

ปีที่ 22 ฉบับที่ 1 [2566] Vol.22, No.1 [2023]

มกราคม - เมษายน 2566

ISSN 2822-1451 [Print]

ISSN 2822-1508 [Online]



Approved by TCI during
2020-2024



ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย
Thai-Journal Citation Index Centre

Advisory Board

from King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Professor Dr. Saowanit Sukparungsee

Professor Dr. Vilai Rungsardthong

Associate Professor Dr. Surapun Yimman

Associate Professor Dr. Pianpool Kamoljitprapa

Associate Professor Dr. Kitti Bodhipadma

Editor-in-Chief

from King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Associate Professor Narumol Kreua-ongarjnukool

Editor

from King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Associate Professor Dr. Nonchanutt Chudpooti

Associate Professor Dr. Sekson Sirisubtawee

Co-Editor

from King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Professor Dr. Yupaporn Areepong

Associate Professor Dr. Anuchit Jitpattanakul

Assistant Professor Dr. Chatchawan Singhapol

Dr. Wannarak Nopcharoenkul

Editorial Team

from King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Associate Professor Dr. Orathai Polsen

Associate Professor Dr. Suvimol Phanyaem

Associate Professor Dr. Walaiporn Prissanaroon Ouajai

Associate Professor Dr. Tanapat Anusas-amornkul

Assistant Professor Dr. Anusara Srisrual

Assistant Professor Dr. Theerawut Phusantisampan

Assistant Professor Dr. Jintawat Tanamatayarat

Assistant Professor Dr. Sukanya Thepwatee

Assistant Professor Dr. Thidarat Wangkham

Assistant Professor Dr. Saowapa Thumsing Niyomthai

Editorial Board

Professor Dr. Paul Pigram

La Trobe University, Australia

Professor Dr. Melvin Pascall

The Ohio State University, USA

Prof. Dr. Andrea De Gaetano

Óbuda University, Budapest, Hungary and CNR-IASI Rome and CNR-IRIB Palermo, Italy

Assoc.Prof. Dr. Nutapong Somjit

University of Leeds, United Kingdom

Dr. Nutsuda Sumonsiri

Teesside University, United Kingdom

Professor Dr. Sergey Meleshko

Suranaree University of Technology, Thailand

Editorial Board (cont.)

Emeritus Professor Dr. Yongwimon Lenbury

Mahidol University, Thailand

Professor Dr. Sutthisak Phongthanapanich

King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Professor Dr. Anuvat Sirivat

Chulalongkorn University, Thailand

Prof. Dr. Supa Hannongbua

Kasetsart University, Thailand

Associate Professor Dr. Yaowadee Temtanapat

Thammasat University, Thailand

Associate Professor Dr. Khongsak Srikaeo

Pibulsongkram Rajabhat University, Thailand

Associate Professor Dr. Weeradej Meeinkuirt

Mahidol University, Thailand

Associate Professor Dr. Wararit Panichkitkosolkul

Thammasat University, Thailand

Associate Professor Dr. Montip Tiensuwan

Mahidol University, Thailand

Associate Professor Dr. Piyapatr Busababodhin

Maharakham University, Thailand

Associate Professor Dr. Wantida Chaiyana

Chiang Mai University, Thailand

Assoc.Prof. Dr. Pranee Phinyocheep

Mahidol University, Thailand

Assistant Professor Dr. Kwan Arayathanitkul

Mahidol University, Thailand

Assistant Professor Dr. Narumon Emarat

Mahidol University, Thailand

Assistant Professor Dr. Kitiporn Plaimas

Chulalongkorn University, Thailand

Assistant Professor Dr. Chatchai Khunboa

Khon Kaen University, Thailand

Assistant Professor Dr. Julaluk Khemacheewakul

Chiang Mai University, Thailand

Assistant Professor Dr. Jutarat Iewkittayakorn

Prince of Songkla University, Thailand

Assistant Professor Dr. Yanisa Laoong-u-thai

Burapha University, Thailand

Assistant Professor Dr. Sararat Mahasaronon

Naresuan University, Thailand

Dr. Worawut Srisukkhram

Chiang Mai University, Thailand

Management Staff

from King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Miss Wilawan Sae-jeng

Miss Kitsiya Chuchuaysuan

JOURNAL POLICY

Journal of Applied Science and Emerging Technology (JASET) is an academic journal published Triannually by the Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok. The JASET publishes papers in four types: (1) original research articles in Thai or English, (2) academic articles in Thai or English, (3) review articles in Thai or English, and (4) editorial corner/invitation articles in English, encompassing all areas of applied science and technology. The journal will not accept articles, which have been published or are being considered for publication by another journal, nor should papers published here be submitted to other journals.

"Journal of Applied Science and Emerging Technology does not have policy to collect publication fee"

"Journal of Applied Science and Emerging Technology published both as hard-copies [ISSN 2822-1451 (Print)] and electronic journal [ISSN 2822-1508 (Online)] available on ThaiJO system"

Scope of the Journal

To publish academic, research and review articles covering all areas of both basic and applied science and technology including pure and applied mathematics, statistics, chemistry and applied chemistry, physics and industrial physics, environmental science and technology, biotechnology, agro-industrial and food technology, medical science and applications, health and beauty technology, computer and informatic science and materials science

Peer Review Process

Each article must be double blind peer reviewed by at least 3 reviewers from the related field.

Human and Animal Ethics in Research

The authors are requested for the appropriate disclosures and declarations if their research involves human participants and animals having an impact on their right, prestige, safety, and health. Hence, they must receive approval from the appropriate ethics committees for research involving humans and/or animals and submit the evidence of approval with the manuscript. Starting from May, 1st 2022)

Language

Both Thai and English

Publication Frequency

Once every four months (Triannual)

First Issue: January to April

Second Issue: May to August

Third Issue: September to December

Remarks

Authors have to be responsible for any legal effects that may occur due to their opinions expressed in the articles.

Website for submissions: www.tci-thaijo.org/index.php/JASCI

Contact: jaset@sci.kmutnb.ac.th

Copyright©2023 by Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced stored or transmitted in any material form or by any methods including electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise without the prior written permission of the publisher, except in accordance with the provisions of the Copyright Design and Patents Act 1988.

TABLE OF CONTENT

Research Articles**Degradation Factors of Semi-Synthetic Lubricant Oil for Gasoline-CNG Engine***Kanikanan Thinprukgam, Duangamol Tungasmit and Sukkaneste Tungasmita*.....e249125**The Performance of DEWMA and EWMA for ZIB Model when Underlying Distribution is the Ratio of Two Poisson Means***Direk Bualuang*.....e248875**Developing a Lexicon for Computerized Transformation of the Transliterated****Words of Thai Noi Characters into Isan language Pronunciations**

การพัฒนาคลังศัพท์สำหรับการแปลงคำพริวรรตของอักษรไทยน้อยเป็นคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานด้วยคอมพิวเตอร์

Jintana Polsri, Nisachol Chamnongsri and Jeerayut Chaijaruvanit.....e248991**Allele Frequencies and Statistical Analysis of 15 Autosomal STR Loci of Myanmar Population in Thailand**

ความถี่ของแอลลีลและการวิเคราะห์ค่าสถิติจากลำดับซ้ำเรียงต่อเนื่องแบบสั้นบนออโตโซม จำนวน 15 ตำแหน่ง

ของประชากรเมียนมาในประเทศไทย

Tayawee Romgaew and Sunisa Aobaom.....e247354**Carbon Footprint of Coffee Drinks**

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของเครื่องดื่มประเภทกาแฟ

Rattanakon Phunphiphat and Piyanon Haputta.....e249700**Estimating the Number of COVID-19 Infected Cases in Bangkok by Capture-Recapture Method**

การประมาณจำนวนผู้ติดเชื้อโควิด-19 ในกรุงเทพมหานครโดยการใช้วิธีจับ-จับใหม่

Parawan Pijitrattana, Kornchanok Pongkan, Sasicha Jarunet and Chayada Yingcharoenthana.....e248228**The Poisson-Paralogistic Distribution: Properties and Applications**

การแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติก: สมบัติและการประยุกต์

Boonyarit Choopradit and Sirithip Wasinrat.....e249656**Poly(lactic acid) Microencapsulation Prolongs the Mosquito Repellent Activity of Essential Oils from Thai Herbs**

การห่อหุ้มด้วยพอลิแลคติกแอซิดไมโครแคปซูลช่วยยืดระยะเวลาออกฤทธิ์ในการไล่ยุงของน้ำมันหอมระเหยที่ได้จากสมุนไพรไทย

Thara Manangan and Sarinya Shawaphun.....e248845**Enhancement of Bagasse Cellulose-Poly(lactic acid) Interaction Using Poly(ethylene glycol) Chain Extender**

การปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเซลลูโลสจากชานอ้อยและพอลิแลคติกแอซิด โดยใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล

เป็นสารยึดต่อสายโซ่โมเลกุล

Sarinya Shawaphun and Thara Manangan.....e248844**Academic Article****Development of High-Altitude Balloon Platform for Education, Experiment and Research in Science, Technology and Engineering**

การพัฒนา High-Altitude Balloon Platform สำหรับการศึกษา ทดลอง และวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์

Pemmavit Sutthikarn, Sorawat Chivapreecha, Thitaphan Jongsatapom and Akraphon Trirat.....e244209

Degradation Factors of Semi-Synthetic Lubricant Oil for Gasoline-CNG Engine

Kanikanan Thinprukgam¹, Duangamol Tungasmit¹ and Sukkaneste Tungasmita¹

¹Multidisciplinary Program of Petrochemistry and Polymer Science, Faculty of Science,
Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

ABSTRACT

Compressed natural gas (CNG) as alternative energy has gained attention in public transport. CNG is clean energy, high octane, and less expensive than other fuels and can be operated in a dual-fuel engine system. This research studied various factors that affect the degradation of semi-synthetic engine lubricants for the gasoline-CNG engine. Samples were collected by distance lubricant oil analysis was conducted based on various ASTM methods. The kinematic viscosity (KV) analysis is an important property of Lubricant oil. It was measured at the structures of 40 and 100 °C. At 100 °C, the KV decreased from the heating phase, causing the intramolecular bonds to break, making the oil film thinner and leading to a catalytic oxidation reaction. The Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy showed that the lubricants undergo chemical changes in their properties due to increasing the carbonyl functional (C=O) concentration by oxidation product. The result indicated increased acid content and KV. It affects the corrosion of the internal engine parts. The total base number analysis indicates the cleaning agent performance of the lubricant. It was found that at a distance of over 15,000 km, the concentration of alkaline additive reduces half the amount of additive. This demonstrated that additives have been degraded from contaminations, such as dirt, water, metal, and soot.

KEYWORDS: Semi-synthetic lubricant oil, compressed natural gas (CNG), gasoline, lubricant oil degradation, additive depletion, free radical, contamination

*Corresponding Author: 6272029023@student.chula.ac.th

Received: 23/07/2022; Revised: 08/11/2022; Accepted: 07/02/2023

1. INTRODUCTION

In 2024, the compressed natural gas (CNG) market demand rising by approximately 65% in southeast Asia. It can continue to grow a further 80%. CNG is alternative energy popular for publication transport and passenger car in southeast Asia. Because it has been recognized as clean energy and reduces carbon dioxide emission from combustion. Disadvantage CNG room temperature combustion is used at around 800 °C. (Zheng *et al.*, 2022) It generates lubricant degradation more comfortably than other fuels and it changes the structure of engine parts. In this work interested in studying semi-synthetic lubricant oil products. Because the manufacturers provide end-of-time for semi-synthetic around 10,000 kilometers. This expert is commonly incorrect, specifically in varying engine

conditions and users. (Karluk *et al.*, 2022) This paper analyses the lifetime of it can use between 15000 to 20000 kilometers. It can be used over the manufacturer recommendations. However, it can lead to a negative effect. Such as sluggish engines, engine wear, and engine failure. As we observe in appearance used lubricant oil. The first was changed to a darker color and the film oil was thicker of these physical changes in lubricant oil. Therefore, they can be monitored end of time in lubricant oil. (Maguire, 2010) The chemical reaction produces lubricant change structure. Initially, the oil structure is a long-chain hydrocarbon. While using operate under high temperatures and a high shear rate of the engine. It leads to a bond hydrocarbon break and leads to an oxidation reaction. The oxidation reaction is easy to react with free radicals and given by

products are peroxide and hydroperoxide. It can produce various products in lubricant oil such as carboxylic acid, hydroxy ketones, and ketoaldehydes. (Barman, 2002) By the time that oxygen is in the environment and attaches chemical structures such as carbonyl, phenol, and alcohol can be measured from FTIR. It causes increased viscosity and acid number. (Guan *et al.*, 2011) The acid number measured the amount of acid generated in lubricant oil. It is an important indicator of efficacy in used lubricant oil. The acid could be corrosive to internal engine parts and wears metal contamination. The result demonstrates a defective engine during operation, leading to a road accident and contamination. The contamination can separate into two types in the engine. The first is internal contamination from wearing metal and soot combustion. The second is external combustion produced from water, dirt, and soil in the environment. These kinds lead to reduce efficiency and changes in the characteristics of the lubricant oil. It can form coagulation, vanish stains, and separate between oil and water. Contamination has a direct impact on the reduced concentration of alkaline additives. Calcium sulfonate is commonly used as a cleaning agent. Because it reduces rust performance, stability oxidation, and low cost. It will adhere to the surface of the calcium sulfonate additive. After a while, the concentration gradually degraded additive, and replace with dirt on the surface additive. The result show additive and lubricant oil degradation.

This article studied and analyzed the degradation factors of semi-synthetic lubricant oil in operated gasoline-CNG engines, following several ASTMs. They point out the degradation of semi-synthetic lubricant oil in the gasoline-CNG engine. Because the room temperature is higher than other fuel combustion.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Samples

The lubricant oil was taken from the Toyota commuter 2018 model. The special engine has a VR38DETT V6, a capacity of 2,982 CC, and 132 horsepower is the engine's maximum power. The fuel

Table 1. The result shows the properties of new semi-synthetic lubricant oils.

Properties	Lubricant A	Lubricant B	Lubricant C
Grade	10W-40	15W-40	15W-40
KV40°C (mm ² /s)	98.01	112.7	115.3
KV 100°C (mm ² /s)	14.80	15.12	15.31
Viscosity index	158	140	140
Pour point (°C)	-45	-33	-33
Flashpoint (°C)	240	250	254

is used in the combustion of CNG-gasoline engines. The initial distance to begin is approximately 120,000 km. It can inidicate the engine's real collect five points: 0, 5000, 7500, 10000, and 15000 km. The collected samples are used at very different distances because it is studied in real operation in the engine parts. To allow flexibility for the driver brings to collect the sample. Because vans are used in public transport systems, continuing work operates between 12 and 15 h and prevents the depletion of lubricant oil by more than 10%. The three samples produced for the CNG engine are lubricants A study was SAE 10W-40 lubricant oil. The lubricant B was SAE 15W-40 grade and lubricant C was SAE 15W-40 grade. Group B and C are different manufacturers. All samples were added to the engine to analyze factors degradation. The new lubricant oil properties are shown in table 1. The method was collecting lubricant oil, The first step set up the instrument, the tube was cut long enough to enable us to reach halfway into the oil sump. The tube was going to assemble the hose into the vacuum pump. The aluminum ring is going to tighten until it is snug. The new bottle includes a vacuum pump to ensure that the instrument is properly sealed. In the second step, clean around the valve to protect against contamination before opening the valve. The tube was inserted so it went halfway to the oil sump, and it was filled up with approximately 100 ml. We take the bottle and remove it. Finally, the bottle's top was sealed with a solid cap.

2.2 Fourier transforms infrared spectroscopy

FTIR is a promising instrument for identifying lubricant oil quality. It extracts quantitative chemical compounds from complex matrices and is completely used for hazardous substances. It is an undestroyed method and no required prepared sample. By measuring

the amount of oxidation and nitration that occurs in the lubricant oil over a given distance, the results can be used to monitor the lubricant oil degradation. The Fourier transform Spectrometer (FT-IR) technique, Perkin Elmer model oil express series one. The sample cells used zinc selenide (ZnSe) transmission cells. It was used at an analytical absorbance wavelength of $4000-550\text{ cm}^{-1}$ and path length was fixed at 0.1 mm. The FTIR instrument was kept in a humidity control box under 45 % of the analysis at room temperature, according to ASTM E2412. The oxidation analysis range was done in the range of $1800\text{ to }1670\text{ cm}^{-1}$ and the nitration was in the range of $1650\text{ to }1600\text{ cm}^{-1}$. (ASTM International Standards, 2019)

2.3 Total base number analysis

Determining the lubricant oil base number is an important oil analysis because it provides information on the alkaline concentration in lubricant oil. It helped neutralize acid by-products that formed issues of the degradation generated under operating of the engine part. Consequently, TBN protects the engine from being damaged by acid in the lubricant oil. Thus, when adding a new lubricant to the engine part, TBN concentration is maximum value but when it uses long-distance the concentration decreases. In this work, the total base number of the samples was measured, using automatic titration (905 Titrand, Metrohm) with LiCl 3M in an EtOH glass electrode. All the measurements followed ASTM D4739. (ASTM International Standards, 2018)

2.4 Total acid number analysis

TAN represents one of the most important factors that lead to lubricant oil degradation products. TAN is commonly used to indicate the quality of lubricant oil. The result of overheating and contamination in the combustion process. The lubricant oil acidity value can be used as an indicator for the engine wear contamination in the engine part. The automated titration (905 Titrand, Metrohm) with LiCl 3M in EtOH glass electrode was used in this analysis, following ASTM D664. This analysis method can trace the acidic content of the lubricant oil, but it cannot

determine the type of acid present in the lubricant oil. The result shows the value of potassium hydroxide (KOH, in milligrams) to the titrate of one gram of sample. (ASTM International Standards, 2018)

2.5 Kinematic viscosity analysis

The kinematic viscosity was studied in physical properties and measured, following ASTM D445 at the test temperature of about $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, using the Cannon instrument, model CAV 2200. A thermometer for the standard silicone fluids within the analytical apparatus had a maximum temperature tolerance of $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. The kinematic viscosity is an indicator of three factors of problems in lubricant oil. As temperature, intermolecular interaction, and the motion state of the liquid molecules. (Al Sheikh Omar *et al.*, 2021), (ASTM International Standards, 2000) KV analysis is required to analyze at 40 and $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. The lubricant oil is commonly analyzed at $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ following ISO 3448 likewise engine lubricant oil is typically measured at $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ following SAE J300. Additionally, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ reduces the rise of measure interference for engine lubricant oil soot contamination. In other words, KV help considers change at low and high temperature of lubricant oil.

2.6 Additive contents and wear metal analysis

Metal analysis has acquired lubricant industry interest and analysis based on atomic spectrometric techniques. It has been improved to measure metal contaminants and organometallic compounds in lubricants. Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES) is a high-performance technique for the analysis of almost all metals. It can be measured for routine multi-element. The experiment argon (Ar) purity of 99.9996 % and oxygen (O_2) purity of 99 %. The peristaltic pump of the ICP-OES instrument was used as a solution to the nebulizer and the sample was prepared by weight standard mix with white spirit solvent. The samples were performed with a PFA-100 nebulizer. It has given a high percentage recovery and accumulated the result of the metal analysis. The ICP-OES technique (Avio-500 model, Perkin Elmer) is used to determine the concentrations

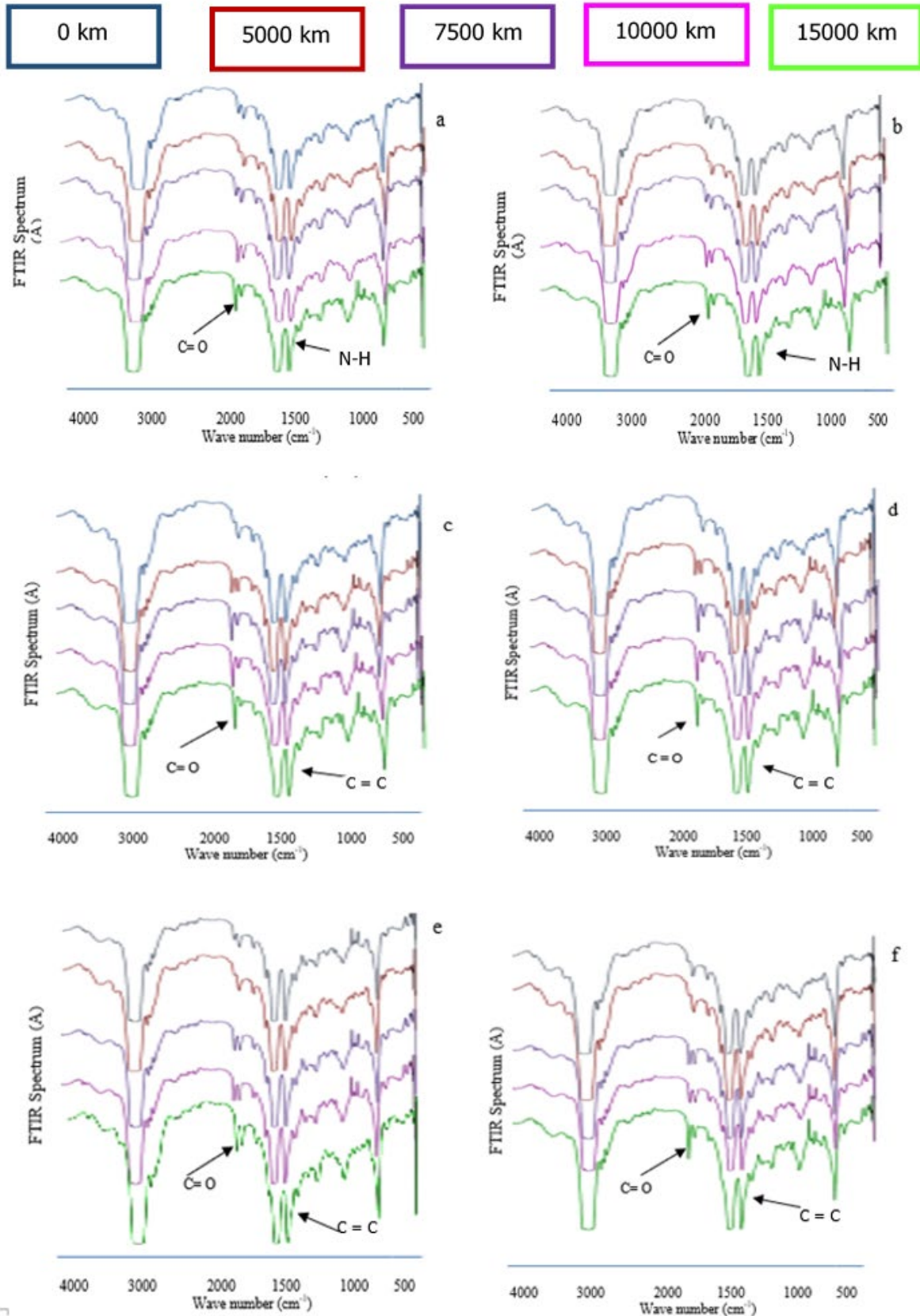


Figure 1 FTIR Spectrum of semi-synthetic lubricant oil with different kilometers travel a) Lubricant A van 1 b) Lubricant A van 2 c) Lubricant B van 1 d) Lubricant B van 2 e) Lubricant C van 1 f) Lubricant C van 2.

of iron (Fe) and aluminum (Al) in the used lubricant oils, following ASTM D5185. (ASTM International, 2019), (Lara *et al.*, 2015), (Goncalves *et al.*, 1998)

The analysis result of the metal-organic contents of additives can be used to determine the oil additives' lifetime and performance. This is due to additives that can help

to improve the properties of the base lubricant oil. In this work, organic metals such as Zn, P, and Ca were investigated, as referred to in ASTM D4951. (R.Q. Aucélio *et al.*, 2007)

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 FTIR analysis

FTIR has proved extremely successful in identifying chemical substances in the lubricant oil spectroscopy data and analyzing the effect of degradation in lubricant oil. However, when coupled with chemometric the average FTIR spectrum of used lubricant oil, the wavelength identified is $550\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$. Rang can be assigned to vibrational modes from hydrocarbons, carbonyl group, nitrite group, and water. Our interests vary in degrees of oxidation. As evidenced by the observation of the carbonyl group (C=O) absorption presented on the spectrum by an intense band around 1740 cm^{-1} . The two intended bands are presented around $1900\text{--}1750\text{ cm}^{-1}$ and $1250\text{--}1150\text{ cm}^{-1}$. Oxidation is the main factor of degradation in lubricant oil. Another group of interesting function observation of the amine group (N-H) absorption was presented on the spectrum by an intense band around $1650\text{--}1580\text{ cm}^{-1}$ on the spectrum of their nitration. It is observed weak intensity at 0 km and high intensity at above 15000 km. It has caused the environment, such as rain acid, and erosion stone. (Macián *et al.*, 2021), (Sneha *et al.*, 2021) figure 1 shows the measured spectrum difference distance in used lubricant oil. At 0 km, the intensity of carbonyl and amine formed is as expected the radical initial chain reaction. Due to the carbonyl and amine low-intensity peak. The lubricant has been used for 5000–15000 km. It was found that the carbonyl and amine had increased as high-intensity peaks, corresponding to the operating distance. Because oxidation of the revolving oil is catalyzed by the metal and overheating temperature in the engine part. The oxidation leads to the destruction of new lubricant oil, additive depletion, and acid number. Molecules of base lubricant oil are nonpolar, but the effect of oxidation produces a polar in the compound of lubricant oil.

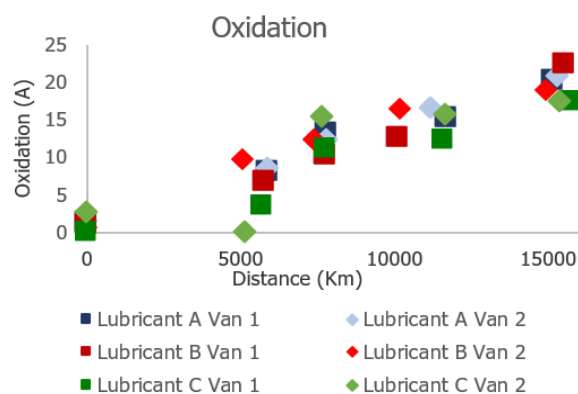


Figure 2 Evolution of amount oxidation analysis by FTIR

It leads to the production of ketone and alcohol in the compound. The accumulation of oxidation products could not be homogenized with the lubricant oil. It transforms the varnish adheres engine part.

Figure 2 presents the amount of oxidation generated in the lubricant oil degradation. Lubricant A Van 1 found a concentration of oxidation increasing around 7.010 abs/cm^{-1} at 5877 km and continuing to increase at $20.131\text{ abs/cm}^{-1}$ at 15100 km. Similarly, concentration in van 2 increased around 6.931 abs/cm^{-1} at 5864 km and continued to increase at $20.013\text{ abs/cm}^{-1}$ at 15300 km. Lubricant B van1 found a volume of oxidation equal to 6.801 abs/cm^{-1} at 5750 km and up the rise increased to $22.473\text{ abs/cm}^{-1}$ at 15534 km. Likely, lubricant B brought quantity oxidation equal to 9.798 abs/cm^{-1} at 5086 km, and up the rise increased to $18.912\text{ abs/cm}^{-1}$ at 14903 km. Lubricant C Van1 found a volume of oxidation equal to 3.561 abs/cm^{-1} at 5698 km and up the rise increased to $17.598\text{ abs/cm}^{-1}$ at 15668 km. Equally, lubricant C van2 brings quantity oxidation equal to 0.875 abs/cm^{-1} at 5109 km, and up the rise increased to $17.591\text{ abs/cm}^{-1}$ at 15320 km. The result agrees with the FTIR spectrum.

3.2 Total base number analysis

The mechanism reacts with alkaline concentration. While the dirty build-up, alkaline additives are unable to work. The work of alkaline additive covers the surface of a metal engine part, and during operation dirty, adhere reduces the efficiency of alkaline additive. The result of TBN is presented in figure 3(a) presented the volume of TBN in the lubricant oil. Lubricant A

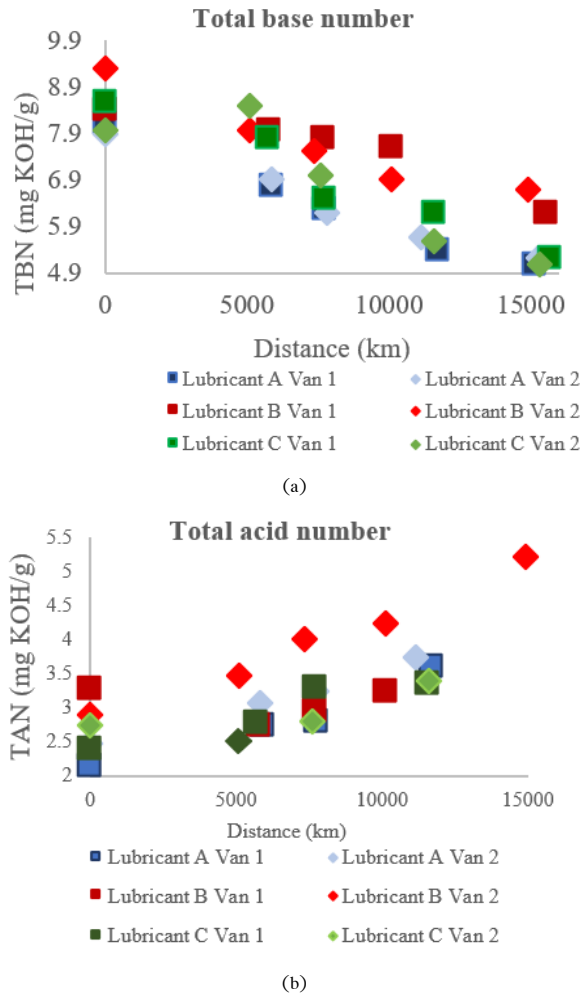


Figure 3 TBN (a) and TAN (b) values of relative difference distance travel by titration analysis.

Van 1 found the amount of TBN at 0 to 5877 km drop the rise estimated at 1.310 mg KOH/g and a distance of 15100 km occurred drop to 3.013 mg KOH/g. Similarly, lubricant A van2 occurs with a drop concentration estimate of 1.001 mgKOH/g at 5864 km and a lower concentration estimate of 2.752 mg KOH/g at 15300 km. Lubricant B found a TBN concentration drop rise of approximately 2.267 mg KOH/g at 15534 km in van 1 and 2.6 mg KoH/g in van 2 at 14903 km. Lubricant C TBN concentration decreased around 3.432 mg KOH/g at 15668 km and 2.915 mg KOH/g at 15320 km. The factors that affect TBN concentration drop the rise bring from contamination in the engine. The beginning contamination includes soot, condensed water, and acid generation. Another problem occurs poor seal of the joint. It can be contaminated in and generated new products in lubricant oil. (Macián *et al.*, 2021)

3.3 Total acid number analysis

The TAN results are presented in figure 3 (b). Lubricant A found TAN concentration to rise approximately 1.510 mg KOH/g at 15100 km in van 1 and 1.473 mg KoH/g in van 2 at 15300 km. Lubricant B found a TAN concentration increase of approximately 1.533 mg KOH/g at 15534 km in van 1 and 2.321 mg KOH/g in van 2 at 14903 km. Lubricant C TBN concentration decreased around 1.353 mg KOH/g at 15668 and 1.151 mg KOH/g at 15320 km. Because the product from oxidation generated in molecule lubricant oil and detected the carboxylic acid functional group agrees with FT-IR analysis. (Macián *et al.*, 2021) The acid number can occur in the degradation of additives and catalytic oxidation. Oxidation products bring nitric acid occurs in gasoline and natural gas fuels. Sulfuric acid brings sulfur of antiwear and extreme pressure. All acids led to the corrosive and reduce performance engine part.

3.4 Kinematic viscosity analysis

The results of kinematic viscosity are presented in Figure 4(a). The kinematic viscosity at 40 °C can be slightly increased in all samples. The accepted degradation criteria are $\pm 15\%$. Lubricant A Van1, the KV increased at 5877 km up the rise at 15100 km. The end distance result show +1.152 % degradation. Similarly, lubricant A van 2 clearly increased at 5864 km and continued to increase at 15300 km. The result end distance demonstrates +2.743 % degradation. Lubricant B van 1 increased at 5750 km and continued to increase at 15534 km. The result end distance demonstrates +8.350 % degradation. Lubricant B Van2, the KV increased at 5086 km up the rise at 14903 km. The end distance result show +6.669 % degradation. Lubricant C van 1 clearly increased at 5698 km and continued to increase at 15668 km. The result end distance demonstrates +3.912 % degradation. Lubricant B Van2, the KV increased at 5109 km up the rise at 15320 km. The end distance result show +3.917 % degradation. The factor analysis affects the increase in viscosity properties. For instance, contamination and oxidation reaction are related to the size of molecules of lubricant oil. The initial oxidation

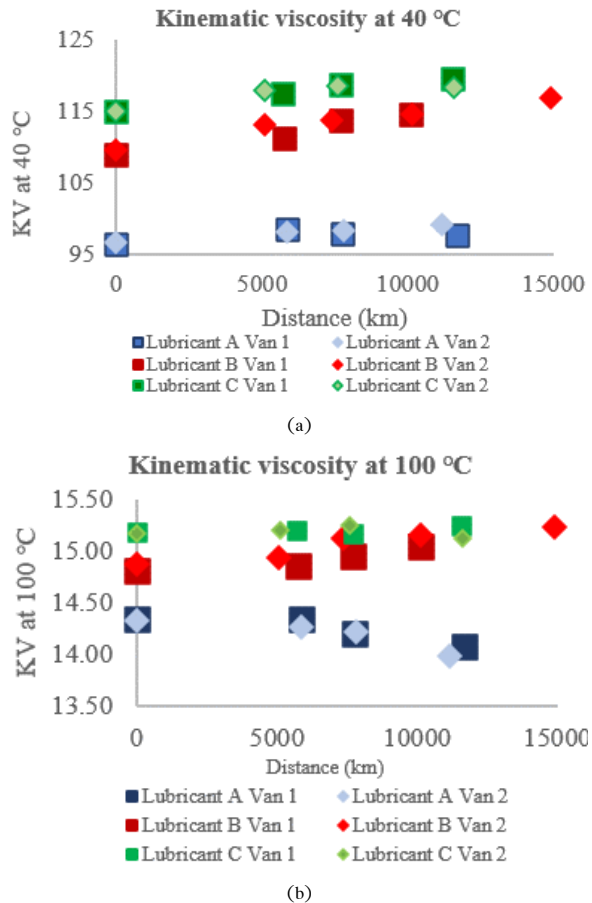


Figure 4 Variation of kinematic viscosity against three semi-synthetic lubricant oil and different distance: (a) 40°C, (b) 100 °C.

is the polymerization process that creates long-chain molecules of hydrocarbon. It increases the size of molecules and changes chemical properties in lubricant oil. This result agrees with the FT-IR analysis. Another related factor is contamination (soot, sludge, and dirty) in lubricant oil. It changes the appearance of lubricant oil such as contamination.

Figure 4b presents kinematic viscosity at 100 °C. The result shows that the A and C groups can be slightly decreased viscosity. The accepted degradation criteria are $\pm 15\%$. Lubricant A Van1, the KV begins decreased at 5877 km drop the rise at 15100 km. The end distance result show -2.442% degradation. Similarly, lubricant A van 2 decreased at 5864 km and continued to reduce at 15300 km. The result end distance demonstrates -2.372% degradation. Lubricant B van 1 increased at 5750 km and continued to increase at 15534 km. The result end distance demonstrates $+3.241\%$ degradation. Lubricant B Van2, the KV increased at 5086 km up the rise at 14903 km. The end distance result shows $+2.351\%$ degradation.

Lubricant C van 1 clearly decreased at 5698 km and continued to decrease at 15668 km. The result end distance demonstrates -0.721% degradation. Lubricant B Van2, the KV decreased at 5109 km dropping the rise at 15320 km. The end distance result show -1.192% degradation. Because while lubricant oil work under high temperatures. It affects molecules of lubricant oil break and appearance lubricant oil film thinner. Other factors, contributes to the change property of lubricant oil such as fuel dilution and coolant leaks inside the engine. It could decrease the viscosity of the lubricant oil but the B group shows the resulting contract in another group. The effect relates to oxidation reaction. Because the spectrum of oxidation is higher than the other groups and agrees with the FT-IR analysis. (Heredia-Cancino *et al.*, 2018)

3.5 Additive contents and wear metal analysis

Five elements (Zn, P, Ca, Al, and Fe) were measured by ICP-OES. The result is presented in figure (5). The concentrations of the elements in all sample groups were small quantity. Lubricant oil can protect the engine part. Figure 5(a) presented the concentration of zinc additive. It coated the steel elements to prevent rust and help anti-oxidation properties in lubricant oil. The result show concentration of zinc was increased concentration in the B and C groups. Because there were operated at long distances and Zn can be contaminated with lubricant oil. On the other hand, group A had more Zn content because of the end distance of A group less used operation in the engine. However, the concentration of Zn had little change and was acceptance critical.

Phosphorous (P) additive works under extreme pressure. It helps to prevent damage to engine parts under operating high pressure such as gearbox starting and stopping of the engine. It was based on the P compound. The result is demonstrated in figure 5(b). B and C groups decreased concentration because long operations have been used which can lead to volatilization during engine operation. Group A has more P content because of the end distance of A group less used operation in the engine.

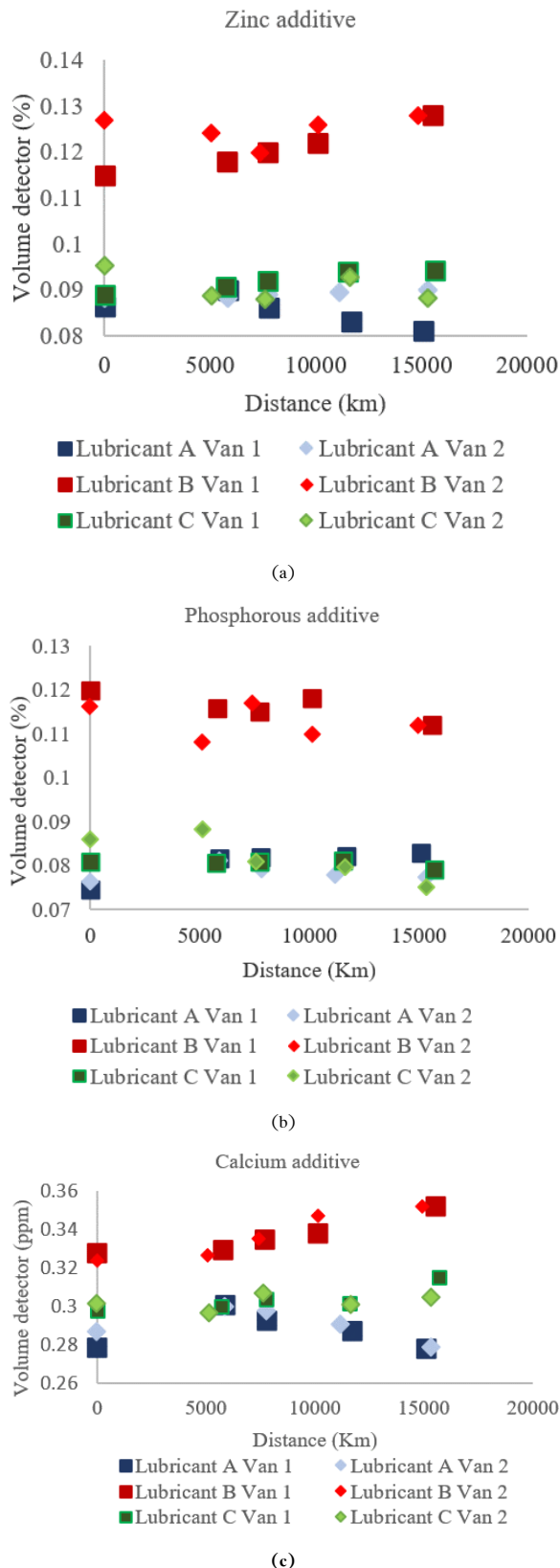


Figure 5 The Result of additive content by ICP-OES in used lubricant oil using a CNG-NGV engine. a) zinc, b) phosphorous, c) Calcium

Calcium (Ca) additive use detergent and dispersant properties in lubricant oil. It works clean deposits and metal contamination on surface engine parts. The result is shown in figure 5(c), the concentration increased

quantitatively in all sample groups. It has multi-reason-produced high valves. The first cause is dust, It can abrasively dust particles from rock or silicon cement. The second cause hard water and the last cause are grease Ca contained cylinder help lubricant the engine.

Figure (6) presented the result of Wear metal being corrosive in the engine part iron (Fe) and aluminum (Al). The result of quantitative wear is corrosive in lubricant oil. Fe and Al were found in small quantities, and it did not affect the operation of the engine part. It demonstrates the lubricant's good performance. (Salem *et al.*, 2015), (Notay *et al.*, 2019), (Kumar *et al.*, 2005)

4. CONCLUSION

This work found the following 7 factors that produce lubricant oil degradation. The main factor is temperature related to KV. The KV increases at low temperatures and decreases the appearance of the film at high temperatures. Temperature led to the second and third-factor oxidation reaction and nitration. Its products such as varnish, sludge, and acid in the lubricant oil. It can be covering the engine part. Four factors occurred acid and corrosive engine parts that produce contamination in the system. Five-factor contamination can be coagulation as it accumulates at high volume. It affects to amount of TBN drop the rise and can be indicated point of lubricant oil degradation. This research expective users to realize the problems from lubricant degradation that led to a negative effect on engine.

All analytical methods in this work is important to indicate optimal performance for lubricant oil application. It was approved for lubricant oil quality inspection by ASTM and routine analysis performance lubricant oil. To conclude, it is suggested that the use of lubricant oil be carried out according to the manual book recommendation for protecting engine parts and reducing emissions to the environment.

ACKNOWLEDGMENT

The author would like to thank Mr.Wanchaleam Sirachat of the Technical service division PTTOR

company for his collaboration in lubricant oil sample processing.

REFERENCES

- Al Sheikh Omar, A., Motamen Salehi, F., Farooq, U., Morina, A., & Neville, A. (2021). Chemical and physical assessment of engine oils degradation and additive depletion by soot. *Tribology International*, 160, 107054. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107054>
- ASTM International. (2019). Standard Test Method for Determination of Additive Elements in Lubricating Oils inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry. 3, 1–3.
- ASTM International Standards. (2000). Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity). 9, 4–11.
- ASTM International Standards. (2018). Standard Test Method for Base Number Determination by Potentiometric Hydrochloric Acid Titration. 8, 1–8.
- ASTM International Standards. (2019). Standard Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry. 24, 1–24.
- Barman, B. (2002). Behavioral differences between group I and group II base oils during thermo-oxidative degradation. *Tribology International*, 35(1), 15–26.
- Goncalves, I. M., Murillo, M., & González, A. M. (1998). Determination of metals in used lubricating oils by AAS using emulsified samples. *Talanta*, 47(4), 1033–1042. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(98\)00186-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-9140(98)00186-6)
- Guan, L., Feng, X., Xiong, G., & Xie, J. (2011). Application of dielectric spectroscopy for engine lubricating oil degradation monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*, 168(1), 22–29.
- Heredia-Cancino, J., Ramezani, M., & Álvarez-Ramos, M. (2018). Effect of degradation on the tribological performance of engine lubricants at elevated temperatures. *Tribology International*, 124, 230–237.
- Karluik, A. A., Ekim, S. D., Baytekin, B., & Tarik Baytekin, H. (2022). Online lubricant degradation monitoring using contact charging of polymers. *Applied Surface Science*, 584, 152593. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.152593>
- Kumar, S., Mishra, N., & Mukherjee, P. (2005). Additives depletion and engine oil condition—a case study. *Industrial Lubrication and Tribology*.
- Lara, R. F., Azcarate, S. M., Cantarelli, M. Á., Orozco, I. M., Caroprese, M. E., Savio, M., & Camiña, J. M. (2015). Lubricant quality control: A chemometric approach to assess wear engine in heavy machines. *Tribology International*, 86, 36–41. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.01.009>
- Macián, V., Tormos, B., García-Barberá, A., & Tsolakis, A. (2021). Applying chemometric procedures for correlation the FTIR spectroscopy with the new thermometric evaluation of Total Acid Number and Total Basic Number in engine oils. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 208, 104215. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2020.104215>
- Maguire, E. (2010). Monitoring of Lubricant Degradation with RULER and MPC. In.
- Notay, R. S., Priest, M., & Fox, M. F. (2019). The influence of lubricant degradation on measured piston ring film thickness in a fired gasoline reciprocating engine. *Tribology International*, 129, 112–123.
- R.Q. Aucélio, R.M. de Souza, R.C. de Campos, N Miekeley, & Silveira, C. L. P. d. (2007). The determination of trace metals in lubricating oils by atomic spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B*, 9, 952–961.
- Salem, S., Salem, A., & Babaei, A. A. (2015). Application of Iranian nano-porous Ca-bentonite for recovery of waste lubricant oil by distillation and adsorption techniques. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 23, 154–162. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.08.009>
- Sneha, E., Karthik, G. V. S., Thampi, A. D., Krishna, A., Revikumar, A., & Rani, S. (2021). Experimental and quantum chemical investigation of bio-fuels/lubricants for its oxidative stability. *Journal of Molecular Liquids*, 340, 117292. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117292>
- Zheng, F., Zhang, H., Yin, H., Fu, M., Jiang, H., Li, J., & Ding, Y. (2022). Evaluation of real-world emissions of China V heavy-duty vehicles fueled by diesel, CNG, and LNG on various road types. *Chemosphere*, 303, 135137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135137>

The Performance of DEWMA and EWMA for ZIB Model when Underlying Distribution is the Ratio of Two Poisson Means

Direk Bualuang

Department of Applied Mathematics, Faculty of Science and Technology, Uttaradit Rajabhat University

ABSTRACT

This research aims to present a double exponentially weighted moving average (DEWMA) control chart for a Zero Inflated Binomial model under the ratio distribution of the two Poisson means (ZIBpoi) by the Markov Chain approach. The objective is to compare the efficiency of DEWMA with EWMA procedure. The performance of DEWMA control chart gives an out-of-control signal quicker than EWMA control chart to small process shifts ($\delta \leq 1\sigma$) for ϕ shifts and all cases for ξ shifts.

KEYWORDS: Average Run Length, zero-inflated binomial, Markov Chain, double exponentially weighted moving average

*Corresponding Author: direk.bua@live.urui.ac.th

Received: 17/08/2022; Revised: 21/02/2023; Accepted: 10/04/2023

1. INTRODUCTION

Generally, in the industrial production process, manufactured products must meet or exceed customer expectations. The goal of production aims to control the variation in product quality to a minimum. The Statistical Process Control (SPC), which employs statistical methods to monitor and control a process, is an effective monitoring technique widely used. SPC is comprised of seven tools: Pareto chart, histogram, process flow diagram, control charts, Scatter diagram, check sheets and cause and effect diagram. Control charts are an important tool for statistical process control. Their purpose is to monitor changes in the production process, whether it is in control or out of control, making it possible to quickly resolve quality issues when manufacturing malfunctions occur. Shewhart (1920s) developed the control charts tool to identify when a process was producing a good or a defective product. Shewhart control charts are suitable for detecting a large shift in the industrial process and are unable to detect a small shift in the process ($\delta > 1.5\sigma$), due the chart's lack of importance of historical data (memoryless) and the fact that production data may not always follow a normal

distribution, making the Shewhart chart unsuitable due to its poor quality. In 1954, Page developed the cumulative sum (CUSUM) control chart, which became popular. Roberts (1959) presented the Exponentially weighted moving average (EWMA) control chart. The CUSUM control chart and EWMA are more efficient than traditional control charts for quick detection of small shifts ($\delta > 1.5\sigma$). Subsequently, Shamma & Shamma (1992) presented a Double Exponentially Weighted Moving Average (DEWMA) control chart. Since then, many other researchers have designed EWMA and DEWMA charts.

The extension of the EWMA technique to the DEWMA technique, for example, Mahmoud & Woodall (2010) conducted a study to compare some characteristics between the EWMA and the DEWMA. Alkahtani (2013) researched the robustness of DEWMA versus EWMA control charts in various skewed (Gamma) and symmetric non-normal (t) distributions to examine the effect of non-normality on the ARL. Rafael & Jay (2017) studied DEWMA for the individuals based on a linear prediction.

The ARL is mostly used to measure the performance of the control chart, Roberts (1959) presented the ARL for EWMA chart. Many methods used Monte Carlo (MC) simulation, which is a simple approach that is often used to test the validity of other methods. However, Monte Carlo simulations can be very expensive in computational time, and the Markov Chain Approach (MCA) can be less processed. The MCA was first presented by Brook & Evans (1972) to approximate the ARL. More references on the evaluation of characteristics by MCA are Champ & Woodall (1987); Calzada and Scariano (2003); Chang and Wu (2011); Chanant *et al.* (2014).

At present, count data with many zeros are common in a wide variety of disciplines. The zero-inflation model has become an important tool for analyzing count data with excess zeros. Lambert (1992) presented zero-inflated Poisson (ZIP) regression models. Next, Hall (2000) introduced the zero-inflated binomial (ZIB) model. Bualuang *et al.* (2017) introduced ARL formulas of MA control chart for ZIBpoi.

The remainder of this paper is organized as follows. In section 2, the methods included are the zero-inflated binomial model underlying distribution the ratio of two Poisson means, EWMA control chart, DEWMA control chart, and Average Run Length of EWMA and DEWMA control chart with Markov Chain approach. Section 3 discusses the output and performance of DEWMA versus EWMA control chart. Finally, the conclusions of EWMA and DEWMA are presented.

2. METHODS

2.1 Zero-inflated Binomial model

The zero-inflated binomial model when the underlying distribution is the ratio of two Poisson means (ZIB_{poi}) was proposed by Bualuang *et al.* (2017). Let $X_1, X_2, \dots, X_{n-1}, X_n$ of random variables are independent and identically distributed, where X_i is the number of nonconforming items in sample i with parameter n , $p = \frac{\varphi}{\varphi + \xi}$ and θ . A zero-inflated binomial is to include a proportion $1 - \theta$ of extra-zeros. Define

parameters $\varphi > 0$ and $\xi > 0$ is two independent Poisson means. In the zero-inflated binomial when the underlying distribution is the ratio of two Poisson means (ZIB_{poi}), the density function $X \sim \text{ZIB}_{\text{poi}}(n, \varphi, \xi, \theta)$ can be written as follows:

$$f(x) = \begin{cases} \theta \binom{n}{x} \left(\frac{\varphi}{\varphi + \xi} \right)^x \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi + \xi} \right)^{n-x} & ; x = 1, 2, \dots, n \\ (1 - \theta) + \theta \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi + \xi} \right)^n & ; x = 0 \end{cases} \quad (1)$$

The mean and variance of X given by

$$E(X) = n\theta \left(\frac{\varphi}{\varphi + \xi} \right) \quad (2)$$

and

$$\text{Var}(X) = \sigma^2 = n(n-1)\theta \left(\frac{\varphi}{\varphi + \xi} \right)^2 + n\theta \left(\frac{\varphi}{\varphi + \xi} \right) - \left[n\theta \left(\frac{\varphi}{\varphi + \xi} \right) \right]^2 \quad (3)$$

2.2 Exponentially weighted moving average control chart: EWMA

The EWMA control chart was proposed by Roberts (1959) (see also Lucas & Saccucci, 1990; Douglas, 2005; Noorosanna *et al.* 2011), which is a chart that can detect well a smaller than 1.5σ change in process parameters, the statistics of EWMA control chart is

$$Y_t = \lambda X_t + (1 - \lambda)Y_{t-1} \quad t = 1, 2, \dots \quad (4)$$

where X_t are observed values of the distribution at any time t , λ is a smoothing parameter have a value between 0 and 1, Y_t is the weighted average between current and previous observations at time t . The mean and variance given by

$$E(Y_t) = \mu_0 \quad (5)$$

and

$$\text{Var}(Y_t) = \sigma^2 \left(\frac{\lambda}{2 - \lambda} \right) [1 - (1 - \lambda)^{2t}] \quad (6)$$

The control limits are

$$LCL / UCL = \mu_0 \pm K_1 \sigma \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2 - \lambda} \right) [1 - (1 - \lambda)^{2t}]} \quad (7)$$

where K_1 is the coefficient of control limit of EWMA control chart. When $t \rightarrow \infty$ has values closer to 1, then

$$LCL / UCL = \mu_0 \pm K_1 \sigma \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2 - \lambda} \right)} \quad (8)$$

The ZIB_{poi} EWMA will signal and out-of-control when $Y_t < LCL$ or $Y_t > UCL$.

2.3 Double Exponentially Weighted Moving Average (DEWMA) control chart

The DEWMA control chart was developed from the EWMA control chart by Shamma & Shamma (1992) presented the control chart with the following DEWMA (Z_t) statistic as

$$Z_t = \lambda_2 Y_t + (1 - \lambda_2) Z_{t-1} \quad t = 1, 2, \dots \quad (9)$$

where

$$Y_t = \lambda_1 X_t + (1 - \lambda_1) Y_{t-1} \quad t = 1, 2, \dots \quad (10)$$

Equation 9 and 10, given $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$. Thus, the statistic of DEWMA is

$$Z_t = \lambda Y_t + (1 - \lambda) Z_{t-1} \quad (11)$$

where Y_t is the statistics of EWMA. The mean and variance given by

$$E(X_t) = E(Y_t) = E(Z_t) = \mu_0 \quad (12)$$

and

$$\text{Var}(Z_t) = \left[\lambda^4 \frac{1 + (1 - \lambda^2) - (t^2 + 2t + 1)(1 - \lambda)^{2t} + (2t^2 + 2t - 1)(1 - \lambda)^{2t+2} - t^2(1 - \lambda)^{2t+4}}{(1 - (1 - \lambda)^2)^3} \right] \sigma^2$$

When $t \rightarrow \infty$ has values closer to 1,

$$\text{Var}(Z_t) = \left[\frac{\lambda(2 - 2\lambda + \lambda^2)}{(1 - \lambda)^3} \right] \sigma^2 \quad (13)$$

Therefore, the control limits of the DEWMA control chart are

$$LCL / UCL = \mu_0 \pm K_2 \sigma \sqrt{\frac{\lambda(2 - 2\lambda + \lambda^2)}{(1 - \lambda)^3}} \quad (14)$$

where K_2 is the coefficient of control limit of DEWMA control chart. Given $LCL = 0$, because the DEWMA control chart was used to detect only positive changes on one side.

2.4 Average Run Length of DEWMA Control Chart

The ZIB_{poi} EWMA and ZIB_{poi} DEWMA control charts are plotted on the control charts and the process is considered out-of-control if the plotted point lies outside the LCL and UCL. The Average Run Length (ARL) is mostly used to measure the performance of control charts. ARL represents the average number of observations required to be monitored until an out-of-control process is detected for the first time. There are

two criteria for ARL: ARL₀ for an in-control process and ARL₁ for an out-of-control process. The control chart with the lowest ARL₁ is considered the best chart. ARL has been evaluated by many researchers to compare the performance of control charts (Chanant et al., 2014; Petcharat et al., 2015; Phantu & Sukparungsee, 2020).

In this paper, develop ARL estimates using the Markov chain approach (MCA) for EWMA and DEWMA control chart. Our approach is based on a zero-state Markov chain approximation, proposed by Lucas & Saccucci (1990).

The observation is defined as x_j where $j = 1, 2, \dots, k$ is in-control process and $j = k+1$ is out-of-control process

Let $Y_t = i$, the control chart in the control state V_i , which each the control chart can be described as a random move to states $V_0, V_1, \dots, V_N$ where the V_N is an absorbing state to represents an out-of-control region above the control limit and V_0 is an initial state.

The transition probability (P_{ij}) is the probability of moving from state i to state j where $i, j = 1, 2, \dots, N$.

We can write the transition matrix (P) and element of matrix (P_{ij}) as

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1N} & | & P_{1,N+1} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2N} & | & P_{2,N+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots \\ P_{N1} & P_{N2} & \dots & P_{NN} & | & P_{N,N+1} \\ \hline 0 & 0 & \dots & 0 & | & 1 \end{bmatrix}$$

or

$$P = \begin{bmatrix} R & (I_N - R)\mathbf{1}_N \\ \mathbf{0}_N^T & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

where sub matrix R is the transition probability between in-control states with $N \times N$ dimension, I is the identity matrix $N \times N$, $\mathbf{1}$ is a column vector of ones $N \times 1$, and vector $\mathbf{0}$ with $1 \times N$ dimension, implies that the Markov chain cannot reach any in-control state starting from the absorbing state.

Table 1 ARL_1 of $DEWMA_{ZIB_poi}$ versus $EWMA_{ZIB_poi}$ by MCA Method where $\lambda = 0.05$, $ARL_0 = 370$.

shifts	φ shifts				ξ shifts			
	$\theta = 0.05$		$\theta = 0.10$		$\theta = 0.05$		$\theta = 0.10$	
	EWMA	DEWMA	EWMA	DEWMA	EWMA	DEWMA	EWMA	DEWMA
	($K_1=1.3787$)	($K_2=0.5882$)	($K_1=1.8036$)	($K_2=0.4607$)	($K_1=1.3787$)	($K_2=0.5882$)	($K_1=1.8036$)	($K_2=0.4607$)
0.01	366.97	364.75	365.99	362.70	369.78	369.40	369.59	368.95
0.03	360.19	354.04	357.24	348.38	368.65	367.52	368.15	366.42
0.05	353.38	343.93	348.39	334.96	367.52	365.65	366.70	363.91
0.07	346.55	334.37	339.50	322.39	366.38	363.80	365.23	361.42
0.1	336.34	320.99	326.17	304.96	364.67	361.03	363.02	357.72
0.3	272.15	253.59	244.81	221.79	352.94	343.30	347.82	334.13
0.5	219.77	210.31	184.28	173.32	340.77	326.67	331.96	312.33
1	138.58	149.85	103.01	112.95	308.99	289.41	290.81	264.95
2	74.82	99.83	51.04	69.50	244.30	229.79	211.85	194.60

Note: The bold is minimal of ARL of control chart.

Table 2 ARL_1 of $DEWMA_{ZIB_poi}$ versus $EWMA_{ZIB_poi}$ by MCA Method where $\lambda = 0.10$, $ARL_0 = 370$.

shifts	φ shifts				ξ shifts			
	$\theta = 0.05$		$\theta = 0.10$		$\theta = 0.05$		$\theta = 0.10$	
	EWMA	DEWMA	EWMA	DEWMA	EWMA	DEWMA	EWMA	DEWMA
	($K_1=1.1395$)	($K_2=1.2633$)	($K_1=1.4192$)	($K_2=0.7812$)	($K_1=1.1395$)	($K_2=1.2633$)	($K_1=1.4192$)	($K_2=0.7812$)
0.01	361.62	363.39	366.95	365.40	368.75	368.90	369.51	369.33
0.03	345.32	350.78	360.63	355.85	365.87	366.67	368.49	367.76
0.05	330.08	338.96	354.09	346.26	363.00	364.46	367.46	366.17
0.07	315.82	327.85	347.36	336.68	360.16	362.27	366.41	364.57
0.1	296.10	312.42	336.98	322.46	355.95	359.01	364.83	362.16
0.3	202.22	237.15	365.79	240.10	329.14	338.22	353.67	345.64
0.5	148.61	191.17	204.14	183.36	304.44	318.96	341.53	328.61
1	87.31	130.30	111.88	110.46	250.87	276.64	307.69	285.71
2	47.75	83.93	51.73	61.93	171.90	211.62	233.12	208.81

Note: The bold is minimal of ARL of control chart.

Table 3 ARL_1 of $DEWMA_{ZIB_poi}$ versus $EWMA_{ZIB_poi}$ by MCA Method where $\lambda = 0.05$, $ARL_0 = 500$

shifts	φ shifts				ξ shifts			
	$\theta = 0.05$		$\theta = 0.10$		$\theta = 0.05$		$\theta = 0.10$	
	EWMA	DEWMA	EWMA	DEWMA	EWMA	DEWMA	EWMA	DEWMA
	($K_1=1.384$)	($K_2=0.42646$)	($K_1=1.8313$)	($K_2=0.42632$)	($K_1=1.384$)	($K_2=0.42646$)	($K_1=1.8313$)	($K_2=0.42632$)
0.01	397.60	493.94	497.14	492.37	499.72	498.99	499.89	498.75
0.03	491.66	481.92	490.11	477.00	499.01	496.96	498.80	496.19
0.05	485.45	470.07	482.50	461.71	498.29	494.92	497.69	493.62
0.07	478.99	458.45	474.37	446.62	497.56	492.89	496.56	491.03
0.1	468.88	441.48	461.34	424.58	496.44	489.83	494.82	487.14
0.3	394.87	345.75	363.10	305.21	488.30	469.32	482.00	460.73
0.5	323.09	278.34	274.13	230.25	478.97	448.78	467.12	434.06
1	194.97	183.89	145.13	139.49	450.53	398.55	422.28	369.59
2	99.92	111.88	65.30	80.04	375.77	308.98	315.93	263.25

Table 4 ARL₁ of DEWMA_{ZIB_poi} versus EWMA_{ZIB_poi} by MCA Method where $\lambda = 0.10$, ARL₀ = 500.

shifts	φ shifts				ξ shifts			
	$\theta = 0.05$		$\theta = 0.10$		$\theta = 0.05$		$\theta = 0.10$	
	EWMA (K ₁ =0.9884)	DEWMA (K ₂ =1.062)	EWMA (K ₁ =1.422)	DEWMA (K ₂ =0.847)	EWMA (K ₁ =0.9884)	DEWMA (K ₂ =1.062)	EWMA (K ₁ =1.422)	DEWMA (K ₂ =0.847)
0.01	487.92	489.69	497.24	492.79	498.19	498.44	499.82	499.26
0.03	464.51	469.73	490.69	477.22	494.03	494.90	498.79	496.66
0.05	442.72	451.16	483.69	461.67	489.90	491.38	497.75	494.06
0.07	422.42	433.84	476.28	446.28	485.82	487.90	496.69	491.44
0.1	394.47	409.99	464.47	423.71	479.76	482.73	495.06	487.50
0.3	263.41	297.33	374.12	299.32	441.38	450.01	483.23	460.68
0.5	189.61	231.80	289.97	220.22	406.27	420.06	469.70	433.43
1	105.67	149.49	150.12	126.28	330.95	355.64	429.05	366.81
2	55.44	90.71	63.81	68.50	221.64	260.62	328.67	255.04

Note: The bold is minimal of ARL of control chart.

An approximation of the ARL using the MCA to detect the mean changes of a process is in the interval of the lower control limit and upper control limit. The region of the in-control state is divided into k subintervals. The j^{th} subinterval of the upper control limit (U_j), j^{th} subinterval of the lower control limit (L_j) and the i^{th} subinterval of the midpoint (m_i) are given by:

$$U_j = h_L + \frac{j(h_U - h_L)}{k} \quad (16)$$

$$m_j = h_L + \frac{(2j-1)(h_U - h_L)}{2k} \quad (17)$$

$$L_j = h_L + \frac{(j-1)(h_U - h_L)}{k} \quad (18)$$

Where, h_L is LCL and h_U = UCL.

Consequently, the transition probability equation (P_{ij}) can be rewritten as

$$P_{ij} = P(L_j \leq Z_t \leq U_j | Z_{t-1} = m_j) \quad (19)$$

form eq. 4 and 10 replace to eq. 18.

$$\begin{aligned}
 P_{ij} &= P(L_j < \lambda Y_t + (1-\lambda)Z_{t-1} < U_j | Z_{t-1} = m_j) \\
 &= P(L_j < \lambda Y_t + (1-\lambda)m_j < U_j) \\
 &= P(L_j < \lambda(\lambda X_t + (1-\lambda)m_j) + (1-\lambda)m_j < U_j) \\
 &= P(L_j < \lambda^2 X_t + (1-\lambda^2)m_j < U_j) \quad (20)
 \end{aligned}$$

Repalce eq.16 – 18 into eq. 20. This transition probability equation is

$$= P\left(h_L + \frac{(j-1)(h_U - h_L)}{k} < \lambda^2 X_t + (1-\lambda^2)\left(h_L + \frac{(2j-1)(h_U - h_L)}{2k}\right) < h_L + \frac{j(h_U - h_L)}{k}\right)$$

$$\begin{aligned}
 &= P\left(h_L + \frac{(j-1)(h_U - h_L)}{k} - (1-\lambda^2)\left(h_L + \frac{(2j-1)(h_U - h_L)}{2k}\right) < \lambda^2 X_t < h_L + \frac{j(h_U - h_L)}{k} - (1-\lambda^2)\left(h_L + \frac{(2j-1)(h_U - h_L)}{2k}\right)\right) \\
 &= P\left(\lambda^2 h_L + \frac{(h_U - h_L)}{2k} 2(j-1) - (1-\lambda^2)(2j-1) < \lambda^2 X_t < \lambda^2 h_L + \frac{(h_U - h_L)}{2k} 2j - (1-\lambda^2)(2j-1)\right) \\
 &= P\left(h_L + \frac{(h_U - h_L)}{2\lambda^2 k} 2(j-1) - (1-\lambda^2)(2j-1) < X_t < h_L + \frac{(h_U - h_L)}{2\lambda^2 k} 2j - (1-\lambda^2)(2j-1)\right) \quad (21)
 \end{aligned}$$

2.5 Performance of DEWMA and EWMA control charts

The properties average run length of the DEWMA_{ZIB_poi} is analyzed within the Markov chain approach simulation study. Using Equation (10) (12) and (13) to analytical ARL, we set $\varphi_0 = 2$ and $\xi_0 = 12$, given ARL₀ = 370 and 500, varied with different shift sizes: 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.3, 0.5, 1 and 2. We are interested only in the proportion increase, the shift increasing for φ_1 and ξ_1 decreasing, given θ and λ is 0.05, 0.10. The ARL₁ shown as tables 1 – 4 between EWMA_{ZIB_poi} versus DEWMA_{ZIB_poi}. The simulation was repeated 100,000 times for each case by using R programming.

In table 1, consider the ZIB_{poi} model with $\lambda = 0.05$, $\theta = 0.05$ and 0.10 at ARL₀ = 370. The numerical results DEWMA detect change more efficient than EWMA at the shift of parameter less than equal 0.5 for φ , and every shift of parameter for ξ .

In table 2, consider the ZIB_{poi} model with $\lambda = 0.10$, ARL₀ = 370. The numerical results

EWMA detect change more efficient than DEWMA for all the shift of parameter at $\theta=0.05$, and DEWMA detect change more efficient than EWMA at $\theta=0.10$. In table 3, consider the ZIB_{poi} model with $\lambda=0.05$, $\theta=0.05$ and 0.10 at $ARL_0=500$. The numerical results DEWMA detect change more efficient than EWMA at the shift of parameter less than equal 1 for φ , and every shift of parameter for ξ .

In table 4, consider the ZIB_{poi} model with $\lambda=0.10$, $ARL_0=500$. The numerical results EWMA detect change more efficient than DEWMA for all the shift of parameter at $\theta=0.05$, and DEWMA detect change more efficient than EWMA at $\theta=0.10$.

