำงาน ทำให้ธุรกิจร้านกาแฟมีการขยายตัวอย่างมากและกลายมาเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันของผู้บริโภค ซึ่งจะเห็นได้จากการบริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนแทนมื้ออาหารหรือการจัดเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนพร้อมขนมเป็นอาหารว่างในการประชุม [4] อย่างไรก็ตาม ผู้บริโภคส่วนใหญ่ไม่ทราบปริมาณคาเฟอีนที่บริโภคในแต่ละวัน ซึ่งการบริโภคคาเฟอีนในปริมาณมาก (200-500 มิลลิกรัมต่อวัน) อาจเกิดผลเสียต่อร่างกาย คือ เกิดอาการคลื่นไส้ ปวดศีรษะ หงุดหงิด นอนไม่หลับ เคร่งเครียด วิตกกังวล กระวนกระวาย ซิพจรเต้นเร็ว และมีอาการใจสั่นได้ [5] ปริมาณคาเฟอีนที่สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาแนะนำให้บริโภคต่อวันคือ ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อวัน หรือเทียบเท่ากับกาแฟประมาณ 3-4 แก้วต่อวัน [6] นอกจากนี้ข้อมูลทางด้านพิษวิทยายังให้คำแนะนำในการบริโภคคาเฟอีนต่อวันสำหรับเด็กและวัยรุ่น คือ ไม่เกิน 2.5-3.0 มิลลิกรัม/น้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม และไม่เกิน 200-300 มิลลิกรัม/น้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม สำหรับสตรีมีครรภ์ [7] ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีนในเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนจึงมีความสำคัญต่อสุขภาพและความปลอดภัยของผู้บริโภค

การสกัดคาเฟอีนด้วยตัวทำละลายส่วนใหญ่นิยมใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ เช่น คลอโรฟอร์ม (Chloroform) ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) และเมทิลีนคลอไรด์ (Methylenechloride) เป็นต้น [5, 8-9] ซึ่งตัวทำละลายเหล่านี้มีความเป็นพิษโดยอาจก่อให้เกิดมะเร็งต่อผู้ใช้ [9] เพื่อลดความเสี่ยงต่อการได้รับอันตรายจากตัวทำละลายอินทรีย์กลุ่มดังกล่าว การวิจัยครั้งนี้จึงเลือกใช้ 1-โพรพานอล (1-Propanol) เป็นตัวทำละลาย ตามการทดลองของ Murray และ Hansen [10] ซึ่งปลอดภัยต่อผู้ใช้และมีราคาถูกกว่าตัวทำละลายอินทรีย์ข้างต้น

ปัจจุบัน เทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีนมีอยู่หลายเทคนิคด้วยกัน เช่น โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-mass Spectrometry, GC-MS) และเนียร์อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (Near Infrared Spectroscopy, NIRS) เป็นต้น [11] แต่เทคนิคการวิเคราะห์เหล่านี้ต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง มีค่าใช้จ่ายสูง มีการเตรียมตัวอย่างที่ซับซ้อน และต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานที่มีความชำนาญเฉพาะ เทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตเมตรี (UV-visible Spectrophotometry) จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการใช้วิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีน เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความไว แม่นยำ ราคาไม่แพง ใช้งานง่าย สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างในปริมาณน้อยได้ [6] และยังมีรายงานการใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีนในน้ำอัดลม กาแฟ และชา อีกด้วย [12]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะสำรวจพฤติกรรมการบริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่จำหน่าย

ในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ของนักเรียนนายร้อยและอาจารย์ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า และวิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีนในเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนโดยใช้ 1-โพพานอล เป็นตัวทำละลาย ในการสกัดคาเฟอีน และวิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีนด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมตรี เพื่อให้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการเลือกบริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนสำหรับผู้บริโภค และเพื่อลดปัญหาสุขภาพจากการได้รับคาเฟอีนในปริมาณที่มากเกินไป

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อสำรวจพฤติกรรมการบริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่จำหน่ายในร้านกาแฟในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ของนักเรียนนายร้อยและอาจารย์ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

2.2 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีนในเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่จำหน่ายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

Ihsan et al. (2023) [13] ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของคาเฟอีนในเมล็ดกาแฟโรบัสต้าที่มีระดับการคั่วแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ คั่วอ่อน (180°C) คั่วกลาง (210°C) และคั่วเข้ม (240°C) โดยใช้ไตรคลอโรมีเทนเป็นตัวทำละลาย และวิเคราะห์ความเข้มข้นของคาเฟอีนด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมตรีที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร ผลการวิเคราะห์พบว่า เมล็ดกาแฟแบบคั่วอ่อน คั่วกลาง และคั่วเข้มมีความเข้มข้นของคาเฟอีนอยู่ในช่วง 10.31-11.02, 9.24-9.28 และ 7.07-7.09 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

Amen (2022) [14] ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของคาเฟอีนในชา 5 ยี่ห้อ คือ แซม (SAM) ฮิลทอป (Hilltop) ลิปตัน (Lipton) ทอป (Top) และไฮแลนด์ (Highland) ที่บริโภคกันในรัฐทาราบา ประเทศไนจีเรีย โดยใช้ เตตระคลอโรมีเทน (Tetrachloromethane, CCl_4) เป็นตัวทำละลาย และวิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีนด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมตรีที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร ผลการวิเคราะห์พบว่า ชาแซม ฮิลทอป ลิปตัน ทอป และไฮแลนด์ มีความเข้มข้นของคาเฟอีนเท่ากับ 0.29, 0.17, 0.3, 1.05 และ 0.34 มิลลิกรัม/100 มิลลิลิตร ตามลำดับ

Vuletic (2021) [15] ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของคาเฟอีนในตัวอย่างเครื่องดื่มชา น้ำอัดลม และเครื่องดื่มชูกำลังที่จำหน่ายในตลาดของประเทศโครเอเชียโดยใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย และวิเคราะห์ความเข้มข้นของคาเฟอีนด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมตรีที่ความยาวคลื่น 274 นาโนเมตร ผลการวิเคราะห์พบว่า เครื่องดื่มชา น้ำอัดลม และเครื่องดื่มชูกำลังมีความเข้มข้นของคาเฟอีนอยู่ในช่วง 558.14-1471.02, 48.20-136.04 และ 173.57-394.67 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

อาตุล อับดุลลอ (2551) [16] ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของคาเฟอีนในเครื่องดื่มปรุงแต่งด้วยช็อกโกแลตจำนวน 8 ยี่ห้อ 96 ตัวอย่าง โดยใช้ 1-โพพานอล เป็นตัวทำละลาย และวิเคราะห์ความเข้มข้นของคาเฟอีนด้วยเทคนิค ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมตรี ที่ความยาวคลื่นสูงสุด ($\lambda\text{-max}$) 273 นาโนเมตร

ผลการวิเคราะห์พบว่า เครื่องดื่มปรุงแต่งด้วยช็อกโกแลตกลุ่มดังกล่าวมีความเข้มข้นของคาเฟอีนเฉลี่ย 1.54–4.96 มิลลิกรัม/100 มิลลิลิตร

ไพรัตน์ โชควิบุลย์กิจ (2547) [9] ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของคาเฟอีนในเครื่องดื่มโค้ก โดยใช้ 1-โพพานอลเป็นตัวทำละลาย และวิเคราะห์ความเข้มข้นของคาเฟอีนด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมตรี ที่ความยาวคลื่นสูงสุด 274 นาโนเมตร ซึ่งได้จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานคาเฟอีนเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร ใน 1-โพพานอล ผลการวิเคราะห์พบว่า เครื่องดื่มโค้กมีความเข้มข้นของคาเฟอีนเฉลี่ย 10.34-0.43 มิลลิกรัม/100 มิลลิลิตร

4. วิธีดำเนินการศึกษา

4.1 การสำรวจพฤติกรรมการบริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่จำหน่ายในร้านกาแฟในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ของนักเรียนนายร้อยและอาจารย์ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

4.1.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

เลือกกลุ่มตัวอย่างจากประชากร คือ นักเรียนนายร้อยชั้นปีที่ 1-5 ปีการศึกษา 2565 และอาจารย์ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จำนวน 1,502 นาย โดยใช้สูตรคำนวณของ Yamane (1973) [17] ดังสมการที่ (1)

$$n = (N / (1 + Ne^2)) \quad (1)$$

เมื่อ n คือ ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง (คน)

N คือ ขนาดของประชากรทั้งหมด (1,502 นาย)

e คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้มีค่าเท่ากับ 0.05

จากการคำนวณพบว่า ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง (n) ที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 316 นาย

4.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล คือ แบบสอบถามพฤติกรรมการบริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่จำหน่ายในร้านกาแฟในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 เป็นแบบสอบถามข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ได้แก่ สถานภาพ เพศ และอายุ โดยมีลักษณะเป็นแบบตรวจสอบรายการ

ส่วนที่ 2 เป็นแบบสอบถามด้านพฤติกรรมการบริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่จำหน่ายในร้านกาแฟในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ได้แก่ ร้านกาแฟในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าที่ชื่นชอบ ประเภทเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่ชื่นชอบ วัตถุประสงค์ในการบริโภค และปริมาณการบริโภคต่อสัปดาห์ โดยมีลักษณะเป็นแบบตรวจสอบรายการ

ผู้วิจัยได้ตรวจสอบคุณภาพของแบบสอบถามด้านความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (Validity) โดยผู้เชี่ยวชาญด้านการวิจัยจำนวน 3 ท่าน คำนวณค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับเนื้อหา (Index of Item Objective Congruence: IOC) ได้ค่า IOC ในช่วง 0.67-1.0 ซึ่งเป็นค่าที่สามารถนำมาใช้ได้ แสดงว่าผู้เชี่ยวชาญทั้ง 3 ท่าน มีความเห็นสอดคล้องกันว่า เครื่องมือที่ในรูปแบบของแบบสอบถามที่สร้างขึ้นมีความสอดคล้องและสามารถวัดผลได้ตรงตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

4.1.3 การเก็บรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล

นำแบบสอบถามที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน มาใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างในช่วงเดือน มิถุนายน - สิงหาคม 2565 ผ่านระบบ Google Form จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามมาตรวจสอบความสมบูรณ์ ลงรหัส และบันทึกข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ (IBM SPSS V.20.0)

4.2 การเก็บตัวอย่าง

จากการสอบถามร้านกาแฟ 4 ร้าน ในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าคือ ร้าน A, ร้าน B, ร้าน C และร้าน D พบว่าร้านกาแฟทั้ง 4 ร้าน ใช้กาแฟเอสเปรสโซ (Espresso) เป็นส่วนผสมพื้นฐานในเครื่องดื่มประเภทกาแฟ 4 ชนิด ได้แก่ เอสเปรสโซ อเมริกาโน (Americano) คัปปุชชีโน (Cappuccino) และลัตเต (Latte) และใช้กาแฟเอสเปรสโซและโกโก้เป็นส่วนผสมพื้นฐานในเครื่องดื่มกาแฟชนิดมอคคา (Mocha) นอกจากนี้ยังใช้น้ำชาเขียวเป็นส่วนผสมพื้นฐานในเครื่องดื่มประเภทชาเขียวนมสด ใช้น้ำชาแดงเป็นส่วนผสมพื้นฐานในเครื่องดื่มประเภทชาไทย และใช้โกโก้เป็นส่วนผสมพื้นฐานในเครื่องดื่มประเภทโกโก้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเก็บตัวอย่างเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีน 4 ชนิด ได้แก่ กาแฟเอสเปรสโซ ชาเขียว ชาแดง และโกโก้ จากร้านกาแฟ 4 ร้าน โดยตัวอย่างเครื่องดื่มทั้ง 4 ชนิด จะใช้ส่วนผสมสำหรับทำเมนูเย็น แต่ไม่มีการใส่น้ำแข็ง เก็บตัวอย่างสัปดาห์ละ 1 ครั้ง ตลอดเดือน มิถุนายน - สิงหาคม 2565

4.3 การหาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลายคาเฟอีนมาตรฐาน

นำสารละลายมาตรฐานคาเฟอีน (ChemFaces, China) ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร ใน 1-โพรพานอล ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200-400 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น Shimadzu UV-1800 (Shimadzu, Japan) เพื่อหาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ -max) ของสารละลายมาตรฐานคาเฟอีน ซึ่งจะถูกใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานคาเฟอีนและวิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีนในเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่จำหน่ายในร้านกาแฟในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าต่อไป

4.4 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานคาเฟอีน

นำสารละลายมาตรฐานคาเฟอีนความเข้มข้น 6-20 มิลลิกรัม/ลิตร ใน 1-โพรพานอล ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลายมาตรฐานคาเฟอีนที่ได้จากการทดลองที่ 4.3 นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของคาเฟอีนในสารละลายมาตรฐานคาเฟอีน

4.5 การสกัดและวิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีนจากตัวอย่างเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีน

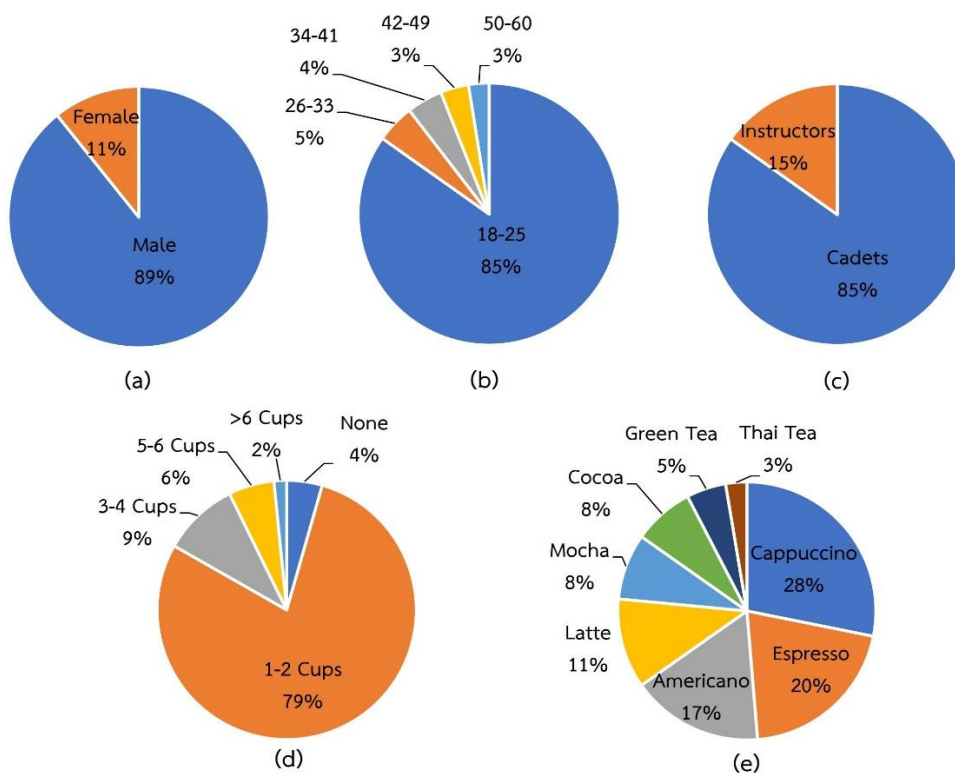
การสกัดคาเฟอีนจากตัวอย่างเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนดัดแปลงจากวิธีการของอาดุล อับดุลลอ (2551) [16]

โดยนำตัวอย่างเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนไปปรับให้ได้ค่า pH 12 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปิเปตตัวอย่างเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่ปรับค่า pH แล้ว ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่กรวยแยก เติมสารละลายอิมตัวของเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในน้ำปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นสกัดคาเฟอีนด้วย 1-โพรพานอล ปริมาตร 12.5 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้นอย่างสมบูรณ์ แยกเก็บชั้นของ 1-โพรพานอล และนำชั้นน้ำไปสกัดซ้ำอีกครั้งด้วย 1-โพรพานอล ปริมาตร 12.5 มิลลิลิตร แยกเก็บชั้น 1-โพรพานอล มารวมกับการสกัดครั้งแรก กำจัดน้ำที่ปะปนมาด้วยผงโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) กรองสารที่สกัดได้ด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 และนำสารที่สกัดได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณคาเฟอีนโดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ สารละลายมาตรฐานคาเฟอีน ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วคำนวณหาความเข้มข้นเฉลี่ยวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ (IBM SPSS V.20.0) โดยวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของคาเฟอีนในตัวอย่างเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนจากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One-way ANOVA และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DUNCAN ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$)

5. ผลการศึกษา

5.1 ผลการสำรวจพฤติกรรมการบริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่จำหน่ายในร้านกาแฟในโรงเรียนนายร้อย พระจุลจอมเกล้า ของนักเรียนนายร้อยและอาจารย์ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

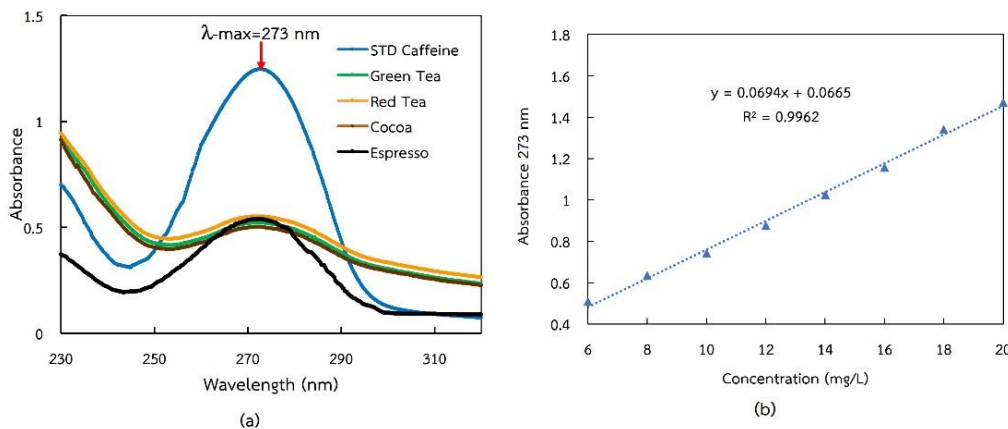
การสำรวจพฤติกรรมการบริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่จำหน่ายในร้านกาแฟในโรงเรียนนายร้อย พระจุลจอมเกล้า ของกลุ่มตัวอย่างคือ นักเรียนนายร้อยและอาจารย์ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อย พระจุลจอมเกล้า จำนวน 316 นาย ผลการสำรวจเมื่อจำแนกตามเพศพบว่า กลุ่มตัวอย่างเป็นเพศชาย จำนวน 282 นาย คิดเป็นร้อยละ 89 และเพศหญิง จำนวน 34 นาย คิดเป็นร้อยละ 11 (รูปที่ 1(a)) เมื่อจำแนกตามช่วงอายุ พบว่ามีกลุ่มตัวอย่างช่วงอายุ 18-25 ปี จำนวน 268 นาย คิดเป็นร้อยละ 85 ช่วงอายุ 26-33 ปี จำนวน 15 นาย คิดเป็นร้อยละ 5 ช่วงอายุ 34-41 ปี จำนวน 14 นาย คิดเป็นร้อยละ 4 ช่วงอายุ 42-49 ปี จำนวน 11 นาย คิดเป็นร้อยละ 3 และช่วงอายุ 50-60 ปี จำนวน 8 นาย คิดเป็นร้อยละ 3 (รูปที่ 1(b)) เมื่อจำแนกตามสถานภาพ ของกลุ่มตัวอย่างพบว่า เป็นนักเรียนนายร้อย จำนวน 268 นาย คิดเป็นร้อยละ 85 และเป็นอาจารย์ ส่วน การศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จำนวน 48 นาย คิดเป็นร้อยละ 15 (รูปที่ 1(c)) เมื่อสำรวจ พฤติกรรมบริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนของกลุ่มตัวอย่างพบว่า มีกลุ่มตัวอย่างที่ไม่บริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีน จำนวน 14 นาย คิดเป็นร้อยละ 4 กลุ่มตัวอย่างที่บริโภค 1-2 แก้ว/วัน จำนวน 249 นาย คิดเป็นร้อยละ 79 กลุ่มตัวอย่างที่บริโภค 3-4 แก้ว/วัน จำนวน 30 นาย คิดเป็นร้อยละ 9 กลุ่มตัวอย่างที่บริโภค 5-6 แก้ว/วัน จำนวน 18 นาย คิดเป็นร้อยละ 6 และกลุ่มตัวอย่างที่บริโภคมากกว่า 6 แก้ว/วัน จำนวน 5 นาย คิดเป็นร้อยละ 2 (รูปที่ 1(d)) โดยเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่นิยมบริโภคในกลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ คัปปูชิโน จำนวน 85 นาย คิดเป็น ร้อยละ 28 เอสเปรสโซ จำนวน 62 นาย คิดเป็นร้อยละ 20 อเมริกาโน จำนวน 50 นาย คิดเป็นร้อยละ 17 ลัตเต จำนวน 34 นาย คิดเป็นร้อยละ 11 มอคคา จำนวน 25 นาย คิดเป็นร้อยละ 8 โกโก้ จำนวน 23 นาย คิดเป็นร้อยละ 8 ชาเขียว จำนวน 15 นาย คิดเป็นร้อยละ 5 และชาไทย จำนวน 8 นาย คิดเป็นร้อยละ 3 ตามลำดับ (รูปที่ 1(e))



รูปที่ 1 ผลการสำรวจพฤติกรรมการบริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่จำหน่ายในร้านกาแฟในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ของนักเรียนนายร้อยและอาจารย์ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า โดย (a) จำแนกตามเพศ (b) จำแนกตามช่วงอายุ (c) จำแนกตามสถานภาพ (d) จำนวนเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่บริโภคต่อวัน และ (e) ประเภทเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่เป็นที่นิยม

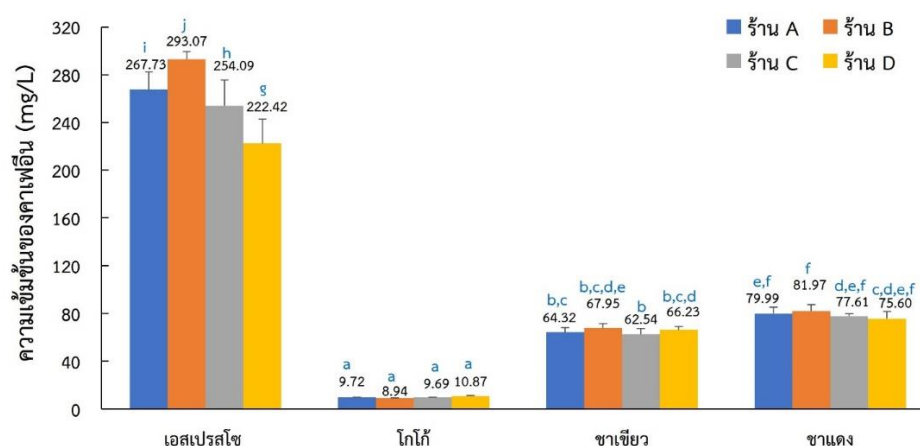
5.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีนจากตัวอย่างเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีน

การหาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลายมาตรฐานคาเฟอีนความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร ใน 1-โพพานอล ในช่วงความยาวคลื่น 200 – 400 นาโนเมตร พบว่าสารละลายมาตรฐานคาเฟอีนมีการดูดกลืนแสงสูงสุดเท่ากับ 273 นาโนเมตร ซึ่งตรงกับผลการศึกษาของอาดุล อับดุลลอ [16] และทิพย์รัตน์ ชาหอมชื่น และคณะ [18] (รูปที่ 2(a)) การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานคาเฟอีนจากความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคาเฟอีน 6-20 มิลลิกรัม/ลิตร ใน 1-โพพานอล พบว่าได้สมการเส้นตรง $y = 0.0694x + 0.0665$ และมีค่าความสัมพันธ์สหสัมพันธ์ (Correlation Caffeine : R^2) เท่ากับ 0.9962 (รูปที่ 2(b)) นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของของสารสกัดคาเฟอีนจากตัวอย่างเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนทั้ง 4 ชนิด พบว่าสารสกัดคาเฟอีนมีการดูดกลืนแสงสูงสุดเท่ากับ 273 นาโนเมตร (รูปที่ 2(a)) สอดคล้องกับผลการศึกษาของทิพย์รัตน์ ชาหอมชื่น และคณะ [18] และการศึกษาของ Eticha และ Bedassa ซึ่งพบว่าคาเฟอีนมีการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วง 271-276 นาโนเมตร [19] แสดงว่าวิธีที่ใช้ในการสกัดสามารถสกัดคาเฟอีนจากตัวอย่างเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนทั้ง 4 ชนิด ได้



