

ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 [2567] Vol.23, No.2 [2024]

พฤษภาคม - สิงหาคม 2567

ISSN 2822-1451 [Print]

ISSN 2822-1508 [Online]



36 ปี คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



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
Mahasarakham 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 Mahasaranon
Naresuan University, Thailand
- Dr. Worawut Srisukkhham
Chiang Mai University, Thailand

Management Staff

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

Miss Wilawan Sae-jeng

Miss Kitsiya Chuchuaysuwan

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©2024 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

Editorial Corner (invitation article)

Unlocking the Potential of Supramolecular Catalysis in Biodiesel Production

*Srideep Dasari and Malinee Sriariyanun**.....e900003**Research Articles**

STABILITY ANALYSIS AND OPTIMAL CONTROL FOR HIV INFECTION WITHIN-HOST MODEL WITH IMMUNE RESPONSE AND ANTIRETROVIRAL TREATMENT

Ratchada Viriyapong and Bunsarika Laokhetkid*.....e254013

Wave solutions to the combined KdV-mKdV equation via two methods with the Riccati equation

Jiraporn Sanjun, Kamonchanok Muenduang and Sirasrete Phoosree*.....e256328

Development of average run length formulas for EWMA control chart under the AR(1) with quadratic trend model for detecting and monitoring process variability

*Suvimol Phanyaem**.....e257034

Forecasting Model for Pneumonia Cases in 13 Health Districts in Thailand

ตัวแบบพยากรณ์ผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในเขตสุขภาพ 13 เขตของประเทศไทย

Watha Minsan and Pradthana Minsan*.....e253041

Comparative Analysis of Long Short-Term Memory and Random Forest Models for GULF Stock Closing Price Prediction

การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวและป่าสุ่มสำหรับการทำนายราคาปิดหุ้น GULF

*Kanin Pongtanavong and Narongrit Kaewbanjak**.....e253143

YOLO-Based Object Detection for Locating Handwritten X-Marks on Multiple-Choice Answer Sheets

การตรวจจับตำแหน่งเครื่องหมายกากบาทที่เขียนด้วยลายมือบนกระดาษคำตอบแบบปรนัยด้วยเทคนิคการตรวจจับวัตถุแบบ YOLO

*Pisit Nakjai, Suchanard Padthep, Waraporn Panup and Patcharee Maneerat**.....e256364

Development of crispy pork product to enhance nutritional value from banana

การพัฒนาผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมคุณค่าทางโภชนาการจากกล้วย

*Nootjaree Sonaard, Narit wardkhean and Wasana Wongngam**.....e257516

Effect of glycerol and holy basil essential oil contents on properties of edible films from purple sweet potato flour

ผลของปริมาณกลีเซอรอลและน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราต่อสมบัติของฟิล์มบิโกลไคได้จากแป้งมันเทศสีม่วง

Namfon Samsalee, Sirinapa Prommat, Saranporn Rungboonkrod, Nisa Romsomsa, Thidarat Bumrungpakdee,**Thipwarin Rimlumduan and Sumalee Musika*.....e248635

Diversity of Freshwater Fish in the Sai Buri River: Around the Watershed Community of Ban Chulabhorn Phatthana 12, Sukhirin District, Narathiwat Province.

ความหลากหลายชนิดของปลาน้ำจืดในแม่น้ำสายบุรี: บริเวณชุมชนต้นน้ำบ้านจุฬารณพัฒนา 12 อำเภอสุคีริน จังหวัดนราธิวาส

Pun Yeesin, Somsak Buatip and Sakareeya Samaae*.....e254305Effects of Breaking Dormancy and Nursery Materials on the Growth of Black Seed Rieng (*Parkia timoriana* (DC.) Merr.)

ผลของการทำลายการพักตัวและวัสดุเพาะต่อการเจริญของเมล็ดเหียงสีดำ

*Kanokkarn Choosong and Warangkhana Riansut**.....e246859

Unlocking the Potential of Supramolecular Catalysis in Biodiesel Production

Srideep Dasari¹ and Malinee Sriariyanun^{2*}

¹Department of Chemistry, École Centrale School of Engineering, Mahindra University, Telangana, India

²Department of Chemical and Process Engineering, The Sirindhorn International Thai-German Graduate School of Engineering (TGGs), King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

*Corresponding Author: macintous@gmail.com

The intensifying dependence on fossil fuels has triggered unprecedented environmental concerns, including climate change, air pollution, and resource depletion. Biodiesel, a renewable fuel derived from vegetable oils and animal fats, offers a promising alternative to fossil fuels due to its biodegradability and lower emissions of greenhouse gases, particulate matter, and sulfur dioxide (Ambat et al, 2018: 356–369, Kularathne et al, 2019: 1355–1367). However, conventional biodiesel production methods often rely on homogeneous catalysts like sodium hydroxide (NaOH) or heterogeneous catalysts like metal oxides (Rehman et al, 2021: 417–438, Rizwanul Fattah et al, 2020). While effective, these methods pose limitations, including separation difficulties, corrosion of reaction vessels, environmental concerns associated with spent catalysts, and energy-intensive reaction conditions (Mandari & Devarai, 2022: 935–961). Supramolecular catalysis offers a compelling path toward overcoming these limitations and achieving sustainable and efficient biodiesel production. This report explores the fascinating interplay of hydrogen bonding and π - π stacking interactions within supramolecular catalysts, highlighting their role in enhancing biodiesel yields and selectivity while emphasizing sustainability. Additionally, we provide details of specific supramolecular catalyst examples for biodiesel production.

Supramolecular catalysis offers a groundbreaking approach, harnessing the power of non-covalent interactions like van der Waals forces, hydrogen

bonding, and π - π stacking to assemble discrete molecular entities into well-defined, functional structures with unique properties tailored for specific catalytic tasks (Raynal et al, 2014: 1660–1733). Supramolecular catalysis unlocks a world of possibilities, enabling high selectivity, mild reaction conditions, and catalyst recyclability (Raynal et al, 2014: 1660–1733, Raynal et al, 2014: 1734–1787) all contributing to the biodiesel production from diverse feedstocks such as vegetable oils, waste cooking oils, and animal fats, with impressive yields exceeding 90% under gentle conditions (Elkelawy et al, 2022: 1–17, Gouda et al, 2022: 100415).

The selectivity of the supramolecular catalyst is influenced by non-covalent interactions. Firstly, hydrogen bonds act as activation enhancers. Strategically placed hydrogen bond donors and acceptors within the polymer structure can interact with reactants like triglycerides and methanol, stabilizing the transition state of the transesterification reaction. This lowers the activation energy, leading to faster reaction rates and higher yields. Beyond activation, these interactions act as a form of molecular recognition, selectively interacting with desired reactants like triglycerides while minimizing side reactions with other molecules. Furthermore, the reversible nature of hydrogen bonds contributes to the reusability of supramolecular polymer catalysts. Post-reaction, the catalyst and product molecules can dissociate through the breaking of hydrogen bonds, allowing for the catalyst's recovery and reuse in subsequent cycles. This

reusability not only reduces production costs but also minimizes waste generation, contributing to a more sustainable biodiesel production process. However, it's important to note that reusability depends not only on reversibility but also on factors like stability and separation efficiency.

Another key player in the realm of supramolecular polymer catalysts for biodiesel production is π - π stacking. This unique interaction arises between electron-rich aromatic rings present in the polymer structure and similar aromatic residues within lipase enzymes, nature's biocatalysts for transesterification. Aromatic rings in the catalyst align with aromatic residues in the lipase's active site, forming a stable and specific binding. π - π stacking induces conformational changes in the lipase enzyme. These changes optimize the enzyme's active site, exposing key binding pockets and facilitating efficient interaction with triglyceride substrates. Beyond activation, π - π stacking contributes to enhanced binding affinity between the lipase and triglyceride substrates. This affinity, stemming from the synergistic interplay of π - π stacking and hydrogen bonding, ensures efficient substrate recruitment and minimizes the chances of competing side reactions. This selectivity, coupled with the activation effect, leads to the production of purer biodiesel with improved fuel properties.

Researchers have synthesized various supramolecular systems employing diverse building blocks, including metal complexes, ionic liquids, and supramolecular gels, each offering unique advantages. For instance, metal-organic frameworks (MOFs) have emerged as particularly promising catalysts. With their well-defined, porous structures, MOFs can be designed to incorporate catalytic sites, leading to exceptional activity and selectivity towards transesterification, the key reaction in biodiesel production. Supramolecular structures can pre-organize reactants, bringing them into proximity and facilitating reaction. Cyclodextrins can encapsulate oil molecules, aligning them for efficient transesterification. The assembled supramolecule creates unique active sites with tailored

Lewis acidity or basicity. Several studies showcase the remarkable potential of these supramolecular catalysts. Copper (Cu)-based β -cyclodextrins supramolecular catalyst achieved biodiesel yields exceeding 88% under mild conditions, demonstrating their effectiveness and sustainability (Elkelawy et al, 2022: 1-17, Zhang et al, 2018: 1123-1128). Poly- β -cyclodextrin hydrogel used to immobilize lipase combined enzymatic activity with cyclodextrin's structural advantages, offered reusability, substrate recognition, and conversion, achieving successful biodiesel production from soybean oil (Wang et al, 2024: 133140). MOFs like UiO-66 and MIL-100 offer high yields and reusability due to their abundant active sites and porous structures (Gouda et al, 2022: 100415). Supramolecular gels and ionic liquids create reusable systems with tunable polarity and compatibility with diverse feedstocks.

Supramolecular catalysts can be designed to accelerate this reaction and improve its efficiency in several ways by providing active sites, stabilizing intermediates, and enhancing selectivity. Research on supramolecular catalysis for biodiesel production is still in its early stages, but several promising examples show its potential. For instance, studies have demonstrated the use of supramolecular catalysts based on cyclodextrins, metal complexes, and ionic liquids to achieve high biodiesel yields under mild reaction conditions. Further research is crucial to optimize these catalysts, explore their long-term stability, and scale up the production process for commercial viability. However, the initial results suggest that supramolecular catalysis holds significant promise for developing a more sustainable and efficient approach to biodiesel production.

REFERENCES

- Ambat, I., Srivastava, V., & Sillanpää, M. (2018). Recent advancement in biodiesel production methodologies using various feedstock: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, *90*, 356–369.
- Chang, F., Yan, C., & Zhou, Q. (2018). Synthesis of a New Copper-Based Supramolecular Catalyst and Its Catalytic Performance for Biodiesel Production. *International Journal of Chemical Engineering*, *2018*(1), 7452817.
- Elkelawy, M., Etaiw, S. E. D. H., Bastawissi, H. A. E., Marie, H., Radwan, A. M., Dawood, M. M., & Panchal, H. (2022). WCO biodiesel production by heterogeneous catalyst and using cadmium (II)-based supramolecular coordination polymer additives to improve diesel/biodiesel fueled engine performance and emissions. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 1–17.
- Gouda, S. P., Dhakshinamoorthy, A., & Rokhum, S. L. (2022). Metal-organic framework as a heterogeneous catalyst for biodiesel production: A review. *Chemical Engineering Journal Advances*, *12*, 100415.
- Kularathne, I. W., Gunathilake, C. A., Rathneweera, A. C., Kalpage, C. S., & Rajapakse, S. (2019). The effect of use of biofuels on environmental pollution—A review. *International Journal of Renewable Energy Research*, *9*(3), 1355–1367.
- Mandari, V., & Devarai, S. K. (2022). Biodiesel production using homogeneous, heterogeneous, and enzyme catalysts via transesterification and esterification reactions: A critical review. *BioEnergy Research*, *15*(2), 935–961.
- Raynal, M., Ballester, P., Vidal-Ferran, A., & van Leeuwen, P. W. (2014). Supramolecular catalysis. Part 1: non-covalent interactions as a tool for building and modifying homogeneous catalysts. *Chemical Society Reviews*, *43*(5), 1660–1733.
- Raynal, M., Ballester, P., Vidal-Ferran, A., & Van Leeuwen, P. W. (2014). Supramolecular catalysis. Part 2: artificial enzyme mimics. *Chemical Society Reviews*, *43*(5), 1734–1787.
- Rehman, A., Noor, T., Hussain, A., Iqbal, N., & Jahan, Z. (2021). Role of Catalysis in Biofuels Production Process—A Review. *ChemBioEng Reviews*, *8*(5), 417–438.
- Rizwanul Fattah, I. M., Ong, H. C., Mahlia, T. M. I., Mofijur, M., Silitonga, A. S., Rahman, S. A., & Ahmad, A. (2020). State of the art of catalysts for biodiesel production. *Frontiers in Energy Research*, *8*, 101.
- Wang, S., Ma, Y., Li, Y., Ji, X., Fei, X., Xu, L., Wang, Y., & Tian, J. (2024). Supramolecular immobilization of lipase inspired by octopus suckers for biodiesel production. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *684*, 133140.
- Zhang, G., He, L., Yuan, M., Li, H., Chang, T., & Qin, S. (2018). Clean and Green Procedure for the Synthesis of Biodiesel from the Esterification of Free Fatty Acids and Alcohol Catalyzed by 6-O-(sulfobutyl)- β -cyclodextrin. *Russian Journal of Applied Chemistry*, *91*, 1123–1128.

STABILITY ANALYSIS AND OPTIMAL CONTROL FOR HIV INFECTION WITHIN-HOST MODEL WITH IMMUNE RESPONSE AND ANTIRETROVIRAL TREATMENT

Ratchada Viriyapong^{1*} and Bunsarika Laokhetkid¹

¹Department of Mathematics, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

ABSTRACT

In this study, we propose a within-host model for HIV infection of CD4+ T-cells. The model includes immune response, immune impairment, and antiretroviral treatment. Two types of antiretroviral drugs (reverse transcriptase inhibitors (RTIs) and protease inhibitors (PIs)) are used within the model. Positivity and boundedness of solutions are verified. We present two equilibrium points which are infection-free and infected one. The basic reproduction number is calculated, and it becomes the threshold indicating the stability of each equilibrium point. When it is less than a unity, an infection-free equilibrium point is locally stable, whereas when it is greater than one an infected equilibrium point exists. Global stability of infection-free equilibrium point is obtained with some conditions. Further, we extend the model by applying optimal control problem in which both antiretroviral drugs becomes control variables. This is to minimize the HIV infection of CD4+ T-cells. Our numerical results demonstrate that RTIs drug alone could slightly reduces an HIV infection whereas the PIs drug alone manages to reduce the infection largely. However, a combination of both types of drugs gives the best result for eliminating HIV infection of CD4+ T-cells.

KEYWORDS: HIV infection, immune response, immune impairment, antiretroviral treatment, optimal control

*Corresponding Author: ratchadapa@nu.ac.th

Received: 02/09/2023; Revised: 01/03/2024; Accepted: 05/03/2024

1. INTRODUCTION

Human Immunodeficiency Virus (HIV) is a virus that attacks immune cells causing an increase in the risk of other diseases and infections. It has been and continues to be a major global public health issue. According to World Health Organization (WHO), 650,000 people died from HIV-related causes and about 38.4 million people living with HIV at the end of 2021 (WHO, 2022). CD4+ T-cells are the majority host cells for HIV to attack. CD4+ T-cells can be infected via the contact from free virus and of cell-to-cell. When the CD4+ T-cells are being attacked, they will stimulate cytotoxic T lymphocyte cells (CTL) to control viral load, this is done by killing the infected CD4+ T-cells.

To the present time, there is no cure for HIV infection, however, it can be managed by treatment regimens which are combination of antiretroviral drugs. These drugs suppress viral replication, reduce the

amount of HIV in patients' body and help patients to stay healthy. Antiretroviral drugs can be classified into six classes consisting of (i) nucleoside reverse transcriptase inhibitors (NRTIs), (ii) non-nucleoside reverse transcriptase inhibitors (NNRTIs), (iii) protease inhibitors (PIs), (iv) integrase inhibitors, (v) fusion inhibitors, and (vi) post-attachment inhibitors (Karrakchou et al., 2006; Arts et al., 2012; Jones, 2021). Note that the first two classes ((i) and (ii)) are subclasses of RTIs. In this study, we mainly focus on two classes which are RTIs and PIs. RTIs treatment helps disrupting new infection, whereas PIs inhibits the activity for viral replication.

Mathematical models have been used as useful tool to study various infectious diseases including HIV infection. Several researchers give attention to HIV infection in population level e.g., the work by Aldila, 2018, Omondi et al., 2019, Munawwaroh et al.,

2020, Ayele et al., 2021, and Omondi et al., 2022, whereas some researchers focus on within-host model, e.g., the work by Ogunlaran and Noutchie, 2016, Ngina et al., 2017, Sutimin et al., 2018, Sutimin et al., 2019, Sutimin et al., 2020, and Arenas et al., 2021. In this study, we focus on a within-host model of HIV infection to better understand the processes regulating HIV load dynamics. For within-host HIV dynamics, some researchers proposed models involves immune response, e.g., the work by Sutimin et al., 2018, and Sutimin et al., 2019 where Bai and Xu, 2021 (Bai and Xu, 2021) included immune impairment in their model. Several researchers proposed a model with antiretroviral treatments, e.g., the work by Sutimin et al., 2018, Sutimin et al., 2019, Ouifki and Witten, 2007, and Srivastava et al., 2009. Further, optimal control problems were applied in some HIV infection studies, e.g., the work by Arruda et al., 2015, Ngina et al., 2018, Olabode et al., 2019, Tjahjana and Sutimin, 2020, and Nath et al., 2023.

In this study, we propose a deterministic model of within-host HIV infection of CD4+ T-cells involving immune response and antiretroviral treatment. This model extends the work of Sutimin et al., 2019 by adding the role of immune impairment. Further, we also apply optimal control problem by considering both drugs RTIs and PIs as control variables in the model, where Sutimin et al., (Sutimin et al., 2019) did not include in their study. The paper is organized as follows. The model description is presented in the next section. All model analysis including positivity and boundedness of solutions, equilibrium points and their stability and the basic reproduction number is presented in Section 3. Section 4 introduces the optimal control

model, where its numerical results are presented in Section 5 with some discussion. Finally, we conclude this study in Section 6.

2. MODEL FORMULATION

A mathematical model of HIV infection of CD4+ T-cells is proposed. We modify the model of Sutimin et al., (Sutimin et al., 2019) by considering the importance of immune impairment and a reduction of free virus due to HIV infection of CD4+ T-cells by free virus itself. Later on in Section 4, we apply optimal control problem into our model which Sutimin et al., (Sutimin et al., 2019) did not study in their model. Our model therefore consists of five variables: the concentration of susceptible CD4+ T-cells (x), the concentration of exposed CD4+ T-cells (e), the concentration of infected CD4+ T-cells (y), the concentration of free virus (v), and the concentration of CTL cells (z). The definition of all parameters are shown in Table 1.

Our proposed model is as follows.

$$\begin{aligned}
 \frac{dx}{dt} &= \Lambda - \beta xv - kxy + (u_1\alpha + \eta)e - \mu x, \\
 \frac{de}{dt} &= \beta xv + kxy - \alpha e - \mu e - \eta e, \\
 \frac{dy}{dt} &= (1 - u_1)\alpha e - dy - qyz - \mu y, \\
 \frac{dv}{dt} &= (1 - u_2)gdv - \epsilon v - sv - \beta xv, \\
 \frac{dz}{dt} &= byz - \delta z - myz.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

The initial conditions are $x(0) \geq 0, e(0) \geq 0, y(0) \geq 0, v(0) \geq 0, z(0) \geq 0$.

Table 1 Definition of all parameters used in the model.

Parameter	Description	Parameter	Description
Λ	The constant production rate of CD4+ T-cells	g	The average number of virus particles produced by infected CD4+ T-cells
β	The infection rate of CD4+ T-cells by free virus	ϵ	The virus clearance rate
k	The infection rate of CD4+ T-cells by infected cells	s	The virus death rate
α	The increase rate of CD4+ T-cells due to RTIs drug	b	The proliferation rate of CTL cells
η	The reverting rate of infected cells to uninfected cells due to viral reverse transcription incomplection	δ	The decay rate of CTL cells

Table 1 Definition of all parameters used in the model (cont.).

Parameter	Description	Parameter	Description
μ	The natural death rate of CD4+ T-cells	m	The rate of immune impairment
d	The viral lysis rate of infected CD4+T-cells	u_1	The efficacy of RTIs drugs
q	The rate at which the infected CD4+ T-cells are eliminated by the CTL cells	u_2	The efficacy of PIs drugs

Here we assume that $0 < u_1 < 1$ and $0 < u_2 < 1$, and $b > m$.

3. MODEL ANALYSIS

3.1 Positivity of the solutions

Theorem 1. With nonnegative initial conditions, all solutions of equation (1) remain nonnegative for all $t > 0$.

Proof. For $t \geq 0$, we consider the five cases where each variable is the first variable to become zero and the other four variables remain nonnegative.

1. If $x(t)$ is the first variable to become zero at $t = t_x$, then at t_x , we have from equation (1) that

$$\frac{dx}{dt}(t_x) = \Lambda + (u_\alpha + \eta)e(t_x) \geq 0,$$

since $e(t_x) \geq 0$ and $\beta x(t_x)v(t_x) + kx(t_x)y(t_x) + \mu(t_x) = 0$. Therefore, $x(t) \geq 0$ in the positive neighbourhood of $t = t_x$.