CONCLUSION

The paper presents DEWMA for ZIB_{poi} using with Markov chain approximation method. A table is provided to select the value of the chart limit coefficient that gives the desired in-control ARL. Numerical results indicate that DEWMA control chart for φ shifts gives an out-of-control signal quicker than EWMA control chart for small process shifts ($\delta \leq 1\sigma$). When ξ shifts, the DEWMA control chart gives an out-of-control signal quicker than EWMA control chart for all cases. However, the DEWMA control chart is not chosen over the EWMA control chart when λ is greater than θ , as it gives an out-of-control signal slower than EWMA control chart.

REFERENCE

- Alkahtani, S. (2013). Robustness of DEWMA versus EWMA control charts to non-normal processes. *JMASM*, 12(1), 148–163. DOI: 10.22237/jmasm/1367381820
- Bualuang, D., Areepong, Y., & Sukparungsee, S. (2017). ARL formulas of MA control chart with zero-inflated Binomial model when underlying distribution is ratio of two Poisson means. pp.292–298. In Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2017, 15–17 March 2017, Hong Kong.
- Calzada, M. E., & Scariano, S. M. (2003). Reconciling the integral equation and markov chain approaches for computing EWMA average run lengths. *Communications in Statistics – Simulation and Computation*, 32(2), 591–604. <https://doi.org/10.1081/SAC-120017508>
- Chanant C., Sukparungsee S., & Areepong Y., (2014). The ARL of EWMA chart of monitoring ZINB model using markov chain approach. *International Journal of Applied Physics and Mathematics*, 4, 236–239. doi: 10.7763/IJAPM.2014.V4.290
- Douglas, C. M. (2005). *Introduction to Statistical Quality Control*. 5th ed. John Wiley & Son.
- Lucas, J. M., & Saccucci, M. S. (1990). Exponentially weighted moving average control schemes: Properties and Enhancements. *Technometrics*, 32, 1–12.
- Mahmoud, M. A., & Woodall, W. H. (2010). An evaluation of the double exponentially weighted moving average control chart. *Communications in Statistics – Simulation and Computation*, 39(5), 933–949. <https://doi.org/10.1080/03610911003663907>
- Noorossana, R., Fatahi, A. A., Dokouhaki, P., & Babakhani, M. (2011). ZIB-EWMA control chart for monitoring rare health events. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 11. <https://doi.org/10.1142/S0219519411004125>
- Page, E. S. (1954). Continuous inspection schemes. *Biometrika*, 41, 100–114.
- Petcharat, K., Sukparungsee, S., & Areepong, Y. (2015). Exact solution of the average run length for the cumulative sum chart for a moving average process of order q. *ScienceAsia*, 41, 141–147. doi: 10.2306/scienceasia1513-1874.2015.41.141
- Phantu, S., & Sukparungsee, S. (2020). A mixed double exponentially weighted moving average –Tukey’s control chart for monitoring of parameter change. *Thailand Statistician*, 18(4), 392–402.
- Rafael, P. A., and Jay, R. S. (2017). A double EWMA control chart for the individuals based on a linear prediction. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 16(2), 443–457. doi: 10.22237/jmasm/1509495840
- Robert, S. W. (1959). Control chart tests based on geometric moving average. *Technometrics*, 1, 239–250.
- Shamma, S. E., & Shamma, A. K. (1992). Development and evaluation of control charts using double exponentially weighted moving averages. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 9(6), 18. <https://doi.org/10.1108/02656719210018570>
- Woodall, W. H. (1984). On the markov chain approach to the two-sided CUSUM procedure. *Technometrics*, 26, 41–46. <https://doi.org/10.2307/1268414>

การพัฒนาคลังศัพท์สำหรับการแปลงคำปริวรรตของอักษร ไทยน้อยเป็นคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานด้วยคอมพิวเตอร์

Developing A Lexicon for Computerized Transformation of The Transliterated Words of Thai Noi Characters into Isan Language Pronunciations

จินตนา พลศรี^{1*}, นิสชล จำนงศรี¹ และ จีรยุทธ ไชยจารุณิ²

Jintana Polsri^{1*}, Nisachol Chamnongsri¹, Jeerayut Chaijaruvanit²

¹สำนักวิทยาศาสตร์และศิลปดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

¹Institute of Digital Arts and Science, Suranaree University of Technology

²Department of Computer Science, Faculty of Science, Chiang Mai University

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาคลังศัพท์สำหรับแปลงคำปริวรรตของอักษรไทยน้อยเป็นคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานด้วยคอมพิวเตอร์ และประเมินประสิทธิภาพของคลังศัพท์ที่พัฒนาขึ้น แบ่งการวิจัยเป็น 3 ขั้นตอน คือ (1) การศึกษาลักษณะคลังศัพท์ภาษาไทยถิ่นอีสาน 7 เล่ม และพจนานุกรมภาษาไทยมาตรฐาน 1 เล่ม (2) การออกแบบและพัฒนาคลังศัพท์ และ (3) การประเมินประสิทธิภาพของคลังศัพท์ในการนำไปใช้แปลงคำปริวรรตของอักษรไทยน้อยเป็นคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน โดยใช้คำปริวรรตของตำรับยาโบราณอีสาน 7,928 คำ เป็นข้อมูลชุดทดสอบ และการประเมินประสิทธิภาพด้านความเหมาะสมในการออกแบบและพัฒนาคลังศัพท์ โดยผู้เชี่ยวชาญอักษรโบราณ 12 คน และผู้ใช้ประโยชน์จากตำรายาโบราณอีสาน 27 คน ผลการวิจัยพบว่า คลังศัพท์ภาษาไทยถิ่นอีสานมีข้อจำกัดในการนำไปใช้แปลงคำปริวรรตของอักษรไทยน้อยเป็นคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานด้วยคอมพิวเตอร์ เนื่องจากคำศัพท์หลักไม่เป็นแบบคำปริวรรต มีเกณฑ์การสะกดคำอ่านที่หลากหลาย และแบบอักษรไทยน้อยที่จะใช้เป็นคำศัพท์หลักยังไม่มีรหัสยูนิโคด ฐานข้อมูลคลังศัพท์ที่พัฒนาขึ้นมีคำศัพท์หลักเป็นคำปริวรรต 4,645 คำ ชนิดของคำ 36 ชนิด และเกณฑ์การสะกดคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน 10 ข้อ ประสิทธิภาพของคลังศัพท์ในการแปลงคำปริวรรตของตำรับยาโบราณอีสานเป็นคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานมีความถูกต้องร้อยละ 71.02 ความเหมาะสมในการออกแบบและพัฒนาฐานข้อมูลคลังศัพท์มีค่าเฉลี่ยทุกด้านอยู่ในระดับดี ($\bar{X} = 3.89$, $SD = 0.71$) การใช้ศัพท์หลักเป็นคำปริวรรตจะช่วยลดการสร้างคลังคำศัพท์เฉพาะของอักษรโบราณแต่ละอักษรได้

คำสำคัญ: คลังศัพท์, การปริวรรต, การปริวรรตภาษาโบราณด้วยเครื่อง, การแปลภาษาด้วยเครื่อง

ABSTRACT

The objectives of this research were to design and develop the lexicon for the transformation of the transliterated words of Thai Noi characters into Isan language pronunciations by computer and to evaluate the efficiency of the lexicon being developed. The research methodology was separated into 3 steps: 1) the study of the characteristics of Isan lexicons totally from 7 books, and one standard Thai lexicon, 2) the design and development of the lexicon and 3) the evaluation of the efficiency of the lexicon for transformation of the 7,929 transliterated words as a testing data into Isan language pronunciation and the evaluation of the efficacy of the design and development of the lexicon by 12 ancient linguists and 27 users of the ancient Isan medicine textbooks. The results of the research revealed that the Isan lexicons were limited for the transformation of the transliterated words of Thai Noi characters into Isan language pronunciations by computer. This is because main vocabularies were not the transliterated words of Thai Noi characters and had a variety of spelling criteria. And Thai Noi font that will be used as main words do not have a Unicode code. The designed and developed lexicon contained 4,645 main vocabularies, 36 parts of speech, 10 spelling criterias of Isan language pronunciation. The result of the accuracy of transformation of the transliterated ancient Isan medicine recipes into Isan language pronunciation was 71.02 percent and the overall mean of the design and development of the lexicon efficacy was in a good level for all items ($\bar{x} = 4.08$, $SD = 0.73$). Using the main vocabulary as a transliteration reduces the need to build a unique vocabulary for each ancient script.

KEYWORDS: Lexicon, transliteration, machine transliteration of ancient language, machine transliteration

*Corresponding Author: jpolsri@yahoo.com¹, nisachol@sut.ac.th², jeerayut.c@cmu.ac.th³

Received: 11/07/2022; Revised: 20/02/2023; Accepted: 31/03/2023

1. บทนำ

เอกสารโบราณเป็นหลักฐานชั้นต้นที่มีความสำคัญต่อการศึกษาเรื่องราวชีวิตความเป็นอยู่ และองค์ความรู้ของผู้คนในอดีตในหลากหลายด้าน อาทิ ประวัติศาสตร์ อักษรศาสตร์ กฎหมายโบราณ และตำรายา เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การเข้าถึงและนำองค์ความรู้เหล่านั้นมาใช้สำหรับคนทั่วไปยังเป็นเรื่องที่ยาก เนื่องจากเอกสารโบราณบันทึกด้วยอักษรและภาษาโบราณที่ปัจจุบันเลิกใช้ไปแล้ว ดังนั้นเพื่อให้คนที่ไม่มีความรู้ด้านอักษรและภาษาโบราณสามารถนำไปศึกษาได้ง่ายขึ้นจำเป็นต้องทำการปริวรรต (Transliterations) เป็นอักษรและภาษาที่คนปัจจุบันสามารถอ่านได้ โดยการปริวรรตเอกสารโบราณเป็นกระบวนการถอดอักษรโบราณไปเป็นอักษรและอักษรวิธีการเขียนแบบปัจจุบันอย่างมีหลักการ เมื่อปริวรรตแล้วสามารถเขียนกลับเป็นอักษรและอักษรวิธีการเขียนแบบเดิมได้ (Wimonkasem, 2005)

การปริวรรตอักษรโบราณเป็นอักษรไทยปัจจุบันมี 3 รูปแบบ คือ (1) ถอดรูปอักษรตรงตัว ตัวต่อตัวตามต้นฉบับโดยไม่คำนึงถึงเสียงอ่าน นิยมใช้กับการปริวรรตจารึก (2) ถอดรูปอักษรและสะกดคำตรงตามเสียงในภาษาที่เขียน มักใช้กับวรรณกรรมท้องถิ่น และ (3) ถอดรูปอักษรและสะกดคำตามอักษรวิธีของภาษาไทยปัจจุบัน โดยไม่คำนึงถึงเสียงในภาษาถิ่นและอักษรวิธีการเขียนในเอกสารต้นฉบับเพื่อให้อ่านเข้าใจได้ง่ายขึ้น (Na Nagara, 1998) การปริวรรตแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การทำ “คำปริวรรต” คือ การถอดรูปอักษรโบราณเป็นอักษรไทยปัจจุบันแบบตรงตัวกับเอกสารต้นฉบับ และ (2) การทำ “คำอ่าน” คือ การทำปริวรรตเป็นคำอ่านแบบภาษาถิ่น หรือคำอ่านแบบภาษาไทยมาตรฐานที่สะกดคำตามพจนานุกรม ส่วนคำที่เป็นชื่อเฉพาะของบุคคล ชื่อสถานที่ ชื่อเมือง จะคงรูปแบบการสะกดตามรูปแบบเดิม และเขียนเชิงอรรถอธิบายคำที่ใช้ในปัจจุบันเอาไว้เพื่อให้รู้จักคำดั้งเดิม สำหรับวรรณกรรมที่มีวิธีเขียนใกล้เคียงกับอักษรวิธีภาษาไทยปัจจุบันค่อนข้างมากอาจตัดขั้นตอนการทำคำปริวรรตออกไป (Paiboonwangcharoen, 1999)

อย่างไรก็ดี การปริวรรตเอกสารโบราณโดยมนุษย์เป็นกระบวนการที่ต้องใช้เวลาและมีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องอาศัยผู้ปริวรรตที่มีประสบการณ์สูงและมีความเชี่ยวชาญด้านการอ่านอักษรและภาษาโบราณเป็นผู้ดำเนินการ ซึ่งปัจจุบันบุคลากรด้านนี้มีจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณเอกสารโบราณมีอยู่เป็นจำนวนมากมหาศาล ความ

พยายามในการนำเทคโนโลยีมาช่วยให้การปริวรรตเอกสารโบราณทำได้รวดเร็วยิ่งขึ้น อาทิ การเพิ่มความชัดเจนของตัวอักษรให้อ่านได้ง่ายขึ้น (Bianco *et.al.*, 2010; Hollaus, 2012; Natarajan & Sreedevi, 2017) การแปลงภาพอักษรโบราณเป็นอักษรโบราณอิเล็กทรอนิกส์เพื่อนำไปประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ (Romulus, 2010; Chamchong *et al.*, 2011; Chueaphun *et al.*, 2012; Inkeaw, 2017; Phattarachairavee, 2019) รวมถึงงานด้านการปริวรรตและแปลภาษาไทยโบราณด้วยเครื่อง เช่น การแปลงอักษรธรรมอีสานเป็นคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน (Paiboon, 2009) และภาษาไทยมาตรฐาน (Phromsoda, 2010) การวิเคราะห์โครงสร้างประโยค (Suradet, 2011) และการพัฒนาระบบการแบ่งคำอักษรธรรมอีสาน (Somsap & Seresangtakul, 2020) เป็นต้น

การแปลภาษาด้วยเครื่อง (Machine Translation) เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีด้านการประมวลผลภาษาธรรมชาติ (Natural Language Processing: NLP) ที่ทำให้คอมพิวเตอร์เข้าใจภาษาที่มนุษย์ใช้สื่อสารกันทั้งในรูปแบบภาษาพูดและภาษาเขียน ช่วยลดข้อจำกัดในการสื่อสารภาษาที่แตกต่างกันและลดต้นทุนการแปลภาษา กระบวนการแปลภาษาด้วยเครื่องจะแตกต่างกันไปตามลักษณะเฉพาะของแต่ละภาษาและในหลายกระบวนการต้องอาศัยคลังศัพท์ (Lexicon) ในการประมวลผล เช่น การตัดคำ (Tokenization) การแบ่งส่วนหรือการกำกับชนิดของคำ (Part of Speech: POS) โดยเฉพาะการทำข้อความให้เป็นบรรทัดฐาน (Text normalization) จะใช้คลังศัพท์เพื่อปรับเปลี่ยนคำที่มีความหมายเดียวกันแต่เขียนได้หลายแบบมาเขียนให้อยู่ในรูปแบบเดียวกันด้วยวิธี เช่น การตรวจแก้ตัวสะกด (Spelling Correction) การลดรูปคำศัพท์ (Stemming) การผันคำ (Inflection) การสะกดคำตามรากศัพท์ (Root) หรือใช้คำตามพจนานุกรม (Lemmatization) เป็นต้น รวมทั้งกระบวนการแปลภาษาที่ใช้คลังศัพท์เป็นฐานในการแปลภาษา ทั้งนี้ประสิทธิภาพการแปลภาษาด้วยเครื่องที่ใช้คลังศัพท์เป็นฐานในการแปลจะขึ้นอยู่กับจำนวนคำศัพท์ในคลังศัพท์เป็นสำคัญ (Azizan *et al.*, 2019; Intasorn., 2021) เช่นเดียวกับงานด้านการปริวรรตและการแปลภาษาไทยโบราณด้วยเครื่อง (Paiboon, 2009; Phromsoda, 2010; Suradet, 2011; 2554; Somsap & Seresangtakul, 2020) ส่วนใหญ่จะใช้คลังศัพท์เป็นฐานในแปล การตัดคำ และการกำกับชนิดของคำ (Part-Of-Speech: POS) โดยโครงสร้างหลักของการ

อธิบายคำศัพท์ในคลังศัพท์ภาษาไทยโบราณที่พบประกอบด้วย คำศัพท์หลักอักษรไทยโบราณ (Ancient Thai font) และคำศัพท์หลักอักษรไทยปัจจุบันภาษาไทยถิ่น หรือภาษาไทยมาตรฐาน ชนิดของคำ และความหมายของคำ

คลังศัพท์ (Lexicon) หรือ ศัพท์านุกรม เป็นศัพท์บัญญัติ มีชื่อเรียกอื่น ๆ เช่น พจนานุกรม ปทานุกรม หรืออภิธานคำศัพท์ หมายถึง หนังสือสำหรับค้นคว้าความหมายของคำที่เรียงตามลำดับบท (Office of the Royal Society, n.d.) การอธิบายคำศัพท์จะประกอบด้วย คำศัพท์หลัก (Terms) ความหมายของคำศัพท์ (Definition) สัทอักษร (Phonetics) ไวยากรณ์ (Syntax) และโครงสร้างของหน่วยคำในประโยคหรือสัทฐานวิทยา (Morphology) เช่น คำนาม คำกริยา เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการสร้างคลังศัพท์ (Hirst, 2009) การสร้างคลังศัพท์จำแนกตามแหล่งข้อมูลที่น่าสนใจคัดเลือกคำศัพท์ได้ 2 วิธี คือ (1) สร้างจากพจนานุกรมที่มีอยู่แล้ว (Dictionary-based Approach) ตัวอย่าง เช่น คลังศัพท์เครือข่ายภาษาไทย (Thai WordNet) สร้างจากพจนานุกรมภาษาไทย-อังกฤษและ WordNet (Thoongsup, 2009) คลังศัพท์บอกความรู้สึกภาษาอังกฤษสร้างจาก WordNet (Eduard., 2010) คลังศัพท์บอกความรู้สึกภาษาไทย สร้างจากพจนานุกรมภาษาไทย (Intasorn *et al.*, 2021) ฐานข้อมูลพจนานุกรมคำร่วมเชื้อสาย สร้างจาก Wang Li's Dictionary of Cognate Words (Fang & Xu, 2022) เป็นต้น (2) สร้างจากคลังข้อมูลภาษา (Corpus-bases Approach) ซึ่งเป็นคลังภาษาเขียนหรือภาษาพูดที่ใช้อยู่จริงที่ได้มีการรวบรวมไว้แล้ว หรือรวบรวมขึ้นมาใหม่จากแหล่งต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น พจนานุกรม Longman Dictionary of American English สร้างจาก Longman Corpus Network ขนาด 330 ล้านคำ พจนานุกรม Macmillan สร้างจาก World English Corpus ขนาด 200 ล้านคำ คลังศัพท์บอกความรู้สึกในภาษาไทยจากบทวิจารณ์ออนไลน์ สร้างจากคลังข้อมูลภาษาที่รวบรวมขึ้นมาใหม่จากบทวิจารณ์โรงแรม ภาพยนต์ และบทวิจารณ์แอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ 4,736 บทวิจารณ์ (Lorattanachaiyong, 2017) คลังศัพท์วิชาการทางภาษาอังกฤษธุรกิจ สร้างจาก KRU-BE Corpus ที่รวบรวมคำจากตำรา บทความวิจัย บทความออนไลน์ และหนังสือพิมพ์สาขาวิชาภาษาอังกฤษธุรกิจ ขนาด 16 ล้านคำ (Tongpoon-Patanasorn, 2018) พจนานุกรมคำศัพท์แสดงความเกลียดชัง สร้างจากการรวบรวมความคิดเห็นที่มีต่อข่าวใน Line Today จำนวน

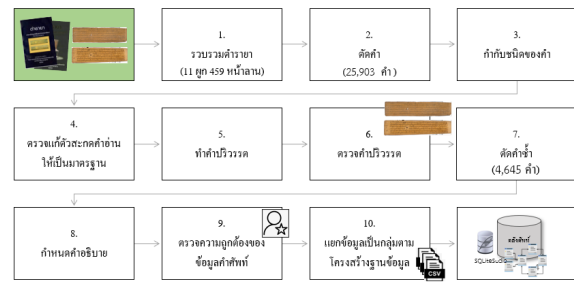
11,917 ความคิดเห็น (Wang, Day, & Wu, 2022) เป็นต้น

อักษรไทยน้อยเป็นอักษรที่คนไทยถิ่นอีสานและคนลาวที่อาศัยในอาณาจักรล้านช้าง (ปัจจุบันคือบริเวณแถบลุ่มแม่น้ำโขงและสปป.ลาว) ใช้งานบันทึกตั้งแต่วรรณกรรมและนิทานพื้นบ้าน ตำรายา โบราณศาสตร์ กฎหมาย พงศาวดาร และเอกสารทางราชการ เป็นต้น โดยบันทึกเป็นภาษาไทยถิ่นอีสานหรือภาษาลาว ส่วนมากพบในเอกสารโบราณ ประกอบด้วยพยัญชนะเดี่ยวประมาณ 24 รูป พยัญชนะประสม (พยัญชนะ 2 ตัวเขียนติดกัน) 8 รูป สระ 23 รูป ไม่มีรูปวรรณยุกต์ อักษรวิหรือวิธีประสมอักษรให้เป็นคำส่วนใหญ่จะคล้ายคลึงกับอักษรไทยปัจจุบัน คือ วางพยัญชนะต้นและตัวสะกดไว้บนบรรทัด เขียนสระไว้รอบพยัญชนะต้น (หน้า หลัง บน ล่าง) ที่แตกต่างคือ มีการใช้รูปพยัญชนะ ตัวเชิง หรือ ตัวเพื่อง ของอักษรธรรมซึ่งเป็นอักษรโบราณอีกชนิดหนึ่งที่คนไทยถิ่นอีสานนิยมใช้บันทึกเนื้อหาทางด้านพุทธศาสนา หรือคาถาอาคม มาเขียนร่วมด้วย (Punnotok, 2006) ซึ่งมักพบเขียนปะปนกันอยู่เสมอ (Kaewplang, 2013) อักษรไทยน้อยเลิกใช้ไปเมื่อมีการจัดการเรียนการสอนในระบบโรงเรียนตามพระราชบัญญัติประถมศึกษา พ.ศ. 2465 ซึ่งมีนโยบายให้คนไทยทุกคนเรียนอักษรและภาษาไทยมาตรฐานเหมือนกันทั่วประเทศ (Punnotok, 2006)

จากการสัมภาษณ์นักภาษาโบราณและการวิเคราะห์การเขียนอักษรไทยน้อยในตำรายาโบราณอีสาน (Polstri, 2021) พบว่า ปัญหาการอ่านและปริวรรตอักษรไทยน้อยที่จารในใบลานด้วยภาษาอีสาน ได้แก่ (1) ความหลากหลายของรูปอักษรจากลายมือเขียนที่มีลีลาแตกต่างกันของผู้เขียนแต่ละคน ลายมือที่อ่านยากจะส่งผลต่อความถูกต้องของการระบุรูปอักษรแต่ละตัว (2) การสร้างคำโดยใช้วิธีประสมอักษรด้วยอักษรวิพิเศษเฉพาะบุคคลของผู้เขียนที่แตกต่างไปจากวิธีประสมอักษรปกติ เช่น การใช้พยัญชนะตัวสะกดของคำพยางค์หน้าเป็นพยัญชนะต้นของคำพยางค์หลัง (ใช้พยัญชนะร่วมกัน) การสร้างกฎเกณฑ์วิธีประสมอักษรขึ้นมาใหม่โดยเลียนแบบวิธีประสมอักษรที่ใช้นักภาษาบาลี หรือ การใช้สัญลักษณ์แทนคำหรือตัวอักษร ซึ่งพบในงานของ สมจิตศรีปัญญา (Somjitsripanya, 1982) จันทร์แดง คำลือหาญ (Khamluehan, 1992) กิตติวัฒน์ สัตนาโค (Sattanakho, 1999) และ เอ็ม อร ชาวน์สวน (Chawsuan, 2015) เช่นกัน และ (3) อักษรไทยน้อยมี

ลักษณะ “เขียนอย่างหนึ่งแต่อ่านอีกอย่างหนึ่ง” คือ คำหนึ่งคำสามารถอ่านได้หลายแบบ ซึ่งการอ่านแต่ละแบบ จะทำให้คำมีความหมายต่างกัน เช่น “ไก” (คำปริวรรต) อ่านได้ 3 แบบ ได้แก่ “ไก” “ไกล” “ใกล้” หรือ “ป่า” (คำปริวรรต) อ่านได้ 3 แบบ ได้แก่ “ป่า” “ป่า” “ปลา” หรือกรณีคำที่อ่านออกเสียงเหมือนกันแต่สามารถสะกดได้หลายแบบ เช่น “ไซ” พบรูปแบบการสะกดทั้งแบบใช้พยัญชนะต้น “ค” และ “ช” คือ “ไซ” “ไค” ผู้อ่านจะต้องผันเสียงให้ตรงกับความหมายตามบริบทของเรื่องที่อ่านจึงจะอ่านได้ถูกต้อง ซึ่งสาเหตุเกิดจากอักษรไทยน้อยมีจำนวนตัวอักษรน้อยกว่าอักษรไทยปัจจุบัน ไม่มีวรรณยุกต์กำกับโทนเสียง และการสะกดคำมุ่งเน้นการอ่านให้ตรงกับเสียงพูดจึงไม่เคร่งครัดเรื่องตัวสะกด ดังนั้น ผู้ปริวรรตจึงจำเป็นต้องรู้ภาษาไทยถิ่นอีสานโบราณ และมีความรู้เกี่ยวกับเรื่องที่จะอ่านเป็นอย่างดี จึงจะทำคำอ่านได้ถูกต้อง

การปริวรรตเอกสารโบราณที่บันทึกด้วยอักษรไทยน้อยเป็นคำอ่านอักษรไทยปัจจุบัน ทั้งคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานและคำอ่านภาษาไทยมาตรฐานแบบอัตโนมัติด้วยเครื่องนั้น จำเป็นต้องใช้คลังศัพท์ในขั้นตอนการตัดคำ (Tokenization) และการทำคำอ่าน ซึ่งจากสำรวจเบื้องต้นพบว่า คลังศัพท์ที่มีคำศัพท์หลักพิมพ์ด้วยอักษรไทยน้อยมีเพียง 1 เล่ม (Chantao, 2015) และยังไม่สามารถสร้างเป็นพจนานุกรมอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจาก ปัจจุบันแบบอักษรไทยน้อย (Thai Noi font) ที่จะใช้พิมพ์คำศัพท์หลักยังไม่มีรหัสยูนิโคด (Unicode) เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการพัฒนาคลังศัพท์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีคำศัพท์หลักเป็นคำปริวรรตของอักษรไทยน้อย (คำถ่ายถอดจากรูปอักษรไทยน้อยเป็นอักษรไทยปัจจุบันแบบตรงตัว) แทนคำศัพท์หลักอักษรไทยน้อย ในหมวดตำรายาโบราณอีสาน เพื่อช่วยให้การอ่านและปริวรรตตำรายาโบราณอีสานทำได้รวดเร็วขึ้น เป็นประโยชน์ต่อการนำไปศึกษาค้นคว้าต่อไป โดยคลังศัพท์ที่พัฒนาขึ้นจะช่วยให้กระบวนการตัดคำและแปลงคำปริวรรตของระบบปริวรรตและแปลตำรายาโบราณอีสานที่บันทึกด้วยอักษรไทยน้อยด้วยคอมพิวเตอร์ทำได้ถูกต้องและเร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการประมวลผลภาษาธรรมชาติ (การตัดคำ การกำกับชนิดของคำ การแปล) การรู้จำชื่อเฉพาะ (Name Entity Recognition) เช่น ชื่อโรค ชื่อเรียกอาการ และชื่อสมุนไพร (พืชวัตถุ สัตว์วัตถุ ธาตุวัตถุ) การสกัดและสรุปสารสนเทศในตำรายาโบราณอีสานเพื่อพัฒนาระบบจัดทำดัชนีและจัดหมวดหมู่ตำรายาโบราณแบบอัตโนมัติ และระบบสืบค้นตำรายาโบราณ



รูปที่ 1 ขั้นตอนการรวบรวมคำศัพท์

ต่อไป อีกทั้งยังช่วยปกป้องและสงวนรักษากฎมรดกของชาติด้านตำรายาและด้านภาษาโบราณซึ่งเป็นมรดกทางวัฒนธรรมที่จับต้องไม่ได้ (Intangible Cultural Heritage) ให้คงอยู่และสามารถต่อยอดนวัตกรรมได้ในอนาคต การวิจัยนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยเรื่องการพัฒนากอบการงานในการแปลงคำปริวรรตของอักษรไทยน้อยเป็นคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน (Polsri, 2021) และได้ผ่านการรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ เอกสารรับรองเลขที่ COA No. 64/2563

2. วิธีดำเนินการวิจัย

แบ่งการวิจัยเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ การวิเคราะห์ลักษณะคลังศัพท์ภาษาไทยถิ่นอีสาน การออกแบบและพัฒนาคลังศัพท์ และการประเมินประสิทธิภาพคลังศัพท์ดังนี้

2.1 การวิเคราะห์ลักษณะคลังศัพท์ภาษาไทยถิ่นอีสาน

เพื่อให้ทราบว่าคลังศัพท์ภาษาไทยถิ่นอีสานที่มีอยู่ในปัจจุบันมีลักษณะอย่างไร และสามารถนำมาใช้ในกระบวนการแปลงคำปริวรรตของอักษรไทยน้อยเป็นคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานได้หรือไม่ กลุ่มตัวอย่างในการศึกษา ได้แก่ คลังศัพท์จำนวน 8 เล่ม ดังนี้ คลังศัพท์ภาษาไทยมาตรฐาน 1 เล่ม คือ พจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2554 (Office of the Royal Society, 2011) และคลังศัพท์ภาษาไทยถิ่นอีสาน จำนวน 7 เล่ม ดังนี้ สารานุกรมภาษาอีสาน-ไทย-อังกฤษ (Pinthong, 1989) ประมวลคำศัพท์ภาษาลาวในเอกสารโบราณ เล่ม 1 - 5 (National Library of Thailand, 2002) พจนานุกรม 3 ภาษา (ไทยน้อย-อังกฤษ-ไทย) (Chantao, 2015) พจนานุกรมภาคอีสาน-ภาคกลาง ฉบับปณิธานสมเด็จพระมหาวิรวงศ์ (ติสสมหาเถระ) (Somdet Phra Maha Wirawong (Tissamah Thera), 1998) พจนานุกรมภาษาถิ่นอีสาน: เว้าอีสาน (Phimworamethakun & Phimworamethakun, 2002) พจนานุกรมภาษาอีสานฉบับ คำพูน บุญทวี (Suksang, 2005)

และ พจนานุกรมภาษาอีสาน-ไทยกลาง (Raksuthi, 2011) รวบรวมข้อมูลโดยใช้แบบวิเคราะห์ลักษณะคลังคำศัพท์ภาษาไทยถิ่นอีสาน ที่ได้จากการวิเคราะห์ลักษณะคลังคำศัพท์ที่ใช้ในการปริวรรตเอกสารโบราณ 11 รายการ ได้แก่ แบบอักษรที่ใช้พิมพ์คำศัพท์หลัก ภาษาของคำศัพท์หลัก หมวดคำศัพท์ มีคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานโบราณ มีคำอ่านภาษาไทยมาตรฐาน มีชนิดของคำ (POS) มีคำอธิบายที่มาของอธิบาย มีตัวอย่างประโยคมีคำตรงข้าม มีคำคล้ายคลึง และมีคำปริวรรต

2.2 การออกแบบและพัฒนาคลังคำศัพท์

การออกแบบและพัฒนาคลังคำศัพท์แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

2.2.1 การออกแบบและสร้างฐานข้อมูลคลังคำศัพท์ มี 4 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การออกแบบโครงสร้างฐานข้อมูลคลังคำศัพท์ในระดับแนวคิด (Conceptual Schema Design) โดยการวิเคราะห์เอนทิตี (Entity) แอททริบิวต์ (Attribute) ของแต่ละเอนทิตี และความสัมพันธ์ระหว่างเอนทิตี (Relationship) และในระดับกายภาพ (Physical Design) ได้แก่ การเลือกระบบฐานข้อมูลที่จะใช้สร้างและจัดเก็บคลังคำศัพท์ (2) การสร้างฐานข้อมูลคลังคำศัพท์ตามรูปแบบไว้ด้วยโปรแกรมจัดการฐานข้อมูล SQLite Studio (3) การวิเคราะห์เกณฑ์การสะกดคำศัพท์ในคลังคำศัพท์ภาษาไทยถิ่นอีสาน (เอกสารชุดเดียวกันกับที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะคลังคำศัพท์ภาษาไทยถิ่นอีสาน) ร่วมกับลักษณะของภาษาไทยถิ่นอีสาน (Kingkham, 2013) เพื่อสร้างเกณฑ์การสะกดคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน และ (4) กำหนดชนิดของคำศัพท์ (POS)

2.2.2 การรวบรวมคำศัพท์ ประกอบด้วย 10 ขั้นตอน (รูปที่ 1) ได้แก่ (1) รวบรวมข้อมูลจากตำรายาที่ปริวรรตมาจากตำรายาโบราณอีสานที่บันทึกไว้ในใบลานด้วยอักษรไทยน้อย ได้แก่ ตำรายาวิธมหาชัย จังหวัดมหาสารคาม เล่ม 5 และตำรายาวิธท่าม่วง อำเภอสหัสขันธ์ จังหวัดร้อยเอ็ด เล่ม 2 นำมาคัดเลือกเฉพาะฉบับที่ปริวรรตมาจากอักษรไทยน้อยจำนวน 11 ผูก 459 หน้า ลาน ขนาดคำศัพท์ 25,903 คำ (2) นำตำรายามาตัดคำด้วยมือด้วยโปรแกรมไมโครซอฟต์เวิร์ด โดยรอบแรกใช้เกณฑ์การตัดคำแบบยาวที่สุด และรอบที่ 2 ใช้เกณฑ์ตัดคำแบบสั้นที่สุด สำหรับแยกคำประสมเป็นคำโดด (3) ตรวจแก้การสะกดคำให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน (4) กำกับชนิดของคำ (POS) (5) ทำคำปริวรรตของคำศัพท์แต่ละคำ โดยใช้หลักการปริวรรตอักษรไทยน้อยเป็นอักษรไทยปัจจุบันมาเป็นเกณฑ์ในการทำคำปริวรรต (6) ตรวจสอบความถูกต้องโดยเทียบกับสำเนาภาพดิจิทัล

ตำรายาต้นฉบับ (7) ตัดคำซ้ำ โดยนำคำศัพท์ไปจัดเรียงตามลำดับตัวอักษรในโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซล จากนั้นตัดคำศัพท์ที่ซ้ำออก (8) กำหนดรายละเอียดการอธิบายคำศัพท์ตามโครงสร้างฐานข้อมูลคลังคำศัพท์ที่ออกแบบไว้ โดยคำอธิบายความหมายของคำศัพท์ได้จากการสืบค้นจากคลังคำศัพท์ภาษาอีสานชุดเดียวกับคลังคำศัพท์ภาษาไทยถิ่นอีสานที่นำมาศึกษาในข้อ 2.2.1 และสืบค้นเพิ่มเติมจากสารานุกรมรวมหลักเภสัชกรรมไทย (Wuthithamwet, 1997) เว็บไซต์ฐานข้อมูลสมุนไพร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี (www.phargarden.com) และเว็บไซต์เมดไทย (www.medthai.com) โดยคำศัพท์ที่ไม่สามารถค้นหาคำอธิบายได้จะใช้วิธีสอบถามจากนักภาษาโบราณ หรือหมอยาพื้นบ้านอีสาน และระบุแหล่งสืบค้นข้อมูลเป็น “สัมภาษณ์” (9) ตรวจสอบความถูกต้องของคำศัพท์โดยนักภาษาโบราณซึ่งเป็นผู้ปริวรรตตำรายาฉบับที่นำมาศึกษา และ (10) แยกข้อมูลจัดกลุ่มข้อมูลตามโครงสร้างฐานข้อมูลที่ออกแบบไว้ บันทึกข้อมูลแบบไฟล์ CSV และนำเข้า (Import) จัดเก็บในฐานข้อมูล

การพัฒนาคลังคำศัพท์ครั้งนี้ใช้วิธีตัดคำด้วยมือ เนื่องจากมีข้อจำกัดที่สำคัญต่อการตัดคำแบบอัตโนมัติคือ ปัจจุบันยังไม่มีฐานความรู้ที่จะนำมาใช้ในการตัดคำ เช่น พจนานุกรมอิเล็กทรอนิกส์คำศัพท์เฉพาะด้านตำรายาโบราณอีสาน หรือคลังข้อความตำรายาโบราณอีสาน (Corpus) ขนาดใหญ่ สำหรับใช้เป็นข้อมูลฝึกและสร้างโมเดลสำหรับตัดคำแบบอัตโนมัติ อย่างไรก็ตามได้นำแนวคิดการเทียบคำที่ยาวที่สุด (Longest Word Pattern Matching) และการเทียบคำที่สั้นที่สุด (Shortest Word Pattern Matching) มาใช้ในการตัดคำ ดังนี้

รอบที่ 1 ใช้การเทียบคำที่ยาวที่สุด เนื่องจากคำศัพท์ที่บันทึกในตำรายาโบราณอีสานมีคำประสมที่เป็นคำเฉพาะค่อนข้างมาก โดยเฉพาะชื่อยา/ชื่อโรค/ชื่อเรียกอาการ และชื่อสมุนไพร การตัดคำจะดูตามบริบทของตำรายา ได้แก่ องค์ประกอบด้านเนื้อหาที่เขียนในตำรายาอีสานโบราณ 12 กลุ่ม (ชื่อยา/โรค/อาการ ชื่อสมุนไพร สัตส่วน/ปริมาณที่ใช้ วิธีไปเก็บสมุนไพร วิธีเตรียมยา วิธีใช้ยา ผู้ป่วย วันและเวลา คาถา พิธีกรรม คำรักษา และเนื้อหาเรื่องอื่น ๆ) รวมกับโครงสร้างการเขียนบรรยายเนื้อหาตำรายา 3 ประเภท (ตำรายาที่ใช้เฉพาะสมุนไพรในการรักษา ตำรายาที่ใช้สมุนไพรร่วมกับคาถา และตำรายาที่ใช้เฉพาะคาถาในการรักษา) 15 รูปแบบ (Polsri, 2021) ตัวอย่างการตัดคำเช่น “ยาแก้ขับขับให้เอาข้าวหมุงาข้างคางกะท่าง...” เป็นตำรายาประเภทใช้

```

graph LR
    Root["ยานักขบวนเข้า  
ให้ยานักขบวนเข้า  
ทางทางทาง..."]
    
    Root --- B1["ยานักขบวนเข้า  
CV_b V_f CT CS V_f CT S"]
    Root --- B2["ให้  
CV_b V_f CT S"]
    Root --- B3["เข้า  
CV_b V_f CT S"]
    Root --- B4["ทาง  
CV_b CV_b CT V_b S"]
    Root --- B5["...  
CV_b CV_b CT V_b S"]
    
    B1 --- B1_1["ยา  
CV_b"]
    B1 --- B1_2["แก่  
V_f CT"]
    B1 --- B1_3["ขบวน  
CS"]
    B1 --- B1_4["เข้า  
V_f CT S"]
    
    B3 --- B3_1["เข้า  
V_f CT S"]
    B3 --- B3_2["หมู่  
CV_b"]
    
    B4 --- B4_1["ทาง  
CV_b"]
    B4 --- B4_2["ทาง  
CV_b"]
    B4 --- B4_3["ทาง  
CV_b"]
    B4 --- B4_4["ทาง  
CV_b"]
    
    B5 --- B5_1["..."]
  
```

รูปที่ 2 ตัวอย่างวิธีการและผลลัพธ์การตัดคำ

ตารางที่ 2 กฎการตัดคำสำหรับคำที่ขึ้นต้นด้วยพยัญชนะ

ข้อ	กฎ	ตัวอย่างคำที่ได้ (หลังตัดคำแล้ว)
1	C + T	บ ก็ หน่อ
2	C + T + C	ก่น (ชุด) ต้น
3	C + C	ขบ ตก ผน ชน
4	C + Vb	ขา คา ตำ งา ยา
5	C + Vb + S	หมาก กาม ขาว
6	C + T + Vb	ข้า ผ่า น้ำ หญ้า
7	C + T + Vb + S	บ้าน ข้าว ก้าน
8	C + ไผ่หน้าอากาศ + S	จัว หนั่ง หัก พัน
9	C + Vu	ดี พี
10	C + Vu + S	ดิน มิน (ลิ้มดา) ดิน ผัง
11	C + Vu + T	ชี จี
12	C + Vu + T + S	จิ้น (แฉะ) ดิ้น ครั้ง ชิ้น
13	C + Vb + T	กำ
14	C + Vl	หมู หู
15	C + Vl + T	หมู ผู้
16	C + Vl + T + S	อุ่น มุ่น (แหลก)
17	C + Vl + S	ชุด พุด (ฟัน) ลูก ผูก
18	C + Vu + “อ”	มือ
19	C + “อ”	คอ
20	C + “อ” + S	ออก ดอก ยอด ตอด
21	C + “อ” + T	คอ (โรคชนิดหนึ่ง) หน่อ
22	C + T + “อ” + S	ต่อน (เผือก) ก้อน น้อย
23	C + “ว” + S	กล้วย หน่วย
24	C + Vu + S + S + G	จันทน์ จันทร์

6

รูปที่ 3 ขั้นตอนและตัวอย่างการแปลงคำอ่านกลับเป็นคำปริวรรต

2.2.3 การทำคำปวิวรรตของอักษรไทยน้อยด้วยวิธีแปลงคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานกลับไปเป็นคำปวิวรรตเพื่อใช้เป็นคำศัพท์หลักในคลังคำ กำหนดกฎดังนี้ (1) ตัดเครื่องหมายวรรณยุกต์ ตัวการ์นต์ และพยัญชนะควบกล้ำออกไปทั้งหมด เนื่องจากภาษาอีสานไม่มีตัวควบกล้ำ (2) คำอ่านที่ใช้พยัญชนะต้นหรือตัวสะกดที่ไม่นิยมใช้ในอักษรไทยน้อย (ข ฉ ฐ ฎ ฏ ธ ฑ ฒ ฌ ภ ร ศ ช ฬ ทร) ให้ใช้พยัญชนะต้นและตัวสะกดตรงตามเสียง ได้แก่ พยัญชนะต้น “ฆ” เปลี่ยนเป็น “ช”, “ฉ” และ “ศ” เปลี่ยนเป็น “ส”, “ทร” เปลี่ยนเป็น “ท”, “ซ” เปลี่ยนเป็น “ช” และ “ร” เปลี่ยนเป็น “ฮ” ส่วนพยัญชนะตัวสะกดแม้มักเปลี่ยนเป็น “ก” แม่มกตเปลี่ยนเป็น “ด” แม่มบเปลี่ยนเป็น “บ” แม่มนเปลี่ยนเป็น “น” และ (3) สระโอะไม่ผันเปลี่ยนเป็นสระไอะไม่มลาย (อักษรไทยน้อยไม่มีรูปสระโอะไม่ม้วน) สระอุ เปลี่ยนเป็น สระอู (อักษรไทยน้อยไม่มีรูปสระอู) จากนั้นนำคำปวิวรรตที่ได้มาตรวจเทียบกับตำรายาต้นฉบับในเอกสารโบราณ หากไม่ตรงกันจะทำการแก้ไขให้ตรงกัน หากสงสัยหรือไม่แน่ใจจะสอบถามผู้เชี่ยวชาญ ตัวอย่างดังรูปที่ 3

การประเมินประสิทธิภาพของคลังศัพท์ แบ่งเป็น 2 ด้าน ดังนี้

3.2 ความเหมาะสมในการออกแบบและพัฒนาคลังศัพท์ ประเมินโดยนักภาษาโบราณ จำนวน 12 คน จากสำนักหอสมุดแห่งชาติและสถาบันวิจัยศิลปะและวัฒนธรรมอีสาน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และผู้ใช้ประโยชน์จากตำรายาโบราณอีสาน ได้แก่ นักศึกษาระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 หลักสูตรแพทย์แผนไทยประยุกต์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ผ่านการเรียนรายวิชาตำรายาในเอกสารโบราณมาแล้ว จำนวน 27 คน ใช้แบบประเมินความเหมาะสมในการออกแบบ

$$\text{ร้อยละความถูกต้องของการแปลงคำปริวรรตเป็นคำอ่าน} = \frac{\text{คำอ่านที่แปลงได้ถูกต้อง}}{\text{จำนวนคำทั้งหมด}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{ร้อยละความผิดพลาดประเภทคำไม่รู้จัก} = \frac{\text{คำอ่านประเภทคำไม่รู้จัก}}{\text{จำนวนคำทั้งหมด}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{ร้อยละความผิดพลาดประเภทแปลงคำผิด} = \frac{\text{คำอ่านประเภทแปลงคำผิด}}{\text{จำนวนคำทั้งหมด}} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{ผลรวมความผิดพลาด} = \text{จำนวนความผิดพลาดประเภทคำไม่รู้จัก} + \text{จำนวนความผิดพลาดประเภทแปลงคำผิด} \quad (4)$$

$$\text{ร้อยละความผิดพลาดทั้งหมด} = \frac{\text{ผลรวมความผิดพลาด}}{\text{จำนวนคำทั้งหมด}} \times 100 \quad (5)$$

ตารางที่ 3 จำนวนคำศัพท์ในคลังศัพท์ คำปริวรรต-คำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน-คำอ่านภาษาไทยมาตรฐาน ที่พัฒนาขึ้น

ประเภทความสัมพันธ์	จำนวน (คำ)	ร้อยละ
1:1	2,858	61.53
M:1	1,677	36.10
1:M	64	1.38
M:N	46	0.99
รวม	4,645	100

และพัฒนาฐานข้อมูลเป็นเครื่องมือในการรวบรวมข้อมูลใช้มาตรวัดแบบ Rating Scale 5 ระดับ

3. ผลการวิจัย

3.1 ลักษณะคลังศัพท์ภาษาไทยถิ่นอีสาน

โครงสร้างและลักษณะการอธิบายคำศัพท์ในคลังศัพท์ภาษาไทยถิ่นอีสานที่มีใช้ในปัจจุบัน ส่วนมากคล้ายคลึงกัน ดังนี้ คำศัพท์หลักพิมพ์ด้วยแบบอักษรไทยปัจจุบัน มีเพียง 1 เล่มที่มีคำศัพท์หลักพิมพ์ด้วยแบบอักษรไทยน้อย คือ พจนานุกรม 3 ภาษา (ไทยน้อย-อังกฤษ-ไทย) (Chantao, 2015) จำแนกชนิดของคำเป็น 7 ชนิด ได้แก่ คำนาม คำสรรพนาม คำกริยา คำวิเศษณ์ คำบุพบท คำสันธาน และคำอุทาน มีการอธิบายความหมายของคำศัพท์ มีตัวอย่างการใช้คำ (เฉพาะบางคำ) ไม่มีคำตรงข้ามและคำคล้ายคลึง ไม่มีคำปริวรรต คำศัพท์ส่วนใหญ่เป็นหมวดวรรณกรรมทั่วไป คำศัพท์หมวดตำรายาโบราณอีสานมีจำนวนน้อย และกระจัดกระจายอยู่ในบางเล่ม ทำให้ไม่สามารถนำคลังศัพท์ภาษาไทยถิ่นอีสานที่มีอยู่ในปัจจุบันไปใช้ในการตัดคำและแปลงคำปริวรรตของอักษรไทยน้อยเป็นคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานด้วยเครื่องได้ โดยคลังศัพท์ต้องมีลักษณะเฉพาะที่สำคัญคือ มีคำศัพท์หลักที่สะกดคำแบบคำปริวรรต มีคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน และหมวดคำศัพท์เป็นหมวดตำรายาโบราณอีสาน

3.2 คลังศัพท์ คำปริวรรต-คำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน-คำอ่านภาษาไทยมาตรฐาน มีลักษณะ ดังนี้

3.2.1 เป็นคลังศัพท์หมวดตำรายาโบราณอีสาน มีคำศัพท์หลักเป็นคำปริวรรตของอักษรไทยน้อย จำนวน 4,645 คำ จำแนกเป็น 4 ประเภทตามความสัมพันธ์ระหว่างคำปริวรรตและคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานที่พบในงานวิจัยนี้ ได้แก่ คำปริวรรต 1 คำ มีคำอ่าน 1 คำ (1:1) คำปริวรรต 1 คำ มีคำอ่านได้หลายคำอ่าน (1:M) คำปริวรรตหลายคำมีคำอ่านคำเดียวกัน (M:1) และคำปริวรรตแต่ละคำมีคำอ่านได้หลายคำและคำอ่านแต่ละคำอ่านมีคำปริวรรตได้หลายคำ (M:N) ดังตารางที่ 3 โครงสร้างฐานข้อมูลคลังศัพท์ ประกอบด้วย 4 ตาราง ได้แก่ คำศัพท์ (Vocabulary) เอกสารอ้างอิง (References) คำ ป ริ ว ร ร ต (Transliteration) และ คำ ป ริ ว ร ร ต - คำ อ า น ภาษา ไทย ถิ่น อีสาน (TransHasVocab) ความสัมพันธ์ระหว่างตารางในฐานข้อมูลแสดงในรูปที่ 4

ฐานข้อมูลคลังศัพท์จะรองรับคำปริวรรตและคำอ่านที่มีความสัมพันธ์ทั้ง 4 รูปแบบ โดยคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานในตารางคำศัพท์แต่ละคำจะมี Vocab_id คนละตัว เช่น คำปริวรรต “เฮือน” มีคำอ่านทั้งหมด 2 คำ ได้แก่ “เฮือน” และ “เฮื้อน” จะมี Vocab_id คือ 1325 และ 1328 ตามลำดับ โดยรายละเอียดคำอธิบายโครงสร้างฐานข้อมูล (Data dictionary) คีย์หลัก (Primary key: PK) และคีย์นอก (Foreign key: FK) ของแต่ละตาราง แสดงในตารางที่ 4

3.2.2 ชนิดของคำ (Part-Of-Speech: POS) งานวิจัยนี้ จำแนกชนิดของคำในคลังศัพท์ออกเป็น 36 ชนิด (ตารางที่ 5) โดยใช้เกณฑ์การแบ่งชนิดของคำตาม

ตารางที่ 4 คำอธิบายโครงสร้างฐานข้อมูลคลังศัพท์คำปริวรรต-คำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน-คำอ่านภาษาไทยมาตรฐาน

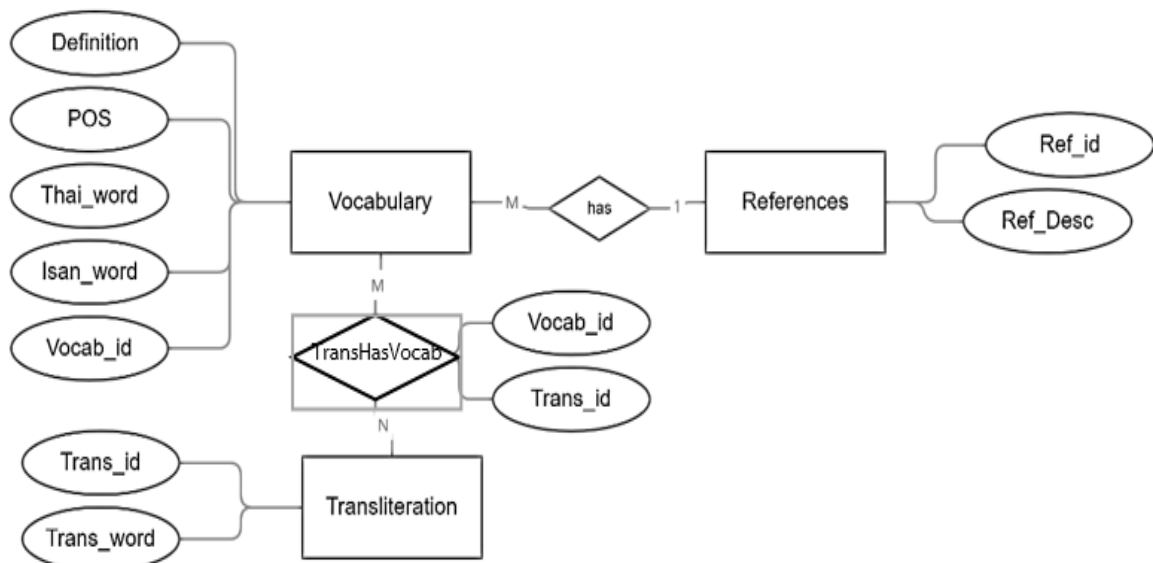
ชื่อแอททริบิวต์	ชนิดของข้อมูล	คำอธิบาย	ชื่อตาราง
Vocab_id (PK)	ตัวเลข (Integer)	รหัสคำศัพท์	คำศัพท์
Isan_word	ตัวอักษร (Text)	คำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน	คำศัพท์
Thai_word	ตัวอักษร (Text)	คำอ่านภาษาไทยมาตรฐาน	คำศัพท์
POS	ตัวอักษร (Text)	ชนิดของคำ	คำศัพท์
Definition	ตัวอักษร (Text)	คำอธิบายคำศัพท์	คำศัพท์
Ref_id (FK)	ตัวเลข (Integer)	รหัสเอกสารอ้างอิง	คำศัพท์
Trans_id	ตัวเลข (Integer)	รหัสคำปริวรรต	คำปริวรรต
Trans_word	ตัวอักษร (Text)	คำปริวรรต	คำปริวรรต
Ref_id (PK)	ตัวเลข (Integer)	รหัสเอกสารอ้างอิง	เอกสารอ้างอิง
Ref_desc	ตัวอักษร (Text)	ชื่อเอกสารอ้างอิง	เอกสารอ้างอิง
Vocab_id (PK)	ตัวเลข (Integer)	รหัสคำศัพท์	คำปริวรรต-คำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน
Trans_id (PK)	ตัวเลข (Integer)	รหัสคำปริวรรต	คำปริวรรต-คำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน

ตารางที่ 5 คำอธิบายโครงสร้างฐานข้อมูลคลังศัพท์คำปริวรรต-คำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน-คำอ่านภาษาไทยมาตรฐาน

ลำดับ	POS	คำอธิบาย	ตัวอย่างคำศัพท์ภาษาไทยถิ่นอีสาน
1	NPRP	วิสามานยนาม (Proper Noun) หรือ คำนามประเภทชื่อเฉพาะอื่นที่ไม่ใช่ชื่อยา ชื่อโรค ชื่อสมุนไพร	ทิพยาธร, เทพพญาธร, ทิพพญาธร
2	NSMPT	คำนาม หรือ กลุ่มคำ (วลี) ประเภทชื่อโรค หรือ ชื่อเรียกอาการของโรค	สารบาท, สะดวง, ไข้มากไม้, ล่องแก้ว
3	NPMED	คำนามประเภทชื่อสมุนไพร (พืช, สัตว์, วัตถุ, กระจายยา) หรือ ส่วนประกอบของพืช หรือสัตว์ ที่นำมาใช้เป็นสมุนไพร	คันคาก (คางคก), อ้อยดำ, ฮากก้วยตีบ, ใบหมากเขียบ
4	NPTBE	คำนามประเภทชนิดของยา (Noun of Pharmacy Type)	น้ำ, ผง, ลูกกอน (ลูกกลอน), ฝุ่น (ผง)
5	NTME	คำนามประเภทเวลา หรือบอกเวลา (Nouns of Time)	เช้า (เช้า), แลง (ตอนเย็น), ตะวันชาย (พระอาทิตย์ขึ้น), เพล (เที่ยง)
6	NDAY	คำนามประเภทชื่อวัน (Nouns of Day Name)	วันหนึ่ง (จันทร์), วันสอง (อังคาร), วันสาม (พุธ), ปะห์ส (พฤหัสบดี)
7	NDRT	คำนามประเภทชื่อทิศ (Noun of Direction)	ตะวันตก, ตะวันออก, เหนือ, ใต้
8	NORG	คำนามประเภทชื่ออวัยวะ และชื่อสิ่งที่เกิดขึ้นภายในร่างกายมนุษย์ หรือสัตว์	แขน, ขา, มือ, เท้า, ฟันตีน, ฟันมือ, หน้าผาก, เลือด, เยี่ยว/เยี่ยว
9	NMTH	คำนามประเภทชื่อเดือนทางจันทรคติ	เดือน 1, อ้าย, ยี่, เจียง, เดือนสิบ
10	NCNM	คำนามประเภทจำนวนนับ หรือ จำนวนเชิงการนับ (Noun of Cardinal Number)	หนึ่ง, สอง, สาม, ..., 1, 2, 3, ...
11	NORD	คำนามบอกลำดับ	ชาว (ยี่), ชาวห้า (25), อ้อย (ร้อย)
12	PDMN	สามัญชนนาม (Common Noun) หรือ คำนามทั่วไปของ คน พืช สัตว์ และสิ่งของ	พ่อช่าย (ผู้ชาย), แม่ญิง (ผู้หญิง), เด็กน้อย, ม้า, หมากไม้, ฮาก, ใบ
13	PPRS	สรรพนามของคน (Personal Pronoun)	เพิ่น, ท่าน, เฮา, เจ้า, ไผ (ใคร)
14	PREL	ประพันธสรรพนาม หรือสรรพนามใช้แทนคำนาม หรือสรรพนามที่กล่าวมาแล้ว (Relative Pronoun)	มัน, อันนั้น
15	VERB	คำกริยาทั่วไป ที่ไม่ใช่กริยาในกลุ่มอาการป่วย วิธีเตรียมยา วิธีใช้ยา	ไป, ค้าง (วาง), ขุด, ให้อา, มี, ฐู้ (รู้), วาน (ขอร้อง), เห็น
16	VSTMP	คำกริยาประเภทอาการป่วย (Verb of Symptom)	ไค้ (บวม), พวน (มาน), ไอ, ออกฮ้อน (แสบร้อน), ฮ้อน (ร้อน), สิ้น
17	VMTD	คำกริยาประเภทวิธีเตรียมยา (Verb of Method)	ฝน, บด, ตำ, ต้ม, แซ่ (แช่), คั่ว
18	VDRCT	คำกริยาประเภทวิธีใช้ยา (Verb of Direction)	กิน, อาบ, สม (รม), สูบ, โปะ (โปะ), พุด (พ่น), โสย (โรย)
19	XVRB	กริยาช่วย (Auxiliary Verb)	อย่า, เสีย, ไต้, สิ, จะ, ไว้
20	DCNM	คำบอกจำนวน (Determiner, Cardinal Number Expression)	ท่อกัน (เท่ากัน), อันแลอัน (อย่างละอัน), ซูอัน (ทุกอัน)
21	ADVN	คำกริยวิเศษณ์รูปปกติ (Adverb with Normal Form) ใช้ประกอบหรือขยายคำกริยาให้ได้ใจความชัดเจนและละเอียดมากขึ้น	ก่อน, ด้วย, แล้ว
22	ADVI	คำกริยวิเศษณ์รูปคำซ้ำ (Adverb with Iterative Form)	ก่อน2 (ก่อน ๆ), ทด2 (ทด ๆ)
23	ADJN	คำคุณศัพท์รูปปกติ (Adjective with Normal Form)	แหม่ม (เกรียม), ไหม้, ดำ, แดง, ใหม่, ชุ่น, ไหญ่, น้อย
24	ADJI	คำคุณศัพท์รูปคำซ้ำ (Adjective with Iterative Form)	แหม่ม2 (แหม่ม ๆ), แดง2 (แดง ๆ), ชาว2 (ชาว ๆ), ชุ่น2 (ชุ่น ๆ)
25	CUNT	ชื่อหน่วยนับ (Unit Classifier)	ก้อน, ผ่าน, ซีก, บ่วง (ช้อน), บาย
26	CLTV	ลักษณะนามแบบกลุ่ม (Collective Classifier)	คู่, ชุม (พวก), ฝูง, ทั้งหมด, ทั้งหมด, ทั้งหมด

ตารางที่ 5 (ต่อ)คำอธิบายโครงสร้างฐานข้อมูลคลังศัพท์คำปริวรรต-คำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน-คำอ่านภาษาไทยมาตรฐาน

ลำดับ	POS	คำอธิบาย	ตัวอย่างคำศัพท์ภาษาไทยถิ่นอีสาน
27	CMTR	ลักษณะนามมาตรวัด (Measurement Classifier)	ตำลึง, บาท, จอมก้อย (ปลายนิ้วก้อย), เบี้ย, สลึง
28	CFQC	คำบอกลักษณะความถี่ (Frequency Classifier)	ที, เทื่อ (ครั้ง), คาบ (ครั้ง/เวลา)
29	CCJT	คำสัณฐาน หรือ คำเชื่อม (Coordinating Conjunction)	ผิว่า, และ, แล้วจึง, เป็นดัง, เพราะ, ถ้า, คั้น (หาก), คั้นว่า (หากว่า)
30	PREP	คำบุพบท (Preposition)	ใต้, ล่าง, เหนือ (บน), ใน, ทางใน, ทางลม, ทางหลัง
31	EAFF	คำจบประโยค (Ending for Affirmative Sentence)	เออะ, ดีแล, ดูก่อน, เทอญ, แล
32	NEG	คำปฏิเสธ (Negator)	บ่ (ไม่)
33	NEGI	คำปฏิเสธรูปซ้ำ (Negator with Iterative Form)	บ่2 (ไม่ ๑)
34	PUNC	เครื่องหมายวรรคตอน หรือจบประโยคคำรับยา(Punctuation)	ฯ
35	SPELL	คำอ่าน	อัติ วิมส์สมิง, สั้งคำ พันเต ปาวา
36	UNK	คำที่ระบุหมวดคำไม่ได้ ไม่แน่ใจ แปลไม่ได้	ลิสาย ทากวม สบสี สะหับ
27	CMTR	ลักษณะนามมาตรวัด (Measurement Classifier)	ตำลึง, บาท, จอมก้อย (ปลายนิ้วก้อย), เบี้ย, สลึง
28	CFQC	คำบอกลักษณะความถี่ (Frequency Classifier)	ที, เทื่อ (ครั้ง), คาบ (ครั้ง/เวลา)
29	CCJT	คำสัณฐาน หรือ คำเชื่อม (Coordinating Conjunction)	ผิว่า, และ, แล้วจึง, เป็นดัง, เพราะ, ถ้า, คั้น (หาก), คั้นว่า (หากว่า)
30	PREP	คำบุพบท (Preposition)	ใต้, ล่าง, เหนือ (บน), ใน, ทางใน, ทางลม, ทางหลัง
31	EAFF	คำจบประโยค (Ending for Affirmative Sentence)	เออะ, ดีแล, ดูก่อน, เทอญ, แล
32	NEG	คำปฏิเสธ (Negator)	บ่ (ไม่)
33	NEGI	คำปฏิเสธรูปซ้ำ (Negator with Iterative Form)	บ่2 (ไม่ ๑)
34	PUNC	เครื่องหมายวรรคตอน หรือจบประโยคคำรับยา(Punctuation)	ฯ
35	SPELL	คำอ่าน	อัติ วิมส์สมิง, สั้งคำ พันเต ปาวา
36	UNK	คำที่ระบุหมวดคำไม่ได้ ไม่แน่ใจ แปลไม่ได้	ลิสาย ทากวม สบสี สะหับ



รูปที่ 4 แผนภาพเอนทิตีและความสัมพันธ์ระหว่างเอนทิตีในฐานข้อมูลคลังศัพท์ คำปริวรรต-คำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน-คำอ่านภาษาไทยมาตรฐาน

วากยสัมพันธ์ (Syntax) ในภาษาไทยมาตรฐาน (Thonglor, 2000) และการแบ่งชนิดของคำตามโครงสร้างการเขียนตำราภาษาโบราณอีสาน

3.3 เกณฑ์การสะกดคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน

เนื่องจากภาษาไทยถิ่นอีสานในแต่ละจังหวัดจะมีลักษณะเฉพาะ ดังนั้น คำศัพท์คำเดียวกันในบางจังหวัดอาจมีเสียงพยัญชนะ สระ หรือโทนเสียงวรรณยุกต์ต่างกัน (Thonglor, 2000) ทำให้การสะกดคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานจะต้องมีการกำหนดเกณฑ์การสะกดคำตามสำเนียง

พูดในแต่ละจังหวัดด้วย โดยงานวิจัยนี้กำหนดเกณฑ์การสะกดคำอ่านตามสำเนียงพูดจังหวัดมหาสารคามและกาฬสินธุ์ (ตามผู้ปริวรรตตำราฉบับที่นำมาศึกษา) และไม่ใช่พยัญชนะ ควบกล้ำ เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะเฉพาะของสำเนียงภาษาไทยถิ่นอีสานที่ไม่มีเสียงพยัญชนะควบกล้ำ รวมถึงการพยายามรักษารูปแบบการใช้คำตามแบบโบราณเอาไว้ เพื่อประโยชน์ต่อการศึกษาด้านภาษาศาสตร์ และเป็นการสงวนรักษาวรรณกรรมด้านภาษาของแต่ละท้องถิ่นซึ่งเป็นมรดกทางวัฒนธรรมที่จับต้อง

ตารางที่ 6 เกณฑ์การสะกดคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานและตัวอย่างการสะกดคำอ่าน