รูปที่ 2 กราฟแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลายมาตรฐานคาเฟอีนและตัวอย่างเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีน และ (b) กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานคาเฟอีนความเข้มข้น 6-20 มิลลิกรัม/ลิตร ใน 1-โพรพานอล

เมื่อวิเคราะห์หาปริมาณคาเฟอีนจากตัวอย่างเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีน 4 ประเภท ได้แก่ กาแฟเอสเปรสโซ ชาเขียว ชาแดง และโกโก้ จากร้านกาแฟ 4 ร้าน ในโรงเรียนนายเรือพระจุลจอมเกล้าคือ ร้าน A, ร้าน B, ร้าน C และร้าน D โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานคาเฟอีน ดังแสดงในรูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์พบว่า เครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนทั้ง 4 ประเภท มีความเข้มข้นของคาเฟอีนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเครื่องดื่มที่มีความเข้มข้นของคาเฟอีนสูงที่สุด ได้แก่ กาแฟเอสเปรสโซ (222.42-293.07 มิลลิกรัม/ลิตร) รองลงมาคือ ชาแดง (75.60-81.97 มิลลิกรัม/ลิตร) ชาเขียว (62.54-67.95 มิลลิกรัม/ลิตร) และโกโก้ (8.94-10.87 มิลลิกรัม/ลิตร) ตามลำดับ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chaugule et al. และ Grujic-Latic et al. [5, 20] เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของคาเฟอีนในเครื่องดื่มจากร้านกาแฟทั้ง 4 ร้าน พบว่า ความเข้มข้นของคาเฟอีนในกาแฟเอสเปรสโซจากร้าน B ($293.07.42 \pm 6.34$ มิลลิกรัม/ลิตร) และร้าน D (222.42 ± 20.40 มิลลิกรัม/ลิตร) มีค่าสูงสุดและต่ำสุด ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของคาเฟอีนในกาแฟเอสเปรสโซจากร้านกาแฟทั้ง 4 ร้าน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ความเข้มข้นของคาเฟอีนในชาแดง จากร้าน B (81.97 ± 5.51 มิลลิกรัม/ลิตร) และร้าน D (75.60 ± 6.12 มิลลิกรัม/ลิตร) มีค่าสูงสุดและต่ำสุด ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของคาเฟอีนในชาแดงจากร้านกาแฟทั้ง 4 ร้าน มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ความเข้มข้นของคาเฟอีนในชาเขียวจากร้าน B (67.95 ± 3.52 มิลลิกรัม/ลิตร) และร้าน C (62.54 ± 5.00 มิลลิกรัม/ลิตร) มีค่าสูงสุดและต่ำสุด ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของคาเฟอีนในชาเขียวจากร้านกาแฟทั้ง 4 ร้าน มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และความเข้มข้นของคาเฟอีนในโกโก้จากร้าน D (10.87 ± 0.43 มิลลิกรัม/ลิตร) และร้าน B (8.94 ± 0.35 มิลลิกรัม/ลิตร) มีค่าสูงสุดและต่ำสุด ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของคาเฟอีนในโกโก้จากร้านกาแฟทั้ง 4 ร้าน มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)



รูปที่ 3 ความเข้มข้นของคาเฟอีนในตัวอย่างเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่สกัดด้วย 1-โพรพานอล และวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 273 นาโนเมตร ตัวอักษรภาษาอังกฤษ (a, b, ...) บนแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$ ของความเข้มข้นของคาเฟอีนในตัวอย่างเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีน

จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณคาเฟอีนในเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนทั้ง 4 ชนิด ที่จำหน่ายในร้านกาแฟทั้ง 4 ร้าน มีปริมาณแตกต่างกัน ความแตกต่างเหล่านี้เป็นผลมาจากแหล่งกำเนิด ความแปรปรวนทางพันธุกรรม สภาพแวดล้อมในการเจริญเติบโตของพืช ฤดูกาลและระยะเวลาในการเก็บเกี่ยว สูตรที่ใช้ในการชงเครื่องดื่ม และกระบวนการในการเตรียมและชงเครื่องดื่ม เช่น เวลาและอุณหภูมิในการคั่ว และความร้อนของน้ำที่ใช้ชงเครื่องดื่ม เป็นต้น [13, 14, 19, 20] ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการวิจัยของ Saad et al. [11] ซึ่งพบว่ากาแฟเอสเปรสโซที่มีจำหน่ายในร้านกาแฟในประเทศซาอุดีอาระเบียมีความเข้มข้นของคาเฟอีนอยู่ในช่วง 839.69-8,080.05 มิลลิกรัม/ลิตร และการวิจัยของ Grujic-Latic et al. [20] ซึ่งพบว่าชาดำ ชาเขียว และโกโก้ที่จำหน่ายในตลาดในประเทศเซอร์เบียมีความเข้มข้นของคาเฟอีนเท่ากับ $1,263.15 \pm 0.46$, $1,013.00 \pm 0.62$ และ 48.91 ± 0.34 มิลลิกรัม/100 มิลลิลิตร ตามลำดับ

นอกจากนี้ เมื่อคำนวณปริมาณคาเฟอีนต่อหน่วยบรรจุ (แก้ว) ในเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่จำหน่ายในร้านกาแฟทั้ง 4 ร้าน ดังแสดงในตาราง ผลการคำนวณพบว่า มอคชาซึ่งเป็นกาแฟที่มีส่วนผสมของเอสเปรสโซและโกโก้ มีปริมาณคาเฟอีนต่อหน่วยบรรจุสูงสุด (128.03-183.54 มิลลิกรัม) รองลงมาคือ เครื่องดื่มในกลุ่มกาแฟอีก 4 ชนิด ที่มีส่วนผสมหลักเป็นเอสเปรสโซ ได้แก่ เอสเปรสโซ คัปปูชิโน อเมริกาโน และลัตเต (121.49-177.31 มิลลิกรัม) ชาไทย (122.47-135.05 มิลลิกรัม) ชาเขียว (101.31-110.09 มิลลิกรัม) และโกโก้ (14.49-17.61 มิลลิกรัม) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคาเฟอีนในเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่จำหน่ายในร้านกาแฟทั้ง 4 ร้าน กับปริมาณคาเฟอีนที่สำนักงานโภชนาการ กรมอนามัย แนะนำให้บริโภคต่อวันคือ ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อวัน [5] พบว่าปริมาณที่แนะนำสำหรับการบริโภคเครื่องดื่มประเภทกาแฟและชาไทยที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพคือ ไม่เกิน 2 แก้วต่อวัน และเครื่องดื่มประเภทชาเขียวคือ ไม่เกิน 3 แก้วต่อวัน

ตาราง ปริมาณคาเฟอีนในเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่จำหน่ายในร้านกาแฟโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

ร้าน กาแฟ	เครื่องดื่มที่มีคาเฟอีน	ส่วนผสมที่มีคาเฟอีน			ปริมาณ คาเฟอีน/แก้ว (mg)
		ส่วนผสม	ปริมาณ (g)	ปริมาตร/ แก้ว (mL)	
ร้าน A	คัปชชีโน, เอสเปรสโซ, อเมริกาโน, ลัตเต	เอสเปรสโซ	16-20	55	161.98
	มอคคา	เอสเปรสโซ	16-20	55	168.54
		โกโก้	10		
	โกโก้	โกโก้	24	90	15.75
	ชาเขียว	ชาเขียว	10-12	90	104.20
	ชาไทย	ชาแดง	10-12	90	132.71
ร้าน B	คัปชชีโน, เอสเปรสโซ, อเมริกาโน, ลัตเต	เอสเปรสโซ	16-20	55	177.31
	มอคคา	เอสเปรสโซ	16-20	55	183.35
		โกโก้	10		
	โกโก้	โกโก้	24	90	14.49
	ชาเขียว	ชาเขียว	10-12	90	110.09
	ชาไทย	ชาแดง	10-12	90	135.05
ร้าน C	คัปชชีโน, เอสเปรสโซ, อเมริกาโน, ลัตเต	เอสเปรสโซ	16-20	60	121.49
	มอคคา	เอสเปรสโซ	16-20	60	128.03
		โกโก้	10		
	โกโก้	โกโก้	24	90	15.70
	ชาเขียว	ชาเขียว	10-12	90	101.31
	ชาไทย	ชาแดง	10-12	90	125.73
ร้าน D	คัปชชีโน, เอสเปรสโซ, อเมริกาโน, ลัตเต	เอสเปรสโซ	16-20	55	134.57
	มอคคา	เอสเปรสโซ	16-20	55	141.91
		โกโก้	10		
	โกโก้	โกโก้	24	90	17.61
	ชาเขียว	ชาเขียว	10-12	90	107.29
	ชาไทย	ชาแดง	10-12	90	122.47

6. สรุป

งานวิจัยนี้ได้สำรวจพฤติกรรมการบริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่จำหน่ายในร้านกาแฟในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จากกลุ่มตัวอย่างคือ นักเรียนนายร้อยและอาจารย์ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จำนวน 316 นาย ผลการสำรวจพบว่า กลุ่มตัวอย่างร้อยละ 96 บริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนอย่างน้อย 1-2 แก้ว/วัน โดยเครื่องดื่มที่เป็นที่นิยม ได้แก่ เครื่องดื่มในกลุ่มของกาแฟ (คัปซุชิน เอสเปรสโซ อเมริกาโน ลัตเต และมอคคา) รองลงมาคือ โกโก้ ชาเขียว และชาไทย ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีนต่อหน่วยบรรจุ (แก้ว) ในตัวอย่างเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่จำหน่ายในร้านกาแฟในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าจำนวน 4 ร้าน คือ ร้าน A, ร้าน B, ร้าน C และร้าน D โดยการสกัดด้วย 1-โพรพานอล และวิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีนด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมตริกที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 273 นาโนเมตร ผลการวิเคราะห์พบว่า เครื่องดื่มประเภทกาแฟทั้ง 5 ชนิด คือ คัปซุชิน เอสเปรสโซ อเมริกาโน ลัตเต และมอคคา มีปริมาณคาเฟอีนต่อหน่วยบรรจุมากที่สุด (121.49-183.54 มิลลิกรัม) รองลงมาคือ ชาไทย (122.47-135.05 มิลลิกรัม) ชาเขียว (101.31-110.09 มิลลิกรัม) และโกโก้ (14.49-17.61 มิลลิกรัม) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคาเฟอีนในเครื่องดื่มจากร้านกาแฟทั้ง 4 ร้าน พบว่าเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนประเภทกาแฟมีปริมาณคาเฟอีนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่เครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนอีก 3 ประเภท คือ ชาไทย ชาเขียว และโกโก้ ปริมาณคาเฟอีนแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคาเฟอีนในเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนที่วิเคราะห์ได้กับปริมาณคาเฟอีนที่สำนักโภชนาการ กรมอนามัย แนะนำให้บริโภคต่อวันคือ ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อวัน พบว่า การบริโภคเครื่องดื่มจากร้านกาแฟในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าทั้ง 4 ร้าน ประเภทกาแฟและชาไทยไม่เกิน 2 แก้วต่อวัน และเครื่องดื่มประเภทชาเขียวไม่เกิน 3 แก้วต่อวัน จะทำให้ผู้บริโภคได้รับปริมาณคาเฟอีนในปริมาณที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ อย่างไรก็ตามจากการสำรวจพบว่า กลุ่มตัวอย่างร้อยละ 17 บริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนมากกว่า 2 แก้วต่อวัน จึงเป็นที่น่ากังวลว่าประชากรในกลุ่มตัวอย่างนี้มีความเสี่ยงที่จะได้รับอันตรายจากการได้รับปริมาณคาเฟอีนที่มากเกินไป ผลการศึกษาจากงานวิจัยในครั้งนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงและเป็นแนวทางให้ผู้บริโภคเลือกบริโภคเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีนในปริมาณที่เหมาะสมและเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพของผู้บริโภค

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์และกำลังพลกองวิชาเคมี ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าที่ให้ความช่วยเหลือจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Amare M, Shimelis A. Polymer modified glassy carbon electrode for the electrochemical determination of caffeine in coffee. Talanta [Internet]. 2012 May;93:122-8. Available from: https://www.researchgate.net/publication/223965288_Polymer_modified_glassy_carbon_electrode_for_the_electrochemical_determination_of_caffeine_in_coffee

- [2] ปัทมา ตาปราบ. การศึกษาการสื่อสารทางการตลาดและลักษณะของผู้บริโภคกาแฟสด [การศึกษาค้นคว้าอิสระ ปริญญาโท สาขาการตลาด]. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2551.
- [3] Norton TR, Lazev AB, Sullivan MJ. The ‘Buzz’ on caffeine: patterns of caffeine use in a convenience sample of college students. J Caffeine Res [Internet]. 2011 Mar;1(1):35-40. Available from: https://www.researchgate.net/publication/275377696_The_Buzz_on_Caffeine_Patterns_of_Caffeine_Use_in_a_Convenience_Sample_of_College_Students
- [4] ศิวพร ไวยยะพิศาล. พฤติกรรมการบริโภคกาแฟสดของบุคลากรสายวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร; 2560.
- [5] Chaugule A, et al. Extraction of caffeine. Int J Adv Res Chem Sci [Internet]. 2019;6(9):11-9. Available from: <https://www.arcjournals.org/pdfs/ijarcs/v6-i9/2.pdf>
- [6] ณัฐนิช อินทร์ขำ. ข้อดีของการดื่ม “กาแฟ” ที่มี “คาเฟอีนธรรมชาติ” [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สำนักโภชนาการ กรมอนามัย; 2565 [เข้าถึงเมื่อ 1 พ.ค. 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://nutrition2.anamai.moph.go.th/th/nrhnews>
- [7] Willson C. The clinical toxicology of caffeine: A review and case study. Toxicol Rep [Internet]. 2018 Nov 3;5:1140-52. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6247400/>
- [8] Gaza U. A comparative analysis of caffeine extraction efficiency from different tea varieties and its effect on human physiology: a spectrophotometric investigation. Am J Anal Chem [Internet]. 2023 Mar;14(3):134-148. Available from: https://www.researchgate.net/publication/370363774_A_Comparative_Analysis_of_Caffeine_Extraction_Efficiency_from_Different_Tea_Varieties_and_Its_Effect_on_Human_Physiology_A_Spectrophotometric_Investigation
- [9] ไพรัตน์ โชควิบุลย์กิจ. การวิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีนในเครื่องดื่มโคล่าโดยวิธีการสกัดและสเปกโตรโฟโตเมตรี. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม. 2548;1(1):40-4.
- [10] Murray SD, Hansen PJ. The extraction of caffeine from tea: an old undergraduate experiment revisited. J Chem Educ [Internet]. 1995 Sep;72(9):851-852. Available from: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1995JChEd..72..851M/abstract>
- [11] Saad M, et al. Determination of caffeine content in coffee drinks prepared in some coffee shops in the local market in Jeddah city, Saudi Arabia. Open Chem [Internet]. 2023 Oct 30;21:1-7. Available from: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/chem-2023-0131/html>
- [12] Gebrewold F, Geletu G. Chemistry of caffeine in coffee and its determination using UV/Vis spectrophotometer: a review article. Chem Mater Res [Internet]. 2018;10(1):23-7. Available from: <https://core.ac.uk/download/pdf/234667097.pdf>

- [13] Ihsan BRP, et al. Determination of caffeine in robusta coffee beans with different roasting methods using UV-Vis spectrophotometry. Food Res [Internet]. 2023 Dec;7(6):29-34. Available from: https://www.myfoodresearch.com/uploads/8/4/8/5/84855864/_4_fr-2021-1006_ihsan.pdf
- [14] Amen A. Determination of caffeine content in some commonly consumed tea brands in Taraba state. Int J Model Appl Sci Res [Internet]. 2022 Sep;25(9):165-74. Available from: https://www.cambridgenigeriapub.com/wp-content/uploads/2022/11/CJMASR_Vol25_No9_Sept_2022-13.pdf
- [15] Vuletic N, Bardic L, Odzak R. Spectrophotometric determination of caffeine content in the selection of teas, soft and energy drinks available on the Croatian market. Food Res [Internet]. 2021 Apr;5(2):325-30. Available from: https://www.myfoodresearch.com/uploads/8/4/8/5/84855864/_39_fr-2020-482_vuletic.pdf
- [16] อาตุล อับดุลลอ. การวิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีนในเครื่องดื่มปรุงแต่งด้วยช็อกโกแลต โดยวิธีใช้ 1-โพรพานอลเป็นสารสกัดด้วยเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมตรี [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ; 2551.
- [17] Yamane T. Statistics: an introductory analysis. 3rd ed. New York: Harper and Row; 1973.
- [18] ทิพย์รัตน์ ขาหอมชื่น และคณะ. ประสิทธิภาพของวิธีการสกัดโดยคลื่นอัลตราโซนิกต่อปริมาณคาเฟอีนและฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียจากกากกาแฟ. วารสารสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา. 2566;8(2):61-71.
- [19] Eticha S, Bedassa T. Determination of caffeine in coffee samples by high performance liquid chromatography and ultraviolet-visible spectrophotometry methods from Wollega, Ethiopia. Int J Biochem Biophys Mol Biol [Internet]. 2020 Aug;5(1):8-17. Available from: https://www.researchgate.net/publication/346796624_Determination_of_Caffeine_in_Coffee_Samples_by_High_Performance_Liquid_Chromatography_and_Ultra_Violet_-_Visible_Spectrophotometry_Methods_from_Wollega_Ethiopia
- [20] Grujic-Latic N, et al. Quantitative determination of caffeine in different matrices. Maced Pharm Bull [Internet]. 2016;62(1):77-84. Available from: https://bulletin.mfd.org.mk/volumes/Volume%2062/62_007.pdf
- [21] Misto KA, et al. Spectrophotometric analysis of caffeine in local product of arabica: observed at different roasted temperatures. IOP Conf Ser Mater Sci Eng [Internet]. 2021 Aug;1173(1):1-7. Available from: https://www.researchgate.net/publication/354304201_Spectrophotometric_analysis_of_caffeine_in_local_product_of_Arabica_observed_at_different_roasted_temperatures

การพัฒนาชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบวงกลมโดยใช้อาduino

Development of a Circular Motion Experiment Kit using Arduino

นุชนาฏ สุชาติพงศ์¹

Nutchanat Suchatpong¹

Received: April 25, 2024

Revised: May 25, 2024

Accepted: May 27, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำอาduinoมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบวงกลม ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นรอบวงของวงกลมรัศมีคงที่ค่าหนึ่ง โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงสู่ศูนย์กลางกับความเร็วเชิงมุมของวัตถุที่เคลื่อนที่แบบวงกลมด้วยความเร็วคงที่ การวัดค่าความเร็วเชิงมุมได้ใช้เซนเซอร์วัดความเร็วรอบรวมกับการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์บนบอร์ดอาduinoและแสดงผลบนจอ Liquid Crystal Display (LCD) แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่ารัศมีวงกลม ผลการวิจัยพบว่าชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถวัดค่ารัศมีวงกลมได้ใกล้เคียงกับค่าจริง โดยมีความคลาดเคลื่อน 2.87% แสดงให้เห็นว่าชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้ทดลองในการวัดค่ารัศมีวงกลมในการศึกษาเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมได้อย่างแม่นยำ

คำสำคัญ: ความเร็วเชิงมุม, ความเร่งสู่ศูนย์กลาง, ไมโครคอนโทรลเลอร์, รัศมีวงกลม

¹นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ หลักสูตรฟิสิกส์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

¹Scientist Professional level, Division of Physical Science, Faculty of Science Prince of Songkla University, Songkhla 90110

E-mail: nutchanat.su@psu.ac.th

Abstract

This research applies Arduino to develop an experimental setup for circular motion, which involves movement along the circumference of a circle with a constant radius. It leverages the relationship between centripetal force and the angular velocity of an object moving in a circle at a constant speed. The angular velocity is measured using a speed sensor in conjunction with a microcontroller on an arduino board and displayed on a Liquid Crystal Display (LCD) screen. The data is then analyzed to determine the circle's radius. The results show that the developed experimental setup can measure the circle's radius with an accuracy close to the actual value, with a margin of error of 2.87%. This demonstrates that the developed experimental setup can be used accurately for measuring the radius of a circle in studies of circular motion.