2. If $e(t)$ is the first variable to become zero at $t = t_e$, then at t_e , we have from equation (1) that

$$\frac{de}{dt}(t_e) = \beta x(t_e)v(t_e) + kx(t_e)y(t_e) \geq 0,$$

since $x(t_e) \geq 0$ and $v(t_e) \geq 0, y(t_e) \geq 0$ and $\alpha e(t_e) + \mu e(t_e) + \eta(t_e) = 0$. Therefore, $e(t) \geq 0$ in the positive neighbourhood of $t = t_e$.

3. If $y(t)$ is the first variable to become zero at $t = t_y$, then at t_y , we have from equation (1) that

$$\frac{dy}{dt}(t_y) = (1 - u_1)\alpha e(t_y) \geq 0,$$

since $e(t_y) \geq 0$ and $dy(t_y) + qy(t_y)z(t_y) + \mu y(t_y) = 0$. Therefore, $y(t) \geq 0$ in the positive neighbourhood of $t = t_y$.

4. If $v(t)$ is the first variable to become zero at $t = t_v$, then at t_v , we have from equation (1) that

$$\frac{dv}{dt}(t_v) = (1 - u_2)gdy(t_v) \geq 0,$$

since $y(t_v) \geq 0$ and $\epsilon v(t_v) + sv(t_v) + \beta x(t_v)v(t_v) = 0$. Therefore, $v(t) \geq 0$ in the positive neighbourhood of $t = t_v$.

5. If $z(t)$ is the first variable to become zero at $t = t_z$, then at t_z , we have from equation (1) that

$$\frac{dz}{dt}(t_z) = 0,$$

since $by(t_z)z(t_z) + \delta z(t_z) + my(t_z)z(t_z) = 0$. Therefore, $z(t) \geq 0$ in the positive neighbourhood of $t = t_z$.

Therefore, the positivity of all solutions of system (1) is guaranteed for all $t > 0$. This completes the proof.

3.2 Invariant region

Theorem 2. Given all initial values are nonnegative and lie in the biologically feasible region Ω for system (1) defined by

$$\Omega = \left\{ (x, e, y, v, z) \in \mathbb{R}_+^5 : x + e + y + \frac{q}{b}z \leq \frac{\Lambda}{\phi}, v \leq \frac{(1 - u_2)gd\Lambda}{(s + \epsilon)\phi} \right\},$$

then all solutions of system (1) are nonnegative and remain inside the region Ω for all $t \geq 0$.

Proof. We first let $N(t) = x(t) + e(t) + y(t) + \frac{q}{b}z(t)$, then

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= \Lambda - \mu x - \mu e - dy - \mu y - \frac{q}{b}\delta z - \frac{q}{b}myz \\ &\leq \Lambda - \mu x - \mu e - \mu y - \frac{q}{b}\delta z \\ &\leq \Lambda - \phi N, \text{ where } \phi = \min(\mu, \delta). \end{aligned} \tag{2}$$

By solving (2), we obtain

$$N(t) \leq \frac{\Lambda}{\phi} - \left(\frac{\Lambda}{\phi} - N(0) \right) e^{-\phi t}. \tag{3}$$

Hence, $N(t)$ is bounded above by $\frac{\Lambda}{\phi}$ for all initial data in Ω . We next consider

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= (1 - u_2)gdy - \epsilon v - sv - \beta xv \\ &\leq (1 - u_2)gdy - sv - \epsilon v \end{aligned} \tag{4}$$

$$\leq (1-u_2)gd \frac{\Lambda}{\phi} - (s+\varepsilon)v. \quad (5)$$

Similarly, we have

$$v(t) \leq \frac{(1-u_2)gd\Lambda}{(s+\varepsilon)\phi} - \left(\frac{(1-u_2)gd\Lambda}{(s+\varepsilon)\phi} - v(t) \right) e^{(s+\varepsilon)t}.$$

Thus, $v(t)$ is bounded above by $\frac{(1-u_2)gd\Lambda}{(s+\varepsilon)\phi}$ for all

initial data in Ω .

Hence, the biologically feasible region Ω for system (1) is defined by

$$\Omega = \left\{ (x, e, y, v, z) \in \mathbb{R}_+^5 : x + e + y + \frac{q}{b}z \leq \frac{\Lambda}{\phi}, v \leq \frac{(1-u_2)gd\Lambda}{(s+\varepsilon)\phi} \right\}.$$

This completes the proof.

3.3 Equilibrium points

Two equilibrium points are calculated for this model. They are

i) the infection-free equilibrium point:

$$E_0 = (x_0, e_0, y_0, v_0, z_0) = \left(\frac{\Lambda}{d}, 0, 0, 0, 0 \right). \quad (6)$$

ii) the infected equilibrium point:

$$E_1 = (x^*, e^*, y^*, v^*, z^*) \text{ where}$$

$$e^* = \frac{(d+\mu)\delta + q\delta z^*}{(b-m)(1-u_1)\alpha}, \quad y^* = \frac{\delta}{b-m},$$

$$v^* = \frac{(1-u_2)gd\delta}{(b-m)(\varepsilon+s+\beta x^*)},$$

$$z^* = \frac{(1-u_1)(1-u_2)\alpha\beta gdx^*}{(\varepsilon+s+\beta x^*)(\alpha+\mu+\eta)q} + \frac{(1-u_1)\alpha kx^*}{(\alpha+\mu+\eta)q} - \frac{(d+\mu)}{q}.$$

x^* is a positive solution of equation

$$A_1x^2 + A_2x + A_3 = 0, \text{ where}$$

$$A_1 = (b-m)(1-u_1)(\alpha+\mu+\eta)\alpha\beta\mu + (1-u_1)(\alpha+\mu+\eta)\alpha\beta k\delta - (1-u_1)(u_1\alpha+\eta)\alpha\beta k\delta > 0,$$

$$\text{since } (1-u_1)(\alpha+\mu+\eta)\alpha\beta k\delta$$

$$> (1-u_1)(u_1\alpha+\eta)\alpha\beta k\delta,$$

$$A_2 = (b-m)(1-u_1)(\varepsilon+s)(\alpha+\mu+\eta)\alpha\mu$$

$$+ (1-u_1)(\varepsilon+s)(\alpha+\mu+\eta)\alpha k\delta$$

$$+ (1-u_1)(1-u_2)(\alpha+\mu+\eta)\alpha\beta g d\delta$$

$$- (1-u_1)(\varepsilon+s)(u_1\alpha+\eta)\alpha k\delta$$

$$- (b-m)(1-u_1)(\alpha+\mu+\eta)\alpha\beta\Lambda$$

$$- (1-u_1)(1-u_2)(u_1\alpha+\eta)\alpha\beta g d\delta,$$

$$A_3 = -(b-m)(1-u_2)(\varepsilon+s)(\alpha+\mu+\eta)\alpha\Lambda < 0.$$

Since $A_1 > 0$ and $A_3 < 0$, either the value of A_2 is positive or negative, there is only one time change of sign. By Descartes' rule of sign, this ensures that there is one positive solution of x^* . Thus, E_1 exists when

$$\frac{(1-u_1)(1-u_2)\alpha\beta gdx^*}{(\varepsilon+s+\beta x^*)(\alpha+\mu+\eta)q} + \frac{(1-u_1)\alpha kx^*}{(\alpha+\mu+\eta)q} > \frac{d+\mu}{q}.$$

3.4 The basic reproduction number (R_0)

The basic reproduction number (R_0) is the expected number of secondary cases of HIV infection caused by a typical case of infected CD4+ T-cells. The next-generation matrix method by van den Driessche and Watmough (2002) is used to calculate R_0 . We first write matrix F which is the matrix of the rate of appearance of new infections and then write matrix V which is the matrix of the transfer rate of individual infections. F and V of our model are shown below.

$$F = \begin{bmatrix} \beta xv + kxy \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ and } V = \begin{bmatrix} \alpha e + \mu e + \eta e \\ dy + \mu y + qyz - (1-u_1)\alpha e \\ \varepsilon v + sv + \beta xv - (1-u_2)gdv \end{bmatrix}.$$

The Jacobian matrices of F and V are

$$F = \begin{bmatrix} 0 & kx & \beta x \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ and } V = \begin{bmatrix} \alpha + \mu + \eta & 0 & 0 \\ -(1-u_1)\alpha & d + \mu + qz & 0 \\ 0 & -(1-u_2)gd & \varepsilon + s + \beta x \end{bmatrix}.$$

We next calculate the next generation matrix as follows :

$$F(E_0)V^{-1}(E_0)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{(1-u_1)\left(\varepsilon+s+\frac{\beta\Lambda}{\mu}\right)\frac{\alpha k\Lambda}{\mu} + (1-u_1)(1-u_2)\frac{\alpha g d\beta\Lambda}{\mu}}{(\alpha+\mu+\eta)(d+\mu)\left(\varepsilon+s+\frac{\beta\Lambda}{\mu}\right)} & \frac{\left(\varepsilon+s+\frac{\beta\Lambda}{\mu}\right)\frac{k\Lambda}{\mu} + (1-u_2)\frac{g d\beta\Lambda}{\mu}}{(d+\mu)\left(\varepsilon+s+\frac{\beta\Lambda}{\mu}\right)} & \frac{\frac{\beta\Lambda}{\mu}}{\varepsilon+s+\frac{\beta\Lambda}{\mu}} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

The spectral radius of the matrix FV^{-1} is the basic reproduction number, thus

$$R_0 = \frac{(1-u_1)\left(\varepsilon+s+\frac{\beta\Lambda}{\mu}\right)\alpha k\Lambda + (1-u_1)(1-u_2)\alpha g d\beta\Lambda}{\mu(\alpha+\mu+\eta)(d+\mu)\left(\varepsilon+s+\frac{\beta\Lambda}{\mu}\right)}.$$

(7)

3.5 Stability of infection-free equilibrium point

● **Local stability of infection-free equilibrium point**

Theorem 3. The infection-free equilibrium point (E_0) is locally asymptotically stable if $R_0 < 1$, otherwise it is unstable.

Proof. The Jacobian matrix at the infection-free equilibrium point is

$$J(x_0, e_0, y_0, v_0, z_0) = \begin{bmatrix} -\mu & u_1\alpha + \eta & -\frac{k\Lambda}{\mu} & -\frac{\beta\Lambda}{\mu} & 0 \\ 0 & -\alpha - \mu - \eta & \frac{k\Lambda}{\mu} & \frac{\beta\Lambda}{\mu} & 0 \\ 0 & (1-u_1)\alpha & -d - \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1-u_2)gd & -\varepsilon - s - \frac{\beta\Lambda}{\mu} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\delta \end{bmatrix} \tag{8}$$

Its first two eigenvalues are $\lambda_1 = -\mu < 0$, $\lambda_2 = -\delta < 0$.

And the characteristic equation for the remaining 3×3 matrix is $\lambda^3 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda + a_3 = 0$, where

$$\begin{aligned} a_1 &= \varepsilon + s + \frac{\beta\Lambda}{\mu} + d + 2\mu + \alpha + \eta, \\ a_2 &= (d + 2\mu + \alpha + \eta)\left(\varepsilon + s + \frac{\beta\Lambda}{\mu}\right) + (\alpha + \mu + \eta)(d + \mu) - (1-u_1)\frac{\alpha k\Lambda}{\mu}, \\ a_3 &= (\alpha + \mu + \eta)(d + \mu)\left(\varepsilon + s + \frac{\beta\Lambda}{\mu}\right) \\ &\quad - \left[(1-u_1)\left(\varepsilon + s + \frac{\beta\Lambda}{\mu}\right)\frac{\alpha k\Lambda}{\mu} + (1-u_1)(1-u_2)\frac{\alpha g d \beta\Lambda}{\mu} \right] \\ &= (\alpha + \mu + \eta)(d + \mu)\left(\varepsilon + s + \frac{\beta\Lambda}{\mu}\right)(1-R_0). \end{aligned}$$

When $R_0 < 1$, we obtain $a_1 > 0$, $a_3 > 0$ and $a_1 a_2 - a_3 > 0$. Thus, with Routh-Hurwitz Criterion, the infection-free equilibrium point is locally asymptotically stable if $R_0 < 1$. It is unstable when $R_0 > 1$. This completes the proof.

● **Global stability of the infection-free equilibrium point**

We use Lyapunov method (see, e.g., Luenberger, 1979) and the concept is as follows.

Let E be an open subset of \mathbb{R}^n containing equilibrium point x_0 . Suppose $f \in C^1(E)$ and that $f(x_0) = 0$. Suppose further that there exists a real valued function $L \in C^1(E)$ satisfying $L(x_0) = 0$ and $L(x) > 0$ if $x \neq x_0$. If

1. $L(x) < 0$ for all $E \setminus x_0$, x_0 is asymptotically stable.

2. $L(x) > 0$ for all $x \in E$, x_0 is unstable.

Theorem 4. If $R_0 < 1$ and $1 - \frac{(\alpha + \mu + \eta)(\varepsilon + s)q\mu^2}{(1-u_2)\alpha g d \beta\Lambda^2} < u_1 < 1$, then the infection-free equilibrium point E_0 is globally asymptotically stable.

Proof. We use Lyapunov method in this proof and it is defined as

$$\begin{aligned} L &= (1-u_1)\left(\varepsilon + s + \frac{\beta\Lambda}{\mu}\right)\alpha e + (\alpha + \mu + \eta)\left(\varepsilon + s + \frac{\beta\Lambda}{\mu}\right)y \\ &\quad + (1-u_1)\frac{\alpha\beta\Lambda}{\mu}v. \end{aligned}$$

Here, L is positive definite. We next calculate the derivative of L with respect to time,

$$\begin{aligned} L' &= \frac{\partial L}{\partial e} \cdot \frac{de}{dt} + \frac{\partial L}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dt} + \frac{\partial L}{\partial v} \cdot \frac{dv}{dt} \\ &= (1-u_1)\left(\varepsilon + s + \frac{\beta\Lambda}{\mu}\right)\alpha [\beta xv + kxy - \alpha e - \mu e - \eta e] \\ &\quad + (\alpha + \mu + \eta)\left(\varepsilon + s + \frac{\beta\Lambda}{\mu}\right) [(1-u_1)\alpha e - dy - qyz - \mu y] \\ &\quad + (1-u_1)\frac{\alpha\beta\Lambda}{\mu} [(1-u_2)gdv - \varepsilon v - sv - \beta xv] \\ &\leq (1-u_1)\left(\varepsilon + s + \frac{\beta\Lambda}{\mu}\right)\frac{\alpha k\Lambda}{\mu} y + (1-u_1)(1-u_2)\frac{\alpha g d \beta\Lambda}{\mu} y \\ &\quad - (\alpha + \mu + \eta)(d + \mu)\left(\varepsilon + s + \frac{\beta\Lambda}{\mu}\right) y \\ &\quad + (1-u_1)\left(\varepsilon + s + \frac{\beta\Lambda}{\mu}\right)\frac{\alpha\beta\Lambda}{\mu} \frac{(1-u_2)gd\Lambda}{(s + \varepsilon)\mu} \\ &\quad - (\alpha + \mu + \eta)\left(\varepsilon + s + \frac{\beta\Lambda}{\mu}\right) \geq q \\ &= (\alpha + \mu + \eta)(d + \mu)\left(\varepsilon + s + \frac{\beta\Lambda}{\mu}\right) y (R_0 - 1) \\ &\quad + \frac{(1-u_1)(1-u_2)\left(\varepsilon + s + \frac{\beta\Lambda}{\mu}\right)\alpha g d \beta\Lambda^2}{(\varepsilon + s)\mu^2} \\ &\quad - (\alpha + \mu + \eta)\left(\varepsilon + s + \frac{\beta\Lambda}{\mu}\right) q. \end{aligned}$$

We obtain that $L' < 0$ when $R_0 < 1$ and

$$1 - \frac{(\alpha + \mu + \eta)(\varepsilon + s)q\mu^2}{(1-u_2)\alpha g d \beta\Lambda^2} < u_1 < 1.$$

Therefore, E_0 is globally asymptotically stable if

$$R_0 < 1 \text{ and } 1 - \frac{(\alpha + \mu + \eta)(\varepsilon + s)q\mu^2}{(1 - u_2)\alpha g d \beta \Lambda^2} < u_1 < 1.$$

This completes the proof.

4. Optimal control model

We apply two optimal control variables in the model of equation (1). This is to look for the best strategy in controlling the HIV infection of CD4+ T-cells. The controls variables are

- i) $u_1(t)$ is the treatment effort by RTIs drugs.
- ii) $u_2(t)$ is the treatment effort by PIs drugs.

The optimal control is for $R_0 > 1$, and this model can be written as

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \Lambda - \beta xv - kxy + (u_1(t)\alpha + \eta)e - \mu x, \\ \frac{de}{dt} &= \beta xv + kxy - \alpha e - \mu e - \eta e, \\ \frac{dy}{dt} &= (1 - u_1(t))\alpha e - dy - qyz - \mu y, \\ \frac{dv}{dt} &= (1 - u_2(t))gdy - \varepsilon v - sv - \beta xv, \\ \frac{dz}{dt} &= byz - \delta z - myz. \end{aligned} \tag{9}$$

We would like to minimize the concentration of exposed CD4+ T-cells, the concentration of infected CD4+ T-cells and the concentration of free virus at a minimal cost of control over the time interval $[0, T]$. The objective function is defined by

$$J(u_1, u_2) = \min \int_0^T [W_1 e(t) + W_2 y(t) + W_3 v(t) + \frac{1}{2} (W_4 u_1^2(t) + W_5 u_2^2(t))] dt.$$

The initial conditions are $x(0) \dots 0, e(0) \dots 0, y(0) \dots 0, v(0) \dots 0$ and $z(0) \dots 0$.

The notations W_1, W_2 and W_3 are the weight constants and $W_4 u_1^2(t)$ and $W_5 u_2^2(t)$ represent the costs associated with antiretroviral drugs used to treat HIV infection by disrupting new infection with RTIs drug, and antiretroviral drugs used to treat HIV infection by blocking protease and preventing new virus from becoming a mature virus that can infect other CD4+ T-

cells with PIs drug. The following function is the Lagrangian of the optimal control problem:

$$f(e, y, v, u_1, u_2) = W_1 e(t) + W_2 y(t) + W_3 v(t) + \frac{1}{2} (W_4 u_1^2(t) + W_5 u_2^2(t)).$$

Following the Pontryagin's Minimum Principle (PMP) (Pontryagin et al., 1986), the Hamiltonian for the optimal control problem is defined as

$$\begin{aligned} H &= W_1 e(t) + W_2 y(t) + W_3 v(t) \\ &+ \frac{1}{2} (W_4 u_1^2(t) + W_5 u_2^2(t)) \\ &+ \lambda_x [\Lambda - \beta xv - kxy + (u_1(t)\alpha + \eta)e - \mu x] \\ &+ \lambda_e [\beta xv + kxy - \alpha e - \mu e - \eta e] \\ &+ \lambda_y [(1 - u_1(t))\alpha e - dy - qyz - \mu y] \\ &+ \lambda_v [(1 - u_2(t))gdy - \varepsilon v - sv - \beta xv] \\ &+ \lambda_z [byz - \delta z - myz], \end{aligned} \tag{10}$$

where the adjoint functions associated with the state equations for x, e, y, v and z are $\lambda_x, \lambda_e, \lambda_y, \lambda_v$ and λ_z , respectively.