เกณฑ์การสะกดคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน	คำปรัวรรต	ตัวอย่างการสะกดคำอ่าน	
		ภาษาไทยถิ่นอีสาน	ภาษาไทยมาตรฐาน
1. คำที่พ้องเสียงพ้องความหมายกับคำภาษาไทยมาตรฐาน ใช้การสะกดคำตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2554	กิน	กิน	กิน
	เป็น	เป็น	เป็น
	ผักหวาน	ผักหวาน	ผักหวาน
2. คำที่ พ้องเสียงพ้องความหมายกับคำอ่านภาษาไทยมาตรฐานที่มีตัวการันต์ ใช้การสะกดคำตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2554	จันทขาว	จันทขาว	จันทขาว
	ซิ่นกอินทรี	ซิ่นกอินทรี	ซิ่นกอินทรี
	นมลาซาฮี	นมราชสีห์	นมราชสีห์
3. คำที่ พ้องเสียงพ้องความหมายกับคำภาษาไทยมาตรฐานที่เป็น คำควบกล้ำ ร ล ว ใช้การสะกดคำตามเสียงภาษาไทยถิ่นอีสาน (ไม่ใช่พยัญชนะควบกล้ำ)	แพ	แพ	แพ
	ลูกกอน	ลูกกอน	ลูกกลอน
	กวาง	กวาง	กวาง
4. คำที่มีหน่วยเสียงพยัญชนะ /ส/ ที่เป็นปฏิภาคกับเสียงพยัญชนะ /ร/ ในภาษาไทยมาตรฐาน ใช้พยัญชนะ “ฮ” สะกดคำตรงกับเสียงภาษาไทยถิ่นอีสาน	เฮือน	เฮือน, เฮือน	เรือน, เรือน
	ฮาง	ฮาง, ฮ้าง	ราง, ร้าง
	ฮอน	ฮอน, ฮ้อน	ร้อน, ร้อน
5. คำที่มี หน่วยเสียงพยัญชนะ /ซ/ ที่เป็นปฏิภาคกับเสียงพยัญชนะ /ช/ ในภาษาไทยมาตรฐาน ใช้พยัญชนะ “ซ” สะกดคำตรงกับเสียงภาษาไทยถิ่นอีสาน	ซาง	ซ้าง	ช้าง
	ซุ่ม	ซุ่ม	ซุ่ม
	เชือก	เชือก	เชือก
6. คำภาษาไทยถิ่นอีสานที่คำปรัวรรตประสมด้วยพยัญชนะต้น /ช/ /ส/ /ท/ และประสมด้วยสระที่มีเสียงคล้ายกัน (สระเสียงสั้น/ยาว) แต่มีความหมายเหมือนกัน สะกดคำโดยใช้พยัญชนะและสระตรงกับเสียงภาษาไทยถิ่นอีสานสมัยปัจจุบัน	เสียบ, เขียบ	เสียบ	เสียบ
	ลิก, ลีก, ชีก	ลีก, ชีก	ฉีก, ชีก
	ชะหน้อย, สนอย	ชะหน้อย, สนอย	สน้อย
7. คำภาษาไทยถิ่นอีสานที่คำปรัวรรตประสมคำด้วย พยัญชนะ สระ เสียงต่างกัน แต่มีความหมายเดียวกัน การสะกดคำตามเสียงภาษาไทยถิ่นอีสานสมัยปัจจุบัน	ซิ่นกอินทรี	ซิ่นกอินทรี	ซิ่นกอินทรี
	เหลิง, เหลื่อง เหลื่อง, เหลียง	เหลื่อง	เหลื่อง
	นมลาซาฮี, นมลาฮี, นมละชะฮี	นมราชสีห์	นมราชสีห์
8. คำที่เป็นคำเฉพาะในภาษาไทยถิ่นอีสาน ใช้เกณฑ์การสะกดคำตามเสียงภาษาไทยถิ่นอีสานสมัยปัจจุบัน	หมากเขือบา	หมากเขือบ้า	ลำโพงกลัก
	คันคาก	คันคาก	คางคก
	หอยจูบ	หอยจูบ	หอยชม
9. คำที่ถอดมาจากพยัญชนะต้น “ย หางยาว” อักษรไทยน้อย การสะกดคำอ่านใช้รูปพยัญชนะต้นเป็น “ออย”	อยาก	อยาก	อยาก
	อยุ	อยุ	อยุ
	อยาง	อยาง	อยาง
10. คำที่มีหน่วยเสียงพยัญชนะต้นเป็นเสียง ย นาลิก ที่พ้องเสียงพ้องความหมายกับคำภาษาไทยมาตรฐาน สะกดคำตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2554 แต่หากเป็นคำศัพท์เฉพาะในภาษาไทยถิ่นอีสานให้สะกดคำด้วย “ญ”	อยา	ออย่า	ออย่า
	หยา	หญ้า	หญ้า
	แมย	แมญ	ผู้หญิง
	ยอน	ญอน	เพราะ
	หญุม	หญุ่ม	ขุ่ม

ไม่ได้ (Intangible Cultural Heritage) ของชาติ สำหรับคำศัพท์ที่พ้องเสียงพ้องความหมายกับคำภาษาไทยมาตรฐานจะใช้เกณฑ์การสะกดคำตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2554 เพื่อให้อ่านเข้าใจได้ง่าย โดยกำหนดเกณฑ์การสะกด คำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานได้ 10 ข้อ ดังตารางที่ 6

จากตารางที่ 6 จะมีคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานบางคำที่เป็นคำเดียวกันแต่มีคำอ่านต่างกัน ซึ่งเกิดจากมีคำปรัวรรตเขียนสะกดต่างกัน การเก็บข้อมูลในฐานข้อมูลจะเก็บปรัวรรตและคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานไว้ทุกคำเพื่อให้สอดคล้องกับการออกเสียงพยัญชนะ และสระ ตามเอกสารต้นฉบับ

3.4. ผลการประเมินประสิทธิภาพคลังศัพท์

ผลการประเมินประสิทธิภาพคลังศัพท์คำปรัวรรต-คำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน-ภาษาไทยมาตรฐาน ในด้านการแปลงคำปรัวรรตของตำรับยาโบราณอีสานที่บันทึกด้วยอักษรไทยน้อยเป็นคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน (ตารางที่ 7) มีระดับความถูกต้อง (Accuracy) ร้อยละ 71.02 ประเภทที่มีความถูกต้องมากที่สุด คือ แบบ 1:1 ร้อยละ 51.72 รองลงมา คือ แบบ M:1 ร้อยละ 19.30 ส่วนความสัมพันธ์ประเภท 1:M และ M:N มีความถูกต้อง ร้อยละ 0 โดยเป็นความผิดพลาด ร้อยละ 28.98 แบ่งเป็นประเภท “คำที่ไม่รู้จัก” ร้อยละ 28.88 สาเหตุเกิดจากไม่มีคำปรัวรรตดังกล่าวในคลังศัพท์ หรือคำปรัวรรตมีคำอ่านมากกว่า 1 คำ ไม่สามารถเจาะจงคำอ่านที่ถูกต้องได้ และ “แปลงคำผิด” ร้อยละ 0.10 สาเหตุเกิดจากคำอ่านที่ได้มีความหมายไม่ถูกต้องตรงตามบริบท

ตารางที่ 7 ผลการประเมินความถูกต้องในการแปลงค่าปริวรรตของตัวรับยาโบราณอีสานเป็นคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานโดยใช้คลังศัพท์ คำปริวรรต-คำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน-คำอ่านภาษาไทยมาตรฐาน

ประเภทคำปริวรรต	จำนวนคำปริวรรต		ถูกต้อง		ผิดพลาด					
	ทดสอบ				คำไม่รู้จัก		แปลงคำผิด		รวม	
	คำ	ร้อยละ	คำ	ร้อยละ	คำ	ร้อยละ	คำ	ร้อยละ	คำ	ร้อยละ
1:1	4,396	55.44	4,101	51.72	292	3.68	3	0.04	295	3.72
M:1	1,775	22.39	1,530	19.30	240	3.03	5	0.06	245	3.09
1:M	1,308	16.50	0	0.00	1,308	16.50	0	0.00	1,308	16.50
M:N	450	5.68	0	0.00	450	5.68	0	0.00	450	5.68
รวม	7,929	100.00	5,631	71.02	2,290	28.88	8	0.10	2,298	28.98

ตารางที่ 8 ผลการประเมินประสิทธิภาพคลังศัพท์ด้านความเหมาะสมในการออกแบบและพัฒนาคลังศัพท์

ข้อ	รายการประเมิน	$\bar{X}$	SD	ประสิทธิภาพ
1	โครงสร้างคลังศัพท์มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้แปลงคำปริวรรตเป็นคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน และคำอ่านภาษาไทยมาตรฐาน	4.08	0.67	ดี
2	คำศัพท์ในคลังศัพท์ครอบคลุมคำศัพท์ในหมวดตำรายาโบราณอีสาน	3.83	0.58	ดี
3	จำนวนคำศัพท์มีเพียงพอสำหรับใช้ปริวรรตตำรายาโบราณอีสาน	3.55	0.82	ดี
4	ความเหมาะสมของเกณฑ์การสะกดคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน	3.91	0.72	ดี
	ค่าเฉลี่ยทุกรายการ	3.89	0.71	ดี

ผลการประเมินประสิทธิภาพด้านความเหมาะสมในการออกแบบและพัฒนาคลังศัพท์ (ตารางที่ 8) พบว่าค่าเฉลี่ยทุกรายการของกลุ่มตัวอย่างทั้งสองกลุ่มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยค่าเฉลี่ยทุกด้านอยู่ในระดับดี ($\bar{X} = 3.89$, $SD = 0.71$) โดยรายการที่มีค่าเฉลี่ยมากที่สุด คือ โครงสร้างฐานข้อมูลคลังศัพท์มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้แปลงคำปริวรรตเป็นคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานและคำอ่านภาษาไทยมาตรฐานอยู่ในระดับดี ($\bar{X} = 4.08$, $SD = 0.67$) และรายการประเมินที่มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ จำนวนคำศัพท์มีเพียงพอสำหรับใช้ปริวรรตตำรายาโบราณอีสานอยู่ในระดับดี ($\bar{X} = 3.55$, $SD = 0.82$)

4. วิจัยและสรุปผลการวิจัย

สรุปผลและวิจารณ์ผลการวิจัยได้ 5 ประเด็น ดังนี้

4.1 ฐานข้อมูลคลังศัพท์ “คำปริวรรต-คำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน-คำอ่านภาษาไทยมาตรฐาน” หมวดตำรายาโบราณอีสาน ใช้วิธีรวบรวมคำศัพท์จากตำรายาโบราณอีสานที่ปริวรรตมาจากตำรายาโบราณอีสานที่บันทึกในใบลานด้วยอักษรไทยน้อย และตัดคำด้วยมือ มีข้อดีคือ ในกรณีหมวดคำศัพท์เฉพาะด้านจะได้คำศัพท์ที่ตรงกับความต้องการมากกว่าการรวบรวมจากคลังศัพท์ที่มีการสร้างเอาไว้แล้ว การรวบรวมคำศัพท์ใช้เวลาน้อยกว่า เนื่องจากไม่ต้องเสียเวลาในการค้นหาและคัดเลือกคำศัพท์ที่ต้องการจากแหล่งข้อมูลหลายแหล่ง สำหรับการนำประโยคในตำรายาโบราณอีสานมาตัดคำด้วยมือพบว่ามีความผิดพลาดต่ำกว่าการตัดคำด้วยโปรแกรมตัดคำภาษาไทย (Thai Word Segmentation) เช่น PythaiNLP TLexPlus

หรือ Lexto เนื่องจากโปรแกรมเหล่านี้ไม่ได้สร้างจากฐานความรู้ทางภาษาที่เป็นภาษาไทยถิ่นอีสานโบราณ โดยเฉพาะ อย่างไรก็ตาม ระดับความถูกต้องในการตัดคำด้วยมือจะขึ้นอยู่กับความเชี่ยวชาญด้านภาษาศาสตร์ภาษาไทยถิ่นอีสาน และความรู้ด้านตำรายาอีสานของผู้สร้างคลังศัพท์เป็นหลัก นอกจากนี้ การตัดคำ 2 รอบ โดยรอบแรกตัดคำแบบยาวที่สุด และรอบที่ 2 นำคำประสมมาตัดคำแบบสั้นที่สุด โดยคำที่ตัดได้จะต้องเป็นคำที่มีความหมายนั้น ช่วยให้สามารถเพิ่มจำนวนคำศัพท์ในคลังศัพท์ได้มากขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากคำศัพท์ในตำรายาโบราณอีสานมีคำประสมอยู่ค่อนข้างมาก จึงสามารถนำมาแยกเป็นคำโดดที่มีความหมายแตกต่างกันได้หลายคำ

4.2 การพัฒนาคลังศัพท์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีคำศัพท์หลักเป็นคำปริวรรต ช่วยลดข้อจำกัดด้านการไม่มีแบบอักษรโบราณ (Ancient Font) ที่ใช้พิมพ์คำศัพท์หลัก ซึ่งนอกจากจะนำไปใช้แปลงคำปริวรรตของอักษรไทยน้อยได้แล้ว ยังพบว่า สามารถนำไปใช้แปลงคำปริวรรตของอักษรธรรมอีสานได้อีกด้วย เนื่องจากเป็นอักษรโบราณที่คนไทยถิ่นอีสานใช้จดบันทึกตำรายาเช่นเดียวกับอักษรไทยน้อยโดยไม่จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้างฐานข้อมูลและคำศัพท์ในคลังศัพท์แต่อย่างใด และการทำคำปริวรรตของอักษรไทยน้อยโดยใช้วิธีแปลงคำอ่านกลับเป็นคำปริวรรตพบว่า ช่วยให้ขั้นตอนการเตรียมคำศัพท์ทำได้เร็วกว่าการทำคำปริวรรตด้วยวิธีถอดรูปอักษรไทยน้อยจากเอกสารต้นฉบับโดยตรง ซึ่งการนำเกณฑ์การปริวรรตอักษรไทยน้อยเป็นอักษรไทยปัจจุบันมาใช้เป็นเกณฑ์ใน

การแปลงคำอ่านกลับเป็นคำปวิรรต ทำให้ผู้ที่มีความเชี่ยวชาญด้านการอ่านอักษรไทยน้อยในระดับพื้นฐานสามารถทำคำปวิรรตได้เร็วขึ้น

4.3 ประสิทธิภาพของการแปลงคำปวิรรตของอักษรไทยน้อยเป็นคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานด้วยเครื่อง เนื้อหาหมวดตำรายาโบราณอีสาน แม้ว่าจะขึ้นอยู่กับขนาดของคลังศัพท์เป็นสำคัญ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากคำปวิรรตที่มีสัดส่วนมากที่สุด 2 อันดับแรก เป็นคำปวิรรตที่มีความสัมพันธ์กับคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสาน แบบ 1:1 และ M:1 (ร้อยละ 61.53, และ ร้อยละ 36.10) เป็นกลุ่มคำที่ใช้เพียงคลังศัพท์ในการทำคำอ่านได้โดยไม่ต้องอาศัยคำบริบทที่อยู่โดยรอบมาช่วยทำคำอ่าน ประกอบกับในตำรายาโบราณอีสานมักมีการใช้คำเดิมซ้ำกันค่อนข้างมาก ดังนั้น แม้ว่าขนาดคลังศัพท์จะมีคำศัพท์เพียง 4,645 คำ แต่ประสิทธิภาพความถูกต้อง (Accuracy) ที่ได้ยังคงอยู่ในระดับปานกลางค่อนข้างดี (ร้อยละ 71.02)

4.4 ด้านความผิดพลาดของคลังศัพท์ที่มีอยู่ร้อยละ 28.98 พบว่า ส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับคำปวิรรตประเภท 1:M และ M:N ทั้งสิ้น (มีความถูกต้องร้อยละ 0) โดยจำแนกความผิดพลาดได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ (1) “คำไม่รู้จัก” ซึ่งเกิดจากการที่ไม่มีคำปวิรรตนั้นในคลังศัพท์ หรือ “เป็นคำปวิรรตที่มีคำอ่านมีมากกว่า 1 คำ” ทำให้เจาะจงคำอ่านไม่ได้ และ (2) ความผิดพลาดแบบ “แปลงคำผิด” ที่เกิดกับคำปวิรรตประเภท 1:M ที่มีคำอ่านในคลังศัพท์เพียง คำเดียว สาเหตุเกิดจากตำรายาที่รวบรวมมาสร้างคลังศัพท์มีคำศัพท์ไม่ครอบคลุมคำศัพท์ที่เป็นไปได้ทั้งหมด ความผิดพลาดประเภทแปลงคำผิดจะทำให้คำอ่านมีความหมายไม่สอดคล้องกับคำบริบทที่อยู่รอบคำดังกล่าว เช่น “หมู” (คำปวิรรต) หากมีคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานในคลังศัพท์เพียง 1 คำ คือ “หมู” เมื่อแปลงคำปวิรรตเป็นคำอ่านก็จะได้คำอ่านเป็นคำว่า “หมู” ในทุกประโยค ในขณะที่ในบางบริบทจะต้องมีคำอ่านเป็น “หมู” (พวก กลุ่ม) ไม่ใช่ “หมู” เป็นต้น ทั้งนี้ การลดความผิดพลาดกรณีดังกล่าว ชุดข้อมูลสำหรับสร้างคลังศัพท์จะต้องมีปริมาณมากและครอบคลุมคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานที่เป็นไปได้ทั้งหมดของคำปวิรรตแต่ละคำ

4.5 ความแตกต่างของฐานข้อมูลคลังศัพท์ที่พัฒนากับคลังคำศัพท์ภาษาอีสานโบราณอื่น ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่คล้ายคลึงกัน 2 เรื่อง ได้แก่ การพัฒนาพจนานุกรมอักษรธรรมอีสานของ นงคณัฐ ไพบูลย์ (Paiboon, 2009) และโสภณ พรหมโสตา (Phromsoda, 2010) ทั้ง 2 พจนานุกรมเป็นพจนานุกรมสำหรับใช้แปลเอกสารโบราณที่บันทึกด้วยอักษรธรรมอีสาน เนื้อหา

หมวดวรรณกรรม นิทานชาดก และพุทธทำนาย โครงสร้างการอธิบายคำศัพท์ของพจนานุกรมทั้ง 2 พจนานุกรมมีความคล้ายคลึงกันคือ ประกอบด้วยคำศัพท์หลักอักษรธรรมอีสาน คำอ่านแปลภาษาไทย และความหมาย และจัดเก็บคำศัพท์ในโครงสร้างข้อมูลแบบทรี (Tries) ใช้แปลเอกสารโบราณที่พิมพ์ด้วยอักษรธรรมอีสานเท่านั้น ไม่สามารถนำใช้กับเอกสารโบราณอักษรไทยน้อยได้ ในขณะที่แนวคิดการพัฒนาคำศัพท์ที่มีคำศัพท์หลักเป็นคำปวิรรตที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้แปลเอกสารโบราณอักษรธรรมอีสานและอักษรไทยน้อยได้ เพียงเพิ่มขั้นตอนการถ่ายถอดอักษรธรรมอีสานหรืออักษรไทยน้อยเป็นคำปวิรรต แล้วจึงนำคำปวิรรตไปค้นหาคำอ่านในคลังศัพท์ ดังนั้น การพัฒนาคำศัพท์ลักษณะนี้จึงช่วยลดการสร้างคลังคำศัพท์เฉพาะของอักษรโบราณแต่ละอักษรได้ รวมถึงสามารถนำแนวคิดนี้ไปใช้พัฒนาคำศัพท์สำหรับแปลเอกสารที่บันทึกด้วยอักษรต่างกันแต่บันทึกเป็นภาษาเดียวกันได้

อย่างไรก็ดี แม้ว่าจะระดับความถูกต้องในการตัดคำและการทำคำอ่านด้วยคลังศัพท์จะขึ้นอยู่กับจำนวนคำศัพท์ในคลังศัพท์ กล่าวคือ ยิ่งมีคำศัพท์มากก็ยิ่งเพิ่มความถูกต้องให้สูงเพิ่มมากขึ้น แต่สำหรับกรณีที่คำปวิรรตประเภท 1:M และ M:N นั้น ยังไม่สามารถใช้คลังศัพท์ที่มีขนาดใหญ่เพียงพอได้ แต่ต้องอาศัยคำบริบทที่อยู่รอบข้างมาช่วยเจาะจงคำอ่านที่ถูกต้องด้วย ดังนั้น ภายใต้โครงการวิจัยเดียวกันนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและนำเสนอขั้นตอนวิธีแปลงคำปวิรรตของอักษรไทยน้อยเป็นคำอ่านภาษาไทยถิ่นอีสานโดยใช้คลังศัพท์นี้ร่วมกับออนโทโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความถูกต้องในการทำคำอ่านให้เพิ่มสูงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยศิลปะและวัฒนธรรมอีสาน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลตำรายาโบราณอีสานมาใช้ในการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- Azizan, A., Jamal, N. N. S. A., Abdullah, M. N., Mohamad, M. & Khairudin, N. (2019). Lexicon-Based Sentiment Analysis for Movie Review Tweets. In Conference, 2019 1st International Conference on Artificial Intelligence and Data Sciences (AiDAS), 2019, 132–136.
- Bianco, G., Bruno, F., Tonazzini, A., Salerno, E., Savino, P., Zitová, B., et al. (2010). A Framework for Virtual Restoration of Ancient Documents by Combination of Multispectral and 3D Imaging. In Proceedings of Eurographics Italian Chapter Conference 2010, 1–7.

- Chamchong, R., Fung, C. & Chun, C. (2011). Character Segmentation from Ancient Palm Leaf Manuscript in Thailand. In Proceedings of the 2011 Workshop on Historical Document Imaging and Processing, 140–145.
- Chantao, R. (2015). Dictionary of 3 Languages (Thai Noi-Lao-Thai). Khon Kaen: Khon Kaen University. (in Thai)
- Chawsuan, E. (2015). The combinations of consonants or syllables in words found in literature written in the Thai Noi script. Silpakorn Journal, Issue 1 January–February 2015, 45–59. (in Thai)
- Chueaphun, C., Klomsae, A., Marukatat, S., & Chaijaruwanich, J. (2012). Lanna Dharma Printed Character Recognition using k-Nearest Neighbor and Conditional Random Fields. In Proceedings of the International Conference on Knowledge Discovery and Information Retrieval (KDIR–2012), Oct 4 – 7, 2012, 169–174.
- Fang, S. & Xu, L. (2022). Creation and Significance of Database of Dictionary of Cognate Words. In Dong, M., Gu, Y., Hong, JF. (eds) Chinese Lexical Semantics. CLSW 2021. Lecture Notes in Computer Science, vol 13250. Springer, Cham.
- https://doi.org/10.1007/978-3-031-06547-7_9
- Hollaus, F., Gau, M., & Sablatnig, R. (2012). Multispectral Image Acquisition of Ancient Manuscripts. In Proceeding of Progress in Cultural Heritage Preservation 4th International Conference, EuroMed 2012, Limassol, Cyprus, October 29 – November 3, 2012, 30–39.
- Inkeaw, P., Charoenkwan, P., Huang, HL., Marukatat, S., Ho, SY., & Chaijaruwanich, J. (2017). Recognition of handwritten Lanna Dhamma characters using a set of optimally designed moment features. Document Analysis and Recognition (IJDAR), December 2017, 20(4), 259–274.
- Intasorn, J., Gertphol, S., & Sammapun, U. (2021). Thai Sentiment Lexicon Construction. In Conference, 2021 13th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST), 2021, 123–128.
- Kaewplang, K. (2013). Thai noi script: Language relation of Thai-Lao cultural. Journal of Culture 52(4), 64–70. (in Thai)
- Khamluehan, C. (1992). Special orthography of the Inventive Dhamma script and Thai Noi. Journal of Srinakharinwirot University Maha Sarakham campus 11(1), 33–38. (in Thai)
- Kingkham, W. (2013). Thai dialects. Bangkok: Kasetsart University printing house. (in Thai)
- Lorattanachaiyong, I. (2017). Generating Thai sentiment lexicon from online reviews. Master of Arts Program in Linguistics Department of Linguistics Faculty of Arts Chulalongkorn University. (in Thai)
- Na Nagara, P. (1998). Journal of Prasert Na Nagara. Guidelines for translating Lanna native characters, Kasetsart University, 71–73. (in Thai)
- Natarajan, J., & Sreedevi, I. (2017). Enhancement of ancient manuscript images by log based binarization technique. AEU – International Journal of Electronics and Communications, 75, 15–22.
- National Library of Thailand. (2002). Collection of Lao language lexicals in ancient documents. Bangkok: Prachachon. (in Thai)
- Office of the Royal Society. (2011). Royal Institute Dictionary 2011 (2nd ed.). Bangkok: Nanme.
- Office of the Royal Society. (n.d.). Terminology of the Office of the Royal Society. Retrieved July,7,2022, from <https://coined-word.orst.go.th>.
- Paiboon, N. (2009). Isan Dhamma alphabet dictionary. Independent study Master of Science department of computer science Khon Kaen University. (in Thai)
- Paiboonwangcharoen, P. (1999). Transliteration of ancient documents. Manutsat Paritat: Journal of Humanities 21, 25–30. (in Thai)
- Phimworamethakun, B. & Phimworamethakun, N. (2002). Isan language dictionary: Speake Isan. Khonkhen: Khlang Nana Witthaya. (in Thai)
- Phromsoda, S. (2010). Translation of Isan script into Thai. Independent study Master of Science computer science Khon Kaen University. (in Thai)
- Pinthong, P. (1989). Encyclopedia of Isan – Thai – English languages. Bangkok: Siritham Printing House.
- Polsri, J. (2021). The Development of a Framework for Transliterating Thai Noi Characters into Isan Language Pronunciation. Ph.D. Thesis in Information Technology Suranaree University. (in Thai)
- Punnotok, T. (2006). Ancient Thai script, Lai Sue Thai script, and the evolution of Thai script. Bangkok: Chulalongkorn University Printing House. (in Thai)
- Raksuthi, S. (2011). Isan-Central Thai Dictionary. Bangkok: Phatthana Sueksa. (in Thai)
- Romulus, P., Maraden, Y., Purnamasari, P. D., & Ratna, A. A. P. (2015). An analysis of optical character recognition implementation for ancient Batak characters using K-nearest neighbors' principle. In the proceeding of 2015 International Conference on Quality in Research (QiR), August 10–13, 2015, Lombok, Indonesia, 47–50.
- Sattanakho, K. (1999). Special orthography in Isan-Lanna script with stone inscription main I. Maha Sarakham Journal 17(2), 64–70. (in Thai)
- Somdet Phra Maha Wirawong (Tissamah Thera). (1998). Isan-central Thai dictionary Somdet Phra Maha Wirawong's aspirations edition (Tissamah Thera). Bangkok: Amarin Printing and Publishing. (in Thai)
- Somjitsripanya, S. (1982). Thai Noi script, Kab script, Soi script. Memorial of the royal funeral service of Phraratchasinsophit (Tha Phutthasorn Mahathara), the Ecclesiastical Provincial Governor of Mahasarakham Province, June 20, 1982. (in Thai)

ความถี่ของแอลลีลและการวิเคราะห์ค่าสถิติจากลำดับซ้ำเรียงต่อเนื่องแบบสั้น บนออโตโซม จำนวน 15 ตำแหน่ง ของประชากรเมียนมาในประเทศไทย

Allele Frequencies and Statistical Analysis of 15 Autosomal STR

Loci of Myanmar Population in Thailand

ทยาวิรุ รมแก้ว^{1,2} และ สุนิษา โอบอ้อม^{3*}

Tayawee Romgaew^{1,2} and Sunisa Aobaom^{3*}

¹บัณฑิตศึกษา สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

²สำนักงานพิสูจน์หลักฐานตำรวจ กองพิสูจน์หลักฐานกลาง กลุ่มงานตรวจชีววิทยาและดีเอ็นเอ

³ภาควิชาเทคนิคการแพทย์ คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

¹Graduate Program in Forensic Science, Faculty of Allied Health Sciences, Thammasat University, Rangsit Campus

²Biology and DNA Sub-Division, Central Police Forensic Science Division, Office of Police Forensic Science

³Department of Medical Technology, Faculty of Allied Health Sciences, Thammasat University, Rangsit Campus

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความถี่ของแอลลีลจากลำดับซ้ำต่อเนื่องแบบสั้นบนออโตโซม (Autosomal Short Tandem Repeat; Autosomal STR) จำนวน 15 ตำแหน่ง และศึกษาลักษณะจีโนไทป์ ของประชากรเมียนมาในประเทศไทยที่ไม่มีความสัมพันธ์กันทางสายเลือดทั้งหมด 150 ตัวอย่าง จากใช้ฐานข้อมูลดีเอ็นเอ กองพิสูจน์หลักฐานกลาง โดยคำนวณความถี่ของแอลลีลจากลำดับซ้ำต่อเนื่องแบบสั้นบนออโตโซม ที่ถูกตรวจสอบด้วยชุดตรวจ AmpFISTR Identifier plus PCR Amplification Kit (Thermo Fisher Scientific, USA) และ Investigator IDplex GO (Qiagen, DEU) ด้วยโปรแกรม STR-Genotype และ โปรแกรม STRAF ผลการศึกษาพบว่าทุกตำแหน่งเป็นไปตามสมมติฐานของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก ยกเว้นตำแหน่ง D2S1338 และ vWA มีความถี่ของแอลลีลที่วิเคราะห์ได้อยู่ในช่วง 0.0033 ถึง 0.5333 ค่าเฮเทอโรไซโกซิตีอยู่ในช่วง 0.6267 ถึง 0.8600 ค่า Probability of Identity อยู่ในช่วง 0.0304 ถึง 0.2081 และ ค่า Probability of paternity exclusion อยู่ในช่วง 0.3753 ถึง 0.7494 เมื่อนำความถี่ของแอลลีลและลักษณะจีโนไทป์ของประชากรเมียนมา ในประเทศไทย เปรียบเทียบกับประชากรเมียนมาที่อพยพเข้ามาในประเทศจีน ประชากรอเมริกาเชื้อสายแอฟริกา เชื้อชาติคอเคเซียน เชื้อชาติลาตินอเมริกา และเชื้อชาติเอเชีย ด้วยค่า Fst และกราฟ PCAพบว่าแต่ละประชากรมีการแยกกลุ่มแตกต่างกัน จากการศึกษาดังกล่าวพบว่ามีความเหมาะสม และมีความหลากหลายที่เพียงพอต่อการนำไปใช้เป็นค่าอ้างอิงในงานนิติวิทยาศาสตร์ได้ต่อไป

คำสำคัญ: ประชากรเมียนมาในประเทศไทย ลำดับซ้ำแบบสั้นบนออโตโซม ความถี่ของแอลลีล นิติพันธุศาสตร์

ABSTRACT

The aim of the present study is to investigate the allele frequencies of 15 using Autosomal Short Tandem Repeat (Autosomal STR) loci were established from 150 unrelated Myanmar Population in Thailand from the Central police forensic science database. Allele frequencies were calculated from Autosomal STR markers which verified by AmpFISTR Identifier plus PCR Amplification Kit (Thermo Fisher Scientific, USA) and Investigator IDplex GO kit (Qiagen, DEU). The results shown the allele frequencies were calculated under Hardy-Weinberg equilibrium except D2S1338 and vWA. It is found the allele frequencies range from 0.0033 to 0.5333, heterozygosity ranged from 0.6267 to 0.8600, probability of identity from 0.0304 to 0.2081, and probability of paternity exclusion from 0.3753 to 0.7494. The allele frequency and Genotype appearance of Myanmar populations in Thailand was compared with other countries including Myanmar population in China, African American, Caucasian, Hispanic and Asian by Fst and PCA analysis. The results demonstrated that there was the difference each population. This study is a powerful tool to be used as a reference in genetic forensic science.

KEYWORDS: Myanmar population in Thailand; autosomal STR; allele frequency; forensic genetics

*Corresponding Author: sunisa.aobaom@gmail.com

Received: 20/01/2022; Revised: 28/08/2022; Accepted: 21/12/2022

1. บทนำ

การทำงานทางด้านพันธุนิติวิทยาศาสตร์ในประเทศไทย ได้มีการตรวจดีเอ็นเอลำดับซ้ำเรียงต่อเนื่องแบบสั้นบนออโตโซม (Autosomal Short Tandem Repeat, Autosomal STR) ของบุคคลและวัตถุพยานที่เกี่ยวข้องกับคดีอาญาต่าง ๆ ทั่วประเทศ และได้เก็บรวบรวมภาพรวมดีเอ็นเอ (DNA profile) ไว้ในระบบฐานข้อมูลดีเอ็นเอที่กระจายอยู่ตามหน่วยงานต่าง ๆ ของประเทศไทย จากฐานข้อมูลความถี่ของแอลลีลที่มีบทบาทสำคัญในนิติพันธุศาสตร์อย่าง Scientific Working Group on DNA Analysis Methods (SWGAM) ได้กำหนดไว้ว่า การระบุการตรงกันของภาพรวมดีเอ็นเอ หรือการระบุความสัมพันธ์ทางเครือญาติที่ใช้ ลำดับซ้ำแบบสั้นบนออโตโซมจะต้องมีการวิเคราะห์ค่าทางสถิติไว้ด้วย (random match probability หรือ likelihood ratio) ซึ่งคำนวณโดยใช้ความถี่ของแอลลีล (SWGAM, 2017) ความถี่ของแอลลีลนั้นจะมีความแตกต่างกันในแต่ละประชากร โดยมีการศึกษาพบว่าความถี่ของแอลลีลของประชากรชาวอเมริกาเชื้อสายแอฟริกัน เชื้อชาติคอเคเซียน เชื้อชาติลาตินอเมริกา และเชื้อชาติเอเชีย มีความแตกต่างกัน (Hill *et al.*, 2013) และความถี่ของแอลลีลของประชากรสัญชาติเดียวกันยังมีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ (Shotivaranon *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2012; Xiang *et al.*, 2016) ค่า เฮเทอโรไซโกซิตี (Hobs) ค่า probability of identity (PI) probability of paternity exclusion (PPE) และการทดสอบสมมูลของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก (HWE) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความหลากหลายของประชากร โดยค่า Hobs และ PPE มีค่ามาก แสดงให้เห็นว่าประชากรนั้นมีความหลากหลายสูง แต่ค่า PI มีค่ามาก จะแสดงให้เห็นว่าประชากรนั้นมีความหลากหลายต่ำ การทดสอบสมมูลของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก (HWE) แสดงให้เห็นว่าความถี่ของจีโนไทป์คงที่ และแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งนั้นมีเฮเทอโรไซกัสแอลลีลมากกว่าโฮโมไซกัสแอลลีล (Butler, 2015) การศึกษาความถี่ของแอลลีลของ 609 ของประชากรเมียนมาที่อพยพเข้ามาในประเทศไทยจีน ของตำแหน่งลำดับซ้ำแบบสั้นบนออโตโซม จำนวน 19 ตำแหน่ง (Chen *et al.*, 2017) พบว่าค่า Power of discrimination (PD) อยู่ในช่วง 0.9807 ถึง 0.7801 ค่า PPE มีค่ามากกว่า 0.00000 และทุกตำแหน่งผ่านการทดสอบสมมูลของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก ($\geq 0.05/10 = 0.0026$)

ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยไม่เพียงแต่เก็บฐานข้อมูลภาพรวมดีเอ็นเอของประชากรไทยเท่านั้น หากยังมีการเก็บฐานข้อมูลดังกล่าวในประชากรอื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็น

ประชากรเมียนมา ลาว กัมพูชา หรือเวียดนาม เป็นต้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลที่ได้มาจากการเกิดคดีอาญาในประเทศไทย โดยการก่อคดีอาญาในประเทศนั้นไม่ได้มีเหตุมาจากคนไทยมีอยู่หลายคดีหนึ่งในนั้นคือการก่อคดีอาญาจากประชากรเมียนมาที่เข้ามาท่องเที่ยวหรืออพยพเข้ามา ทำงานในประเทศซึ่งในแต่ละปีมีประชากรเมียนมาอพยพเข้ามามีจำนวนมากโดยสถิติการอพยพเข้าประเทศด้วยวิธีถูกกฎหมายของประชากรดังกล่าวมีจำนวนเพิ่มขึ้นทุกปี โดยในปี 2557 มีจำนวนผู้อพยพ 1,031,643 คน ปี 2558 มีจำนวน 1,427,224 คน ปี 2559 มีจำนวน 1,597,878 คน และปี 2560 มีจำนวนมากถึง 2,062,277 คน มา คิดเป็นร้อยละ 69 ของแรงงานที่เข้ามาในประเทศไทย ซึ่งเป็นจำนวนผู้อพยพเข้าประเทศที่สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่ม ประชากรอพยพจากกัมพูชา และลาว (Hartkins, 2019) แสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการวิเคราะห์หาความถี่ของแอลลีลเพื่อใช้อ้างอิงในงานนิติวิทยาศาสตร์

ในประเทศไทยได้มีการวิเคราะห์ความถี่ของแอลลีลในกลุ่มประชากรต่าง ๆ ในไทยด้วยชุดตรวจต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์ความถี่ของแอลลีลของลำดับซ้ำเรียงต่อเนื่องแบบสั้นบนออโตโซมจำนวน 15 ตำแหน่ง โดยเก็บตัวอย่างประชากรไทย จำนวน 210 คน โดยใช้ชุดตรวจ AmpFLSTR Identifier PCR Amplification kit (Thermo Fisher Scientific, USA) (Rerkamnuaychoke *et al.*, 2006) การวิเคราะห์ความถี่ของแอลลีลของลำดับซ้ำเรียงต่อเนื่องแบบสั้นบนออโตโซม จำนวน 15 ตำแหน่ง ในประชากรไทย โดยเก็บตัวอย่างของประชากรไทยเชื้อสายเขมร จำนวน 31 คน และประชากรชนเผ่ากุ่ม จำนวน 47 คน โดยใช้ชุดตรวจ AmpFLSTR Identifier PCR Amplification kit (Thermo Fisher Scientific, USA) (Chantakot *et al.*, 2017) หรือการวิเคราะห์ความถี่ของแอลลีลของลำดับซ้ำเรียงต่อเนื่องแบบสั้นบนออโตโซมจำนวน 21 ตำแหน่ง ในประชากรไทย โดยเก็บตัวอย่างประชากรไทยที่บริเวณสามจังหวัดชายแดนภาคใต้จำนวน 249 คน โดยใช้ชุดตรวจ GlobalFiler PCR Amplification Kit (Thermo Fisher Scientific, USA) (Boonderm *et al.*, 2017) เป็นต้น

จากการศึกษาข้างต้นชี้ให้เห็นว่าการวิเคราะห์ความถี่ของแอลลีลในแต่ละเชื้อชาติมีความจำเป็นอย่างยิ่งอีกทั้งประเทศไทยยังไม่เคยมีการศึกษาข้อมูลค่าความถี่ของแอลลีลของประชากรเมียนมาในประเทศไทยมาก่อน ทำให้งานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าความถี่ของแอลลีลและการวิเคราะห์ค่าสถิติจากลำดับซ้ำเรียงต่อเนื่องแบบสั้นบน

ออโทโซม จำนวน 15 ตำแหน่ง ของประชากรเมียนมาในประเทศไทย โดยทำการเก็บข้อมูลภาพรวมดีเอ็นเอของลำดับซ้ำแบบสั้นย้อนหลังตั้งแต่ปี พ.ศ. 2557 ถึง พ.ศ. 2562 จากฐานข้อมูลดีเอ็นเอ กองพิสูจน์หลักฐานกลาง จำนวน 150 คน เพื่อวิเคราะห์ความถี่ของแอลลีลและค่าสถิติต่าง ๆ ประกอบด้วย ค่า Hobs, ค่า Pi ค่า PPE และการทดสอบความเป็น HWE โดยมีตำแหน่งที่วิเคราะห์จำนวน 15 ตำแหน่ง ดังนี้ D8S1179 D21S11 D7S820 CSF1PO D3S1358 TH01 D13S317 D16S539 D2S1338 D19S433 vWA TPOX D18S51 D5S818 และ FGA เพื่อให้สามารถปรับใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับใช้ในการคำนวณค่าสถิติที่เกี่ยวข้องได้แม่นยำขึ้น และวิเคราะห์ลักษณะจีโนไทป์ของประชากรเมียนมาในประเทศไทย เพื่อใช้ประโยชน์ฐานข้อมูลดีเอ็นเอประชากรเมียนมาที่เกี่ยวข้องกับคดีอาญาในทางนิติวิทยาศาสตร์ต่อไป

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลภาพรวมดีเอ็นเอ

การศึกษานี้เก็บข้อมูลภาพรวมดีเอ็นเอของลำดับซ้ำแบบสั้นบนออโทโซม จำนวน 15 ตำแหน่ง จากประชากรสัญชาติเมียนมาที่อาศัยในประเทศไทย จำนวน 150 คน ที่ถูกบันทึกไว้ในฐานข้อมูลดีเอ็นเอ กองพิสูจน์หลักฐานกลาง โดยผู้วิจัยจะทราบข้อมูลเพียงภาพรวมดีเอ็นเอ สัญชาติ และเพศ เท่านั้น และจะลบข้อมูลหลังจากที่ดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้น โดยภาพรวมดีเอ็นเอจากประชากรเมียนมาในประเทศไทยทั้ง 150 คน นั้น ถูกทดสอบโดยกลุ่มงานตรวจชีววิทยาและดีเอ็นเอ กองพิสูจน์หลักฐานกลาง สำนักงานพิสูจน์หลักฐานตำรวจ และบันทึกไว้ในฐานข้อมูลกลาง เป็นภาพรวมดีเอ็นเอที่ตรวจด้วยชุดน้ำยาสำเร็จรูป AmpFISTR Identifier plus PCR Amplification Kit (Thermo Fisher Scientific, USA) และ the Investigator IDplex GO kit (Qiagen, DEU) ที่มีตำแหน่งตรวจดังนี้ D8S1179, D21S11, D7S820, CSF1PO, D3S1358, TH01, D13S317, D16S539, D2S1338, D19S433, vWA, TPOX, D18S51, D5S818 และ FGA (QIAGEN, 2012) โดยการศึกษาวิจัยนี้ผ่านกระบวนการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในคนจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในคน มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์ (COA No. 122/2563)

2.2 การวิเคราะห์ข้อมูลและคำนวณค่าสถิติ

ความถี่ของแอลลีล Hobs, PI, และ PPE วิเคราะห์จากภาพรวมดีเอ็นเอของประชากรเมียนมาในประเทศไทย 150 คน ด้วยโปรแกรม STR_Genotype เป็นการนำภาพรวมดีเอ็นเอจากอาสาสมัครวิเคราะห์โดยดาวน์โหลดโปรแกรมจาก <http://www.cstl.nist.gov/biotech/strbase/software.htm> (Hill et al., 2013) และการทดสอบของสมดุลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก (HWE) และการทดสอบ principal components analysis (PCA) ด้วยโปรแกรม STRAF ซึ่งสามารถคำนวณได้ผ่านทาง <http://cmpg.unibe.ch/shiny/STRAF/> (Gouy et al., 2017)

2.3 สูตรการคำนวณค่าสถิติประชากร

2.3.1 Observed Heterozygosity (Hobs)

ค่าที่บอกความหลากหลายของแอลลีลในตำแหน่งที่สนใจ โดยค่า Hobs มีมาก หมายความว่าความหลากหลายของแอลลีลที่ตำแหน่งที่สนใจมีสูง และมีโอกาสที่จะพบจีโนไทป์ที่เหมือนกันโดยบังเอิญในกลุ่มประชากรที่สนใจน้อย (Butler, 2017) มีสูตรคำนวณดังต่อไปนี้

$$H_{obs} = 1 - \frac{\text{จำนวนความถี่จีโนไทป์แบบโฮโมไซกัส}}{\text{จำนวนประชากรที่สนใจ}}$$

2.3.2 Probability of Identity (Pi)

ค่าความเป็นไปได้ที่บุคคล 2 คนจะมีจีโนไทป์ที่เหมือนกัน ในตำแหน่งที่สนใจโดยบังเอิญ (Butler, 2017) มีสูตรคำนวณดังต่อไปนี้

$$P_i = \sum \frac{\text{ความเป็นไปได้ของจีโนไทป์แต่ละจีโนไทป์}^2}{\text{ในตำแหน่งที่สนใจ}}$$

2.3.3 Probability of paternity exclusion (PPE)

ค่าความเป็นไปได้ที่จะคัดผู้ชายที่อาจจะเป็นบิดาโดยบังเอิญออก (Butler, 2017) มีสูตรคำนวณดังต่อไปนี้โดย p คือ ความถี่ของแอลลีล, i คือ แอลลีลที่สนใจ, n คือ จำนวนประชากรที่สนใจ

$$PPE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n p_i^2 - 2(\sum_{i=1}^n p_i^2)^2 + 2 \sum_{i=1}^n p_i^4 - \sum_{i=1}^n p_i^3 + 3 \sum_{i=1}^n p_i^3 + 3 \sum_{i=1}^n p_i^2 \sum_{i=1}^n p_i^3}{\sum_{i=1}^n p_i^3 + 3 \sum_{i=1}^n p_i^3 + 3 \sum_{i=1}^n p_i^2 \sum_{i=1}^n p_i^3}$$

3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ความถี่ของแอลลีลของประชากรเมียนมาในประเทศไทยจำนวน 150 คน

จากการคำนวณค่าความถี่แอลลีลจากประชากรสัญชาติเมียนมาจำนวน จำนวน 150 คน ด้วยโปรแกรม STR_Genotype พบว่า ช่วงค่าความถี่แอลลีลที่พบอยู่ในช่วง 0.0033 ถึง 0.5333 (ตารางที่ 1) ซึ่งเมื่อทำการศึกษาลักษณะของตัวอย่างภาพรวมดีเอ็นเอของบุคคล ของ Butler นั้น พบว่า การคำนวณค่าความถี่แอลลีลที่เหมาะสม สามารถวิเคราะห์ผลได้น่าเชื่อถือจะมีจำนวนตั้งแต่ 100–150 ตัวอย่าง (Butler, 2017) ซึ่งในการทดสอบนี้เป็นไปตามงานวิจัยดังกล่าวทำให้สามารถปรับใช้เป็นค่าอ้างอิง สำหรับใช้ในการคำนวณค่าสถิติที่เกี่ยวข้องได้แม่นยำได้

3.2 ค่าสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์ประชากรเมียนมาในประเทศไทยจำนวน 150 คน

ค่าสถิติต่าง ๆ (Hobs, PI, และ PPE) ที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม STR_Genotype ดังที่แสดงในตารางที่ 2 พบว่า ค่า Hobs พบว่าอยู่ในช่วง 0.6267 (ตำแหน่ง TPOX) ถึง 0.8600 (ตำแหน่ง D8S1179 และ ตำแหน่ง D2S1338) ค่า PI พบว่าอยู่ในช่วง 0.0304 (ตำแหน่ง FGA) ถึง 0.2081 (ตำแหน่ง TPOX) และค่า PPE พบว่าอยู่ในช่วง 0.7494 (ตำแหน่ง FGA) ถึง 0.3753 (ตำแหน่ง TPOX) จากค่าสถิตินี้แสดงให้เห็นว่า ตำแหน่ง TPOX เป็นตำแหน่งที่มีความหลากหลายน้อยที่สุดในกลุ่มประชากรเมียนมาในประเทศไทย ซึ่งสอดคล้องกับประชากรเมียนมาที่อพยพเข้ามาในประเทศจีนที่ตำแหน่ง TPOX เป็นตำแหน่งที่มีความหลากหลายน้อยที่สุด (Chen *et al.*, 2017)

การทดสอบสมมติฐานของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์กด้วยโปรแกรม STRAF ดังที่แสดงในตารางที่ 1 พบว่า ทุกตำแหน่งผ่านการทดสอบสมมติฐานของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก (HWE) ($P\text{-value} \geq 0.05$) ยกเว้นตำแหน่ง D2S1338 และ ตำแหน่ง vWA ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในประชากรที่นำมาใช้ในการศึกษานี้มีโฮโมไซกัสแอลลีลมากกว่าเฮเทอโรไซกัสแอลลีล ทำให้ความหลากหลายของประชากรไม่มากพอที่จะวิเคราะห์ความถี่ของแอลลีลได้อย่างครบถ้วน ถ้ามีการเพิ่มปริมาณมากขึ้นจะส่งผลทำให้ตำแหน่ง D2S1338 และ ตำแหน่ง vWA จะทำให้มีความหลากหลายมากพอและผ่านการทดสอบสมมติฐานของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์กได้

การทดสอบ principal components analysis (PCA) ด้วยโปรแกรม STRAF (HWE) เมื่อเปรียบเทียบกับ

ประชากรเมียนมาที่อพยพเข้ามาในประเทศจีน (รูปที่ 1) พบว่า ค่าความแตกต่างระหว่างประชากรย่อย (Fst) ของระหว่างทั้ง 2 ประชากร คือ 0.0008 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างพันธุกรรมมีความแตกต่างกันในระดับน้อยมาก (Wright, 1978; Hartl and Clark, 1997) และเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วย PCA แสดงให้เห็นว่าจุดศูนย์กลางของกราฟ PCA ของทั้งสองประชากรนั้นอยู่จุดเดียวกัน แต่พบว่าบางจุดของประชากรเมียนมาในประเทศไทย กระจ่ายแยกออกจากประชากรเมียนมาที่อพยพเข้ามาในประเทศจีน แสดงให้เห็นว่า ทั้งสองประชากรมีความแตกต่างกันอยู่ ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากความแตกต่างของพื้นที่ของประชากรในกลุ่มเชื้อชาติเดียวกันที่จะมีความถี่ของแอลลีลแตกต่างกัน (Shotivaranon *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2012; Xiang *et al.*, 2016)

เมื่อเปรียบเทียบกับประชากรเชื้อชาติต่าง ๆ จากการศึกษาความถี่ของแอลลีลของประชากรอเมริกันเชื้อสายต่าง ๆ (Hill *et al.*, 2013) (รูปที่ 2) พบว่า ค่า Fst ของระหว่างประชากรเมียนมาในประเทศไทยกับประชากรชาวอเมริกาเชื้อสายแอฟริกัน เชื้อชาติคอเคเซียน เชื้อชาติลาตินอเมริกา คือ 0.0139, 0.0106, 0.0087 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างพันธุกรรมระหว่างกลุ่มประชากร 2 กลุ่ม มีความแตกต่างกันระดับปานกลาง (Wright, 1978; Hartl and Clark, 1997) และเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วย PCA แสดงให้เห็นว่าจุดศูนย์กลางของกราฟ PCA ของประชากรชาวอเมริกาเชื้อสายแอฟริกัน เชื้อชาติคอเคเซียน เชื้อชาติลาตินอเมริกา มีจุดศูนย์กลางกราฟ PCA แยกออกจากกันอย่างชัดเจนจากกลุ่มประชากรเมียนมาในประเทศไทย ส่วนในกลุ่มประชากรเมียนมาที่อพยพเข้ามาในประเทศจีน และประชากรเชื้อชาติเอเชีย เมื่อเปรียบเทียบกับประชากรเมียนมาในประเทศไทย พบว่ามีค่า Fst อยู่ที่ 0.008 และ 0.0039 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างพันธุกรรมมีความแตกต่างกันในระดับน้อยมาก (Wright, 1978; Hartl and Clark, 1997) และมีจุดศูนย์กลางเดียวกัน

จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ประชากรชาวอเมริกาเชื้อสายแอฟริกัน เชื้อชาติคอเคเซียน เชื้อชาติลาตินอเมริกา และเชื้อชาติเอเชีย มีความแตกต่างกันในขณะที่ ประชากรเมียนมาในประเทศไทย ประชากรเมียนมาที่อพยพเข้ามาในจีน และประชากรเชื้อชาติเอเชียในอเมริกา มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกัน จึงทำให้จุดศูนย์กลางของทั้ง 3 ประชากรอยู่ในจุดเดียวกัน อย่างไรก็ตามจุดกราฟบางจุดของทั้ง 3 ประชากรมีกระจ่ายแยกออกจากจุด

ตารางที่ 1 ความถี่ของแอลลีลประชากรเมียนมาในประเทศไทยจำนวน 150 คน

Allele	D8S1179	D21S11	D7S820	CSF1PO	D3S1358	TH01	D13S317	D16S539	D2S1338	D19S433	vWA	TPOX	D18S51	D5S818	FGA
6.0						0.1133									
7.0			0.0033			0.2267	0.0100							0.0267	
8.0	0.0033		0.1633	0.0067		0.0700	0.3300	0.0267				0.5333			
9.0			0.0800	0.0567		0.4633	0.1133	0.2267				0.1300		0.0933	
9.3						0.1033									
10.0	0.1533		0.1933	0.1867		0.0233	0.1333	0.1200				0.0400	0.0033	0.2100	
11.0	0.0533		0.2833	0.2800			0.1700	0.2533		0.0033		0.2667	0.0067	0.3500	
12.0	0.1200		0.2400	0.3567			0.1500	0.2233		0.0467		0.0300	0.0767	0.1767	
12.2										0.0167					
13.0	0.1733		0.0300	0.1067			0.0767	0.1367		0.2467	0.0033		0.1167	0.1267	
13.2										0.0633					
14.0	0.2167		0.0067	0.0067	0.0367		0.0167	0.0133		0.2733	0.1733		0.2167	0.0167	
14.2										0.1100					
15.0	0.1833				0.3000				0.0033	0.0700	0.0433		0.1900		
15.2										0.1167					
16.0	0.0767				0.3333				0.0033	0.0133	0.1867		0.1433		
16.2										0.0267					
17.0	0.0200				0.2433				0.0767		0.2600		0.0867		
17.2										0.0133					
18.0					0.0767				0.1167		0.1800		0.0367		0.0167
19.0					0.0100				0.1767		0.1167		0.0267		0.0633
20.0									0.1400		0.0367		0.0367		0.0667
20.2															0.0033
21.0									0.0433				0.0267		0.1500
21.2															0.0033
22.0									0.0600				0.0167		0.1633
22.2															0.0067
23.0									0.1700				0.0067		0.2000
23.2															0.0167
24.0									0.1433				0.0033		0.0933
24.2															0.0267
25.0									0.0600				0.0033		0.1167
25.2															0.0033
26.0									0.0033				0.0033		0.0600
27.0									0.0033						0.0100
28.0		0.0600													
28.2		0.0067													
29.0		0.2500													
30.0		0.2267													
30.2		0.0667													
31.0		0.0467													
31.2		0.0900													
32.0		0.0133													
32.2		0.1900													
33.2		0.0467													
34.2		0.0033													

ตารางที่ 2 ค่าสถิติต่าง ๆ ของประชากรเมียนมาในประเทศไทยจำนวน 150 คน

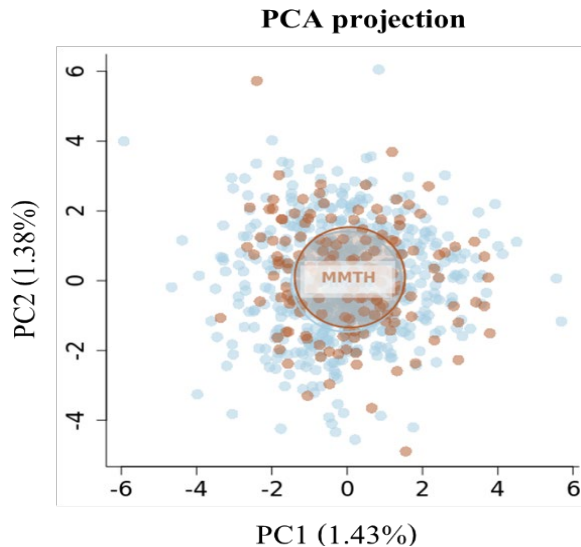
Population statistic	D8S1179	D21S11	D7S820	CSF1PO	D3S1358	TH01	D13S317	D16S539	D2S1338	D19S433	vWA	TPOX	D18S51	D5S818
H_{ex}	0.8600	0.8267	0.8267	0.8000	0.7733	0.6933	0.8133	0.8333	0.8600	0.7933	0.8000	0.6267	0.8400	0.8267
HWE	0.9250	0.2670	0.5060	0.7170	0.9650	0.5550	0.2440	0.3680	0.0010	0.7070	0.0100	0.3780	0.1250	0.7990
PI	0.0481	0.0528	0.0817	0.1127	0.1252	0.1231	0.0719	0.0782	0.0389	0.0525	0.0658	0.2081	0.0379	0.0880
PPE	0.6827	0.6645	0.5879	0.5165	0.4896	0.4829	0.6199	0.6038	0.7393	0.6635	0.6379	0.3753	0.7313	0.5729

ศูนย์กลาง แสดงให้เห็นว่า ทั้ง 3 ประชากรนี้ยังมีความแตกต่างกัน

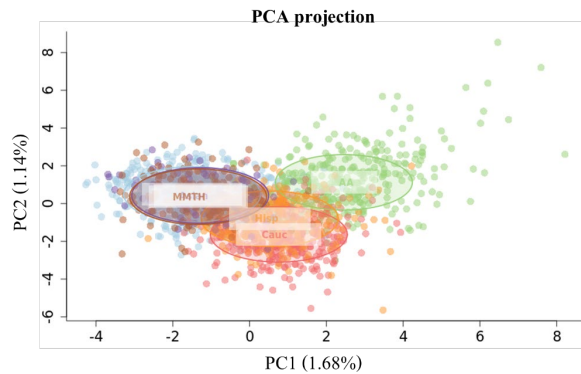
4. สรุปผลการทดลอง

จากการการศึกษาความถี่ของแอลลีลและค่าสถิติประชากรของประชากรเมียนมาในประเทศไทย จากประชากรเมียนมาในประเทศไทยจำนวน 150 คน ค่าสถิติประชากรของประชากรนี้ แสดงให้เห็นว่าตำแหน่ง TPOX เป็นตำแหน่งที่มีความหลากหลายน้อยที่สุดในกลุ่มประชากรเมียนมาในประเทศไทยและพบว่าตำแหน่ง D2S1338 และ ตำแหน่ง vWA ไม่ผ่านการทดสอบ HWE เนื่องจาก ตำแหน่งดังกล่าวนี้มีความหลากหลายของแอลลีลน้อย (Homozygous allele) จึงส่งผลทำให้ไม่ผ่าน

การทดสอบ HWE ซึ่งในงานวิจัยครั้งต่อไป หากเก็บตัวอย่างข้อมูลภาพรวมดีเอ็นเอของลำดับซ้ำแบบสั้นบนออโทโซมมากขึ้น อาจส่งผลให้ตำแหน่งทั้ง 2 สอง มีความหลากหลายที่มากขึ้นและสามารถผ่านการทดสอบ HWE ได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าความถี่ของแอลลีลทั้งหมดก็ยังสามารถใช้ในการอ้างอิงในการวิเคราะห์ทางด้านสถิติในงานนิติวิทยาศาสตร์ได้ และเมื่อนำความถี่ของแอลลีลแต่ละประชากรมาเปรียบเทียบกับค่า F_{st} และกราฟ PCA ทำให้เห็นว่าประชากรเมียนมาในประเทศไทย ประชากรเมียนมาที่อพยพเข้าไปในประเทศไทย และประชากรเชื้อชาติเอเชีย กระจายอยู่ในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากเชื้อชาติที่ใกล้เคียงกัน แต่ในขณะเดียวกัน พบว่าในแต่ละประชากรมีความแตกต่างกันระหว่างประชากรเมียนมา



รูปที่ 1 ผลการเปรียบเทียบด้วยกราฟ PCA ของประชากรเมียนมาในประเทศไทย (MMTH: ●) และประชากรเมียนมาที่อพยพเข้ามาในประเทศไทยจีน (MMCN: ●), PC คือ Principal component



รูปที่ 2 ผลการเปรียบเทียบด้วยกราฟ PCA ของประชากรเมียนมาในประเทศไทย (MMTH: ●) ประชากรเมียนมาที่อพยพเข้ามาในประเทศไทยจีน (MMCN: ●) ประชากรอเมริกาเชื้อสายแอฟริกัน (AA: ●) เชื้อชาติคอเคเซียน (Cauc: ●) เชื้อชาติลาตินอเมริกา (Hisp: ●) และเชื้อชาติเอเชีย (Asia: ●), PC คือ Principal component

ในประเทศไทยกับประชากรชาวอเมริกาเชื้อสายแอฟริกัน เชื้อชาติคอเคเซียน เชื้อชาติลาตินอเมริกา ซึ่งเป็นผลมาจากชาติพันธุ์ที่แตกต่างกัน

การทดสอบความถี่ของแอลลีลและการวิเคราะห์ค่าสถิติจากลำดับซ้ำเรียงต่อเนื่องแบบสั้นบนออโทโซมของแต่ละกลุ่มประชากรจึงมีความสำคัญ และมีความเป็นเอกลักษณ์ (uniqueness) ของแต่ละกลุ่มอย่างชัดเจน และสามารถใช้ในการนิติพันธุศาสตร์ได้ ดังนั้นความถี่ของแอลลีลของประชากรเมียนมาในประเทศไทยจะสามารถใช้ในการคำนวณค่าสถิติต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม และสามารถเพิ่มความเชื่อถือในงานวิเคราะห์ด้านนิติพันธุศาสตร์ ไม่ว่าจะเป็นการทดสอบเอกลักษณ์บุคคล การทดสอบความเป็นพ่อ แม่ ลูก หรือ การทดสอบความเป็นเครือญาติ ต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการสนับสนุนข้อมูลภาพรวมดีเอ็นเอจากฐานข้อมูลดีเอ็นเอ สำนักงานพิสูจน์หลักฐานตำรวจ และความช่วยเหลือจากเจ้าหน้าที่กลุ่มงานตรวจชีววิทยาและดีเอ็นเอ กองพิสูจน์หลักฐานกลาง สำนักงานพิสูจน์หลักฐานตำรวจ

เอกสารอ้างอิง

- Boonderm, N., Suriyanratakorn, D., Sangpueng, S., Onthong, N., Nettakul, A. & Waiyawuth, W. (2017). Population genetic data of 21 STR markers in Thais of southern border provinces of Thailand. *Forensic Science International: Genetics Supplement Series*, 6, 523-525. <https://doi.org/10.1016/j.fsigss.2017.09.205>
- Butler, J. M. (2015). *Advance Topics in Forensic DNA Typing: Interpretation* (1st Ed). San Diego, USA: Elsevier.
- Chantakot, P., Pittaporn, P., Srithongdaeng, K., Srithawong, S. & Kutanant, W. (2017). Genetic Divergence of Austroasiatic Speaking Groups in the Northeast of Thailand: A Case Study on Northern Khmer and Kuy. *Chiang Mai Journal of Science*. 44(4), 1279-1294.
- Chen, L., Duan, L., Yuan, L., Shen, Z., He, W., Zhai, D., Huang, Y. & Xu, B. (2017). Genetic polymorphisms of 19 autosomal STR loci in the China Burmese immigrants. *Forensic Science International: Genetics*, 31, 446-447. <https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2017.07.009>
- Gouy, A. & Zieger, M. (2017). STRAF – a convenient online tool for STR data evaluation in forensic genetics. *Forensic Science International: Genetics*, 30, 148-151. <https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2017.07.007>
- Harkins, B. (2019). *Thailand Migration Report 2019*. Bangkok, Thailand: Ainergy Studio Company Limited.
- Hartl, D. L. & Clark, A. G. (1997). *Principles of Population Genetics* (3rd Ed). Sunderland: Sinauer Associate
- Hill, C.R., Duewer, D.L., Kline, M.C., Coble, M.D. & Butler, J.M. (2013). U.S. population data for 20 autosomal STR loci. *Forensic Science International: Genetics*, 7, 82-83. <https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2018.07.013>
- QIAGEN. (2012). *Investigator®IDplex Plus Handbook*. Germany: Poison Information Center Mainz.
- Rerkamnuaychoke, B., Rinthachai, T., Shotvaranon, J., Jomsawat, U., Sinboonpipittana, T., Chaitanarat, K., Pasomsub, E. & Chantrata, W. (2006). Thai population data on 15 tetrameric STR loci-D8S1179, D21S11, D7S820, CSF1PO, D3S1358, TH01, D12S317, D16S539, D2S1338, D19S433, vWA, TPOX, D18S51, D5S818 and FGA. *Forensic Science International*, 158(2-3), 234-237
- Scientific Working Group on DNA Analysis Methods (SWGDM) (2017). *SWGDM Interpretation Guidelines for Autosomal STR Typing by Forensic DNA Testing Laboratories*. Scientific Working Group on DNA Analysis Methods (SWGDM), USA. Retrieved from <https://www.swgdam.org/publications>
- Shotvaranon, J., Chirachariyavej, T., Leetrakool, N. & Rerkamnuaychoke, B. (2009). DNA database of populations from different parts in the Kingdom of Thailand. *Forensic Science International: Genetics*, 4, 37-38. <https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2009.02.009>
- Silva, N.M., Pereira, L., Poloni, E.S. & Currat, M. (2012). Human Neutral Genetic Variation and Forensic STR Data. *PLoS ONE*, 7(11), E49666. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049666>
- Wright, S. (1978). *Evolution and the Genetics of Populations*, Vol. 4, Variability Within and Among Natural Populations. Chicago: University of Chicago Press
- Xiang, C., Huang, L., Su, S., Fan, Y. & Yu, J. (2016). Genetic variation of the 20 STRs in Han population from Yunnan-Kweichow plateau of China. *Forensic Science International: Genetics*, 23, 10-11. <https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2016.03.003>

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของเครื่องดื่มประเภทกาแฟ

Carbon Footprint of Coffee Drinks

รัตนกร พูนพิพัฒน์ และ ปิยานนท์ หาพุดธา*

Rattanakon Phunphiphat and Piyanon Haputta*

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Department of Environmental Science, Faculty of Science and Technology, Thammasat University

บทคัดย่อ

กาแฟเป็นเครื่องดื่มที่ได้รับความนิยมอย่างมากในหลายประเทศทั่วโลก นอกจากปัญหามลพิษพลาสติกที่เกิดขึ้นหลังจากการบริโภคแล้ว วัฏจักรชีวิตของเครื่องดื่มประเภทกาแฟยังก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกที่ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อนอีกด้วย เพื่อให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการผลิตและบริโภคเครื่องดื่มประเภทกาแฟ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินและเปรียบเทียบรอยเท้าคาร์บอน (Carbon footprint) ของเครื่องดื่มประเภทกาแฟ ได้แก่ มอคค่าเย็น คาปูชิโนเย็น ลาเต้เย็น และเอสเปรสโซร้อน โดยพิจารณาตั้งแต่การได้มาซึ่งเมล็ดกาแฟ การบรรจุภัณฑ์ การทำเครื่องดื่ม การขนส่ง ตลอดจนการจัดบรรจุภัณฑ์หลังการบริโภค ผลการศึกษาพบว่ารอยเท้าคาร์บอนของกาแฟมอคค่าเย็น คาปูชิโนเย็น ลาเต้เย็น และเอสเปรสโซร้อน 1 แก้ว ที่ใช้กาแฟบด 18 กรัมเท่ากัน มีค่าประมาณ 626, 507, 542 และ 161 กรัม คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ตามลำดับ โดยวัตถุดิบที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุดคือนมวัว รองลงมาคือช็อกโกแลต ส่งผลให้กาแฟเมนูมอคค่าเย็นที่มีการใส่วัตถุดิบทั้ง 2 ชนิดนี้มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุด ด้วยเหตุนี้เอง การใช้นมวัวที่ผลิตโดยมีการลดก๊าซมีเทนจากการหมักย่อยอาหารของโคนมและการจัดการมูลโคอย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นแนวทางสำคัญที่สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเครื่องดื่มประเภทกาแฟได้ ทั้งนี้ ไม่เพียงแต่ผลการศึกษาจะสามารถใช้เป็นแนวทางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตและการบริโภคเครื่องดื่มกาแฟเท่านั้น แต่วิธีประเมินรอยเท้าคาร์บอนในการศึกษานี้ยังสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการประเมินรอยเท้าคาร์บอนของเครื่องดื่มประเภทอื่น ๆ ได้อีกด้วย

คำสำคัญ: เครื่องดื่มกาแฟ, ก๊าซเรือนกระจก, รอยเท้าคาร์บอน

ABSTRACT

Coffee is a popular drink in many countries. Other than plastic waste problem, the life cycle of coffee drinks also brings about greenhouse gas (GHG) emissions that contribute to global warming. To provide the recommendations on the reduction of GHG emissions of coffee drinks, this study aimed at assessing and comparing the carbon footprint of coffee drinks, including iced mocha, iced cappuccino, iced latte, and hot espresso. Life cycle of the coffee drinks, covering raw material production, packaging, coffee making, product use, and the disposal of beverage container were considered in this study. The results showed that the carbon footprint of a glass of iced mocha, iced cappuccino, iced latte, and hot espresso (in which 18 g ground coffee were equally used) were around 626, 507, 542 and 161 g CO₂ equivalent, respectively. Raw materials with the highest GHG emissions were cow's milk and chocolate. This leads to the largest carbon footprint of iced mocha in which both cow's milk and chocolate were used as the ingredients. According to this, the use of cow's milk produced from the cow whose production of methane from the digestive system was reduced and the efficient cow manure management can be considered for the reduction of carbon footprint of coffee drinks. Not only does the results of this study have an implication on the reduction of GHG emissions from coffee drinks, but also the method presented in this study can be a guideline for other beverages' carbon footprint assessment.