Keywords: Angular Velocity, Centripetal Acceleration, Microcontroller, Radius of circle

1. บทนำ

หลักสูตรฟิสิกส์ สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ มีหน้าที่รับผิดชอบการศึกษารายวิชาฟิสิกส์ทั้งในรายวิชาทางทฤษฎีและรายวิชาปฏิบัติการ โดยมุ่งเน้นให้นักศึกษามีความรู้ความเข้าใจในหลักการและสามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติอย่างถูกต้องเหมาะสมตามมาตรฐานสากล ดังนั้นการจัดการเรียนการสอนรายวิชาฟิสิกส์จึงควรใช้วิธีที่หลากหลายผสมผสานกันไป กิจกรรมการทดลองก็นับว่าเป็นวิธีการที่สำคัญมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องจัดให้มีการปฏิบัติการทดลองควบคู่กันไปกับการเรียนทฤษฎีเพื่อให้ผู้เรียนได้เกิดความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีรวมถึงทักษะการปฏิบัติการทางฟิสิกส์ ซึ่งการใช้ชุดการทดลองถือเป็นตัวเลือกหนึ่งในการเพิ่มผลการเรียนรู้ในการเรียนฟิสิกส์ได้ดี [1]

การสร้างชุดการทดลองทางฟิสิกส์ที่มีประสิทธิภาพสูงและมีราคาถูกโดยอาศัยงานวิจัยเพื่อเป็นองค์ความรู้และมีการถ่ายทอดองค์ความรู้เหล่านี้ให้กับบุคลากรทางการศึกษา มีส่วนขับเคลื่อนการสร้างสังคมแห่งการเรียนรู้ให้พลเมืองมีทักษะในศตวรรษที่ 21 ในรูปแบบของ STEM หรือสะเต็มศึกษา ทำให้นักเรียนได้เรียนรู้จากกิจกรรมใหม่ๆ ที่ไม่เฉพาะการสอนเพื่อทำข้อสอบ ครุมีโครงการทางวิทยาศาสตร์ไว้ให้เด็กได้เรียนรู้ โรงเรียนมีชุดการทดลองที่มีความเที่ยงตรง มีความทันสมัย ราคาถูก ที่เกิดจากการทำกิจกรรมร่วมกันระหว่างครูและนักเรียน สิ่งเหล่านี้สามารถตอบตัวชี้วัดของแผนการจัดการศึกษาแห่งชาติได้เป็นอย่างดี ซึ่งงานวิจัยนี้คำนึงถึงการนำนวัตกรรมมาประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนปฏิบัติการเรื่องการเคลื่อนที่เป็นวงกลม [2]

ปัจจุบันนักวิจัยรวมถึงผู้สอนรายวิชาวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์จำนวนมากได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการนำนวัตกรรมมาใช้ในการพัฒนาการเรียนการสอนรายวิชาปฏิบัติการ ผู้วิจัยมีความรู้พื้นฐานแพลตฟอร์มไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ด้านบอร์ด Arduino [3] ซึ่ง Arduino เป็นบอร์ดที่ออกแบบมาเพื่อให้ใช้งานได้ง่าย ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้างภายในชิพและมีส่วน

คือ 1) ราคาไม่แพง เมื่อเทียบกับแพลตฟอร์มไมโครคอนโทรลเลอร์อื่น ๆ โมดูล Arduino ที่มีราคาถูกที่สุดสามารถประกอบได้ด้วยมือและแม้แต่โมดูล Arduino ที่ประกอบไว้ล่วงหน้าก็มีราคาถูก 2) ข้ามแพลตฟอร์ม (Cross-platform) Arduino Software (IDE) ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Windows, Macintosh OSX และ Linux ซึ่งระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ส่วนใหญ่จะสามารถใช้งานได้เพียงระบบปฏิบัติการ Windows 3) สภาพแวดล้อมการเขียนโปรแกรมที่เรียบง่ายและชัดเจน (Simple and Clear Programming Environment) Arduino Software (IDE) ใช้งานง่ายสำหรับผู้เริ่มต้นใช้งานและมีความยืดหยุ่นเพียงพอสำหรับผู้ใช้งานขั้นสูง ในขณะที่การเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ในแพลตฟอร์มอื่น ๆ และมักจะเป็นชุดคำสั่งสำเร็จรูปที่ไม่สามารถแก้ไขได้ 4) ซอฟต์แวร์โอเพนซอร์สและส่วนขยาย (Open Source and Extensible Software) ซอฟต์แวร์ Arduino เป็นเครื่องมือโอเพนซอร์สซึ่งสามารถใช้ได้กับผู้เริ่มต้นใช้งานไปจนถึงโปรแกรมเมอร์ที่มีประสบการณ์ ภาษานี้สามารถขยายได้ผ่านไลบรารี (Library) ภาษา C/C++ 5) ฮาร์ดแวร์โอเพนซอร์สและฮาร์ดแวร์ที่ต่อขยายเพิ่มเติม (Open Source and Extensible Hardware) แผนผังของบอร์ด Arduino ได้รับการเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ผู้เริ่มต้นใช้งานหรือผู้ออกแบบวงจรที่มีประสบการณ์สามารถสร้างโมดูลของตัวเองขยายและปรับปรุงได้ [4]

สำหรับรายวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์พื้นฐานเป็นรายวิชาที่สอนให้กับนักศึกษาหลายคนด้วยกัน ชุดทดลองส่วนใหญ่ยังล้าสมัย อีกทั้งอุปกรณ์บางอย่างต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นเพื่อลดรายจ่ายและเพื่อตอบสนองต่อนโยบายด้านเศรษฐกิจพอเพียง ผู้วิจัยจึงสนใจนำบอร์ด Arduino มาประยุกต์ใช้ในการสร้างชุดทดลองสำหรับเรียนการสอนปฏิบัติการฟิสิกส์ ในชุดทดลองกลศาสตร์ฟิสิกส์เรื่องการเคลื่อนที่เป็นวงกลม

การเคลื่อนที่แบบวงกลมเป็นการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นรอบวงของวงกลมแบ่งได้เป็น 2 แบบย่อย คือ การเคลื่อนที่แบบวงกลมสม่ำเสมอกับการเคลื่อนที่แบบวงกลมไม่สม่ำเสมอ โดยในรายวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์พื้นฐานได้ศึกษาการเคลื่อนที่แบบวงกลมสม่ำเสมอซึ่งเป็นการเคลื่อนที่โดยที่ความเร็วของวัตถุตามแนวเส้นรอบวงมีขนาดคงที่ แสดงให้เห็นว่าความเร่งตามแนวนี้มีค่าเป็นศูนย์ แต่เนื่องจากทิศทางของความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาจึงแสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของความเร่ง โดยความเร่งที่ว่านี้จะต้องมีทิศตั้งฉากกับแนวเส้นรอบวงเท่านั้นซึ่งก็คือทิศตามแนวรัศมีวงกลมนั่นเอง ซึ่งความเร่งขณะใดขณะหนึ่งที่มีทิศตั้งฉากกับความเร็วตามแนวเส้นรอบวงหรือขนานกับแนวรัศมีในลักษณะที่ชี้เข้าหาจุดศูนย์กลางการเคลื่อนที่ตลอดเวลาจึงสามารถเรียกความเร่งนี้ได้ว่า ความเร่งสู่ศูนย์กลาง (a_c) สำหรับการเคลื่อนที่แบบวงกลมสม่ำเสมอขนาดของความเร่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1) เมื่อ ω คือความเร็วเชิงมุม และ r คือรัศมีวงกลม

$$a_c = \omega^2 r \quad (1)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งสู่ศูนย์กลางกับกำลังสองของความเร็วเชิงมุม ในสมการที่ (1) จึงสามารถวิเคราะห์หาค่ารัศมีวงกลมของการเคลื่อนที่แบบวงกลมได้ [5]

ปัจจุบันการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมของรายวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์พื้นฐาน ใช้วิธีการจับเวลาด้วยนาฬิกาแล้วนำมาคำนวณหาค่าคาบในการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบวงกลมเพื่อนำมาคำนวณหาความเร็วเชิงมุมซึ่งมีความซับซ้อนหลายขั้นตอน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ออกแบบชุดอุปกรณ์ทดลองสำหรับวัดค่าความเร็วเชิงมุมในการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบวงกลมโดยใช้เซนเซอร์วัดความเร็วรอบของวัตถุแล้วส่งสัญญาณไปยังบอร์ดอาดูยโน้เพื่อแปลงผลสัญญาณออกมาเป็นค่าความเร็วเชิงมุมและแสดงผลบนจอ LCD ซึ่งอุปกรณ์นี้จะช่วยลดขั้นตอนในการทดลองและให้ได้ผลการทดลองที่มีความแม่นยำมากขึ้น

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่แบบวงกลมและความสัมพันธ์ระหว่างแรงสู่ศูนย์กลางกับความเร็วเชิงมุม
- 2.2 เพื่อออกแบบชุดทดลองสำหรับวัดค่าความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่แบบวงกลม

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วีระ บุญผุด [6] ได้พัฒนาชุดทดลองการหาค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกด้วยตัวตรวจวัดเวลาแบบดิจิทัลพร้อมโปรแกรมแสดงผลอัตโนมัติด้วย IoT บน Smartphone โดยใช้ตัวตรวจวัดเปียโซอิเล็กทริกวัดค่าเวลาและใช้ตัวตรวจวัดอัลตราโซนิกวัดค่าการกระจัดรวมกับการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด Arduino Mega2560 R3 ควบคุมและแสดงผลอัตโนมัติบนจอภาพชนิดสัมผัส อีกทั้งยังใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งควบคุมและแสดงผลบนสมาร์ตโฟนผ่านแอปพลิเคชันบลิงค์ จากการศึกษาพบว่าค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกที่วัดได้จากชุดทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานโดยมีความแม่นยำถึงร้อยละ 99.51

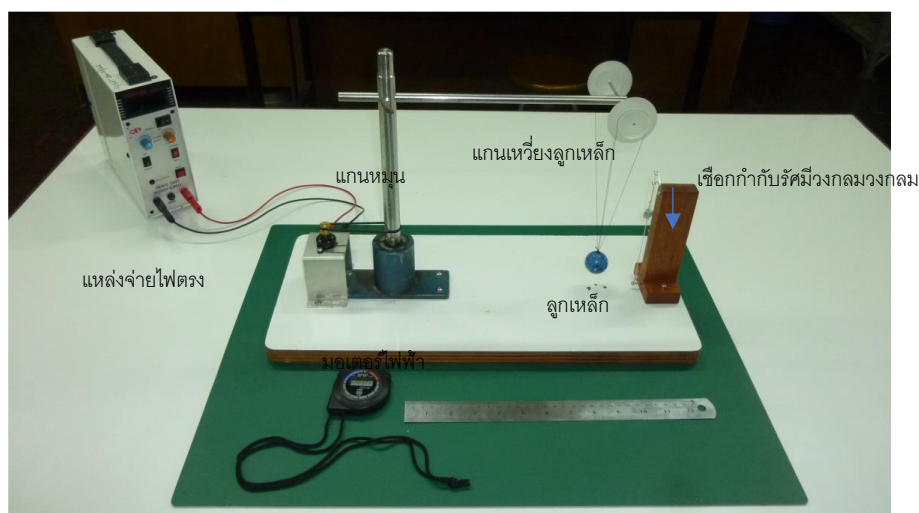
ศุภกานต์ แก้วเหลื่อม และคณะ [7] ได้ออกแบบระบบร่นน้ำแปลงผักอัตโนมัติผ่านเซนเซอร์วัดความชื้นในดินและส่งสัญญาณข้อมูลกลับไปยังตัวรับสัญญาณโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (บอร์ดอาดูยโน้) ในการควบคุมการทำงาน โดยการติดตั้งเซนเซอร์ในบริเวณแปลงเพาะปลูกจำลอง 2 แปลง สำหรับตรวจวัดค่าความชื้นในดิน จากนั้นส่งค่าการตรวจวัดผ่านโมดูลสื่อสารแบบมีสายไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการประมวลผลว่าควรจ่ายน้ำหรือไม่ โดยผ่านเงื่อนไขของความชื้น 70% ในการควบคุมให้ระบบจ่ายน้ำเพื่อรดน้ำ หากความชื้นต่ำกว่า 70% ระบบจะจ่ายน้ำเพื่อรดน้ำแปลงผักอัตโนมัติและเมื่อความชื้นมากกว่า 70% ระบบจะหยุดจ่ายน้ำ โดยค่าความชื้นที่วัดได้จะถูกส่งไปเก็บที่โมดูลเอสดีการ์ดเพื่อไปวิเคราะห์ผลการทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบพบว่าระบบที่สร้างขึ้นสามารถควบคุมความชื้นในดินได้ดีที่สุดที่ 69.99% มีความคลาดเคลื่อน 0.000948% และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.04

Wissarut and *et.al* [8] ได้ประยุกต์ใช้อาดูยโน้ในการวัดค่ายังโมดูลัสในไม้บรรทัดเหล็กโดยใช้เซนเซอร์อินฟราเรดตรวจจับการเคลื่อนที่ของวัตถุแล้วส่งสัญญาณไปยังบอร์ดอาดูยโน้เพื่อประมวลผลและแสดงผลเป็นค่าความถี่บนจอ LCD ซึ่งผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถวัดค่ายังโมดูลัสได้ 227 ± 14 GPa โดยที่ค่ายังโมดูลัสของสแตนเลสมีค่าประมาณ 200 GPa ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่วัดได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมาก

Nutchanat S. and Vitchuda S. [9] ได้ประยุกต์ใช้อาduino ในการวัดค่าความถี่การแกว่งของวัตถุฟิสิกส์เพนดูลัมโดยใช้เซนเซอร์อินฟราเรดตรวจจับการเคลื่อนที่ของวัตถุแล้วส่งสัญญาณไปยังบอร์ดอาduino เพื่อประมวลผลและแสดงผลบนจอ LCD โดยพบว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถวัดค่าความถี่ได้ใกล้เคียงกับค่าจริงทางทฤษฎี มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 2.5%

4. วิธีดำเนินการศึกษา

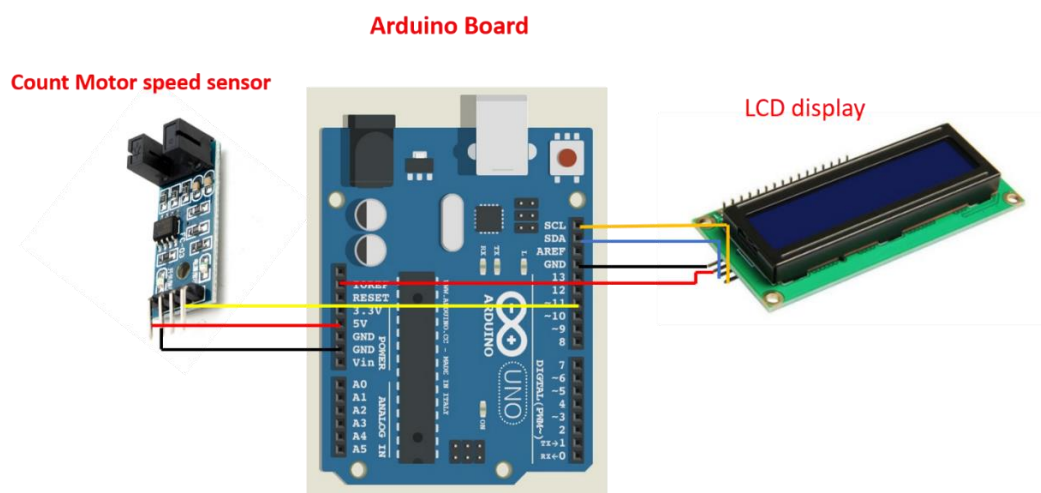
งานวิจัยนี้ได้นำชุดทดลองและอุปกรณ์ที่มีในห้องปฏิบัติการมาประยุกต์ใช้งานดังรูปที่ 1 ชุดทดลองนี้ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับค่าได้ ทำหน้าที่จ่ายไฟเพื่อขับมอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อมอเตอร์หมุนสายพานจากแกนของมอเตอร์จะจุดให้แกนหมุนเกิดการหมุนตามมา ด้านบนของแกนมีแขนปรับระยะได้สอดอยู่เพื่อปรับรัศมีการหมุนให้มีค่าต่าง ๆ กัน โดยปลายแขนด้านหนึ่งจะแขวนลูกเหล็กเอาไว้เมื่อแกนหมุนมีการหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ ลูกเหล็กจะถูกเหวี่ยงออกไปและเคลื่อนที่เป็นวงกลมสม่ำเสมอ ในห้องปฏิบัติการจะใช้วิธีการจับเวลาในการเคลื่อนที่ของวัตถุแล้วนำมาคำนวณหาค่าความเร็วเชิงมุมและความเร่งสู่ศูนย์กลางต่อไป



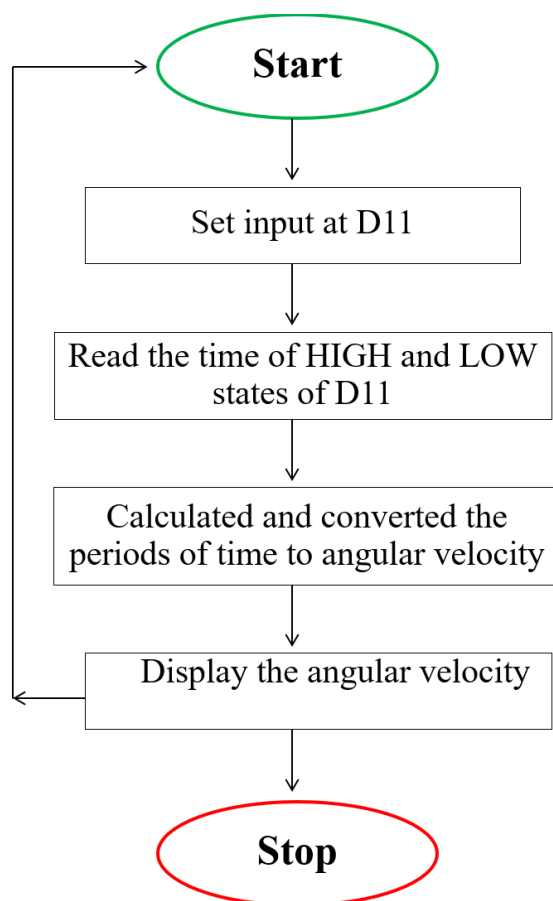
รูปที่ 1 ชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบวงกลม

4.1 การออกแบบอุปกรณ์การทดลองการเคลื่อนที่แบบวงกลม

อุปกรณ์สำหรับวัดค่าความเร็วเชิงมุมในงานวิจัยนี้ออกแบบโดยการใช้ เซนเซอร์วัดความเร็วรอบ (Count Motor Speed Sensor) ซึ่งเป็นเซนเซอร์ที่ใช้ตรวจจับและส่งสัญญาณเมื่อมีวัตถุเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์ โดยสัญญาณที่ได้จะถูกส่งไปยังบอร์ดอาduino (Arduino Board) เพื่อประมวลผลและแสดงผลที่ได้บนหน้าจอแสดงผล (LCD Displays) ดังรูปที่ 2 โดยมีขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม ดังรูปที่ 3



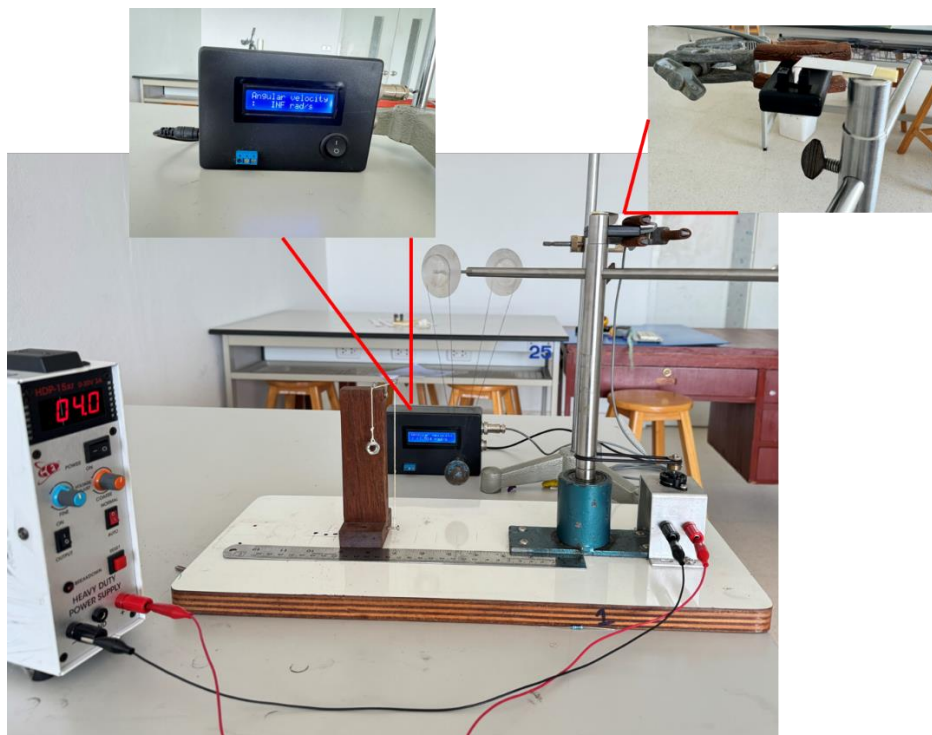
รูปที่ 2 แผงการออกแบบอุปกรณ์สำหรับการทดลองการเคลื่อนที่แบบวงกลม



รูปที่ 3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

4.2 การทดลองการเคลื่อนที่แบบวงกลมโดยชุดทดลอง

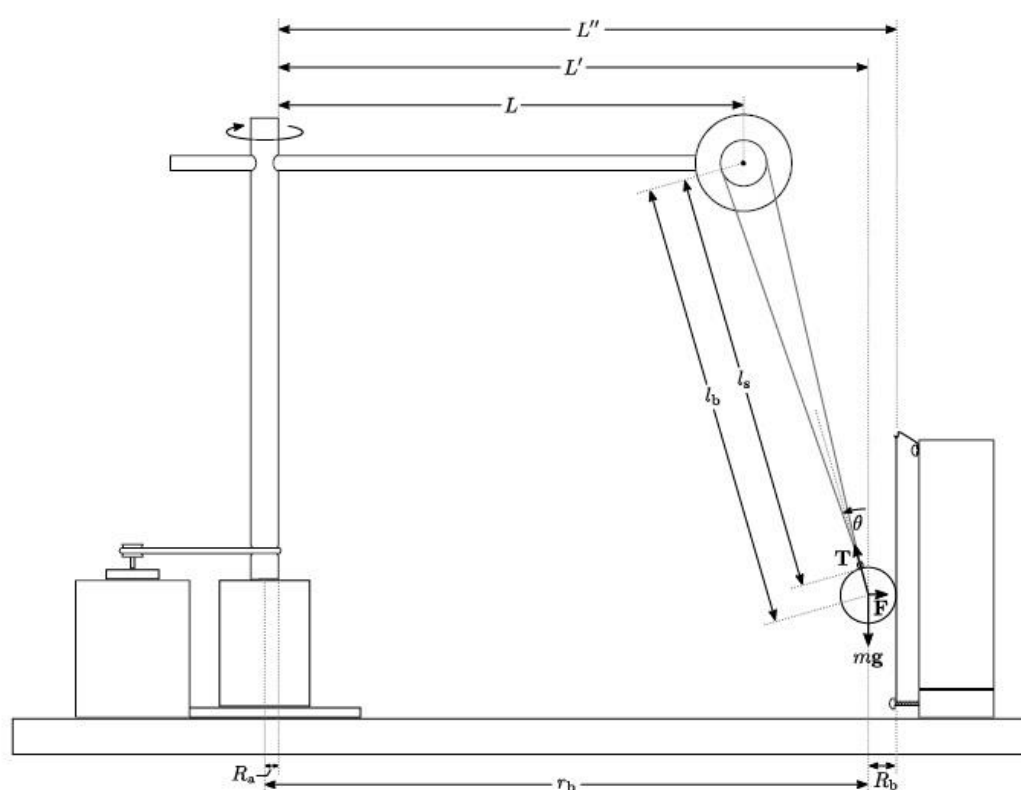
วิธีการทดลองการเคลื่อนที่แบบวงกลมผู้วิจัยได้ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วรอบในการเคลื่อนที่แบบวงกลมของชุดทดลองดังรูปที่ 4 โดยเมื่อแกนหมุนมีการหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ ลูกเหล็กถูกเหวี่ยงออกไปและเคลื่อนที่เป็นวงกลมสม่ำเสมอซึ่งเราได้กำหนดรัศมีของวงกลมให้เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งโดยอาศัยเชือกกำกับระยะเมื่อลูกเหล็กเคลื่อนที่สัมผัสเชือกกำกับระยะและแกนหมุนเคลื่อนที่ตัดผ่านเซนเซอร์วัดความเร็วรอบแล้วค่าความเร็วเชิงมุมจะแสดงบนหน้าจอแสดงผล



รูปที่ 4 ชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบวงกลมโดยการประยุกต์ใช้ฮาร์ดแวร์

ในส่วนค่าความเร่งสู่ศูนย์กลางนั้นเราสามารถหาได้โดยวิธีการวัดทางอ้อมด้วยการคำนวณจากมุมที่ลูกเหล็กเบนไปจากแนวตั้ง ซึ่งเมื่อจากรูปที่ 5 แรงที่กระทำกับลูกเหล็กประกอบด้วยแรงโน้มถ่วง (mg) แรงสู่ศูนย์กลาง (F) และแรงตึงเชือก (T) เมื่อการเหวี่ยงของลูกเหล็กอยู่ในสถานะสมดุล (เหวี่ยงด้วยรัศมี (r) คงที่) สามารถหาความเร่งสู่ศูนย์กลางได้จากสมการ $a = g \tan \theta$ โดยใช้ค่า $g = 9.781 \text{ m/s}^2$ ซึ่งเป็นค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกที่จังหวัดสงขลาโดยสถาบันมาตรวิทยา ส่วนค่าแทนเจนต์ของมุม θ สามารถหาได้ตามสมการที่ 2

$$\tan \theta = \left(\frac{L' - L}{\sqrt{L_b^2 - (L' - L)^2}} \right) \quad (2)$$