Theorem 6. Let optimal state solutions with associated optimal control variables $u_1^*(t)$, and $u_2^*(t)$ be $\tilde{x}, \tilde{e}, \tilde{y}, \tilde{v}$ and \tilde{z} . Then, there exists adjoint variables $\lambda_x, \lambda_e, \lambda_y, \lambda_v$ and λ_z satisfying:

$$\begin{aligned} \lambda_x' &= -\left[-(\beta\tilde{v} + k\tilde{y} + \mu)\lambda_x + (\beta\tilde{v} + k\tilde{y})\lambda_e - (\beta\tilde{v})\lambda_y \right] \\ \lambda_e' &= -\left[W_1 + (u_1(t)\alpha + \eta)\lambda_x - (\alpha + \mu + \eta)\lambda_e + (1 - u_1(t))\alpha\lambda_y \right] \\ \lambda_y' &= -\left[W_2 - k\tilde{x}\lambda_x + k\tilde{x}\lambda_e - (d + q\tilde{z} + \mu)\lambda_y \right. \\ &\quad \left. + (1 - u_2(t))gd\lambda_v + (b\tilde{z} - m\tilde{z})\lambda_z \right] \\ \lambda_v' &= -\left[W_3 - \beta\tilde{x}\lambda_x + \beta\tilde{x}\lambda_e - (\varepsilon + s + \beta\tilde{x})\lambda_v \right] \\ \lambda_z' &= -\left[-q\tilde{y}\lambda_y + (b\tilde{y} - \delta - m\tilde{y})\lambda_z \right]. \end{aligned}$$

Its transversality conditions are

$$\lambda_x(T) = 0, \lambda_e(T) = 0, \lambda_y(T) = 0, \lambda_v(T) = 0, \lambda_z(T) = 0$$

with characterization of the optimal control

$$\begin{aligned} u_1^*(t) &= \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{\alpha\tilde{e}(\lambda_y - \lambda_x)}{W_4}, u_{1\max} \right\} \right\}, \\ u_2^*(t) &= \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{gd\tilde{y}\lambda_v}{W_5}, u_{2\max} \right\} \right\}. \end{aligned}$$

Proof. By using the Pontryagin's Minimum Principle, we determine the adjoint equations. We differentiate the

Hamiltonian with respect to x, e, y, v and z , respectively. The adjoint system is therefore as follows :

$$\begin{aligned} \lambda_x' &= -\frac{\partial H}{\partial x} = -\left[-(\beta\tilde{v} + k\tilde{y} + \mu)\lambda_x + (\beta\tilde{v} + k\tilde{y})\lambda_e - (\beta\tilde{v})\lambda_v\right] \\ \lambda_e' &= -\frac{\partial H}{\partial e} = -\left[W_1 + (u_1(t)\alpha + \eta)\lambda_x - (\alpha + \mu + \eta)\lambda_e \right. \\ &\quad \left. + (1 - u_1(t))\alpha\lambda_y\right] \\ \lambda_y' &= -\frac{\partial H}{\partial y} = -\left[W_2 - k\tilde{x}\lambda_x + k\tilde{x}\lambda_e - (d + q\tilde{z} + \mu)\lambda_y \right. \\ &\quad \left. + (1 - u_2(t))gd\lambda_v + (b\tilde{z} - m\tilde{z})\lambda_z\right] \quad (11) \\ \lambda_v' &= -\frac{\partial H}{\partial v} = -\left[W_3 - \beta\tilde{x}\lambda_x + \beta\tilde{x}\lambda_e - (\varepsilon + s + \beta\tilde{x})\lambda_v\right] \\ \lambda_z' &= -\frac{\partial H}{\partial z} = -\left[-q\tilde{y}\lambda_y + (b\tilde{y} - \delta - m\tilde{y})\lambda_z\right]. \end{aligned}$$

Next, we determine $\frac{\partial H}{\partial u_i} = 0$ at u_i^* , for $i=1,2$ and we obtain

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial u_1} &= W_4 u_1(t) + \alpha\tilde{e}\lambda_x - \alpha\tilde{e}\lambda_y = 0 \\ u_1 &= \frac{\alpha\tilde{e}(\lambda_y - \lambda_x)}{W_4}. \quad (12) \\ \frac{\partial H}{\partial u_2} &= W_5 u_2(t) - gd\tilde{y}\lambda_v = 0 \\ u_2 &= \frac{gd\tilde{y}\lambda_v}{W_5}. \quad (13) \end{aligned}$$

Then, we have optimal control variables as

$$u_1^*(t) = \max\left\{0, \min\left\{\frac{\alpha\tilde{e}(\lambda_y - \lambda_x)}{W_4}, u_{1\max}\right\}\right\}, \quad (14)$$

$$u_2^*(t) = \max\left\{0, \min\left\{\frac{gd\tilde{y}\lambda_v}{W_5}, u_{2\max}\right\}\right\}. \quad (15)$$

This completes the proof.

5. Numerical simulation of optimal control

model

Numerical simulation of the dynamics of the equation (9) is performed. We use the forward-backward sweep method to solve the optimality system numerically. The optimal control is applied continuously for 300 days. All parameter values used in this study is shown in Table 2. Some parameters used are from previous research as indicated in Table 2 and they are based on existing experiment data or data collected from clinical experiments and some are assumed. The numerical results are shown in Figure 1 – Figure 3. We divide our results into three strategies as shown below.

Table 2. Parameter values of the model used in numerical study.

Parameter	Value	Unit	Ref
Λ	23	day^{-1}	Arenas et al., 2021
β	0.0005	mm^3 / day	Sutimin et al., 2019
k	0.0008	mm^3 / day	Sutimin et al., 2019
α	0.1	$1 / day$	Sutimin et al., 2019
η	0.01	$1 / day$	Assume
μ	0.02	$1 / day$	Sutimin et al., 2019
d	0.24	$1 / day$	Sutimin et al., 2019
q	0.01	$1 / day$	Sutimin et al., 2019
g	100	$cell / day$	Sutimin et al., 2019
ε	2.4	$1 / day$	Arenas et al., 2021
s	2.4	$1 / day$	Sutimin et al., 2019
b	0.01	$1 / day$	Sutimin et al., 2019
δ	0.05	$1 / day$	Sutimin et al., 2019
m	0.005	$cells^{-1} / day^{-1}$	Bai and Xu, 2021

5.1 Strategy A : Control with treatment effort by using RTIs drug only

We use control u_1 to optimize the objective function while we set u_2 to be zero. Figure 1(a) shows that the concentration of susceptible CD4+ T-cells (x) in control case is equal to those in non-control case for the first few days and after that it largely increases and reaches higher equilibrium value than non-control case. Figure 1(b) shows that the concentration of exposed CD4+ T-cells (e) in control condition rarely changes in the first 50 days comparing to non-control one, whereas after that it drops to zero on 60th day which is lower equilibrium value than non-control case. Similarly, Figure 1(c) and (d) show that the concentration of infected CD4+ T-cells (y) and the concentration of free virus (v) have the same pattern as of Figure 1(b). Figure 1(f) shows that the concentration of CTL cells (z) is largely lower in control case than non-control one and drops to zero as equilibrium value towards 125th day. Figure 1(g) shows the strategy of u_1 that we have to start controlling with u_1 at around 7%. After that it has to go up to 90% on 30th day until 300th day, then it can be dropped down to zero.

5.2 Strategy B : Control with treatment effort by using PIs drug only

Here, we set the control u_1 to be zero and use control u_2 to optimize the objective function. Figure 2(a) shows that the concentration of susceptible CD4+ T-cells (x) in control case decreases much less than in non-control one and it fluctuates around 760–960 $cell/mm^3$ until the end of 300 days which reaches higher equilibrium value. Figure 2(b) shows that the concentration of exposed CD4+ T-cells (e) is significantly lower in control case for the first peak and slightly lower in the second peak than without control case. Further, it reaches lower equilibrium value in control one comparing to without control condition.

Figure 2(c) shows that the concentration of infected CD4+ T-cells (y) is also significantly lower in control case, and time for the peak to occur is slightly slower than non-control one. However, it can be seen that the concentration of infected CD4+ T-cells (y) is slightly higher in the second peak in control case, whereas it reduces to the same equilibrium value towards the end. Figure 2(d) shows that the concentration of free virus (v) is dramatically lower in control case with the peak of about 25 $cell/mm^3$, whereas it reaches the peak to more than 600 $cell/mm^3$ in no control one. After that it decreases to reach lower equilibrium value than without control one. Figure 2(f) shows that in control condition, the concentration of CTL cells (z) is largely lower than without control case and is lower all along towards 300th day. Figure 2(g) shows that in this strategy we have to start controlling u_2 at the maximum rate of 90% for all 300 days and finally it can be dropped down to 0% at the end. From results above, this strategy demonstrates that u_2 could have a bigger impact in reducing the concentration of e , y , v and z .

5.3 Strategy C : Combination of all controls

A combination of both controls is applied to optimize the objective function. Figure 3(a) shows that the concentration of susceptible CD4+ T-cells (x) reduces much slower in control case than without control one and after 30 days it gradually increases to almost 1,148 $cell/mm^3$ at the end. Figure 3(b) shows a dramatic decrease in the concentration of exposed CD4+ T-cells (e) in control case with the peak of about 417 $cell/mm^3$, whereas it increases and reaches the peak of more than 1,077 $cell/mm^3$ in non-control case. After that it drops to zero on the 75th day in control case, which gives better result than Strategy A and B. Similarly, Figure 3(c) shows a dramatic reduction in the concentration of infected CD4+ T-cells (y) in control case with the peak of about 58 $cell/mm^3$,

whereas it increases and reaches the peak of more than 125 cell/mm^3 in non-control one. Then, it drops to zero on the 75^{th} day in control condition, which again gives better result than Strategy A and B. In the control condition, Figure 3(d) shows a significant decrease in the concentration of free virus (v) with the peak of about 25 cell/mm^3 , whereas it increases and reaches the peak of more than 600 cell/mm^3 in without control one, and it reaches zero on the 25^{th} day. Finally, Figure 3(e) shows that the concentration of CTL cells (z) reduces largely in control case and it reduces to reach zero on 125^{th} day. Hence, we can see that the results in this strategy gives better control in reducing the HIV infection than previous two strategies. Figure 3(f) shows that in this strategy we need to start controlling u_1 from 0% for about 15 days and increases u_1 gradually to 90% on 105^{th} day, then remains at 90% until 290^{th} day. After that we can

gradually drop u_1 to zero towards the 300^{th} day. Further, Figure 3(g) shows that we need to start controlling u_2 at the maximum rate of 90% for all 300 days and can drop it to zero on 300^{th} day.

Overall, our results demonstrate that with the treatment effort, i.e., the use of RTIs drug (u_1) alone in Strategy A can slightly reduce the concentration of e, y, v and z , although the equilibrium value of e, y and v reach zero. The use of PIs drug (u_2) alone gives a better result in reducing e, y, v and z than a control with u_1 alone, although the equilibrium value of e and y do not seem to reach zero. Further, Strategy C shows that when using both drugs, the concentration of e, y, v and z not only reduce largely as Strategy B, but also reach zero as Strategy A. Moreover, time for the peak to occur of e, y, v and z in control case is slightly later than those of non-control case. Hence, Strategy C gives the best result.

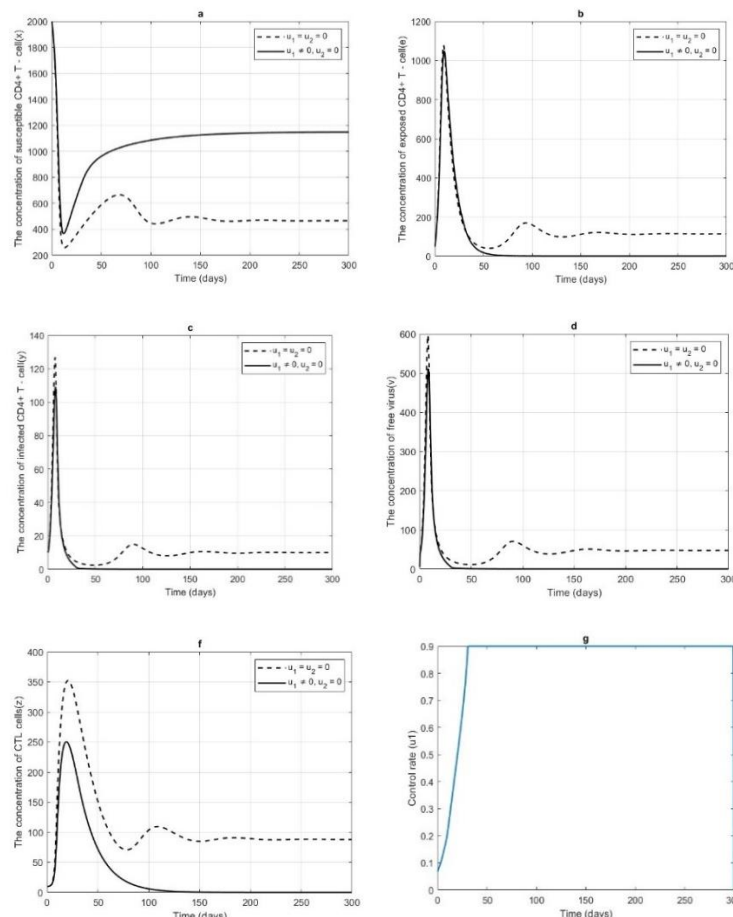


Figure 1 Numerical simulation of the optimal control model (9) with treatment effort by using RTIs drug of u_1 alone when $u_{1\max} = 0.9$.

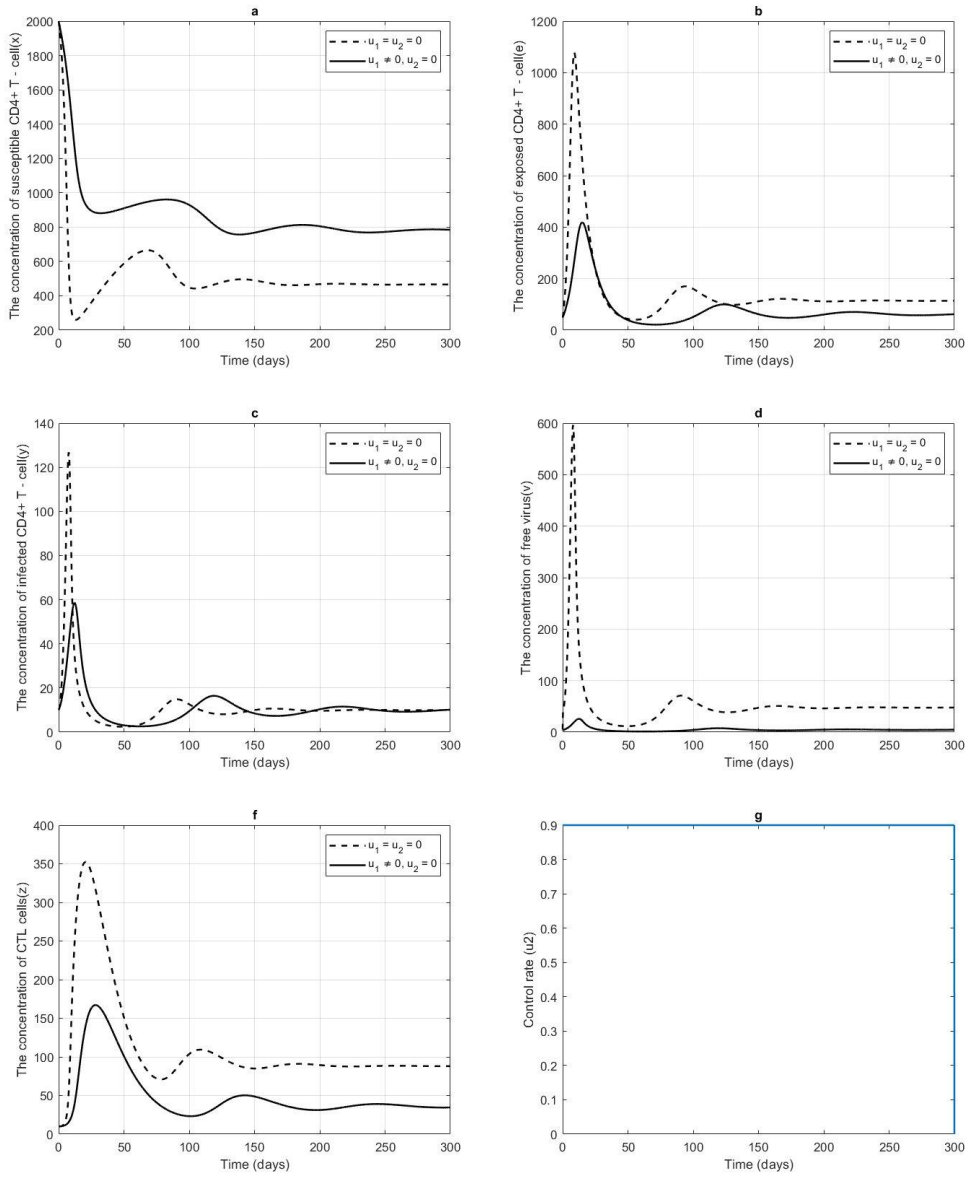
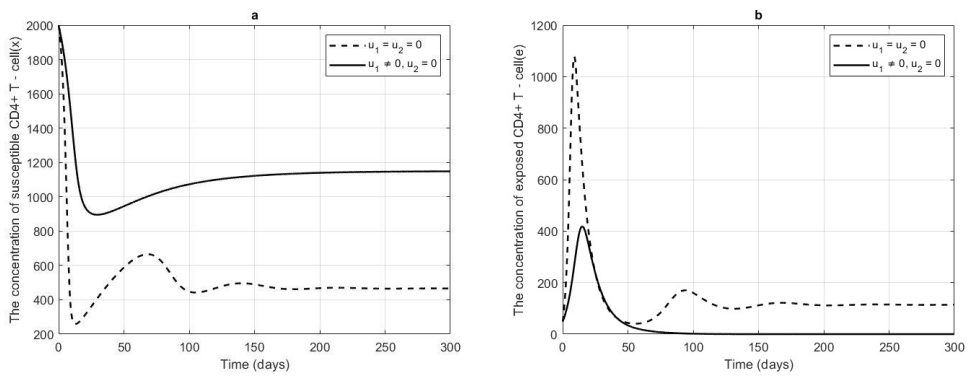


Figure 2 Numerical simulation of the optimal control model (9) with optimal control of treatment effort by using PIs drug of u_2 alone when $u_{2\max} = 0.9$.



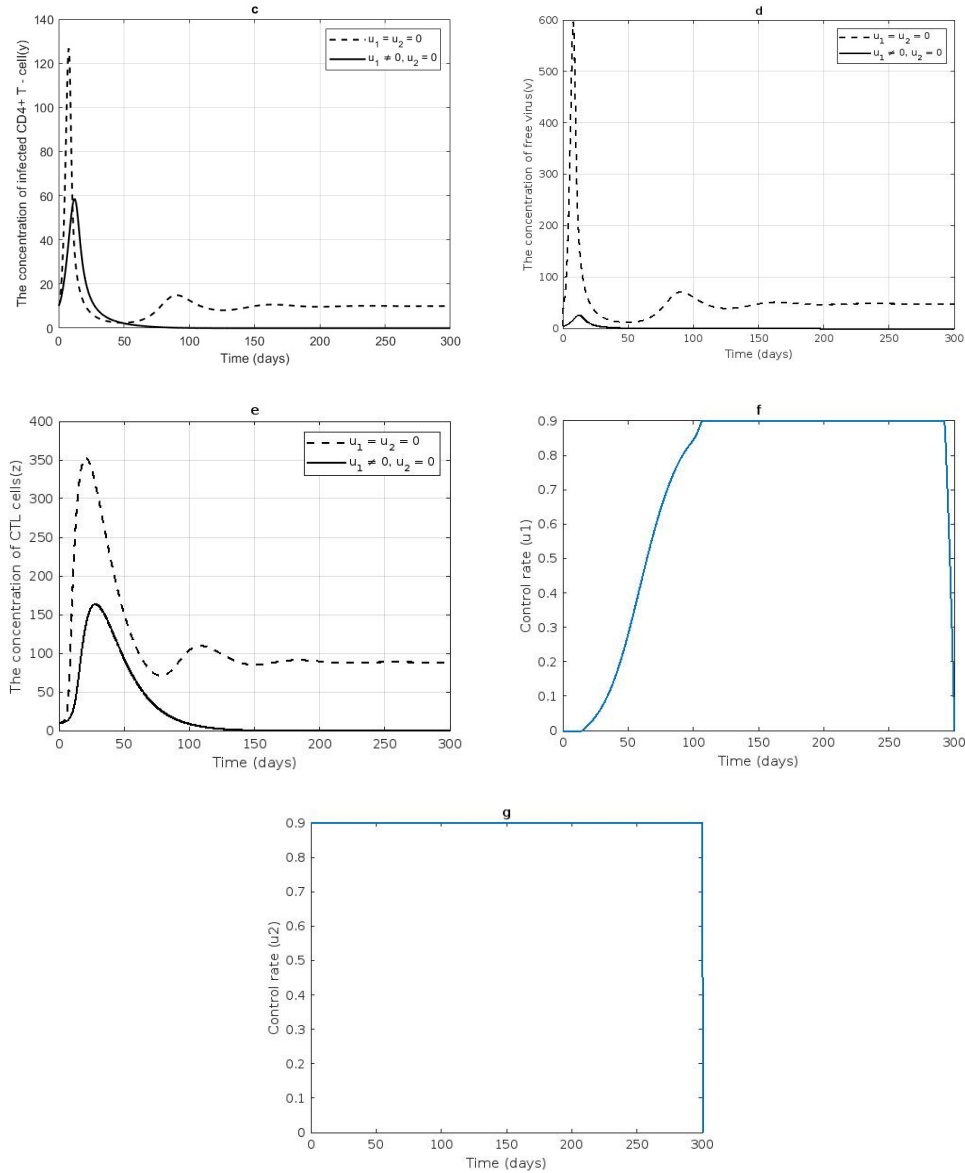


Figure 3 Numerical simulation of the optimal control model (9) with all optimal controls u_1 and u_2 when $u_{1\max} = u_{2\max} = 0.9$.

6. Conclusions

Even with great attempt of various organization trying to eliminate HIV infection, there are still a high number of HIV infected patients globally every year. A better understanding of virus kinetic of HIV infection therefore remains essential. In this study, we propose a within-host model of HIV infection of CD4+ T-cells. The model is modified from the work of Sutimin et al., (Sutimin et al., 2019) by including the immune impairment and a fact that free viruses are reduced due to an HIV infection by free virus itself. The model consists of five variables: the concentration of susceptible CD4+ T-cells (x), the concentration of

exposed CD4+ T-cells (e), the concentration of infected CD4+ T-cells (y), the concentration of free virus (v), and the concentration of CTL cells (z). The positivity and boundedness of model solutions are verified. Two equilibrium points are obtained and they are infection-free and infected steady state. The basic reproduction number is calculated and when it is less than a unity, an infection-free equilibrium point is locally stable. When it is greater than one, an infected equilibrium point exists. Infection-free equilibrium point is globally stable when they meet some required conditions. In addition, optimal control problem is applied into the model by considering both type of

antiretroviral drugs, which are RTIs and PIs drugs as control variables. We performed some numerical simulations of optimal control model. The results demonstrate that RTIs drug alone could slightly reduce an HIV infection whereas the PIs drug alone gives better result in reducing the infection than RTIs drug. Nevertheless, for eliminating an HIV infection of CD4+ T-cells, a combination of both types of drugs gives the best result. Our study therefore encourages a mixed use of antiretroviral drugs, RTIs and PIs, however, an amount of each type of drugs are to be decided by the medical doctors. Further, we like to point out that our numerical results of optimal control model show that with optimal control, it can reduce an infection to zero. However, if the controls are omitted, an infection could occur and increase again. Hence, antiretroviral drugs are required to make $R_0 < 1$ in order to let the infection-free equilibrium point stable all the time.