KEYWORDS: Coffee drinks, greenhouse gases, carbon footprint

*Corresponding Author: piyanonk@tu.ac.th

Received: 26/08/2022; Revised: 18/11/2022; Accepted: 07/02/2023

1. บทนำ

กาแฟถูกค้นพบประมาณ 850 ปีก่อนคริสต์ศักราช เนื่องจากกาแฟมีฤทธิ์ในการกระตุ้นร่างกาย เมื่อรับประทานจะมีความรู้สึกกระปรี้กระเปร่า หายเหนื่อย ทำให้เริ่มเป็นที่รู้จักของคนอย่างแพร่หลาย (Department of Agricultural Extension, 2014) ปัจจุบัน กาแฟเป็นเครื่องดื่มที่ได้รับความนิยมทั้งในคนไทยวัยเรียนและวัยทำงาน ซึ่งความนิยมของการดื่มกาแฟในประเทศไทยมีอัตราเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 0.9 กิโลกรัมต่อปี (National Food Institute, 2015) โดยในปี 2561 ประเทศไทยมีความต้องการใช้เมล็ดกาแฟมากถึง 95,000 ตันต่อปี และมีการทำธุรกิจกาแฟเพิ่มขึ้นร้อยละ 37.71 เมื่อเทียบกับปี 2560 จะเห็นได้ว่าตลาดกาแฟในประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างมากสอดคล้องกับความต้องการในการบริโภค และแนวโน้มขยายตัวสูงขึ้นเรื่อย ๆ อีกด้วย (Department of Business Development, 2019)

ความต้องการดื่มกาแฟที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่เพาะปลูกกาแฟขยายตัวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากกาแฟเป็นพืชที่ต้องปลูกในพื้นที่เขตร้อนซึ่งเป็นระบบนิเวศที่มีความเหมาะสมที่สุดในโลก จึงเป็นที่น่ากังวลว่าการปลูกกาแฟอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ทั้งมลพิษทางน้ำ ความแปรปรวนทางชีวภาพ การเสื่อมสภาพของดิน รวมไปถึงการใช้สารเคมีทางการเกษตร (Thairath, 2021) นอกจากนี้ผลการศึกษาของ University College London (UCL) กาแฟแต่ละแก้วมีผลกระทบด้านการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนแฝงอยู่จากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการผลิตทั้งหมด โดยเมื่อเทียบจากน้ำหนักที่เท่ากัน กาแฟที่ปลูกแบบยั่งยืนอย่างน้อยที่สุดจะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าการผลิตชีส และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของผลิตภัณฑ์ (รอยเท้าคาร์บอน) เป็นครึ่งหนึ่งของเนื้อวัว ซึ่งเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุดในโลก โดยประมาณ (TNN, 2021)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Prasatketkan *et al.* (n.d.), Trinh *et al.* (2019) และ Harsono *et al.* (2021) แสดงให้เห็นว่าขั้นตอนการผลิตเมล็ดกาแฟส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน แต่ยังไม่มียานวิจัยที่แสดงผลกระทบด้านภาวะโลกร้อนของกาแฟที่เป็นเครื่องดื่ม เช่น เอสเปรสโซ อเมริกาโน่ คาปูชิโน่ ลาเต้ และมอคค่า ซึ่งล้วนแล้วแต่มีวัตถุดิบและกระบวนการเตรียมที่แตกต่างกัน ซึ่งหมายความว่าต้องมียานวิจัยที่แตกต่างกันด้วย โดยขนาดของผลกระทบ

นี้สามารถแสดงในรูปของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการประเมินรอยเท้าคาร์บอน (Carbon footprint) ซึ่งก็คือการคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจก ที่ปล่อยออกมาจากผลิตภัณฑ์แต่ละหน่วย ตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การผลิต การขนส่ง การใช้งาน และการจัดการของเสียหลังหมดอายุการใช้งาน ออกมาในรูปของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (TGO, 2021a)

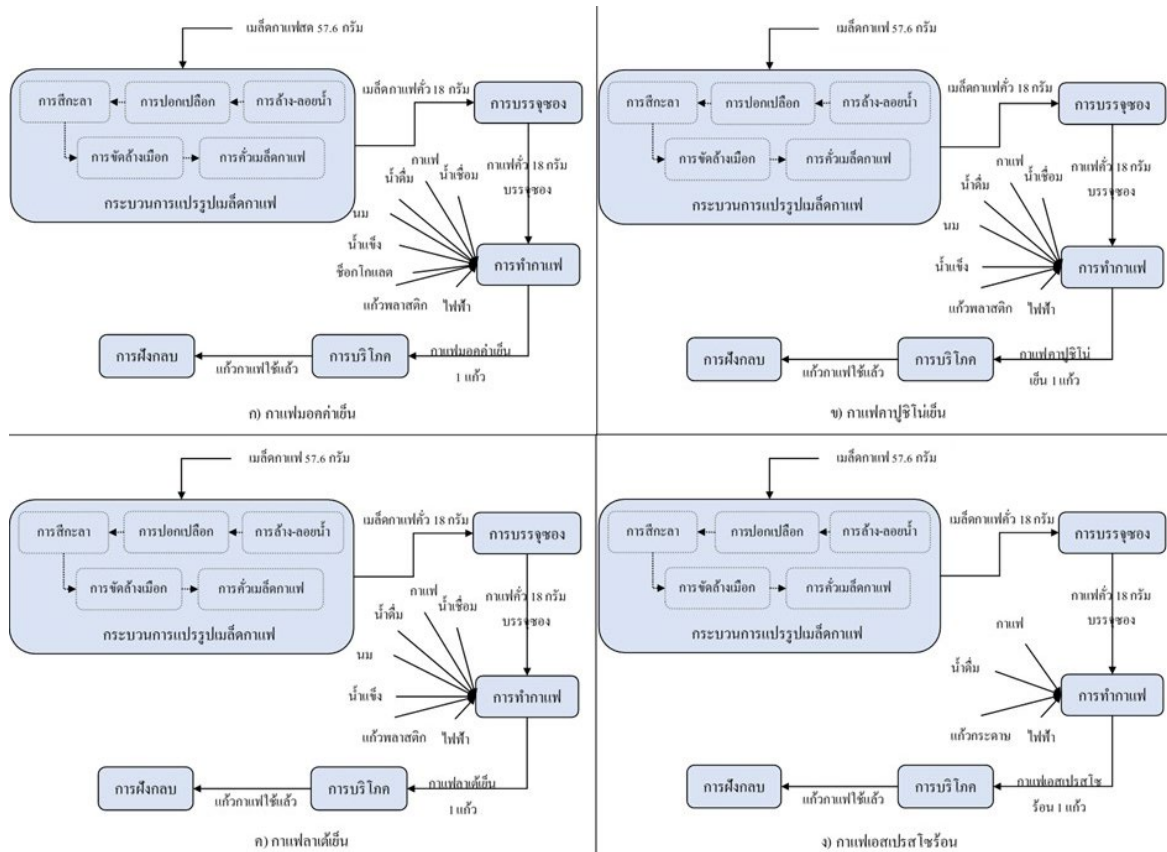
เพื่อเสนอแนะแนวทางที่เป็นประโยชน์สำหรับการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกในการผลิตเครื่องดื่มประเภทกาแฟให้แก่ผู้ประกอบการ และเพื่อประกอบการตัดสินใจของผู้บริโภคในการเลือกซื้อเครื่องดื่มประเภทกาแฟ งานวิจัยนี้จึงมุ่งประเมินและเปรียบเทียบรอยเท้าคาร์บอนของเครื่องดื่มประเภทกาแฟ ได้แก่ มอคค่าเย็น คาปูชิโน่เย็น ลาเต้เย็น และเอสเปรสโซร้อน เพื่อนำไปสู่การผลิตและการบริโภคที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของประเทศไทยต่อไป ทั้งนี้ ไม่เพียงแต่ผลการศึกษาจะเป็นประโยชน์แก่ผู้ประกอบการและผู้บริโภคเท่านั้น แต่วิธีการศึกษาของงานวิจัยยังสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการประเมินรอยเท้าคาร์บอนของเครื่องดื่มประเภทอื่น ๆ ได้อีกด้วย

2. วิธีการศึกษา

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาปริมาณรอยเท้าคาร์บอนของเครื่องดื่มกาแฟ ครอบคลุมตั้งแต่ขั้นตอนการปลูกกาแฟ กระบวนการแปรรูปเมล็ดกาแฟ การบรรจุเมล็ดกาแฟใส่บรรจุภัณฑ์ การขนส่ง การทำกาแฟ ไปจนถึงการกำจัดของเสียจากการผลิตและบริโภคเครื่องดื่มกาแฟ ตามกรอบการดำเนินการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ในมาตรฐาน ISO14040 โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา (Goal and scope definition)

การประเมินและเปรียบเทียบปริมาณรอยเท้าคาร์บอนของกาแฟ 4 เมนู ได้แก่ มอคค่าเย็น คาปูชิโน่เย็น ลาเต้เย็น และเอสเปรสโซร้อน ในงานวิจัยนี้ มีเป้าหมายคือการนำผลการศึกษาไปใช้ประกอบการพิจารณาปรับปรุงการผลิตของผู้ประกอบการผลิตเมล็ดกาแฟและร้านกาแฟ รวมถึงประกอบการตัดสินใจของผู้บริโภคในการบริโภคเครื่องดื่มกาแฟ เพื่อให้มีผลกระทบด้านการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนลดลง หน่วยหน้าที่ที่ใช้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบในงานวิจัยคือ เครื่องดื่มกาแฟ 1 แก้ว ที่ใช้เมล็ดกาแฟโรบัสต้าบด 18 กรัม (ปริมาณสุทธิของเครื่องดื่มกาแฟ มอคค่าเย็น คาปูชิโน่เย็น และลาเต้เย็น



รูปที่ 1 ขอบเขตระบบของเครื่องต้มกาแฟแต่ละเมนู

เท่ากับ 483 กรัม และปริมาตรสุทธิของเครื่องต้มกาแฟ เอสเปรสโซร้อน เท่ากับ 33 กรัม โดยการประเมินรอยเท้าคาร์บอนในการศึกษานี้มีขอบเขตแบบตั้งแต่เกิดจนตาย (Cradle to grave) คือพิจารณาผลกระทบด้านการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนตลอดวัฏจักรชีวิตของเครื่องต้มกาแฟ ตั้งแต่การได้มาซึ่งเมล็ดกาแฟ การบรรจุภัณฑ์ การขนส่ง การทำเครื่องต้ม และการกำจัดบรรจุภัณฑ์หลังการบริโภค ดังแสดงในขอบเขตระบบของเครื่องต้มกาแฟแต่ละเมนูในรูปที่ 1 โดย ในงานวิจัยนี้ กาแฟกาแฟที่เหลือจากการทำเครื่องต้มถูกพิจารณาว่าเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ของระบบ ไม่ใช่ขยะที่จะต้องถูกนำไปกำจัดเช่นเดียวกับแก้วกาแฟ เนื่องจากกาแฟมีมูลค่าทางเศรษฐกิจ สามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นได้ เช่น สดกรี๊ด ผักชีโรล และน้ำมัน ฯลฯ อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาการปันส่วนผลกระทบเชิงมูลค่า (Economic allocation) กาแฟมีมูลค่าทางเศรษฐกิจน้อยมากเมื่อเทียบกับมูลค่าของกาแฟ 1 แก้ว งานวิจัยนี้จึงไม่ได้ทำการปันส่วนผลกระทบให้แก่กาแฟแต่อย่างใด ทั้งนี้ เนื่องจากข้อมูลส่วนใหญ่ที่ใช้ในการวิจัยเป็นข้อมูลของประเทศไทย ผลการวิจัยนี้จึงสามารถนำไปใช้ได้กับบริบทของการผลิตและการบริโภคเครื่องต้มกาแฟในประเทศไทยเท่านั้น

2.2 การรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลบัญชีรายการสารเข้าและสารออก (Inventory analysis) ของกระบวนการทำเครื่องต้มกาแฟ รวมถึงข้อมูลการขนส่งที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำเครื่องต้มกาแฟ สำหรับนำไปใช้ประเมินผลกระทบด้านการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนนั้น ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลวัตถุดิบและปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการทำมอคค่าเย็น คาปูชิโนเย็น ลาเต้เย็น และเอสเปรสโซร้อน จากร้านกาแฟแห่งหนึ่งในอำเภอนางรอง จังหวัดบุรีรัมย์ โดยร้านกาแฟแห่งนี้มีการทำเครื่องต้มประเภทกาแฟเฉลี่ยเดือนละกว่า 150 แก้ว และกาแฟที่ขายดีที่สุด คือ เอสเปรสโซร้อน รองลงมา คือ ลาเต้เย็น คาปูชิโนเย็น และมอคค่าเย็น ตามลำดับ

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ผลกระทบด้านการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนของการทำเครื่องต้มกาแฟที่เกิดจากการใช้วัตถุดิบและพลังงาน และการปล่อยมลภาวะหรือของเสียต่าง ๆ ที่ได้จากการทำบัญชีรายการสารเข้าและสารออกของกระบวนการทำเครื่องต้มกาแฟจะถูกพิจารณาในหน่วยของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($\text{CO}_2 \text{ eq.}$) โดยปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของแต่ละกิจกรรมการใช้

ตารางที่ 1 ข้อมูลค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการและผลิตภัณฑ์

รายการ	ปริมาณ	หน่วย	แหล่งอ้างอิง
เมล็ดกาแฟสด	0.4	g CO ₂ eq./g	Ratchawat <i>et al.</i> (2018)
การแปรรูปเมล็ดกาแฟ	0.22	g CO ₂ eq./g	Prasathetkan <i>et al.</i> (n.d.)
การบรรจุใส่ซอง	0.88	g CO ₂ eq./g	Cibellia <i>et al.</i> (2021)
รถกระบะบรรทุกขนาดเล็ก 4 ล้อ วิ่งปกติ 100% Loading	184	g CO ₂ eq./tkm	TGO (2021b)
รถตู้บรรทุก 6 ล้อ ขนาดเล็ก วิ่งปกติ 100% Loading	65.3	g CO ₂ eq./tkm	TGO (2021b)
น้ำ	0.15	g CO ₂ eq./g	TGO (2019)
นม	1.95	g CO ₂ eq./g	Liblab (2020)
น้ำเชื่อม	0.29	g CO ₂ eq./g	TGO (2021b)
ช็อกโกแลต	5	g CO ₂ eq./g	Reay (2019)
น้ำแข็ง	0.23	g CO ₂ eq./g	Newton Associate (n.d.)
แก้วพลาสติก *	3.91	g CO ₂ eq./g	Harst & Potting (2013)
แก้วกระดาษ *	2.49	g CO ₂ eq./g	Harst & Potting (2013)
พลังงานไฟฟ้า	598.6	g CO ₂ eq./kWh	TGO (2021b)

หมายเหตุ * ข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแบบ cradle to grave (รวมผลกระทบของขั้นตอนการกำจัดซากหลังการใช้งาน ด้วยวิธีการฝังกลบ)

ตารางที่ 2 ข้อมูลสารเข้าและสารขาออกจากกระบวนการทำเครื่องดื่มกาแฟ 1 แก้ว (ใช้เมล็ดกาแฟบด 18 กรัม)

	เครื่องดื่มกาแฟ			
	มอคค่าเย็น	คาปูชิโนเย็น	ลาเต้เย็น	เอสเปรสโซร้อน
สารเข้า	กาแฟบด (กรัม)	18	18	18
	น้ำ (กรัม)	60	60	30
	นม (กรัม)	100	100	0
	น้ำเชื่อม (กรัม)	25	30	0
	ช็อกโกแลต (กรัม)	25	0	0
	น้ำแข็ง (กรัม)	270	290	0
	แก้วพลาสติก (กรัม)	15	15	0
	แก้วกระดาษ (กรัม)	0	0	12
	พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)*	0.15	0.15	0.08
สารขาออก	กากกาแฟ (กรัม)	15	15	15
	เครื่องดื่มกาแฟ (กรัม)	483	483	33

หมายเหตุ * คำนวณจากผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเตาอุ่นนม (กำลังไฟ 800 วัตต์ ใช้อุ่นนม 5 นาที) และเตาต้มน้ำร้อน (กำลังไฟ 1000 วัตต์ ใช้ต้มน้ำ 5 นาที)

วัตถุดิบและพลังงาน และการปล่อยมลภาวะหรือของเสียต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$\text{ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CO}_2\text{ eq.)} = \text{Activity Data} \times \text{Emission Factor} \quad (1)$$

โดยที่

- ข้อมูลกิจกรรม (Activity Data) คือ ปริมาณการใช้วัตถุดิบและพลังงาน และการปล่อยมลภาวะหรือของเสียต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกอันเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน ซึ่งอาจมีหน่วยที่แตกต่างกันไป เช่น ปริมาณน้ำ ปริมาณกาแฟ ปริมาณน้ำเชื่อม และปริมาณนม เป็นต้น ทั้งนี้ หน่วยของข้อมูลกิจกรรมต้องสัมพันธ์กับหน่วยของค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

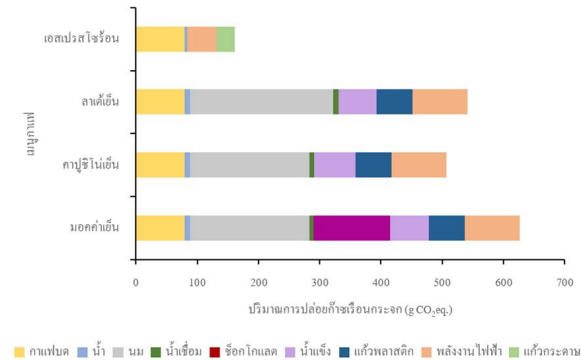
- ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) คือ ค่าที่แสดงปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในหน่วยของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์หรือ

กิจกรรม โดยในการศึกษานี้ใช้ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์หรือกิจกรรมซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การสกัดวัตถุดิบจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์มาแต่ไม่รวมขั้นตอนการใช้งานและกำจัดซาก (cradle to gate) ที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมและแหล่งข้อมูลทุติยภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 1

ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการและผลิตภัณฑ์บางชนิดในตารางที่ 1 ได้แก่ การบรรจุใส่ซอง ช็อกโกแลต แก้วพลาสติก และแก้วกระดาษ เป็นค่าที่ได้จากการศึกษาของต่างประเทศเนื่องจากไม่มีข้อมูลสำหรับประเทศไทย อย่างไรก็ตามกระบวนการและผลิตภัณฑ์เหล่านี้ใช้เทคโนโลยีการผลิตไม่แตกต่างจากประเทศไทย ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการและผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจึงสามารถนำมาใช้ประเมินรอยเท้าคาร์บอนของเครื่องดื่มประเภทกาแฟในบริบทของประเทศไทยได้ โดยแม้มีการเปลี่ยนแปลงค่าการปล่อย

ตารางที่ 3 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกาแฟ 4 เมนู
(ต่อกาแฟ 1 แก้วที่ใช้เมล็ดกาแฟบด 18 กรัม)

เมนูกาแฟ	ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (g CO ₂ eq.)
มอคค่าเย็น	626.21
คาปูชิโนเย็น	507.33
ลาเต้เย็น	541.61
เอสเปรสโซร้อน	161.37



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบรอยเท้าคาร์บอนจากกระบวนการทำกาแฟ 4 เมนู

ก๊าซเรือนกระจกให้เป็นของประเทศไทยอนาคต ผลการศึกษาจะเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

3. ผลการศึกษาและการอภิปรายผลการศึกษา

3.1 ผลการวิเคราะห์บัญชีรายการ

การเก็บรวบรวมข้อมูลจากร้านกาแฟทำให้ได้ข้อมูลบัญชีรายการสารขาเข้าและสารขาออกของกระบวนการทำเครื่องดื่มกาแฟมอคค่าเย็น คาปูชิโนเย็น ลาเต้เย็น และเอสเปรสโซร้อน สำหรับใช้ประเมินผลกระทบด้านการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนของเครื่องดื่มกาแฟทั้ง 4 เมนู ดังแสดงในตารางที่ 2

สำหรับระยะทางในการขนส่งนั้น ร้านกาแฟได้ใช้เมล็ดกาแฟที่ปลูกจากไร่สะเก็ดดาว อำเภอสะเกตดาว จังหวัดเชียงใหม่ หลังจากเก็บเกี่ยวผลกาแฟแล้วจะถูกนำส่งมายังโรงงานแปรรูปและบรรจุเมล็ดกาแฟใส่ซอง ซึ่งตั้งอยู่ที่อำเภอสะเกตดาว จังหวัดเชียงใหม่ โดยมีระยะทาง 33.6 กิโลเมตร ขนส่งด้วยรถกระบะบรรทุกขนาดเล็ก 4 ล้อ วึ่งปกติ บรรทุกเต็มคันรถ (100% Loading) แล้งจึงส่งมายังร้านกาแฟในอำเภอนางรองจังหวัดบุรีรัมย์ ด้วยรถตู้บรรทุก 6 ล้อ ขนาดเล็ก วึ่งปกติ บรรทุกเต็มคันรถ (100% Loading) มีระยะทาง 798 กิโลเมตร

3.2 ผลการประเมินรอยเท้าคาร์บอน

จากการประเมินรอยเท้าคาร์บอนของเครื่องดื่มกาแฟทั้ง 4 เมนู พบว่ามอคค่าเย็น คาปูชิโนเย็น ลาเต้เย็น และเอสเปรสโซร้อน มีคาร์บอนรอยเท้าคาร์บอนอยู่ที่ 626.21, 507.33, 541.64 และ 161.37 g CO₂ eq. ตามลำดับ

แสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nab and Maslin (2020) ที่ทำการประเมินรอยเท้าคาร์บอนของกาแฟที่ผลิตในบราซิลและเวียดนาม ซึ่งพบว่า เอสเปรสโซ ลาเต้ และคาปูชิโน 1 แก้ว มีรอยเท้าคาร์บอนเฉลี่ยประมาณ 280, 550 และ 410 g CO₂ eq. ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการศึกษาของ Hassard *et al.* (2014) ระบุว่ารอยเท้าคาร์บอนของกาแฟเอสเปรสโซและลาเต้ในประเทศญี่ปุ่น 1 แก้ว มีค่าเท่ากับ 126 และ 573 g CO₂ eq. ตามลำดับ ซึ่งมีความใกล้เคียงกับผลของการศึกษานี้ ทั้งนี้ ความแตกต่างของคาร์บอนรอยเท้าคาร์บอนเพียงเล็กน้อยอาจเนื่องมาจากปริมาณวัตถุดิบที่ใช้มีอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมที่แตกต่างจากประเทศไทย ไม่ว่าจะเป็นภูมิอากาศ วิธีการเพาะปลูกการใส่ปุ๋ย และการดูแลต้นกาแฟต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาถึงวัตถุดิบที่ใช้ในการทำกาแฟ พบว่านมเป็นวัตถุดิบที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด สูงถึง 1.95 g CO₂ eq. ต่อ นม 1 กรัม (รวมบรรจุภัณฑ์) ซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่ที่ทำให้นมมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดนั้นมาจากการหมักย่อยในกระเพาะรูเมนของโคนม คิดเป็นร้อยละ 67.79 รองลงมา คือ การจัดการมูล คิดเป็นร้อยละ 18.65 จากการทำฟาร์มโคนม จะเห็นว่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจากตัวสัตว์เนื่องจากมีกระบวนการหมักที่เกิดขึ้นแล้วปล่อยก๊าซในรูปคาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Liblab, 2020) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Flysjö *et al.* (2011) ที่ระบุว่าค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากฟาร์มโคนมในประเทศนอร์เวย์และสวีเดนคือ 1.00 และ 1.16 g CO₂ eq. ต่อ นม (Energy-corrected milk; ECM) 1 กรัม (ไม่รวมบรรจุภัณฑ์) ตามลำดับ ซึ่งการหมักในลำไส้เป็นกิจกรรมที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกครั้งหนึ่งของทั้งหมด นอกจากนี้วัตถุดิบในการทำกาแฟที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงรองลงมาจากนมคือ ซ็อกโกแลต มีค่า 5 g CO₂ eq. ต่อ ซ็อกโกแลต 1 กรัม ซึ่งซ็อกโกแลตเป็นวัตถุดิบที่ใส่ในมอคค่าเย็นเพียงเมนูเดียว ทำให้มอคค่าเย็นมีคาร์บอนรอยเท้าคาร์บอนที่สูงกว่าเมนูอื่น ๆ โดยสามารถแสดงสัดส่วนเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่จากวัตถุดิบทั้งหมดทำให้กาแฟทั้ง 4 เมนูมีค่าแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2

จากการศึกษาของ Reay (2019) พบว่าของเสียจากซ็อกโกแลตเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกประมาณ 90,000 ตันต่อปี เนื่องจากซ็อกโกแลตมีพลาสติกที่ห่อเป็นบรรจุภัณฑ์หลายชั้น ทำให้มีค่าการ

ปล่อยก๊าซเรือนกระจก รอยเท้าคาร์บอนที่สูง นอกจากนี้ ช็อกโกแลตยังมีนมเป็นส่วนประกอบซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีค่า รอยเท้าคาร์บอนสูงดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นอีกด้วย จาก การศึกษาของ Konstantas *et al.* (2019) ระบุว่าเมื่อ เปรียบเทียบขนมปังกรอบที่มีช็อกโกแลตเป็น ส่วนประกอบกับขนมปังกรอบไขมันต่ำ พบว่าขนมปัง กรอบที่มีช็อกโกแลตเป็นส่วนประกอบให้ค่าการปล่อยก๊าซ เรือนกระจกสูงกว่าและส่วนใหญ่มาจากช็อกโกแลต โดย ช็อกโกแลตเป็นวัตถุดิบที่มีผลกระทบสูงสุด ดังนั้นการ ใช้ช็อกโกแลตเป็นส่วนประกอบของเมนูอาหารและ เครื่องดื่มจึงส่งผลให้ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงขึ้น ได้

วัตถุดิบในการทำกาแฟที่มีค่าการปล่อยก๊าซเรือน กระจกสูงรองลงมาจากนมและช็อกโกแลต คือ พลังงาน ไฟฟ้าที่ใช้ในการทำกาแฟ จากการเก็บข้อมูลจากร้าน กาแฟพบว่า เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้ในการทำกาแฟมี 2 เครื่อง คือ เตาดม้ น้ำร้อนและเตาอุ่นนม ซึ่งในการทำเอสเปรสโซ ร้อนไม่มีการใช้วัตถุดิบนม ส่งผลให้ค่าการปล่อยก๊าซเรือน กระจกจากพลังงานไฟฟ้าของเอสเปรสโซร้อนมีค่าน้อย กว่ากาแฟเมนูอื่น ๆ

จากรายงานสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าของ ประเทศไทย ในปี 2564 พบว่ามีการใช้เชื้อเพลิงจากก๊าซ ธรรมชาติมากที่สุด เป็นจำนวน 75,552.61 ล้าน กิโลวัตต์-ชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 57.55 รองลงมาคือ ถ่าน หิน (รวมลิกไนต์) พลังงานหมุนเวียน (พลังน้ำ, อื่น ๆ) น้ำมันเตา น้ำมันดีเซล และอื่น ๆ (Electricity Generating Authority of Thailand, 2021) ซึ่งก๊าซธรรมชาติ คือ เชื้อเพลิงฟอสซิลที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ จัดเป็น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยก๊าซมีเทน ร้อย ละ 70 ขึ้นไป (UAC, 2564) ส่งผลให้ก๊าซธรรมชาติมีค่า การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สูง การใช้ก๊าซธรรมชาติเป็น เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าจำนวนมากเช่นนี้ ส่งผลให้ค่า การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการใช้ไฟฟ้ามีค่าสูงมาก ด้วยเหตุนี้ทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำกาแฟมีค่า การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สูงรองลงมาจากนมและ ช็อกโกแลต

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา มอคค่า คาปูชิโน และ ลาเต้ ในรูปแบบเครื่องดื่มเย็น หากเปลี่ยนรูปแบบเป็น เครื่องดื่มร้อนจะมีการปรับเปลี่ยนวัตถุดิบที่ใช้ คือ ไม่น้ำแข็ง และเปลี่ยนจากแก้วพลาสติกขนาด 16 ออนซ์ เป็น แก้วกระดาษขนาด 12 ออนซ์ ส่งผลให้คาร์บอน รอยเท้า คาร์บอน ลดลงเหลือ 533.79, 410.26 และ 449.19 g CO₂ eq. ตามลำดับ และปริมาณสุทธิของเครื่องดื่มลดลงเป็น 210,

190, 210 กรัม ตามลำดับ และในรูปแบบการจัดการขยะ ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ การฝังกลบแก้วพลาสติกและ แก้วกระดาษ ซึ่งหากเปลี่ยนรูปแบบการจัดการขยะของ แก้วพลาสติกเป็นการเผาแบบ incineration คาร์บอน รอยเท้า คาร์บอนจะสูงขึ้นเป็น 663.28, 544.40 และ 578.68 g CO₂ eq. ตามลำดับ

4. สรุปผลการศึกษา

จากการประเมินรอยเท้าคาร์บอนของเครื่องดื่ม ประเภทกาแฟ 4 เมนูได้แก่ มอคค่าเย็น คาปูชิโนเย็น ลาเต้เย็น และเอสเปรสโซร้อน โดยดำเนินการตามแนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ครอบคลุม กระบวนการตั้งแต่การปลูกกาแฟ การแปรรูปเมล็ดกาแฟ การบรรจุเมล็ดกาแฟใส่ซอง การขนส่ง การทำกาแฟ การ บริโภค และการกำจัดขยะ พบว่ารอยเท้าคาร์บอนทั้งหมด ของมอคค่าเย็นอยู่ที่ 626.21 g CO₂ eq. โดยสัดส่วนที่มี การปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดคือ นม คิดเป็นร้อยละ 31.09 ของมอคค่าเย็น 1 แก้ว รองลงมาคือ ช็อกโกแลต คิดเป็นร้อยละ 19.96 ซึ่งการใส่ช็อกโกแลตทำให้มอคค่า เย็นมีคาร์บอนรอยเท้าคาร์บอนสูงกว่ากาแฟเมนูอื่น รอยเท้า คาร์บอนทั้งหมดของคาปูชิโนเย็นอยู่ที่ 507.33 g CO₂ eq. โดยสัดส่วนที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดคือ นม คิดเป็นร้อยละ 38.37 ของคาปูชิโนเย็น 1 แก้ว รองลงมา คือ พลังงานไฟฟ้า คิดเป็นร้อยละ 17.70 รอยเท้า คาร์บอนทั้งหมดของลาเต้เย็นอยู่ที่ 541.61 g CO₂ eq. โดยสัดส่วนที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดคือ นม คิดเป็นร้อยละ 43.13 ของลาเต้เย็น 1 แก้ว รองลงมาคือ พลังงานไฟฟ้า คิดเป็นร้อยละ 16.58 และรอยเท้า คาร์บอนทั้งหมดของเอสเปรสโซอยู่ที่ 161.37 g CO₂ eq. โดยสัดส่วนที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดคือ กาแฟสด คิดเป็นร้อยละ 49.01 ของเอสเปรสโซร้อน 1 แก้ว รองลงมาคือ พลังงานไฟฟ้า คิดเป็นร้อยละ 29.68 เนื่องจากวัตถุดิบของการทำเอสเปรสโซร้อนไม่มีนมหรือ ช็อกโกแลต ทำให้มีคาร์บอนรอยเท้าคาร์บอนต่ำที่สุดเมื่อเทียบ กับเมนูอื่น จากการวิเคราะห์หรือรอยเท้าคาร์บอนของ เครื่องดื่มประเภทกาแฟทั้ง 4 เมนูแสดงให้เห็นว่าสัดส่วน ที่มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดมาจาก ขั้นตอนการทำกาแฟที่ร้าน คือในส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ และพลังงานไฟฟ้า ทั้งนี้วิธีการลดปริมาณการปล่อยก๊าซ เรือนกระจกนั้นอาจขึ้นอยู่กับกระบวนการและทรัพยากรที่ ใช้ในการผลิตวัตถุดิบ นั้นทำให้แนวทางการลดรอยเท้า คาร์บอนจากผลิตภัณฑ์สามารถทำได้โดยมีการปรับเปลี่ยน วิธีการผลิตของผู้ผลิตวัตถุดิบ ตั้งแต่การลดการใช้ก๊าซ

ธรรมชาติหรือถ่านหิน หาแหล่งพลังงานทดแทนมาใช้ เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ หรือก๊าซชีวภาพจากขยะ การลดการหมักย่อยที่ผลิตก๊าซมีเทนของโคนม การจัดการมูลสัตว์อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น นำมูลสัตว์ไปทำปุ๋ยหมัก นำมูลสัตว์ไปผลิตพลังงานชีวภาพ การลดบรรจุภัณฑ์ที่ไม่จำเป็น และการเลือกวิถีกำจัดขยะที่เหมาะสม ผู้ประกอบการร้านอาหารแฟก็ควรเลือกใช้วัตถุดิบในการทำกาแฟที่มีคาร์บอนต่ำคาร์บอนต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นมและช็อกโกแลต และลดการใช้ไฟฟ้าในกระบวนการทำกาแฟ เช่น การทำกาแฟให้ได้หลายแก้วต่อการอุ่นนมหรือต้มน้ำร้อนหนึ่งครั้ง ในส่วนของผู้บริโภค เมื่อทราบข้อมูลรอยเท้าคาร์บอนของกาแฟเมนูต่าง ๆ แล้ว ก็สามารถประกอบการตัดสินใจเลือกเมนูกาแฟที่มีรอยเท้าคาร์บอนต่ำหรือเลือกรูปแบบเครื่องดื่มที่ส่งผลกระทบท่อสิ่งแวดล้อมน้อย ซึ่งสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้เช่นกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสนิยมและความชอบส่วนบุคคลด้วย โดยนอกจากผลการศึกษาี้จะเป็นประโยชน์ต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตและการบริโภคเครื่องดื่มกาแฟแล้ว วิธีประเมินรอยเท้าคาร์บอนในการศึกษานี้ เช่น การพิจารณาวัตถุดิบและกระบวนการที่เกี่ยวข้อง วิธีการคำนวณรอยเท้าคาร์บอน ตลอดจนความแตกต่างของผลการศึกษาเมื่อพิจารณาแบบเครื่องดื่ม (ร้อน/เย็น) และบรรจุภัณฑ์ที่ใช้บรรจุเครื่องดื่มที่ต่างกัน ยังสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการประเมินรอยเท้าคาร์บอนของเครื่องดื่มประเภทอื่น ๆ ได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- Cibelli, M., Cimini, A., Cerchiara, G. & Moresi, M. (2021). Carbon footprint of different methods of coffee preparation. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1614–1625. doi: 10.1016/j.spc.2021.04.004
- Department of Agricultural Extension. (2014). Increase coffee production efficiency. The agricultural Co-operative Federation of Thailand., LTD.
- Department of Business Development. (2019). Coffee production business. Retrieved January 20, 2022, from https://www.dbd.go.th/download/document_file/Statistic/2562/T26/T26_201901.pdf
- Electricity Generating Authority of Thailand. (2021). Proportion of fuel use for generating electricity in the EGAT system in 2021. Retrieved March 6, 2022, from https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=2455&Itemid=116
- Flysjö, A., Henriksson, M., Cederberg, C. Ledgard, S., & Englund, J. (2011). The impact of various parameters on the carbon footprint of milk production in New Zealand and Sweden. *Agricultural Systems*, 104, 459–469. doi: 10.1016/j.agsy.2011.03.003
- Harsono, S.S., Wibowo, R.K.K., and Supriyanto, E. (2021). Energy Balance and Green House Gas Emission on Smallholder Java Coffee Production at Slopes Ijen Raung Plateau of Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 22(7), 271–283. doi: 10.12911/22989993/138997
- Harst, E. v. d. & Potting, J. (2013). A critical comparison of ten disposable cup LCAs. *Environmental Impact Assessment Review*, 43, 86–96. doi: 10.1016/j.eiar.2013.06.006
- Hassard, H. A., Couch, M. H., Techa-erawan, T. & McLellan, B. C. (2014). Product carbon footprint and energy analysis of alternative coffee products in Japan. *Journal of Cleaner Production*, 1–12. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.02.006
- Konstantas, A., Stamford, L. & Azapagic, A. (2019). Evaluation of environmental sustainability of biscuits at the product and sectoral levels. *Journal of Cleaner Production*, 230, 1217–1228. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.095
- Liblab, N. (2020). Carbon footprint assessment of dairy farm and dairy product in Phetchaburi college of agriculture and technology (Ph.D. thesis) Silpakorn University. Retrieved March 6, 2022, from <http://thesis-ir.su.ac.th/dspace/bitstream/123456789/3379/1/59751301.pdf>
- Nab, C., and Maslin, M. (2020). Life cycle assessment synthesis of the carbon footprint of Arabica coffee: Case study of Brazil and Vietnam conventional and sustainable coffee production and export to the United Kingdom. *Geography and Environment*, 7(2), 96. doi: 10.1002/geo2.96
- National Food Institute. (2015). Coffee market in Thailand. Retrieved January 25, 2022, from <http://fic.nfi.or.th/MarketOverviewDomesticDetail.php?id=79>
- Newton Associate. (n.d.). ICEman IM-505U. Retrieved March 6, 2022, from <https://icemancool.com/product/iceman-im-505u/>
- Prasatkhetkan, P. & Chiarakorn, S. (n.d.). Carbon Footprint of Robusta Coffee Bean Processing in Community Enterprise. pp 327–340. In the 34th the national graduate research conference, 27 March 2015, Faculty of Medicine, KhonKaen University, KhonKaen.
- Ratchawat, T., Panyatona, S., Nopchinwong, P., Chidthaisong, A., & Chiarakorn, S. (2020). Carbon and water footprint of Robusta coffee through its production chains in Thailand. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 2415–2429. doi: 10.1007/s10668-018-0299-4
- Reay, D. (2019). Climate-Smart Food. *Environment*, Palgrave macmillan, 22, 2415–2429. doi: 10.1007/978-3-030-18206-9
- TGO. (2019). Carbon Footprint PET Bottled Water Products. Retrieved January 25, 2022, from <http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=WVhKMdGFXTnNaUT09&action=WkdWdWdXbHM¶m=T1E9PQ>
- TGO. (2021a). Carbon Footprint of Products. Retrieved January 25, 2022, from <http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=Y0hKdmlpVmpkSE5mYVhNPQ>
- TGO. (2021b). Emission factors by industry. Retrieved January 25, 2022, from http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/admin/uploadfiles/emission/ts_b934985782.pdf
- Thairath. (2021). Lab coffee is grown in trays for flavor. Sustainable drinking from the cup. Retrieved January 20, 2022, from <https://plus.thairath.co.th/topic/futurism/100639>
- TNN. (2021). "Coffee" culture hidden costs that hurt the world. Retrieved January 20, 2022, from <https://today.line.me/th/v2/article/BjrQR6>
- Trinh, L.T.K., Hu, A.H., Lan, Y.C. and Chen, Z.H. (2019). Comparative life cycle assessment for conventional and organic coffee cultivation in Vietnam. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17, 1307–1324. doi:10.1007/s13762-019-02539-5
- UAC. (2021). Natural gas. Retrieved April 14, 2022, from <https://www.uac.co.th/th/knowledge-sharing/344/natural-gas>

การประมาณจำนวนผู้ติดเชื้อโควิด-19 ในกรุงเทพมหานคร

โดยการใช้วิธีจับ-จับใหม่

Estimating the Number of COVID-19 Infected Cases in Bangkok

by Capture-Recapture Method

ปารวัน ไพจิตรรัตน์* กรชนก ป้องกัน, ศศิชา จารุนทร และ ชญาดา ยิ่งเจริญธนา

Parawan Pijitrattana* Kornchanok Pongkan, Sasicha Jarunet and Chayada Yingcharoenthana

สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University

บทคัดย่อ

วิธีการจับ-จับใหม่ ใช้ในการประมาณขนาดประชากรที่ยากต่อการสำรวจพบ ซึ่งปัจจุบันมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านต่าง ๆ รวมถึงด้านระบาดวิทยา เนื่องจากผู้ติดเชื้อโควิด-19 ส่วนใหญ่จะไม่แสดงอาการ ทำให้มีผู้ติดเชื้อซ่อนเร้นอยู่เป็นจำนวนมาก งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้วิธีจับ-จับใหม่เพื่อประมาณจำนวนประชากรผู้ติดเชื้อโควิด-19 ในกรุงเทพมหานครเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2564 ถึง มกราคม พ.ศ. 2565 โดยใช้ตัวประมาณขนาดประชากรจากการแจกแจงเรขาคณิตซึ่งเป็นตัวประมาณขอบเขตล่าง และตัวประมาณขอบเขตบนภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต เมื่อพิจารณาตัวประมาณขอบเขตล่างพบว่าในเดือนพฤศจิกายน ธันวาคม และมกราคม มีผู้ติดเชื้อจำนวน 46,134, 35,427 และ 58,083 ราย ตามลำดับ คิดเป็น 2 เท่าของจำนวนผู้ติดเชื้อที่มีการรายงานโดยกรมควบคุมโรค สำหรับตัวประมาณขอบเขตบนพบว่าในเดือนพฤศจิกายน ธันวาคม และมกราคม มีจำนวนผู้ติดเชื้อจำนวน 99,258, 76,443 และ 125,377 ราย ตามลำดับ คิดเป็น 4.5 เท่าของจำนวนผู้ติดเชื้อที่มีการรายงานโดยกรมควบคุมโรค

คำสำคัญ: การประมาณขนาดประชากร ไวรัสโคโรนา ไร้อาการ ตรวจไม่พบ

ABSTRACT

Capture-recapture method is widely used in a variety of fields including epidemiology to estimate the size of difficult-to-explore populations. Many people are asymptomatic after contracting COVID-19, resulting in a significant number of concealed infections. This study applied capture-recapture method to estimate the total number of infected populations in Bangkok from November 2021 to January 2022 using Chao lower bound estimator and upper bound estimator under geometric distribution. When the lower bound estimates were taken into account, it was discovered that there were 46,134, 35,427, and 58,083 cases in November, December, and January, respectively, representing 2 times the number of infected reported by the Department of Disease Control. According to the upper bound estimator, there were 99,258, 76,443, and 125,377 cases in November, December, and January, respectively, representing 4.5 times the number of infections reported by the Department of Disease Control.

KEYWORDS: population size estimation, coronavirus, asymptomatic, undetected

*Corresponding Author: parawan@mathstat.sci.tu.ac.th

Received: 18/04/2022; Revised: 10/02/2023; Accepted: 14/02/2023

1. บทนำ

การระบาดของเชื้อไวรัสโคโรนาหรือโควิด-19 เริ่มระบาดในเมืองอู่ฮั่น มณฑลหูเป่ย์ของประเทศจีน ในช่วงปลายปี พ.ศ. 2562 ได้มีการระบาดไปยังประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก ไวรัสโคโรนา (coronavirus) เป็นไวรัสที่ถูกพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1960 แต่ยังไม่ทราบแหล่งที่มาอย่างชัดเจน ไวรัสนี้สามารถติดเชื้อได้ทั้งในมนุษย์และสัตว์

ปัจจุบันมีการค้นพบไวรัสสายพันธุ์นี้แล้วทั้งหมด 6 สายพันธุ์ ส่วนสายพันธุ์ที่กำลังแพร่ระบาดในปัจจุบันถูกเรียกว่า “ไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่” มีชื่อทางการว่า “โควิด-19 (coronavirus disease starting in 2019: COVID-19)” โดยเชื้อโควิด-19 สามารถแพร่ผ่านทางละอองน้ำมูก น้ำลาย ผ่านการไอ จาม และสามารถอยู่บนพื้นผิวของวัตถุต่าง ๆ ทำให้ผู้ที่สัมผัสอาจรับเชื้อเข้าสู่

ร่างกายได้ โดยผู้ติดเชื้อโควิด-19 อาจมีอาการเริ่มต้น เช่น ไอแห้ง หายใจไม่สะดวก ไม่สามารถรับรู้รสชาติและกลิ่นได้ และมีผู้ติดเชื้อจำนวนมากไม่แสดงอาการ

การแพร่ระบาดของโควิด-19 ในประเทศไทยมีความรุนแรงมากขึ้นนับตั้งแต่เริ่มมีการระบาด มีจำนวนผู้ป่วยและจำนวนผู้เสียชีวิตเพิ่มมากขึ้น แต่ข้อมูลจำนวนผู้ติดเชื้อโควิด-19 จากการรายงานของภาครัฐอาจไม่ใช่ข้อมูลที่ต้องการ เนื่องจากมีผู้ติดเชื้อที่มีอาการไม่รุนแรงหรือไม่แสดงอาการอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้มีผู้ติดเชื้อซ่อนเร้นที่ไม่ถูกบันทึกเข้าสู่ระบบสาธารณสุข ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาในการเฝ้าระวังทางสาธารณสุขในเรื่องของการเตรียมทรัพยากรทางสาธารณสุขเพื่อรองรับผู้ป่วย และการวางแผนในการป้องกันการติดเชื้อและดำเนินการเกี่ยวกับผู้ที่ได้รับเชื้อ

วิธีจับ-จับใหม่ (capture-recapture method) เป็นวิธีที่ใช้ประมาณขนาดประชากรที่หน่วยตัวอย่างยากต่อการพบเจอ แต่เดิมวิธีจับ-จับใหม่ ใช้ในการประมาณขนาดประชากรสัตว์ป่าที่อาศัยอยู่ในพื้นที่กว้าง มีการหลบซ่อนและมีการเคลื่อนย้ายถิ่นฐานตลอดเวลา โดยทำการสุ่มตัวอย่างครั้งแรกจากประชากรและทำเครื่องหมายแล้วปล่อยกลับคืน หลังจากนั้นรอรยะเวลาหนึ่งจึงทำการสุ่มตัวอย่างจากประชากรเดิมอีกครั้งและทำเครื่องหมายซ้ำ ๆ กันหลายครั้ง (repeated identification) ซึ่งหน่วยตัวอย่างที่ได้จากการสุ่มในแต่ละครั้งอาจมีหน่วยตัวอย่างซ้ำจากการสุ่มครั้งก่อน ๆ ที่ถูกทำเครื่องหมายไว้ ปัจจุบันวิธีจับ-จับใหม่ถูกประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านชีววิทยา สังคมวิทยาและอาชีววิทยา รวมไปถึงทางด้านสาธารณสุขและด้านระบาดวิทยา เช่น การประมาณจำนวนผู้เสพยาเสพติดของจังหวัดเชียงใหม่ในปี พ.ศ 2559-2560 (Pijittrattana *et.al.*, 2020) การประมาณจำนวนผู้ติดเชื้อเอชไอวีในประเทศไทย (Lanumtaeng, &Bohning, 2011) การประมาณจำนวนโสเภณีในประเทศเวียดนาม (Nguyen *et.al.*, 2021) การตรวจสอบความสมบูรณ์ของการสอบสวนโรคและการติดตามผู้สัมผัสโรคโควิด-19 ในช่วงการระบาดระลอกแรกของประเทศไทย (Lerdsuwansri *et.al.*, 2022)

ข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมด้วยวิธีจับ-จับใหม่เป็นข้อมูลนับ (count data) โดยสนใจจำนวนครั้งที่หน่วยตัวอย่างถูกพบในช่วงเวลาที่ทำการศึกษา ถ้ากำหนดให้ตัวแปรสุ่ม Y แทน จำนวนครั้งที่หน่วยตัวอย่างถูกพบในช่วงเวลาที่ทำการศึกษา โดย $y=0, 1, 2, 3, \dots, m$ และ f_i แทน จำนวนหน่วย

ตัวอย่างที่ถูกพบ i ครั้ง โดยที่ $i=0,1,2,\dots,m$ เมื่อ m คือ จำนวนครั้งสูงสุดที่พบ เนื่องจาก f_0 คือ จำนวนหน่วยตัวอย่างที่ไม่ถูกพบ จึงไม่ทราบค่า f_0 ถ้ากำหนดให้ความน่าจะเป็นที่แต่ละหน่วยตัวอย่างในประชากรจะไม่ถูกพบเท่ากับ p_0 ดังนั้นความน่าจะเป็นที่แต่ละหน่วยตัวอย่างในประชากรจะถูกพบเท่ากับ $1-p_0$ และ N แทน ขนาดประชากรที่ไม่ทราบค่าซึ่งประกอบด้วยจำนวนหน่วยตัวอย่างที่ถูกพบและไม่ถูกพบ

$$N = n + f_0 = n + Np_0 \quad (1)$$

เมื่อ n แทนจำนวนหน่วยตัวอย่างที่ถูกพบโดย $n = f_1 + f_2 + \dots + f_m$ จากสมการ (1) จะได้ตัวประมาณขนาดประชากร Horvitz-Thompson (Van Der Heijden *et.al.*, 2003)

$$\hat{N} = \frac{n}{1 - \hat{p}_0} \quad (2)$$

ดังนั้นในการประมาณขนาดประชากรต้องทำการประมาณค่า p_0 ซึ่งโดยส่วนใหญ่มักอธิบายข้อมูลนับด้วยการแจกแจงปัวซอง (Poisson distribution) ที่มีพารามิเตอร์ λ โดยความน่าจะเป็นที่หน่วยตัวอย่างแต่ละหน่วยจะถูกพบ i ครั้งมีค่าเท่ากัน คือ $\frac{e^{-\lambda} \lambda^i}{i!}$ เรียกว่าตัวแบบปัวซองเอกพันธ์ (homogeneous Poisson model) แต่ในความเป็นจริง หน่วยตัวอย่างในประชากรมักมีความหลากหลาย โดยประชากรประกอบด้วยกลุ่มประชากรย่อย (subpopulation) ซึ่งประชากรย่อยแต่ละกลุ่มมีการแจกแจงปัวซองที่มีพารามิเตอร์ Λ มีค่าแตกต่างกัน ทำให้ความน่าจะเป็นที่หน่วยตัวอย่างแต่ละหน่วยจะถูกพบ ครั้งมีค่าไม่เท่ากัน กรณีเช่นนี้เรียกว่าตัวแบบปัวซองวิวิธพันธุ์ (heterogeneous Poisson model) โดยฟังก์ชันการแจกแจงของตัวแบบปัวซองวิวิธพันธุ์ คือ $p_i = \int_0^\infty \frac{e^{-\lambda} \lambda^i}{i!} f(\lambda) d\lambda$

เมื่อพารามิเตอร์ Λ ของการแจกแจงปัวซองมีการแจกแจงแบบเลขชี้กำลัง (exponential distribution) เกิดเป็นการแจกแจงผสมปัวซองเลขชี้กำลังหรือการแจกแจงเรขาคณิต (geometric distribution)

ในปี พ.ศ. 2563 Böhning และคณะ (Böhning *et.al.*, 2020) ได้ประมาณจำนวนผู้ติดเชื้อโควิด-19 ในประเทศออสเตรเลีย จากข้อมูลจำนวนผู้ติดเชื้อสะสมและจำนวนผู้เสียชีวิตสะสม Böhning และคณะ สมมติให้จำนวนผู้ติดเชื้อโควิด-19 มีการแจกแจงเรขาคณิต และใช้ตัวประมาณ

ชาวภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต ที่นำเสนอโดย Niwitpong และคณะ ในปี พ.ศ. 2556 (Niwitpong *et.al.*, 2013) มีสูตรในการคำนวณคือ $\hat{N}_{Chao} = n + \hat{f}_0 = n + \frac{f_1^2}{f_2}$ ในการ

ประมาณขนาดประชากรผู้ติดเชื้อโควิด-19 ซึ่งเป็นตัวประมาณขอบเขตล่าง อีกทั้ง Niwitpong และคณะยังได้เสนอตัวประมาณความแปรปรวนของตัวประมาณชาวภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต มีสูตรในการคำนวณคือ $\widehat{Var}(\hat{N}_{Chao}) = \frac{f_1^4}{f_2^3} + \frac{4f_1^3}{f_2^2} + \frac{f_1^2}{f_2}$ โดย Böhning และคณะ

กำหนดให้ $f_1(t) = \Delta N(t)$ และ $f_2(t) = \Delta N(t-1) - \Delta D(t)$

$N(t)$ แทน จำนวนผู้ติดเชื้อสะสม ณ วันที่ t

$N(t-1)$ แทน จำนวนผู้ติดเชื้อสะสม ณ วันที่ $t-1$

$D(t)$ แทน จำนวนผู้เสียชีวิตสะสม ณ วันที่ $t-1$

$D(t-1)$ แทน จำนวนผู้เสียชีวิตสะสม ณ วันที่ t

$\Delta N(t) = N(t) - N(t-1)$ แทน จำนวนผู้ติดเชื้อ ณ วันที่ t

$\Delta D(t) = D(t) - D(t-1)$ แทน จำนวนผู้เสียชีวิต ณ วันที่ t

สามารถประมาณจำนวนผู้ติดเชื้อซ่อนเร้น ณ วันที่ t โดยตัวประมาณชาวภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตจาก

$\hat{f}_0^C(t) = \frac{f_1^2(t)}{f_2(t)}$ เมื่อ $t = t_0 + 1, \dots, t_m$ และประมาณ

จำนวนผู้ติดเชื้อซ่อนเร้นในช่วงระยะเวลาที่ศึกษาโดย

$\hat{f}_0^C = \sum_{t=t_0+1}^{t_m} \hat{f}_0^C(t) = \sum_{t=t_0+1}^{t_m} \frac{f_1^2(t)}{f_2(t)}$ ดังนั้นจำนวนผู้ติดเชื้อ

ในช่วงที่ศึกษาคือ $\hat{N}_C = n + \sum_{t=t_0+1}^{t_m} \frac{f_1^2(t)}{f_2(t)}$ เมื่อ n แทน

จำนวนผู้ติดเชื้อที่มีการรายงานในช่วงที่ศึกษา อีกทั้ง Böhning และคณะได้ตรวจสอบประสิทธิภาพของตัวประมาณชาวภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต โดยการคำนวณอัตราการติดเชื้อที่ประมาณได้จากตัวประมาณชาวภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตเทียบกับอัตราการติดเชื้อจากการตรวจด้วยวิธี RT-PCR (real time PCR) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

ในปี พ.ศ. 2563 Rocchetti และคณะ (Rocchetti *et.al.*, 2020) ได้เสนอตัวประมาณขอบเขตบนภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตเพื่อประมาณจำนวนผู้ติดเชื้อโควิด-19 ในทวีปยุโรป โดยประยุกต์ใช้ตัวประมาณขอบเขตบนของ Alfó และคณะ (Alfó *et.al.*, 2020) กับแนวคิดของ Böhning และคณะ (Böhning *et.al.*, 2020) ในการกำหนด $f_1(t) = \Delta N(t)$, $f_2(t) = \Delta N(t-1) - \Delta D(t)$ และ $f_3(t) = \Delta N(t-2) - \Delta D(t-1) - \Delta D(t)$ โดยประมาณจำนวนผู้ติดเชื้อซ่อนเร้น ณ วันที่ t จากสมการที่ (3)

$$\hat{f}_0^{UB}(t) = n^*(t) \left(\frac{\hat{\pi}_0^{UB}(t)}{1 - \hat{\pi}_0^{UB}(t)} \right), \quad (3)$$

$$n^*(t) = f_1(t) + f_2(t) + f_3(t),$$

$$\hat{\pi}_0^{UB}(t) = \frac{\frac{f_1^2(t)}{f_2(t)}}{f_1(t) + f_2(t) + \frac{f_1^2(t)}{f_2(t)}}$$

เมื่อ $t = t_0 + 2, \dots, t_m$ และประมาณจำนวนผู้ติดเชื้อซ่อนเร้นในช่วงระยะเวลาที่ทำการศึกษาดังนี้

$$\hat{f}_0^{UB} = \sum_{t=t_0+2}^{t_m} \hat{f}_0^{UB}(t) = \sum_{t=t_0+2}^{t_m} n^*(t) \left(\frac{\hat{\pi}_0^{UB}(t)}{1 - \hat{\pi}_0^{UB}(t)} \right)$$

ดังนั้นจำนวนผู้ติดเชื้อในช่วงที่ศึกษา คือ $\hat{N}_{UB} = n + \hat{f}_0^{UB}$ เมื่อ n แทนจำนวนผู้ติดเชื้อที่มีการรายงานในช่วงที่ศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการประมาณขนาดประชากรผู้ติดเชื้อโควิด-19 ในกรุงเทพมหานครด้วยวิธีจับ-จับใหม่ โดยใช้ตัวประมาณขนาดประชากรที่พัฒนาภายใต้การแจกแจงปัวซองวิวิพันธ์ 2 ตัวประมาณ ได้แก่ ตัวประมาณชาวภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตซึ่งเป็นตัวประมาณขอบเขตล่าง (Böhning *et.al.*, 2020) และตัวประมาณขอบเขตบนภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต (Rocchetti *et.al.*, 2020) โดยใช้ข้อมูลจำนวนผู้ติดเชื้อและจำนวนผู้เสียชีวิตรายวันซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการวางแผนเกี่ยวกับการควบคุมและป้องกันการติดเชื้อโควิด-19 และวางแผนรับมือต่อการแพร่ระบาดของโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ จำนวนผู้ติดเชื้อโควิด-19 และจำนวนผู้เสียชีวิตในกรุงเทพมหานครที่ได้รับการยืนยันจากกรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข และข้อมูลการติดเชื้อจากการตรวจเชิงรุกที่ได้รับการยืนยันจากสำนักอนามัย กรุงเทพมหานครตั้งแต่วันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2564 ถึงวันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2565

2.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

2.2.1 คำนวณค่าที่ใช้ในการประมาณขนาดประชากรโดยใช้แนวคิดของ Böhning และคณะ (Böhning *et.al.*, 2020)

$$f_1(t) = \Delta N(t)$$

$$f_2(t) = \Delta N(t-1) - \Delta D(t)$$

$$f_3(t) = \Delta N(t-2) - \Delta D(t-1) - \Delta D(t)$$

$$n^*(t) = f_1(t) + f_2(t) + f_3(t)$$

โดย $\Delta N(t)$ แทน จำนวนผู้ติดเชื้อ ณ วันที่ t

$\Delta N(t-1)$ แทน จำนวนผู้ติดเชื้อ ณ วันที่ $t-1$

$\Delta N(t-2)$ แทน จำนวนผู้ติดเชื้อ ณ วันที่ $t-2$

$\Delta D(t)$ แทน จำนวนผู้เสียชีวิต ณ วันที่ t

$\Delta D(t-1)$ แทน จำนวนผู้เสียชีวิต ณ วันที่ $t-1$

2.2.2 ประเมินจำนวนผู้ติดเชื้อซ่อนเร้น ณ วันที่ t

ตัวประมาณค่าภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต

(Niwitpong *et.al.*, 2013, Böhning *et.al.*, 2020)

$$\hat{f}_0^C(t) = \frac{f_1^2(t)}{f_2(t)}, t = t_0 + 1, \dots, t_m \quad (4)$$

ตัวประมาณค่าภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต

(Rocchetti *et.al.*, 2020)

$$\hat{f}_0^{UB}(t) = n^*(t) \left(\frac{\hat{\pi}_0^{UB}(t)}{1 - \hat{\pi}_0^{UB}(t)} \right), t = t_0 + 2, \dots, t_m \quad (5)$$

$$\text{เมื่อ } \hat{\pi}_0^{UB}(t) = \frac{\frac{f_1^2(t)}{f_2(t)}}{f_1(t) + f_2(t) + \frac{f_1^2(t)}{f_2(t)}}$$

2.2.3 ประเมินจำนวนผู้ติดเชื้อและความแปรปรวนของจำนวนผู้ติดเชื้อ ณ วันที่ t

ตัวประมาณค่าภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต

(Niwitpong *et.al.*, 2013, Böhning *et.al.*, 2020)

$$\hat{N}_C(t) = \Delta N(t) + \hat{f}_0^C(t) \quad (6)$$

$$\widehat{Var}(\hat{N}_C(t)) = \frac{f_1^4(t)}{f_2^3(t)} + \frac{4f_1^3(t)}{f_2^2(t)} + \frac{f_1^2(t)}{f_2(t)} \quad (7)$$

ตัวประมาณค่าภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต

(Rocchetti *et.al.*, 2020)

$$\hat{N}_{UB}(t) = n^*(t) + \hat{f}_0^{UB}(t) \quad (8)$$

2.2.4 ประเมินจำนวนผู้ติดเชื้อและความแปรปรวนของจำนวนผู้ติดเชื้อในช่วงที่ศึกษา

ตัวประมาณค่าภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต

(Niwitpong *et.al.*, 2013, Böhning *et.al.*, 2020)

$$\hat{N}_C = \sum_{t=t_0+1}^{t_m} \hat{N}_C(t) \quad (9)$$

$$\widehat{Var}(\hat{N}_C) = \sum_{t=t_0+1}^{t_m} \widehat{Var}(\hat{N}_C(t)) \quad (10)$$

ตัวประมาณค่าภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต

(Rocchetti *et.al.*, 2020)

$$\hat{N}_{UB} = \sum_{t=t_0+2}^{t_m} \hat{N}_{UB}(t) \quad (11)$$

2.2.5 ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ของจำนวนผู้ติดเชื้อในช่วงที่ศึกษา

เนื่องจากในปี พ.ศ. 2556 Niwitpong และคณะ (Niwitpong *et.al.*, 2013) เสนอตัวประมาณค่าความแปรปรวนของตัวประมาณค่าภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต จึงสามารถหาช่วงความเชื่อมั่นโดยวิธีวิลด์ (Pawitan, 2001) ซึ่งอาศัยทฤษฎีบทขีดจำกัดส่วนกลาง (central limit theorem) จะได้ว่า

$$\hat{N}_C \pm z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\widehat{Var}(\hat{N}_C)} \quad (12)$$

โดยที่ $\hat{N}_C$ คือ จำนวนผู้ติดเชื้อในช่วงที่ศึกษาที่ประมาณโดยตัวประมาณค่าภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต $z_{\frac{\alpha}{2}}$ คือ

ค่าควอนไทล์ที่ $\frac{\alpha}{2}$ ของการแจกแจงปกติมาตรฐาน $\widehat{Var}(\hat{N}_C)$ คือ ค่าประมาณความแปรปรวนของจำนวนผู้ติดเชื้อในช่วงที่ศึกษาที่ประมาณโดยตัวประมาณค่าภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต

ดังนั้นช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ของตัวประมาณค่าภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตโดยวิธีวิลด์ คือ

$$\hat{N}_C \pm 1.96 \sqrt{\widehat{Var}(\hat{N}_C)} \quad (13)$$

สำหรับช่วงความเชื่อมั่นของตัวประมาณค่าภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต จะใช้วิธีบูตสแตรป์ (bootstrap method) (Efron, 1992) โดยทำการสุ่มตัวอย่างขนาด t_m แบบคืนที่ (resampling with replacement) จำนวน 1,000 ชุด จากค่าสังเกต $\Delta N(1), \Delta N(2), \Delta N(3), \dots, \Delta N(t_m)$ ได้ตัวอย่างชุดใหม่จำนวน 1,000 ชุด คือ $\Delta N(1)^{(b)}, \Delta N(2)^{(b)}, \Delta N(3)^{(b)}, \dots, \Delta N(t_m)^{(b)}$ เมื่อกำหนดให้ $b = 1, 2, \dots, 1000$ หลังจากนั้นคำนวณจำนวนผู้ติดเชื้อในช่วงที่ศึกษาโดยตัวประมาณค่าภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตจากสมการที่ 11 ของตัวอย่างแต่ละ

ตารางที่ 1 จำนวนผู้ติดเชื้อที่มีการรายงาน จำนวนผู้ติดเชื้อจากตัวประมาณชาวภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต และอัตราส่วนของจำนวนผู้ติดเชื้อจากการประมาณกับจำนวนผู้ติดเชื้อที่มีการรายงานของกรุงเทพมหานครในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2564 ถึง มกราคม พ.ศ. 2565

เดือน	จำนวนผู้ติดเชื้อที่มีการรายงาน (n)	$\hat{f}_0$	$\hat{N}_C$	ช่วงความเชื่อมั่น 95%	$\frac{\hat{N}_C}{n}$
พฤศจิกายน	22,783	23,351	46,134	(27,773, 46,496)	2.0249
ธันวาคม	17,635	17,792	35,427	(21,354, 35,745)	2.0089
มกราคม	28,044	30,039	58,083	(35,565, 58,488)	2.0711

ตารางที่ 2 จำนวนผู้ติดเชื้อที่มีการรายงาน จำนวนผู้ติดเชื้อจากตัวประมาณขอบเขตบนภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต และอัตราส่วนของจำนวนผู้ติดเชื้อจากการประมาณกับจำนวนผู้ติดเชื้อที่มีการรายงานของกรุงเทพมหานครในเดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2564 ถึง มกราคม พ.ศ. 2565

เดือน	จำนวนผู้ติดเชื้อที่มีการรายงาน (n)	$\hat{f}_0^{UB}$	$\hat{N}_{UB}$	ช่วงความเชื่อมั่น 95%	$\frac{\hat{N}_{UB}}{n}$
พฤศจิกายน	22,783	77,298	99,258	(94,794, 103,774)	4.3567
ธันวาคม	17,635	61,157	76,443	(71,053, 85,834)	4.3347
มกราคม	28,044	97,741	125,377	(106,902, 143,647)	4.4707

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบอัตราการติดเชื้อจากตัวประมาณและอัตราการติดเชื้อจากการตรวจเชิงรุกของกรุงเทพมหานครที่มีการรายงานในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2564 ถึง มกราคม พ.ศ. 2565

เดือน	จำนวนผู้เข้ารับ การตรวจเชิงรุก	จำนวนผู้ติดเชื้อ จากการตรวจเชิงรุก	$\hat{\pi}_{Active}$ (%)	$\hat{\pi}_C$ (%) (ช่วงความเชื่อมั่น 95%)	$\hat{\pi}_{UB}$ (%) (ช่วงความเชื่อมั่น 95%)
พฤศจิกายน	29,729	456	1.53	0.77 (0.7577, 0.7827)	1.66 (1.5825, 1.7325)
ธันวาคม	38,564	506	1.30	0.59 (0.5806, 0.6023)	1.28 (1.1862, 1.4330)
มกราคม	42,242	763	1.81	0.97 (0.9550, 0.9844)	2.09 (1.7847, 2.3981)