รูปที่ 5 แรงที่กระทำกับลูกเหล็กขณะถูกเหวี่ยงเป็นวงกลม

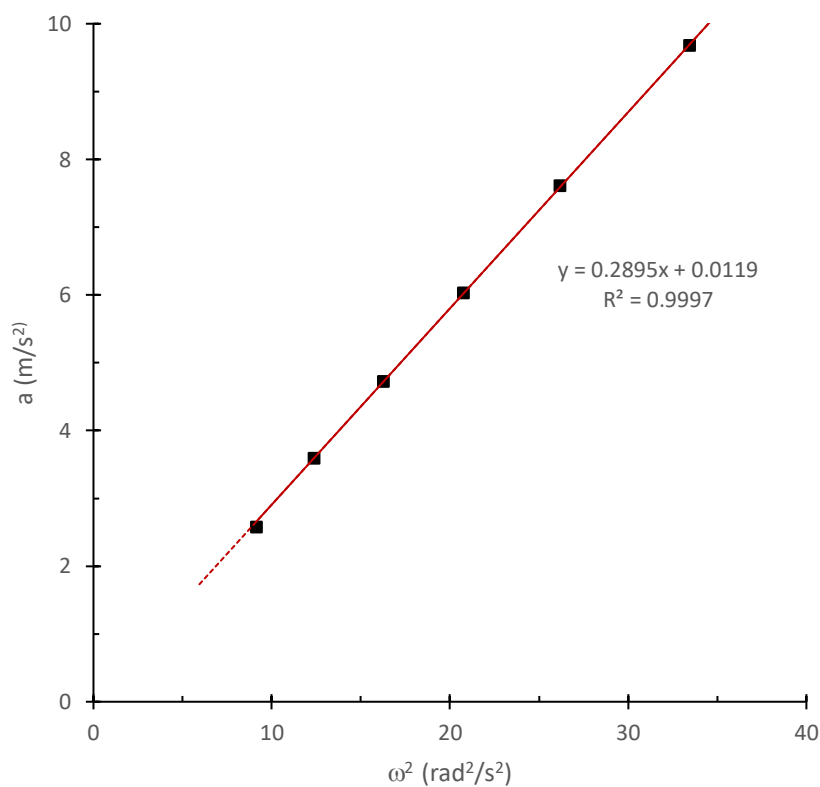
ดังนั้นเมื่อปรับความยาวแกนเหวี่ยง (L) ลูกเหล็กก็จะเบนไปจากแนวตั้งที่มุมต่าง ๆ กัน ส่งผลให้ความเร็วเชิงมุมมีค่าต่างกันด้วย งานวิจัยนี้ได้ปรับความยาวแกนเหวี่ยง 8 ระยะ โดยแต่ละระยะได้บันทึกผลค่าความเร็วเชิงมุม 3 ครั้ง นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟจากความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งสู่ศูนย์กลางกับความเร็วเชิงมุมยกกำลังสองเพื่อหาค่ารัศมีวงกลม (r) ของการเคลื่อนที่แบบวงกลมต่อไป แล้วเปรียบเทียบกับค่าจริงในรูปเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

5. ผลการวิจัย

จากการใช้ชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบวงกลมโดยใช้อาตุยโนในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งสู่ศูนย์กลางกับกำลังสองของความเร็วเชิงมุมแสดงดังตาราง และสามารถนำมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 6 โดยค่าความชันของกราฟที่ได้คือรัศมีวงกลม (r) ของการเคลื่อนที่แบบวงกลม ซึ่งจากผลการทดลองสามารถนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนได้จาก $\left| \frac{r-r_b}{r_b} \right| \times 100$ โดยที่ r คือ รัศมีวงกลมที่ได้จากการทดลอง r_b คือ รัศมีวงกลมค่าจริง

ตาราง ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งศูนย์กลางกับความเร็วเชิงมุมจากการวัดโดย Arduino

L (cm)	ω (rad/s)					ω^2 (rad ² /s ²)	σ_{ω^2} (rad ² /s ²)	a (m/s ²)
	ω_1	ω_2	ω_3	Avg.	SD			
22	3.019	3.022	3.030	3.024	0.006	9.143	0.034	2.579
20	3.526	3.508	3.519	3.518	0.009	12.374	0.064	3.596
18	4.042	4.016	4.044	4.034	0.016	16.273	0.126	4.725
16	4.573	4.534	4.560	4.556	0.020	20.754	0.181	6.029
14	5.133	5.102	5.118	5.118	0.016	26.191	0.159	7.613
12	5.773	5.793	5.789	5.785	0.011	33.466	0.122	9.682
10	6.563	6.569	6.598	6.577	0.019	43.253	0.246	12.707
8	7.952	7.947	7.962	7.954	0.008	63.261	0.121	18.214



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งศูนย์กลางกับกำลังสองของความเร็วจึงมุม

6. สรุปและอภิปรายผล/ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบวงกลมโดยใช้แอduinoเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่งสู่ศูนย์กลางกับความเร็วเชิงมุม พบว่าการใช้แอduinoในการวัดค่าความเร็วเชิงมุมจากชุดทดลองนี้ช่วยลดขั้นตอนการทดลองได้มากและเมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาค่ารัศมีวงกลมของการเคลื่อนที่แบบวงกลมได้เท่ากับ 28.95 เซนติเมตร เปรียบเทียบกับค่าจริงคือ 28.14 เซนติเมตร พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเพียง 2.87% หรือมีความแม่นยำร้อยละ 97.13 ซึ่งผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าชุดทดลองนี้เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนในวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์เป็นอย่างมากทั้งในระดับมัธยมและระดับมหาวิทยาลัย

ข้อเสนอแนะสำหรับการนำชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบวงกลมโดยใช้แอduinoไปใช้ในห้องปฏิบัติการคือความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุต้องมีขนาดของความเร็วที่ทำให้เซนเซอร์จับสัญญาณได้ ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงการเลือกมอเตอร์และแหล่งจ่ายไฟตรงให้มีความเหมาะสมกับเซนเซอร์ที่เลือกใช้ด้วย อีกทั้งการแสดงผลการทดลองยังสามารถใช้ระบบแสดงผลอื่น ๆ ได้ แนะนำการใช้โปรแกรมแสดงผลอัตโนมัติด้วย IoT เพื่อความทันสมัยเป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ [อินเทอร์เน็ต]. สงขลา: สำนักงาน; 2566. [เข้าถึงเมื่อ 20 มิถุนายน 2567] เข้าถึงได้จาก: <https://www.sci.psu.ac.th/academic-programs/bachelors-degree/bachelor-of-science-physics/>
- [2] สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพมหานคร: สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.); 2562. สะเต็มศึกษากับกระบวนการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21; 2562 [ปรับปรุงเมื่อ 28 ก.พ. 2562; เข้าถึงเมื่อ 23 เมษายน 2567]; [ประมาณ 1 น.]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.scimath.org/article-stem/item/9112-21>
- [3] เอกพงศ์ บัวชุม, สุระ วุฒิพรหม, ธนิตา สุจริตธรรม. การพัฒนาเครื่องมือวัดปริมาณทางฟิสิกส์ด้วยแพลตฟอร์ม Arduino วารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา [อินเทอร์เน็ต]. ม.ค.-มิ.ย. 2563 [เข้าถึงเมื่อ 23 เมษายน 2567];3(1):98-104. เข้าถึงได้จาก: <https://so04.tci-thaijo.org/index.php/JSSE/article/view/230418>
- [4] ปริญญา สาเพชร. การใช้บอร์ด Arduino ร่วมกับ LabVIEW สำหรับชุดทดลองทางกลศาสตร์. Thai Journal of Physics [อินเทอร์เน็ต]. 2019 [เข้าถึงเมื่อ 23 เมษายน 2567];36(2):55-61. เข้าถึงได้จาก: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/ThaiJPhys/article/view/240869>
- [5] กลุขดา รวีศรีวัฒนา. การเคลื่อนที่แบบวงกลม [เอกสารประกอบการสอนรายวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ 2566].
- [6] วีระ บุญผุด. การพัฒนาชุดทดลองการหาค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลกด้วยตัวตรวจวัดเวลาแบบดิจิตอลพร้อมโปรแกรมแสดงผลอัตโนมัติด้วย IoT บน Smartphone สำหรับห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ โรงเรียนนายเรือ. วารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี [อินเทอร์เน็ต]. ม.ค.-ธ.ค.2565 [เข้าถึงเมื่อ 23 เมษายน 2567];5(1):158-169. เข้าถึงได้จาก: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rtna/article/view/248299>

- [7] ศุภกานต์ แก้วเหลี่ยม, สุคนธ์ พันธุ์เนร, ปราโมทย์ สุขศิริศักดิ์. ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการให้น้ำพืชผัก. วารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี [อินเทอร์เน็ต]. ม.ค.– ธ.ค. 2566 [เข้าถึงเมื่อ 23 เม.ย. 2567];6(1):64-75. เข้าถึงได้จาก:<https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rtna/article/view/252304>
- [8] Wissarut P, Suttida R, Singha P. Young's modulus determination for a vibrated metal ruler using Arduino. Phys Educ [Internet]. 2022 Jul;57(4): 7 pp. Available from: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022PhyEd..57d5023P/abstract>
- [9] Nuchanat S, Vitchuda S. Photogate sensor for compound physical pendulum experiments. J Phys Conf Ser [Internet]. 2018 Dec;1144(1):012127. Available from: https://www.researchgate.net/publication/329723975_Photogate_sensor_for_compound_physical_pendulum_experiments

ต้นแบบระบบตรวจจับและติดตามใบหน้าด้วยการประมวลผลภาพดิจิทัลประกอบแขนกล

Prototype Facial Detection and Tracking System Using Digital Image Processing Assembled with A Mechanical Arm

พิศณุ คุมีชัย¹ จักริน มาลัยโรจน์ศิริ²
Pisanu Kumeechai¹ Jakrin Malairojsiri²

Received: June 1, 2024

Revised: June 25, 2024

Accepted: July 1, 2024

บทคัดย่อ

ระบบตรวจจับและติดตามใบหน้าเป็นเทคโนโลยีที่ใช้การประมวลผลภาพดิจิทัลเพื่อวิเคราะห์และระบุใบหน้าบุคคล เทคโนโลยีนี้นำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในหลายสาขา เช่น ระบบรักษาความปลอดภัย การติดตามบุคคล และการวิเคราะห์พฤติกรรมลูกค้า ในทางทหารเทคโนโลยีติดตามใบหน้าอาจถูกพัฒนาเป็นระบบควบคุมการยิงอัตโนมัติ โดยเปลี่ยนเป้าหมายจากวัตถุทั่วไปเป็นใบหน้าบุคคล เมื่อทำงานร่วมกับระบบควบคุมแท่นปืน กลายเป็นอาวุธที่มีประสิทธิภาพ การทำงานของระบบเริ่มจากการตรวจจับใบหน้า ระบบใช้กล้องดิจิทัลจับภาพ จากนั้นใช้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพเพื่อค้นหาและระบุใบหน้าบุคคลในเฟรม ทำการติดตามใบหน้า เมื่อระบบพบใบหน้าแล้วส่งค่าจุดเซนทรอยด์สู่แขนกลอาอูโน่ เพื่อทำการติดตามการเคลื่อนไหวของใบหน้าในเฟรมต่อ ๆ ไป ในการควบคุมแขนกล แขนกลปรับมุมและตำแหน่งตามข้อมูลที่ได้รับจากระบบ

คำสำคัญ: ระบบตรวจจับและติดตามใบหน้า, การประมวลผลภาพดิจิทัล, ระบบควบคุมการยิงอัตโนมัติ, โครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน

¹ อาจารย์กองวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

Instructor, Department of Engineering, Education Branch, Royal Thai Naval Academy

E-mail: pisanu41984198@hotmail.com

² อาจารย์กองวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

Instructor, Department of Engineering, Education Branch, Royal Thai Naval Academy

E-mail: jakrin.m@navy.mi.th

โดยชี้เป้าหมายไปที่ใบหน้าบุคคล อัลกอริทึม 4 ตัวในการทดลองในการตรวจจับภาพใบหน้าประกอบด้วย Viola-Jones Algorithm, Dlib Library, Convolutional Neural Networks (CNN) และ Multi-task Cascaded Convolutional Networks (MTCNN) ผลการวัดประสิทธิภาพด้วย Confusion Matrix มีค่าเฉลี่ยในการตรวจจับภาพใบหน้าจากทั้ง 4 อัลกอริทึมพบว่า อัลกอริทึม (CNN) มีประสิทธิภาพดีที่สุด มีค่า Precision ที่ 0.95, Recall ที่ 0.92 และ F1 score ที่ 0.93 ดังนั้น (CNN) เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับใบหน้าสูงที่สุด ประสิทธิภาพการทำงานของแขนกลร่วมกับอัลกอริทึมที่ใช้ในการตรวจจับใบหน้าพบว่า อัลกอริทึม (CNN) มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการระบุและติดตามใบหน้าบุคคลได้อย่างแม่นยำ แม้ในสภาพแสงน้อยหรือสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน เมื่อทำงานร่วมกับแขนกลทำการทดสอบหมุนแขนกลในมุม 45 องศา และ 135 องศา สามารถทำงานในการติดตามใบหน้าได้ถึงร้อยละ 82.5

Abstract

Face detection and tracking systems use digital image processing to analyse and identify human faces. This technology is widely applied in various fields such as security systems, personal tracking, and customer behaviour analysis. In the military, face tracking technology can be developed into an automatic targeting system by shifting the focus from general objects to human faces. When integrated with a gun turret control system, it becomes an efficient weapon. The system's operation starts with face detection using digital cameras to capture images, followed by image analysis software to locate and identify faces within frames and then track them. Once a face is detected, the centroid coordinates are sent to an Arduino robotic arm to track the face's movements within subsequent frames. The robotic arm adjusts its angle and position based on the information received from the system, targeting the human face. The experiment utilized four algorithms for face detection: the Viola-Jones algorithm, Dlib library, Convolutional Neural Networks (CNN), and Multi-task Cascaded Convolutional Networks (MTCNN). Performance measurement using a confusion matrix showed that the CNN algorithm had the highest efficiency, with a precision of 0.95, recall of 0.92, and F1 score of 0.93. Therefore, CNN is the most effective algorithm for face detection. The performance of the robotic arm combined with the face detection algorithms demonstrated that the CNN algorithm was the most accurate in identifying and tracking human faces, even in low light or complex environments. Testing the robotic arm's rotation at 45 and 135 degrees achieved an 82.5% success rate in face tracking.

Keywords: Face Detection and Tracking Systems, Image Processing, Automatic Targeting System, Convolutional Neural Networks (CNN)

1. บทนำ

การพัฒนาระบบแขนกลที่ติดตามใบหน้าผ่านการประมวลผลภาพดิจิทัลเป็นเทคโนโลยีที่มีความน่าสนใจและนำไปประยุกต์ใช้ในหลายสาขาอุตสาหกรรม ระบบดังกล่าวนำมาใช้ในภาครัฐและภาคเอกชนในการเพิ่มระดับความปลอดภัยให้กับระบบประตูอัจฉริยะ การติดตามบุคคลในสถานที่สาธารณะ และการจำแนกประเภทลูกค้าในธุรกิจห้างสรรพสินค้า เทคโนโลยีนี้ใช้การประมวลผลภาพดิจิทัลเพื่อตรวจจับใบหน้าของบุคคล โดยระบบรับภาพหน้าบุคคลเข้ามาและนำผ่านกระบวนการวิเคราะห์และการจำแนกภาพ เพื่อระบุและติดตามใบหน้าของบุคคลในเฟรมต่อไป จากนั้นส่งค่าจุดเซนทรอยด์ไปยังแขนกล เพื่อทำการขยับแขนกลเพื่อชี้เป้าหมายได้อย่างแม่นยำ การพัฒนาต้นแบบระบบแขนกลติดตามใบหน้าด้วยการประมวลผลภาพดิจิทัลนี้มีผลกระทบใหญ่ต่อการปรับปรุงระบบรักษาความปลอดภัย การติดตามบุคคลในสถานที่สาธารณะ และการจำแนกประเภทลูกค้าในธุรกิจห้างสรรพสินค้า ด้วยการนำเอาเทคโนโลยีประมวลผลภาพดิจิทัลมาประยุกต์ใช้ ระบบนี้เปิดโอกาสให้เกิดความปลอดภัยที่มั่นคงมากขึ้น การสืบค้นและติดตามบุคคลที่อยู่ในสถานที่สาธารณะทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการจัดการลูกค้าในธุรกิจห้างสรรพสินค้าที่ดียิ่งขึ้น อีกเหตุผลหนึ่งในการพัฒนาแขนกลที่ติดตามใบหน้านั้นก็เพื่อเป็นต้นแบบที่พัฒนาเป็นระบบอาวุธที่ใช้กล้องดิจิทัลเป็นเซ็นเซอร์ในการตรวจจับเป้าหมาย ลดการพึ่งพาการใช้อาวุธจากต่างชาติได้ในอนาคต เนื่องจากระบบควบคุมการยิงแบบออปโทรนิคส์ (Optronic Fire Control System) ที่มีอัลกอริทึมต่าง ๆ ที่มีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกัน

ระบบควบคุมการยิงแบบออปโทรนิคส์เป็นระบบที่ใช้เทคโนโลยีและอัลกอริทึมต่าง ๆ เพื่อควบคุมการยิงอาวุธหรือระบบอาวุธที่ติดตั้งบนออปโทรนิคส์ โดยระบบนี้มีหลักการทำงานอย่างเป็นระบบเพื่อให้การยิงมีความแม่นยำและเป้าหมายที่ถูกต้อง โดยระบบควบคุมการยิงแบบออปโทรนิคส์ประกอบด้วยส่วนประกอบหลายอย่าง ดังนี้ เซ็นเซอร์ (Sensors) ระบบใช้เซ็นเซอร์เพื่อตรวจจับและรับข้อมูลเกี่ยวกับสภาพแวดล้อม ซึ่งอาจมีเซ็นเซอร์ที่วัดระยะทาง การเคลื่อนไหว หรือแสง ซึ่งเป็นข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการตรวจจับและติดตามเป้าหมาย ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ระบบควบคุมการยิงออปโทรนิคส์ใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลจากเซ็นเซอร์และตัดสินใจในการปรับการยิงให้เหมาะสม การใช้ปัญญาประดิษฐ์สามารถเรียนรู้และปรับปรุงผลลัพธ์การยิงให้ดียิ่งขึ้นได้ตามเวลา ระบบส่งกำลัง (Power Transmission) ระบบส่งกำลังใช้เพื่อส่งพลังงานไปยังอาวุธหรือระบบอาวุธที่ใช้ในการยิง ระบบนี้สามารถควบคุมและปรับความแรงหรือการยิงได้ตามคำสั่งของระบบควบคุม อัลกอริทึม (Algorithms) ระบบควบคุมการยิงแบบออปโทรนิคส์ใช้อัลกอริทึมเพื่อคำนวณและปรับค่าต่าง ๆ เพื่อให้การยิงมีความแม่นยำและความเสถียร ระบบควบคุมการยิงแบบออปโทรนิคส์เป็นระบบที่ซับซ้อนและใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัย เพื่อให้การยิงมีความแม่นยำและประสิทธิภาพสูง [1-10]

ระบบควบคุมการยิงแบบออปโทรนิคส์และระบบแขนกลติดตามใบหน้าด้วยการประมวลผลภาพดิจิทัลเป็นสองเรื่องที่มีความสัมพันธ์กัน 2 ส่วน คือ ส่วนการประมวลผลภาพดิจิทัลและส่วนการติดตามวัตถุ ในด้านการประมวลผลภาพดิจิทัล ทั้งระบบควบคุมการยิงและระบบแขนกลติดตามใบหน้าใช้การประมวลผลภาพดิจิทัลเพื่อวิเคราะห์และจำแนกภาพใบหน้าหรือวัตถุต่าง ๆ ในภาพ เทคโนโลยีประมวลผลภาพ เช่น การตรวจจับและติดตามวัตถุ การจำแนกคุณลักษณะ และการระบุตำแหน่งทางพิกัด เป็นส่วนสำคัญในการทำงานของทั้งสองระบบนี้

ในด้านการติดตามวัตถุ ทั้งระบบควบคุมการยิงและระบบแขนกลติดตามใบหน้าใช้ระบบการติดตามเพื่อระบุและติดตามตำแหน่งของวัตถุหรือใบหน้าที่เป็นเป้าหมาย ใช้เทคโนโลยีติดตามอย่างแม่นยำ เช่น การระบุจุดเซนทรอยด์หรือการใช้เทคนิค Computer Vision เพื่อติดตามการเคลื่อนไหวของวัตถุหรือใบหน้าในเวลาเป็นที่รวดเร็วได้ ถ้าเป็นระบบควบคุมการยิงตรวจจับและติดตามเป้าหมายด้วยการประมวลผลภาพดิจิทัลเมื่อตรวจจับเป้าหมายและได้จุดเซนทรอยด์แล้วส่งค่าสู่ระบบควบคุมอาวุธที่เสมือนแขนกลในการตรวจจับเป้าหมายและอากาศยานที่ปรากฏในเฟรมภาพ โดยต้องการประสิทธิภาพและความแม่นยำสูงที่สุดในการทำงาน [11-14] ดังเช่นตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้การการจำแนกและการติดตามเรือผิวน้ำด้วยระบบอัตโนมัติโดยการจดจำวัตถุด้วยวิธี AlexNet เสนออัลกอริทึมการติดตามเพื่อติดตามวัตถุที่ระบุ [15]

1.1 ความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา

แบบจำลองในการพัฒนาระบบอาวุธที่ใช้กล้องในการตรวจจับและติดตามเป้าหมายในอนาคต งานวิจัยนี้อาจมีต้นกำเนิดจากความสำคัญของการพัฒนาเทคโนโลยีทางทหารที่มีความสามารถในการตรวจจับและติดตามศัตรูหรือเป้าหมายเพื่อให้การดำเนินงานทางทหารมีประสิทธิภาพมากขึ้น การศึกษาและพัฒนาระบบแขนกลที่ติดตามใบหน้าเป็นต้นแบบอาจช่วยเสริมสร้างความรู้และเข้าใจในการพัฒนาระบบอาวุธที่ใช้เทคโนโลยีกล้องในการตรวจจับและติดตามเป้าหมายได้ในอนาคต

ความสำคัญของปัญหานี้มาจากความเร่งด่วนในการพัฒนาเทคโนโลยีทางทหารที่มีความแม่นยำและประสิทธิภาพสูงในการตรวจจับและติดตามเป้าหมาย การมีระบบอาวุธที่สามารถตรวจจับและติดตามศัตรูให้ได้ในระยะเวลาที่เร็วและแม่นยำส่งผลให้การดำเนินงานทางทหารมีประสิทธิภาพสูงขึ้น อนึ่งการศึกษาและพัฒนา ระบบแขนกลที่ติดตามใบหน้าเป็นต้นแบบยังเป็นกระบวนการที่เป็นประโยชน์ในการสร้างความเข้าใจและความรู้เพิ่มเติมในเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปพัฒนาต่อยอดให้สำเร็จได้ในอนาคต

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาและทดสอบการทำงานอัลกอริทึมในการตรวจจับใบหน้าที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการทำงานกับแขนกลอัตโนมัติในการตรวจจับและติดตามภาพใบหน้าได้

2.2 เพื่อใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาต่อยอดความรู้เทคโนโลยีทางการทหาร งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะนำระบบการทำงานของแขนกลติดตามใบหน้าที่ได้รับการศึกษาและวิเคราะห์มาเป็นต้นแบบ โดยการพัฒนา ระบบอื่น ๆ ที่ใช้กล้องในการตรวจจับและติดตามเป้าหมายในอนาคต ระบบที่ได้รับแรงบันดาลใจจากงานวิจัยนี้อาจมีการพัฒนาเพื่อเสริมสร้างความแม่นยำและประสิทธิภาพในการตรวจจับและติดตามเป้าหมาย

2.3 เพื่อนำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาต่อยอดในการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องทางทหาร การศึกษาและวิจัยระบบการติดตามใบหน้าในงานนี้อาจช่วยเสริมสร้างความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง เช่น เทคนิคการระบุตำแหน่ง การประมวลผลภาพ หรือเทคโนโลยีที่ใช้ในการตรวจจับใบหน้า เนื่องจากเทคโนโลยีเหล่านี้อาจมีความสำคัญในการพัฒนาระบบอาวุธที่ใช้กล้องในการตรวจจับและติดตามเป้าหมายในอนาคต

3. สมมติฐานของการวิจัย

3.1 ระบบการติดตามใบหน้าด้วยแขนกลสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้ สมมติฐานนี้สันนิษฐานว่าระบบการติดตามใบหน้าที่ใช้แขนกลสามารถระบุและติดตามใบหน้าของเป้าหมายอย่างแม่นยำและเป็นระบบที่น่าเชื่อถือในการใช้งานจริงในอนาคต