Acknowledgement

This work has been supported by Faculty of Science, Naresuan University, Thailand.

REFERENCES

- Arenas, A. J., González-Parra, G., Naranjo, J. J., Cogollo, M., & De La Espriella, N. (2021). Mathematical analysis and numerical solution of a model of HIV with a discrete time delay. *Mathematics*, 9(3), 257. <http://doi.org/10.3390/math9030257>.
- Arruda, E. F., Dias, C. M., de Magalhães, C. V., Pastore, D. H., Thomé, R. C., & Yang, H. M. (2015). An optimal control approach to HIV immunology. *Applied Mathematics*, 6(6), 1115–1130. <https://doi.org/10.4236/am.2015.66102>.
- Arts, E. J., & Hazuda, D. J. (2012). HIV-1 antiretroviral drug therapy. *Cold Spring Harbor perspectives in medicine*, 2(4): a007161. <https://doi.org/10.1101/cs-hperspect.a007161>.
- Ayele, T. K., Goufo, E. F. D., & Mugisha, S. (2021). Mathematical modeling of HIV/AIDS with optimal control: a case study in Ethiopia. *Results in Physics*, 26, 104263. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104263>.
- Bai, N., & Xu, R. (2021). Mathematical analysis of an HIV model with latent reservoir, delayed CTL immune response and immune impairment. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 18(2), 1689–1707. <https://doi.org/10.3934/mbe.2021087>.
- Jones, A. (2021). Types of antiretroviral medications. Retrieved February 9, 2023, from <https://www.aidsmap.com/about-hiv/types-antiretroviral-medications>
- Karrakchou, J., Rachik, M., & Gourari, S. (2006). Optimal control and infectiology: application to an HIV/AIDS model. *Applied mathematics and computation*, 177(2): 807–818. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2005.11.092>.
- Li, Y., & Muldowney, J. S. (1993). On Bendixson's criterion. *Journal of Differential Equations*, 106(1), 27–39. <https://doi.org/10.1006/jdeq.1993.1097>.
- Li, M. Y., & Muldowney, J. S. (1996). A geometric approach to global-stability problems. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 27(4), 1070–1083. <https://doi.org/10.1137/S0036141094266449>.
- Luenberger, D. G. (1979). *Introduction to Dynamic System: Theory, Models and Applications*, 1st ed., John Wiley & Sons, New York. pp.336–38.
- Aldila, M., & Aldila, D. (2018). Mathematical model for HIV spreads control program with ART treatment. In *Journal of physics: Conference series*, 9:012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/974/1/012035>.
- Munawwaroh, D. A., Heri, R., Khabibah, S. U. S., & Anindita, H. P. (2020, April). Analysis stability of HIV/AIDS epidemic model of different infection stage in closed community. In *Journal of Physics: Conference Series*. 1524(1), 012130. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1524/1/012130>.
- Nath, B. J., Dehingia, K., Sadri, K., Sarmah, H. K., Hosseini, K., & Park, C. (2023). Optimal control of combined antiretroviral therapies in an HIV infection model with cure rate and fusion effect. *International Journal of Biomathematics*, 16(01), 2250062. <https://doi.org/10.1142/S1793524522500620>.
- Ngina, P. M., Mbogo, R. W., & Luboobi, L. S. (2017). Mathematical modelling of in-vivo dynamics of HIV subject to the influence of the CD8+ T-cells. *Applied Mathematics*, 8(08), 1153. <https://doi.org/10.4236/am.2017.88087>.
- Ngina, P., Mbogo, R. W., & Luboobi, L. S. (2018). Modelling Optimal Control of In-Host HIV Dynamics Using Different Control Strategies. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2018(1), 9385080. <https://doi.org/10.1155/2018/9385080>.
- Ogunlaran, O. M., & Oukouomi Noutchie, S. C. (2016). Mathematical model for an effective management of HIV infection. *BioMed research international*, 2016(1), 4217548. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4217548>
- Olabode, D., Rong, L., & Wang, X. (2019). Optimal control in HIV chemotherapy with termination viral load and latent reservoir. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 16(2), 619–635. <https://doi.org/10.3934/mbe.2019030>.
- Omondi, E. O., Mbogo, R. W., & Luboobi, L. S. (2019). A mathematical modelling study of HIV infection in two heterosexual age groups in Kenya. *Infectious Disease Modelling*, 4, 83–98. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2019.04.003>
- Omondi, E. O., Mbogo, R. W., & Luboobi, L. S. (2022). A mathematical model of HIV transmission between commercial sex workers and injection drug users. *Research in Mathematics*, 9(1), 2082044. <https://doi.org/10.1080/27684830.2022.208244>.
- Oufiki, R., & Witten, G. (2007). A model of HIV-1 infection with HAART therapy and intracellular delays. *Discrete and Continuous Dynamical Systems-B*, 8(1), 229–240. <https://doi.org/10.3934/dcdsb.2007.8.229>.

- Pontryagin, L. S. (1986). *Mathematical theory of optimal processes*, 1st ed., Gordon and Breach Science, New York.
- Srivastava, P. K., Banerjee, M., & Chandra, P. (2009). Modeling the drug therapy for HIV infection. *Journal of Biological Systems*, 17(02), 213–223. <https://doi.org/10.1142/S02183390090002764>.
- Sutimin, S., Sunarsih, S., & Tjahjana, R. (2018). Modeling CD4+ T-cells and CTL response in HIV-1 infection with antiretroviral therapy. *Communication in Biomathematical Sciences*, 1(2), 100–109. <https://doi.org/10.5614/cbms.2018.1.2.3>.
- Sutimin, S., Sunarsih, S., & Tjahjana, R. (2020). Modeling of HIV-1 infection incorporating cell-to-cell transmission and viral clearance of CD4+ T cells. In *AIP Conference Proceedings*, 2264, 020007. <https://doi.org/10.1063/5.0024193>.
- Thahjana, H. (2019). Analysis of mathematical model of HIV-1 infection of CD4+ T cells with CTL response and antiretroviral treatment. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1217, 012074. doi.org/10.1088/1742-6596/1217/1/012074
- Tjahjana, R. H., & Sutimin, S. (2020). Optimal Control Approach For HIV-1 Infection in CD4+ T Cells with RTI and PI Treatments. *International Journal of Computing Science and Applied Mathematics*, 6(2), 42–45.
- Van den Driessche, P., & Watmough, J. (2002). Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission. *Mathematical biosciences*, 180(1–2), 29–48. [https://doi.org/10.1016/S0025-5564\(02\)00108-6](https://doi.org/10.1016/S0025-5564(02)00108-6).
- WHO. (2022). HIV. Retrieved February 9, 2023, from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/hiv-aids>

Wave solutions to the combined KdV–mKdV equation via two methods with the Riccati equation

Jiraporn Sanjun^{1*}, Kamonchanok Muenduang¹, Sirasrete Phoosree²

¹Department of Mathematics, Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University, Thailand

²Education Program in Mathematics, Faculty of Education, Suratthani Rajabhat University, Thailand

ABSTRACT

The exact traveling wave solutions of the combined KdV–mKdV equation, which are the partial differential equations, were examined using the simple equation method with the Riccati equation and the modified extended tanh–function method. The solutions of the combined KdV–mKdV equation are obtained in terms of hyperbolic functions and trigonometric functions. Some solutions are created in the form of kink waves, which are represented by the two–dimensional graph, the three–dimensional graph, and the contour graph. Moreover, the results validated that the methods used in this study were powerful mathematical tools to find exact wave solutions to nonlinear models encountered in various areas of science and engineering.

KEYWORDS: the simple equation method with the Riccati equation, the modified extended tanh–function method, the combined KdV–mKdV equation, partial differential equation.

*Corresponding Author: jiraporn.san@sru.ac.th

Received: 04/04/2024; Revised: 13/06/2024; Accepted: 13/06/2024

1. INTRODUCTION

In many branches of natural science, accurate solutions of non–linear partial differential equations (NLPDEs) are essential to comprehending the qualitative aspects of numerous processes and phenomena. In the present, researchers have discovered numerous potent techniques for resolving the nonlinear partial differential equation, such as the simple equation method (Sanjun & Chankaew, 2022), the tanh–coth method (Kumar & Pankaj, 2015), the sin–cosine method (Raslan et al., 2017), the (G'/G) –expansion method (Akbar et al., 2018), the modified extended tanh–function method (Zahran & Khater, 2016), the Exp–expansion method (He & Wu, 2006), the unified method (Abdel–Gawad et al., 2022), the Riccati–Bernoulli sub–ODE method (Yang et al., 2015), etc.

The combined KdV–mKdV equation (Khan et al., 2023),

$$u_t + muu_x + nu^2 u_x + u_{xxx} = 0, \quad (1)$$

where $u = u(x, t)$, m and n are real constants, which is a useful tool in the study of water waves. It helps researchers understand and forecast the actions of many wave phenomena, such as solitary waves, wave breaking, turbulence, interactions between waves and structures, and tsunamis (Yuan et al., 2023). Many analytical methods have been used to investigate this equation. from multiple authors, such as in 2010 (Lu & Shi, 2010) using the expansion approach of Jacobi elliptic functions; in 2012 (Naher & Abdullah, 2012) using the improved (G'/G) –expansion method; in 2014 (Huang et al., 2014) using the complex method; in 2016 (Hu et al., 2016) using the consistent tanh expansion (CTE) method; in 2022 (Ekici & Ünal, 2022) using the rational (G'/G) –expansion method (Ekici & Ünal, 2022); and in 2023 using the Bernoulli sub–ODE method (Khan et al., 2023).

Two different methods are used in this article. The first method is called the simple equation method with Riccati equation, which was first proposed to construct exact traveling wave solutions of the Kodomtsev–Petviashvili (KP) equation, the (2 + 1)-dimensional breaking soliton equation, and the modified generalized Vakhnenko equation in 2016 (Nofal, 2016). In 2024, (Thadee & Phoosree, 2024) used the simple equation method with the Riccati equation to find the exact traveling wave solutions of fourth-order fractional water wave equations. And the modified extended tanh-function method that executes this method has broad applicability to many other nonlinear evolution equations. In mathematical physics, the modified extended tanh-function method was used to investigate exact solutions to various equations, such as the Hirota–Satsuma–coupled KdV system in 2007 (El-Wakil & Abdou, 2007). The fisher-type equation, the ZK–BBM equation, generalized the Burgers–Fisher equation in 2007 (El-Wakil & Abdou, 2007). The Bogoyavlenskii equation in 2016 (Zahran & Khater, 2016). And the conformable time fractional Drinfel’d–Sokolov–Wilson equation (Bashar et al., 2023).

In this work, we solve the combined KdV–mKdV equation using the simple equation method with the Riccati equation and the modified extended tanh-function method for finding the traveling wave solutions of the combined KdV–mKdV equation. We have shown the new exact solutions and obtained the wave solutions for the wave effects in a two-dimensional graph, a three-dimensional graph, and a contour graph in Section. 4. Moreover, we compared the solutions and got the new simpler form, which is shown in Section. 5. Finally, Section. 6 concludes with observations and results.

2. MATERIALS AND METHODS

Let there be a NLPDE, say, in two independent variables x and t , is given by:

$$G(u, u_t, u_x, u_{xx}, u_{xt}, \dots) = 0, \quad (2)$$

where G is in general a polynomial function of $u(x, t)$ and its arguments; the subscripts denote the partial derivatives. Start by considering combining the independent variables x and t into one variable, ξ . We suppose that

$$u(x, t) = u(\xi), \quad \xi = x - \omega t. \quad (3)$$

The traveling wave transformation Eq. (3) permits us to reduce Eq. (2) to the following ordinary differential equation (ODE):

$$Q(u, u', u'', u''', \dots) = 0, \quad (4)$$

where Q is a polynomial in $u(\xi)$ and its total derivatives, where $u'(\xi) = \frac{du}{d\xi}$, $u''(\xi) = \frac{d^2u}{d\xi^2}$, and so on.

2.1 The simple equation method with the Riccati equation

We outline the fundamental steps of the simple equation method with the Riccati equation (Nofal, 2016) as follows:

Step 1. Start by considering Eqs. (2)–(4).

Step 2. Suppose that the solution of Eq. (4) is in the following form:

$$u(\xi) = \sum_{i=0}^N a_i Z^i(\xi). \quad (5)$$

Which a_i ($i = 0, 1, 2, \dots, N$) are constants that need to be determined such that $a_N \neq 0$ and $Z(\xi)$ conform to the following the Riccati equation,

$$Z'(\xi) = \alpha Z^2(\xi) + \beta, \quad (6)$$

where α and β are non-zero constants. The two-case solutions of Eq. (6) can be explained here:

Case 1: $\alpha\beta < 0$,

$$z(\xi) = -\frac{\sqrt{-\alpha\beta}}{\alpha} \tanh\left(\sqrt{-\alpha\beta}\xi - \frac{V \ln(\xi_0)}{2}\right), \quad (7)$$

where $\xi_0 > 0$ and $V = \pm 1$.

Case 2: $\alpha\beta > 0$,

$$z(\xi) = \frac{\sqrt{\alpha\beta}}{\alpha} \tan\left(\sqrt{\alpha\beta}(\xi + \xi_0)\right), \quad (8)$$

where ξ_0 is a constant.

Step 3. The balance number N may be achieved by striking a balance between the derivative of the highest-order and the highest nonlinear terms that exist in Eq. (4).

Step 4. For the terms that were all in the same power of z , we added up all of the coefficients and set them to zero. We obtained $\omega, \alpha\beta$ and a_i . Thus, the solutions to Eq. (2) that include traveling waves are constructed.

2.2 The modified extended tanh-function method

We describe the main steps of the modified extended tanh-function method (Zahran & Khater, 2016).

Step 1. Start by considering Eqs. (2)-(4).

Step 2. Suppose that the solution of Eq. (4) in the following form:

$$u(\xi) = a_0 + \sum_{i=1}^N (a_i \varphi^i + b_i \varphi^{-i}), \quad (9)$$

where a_i and b_i are constants that need to be determined such that $a_N \neq 0$ or $b_N \neq 0$ and φ satisfy the Riccati equation,

$$\varphi' = \sigma + \varphi^2 \quad (10)$$

where σ is a constant. Eq. (6) admits several types of solutions according to the following:

Case 1: If $\sigma < 0$, then

$$\varphi = -\sqrt{-\sigma} \tanh(\sqrt{-\sigma}\xi), \quad (11)$$

or

$$\varphi = -\sqrt{-\sigma} \coth(\sqrt{-\sigma}\xi). \quad (12)$$

Case 2: If $\sigma > 0$, then

$$\varphi = \sqrt{\sigma} \tan(\sqrt{\sigma}\xi), \quad (13)$$

or

$$\varphi = -\sqrt{\sigma} \cot(\sqrt{\sigma}\xi). \quad (14)$$

Case 3: If $\sigma = 0$, then

$$\varphi = -\frac{1}{\xi}. \quad (15)$$

Step 3. The balance number N may be achieved by striking a balance between the derivative of the highest-order and the highest nonlinear terms that exist in Eq. (4).

Step 4. Substitute Eq. (9) and its derivative as well as Eq. (10) into Eq. (4). Then by setting the coefficients of $\varphi^i, (i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$, and equating them to zero, we obtain a system of algebraic equations, which can be solved to obtain the values of a_i, b_i, σ and ω .

Step 5. Substitute the values of a_i, b_i, σ, ω and the solutions of Eq. (10) into Eq. (9) and we obtain the exact solutions of Eq. (2).

3. APPLICATIONS

We next want to solve the combined KdV-mKdV equation using the simple equation method with the Riccati equation and the modified extended tanh-function method.

The combined KdV-mKdV equation is

$$u_t + muu_x + nu^2 u_x + u_{xxx} = 0, \quad (16)$$

where $u = u(x, t)$, m and n are real constants. Using $u(\xi) = u(x, t)$ and the traveling wave variable

$\xi = x - \omega t$, we will transform it into an ODE. When the transformation is put into equation (16), the outcome is

$$-\omega u' + muu' + nu^2u' + u''' = 0. \quad (17)$$

Integrating Eq. (17) with the zero constant, we get:

$$-\omega u + \frac{m}{2}u^2 + \frac{nu^3}{3} + u'' = 0. \quad (18)$$

The proposed procedures are used in the following sections to achieve the desired results.

3.1 Solutions with the simple equation method with the Riccati equation

Next, we balanced the highest-order derivative terms u'' with the highest nonlinear terms u^3 in Eq. (18). Then $N = 1$. We have the solution to Eq. (18) as follows:

$$u(\xi) = a_0 + a_1 Z, \quad (19)$$

where Z satisfies Eq. (6). Therefore, the expressions for u'' , u^2 and u^3 are expressed as:

$$u'' = 2\alpha^2 a_1 Z^3 + 2\alpha\beta a_1 Z, \quad (20)$$

$$u^2 = a_0^2 + 2a_0 a_1 Z + a_1^2 Z^2, \quad (21)$$

$$u^3 = a_0^3 + 3a_0^2 a_1 Z + 3a_0 a_1^2 Z^2 + a_1^3 Z^3. \quad (22)$$

Substituting Eqs. (19)-(22) into Eq. (18), the outcome is

$$\begin{aligned} & \left(-\omega a_0 + \frac{m}{2}a_0^2 + \frac{n}{2}a_0^3\right) \\ & + \left(-\omega a_1 + ma_0 a_1 + na_0^2 a_1 + 2\alpha\beta a_1\right)Z \\ & + \left(\frac{m}{2}a_1^2 + na_0 a_1^2\right)Z^2 + \left(\frac{n}{3}a_1^3 + 2\alpha^2 a_1\right)Z^3 = 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Then we set each coefficient of Z^i to zero, where $i = 0, 1, 2, 3$, yields

$$Z^0(\xi): -\omega a_0 + \frac{m}{2}a_0^2 + \frac{n}{2}a_0^3 = 0, \quad (24)$$

$$Z^1(\xi): -\omega a_1 + ma_0 a_1 + na_0^2 a_1 + 2\alpha\beta a_1 = 0, \quad (25)$$

$$Z^2(\xi): \frac{m}{2}a_1^2 + na_0 a_1^2 = 0, \quad (26)$$

$$Z^3(\xi): \frac{n}{3}a_1^3 + 2\alpha^2 a_1 = 0. \quad (27)$$

After solving this collection of mathematical equations, we get

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{-m}{2n}, \quad a_1 = \pm\alpha\sqrt{\frac{-6}{n}}, \quad \omega = \frac{-m^2}{8n} \quad \text{and} \\ \alpha\beta &= \frac{m^2}{16n}. \end{aligned} \quad (28)$$

By Eqs. (7), (8), (28) and $\xi = x - \omega t$, the exact solutions of the combined KdV-mKdV equation are shown for two cases with an arbitrary constant ξ_0 .

Case 1: $\alpha\beta < 0$,

$$u_1(x, t) = -\frac{m}{2n} + \frac{m\sqrt{6}}{4n} \tanh\left(\sqrt{\frac{-m^2}{16n}}\left(x + \left(\frac{m^2}{8n}\right)t\right) - \frac{v \ln \xi_0}{2}\right), \quad (29)$$

$$u_2(x, t) = -\frac{m}{2n} - \frac{m\sqrt{6}}{4n} \tanh\left(\sqrt{\frac{-m^2}{16n}}\left(x + \left(\frac{m^2}{8n}\right)t\right) - \frac{v \ln \xi_0}{2}\right), \quad (30)$$

where $\xi_0 > 0$ and $v = \pm 1$.

Case 2: $\alpha\beta > 0$,

$$u_3(x, t) = \frac{-m}{2n} + \frac{m\sqrt{-6}}{4n} \tan\sqrt{\frac{m^2}{16n}}\left(x + \left(\frac{m^2}{8n}\right)t\right), \quad (31)$$

$$u_4(x, t) = \frac{-m}{2n} - \frac{m\sqrt{-6}}{4n} \tan\sqrt{\frac{m^2}{16n}}\left(x + \left(\frac{m^2}{8n}\right)t\right), \quad (32)$$

where ξ_0 is a constant.