ชุดจะได้ $\hat{N}_{UB}^1, \hat{N}_{UB}^2, \hat{N}_{UB}^3, \dots, \hat{N}_{UB}^{1,000}$ นำค่าที่ได้มาจัดเรียงจากน้อยไปมาก จากนั้นหาค่าตำแหน่งเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 กำหนดให้เป็น $\hat{N}_{UB}^L$ และหาตำแหน่งเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 95 กำหนดให้เป็น $\hat{N}_{UB}^U$ จะได้ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ของจำนวนผู้ติดเชื้อในช่วงที่ศึกษาด้วยวิธีบูตสเตรป คือ $[\hat{N}_{UB}^L, \hat{N}_{UB}^U]$

2.3 ประเมินประสิทธิภาพการประมาณจำนวนผู้ติดเชื้อ

ประเมินประสิทธิภาพการประมาณจำนวนผู้ติดเชื้อโดยคำนวณอัตราการติดเชื้อจากตัวประมาณทั้ง 2 เทียบกับอัตราการติดเชื้อจากการตรวจเชิงรุกของกรุงเทพมหานครที่ได้รับการยืนยันจากสำนักอนามัย กรุงเทพมหานคร ตั้งแต่วันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2564 ถึง วันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2565

$$\hat{\pi}_C = \frac{\text{จำนวนผู้ติดเชื้อจากตัวประมาณชาว}}{\text{จำนวนประชากรในกรุงเทพมหานคร}} \times 100\%$$

$$\hat{\pi}_{UB} = \frac{\text{จำนวนผู้ติดเชื้อจากตัวประมาณขอบเขตบน}}{\text{จำนวนประชากรในกรุงเทพมหานคร}} \times 100\%$$

$$\hat{\pi}_{Active} = \frac{\text{จำนวนผู้ติดเชื้อจากการตรวจเชิงรุก}}{\text{จำนวนผู้เข้ารับการตรวจเชิงรุก}} \times 100\%$$

โดยที่ $\hat{\pi}_C, \hat{\pi}_{UB}, \hat{\pi}_{Active}$ คือ ค่าประมาณของอัตราการติดเชื้อโควิด-19 โดยตัวประมาณชาวภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต ตัวประมาณขอบเขตบนภายใต้การแจกแจง

เรขาคณิต และข้อมูลการติดเชื้อจากการตรวจเชิงรุกตามลำดับ หากค่าประมาณของอัตราการติดเชื้อโควิด-19 โดยตัวประมาณชาวภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต และตัวประมาณขอบเขตบนภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตใกล้เคียงกับอัตราการติดเชื้อจากการตรวจเชิงรุก แสดงว่าตัวประมาณนั้นมีประสิทธิภาพดี

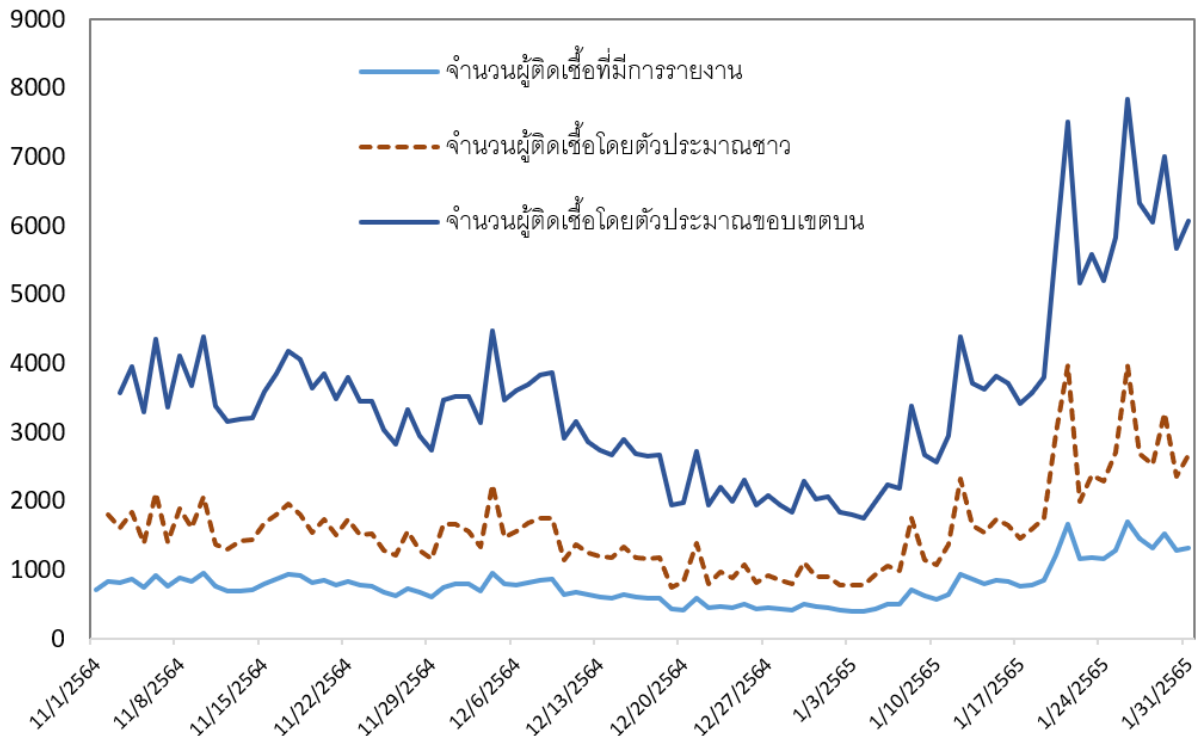
4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการประมาณจำนวนผู้ติดเชื้อโควิด-19

ผลการประมาณจำนวนผู้ติดเชื้อโควิด-19 รายเดือนตั้งแต่วันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2564 ถึง วันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2565 ของกรุงเทพมหานครแสดงได้ดังตารางที่ 1 และ 2

จากข้อมูลจำนวนผู้ติดเชื้อของกรุงเทพมหานครที่รายงานโดยกรมควบคุมโรค พบว่าในเดือนพฤศจิกายน ธันวาคม และมกราคม มีจำนวนผู้ติดเชื้อ 22,783, 17,635 และ 28,044 ราย ตามลำดับ

ตารางที่ 1 แสดงผลการประมาณจำนวนผู้ติดเชื้อโดยตัวประมาณชาวภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต พบว่าในเดือนพฤศจิกายน มีจำนวนผู้ติดเชื้อ 46,134 ราย หรือมีจำนวนผู้ติดเชื้อ 27,773 ถึง 46,496 ราย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในเดือนธันวาคม มีจำนวนผู้ติดเชื้อ 35,427 ราย หรือมีจำนวนผู้ติดเชื้อ 21,354 ถึง 35,745



รูปที่ 1 จำนวนติดเชื้อโควิด-19 รายงานจากการรายงาน จำนวนผู้ติดเชื้อรายวันจากตัวประมาณชาวภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตและตัวประมาณขอบเขตบนภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต ในเดือนพฤศจิกายน 2564 พ.ศ.2564 ถึง มกราคม พ.ศ.2565

ราย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และในเดือนมกราคม มีจำนวนผู้ติดเชื้อ 58,083 ราย หรือมีจำนวนผู้ติดเชื้อ 35,565 ถึง 58,488 ราย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และยังพบว่าในเดือนพฤศจิกายน ธันวาคม และมกราคม จำนวนผู้ติดเชื้อโดยตัวประมาณชาวภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตคิดเป็น 2.0249, 2.0089, 2.0711 เท่าของจำนวนผู้ติดเชื้อที่มีการรายงานโดยกรมควบคุมโรค

ตารางที่ 2 แสดงผลการประมาณจำนวนผู้ติดเชื้อโดยตัวประมาณขอบเขตบนภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตพบว่าในเดือนพฤศจิกายน มีจำนวนผู้ติดเชื้อ 99,258 ราย หรือมีจำนวนผู้ติดเชื้อ 94,794 ถึง 103,774 ราย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในเดือนธันวาคม มีจำนวนผู้ติดเชื้อ 76,443 ราย หรือมีจำนวนผู้ติดเชื้อ 71,053 ถึง 85,834 ราย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และในเดือนมกราคม มีจำนวนผู้ติดเชื้อ 125,377 ราย หรือมีจำนวนผู้ติดเชื้อ 106,902 ถึง 143,647 ราย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และยังพบว่าในเดือนพฤศจิกายน ธันวาคม และมกราคม จำนวนผู้ติดเชื้อโดยตัวประมาณขอบเขตบนภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตคิดเป็น 4.3567, 4.3347, 4.4707 เท่าของจำนวนผู้ติดเชื้อที่มีการรายงานโดยกรมควบคุมโรค

4.2 ผลประเมินประสิทธิภาพการประมาณจำนวนผู้ติดเชื้อโควิด-19

ข้อมูลจำนวนผู้เข้ารับการรักษาเชิงรุกและจำนวนผู้ติดเชื้อจากการตรวจเชิงรุกของกรุงเทพมหานครได้รับการยืนยันจากสำนักอนามัย กรุงเทพมหานคร ตั้งแต่วันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2564 ถึง วันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2565 นำมาคำนวณหาอัตราการติดเชื้อได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 พบว่าในเดือนพฤศจิกายน มีผู้ติดเชื้อจากการตรวจเชิงรุก 456 ราย จากผู้เข้ารับการรักษาทั้งสิ้น 29,729 ราย ซึ่งคิดเป็นอัตราการติดเชื้อร้อยละ 1.53 ในเดือนธันวาคมมีผู้ติดเชื้อจากการตรวจเชิงรุก 506 ราย จากผู้เข้ารับการรักษาทั้งสิ้น 38,564 ราย ซึ่งคิดเป็นอัตราการติดเชื้อร้อยละ 1.30 และในเดือนมกราคมมีผู้ติดเชื้อจากการตรวจเชิงรุก 763 ราย จากผู้เข้ารับการรักษาทั้งสิ้น 42,242 ราย ซึ่งคิดเป็นอัตราการติดเชื้อร้อยละ 1.81

จากการประมาณจำนวนผู้ติดเชื้อโดยตัวประมาณชาวภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตในเดือนพฤศจิกายน คำนวณอัตราการติดเชื้อคิดเป็นร้อยละ 0.77 หรือมีอัตราการติดเชื้อคิดเป็นร้อยละ 0.7577 ถึง 0.7827 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในเดือนธันวาคม คำนวณอัตราการติดเชื้อคิดเป็นร้อยละ 0.59 หรือมีอัตราการติดเชื้อคิดเป็นร้อยละ 0.5806 ถึง 0.6023 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และในเดือนมกราคม คำนวณอัตราการติดเชื้อคิดเป็นร้อยละ

0.97 หรือมีอัตราการติดเชื้อคิดเป็นร้อยละ 0.9550 ถึง 0.9844 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากการประมาณจำนวนผู้ติดเชื้อโดยตัวประมาณขอบเขตบนภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตในเดือนพฤศจิกายน คำนวณอัตราการติดเชื้อคิดเป็นร้อยละ 1.66 หรือมีอัตราการติดเชื้อคิดเป็นร้อยละ 1.5825 ถึง 1.7325 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในเดือนธันวาคม คำนวณอัตราการติดเชื้อคิดเป็นร้อยละ 1.28 หรือมีอัตราการติดเชื้อคิดเป็นร้อยละ 1.1862 ถึง 1.4330 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และในเดือนมกราคม คำนวณอัตราการติดเชื้อคิดเป็นร้อยละ 2.09 หรือมีอัตราการติดเชื้อคิดเป็นร้อยละ 1.7847 ถึง 2.3981 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากการเปรียบเทียบอัตราการติดเชื้อจากการตรวจเชิงรุกและอัตราการติดเชื้อโดยตัวประมาณทั้งสอง พบว่าอัตราการติดเชื้อโดยตัวประมาณขอบเขตบนภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการติดเชื้อจากการตรวจเชิงรุกมากกว่าอัตราการติดเชื้อโดยตัวประมาณชาวภายใต้การแจกแจงเรขาคณิต อีกทั้งช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ของอัตราการติดเชื้อโดยตัวประมาณขอบเขตบนภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตครอบคลุมอัตราการติดเชื้อจากการตรวจเชิงรุก ดังนั้นตัวประมาณขอบเขตบนภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตจึงเหมาะสมที่จะใช้ในการประมาณขนาดประชากรผู้ติดเชื้อโควิด-19 ในกรุงเทพมหานคร

5. อภิปรายและสรุปผล

การประมาณจำนวนประชากรผู้ติดเชื้อโควิด-19 ในกรุงเทพมหานคร โดยตัวประมาณขนาดประชากรชาวภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตซึ่งเป็นตัวประมาณขอบเขตล่าง พบว่าในเดือนพฤศจิกายน ธันวาคม พ.ศ. 2564 และ มกราคม พ.ศ. 2565 จะมีจำนวนประชากรผู้ติดเชื้อโควิด-19 อย่างน้อยประมาณ 2 เท่าของจำนวนผู้ติดเชื้อที่มีการรายงานโดยกรมควบคุมโรค และจากตัวประมาณขอบเขตบนภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตกล่าวได้ว่าจะมีจำนวนประชากรผู้ติดเชื้อโควิด-19 ไม่เกิน 4.5 เท่าของจำนวนผู้ติดเชื้อที่มีการรายงานโดยกรมควบคุมโรค และเมื่อทำการประเมินประสิทธิภาพของตัวประมาณทั้งสองโดยการคำนวณอัตราการติดเชื้อจากตัวประมาณทั้ง 2 เทียบกับอัตราการติดเชื้อจากการตรวจเชิงรุกของกรุงเทพมหานครที่มีการรายงานโดยสำนักงานกนอมาัย กรุงเทพมหานคร ในช่วงเดือนพฤศจิกายน ธันวาคม และ มกราคม พบว่าอัตราการติดเชื้อจากตัวประมาณขอบเขตบนให้ค่าประมาณใกล้เคียงกับอัตราการติดเชื้อจากการ

ตรวจเชิงรุกมากกว่า และช่วงความเชื่อมั่น 95% ของอัตราการติดเชื้อโดยตัวประมาณขอบเขตบนภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตยังครอบคลุมอัตราการติดเชื้อจากการตรวจเชิงรุก จึงกล่าวได้ว่าตัวประมาณขอบเขตบนภายใต้การแจกแจงเรขาคณิตมีประสิทธิภาพในการประมาณจำนวนประชากรผู้ติดเชื้อโควิด-19 ในกรุงเทพมหานคร

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นผลงานวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยประเภทนักวิจัยรุ่นใหม่ จากกองทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ตามเลขที่สัญญา 2/2565 ขอขอบคุณ ผศ.ดร.รัตน เลิศสุวรรณศรี ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- Alfi, M., Böhning, D., & Rocchetti, I. (2021). Upper bound estimators of the population size based on ordinal models for capture-recapture experiments. *Biometrics*, 77(1), 237–248.
- Böhning, D., Rocchetti, I., Maruotti, A., & Holling, H. (2020). Estimating the undetected infections in the Covid-19 outbreak by harnessing capture-recapture methods. *International Journal of Infectious Diseases*, 97, 197–201.
- Efron, B., & LePage, R. (1992). *Introduction to bootstrap* (pp. 3–10). Wiley & Sons, New York.
- Lanumtaeng, K., Böhning, D. (2011). An extension of Chao's estimator of population size based on the first three capture frequency counts. *Computational Statistics and Data Analysis*, 55, 2302–2311.
- Lerdsuwansri, R., Sangnawakij, P., Böhning, D., Sansilapin, C., Chaifoo, W., Polonsky, J. A., & Del Rio Vilas, V. J. (2022) Sensitivity of contact-tracing for COVID-19 in Thailand: a capture-recapture application. *BMC Infectious Diseases*, 22(1), 1–10.
- Nguyen, L. T., Patel, S., Nguyen, N. T., Gia, H. H., Raymond, H. F., Hoang, V. T. H., & Abdul-Quader, A. S. (2021). Population Size Estimation of Female Sex Workers in Hai Phong, Vietnam: Use of Three Source Capture-Recapture Method. *Journal of Epidemiology and Global Health*, 11(2), 194.
- Niwitpong, S. A., Böhning, D., van der Heijden, P. G., & Holling, H. (2013). Capture-recapture estimation based upon the geometric distribution allowing for heterogeneity. *Metrika*, 76(4), 495–519.
- Pawitan, Y. (2001). *In all likelihood: statistical modelling and inference using likelihood*. Oxford University Press.
- Pijitrattana, J., Lerdsuwansri, R. And Böhning, D. (2020). Profile Confidence Interval for Population Size Based on Poisson-Normal Mixture Models. *Proceedings of International Conference in Mathematics and Applications Mahidol University (ICMA-MU2020)*, 119–128.
- Rocchetti, I., Böhning, D., Holling, H., & Maruotti, A. (2020). Estimating the size of undetected cases of the COVID-19 outbreak in Europe: an upper bound estimator. *Epidemiologic Methods*, 9(s1).
- Van Der Heijden, P. G., Bustami, R., Cruyff, M. J., Engbersen, G., & Van Houwelingen, H. C. (2003). Point and interval estimation of the population size using the truncated Poisson regression model. *Statistical Modelling*, 3(4), 305–322.

การแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติก: สมบัติและการประยุกต์

The Poisson-Paralogistic Distribution: Properties and Applications

บุญฤทธิ์ ชูประดิษฐ์¹ และ สิริทิพ วะสินรัตน์^{2*}

Boonyarit Choopradit¹ and Sirithip Wasinrat^{2*}

¹ภาควิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

²คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

¹Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University

²Faculty of Science, Chandrakasem Rajabhat University

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอการแจกแจงผสมระหว่างการแจกแจงพาราลอจิสติกกับการแจกแจงปัวซอง เรียกว่าการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติก ที่ประกอบด้วย 3 พารามิเตอร์ มีการศึกษาสมบัติเบื้องต้นของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกบางประการ ได้แก่ ตัวสถิติอันดับ ฟังก์ชันควอนไทล์ และมูลค่าเสี่ยง การประมาณค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงด้วยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด และประเมินประสิทธิภาพของการประมาณค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงใหม่ ด้วยการจำลองข้อมูลภายใต้สถานการณ์ต่าง ๆ พบว่าค่าประมาณพารามิเตอร์เฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์จริง ค่าความเอนเอียง และรากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยมีค่าลดลง เมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการแจกแจงใหม่ ในการประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริง 3 ชุด พบว่าการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกให้ค่าล็อกภาวะน่าจะเป็นสูงกว่าการแจกแจงพาราลอจิสติก การแจกแจงพาราลอจิสติกผกผัน และการแจกแจงล็อกพาราลอจิสติก

คำสำคัญ: การแจกแจงผสม, ฟังก์ชันควอนไทล์, วิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด

ABSTRACT

In this paper, the Poisson-paralogistic distribution (PPD), a new distribution compounding the paralogistic and Poisson distributions, is proposed. Properties of the new distribution, such as order statistics, quantile function, and value-at-risk (VaR), are obtained. The maximum likelihood estimation (MLE) is then studied to obtain a parameter estimation. A simulation study shows that the average of PPD estimated parameters approximates the real parameters, bias values, and root mean square error value decrease when sample size increases. The proposed distribution is applied to three real datasets, potentially providing a better fit than other related paralogistic, inverse paralogistic, and log-paralogistic distributions, with higher log-likelihood values.

KEYWORDS: mixture distribution, quantile function, maximum likelihood method

*Corresponding Author: sirithip.w@chandra.ac.th

Received: 24/08/2022; Revised: 28/02/2023; Accepted: 10/04/2023

1. บทนำ

การศึกษาลักษณะการแจกแจงที่เหมาะสมกับข้อมูลสามารถพบได้ในหลากหลายศาสตร์ เช่น Khajorntaewawong et al. (2020) ได้ศึกษาการแจกแจงความล่าช้าของเที่ยวบินขาออก Choopradit et al. (2021) ศึกษาการแจกแจงค่าใช้จ่ายต่อหัวของนักท่องเที่ยวในกลุ่มจังหวัดภาคใต้ฝั่งอ่าวไทยก่อนสถานการณ์การระบาดของโควิด-19 ทั่วโลก และ Choopradit & Wasinrat (2021) การแจกแจงของจำนวนพายุหมุนเขตร้อนที่เคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทย อย่างไรก็ตามในบางกรณีชุดข้อมูลไม่สามารถหาลักษณะการแจกแจงที่เหมาะสมได้นั้น

ในปัจจุบันมีการพัฒนาฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นใหม่ ๆ เพิ่มขึ้นมากมายอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะของข้อมูลที่มีความหลากหลายมากขึ้นและสอดคล้องกับสถานการณ์ต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งวิธีที่จะพัฒนาการแจกแจงขึ้นมาใหม่วิธีหนึ่งคือ การผสมการแจกแจงที่มีอยู่แล้วเข้าด้วยกัน โดยมีผู้ศึกษาทั้งที่เป็นแบบการแจกแจงผสมอันตะ (Finite mixture distribution) (Balakrishnan et al., 2009; Erisoglu et al., 2013; Hall & Zhou, 2003; McLachlan & Peel, 2000) และ แบบการแจกแจงผสมอนันต์ (Infinite mixture distribution) (Bulmer, 1974; Emilio et al., 2008; Withers &

Nadarajah, 2011) จากงานวิจัยของ Rodrigues et al. (2009) ได้เสนอการรวมกันของตัวแบบการรอดชีพระยะยาว (Unification of long-term survival models) ซึ่งเป็นการผสมผสานกันระหว่างตัวแปรสุ่มจำนวนสาเหตุของการเกิดเหตุการณ์ที่ไม่ทราบค่า ที่มาจากการแจกแจงของตัวแปรสุ่มไม่ต่อเนื่องกับตัวแปรสุ่มระยะเวลาของการเกิดเหตุการณ์ที่เป็นตัวแปรสุ่มต่อเนื่อง หรือที่เรียกว่าตัวแบบการรักษาแบบผสม (Mixture cure model) โดย Wasinrat & Choopradit (2023) ได้นำตัวแบบของการรอดชีพระยะยาวนี้ไปพัฒนาเป็นการแจกแจงใหม่ โดยผสมการแจกแจงปัวซองและการแจกแจงพาราโตผกผัน เรียกว่าการแจกแจงปัวซองพาราโตผกผัน (Poisson inverse pareto distribution)

การแจกแจงพาราลอจิสติก (Paralogistic distribution: PD) เป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบต่อเนื่อง ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย McDonald (1984) ซึ่งพัฒนามาจากการแจกแจงเบอร์ (Burr distribution) กรณีที่พารามิเตอร์บ่งรูปร่าง (Shape parameter) ทั้งสองตัวมีค่าเท่ากัน (Kleiber & Kotz, 2003) สำหรับการประยุกต์ใช้การแจกแจงพาราลอจิสติกนั้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับตัวแบบทางเศรษฐศาสตร์ การเงิน และทางด้านการประกันภัยอีกด้วย (Kleiber & Kotz, 2003; Klugman et al., 2019) ที่ผ่านมามีผู้วิจัยได้ขยายการแจกแจงพาราลอจิสติก เช่น งานวิจัยของ Idemudia & Ekhosuehi (2019) ได้เสนอการแจกแจงพาราลอจิสติกใหม่ที่มี 3 พารามิเตอร์ โดยการเพิ่มพารามิเตอร์บ่งตำแหน่ง (Location parameter) ซึ่งเพิ่มความยืดหยุ่นในการประยุกต์ใช้กับชุดข้อมูลจริง โดยการเปรียบเทียบกับ การแจกแจงที่ใกล้เคียง ได้แก่ การแจกแจงพาราลอจิสติก การแจกแจงพาราลอจิสติกผกผัน การแจกแจงล็อกลอจิสติก การแจกแจงแกมมา พบว่าจากการทดสอบภาวะสารูปติการแจกแจงพาราลอจิสติกใหม่ 3 พารามิเตอร์มีความเหมาะสมมากกว่าเมื่อเทียบกับการแจกแจงอื่น และงานวิจัยของ Bhati et al. (2019) ได้ขยายการแจกแจงพาราลอจิสติกที่ชื่อว่า การแจกแจงพาราลอจิสติก-เอ็มพีแอลจี (Paralogistic-MPLG distribution) ซึ่งเป็นการแจกแจงที่มี 4 พารามิเตอร์ จากการนำไปประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริงเปรียบเทียบกับ การแจกแจงอื่น เช่น การแจกแจงไวบูล-เอ็มพีแอลจี การแจกแจงล็อกนอร์มัล-เอ็มพีแอลจี การแจกแจงไวบูล-พาราโต การแจกแจงล็อกนอร์มัล-เอ็มพีแอลจี พบว่าการทดสอบภาวะสารูปติการแจกแจงพาราลอจิสติก-เอ็มพีแอลจี มีความเหมาะสมเป็นลำดับที่ 2 เมื่อเทียบกับการแจกแจงอื่น เห็นได้ว่าการขยายการแจกแจงพาราลอจิสติกสามารถนำไป

ประยุกต์ใช้กับข้อมูลได้ดีเมื่อเทียบกับการแจกแจงอื่น อย่างไรก็ตามยังได้มีการพัฒนาหรือการขยายของการแจกแจงพาราลอจิสติกที่กว้างขวางมากขึ้น

สำหรับการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาการแจกแจงที่เป็น การผสมระหว่าง การแจกแจงปัวซองกับการแจกแจงพาราลอจิสติกและนำเสนอเป็นการแจกแจงใหม่ พร้อมทั้งพิสูจน์คุณสมบัติเชิงความน่าจะเป็นของการแจกแจงดังกล่าวควบคู่กับการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ศึกษาวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุดและประเมินประสิทธิภาพของการประมาณค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงใหม่ด้วยการจำลองข้อมูลภายใต้สถานการณ์ต่าง ๆ นอกจากนี้ มีการประยุกต์การแจกแจงใหม่กับชุดข้อมูลจริง และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการแจกแจงใหม่กับการแจกแจงอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

2. วิธีการ

2.1 วิธีของการแจกแจงผสม

(Method of mixture distribution)

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการผสมผสานของตัวแบบการรอดชีพระยะยาว (Unification of long-term survival models) ที่เสนอโดย Rodrigues et al. (2009) ซึ่งเป็นการผสมผสานกันระหว่างตัวแปรสุ่มจำนวนสาเหตุของการเกิดเหตุการณ์ที่ไม่ทราบค่ากับตัวแปรสุ่มเวลาของการเกิดเหตุการณ์ ดังนี้

ให้ N เป็นตัวแปรสุ่มที่ไม่ทราบค่าแทนจำนวนสาเหตุของการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจด้วยการแจกแจงความน่าจะเป็น $p_n = P(N = n)$ โดยที่ $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ และให้ $Z_i, i = 1, 2, \dots, n$ เป็นตัวแปรสุ่มแทนเวลาของการเกิดเหตุการณ์จากสาเหตุลำดับที่ i และ Z_i เป็นอิสระกับ N ตัวแบบการรอดชีพระยะยาว (Long-term survival function) ของตัวแปรสุ่ม X เขียนแทนด้วย $S_{LT}(x)$ กำหนดโดย

$$\begin{aligned} S_{LT}(x) &= P(N = 0) + P(Z_1 > x, Z_2 > x, \dots, Z_N > x, N \geq 1) \\ &= P(N = 0) + \sum_{n=1}^{\infty} P(N = n) P(Z_1 > x, Z_2 > x, \dots, Z_N > x) \\ &= p_0 + \sum_{n=1}^{\infty} p_n [S(x)]^n \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} p_n [S(x)]^n \\ &= A[S(x)] \end{aligned} \quad (1)$$

โดย $A[\cdot]$ คือ ฟังก์ชันก่อกำเนิดของลำดับ p_n และ $S(x)$ คือ ฟังก์ชันการรอดชีพที่ $0 \leq S(x) \leq 1$ ทั้งนี้ เนื่องจาก

$\lim_{x \rightarrow \infty} S_{LT}(x) = p_0$ ใน Rodrigues et al. (2009) ได้แสดง $S_{LT}(x)$ ในรูปของ

$$S_{LT}(x) = p_0 + (1 - p_0)S_M(x) \quad (2)$$

โดยที่ $S_M(x)$ คือ ฟังก์ชันการรอดชีพที่

$$S_M(x) = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} p_n [S(x)]^n - p_0}{1 - p_0} \quad \text{และ} \quad \lim_{x \rightarrow \infty} S_M(x) = 0$$

จากสมการที่ (1) และ (2) Wasinrat & Choopradit (2023) ได้แสดงให้เห็นว่า

$$S_M(x) = \frac{A[S(x)] - p_0}{1 - p_0} \quad (3)$$

โดยในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงสมการที่ (3) ในฐานะที่เป็นฟังก์ชันการรอดชีพผสม (Mixed survival function) และด้วยความสัมพันธ์ของฟังก์ชันการรอดชีพและฟังก์ชันการแจกแจง จะนำไปสู่การสร้างเป็นฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบผสม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wasinrat & Choopradit (2023) ที่ได้นำเสนอการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติก

2.2 การแจกแจงพาราลอจิสติก

ให้ X เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงพาราลอจิสติก โดยมีฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative distribution function: cdf) ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability density function: pdf) และ ฟังก์ชันการรอดชีพ (Survival function) ตามลำดับดังนี้

$$\begin{aligned} F_{PD}(x) &= 1 - \left[\frac{1}{(x/\theta)^\alpha + 1} \right]^\alpha; \quad x > 0, \theta > 0, \alpha > 0 \\ f_{PD}(x) &= \frac{\alpha^2 (x/\theta)^\alpha}{x \left[(x/\theta)^\alpha + 1 \right]^{\alpha+1}}; \quad x > 0, \theta > 0, \alpha > 0 \\ S_{PD}(x) &= \left[\frac{1}{(x/\theta)^\alpha + 1} \right]^\alpha; \quad x > 0, \theta > 0, \alpha > 0 \end{aligned} \quad (4)$$

โดยที่ $\theta > 0$ คือพารามิเตอร์บ่งขนาด (Scale parameter) และ $\alpha > 0$ คือพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง (Shape parameter) การแจกแจงพาราลอจิสติกมาจากการแจกแจงเบอร์ (Burr distribution) กรณีที่พารามิเตอร์บ่งรูปร่างทั้งสองตัวมีค่าเท่ากัน ในทำนองเดียวกันการแจกแจงพาราลอจิสติกผกผัน (Inverse paralogistic distribution: IPD) มาจากการแจกแจงเบอร์ผกผัน (Inverse Burr distribution) กรณีที่พารามิเตอร์บ่งรูปร่างทั้งสองตัวมีค่าเท่ากันเช่นกัน และการแจกแจงเบอร์กรณีพารามิเตอร์บ่งรูปร่างมีค่าเท่ากับ 1

จะเป็นการแจกแจงล็อกลอจิสติก (Log-logistic distribution: LLD) (Kleiber & Kotz, 2003) โดยมีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นดังนี้

การแจกแจงพาราลอจิสติกผกผัน

ให้ X เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงพาราลอจิสติกผกผันโดยมีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น คือ

$$f_{IPD}(x) = \frac{\nu^2 (x/\mu)^{\nu^2}}{x \left[1 + (x/\mu)^\nu \right]^{\nu+1}}, \quad x > 0, \mu > 0, \nu > 0 \quad (5)$$

การแจกแจงล็อกลอจิสติก

ให้ X เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงล็อกลอจิสติกโดยมีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น คือ

$$f_{LLD}(x) = \frac{\gamma (x/\kappa)^\gamma}{x \left[1 + (x/\kappa)^\gamma \right]^2}, \quad x > 0, \kappa > 0, \gamma > 0 \quad (6)$$

3. ผลการวิจัย

3.1 การแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติก

(Poisson-paralogistic distribution: PPD)

ในขั้นนี้เสนอการแจกแจงผสมใหม่ของการแจกแจงปัวซองและการแจกแจงพาราลอจิสติก โดยใช้ฟังก์ชันการรอดชีพผสมจากสมการที่ (3)

บทนิยาม 1. ให้ $A_p(s)$ แทนฟังก์ชันก่อกำเนิดความน่าจะเป็น (Probability generating function: pgf) ของการแจกแจงปัวซองที่มีพารามิเตอร์ λ โดยที่

$$A_p(s) = \exp[-\lambda(1-s)] \quad (7)$$

โดยที่ $\lambda > 0$ และ $|s| \leq 1$

บทนิยาม 2. ให้ X เป็นตัวแปรสุ่มของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกที่มีพารามิเตอร์ λ , θ และ α เขียนแทนด้วย $X \sim PPD(\lambda, \theta, \alpha)$ โดยที่ $\lambda > 0$, $\theta > 0$ และ $\alpha > 0$

ทฤษฎีบท 1. ฟังก์ชันการรอดชีพของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติก คือ

$$S_{PPD}(x) = \frac{\exp \left[-\lambda \left(1 - \left[\frac{1}{(x/\theta)^\alpha + 1} \right]^\alpha \right) \right] - \exp(-\lambda)}{1 - \exp(-\lambda)}, \quad x > 0, \lambda > 0, \theta > 0, \alpha > 0 \quad (8)$$

พิสูจน์ ให้ $A[S(x)]$ เป็น pgf ของการแจกแจงปัวซองตามสมการที่ (7) ฟังก์ชันการรอดชีพผสมเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} S_M(x) &= \frac{\exp[-\lambda(1-S(x))] - p_0}{1 - p_0} \\ &= \frac{\exp[-\lambda F(x)] - \exp(-\lambda)}{1 - \exp(-\lambda)} \end{aligned}$$

โดยที่ $F(x) = 1 - S(x)$ และ $p_0 = P(N=0) = \exp(-\lambda)$
 ดังนั้น แทน $F(x)$ ด้วย $F_{PPD}(x)$ ได้ฟังก์ชันการรอดชีพ
 ของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกคือ

$$S_{PPD}(x) = \frac{\exp[-\lambda F_{PPD}(x)] - \exp(-\lambda)}{1 - \exp(-\lambda)}$$

$$= \frac{\exp\left[-\lambda \left(1 - \left[\frac{1}{(x/\theta)^\alpha + 1}\right]^\alpha\right)\right] - \exp(-\lambda)}{1 - \exp(-\lambda)}$$

รูปที่ 1 แสดงฟังก์ชันการรอดชีพของการแจก
 แจงปัวซองพาราลอจิสติกสำหรับบางค่าพารามิเตอร์
 λ, θ, α โดยจะเห็นว่าฟังก์ชันการรอดชีพของการแจก
 แจงปัวซองพาราลอจิสติกมีรูปร่างลดลง (Decreasing
 shape) ในกรณีที่ λ มีค่าเพิ่มขึ้น รูปร่างของฟังก์ชันการ
 รอดชีพจะลดลงเร็วขึ้น เมื่อค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ คงที่

ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (The cumulative
 distribution function) เขียนได้ดังนี้

$$F_{PPD}(x) = 1 - \frac{e^{-\lambda \left[1 - \left(\frac{1}{(x/\theta)^\alpha + 1}\right)^\alpha\right]} - e^{-\lambda}}{1 - e^{-\lambda}}, \quad x > 0, \lambda > 0, \theta > 0, \alpha > 0 \quad (9)$$

รูปที่ 2 แสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของการแจก
 แจงปัวซองพาราลอจิสติกสำหรับบางค่าพารามิเตอร์ λ, θ, α
 ในกรณีที่ λ มีค่าเพิ่มขึ้นฟังก์ชันการแจกแจงสะสมจะมีความ
 ชันของกราฟที่เพิ่มขึ้น เมื่อค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ คงที่

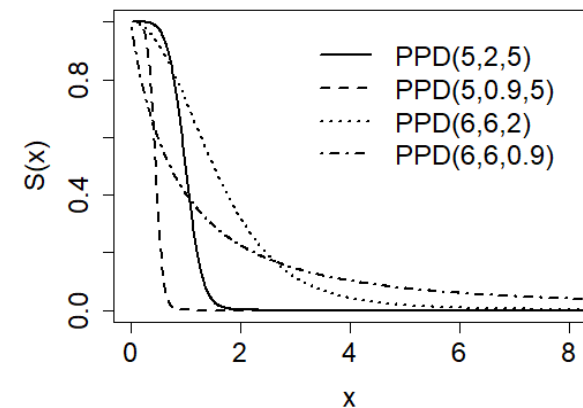
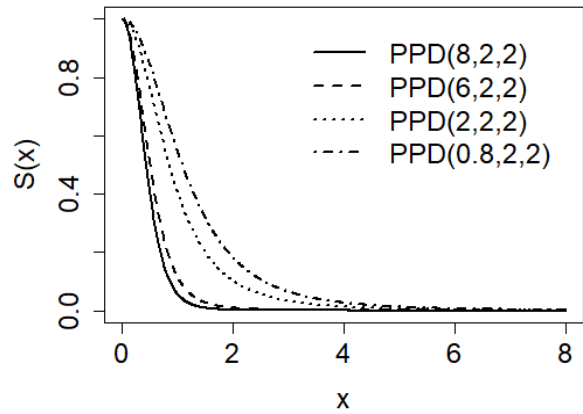
ทฤษฎีบท 2. ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น คือ

$$f_{PPD}(x) = \frac{e^{-\lambda \left[1 - \left(\frac{1}{(x/\theta)^\alpha + 1}\right)^\alpha\right]} \lambda \alpha^2 (x/\theta)^\alpha}{(1 - e^{-\lambda}) x \left[(x/\theta)^\alpha + 1\right]^{\alpha+1}}, \quad x > 0, \lambda > 0, \theta > 0, \alpha > 0 \quad (10)$$

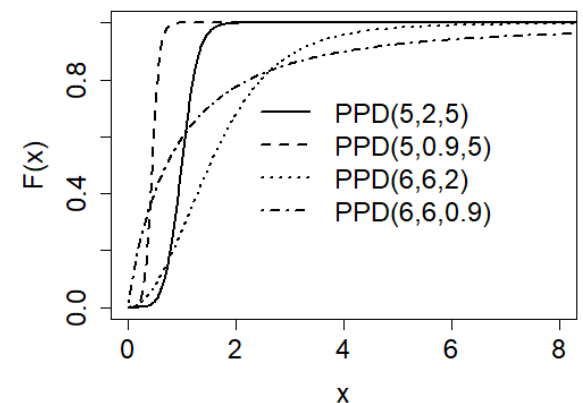
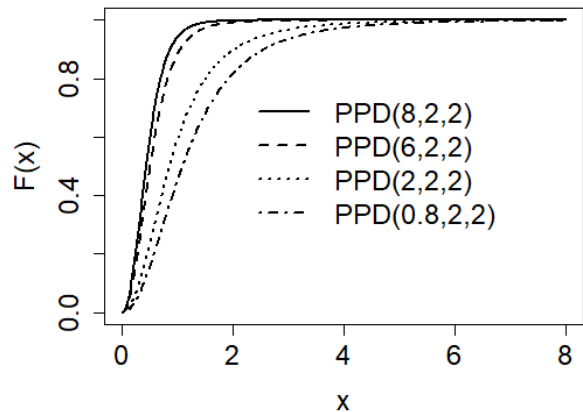
พิสูจน์ เมื่อ $f_{PPD}(x) = -\frac{dS_{PPD}(x)}{dx}$ เป็นการเสร็จสิ้นการ

พิสูจน์ทฤษฎีบท

รูปที่ 3 แสดงฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น
 ของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกสำหรับบาง
 ค่าพารามิเตอร์ λ, θ, α เส้นโค้งแสดงให้เห็นว่าการแจก
 แจงปัวซองพาราลอจิสติกมีการแจกแจงเบ้ขวา และยังพบ
 อีกว่าการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกเป็นการแจกแจง
 ฐานนิยมเดียว (Unimodal distribution) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของ
 พารามิเตอร์บ่งรูปร่างคือ α อย่างไรก็ตาม จากการเพิ่ม
 ค่าพารามิเตอร์ λ เข้ามาขยายการแจกแจงพาราลอจิสติกเดิม



รูปที่ 1 ฟังก์ชันการรอดชีพของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกสำหรับบางค่าพารามิเตอร์



รูปที่ 2 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกสำหรับบางค่าพารามิเตอร์

จะเห็นว่าเมื่อ λ มีค่าลดลง การกระจายของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกจะมากขึ้น เมื่อพารามิเตอร์อื่น ๆ คงที่

ทฤษฎีบท 3. ฟังก์ชันพิบัติ (The hazard function) คือ

$$h_{PPD}(x) = \frac{e^{-\lambda \left[1 - \left(\frac{1}{(x/\theta)^\alpha + 1}\right)^\alpha\right]} \lambda \alpha^2 (x/\theta)^\alpha}{x \left[(x/\theta)^\alpha + 1\right]^{\alpha+1} \left\{ e^{-\lambda \left[1 - \left(\frac{1}{(x/\theta)^\alpha + 1}\right)^\alpha\right]} - e^{-\lambda} \right\}}, \quad x > 0, \lambda > 0, \theta > 0, \alpha > 0 \quad (11)$$

พิสูจน์ เมื่อ $h_{PPD}(x) = \frac{f_{PPD}(x)}{S_{PPD}(x)}$ แทน $f_{PPD}(x)$ จากสมการที่ (10) และ $S_{PPD}(x)$ ในสมการที่ (8) จึงได้ผลลัพธ์ เป็นการเสร็จสิ้นการพิสูจน์ทฤษฎีบท

รูปที่ 4 แสดงฟังก์ชันพิบัติของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกสำหรับบางค่าพารามิเตอร์ λ, θ, α โดยเส้นโค้งแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันพิบัติของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกสามารถสร้างได้หลากหลายรูปร่างดังสมการที่ (11)

3.2 คุณสมบัติเชิงความน่าจะเป็น

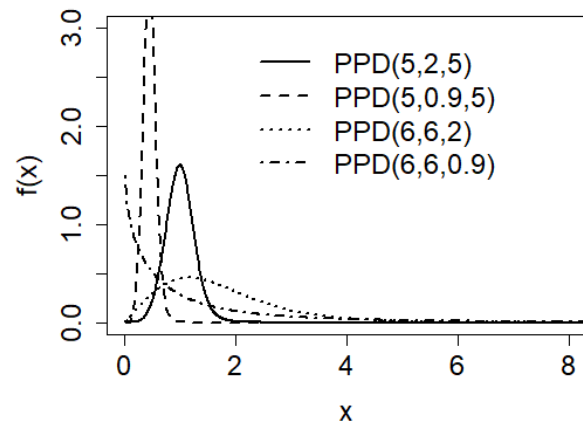
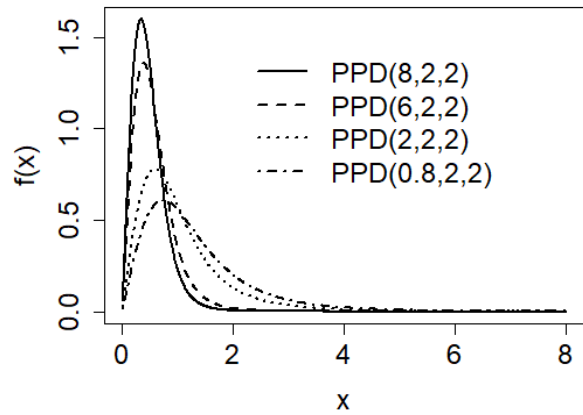
ในส่วนนี้ได้นำเสนอบางสมบัติเบื้องต้นของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติก เช่น ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของตัวสถิติอันดับที่ k , ฟังก์ชันควอนไทล์ รวมทั้งมูลค่าเสี่ยงภัยที่นำไปใช้ในการประยุกต์ด้านการประกันภัย

3.2.1 ตัวสถิติอันดับ (Order statistics)

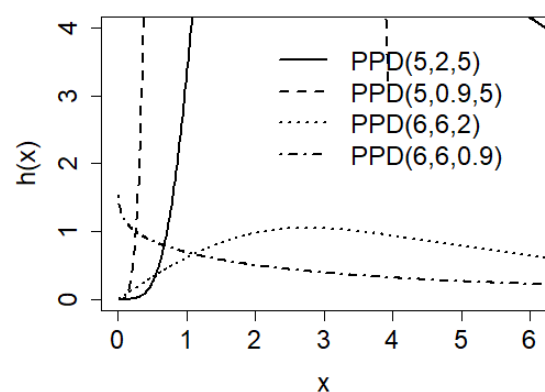
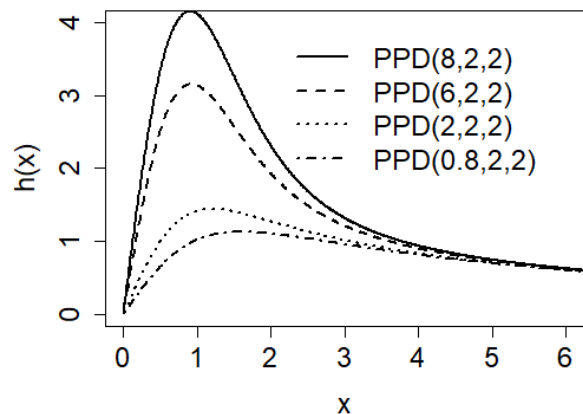
ให้ $X_1, X_2, \dots, X_n$ เป็นตัวอย่างสุ่มขนาด n จากการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกที่มีพารามิเตอร์ λ, θ และ $\alpha, X \sim PPD(\lambda, \theta, \alpha)$, โดยที่ $\lambda > 0, \theta > 0$ และ $\alpha > 0$ ที่มีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ดังสมการที่ (10) และ (9) ตามลำดับ ให้ $X_{1:n} < X_{2:n} < \dots < X_{n:n}$ เป็นตัวสถิติอันดับ แล้วฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ $X_{k:n}$ คือ $f_{k:n}(x)$, $k = 1, 2, \dots, n$ หาได้จาก

$$f_{k:n}(x) = \frac{n!}{(k-1)!(n-k)!} f(x) [F(x)]^{k-1} [1-F(x)]^{n-k} \quad (12)$$

เมื่อแทนฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ดังสมการที่ (10) และ (9) ตามลำดับ ลงในสมการที่ (12) จะได้ว่า



รูปที่ 3 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกสำหรับบางค่าพารามิเตอร์



รูปที่ 4 ฟังก์ชันพิบัติของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกสำหรับบางค่าพารามิเตอร์

$$f_{k:n}(x) = \frac{n!}{(k-1)!(n-k)!} \cdot \frac{e^{-\lambda \left[1 - \left(\frac{1}{(x/\theta)^\alpha + 1} \right)^\alpha \right]} \lambda \alpha^2 (x/\theta)^\alpha}{(1-e^{-\lambda}) x \left[(x/\theta)^\alpha + 1 \right]^{\alpha+1}} \left[1 - \frac{e^{-\lambda \left[1 - \left(\frac{1}{(x/\theta)^\alpha + 1} \right)^\alpha \right]} - e^{-\lambda}}{1-e^{-\lambda}} \right]^{k-1} \left[\frac{e^{-\lambda \left[1 - \left(\frac{1}{(x/\theta)^\alpha + 1} \right)^\alpha \right]} - e^{-\lambda}}{1-e^{-\lambda}} \right]^{n-k}$$

เมื่อ $k=1$ ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ $X_{1:n}$ ได้แก่

$$f_{1:n}(x) = \frac{n!}{(n-1)!} \cdot \frac{e^{-\lambda \left[1 - \left(\frac{1}{(x/\theta)^\alpha + 1} \right)^\alpha \right]} \lambda \alpha^2 (x/\theta)^\alpha}{(1-e^{-\lambda}) x \left[(x/\theta)^\alpha + 1 \right]^{\alpha+1}} \left[\frac{e^{-\lambda \left[1 - \left(\frac{1}{(x/\theta)^\alpha + 1} \right)^\alpha \right]} - e^{-\lambda}}{1-e^{-\lambda}} \right]^{n-1}$$

เมื่อ $k=n$ ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ $X_{n:n}$ ได้แก่

$$f_{n:n}(x) = \frac{n!}{(n-1)!} \cdot \frac{e^{-\lambda \left[1 - \left(\frac{1}{(x/\theta)^\alpha + 1} \right)^\alpha \right]} \lambda \alpha^2 (x/\theta)^\alpha}{(1-e^{-\lambda}) x \left[(x/\theta)^\alpha + 1 \right]^{\alpha+1}} \left[1 - \frac{e^{-\lambda \left[1 - \left(\frac{1}{(x/\theta)^\alpha + 1} \right)^\alpha \right]} - e^{-\lambda}}{1-e^{-\lambda}} \right]^{n-1}$$

3.2.2 ฟังก์ชันควอนไทล์ (Quantile function: QF)

ให้ $X \sim PPD(\lambda, \theta, \alpha)$ โดยที่ $\lambda > 0$, $\theta > 0$ และ $\alpha > 0$ ที่มีฟังก์ชันการแจกแจงสะสม แสดงดังสมการที่ (9) ฟังก์ชันควอนไทล์ (QF; Gilchrist, 2000) เขียนแทนด้วย $Q(p)$ และ $Q(p) = F^{-1}(p)$ โดยที่ $p \in (0,1)$

ทฤษฎีบท 4. ถ้า $X \sim PPD(\lambda, \theta, \alpha)$ แล้ว QF ของ X คือ

$$Q(p) = \theta \left[1 - \left\{ \frac{\ln \left[(1-p)(1-e^{-\lambda}) + e^{-\lambda} \right]}{-\lambda} \right\}^{-\frac{1}{\alpha}} - 1 \right]^{\frac{1}{\alpha}}$$

โดยเฉพาะอย่างยิ่ง มัธยฐานของ $X \sim PPD(\lambda, \theta, \alpha)$ คือ

$$Q(0.5) = \theta \left[1 - \left\{ \frac{\ln \left[(1-0.5)(1-e^{-\lambda}) + e^{-\lambda} \right]}{-\lambda} \right\}^{-\frac{1}{\alpha}} - 1 \right]^{\frac{1}{\alpha}}$$

พิสูจน์ เมื่อ $Q(p) = F^{-1}(p)$ โดยที่ $p \in (0,1)$ นั่นคือ $F(Q(p)) = p$ เมื่อ $X \sim PPD(\lambda, \theta, \alpha)$ โดยที่ $\lambda > 0$, $\theta > 0$ และ $\alpha > 0$ ที่มีฟังก์ชันการแจกแจงสะสม แสดงดังสมการที่ (9) เราได้ว่า

$$F(Q(p)) = 1 - \frac{e^{-\lambda \left[1 - \left(\frac{1}{(Q(p)/\theta)^\alpha + 1} \right)^\alpha \right]} - e^{-\lambda}}{1-e^{-\lambda}} = p$$

$$\frac{e^{-\lambda \left[1 - \left(\frac{1}{(Q(p)/\theta)^\alpha + 1} \right)^\alpha \right]} - e^{-\lambda}}{1-e^{-\lambda}} = 1-p$$

ดังนั้น เมื่อแก้สมการหา $Q(p)$ จะได้ว่า

$$Q(p) = \theta \left[1 - \left\{ \frac{\ln \left[(1-p)(1-e^{-\lambda}) + e^{-\lambda} \right]}{-\lambda} \right\}^{-\frac{1}{\alpha}} - 1 \right]^{\frac{1}{\alpha}}$$

ตารางที่ 1 แสดงค่าควอนไทล์ของการแจกแจงปัวซอง พาราลอจิสติกสำหรับบางค่าพารามิเตอร์ λ, θ, α

3.2.3 มูลค่าเสี่ยงภัย (Value-at-Risk: VaR)

ให้ X แทนค่าความเสียหายหรือสูญเสียเป็นผลลัพธ์ที่ไม่พึงประสงค์ มูลค่าเสี่ยงภัย (VaR; Klugman et al., 2019) ของ X คือ ค่าเปอร์เซ็นไทล์ที่ $100p$ ของการแจกแจงของ X เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $VaR_p(X)$ หรือ π_p พิจารณาการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติก ที่มีพารามิเตอร์ $\lambda > 0$, $\theta > 0$ และ $\alpha > 0$ โดยฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแสดงดัง ทฤษฎีบท 2 จะได้ว่า VaR สำหรับการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกเขียนได้ดังนี้

$$VaR_p(X) = \pi_p = \theta \left[\frac{\left\{ 1 - \left\{ 1 + \frac{1}{\lambda} \ln \left[(1-p)(1-e^{-\lambda}) + e^{-\lambda} \right] \right\}^{\frac{1}{\alpha}} \right\}^{\frac{1}{\alpha}}}{\left\{ 1 + \frac{1}{\lambda} \ln \left[(1-p)(1-e^{-\lambda}) + e^{-\lambda} \right] \right\}^{\frac{1}{\alpha}}} \right]^{\frac{1}{\alpha}}$$

พิสูจน์ เมื่อ $X \sim PPD(\lambda, \theta, \alpha)$ โดยที่ $\lambda > 0$, $\theta > 0$ และ $\alpha > 0$ มีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น แสดงดังสมการที่ (10) แล้วค่าของ π_p หาได้จาก

$$P(X > \pi_p) = \int_{\pi_p}^{\infty} f_{PPD}(x) dx = 1-p \text{ ซึ่งจะได้ว่า}$$

$$\frac{e^{-\lambda \left[1 - \left(\frac{1}{(\pi_p/\theta)^\alpha + 1} \right)^\alpha \right]} - e^{-\lambda}}{1-e^{-\lambda}} = 1-p$$

คูณ $1-e^{-\lambda}$ ทั้งสองข้างของสมการด้านบนและใส่ลอการิทึมธรรมชาติทั้งสองข้าง จะได้

$$-\lambda \left[1 - \left(\frac{1}{(\pi_p/\theta)^\alpha + 1} \right)^\alpha \right] = \ln \left[(1-p)(1-e^{-\lambda}) + e^{-\lambda} \right]$$

ดังนั้น เมื่อแก้สมการหา π_p จะได้ว่า

$$\frac{1}{(\pi_p/\theta)^\alpha + 1} = \left\{ 1 + \frac{1}{\lambda} \ln \left[(1-p)(1-e^{-\lambda}) + e^{-\lambda} \right] \right\}^{\frac{1}{\alpha}}$$

ตารางที่ 1 ค่าคอนโวลูชันของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกสำหรับบางค่าพารามิเตอร์

λ	θ	$\alpha=6$			$\alpha=2$			$\alpha=0.8$		
		Q_1	Q_2	Q_3	Q_1	Q_2	Q_3	Q_1	Q_2	Q_3
6	6	2.6943	3.1412	3.5715	0.9448	1.5066	2.2407	0.1899	0.6318	1.8254
	2	0.8981	1.0471	1.1905	0.3149	0.5022	0.7469	0.0633	0.2106	0.6085
	0.8	0.3592	0.4188	0.4762	0.1260	0.2009	0.2988	0.0253	0.0842	0.2434
2	6	3.1731	3.7226	4.2771	1.5540	2.5531	4.0140	0.6851	2.6237	10.1356
	2	1.0577	1.2409	1.4257	0.5180	0.8510	1.3380	0.2284	0.8746	3.3785
	0.8	0.4231	0.4963	0.5703	0.2072	0.3404	0.5352	0.0914	0.3498	1.3514
0.8	6	3.4269	4.0139	4.5902	1.9699	3.2520	5.1268	1.2860	5.2877	23.0711
	2	1.1423	1.3380	1.5301	0.6566	1.0840	1.7089	0.4287	1.7626	7.6903
	0.8	0.4569	0.5352	0.6120	0.2627	0.4336	0.6836	0.1715	0.7050	3.0761

$$\pi_p = \theta \left(\frac{1 - \left\{ 1 + \frac{1}{\lambda} \ln \left[(1-p)(1-e^{-\lambda}) + e^{-\lambda} \right] \right\}^{\frac{1}{\alpha}}}{\left\{ 1 + \frac{1}{\lambda} \ln \left[(1-p)(1-e^{-\lambda}) + e^{-\lambda} \right] \right\}^{\frac{1}{\alpha}}} \right)^{\frac{1}{\alpha}}$$

3.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์

ในการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด กำหนดให้ $X_1, X_2, \dots, X_n$ เป็นตัวอย่างสุ่มขนาด n ที่มาจากการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติก ฟังก์ชันภาวะน่าจะเป็นของตัวอย่างสุ่มขนาด n คือ

$$L(\lambda, \theta, \alpha; x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n \frac{e^{-\lambda \left[1 - \left(\frac{1}{(x_i/\theta)^\alpha + 1} \right)^\alpha \right]} \lambda \alpha^2 (x_i/\theta)^\alpha}{(1-e^{-\lambda}) x_i \left[(x_i/\theta)^\alpha + 1 \right]^{\alpha+1}}$$

$$= \frac{(\lambda \alpha^2)^n}{(1-e^{-\lambda})^n} \prod_{i=1}^n \frac{(x_i/\theta)^\alpha}{x_i \left[(x_i/\theta)^\alpha + 1 \right]^{\alpha+1}} \cdot e^{-\lambda \sum_{i=1}^n \left[1 - \left(\frac{1}{(x_i/\theta)^\alpha + 1} \right)^\alpha \right]}$$

ฟังก์ชันล็อกภาวะน่าจะเป็นแทนด้วย $\ell(\lambda, \theta, \alpha)$ เขียนได้ดังนี้

$$\ell(\lambda, \theta, \alpha) = n \ln(\lambda) + 2n \ln(\alpha) - n \ln(1-e^{-\lambda}) - \lambda \sum_{i=1}^n \left[1 - \left(\frac{1}{(x_i/\theta)^\alpha + 1} \right)^\alpha \right]$$

$$+ \alpha \sum_{i=1}^n \ln(x_i/\theta) - \sum_{i=1}^n \ln(x_i) - (\alpha+1) \sum_{i=1}^n \ln \left[(x_i/\theta)^\alpha + 1 \right]$$

โดยที่ค่าประมาณพารามิเตอร์ λ, θ และ α สามารถหาได้จากผลลัพธ์ของสมการอนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของฟังก์ชันล็อกภาวะน่าจะเป็นเทียบกับพารามิเตอร์แต่ละค่าตามลำดับดังนี้

$$\frac{\partial \ell}{\partial \lambda} = \frac{n}{\lambda} - \frac{ne^{-\lambda}}{1-e^{-\lambda}} - \sum_{i=1}^n \left[1 - \left(\frac{1}{(x_i/\theta)^\alpha + 1} \right)^\alpha \right] = 0$$

$$\frac{\partial \ell}{\partial \theta} = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha^2 \lambda \left[(x_i/\theta)^\alpha + 1 \right]^{-\alpha-1} (x_i/\theta)^\alpha}{\theta} - (\alpha/\theta)^n + \sum_{i=1}^n \frac{(\alpha^2 + \alpha)(x_i/\theta)^\alpha}{\theta \left[(x_i/\theta)^\alpha + 1 \right]} = 0$$

$$\frac{\partial \ell}{\partial \alpha} = \frac{2n}{\alpha} + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda \left\{ -\frac{(x_i/\theta)^\alpha \ln(x_i/\theta) \alpha}{(x_i/\theta)^\alpha + 1} - \ln \left[(x_i/\theta)^\alpha + 1 \right] \right\}}{\left[(x_i/\theta)^\alpha + 1 \right]^\alpha} + \sum_{i=1}^n \ln(x_i/\theta)$$

$$+ \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{(x_i/\theta)^\alpha \ln(x_i/\theta)(-\alpha-1)}{(x_i/\theta)^\alpha + 1} - \ln \left[(x_i/\theta)^\alpha + 1 \right] \right\} = 0$$

ในกรณีที่ผลลัพธ์ของค่าประมาณพารามิเตอร์ λ, θ และ α โดยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุดไม่สามารถจัดรูปแบบได้ สามารถหาค่าประมาณพารามิเตอร์ λ, θ และ α ได้จากการใช้วิธีเชิงตัวเลข สำหรับการศึกษาค้นคว้าค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุดของพารามิเตอร์ λ, θ และ α ด้วยวิธีเชิงตัวเลข โดยใช้ฟังก์ชัน mledist ของ fitdistrplus package ในโปรแกรม R (Delignette-Muller & Dutang, 2015)

3.4 การจำลอง

ในส่วนนี้จะนำเสนอผลการศึกษการจำลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุดของพารามิเตอร์ λ, θ และ α โดยใช้ฟังก์ชัน mledist ของ fitdistrplus package ในโปรแกรม R

การสร้างตัวแปรสุ่มที่มาจากการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติก ใช้วิธีฟังก์ชันการแจกแจงผกผัน ดังนี้ $F(X) = U \Rightarrow X = F^{-1}(U)$ ที่ซึ่ง U คือตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงเอกรูปมาตรฐาน หรือ $U \sim U(0,1)$ ตัวแปรสุ่ม $X \sim PPD(\lambda, \theta, \alpha)$ สามารถสร้างได้จาก

$$X = \theta \left[\left(1 - \left\{ \frac{\ln \left[(1-U)(1-e^{-\lambda}) + e^{-\lambda} \right]}{-\lambda} \right\} \right)^{-\frac{1}{\alpha}} - 1 \right]^\alpha$$

การศึกษานี้ ทำการจำลองตัวแปรสุ่มที่มาจากการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติก ด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์เป็นดังนี้ PPD (6, 6, 6) PPD (2, 0.8, 4) และ PPD (4, 6, 2) ที่ขนาดตัวอย่าง 25 50 100 200

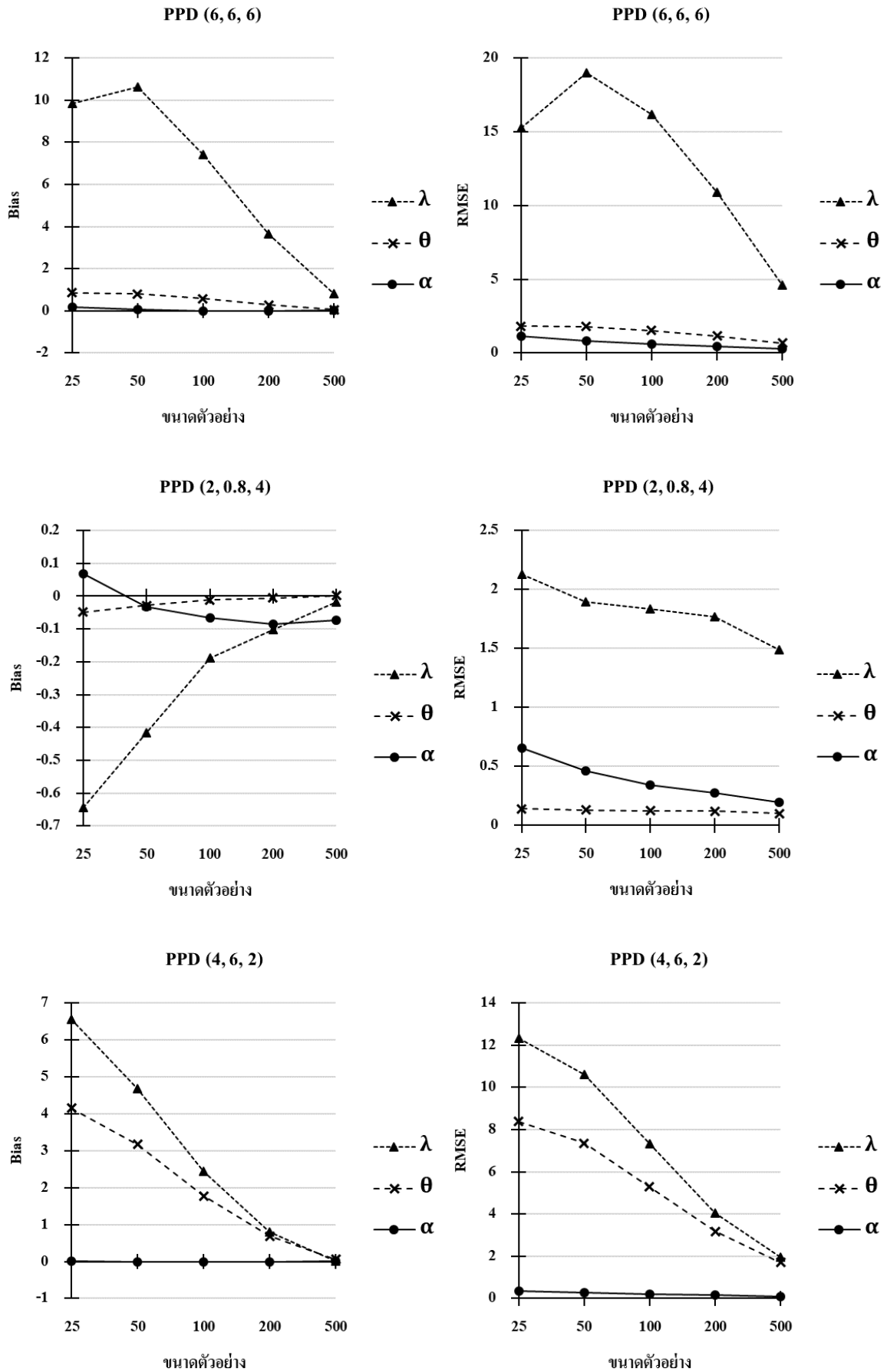
ตารางที่ 2 ค่าประมาณพารามิเตอร์เฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความเอนเอียง และรากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย

	ขนาดตัวอย่าง	พารามิเตอร์	ค่าประมาณพารามิเตอร์เฉลี่ย	SD	Bias	RMSE
PPD (6, 6, 6)	25	λ	15.8553	11.6821	9.8553	15.2795
		θ	6.8587	1.5541	0.8587	1.8149
		α	6.1672	1.1090	0.1672	1.1210
	50	λ	16.6049	15.7403	10.6049	18.9762
		θ	6.7976	1.6162	0.7976	1.8020
		α	6.0573	0.8005	0.0573	0.8024
	100	λ	13.4196	14.3581	7.4196	16.1587
		θ	6.5749	1.4173	0.5749	1.5292
		α	5.9920	0.5904	-0.0080	0.5903
	200	λ	9.6531	10.2358	3.6531	10.8658
		θ	6.2901	1.1121	0.2901	1.1491
		α	6.0021	0.4547	0.0021	0.4546
	500	λ	6.8125	4.5480	0.8125	4.6189
		θ	6.0503	0.7462	0.0503	0.6793
		α	6.0179	0.3098	0.0179	0.3102
PPD (2, 0.8, 4)	25	λ	1.3572	2.0293	-0.6428	2.1281
		θ	0.7516	0.1334	-0.0484	0.1419
		α	4.0677	0.6511	0.0677	0.6544
	50	λ	1.5844	1.8517	-0.4156	1.8973
		θ	0.7717	0.1283	-0.0283	0.1314
		α	3.9674	0.4602	-0.0326	0.4613
	100	λ	1.8120	1.8258	-0.1880	1.8350
		θ	0.7888	0.1250	-0.0112	0.1256
		α	3.9351	0.3391	-0.0649	0.3451
	200	λ	1.8990	1.7685	-0.1010	1.7709
		θ	0.7951	0.1209	-0.0049	0.1210
		α	3.9152	0.2634	-0.0848	0.2766
	500	λ	1.9829	1.4876	-0.0171	1.4873
		θ	0.8012	0.1020	0.0012	0.1021
		α	3.9259	0.1826	-0.0741	0.1970
PPD (4, 6, 2)	25	λ	10.5523	10.4253	6.5523	12.3112
		θ	10.1508	7.2857	4.1508	8.3836
		α	2.0203	0.3609	0.0203	0.3614
	50	λ	8.6739	9.5226	4.6739	10.6057
		θ	9.1730	6.1415	3.1730	7.3590
		α	1.9862	0.2676	-0.0138	0.2679
	100	λ	6.4359	6.9010	2.4359	7.3167
		θ	7.7729	4.9760	1.7729	5.2813
		α	1.9827	0.2042	-0.0173	0.2048
	200	λ	4.7929	3.9641	0.7929	4.0417
		θ	6.6828	3.0962	0.6828	3.1699
		α	1.9908	0.1549	-0.0092	0.1551
	500	λ	4.0104	1.9464	0.0104	1.9459
		θ	6.0616	1.7058	0.0616	1.7065
		α	2.0009	0.1065	0.0009	0.1064