3.2 การพัฒนาและปรับปรุงระบบการติดตามใบหน้าด้วยแขนกลจะเป็นที่ต้องการในอนาคต สมมติฐานนี้เสนอว่ามีความสำคัญและความต้องการในการพัฒนาระบบการติดตามใบหน้าที่ใช้แขนกลอย่างต่อเนื่อง โดยการปรับปรุงเทคโนโลยีและความสามารถของระบบเพื่อให้มีประสิทธิภาพและการใช้งานที่เหมาะสมกับระบบอาวุธที่ใช้กล้องในการตรวจจับและติดตามเป้าหมาย

3.3 การพัฒนาระบบอาวุธที่ใช้กล้องในการตรวจจับและติดตามเป้าหมายจะมีผลกระทบในด้านความปลอดภัยและประสิทธิภาพของการดำเนินงานทางทหาร สมมติฐานนี้เสนอว่าการพัฒนาระบบอาวุธที่สามารถตรวจจับและติดตามเป้าหมายด้วยกล้องจะมีผลกระทบในด้านความปลอดภัยและประสิทธิภาพของการดำเนินงานทางทหารเนื่องจากมีความสามารถในการระบุและติดตามเป้าหมายในระยะเวลาที่เร็วและแม่นยำ ทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในการดำเนินงานทางทหาร

4. ขอบเขตของการวิจัย

4.1 สามารถควบคุมแขนกลอัตโนมัติประกอบกับกล้องเว็บแคมในการติดตามใบหน้าบุคคลได้ในสภาวะแสงปกติ

4.2 ตรวจจับใบหน้าบุคคลด้วยอัลกอริทึมที่แตกต่างกันจำนวน 4 อัลกอริทึม ประกอบด้วย 1) Viola-Jones Algorithm 2) Dlib Library 3) Convolutional Neural Networks (CNN) และ 4) Multi-task Cascaded Convolutional Networks

4.3 วัดประสิทธิภาพด้วยเครื่องมือสำคัญในการประเมินผลลัพธ์ของการทำนาย Confusion Matrix เพื่อหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการทำงาน อุปกรณ์ที่ใช้กล้องดิจิทัลขนาดไฟล์ภาพ 640 คูณ 480 อัตราเฟรม 50 เฟรมต่อวินาที ชุดข้อมูลรูปภาพทำการตรวจจับภาพใบหน้าจากสภาวะแวดล้อมภายในอาคารที่มีแสงสว่างเพียงพอ มีค่าความสว่างของแสงประมาณ 3500 lumen สามารถมองเห็นวัตถุและผู้คนในภาพได้อย่างถนัด สีสันของภาพสดใส ไม่ซีดจาง ภาพโดยรวมจะดูสว่างและสดใส จากภาพรวมทั้งหมด 1,000 ภาพ แบ่งเป็นตัวอย่างการฝึก 800 ภาพ และตัวอย่างทดสอบ 200 ภาพ ซึ่งจำนวนใบหน้าที่มีในแต่ละภาพ เช่น แต่ละภาพมีใบหน้าไม่เกิน 1 ใบหน้า และจำนวนพิกเซลของใบหน้าที่เล็กที่สุดที่ตรวจจับได้เท่ากับ 40,000 พิกเซล

5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การเพิ่มความเข้าใจและความรู้ในเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง การศึกษาและวิจัยระบบการติดตามใบหน้าด้วยแขนกลซึ่งจะช่วยเสริมสร้างความเข้าใจและความรู้ในเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง เช่น เทคนิคการระบุตำแหน่ง การประมวลผลภาพ หรือเทคโนโลยีที่ใช้ในการตรวจจับใบหน้า ซึ่งอาจนำไปสู่การพัฒนาระบบอื่น ๆ ที่ใช้เทคโนโลยีกล้องในการตรวจจับและติดตามเป้าหมายในอนาคต

ระบบการติดตามใบหน้าด้วยแขนกลดังกล่าวนี้ช่วยเสริมสร้างศักยภาพของวิทยาการและนักวิจัยในเชิงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางทหาร ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดนวัตกรรมและการพัฒนาที่สำคัญในการปรับใช้เทคโนโลยีที่ใช้กล้องในการตรวจจับและติดตามเป้าหมายในสถานการณ์ทางทหาร

6. วิธีดำเนินการศึกษา

ในส่วนของการเตรียมวัสดุและอุปกรณ์จะทำการประกอบแขนกลกับฐานและเชื่อมต่อกับกล้องเว็บแคม จัดเตรียมโปรแกรมเพื่อเตรียมใช้งานตามหัวข้อย่อย ดังนี้

6.1 วัสดุอุปกรณ์

- 6.1.1 Servo MG996R (180 องศา) เซอร์โวเฟืองเหล็กภายใน เฟืองวัสดุผสมกึ่งโลหะ จำนวน 2 ตัว
- 6.1.2 Arduino UNO R3
- 6.1.3 กล้อง WEBCAM LOGITECH (C922)
- 6.1.4 แท่นยึดเซอร์โวมอเตอร์และกล้องเว็บแคม



รูปที่ 1 อุปกรณ์ต้นแบบระบบตรวจจับและติดตามใบหน้า

6.2 ขั้นตอนวิธีการวิจัย

- 6.2.1 เริ่มจากการกำหนดปัญหา นำเสนอในหัวข้อ 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
- 6.2.2 การทบทวนวรรณกรรม

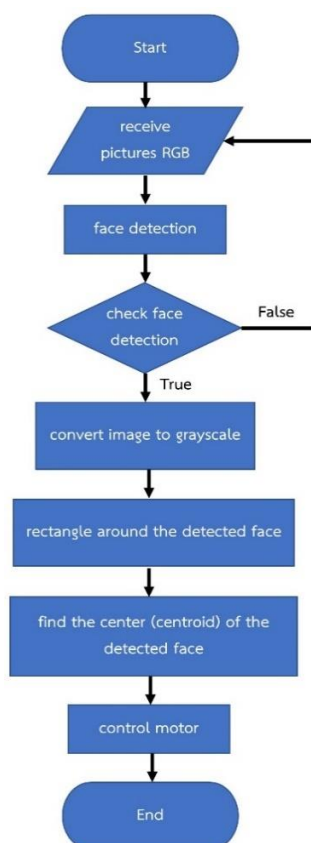
การตรวจจับใบหน้าด้วยการประมวลผลภาพดิจิทัลมีประวัติความเป็นมายาวนานกว่า 50 ปี โดยเริ่มต้นขึ้นในช่วงทศวรรษ 1960 เมื่อเทคโนโลยีการประมวลผลภาพดิจิทัลเริ่มพัฒนาขึ้น ในช่วงแรก ๆ การตรวจจับใบหน้าเป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพแบบดั้งเดิม เช่น การเปรียบเทียบลักษณะทางเรขาคณิตของใบหน้า เช่น ตำแหน่งของดวงตา จมูก ปาก เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เทคนิคเหล่านี้มีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากใบหน้าของมนุษย์มีความแตกต่างกันในแต่ละบุคคล ทั้งในด้านรูปร่าง ลักษณะ และการแสดงอารมณ์ ในช่วง

ทศวรรษ 1980 ได้มีการพัฒนาเทคนิคการตรวจจับใบหน้าที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยอาศัยหลักการของการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เทคนิคเหล่านี้สามารถเรียนรู้ลักษณะเฉพาะของใบหน้าแต่ละบุคคลจากข้อมูลตัวอย่างที่ให้มา ทำให้สามารถตรวจจับใบหน้าได้แม่นยำยิ่งขึ้น ในช่วงทศวรรษ 1990 ได้มีการพัฒนาเทคนิคการตรวจจับใบหน้าแบบเรียลไทม์ (Real-time Face Detection) เทคนิคเหล่านี้สามารถตรวจจับใบหน้าได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ทำให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในระบบต่าง ๆ เช่น ระบบรักษาความปลอดภัย ระบบจดจำใบหน้า เป็นต้น ในปัจจุบัน การตรวจจับใบหน้าด้วยการประมวลผลภาพดิจิทัลมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยอาศัยเทคนิคใหม่ๆ เช่น การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ทำให้สามารถตรวจจับใบหน้าได้แม่นยำยิ่งขึ้น และสามารถตรวจจับใบหน้าจากกระยะไกล หรือจากภาพที่มีความละเอียดต่ำได้อีกด้วย สำหรับงานวิจัยที่ใช้เทคนิคในการตรวจจับใบหน้าที่น่าสนใจพอสังเขป ดังนี้ Viola และ Jones ในปี 2004 [16] ได้ศึกษาเทคนิคนี้ใช้หลักการของการเรียนรู้ของเครื่องในการจำแนกใบหน้า โดยแบ่งใบหน้าออกเป็นส่วนย่อย ๆ แล้วเปรียบเทียบลักษณะของส่วนย่อยเหล่านั้นกับใบหน้าในฐานข้อมูล การพัฒนาการของการตรวจจับใบหน้าด้วยการประมวลผลภาพดิจิทัล เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถนำมาใช้ในระบบต่าง ๆ ได้อย่างแพร่หลาย Ahonen, T. และคณะ [17] ได้เสนอเทคนิคการตรวจจับใบหน้าโดยใช้ลักษณะเฉพาะของใบหน้าที่เรียกว่า Local Binary Patterns (LBP) เทคนิคนี้ใช้หลักการของการทำแผนที่ภาพเป็นชุดของค่าบิต ซึ่งสามารถใช้ในการจำแนกใบหน้าได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถนำมาใช้ในระบบต่าง ๆ ได้อย่างแพร่หลาย เช่น ระบบรักษาความปลอดภัย ระบบจดจำใบหน้า Agarwal, A. [18] ได้ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการตรวจจับใบหน้าด้วยไลบรารี Dlib Library เพื่อตรวจจับใบหน้าในสภาพแวดล้อมที่ท้าทาย เช่น สภาพแวดล้อมที่มีแสงน้อย สภาพแวดล้อมที่มีวัตถุรบกวน เป็นต้น บทความวารสารเล่มนี้นำเสนอเทคนิคการปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการตรวจจับใบหน้าด้วยไลบรารี Dlib Library หลายเทคนิค เช่น การใช้เทคนิคการประมวลผลภาพขั้นสูง การใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง Sawhney, S. และคณะ[19] ได้นำเสนอวิธีการตรวจจับใบหน้าแบบใหม่โดยใช้ไลบรารี Dlib Library และเทคนิค Adaptive Thresholding วิธีการตรวจจับใบหน้าแบบใหม่นี้สามารถตรวจจับใบหน้าในสภาพแวดล้อมที่มีแสงน้อยและสภาพแวดล้อมที่มีวัตถุรบกวนได้ดี Ren, S.และคณะ[20] นำเสนออัลกอริทึม Faster R-CNN ซึ่งเป็นอัลกอริทึมการตรวจจับวัตถุแบบหลายภาพ (Multi-stage Detector) ที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบลึก (Deep Learning) อัลกอริทึมนี้มีประสิทธิภาพสูงและทำงานได้รวดเร็ว Redmon, J. และคณะ [21] นำเสนออัลกอริทึม YOLO ซึ่งเป็นอัลกอริทึมการตรวจจับวัตถุแบบหนึ่งภาพ (One-stage Detector) ที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบลึก (Deep Learning) อัลกอริทึมนี้มีประสิทธิภาพสูงและทำงานได้รวดเร็ว Liu, W. คณะ [22] นำเสนออัลกอริทึม SSD ซึ่งเป็นอัลกอริทึมการตรวจจับวัตถุแบบหนึ่งภาพ (One-stage Detector) ที่ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบลึก (Deep Learning) อัลกอริทึมนี้มีประสิทธิภาพสูงและทำงานได้รวดเร็ว ในอนาคต การตรวจจับใบหน้าด้วยการประมวลผลภาพดิจิทัลจะมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยคาดว่าจะสามารถตรวจจับใบหน้าได้แม่นยำยิ่งขึ้น และสามารถประยุกต์ใช้งานในสาขาใหม่ ๆ มากขึ้น พิศณุ ค. [23] ได้เสนอการตรวจจับใบหน้าบุคคลโดยใช้โมเดล YOLOv4 และเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ

ที่ใช้ในงานวิจัยตรวจจับใบหน้า โดยใช้ชุดข้อมูลรูปภาพจำนวนมากจาก 3 สถานะแวดล้อมที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือ ภายในอาคารที่มีแสงน้อย น้อยกว่า 3500 lumen, ภายในอาคารที่มีแสงสว่างเพียงพอประมาณ 3500 lumen และภายนอกอาคารในช่วงเวลาปกติที่มีแสงสว่างผลการทดลองพบว่า YOLOv4 เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับใบหน้าบุคคลที่ดีที่สุด ซึ่งงานวิจัยนี้มีข้อดี คือ ใช้ YOLOv4 ในการตรวจจับใบหน้า ทำให้ผลการทดลองดีกว่างานวิจัยอื่น ๆ

6.2.3 การออกแบบการวิจัย

การตรวจจับใบหน้า จะเริ่มจากการรับภาพจากกล้องต่อจากนั้นจะทำการแปลงภาพ RGB เป็นภาพ Gray Scale เพื่อลดขนาดข้อมูลและสะดวกในการประมวลผล ลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ และลดอิทธิพลจากแสง ในส่วนของการตรวจจับใบหน้าจะทำการคำนวณหาจุดเซ็นทรอยด์ และส่งค่า X และ Y ไปยังส่งค่าจุดเซ็นทรอยด์ X และ Y ไปที่ Arduino ในการขับแขนกลมีขั้นตอนการปฏิบัติสำคัญตามรูปที่ 2 ดังนี้



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำงาน

6.2.3.1 การรับภาพ (RGB) ภาพที่นำมาใช้ในงานวิจัยต้องเป็นนามสกุล jpg/png ที่มีขนาดภาพในตอนแรกขนาด $1,478 \times 1,108$ พิกเซล ภาพมีลักษณะเป็นตัวบุคคลที่สามารถมองเห็นใบหน้าได้ เพื่อให้ง่ายต่อการตรวจจับใบหน้าที่แสดงดังรูปที่ 3



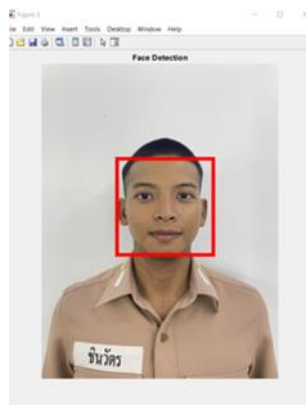
รูปที่ 3 ภาพ (RGB)

6.2.3.2 การปรับภาพเป็นภาพสีเทา (Gray Scale) ดังแสดงดังรูปที่ 4



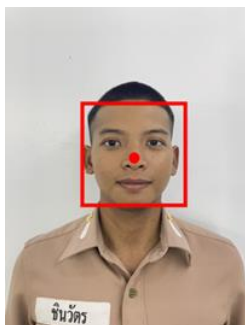
รูปที่ 4 ภาพสีเทา (Gray Scale)

6.2.3.3 ตรวจสอบใบหน้า (Face Detection) และการสร้าง (Bounding Box) คลุมรอบใบหน้า เป็นขั้นตอนที่ใช้ในการระบุใบหน้าในภาพหรือวิดีโอ โดยใช้เทคนิคการต่าง ๆ ดังแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ภาพสีเทา (Gray Scale)

6.2.3.4 การหาจุดเซ็นทรอยด์ของภาพ กระบวนการหาจุดศูนย์กลางหรือจุดที่มีค่าเฉลี่ยของพิกเซลในภาพ โดยจุดเซ็นทรอยด์เป็นจุดที่มีค่าเฉลี่ยของค่าพิกเซลในแนวแกน X และแกน Y ของภาพดังแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงจุดเซ็นทรอยด์

ในขั้นตอนนี้จะมีการนำค่า x และ y จากภาพมาแปลงให้เป็นค่ามุมของเซอร์โวมอเตอร์ สามารถทำได้โดยใช้สมการที่ (1)

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (1)$$

โดยที่ θ คือ มุมองศา

x คือ ค่าที่ได้จากการหาจุดเซ็นทรอยด์จากภาพใบหน้า

y คือ ค่าที่ได้จากการหาจุดเซ็นทรอยด์จากภาพใบหน้า

การคำนวณค่าอะซิมุท (Azimuth) ของเส้นวงรอบ เริ่มจากเส้นที่ทราบค่าอะซิมุทเส้นแรกออกจากสูตร

$$az \text{ ใหม่} = Az \text{ ี่มา} + \text{มุม} \pm 180^\circ \quad (2)$$

+ 180 เมื่อผลรวมน้อยกว่า 180°

- 180 เมื่อผลรวมมากกว่า 180°

6.2.3.5 ส่งค่าจุดเซ็นทรอยด์ ค่า x และ y จะถูกส่งไปที่ Arduino โดยใช้สื่อสารทางซีเรียล (Serial Communication) เพื่อส่งค่าจุดเซ็นทรอยด์ x และ y จากคอมพิวเตอร์ไปยัง Arduino โปรแกรมบน Arduino จะรับค่าจากคอมพิวเตอร์ผ่านการสื่อสารซีเรียล และนำค่า x และ y ไปใช้ในการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ เมื่อเซอร์โวมอเตอร์ถูกควบคุมและคำนวณค่า x และ y ให้เหมาะสม แขนกลจะหมุนหรือเคลื่อนที่เพื่อชี้ไปที่จุดเซ็นทรอยด์ที่ส่งมาจากการตรวจจับใบหน้าดังแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การทำงานของแขนกล

6.2.3.6 ทดสอบการควบคุมแขนกลอัตโนมัติประกอบกับกล้องเว็บแคม

6.2.3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการตรวจจับใบหน้าบุคคล ด้วยค่า Confusion Matrix [24] สามารถทำได้โดยพิจารณาจากค่า Precision, Recall และ F1 Score ดังนี้

$$Precision = \frac{TP}{(TP + FP)} \quad (3)$$

$$Recall = \frac{TP}{(TP + FN)} \quad (4)$$

$$F1 \text{ score} = 2 \times \frac{(Precision \times Recall)}{(Precision + Recall)} \quad (5)$$

โดยที่

TP คือ จำนวนตัวอย่างที่จำแนกถูกต้องในกลุ่มตัวอย่างที่คาดว่าจะใบหน้า (True Positive)

FP คือ จำนวนตัวอย่างที่จำแนกผิดพลาดในกลุ่มตัวอย่างที่คาดว่าจะใบหน้า (False Positive)

FN คือ จำนวนตัวอย่างที่จำแนกผิดพลาดในกลุ่มตัวอย่างที่แท้จริงเป็นใบหน้า (False Negative)

Recall คือ อัตราส่วนของตัวอย่างที่จำแนกถูกต้องในกลุ่มตัวอย่างที่แท้จริงเป็นใบหน้า (True Positive) ทั้งหมด

Precision คือ อัตราส่วนของตัวอย่างที่จำแนกถูกต้องในกลุ่มตัวอย่างที่คาดว่าจะใบหน้า (True Positive) ทั้งหมด

F1 Score คือ ค่าเฉลี่ยแบบ Harmonic ของ Precision และ Recall

7. ผลการศึกษา

ระบบแขนงที่ใช้การตรวจจับใบหน้าด้วยการประมวลผลภาพดิจิทัลในการทดลองนี้ได้ทดสอบใช้อัลกอริทึมทั้งหมด 4 ตัว คือ Viola-Jones Algorithm, Dlib Library, Convolutional Neural Networks (CNN) และ Multi-task Cascaded Convolutional Networks (MTCNN) เพื่อตรวจจับใบหน้าบุคคลในภาพ ซึ่งเหตุผลที่เลือกใช้หลักการตรวจจับใบหน้าแทนที่ หลักการรู้จำใบหน้าเนื่องจากว่าในงานวิจัยนี้ต้องการติดตามใบหน้าไม่ได้ต้องการรู้จำใบหน้า ผลการวัดประสิทธิภาพด้วย Confusion Matrix แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึม (CNN) มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยมีค่า Precision ที่ 0.95, Recall ที่ 0.92, และ F1 score ที่ 0.93 สรุปว่าอัลกอริทึม (CNN) เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับใบหน้าบุคคลที่ดีที่สุด และมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพในการตรวจจับใบหน้าบุคคล

Algorithm	Precision	Recall	F1 score	Accuracy (%)
Viola-Jones	0.85	0.78	0.81	85
Dlib library	0.92	0.85	0.88	92
CNN	0.95	0.92	0.93	95
MTCNN	0.93	0.91	0.92	93

จากผลของประสิทธิภาพอัลกอริทึม (CNN) นี้จากภาพรวมทั้งหมด 1,000 ภาพ แบ่งเป็นตัวอย่างการฝึก 800 ภาพ และตัวอย่างทดสอบ 200 ภาพ และต้องการหาประสิทธิภาพของการจำแนก พบว่ามีจำนวนรูปภาพที่ถูกจำแนกถูกต้อง (True Positive) จำนวน 184 ภาพ มีจำนวนรูปภาพที่ถูกจำแนกผิด (False Positive) จำนวน 4 ภาพ ใบหน้าที่จริงมี แต่ตรวจจับไม่ถูกต้อง FN (False Negative) จำนวน 16 ภาพ และใบหน้าที่จริงไม่มี และตรวจจับไม่ถูกต้อง TN (True Negative) จำนวน 18 ภาพ ดังแสดงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์การเปรียบเทียบ

	Predicted True (Positive)	Predicted False (Negative)
True (Positive)	True Positive (TP) = 184	False Negative (FN) = 16
False (Negative)	False Positive (FP) = 4	True Negative (TN) = 18

การทดสอบแขนงรวมกับการทำงานของกล้องเว็บแคมในการตรวจจับและติดตามภาพใบหน้าโดยใช้ CNN โดยมีผลการทดลองในการตรวจจับภาพใบหน้าในมุม 45° และ 135° เพราะ 2 มุมนี้ให้ความแตกต่างของใบหน้ามากที่สุด ตามตารางที่ 3 MTCNN ตามตารางที่ 4 Dlib Library ตามตารางที่ 5 และ Viola-Jones ตามตารางที่ 6

ตารางที่ 3 การตรวจจับและติดตามภาพใบหน้าโดยใช้ CNN ในมุม 45° และ 135° มุมละ 10 ครั้งรวมทั้งหมด 20 ครั้ง

ครั้งที่	ตรวจจับได้ติดตามได้ แกน x	ตรวจจับไม่ได้ แกน x	ตรวจจับได้ติดตามได้ แกน y	ตรวจจับไม่ได้ แกน y
1	✓			✓
2	✓		✓	
3		✓	✓	
4		✓	✓	
5	✓			✓
6	✓		✓	
7	✓		✓	
8	✓			✓
9	✓		✓	
10	✓		✓	
11		✓	✓	
12	✓		✓	
13		✓	✓	
14	✓		✓	
15	✓		✓	
16	✓		✓	
17	✓		✓	
18	✓		✓	
19	✓		✓	
20	✓		✓	
รวม	16	4	17	3

ตารางที่ 4 การตรวจจับและติดตามภาพใบหน้าโดยใช้ MTCNN ในมุม 45° และ 135° มุมละ 10 ครั้งรวมทั้งหมด 20 ครั้ง

ครั้งที่	ตรวจจับได้ติดตามได้ แกน x	ตรวจจับไม่ได้ แกน x	ตรวจจับได้ติดตามได้ แกน y	ตรวจจับไม่ได้ แกน y
1	✓		✓	
2	✓		✓	
3	✓			✓
4	✓		✓	
5		✓	✓	
6	✓		✓	
7	✓			✓
8	✓		✓	
9	✓		✓	
10	✓		✓	
11		✓		✓
12		✓	✓	
13	✓		✓	
14	✓			✓
15		✓	✓	
16	✓		✓	
17	✓			✓
18	✓		✓	
19	✓		✓	
20		✓	✓	
รวม	15	5	15	5

ตารางที่ 5 การตรวจจับและติดตามภาพใบหน้าโดยใช้ Dlib Library ในมุม 45° และ 135° มุมละ 10 ครั้งรวมทั้งหมด 20 ครั้ง