3.2 Solutions with the modified extended tanh function method

According to the procedure that will be described, the balancing number N is a positive integer, which can be defined by balancing the highest-order derivative terms u'' with the highest nonlinear terms u^3 in Eq. (18). Thus, $N=1$. We have the solution to Eq. (18) as follows:

$$u(\xi) = a_0 + a_1\varphi + b_1\varphi^{-1} \tag{33}$$

where φ satisfies Eq. (10). Therefore, the expressions for u'' , u^2 and u^3 are expressed as:

$$u''(\xi) = 2\sigma a_1\varphi + 2a_1\varphi^3 + 2\sigma^2 b_1\varphi^{-3} + 2\sigma b_1\varphi^{-1}, \tag{34}$$

$$u^2(\xi) = a_0^2 + 2a_0a_1\varphi + 2a_0b_1\varphi^{-1} + a_1^2\varphi^2 + 2a_1b_1 + b_1^2\varphi^{-2}, \tag{35}$$

$$u^3(\xi) = a_0^3 + 3a_0^2a_1\varphi + 3a_0^2b_1\varphi^{-1} + 3a_0a_1^2\varphi^2 + 6a_0a_1b_1 + 3a_0b_1^2\varphi^{-2} + 3a_1^2b_1\varphi + 3a_1b_1^2\varphi^{-1} + a_1^3\varphi^3 + b_1^3\varphi^{-3}. \tag{36}$$

Substituting Eqs. (33)-(36) into Eq. (18), the outcome is

$$\begin{aligned} &\left(-\omega a_0 + \frac{m}{2}a_0^2 + ma_1b_1 + \frac{n}{3}a_0^3 + 2na_0a_1b_1\right) \\ &+ (-\omega a_1 + ma_0a_1 + na_1^2 + na_1^2b_1 + 2\sigma a_1)\varphi \\ &+ (-\omega b_1 + ma_0b_1 + na_0^2b_1 + na_1b_1^2 + 2\sigma b_1)\varphi^{-1} \\ &+ \left(\frac{m}{2}a_1^2 + na_0a_1^2\right)\varphi^2 + \left(\frac{m}{2}b_1^2 + na_0b_1^2\right)\varphi^{-2} \\ &+ \left(\frac{n}{3}a_1^3 + 2a_1\right)\varphi^3 + \left(\frac{n}{3}b_1^3 + 2\sigma^2b_1\right)\varphi^{-3} = 0. \end{aligned} \tag{37}$$

Then we set each coefficient of φ^i to zero, where $i = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$, yields

$$\varphi^0; -\omega a_0 + \frac{m}{2}a_0^2 + ma_1b_1 + \frac{n}{3}a_0^3 + 2na_0a_1b_1 = 0, \tag{38}$$

$$\varphi^1; -\omega a_1 + ma_0a_1 + na_0^2a_1 + na_1^2b_1 + 2\sigma a_1 = 0, \tag{39}$$

$$\varphi^{-1}; -\omega b_1 + ma_0b_1 + na_0^2b_1 + na_1b_1^2 + 2\sigma b_1 = 0, \tag{40}$$

$$\varphi^2; \frac{m}{2}a_1^2 + na_0a_1^2 = 0, \tag{41}$$

$$\varphi^{-2}; \frac{m}{2}b_1^2 + na_0b_1^2 = 0, \tag{42}$$

$$\varphi^3; \frac{n}{3}a_1^3 + 2a_1 = 0, \tag{43}$$

$$\varphi^{-3}; \frac{n}{3}b_1^3 + 2\sigma b_1 = 0. \tag{44}$$

After we solve this set of algebraic equations, we get

$$a_0 = \frac{-m}{2n}, a_1 = \sqrt{\frac{-6}{n}}, b_1 = -\sigma\sqrt{\frac{-6}{n}}, \sigma = \frac{m^2}{96n} \text{ and } \omega = -\frac{m^2}{6n}, \tag{45}$$

or

$$a_0 = \frac{-m}{2n}, a_1 = -\sqrt{\frac{-6}{n}}, b_1 = \sigma\sqrt{\frac{-6}{n}}, \sigma = \frac{m^2}{96n} \text{ and } \omega = -\frac{m^2}{6n}. \tag{46}$$

By Eqs. (11)-(14), (45)-(46), and $\xi = x - \omega t$, the exact solutions of the combined KdV-mKdV equation can be classified into the following cases according to Section 2.2:

Case 1: If $\sigma < 0$, then

$$u_5(x, t) = \frac{-m}{2n} \left[1 + \frac{1}{2} \tanh \sqrt{\frac{-m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right) + \frac{1}{2 \tanh \sqrt{\frac{-m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right)} \right], \tag{47}$$

$$u_6(x, t) = \frac{-m}{2n} \left[1 - \frac{1}{2} \tanh \sqrt{\frac{-m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right) - \frac{1}{2 \tanh \sqrt{\frac{-m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right)} \right], \tag{48}$$

$$u_7(x, t) = \frac{-m}{2n} \left[1 + \frac{1}{2} \coth \sqrt{\frac{-m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right) + \frac{1}{2 \coth \sqrt{\frac{-m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right)} \right], \tag{49}$$

$$u_8(x, t) = \frac{-m}{2n} \left[1 - \frac{1}{2} \coth \sqrt{\frac{-m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right) - \frac{1}{2 \coth \sqrt{\frac{-m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right)} \right]. \tag{50}$$

Case 2: If $\sigma > 0$, then

$$u_9(x,t) = \frac{-m}{2n} \left(1 + \frac{I}{2} \tan \sqrt{\frac{m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right) - \frac{I}{2 \tan \sqrt{\frac{m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right)} \right), \tag{51}$$

$$u_{10}(x,t) = \frac{-m}{2n} \left(1 - \frac{I}{2} \tan \sqrt{\frac{m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right) + \frac{I}{2 \tan \sqrt{\frac{m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right)} \right), \tag{52}$$

$$u_{11}(x,t) = \frac{-m}{2n} \left(1 + \frac{I}{2} \cot \sqrt{\frac{m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right) - \frac{I}{2 \cot \sqrt{\frac{m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right)} \right), \tag{53}$$

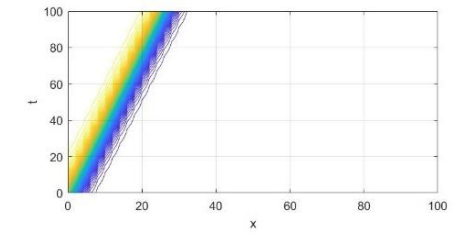
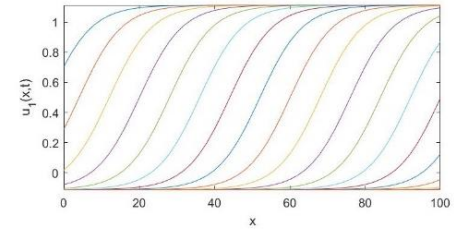
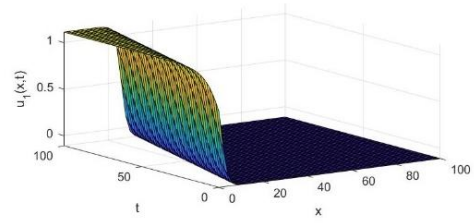
$$u_{12}(x,t) = \frac{-m}{2n} \left(1 - \frac{I}{2} \cot \sqrt{\frac{m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right) + \frac{I}{2 \cot \sqrt{\frac{m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right)} \right). \tag{54}$$

4. GRAPHICAL REPRESENTATION OF SOME OBTAINED SOLUTIONS

The physical graphs of some solutions to the combined KdV-mKdV equation are shown in this section.

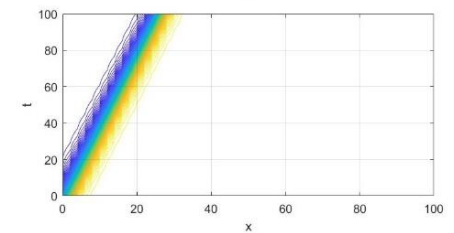
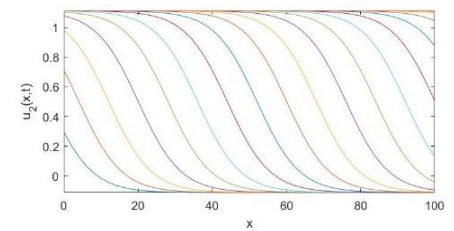
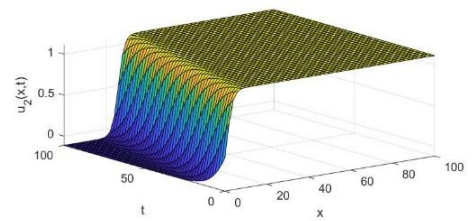
4.1 Graphical representation of the combined KdV-mKdV equation with the simple equation method with the Riccati equation

We set some parameters to get the example graph of the wave effects of the combined KdV-mKdV equation by $m = 2, n = -2, \xi_0 = 2$ in the interval $0 \leq x, t \leq 100$, which is displayed in Figures 1 and 2. It produces a kink wave solution.



$$u_1(x,t) = -\frac{m}{2n} + \frac{m\sqrt{6}}{4n} \tanh \left(\sqrt{\frac{m^2}{16n}} \left(x + \left(\frac{m^2}{8n} \right) t \right) - \frac{\ln \xi_0}{2} \right).$$

Figures 1 Kink wave solution of $u_1(x,t)$ in 3D, 2D, and contour

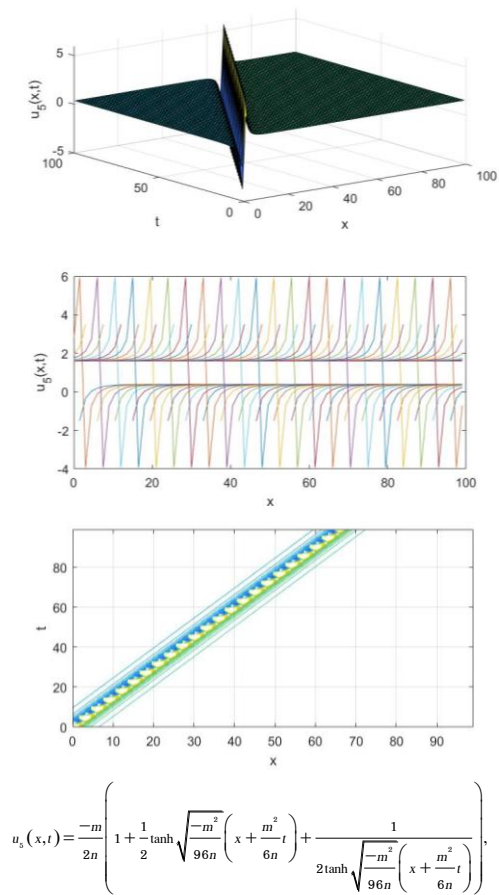


$$u_2(x,t) = -\frac{m}{2n} - \frac{m\sqrt{6}}{4n} \tanh \left(\sqrt{\frac{m^2}{16n}} \left(x + \left(\frac{m^2}{8n} \right) t \right) - \frac{\ln \xi_0}{2} \right).$$

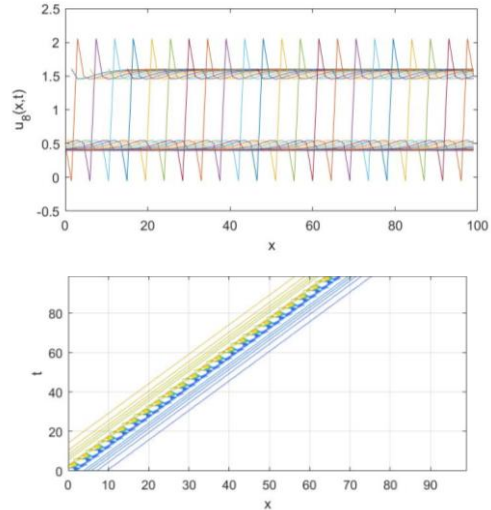
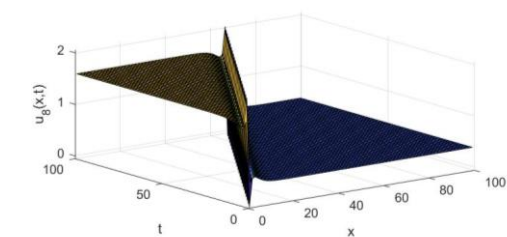
Figures 2 Kink wave solution of $u_2(x,t)$ in 3D, 2D, and contour.

4.2 Graphical representation of the combined KdV-mKdV equation with the modified extended tanh function method

Next, we represent the shape of some solution to the combined KdV-mKdV equation with the modified extended tanh function method by setting some parameters $m=2, n=-1$ in the interval $0 \leq x, t \leq 100$, which is displayed in Figures 3 and 4. It produces a kink wave solution.



Figures 3 Kink wave solution of $u_5(x,t)$ in 3D, 2D, and contour.



$$u_8(x,t) = \left(\frac{-m}{2n} \left[1 - \frac{1}{2} \coth \sqrt{\frac{-m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right) \right] - \frac{1}{2 \coth \sqrt{\frac{-m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right)} \right)$$

Figures 4. Kink wave solution of $u_8(x,t)$ in 3D, 2D, and contour.

5. SOLUTIONS COMPARISON

In this section, the solutions of the combined KdV-mKdV equation by the simple equation method with the Riccati equation and the modified extended tanh function method can be expressed in a simpler form than the rational (G'/G) -expansion method (Ekici & Ünal, 2022), as in Tables 1 and 2.

Table 1 Solutions comparison of the combined KdV-mKdV equation between the rational (G'/G) -expansion method and the simple equation method with the Riccati equation.

The rational (G'/G) -expansion method

Case 1: $\lambda^2 - 4\mu > 0$

$$u(\xi) = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{6(\lambda^2 - 4\mu)}{\beta}} \left(\frac{c_1 \cosh\left(\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2 - 4\mu}\xi\right) + c_2 \sinh\left(\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2 - 4\mu}\xi\right)}{c_1 \sinh\left(\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2 - 4\mu}\xi\right) + c_2 \cosh\left(\frac{1}{2}\sqrt{\lambda^2 - 4\mu}\xi\right)} \right) \pm \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{6}{\beta}} - \frac{\alpha}{2\beta} \mp \frac{3\lambda}{\beta} \sqrt{\frac{\beta}{6}}$$

Case 2: $\lambda^2 - 4\mu < 0$

$$u(\xi) = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{6(4\mu - \lambda^2)}{\beta}} \left(\frac{-c_1 \cos\left(\frac{\xi}{2}\sqrt{4\mu - \lambda^2}\right) + c_2 \sin\left(\frac{\xi}{2}\sqrt{4\mu - \lambda^2}\right)}{c_1 \sin\left(\frac{\xi}{2}\sqrt{4\mu - \lambda^2}\right) + c_2 \cos\left(\frac{\xi}{2}\sqrt{4\mu - \lambda^2}\right)} \right) \pm \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{6}{\beta}} - \frac{\alpha}{2\beta} \mp \frac{3\lambda}{\beta} \sqrt{\frac{\beta}{6}}$$

Case 3: $\lambda^2 - 4\mu = 0$

$$u(\xi) = \pm \sqrt{\frac{6}{\beta} \left(\frac{c_2}{c_1 + c_2 \xi} \right)} \mp \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{6}{\beta}} - \frac{\alpha}{2\beta} \mp \frac{3\lambda}{\beta} \sqrt{\frac{\beta}{6}}$$

where $\xi = x - st + \xi_0$, $s = -\frac{2\beta\lambda^2 + \alpha^2 - 8\beta\mu}{4\beta}$.

The simple equation method with the Riccati equation

Case 1: $\alpha\beta < 0$

$$u(x, t) = -\frac{m}{2n} \pm \frac{m\sqrt{6}}{4n} \tanh \left(\sqrt{\frac{m^2}{16n}} \left(x + \left(\frac{m^2}{8n} \right) t \right) - \frac{\ln \xi_0}{2} \right)$$

Case 2: $\alpha\beta > 0$

$$u(x, t) = \frac{-m}{2n} \pm \frac{m\sqrt{-6}}{4n} \tan \sqrt{\frac{m^2}{16n}} \left(x + \left(\frac{m^2}{8n} \right) t \right)$$

Table 2 Solutions comparison of the combined KdV-mKdV equation between the rational (G'/G)-expansion method and the modified extended tanh function method.

The rational (G'/G)-expansion method

Case 1: $\lambda^2 - 4\mu > 0$

$$u(\xi) = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{6(\lambda^2 - 4\mu)}{\beta}} \left(\frac{c_1 \cosh \left(\frac{1}{2} \sqrt{\lambda^2 - 4\mu} \xi \right) + c_2 \sinh \left(\frac{1}{2} \sqrt{\lambda^2 - 4\mu} \xi \right)}{c_1 \sinh \left(\frac{1}{2} \sqrt{\lambda^2 - 4\mu} \xi \right) + c_2 \cosh \left(\frac{1}{2} \sqrt{\lambda^2 - 4\mu} \xi \right)} \right) \pm \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{6}{\beta}} - \frac{\alpha}{2\beta} \mp \frac{3\lambda}{\beta} \sqrt{\frac{\beta}{6}}$$

Case 2: $\lambda^2 - 4\mu < 0$

$$u(\xi) = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{6(4\mu - \lambda^2)}{\beta}} \left(\frac{-c_1 \cos \left(\frac{\xi}{2} \sqrt{4\mu - \lambda^2} \right) + c_2 \sin \left(\frac{\xi}{2} \sqrt{4\mu - \lambda^2} \right)}{c_1 \sin \left(\frac{\xi}{2} \sqrt{4\mu - \lambda^2} \right) + c_2 \cos \left(\frac{\xi}{2} \sqrt{4\mu - \lambda^2} \right)} \right) \pm \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{6}{\beta}} - \frac{\alpha}{2\beta} \mp \frac{3\lambda}{\beta} \sqrt{\frac{\beta}{6}}$$

Case 3: $\lambda^2 - 4\mu = 0$

$$u(\xi) = \pm \sqrt{\frac{6}{\beta} \left(\frac{c_2}{c_1 + c_2 \xi} \right)} \mp \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{6}{\beta}} - \frac{\alpha}{2\beta} \mp \frac{3\lambda}{\beta} \sqrt{\frac{\beta}{6}}$$

where $\xi = x - st + \xi_0$, $s = -\frac{2\beta\lambda^2 + \alpha^2 - 8\beta\mu}{4\beta}$.

The modified extended tanh function method

Case 1: $\sigma < 0$

$$u(x, t) = \frac{-m}{2n} \left(1 \pm \frac{1}{2} \tanh \sqrt{\frac{-m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right) \right) \pm \frac{1}{2 \tanh \sqrt{\frac{-m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right)}$$

and

$$u(x, t) = \frac{-m}{2n} \left(1 \pm \frac{1}{2} \coth \sqrt{\frac{-m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right) \right) \pm \frac{1}{2 \coth \sqrt{\frac{-m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right)}$$

Case 2: $\sigma > 0$

$$u(x, t) = \frac{-m}{2n} \left(1 \pm \frac{I}{2} \tan \sqrt{\frac{m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right) \right) \mp \frac{I}{2 \tan \sqrt{\frac{m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right)}$$

and

$$u(x, t) = \frac{-m}{2n} \left(1 + \frac{I}{2} \cot \sqrt{\frac{m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right) \right) - \frac{I}{2 \tan \sqrt{\frac{m^2}{96n}} \left(x + \frac{m^2}{6n} t \right)}$$

6. CONCLUSION

In this work, we applied the simple equation method with the Riccati equation and the modified extended tanh function method in a satisfactory way to determine the traveling wave solution for the combined KdV-mKdV equation. Sequently, we found several new exact traveling wave solutions containing trigonometric functions and hyperbolic functions.

Both the simple equation method with the Riccati equation and the modified extended tanh function method rely on the Riccati equation and are straightforward to comprehend. Also, this research shows that this suggested method is suitable and highly practical for finding exact solutions to the combined KdV-mKdV problem. The method provides correct solutions for solitary waves and operates in a dependable and efficient manner.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the referees for their valuable comments that helped us improve the manuscript. And also partially supported by the Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University.