และ 500 จำนวน 2,000 รอบ ประมาณค่าพารามิเตอร์ ด้วยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุดในแต่ละค่าพารามิเตอร์และ ขนาดตัวอย่างที่กำหนดในแต่ละรอบ หาค่าเฉลี่ยและส่วน เบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) ของ ค่าประมาณพารามิเตอร์ดังกล่าว ประเมินประสิทธิภาพของ การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด ด้วย

ค่าความเอนเอียง (Bias) และรากของค่าคลาดเคลื่อนกำลัง สองเฉลี่ย (Root mean square error: RMSE) แสดงดัง ตารางที่ 2

จากผลในตารางที่ 2 พบว่า ค่าประมาณพารามิเตอร์เฉลี่ย λ , θ และ α มีค่าใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์จริงเมื่อ ขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น และค่าความเอนเอียง (Bias) และ



รูปที่ 5 ค่า Bias และ RMSE ของ PPD พารามิเตอร์ต่าง ๆ

ตารางที่ 3 สถิติเชิงพรรณนาสำหรับข้อมูลชุดที่ 1

จำนวน	ค่าเฉลี่ย	มัธยฐาน	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความเบ้	ความโด่ง
50	2.95	2.94	0.64	0.41	1.02

ตารางที่ 4 ค่าประมาณพารามิเตอร์และเกณฑ์การเปรียบเทียบการแจกแจงของข้อมูลชุดที่ 1

การแจกแจง	ค่าประมาณพารามิเตอร์	LL	AIC	BIC	KS	CM	AD
PPD	$\hat{\lambda} = 3.9945$ $\hat{\theta} = 5.1148$ $\hat{\alpha} = 6.3217$	-46.9383	99.8766	105.6127	0.0790	0.0406	0.3153
PD	$\hat{\alpha} = 5.6043$ $\hat{\theta} = 4.2226$	-48.0954	100.1909	104.0150	0.0978	0.0727	0.5193
IPD	$\hat{\nu} = 4.8719$ $\hat{\mu} = 1.9499$	-53.3155	110.6311	114.4551	0.1328	0.2125	1.4695
LLD	$\hat{\gamma} = 8.4432$ $\hat{K} = 2.9121$	-47.0421	98.0843	101.9084	0.0770	0.0369	0.3180

ตารางที่ 5 สถิติเชิงพรรณนาสำหรับข้อมูลชุดที่ 2

จำนวน	ค่าเฉลี่ย	มัธยฐาน	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความเบ้	ความโด่ง
101	1.03	0.8	1.12	3.05	14.51

ตารางที่ 6 ค่าประมาณพารามิเตอร์และเกณฑ์การเปรียบเทียบการแจกแจงของข้อมูลชุดที่ 2

การแจกแจง	ค่าประมาณพารามิเตอร์	LL	AIC	BIC	KS	CM	AD
PPD	$\hat{\lambda} = 82.3361$ $\hat{\theta} = 98.4441$ $\hat{\alpha} = 0.9420$	-103.0045	212.0089	219.8543	0.0913	0.2032	1.1648
PD	$\hat{\alpha} = 1.2808$ $\hat{\theta} = 0.8290$	-110.4026	224.8051	230.0353	0.1047	0.3497	2.6336
IPD	$\hat{\nu} = 1.1307$ $\hat{\mu} = 0.5230$	-114.2977	232.5954	237.8256	0.1206	0.4431	2.9309
LLD	$\hat{\gamma} = 1.2704$ $\hat{K} = 0.6238$	-112.6862	229.3724	234.6026	0.1113	0.3915	2.7831

ตารางที่ 7 สถิติเชิงพรรณนาสำหรับข้อมูลชุดที่ 3

จำนวน	ค่าเฉลี่ย	มัธยฐาน	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความเบ้	ความโด่ง
63	2.09	2.06	1.25	0.43	2.73

ตารางที่ 8 ค่าประมาณพารามิเตอร์และเกณฑ์การเปรียบเทียบการแจกแจงของข้อมูลชุดที่ 3

การแจกแจง	ค่าประมาณพารามิเตอร์	LL	AIC	BIC	KS	CM	AD
PPD	$\hat{\lambda} = 109.4739$ $\hat{\theta} = 54.3890$ $\hat{\alpha} = 1.6402$	-100.4288	206.8577	213.2871	0.1091	0.0942	0.6561
PD	$\hat{\alpha} = 2.0019$ $\hat{\theta} = 2.8434$	-104.5693	213.1386	217.4249	0.1141	0.1190	1.14079
IPD	$\hat{\nu} = 1.5592$ $\hat{\mu} = 1.2005$	-113.7165	231.4331	235.7194	0.1424	0.3517	2.5551
LLD	$\hat{\gamma} = 2.1352$ $\hat{K} = 1.8016$	-108.7423	221.4846	225.7709	0.1198	0.1817	1.6807

รากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ลดลงเมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 5 สังเกตได้ว่าค่าประมาณของพารามิเตอร์ λ เมื่อตัวอย่างขนาดเล็กให้ค่าความเอนเอียงและรากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยมากกว่าค่าประมาณของพารามิเตอร์ตัวอื่นในทุกกรณี นั่นคือมีค่าประมาณที่ห่างจากค่าพารามิเตอร์จริงค่อนข้างมาก แต่อย่างไรก็ตามค่าประมาณของพารามิเตอร์ λ จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์จริงเมื่อขนาดตัวอย่างใหญ่

3.5 การประยุกต์

งานวิจัยครั้งนี้ได้ประยุกต์การแจกแจงการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติก (PPD) กับชุดข้อมูลจริง 3 ชุด โดยเปรียบเทียบการแจกแจงใหม่ที่เสนอกับการแจกแจงพาราลอจิสติก (PD) การแจกแจงพาราลอจิสติกผกผัน (IPD) และการแจกแจงล็อกลอจิสติก (LLD)

เกณฑ์การเปรียบเทียบที่ใช้มีดังนี้ ค่าล็อกภาวะน่าจะเป็น (Log-likelihood; LL) ค่าเกณฑ์สารสนเทศของอะกะอิเกะ (Akaike's Information Criterion; AIC) ค่าเกณฑ์สารสนเทศของเบส์ (Bayesian Information Criterion; BIC) ค่าการทดสอบคอลโมโกรอฟ-สมิรโนฟ (Kolmogorov-Smirnov test; KS) ค่าการทดสอบคราเมอร์-ฟอนมีเซส (Cramer-von Mises test; CM) และค่าการทดสอบแอนเดอลันดาร์ลิง (Anderson-Darling test; AD) ซึ่งการแจกแจงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับข้อมูลคือ ค่าล็อกภาวะน่าจะเป็น (LL) มีค่าสูงกว่า และค่าเกณฑ์สารสนเทศของอะกะอิเกะ (AIC) ค่าเกณฑ์สารสนเทศของเบส์ (BIC) ค่าการทดสอบคอลโมโกรอฟ-สมิรโนฟ (KS) ค่าการทดสอบคราเมอร์-ฟอนมีเซส (CM) และค่าการทดสอบแอนเดอลันดาร์ลิง (AD) มีค่าน้อยกว่าในส่วนของการประมาณค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงทั้งหมดนั้น คำนวณโดยใช้ฟังก์ชัน fitdistrplus ในโปรแกรม R

3.5.1 ข้อมูลชุดที่ 1

ค่าความต้านทานแรงดึงของเส้นใยคาร์บอนที่สุ่มตัวอย่างมาจากกระบวนการผลิต มีหน่วยเป็นจิกะปาสกาล (Gigapascal: GPa) (Aldahlan et al., 2020)

ตารางที่ 3 แสดงค่าสถิติเชิงพรรณนาสำหรับข้อมูลชุดที่ 1 และตารางที่ 4 แสดงค่าประมาณพารามิเตอร์และเกณฑ์การเปรียบเทียบ LL AIC BIC KS CM และ AD สำหรับการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติก การแจกแจงพาราลอจิสติก การแจกแจงพาราลอจิสติกผกผัน และการแจกแจงล็อกลอจิสติก ของข้อมูลชุดที่ 1 พบว่าเมื่อพิจารณาจากเกณฑ์การเปรียบเทียบ LL การแจกแจงปัวซอง

พาราลอจิสติก มีความเหมาะสมกับข้อมูลชุดที่ 1 มากกว่าการแจกแจงแบบอื่น ๆ เมื่อพิจารณาเกณฑ์การเปรียบเทียบแบบอื่น ๆ พบว่าการแจกแจงล็อกลอจิสติกมีความเหมาะสมกับข้อมูลชุดที่ 1 มากกว่าการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกเพียงเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบค่า LL กับผลศึกษาของ Aldahlan et al. (2020) ที่ประยุกต์ใช้ข้อมูลชุดที่ 1 กับการแจกแจง Exponentiated power generalized Weibull power series (EPGWPS) ที่ประกอบด้วย 5 พารามิเตอร์ ให้ค่า LL เท่ากับ -46.4481 โดยพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่า LL ของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติก ทั้งที่มีจำนวนพารามิเตอร์มากกว่า

3.5.2 ข้อมูลชุดที่ 2

ระยะเวลาที่ใช้ทดสอบเส้นใยเคฟลาร์ 49/อีพ็อกซี่ ภายใต้แรงกดดันอย่างต่อเนื่องที่ระดับ 90% จนกระทั่งเส้นใยขาด มีหน่วยเป็นชั่วโมง (Nasir et al., 2019)

ตารางที่ 5 แสดงค่าสถิติเชิงพรรณนาสำหรับข้อมูลชุดที่ 2 และตารางที่ 6 แสดงค่าประมาณพารามิเตอร์และเกณฑ์การเปรียบเทียบ LL AIC BIC KS CM และ AD สำหรับการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติก การแจกแจงพาราลอจิสติก การแจกแจงพาราลอจิสติกผกผัน และการแจกแจงล็อกลอจิสติก ของข้อมูลชุดที่ 2 ซึ่งพบว่าการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกมีความเหมาะสมกับข้อมูลชุดที่ 2 มากที่สุด ในทุก ๆ เกณฑ์การเปรียบเทียบ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลศึกษาของ Nasir et al. (2019) ที่ประยุกต์ใช้ข้อมูลชุดที่ 2 กับการแจกแจง exponentiated Burr XII (EBXII) power series โดยมีการแจกแจงเฉพาะ ได้แก่ การแจกแจง EBXII geometric (EBXII-G), การแจกแจง EBXII logarithmic (EBXII-L) และการแจกแจง EBXII Poisson (EBXII-P) ซึ่งประกอบด้วย 4 พารามิเตอร์ พบว่าค่า LL ของการแจกแจง EBXII-G, การแจกแจง EBXII-L และการแจกแจง EBXII-P มีค่าเท่ากับ -102.2356, -101.0149 และ -103.4967 ตามลำดับ ซึ่งการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกมีค่า LL มากกว่าการแจกแจง EBXII-P แต่มีค่า LL น้อยกว่าการแจกแจง EBXII-G และการแจกแจง EBXII-L ในส่วนค่า AIC ของการแจกแจง EBXII-G, การแจกแจง EBXII-L และการแจกแจง EBXII-P มีค่าเท่ากับ 212.4712, 210.0298 และ 214.9934 ตามลำดับ ซึ่งการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกมีค่า AIC น้อยกว่า การแจกแจง EBXII-G และการแจกแจง EBXII-P แต่มีค่า AIC มากกว่าการแจกแจง EBXII-L แต่ทั้งนี้พารามิเตอร์ของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกมีจำนวนที่น้อยกว่า

3.5.3 ข้อมูลชุดที่ 3

ระยะเวลาการใช้งานของกระจกหน้าเครื่องบิน มีหน่วยเป็น 1,000 ชม (Nasir et al., 2019)

ตารางที่ 7 แสดงค่าสถิติเชิงพรรณนาสำหรับข้อมูลชุดที่ 3 และตารางที่ 8 แสดงค่าประมาณพารามิเตอร์และเกณฑ์การเปรียบเทียบ LL AIC BIC KS CM และ AD สำหรับการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติก การแจกแจงพาราลอจิสติก การแจกแจงพาราลอจิสติกผกผัน และการแจกแจงล็อกลอจิสติก ของข้อมูลชุดที่ 3 โดยพบว่าการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกมีความเหมาะสมกับข้อมูลชุดที่ 3 มากที่สุด ในทุก ๆ เกณฑ์การเปรียบเทียบ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลศึกษาของ Nasir et al. (2019) ที่ประยุกต์ใช้ข้อมูลชุดที่ 3 กับการแจกแจง EBXII power series โดยมีการแจกแจงเฉพาะ ได้แก่ การแจกแจง EBXII-G, การแจกแจง EBXII-L และการแจกแจง EBXII-P ซึ่งประกอบด้วย 4 พารามิเตอร์ พบว่าค่า LL ของการแจกแจง EBXII-G, การแจกแจง EBXII-L และการแจกแจง EBXII-P มีค่าเท่ากับ -102.0361, -99.5671, และ -108.0832 ตามลำดับ ซึ่งการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกมีค่า LL มากกว่าการแจกแจง EBXII-G และการแจกแจง EBXII-P แต่มีค่า LL น้อยกว่าการแจกแจง EBXII-L ในส่วนค่า AIC ของการแจกแจง EBXII-G, การแจกแจง EBXII-L และการแจกแจง EBXII-P มีค่าเท่ากับ 212.0721, 207.1343 และ 224.1664 ตามลำดับ ซึ่งการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกมีค่า AIC น้อยกว่าทุกการแจกแจงดังกล่าว โดยที่พารามิเตอร์ของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกมีจำนวนที่น้อยกว่า

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เสนอการแจกแจงใหม่คือ การแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติก ซึ่งเป็นการแจกแจงผสมของการแจกแจงพาราลอจิสติกกับการแจกแจงปัวซอง มีการเสนอสมบัติเบื้องต้นของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกบางสมบัติ ประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด และประเมินประสิทธิภาพของการประมาณค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงใหม่ด้วยการจำลองข้อมูลภายใต้สถานการณ์ต่าง ๆ พบว่าค่าประมาณพารามิเตอร์เฉลี่ยของ θ และ α มีค่าใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์จริงเมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น ในขณะที่กรณีตัวอย่างขนาดเล็กค่าประมาณของพารามิเตอร์เฉลี่ยของ λ มีค่าห่างจากค่าพารามิเตอร์จริงค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับค่าประมาณพารามิเตอร์ของตัว

อื่น แต่อย่างไรก็ตามค่าประมาณของพารามิเตอร์ λ จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์จริง เมื่อตัวอย่างมีขนาดใหญ่

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกด้วยเกณฑ์การเปรียบเทียบ LL AIC BIC KS CM และ AD กับการแจกแจงอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การแจกแจงพาราลอจิสติก การแจกแจงพาราลอจิสติกผกผัน และการแจกแจงล็อกลอจิสติก โดยการประยุกต์กับชุดข้อมูลจริง 3 ชุด พบว่าการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกมีความเหมาะสมกับชุดข้อมูลต่าง ๆ มากกว่าการแจกแจงอื่น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่า LL และ AIC ของการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกกับการแจกแจง EPGWPS (Aldahlan et al., 2020) ในข้อมูลชุดที่ 1 และการแจกแจง EBXII power series (Nasir et al., 2019) ในข้อมูลชุดที่ 2 และชุดที่ 3 พบว่าการแจกแจงปัวซองพาราลอจิสติกที่มีจำนวนพารามิเตอร์น้อยกว่า ให้ค่า LL และ AIC ใกล้เคียงกับการแจกแจงดังกล่าว

กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่งขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ได้สละเวลาอันมีค่าอย่างยิ่งในการพิจารณาบทความ และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการปรับปรุงเนื้อหาของบทความฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Aldahlan, M. A., Jamal, F., Chesneau, C., Elbatal, I. & Elgarhy, M. (2020). Exponentiated power generalized Weibull power series family of distributions: Properties, estimation and applications. *PLoS ONE*, 15(3): e0230004. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230004>
- Balakrishnan, N., Leiva, V., Sanhueza, A. & Cabrera, E. (2009). Mixture inverse Gaussian distribution and its transformations, moments and applications. *Statistics*, 43(1), 91–104. <https://doi.org/10.1080/02331880701829948>
- Bhati, D., Calderin-Ojeda, E. & Meenakshi, M. (2019). A New Heavy Tailed Class of Distributions Which Includes the Pareto. *Risks*, 7(4), 99. <https://doi.org/10.3390/risks7040099>
- Bulmer, M.G. (1974). On fitting the Poisson lognormal distribution to species abundance data. *Biometrics*, 30(1), 101–110. <https://doi.org/10.2307/2529621>
- Choochadit, B., Thammachote, P., Pianroj, N. & Duangsawat, S. (2021). Identifying Best-fit Distribution for Tourist Expenditure per Person in the Southern Gulf of Thailand Provincial Cluster before Global Covid-19 Pandemic. *Journal of Chandrakasemsam*, 27(2), 212–227. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/crujournal/article/view/251379> (in Thai)
- Choochadit, B. & Wasinrat, S. (2021). Distribution of Tropical Cyclone Counts Moving into Thailand. *NKRAFA Journal of Science and Technology*, 17(2), 45–53. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/nkrafa-sct/article/view/244489> (in Thai)

- Delignette-Muller, M. L. & Dutang, C. (2015). *fitdistrplus: An R Package for Fitting Distributions*. *Journal of Statistical Software*, 64(4), 1–34. <https://doi.org/10.18637/jss.v064.i04>
- Emilio, G.D., Sarabia, J.M. & Enrique, C.O. (2008). Univariate and multivariate versions of the negative binomial-inverse Gaussian distributions with applications. *Insurance: Mathematics and Economics*, 42(1), 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.insmatheco.2006.12.001>
- Erisoglu, M., Servi, T., Erisoglu, U. & Calis, N. (2013). Mixture gamma distribution for estimation of wind power potential. *International Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 40(10), 223–231. <http://www.ceser.in/ceserp/index.php/ijamas/article/view/3127>
- Hall, P. & Zhou, X. (2003). Nonparametric estimation of component distributions in a multivariate mixture. *Annals Statistics*, 31(1), 201–224. <https://doi.org/10.1214/aos/1046294462>
- Idemudia, R. & Ekhosuehi, N. (2019). A New Three-Parameter Paralogistic Distribution: Its Properties and Application. *Journal of Data Science*, 17(2), 239–258. [https://doi.org/10.6339/JDS.201904_17\(2\).0001](https://doi.org/10.6339/JDS.201904_17(2).0001)
- Gilchrist, W. G. (2000). *Statistical modelling with quantile functions*. Florida: Chapman & Hall/ CRC.
- Khajorntaewawong, N., Wiriyapreeda, N., Pathumrathaiand, C. & Budsaba, K. (2020). Analysis of Flight Departure Delay Distributions. *Thai Science and Technology Journal*, 28(6), 957–968. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/tstj/article/view/239864> (in Thai)
- Kleiber, C. & Kotz, S. (2003). *Statistical Size Distributions in Economics and Actuarial Sciences*. New York: John Wiley and Sons.
- Klugman, S. A., Panjer, H. H. & Willmot, G. E. (2019). *Loss models: from data to decisions* (5th ed.). New York: John Wiley and Sons.
- McDonald, J. B. (1984). *Some generalized functions for the Size distributions in Economics and Actuarial Sciences*. New York: John Wiley and Sons.
- McLachlan, G. & Peel, D. (2000). *Finite Mixture Models*. New York: John Wiley and Sons.
- Nasir, A., Yousof, H. M., Jamal, F. & Korkmaz, M. Ç. (2019). The Exponentiated Burr XII Power Series Distribution: Properties and Applications. *Stats*, 2(1), 15–31. <https://doi.org/10.3390/stats2010002>
- Rodrigues, J., Cancho, V.G., de Castro, M. & Louzada-Neto, F. (2009). On the unification of long-term survival models. *Statistics and Probability Letters*, 79(6), 753–759. <https://doi.org/10.1016/j.spl.2008.10.029>
- Wasinrat, S. & Choopradit, B. (2023). The Poisson Inverse Pareto Distribution and Its Application. *Thailand Statistician*, 21(1), 110–124. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/thaistat/article/view/248027>
- Withers, C.S. & Nadarajah, S. (2011). On the compound Poisson-gamma distribution. *Kybernetika*, 47(1), 15–37. <https://eudml.org/doc/197008>

การห่อหุ้มด้วยพอลิแลคติกแอซิดไมโครแคปซูลช่วยยืดระยะเวลาออกฤทธิ์ ในการไล่ยุงของน้ำมันหอมระเหยที่ได้จากสมุนไพรไทย

Poly(lactic acid) Microencapsulation Prolongs the Mosquito Repellent Activity of Essential Oils from Thai Herbs

ธารา มานังงาน และ สรinya ชวพันธ์*

Thara Manangan and Sarinya Shawaphun*

ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ต้องการเตรียมไมโครแคปซูลของพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) ที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพรไทย 5 ชนิด ที่มีฤทธิ์ในการไล่ยุง ได้แก่ ตะไคร้ (*Cymbopogon winterianus*), มะกรูด (*Citrus hystrix*), ขมิ้นชัน (*Curcuma longa*), ข่า (*Alpinia galangal* L.) และ ใบแมงลัก (*Ocimum americanum*) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารเคลือบสำหรับสิ่งทอ ในการเตรียม PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยจะใช้เทคนิค emulsification-solvent evaporation และใช้ พอลิ(ไวนิลแอลกอฮอล์-โค-ไวนิลอะซิเตต) (P(VA-co-VAc)) เป็นอิมัลซิไฟเออร์รวมทั้งเป็นสารช่วยในการยึดเกาะระหว่างไมโครแคปซูลของ PLA กับสิ่งทอ หลังจากวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของ PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยพบว่าพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยทั้ง 5 ชนิดที่เตรียมได้มีลักษณะกลมและมีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยมีขนาดอยู่ในช่วง 5.79 ± 1.73 ถึง 6.58 ± 2.27 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า PLA ไมโครแคปซูลที่ไม่ได้ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยเล็กน้อย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.02 ± 1.25 ไมโครเมตร จากการหาเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้ม น้ำมันหอมระเหยทั้ง 5 ชนิดด้วย PLA ไมโครแคปซูล พบว่าอยู่ในช่วง 30-40% โดย PLA ไมโครแคปซูลสามารถห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยผิวมะกรูดได้ดีที่สุด รองลงมาคือ ตะไคร้ ขมิ้น ใบแมงลัก ข่า ตามลำดับ และเมื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการไล่ยุงลายบ้าน (*Aedes aegypti*) โดยใช้ชุดทดสอบ Excito-Repellency เทียบกับผลิตภัณฑ์ไล่ยุงที่มีขายในเชิงพาณิชย์ N,N-diethyl-m-toluamide (DEET) พบว่าในช่วงต้นประสิทธิภาพในการไล่ยุงลายบ้านของน้ำมันหอมระเหยที่ถูกห่อหุ้มในไมโครแคปซูลต่ำกว่า DEET อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการไล่ยุงของ PLA ไมโครแคปซูลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนใกล้เคียงหรือสูงกว่า DEET เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที ตรงกันข้ามกับน้ำมันหอมระเหยทั้ง 5 ชนิด แสดงประสิทธิภาพในการไล่ยุงลายบ้านได้ดีใกล้เคียงกับ DEET ในช่วงต้น แต่มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากเวลาผ่านไป 20 นาที ในขณะที่ DEET ประสิทธิภาพในการไล่ยุงลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สรุปได้ว่า สารเคลือบ PLA ไมโครแคปซูลสามารถควบคุมการปลดปล่อยของน้ำมันหอมระเหยทั้ง 5 ชนิด ดังนั้นจึงช่วยยืดประสิทธิภาพในการไล่ยุงของน้ำมันหอมระเหยให้อยู่ได้นานขึ้น

คำสำคัญ: การไล่ยุง, น้ำมันหอมระเหย, พอลิแลคติกแอซิด, ไมโครแคปซูล, การห่อหุ้ม

ABSTRACT

In this research, biodegradable poly(lactic acid) (PLA) was used to encapsulate 5 traditional Thai herb essential oils including lemon grass (*Cymbopogon winterianus*), bergamot (*Citrus hystrix*), turmeric (*Curcuma longa*), galangal (*Alpinia galangal* L.) and basil (*Ocimum americanum*) to be used as a coating for textiles. Essential oils encapsulated PLA microcapsules was prepared via the emulsification-solvent evaporation method using Poly(vinyl alcohol-co-vinyl acetate) (P(VA-co-VAc)) as an emulsifier and also a binding agent between the PLA microcapsules and textiles. The particle size analysis of the essential oils encapsulated PLA microcapsules showed that the obtained microcapsules were round with the same particle sizes for all 5 essential oils around 5.79 ± 1.73 to 6.58 ± 2.27 μm slightly larger than the size of the empty PLA microcapsules without essential oils, 5.02 ± 1.25 μm . Determination of the percentages of encapsulation of all 5 essential oils within PLA microcapsules to be in of 30-40%, where PLA microcapsule can encapsulate bergamot essential oil the best, followed by lemon grass, turmeric, basil and galangal, respectively. When testing the mosquito (*Aedes aegypti*) repellent efficacy using an Excito-Repellency test kit versus commercial repellent, N, N-diethyl-m-toluamide (DEET), it was found that in the first 20 min the efficacy of PLA microcapsules encapsulating essential oils were lower than DEET and all essential oils. However, the mosquito repellent efficiency of PLA microcapsules tended to increase gradually until it was close to or higher than DEET and all essential oils after 60 minutes. In contrast, all 5 species of essential oils showed similar

repellent efficiency to DEET in the early stages but tended to decrease sharply after 20 min. While the DEET's mosquito repellent efficiency was slightly reduced. It can be concluded that PLA microcapsule can regulate the release of all 5 essential oils, thus prolonging the efficiency of repelling mosquitoes of all essential oils for longer.

KEYWORDS: mosquito repellent, essential oils, polylactic acid, microcapsule, encapsulation

*Corresponding Author: sarinya.s@sci.kmutnb.ac.th

Received: 25/06/2022; Revised: 21/02/2023; Accepted: 10/04/2023

1. บทนำ

ยุงเป็นพาหะนำโรคที่ร้ายแรงหลายชนิด อาทิเช่น โรคไข้เลือดออก โรคเท้าช้าง โรคมาลาเรีย โรคไข้เหลือง และ โรคไข้สมองอักเสบ (Govindarajan *et al.*, 2011) โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรคไข้เลือดออกจัดว่าเป็นโรคติดต่อที่สำคัญโดยมียุงลาย (*Aedes aegypti*) เป็นพาหะ เนื่องจากเป็นโรคที่ส่งผลกระทบต่อระบบสาธารณสุขทั่วโลกโดยพบว่าประชากรประมาณ 2.5 ล้านคนใน 100 ประเทศเสี่ยงต่อการเป็นโรคนี้นี้เนื่องจากอาศัยในบริเวณที่มียุงลายเป็นพาหะ (Borah *et al.*, 2010) จากรายงานพบว่าโรคไข้เลือดออกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง 30 ปีที่ผ่านมา ซึ่งจำนวนคนที่ติดเชื้อที่ถูกรายงานจากองค์การอนามัยโลกระหว่าง ค.ศ. 2000–2007 เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจาก 10 ปีที่ผ่านมา โดยเฉพาะประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และแปซิฟิกตะวันตก (WHO, 2009) ดังนั้นการควบคุมปริมาณของยุงและการป้องกันตนเองจากการถูกยุงกัดจึงเป็นมาตรการที่สำคัญในการควบคุมโรคที่เกิดจากยุง แม้ว่าในปัจจุบันจะมีผลิตภัณฑ์ไล่ยุงที่มีส่วนประกอบของสารเคมีสังเคราะห์จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีกรายงานว่าสารสังเคราะห์เหล่านี้อาจไม่ปลอดภัยต่อมนุษย์ โดยเฉพาะเด็กเล็ก เนื่องจากสารเหล่านี้อาจก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง ผื่นแดง หรือการแพ้ (Das *et al.*, 2003) หนึ่งในผลิตภัณฑ์หลายชนิดที่นิยมใช้ป้องกันยุงกัดคือ *N, N*-diethyl-*m*-toluamide หรือที่รู้จักกันในชื่อ DEET เนื่องจากให้ระยะเวลาในการป้องกันยุงกัดที่ยาวนานและสามารถใช้ได้กับยุงหลากหลายสายพันธุ์ (Mark *et al.*, 2002) แต่อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยพบว่า DEET มีความเป็นพิษต่อมนุษย์โดยพบผลข้างเคียงตั้งแต่ระดับน้อยไปจนถึงมาก โดย DEET สามารถก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อเนื้อเยื่ออ่อน ดังนั้น DEET จึงไม่ปลอดภัยที่จะใช้ในเด็ก นอกจากนี้ DEET ยังอาจส่งผลให้เกิดโรคสมองฝ่ออีกด้วย (Briassoulis *et al.*, 2001) ในปัจจุบันผู้บริโภคส่วนใหญ่ได้ตระหนักถึงความไม่ปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากสารเคมีสังเคราะห์มากขึ้น ดังนั้นจึงมี

ผู้ผลิตบางรายหันมาใช้สารธรรมชาติมากขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่ใช้ป้องกันยุงกัด ตัวอย่างของสารธรรมชาติที่มีฤทธิ์ฆ่าแมลงหรือไล่แมลง ได้แก่ สารสกัดและน้ำมันหอมระเหยที่ได้จากพืช จากงานวิจัยของ Trongtokit *et al.* (2005) พบว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อระยะเวลาป้องกันยุงกัดของน้ำมันหอมระเหยจากพืชไทย 38 ชนิดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารไล่ยุง การออกแบบการทดลอง และสายพันธุ์ของยุง นอกจากนี้งานวิจัยของ Tawatsin *et al.* (2001) พบว่าน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้จากขมิ้นชัน (*Curcuma longa*), มะกรูด (*Citrus hystrix*), ตะไคร้ (*Cymbopogon citratus*) และ ใบแมงลัก (*Ocimum americanum*) ที่ทาบนผิวหนังแสดงฤทธิ์ในการไล่ยุงอย่างมีประสิทธิภาพต่อยุง 3 สายพันธุ์ได้แก่ ยุงลายบ้าน (*Aedes aegypti*), ยุงก้นปล่อง (*Anopheles dirus*) และยุงรำคาญ (*Culex quinquefasciatus*) พบว่าน้ำมันหอมระเหยมีประสิทธิภาพในการไล่ยุงได้ดีเทียบเท่า DEET แต่เนื่องจากความสามารถในการระเหยที่รวดเร็วของน้ำมันหอมระเหยจึงทำให้ระยะเวลาในการไล่ยุงของน้ำมันหอมระเหยไม่ยาวนานเหมือน DEET ซึ่งสามารถป้องกันยุงกัดได้เป็นเวลานานถึง 6 ชั่วโมง (Barnard & Xue, 2004) ดังนั้นการยืดระยะเวลาในการระเหยของน้ำมันหอมระเหยออกไปจะช่วยทำให้สารไล่ยุงที่ผลิตจากน้ำมันหอมระเหยมีประสิทธิภาพในการไล่ยุงที่ยาวนานขึ้น สารประกอบ monoterpenoid เป็นสารกลุ่มสำคัญในน้ำมันหอมระเหยซึ่งไปรบกวนระบบ octopaminergic ของแมลงซึ่งเป็นเป้าหมายของน้ำมันหอมระเหยที่มีฤทธิ์ไล่แมลง สัตว์ที่มีกระดูกสันหลังอย่างเช่นมนุษย์ไม่มีตัวรับ octopamine ดังนั้นน้ำมันหอมระเหยที่มีฤทธิ์ไล่แมลงจึงค่อนข้างปลอดภัยต่อมนุษย์ (Sousa *et al.*, 2022) นอกจากนี้ น้ำมันหอมระเหยสามารถใส่ลงในสิ่งทอเพื่อผลิตสิ่งทอที่มีสมบัติพิเศษ อย่างเช่น ไล่แมลง ดันเชื้อแบคทีเรีย เป็นต้น (Soroh *et al.*, 2021) อย่างไรก็ตาม น้ำมันหอมระเหยมักจะระเหยง่ายและไวต่อแสงและออกซิเจน การประยุกต์ใช้น้ำมันหอมระเหยบนสิ่งทอที่ประสบความสำเร็จ ต้องการสูตรที่ปกป้องน้ำมันหอม

ระเหยจากการระเหยและเสื่อมสภาพ รวมทั้งควบคุมอัตราการปลดปล่อย (Volic *et al.*, 2020) การใช้พอลิเมอร์ไมโครแคปซูลมาห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยก็เป็นทางเลือกหนึ่งในหลายวิธีที่ช่วยยืดระยะเวลาการระเหยของน้ำมันหอมระเหยออกไปได้ โดยพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลเป็นระบบซึ่งประกอบด้วยวัสดุแกนกลางที่มีสารออกฤทธิ์และวัสดุห่อหุ้มที่ทำจากพอลิเมอร์ธรรมชาติหรือพอลิเมอร์สังเคราะห์เป็นวัฏภาคภายนอก (Bakry *et al.*, 2016) การปรับเปลี่ยนวัสดุแกนกลางและวัสดุห่อหุ้มจะทำให้ได้ขนาดอนุภาค ความหนาของวัสดุห่อหุ้มและความสามารถในการแพร่ผ่านของสารออกฤทธิ์ที่แตกต่างกันจึงทำให้สามารถควบคุมอัตราการปลดปล่อยของสารที่ออกฤทธิ์ได้ (Martins *et al.*, 2014) ตัวอย่างเช่น การปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ที่มีฤทธิ์ไล่แมลงได้ถูกควบคุมโดยการแพร่และการระเหยออกจากพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลหรือการแตกออกของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลหลังจากการทาบนผิวหนังทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัสดุห่อหุ้ม (Tavares *et al.*, 2018) ช่องว่าง ที่อยู่ภายใน พอลิเมอร์ไมโครแคปซูลมีมากเพียงพอที่จะกักเก็บสารไล่แมลงที่ระเหยง่าย ความหนาของวัสดุห่อหุ้มที่สม่ำเสมอจะช่วยควบคุมการแพร่ของสารไล่แมลงดังนั้นจึงสามารถควบคุมการปลดปล่อยและทำให้สารไล่แมลงออกฤทธิ์ได้นานขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้สารไล่แมลงมีความเสถียรต่อสภาวะทางเคมี ทางกายภาพและทางกล มีงานวิจัยหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลเมื่ออยู่ในสูตรที่เหมาะสมจะช่วยลดการระเหยของสารไล่แมลงที่ระเหยง่ายได้ ดังนั้นจึงทำให้สารไล่แมลงออกฤทธิ์ได้ยาวนานขึ้น (Karr *et al.*, 2012) จากงานวิจัยของ Miro Specos *et al.* (2017) พบว่าสารไล่แมลงอย่างน้ำมันตะไคร้หอม Citriodiol® ที่ถูกห่อหุ้มในพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลสามารถควบคุมการปลดปล่อยของสารไล่แมลงได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยออกฤทธิ์ไล่ยุงลายบ้าน *Aedes aegypti* ได้เป็นเวลามากกว่า 30 วัน นอกจากนี้พอลิเมอร์ไมโครแคปซูลยังแสดงการปลดปล่อยอย่างช้า ๆ ของ DEET จึงทำให้ออกฤทธิ์ได้เป็นระยะเวลานานขึ้นและยังช่วยลดการซึมผ่านผิวหนังอีกด้วย พอลิแลคติก แอซิด (Polylactic acid, PLA) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ที่น่าสนใจเนื่องจาก PLA มีความไม่ชอบน้ำซึ่งสามารถเข้ากันได้ดีกับน้ำมันหอมระเหยซึ่งเป็นสารที่ไม่ชอบน้ำเหมือนกัน นอกจากนี้ PLA ยังมีความเสถียรสามารถทนต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ดี อาทิเช่น ความร้อน แสง ออกซิเจน กรด หรือ เบส เป็นต้น นอกจากนี้สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และสามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพ

ดังนั้น PLA จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ห่อหุมน้ำมันหอมระเหยเพื่อประยุกต์ใช้เป็นสารเคลือบบนสิ่งทอ ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการเคลือบสิ่งทอในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักนิยมใช้กระบวนการ impregnation ซึ่งก็คือการนำผ้าไปทำให้ชุ่มในสารเคลือบ จากนั้นต้องนำมาผ่านกระบวนการทำให้แห้ง (Rodrigues *et al.*, 2019) หากต้องการพัฒนา PLA ไมโครแคปซูลไปเป็นสารเคลือบ PLA ไมโครแคปซูลที่เตรียมได้ควรอยู่ในรูปสารแขวนลอยในน้ำก็จะทำให้สะดวกแก่การนำไปเคลือบบนสิ่งทอ โดยวิธีการเตรียม PLA ไมโครแคปซูลให้อยู่ในรูปสารแขวนลอยในน้ำมีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมคือ วิธี coacervation เนื่องจากให้เปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มสูง แต่ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้วิธี emulsification-solvent evaporation แม้ว่าวิธีนี้จะให้เปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มที่ต่ำเมื่อเทียบกับวิธี coacervation และอาจมีตัวทำละลายหลงเหลืออยู่บ้าง (Sousa *et al.*, 2022) แต่เนื่องจากวิธีนี้สามารถปรับใช้กับสารลดแรงตึงผิวได้หลากหลายชนิดมากกว่าวิธี coacervation รวมทั้งในงานวิจัยนี้ยังต้องการเตรียมสารแขวนลอย PLA ไมโครแคปซูลที่สามารถไปยึดเกาะกับสิ่งทอได้ดี ดังนั้นจึงเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวที่เตรียมขึ้นเอง เพื่อวัตถุประสงค์นี้โดยเฉพาะ ซึ่งก็คือ พอลิ(ไวนิลแอลกอฮอล์-โค-ไวนิลอะซิเตต) P(VA-co-VAc) เพราะนอกจาก P(VA-co-VAc) จะทำหน้าที่เป็นอิมัลซิฟายเออร์ในระหว่างการเตรียม PLA ไมโครแคปซูลแล้ว (Manangan & Shawaphun, 2016) โดยส่วนที่เป็นไวนิลแอลกอฮอล์ของ P(VA-co-VAc) ที่ยังคงเหลืออยู่บนผิวหนังของอนุภาค PLA ไมโครแคปซูลภายหลังการเตรียมยังช่วยในการไปยึดเกาะกับสิ่งทอได้ดีอีกด้วยโดยเฉพาะสิ่งทอที่เป็นผ้าฝ้ายซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในปริมาณมากที่พื้นผิวจึงสามารถยึดเกาะกับหมู่ไวนิลแอลกอฮอล์ที่อยู่บนผิวหนังของ PLA ไมโครแคปซูลได้ดีผ่านพันธะไฮโดรเจน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ต้องการเตรียมไมโครแคปซูลของพอลิแลคติก แอซิด (Polylactic acid, PLA) ที่ห่อหุมน้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพรไทย 5 ชนิด ที่มีฤทธิ์ในการขับไล่ยุง ได้แก่ ตะไคร้ (*Cymbopogon winterianus*), มะกรูด (*Citrus hystrix*), ขมิ้นชัน (*Curcuma longa*), ข่า (*Alpinia galangal L.*) และ ใบแมงลัก (*Ocimum americanum*) เพื่อประยุกต์ใช้เป็นสารเคลือบสำหรับสิ่งทอ ในการเตรียม PLA ไมโครแคปซูลที่ใช้ห่อหุมน้ำมันหอมระเหยจะใช้เทคนิค emulsification-solvent evaporation และใช้ พอลิ(ไวนิลแอลกอฮอล์-โค-ไวนิลอะซิเตต) P(VA-co-VAc) เป็นอิมัลซิฟายเออร์รวมทั้งเป็นสารช่วย

ในการยิดเกาะระหว่างไมโครแคปซูลของ PLA กับสิ่งทอ จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของ ขนาดอนุภาค PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหย ความสามารถในการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยของ PLA ไมโครแคปซูล จากนั้นจึงนำไปทดสอบประสิทธิภาพ ในการไล่ยุงลายบ้าน (*Aedes aegypti*) โดยใช้ชุดทดสอบ Excito-Repellency เทียบกับผลิตภัณฑ์ไล่ยุงที่มี DEET เป็นองค์ประกอบ

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียม Poly(vinyl alcohol-co-vinyl acetate) เพื่อใช้เป็นอิมัลซิฟายเออร์

การเตรียม Poly(vinyl alcohol-co-vinyl acetate) หรือ P(VA-co-VAc) เพื่อใช้เป็นอิมัลซิฟายเออร์จะใช้วิธีการเตรียมตามวิธีของ Manangan & Shawaphun (2016) โดยชั่งพอลิไวนิลอะซิเตต (Polyvinyl acetate, PVAc) ปริมาณ 1 กรัม มาละลายในเมทานอลปริมาตร 30 มิลลิลิตร ปั่นจนจนพอลิไวนิลอะซิเตตละลายหมด จากนั้นเติมสารละลาย KOH ที่มีความเข้มข้น 0.029 โมลต่อลิตรลงในขวดก้นกลมที่มีสารละลายของพอลิไวนิลอะซิเตตในเมทานอล จากนั้นทำการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำของผสมที่ได้ไประเหยตัวทำละลายออกที่อุณหภูมิห้องด้วยเครื่องระเหยสารแบบหมุน ส่วนที่เหลือลงในจานเพาะเชื้อวางทิ้งไว้ให้เมทานอลระเหยจนแห้งแล้วเก็บในโถดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.2 การเตรียม PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหย

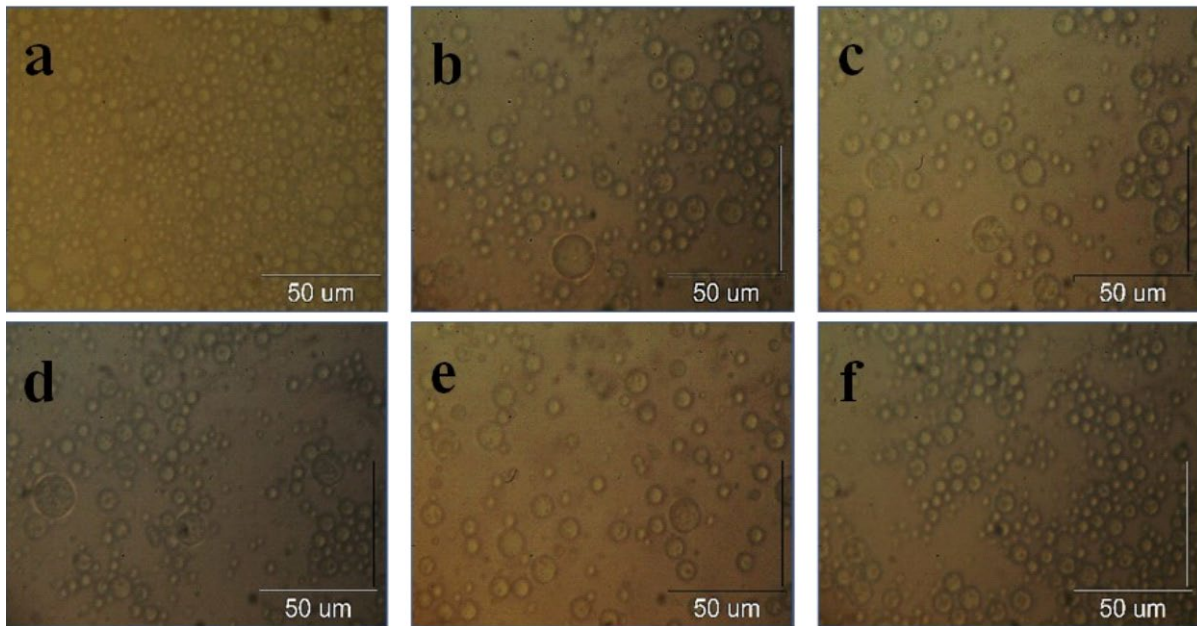
การเตรียม PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหย จะใช้วิธีการเตรียมตามวิธีของ Manangan & Shawaphun (2016) โดยชั่ง PLA มา 2.000 กรัม และชั่งน้ำมันหอมระเหยมา 0.050 กรัม มาละลายให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทนปริมาตร 200 มิลลิลิตร จากนั้น ชั่ง P(VA-co-VAc) อิมัลซิฟายเออร์มา 5.600 กรัม นำไปละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 120 มิลลิลิตร โดยกวนที่อุณหภูมิ 80°C จนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้น นำสารละลายของ P(VA-co-VAc) ในน้ำมาปั่นด้วยเครื่องปั่นที่ความเร็ว 1,000 รอบต่อนาที จากนั้นค่อยๆ หยดสารละลายของ PLA และน้ำมันหอมระเหยในไดคลอโรมีเทนลงไปด้วยอัตราเร็ว 5 มิลลิลิตรต่อนาทีจนหมดและจากนั้นทำการปั่นที่อุณหภูมิห้องต่ออีกเป็นเวลา 8 ชั่วโมงเพื่อระเหยตัวทำละลายไดคลอโรมีเทนออกจนหมด

2.3 การหาขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของ PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหย

นำสารแขวนลอยในน้ำของ PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยมาทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปหยดบนกระจกสไลด์ จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง แล้วทำการบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัล ภาพถ่ายที่ถูกบันทึกด้วยกล้องดิจิทัลจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ (Scope Image 9.0) เพื่อหาขนาดอนุภาคเฉลี่ย

2.4 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ถูกห่อหุ้มใน PLA ไมโครแคปซูล

น้ำมันหอมระเหยที่ถูกห่อหุ้มใน PLA ไมโครแคปซูล ได้ถูกวิเคราะห์หาปริมาณตามขั้นตอนดังนี้ ขั้นแรกทำการแยกอนุภาค PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยออกจากสารแขวนลอยโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที โดยเทสารละลายส่วนใส่ทิ้ง จากนั้นนำอนุภาค PLA ไมโครแคปซูลมาล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 2 ครั้ง เพื่อแยกเอาน้ำมันหอมระเหยที่ไม่ได้ถูกห่อหุ้มภายใน PLA ไมโครแคปซูลออกไป จากนั้นจึงนำ PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยมาสกัดด้วยเมทานอลปริมาตร 200 มิลลิลิตรเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำสารละลายที่สกัดได้มาทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ดังนี้ โดยน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ให้วัดที่ความยาวคลื่น 238 นาโนเมตร, น้ำมันหอมระเหยผิวมะกรูดให้วัดที่ความยาวคลื่น 205 นาโนเมตร, น้ำมันหอมระเหยชาให้วัดที่ความยาวคลื่น 203 นาโนเมตร, น้ำมันหอมระเหยขมิ้นให้วัดที่ความยาวคลื่น 236 นาโนเมตร และ น้ำมันหอมระเหยใบแมงลักให้วัดที่ความยาวคลื่น 231 นาโนเมตรตามลำดับ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐานของน้ำมันหอมระเหยแต่ละชนิดก็จะทำให้หาค่าความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยที่อยู่ในสารละลายได้ เมื่อทราบปริมาตรของสารละลายที่สกัดได้ก็จะคำนวณหาปริมาณของน้ำมันหอมระเหยที่ถูกห่อหุ้มใน PLA ไมโครแคปซูลได้ ค่าเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหย (% encapsulation) ของ PLA ไมโครแคปซูลถูกคำนวณโดยการนำเอาน้ำหนักของน้ำมันหอมระเหยที่ถูกห่อหุ้มภายในไมโครแคปซูลหารด้วยน้ำหนักของน้ำมันหอมระเหยที่ใส่เข้าไปตอนที่เตรียม PLA ไมโครแคปซูล จากนั้นคูณด้วย 100



รูปที่ 1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของอนุภาค PLA ไมโครแคปซูล a) ที่ไม่ได้ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหย b) ที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ c) ที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยผิวมะกรูด d) ที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยขมิ้น e) ที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยขมิ้น f) ที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยใบแมงลัก

2.5 การทดสอบฤทธิ์การไล่ยุงลายของน้ำมันหอมระเหย น้ำมันหอมระเหยที่ถูกห่อหุ้มใน PLA ไมโครแคปซูล และ DEET

หยดน้ำมันหอมระเหย สารแขวนลอย PLA ไมโครแคปซูล ที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหย และ ผลิตภัณฑ์ไล่ยุงที่มี DEET เป็นองค์ประกอบ ลงไปในจานเพาะเชื้อโดยควบคุมให้น้ำหนักของสารออกฤทธิ์มีปริมาณ 0.15 กรัมเท่ากันในทุกการทดลอง จากนั้นนำไปทดสอบด้วยชุดทดสอบ Excito-Repellency ในการทดสอบแต่ละครั้งให้น้ำจานเพาะเชื้อที่มีสารที่จะทดสอบนำมาวางในกล่องอูมิเนียมด้านใน จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ช่วง ช่วงละ 20 นาที ส่วนยุงลายที่ใช้ในการทดสอบจะถูกใส่กล่องทดสอบเป็นจำนวน 15 ตัวต่อการทดสอบ 1 ช่วง เมื่อเริ่มต้นการทดสอบแต่ละช่วงจะนำยุงลาย 15 ตัว ใส่ในกล่องทดสอบและพักยุงเอาไว้ 3 นาทีโดยยังไม่เริ่มจับเวลาเพื่อให้ยุงปรับสภาพ เมื่อครบ 3 นาทีจะเปิดช่องทางออก เริ่มจับเวลาและบันทึกจำนวนตัวยุงที่ออกจากกล่องทดสอบทุก 1 นาที จนครบ 20 นาที นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาร้อยละของยุงที่หนีออกจากกล่องทดสอบ หลังจากนั้นนำยุงที่เหลือออกจากกล่องทดสอบ แล้วทำการทดสอบต่อช่วงที่ 2 โดยใส่ยุงใหม่ในกล่องทดสอบเป็นจำนวน 15 ตัว โดยใช้จานเพาะเชื้อใบเดิมและไม่เปลี่ยนสารที่ใช้ พักยุงเอาไว้ 3 นาทีโดยยังไม่เริ่มจับเวลาเพื่อให้ยุงปรับสภาพ เมื่อครบ 3 นาทีจะเปิดช่องทางออก เริ่มจับเวลาและบันทึกจำนวนตัวยุงที่ออกจากกล่องทดสอบทุก 1 นาที จนครบ 20 นาที นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาร้อยละ

ของยุงที่หนีออกจากกล่องทดสอบ หลังจากนั้นนำยุงที่เหลือออกจากกล่องทดสอบ แล้วทำการทดสอบต่อช่วงที่ 3 โดยใส่ยุงใหม่ในกล่องทดสอบเป็นจำนวน 15 ตัว โดยใช้จานเพาะเชื้อใบเดิมและไม่เปลี่ยนสารที่ใช้ทดสอบ พักยุงเอาไว้ 3 นาทีโดยยังไม่เริ่มจับเวลาเพื่อให้ยุงปรับสภาพ เมื่อครบ 3 นาทีจะเปิดช่องทางออก เริ่มจับเวลาและบันทึกจำนวนตัวยุงที่ออกจากกล่องทดสอบทุก 1 นาที จนครบ 20 นาที นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาร้อยละของยุงที่หนีออกจากกล่องทดสอบ โดยทำการทดลองเปรียบเทียบกับตัวควบคุมคือจานเพาะเชื้อเปล่า และจานเพาะเชื้อที่มี PLA ไมโครแคปซูลเปล่าที่ไม่ได้ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหย

3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของ PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหย

สมบัติและลักษณะของอนุภาค PLA ไมโครแคปซูลทั้งที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยและที่ไม่ได้ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยซึ่งได้แก่ ขนาดอนุภาค การกระจายตัวของขนาดอนุภาค ได้ถูกแสดงในรูปที่ 1 และตารางที่ 1 โดยพบว่า PLA ไมโครแคปซูลที่ไม่ได้ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยมีขนาดอนุภาค 5.02 ± 1.25 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่า PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยเล็กน้อยซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 5.79 ± 1.73 ถึง 6.58 ± 2.27 ไมโครเมตร ซึ่ง PLA ไมโครแคปซูลที่ไม่ได้ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยที่เตรียมได้ในการทดลองนี้มีขนาดเล็กกว่า PLA ไมโครแคปซูลที่เตรียมโดยใช้วิธีเดียวกันจากการทดลอง

ตารางที่ 1 ขนาดอนุภาคของ PLA ไมโครแคปซูลที่ไม่ได้ห่อหุ้มและที่ห่อหุ้ม น้ำมันหอมระเหยชนิดต่างๆ

น้ำมันหอมระเหยที่ห่อหุ้ม	ขนาดอนุภาค (μm)
ไม่มี	5.02 $\pm$ 1.25
ตะไคร้	6.12 $\pm$ 1.63
ผิวมะกรูด	6.58 $\pm$ 2.27
ข่า	5.97 $\pm$ 2.24
ขมิ้น	6.17 $\pm$ 1.59
ใบแมงลัก	5.79 $\pm$ 1.83

ตารางที่ 2 เปอร์เซ็นต์การห่อหุมน้ำมันหอมระเหยชนิดต่างๆในอนุภาค PLA ไมโครแคปซูล

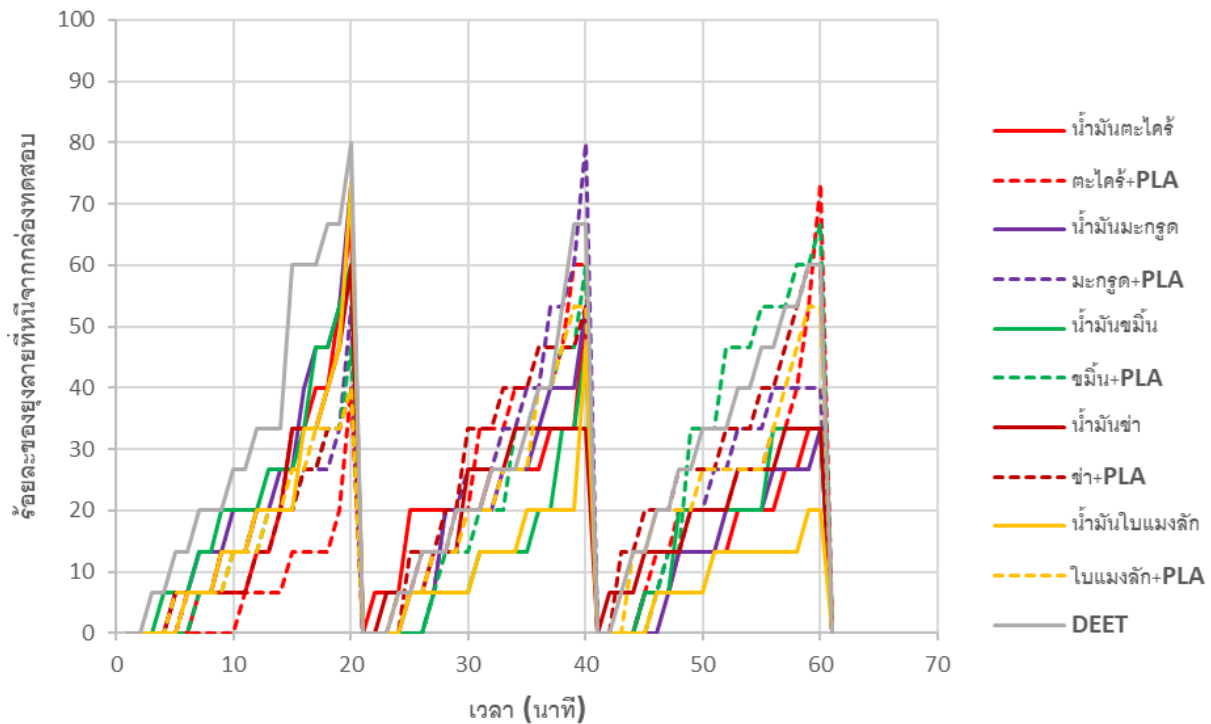
น้ำมันหอมระเหย	เปอร์เซ็นต์การห่อหุ้ม
ตะไคร้	32.00 $\pm$ 1.30
ผิวมะกรูด	40.87 $\pm$ 1.54
ข่า	26.52 $\pm$ 2.50
ขมิ้น	30.66 $\pm$ 2.10
ใบแมงลัก	29.30 $\pm$ 1.80

ของ Virag *et. al.* (2002) ถึง 10 เท่า ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 57 ± 18 ไมโครเมตร ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยในการเตรียมที่แตกต่างกัน

3.2 ผลการหาเปอร์เซ็นต์การห่อหุมน้ำมันหอมระเหยใน PLA ไมโครแคปซูล

จากงานวิจัยพบว่าในน้ำมันหอมระเหยผิวมะกรูดมีสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด ได้แก่ β -pinene (24.62%), Sabinene (22.06%) และ Limonene (19.29%) (Suwannayod *et. al.*, 2018) ในน้ำมันหอมระเหยตะไคร้มีสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด ได้แก่ Citronellal (27.00%), Geraniol (22.70%) และ Citronellol (10.09%) (Simie *et. al.*, 2008) ในน้ำมันหอมระเหยขมิ้นมีสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด ได้แก่ α -Turmerone (42.60%), ar-Turmerone (12.90%) และ β -Turmerone (16.00%) (Avanco *et. al.*, 2017) ในน้ำมันหอมระเหยใบแมงลักมีสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด ได้แก่ Terpinen-4-ol (43.21%), 1,8-Cineole (16.13%) และ α -Terpineol (4.01%) (Matasyoh *et. al.*, 2006) ในน้ำมันหอมระเหยข่ามีสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด ได้แก่ Eucalyptol (22.63%), β -Pinene (14.36%) และ α -Pinene (10.89%) (Wu *et. al.*, 2014) เมื่อพิจารณาโครงสร้างของสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันหอมระเหยทั้ง 5 ชนิด จะพบว่าน้ำมันหอมระเหยที่มีค่าสูงที่สุดคือน้ำมันหอมระเหยใบแมงลัก ซึ่ง

ประกอบด้วยสารประกอบที่มีช่วงปานกลาง ได้แก่ 1,8-Cineole มีปริมาณ 16.13% และสารประกอบที่มีค่าสูง ได้แก่ Terpinen-4-ol และ α -Terpineol มีปริมาณรวมกัน 47.22% ส่วนน้ำมันหอมระเหยที่มีช่วงรองลงมาจากใบแมงลักคือน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบที่มีช่วงปานกลาง ได้แก่ Citronellal มีปริมาณ 27.00% และสารประกอบที่มีค่าสูง ได้แก่ Citronellol และ Geraniol มีปริมาณรวมกัน 32.79% ส่วนน้ำมันหอมระเหยที่มีช่วงรองลงมาจากตะไคร้คือน้ำมันหอมระเหยข่า ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบที่มีช่วงปานกลาง ได้แก่ Eucalyptol ซึ่งมีปริมาณ 22.63% และสารประกอบที่ไม่มีค่า ได้แก่ β -Pinene และ α -Pinene ซึ่งมีปริมาณรวมกัน 25.25% ส่วนน้ำมันหอมระเหยที่เหลืออีก 2 ชนิดคือน้ำมันหอมระเหยขมิ้นและผิวมะกรูด มีช่วงค่อนข้างต่ำโดยในน้ำมันหอมระเหยผิวมะกรูดซึ่งองค์ประกอบหลัก (65.97%) ล้วนแต่ประกอบด้วยสารประกอบที่ไม่มีค่า ได้แก่ β -Pinene, Sabinene และ Limonene เช่นเดียวกันกับน้ำมันหอมระเหยขมิ้น (71.50%) ซึ่งล้วนแต่ประกอบด้วยสารประกอบที่ไม่มีค่า ได้แก่ α -Turmerone, ar-Turmerone และ β -Turmerone ถ้าดูจากผลการทดลองในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า PLA ไมโครแคปซูลสามารถห่อหุมน้ำมันหอมระเหยผิวมะกรูดซึ่งอยู่ในกลุ่มที่มีค่าต่ำได้มากที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มเท่ากับ 40.87 ± 1.54 % ส่วนน้ำมันหอมระเหยที่ PLA ไมโครแคปซูลห่อหุ้มได้ดีรองลงมาคือน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ ขมิ้น และใบแมงลัก โดยมีเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มเท่ากับ 32.00 ± 1.30 , 30.66 ± 2.10 และ 29.30 ± 1.80 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากความมีค่าของน้ำมันหอมระเหยทั้ง 3 ชนิดก็จะพบว่า น้ำมันหอมระเหยตะไคร้และใบแมงลักจัดอยู่ในกลุ่มน้ำมันหอมระเหยที่มีค่าสูง ส่วนน้ำมันหอมระเหยขมิ้นจัดอยู่ในกลุ่มน้ำมันหอมระเหยที่มีค่าต่ำ ส่วนน้ำมันหอมระเหยที่ PLA ไมโครแคปซูลห่อหุ้มได้น้อยที่สุดคือน้ำมันหอมระเหยข่า โดยมีเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มเท่ากับ 26.52 ± 2.50 แม้ว่าจากรายงานวิจัยก่อนหน้านี้ Martins *et. al.* (2011) ได้ตรวจสอบการเติมน้ำมันหอมระเหยของโคม์เข้าไปในระหว่างกระบวนการเตรียม PLA ไมโครแคปซูล โดยน้ำมันหอมระเหยโคม์ประกอบด้วยสารประกอบฟีนอลิกที่มีค่าสูง 62.2% โดยมีปริมาณ Thymol เป็นองค์ประกอบหลักโดยมีปริมาณสูงถึง 47.7% โดยเปอร์เซ็นต์การห่อหุมน้ำมันหอมระเหยของโคม์ใน PLA ไมโครแคปซูลมีค่าประมาณ 65% และพบว่าใน 65% นี้มีองค์ประกอบที่



รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของยูงลายที่หักจากกล่องทดสอบและเวลา(นาทื)ของ DEET น้ำมันหอมระเหยชนิดต่างๆ ที่ไม่ถูกห่อหุ้มและที่ถูกห่อหุ้มด้วย PLA ไมโครแคปซูล

เป็นสารประกอบที่ไม่มีขั้วอยู่สูงถึง 80% และมีองค์ประกอบที่เป็นสารประกอบที่มีขั้วอยู่เพียง 54% ซึ่งสอดคล้องกับผลวิจัยในตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าน้ำมันผิวมะกรูดซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบที่ไม่มีขั้วสามารถถูกห่อหุ้มใน PLA ไมโครแคปซูลได้มากที่สุด อย่างไรก็ตามผลการวิจัยนี้ขัดแย้งกับงานวิจัยของ Dusankova et. al. (2019) ที่ได้ศึกษาการเตรียมและหาคุณสมบัติเฉพาะของอนุภาคทรงกลมขนาดไมโครของ PLA ที่บรรจุน้ำมันหอมระเหยชนิดต่างๆ โดยพบว่าองค์ประกอบที่มีขั้วของน้ำมันหอมระเหยจะถูกดูดซับใน PLA ไมโครแคปซูลได้มากกว่าองค์ประกอบที่ไม่มีขั้วเนื่องจาก PLA เองก็มีขั้วเหมือนกัน นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Virag et. al. (2022) ได้ทำการหาค่า absorption capacity ของอนุภาค PLA ที่มีต่อน้ำมันหอมระเหย 3 ชนิด ได้แก่ *Thymus vulgaris*, *Melissa officinalis* และ *Foeniculum vulgare* ในการทดลองนี้อนุภาค PLA ได้เตรียมโดยใช้วิธี solvent evaporation emulsification โดยใช้เม็ดพลาสติก PLA ที่มีปริมาณผลึกแตกต่างกัน ได้แก่ 0.1% และ 16.0% ตามลำดับ โดยพบว่าค่าการดูดซับน้ำมันหอมระเหยของอนุภาค PLA ลดลง เมื่อปริมาณผลึกในอนุภาค PLA มีค่าลดลง โดยพบว่าปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ถูกดูดซับในอนุภาค PLA ที่มีปริมาณผลึกสูงกว่ามีค่ามากกว่าที่ถูกดูดซับในอนุภาค PLA ที่มีปริมาณผลึกต่ำกว่าอยู่ประมาณ 15% โดยพบว่าอนุภาค PLA ที่มีปริมาณผลึกสูงกว่าสามารถดูดซับน้ำมันหอมระเหยที่

ละลายในเอทานอลได้ประมาณ 30-40% และอนุภาค PLA ที่มีปริมาณผลึกต่ำกว่าสามารถดูดซับน้ำมันหอมระเหยที่ละลายในเอทานอลได้ประมาณ 25-33% โดยพบว่าค่าปริมาณการดูดซับน้ำมันหอมระเหยของอนุภาค PLA ที่มีปริมาณผลึกสูงกว่าในงานวิจัยนี้ใกล้เคียงกับค่าเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยชนิดต่างๆ ที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 2 นอกจากนี้ ในงานวิจัยของ Vay et. al. (2011) และ Virag et. al. (2022) พบว่าค่าการดูดซับของ PLA เกี่ยวข้องกับค่า พารามิเตอร์การละลายของแฮนเซน Hensen solubility parameter (HSP) ของสารประกอบหรือองค์ประกอบหลักที่อยู่ในน้ำมันหอมระเหยหรือ HSP นอกจากนี้ ในงานวิจัยของ Sato et. al. (2022) ยังพบว่าค่า HSP บ่งบอกถึงความสามารถในการดึงดูดของพอลิเมอร์กับตัวทำละลายอินทรีย์ โดยค่า HSP แบ่งออกเป็น 3 พารามิเตอร์ย่อย ได้แก่ พารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงแรงแผ่กระจาย (δ_d) พารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงอันตรกิริยาที่มีขั้ว (δ_p) และพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจน (δ_h) ถ้าค่า HSP ของตัวทำละลายอินทรีย์มีค่าใกล้เคียงกับค่า HSP ของพอลิเมอร์ แสดงว่าตัวทำละลายอินทรีย์นั้นจะสามารถละลายวัสดุพอลิเมอร์นั้นได้ แม้ว่าจากงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดพอจะสรุปได้ว่า ค่าการดูดซับของน้ำมันหอมระเหยใน PLA ไมโครแคปซูลขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ความมีขั้วขององค์ประกอบหลักในน้ำมันหอมระเหย รวมทั้งค่า HSP