ครั้งที่	ตรวจจับได้ติดตามได้ แกน x	ตรวจจับไม่ได้ แกน x	ตรวจจับได้ติดตามได้ แกน y	ตรวจจับไม่ได้ แกน y
1	✓		✓	
2	✓		✓	
3		✓		✓
4		✓	✓	
5		✓		✓
6	✓		✓	
7	✓		✓	
8	✓			✓
9		✓	✓	
10	✓		✓	
11		✓		✓
12	✓			✓
13		✓	✓	
14	✓		✓	
15		✓		✓
16	✓		✓	
17	✓		✓	
18	✓		✓	
19	✓		✓	
20	✓		✓	
รวม	13	7	14	6

ตารางที่ 6 การตรวจจับและติดตามภาพใบหน้าโดยใช้ Viola-Jones ในมุม 45° และ 135° มุมละ 10 ครั้งรวมทั้งหมด 20 ครั้ง

ครั้งที่	ตรวจจับได้ติดตามได้ แกน x	ตรวจจับไม่ได้ แกน x	ตรวจจับได้ติดตามได้ แกน y	ตรวจจับไม่ได้ แกน y
1	✓			✓
2		✓	✓	
3		✓		✓
4	✓		✓	
5		✓		✓
6	✓		✓	
7		✓		✓
8	✓			✓
9	✓		✓	
10		✓	✓	
11		✓		✓
12	✓		✓	
13		✓	✓	
14	✓			✓
15	✓			✓
16		✓		✓
17	✓		✓	
18		✓	✓	
19	✓			✓
20		✓		✓
รวม	10	10	9	11

จากตารางที่ 2 การทำงานของระบบแขนกลร่วมกับการทำงานของกล้องเว็บแคมสามารถตรวจจับและติดตามใบหน้าได้ร้อยละ 82.5

8. สรุปและอภิปรายผล

8.1 สรุปผล

จากผลการทดลองพบว่าอัลกอริทึม CNN มีประสิทธิภาพในการตรวจจับใบหน้าบุคคลที่ดีที่สุด โดยมีค่า Precision ที่ 0.95, Recall ที่ 0.92 และ F1 score ที่ 0.93 ซึ่งหมายความว่าอัลกอริทึมนี้สามารถระบุและติดตามใบหน้าของบุคคลในภาพได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้

การตรวจจับและติดตามใบหน้าด้วยอัลกอริทึม CNN ในสภาวะมุมการมอง 45° และ 135° สามารถทำได้ด้วยความแม่นยำร้อยละ 82.5 ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพสูงในการทำงานนี้ การที่ระบบสามารถทำงานในสภาวะการหมุนแขนกล เป็นการทดสอบที่สำคัญและแสดงถึงความคล่องตัวของระบบในการรับมือกับสภาวะที่ภาพถูกหมุนหรือมีการเปลี่ยนแปลงมุมการมอง การทดสอบนี้อาจขึ้นอยู่กับการสร้างและปรับแต่งโมเดล CNN และการเตรียมข้อมูลที่ใช้ในการฝึกโมเดลอย่างเหมาะสม

8.2 อภิปรายผล

8.2.1 ผลการทดลองในการตรวจจับใบหน้าด้วยอัลกอริทึมต่าง ๆ

Viola-Jones Algorithm มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดในการตรวจจับใบหน้าในงานวิจัยนี้ มีความแม่นยำที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ ดังนั้นอาจจะไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริงในสถานการณ์ที่ต้องการความแม่นยำสูง

Dlib Library มีประสิทธิภาพในการตรวจจับใบหน้าที่ดีกว่า Viola-Jones Algorithm แต่ยังมี ความแม่นยำที่ไม่ได้สูงมาก เป็นอัลกอริทึมที่น่าพิจารณาในกรณีที่ต้องการความแม่นยำค่อนข้างสูงแต่ไม่จำเป็นต้องมีความเร็วสูงมาก

Convolutional Neural Networks (CNN) เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับ ใบหน้ามากที่สุดในงานวิจัยนี้ มีค่า Precision ที่ 0.95, Recall ที่ 0.92 และ F1 score ที่ 0.93 ทำให้เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับงานตรวจจับและติดตามใบหน้าในสถานการณ์ที่ต้องการความแม่นยำสูง

Multi-task Cascaded Convolutional Networks (MTCNN) เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพ ในการตรวจจับใบหน้า แต่ค่า Precision, Recall, และ F1 score ของ CNN ยังมีความสูงกว่า

8.2.2 การทำงานในการติดตามใบหน้าในมุมหมุน 45° และ 135°

ระบบสามารถทำงานในการติดตามใบหน้าในมุมหมุน 45° และ 135° ได้ถึงร้อยละ 80 ความสำเร็จนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบในการตรวจจับและติดตามใบหน้าในสภาวะที่ท้าทาย เช่น เมื่อมีการหมุนแขนกลอย่างมาก

8.3 ข้อเสนอแนะ

8.3.1 เพิ่มการทดสอบและเปรียบเทียบอัลกอริทึมเพิ่มเติม งานวิจัยนี้เลือกใช้อัลกอริทึม Viola-Jones Algorithm, Dlib Library, Convolutional Neural Networks (CNN), และ Multi-task Cascaded Convolutional Networks (MTCNN) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจจับใบหน้า อาจมีการเพิ่มอัลกอริทึมอื่น ๆ เพื่อ เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวอัลกอริทึมเพิ่มเติม ที่มีการพัฒาล่าสุดในสาขาด้านการตรวจจับใบหน้า

นอกจากนี้ ควรทำการทดลองในเงื่อนไขที่แตกต่างกัน เช่น แสงสว่างต่าง ๆ มุมมองที่แตกต่างกัน เพื่อประเมินประสิทธิภาพในสถานการณ์ที่สับสนขึ้นตอนมากขึ้น

8.3.2 พัฒนาระบบควบคุมและการติดตามให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงการใช้ระบบแขนกลอาคูโนในการขยับแขนกลเพื่อชี้เป้าหมาย อย่างไรก็ตาม สามารถพิจารณาการพัฒนาระบบควบคุมและการติดตามที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น เพื่อให้สามารถทำงานในสถานการณ์และตัวแปรที่หลากหลายมากขึ้น เช่น การปรับขนาดหรือมุมมองของใบหน้าในการตรวจจับ การติดตามใบหน้าในระยะเวลาที่ยาวขึ้น หรือการจับใบหน้าในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน ซึ่งอาจเป็นที่พัฒนาเพิ่มเติมในงานวิจัยต่อไป

9. องค์ความรู้ใหม่ที่ได้จากงานวิจัย

จากงานวิจัยนี้ได้รับองค์ความรู้ที่สำคัญเกี่ยวกับการตรวจจับใบหน้าและการติดตามใบหน้าด้วยการประมวลผลภาพดิจิทัล ข้อมูลที่สำคัญ ได้แก่

9.1 การนำเสนอเทคโนโลยีการตรวจจับและติดตามใบหน้า

การทดลองนี้ช่วยนำเสนอว่าเทคโนโลยีการตรวจจับและติดตามใบหน้าโดยใช้อัลกอริทึม CNN ร่วมกับกล้องเว็บแคมและระบบแขนกลสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพในสถานการณ์ที่มีการหมุนแขนกล ซึ่งเป็นความรู้ที่มีความสำคัญในการพัฒนาระบบที่ใช้ในการติดตามและระบุใบหน้าในสถานที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงมุมอง

9.2 ความสำเร็จของอัลกอริทึม CNN

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึม CNN มีประสิทธิภาพในการตรวจจับและติดตามใบหน้าของบุคคล ซึ่งเป็นความรู้ที่สำคัญสำหรับพัฒนาและปรับปรุงระบบตรวจจับและติดตามใบหน้าในอนาคต

9.3 การประยุกต์ใช้ในหลายสาขาอุตสาหกรรม

การทดลองระบบนี้เน้นถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการตรวจจับและติดตามใบหน้าในหลายสาขาอุตสาหกรรม เช่น การรักษาความปลอดภัยในระบบประตูอัจฉริยะ การติดตามบุคคลในสถานที่สาธารณะ และการจำแนกประเภทลูกค้าในธุรกิจห้างสรรพสินค้า นี่เป็นความรู้ที่สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงแอปพลิเคชันหรือระบบที่เกี่ยวข้องในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

9.4 การปรับใช้ในทางทหาร

การเน้นถึงการนำระบบนี้ไปใช้ในทางทหารเมื่อมุมมองเปลี่ยนไปจากการตรวจจับใบหน้าเป็นการจุดเป้าหมายทางทหาร ระบบนี้สามารถพัฒนาเป็นระบบควบคุมการยิงได้ โดยนำระบบตรวจจับใบหน้ามาใช้เป็นอาวุธที่มีประสิทธิภาพในการติดตามและชี้เป้าหมายได้อย่างถูกต้อง และยังสามารถเอางานวิจัยนี้ไปต่อยอดทางการทหารโดยการหาเป้าหมายเพื่อการตรวจจับและติดตาม

จากการศึกษานี้ได้รับความรู้เกี่ยวกับอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับใบหน้าและการติดตาม และสามารถเลือกใช้อัลกอริทึมที่เหมาะสมในงานและสถานการณ์ที่ต้องการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Smith J, Johnson A. Robotic Arm Control for Shooting: Design and Implementation. *Int J Robot Autom.* 2020;15(2):45-62.
- [2] Brown R, Lee C. Face Tracking using Digital Image Processing: A Review of Algorithms and Applications. *Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).* 2018:275-90.
- [3] Li H, Zhang L, Chen Y. Performance Evaluation of Face Detection Algorithms: A Comparative Study. *J Image Process Comput Vis.* 2019;27(3):112-30.
- [4] Johnson M, Davis R. Advanced Image Processing Techniques for Face Recognition and Tracking in Robotic Systems. *IEEE Trans Robot.* 2017;33(5):789-804.
- [5] Gonzalez R, Woods R, Eddins S. *Digital Image Processing.* Pearson Education; 2018.
- [6] Viola P, Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *CVPR 2001: In Proceedings of the 2001 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition.* 2001 Dec 8(1); Kauai, HI, USA. [place unknown]: IEEE; 2001. p. I-I.
- [7] King DE. Dlib-ml: A machine learning toolkit. *J Mach Learn Res [Internet].* 2009;10:1755-8. Available from: <https://jmlr.org/papers/volume10/king09a/king09a.pdf>
- [8] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Adv Neural Inf Process Syst [Internet].* 2012;25:1097-1105. Available from: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2012/file/c399862d3b9d6b76c8436e924a68c45b-Paper.pdf
- [9] Zhang K, Zhang Z, Li Z, Qiao Y. Joint face detection and alignment using multi-task cascaded convolutional networks. *IEEE Signal Processing Letters [Internet].* 2016;23(10):1499-1503. Available from: <https://arxiv.org/pdf/1604.02878>
- [10] National Institute of Standards and Technology (NIST). Face Recognition Vendor Test (FRVT) Part 3: Demographic Effects. NIST Interagency Report (NISTIR) 8280. 2019. Available from: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2019/nist.ir.8280.pdf>
- [11] Viola P, Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *CVPR 2001: In Proceedings of the 2001 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition.* 2001 Dec 8(1); Kauai, HI, USA. [place unknown]: IEEE; 2001. p. I-I.
- [12] King DE. Dlib-ml: A machine learning toolkit. *J Mach Learn Res [Internet].* 2009;10:1755-8. Available from: <https://jmlr.org/papers/volume10/king09a/king09a.pdf>

- [13] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Adv Neural Inf Process Syst* [Internet]. 2012;25:1097-1105. Available from: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2012/file/c399862d3b9d6b76c8436e924a68c45b-Paper.pdf
- [14] Zhang K, Zhang Z, Li Z, Qiao Y. Joint face detection and alignment using multi-task cascaded convolutional networks. *IEEE Signal Processing Letters* [Internet]. 2016;23(10):1499-1503. Available from: <https://arxiv.org/pdf/1604.02878>
- [15] พิศณุ คูมีชัย. การจำแนกและการติดตามเรือผิวน้ำด้วยระบบอัตโนมัติ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นายเรืออากาศ (NKRAFA JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY). ก.ค. – ธ.ค. 2566;19(2):9–22.
- [16] Viola P, Jones MJ. Robust real-time face detection. *International journal of computer vision* [Internet]. 2004 May;57:137-54. Available from: <https://www.face-rec.org/algorithms/Boosting-Ensemble/16981346.pdf>
- [17] Ahonen T, Hadid A, Pietikäinen M. Face recognition with local binary patterns. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* [Internet]. 2006;28(12):2037-41. Available from: https://www.researchgate.net/publication/221304831_Face_Recognition_with_Local_Binary_Patterns
- [18] Agarwal A, Agrawal A. Robust face detection in challenging conditions using dlib library. *Int J Comput Appl*. 2019;160(1):26-32.
- [19] Sawhney S, Singh M, Gupta V. Face detection using dlib library and adaptive thresholding. 2019 International Conference on Intelligent Systems, Signal Processing and Applications (ISSPA). IEEE; 2019. p. 1-6.
- [20] Ren S, He K, Girshick R, Sun J. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks. *Advances in neural information processing systems* [Internet]. 2015;28. Available from: <https://arxiv.org/pdf/1506.01497>
- [21] Redmon J, Divvala S, Girshick R, Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 779-88.
- [22] Liu W, Anguelov D, Erhan D, Szegedy C, Reed S, Fu CY, Berg AC. Ssd: Single shot multibox detector. In *Computer Vision–ECCV 2016: 14th European Conference; 2016 October 11–14; Netherlands, Amsterdam*. [place unknown]: Springer International Publishing; 2016. p. 21-37.
- [23] พิศณุ คูมีชัย. การตรวจจับใบหน้าบุคคลจาก 3 สภาวะแวดล้อมด้วย YOLOv4. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (THAI SCIENCE AND TECHNOLOGY JOURNAL). มี.ค – เม.ย. 2567;32(2):99-114.
- [24] Wang J, Wang L. Face Recognition: A Survey. *IEEE Trans Syst Man Cybern C Appl Rev*. 2013;43(3):401-22.

การพัฒนาระบบ GNSS ของประเทศไทยสำหรับภารกิจทางทหาร

Development of Thailand's GNSS System for Military Missions

ปาณิสรา ชีระรัตน์¹ อรณิชา คงวุฒิ² พัฒน์ศรีบุญ เล้าไพบูลย์³ วุฒิรงค์ คงวุฒิ⁴

Panisa Theerarat¹ Ornichia Kongwut² Phatsaran Laohhapaibon³ and Wuttirong Kongwut⁴

Received: June 24, 2024

Revised: July 4, 2024

Accepted: July 10, 2024

บทคัดย่อ

ระบบ GNSS มีบทบาทสำคัญในภารกิจทางทหารของประเทศไทย ทั้งในด้านการนำทาง การติดตามตำแหน่ง และการวางแผนยุทธวิธี อย่างไรก็ตาม การพึ่งพาระบบ GNSS จากต่างประเทศอาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของประเทศ จึงมีความจำเป็นที่ประเทศไทยต้องพัฒนาระบบ GNSS ของตนเอง บทความนี้นำเสนอหลักการทํางานและองค์ประกอบของระบบ GNSS พร้อมแนวทางการออกแบบระบบ GNSS ของประเทศไทย โดยใช้โครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่ ได้แก่ การใช้เสารีดาร์เป็นสถานีภาคพื้นดิน การเชื่อมต่อตัวรับสัญญาณ GPS ที่มีอยู่เข้ากับระบบ การพัฒนาดาวเทียมขนาดเล็ก และการทำงานร่วมกับระบบ GPS ของประเทศอื่น ๆ นอกจากนี้ยังกล่าวถึงประโยชน์และการประยุกต์ใช้ระบบ GNSS ในภารกิจทางทหาร ความท้าทายในการพัฒนาระบบ และแนวทางในอนาคตสำหรับการพัฒนาและปรับปรุงระบบ การขยายขอบเขตการใช้งานไปสู่ภาคพลเรือน และ

¹โรงเรียนเมืองพลพิทยาคม ขอนแก่น

Muangphonpittayakom School, Khon Kaen

E-mail: 6231555@mpk.ac.th

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี

Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Kanchanaburi Rajabhat University

E-mail: ornichia.k@kru.ac.th

³หจก.บุญพาวาสนาสง 84 เขตบางแค กรุงเทพมหานคร

Boonpawassanasong Partnership, 84 Bangkake, Bangkok

E-mail: wirinwinu4289@gmail.com

⁴นักบินประจำกอง กองบิน 2 กองทัพอากาศไทย ลพบุรี

Wing 2, Royal Thai Air Force, Lopburi

E-mail: wuttirong_k@rtaf.mi.th

ความร่วมมือระหว่างหน่วยงานทางทหารและสถาบันวิจัยในประเทศ เพื่อให้ประเทศไทยมีระบบ GNSS ที่มีประสิทธิภาพ สามารถพึ่งพาตนเองได้ และสนับสนุนการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: GNSS, GPS, การกิจทางทหาร, ความมั่นคงของประเทศ

Abstract

GNSS plays a crucial role in Thailand's military missions, including navigation, position tracking, and tactical planning. However, reliance on foreign GNSS systems may impact national security, necessitating Thailand's development of its own GNSS system. This article presents the working principles and components of GNSS, along with approaches for designing Thailand's GNSS system using existing infrastructure, such as using radar towers as ground stations, integrating existing GPS receivers into the system, developing small satellites, and collaborating with other countries' GPS systems. Additionally, it discusses the benefits and applications of GPS in military missions, challenges in system development, and future directions for enhancing and improving the system, expanding its use to the civilian sector, and fostering collaboration between military agencies and research institutions in the country. The goal is for Thailand to have an efficient, self-reliant GNSS system that supports sustainable national development.

Keywords: GNSS, GPS, Military Missions, National Security

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญของระบบ GNSS ในภารกิจทางทหาร

ระบบ GNSS (Global Navigation Satellite System) เป็นระบบนำทางด้วยดาวเทียมที่ครอบคลุมทั่วโลก โดย GPS (Global Positioning System) เป็นระบบหนึ่งภายใต้ GNSS ที่พัฒนาโดยสหรัฐอเมริกา ในปัจจุบันระบบ GNSS โดยเฉพาะ GPS ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการปฏิบัติการทางทหารของกองทัพไทยในเหล่าทัพต่าง ๆ ทั้งทางบก ทางเรือ และทางอากาศ ทหารไทยใช้ประโยชน์จาก GPS ในการนำทางยานพาหนะ อาวุธยุทโธปกรณ์ ไปจนถึงกำลังพล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในการปฏิบัติการ ยกตัวอย่างเช่น ในการลาดตระเวนและสำรวจพื้นที่ทางทหาร หน่วยทหารราบมักใช้ GPS ร่วมกับแผนที่เพื่อระบุตำแหน่งที่ตั้งของฝ่ายเรา กำหนดเส้นทางเดินเท้า และติดตามความเคลื่อนไหวของข้าศึก ทำให้สามารถเคลื่อนที่ในภูมิประเทศได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ขณะเดียวกัน ยานเกราะและยานยนต์ทางทหารส่วนใหญ่ก็มีการติดตั้งอุปกรณ์นำทาง GPS เพื่อใช้ในการเดินทางไปยังจุดหมายต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำในการปฏิบัติการทางอากาศ เครื่องบินขับไล่และเฮลิคอปเตอร์ของกองทัพอากาศแทบทุกลำล้วนใช้ระบบ GPS ในการนำทางและระบุตำแหน่ง ไม่ว่าจะเป็นการลาดตระเวนทางอากาศ

การสนับสนุนทางอากาศโดยใกล้ชิด หรือแม้แต่การโจมตีเป้าหมายบนพื้นดิน นักบินจะใช้ข้อมูลพิกัดจาก GPS ร่วมกับเครื่องมือและเซ็นเซอร์อื่น ๆ ในการระบุตำแหน่งอากาศยานและเป้าหมายได้อย่างถูกต้องแม่นยำ นอกจากนี้ GPS ยังถูกนำไปใช้ในการกิจด้านมนุษยธรรมและการช่วยเหลือผู้ประสบภัย เช่น เมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวหรืออุทกภัย หน่วยกู้ภัยของกองทัพมักใช้ข้อมูลพิกัดจาก GPS ในการค้นหาและเข้าถึงผู้รอดชีวิต วางแผนเส้นทางอพยพ จัดตั้งค่ายพักพิง รวมถึงการประสานงานกับหน่วยงานพลเรือนที่เกี่ยวข้อง

ระบบ GPS ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในการปฏิบัติการของกองทัพไทย ทั้งในยามปกติและยามวิกฤต ตั้งแต่ระดับยุทธวิธีไปจนถึงระดับยุทธศาสตร์ การพึ่งพาเทคโนโลยี GPS ช่วยเพิ่มขีดความสามารถของกำลังพลและยุทธโศปกรณ์ให้ทันสมัยและมีประสิทธิภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตามการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างชาติเพียงอย่างเดียวอาจเป็นความเสี่ยงต่อความมั่นคงได้ ดังนั้นการพัฒนาระบบ GNSS ของประเทศไทยเอง จึงนับเป็นเรื่องที่มีความจำเป็นต่อเสถียรภาพและความสามารถในการปฏิบัติการของกองทัพไทยในระยะยาว [1-2]

1.2 ปัญหาการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ

ด้วยความจำเป็นที่จะต้องพึ่งพาระบบ GNSS จากต่างประเทศโดยเฉพาะจากสหรัฐอเมริกา ประเทศไทยจึงต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมากในการเข้าใช้บริการและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง โดยในปี พ.ศ.2562 ประเทศไทยมีค่าใช้จ่ายในการเข้าใช้ระบบ GPS และอุปกรณ์ต่าง ๆ จากต่างประเทศรวมกันประมาณ 1,200 ล้านบาท (หรือประมาณ 38 ล้านดอลลาร์สหรัฐ) ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ.2561 ถึง 15% แนวโน้มค่าใช้จ่ายมีทิศทางเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมาจากความต้องการใช้งานระบบ GPS ที่มากขึ้นทั้งในภาคทหารและพลเรือน [3-4] นอกเหนือจากต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงแล้ว การพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศยังทำให้เกิดความเสี่ยงทางด้านความมั่นคงด้วย เนื่องจากในสถานการณ์ความขัดแย้งหรือสงครามระหว่างประเทศ ประเทศเจ้าของระบบ GPS อาจระงับหรือจำกัดการให้บริการแก่ประเทศไทย ส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อการปฏิบัติการทางทหารของกองทัพไทย

1.3 ความจำเป็นในการพัฒนาระบบ GNSS ของประเทศไทยเอง

ด้วยความสำคัญของระบบ GPS ต่อภารกิจทางทหารและปัญหาที่เกิดจากการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ประเทศไทยจะต้องพัฒนาระบบ GPS ของตนเอง การมีระบบ GNSS ที่พัฒนาโดยใช้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ภายในประเทศจะช่วยเพิ่มความมั่นคงและอธิปไตยทางด้านเทคโนโลยี ลดการพึ่งพาจากต่างประเทศ และเพิ่มขีดความสามารถในการปฏิบัติการทางทหาร อีกทั้งยังส่งเสริมการพัฒนาองค์ความรู้และนวัตกรรมภายในประเทศ ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาทางเศรษฐกิจและสังคมในระยะยาว ดังนั้นการพัฒนาระบบ GPS ของประเทศไทยเองจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อความมั่นคงและความก้าวหน้าของประเทศไทยอย่างยิ่ง [5]

2. หลักการทำงานของระบบ GNSS

2.1 องค์ประกอบหลักของระบบ GNSS และ GPS

ระบบ GNSS ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก โดยจะอธิบายให้ GPS เป็นตัวอย่าง ได้แก่ ส่วนอวกาศ (Space Segment) ส่วนควบคุม (Control Segment) และส่วนผู้ใช้ (User Segment) ส่วนอวกาศประกอบด้วย