REFERENCES

- Abdel-Gawad, H. I., Tantawy, M., & Abdelwahab, A. M. (2023). A new technique for solving Burgers-Kadomtsev-Petviashvili equation with an external source. Suppression of wave breaking and shock wave. *Alexandria Engineering Journal*, 69, 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.12.022>
- Akbar, M. A., Ali, N. H. M., & Roy, R. (2018). Closed form solutions of two time fractional nonlinear wave equations. *Results in Physics*, 9(1), 1031-1039. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.03.059>
- Bashar, M. H., Mawa, H. Z., Biswas, A., & et al. (2023). The modified extended tanh technique ruled to exploration of soliton solutions and fractional effects to the time fractional couple Drinfel'd-Sokolov-Wilson equation. *Heliyon*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15662>
- Ekici, M., & Ünal, M. (2022). Application of the rational (G'/G)-expansion method for solving some coupled and combined wave equations. *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series A1 Mathematics and Statistics*, 71(1), 116-132. <https://doi.org/10.31801/cfsuasmas.884025>
- El-Wakil, S. A., & Abdou, M. A. (2007). Modified extended tanh-function method for solving nonlinear partial differential equations. *Chaos, Solitons & Fractals*, 31(5), 1256-1264. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2005.10.072>
- El-Wakil, S. A., & Abdou, M. A. (2007). New exact travelling wave solutions using modified extended tanh-function method. *Chaos, Solitons & Fractals*, 31(4), 840-852. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2005.10.032>
- He, J. H., & Wu, X. H. (2006). Exp-function method for nonlinear wave equations. *Chaos, Solitons & Fractals*, 30(3), 700-708. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2006.03.020>
- Hu, H., Tan, M., & Hu, X. (2016). New interaction solutions to the combined KdV-mKdV equation from CTE method. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 21, 64-67. <https://doi.org/10.1016/j.jaubas.2016.01.005>
- Huang, Y., Wu, Y., Meng, F., & Yuan, W. (2014). All exact traveling wave solutions of the combined KdV-mKdV equation. *Advances in Difference Equations*, 2014(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/1687-1847-2014-261>
- Khan, K., Mudaliar, R. K., & Islam, S. R. (2023). Traveling waves in two distinct equations: the (1+1)-Dimensional cKdV-mKdV equation and the sinh-Gordon equation. *International Journal of Applied and Computational Mathematics*, 9(3), 21. <https://doi.org/10.1007/s40819-023-01503-9>
- Kumar, A., & Pankaj, R. D. (2015). Tanh-coth scheme for traveling wave solutions for Nonlinear Wave Interaction model. *Journal of the Egyptian Mathematical Society*, 23(2), 282-285. <http://dx.doi.org/10.1016/j.joems.2014.05.002>
- Lu, D. & Shi, Q. (2010). New solitary wave solutions for the cKdV-mKdV equation. *Journal of Information and Computational Science*, 8(7), 1733-1737.
- Naher, H., & Abdullah, F. A. (2012). Some new solutions of the combined KdV-MKdV equation by using the improved (G'/G)-expansion method. *World Applied Sciences Journal*, 16(11), 1559-1570.
- Nofal, T. A. (2016). Simple equation method for nonlinear partial differential equations and its applications. *Journal of the Egyptian Mathematical Society*, 24(2), 204-209. <https://doi.org/10.1016/j.joems.2015.05.006>
- Raslan, K. R., EL-Danaf, T. S., & Ali, K. K. (2017). New exact solution of coupled general equal width wave equation using sine-cosine function method. *Journal of the Egyptian Mathematical Society*, 25(3), 350-354. <https://doi.org/10.1016/j.joems.2017.03.004>
- Sanjun, J., & Chankaew, A. (2022). Wave solutions of the DMBBM equation and the cKG equation using the simple equation method. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 8(1), 952668. <https://doi.org/10.3389/fams.2022.952668>
- Thadee, W., & Phoosree, S. (2024). New Wave Behaviors Generated by Simple Equation Method with Riccati Equation of Some Fourth-Order Fractional Water Wave Equations. *Journal of the Physical Society of Japan*, 93(1), 014002. <https://doi.org/10.7566/JPSJ.93.014002>
- Yang, X. F., Deng, Z. C., & Wei, Y. (2015). A Riccati-Bernoulli sub-ODE method for nonlinear partial differential equations and its application. *Advances in Difference equations*, 2015, 1-17. <https://doi.org/10.1186/s13662-015-0452-4>
- Yuan, R. R., Shi, Y., Zhao, S. L., & et al. (2023). The combined KdV-mKdV equation: Bilinear approach and rational solutions with free multi-parameters. *Results in Physics*, 55, 107188. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.107188>
- Zahran, E. H., & Khater, M. M. (2016). Modified extended tanh-function method and its applications to the Bogoyavlenskii equation. *Applied Mathematical Modelling*, 40(3), 1769-1775. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.08.018>
- Zahran, E. H., & Khater, M. M. (2016). Modified extended tanh-function method and its applications to the Bogoyavlenskii equation. *Applied Mathematical Modelling*, 40(3), 1769-1775. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.08.018>

Development of average run length formulas for EWMA control chart under the AR(1) with quadratic trend model for detecting and monitoring process variability

Suvimol Phanyaem^{*}

¹ Department of Applied Statistics, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

ABSTRACT

This paper proposes an explicit formula for calculating the average run length (ARL) of an exponentially weighted moving average (EWMA) control chart for monitoring process mean shifts. The study focuses on the AR(1) model with quadratic trends, because this model combines two essential components in time series analysis including the autocorrelation and long-term trend analysis. It is useful for producing accurate and insightful data predictions. Additionally, it is used in various contexts such as economic forecasting, financial analysis, and environmental studies. Furthermore, the study presents a technique for estimating the ARL using the numerical integral equation (NIE) method. This enables a comparison between the results of the explicit formula and the numerical integral equation method. The two ARL solutions obtained from the explicit formula and numerical integral equation method are very similar identical with an absolute percentage difference of less than 0.001. Thereby, the explicit formula accurately corresponds to the NIE method. Additionally, the explicit formulas are more computationally efficient as they require fewer computations compared to the NIE approach

KEYWORDS: Average run length, AR(1) with quadratic trend, Explicit formulas, Numerical integral equation.

*Corresponding Author: suvimol.p@sci.kmutnb.ac.th

Received: 05/06/2024; Revised: 26/07/2024; Accepted: 30/07/2024

1. INTRODUCTION

Control charts are important tools for statistical process control. In 1931, Shewhart introduced the Shewhart control chart, which is used to detect a large shift in the process mean or variance. It is especially effective when the observations have a normal distribution (Shewhart, 1931). Subsequently, Page introduced the Cumulative Sum (CUSUM) control chart. It is adept at identifying small shifts in statistical parameters and complex patterns like autocorrelation (Page, 1954). Recently, Robert proposed the exponentially weighted moving average (EWMA) control chart (Robert, 1959). The CUSUM and EWMA control charts are more effective in identifying small changes and complex patterns within processes, whereas the Shewhart control chart is effective in detecting large shifts.

Statistical quality control techniques will be used in this

research to manage process variability. In general, the effectiveness of control chart research frequently depends on an initial assumption that the data has a normal distribution. However, in many real-world scenarios, data usually displays a time series trend. Therefore, for efficient process change monitoring, choosing a suitable control chart is important. Therefore, the average run length (ARL) of EWMA control charts is of interest to the researchers, and they are working on creating a precise formula and estimation technique for it.

The ARL is a critical metric for assessing control chart effectiveness in detecting shifts in process mean. It represents the average number of subgroups needed before a control chart detects an out-of-control process. ARL comprises two components: ARL_0 , the average number of samples from a stable process before a false out-of-control signal, and ARL_1 , the average number

of samples within control limits before an out-of-control signal is triggered.

Three common methods for estimating the ARL are Monte Carlo simulations (MC), Markov Chain approach (MCA), and Integral Equation approach (IE). Roberts (1959) used the MC method to calculate the ARL for the EWMA control chart, which is useful for validating analytical results but can be time-consuming. Crowder (1987) introduced a numerical procedure for EWMA run length computation, extending to non-normal cases and one-sided EWMA control charts. Later, Lucas and Saccucci (1990) showed that the EWMA control scheme, used to monitor process mean shifts by using the MCA method. They proposed a design procedure for EWMA control chart with different parameter values that can efficiently detect small shifts in a process. The limitations of both MCA and MC methods have caused researchers to reconsider their research on the IE approach. Analytical solutions for average delay and ARL on EWMA control charts with observations of exponential distribution were proposed by Areepong and Novikov (2009). After that, Mititelu et al. (2010) used the Fredholm integral equations to derive explicit formulas for ARL in special control charts like CUSUM and EWMA, requiring fewer computations.

Control charts are commonly formulated assuming observations are independent and identically distributed. When a process displays indications of autocorrelation, it becomes essential to make use of specialized control charts. Vanbrackle and Reynolds (1997) discovered that correlation has a significant impact on the ARL and steady state ARL of EWMA and CUSUM control charts, even though independence is assumed in control chart evaluation. They provided numerical evaluations for control chart design using integral equation and MCA methods. Busaba et al. (2012) proposed the numerical integral equation (NIE) method to approximate the ARL_0 and ARL_1 in the CUSUM procedure. They used the first order autoregressive (AR(1)) model with exponential white noise, which showed an excellent agreement between the NIE method and the explicit formula. Later, Petcharat et al. (2013) used a moving average (MA) model to provide explicit formulas of ARL for EWMA

and CUSUM control charts. Phanyaem (2022) used the IE and NIE methods to evaluate the ARL of the CUSUM chart on the $SARX(P,r)_L$ model. The Fredholm integral equation was employed, and NIE methods like the midpoint rule, the trapezoidal rule, Simpson's rule, and the Gaussian rule were used to approximate the ARL. Recently, Petcharat (2022) constructs the ARL for a CUSUM control chart using the Fredholm integral equation approach and Banach's Fixed Point theorem to ensure the solution's existence and uniqueness based on $SAR(P)_L$ with the trend process. Subsequently, Karoon and Areepong (2023) confirmed the efficacy of the double exponential weighted moving average (DEWMA) control chart in monitoring process quality by creating an explicit ARL formula using an autoregressive model with trend. Furthermore, Karoon et al. (2023) studied the ARL of the double exponentially weighted moving average (double EWMA) control chart for observational data following exponential white noise in a time series model with an autoregressive process. Supharakonsakun and Areepong (2023) developed a double exponentially weighted moving average (DEWMA) control chart to detect small shifts in a moving average of order q ($MA(q)$) process with exponential white noise. Karoon et al. (2024) show the effectiveness of the extended exponentially weighted moving average (EEWMA) control chart in detecting small shifts, particularly when the observations are autocorrelated with exponential white noise, using explicit formulas for the ARL. Recently, Sunthornwat et al. (2024) developed a specific formula for the ARL for the autoregressive process with a quadratic trend on a modified exponentially weighted moving average (EWMA) control chart. Most recently, Phanthuna et al. (2024) presented a double-modified exponentially weighted moving average (DMEWMA) chart for an autoregressive (AR) process.

In this paper, we propose the explicit formula for ARL of the EWMA control chart for an AR(1) with quadratic trend model. This paper presents a new contribution that has not been explored before. The proposed ARL of the EWMA control chart is compared with NIE approaches. The paper is structured as follows: Section 2 explains the materials used; Sections 3 and 4 describe the methods

employed; Section 5 presents the proposed method's results, and Section 6 provides concluding remarks.

2. MATERIALS AND METHODS

This section explains the features of AR(1) with quadratic trend model, which is used on the EWMA control chart for monitoring process mean shifts. The last section examines the characteristics of the ARL that are essential to the assessment of control chart performance.

2.1 AR(1) with Quadratic Trend model

The AR(1) with quadratic trend model is a time series model that combines the AR(1) model with quadratic trend component. In time series analysis, it is common to assume that white noise follows a normal distribution. However, the choice of using an exponential distribution or other types of distributions for error terms depends on the characteristics of the data being studied. In this case, we are assuming that the white noise follows an exponential distribution. An exponential distribution for the white noise error term is important when the time series data or the underlying process is inherently non-negative. The model analyzes the serial correlation of time series data using AR model and quadratic trend; coefficients c , ϕ , β_1 and β_2 are estimated statistically using techniques such as maximum likelihood estimation.

An AR(1) model with quadratic trend can be represented by equation (1).

$$Y_t = c + \phi Y_{t-1} + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \varepsilon_t ; t=1,2,\dots \tag{1}$$

where c is a suitable constant, ϕ is an autoregressive coefficient, β_1 is a linear coefficient, β_2 is a quadratic coefficient, t is the times and ε_t is the exponential white noise sequence of independent and identically distributed random variables.

2.2 EWMA Control Chart

An EWMA control chart is a statistical tool used in process control to monitor the mean or variance of a process over time, an alternative to conventional control charts like the Shewhart control chart. The EWMA statistic is calculated as a weighted average of the current observation and the previous EWMA statistic. It provides more weight for current observations, making it sensitive to changes or trends in the process.

The EWMA statistic is represented by equation (2).

$$E_t = (1-\lambda)E_{t-1} + \lambda Y_t ; t=1,2,\dots \tag{2}$$

where E_{t-1} is a previous EWMA statistic and λ is an exponential smoothing parameter with $0 < \lambda < 1$.

The upper and lower control limits of the EWMA control chart are as follows:

$$UCL = \mu + L \sigma \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}}, \quad LCL = \mu - L \sigma \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}},$$

where μ and σ are the mean and standard deviation of the process and L is a suitable control width limit.

3. INTEGRAL EQUATION METHOD

In this section, we derive analytical formulas for ARL using the Fredholm Integral Equation of the second kind. The lower and upper control limits are determined as zero and b respectively. The function $H(u)$ is defined as the ARL of EWMA control chart for the AR(1) with quadratic trend model.

$$ARL = H(u) = \mathbf{E}_\infty(\tau_b) < \infty.$$

where $\tau_b = \inf \{t > 0; E_t > b\}$, $b > u$.

The function $H(u)$ is extended into the Fredholm Integral Equations of the second kind.

$$H(u) = 1 + \mathbf{E}_E [I\{0 < E_1 < b\}H(E_1)] + \mathbf{P}_E\{E_1 = 0\}H(0).$$

Where \mathbf{P}_E represents the probability measure and \mathbf{E}_E represents the expectation corresponding to the initial value of $E_0 = u$.

The EWMA statistics E_1 represents a state of being in-control, which can be visualized as equation (3)

$$0 \leq (1-\lambda)E_0 + \lambda c + \lambda \phi Y_{t-1} + \lambda \beta_1 t + \lambda \beta_2 t^2 \leq b. \tag{3}$$

In the event that Y_1 produces an out-of-control state for E_1 , then

$$(1-\lambda)E_0 + \lambda c + \lambda \phi Y_{t-1} + \lambda \beta_1 t + \lambda \beta_2 t^2 > b. \tag{4}$$

or $(1-\lambda)E_0 + \lambda c + \lambda \phi Y_{t-1} + \lambda \beta_1 t + \lambda \beta_2 t^2 < 0$.

For an initial value $E_0 = u$, then equation (4) can be rewritten as follows:

$$0 < (1-\lambda)u + \lambda c + \lambda \phi Y_{t-1} + \lambda \beta_1 t + \lambda \beta_2 t^2 < b.$$

Following Champ and Rigdon's method (1991), the initial value $E_0 = u$, and $\varepsilon_t \square Exp(\alpha)$. The function $H(u)$ can be rewritten as follows:

$$H(u) = 1 + \int_0^b H(E_1) f(\varepsilon_1) d\varepsilon_1. \tag{5}$$

$$= 1 + \int_0^b H((1-\lambda)u + \lambda c + \lambda\phi Y_{t-1} + \lambda\beta_1 t + \lambda\beta_2 t^2) f(z) dz.$$

Equation (5) is changed the variable of integration, then $H(u)$ is obtained as:

$$H(u) = 1 + \frac{1}{\lambda} \int_0^b H(z) f\left(\frac{z-(1-\lambda)u}{\lambda} - c - \phi Y_{t-1} - \beta_1 t - \beta_2 t^2\right) dz.$$

$$= 1 + \frac{1}{\lambda} \int_0^b H(z) \left[\frac{1}{\alpha} e^{-\frac{1}{\alpha} \left\{ \frac{z-(1-\lambda)u}{\lambda} - c - \phi Y_{t-1} - \beta_1 t - \beta_2 t^2 \right\}} \right] dz.$$

The Fredholm Integral Equation of the second kind can be derived as follows:

$$H(u) = 1 + \frac{1}{\lambda\alpha} \int_0^b H(z) e^{-\frac{z}{\lambda\alpha} \left\{ \frac{(1-\lambda)u}{\lambda\alpha} + \frac{(c+\phi Y_{t-1} + \beta_1 t + \beta_2 t^2)}{\alpha} \right\}} dz.$$

If we assume that $C(u) = e^{-\frac{1}{\alpha} \left\{ \frac{(1-\lambda)u}{\lambda\alpha} + \frac{(c+\phi Y_{t-1} + \beta_1 t + \beta_2 t^2)}{\alpha} \right\}}$, then we can rewrite the equation as follows:

$$H(u) = 1 + \frac{C(u)}{\lambda\alpha} \int_0^b H(z) e^{-\frac{z}{\lambda\alpha}} dz, 0 \leq u \leq b.$$

Let $k = \int_0^b H(z) e^{-\frac{z}{\lambda\alpha}} dz$, then we have

$$H(u) = 1 + \frac{C(u)}{\lambda\alpha} k. \tag{6}$$

For solving k we obtain

$$k = \int_0^b H(z) e^{-\frac{z}{\lambda\alpha}} dz$$

$$= \int_0^b \left(1 + \frac{k}{\lambda\alpha} C(z) \right) e^{-\frac{z}{\lambda\alpha}} dz$$

$$= \int_0^b e^{-\frac{z}{\lambda\alpha}} dz + \int_0^b \frac{C(z)}{\lambda\alpha} k e^{-\frac{z}{\lambda\alpha}} dz$$

$$= \int_0^b e^{-\frac{z}{\lambda\alpha}} dz + \frac{k}{\lambda\alpha} \int_0^b C(z) e^{-\frac{z}{\lambda\alpha}} dz$$

$$= \int_0^b e^{-\frac{z}{\lambda\alpha}} dz + \frac{k}{\lambda\alpha} e^{-\frac{c+\phi Y_{t-1} + \beta_1 t + \beta_2 t^2}{\alpha}} \int_0^b e^{-\frac{(1-\lambda)z}{\lambda\alpha} - \frac{z}{\lambda\alpha}} dz$$

$$= -\lambda\alpha \left(e^{-\frac{b}{\lambda\alpha}} - 1 \right) + \frac{k}{\lambda\alpha} e^{-\frac{c+\phi Y_{t-1} + \beta_1 t + \beta_2 t^2}{\alpha}} \int_0^b e^{-\frac{z}{\alpha}} dz$$

$$= -\lambda\alpha \left(e^{-\frac{b}{\lambda\alpha}} - 1 \right) - \frac{k}{\lambda} e^{-\frac{c+\phi Y_{t-1} + \beta_1 t + \beta_2 t^2}{\alpha}} \left(e^{-\frac{b}{\alpha}} - 1 \right).$$

As a result, the following formula can be utilized to determine a constant k :

$$k = \frac{-\lambda\alpha \left(e^{-\frac{b}{\lambda\alpha}} - 1 \right)}{1 + \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{c+\phi Y_{t-1} + \beta_1 t + \beta_2 t^2}{\alpha}} \left(e^{-\frac{b}{\alpha}} - 1 \right)}. \tag{7}$$

Next, substitute equation (7) into equation (6) to derive the explicit formula of ARL for the AR(1) with quadratic trend model.

$$H(u) = 1 - \frac{\lambda e^{-\frac{(1-\lambda)u}{\lambda\alpha}} \left(e^{-\frac{b}{\lambda\alpha}} - 1 \right)}{\lambda e^{-\frac{c+\phi Y_{t-1} + \beta_1 t + \beta_2 t^2}{\alpha}} + \left(e^{-\frac{b}{\alpha}} - 1 \right)}.$$

If the exponential parameter (α) is determined with α_0 before the start of the process, then the ARL is called ARL_{α_0} . Similarly, if the exponential parameter (α) is assigned to $\alpha_1 = \alpha_0(1 + \delta)$, where $\alpha_1 > \alpha_0$ and δ is the shift sizes in an out-of-control process, then the ARL is called ARL_{α_1} .

The ARL solution demonstrates the uniqueness of the integral equation for explicit formulas using Banach's Fixed-point Theorem. The theorem applies to a metric space consisting of continuous functions on a closed interval $(C(I), \| \cdot \|_{\infty})$ where I denote the compact interval. The norm $\|H\|_{\infty} = \text{Sup}_{u \in I} |H(u)|$ and the operator T are defined on this space. If there exists a number $0 \leq q < 1$ such that the operator T is a contraction, then the theorem holds true

$$\|T(H_1) - T(H_2)\|_{\infty} \leq q \|H_1 - H_2\| \text{ for all } H_1, H_2 \in I.$$

Let $C(I_1)$ as a continuous function on $I_1 = [0, b]$ and define the operator T as

$$T(H(u)) = 1 + \frac{1}{\lambda\alpha} e^{-\frac{1}{\alpha} \left\{ \frac{(1-\lambda)u}{\lambda\alpha} + \frac{(c+\phi Y_{t-1} + \beta_1 t + \beta_2 t^2)}{\alpha} \right\}} \int_0^b H(z) e^{-\frac{z}{\lambda\alpha}} dz.$$

According to the Banach Fixed Point Theorem, if the operator T is a contraction, then fixed point equations $T(H(u)) = H(u)$ has a unique solution. So, in this case, if T is a contraction, then the integral equation can be written as $T(H(u)) = H(u)$, and it will have a unique solution.

Theorem: Banach’s Fixed-point Theorem

In the complete metric space (X, d) where $T : X \rightarrow X$ is a mapping satisfying the criteria of a contraction mapping with contraction constant $q < 1$ such that $\|T(H_1) - T(H_2)\|_\infty \leq q \|H_1 - H_2\|$, there is a unique function $H(\cdot) \in X$ for which $T(H(u)) = H(u)$ has a unique fixed point in X .

Proof:

For any given $u \in I$ and $H_1, H_2 \in C(I)$, we have the inequality $\|T(H_1) - T(H_2)\|_\infty \leq q \|H_1 - H_2\|$ where $q < 1$.