ของพอลิเมอร์และขององค์ประกอบหลักที่อยู่ในน้ำมันหอมระเหย อย่างไรก็ตาม การทำนายค่าการดูดซับของ PLA ไมโครแคปซูลด้วยค่า HSP เพียงอย่างเดียว แม้ว่าจะมีความเป็นไปได้ แต่ก็อาจได้ผลที่ไม่แน่นอนเนื่องจากในน้ำมันหอมระเหยมีส่วนประกอบของสารประกอบหลากหลายชนิด หากใช้องค์ประกอบหลักในการทำนายค่า HSP เพียงอย่างเดียวค่าที่ได้อาจไม่ถูกต้องนัก จากผลการทดลองในตารางที่ 2 PLA ไมโครแคปซูลสามารถห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ ชมิ้น และใบแมงลักได้ใกล้เคียงกันโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มประมาณ 30% ถึงแม้ว่าน้ำมันตะไคร้และใบแมงลักจะจัดอยู่ในกลุ่มที่มีขั้วสูงแต่น้ำมันชมิ้นจะจัดอยู่กลุ่มที่มีขั้วต่ำก็ตาม จากการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์ในการห่อหุ้มของ PLA ไมโครแคปซูลอาจไม่ได้ขึ้นอยู่กับความมีขั้วขององค์ประกอบหลักที่มีในน้ำมันหอมระเหยเพียงอย่างเดียว แต่อาจขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นด้วย อย่างเช่น วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูล ความไม่เสถียรและความสามารถในการระเหยขององค์ประกอบที่อยู่ในน้ำมันหอมระเหย เป็นต้น โดยองค์ประกอบที่ระเหยง่ายที่อยู่ในน้ำมันหอมระเหยอาจสูญเสียไปในระหว่างการเตรียมและการเก็บรักษา PLA ไมโครแคปซูล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fraj et. al. (2019) ซึ่งได้ทำการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลโดยใช้ Polycaprolactone (PCL) เป็นวัสดุเปลือกในการห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหย *Origanum vulgare* L. ซึ่งมีสารประกอบ cavacrol อยู่ในปริมาณสูงโดยเปรียบเทียบวิธีเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูล 2 วิธี ได้แก่ วิธี nanoprecipitation และวิธี double emulsion โดยพบว่าทั้ง 2 วิธี ให้เปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยที่แตกต่างกัน โดยวิธี nanoprecipitation ให้เปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยอยู่ในช่วง $50.36 \pm 1.86\%$ ถึง $85.89 \pm 2.40\%$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยในการเตรียม ส่วนวิธี double emulsion ให้เปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยเพียง $47.52 \pm 0.52\%$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีในการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหย แม้ว่าในงานวิจัยนี้จะไม่ได้ออกมาหาความเสถียรของ PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยชนิดต่างๆ ในระยะยาว แต่จากงานวิจัยของ Fraj et. al. (2019) ที่ได้ทำการทดลองหาความเสถียรของ PCL ไมโครแคปซูล ในการกักเก็บน้ำมันหอมระเหยของ *Origanum vulgare* L. ที่สภาวะ 4 ± 2 °C, 25 ± 2 °C และ 40 ± 2 °C เป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่า น้ำมันหอมระเหยที่ถูกห่อหุ้มใน PCL ไมโคร

แคปซูลที่เตรียมโดยวิธี nanoprecipitation มีปริมาณ cavacrol ที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันหอมระเหยที่ถูกกักเก็บแทบไม่เปลี่ยนแปลง แต่ cavacrol ที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันหอมระเหยที่ถูกห่อหุ้มใน PCL ไมโครแคปซูลที่เตรียมโดยวิธี double emulsion มีปริมาณลดลงเหลือเพียง 64.56% และ 61.84% ที่อุณหภูมิ 25 และ 40 °C ตามลำดับ จากการทดลองข้างต้น ทำให้พออนุมานได้ว่า PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยชนิดต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้น่าจะมีความเสถียรระยะยาวอย่างน้อยเป็นระยะเวลา 60 วัน เนื่องจาก PLA ที่ใช้ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นพอลิเอสเทอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเหมือนกับ PCL ที่ใช้ในการห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยในการทดลองของ Fraj et. al. (2019) ถึงแม้ว่า PLA จะมีความมีขั้วและปริมาณผลึกแตกต่างจาก PCL บ้าง แต่ก็คงไม่มีผลต่อความเสถียรของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ดังนั้นผลที่ได้ก็น่าจะค่อนข้างใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ วิธีการเตรียม พอลิเมอร์ไมโครแคปซูลแบบ nanoprecipitation ที่ใช้ในการทดลองของ Fraj et. al. (2019) ค่อนข้างคล้ายคลึงกับวิธีการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลแบบ emulsification-solvent evaporation ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังนั้นจึงทำให้ผู้วิจัยค่อนข้างมั่นใจว่า PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยทั้ง 5 ชนิด น่าจะมีความเสถียรในระยะยาว

3.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการไล่ยุงลายบ้านของ DEET น้ำมันหอมระเหยชนิดต่างๆ ที่ไม่ได้ถูกห่อหุ้มและที่ถูกห่อหุ้มด้วย PLA ไมโครแคปซูล

รูปที่ 2 และตารางที่ 3 แสดงประสิทธิภาพในการไล่ยุงลายบ้านของสารไล่ยุงชนิดต่างๆ ซึ่งได้แก่ น้ำมันหอมระเหย 5 ชนิด (ตะไคร้, ผิวมะกรูด, ข่า, ชมิ้น และใบแมงลัก) ทั้งที่ไม่ถูกห่อหุ้มและที่ถูกห่อหุ้มด้วย PLA ไมโครแคปซูล และ DEET โดยใช้ชุดทดสอบ Excito-Repellency

จากการทดสอบประสิทธิภาพในการไล่ยุงของน้ำมันหอมระเหยทั้ง 5 ชนิดทั้งที่ถูกห่อหุ้มและไม่ได้ถูกห่อหุ้มด้วย PLA ไมโครแคปซูล เทียบกับตัวอย่างที่เป็นตัวควบคุมคือจานเปล่าที่ไม่ใส่อะไรเลยและ PLA ไมโครแคปซูลเปล่าที่ไม่ได้บรรจุอะไรเลย จากผลการทดลองในตารางที่ 3 พบว่าตัวอย่างควบคุมที่เป็นจานเปล่าและ PLA ไมโครแคปซูลเปล่าให้ร้อยละในการไล่ยุงที่เวลา 20 นาทีมีค่า 13.33 ± 5.96 และ 15.55 ± 3.44 ซึ่งค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยตัวควบคุมที่เป็นจานเปล่าและ PLA ไมโครแคปซูลเปล่า พบว่าหลังจากเวลาผ่านไป 40 และ 60 นาที ร้อยละในการไล่ยุงยังคงใกล้เคียงเดิม

ตารางที่ 3 แสดงร้อยละของยุงที่หนีออกจากกล่องทดสอบของ DEET น้ำมันหอมระเหยชนิดต่างๆที่ไม่ถูกห่อหุ้มและที่ถูกห่อหุ้มด้วย PLA ไมโครแคปซูล ที่เวลา 20, 40 และ 60 นาที

ชนิดสาร	ร้อยละของยุงที่หนีจากกล่องทดสอบ					
	ที่ไม่ถูกห่อหุ้มใน PLA ไมโครแคปซูล			ที่ถูกห่อหุ้มใน PLA ไมโครแคปซูล		
	ที่เวลา 20 นาที	ที่เวลา 40 นาที	ที่เวลา 60 นาที	ที่เวลา 20 นาที	ที่เวลา 40 นาที	ที่เวลา 60 นาที
ไม่มี	13.33±5.96	15.55±3.44	11.11±3.44	15.55±3.44	20.00±5.97	17.78±3.44
DEET	77.78±3.44	66.67±5.96	62.22±9.11	-	-	-
น้ำมันตะไคร้	66.67±5.96	55.55±3.44	31.11±9.11	42.22±3.44	64.44±6.88	75.56±9.11
น้ำมันมะกรูด	75.55±3.44	53.33±5.96	35.56±9.11	57.78±6.89	75.56±6.88	37.78±9.11
น้ำมันข่า	60.00±5.97	31.11±3.44	33.33±5.96	40.00±5.97	48.89±6.88	62.22±9.11
น้ำมันขมิ้น	60.00±5.97	48.89±3.44	33.33±5.96	44.45±3.44	60.00±5.97	68.89±9.11
น้ำมันใบแมงลัก	71.11±3.44	46.67±5.96	20.00±5.97	40.00±5.97	57.78±6.89	55.56±9.11

จากผลการทดลองในตารางที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบสารไล่ยุงที่ไม่ได้ถูกห่อหุ้มทั้ง 6 ชนิด เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาทีพบว่า DEET มีประสิทธิภาพในการไล่ยุงสูงที่สุดโดยร้อยละการไล่ยุงมีค่า 77.78±3.44 รองลงมาคือน้ำมันหอมระเหยผิวมะกรูดซึ่งร้อยละการไล่ยุงมีค่า 75.55±3.44 รองลงมาคือน้ำมันหอมระเหยใบแมงลักโดยร้อยละการไล่ยุงมีค่า 71.11±3.44 ถัดมาคือน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ซึ่งร้อยละการไล่ยุงมีค่า 66.67±5.96 ส่วนน้ำมันหอมระเหยข่าและขมิ้นที่เวลา 20 นาที มีประสิทธิภาพในการไล่ยุงเท่ากันและมีค่าต่ำที่สุดโดยมีค่าร้อยละการไล่ยุงเท่ากับ 60±5.97 แต่ถ้าเปรียบเทียบปริมาณการลดลงของประสิทธิภาพการไล่ยุงของสารไล่ยุงทั้ง 6 ชนิด ตั้งแต่เวลา 20 นาที ไปจนถึงเวลา 60 นาที พบว่า สารไล่ยุงที่มีการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการไล่ยุงน้อยที่สุดคือ DEET โดยพบว่าร้อยละในการไล่ยุงมีการลดลงเพียง 15.56% รองลงมาคือน้ำมันหอมระเหยข่าและขมิ้นที่ร้อยละการไล่ยุงลดลงเพียง 26.67% รองลงมาคือน้ำมันหอมระเหยตะไคร้พบว่าร้อยละการไล่ยุงลดลง 35.56% รองลงมาคือน้ำมันหอมระเหยผิวมะกรูดที่ร้อยละการไล่ยุงลดลง 39.99% และน้ำมันหอมระเหยที่ร้อยละในการไล่ยุงลดลงมากที่สุดเมื่อเวลาผ่านไปคือน้ำมันหอมระเหยใบแมงลัก โดยลดลงถึง 51.11% ซึ่งสอดคล้องกับกราฟในรูปที่ 2 ซึ่งแสดงอัตราการลดลงของร้อยละในการไล่ยุงของสารไล่ยุงทั้ง 6 ชนิด ขณะที่ร้อยละในการไล่ยุงของน้ำมันหอมระเหยที่ถูกห่อหุ้มด้วย PLA ไมโครแคปซูลในตารางที่ 3 พบว่าที่เวลา 20 นาที PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุมน้ำมันหอมระเหยมะกรูดมีค่าร้อยละการไล่ยุงสูงที่สุดโดยมีค่า 57.78±6.89 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าน้ำมันหอมระเหยที่ไม่ได้ห่อหุ้มอยู่ถึง 17.77 % รองลงมาคือ PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุมน้ำมันขมิ้นซึ่งมีค่าร้อยละในการไล่ยุงเท่ากับ 44.45±3.44 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าน้ำมันหอมระเหยที่ไม่ได้ห่อหุ้มอยู่ถึง 15.55 % ถัดมาคือ PLA ไมโครแคปซูลที่

ห่อหุมน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ พบว่ามีค่าร้อยละในการไล่ยุงเท่ากับ 42.22±3.44 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าน้ำมันหอมระเหยที่ไม่ได้ห่อหุ้มอยู่ 24.45 % ถัดมาคือ PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุมน้ำมันหอมระเหยข่า พบว่ามีค่าร้อยละในการไล่ยุง 40.00±5.97 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าจากน้ำมันหอมระเหยที่ไม่ได้ห่อหุ้มอยู่ถึง 20.00 % และ PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุมน้ำมันหอมระเหยใบแมงลักพบว่าค่าร้อยละในการไล่ยุงเท่ากับ 40.00±5.97 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าน้ำมันหอมระเหยที่ไม่ได้ห่อหุ้มอยู่ 31.11 % นอกจากนี้ยังพบว่า น้ำมันหอมระเหยทุกชนิดที่ไม่ได้ถูกห่อหุ้มเมื่อเวลาผ่านไป ร้อยละในการไล่ยุงมีแนวโน้มลดลง ซึ่งตรงข้ามกับน้ำมันหอมระเหยที่ถูกห่อหุ้มด้วย PLA ไมโครแคปซูลซึ่งพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปกลับพบว่าร้อยละในการไล่ยุงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดย PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุมน้ำมันหอมระเหยตะไคร้มีร้อยละในการไล่ยุงเพิ่มขึ้นมากที่สุดโดยเพิ่มขึ้นถึง 33.34% รองลงมาคือ ไมโครแคปซูลที่ห่อหุมน้ำมันหอมระเหยขมิ้นที่มีร้อยละการไล่ยุงเพิ่มขึ้น 24.44% รองลงมาคือ PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุมน้ำมันหอมระเหยข่าซึ่งมีร้อยละการไล่ยุงเพิ่มขึ้น 22.22% และ PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุมน้ำมันหอมระเหยใบแมงลักที่มีร้อยละการไล่ยุงเพิ่มขึ้น 15.56% อย่างไรก็ตามพบว่า PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุมน้ำมันหอมระเหยมะกรูดพบว่าร้อยละการไล่ยุงมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 17.78 % ที่เวลา 40 นาที แต่เมื่อเวลาผ่านไปกลับมีค่าลดลงอีกครั้งที่เวลา 60 นาที จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า PLA ไมโครแคปซูล ช่วยควบคุมการปลดปล่อยของน้ำมันหอมระเหยได้ดี ทำให้น้ำมันหอมระเหยสามารถคงประสิทธิภาพในการไล่ยุงได้นานขึ้น จากงานวิจัยของ Martin et. al. (2012) ซึ่งได้ตรวจสอบการปลดปล่อยของ Thymol และ p-Cymene จากอนุภาคไมโครแคปซูลของ PLA โดยพบว่าอัตราเร็วการปลดปล่อยสารประกอบทั้ง 2 ชนิด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในช่วงเวลา 60 นาทีแรก เนื่องจากการ

แพร่ผ่านชั้น PLA อย่างไรก็ตามหลังจาก 60 นาทีแรกผ่านไป อัตราเร็วในการปลดปล่อยสารประกอบทั้ง 2 ชนิดมีแนวโน้มคงที่ โดยพบว่ากลไกการปลดปล่อยในช่วง 60 นาทีแรกขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของ PLA โดยการแพร่ของน้ำมันหอมระเหยผ่านชั้น PLA จะเร็วขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PLA มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่ใน PLA จะลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PLA มีค่าสูงขึ้น จากการทดลองผู้วิจัยสรุปว่า สารประกอบ Thymol สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นพอลิเมอร์ได้เร็วกว่าทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของความมีขั้วระหว่าง PLA กับ Thymol มีค่าแตกต่างกันมากกว่าระหว่าง PLA กับ p-Cymene โดยพบว่า ค่า diffusion coefficient ในช่วง 60 นาทีแรกของ Thymol มีค่า $1.99 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ส่วนของ p-Cymene มีค่า $4.34 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$ ซึ่งผลการทดลองของ Martin *et. al.* (2012) สอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ในตารางที่ 3 จากการสังเกตประสิทธิภาพในการไล่ยุงของน้ำมันหอมระเหยทั้ง 5 ชนิดที่ถูกห่อหุ้มและที่ไม่ได้ถูกห่อหุ้มด้วย PLA ไมโครแคปซูล พบว่าร้อยละในการไล่ยุงของน้ำมันหอมระเหยที่ถูกห่อหุ้มด้วย PLA ไมโครแคปซูล มีค่าต่ำกว่าน้ำมันหอมระเหยที่ไม่ได้ถูกห่อหุ้มในช่วง 20 นาทีแรก แต่เมื่อเวลาผ่านไปร้อยละในการไล่ยุงของน้ำมันหอมระเหยที่ถูกห่อหุ้มมีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าน้ำมันหอมระเหยที่ถูกห่อหุ้มต้องเคลื่อนที่ผ่านชั้น PLA ที่เป็นเมทริกซ์ ดังนั้นจึงทำให้ร้อยละในการไล่ยุงของน้ำมันหอมระเหยที่ถูกห่อหุ้มมีค่าต่ำกว่าน้ำมันหอมระเหยที่ไม่ได้ถูกห่อหุ้มในช่วง 20 นาทีแรก นอกจากนี้ความมีขั้วขององค์ประกอบหลักในน้ำมันหอมระเหยทั้ง 5 ชนิดมีค่าไม่เท่ากัน จึงทำให้อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ผ่านชั้น PLA ที่เป็นเมทริกซ์มีค่าแตกต่างกันด้วย ส่งผลให้อัตราเร็วในการเพิ่มขึ้นของร้อยละในการไล่ยุงของน้ำมันหอมระเหยทั้ง 5 ชนิดที่ถูกห่อหุ้มด้วย PLA ไมโครแคปซูลมีค่าแตกต่างกัน

4. สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยทั้ง 5 ชนิด ซึ่งได้แก่ น้ำมันหอมระเหยตะไคร้ มะกรูด ข่า ขมิ้น และใบแมงลัก ได้ถูกเตรียมขึ้น โดยพบว่าอนุภาคของ PLA ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยทั้ง 5 ชนิดที่เตรียมได้ มีลักษณะกลมและมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน โดยมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 5.79 ± 1.73 ถึง 66.58 ± 2.27 ซึ่งมีค่ามากกว่า PLA ไมโครแคปซูลที่ไม่ได้ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยเพียงเล็กน้อยซึ่งมีค่าเท่ากับ

5.02 ± 1.25 จากการหาประสิทธิภาพในการห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยทั้ง 5 ชนิด พบว่า PLA ไมโครแคปซูลสามารถห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยผิวมะกรูดซึ่งอยู่ในกลุ่มที่มีขั้วต่ำได้มากที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการห่อหุ้มเท่ากับ $40.87 \pm 1.54 \%$ ส่วนน้ำมันหอมระเหยที่ PLA ไมโครแคปซูลห่อหุ้มได้ต่ำรองลงมาคือ น้ำมันหอมระเหยตะไคร้ ขมิ้น และใบแมงลัก โดยมีประสิทธิภาพการห่อหุ้มเท่ากับ $32.00 \pm 1.30 \%$, $30.66 \pm 2.10 \%$ และ $29.30 \pm 1.80 \%$ ตามลำดับ ส่วนน้ำมันหอมระเหยที่ PLA ไมโครแคปซูลห่อหุ้มได้น้อยที่สุดคือน้ำมันหอมระเหยข่า โดยมีประสิทธิภาพการห่อหุ้มเท่ากับ $26.52 \pm 2.50 \%$ จากการทดสอบประสิทธิภาพในการไล่ยุงลายบ้าน พบว่าน้ำมันหอมระเหยตะไคร้ มะกรูด ข่า ขมิ้น และใบแมงลักที่ไม่ถูกห่อหุ้มแสดงประสิทธิภาพในการไล่ยุงลายบ้านได้ดีใกล้เคียงกับ DEET ในช่วง 20 นาทีแรก แต่ประสิทธิภาพในการไล่ยุงมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที ในขณะที่ DEET ประสิทธิภาพในการไล่ยุงลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากการที่นำเอาน้ำมันหอมระเหยมาห่อหุ้มด้วย PLA ไมโครแคปซูลแม้ว่าประสิทธิภาพในการไล่ยุงต่ำกว่าน้ำมันหอมระเหยที่ไม่ถูกห่อหุ้มในช่วง 20 นาทีแรก ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันหอมระเหยต้องแพร่ผ่านชั้น PLA ที่เป็นวัสดุห่อหุ้ม แต่เมื่อเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการไล่ยุงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนมีประสิทธิภาพในการไล่ยุงเทียบเท่า DEET ที่เวลา 60 นาที ดังนั้น PLA ไมโครแคปซูลจึงเหมาะสมที่จะใช้ห่อหุ้มน้ำมันหอมระเหยเพื่อควบคุมการปลดปล่อยของน้ำมันหอมระเหยซึ่งช่วยให้ น้ำมันหอมระเหยมีประสิทธิภาพในการไล่ยุงที่ยาวนานขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประจำปีงบประมาณ 2561 เลขที่สัญญารับทุน 6141103

เอกสารอ้างอิง

- Avanco, G. B., Ferreira, F. D., Bomfim, N. S., Peralta, R. M., Brugnari, T., Mallmann, C. A., et. al. (2017) Curcuma longa L. essential oil composition, antioxidant effect and effect on *Fusarium verticillioides* and Furonisin production. Food Control, 73, 806 – 813 . <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.09.032>
- Bakry, A. M., Abbas, S., Ali, B., Majeed, H., Abouelwafa, M. Y., Mousa, A. et.al. (2016) Microencapsulation of oils: a comprehensive review of benefits, techniques and applications, Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 15, 143 – 182 . <http://dx.doi.org/10.1111/1541-4337.12179>

- Barnard, D. R. & Xue, R. (2004). Laboratory evaluation of mosquito repellents against *Aedes albopictus*, *Culex nigripalpus*, and *Ochlerotatus triseriatus* (Diptera: Culicidae). *Journal of Medical Entomology*, 41(4), 726–730. <http://dx.doi.org/10.1603/0022-2585-41.4.726>
- Borah, R., Kalita, M. C., Kar, A. & Talukdar A. K. (2010). Larvicidal efficacy of *Toddalia asiatica* (Linn.) Lam against two mosquito vectors *Aedes aegypti* and *Culex quinquefasciatus*. *African Journal of Biotechnology*, 9(16), 2527–2530.
- Briassoulis, G., Narioglou, M. & Hatzis, T. (2001) Toxic encephalopathy associated with use of DEET insect repellents: a case analysis of its toxicity in children. *Human and Experimental Toxicology*, 20, 8–14.
- Das, N. G., Baruah, I., Talukdar, P. K. & Das, S. C. (2003) Evaluation of botanicals as repellents against mosquitoes. *Journal of Vector Borne Diseases*, 40, 49–53.
- Dusankova, M., Pummerova, M. & Sedlarik, V. (2019) Microspheres of essential oil in polylactic acid and poly(methyl methacrylate) matrices and their blends. *Journal of Microencapsulation*, 36, 305–316. <http://dx.doi.org/10.1080/02652048.2019.1623337>
- Fraj, A., Jaafar, F., Marti, M., Coderch, L. & Ladhari, N. (2019) A comparative study of oregano (*Origanum vulgare* L.) essential oil-based polycaprolactone nanocapsules/microspheres; Preparation, Physicochemical characterization, and storage stability. *Industrial Crops and Products*, 140, 111669.
- Govinda, R. M., Mathivanan, T., Elumalai, K., Krishnappa, K. & Anandan, A. (2011). Mosquito larvicidal, ovicidal and repellent properties of botanical extracts against *Anopheles stephensi*, *Aedes aegypti*, and *Culex quinquefasciatus* (Diptera : Culicidae). *Parasitology Research*, 109, 353–367.
- Karr, J. I., Speaker, T. J. & Kasting, G. B. (2012) A novel encapsulation of N,N-diethyl-3-methylbenzamide (DEET) favorably modifies skin absorption while maintaining effective evaporation rates. *Journal of Controlled Release*, 160(3), 502–508.
- Manangan, T. & Shawaphun, S. (2016) Methyl salicylate encapsulation in biodegradable polymer microcapsule. *The Journal of Applied Science*, 15(2): 24–38. <http://dx.doi.org/10.14416/j.japsci.2016.06.002> (in Thai)
- Mark, S., Fradin M. D. & Day J. F. (2002) Comparative efficacy of insect repellents against mosquito bites. *The New England Journal of Medicine*, 347(1), 13–18. <http://dx.doi.org/10.1056/NEJMoa011699>
- Martins, I. M., Rodrigues, S. N., Barreiro, M. F. & Rodrigues, A. E. (2011) Release of thyme oil from polylactide microcapsules. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50, 13752–13761. <http://dx.doi.org/10.1021/ie200791r>
- Martins, I. M., Rodrigues, S. N., Barreiro, M. F. & Rodrigues, A. E. (2012) Release Studies of Thymol and p-Cymene from Polylactide microcapsules. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51, 115565–11571. <http://dx.doi.org/10.1021/ie301406f>
- Martins, I. M. Barreiro, M. F., Coelho M. & Rodrigues A. E. (2014) Microencapsulation of essential oils with biodegradable polymeric carriers for cosmetic applications. *Chemical Engineering Journal*, 245, 191–200. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2014.02.024>
- Matasyoh, J. C., Bendera, M. M., Ogendo, J. O., Omollo, E. O. & Deng, A. L. (2006) Volatile leaf oil constituents of *Ocimum Americanum* L. occurring in western Kenya. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 20(1), 177–180. <http://dx.doi.org/10.4314/bcse.v20i1.21159>
- Miro Specos, M. M., Garcia, J. J., Gutierrez, A. C. & Hermida, L. G. (2017) Application of microencapsulated biopesticides to improve repellent finishing of cotton fabrics. *The Journal of The Textile Institute*, 108, 1454–1460. <http://dx.doi.org/10.1080/00405000.2016.1257345>
- Rodrigues, A. G., de Oliveira Goncalves, P. J. R., Ottoni, C. A., de Cassia Ruiz, R., Morgano, M. A., de Araujo, W. L., et. al. (2019) Functional textiles impregnated with biogenic silver nanoparticles from *Bionectria ochroleuca* and its antimicrobial activity. *Biomedical Microdevices*, 21(56), 1–10. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10544-019-0410-0>
- Sato, S., Gondo, D., Wada, T., Kanehashi, S. & Nagai, K. (2012) Effects of various liquid organic solvents on solvent-induced crystallization of amorphous poly(lactic acid) film. *Journal of Applied Polymer Science*, 1–11. <http://dx.doi.org/10.1002/app.38833>
- Simic, A., Rancic, A., Sokovic, M. D., Ristic, M., Grujic-Jovanovic, S., Vukojevic, J. & Marin, P.D. (2008) Essential oil composition of *Cymbopogon winterianus* and *Carun carvi* and their antimicrobial activities. *Pharmaceutical Biology*, 46(6), 437–441. <http://dx.doi.org/10.1080/13880200802055917>
- Soroh, A., Owen, L., Rahim, N., Masania, J., Abioye, A., Qutachi, O., et. al. (2021) Microemulsification essential oils for the development of antimicrobial and mosquito repellent functional coatings for textiles. *Journal of Applied Microbiology*, 131, 2808–2820. <http://dx.doi.org/10.1111/jam.15157>
- Sousa, V. I., Parente, J. F., Marques, J. F., Forte, M. A. & Tavares, C. J. (2022) Microencapsulation of essential oils: A Review. *Polymers*, 14(1730), 1–42. <http://dx.doi.org/10.3390/polym14091730>
- Suwanayod, S., Sukontason, K. L., Somboon, P., Junkum, A., Leksomboon R., Chaiwong, T., et. al. (2018) Activity of Kaffir lime (*Citrus hystrix*) essential oil against blow flies and house fly. *Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health*, 49(1), 32–45.
- Tavares, M., da Silva, M. R. M., de Siqueira, L. B. D. O., Rodrigues, R. A. S., Bodjolle-d'Almeida, L., dos Santos, E. P., et. al. (2018) Trends in insect repellent formulations: a review. *International Journal of Pharmaceutics*, 539, 190–209. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.01.046>
- Tawatsin, A., Wratten, S. D., Scott, R. R., Thavara, U. & Techadamrongsin, Y. (2001) Repellency of volatile oils from plants against three mosquito vectors. *Journal of Vector Ecology*, 26, 76–82.
- Trongtokit, Y., Rongsriyam, Y., Komalamisra, N. & Apiwathnasorn, C. (2005) Comparative repellency of 38 essential oils against mosquito bites. *Phytotherapy Research*, 19, 303–309. <http://dx.doi.org/10.1002/ptr.1637>
- Vay, K., Scheler, S. & Frieb, W. (2011) Application of Hansen solubility parameters for understanding and prediction of drug distribution in microspheres. *International Journal of Pharmaceutics*, 416, 202–209.
- Virag, L., Bocsi, R. & Petho, D. (2022) Adsorption properties of essential oils on polylactic acid microparticles of different sizes. *Materials*, 15(6602), 1–14. <http://dx.doi.org/10.3390/ma15196602>
- Volic, M. M., Obradovic, N. S., Djordjevic, V. B., Lukovic, N. D., Knezevic-Jugovic, Z. D. & Bugarski, B. M. (2020) Design of biopolymer carriers enriched with natural emulsifiers for improved controlled release of thyme essential oil. *J. Food Sci*, 85, 3833–3842. <http://dx.doi.org/10.1111/1750-3841.15499>
- WHO (2009). *Degue: guidelines for diagnosis, treatment, prevention, and control*. Geneva.
- Wu, Y., Wang, Y., Li, A., Wang, C., Wei, J. Li, X., et. al. (2014) Composition of the essential oil from *Alpinia galanga* rhizome and its bioactivity on *Lasioderma serricorne*. *Bulletin of Insectology*, 67(2), 247–254.

การปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเซลลูโลสจากชานอ้อยและพอลิแลกติกแอซิด โดยใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลเป็นสารยึดต่อสายโซ่โมเลกุล

Enhancement of Bagasse Cellulose-Poly(Lactic Acid) Interaction Using Poly(Ethylene Glycol) Chain Extender

สรินญา ชวพันธ์ และ ธารา มานะงาน*

Sarinya Shawaphun and Thara Manangan*

ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

บทคัดย่อ

เยื่อกากอ้อยเป็นผลพลอยได้ปริมาณมหาศาลในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลทรายในประเทศไทย ซึ่งนอกจากจะปลูกทดแทนได้แล้ว ยังเป็นวัสดุเสริมแรงที่ดีมากสำหรับพลาสติกชีวภาพ เช่น พอลิแลกติกแอซิด เพื่อใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์แตกสลายทางชีวภาพได้สำหรับใส่อาหารอีกด้วย อย่างไรก็ตามการผสมโดยตรงด้วยความร้อนนั้นจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิและแรงดันที่สูงมากเนื่องจากความแตกต่างของขั้วในองค์ประกอบทั้งสอง งานวิจัยนี้พบความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเอทิลีนไกลคอลในระบบพอลิเมอร์หลอมเหลวและระบบการหลอมอัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลา 10 นาที เช่นเดียวกับระบบการหลอมอัดของเยื่อกากอ้อยพอกขาวที่ผ่านกระบวนการเคลือบบางส่วนด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอลและพอลิแลกติกแอซิด นอกจากนี้ยังพบการเสริมแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเซลลูโลสในเยื่อกากอ้อยพอกขาวและพอลิแลกติกแอซิดในวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ เมื่อมีปริมาณ PEG ในช่วง 10-20% โดยน้ำหนักเทียบกับพอลิแลกติกแอซิด และปริมาณเยื่อกากอ้อยพอกขาว 5-10% โดยน้ำหนัก

คำสำคัญ: การแลกเปลี่ยนเอสเทอร์, บรรจุภัณฑ์แตกสลายทางชีวภาพได้, วัสดุเชิงประกอบชีวภาพ, การดัดแปรโครงสร้าง

ABSTRACT

Sugar cane bagasse pulp is one of the most abundant natural cellulose fiber available as by-product from sugar industries of Thailand. The bagasse fiber, not only renewable but also biodegradable, provides a huge potential in reinforcement of bioplastic such as poly(lactic acid) (PLA) to be used for biodegradable food packaging. However, direct biocomposite fabrication using melt mixing process requires high blending temperature and massive amount of torque due to difference in polarity of the two components. In this study, transesterification between PLA and poly(ethylene glycol) (PEG) has been proved possible in both melt-mixing and compression moulding processes at 180 °C for 10 minutes as well as in the compression moulding of bleached bagasse pulp (BBP) partially pre-coated with PEG and PLA. In addition, the obtained copolymer PLA-b-PEG showed high improved of reinforcement in the BBP/PLA/PEG composite when PEG content is 10-20% by weight and BBP content not more than 5-10% were used.

KEYWORDS: transesterification, biodegradable packaging, biocomposite, structural modification

*Corresponding Author: thara.m@sci.kmutnb.ac.th

Received: 25/06/2022; Revised: 21/02/2023; Accepted: 10/04/2023

1. บทนำ

เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากขยะบรรจุภัณฑ์พลาสติกสังเคราะห์จากปิโตรเคมีพลาสติกที่ใช้งานทั่วไป เช่น พอลิโพรพิลีน (poly propylene, PP) และพอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) ซึ่งใช้เวลานานในการย่อยสลาย ผลักดันให้มีการคิดค้นวัสดุทดแทนที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันแต่สามารถย่อยสลายตัวโดยวิธีธรรมชาติได้หรือที่

เรียกว่า “พอลิเมอร์แตกสลายทางชีวภาพได้ (biodegradable polymer)” (Kaplan, 1998; Vroman *et.al*, 2009) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มพอลิเอสเทอร์ที่เป็นพลาสติกชีวภาพชนิดหมุนเวียน (renewable bioplastics) ซึ่งผลิตจากวัตถุดิบจากการเกษตร เช่น พอลิแลกติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) ได้รับความนิยมในเชิงพาณิชย์อย่างมากในปัจจุบันเนื่องจากมีคุณสมบัติทางความร้อน

ใกล้เคียงกับพลาสติก PP และ PE มาก ทำให้ไม่ต้องปรับเปลี่ยนกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์มากนัก อีกทั้งมีความโปร่งใส ทนต่อน้ำและไขมันได้ดี (Garlotta, 2001, Jem *et.al*, 2020) และมีความปลอดภัยสำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สัมผัสอาหาร ได้รับการรับรองเป็น GRAS (Generally Recognized As Safe) โดยสำนักงานอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา (US FDA) (Conn *et.al*, 1995) แต่เนื่องจาก PLA เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semi-crystalline) มีอุณหภูมิหลอม (melting temperature, T_m) อยู่ในช่วง 170–180 °C และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) ที่สูงถึง 50–60 °C จึงทำให้มีความแข็งแต่เปราะ ขาดความยืดหยุ่น บิดงอที่อุณหภูมิต่ำ และขาดความคงสภาพเมื่อรับแรงกระแทก ส่งผลให้ขึ้นรูปเป็นแผ่นหรือฟิล์มบางได้ยาก (Lim *et.al*, 2008) เพื่อช่วยลดข้อจำกัดเหล่านี้ได้มีการศึกษาจำนวนมากเกี่ยวกับการผสม PLA กับสารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer) หลากหลาย เช่น กลุ่มซิเตรตเอสเทอร์ (citrate ester) มาโลเนตเอสเทอร์ (malonate ester) กลุ่มกลีเซอไรด์ (glyceride) และกลุ่มพอลิเอทิลีนไกลคอล (poly(ethylene glycol), PEG) เป็นต้น (Sheth *et.al*, 1997; Martino *et.al*, 2006; Nofar, *et.al*, 2019) พบว่า พอลิเอทิลีนไกลคอล (poly(ethylene glycol), PEG) มีความโดดเด่นและได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถเลือกใช้น้ำหนักโมเลกุลหลากหลายปลอดภัยและมีความเข้ากันได้กับ PLA ไม่มีการแยกกันของวัฏภาคที่ปริมาณของ PEG ไม่เกิน 20% มีผลให้พอลิเมอร์ผสม PLA/PEG มีค่า T_g ลดลงต่ำสุดถึง 19 °C โดยยังคงมี T_m อยู่ในช่วง 150–160 °C ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus, Y-mod) อยู่ในช่วง 500–1600 MPa และมีความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break, E_b) สูงถึงร้อยละ 528 เมื่อใช้ PEG น้ำหนักโมเลกุล 600 g/mol แต่พอลิเมอร์ผสมนี้มีความคงทนต่อแรงดึง (tensile strength, TS) ลดลง (Piorkowska *et. al*, 2006; Shin, *et. al*, 2022; Sirisinha, *et.al*, 2022) ดังนั้นการเสริมแรงด้วยวัสดุธรรมชาติ (bioreinforcement) ด้วยเส้นใยธรรมชาติ เส้นใยเซลลูโลสหลากหลายชนิดถูกนำมาใช้และมีการศึกษาอย่างแพร่หลาย เพื่อให้ได้วัสดุเชิงประกอบของ PLA ที่ยังคงสามารถแตกสลายโดยธรรมชาติได้และมีสมบัติทางเชิงกลเหมาะสำหรับการขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร (Huda *et.al*, 2008; Suryanegara *et.al*, 2009; Graupner *et.al*, 2009; Jonoobi *et.al*, 2010) งานวิจัยนี้เล็งเห็นการนำเส้นใยเซลลูโลสจากเยื่อกากอ้อยฟอกขาว (bleached bagasse

pulp, BBP) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานน้ำตาลที่มีอยู่มากในประเทศไทยมาผสมเพื่อเป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับ PLA/PEG เพื่อขึ้นรูปด้วยการหลอมอัดเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร แต่การนำเส้นใยเซลลูโลสที่มีความเป็นขั้วสูงนั้นมาผสมกับ PLA นั้นทำได้ยากและมีการยึดเหนี่ยวต่ำเนื่องจากความไม่เหมาะสมของสภาพขั้วและลักษณะทางกายภาพของเส้นใยที่มักจับรวมกันเป็นก้อน (Bras *et.al*, 2010; Bledzki *et.al*, 2009) ทำให้เกิดแรงต้านในกระบวนการผสม ความไม่เข้ากันในเนื้อวัสดุเชิงประกอบที่ได้ การกระจายตัวของเส้นใยต่ำ และการเกิดฟองอากาศภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่ได้ (Nakagaito *et.al*, 2009; Okubo *et.al*, 2009) เมื่อพิจารณาโครงสร้างของ PEG จะเห็นว่าหมู่ไฮดรอกซิล (–OH) ที่ปลายสายโซ่ทั้ง 2 ด้าน จึงมีแนวโน้มจะทำปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ (trans-esterification) ระหว่าง PLA กับ PEG ในระหว่างการขึ้นรูปด้วยความร้อน เพื่อให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม PLA-b-PEG ซึ่งมีส่วนของสายโซ่ที่มีขั้วสูงของ PEG ที่ช่วยให้มีแรงยึดเหนี่ยวกับเส้นใยเซลลูโลสในเยื่อกากอ้อยฟอกขาวได้ดียิ่งขึ้นและมีส่วนของสายโซ่ที่มีขั้วต่ำของ PLA ที่จะสามารถช่วยการกระจายตัวของเยื่อในพอลิเมอร์ผสมได้ (Xiao, *et.al*, 2010; Zang *et.al*, 2009) ในเบื้องต้นจะศึกษาความเป็นไปได้และเวลาที่ต้องใช้ให้เกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ในเครื่องผสมระบบปิด (internal mixer) ติดตามและวิเคราะห์ผลผลิตกับด้วยเทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Proton nuclear magnetic resonance spectroscopy, ^1H NMR) ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR) วิเคราะห์ความแตกต่างของพลังงาน (Differential scanning calorimetry, DSC) แล้วนำไปปรับใช้ในระบบการขึ้นรูปด้วยเครื่องหลอมอัดขึ้นรูปพลาสติก (compression moulding) ทั้งที่ผสม BBP ที่อัตราส่วนต่างๆ และไม่ได้ผสม แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกล เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเสริมแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเซลลูโลสจาก BBP และ PLA เพื่อใช้เป็นพื้นฐานของกระบวนการต้นแบบในการเตรียมเม็ดวัสดุเชิงประกอบกับเซลลูโลสอื่นๆ ในระดับอุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์แตกสลายทางชีวภาพได้

2. วิธีการทดลอง

วัสดุ และสารเคมี

เยื่อกากอ้อยฟอกขาว (Bleached bagasse pulp, BBP; Environment Pulp & Paper Co.Ltd. (EPPCO); Thailand), พอลิแลกติกแอซิด; (PLA 2002D; MW 101,000 g/mol, Natureworks LLC; USA) พอลิเอทิลีน ไกลคอล (PEG 4000D; MW 4,000 g/mol Union Chemical 1986 Co.Ltd.; Thailand) เมทานอล ไดคลอโรมีเทนและเอทิลแอลกอฮอล์ (analytical grade, Sigma-Aldrich Co.LLC; USA)

2.1 การศึกษาปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ในระบบพอลิเมอร์หลอมเหลว

เพื่อติดตามความก้าวหน้า หาเวลาที่เหมาะสมและความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการผสม PLA (32.0 g) กับ PEG (8.0 g) ด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Brabender Internal Mixer, Brabender PLASTI-CORDER internal mixer, MELCHERS TECHEXPORT, Germany) ด้วยความเร็วรอบ 50 rpm ที่อุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลา 2, 4, 8 และ 10 นาที มาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนและวิเคราะห์ผลผลิตภัณฑพอลิเมอร์ผสมที่ได้ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ต่อไปนี้

2.1.1 การวิเคราะห์ด้วยโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี

นำผลิตภัณฑ์ที่ตัดและบดละเอียดประมาณ 30 mg มาทำละลายด้วยดิวเทอเรตคลอโรฟอร์ม (deuterated chloroform, CDCl₃) ปริมาตร 4 mL แล้วบันทึกสเปกตรัม ¹H-NMR ด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (Nuclear magnetic resonance spectrometer, Bruker Ascend 400MHz) จำนวน 128 สแกน

2.1.2 การวิเคราะห์ด้วยฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาตัดและบดให้ละเอียด แล้วเติม KBr ลงไปบดรวมให้ละเอียดในอัตราส่วน 1:10 หลังจากอัดเป็นแผ่นบาง (disc) บันทึกสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier-transform infrared spectrometer; Nicolet 6700) ที่ช่วงเลขคลื่น 400–4000 cm⁻¹ จำนวน 16 สแกน

2.1.3 การวิเคราะห์ความแตกต่างของพลังงานซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้หนัก 5–10 mg มาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์ความแตกต่างของพลังงาน (Differential scanning calorimeter, DSC 2910; TA Instruments, Thailand) เริ่มจากอุณหภูมิ 30 °C คงที่เป็นเวลา 5 นาที แล้วเพิ่ม

อุณหภูมิด้วยอัตรา 10 °C/นาที จนถึง 200 °C หลังจากอุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 5 นาทีและให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ให้ความร้อนรอบที่ 2 จากอุณหภูมิ 30 °C จนถึง 200 °C ด้วยอัตรา 10 °C/นาที โดยให้อุณหภูมิคงที่ ที่อุณหภูมิ 30 และ 200 °C เป็นเวลา 5 นาที ก่อนและหลังการให้ความร้อน ทำการวิเคราะห์ผลจากการให้ความร้อนในรอบที่ 2

2.2 การศึกษาปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ในระบบการหลอมอัด

2.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ในระบบการหลอมอัด นำผง PLA ที่บดละเอียด (32.0 g) กับ PEG (8.0 g) มาผสมให้เข้ากันดีแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเครื่องหลอมอัดขึ้นรูปพลาสติก (Compression moulding, LabTec Engineering Company Ltd., Thailand) โดยให้ความร้อนแม่พิมพ์ทั้ง 2 ด้าน ที่อุณหภูมิ 180 °C ความดัน 1500 psi เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์ความแตกต่างของพลังงานและวิเคราะห์เอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ด้วยเทคนิค FTIR และ ¹H NMR spectroscopy

2.2.2 เพื่อศึกษาผลของปริมาณ PEG ต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่เกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ในระบบหลอมอัด โดยนำผง PLA ที่บดละเอียดมาผสมกับ PEG 10, 20, 43 และ 50% โดยน้ำหนักเทียบกับ PLA มาให้ความร้อนด้วยเครื่องหลอมอัดขึ้นรูปพลาสติกภายใต้สภาวะเดียวกันกับข้างต้น แล้วนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนและทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องวัดความต้านทานต่อการยืดดึง (Universal testing machine, Tensile H5K-T; Calserve, Thailand) ภายใต้สภาวะทดสอบมาตรฐาน ASTM D882 จากตัวอย่างอย่างน้อย 5 ชิ้นงาน ที่มีขนาดกว้าง x ยาว (13cm x 2cm) ใช้แรงดึง (load range) 500 N ความเร็ว 2 mm/นาที และความยาวพิสัย 90 mm

2.3 การศึกษาปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ในระบบการหลอมอัดเมื่อผสมเยื่อกากอ้อยฟอกขาว

เพื่อให้เกิดการผสมกันเส้นใยเยื่อกากอ้อยฟอกขาวกับ PLA และ PEG จึงต้องผ่านกระบวนการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดก่อน โดยตัวอย่างกระบวนการเตรียมของผสมเยื่อกากอ้อยฟอกขาว BBP20% กับ PEG 20% เทียบกับ PLA ดังนี้ นำ BBP หนัก 7.5 g มาปั่นจนให้กระจายตัวในน้ำกลั่น 250 mL ด้วยเครื่องกวนผสมสาร (overhead stirrer) เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปบดย่อย

ต่อด้วยเครื่องบอลลมิล (ball mill) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้เยื่อแยกออกเป็นเส้นใยเดี่ยวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 20 μm และความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 112 μm (วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ Meiji MT4300L, Japan ที่กำลังขยาย 400 เท่า) จากนั้นถ้ายลงในอ่างสแตนเลสขนาด 1 L และกวนด้วยเครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อนตลอดเวลา แล้วเติมสารละลาย PEG หนัก 7.5 g ในเมทานอล 250 mL อย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมเมทานอล 100 mL เพิ่มความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 60 $^{\circ}\text{C}$ จึงเติมสารละลาย PLA หนัก 30.0 g ในไดคลอโรมีเทน 500 mL อย่างช้า ๆ จนหมด กวนและให้ความร้อนต่อเนื่องจนปริมาตรของผสมลดลงครึ่งหนึ่ง จึงเทของผสมทั้งหมดลงในถาดระเหยสแตนเลส เกลี่ยให้บางสม่ำเสมอแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่ ก่อนนำมาศึกษาปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ในขณะขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเครื่องหลอมอัดขึ้นรูปพลาสติก ภายใต้สภาวะเดียวกันกับข้างต้น นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และแบ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ หนัก 3 g นำไปสกัดแบบต่อเนื่อง (Sohxlet extraction) ด้วยไดคลอโรมีเทนเป็นเวลา 3 ชั่วโมงและระเหยตัวทำละลายออกก่อน จึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR และ ^1H NMR spectroscopy เช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ข้างต้น

2.4 การศึกษาผลของอัตราส่วน PEG/PLA ต่อการเสริมแรงยึดเหนี่ยวกับ BBP

เตรียมของผสมเยื่อกากอ้อยฟอกขาวที่มี BBP คงที่ 20% กับ PEG และ PLA ตามวิธีที่นำเสนอเป็นตัวอย่างไว้ข้างต้น แต่กำหนดให้มี PEG 10, 20, 43 และ 50% โดยน้ำหนักเทียบกับ PLA (หรือคิดเป็นอัตราส่วน BBP:PEG เท่ากับ 1:0.5, 1:1, 1:2.25 และ 1:2.5) นำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นบางเครื่องหลอมอัดขึ้นรูปพลาสติกแล้ววิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนและทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องวัดความต้านทานต่อการยืดดึง ภายใต้สภาวะทดสอบมาตรฐาน ASTM D882 เช่นเดียวกันกับข้างต้น

2.5 การศึกษาผลของอัตราส่วนของ BBP ต่อการเสริมแรงยึดเหนี่ยวกับ PLA-b-PEG

เตรียมของผสมเยื่อกากอ้อยฟอกขาวกับ PEG และ PLA ตามวิธีที่นำเสนอไว้ข้างต้นที่มีปริมาณ BBP 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35% แต่กำหนดให้มี PEG คงที่ที่ 43% โดยน้ำหนักเทียบกับ PLA (ซึ่งมากกว่า BBP ในทุกอัตราส่วน) แล้วนำไปกีดอัดความร้อนด้วยเครื่องหลอม

อัดขึ้นรูปพลาสติก วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน และการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องวัดความต้านทานต่อการยืดดึงภายใต้สภาวะเดียวกันที่กล่าวไว้ข้างต้น

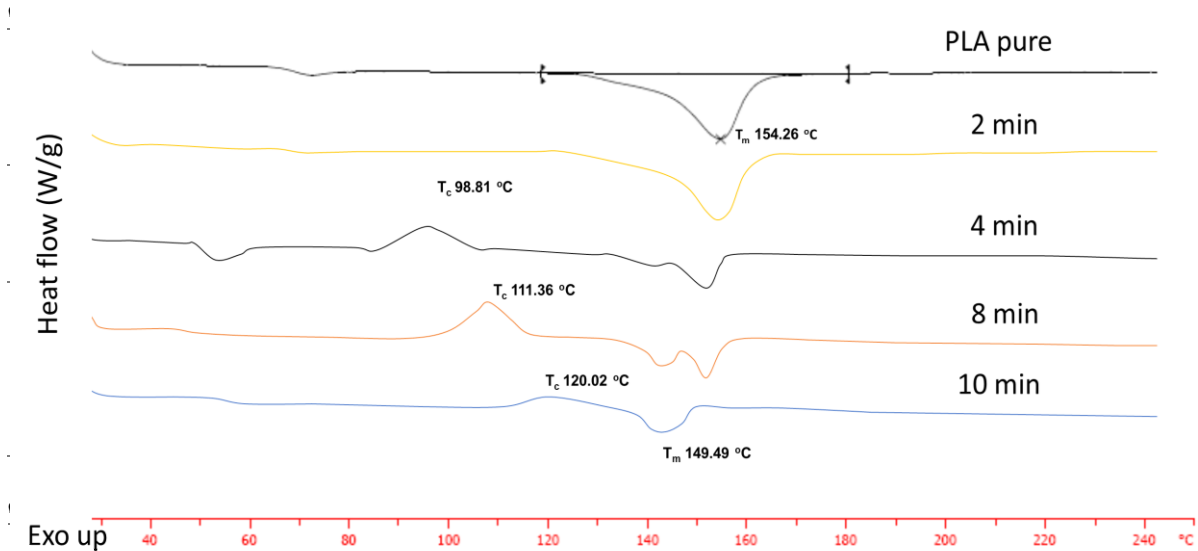
3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ผลการศึกษาสภาวะของปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ในระบบพอลิเมอร์หลอมเหลว

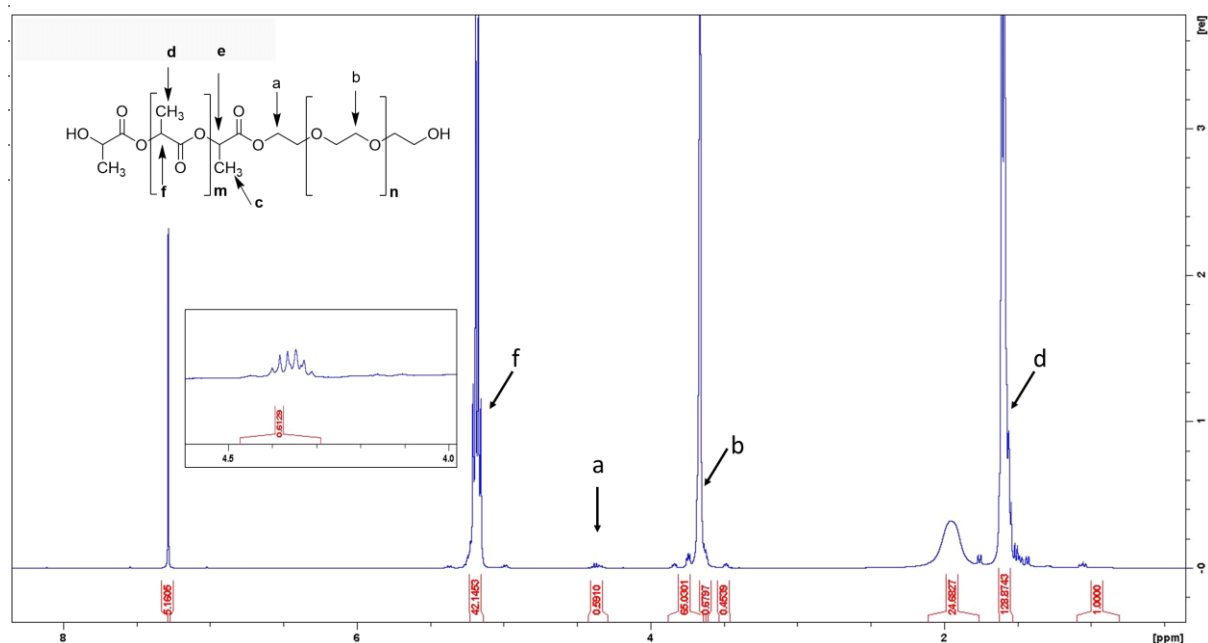
ผลการศึกษาและติดตามความก้าวหน้าปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ระหว่าง PLA กับ PEG 20% โดยน้ำหนัก ในระบบพอลิเมอร์หลอมเหลวด้วยเครื่องผสมระบบปิด ที่อุณหภูมิ 180 $^{\circ}\text{C}$ ที่เวลา 2, 4, 8 และ 10 นาที ตามลำดับ เทียบกับ PLA บริสุทธิ์ พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ได้มี T_m ลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น จนถึงเวลา 10 นาที ไม่พบผลึกดั้งเดิมของ PLA ที่ $T_m = 154^{\circ}\text{C}$ อยู่เลย แต่ปรากฏผลึกชนิดใหม่ทั้งหมดที่ $T_m = 149^{\circ}\text{C}$ แทน ดังรูปที่ 1 นอกจากนี้อุณหภูมิการเกิดผลึกขณะเย็นตัว (cool crystallization temperature, T_c) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป สเปกตรัม ^1H NMR ของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ ณ เวลา 10 นาทีนี้ บ่งชี้การเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็น PEG-b-PLA ปรากฏพีคที่เคมีคัลชิฟท์ 4.36 ppm แสดงถึงหมู่ $-\text{CH}_2-\text{O}-$ ในพันธะเอสเทอร์ที่เกิดใหม่ ดังรูปที่ 2 สอดคล้องกับรายงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่สังเคราะห์ PEG-b-PLA ด้วยวิธีการเปิดวงแลคไทด์ด้วย PEG (Xu, et. al., 2016) และการใช้ตัวเร่งในปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ในเครื่องผสมระบบปิด (Sirisinha, et. al., 2022) เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR spectroscopy พบพีคการสั่นของพันธะเอสเทอร์ ($\text{C}=\text{O}$ stretching) ในส่วนของ PLA ที่เลขคลื่น 1760 cm^{-1} และพีคการสั่นของพันธะเอสเทอร์ ($\text{C}=\text{O}$ stretching) ของ PEG-b-PLA ที่เลขคลื่น 1714 cm^{-1} ดังรูปที่ 3

3.2 ผลการศึกษาปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ในระบบการหลอมอัด

3.2.1 ผลการศึกษาปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ในระบบหลอมอัดด้วยเครื่องหลอมอัดขึ้นรูปพลาสติก ที่อุณหภูมิ 180 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที เช่นเดียวกับในระบบพอลิเมอร์หลอมเหลว โดยใช้ PEG 20% (20%PEG/PLA) เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ^1H NMR spectroscopy ก็สามารถเห็นพีคที่เคมีคัลชิฟท์ 4.36 ppm ของหมู่ $-\text{CH}_2-\text{O}-$ ในพันธะเอสเทอร์ที่เกิดใหม่ของ



รูปที่ 1 แสดงความก้าวหน้าของปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ในระบบพอลิเมอร์หลอมเหลว



รูปที่ 2 สเปกตรัม ^1H NMR ของผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ในระบบพอลิเมอร์หลอมเหลว

PEG-b-PLA เช่นเดียวกัน ดังแสดงในเปรียบเทียบในรูปที่ 4A แต่สเปกตรัม FTIR เห็นการเปลี่ยนแปลงของพีดคาร์บอนิลที่เลขคลื่นลดลงเล็กน้อย และเมื่อใช้เยื่อกากอ้อยฟอกขาวที่ผ่านกระบวนการเคลือบด้วย 20 % PEG/PLA ซึ่งมี BBP อยู่ 20 % (20 % BBP/20 % PEG/PLA) มาทำปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ระบบหลอมอัดด้วยเครื่องหลอมอัดขึ้นรูปพลาสติกภายใต้สภาวะเดียวกัน แล้วนำไปสกัดแบบต่อเนื่องและวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ^1H NMR spectroscopy ก็ยืนยันการเกิดพันธะเอสเทอร์ใหม่ของ PEG-b-PLA เช่นเดียวกัน ที่เคมีคัลชิฟท์ 4.36 ppm ดังแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 4A และรูปที่ 4B

3.2.2 ผลของอัตราส่วน PEG ต่อการเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์และสมบัติเชิงกลวัสดุพอลิเมอร์ผสมในระบบหลอมอัด ที่อุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลา 10 นาที เช่นเดียวกันกับข้างต้น พบว่า ภายใต้สภาวะนี้ PLA บริสุทธิ์ มี $Y\text{-mod} = 380 \text{ MPa}$ แต่ $\%E_b = 9.08 \%$ จึงมีลักษณะแข็งแต่เปราะ เมื่อผสมกับ PEG 20% โดยน้ำหนัก เพื่อให้เกิด PEG-b-PLA ขึ้นในแผ่นวัสดุพอลิเมอร์ผสม ทำให้ค่าความยืดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นกว่า 10 เท่า โดยที่ $Y\text{-mod}$ และ TS ลดลงครึ่งหนึ่ง ดังรูปที่ 5 และเมื่อเพิ่มปริมาณ PEG มากขึ้นอีกจะทำให้ความต้านทานแรงดึงลดต่ำลงอย่างมาก จนแทบไม่สามารถขึ้นรูปได้ที่ PEG 50% ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยก่อนหน้านี้

(Maglio, et.al, 2003; Shin, et. al., 2022; Sirisinha, et. al., 2022)

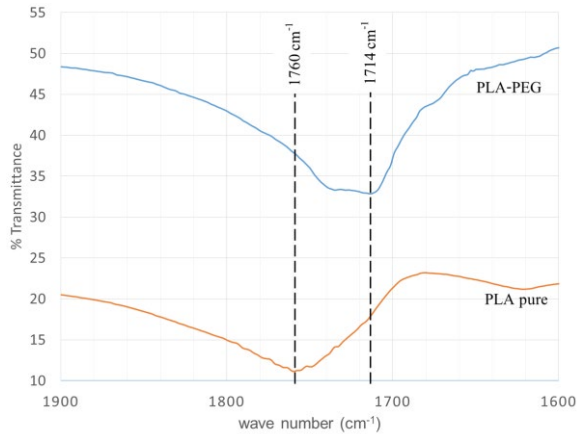
3.3 ผลการศึกษาปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ในระบบการหลอมอัดเมื่อผสมเยื่อกากอ้อยฟอกขาว

จากการทดลอง เมื่อกำหนดให้ แผ่นวัสดุที่มี BBP 20% แล้วเพิ่มปริมาณ PEG ขึ้นเรื่อยๆ พบว่า เมื่อใช้ PEG 10% ซึ่งน้อยกว่า BBP นั้นไม่สามารถหลอมอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นได้สมบูรณ์ เพราะ PEG ไม่เพียงพอที่จะเคลือบ BBP แต่เมื่ออัตราส่วน BBP: PEG เท่ากับ 1:1 (20% PEG/PLA) ขึ้นไป จะสามารถหลอมอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นได้จนถึงอัตราส่วน PEG:BBP เท่ากับ 1:2.5 (50% PEG/PLA) ดังรูปที่ 6 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า BBP จะทำให้แผ่นวัสดุเชิงประกอบที่ได้มีลักษณะแข็งตึงมากกว่าวัสดุพอลิเมอร์ผสม 20%PEG/PLA ที่ปราศจาก BBP ภายใตสภาวะเดียวกัน โดยที่ Y-mod สูงกว่าถึง 80% และมี TS คงที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ %E₀ ลดลงอย่างมาก ซึ่งเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้นระหว่างเส้นใย BBP และ PLA นั้นเอง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ PEG มากกว่าปริมาณ BBP จะมีผลทำให้ค่า Y-mod และ TS ลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่ %E₀ เพิ่มขึ้น ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน BBP:PEG ต้องมีปริมาณพอๆ กัน คือ ประมาณ 1:1 เมื่อติดตามผลการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์จากการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงความร้อน พบว่าวัสดุพอลิเมอร์ผสม 43%PEG/PLA ที่ได้จากระบบหลอมอัดขึ้นรูป ปรากฏทั้งพีค T_m ของ PEG ที่ 56.17 °C และพีค T_m ของ PLA ที่ตำแหน่ง 153.56 °C ซึ่งมีร้อยละความเป็นผลึก (percent crystallinity, %X_c) เท่ากับ 0.305% ซึ่งมากกว่าใน PLA บริสุทธิ์ เพราะ PEG-b-PLA ที่เกิดขึ้นและ PEG เหลืออยู่ทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพพลาสติก จึงทำให้สายโซ่เกิดการเคลื่อนที่ได้ดีและสามารถจัดเรียงตัวใหม่ได้ และการที่ปรากฏพีค T_m ของ PEG อยู่ แสดงว่ามี PEG มากเกินไป แต่เมื่อมี BBP ผสมเข้าไปในอัตราส่วน BBP:PEG 1:1.0 ไปจนถึง 1:2.25 ไม่ปรากฏพีค T_m ของ PEG ดังแสดงในตารางที่ 1 แต่ปรากฏอีกครั้งที่อัตราส่วน 1:2.50 หรือ 20%BBP/50%PEG/PLA

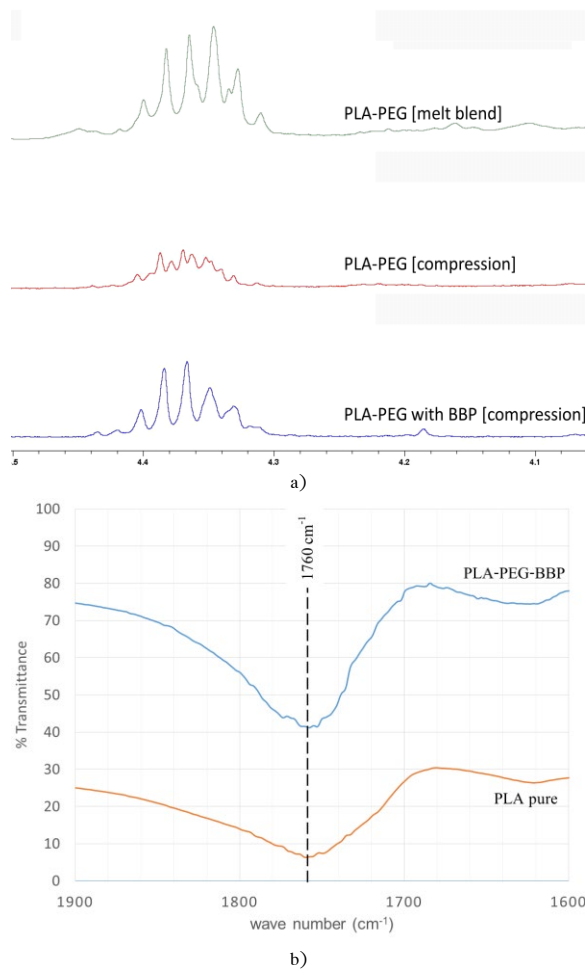
3.4 ผลของอัตราส่วนของ BBP ต่อการแรงยึดเหนี่ยวกับ PLA-b-PEG

เพื่อจะทดสอบหาปริมาณ BBP สูงสุดที่สามารถนำมาผสมหลอมอัดขึ้นรูปได้ จึงกำหนดให้ใช้ PEG ปริมาณคงที่ที่ 43% และมีปริมาณ BBP 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35% แล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องหลอมอัดขึ้นรูปพลาสติก ภายใตสภาวะเดียวกันกับข้างต้น เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของแผ่นวัสดุมีปริมาณ PEG คงที่ที่ 43% พบว่า

ปริมาณ BBP ที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า Y-mod เพิ่มขึ้นอย่างมากจากเดิม 82MPa ไปเป็น 255 MPa และเพิ่ม TS เพิ่มขึ้นจากเดิม 7.1 MPa ไปเป็น 11-15 MPa ในขณะที่ %E₀ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญตั้ง BBP 5% แรก เดิม 93.5% เหลือเพียง 6-8% ดังรูปที่ 7 ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของ PEG ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์เหลืออยู่ปริมาณมากเกินไป เมื่อเทียบกับ PLA ที่เหลืออยู่ในแผ่นวัสดุ สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 2 แผ่นวัสดุที่มี BBP 5, 10 และ 20% ไม่ปรากฏพีค T_m ของ PEG อยู่เลย แต่เกิดผลึก PLA ขึ้นรูปแบบใหม่ที่มี T_m เท่ากับ 133 °C และรูปแบบเดิมที่ T_m เท่ากับ 148 °C ซึ่งเป็นผลึกรูปแบบที่ 2 ของ PLA ซึ่งไม่ใช่ผลึกของ PLA บริสุทธิ์ตั้งต้น T_m = 154 °C จากนั้นนอกจากนี้ยังพบว่า %X_c ที่เพิ่มสูงขึ้นย่อมส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงโดยดูจาก Y-mod และ



รูปที่ 3 สเปกตรัม FTIR ของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ในระบบพอลิเมอร์หลอมเหลว

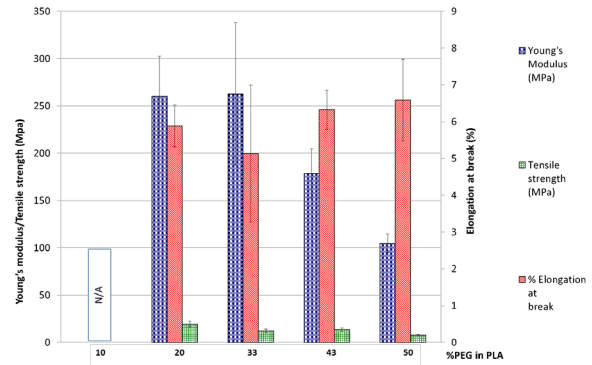


รูปที่ 4 สเปกตรัม ^1H NMR และ FTIR ของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ในระบบหลอมอัด a) สเปกตรัม ^1H NMR ของ PLA-PEG จากระบบต่าง ๆ b) สเปกตรัม FTIR ของ PLA-PEG-BBP เทียบกับ PLA

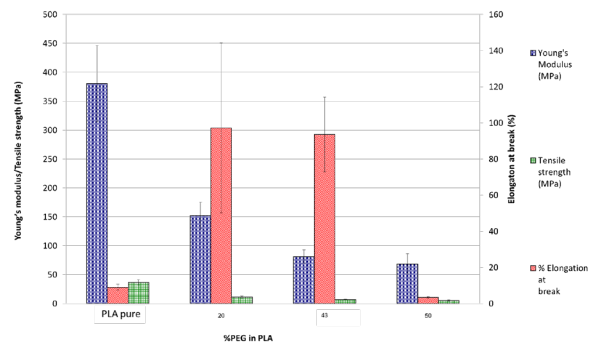
TS เพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มี BBP จนถึงปริมาณ BBP 35%

4. สรุปผลการทดลอง

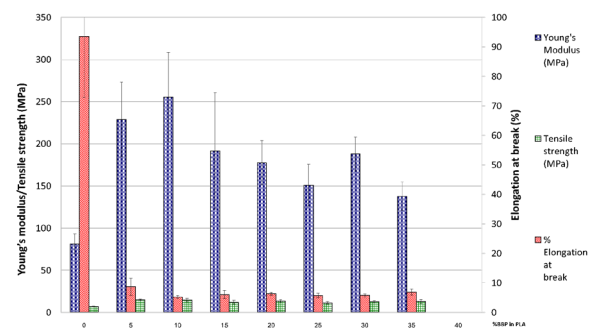
จากการศึกษาปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ของ PLA กับ PEG ทั้งในระบบพอลิเมอร์หลอมเหลวและ



รูปที่ 5 สมบัติเชิงกลของแผ่นวัสดุพอลิเมอร์ผสม PEG/PLA ที่มีปริมาณ PEG ต่างกัน



รูปที่ 6 สมบัติเชิงกลของแผ่นวัสดุเชิงประกอบ 20%BBP/PEG/PLA ที่มีปริมาณ PEG ต่างกัน



รูปที่ 7 ผลของปริมาณ BBP ต่อความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณ PEG คงที่ที่ 43%

ในระบบหลอมอัด ที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 10 นาที ก่อให้เกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นพอลิเมอร์รวมแบบกลุ่ม PEG-b-PLA ที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวลดลงและมีความเปราะลดลง และเมื่อผสมกับเส้นใย BBP ในผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยการหลอมอัดขึ้นรูป พบว่า อัตราส่วน BBP: PEG และ BBP:PLA ที่สามารถทำให้เกิดการขึ้นรูปได้จะต้องมีค่าอย่างน้อย 1:1 และ 1:3 ตามลำดับ จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ BBP/PEG/PLA ที่เกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ได้ดีจะมีอัตราส่วน BBP:PEG:PLA ที่ 0.5:2:4 และให้การเสริมแรงสูงที่สุด ปริมาณ BBP 5 - 10% และ PEG 10-20% ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า PEG-b-PLA เป็นตัวแปรหลักในการประสาน PLA เข้ากับ BBP ที่มีสภาพขั้วสูง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิทยาศาสตร์
ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร
เหนือ ประจำปีงบประมาณ 2556 และความอนุเคราะห์
เยื่อกากอ้อยฟอกขาวจากบริษัท Environment Pulp &
Paper Co.Ltd (EPPCO) อ. ตาคี จ. นครสวรรค์

เอกสารอ้างอิง

- Bledzki, A.K. Jazkiewicz, A. & Scherzer, D. (2009) Mechanical properties of PLA composites with man-made cellulose and abaca fibres, *Composites: Part A*, 40, 404–412.
- Bras, J., Hassan, M.L., Bruzesse, C., Hassan E.A., El-Wakil N.A. & Dufresne, A. (2010) Mechanical, barrier, and biodegradability properties of bagasse cellulose whiskers reinforced natural rubber nanocomposites, *Industrial Crops and Products*, 32, 627–633.
- Conn, R.E., Kolstad, J.J. Borzelleca, J.F. Dixler, D.S. Filer, L.J. Ladu, B.N. et.al. (1995) Safety assessment of polylactide (PLA) for use as a food-contact polymer, *Food and Chemical Toxicology*, 33(4), 273–283. [https://doi.org/10.1016/0278-6915\(94\)00145-E](https://doi.org/10.1016/0278-6915(94)00145-E).
- Garlotta, D. A (2001) Literature Review of Poly(Lactic Acid). *Journal of Polymers and the Environment* 9, 63–84. <https://doi.org/10.1023/A:1020200822435>
- Graupner, N., Herrmann, A.S. & Mussig, J. (2009) Natural and man-made cellulose fibre-reinforced poly(lactic acid) (PLA) composites: An overview about mechanical characteristics and application areas, *Composites: Part A*, 40, 810–821.
- Huda, M.S., Drzal, L.T., Mohanty A.K. & Misra, M. (2008) Effect of fiber surface-treatments on the properties of laminated biocomposites from poly(lactic acid) (PLA) and kenaf fibers, *Composites Science and Technology*, 68, 424–432.
- Jem, K.J. & Tan, B., (2020). The development and challenges of poly (lactic acid) and poly (glycolic acid), *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3 (2), 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.01.002>.
- Jonoobi M., Harun, J., Mathew, A.P. & Oksman, K. (2010) Mechanical properties of cellulose nanofiber (CNF) reinforced polylactic acid (PLA) prepared by twin screw extrusion”, *Composite Science and Technology*, 70, 1742–1747.
- Kaplan, D.L. (1998) *Biopolymers from renewable resources*, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.
- Lim, L.-T., Auras, R. & Rubino, M. (2008) Processing technologies for poly(lactic acid), *Progress in Polymer Science*, 33, 820–852.
- Maglio, G., Migliozi, A., & Palumbo, R. (2003). Thermal properties of di- and triblock copolymers of poly(l-lactide) with poly(oxyethylene) or poly(ε-caprolactone). *Polymer*, 44, 369–375.
- Martino, V.P., Ruseckaite, R.A. & Jiménez, A. (2006). Thermal and mechanical characterization of plasticized poly (L-lactide-co-D,L-lactide) films for food packaging. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 86(3), 707–712. <https://doi.org/10.1007/s10973-006-7897-3>
- Nakagaito, A.N. Fujimura, A. Sakai, T. Hama Y. & Yano, H. (2009) Production of microfibrillated cellulose (MFC)-reinforced polylactic acid (PLA) nanocomposites from sheets obtained by a papermaking-like process, *Composites Science and Technology*, 69, 1293–1297.
- Nofar, M., Sacligil, D., Carreau, P. J., Kamal, M. R., & Heuzey, M. C. (2019) Poly (lactic acid) blends: Processing, properties and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 125, 307–360. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.002>
- Okubo, K., Fujii T. & Thostenson, E.T. (2009) Multi-scale hybrid biocomposite: Processing and mechanical characterization of bamboo fiber reinforced PLA with microfibrillated cellulose, *Composites: Part A*, 40, 469–475.
- Piorkowska E., Kulinski Z., Galeski A. & Masirek R., (2006), Plasticization of semicrystalline poly(l-lactide) with poly(propylene glycol), *Polymer*, 47(20), 7178–7188. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.03.115>.
- Sheth, M., Kumar, R.A., Davé, V., Gross, R. A. & McCarthy, S.P. (1997) Biodegradable polymer blends of poly(lactic acid) and poly(ethylene glycol) *Journal of Applied Polymer Science*, 66 (8) 1495–1505.
- Shin, H., Thanakkasaranee, S., Sadeghi, K. & Seo, J., (2022) Preparation and characterization of ductile PLA/PEG blend films for eco-friendly flexible packaging application, *Food Packaging and Shelf Life*, 34, 100966–100975. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100966>.
- Sirsinha K., Wirasate S., Sirsinha C. & Wattanakrai N., (2022) One-Pot Reactive Melt Recycling of PLA Post-Consumer Waste for the Production of Block Copolymer Nanocomposites of High Strength and Ductility, *Polymers* 2022, 14(17), 3642–3654. <https://doi.org/10.3390/polym14173642>
- Suryanegara, L., Nakagaito, A.N. & Yano, H. (2009) The effect of crystallization of PLA on the thermal and mechanical properties of microfibrillated cellulose-reinforced PLA-composites, *Composites Science and Technology*, 69, 1187–1192.
- Vroman, I. & Tighzert, L (2009) Biodegradable Polymers, *Materials*, 2, 307–344. <https://doi.org/10.3390/ma2020307>
- Xiao, R. Z., Zeng, Z. W., Zhou, G. L., Wang, J. J., Li, F. Z., & Wang, A. M. (2010). Recent advances in PEG-PLA block copolymer nanoparticles. *International Journal of Nanomedicine*, 5, 1057–1065. <https://doi.org/10.2147/IJN.S14912>
- Xu, G., Chen, S., Yan, X., Yang, C. & Chen, Z. (2016). Synthesis and Hydrophilic Performance of Poly(Lactic Acid)-Poly(Ethylene Glycol) Block Copolymers. *American Journal of Analytical Chemistry*, 7, 299–305. <http://doi.org/10.4236/ajac.2016.73028>.
- Zang, H., Xia, H., Wang, J. & Li, Y. (2009). High intensity focused ultrasound-responsive release behavior of PLA-b-PEG, *Journal of Controlled Release*, 139, 31–39.