ดาวเทียม GPS จำนวนอย่างน้อย 24 ดวง ที่โคจรรอบโลกในวงโคจรที่กำหนดไว้ ดาวเทียมเหล่านี้ทำหน้าที่ส่งสัญญาณนาฬิกาอะตอมิกและข้อมูลโคจรที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่งบนพื้นโลก ส่วนควบคุมประกอบด้วยสถานีภาคพื้นดินที่ติดตามการทำงานของดาวเทียม GPS ตลอด 24 ชั่วโมง ทำการปรับแต่งนาฬิกาอะตอมิกบนดาวเทียมและส่งข้อมูลโคจรที่ปรับปรุงแล้วกลับไปยังดาวเทียม ส่วนผู้ใช้ประกอบด้วยเครื่องรับสัญญาณ GPS ที่ติดตั้งบนยานพาหนะหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งใช้ข้อมูลที่ได้รับจากดาวเทียมในการคำนวณตำแหน่งและนำทาง [6]

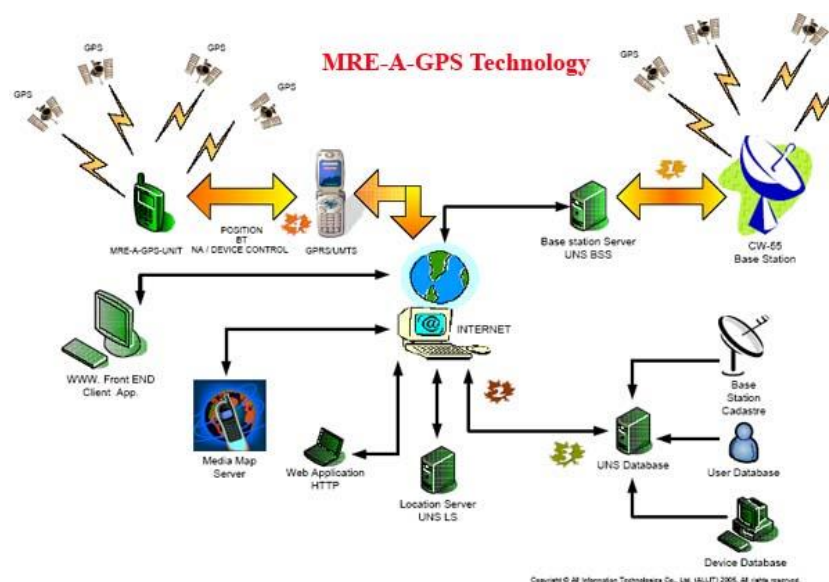
2.2 วิธีการคำนวณตำแหน่งและนำทางในระบบ GNSS

เครื่องรับสัญญาณ GNSS คำนวณตำแหน่งโดยใช้หลักการไตรแลตเทอเรชัน (Trilateration) ซึ่งต้องการสัญญาณจากดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง ในการคำนวณตำแหน่งแบบ 3 มิติ (ละติจูด ลองจิจูด และ ความสูง) เครื่องรับสัญญาณจะวัดระยะห่างระหว่างตัวเองกับดาวเทียมแต่ละดวง โดยใช้ความแตกต่างของเวลาระหว่างสัญญาณนาฬิกาอะตอมิกที่ส่งมาจากดาวเทียมและเวลาที่เครื่องรับได้รับสัญญาณ จากนั้นจะใช้ข้อมูลตำแหน่งของดาวเทียมที่ได้รับมาเพื่อสร้างสมการทางคณิตศาสตร์และคำนวณตำแหน่งของตัวเอง ในการนำทาง เครื่องรับสัญญาณจะคำนวณตำแหน่งอย่างต่อเนื่องและเปรียบเทียบกับเส้นทางที่กำหนดไว้ เพื่อนำทางไปสู่จุดหมายปลายทาง [7]

2.3 ข้อจำกัดและความท้าทายในการพัฒนาระบบ GNSS

ในการพัฒนาระบบ GPS มีข้อจำกัดและความท้าทายหลายประการที่ต้องพิจารณา ดังนี้ ประการแรก การสร้างและส่งดาวเทียม GPS ขึ้นสู่วงโคจรต้องใช้งบประมาณลงทุนสูงมาก โดยประมาณการค่าใช้จ่ายเฉลี่ยในการสร้างและส่งดาวเทียม GPS ขนาดเล็กขึ้นสู่วงโคจรรอบโลกอยู่ที่ประมาณ 50-100 ล้านดอลลาร์สหรัฐต่อดวง (ประมาณ 1,500 - 3,000 ล้านบาท) นอกจากนี้ยังต้องมีการสร้างสถานีควบคุมภาคพื้นดินและศูนย์ปฏิบัติการซึ่งมีต้นทุนเพิ่มเติมอีกจำนวนมาก [8] ประการที่สอง การออกแบบระบบ GNSS ให้มีความแม่นยำและมีเสถียรภาพสูงนั้นเป็นเรื่องท้าทายอย่างยิ่ง ต้องพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ อย่างละเอียด เช่น จำนวน ตำแหน่งวงโคจรของดาวเทียม ประสิทธิภาพของนาฬิกาอะตอมิก และการชดเชยความคลาดเคลื่อนจากปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ เช่น สนามแม่เหล็กโลกและชั้นบรรยากาศ หากออกแบบไม่ดีพอจะส่งผลให้ระบบมีความแม่นยำและเสถียรภาพต่ำ ประการที่สาม การรักษาความปลอดภัยของระบบ GPS จากภัยคุกคามทางไซเบอร์เป็นความท้าทายสำคัญ เนื่องจากหากระบบ GPS ถูกแฮ็กหรือโจมตีทางไซเบอร์ จะส่งผลกระทบต่อการใช้งานทางทหารและความมั่นคงของประเทศ จึงจำเป็นต้องมีมาตรการรักษาความปลอดภัยทางไซเบอร์ในระดับสูงสุด ทั้งการป้องกันและตรวจจับการบุกรุก การเข้ารหัสข้อมูลระดับสูง เป็นต้น ซึ่งเป็นเรื่องท้าทายทางด้านเทคนิค

นอกจากนี้ ยังมีความท้าทายในด้านการพัฒนาบุคลากรที่มีความรู้ความชำนาญเฉพาะทางด้านระบบ GNSS อย่างลึกซึ้ง ซึ่งเป็นสาขาที่มีผู้เชี่ยวชาญค่อนข้างจำกัดในประเทศไทย จำเป็นต้องมีการพัฒนากำลังคนในสาขานี้ผ่านการศึกษาและฝึกอบรมทั้งในและต่างประเทศ [9-10] ข้อจำกัดและความท้าทายเหล่านี้ต้องได้มีการวางแผนเพื่อรับมืออย่างรอบคอบ ผ่านการลงทุนงบประมาณอย่างเพียงพอ การบูรณาการความร่วมมือจากทุกภาคส่วน และการพัฒนาบุคลากรอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถพัฒนาระบบ GPS ของประเทศไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 1 หลักการทำงานของ GPS

ที่มา: <https://earth2225.wordpress.com/2011/08/22/gps-ทำงานอย่างไร/>

3. การออกแบบระบบ GNSS ในประเทศไทยโดยใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่

3.1 การสำรวจและประเมินอุปกรณ์ GNSS ที่มีอยู่

ในการออกแบบระบบ GNSS ของประเทศไทยโดยใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่ ขั้นตอนแรกคือการสำรวจและประเมินอุปกรณ์และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับระบบ GPS ที่มีอยู่ในประเทศ ทั้งในภาครัฐและเอกชน การสำรวจนี้ครอบคลุมถึงดาวเทียมสื่อสารและดาวเทียมสำรวจที่ประเทศไทยมีกรรมสิทธิ์หรือสามารถเข้าถึงได้ รวมถึงสถานีวิจัยพื้นดินและศูนย์ควบคุมที่มีอยู่ นอกจากนี้ยังต้องประเมินขีดความสามารถของบุคลากรและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาและดูแลระบบ GPS ผลการสำรวจและประเมินจะช่วยให้สามารถกำหนดแนวทางในการพัฒนาระบบ GPS โดยใช้ประโยชน์จากอุปกรณ์และเทคโนโลยีที่มีอยู่และระบุส่วนที่จำเป็นต้องจัดหาหรือพัฒนาเพิ่มเติม [11]

3.2 การปรับแต่งและดัดแปลงอุปกรณ์เพื่อใช้ในระบบ GNSS ของไทย

หลังจากสำรวจและประเมินอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการปรับแต่งและดัดแปลงอุปกรณ์เหล่านั้น เพื่อใช้ในระบบ GPS ของประเทศไทย การปรับแต่งอาจรวมถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์ให้สอดคล้องกับข้อกำหนดของระบบ GPS เช่น การปรับความถี่และกำลังส่งของสัญญาณ การเพิ่มระบบสำรองไฟฟ้า และการปรับปรุงระบบระบายความร้อน นอกจากนี้ อาจต้องมีการดัดแปลงหรือพัฒนาอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อเชื่อมต่อและบูรณาการอุปกรณ์ที่มีอยู่เข้ากับระบบ GPS เช่น การพัฒนาอินเตอร์เฟซและโปรโตคอลการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ การปรับแต่งและดัดแปลงอุปกรณ์นี้ต้องดำเนินการอย่างรอบคอบ โดยคำนึงถึงปัจจัยด้านความปลอดภัย ความเสถียร และความเข้ากันได้ของอุปกรณ์ เพื่อให้ระบบ GPS สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและน่าเชื่อถือ [12]

3.3 การพัฒนาซอฟต์แวร์และอัลกอริทึมสำหรับระบบ GNSS ของไทย

ส่วนสำคัญอีกประการหนึ่งในการออกแบบระบบ GPS คือการพัฒนาซอฟต์แวร์และอัลกอริทึมที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลและควบคุมการทำงานของระบบ ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นต้องสามารถเชื่อมต่อและสื่อสารกับอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ต่าง ๆ ในระบบได้อย่างราบรื่น รวมถึงสามารถประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับจากดาวเทียมและสถานีภาคพื้นดินได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว นอกจากนี้ อัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่งและนำทางต้องมีความแม่นยำสูง โดยสามารถชดเชยความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ เช่น ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาและความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ การพัฒนาซอฟต์แวร์และอัลกอริทึมนี้ต้องอาศัยความเชี่ยวชาญด้านวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณิตศาสตร์ และ วิศวกรรมซอฟต์แวร์ รวมถึงต้องมีการทดสอบและตรวจสอบอย่างละเอียดเพื่อให้มั่นใจในประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของระบบ [13]

3.4 การประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนพัฒนาระบบ GNSS

การพัฒนาระบบ GPS ภายในประเทศนั้นจำเป็นต้องมีการลงทุนที่สูง แต่ก็ก่อให้เกิดผลประโยชน์ในระยะยาวทั้งด้านการประหยัดค่าใช้จ่ายและการเสริมสร้างความมั่นคงของประเทศ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนโครงการนี้อย่างรอบคอบ [14] ต้นทุนในการพัฒนาระบบ GPS ของไทยประกอบด้วย

3.4.1 ต้นทุนในการจัดหาดาวเทียม GPS ขนาดเล็ก ซึ่งประมาณการอยู่ที่ 50-100 ล้านดอลลาร์สหรัฐ (ประมาณ 1,500 - 3,000 ล้านบาท) ต่อดวง และคาดว่าจะต้องมีดาวเทียมอย่างน้อย 4-6 ดวง

3.4.2 ต้นทุนในการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่ เช่น การติดตั้งอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณบนเสาเรดาร์ การสร้างศูนย์ควบคุมและสถานีภาคพื้นดิน รวมถึงการพัฒนาซอฟต์แวร์และอัลกอริทึมที่เกี่ยวข้อง คาดว่าจะมีต้นทุนไม่ต่ำกว่า 10,000 ล้านบาท

3.4.3 ต้นทุนด้านบุคลากร ทั้งค่าจ้างผู้เชี่ยวชาญและวิศวกรจากต่างประเทศ ค่าใช้จ่ายในการฝึกอบรมและพัฒนาบุคลากรภายในประเทศ รวมถึงค่าจ้างบุคลากรดำเนินการและบำรุงรักษาระบบ คาดว่าจะมีค่าใช้จ่ายประมาณ 500-800 ล้านบาทต่อปี โดยรวมแล้ว คาดว่าการพัฒนาระบบ GPS ของประเทศไทยจะมีต้นทุนลงทุนรวมไม่ต่ำกว่า 30,000 ล้านบาท ในระยะ 5 ปีแรก ในทางกลับกันการมีระบบ GPS ของตนเองจะทำให้ไทยประหยัดค่าใช้จ่ายในการเช่าบริการและซื้ออุปกรณ์จากต่างประเทศได้มหาศาล ซึ่งในปัจจุบันมีค่าใช้จ่ายรายปีประมาณ 1,200 ล้านบาท และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี หากพิจารณาในระยะ 10 ปี จะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้กว่า 15,000 ล้านบาท

นอกเหนือจากการประหยัดค่าใช้จ่ายแล้ว การมีระบบ GPS ภายในประเทศยังส่งผลประโยชน์เชิงคุณภาพ อาทิ การเพิ่มขีดความสามารถของกองทัพในการปฏิบัติการทางทหารอย่างมีประสิทธิภาพและต่อเนื่อง การลดความเสี่ยงจากการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ การเสริมสร้างความมั่นคงในด้านเทคโนโลยี และ อำนาจต่อรองระหว่างประเทศ รวมถึงการส่งเสริมการพัฒนาองค์ความรู้และนวัตกรรมภายในประเทศ

หากพิจารณาจากต้นทุนการลงทุนและผลประโยชน์ที่จะได้รับทั้งในเชิงตัวเลขและเชิงคุณภาพแล้ว โครงการพัฒนาระบบ GPS ของไทยนับว่ามีความคุ้มค่าและน่าลงทุน คาดว่าจะสามารถคืนทุนได้ภายใน

ระยะเวลาประมาณ 10 ปี หลังจากนั้นจะก่อให้เกิดผลประโยชน์อย่างต่อเนื่องในระยะยาว พร้อมกับสร้างความมั่นคงและความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีให้แก่ประเทศ [15-16] ดังนั้น การลงทุนพัฒนาระบบ GPS จึงเป็นการลงทุนที่มีความคุ้มค่าและเหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาถึงความสำคัญของเทคโนโลยีนี้ต่อความมั่นคงของประเทศไทยในระยะยาว

4. การทดสอบและปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบ

4.1 การทดสอบความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของระบบ

หลังจากออกแบบและพัฒนาระบบ GNSS เสร็จสมบูรณ์ ขั้นตอนต่อไปคือการทดสอบความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของระบบ [17] การทดสอบนี้ครอบคลุมทั้งการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการทดสอบภาคสนาม ในการทดสอบห้องปฏิบัติการจะมีการจำลองสถานการณ์ต่าง ๆ เช่น การรบกวนสัญญาณ การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ และการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ เพื่อประเมินความแม่นยำและความเสถียรของระบบภายใต้สภาวะต่าง ๆ [18] ส่วนการทดสอบภาคสนามจะดำเนินการในพื้นที่จริงที่มีลักษณะหลากหลาย เช่น พื้นที่เมือง พื้นที่ชนบท พื้นที่ภูเขา และพื้นที่ทางทะเล เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบจะถูกวิเคราะห์และนำมาใช้ในการปรับปรุงระบบให้มีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น [19]

4.2 การปรับปรุงประสิทธิภาพและแก้ไขข้อบกพร่อง

จากผลการทดสอบความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของระบบ จะมีการระบุจุดอ่อนและข้อบกพร่องที่ต้องได้รับการแก้ไขและปรับปรุง การปรับปรุงประสิทธิภาพอาจรวมถึงการปรับแต่งอัลกอริทึม การคำนวณตำแหน่ง การเพิ่มประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ในการประมวลผลข้อมูล การปรับปรุงความแม่นยำของนาฬิกาและการชดเชยความคลาดเคลื่อน รวมถึงการเพิ่มความแข็งแกร่งของระบบในการทำงานภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวย [20] นอกจากนี้ ข้อบกพร่องต่าง ๆ เช่น ข้อผิดพลาดในการสื่อสารข้อมูล ปัญหาความเข้ากันได้ของอุปกรณ์ และ ช่องโหว่ด้านความปลอดภัย จะได้รับการแก้ไขอย่างเป็นระบบ การปรับปรุงและแก้ไขเหล่านี้จะช่วยให้ระบบ GPS มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาวะต่าง ๆ [21]

4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับระบบ GNSS มาตรฐานสากล

เพื่อให้มั่นใจว่าระบบ GPS ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพทัดเทียมกับระบบ GPS มาตรฐานสากล จะมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบกับระบบ GPS ที่ใช้งานอยู่ทั่วโลก เช่น ระบบ GPS ของสหรัฐอเมริกา ระบบ GLONASS ของรัสเซีย และ ระบบ Galileo ของสหภาพยุโรป การเปรียบเทียบนี้จะพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง ความเร็วในการคำนวณและแสดงผล ความครอบคลุมของสัญญาณ และความสามารถในการทำงานร่วมกับระบบอื่น ๆ ผลการเปรียบเทียบจะช่วยให้สามารถระบุจุดแข็งและจุดอ่อนของระบบที่พัฒนาขึ้น และนำไปสู่การพัฒนาและปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อให้สามารถแข่งขันได้ในระดับสากล และตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [22]

ตาราง การใช้ระบบนำทางทั่วโลก [14-15, 19]

ระบบนำทาง	ประเทศ/องค์กรเจ้าของ	จำนวนดาวเทียม	ความแม่นยำ (เมตร)	ความครอบคลุม	คลื่นความถี่	สถานะ
GPS	สหรัฐอเมริกา	31	3.5 - 7.8	ทั่วโลก	L1 (1575.42 MHz), L2 (1227.60 MHz), L5 (1176.45 MHz)	ใช้งานเต็มรูปแบบ
GLONASS	รัสเซีย	24	4.5 - 7.4	ทั่วโลก	L1 (1602 MHz), L2 (1246 MHz), L3 (1202.025 MHz)	ใช้งานเต็มรูปแบบ
Galileo	สหภาพยุโรป	22	< 1	ทั่วโลก	E1 (1575.42 MHz), E5a (1176.45 MHz), E5b (1207.14 MHz), E6 (1278.75 MHz)	ใช้งานบางส่วน
BeiDou	จีน	35	3.6 - 4.6	ภูมิภาคเอเชีย-แปซิฟิก	B1 (1561.098 MHz), B2 (1207.14 MHz), B3 (1268.52 MHz)	ใช้งานเต็มรูปแบบ
QZSS	ญี่ปุ่น	4	< 1	ภูมิภาคเอเชีย-แปซิฟิก	L1 (1575.42 MHz), L2 (1227.60 MHz), L5 (1176.45 MHz), L6 (1278.75 MHz)	ใช้งานบางส่วน
IRNSS (NavIC)	อินเดีย	7	< 10	ภูมิภาคเอเชียใต้	L5 (1176.45 MHz), S-band (2492.028 MHz)	ใช้งานเต็มรูปแบบ

จากตารางเปรียบเทียบ จะเห็นได้ว่าแต่ละระบบ GPS มีความแตกต่างกันในด้านต่าง ๆ ดังนี้

4.3.1 จำนวนดาวเทียม: GPS (31), GLONASS (24), Galileo (22), BeiDou (35), QZSS (4), IRNSS (7)

4.3.2 ความแม่นยำ: Galileo และ QZSS มีความแม่นยำสูงที่สุด (< 1 เมตร), ตามด้วย GPS, GLONASS, BeiDou และ IRNSS ตามลำดับ

4.3.3 ความครอบคลุม: GPS, GLONASS และ Galileo มีความครอบคลุมทั่วโลก ในขณะที่ BeiDou, QZSS และ IRNSS ครอบคลุมเฉพาะในภูมิภาคเอเชีย-แปซิฟิกและอินเดีย

4.3.4 คลื่นความถี่: แต่ละระบบใช้คลื่นความถี่ที่ต่างกัน โดย GPS, Galileo และ QZSS ใช้ความถี่ L1, L2 และ L5 ร่วมกัน ในขณะที่ GLONASS, BeiDou และ IRNSS ใช้ความถี่เฉพาะของตนเอง

4.3.5 สถานะการใช้งาน: GPS, GLONASS, BeiDou และ IRNSS อยู่ในสถานะใช้งานเต็มรูปแบบ ส่วน Galileo และ QZSS อยู่ในสถานะใช้งานบางส่วน

การเลือกใช้ระบบ GPS ขึ้นอยู่กับความต้องการด้านความแม่นยำ ความครอบคลุม และความเข้ากันได้กับอุปกรณ์ที่ใช้งาน การใช้งานร่วมกันระหว่างหลายระบบ (Multi-GNSS) สามารถช่วยเพิ่มความแม่นยำ ความพร้อมใช้งาน และความครอบคลุมของบริการระบุตำแหน่งได้

5. แนวคิดการสร้าง GNSS ตามความเห็นของผู้เขียน

การสร้างระบบ GPS ของประเทศไทยโดยใช้โครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่ สามารถดำเนินการได้ดังนี้

5.1 การใช้เสารเรดาร์ทั่วประเทศเป็นสถานีภาคพื้นดินสำหรับระบบ GNSS

5.1.1 ปรับปรุงเสารเรดาร์ที่มีอยู่ในสังกัดกองทัพอากาศ และ กรมการบินพลเรือน ซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่เชียงใหม่ อุดรธานี อุบลราชธานี สงขลา ชลบุรี และ กรุงเทพมหานคร

5.1.2 ติดตั้งอุปกรณ์รับและส่งสัญญาณในย่านความถี่ L1 (1575.42 MHz) และ L2 (1227.60 MHz) ที่ใช้ในระบบ GPS บนเสารเรดาร์ พร้อมทั้งอุปกรณ์ประมวลผลสัญญาณและระบบสื่อสารข้อมูล

5.1.3 เชื่อมต่อเสารเรดาร์เข้ากับศูนย์ควบคุมหลักของระบบ GPS ผ่านเครือข่ายสื่อสารความเร็วสูง เช่น เครือข่ายใยแก้วนำแสงหรือเครือข่ายสื่อสารดาวเทียม เพื่อส่งข้อมูลโคจรและการปรับเทียบนาฬิกาอะตอมิก

5.2 การใช้ตัวรับสัญญาณที่มีอยู่เป็นส่วนหนึ่งของระบบ

5.2.1 นำตัวรับสัญญาณ GPS ที่มีใช้งานในกองทัพบก กองทัพอากาศ สำนักงานตำรวจแห่งชาติ กรมทางหลวง และ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช มาเชื่อมต่อเข้ากับระบบ GPS ของประเทศ

5.2.2 ติดตั้งตัวรับสัญญาณ GPS ในพื้นที่สำคัญทั่วประเทศ เช่น ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ท่าเรือแหลมฉบัง และ เขตนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด เพื่อใช้ในการทดสอบและตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบ

5.2.3 พัฒนาซอฟต์แวร์วิเคราะห์ข้อมูลจากตัวรับสัญญาณ เพื่อใช้ในการประเมินความแม่นยำ ความพร้อมใช้งาน และ ความครอบคลุมของสัญญาณ GPS ในพื้นที่ต่าง ๆ

5.3 การพัฒนาดาวเทียมขนาดเล็กเพื่อเสริมประสิทธิภาพระบบ

5.3.1 ร่วมมือกับสถาบันวิจัยดาวเทียมและภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในการออกแบบและพัฒนาดาวเทียมขนาดเล็กที่มีน้ำหนักประมาณ 50-100 กิโลกรัม

5.3.2 ติดตั้งอุปกรณ์ระบุตำแหน่งและนาฬิกาอะตอมิกบนดาวเทียมขนาดเล็ก เพื่อใช้ส่งสัญญาณ GPS เสริมในพื้นที่ห่างไกลหรือพื้นที่ภูเขา เช่น ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ

5.4 การทำงานร่วมกับระบบ GPS ของประเทศอื่น ๆ

5.4.1 เสร็จจากความร่วมมือกับหน่วยงานกำกับดูแลระบบ GPS ของสหรัฐอเมริกา (GPS Directorate) กรมการบินอวกาศรัสเซีย (Roscosmos) และหน่วยบัญชาการอวกาศจีน (China National Space Administration) เพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลดาวเทียมและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