According to (11), we obtain

$$\begin{aligned} \|T(H_1) - T(H_2)\|_\infty &= \text{Sup}_{u \in [0, b]} |H_1(z) - H_2(z)| \\ &= \text{Sup}_{u \in [0, b]} \left| \frac{e^{\frac{(1-\lambda)u + c + \phi Y_{t-1} + \beta_1 t + \beta_2 t^2}{\lambda \alpha}}}{\lambda \alpha} \int_0^b (H_1(z) - H_2(z)) e^{-\frac{z}{\lambda \alpha}} dz \right| \\ &\leq \text{Sup}_{u \in [0, b]} \left\{ \frac{e^{\frac{(1-\lambda)u + c + \phi Y_{t-1} + \beta_1 t + \beta_2 t^2}{\lambda \alpha}}}{\lambda \alpha} \int_0^b e^{-\frac{z}{\lambda \alpha}} dz \right\} \|H_1 - H_2\|_\infty \\ &\leq \text{Sup}_{u \in [0, b]} \left\{ e^{\frac{(1-\lambda)u + c + \phi Y_{t-1} + \beta_1 t + \beta_2 t^2}{\lambda \alpha}} (1 - e^{-\frac{b}{\lambda \alpha}}) \right\} \|H_1 - H_2\|_\infty \\ &\leq q \|H_1 - H_2\|_\infty, \end{aligned}$$

$$\text{where } q = \text{Sup}_{u \in [0, b]} \left[e^{\frac{(1-\lambda)u + c + \phi Y_{t-1} + \beta_1 t + \beta_2 t^2}{\lambda \alpha}} (1 - e^{-\frac{b}{\lambda \alpha}}) \right] < 1.$$

4. NUMERICAL INTEGRATION METHOD

The section addresses the numerical integration of ARL of the EWMA control chart for AR(1) with quadratic trend model. We will use Gauss-Legendre Quadrature rule to approximate the ARL integral equation. Consequently, the following $\tilde{H}(u)$ can be used to define the integral equation in (5).

$$\tilde{H}(u) = 1 + \frac{1}{\lambda} \int_0^b H(z) f\left(\frac{z - (1-\lambda)u}{\lambda} - c - \phi Y_{t-1} - \beta_1 t - \beta_2 t^2\right) dz.$$

The quadrature rule is a mathematical method that allows for the numerical integration of integral equations using finite sums. The approximation for an integral has the following form:

$$\int_0^b W(z) f(z) dz \approx \sum_{j=1}^m w_j f(a_j).$$

$$\text{where } w_j = \frac{b}{m} \text{ and } a_j = \frac{b}{m} \left(j - \frac{1}{2} \right); j = 1, 2, \dots, m.$$

The numerical approximation $\tilde{H}(a_i)$ is used to solve the integral equation through a linear algebraic method.

$$\tilde{H}(a_i) \approx 1 + \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^m w_j \tilde{H}(a_j) f\left(\frac{a_j - (1-\lambda)a_i}{\lambda} - c - \phi Y_{t-1} - \beta_1 t - \beta_2 t^2\right).$$

Thus,

$$\tilde{H}(a_1) \approx 1 + \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^m w_j \tilde{H}(a_j) f\left(\frac{a_j - (1-\lambda)a_1}{\lambda} - c - \phi Y_{t-1} - \beta_1 t - \beta_2 t^2\right).$$

$$\tilde{H}(a_2) \approx 1 + \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^m w_j \tilde{H}(a_j) f\left(\frac{a_j - (1-\lambda)a_2}{\lambda} - c - \phi Y_{t-1} - \beta_1 t - \beta_2 t^2\right).$$

:

$$\tilde{H}(a_m) \approx 1 + \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^m w_j \tilde{H}(a_j) f\left(\frac{a_j - (1-\lambda)a_m}{\lambda} - c - \phi Y_{t-1} - \beta_1 t - \beta_2 t^2\right).$$

It can be rewritten in matrix form.

$$\mathbf{H}_{m \times 1} = (\mathbf{I}_m - \mathbf{R}_{m \times m})^{-1} \mathbf{1}_{m \times 1}.$$

$$\text{where } \mathbf{H}_{m \times 1} = \begin{pmatrix} \tilde{H}(a_1) \\ \tilde{H}(a_2) \\ \vdots \\ \tilde{H}(a_m) \end{pmatrix}, \mathbf{1}_{m \times 1} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}.$$

$$\text{and } [\mathbf{R}]_{ij} \approx \frac{1}{\lambda} w_j f\left(\frac{a_j - (1-\lambda)a_i}{\lambda} - c - \phi Y_{t-1} - \beta_1 t - \beta_2 t^2\right).$$

The numerical integral equation for the ARL of the EWMA control chart is provided below.

$$\tilde{H}(u) \approx 1 + \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^m w_j \tilde{H}(a_j) f\left(\frac{a_j - (1-\lambda)u}{\lambda} - c - \phi Y_{t-1} - \beta_1 t - \beta_2 t^2\right).$$

5. NUMERICAL RESULTS

The study analyzed the explicit formulas and the NIE approach used for detecting changes in the process mean on an EWMA control chart for AR(1) with a quadratic trend model. It compared the findings obtained through numerical integration, especially the absolute percentage difference, with the accuracy and reliability of ARL values calculated from explicit formulas. The absolute percentage difference of ARL can be calculated by

$$\text{Diff}(\%) = \frac{|H(u) - \tilde{H}(u)|}{H(u)} \times 100.$$

Tables 1 through 6 display the numerical results for $ARL_0 = 370$. The ARL_1 of the EWMA control chart for the AR(1) with a quadratic trend model was analyzed using two different methods: the explicit formula and the NIE method. The analysis used an EWMA control chart and determined an exponential smoothing parameter ($\lambda = 0.10, 0.15$). In-control state: exponential parameter

of white noise process $(\alpha_0) = 1$. Out-of-control state: (α_1) ranges from 1.01, 1.03, 1.05, 1.10, 1.20, 1.30, 1.40, 1.50 and 2.00, respectively. The study examined AR(1) with quadratic trend model when the autoregressive coefficient parameter $(\phi) = 0.10, 0.20$ and 0.30 . The linear (β_1) and the quadratic (β_2) coefficients parameter; $(\beta_1 = 0.20, \beta_2 = 0.30)$, $(\beta_1 = 0.30, \beta_2 = 0.50)$, and $(\beta_1 = 0.50, \beta_2 = 0.80)$, respectively. The comparison analysis showed that the ARL values obtained by the explicit formula and the NIE methods were highly similar. It is important to mention that the absolute percentage difference of ARL calculated resulted in a value of zero, which suggests that there was no noticeable difference between the ARL values derived from both methods. However, the CPU time of the explicit formula is faster than the NIE method by around 1–2 seconds.

Table 1 ARL for the explicit formulas and the NIE method on EWMA control chart for AR(1) with quadratic trend model with $\alpha_0 = 1, \lambda = 0.10, \phi = 0.10, \beta_1 = 0.20, \beta_2 = 0.30, b = 0.00242$ and $ARL_0 = 370.283$

α_1	Explicit		NIE	
	ARL	CPU time	ARL	CPU time
1.01	333.273	0.001	333.273	2.199
1.03	271.597	0.001	271.597	2.247
1.05	223.023	0.001	223.023	2.278
1.10	140.524	0.001	140.524	2.184
1.20	62.5586	0.001	62.5586	2.246
1.30	31.6155	0.001	31.6155	2.152
1.40	17.7351	0.001	17.7351	2.278
1.50	10.8692	0.001	10.8692	2.309
2.00	2.48567	0.001	2.48567	2.246

Table 2 ARL for the explicit formulas and the NIE method on EWMA control chart for AR(1) with quadratic trend model with $\alpha_0 = 1, \lambda = 0.15, \phi = 0.10, \beta_1 = 0.20, \beta_2 = 0.30, b = 0.05016$ and $ARL_0 = 370.006$

α_1	Explicit		NIE	
	ARL	CPU time	ARL	CPU time
1.01	337.264	0.001	337.264	2.309
1.03	282.224	0.001	282.224	2.231
1.05	238.224	0.001	238.224	2.230
1.10	161.300	0.001	161.300	2.324
1.20	82.9552	0.001	82.9552	2.231
1.30	47.9105	0.001	47.9105	2.247
1.40	30.1893	0.001	30.1893	2.138
1.50	20.3680	0.001	20.3680	2.325
2.00	5.54718	0.001	5.54718	2.262

Table 3 ARL for the explicit formulas and the NIE method on EWMA control chart for AR(1) with quadratic trend model with $\alpha_0 = 1, \lambda = 0.10, \phi = 0.20, \beta_1 = 0.30, \beta_2 = 0.50, b = 0.001615$ and $ARL_0 = 370.059$

α_1	Explicit		NIE	
	ARL	CPU time	ARL	CPU time
1.01	331.688	0.001	331.688	0.609
1.03	268.137	0.001	268.137	0.578
1.05	218.49	0.001	218.49	0.531
1.10	135.226	0.001	135.226	0.438
1.20	58.3912	0.001	58.3912	0.406
1.30	28.8007	0.001	28.8007	0.328
1.40	15.8592	0.001	15.8592	0.453
1.50	9.59491	0.001	9.59491	0.344
2.00	2.20971	0.001	2.20971	0.500

Table 4 ARL for the explicit formulas and the NIE method on EWMA control chart for AR(1) with quadratic trend model with $\alpha_0 = 1, \lambda = 0.15, \phi = 0.20, \beta_1 = 0.30, \beta_2 = 0.50, b = 0.03270$ and $ARL_0 = 370.097$

α_1	Explicit		NIE	
	ARL	CPU time	ARL	CPU time
1.01	334.368	0.001	334.368	1.890
1.03	275.320	0.001	275.320	1.843
1.05	229.104	0.001	229.104	1.781
1.10	150.532	0.001	150.532	1.828
1.20	74.1248	0.001	74.1248	1.953
1.30	41.5329	0.001	41.5329	1.890
1.40	25.6008	0.001	25.6008	1.828
1.50	16.9977	0.001	16.9977	2.328
2.00	4.52274	0.001	4.52274	1.812

Table 5 ARL for the explicit formulas and the NIE method on EWMA control chart for AR(1) with quadratic trend model with $\alpha_0 = 1, \lambda = 0.10, \phi = 0.30, \beta_1 = 0.50, \beta_2 = 0.80, b = 0.000884$ and $ARL_0 = 370.395$

α_1	Explicit		NIE	
	ARL	CPU time	ARL	CPU time
1.01	329.93	0.001	329.93	1.859
1.03	263.526	0.001	263.526	1.765
1.05	212.276	0.001	212.276	1.625
1.10	127.923	0.001	127.923	1.734
1.20	52.7900	0.001	52.7900	1.875
1.30	25.1230	0.001	25.1230	1.859
1.40	13.4700	0.001	13.4700	1.891
1.50	8.00802	0.001	8.00802	1.875
2.00	1.89231	0.001	1.89231	1.750

Table 6 ARL for the explicit formulas and the NIE method on EWMA control chart for AR(1) with quadratic trend model with $\alpha_0 = 1, \lambda = 0.15, \phi = 0.30, \beta_1 = 0.50, \beta_2 = 0.80, b = 0.01750$ and $ARL_0 = 370.087$

α_1	Explicit		NIE	
	ARL	CPU time	ARL	CPU time
1.01	330.059	0.001	330.059	2.000
1.03	265.537	0.001	265.537	1.843
1.05	216.521	0.001	216.521	1.828
1.10	136.464	0.001	136.464	1.687
1.20	63.3354	0.001	63.3354	1.875
1.30	34.0676	0.001	34.0676	1.766
1.40	20.3922	0.001	20.3922	2.172
1.50	13.2606	0.001	13.2606	1.906
2.00	3.46240	0.001	3.46240	1.859

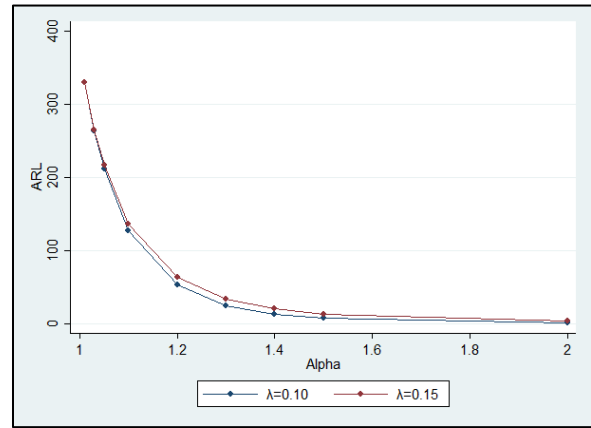


Figure 3 Comparison of ARL_1 of EWMA control charts under AR(1) with quadratic trend model ($\phi = 0.30, \beta_1 = 0.50, \beta_2 = 0.80$) when $\lambda = 0.10$ and 0.15

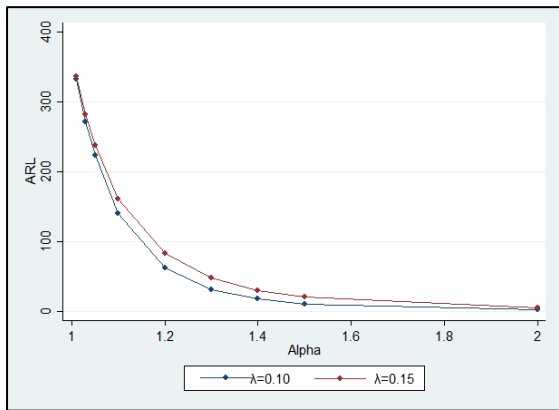


Figure 1 Comparison of ARL_1 of EWMA control charts under AR(1) with quadratic trend model ($\phi = 0.10, \beta_1 = 0.20, \beta_2 = 0.30$) when $\lambda = 0.10$ and 0.15

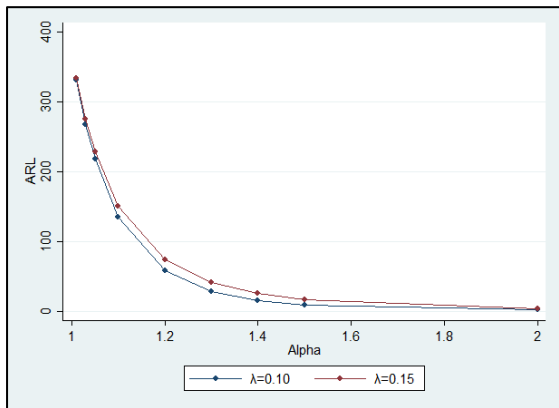


Figure 2 Comparison of ARL_1 of EWMA control charts under AR(1) with quadratic trend model ($\phi = 0.20, \beta_1 = 0.30, \beta_2 = 0.50$) when $\lambda = 0.10$ and 0.15

6. DISCUSSION

The study aimed to calculate the ARL value to detect process mean shifts in an AR(1) with quadratic trend model, using explicit formulas and the NIE method. Establishing the existence and uniqueness of the ARL is crucial for ensuring the accuracy and reliability of any statistical analysis. The validation of explicit formulas has proven beyond doubt that the ARL can be calculated with precision, providing a solid foundation for making informed decisions and driving positive outcomes. This study provides valuable insights into the effectiveness of ARL analysis for monitoring mean shifts. By comparing explicit formulas and the NIE method, the study highlights the benefits and limitations of each approach. This research can help organizations make informed decisions about which method to use in their own monitoring processes. A numerical investigation was conducted to determine the in-control ARL for different parameter configurations and levels of process mean shift. The results showed that there was no significant difference between the absolute percentage difference of the ARLs derived from explicit formulas and those obtained through the NIE method. These findings suggest that either method can be used with confidence to calculate ARLs. Although both methods produced similar results, we observed that the explicit formulas exhibited a significant advantage in computational efficiency. The explicit formulas required considerably less processing time compared to the NIE method. Hence, if you are working on a project that requires

speedy calculations, then the explicit formulas may be the more practical option to use.

ACKNOWLEDGMENT(S)

The authors gratefully acknowledge the editor and referees for their valuable comments and suggestions which greatly improve this paper. The research was funding by Applied Science Faculty King Mongkut's University of Technology North Bangkok Contract no. 672187

REFERENCES

- Areepong, Y., & Novikov, A. A. An integral equation approach for analysis of control charts [Doctoral thesis]. University of Technology. 2009.
- Busaba, J., Sukparungsee, S., Areepong, Y., & Mititelu, G. (2012). Numerical approximations of average run length for AR(1) on exponential CUSUM. In *Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists, Hong Kong 2012*, 7-10 March.
- Champ, C. W., & Rigdon, S. E. (1991). A comparison of the markov chain and the integral equation approaches for evaluating the run length distribution of quality control charts. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 20(1), 191-204.
- Crowder, S. V. (1987). A simple method for studying run-length distributions of exponentially weighted moving average charts. *Technometrics*, 29(4), 401-407.
- Karoon, K., & Areepong, Y. (2023). Improving Sensitivity of the DEWMA Chart with Exact ARL Solution under the Trend AR (p) Model and Its Applications. *Emerging Science Journal*, 7(6), 1875-1891.
- Karoon, K., Areepong, Y., & Sukparungsee, S. (2023). Modification of ARL for detecting changes on the double EWMA chart in time series data with the autoregressive model. *Connection Science*, 35(1), 2219040.
- Karoon, K., Areepong, Y., & Sukparungsee, S. (2024). On the performance of the extended EWMA control chart for monitoring process mean based on autocorrelated data. *Applied Science and Engineering Progress*, 17(2), 6599-6599.
- Lucas, J. M., & Saccucci, M. S. (1990). Exponentially weighted moving average control schemes: properties and enhancements. *Technometrics*, 32(1), 1-12.
- Mititelu, G., Areepong, Y., Sukparungsee, S., & Novikov, A. (2010). Explicit analytical solutions for the average run length of CUSUM and EWMA charts. *East-West Journal of Mathematics*, 1, 253-265.
- Page, E. S. (1954). Continuous inspection schemes. *Biometrika*, 41(1/2), 100-115.
- Peerajit, W. (2023). Statistical design of a one-sided CUSUM control chart to detect a mean shift in a FIMAX model with underlying exponential white noise. *Thailand Statistician*, 21(2), 397-420.
- Petcharat, K., Areepong, Y., & Sukparungsee, S. (2013). Explicit formulas of average run length of EWMA chart for MA (q). *Far East Journal of Mathematic Science*, 78, 291 - 300.
- Petcharat, K. (2022). The effectiveness of CUSUM control chart for trend stationary seasonal autocorrelated data. *Thailand Statistician*, 20(2), 475-488.
- Phanyaem, S. (2022). Explicit formulas and numerical integral equation of ARL for SARX (P, r) L model based on CUSUM chart. *Mathematics and Statistics*, 10(1), 88-99.
- Phanthuna, P., Areepong, Y., & Sukparungsee, S. (2024). Performance Measurement of a DMEWMA Control Chart on an AR (p) Model with Exponential White Noise. *Applied Science and Engineering Progress*, 17(3), 7088-7088.
- Roberts, S. W. (1959). Control chart tests based on geometric moving average. *Technometrics*, 1, 239-250.
- Shewhart, W. A. (1931). *Economic control of quality of manufactured product*. Van Nostrand, New York.
- Supharakonsakun, Y., & Areepong, Y. (2023). ARL Evaluation of a DEWMA Control Chart for Autocorrelated Data: A Case Study on Prices of Major Industrial Commodities. *Emerging Science Journal*, 7(5), 1771-1786.
- Sunthornwat, R., Areepong, Y., & Sukparungsee, S. (2024). Evaluating the Performance of Modified EWMA Control Schemes for Serially Correlated Observations. *Thailand Statistician*, 22(3), 657-673.
- Vanbrackle, L. N., & Reynolds, M. R. (1997). EWMA and CUSUM control charts in the presence of correlation. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 26(3), 979-1008.

ตัวแบบพยากรณ์ผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในเขตสุขภาพ 13 เขตของประเทศไทย

Forecasting Model for Pneumonia Cases in 13 Health Districts in Thailand

วฐา มินเสน^{1*} และ ปรารถนา มินเสน²

Watha Minsan^{1*} and Pradthana Minsan²

¹ ศูนย์วิจัยวิทยาการข้อมูล ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ ประเทศไทย

² ภาควิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ เชียงใหม่ ประเทศไทย

¹Data Science Research Center, Department of Statistics, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand

²Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University, Chiang Mai, Thailand

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในเขตสุขภาพ 13 เขตของประเทศไทย จากข้อมูลทุติยภูมิ Health Data Center กระทรวงสาธารณสุข ด้วยวิธีการวิเคราะห์อนุกรมเวลา 4 วิธี คือ วิธีแยกส่วนประกอบ วิธีทำให้เรียบ วิธีบอซ-เจนกินส์ และวิธีพยากรณ์รวม โดยข้อมูลจำแนกเป็นรายเดือนอยู่ในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2558 ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2565 ผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในเขตสุขภาพแต่ละเขตใช้จำนวนข้อมูลที่แตกต่างกันตามความสมบูรณ์ของข้อมูล แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือชุดข้อมูลฝึกฝนเพื่อสร้างตัวแบบพยากรณ์ และชุดข้อมูลทดสอบเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ โดยใช้เกณฑ์วัดความแม่นยำด้วยร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์แบบสมมาตร (Symmetric Mean Absolute Percentage Error: sMAPE) ผลการวิจัยเพื่อหาตัวแบบที่เหมาะสมพบว่า เขตสุขภาพที่ 1 ถึง 6 และ 8 9 10 12 และ 13 มีตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมคือ ตัวแบบพยากรณ์รวมโดยใช้วิธีถ่วงน้ำหนักด้วยสัมประสิทธิ์การถดถอย และตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมของเขตสุขภาพที่ 7 คือ วิธีแยกส่วนประกอบที่มีส่วนประกอบของแนวโน้มและฤดูกาลรูปแบบคูณและเขตสุขภาพที่ 11 ตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมคือ ตัวแบบพยากรณ์บอซ-เจนกินส์

คำสำคัญ: ผู้ป่วยโรคปอดอักเสบ แยกส่วนประกอบ การทำให้เรียบ บอซ-เจนกินส์ การพยากรณ์รวม

ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate a proposed forecasting model for predicting pneumonia cases across all 13 health districts in Thailand. Monthly time series data from January 2015 to December 2022, obtained from the Health Data Center of the Ministry of Public Health, were utilized. Each health district utilized a varying number of data points depending on data completeness. The data were categorized into two sets: a training dataset for model construction and a test dataset for assessing model accuracy. The forecasting models were evaluated using the symmetric mean absolute percentage error (sMAPE). The results revealed that the combined forecasting approach using regression analysis demonstrated advantages over other methods for health districts 1 to 6, 8, 9, 10, 12, and 13. For health district 7, the most appropriate model was the multiplicative decomposition model with trend and seasonal components. Similarly, for health district 11, the Box-Jenkins model was found to be the most suitable.