การพัฒนา High-Altitude Balloon Platform สำหรับการศึกษา ทดลอง และวิจัย ทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์

Development of High-Altitude Balloon Platform for Education, Experiment and Research in Science, Technology and Engineering

กัมวิชญ์ สุทธิกาญจน์¹, ศรีวัฒน์ ชิวปรีชา^{1*}, ฐิตพันธ์ จงสงสาร², อัครพล ตรีรัตน์¹

Pemmavit Sutthikarn¹, Sorawat Chivapreecha^{1*}, Thitaphan Jongsataporn², Akraphon Trirat¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

²ภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

¹Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

²Industrial Physics and Medical Instrumentation, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาและนำเสนอแนวทางการพัฒนาแพลตฟอร์มบอลลูนระดับสูง (High-altitude balloon platform) เพื่อการศึกษาทดลองวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีรวมทั้งทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ ที่มีความจำเป็นต้องทำการทดลองในชั้นบรรยากาศที่สูงขึ้นไประดับสตราโตสเฟียร์ หรือสภาพการจำลองระยะทางที่สูงใกล้เคียงอวกาศ ทั้งการทดลองหรือตรวจวัดปริมาณทางกายภาพต่าง ๆ ในด้านฟิสิกส์บนชั้นบรรยากาศระดับที่สูง ซึ่งรวมถึงงานทางด้านตรวจวัดสำหรับอุตุนิยมวิทยา โดยโครงสร้างของแพลตฟอร์มที่สำคัญจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ 1) การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับบอลลูนสำหรับวางแผนภารกิจ เช่น ความสามารถในการแบกรับเพย์โหลดสำหรับการทดลองขึ้นไปทำการทำทดสอบ เรื่องของแรงยกตัว (lifting force) ระยะเวลาที่ใช้ในการลอยตัวสำหรับปฏิบัติการกิจ ความเร็วในการลอยขึ้น (Ascent rate) เป็นต้น รวมไปถึงการออกแบบร่มชูชีพสำหรับการนำเพย์โหลดทั้งหมดกลับลงสู่พื้นโลกหลังเสร็จสิ้นภารกิจ 2) ระบบติดตามตำแหน่งพิกัดของบอลลูนและระบบการสื่อสาร ที่ทำหน้าที่ส่งค่าพิกัดเพื่อการติดตามและข้อมูลตรวจวัดที่จำเป็นอื่น ๆ ทั้งนี้เพื่อติดตามตำแหน่งการเดินทางของบอลลูนในขณะปฏิบัติการกิจ รวมไปถึงการเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้งและการเคลื่อนตัวของระยะกระจัดตามแนวราบอันเกิดจากทิศทางและกระแสลม ทั้งนี้เพื่อภารกิจการตามเก็บกู้ โดยองค์ความรู้ที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับการกำหนดภารกิจและทดสอบด้วยแพลตฟอร์มบอลลูนระดับสูงจะได้ถูกอธิบายในบทความนี้ พร้อมทั้งการดำเนินการทดลองบางส่วนกับการใช้แพลตฟอร์มบอลลูนระดับสูงเพื่อการทดสอบต้นแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียมคิวบัสแซทขนาดเล็ก 1U (KMUTL-CubeSat) ให้ได้เห็นภาพของการนำไปประยุกต์ใช้งานกับการทดลอง เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์กับการทดสอบในงานและภารกิจทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ในด้านอื่น ๆ ต่อไป

คำสำคัญ: แพลตฟอร์มบอลลูนระดับสูง, ระบบติดตามตำแหน่งพิกัด, การวางแผนภารกิจ, ร่มชูชีพ, ดาวเทียมคิวบัสแซท

ABSTRACT

This paper presents a study and development of high-altitude balloon platform for education, experiment and research in science, technology and engineering where it is necessary to conduct the experiments in the atmosphere above stratosphere. Moreover, the high distance can also be used to simulate near space conditions, used in experiments or measurements of various physical quantities in high-level atmospheric physics including use in the measurement for meteorology. The platform consists of 2 major parts: 1) Calculations involving balloon for mission planning such as ability to carry payloads for testing, lifting force, total time the balloon can stay afloat for the mission, ascent rate, etc. It also includes designing a parachute for bringing all payloads back to Earth after complete a mission. 2) Balloon coordinate tracking system and communication system which serves to transmit coordinates for tracking and other necessary measurement data to the ground. This is to keep track of the balloon's travel position during the mission, including the vertical displacement and the horizontal displacement caused by wind current/direction, and also used to track the last stop for recovery mission. The main contribution and relevant knowledge for the mission that use high-altitude balloon platform for testing will be explained in this paper. Along with conducting some experiments on the use of a high-altitude balloon platform to test engineering

prototype of the 1U CubeSat (KMITL-CubeSat), we can visualize its application to the KMITL-CubeSat and also apply to other tests in the work and mission of science, technology and engineering in other areas further.

KEYWORDS: high-altitude balloons, autonomous tracking, mission operation, parachute, CubeSat

*Corresponding Author: sorawat.ch@kmitl.ac.th

Received: 30/03/2021; Revised: 31/08/2022; Accepted: 07/11/2022

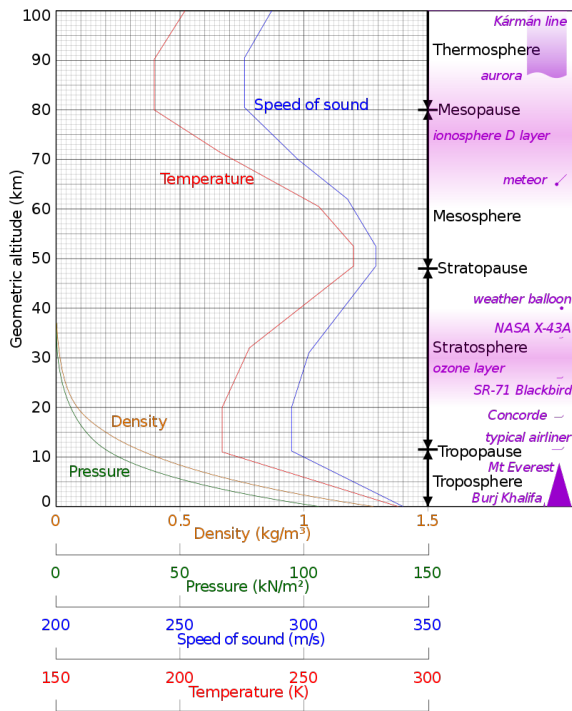
1. บทนำ

ในปัจจุบันงานที่ต้องใช้ high-altitude balloon อยู่สม่ำเสมอในทุก ๆ วัน คืองานทางด้านอุตุนิยมวิทยา ซึ่งใช้อุปกรณ์วิทยุห้วงอากาศ (Radiosonde) ผูกติดขึ้นไปกับบอลลูนตรวจอากาศ เพื่อวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นในอากาศรวมถึงทิศทางลม แต่กระนั้นบอลลูนตรวจอากาศส่วนมากจะถูกปล่อยทิ้ง มุ่งเน้นรับสัญญาณข้อมูลในช่วงขณะที่บอลลูนยังคงลอยตัวอยู่ ซึ่ง High-Altitude Platform ที่กำลังจะได้กล่าวต่อไป นี้มีความยืดหยุ่นในการใช้งานมากกว่านั้น กล่าวคือ นอกจากจะสามารถรับข้อมูลที่ส่งมาได้ในพื้นที่เหมือนกับวิทยุห้วงอากาศทั่วไปแล้วยังสามารถบันทึกข้อมูลเก็บไว้ได้ในกรณีที่ข้อมูลขนาดมีใหญ่ ซึ่งไม่สามารถส่งออกอากาศได้ในทันทีทันใด โดยออกแบบเพย์โหลดที่มีไมโครโปรเซสเซอร์พร้อมเซนเซอร์ตรวจวัด อีกทั้งยังมีระบบติดตามตำแหน่งพิกัดตลอดภารกิจ เพื่อการเฝ้าติดตามเก็บกู้และนำเพย์โหลดกลับมาใช้งานได้ใหม่ ทั้งในแง่การใช้ซ้ำหรือการนำข้อมูลที่บันทึกไว้มาวิเคราะห์ในภายหลัง ทั้งนี้เรื่องการวางแผนภารกิจซึ่งจะต้องเตรียมบอลลูนทั้งในแง่ของขนาดและปริมาณก๊าซฮีเลียมที่จะบรรจุ นำหนักเพย์โหลดที่จะผูกติดขึ้นไป ระยะเวลาในการดำเนินการทั้งหมด รวมถึงขนาดของร่มชูชีพและความเร็วขาลงเพื่อนำเพย์โหลดทั้งหมดกลับลงสู่พื้นโลกอย่างปลอดภัย รายละเอียดเหล่านี้เป็นองค์ความรู้และสิ่งที่จะต้องมีการคำนวณเพื่อการเตรียมใช้งาน High-Altitude Platform ดังกล่าว ซึ่งรวมไปถึงการพยากรณ์ถึงตำแหน่งตกจากจุดปล่อยโดยอาศัยข้อมูลลม (Mohamed *et al.*, 2007; Larson *et al.*, 2009) ที่ประกอบด้วยความเร็วและทิศทางลม เป็นสิ่งที่ช่วยให้การทำการกิจสำเร็จลุล่วงรวมทั้งชุดอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งพิกัดและสื่อสารข้อมูลตำแหน่ง ซึ่งอาจมีข้อมูลที่เป็นอื่น ๆ เป็นส่วนประกอบ (Margarita *et al.*, 2016) ด้วยการใช้ช่องสื่อสารบนโครงข่ายวิทยุสมัครเล่นในระบบ APRS (Automatic Packet Reporting System) ซึ่งเป็นการติดตามตำแหน่งจริง ณ เวลาจริงก็เป็นอีกหนึ่งเครื่องมือที่สำคัญในการปฏิบัติการ high-altitude balloon

นอกเหนือจากการใช้งาน high-altitude balloon กับงานทางด้านอุตุนิยมวิทยาและการทดลองทางวิทยาศาสตร์แล้ว (Jordan *et al.*, 2019) ทางทีมของผู้ศึกษาเองยังเคยได้มีโอกาสและประสบการณ์ตรงกับการนำไปทดสอบกับต้นแบบทางวิศวกรรมของดาวเทียม KMITL-CubeSat (Chanatip *et al.*, 2016; Pirada *et al.*, 2016; Pemmavit *et al.*, 2016; Pirada *et al.*, 2018; Pirada *et al.*, 2020; Trongsom *et al.*, 2020) ซึ่งทุก ๆ เทียบวินของการปล่อยบอลลูนจำเป็นต้องวางแผนภารกิจ คำนวณน้ำหนักรวมของเพย์โหลดทั้งหมด ปริมาณก๊าซที่ต้องใช้ประจำบอลลูน และขนาดของร่มชูชีพที่ใช้สำหรับขาลง (Nock *et al.*, 2007; Warayut *et al.*, 2009) รวมไปถึงการพยากรณ์เส้นทางการบินจนถึงจุดตก ด้วยข้อมูลตำแหน่งพิกัดและเวลาของจุดปล่อยตัว ที่สำคัญไม่แพ้กันอีกอย่างคือระบบติดตามและรายงานตำแหน่งพิกัดของบอลลูน ซึ่งต้องมีความน่าเชื่อถือ สามารถปฏิบัติงานได้ตลอดภารกิจจนกระทั่งเก็บกู้ได้สำเร็จ (Mohamed *et al.*, 2017; Pemmavit *et al.*, 2020)

จากที่ได้กล่าวมาจนถึงตรงนี้จะพบว่า high-altitude balloon platform จะเป็นประโยชน์ไม่น้อยสำหรับการศึกษาวิจัยทดลองทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ที่ต้องดำเนินการในชั้นบรรยากาศสูง ๆ ระดับสตราโทสเฟียร์ หรือในสภาวะใกล้เคียงกับอวกาศ ที่ซึ่งมีความดันอากาศเบาบาง และมีอุณหภูมิเป็นช่วงกว้างมาก

บทความนี้ได้จัดแบ่งลำดับการอธิบายเป็นดังนี้ เริ่มจากการทบทวนวรรณกรรมในงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ high-altitude balloon platform เพื่อการทดลองทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ส่วนถัดมาจะได้อธิบายถึงรายละเอียดของการใช้ high-altitude balloon platform ในการวางแผนภารกิจบอลลูน และติดตามตำแหน่งพิกัดของบอลลูนผ่านระบบสื่อสาร ส่วนผลการทดลองจะได้ อธิบายถึงการนำ high-altitude balloon platform มาใช้ในการทำการทดสอบต้นแบบทางวิศวกรรมของดาวเทียม KMITL-CubeSat ของทีมผู้ศึกษาเอง รวมทั้งผลทดสอบ



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดัน และความหนาแน่นของอากาศ

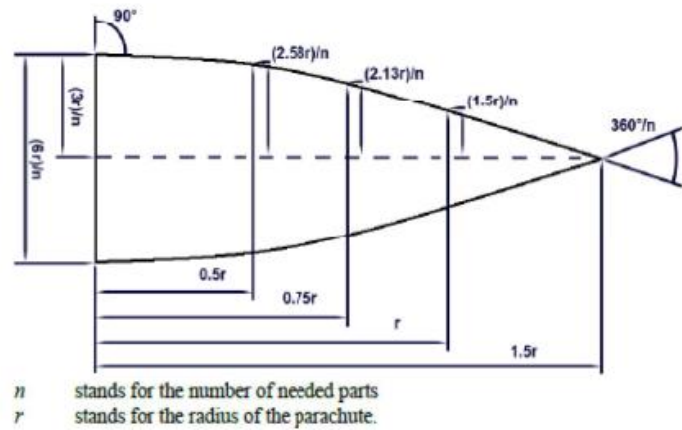
และส่วนสุดท้ายคือสรุปองค์ความรู้จากบทความนี้และข้อเสนอแนะในการนำไปใช้ต่อไป

2. การทบทวนวรรณกรรม

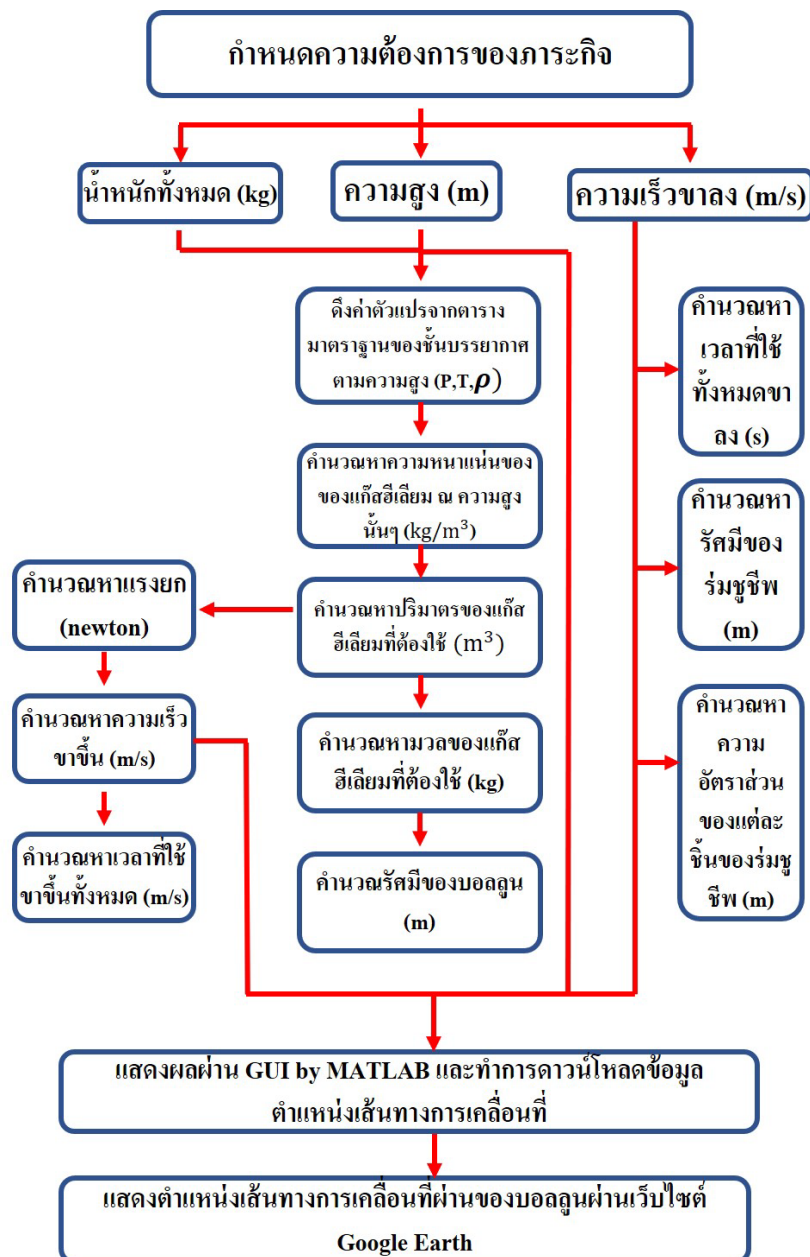
High-altitude balloon เป็นเครื่องมือที่สำคัญยิ่งสำหรับนักวิจัยรวมถึงนักเรียนนักศึกษา ในการเข้าถึงสภาพที่คล้ายคลึงกับอวกาศและสภาพแวดล้อมนอกโลก ในชั้นบรรยากาศชั้นบนของโลก เนื่องด้วยบรรยากาศในชั้นสตราโตสเฟียร์ของโลก ช่วยให้นักวิจัยสามารถเข้าถึงการผสมผสานระหว่างรังสีดวงอาทิตย์แบบแบนด์กว้าง, ความเย็นจัด, ความชื้นต่ำ, และการแผ่รังสีไอออไนซ์เฉียบพลันซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยชีววิทยาอวกาศ ดังนั้นในงานวิจัย (McKaig *et al.*, 2019) ได้นำเสนอการออกแบบ payload สำหรับใช้กับบอลลูนอุตุนิยมวิทยาโดยทั่วไปรวมถึงร่างโปรโตคอลมาตรฐานสำหรับภารกิจ high-altitude balloon ที่สามารถใช้เป็นแพลตฟอร์มสำหรับการทดลองในบรรยากาศระดับสูง โดยมีการปรับ payload ให้เหมาะสมสำหรับการสุ่มตัวอย่างละอองลอยและการสัมผัสกับตัวอย่างทางชีวภาพบนชั้นบรรยากาศระดับสูง อย่างไรก็ตามลักษณะโมดูลาร์ของการออกแบบ payload ช่วยให้สามารถรวมการทดลองและการวิเคราะห์ประเภทต่าง ๆ เข้าด้วยกันได้ รวมถึงข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ, ความดัน, และระดับความสูง วิธีการที่พัฒนาจากโครงการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงการ HAB ในอนาคต

เพื่อวัตถุประสงค์ทั้งด้านการศึกษาและการวิจัยต่อไป โดยผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่า HAB ราคาประหยัดทั่วไปสามารถใช้เพื่อเข้าถึงชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และสตราโตสเฟียร์ ซึ่งสามารถรวบรวมข้อมูลสำหรับการตรวจสอบที่เกี่ยวข้องกับทั้งบรรยากาศของโลกและสภาพคล้ายดาวอังคาร ที่ความสูงในช่วง 30-35 กิโลเมตรจากพื้นโลกจะมีสภาพแวดล้อมคล้ายกับพื้นผิวของดาวอังคาร โดยจะมีความดัน 560 Pa (0.006 atm), อุณหภูมิ -36°C และความหนาแน่น 0.008 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งในงานวิจัย (Larson *et al.*, 2009) ได้นำเสนอการออกแบบและสร้าง high-altitude balloon ด้วยโครงการชื่อว่า HARBOR ที่ใช้นักเรียนเป็นศูนย์กลาง ซึ่งจะมี payload ที่สำคัญได้แก่ โมดูลวัดอุณหภูมิทั้งภายในและภายนอก โมดูลวัดความดันบรรยากาศ โมดูลวัดรังสีคอสมิก และโมดูลถ่ายภาพดิจิทัล รวมทั้งมีการออกแบบระบบ APRS ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งตำแหน่งของบอลลูนผ่านเครือข่ายวิทยุสมัครเล่น เพื่อใช้ในการติดตามเก็บข้อมูลต่อไป และในงานวิจัย (Safonova *et al.*, 2016) ได้นำเสนอการใช้บอลลูน เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในบรรยากาศชั้นบน ช่วงอัตราไวโอเลต (UV) ของแสงในอวกาศ และการสังเกตการณ์ UV ด้วยสเปกโตรสโกปีของวัตถุทางดาราศาสตร์ที่ขยายออกไปเช่นดาวหาง โดยใช้สเปกโตรกราฟิกที่ใช้แผ่นกรองในย่าน UV 200 ถึง 400 นาโนเมตร นอกจากนี้ทางผู้วิจัยได้วางแผนทำการทดลองทางชีววิทยาดาราศาสตร์ เช่น การอยู่รอดของจุลินทรีย์ในบรรยากาศชั้นบน หรือการเก็บตัวอย่างบรรยากาศในชั้นสตราโตสเฟียร์เพื่อศึกษาองค์ประกอบของอากาศ/ฝุ่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตรวจจับเซลล์นอกโลกในสตราโตสเฟียร์ รวมถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่สำคัญของการทดลองทางชีววิทยาดาราศาสตร์ (ค่าความดันก๊าซ, อุณหภูมิ, ความชื้นและการแผ่รังสีของสตราโตสเฟียร์) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับพื้นผิวของดาวอังคารมาก นอกจากวัตถุประสงค์ทางวิทยาศาสตร์ดังกล่าวแล้วทางผู้วิจัยยังได้ตั้งใจที่จะพัฒนาเครื่องมือที่จะใช้ในการทดลองด้วยตนเอง สำหรับการบินในอวกาศด้วยบอลลูน โดยคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของ high-altitude balloon คือความถูกต้องแม่นยำ ซึ่งผู้วิจัยได้ออกแบบและผลิตรบบป้องกันการสั่นไหวแบบ 2 แกนเพื่อแก้ไขการเคลื่อนที่แบบสุ่มของเพย์โหลด

นอกจากการทดลองทางวิทยาศาสตร์ดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว high-altitude balloon ยังถูกใช้ในการทดสอบการทำงานของดาวเทียม Cubesat ในขั้นตอนการศึกษา, ออกแบบ, และทดสอบดาวเทียมก่อนที่จะส่งขึ้นสู่



รูปที่ 2 ร่มชูชีพแบบ Semi-Spherical (ซ้าย) และ อัตราส่วนของแต่ละชั้นส่วนของร่มชูชีพ (ขวา)



รูปที่ 3 ลำดับการทำงานของโปรแกรมวางแผนภารกิจ

วงโคจรจริง ดังในงานวิจัย (Techavijit *et al.*, 2016) ที่ได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาโปรโตคอลการส่งข้อมูลรูปภาพ ด้วยการมอดูเลตแบบ GFSK ซึ่งทดสอบการทำงานด้วย high-altitude balloon โดยผลลัพธ์ของการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าโปรโตคอลดิจิทัล GFSK สามารถทำงานได้ดีที่ความไวของตัวรับคือ -110 dBm ซึ่งสามารถยอมรับได้

2.1 High-Altitude Balloon Platform

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายถึงองค์ประกอบของการใช้งาน high-altitude balloon platform ซึ่งได้แก่ การวางแผนภารกิจ และระบบติดตามตำแหน่งพิกัด

1) การวางแผนภารกิจ

ในการวางแผนภารกิจปล่อยบอลลูนนี้จะได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) การคำนวณหาปริมาณก๊าซฮีเลียมที่ใช้บรรจุเพื่อให้สามารถยกเพย์โพลด์ขึ้นไปได้ 2) การคำนวณเพื่อออกแบบร่มชูชีพสำหรับนำเพย์โพลด์ลงสู่พื้นดินอย่างปลอดภัย และ 3) การพยากรณ์เส้นทางและจุดตกของของบอลลูน ซึ่งจะเริ่มอธิบายจากส่วนแรกก่อน โดยใช้ทฤษฎีและหลักการของแก๊สในอุดมคติที่ต้องบรรจุลงบอลลูนในปริมาณมากพอที่จะเกิดแรงยกตัวของบอลลูนที่ผูกกับเพย์โพลด์ให้ไต่ระดับไปถึงความสูงที่ต้องการ ซึ่งปริมาณแก๊สที่จะต้องใช้มากพอที่จะทำให้เกิดแรงลอยตัวที่มีค่ามากกว่าน้ำหนักของโพลด์ จากทฤษฎีกฎของแก๊สที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิ แต่ยังมีสมบัติที่ควรคำนึงถึงอีกอย่างหนึ่งคือ ปริมาตรหรือจำนวนโมล (n) ของแก๊สในระบบ จากกฎของอวอกาโดรที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน แก๊สที่มีปริมาตรเท่ากันจะมีจำนวนอนุภาคเท่ากัน นอกจากนี้จำนวนโมลของแก๊ส ยังมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ จำนวนอนุภาคและปริมาตรของแก๊สอีกด้วย กล่าวคือแก๊ส 1 โมล จะมีจำนวน 6.02×10^{23} อนุภาคและปริมาตร 22.4 ลิตรหรือลูกบาศก์เดซิเมตรที่ STP จึงสามารถเขียนนิยามของกฎอวอกาโดรได้ดังสมการที่ (1)

$$PV = nRT = \left(\frac{\rho}{m}\right)kt \quad (1)$$

เมื่อ V เป็นปริมาตรของแก๊ส หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร (m^3), P เป็นความดันของแก๊ส หน่วยเป็นปาสกาล (Pa), T เป็นอุณหภูมิของแก๊ส หน่วยเป็นเคลวิน (K), n เป็นจำนวนโมลของแก๊ส, R เป็นค่าคงตัวแก๊สอุดมคติ (ประมาณ 8.3145 จูลต่อ (โมล เคลวิน) (J/K), k เป็นค่าคงที่ของ Boltzman's (ประมาณ 1.38×10^{-23}

J/K), เป็นความหนาแน่นของแก๊ส He และ เป็นมวลของแก๊ส เนื่องจากบนชั้นบรรยากาศแต่ละชั้นนั้นจะมีอุณหภูมิ ความดัน และความหนาแน่นของอากาศที่ไม่เท่ากัน แต่มีความสัมพันธ์กัน โดยในที่นี้ผู้ศึกษาจะอ้างอิงจาก มาตรฐานชั้นบรรยากาศ 1976 สำหรับการออกแบบภารกิจการปล่อยบอลลูนดังรูปที่ 1

ขนาดของโพลด์มีผลต่อแรงยกของบอลลูนที่อัดแก๊ส (Timothy *et al.*, 2012) โดยปริมาณแก๊สนั้นจะต้องมากพอที่จะทำให้เกิดแรงลอยตัวที่มีค่ามากกว่าน้ำหนักของโพลด์ โดยจะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของปริมาตรและความหนาแน่นของแก๊สดังสมการที่ (2) (Cross *et al.*, 2007)

$$Fb = V(\rho_{He} - \rho_{Air})g \quad (2)$$

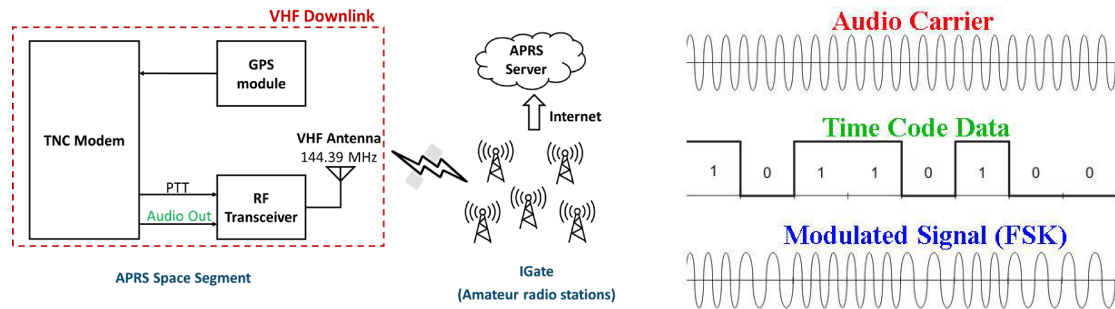
เมื่อ V เป็นปริมาตรของแก๊ส หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร (m^3), P เป็นความดันของแก๊ส หน่วยเป็นปาสกาล (Pa), T เป็นอุณหภูมิของแก๊ส หน่วยเป็นเคลวิน (K), n เป็นจำนวนโมลของแก๊ส, R เป็นค่าคงตัวแก๊สอุดมคติ (ประมาณ 8.3145 จูลต่อ (โมล เคลวิน) (J/K), k เป็นค่าคงที่ของ Boltzman's (ประมาณ 1.38×10^{-23} J/K), ρ เป็นความหนาแน่นของแก๊ส He (kg/m^3) และ m เป็นมวลของแก๊ส (kg)

นอกจากปัจจัยที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นยังมีอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญคือ ความเร็วต้นในการปล่อยของบอลลูน โดยจะส่งผลต่อระยะเวลาตั้งแต่ทำการเริ่มปล่อยจนถึงจุดที่บอลลูนแตกนั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการดังสมการที่ (3) (Gallice *et al.*, 2011)

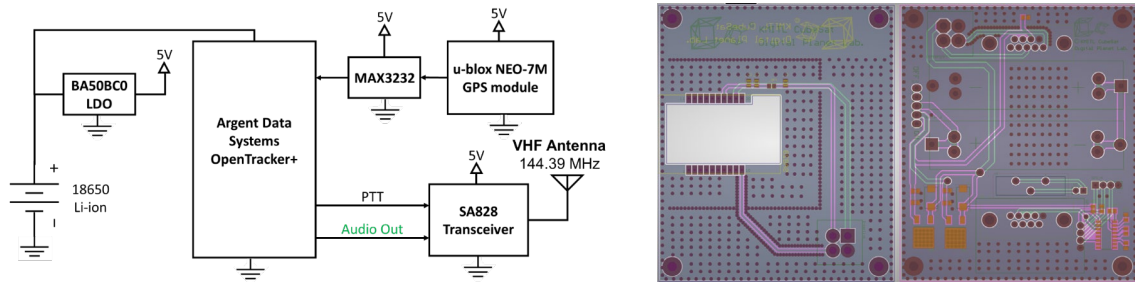
$$v = \sqrt{\frac{4d(\rho_{He} - \rho_{Air})g}{3Cd\rho_{Air}}} \quad (3)$$

เมื่อ V คือปริมาตรของแก๊ส (m^3), ρ_{He} คือความหนาแน่นของแก๊ส He มีค่าเท่ากับ 1.225 (kg/m^3), ρ_{Air} คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3) และ g คือ ความเร่งของแรงโน้มถ่วงโลก (m/s^2)

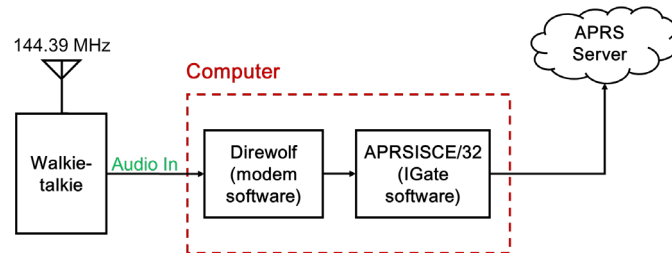
จากจุดที่บอลลูนแตกจนกระทั่งถึงพื้นนั้นจะชะลอความเร็วในการตกด้วยร่มชูชีพ นอกจากนั้นยังทำให้โพลด์ได้รับความเสียหายน้อยลงเมื่อตกสู่พื้นดินซึ่งจะอาศัยแรงต้านอากาศในการลดความเร็วขาลง โดยร่มชูชีพนั้นมีหลากหลายให้เลือกมากมาย ทั้งนี้ผู้ศึกษาได้เลือกร่ม



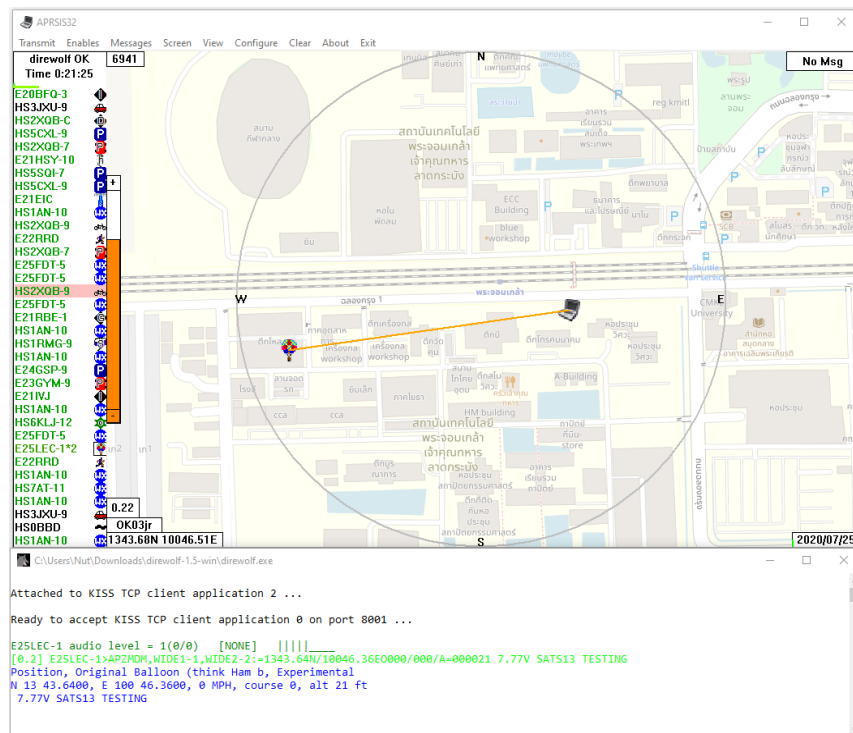
รูปที่ 4 ภาพรวมของระบบ APRS (ซ้าย) และการมอดูเลตแบบ AFSK (ขวา)



รูปที่ 5 ไดอะแกรมของระบบ APRS ในส่วนของภาคส่ง (ซ้าย) และการออกแบบ PCB ของระบบในส่วนของภาคส่ง (ขวา)



รูปที่ 6 ไดอะแกรมของระบบ APRS ในส่วนของภาครับ [iSTEM-Ed]



รูปที่ 7 APRSSISCE/32 [iSTEM-Ed]

ชูชีพชนิด Semi-spherical ซึ่งมีประสิทธิภาพในการต้านแรงอากาศได้ดี แสดงได้ดังรูปที่ 2 (ซ้าย)

ในการออกแบบร่มชูชีพแบบ semi-spherical นั้นจำเป็นต้องคำนวณหารัศมีของร่มชูชีพที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของโหลตและความเร็วหลังจากสมการที่ (4)

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{8mg}{\pi \rho_{Air} C_d v^2}} \quad (4)$$

เมื่อ r คือ รัศมีของร่มชูชีพ (m), m คือ มวลของโหลตทั้งหมด (kg) และ v คือ ความเร็วในการตกของร่มชูชีพ (m/s)

ร่มชูชีพแบบ semi-spherical นั้นเกิดจากการนำชิ้นส่วนที่คล้ายคลึงสามเหลี่ยมจำนวนหลายชิ้นมาเย็บต่อกันเป็นลักษณะวงกลมมุม 360 องศา จากนั้นเย็บเชือกที่ส่วนปลายของร่มชูชีพ โดยเมื่อเราคำนวณหารัศมีของร่มชูชีพได้แล้วนั้น จะสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาความยาวแต่ละส่วนของแต่ละชิ้นนี้ได้จากรูปแบบชิ้นส่วนของร่มชูชีพดังรูปที่ 2 (ขวา) โดยขั้นตอนการวางแผนการกิจปล่อยบอลลูนสามารถสรุปได้ดังผังงานรูปที่ 3 (Warayut et al., 2009)

2) ระบบติดตามตำแหน่งพิกัด

ระบบติดตามและรายงานพิกัดโดยอัตโนมัติผ่านเครือข่ายไร้สายในบทความนี้ใช้ระบบ APRS ที่ซึ่งสามารถส่งข้อความหรือข้อมูลโทรมาตรรวมทั้งตำแหน่งพิกัด โดยจัดการเฟรมข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบโปรโตคอล AX.25 สำหรับแพ็คเกจวิทยุสมัครเล่น (amateur packet radio) ซึ่งระบบ APRS ในบทความนี้ประกอบไปด้วยส่วนที่ผูกติดไปกับบอลลูน (space/air segment) ที่ทำหน้าที่ติดตามพร้อมรายงานพิกัดโดยอัตโนมัติผ่านภาคส่ง และส่วนที่อยู่บนภาคพื้นดิน (ground segment) หรือ IGate ที่เป็นภาครับสัญญาณและส่งต่อไปยังเซิร์ฟเวอร์ของระบบ APRS เพื่อการเข้าถึงข้อมูลตำแหน่งพิกัดสำหรับการติดตามต่อไป โดยภาพรวมของระบบ APRS แสดงได้ดังรูปที่ 4 (ซ้าย)

ในภาคส่งของระบบ APRS จะใช้โมเด็ม TNC (Terminal Node Controller) ในการเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลดิจิตอลให้เป็นสัญญาณอนาล็อก AFSK (Audio Frequency Shift Keying) ดังรูปที่ 4 (ขวา) ซึ่งเป็นการมอดูเลตที่ใช้ความถี่เสียง 1200 Hz แทนบิตข้อมูล “1” และใช้ความถี่ 2200 Hz แทนบิตข้อมูล “0” ภายใต้

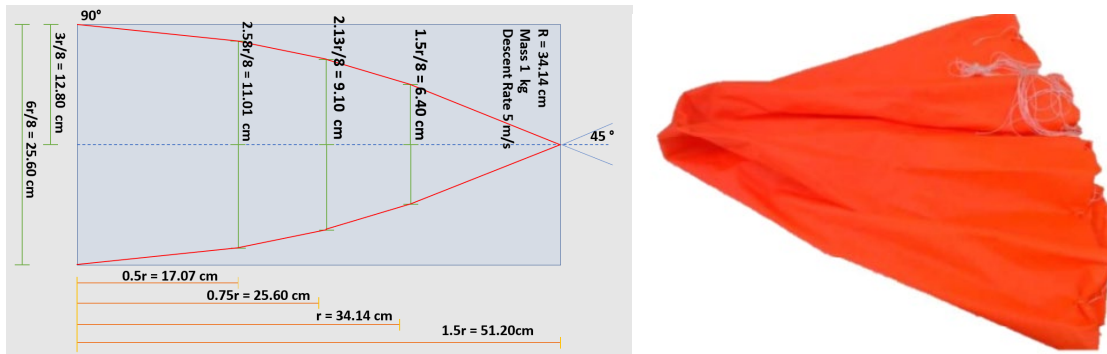
มาตรฐาน Bell 202 โดยมีความเร็วในการสื่อสาร 1200 baud หรือ 150 ตัวอักษรต่อวินาที

หลังจากได้สัญญาณอนาล็อก AFSK ซึ่งเป็นสัญญาณเสียงมาแล้ว จากนั้นจะถูกส่งออกอากาศด้วยการมอดูเลตแบบความถี่ (frequency modulation) โดยใช้คลื่นพาห้ที่ความถี่ 144.39 MHz เพื่อให้ภาครับสัญญาณที่อยู่บนพื้นดิน ซึ่งก็คือสถานีภาคพื้นดินของนักวิทยุสมัครเล่นทั่วโลก สามารถรับสัญญาณและทำการตีมอดูเลตกลับมาเป็นข้อมูลตำแหน่งพิกัด พร้อมทั้งข้อมูลอื่น ๆ ส่งขึ้นไปยังเซิร์ฟเวอร์ของระบบ APRS เพื่อให้ผู้ใช้งานระบบสามารถติดตามพิกัดบอลลูนได้ต่อไป โดยการออกแบบในส่วนของภาคส่งแสดงได้ดังรูปที่ 5 (ซ้าย) (Pemmavit et al., 2020)

ทีมพัฒนาของผู้ศึกษาได้เลือกใช้โมเด็ม TNC รุ่น OpenTracker ซึ่งสามารถจัดการกับข้อมูลจากโมดูล GPS พร้อมทั้งนำมาจัดเฟรมโปรโตคอล AX.25 ให้โดยอัตโนมัติ โดยหลังจากมอดูเลตสัญญาณแบบ AFSK แล้ว จึงส่งต่อสัญญาณไปยังโมดูลสื่อสาร FM รุ่น SA828 เพื่อกระจายสัญญาณต่อไป โดยการออกแบบ PCB (printed circuit board) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 (ขวา) ในส่วนของภาครับหรือ IGate ทีมพัฒนาของผู้ศึกษาได้ประยุกต์ใช้งานในเชิงซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ผสมกับวิทยุสื่อสารความถี่ 144.39 MHz ซึ่งอยู่ในย่านวิทยุสมัครเล่น สามารถแสดงไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 6 โดยใช้เครื่องวิทยุเป็นตัวรับสัญญาณและตีมอดูเลต FM จากนั้นจะได้สัญญาณเสียงออกมาแล้วส่งต่อเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อใช้โมเด็ม TNC ที่เป็นแบบซอฟต์แวร์ซึ่งในที่นี้คือโปรแกรม direwolf ทำการถอดสัญญาณ AFSK ให้กลายเป็นข้อมูลที่ภาคส่งต้องการสื่อสาร หรือก็คือตำแหน่งพิกัดของบอลลูนนั่นเอง จากนั้นจึงส่งต่อข้อมูลตำแหน่งพิกัดให้กับ IGate ในที่นี้คือโปรแกรม APRSSISCE/32 ซึ่งทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูลขึ้นไปบนเซิร์ฟเวอร์ของระบบ APRS ซึ่งจะสามารถเฝ้าสังเกตการณ์ติดตามพิกัดผ่านเว็บ aprs.fi โดยทั้งสองโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7 (Pemmavit et al., 2020)

3. ผลจากการศึกษาค้นคว้า

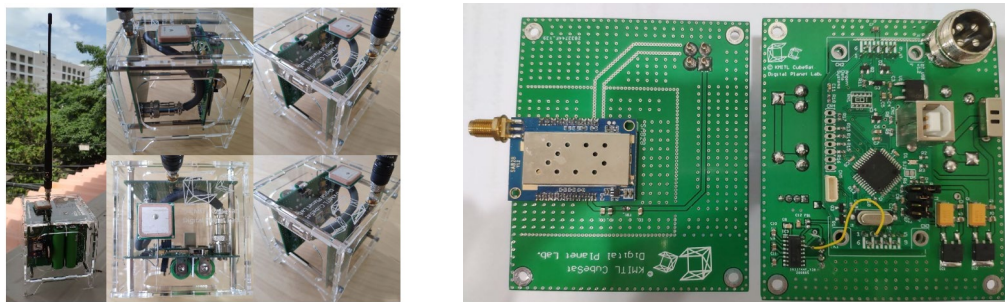
ในส่วนของผลการทดลองก็ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนเช่นกัน เพื่อความให้เห็นถึงความชัดเจนของการใช้งาน high-altitude balloon platform



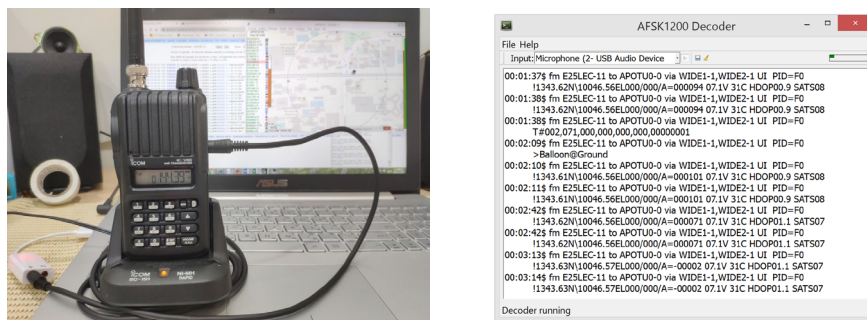
รูปที่ 8 ขนาดความยาวของแต่ละอัตราส่วนแต่ละชั้นของร่มชูชีพที่ได้จากการคำนวณ



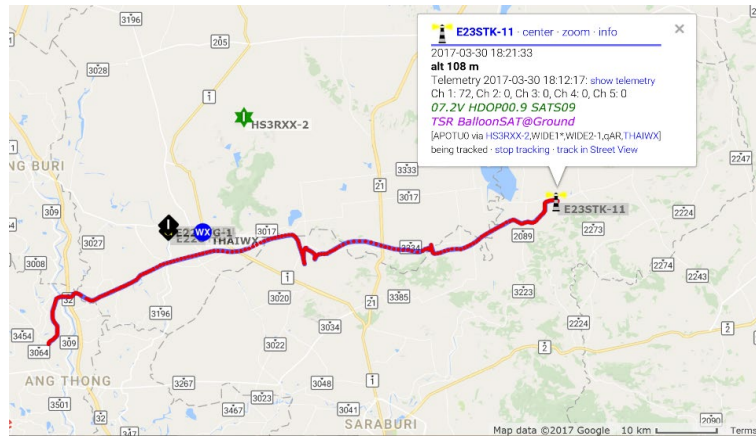
รูปที่ 9 ตำแหน่งพิกัด 3 มิติจากหลังการปล่อยจริงและหมุดพิกัดที่เพยโฮลดตกถึงพื้นโลกจากการพยากรณ์



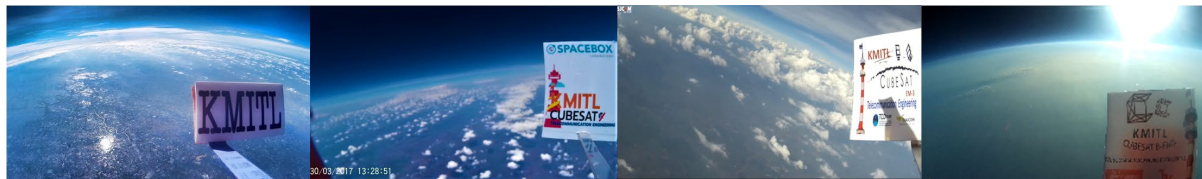
รูปที่ 10 อุปกรณ์ภาคส่งของระบบ APRS [iSTEM-Ed] ที่ประกอบแล้ว (ซ้าย) และ PCB ทั้ง 2 (ขวา)



รูปที่ 11 อุปกรณ์ภาครับของระบบ APRS (ซ้าย) และข้อมูลตำแหน่งพิกัดที่รับได้ (ขวา)



รูปที่ 12 การติดตามบอลูนด้วยระบบ APRS ผ่านเว็บ aprs.fi



รูปที่ 13 ภาพถ่ายทางอากาศจากหลายๆภารกิจที่ใช้งาน high-altitude balloon platform

3.1 การวางแผนภารกิจ

การคำนวณการออกแบบในส่วนต่าง ๆ นั้นสามารถแสดงดังตัวอย่างเช่น เมื่อต้องการให้บอลูนแตกที่ความสูง 30 กิโลเมตรจากพื้นดินที่บรรจุด้วยแก๊สฮีเลียม มีน้ำหนักโหลรวมน้ำหนักของบอลูนแล้ว 1 กิโลกรัม และมีความเร็วขาลงเป็น 5 m/s จากข้อมูลมาตรฐานชั้นบรรยากาศ (U.S. Standard 1976) ที่ ความสูง 30 กิโลเมตรจะมีอุณหภูมิ 226.650 เคลวิน ความดัน 8.7898 Torr (0.0116 n/m²) และความหนาแน่นของอากาศเป็น 1.8×10^{-2} kg/m³ ดังนั้นเมื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการแล้วจะได้ปริมาตรแก๊สฮีเลียมที่ต้องบรรจุเป็น 64.4773 m³ และได้รับรัศมีของร่มชูชีพเป็น 0.34 m เมื่อนำมาแทนค่าลงในแบบอัตราส่วนของชิ้นส่วนร่มชูชีพจะได้ขนาดความยาวแต่ละส่วนดังรูปที่ 8 (ซ้าย) จึงทำการตัดตามรูปแบบและเย็บเข้าด้วยกันจนครบทั้ง 8 ชิ้น จะได้ร่มชูชีพที่มีลักษณะครึ่งวงกลมที่มีมุม 360 องศา และเย็บเชือกที่ส่วนปลายของร่มชูชีพตามลำดับรูปที่ 8 (ขวา) (Warayut et al., 2020)

ในส่วนของการพยากรณ์เส้นทางและจุดตกของบอลูนซึ่งใช้ฐานข้อมูลจาก CUSF Landing Predictor จะได้ยกตัวอย่างจากภารกิจที่ปล่อยทิ้งเมื่อบอลูนแตกโดยข้อมูลตำแหน่งพิกัดจากการปล่อยจริงแสดงได้ดังเส้นกราฟใน 3 มิติ พร้อมทั้งหมุดพิกัดที่เพย์โหลดตกถึงพื้นโลกจากการพยากรณ์ แสดงได้ดังรูปที่ 9

จากการสังเกตเส้นทางที่พยากรณ์จากฐานข้อมูลลมเปรียบเทียบกับข้อมูลหลังการปล่อยบอลูนจริงนั้นมีความใกล้เคียงกัน โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นคือระยะทางระหว่างจุดตกที่ได้จากการพยากรณ์และจุดตกจริงที่ 12.5 กิโลเมตร

3.2 ระบบติดตามตำแหน่งพิกัด

จากการออกแบบ PCB ของระบบ APRS ในส่วนของภาคส่ง จึงนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ขึ้นมาติดตั้งแสดงในรูปที่ 10 (ซ้าย) ซึ่งประกอบด้วย 2 บอร์ด ดังรูปที่ 10 (ขวา) (Pemmavit et al., 2020) ที่แยกการทำงานระหว่างส่วนของโมเด็ม TNC กับส่วนของโมดูลสื่อสารวิทยุออกจากกันเพื่อป้องกันการรบกวน

ภาครับหรือ IGate ซึ่งใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์กับเครื่องวิทยุสื่อสารย่านความถี่วิทยุสมัครเล่น สามารถแสดงการเชื่อมต่อได้ดังรูปที่ 11 (ซ้าย) และแสดงข้อมูลตำแหน่งพิกัดที่รับได้ดังรูปที่ 11 (ขวา)

จากการทดสอบต้นแบบจำลองทางวิศวกรรมของดาวเทียม KMITL-CubeSat กว่า 4 ครั้งที่ผ่านมาของทีมนักศึกษา ด้วยการใช้งาน high-altitude balloon platform สามารถวางแผนภารกิจและตามเก็บกู้ดาวเทียม และเศษซากบอลูนที่แตกแล้วได้ทุกครั้ง นำมาซึ่งภาพถ่ายทางอากาศที่ถ่ายได้ด้วยกล้องสังเกตการณ์ที่ถูกติดไปกับบอลูนดังรูปที่ 13

4. สรุป

เนื่องจากบทความนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนา high-altitude balloon platform เพื่อการทดลอง และวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ จึงได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือการวางแผนภารกิจบอลลูน และระบบติดตามตำแหน่งพิกัด ซึ่งมีความจำเป็นต้องทำงานประสานกัน กล่าวคือในการวางแผนภารกิจจะคำนึงถึงปริมาณแก๊สฮีเลียมที่ต้องใช้บรรจุลงในบอลลูน เพื่อให้สามารถยกเพย์โหลดขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศในระดับความสูงที่ต้องการได้ พร้อมทั้งต้องสามารถพยากรณ์เส้นทาง และความสูงของบอลลูน ณ เวลาต่าง ๆ ขณะทำการกิจ และสามารถออกแบบร่มชูชีพที่สามารถนำเพย์โหลดลงสู่พื้นดินได้อย่างปลอดภัย ซึ่งต้องทำงานร่วมกับระบบติดตามตำแหน่งพิกัด ที่สามารถกระจายสัญญาณข้อมูลพิกัดได้ในระยะไกล เนื่องจากบอลลูนได้ระดับขึ้นไปสูงถึงระดับ สตราโทสเฟียร์ และต้องเป็นระบบที่มีอายุผู้ที่รับสัญญาณได้อยู่ทั่วโลก จึงต้องเลือกใช้ระบบ APRS ที่ซึ่งอยู่ในข่ายของนักวิทยุสมัครเล่นที่มีอยู่ทั่วประเทศ ทำหน้าที่คอยรับสัญญาณและส่งต่อไปยังเซิร์ฟเวอร์เพื่อให้ผู้ใช้งานแพลตฟอร์มสามารถติดตามตำแหน่งพิกัดของบอลลูนขณะทำการกิจผ่านอินเทอร์เน็ตได้ ณ เวลาจริงผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการใช้เตรียมภารกิจสำหรับการทดลอง/ทดสอบทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและวิศวกรรมต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องอาศัย high-altitude balloon ในการนำพาการทดลองขึ้นไปบนชั้นบรรยากาศที่สูงหรือในสภาวะใกล้เคียงอวกาศ เช่น การทดสอบต้นแบบดาวเทียม CubeSat ดังที่ได้นำเสนอเป็นกรณีศึกษาในบทความนี้ นอกจากนี้ยังรวมถึงการทดลองและการตรวจวัดอื่นทางด้านวิทยาศาสตร์ที่จำเป็นต้องทำการทดลองหรือตรวจวัดปริมาณทางกายภาพต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศระดับสูง การตรวจวัดทางอุตุนิยมวิทยา เป็นต้นความสามารถในการแบกน้ำหนักอุปกรณ์ที่จะนำขึ้นไปปริมาณแก๊สฮีเลียมที่ต้องใช้บรรจุ ระยะเวลา ตำแหน่งและเส้นทางตลอดการเดินทางของภารกิจ จนกระทั่งตามเก็บกู้เมื่ออุปกรณ์ทดสอบตกกลับลงมายังพื้นดิน สามารถคำนวณ ออกแบบและใช้ประโยชน์จากสิ่งที่นำเสนอผ่านงานวิจัยนี้ รวมทั้งส่วนหนึ่งของผลงานวิจัยนี้จะช่วยให้การทดลองวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับอวกาศทำได้โดยสะดวกและใช้เวลาในการเตรียมดำเนินการกิจได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากสำนักงานนโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ โดยหน่วยบริหารและจัดการทุน ด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม สัญญาเลขที่ B05F630018

เอกสารอ้างอิง

- Chaisita, T., Nakorn, T. N., Prathetrat, C., Sutthikarn, P., Chivapreecha, S., & Trirat, A. (2020). Development of High-Altitude Balloon Tracking by APRS System. ECTI CARD 2020, 26-27 May 2020, Nakornsawan, Thailand. (in Thai).
- Cross, R. (2007). Aerodynamics of a Party Balloon. The Physics Teacher, 45(6), 334-336. <https://doi.org/https://doi.org/10.1119/1.2768686>
- Gallice, A., Wienhold, F. G., Hoyle, C. R., Immler, F., & Peter, T. (2011). Modeling the ascent of sounding balloons: derivation of the vertical air motion. Atmos. Meas. Tech., 4(10), 2235-2253. <https://doi.org/10.5194/amt-4-2235-2011>
- Kerry, T. N., Kim, M. A., Matthew, K. H., & Alexey, A. P. (2007). Aerodynamic and Mission Performance of a Winged Balloon Guidance System. Journal of Aircraft, 44(6), 1923-1938. <https://doi.org/https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/1.31922>
- Kusonthammarat, T., Thepsitha, T., & Sutthikarn, P. (2016). Design and Implementation of CubeSat Engineering Model and Channel Coding Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineer, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang]. Bangkok. (in Thai).
- McKaig, J., Caro, T., Hyer, A., Talburt, E. D., Verma, S., Cui, K., Boguraev, A.-S., Heit, M., Johnson, A., Johnson, E., Jong, A., Shepard, B., Stankiewicz, J., Tran, N., & Rask, J. (2019). A High-Altitude Balloon Platform for Space Life Sciences Education. Gravitational and Space Research, 7(1), 62-69. <https://doi.org/https://doi.org/10.2478/gsr-2019-0007>
- Roeksukrungrueang, C. (2016). The CubeSat Engineering Model and Improvement of Power Consumption using Adjustable Code Rate Convolution Code Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineer, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang]. Bangkok. (in Thai).
- Safonova, M., Nayak, A., Sreejith, A. G., Mathew, J., Sarpotdar, M., Ambily, S., Nirmal, K., Talnikar, S., Hadigal, S., & Prakash, A. (2015). An overview of high-altitude balloon experiments at the Indian Institute of Astrophysics. Astronomical and Astrophysical Transactions, 29(3), 397-426. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.01538>
- Shane, L. L., John, C. A., & William, A. H. (2009). The first frontier: High altitude ballooning as a platform for student research experiences in science and engineering. American Journal of Physics, 77(6), 489-497. <https://doi.org/https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.3097775>
- Sitha, W., Sutthikarn, P., & Chivapreecha, S. (2020, 15-16 December 2020). Simulation Software Development for Mission Planning of Science/Engineering Testing Using with High-Altitude Balloon. ARUCON2020, Ayutthaya, Thailand.
- Smith, T. P. (2012). Balloon Calculations. Retrieved Mar 28, 2020, from <https://northstar-www.dartmouth.edu/~klynch/pmwiki-gc/uploads/BalloonCalculations.pdf>

- Sutthikarn, P., Chivapreecha, S., Sitha, W., Jongsataporn, T., & Trirat, A. (2020, 4–6 November 2020). Automatic Position Reporting System for Miniaturized Satellite Experiment Using High-Altitude Balloon. 2020 International STEM Education Conference (iSTEM-Ed 2020), Huahin, Thailand.
- Techavijit, P. (2020). Practical Ground-Space Communication Network for Miniaturized Satellites Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineer, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang]. Bangkok. (in Thai).
- Techavijit, P., Chivapreecha, S., Sukchalerm, P., & Wongphuangfuthaworn, N. (2016, 3–6 Feb. 2016). Suitable altitude for long-operated communication high altitude balloon with experimental flights. 2016 8th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST),
- Techavijit, P., Chivapreecha, S., Sukchalerm, P., & Plodpai, A. (2016, 3–6 Feb. 2016). CubeSat image transmission in JPEG compression: An experiment on high altitude platform. Paper presented at the 2016 8th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST).
- Techavijit, P., Sukchalerm, P., Wongphuangfuthaworn, N., Plodpai, A., Manuthasna, S., & Chivapreecha, S. (2018). Internet Network in Space for Small Satellites: Concept and Experiments. *Sensors and Materials*, 30(10), 2295–2311. <https://doi.org/10.18494/SAM.2018.1854>
- Thaheer, A. S. M., & Ismail, N. A. (2017). Mission design and analysis of USM high-altitude balloon. *Journal of Mechanical Engineering (JMEchE)*, 14(2), 62–92.