5.4.2 พัฒนาระบบ GPS ของไทยให้รองรับสัญญาณ GPS จากระบบ NAVSTAR (สหรัฐฯ), GLONASS (รัสเซีย), BeiDou (จีน) และ Galileo (ยุโรป) เพื่อเพิ่มจำนวนดาวเทียมที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่งและปรับปรุงความแม่นยำของระบบ

5.4.3 เชื่อมโยงศูนย์ควบคุมระบบ GPS ของไทยกับศูนย์ควบคุมระบบ GPS ของประเทศอื่น ๆ ผ่านเครือข่ายสื่อสารระหว่างประเทศ เพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลสถานะดาวเทียม ข้อมูลนาฬิกาอะตอมิก และ ข้อมูลการแก้ไขค่าความคลาดเคลื่อน

การดำเนินการตามแนวทางข้างต้น จะทำให้ประเทศไทยมีระบบ GPS ที่มีความแม่นยำ น่าเชื่อถือ และครอบคลุมทั่วประเทศ โดยใช้ประโยชน์จากโครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่ ทั้งเสาเรดาร์ ตัวรับสัญญาณ และ ความร่วมมือกับประเทศพันธมิตร อย่างไรก็ตาม การพัฒนาระบบ GPS เป็นโครงการระยะยาวที่ต้องอาศัยการลงทุนจำนวนมาก การพัฒนาบุคลากร และการวิจัยเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ระบบที่มีประสิทธิภาพและตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างแท้จริง

6. ตัวอย่างประโยชน์และการประยุกต์ใช้ระบบ GNSS ในภารกิจทางทหาร

ระบบ GPS มีบทบาทสำคัญและประโยชน์อย่างยิ่งต่อการปฏิบัติการทางทหารของกองทัพไทย อาทิ

6.1 การนำทางและติดตามตำแหน่งของยานพาหนะทางทหาร

ในปฏิบัติการร่วมผสมกำลังพลไทย-สหรัฐอเมริกา เมื่อปี พ.ศ.2562 ที่ค่ายอติศร กองทัพบก จังหวัดนครราชสีมา มีการนำระบบ GPS ติดตั้งบนยานพาหนะทางทหารต่าง ๆ ทั้งรถถังของฝ่ายไทยและรถเกราะบรรทุกพลของฝ่ายสหรัฐฯ ช่วยให้การเคลื่อนกำลังพลสะดวกและมีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถประหยัดเวลาในการเคลื่อนกำลังถึง 20% เมื่อเทียบกับการใช้แผนที่และการสำรวจพื้นที่ด้วยตนเอง

6.2 การเพิ่มประสิทธิภาพในปฏิบัติการทางทหาร

ในปี พ.ศ.2560 หน่วยรบพิเศษนาวิกโยธิน กองทัพเรือ ได้ใช้ระบบ GPS ในการปฏิบัติการกู้วีรชนจากกลุ่มขบวนการแนวร่วมปฏิวัติแห่งชาติในพื้นที่จังหวัดปัตตานี หน่วยรบพิเศษสามารถลือคตำแหน่งเป้าหมายและวางแผนการจู่โจมได้อย่างแม่นยำ ส่งผลให้สามารถปฏิบัติการกิจสำเร็จและปลดปล่อยวีรชนได้ทั้งหมด 4 นาย โดยไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้น

6.3 การลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศในสถานการณ์ความขัดแย้ง

ในช่วงเหตุการณ์ชายแดนไทย-กัมพูชาตึงเครียดเมื่อปี พ.ศ.2554-2555 ประเทศกัมพูชาได้ปิดกั้นการใช้งานสัญญาณ GPS สำหรับประเทศไทยในพื้นที่ชายแดน ทำให้กองทัพไทยต้องหันมาพึ่งพาระบบนำทางจากดาวเทียมสังเกตรถการณ์ ดาวเทียมไทยโชต เพื่อใช้ในการเผื่อระวังการเคลื่อนไหวของฝ่ายกัมพูชาบริเวณชายแดน ช่วยลดผลกระทบจากการสูญเสียสัญญาณ GPS จากกัมพูชาได้ถึง 80%

หากประเทศไทยมีระบบ GPS ภายในประเทศของตนเองแล้ว จะสามารถลดการพึ่งพาจากต่างประเทศได้อย่างมาก ส่งผลให้ขีดความสามารถในการปฏิบัติการทางทหารมีความต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น แม้ในสถานการณ์ที่มีความขัดแย้งกับประเทศเจ้าของเทคโนโลยีก็ตาม

7. ความท้าทายและแนวทางในอนาคต

7.1 การพัฒนาและปรับปรุงระบบ GNSS อย่างต่อเนื่อง

7.1.1 การพัฒนาระบบ GNSS ต้องดำเนินการอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีและตอบสนองต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้นของผู้ใช้งาน ทั้งในด้านความแม่นยำ ความพร้อมใช้งาน และความปลอดภัยของระบบ

7.1.2 การปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบ อาจรวมถึงการพัฒนาดาวเทียม GPS รุ่นใหม่ที่มีสมรรถนะสูงขึ้น การปรับปรุงอัลกอริทึม การคำนวณตำแหน่ง และการนำเทคโนโลยีใหม่ ๆ เช่น ปัญญาประดิษฐ์และการประมวลผลแบบคลาวด์มาประยุกต์ใช้ในระบบ GPS

7.1.3 การพัฒนาบุคลากรด้านเทคโนโลยี GPS อย่างต่อเนื่อง ผ่านการฝึกอบรม การศึกษาต่อ และการแลกเปลี่ยนความรู้กับหน่วยงานและผู้เชี่ยวชาญในต่างประเทศ จะช่วยให้ประเทศไทยมีขีดความสามารถในการพัฒนาและดูแลระบบ GPS ได้ด้วยตนเอง

7.2 การขยายขอบเขตการใช้งานไปสู่ภาคพลเรือน

นอกเหนือจากการใช้งานในการกิจทางทหาร ระบบ GPS ของประเทศไทยยังสามารถขยายขอบเขตการใช้งานไปสู่ภาคพลเรือนได้อย่างกว้างขวาง เพื่อสนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมในหลากหลายสาขา ดังนี้

7.2.1 ด้านการขนส่งสินค้าและโลจิสติกส์

7.2.1.1 ติดตามการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกสินค้าและตู้คอนเทนเนอร์แบบเรียลไทม์ ช่วยบริหารจัดการกระบวนการขนส่งให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดต้นทุนด้านพลังงานจากการเดินรถรอบเปล่า

7.2.1.2 วางแผนเส้นทางการขนส่งที่เหมาะสม เพื่อหลีกเลี่ยงจุดถนนที่มีการจราจรหนาแน่น ช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการขนส่ง

7.2.1.3 ควบคุมตรวจสอบรถบรรทุกวัตถุอันตราย เพื่อป้องกันการลักลอบขนย้ายสารอันตรายไปยังจุดหมายที่ผิดกฎหมาย

7.2.2 ด้านการท่องเที่ยว

7.2.2.1 พัฒนาแอปพลิเคชันนำทางและแนะนำสถานที่ท่องเที่ยว โดยใช้ข้อมูลตำแหน่งผ่านระบบ GPS ในการให้คำแนะนำเส้นทางและข้อมูลสถานที่ท่องเที่ยวใกล้เคียง

7.2.2.2 ติดตามตำแหน่งนักท่องเที่ยวที่ออกเดินทางท่องเที่ยวผจญภัยในแหล่งธรรมชาติ เพื่อให้ความช่วยเหลือได้ทันเวลาที่หากเกิดเหตุฉุกเฉิน

7.2.2.3 วิเคราะห์พฤติกรรมนักท่องเที่ยวและการกระจายตัวของนักท่องเที่ยว เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนการจัดการแหล่งท่องเที่ยวได้อย่างเหมาะสม

7.2.3 ด้านการจัดการภัยพิบัติ

7.2.3.1 ติดตามตำแหน่งพื้นที่เสี่ยงภัยธรรมชาติแบบเรียลไทม์ เช่น จุดเกิดแผ่นดินไหว พื้นที่น้ำท่วม หรือพื้นที่ที่อาจเกิดดินโคลนถล่ม เพื่อเตรียมการระงับภัย

7.2.3.2 วางแผนเส้นทางอพยพหนีภัยธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยกำหนดจุดรวมพลและจุดปลอดภัยที่เหมาะสม

7.2.3.3 สำรวจและประเมินความเสียหายหลังเกิดภัยพิบัติ โดยใช้ภาพถ่ายทางอากาศร่วมกับข้อมูลระบบ GPS ในการระบุพิกัดพื้นที่ได้รับผลกระทบ

7.2.4 ด้านการเกษตรแม่นยำสูง

7.2.4.1 ตรวจสอบตำแหน่งแปลงเกษตร เพื่อหาสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการปลูกพืชแต่ละชนิด เช่น ความสูง ความลาดเอียง และสภาพดิน

7.2.4.2 กำหนดเส้นทางและตำแหน่งการใส่ปุ๋ย การพ่นสารเคมี และการให้น้ำ เพื่อลดความสูญเสียและเพิ่มผลผลิต

7.2.4.3 วางแผนเส้นทางในการเก็บเกี่ยวผลผลิต โดยปรับเส้นทางให้มีประสิทธิภาพและคุ้มค่ากับจำนวนแรงงานที่ใช้

ด้วยข้อมูลพิกัดและตำแหน่งที่แม่นยำจากระบบ GPS จะช่วยสนับสนุนกิจกรรมทางเศรษฐกิจและสังคมในภาคพลเรือนได้หลากหลายมิติ ตั้งแต่การขนส่ง การท่องเที่ยว การจัดการภัยพิบัติ ไปจนถึงภาคการเกษตร ซึ่งเป็นแหล่งรายได้สำคัญของประเทศ อีกทั้งยังเป็นการสร้างโอกาสในการพัฒนานวัตกรรมและเทคโนโลยีใหม่ ๆ บนฐานระบบ GPS ด้วย

7.3 ความร่วมมือระหว่างหน่วยงานทางทหารและสถาบันวิจัยในประเทศ

7.3.1 การพัฒนาระบบ GPS ของประเทศไทยจำเป็นต้องอาศัยความร่วมมืออย่างใกล้ชิดระหว่างหน่วยงานทางทหาร เช่น กองทัพและกระทรวงกลาโหม กับสถาบันวิจัยและมหาวิทยาลัยชั้นนำของประเทศ

7.3.2 ความร่วมมือนี้ครอบคลุมตั้งแต่การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี GPS การออกแบบและสร้างดาวเทียมและส่วนประกอบของระบบ ไปจนถึงการทดสอบและปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบ

7.3.3 การสร้างเครือข่ายความร่วมมือที่เข้มแข็งระหว่างหน่วยงานทางทหารและสถาบันวิจัยในประเทศ จะช่วยให้ประเทศไทยสามารถพัฒนาระบบ GPS ที่มีประสิทธิภาพสูง สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้งาน และสามารถพึ่งพาตนเองได้ในระยะยาว

ความท้าทายและแนวทางในอนาคตของการพัฒนาระบบ GPS ในประเทศไทย ต้องอาศัยความมุ่งมั่นและความร่วมมือจากทุกภาคส่วนที่เกี่ยวข้อง ทั้งในด้านการพัฒนาและปรับปรุงระบบอย่างต่อเนื่อง การขยายขอบเขตการใช้งานไปสู่ภาคพลเรือน และการสร้างความร่วมมือระหว่างหน่วยงานทางทหารและสถาบันวิจัยในประเทศ การดำเนินการตามแนวทางเหล่านี้จะช่วยให้ประเทศไทยสามารถสร้างระบบ GPS ที่มีประสิทธิภาพตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างครอบคลุม และสนับสนุนการพัฒนาประเทศในมิติต่าง ๆ ได้อย่างยั่งยืนในอนาคต

8. บทสรุป

บทความนี้ได้ทำการสำรวจโครงสร้างพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบ GPS ที่มีอยู่ในประเทศไทย พบว่ามีองค์ประกอบบางส่วนที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ เช่น เสารadarและตัวรับสัญญาณ GPS แต่ก็ยังมีข้อจำกัดและจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงเพิ่มเติม นอกจากนี้ การประเมินขีดความสามารถของบุคลากรและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีศักยภาพระดับหนึ่งแต่ต้องพัฒนาเพิ่มเติมโดยเฉพาะในสาขาที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับเทคโนโลยี GPS

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ชี้ให้เห็นว่าการพัฒนาระบบ GNSS ของประเทศไทยมีความเป็นไปได้ และมีความจำเป็นต่อความมั่นคงของประเทศ แต่จะต้องมีการลงทุนงบประมาณอย่างเพียงพอ มีการพัฒนาบุคลากรอย่างต่อเนื่อง และมีความร่วมมือกับประเทศพันธมิตรหรือองค์กรที่เกี่ยวข้อง

บทความนี้ได้เสนอแนวทางในการพัฒนาระบบ GPS โดยใช้ประโยชน์จากโครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่ เช่น ปรับปรุงเสารับสัญญาณ พัฒนาดาวเทียมขนาดเล็กที่ติดตั้งอุปกรณ์ GPS สร้างความร่วมมือระหว่างประเทศในการแลกเปลี่ยนข้อมูลและเทคโนโลยี รวมถึงร่วมมือกับสถาบันการศึกษาและวิจัยภายในประเทศ นอกจากนี้ ควรมีแผนพัฒนาและปรับปรุงระบบ GPS อย่างต่อเนื่องให้ทันสมัย

การมีระบบ GPS ของประเทศไทยเองจะช่วยเสริมสร้างความมั่นคง ลดการพึ่งพาต่างประเทศ และเพิ่มขีดความสามารถในการปฏิบัติการทางทหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ต้องอาศัยความร่วมมือจากทุกภาคส่วนที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากเป็นโครงการระยะยาวที่ต้องใช้การลงทุนสูง

9. ข้อเสนอแนะ

การพัฒนาระบบ GNSS ของประเทศไทยมีความเป็นไปได้และจำเป็นต่อความมั่นคงของประเทศ โดยสามารถใช้ประโยชน์จากโครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่ได้บางส่วน แต่ยังต้องมีการลงทุนและพัฒนาเพิ่มเติมอีกมาก จากการวิเคราะห์สามารถสรุปข้อเสนอแนะที่เป็นรูปธรรมได้ดังนี้:

9.1 การลงทุนและพัฒนาเทคโนโลยี

9.1.1 ลงทุนพัฒนาดาวเทียม GPS ขนาดเล็กอย่างน้อย 4-6 ดวง โดยร่วมมือกับสถาบันวิจัยดาวเทียมในประเทศ

9.1.2 ปรับปรุงเสารับสัญญาณให้สามารถรับ-ส่งสัญญาณ GPS ได้ โดยเริ่มจากพื้นที่ยุทธศาสตร์สำคัญก่อน

9.1.3 พัฒนาซอฟต์แวร์และอัลกอริทึมสำหรับประมวลผลข้อมูล GPS โดยเฉพาะ

9.2 การพัฒนาบุคลากร

9.2.1 จัดตั้งศูนย์ฝึกอบรมเฉพาะทางด้านเทคโนโลยี GNSS ร่วมกับมหาวิทยาลัยชั้นนำของประเทศ

9.2.2 ส่งบุคลากรไปศึกษาและฝึกงานในต่างประเทศที่มีความก้าวหน้าด้าน GPS อย่างน้อยปีละ 10 คน

9.3 ความร่วมมือระหว่างหน่วยงาน

9.3.1 จัดตั้งคณะกรรมการร่วมระหว่างกระทรวงกลาโหม กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม และสถาบันการศึกษา เพื่อกำกับดูแลโครงการพัฒนาระบบ GPS ของประเทศ

9.3.2 สร้างความร่วมมือกับประเทศพันธมิตรในการแลกเปลี่ยนข้อมูลและเทคโนโลยี GNSS

9.4 การขยายการใช้งานสู่ภาคพลเรือน

9.4.1 พัฒนาแอปพลิเคชันนำร่องสำหรับภาคเกษตรกรรมและการขนส่ง โดยใช้ข้อมูลจากระบบ GPS ของไทย

9.4.2 ส่งเสริมการวิจัยและพัฒนานวัตกรรมบนฐาน GPS ในภาคเอกชน ผ่านมาตรการสนับสนุนทางภาษีและเงินทุน

9.5 การประเมินและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

9.5.1 จัดทำแผนแม่บทการพัฒนาระบบ GPS แห่งชาติระยะ 10 ปี พร้อมกำหนดเป้าหมายและตัวชี้วัดที่ชัดเจน

9.5.2 จัดให้มีการประเมินประสิทธิภาพของระบบและปรับปรุงแผนการดำเนินงานทุก 2 ปี

การดำเนินการตามข้อเสนอแนะเหล่านี้จะช่วยให้ประเทศไทยสามารถพัฒนาระบบ GPS ของตนเองได้อย่างมีประสิทธิภาพ เสริมสร้างความมั่นคง และสนับสนุนการพัฒนาประเทศในระยะยาว

เอกสารอ้างอิง

- [1] Maidanov AK, Canbolat H, Atanov SK. Optimizing GPS and Gyroscope Data for Military Missions. In: Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST); 2023 May 4-6; Astana, Kazakhstan. Piscataway (NJ): IEEE; 2023. p. 527-31. doi: 10.1109/SIST58284.2023.10223559
- [2] Singh B. Global Missions. Reconstructing Japan's Security: The Role of Military Crises [online]. Edinburgh; 2020 [cited 2024 Jun 7]. Available from: <https://doi.org/10.3366/edinburgh/9781474446228.003.0005>
- [3] กระทรวงกลาโหม, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: ฝ่ายวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ; [ม.ป.ป.]. Future Warfare สงครามในอนาคต; 2566 [เข้าถึงเมื่อ 2567 มิ.ย. 8]; น. 1-5. เข้าถึงได้จาก: <http://dspace.dti.or.th/jspui/bitstream/123456789/1289/1/Future%20Warfare%20สงครามในอนาคต.pdf>
- [4] สำนักงานพัฒนารัฐบาลดิจิทัล (องค์การมหาชน) [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สำนักงานฯ; 2564. รายงานประจำปี 2562: สำนักงานพัฒนารัฐบาลดิจิทัล (องค์การมหาชน) (สพธ.); 2564 [ปรับปรุงเมื่อ 2564 ก.พ. 10; เข้าถึงเมื่อ 2567 มิ.ย. 8]; น. 1-57. เข้าถึงได้จาก: <https://www.dga.or.th/document-sharing/dga-e-book/annual-report/46958/>
- [5] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ [อินเทอร์เน็ต]. นนทบุรี: สถาบันฯ; 2565. แนวโน้มเทคโนโลยียานรบทางทหาร ปี ค.ศ. 2021-2030 (Combat Vehicle Trend 2021-2030); 2565; [เข้าถึงเมื่อ 2567 มิ.ย. 10]; น. 2-33. เข้าถึงได้จาก: <http://dspace.dti.or.th/jspui/bitstream/123456789/3812/1/64-Q3%20P.02-33%20แนวโน้มเทคโนโลยียานรบทางทหาร%20ปี%20ค.ศ.%202021-2030.pdf>
- [6] Guerova G, Simeonov T. Global Navigation Satellite System Monitoring of the Atmosphere. Berkeley, CA: Elsevier; 2021.
- [7] Springer B. GPS: Good Parenting Strategies: The No-Guilt Survival Guide for Parenting During the Pandemic and Beyond. Thousand Oaks, CA: Corwin; 2021.

- [8] Laksanakosan S, Chaowalit O. The Development of Location-Based Learning Model: A Case Study of Religious Sites in Sathorn [Doctoral dissertation of Arts]. Nakhon Pathom: Silpakorn University; 2022.
- [9] OECD. Venture capital investments by investee company. In: Entrepreneurship at a Glance 2016. Paris: OECD Publishing; 2016. Available from: https://doi.org/10.1787/entrepreneur_aag-2016-35-en
- [10] ฉันทย์ชนก คล่องแคล่ว. การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบการจัดการจราจรอวกาศไปใช้ในเชิงพาณิชย์ = Feasibility study of commercialization of space traffic management: STM [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2563.
- [11] เจตนิพัทธ์ กิตติบุญเกศ. การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมราคาประหยัดแบบหลายความถี่ด้วยเทคนิคการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงสำหรับการประยุกต์ใช้งานสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก = Performance of the low-cost multi-frequency GNSS receiver using precise point positioning technique for small unmanned aerial vehicle application วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2565.
- [12] ชญานนท์ เหล่านิพนธ์. การประเมินประสิทธิภาพของระบบการรังวัดสัญญาณดาวเทียมแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัย โครงข่าย 4 วิธี ในเวลาเดียวกันสำหรับการใช้งานที่มีความแม่นยำสูง = Simultaneously performance assessment of four different network-based GNSS real-time kinematic methods for high precision applications วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2564.
- [13] Kim W, Son PW, Rhee JH, Seo J. Development of record and management software for GPS/loran measurements. In 2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems, ICCAS 2020. IEEE Computer Society. 2020. p. 796-9. 9268359. (International Conference on Control, Automation and Systems). doi: 10.23919/ICCAS50221.2020.9268359
- [14] Wellenhopf BH, Lichtenegger H. Wasle E. GNSS - Global Navigation Satellite System: GPS, GLONASS, Galileo and more. New York: Springer Wien; 2008.
- [15] Sickel JV. GPS and GNSS for Land Surveyors. 5th ed. Boca Raton: CRC Press; 2024.
- [16] Abdolkarimi E, Mosavi MR. Wavelet-adaptive neural subtractive clustering fuzzy inference system to enhance low-cost and high-speed INS/GPS navigation system. GPS Solut [Internet]. 2020 Jan [cited 2024 Jun 12];24(2):34. Available from: https://www.researchgate.net/publication/338542367_Wavelet-adaptive_neural_subtractive_clustering_fuzzy_inference_system_to_enhance_low-cost_and_high-speed_INSGPS_navigation_system

- [17] Kraus J, Pleninger S, Hospodka J. Methodology for Positioning of GNSS Interference Detector. 2019 International Conference on Military Technologies (ICMT); 2019 May 29-31; Brno, Czech Republic. p. 1-5.
- [18] Jonáš P, Vitan V. Detection and Localization of GNSS Radio Interference using ADS-B Data. 2019 International Conference on Military Technologies (ICMT); 2019 May 29-31; Brno, Czech Republic. p. 1-5.
- [19] Wang Y, Sun FP, Hao JM, Zhang LD, Wang X. Reduction research on performance index system of satellite navigation system spoofing. GPS Solut [Internet]. 2022 Apr [cited 2024 Jun 15];26(2):[about 35 p.]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/358215289_Reduction_research_on_performance_index_system_of_satellite_navigation_system_spoofing
- [20] Shen D, Chen G, Nguyen T, Pham K. Multi-carrier constant envelope GNSS waveforms compatible with existing user equipment. In: MILCOM 2022 - 2022 IEEE Military Communications Conference (MILCOM); 2022 Nov 28-30; Rockville, MD, USA. Piscataway, NJ: IEEE; 2022. p. 210-5.
- [21] Zhi Z, Liu D, Liu L. A performance compensation method for GPS/INS integrated navigation system based on CNN-LSTM during GPS outages. Measurement [Internet]. 2021 Dec [cited 2024 Jun 16];188(6): 110516. Available from: https://www.researchgate.net/publication/356856002_A_performance_compensation_method_for_GPSINS_integrated_navigation_system_based_on_CNN-LSTM_during_GPS_outages
- [22] Alhosban A. Assessing Availability of GNSS-GBAS Landing Systems in GAST-D/F Performance. Advances in Military Technology [Internet]. 2022 May [cited 2024 Jun 17];17(1): 121-36. Available from: https://www.researchgate.net/publication/361944640_Assessing_Availability_of_GNSS-GBAS_Landing_Systems_in_GAST-DF_Performance

ปณิธาน โรงเรียนนายเรือ

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