KEYWORDS: pneumonia patient, decomposition, smoothing, Box-Jenkins, combined forecasting

*Corresponding Author: wathaminsan@gmail.com

Received: 13/06/2023; Revised: 25/01/2024; Accepted: 16/02/2024

1. บทนำ

โรคปอดอักเสบ หรือปอดบวม (Pneumonia) เป็นโรคติดต่อทางเดินหายใจที่พบเห็นกันมากทั่วไป จากผลการ

สำรวจและการจัดลำดับ 10 โรคที่มีอัตราป่วยของผู้ป่วยในต่อประชากรหนึ่งแสนคน (รวมทุกการวินิจฉัยโรค) พ.ศ. 2558 พบว่า โรคปอดอักเสบสูงเป็นอันดับที่ 7 ของกลุ่ม

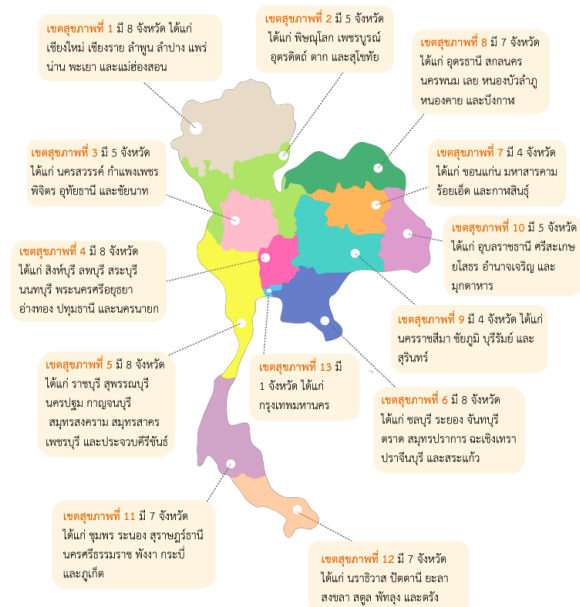
โรคทั้งหมด สูงถึง 702.44 ต่อประชากรหนึ่งแสนคน และโรคนี้มีอัตราการตายตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554 ถึง 2559 ที่มีแนวโน้มสูงขึ้น คือ 23.8 23.7 31.1 37.4 42.1 และ 43.8 ต่อประชากรหนึ่งแสนคน ตามลำดับ (Charupronprasit et. al., 2016; Charupronprasit et. al., 2017) ทั้งนี้โรคปอดอักเสบเกิดได้จากการติดเชื้อจากไวรัส แบคทีเรีย และเชื้อรา เชื้อแบคทีเรียที่พบบ่อยได้แก่ เชื้อ Streptococcus Pneumoniae เชื้อ Haemophilus Influenzae Type b เชื้อ Chlamydia Pneumoniae เชื้อ Legionella SPP. และเชื้อ Mycoplasma Pneumoniae เป็นต้น ส่วนเชื้อไวรัส ได้แก่ เชื้อ Respiratory Syncytial Virus (RSV) เชื้อ Influenza หรือเชื้อไข้หวัดใหญ่ เป็นต้น และเชื้อราจะมาจากมูลนกหรือซากพืชซากสัตว์ เมื่อผู้ป่วยติดเชื้อระบบทางเดินหายใจ ระยะพักตัวขึ้นอยู่กับเชื้อก่อโรค อาจใช้เวลา 1 ถึง 3 วัน เมื่อพบผู้ป่วยมีไข้ ไอ หอบ อาจมีเจ็บหน้าอก ตรวจร่างกายพบมีเสียง Crepitation ในปอดหรือเสียง Bronchial Breath Sound ในเด็กอายุ 2 เดือนถึง 5 ปี

จากรายงาน Bureau of Epidemiology (2015) เมื่อมีรายงานผู้ป่วยเสียชีวิตเฉียบพลันควรตรวจสอบโรคทันทีเพื่อหาเชื้อก่อโรคและสาเหตุการเสียชีวิต และต้องสอบสวนการระบาดเมื่อพบการป่วยเป็นจำนวนมากเป็นกลุ่มก้อนในพื้นที่เดียวกันเพื่อหาเชื้อก่อโรค ผู้ป่วยสามารถแพร่เชื้อได้จนกว่าเสมหะจากปากและจมูกจะมีเชื้อไม่รุนแรงและปริมาณไม่มากพอ การรักษาผู้ป่วยจะใช้ยาปฏิชีวนะเมื่อวินิจฉัยเป็นการติดเชื้อจากแบคทีเรีย ทั้งนี้หากเป็นการติดเชื้อจากไวรัส แพทย์จะรักษาแบบประคับประคองอาการร่วมกับการบำบัดรักษาระบบทางเดินหายใจให้เหมาะสม

ในปัจจุบันมีการระบาดของเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 หรือ โควิด-19 (Covid-19) ซึ่งได้เริ่มแพร่ระบาดเมื่อปลายปี พ.ศ. 2562 และลุกลามไปทั่วโลก สร้างความหวาดกลัวและส่งผลกระทบต่อสุขภาพร่างกายของประชากร ซึ่งโรคระบาดโควิด-19 เป็นโรคที่ส่งผลต่อระบบทางเดินหายใจและปอดโดยตรง ซึ่งอาจจะทำให้มีผู้ป่วยโรคปอดอักเสบเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่มีการระบาดของโรค ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำข้อมูลผู้ป่วยโรคปอดอักเสบเพื่อมาพยากรณ์โดยใช้หลักการทางสถิติ

การพยากรณ์โดยใช้หลักการทางสถิติถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการพยากรณ์มีประโยชน์อย่างมากในการ

วางแผนและการตัดสินใจในการดำเนินงานทั้งระยะสั้นและระยะยาว การพยากรณ์ยังเป็นเครื่องมืออย่างหนึ่งที่จะช่วยให้ได้ข้อมูลในอนาคตเพื่อประกอบการวางแผน จึงเป็นที่ยอมรับกันว่าการพยากรณ์มีบทบาทสำคัญทั้งในงานของภาครัฐและภาคเอกชน ในปัจจุบันตัวแบบพยากรณ์ที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์อนุกรมเวลา หลายวิธีได้ถูกนำมาใช้ในการพยากรณ์ผู้ป่วยทางระบาดวิทยา ในปี พ.ศ. 2559 Keerativibool (2016) ได้ทำการพยากรณ์รายไตรมาสของผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในประเทศไทย โดยใช้วิธีการทางสถิติ 3 วิธี คือ วิธีปรับให้เรียบ วิธีบอซซ์-เจนกินส์ และวิธีพยากรณ์รวม พบว่าผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในประเทศไทยมีลักษณะแนวโน้มและมีฤดูกาลรูปแบบบวกลบสลับได้วิธีพยากรณ์รวมเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาชุดดังกล่าวมากที่สุด ในปี พ.ศ. 2561 Nakunthod & Khamkhod (2018) ได้ศึกษาตัวแบบพยากรณ์อนุกรมเวลารายเดือนของอัตราผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในจังหวัดลำปาง ด้วยวิธีการทางสถิติ 4 วิธี คือ วิธีแยกส่วนประกอบ วิธีทำให้เรียบ วิธีบอซซ์-เจนกินส์ และวิธีพยากรณ์รวม และผลสรุปได้วิธีพยากรณ์รวมมีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาชุดดังกล่าวมากที่สุดเช่นกัน



รูปที่ 1 แผนที่เขตสุขภาพ 13 เขตของประเทศไทย

ที่มา: Ekachampaka et. al. (2018)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะพยากรณ์ผู้ป่วยโรคปอดอักเสบทั่วทั้งประเทศไทย โดยจำแนกเขตสุขภาพเป็นจำนวน 13 เขต ดังรูปที่ 1 โดยงานวิจัยนี้ใช้วิธีการพยากรณ์

ทางสถิติ 4 วิธี ได้แก่ วิธีแยกส่วนประกอบ วิธีปรับให้เรียบ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ และวิธีพยากรณ์รวม โดยแต่ละวิธีทางสถิติจะมีตัวแบบย่อยแตกต่างกันไปตามแต่ลักษณะข้อมูลอนุกรมเวลา เพื่อให้ได้วิธีการพยากรณ์ผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในเขตสุขภาพ 13 เขต ของประเทศไทยที่เหมาะสมเพื่อผลทำนายที่แม่นยำสามารถนำไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นประกอบการวางแผนป้องกัน และควบคุมโรคที่ต้องเฝ้าระวังทางระบาดวิทยาต่อไปทั่วทุกเขตสุขภาพได้

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้มีขั้นตอนวิธีการดำเนินการวิจัยดังนี้

2.1 การจัดเตรียมข้อมูล

การวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อศึกษาวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมของผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในเขตสุขภาพ 13 เขตของประเทศไทย ข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลทุติยภูมิที่รวบรวมจาก Health Data Center กระทรวงสาธารณสุข (Health Data Center, Ministry of Public Health, 2023) โดยลักษณะข้อมูลจำแนกเป็นรายเดือน เขตสุขภาพ 1 ถึง 12 จำนวนข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2558 ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2565 ทั้งหมด 96 ค่า เขตสุขภาพ 13 ข้อมูลตั้งแต่เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2561 ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2565 ทั้งหมด 56 ค่า โดยใช้จำนวนข้อมูลที่แตกต่างกันตามความสมบูรณ์ของข้อมูล จัดแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 เป็นชุดข้อมูลฝึกฝน (Training Data Set) ได้แก่ผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในเขตสุขภาพ 1 ถึง 12 ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2558 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2564 จำนวน 84 ค่า ผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในเขตสุขภาพ 13 ตั้งแต่เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2561 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2564 จำนวน 44 ค่า เพื่อใช้สำหรับการสร้างตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมของแต่ละวิธีการพยากรณ์ ส่วนข้อมูลชุดที่ 2 เป็นชุดข้อมูลทดสอบ (Test Data Set) ได้แก่ผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในเขตสุขภาพ 1 ถึง 13 ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2565 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2565 จำนวน 12 ค่า โดยใช้เกณฑ์ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยแบบสมมาตร (Symmetric Mean Absolute Percentage Error: sMAPE) เพื่อใช้ตรวจสอบความแม่นยำ (Accuracy) ของตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้น

2.2 องค์ประกอบของอนุกรมเวลา

ในการวิเคราะห์ห้อนุกรมเวลาจะแยกองค์ประกอบต่างๆ ที่ประกอบกันขึ้นเป็นอนุกรมเวลา การทราบองค์ประกอบของอนุกรมเวลาเป็นสิ่งสำคัญในการตัดสินใจเลือกวิธีที่เหมาะสมในการสร้างตัวแบบการพยากรณ์ โดยงานวิจัยนี้ องค์ประกอบของอนุกรมเวลาจะใช้เป็นตัวตัดสินใจในการเลือกตัวแบบการพยากรณ์ในวิธีแยกส่วนประกอบและวิธีปรับให้เรียบ โดยพิจารณาองค์ประกอบของการแปรผันของอนุกรมเวลา 3 ส่วน ดังนี้

2.2.1 แนวโน้ม (Trend) ใช้สถิติทดสอบรันส์ (Runs Test) ในการตรวจสอบ โดยใช้ข้อมูลอนุกรมเวลา (Y) หาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กลางแบบ 12 เดือนเพื่อกำจัดอิทธิพลของฤดูกาล แล้วใช้ข้อมูลที่กำจัดอิทธิพลของฤดูกาลแล้ว (Y^T) ทดสอบ

2.2.2 การเปลี่ยนแปลงหรือความแปรผันตามฤดูกาล (Seasonal Variation) ใช้สถิติทดสอบ Kruskal-Wallis ในการตรวจสอบ โดยใช้ข้อมูลอนุกรมเวลาลบข้อมูลที่กำจัดอิทธิพลของฤดูกาลจะเป็นการกำจัดอิทธิพลของแนวโน้ม $Y^S = Y - Y^T$ แล้วใช้ข้อมูล Y^S ในการทดสอบ

2.2.3 ความแปรปรวนของข้อมูลอนุกรมเวลาใช้สถิติทดสอบของเลวิน (Levene's Test) ถ้าความแปรปรวนของข้อมูลอนุกรมเวลาเท่ากัน (Homogeneity of variance หรือ Homoscedasticity) หรือความแปรปรวนคงที่ จะเลือกใช้สมการรูปแบบบวกและถ้าความแปรปรวนของข้อมูลอนุกรมเวลาไม่เท่ากันจะใช้สมการรูปแบบคูณในการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีส่วนประกอบแนวโน้มและฤดูกาล

2.3 การสร้างตัวแบบพยากรณ์

ในการทำวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดสัญลักษณ์ไว้ดังนี้ Y_t คือ ข้อมูลอนุกรมเวลา ณ เวลา t
 \hat{Y}_t คือ ค่าพยากรณ์ ณ เวลา t
 ε_t คือ ความคลาดเคลื่อนที่มีการแจกแจงปรกติและเป็นอิสระกัน ที่มีเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนคงที่ทุกช่วงเวลา
 t คือ ช่วงเวลา มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n_1 หรือ n_2 หรือ n แล้วแต่กรณี คือ

- กรณีอยู่ในขั้นตอนสร้างตัวแบบ n_1 แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาชุดข้อมูลฝึกฝน

- กรณีอยู่ในขั้นตอนทดสอบตัวแบบ n_2 แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาชุดข้อมูลทดสอบและ
- กรณีอยู่ในขั้นตอนการพยากรณ์ล่วงหน้า n แทนจำนวนข้อมูลทั้งหมด

s คือ คาบของฤดูกาลมีค่าเท่ากับ 12 ($s = 12$)

2.3.1 วิธีแยกส่วนประกอบ (Decomposition Method)

วิธีแยกส่วนประกอบเสนอโดย Persons (1919) กล่าวถึงแนวคิดเรื่องการแบ่งอนุกรมเวลาเป็น แนวโน้ม (Trend: T_t) ฤดูกาล (Seasonal: S_t) และส่วนประกอบไม่ปรกติ (Irregular: I_t) ออกจากกัน ส่วนประกอบแนวโน้มสะท้อนถึงทิศทางของข้อมูลระยะยาว ฤดูกาลที่แสดงถึงรูปแบบที่เกิดขึ้นซ้ำๆ กันในช่วงคาบเวลาใดเวลาหนึ่งอย่างเฉพาะเจาะจง และส่วนประกอบไม่ปรกติแสดงถึงความผันผวนของข้อมูลแบบสุ่ม วิธีการนี้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และในปัจจุบันนิยมแยกอนุกรมเวลาออกเป็น ส่วนประกอบต่างๆ 4 ส่วน คือ แนวโน้ม ฤดูกาล วัฏจักร (Cycle: C_t) และส่วนประกอบไม่ปรกติ แต่โดยทั่วไปการพยากรณ์ในระยะสั้น ส่วนประกอบที่จะนำมาพิจารณาในการสร้างตัวแบบพยากรณ์จะมี 2 ส่วนประกอบ คือ แนวโน้มและ/หรือฤดูกาล

ในกรณีที่ส่วนประกอบของข้อมูลอนุกรมเวลาที่พิจารณามีเพียงแนวโน้มใช้ ตัวแบบแนวโน้มเส้นตรง (Linear Trend Model) ในการสร้างตัวแบบพยากรณ์ ตัวแบบและตัวแบบพยากรณ์ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon_t \tag{1}$$

$$\hat{Y}_t = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 t \tag{2}$$

เมื่อพารามิเตอร์ β_0, β_1 แทนระดับของข้อมูล และความชัน ตามลำดับ ส่วน $\hat{\beta}_0$ และ $\hat{\beta}_1$ เป็นตัวประมาณของ β_0 และ β_1 ตามลำดับ

ในกรณีที่ส่วนประกอบของข้อมูลอนุกรมเวลาที่พิจารณามีแนวโน้มและฤดูกาล จะแบ่งการพิจารณาเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบบวก (Additive Decomposition) เหมาะกับอนุกรมเวลาที่มีความแปรผันของฤดูกาลคงที่ และ รูปแบบคูณ (Multiplicative Decomposition) เหมาะกับอนุกรมเวลาที่มีความแปรผันของฤดูกาลไม่คงที่

รูปแบบบวก ตัวแบบและตัวแบบพยากรณ์ดังสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + S_t + \varepsilon_t \tag{3}$$

$$\hat{Y}_t = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 t + \hat{S}_t \tag{4}$$

เมื่อพารามิเตอร์ S_t แทน ดัชนีวัดความแปรผันเนื่องจากฤดูกาล ณ เวลา t ส่วน \hat{S}_t เป็นตัวประมาณของ S_t (Minsan, 2022)

รูปแบบคูณ ตัวแบบและตัวแบบพยากรณ์ดังสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$Y_t = (\beta_0 + \beta_1 t) \times S_t \times \varepsilon_t \tag{5}$$

$$\hat{Y}_t = (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 t) \times \hat{S}_t \tag{6}$$

2.3.2 วิธีปรับเรียบ (Smoothing Method)

วิธีปรับเรียบนั้นเป็นวิธีการสร้างสมการพยากรณ์จากค่าสังเกตในอนุกรมเวลาบางส่วนหรือทั้งหมดโดยให้น้ำหนักกับค่าสังเกตในอนุกรมเวลาแตกต่างกันแล้วแต่ส่วนประกอบของอนุกรมเวลา

ในกรณีที่ส่วนประกอบของข้อมูลอนุกรมเวลาที่พิจารณามีเพียงแนวโน้มใช้ ตัวแบบแนวโน้มเส้นตรงวิธีของ Brown หรือเรียกว่า วิธีทำให้เรียบเอ็กโปเนนเชียลสองครั้ง ในการสร้างตัวแบบพยากรณ์ ตัวแบบพยากรณ์ (7) ดังนี้

$$\hat{Y}_{t+p} = \hat{T}_t + p\hat{\beta}_t \tag{7}$$

$$\hat{T}_t = 2A_t - A'_t$$

$$\hat{\beta}_t = \frac{\alpha}{1-\alpha}(A_t - A'_t)$$

เมื่อ A_t คือ ค่าปรับให้เรียบเอ็กโปเนนเชียลครั้งที่ 1 ที่

$$\text{เวลา } t = \alpha Y_t + (1-\alpha)A_{t-1}$$

A'_t คือ ค่าปรับให้เรียบเอ็กโปเนนเชียลครั้งที่ 2 ที่

$$\text{เวลา } t = \alpha A_t + (1-\alpha)A'_{t-1}$$

โดยค่าเริ่มต้นกำหนดได้ดังนี้ $A_1 = Y_1$ และ $A'_1 = Y_1$

α คือ ค่าถ่วงน้ำหนักอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

p คือ จำนวนช่วงเวลาที่ต้องการพยากรณ์ไปล่วงหน้า

ในกรณีที่ส่วนประกอบของข้อมูลอนุกรมเวลาที่พิจารณามีแนวโน้มและฤดูกาล จะสร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยวิธีปรับเรียบเส้นโค้งเลขชี้กำลังของโฮลต์-วินเตอร์ รูปแบบบวกหรือแบบคูณ วิธีของโฮลต์-วินเตอร์ ใช้ค่าทำให้เรียบ 3 ค่าได้แก่ α, γ และ δ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 สำหรับค่าแนวโน้ม ค่าความลาดชัน และค่าวัดอิทธิพลของฤดูกาลหรือดัชนีฤดูกาลตามลำดับ (Taesombat, 2006)

รูปแบบบวก ตัวแบบพยากรณ์ (8) ดังนี้

$$\hat{Y}_{t+p} = \hat{T}_{t+p} + \hat{S}_{t+p-s} \quad \text{สำหรับ } p=1,2,\dots \quad (8)$$

เมื่อ $\hat{T}_{t+p} = \hat{T}_t + p\hat{\beta}_t$

\hat{Y}_{t+p} คือ ค่าพยากรณ์ ณ เวลา $t+p$

\hat{T}_t คือ ตัวประมาณระดับ $\hat{\beta}_t$ คือ ตัวประมาณ แนวโน้ม และ \hat{S}_t คือ ตัวประมาณฤดูกาล ของอนุกรมเวลา ณ เวลา t โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (9) (10) และ (11)

$$\hat{T}_t = \alpha(Y_t - \hat{S}_{t-s}) + (1-\alpha)(\hat{T}_{t-1} + \hat{\beta}_{t-1}) \quad (9)$$

$$\hat{\beta}_t = \gamma(\hat{T}_t - \hat{T}_{t-1}) + (1-\gamma)\hat{\beta}_{t-1} \quad (10)$$

$$\hat{S}_t = \delta(Y_t - \hat{T}_t) + (1-\delta)\hat{S}_{t-s} \quad (11)$$

รูปแบบคูณ ตัวแบบพยากรณ์ (12) ดังนี้

$$\hat{Y}_{t+p} = \hat{T}_{t+p} \times \hat{S}_{t+p-s} \quad \text{สำหรับ } p=1,2,\dots \quad (12)$$

เมื่อ $\hat{T}_{t+p} = \hat{T}_t + p\hat{\beta}_t$

\hat{Y}_{t+p} คือ ค่าพยากรณ์ ณ เวลา $t+p$

\hat{T}_t คือ ตัวประมาณระดับ $\hat{\beta}_t$ คือ ตัวประมาณ แนวโน้ม และ \hat{S}_t คือ ตัวประมาณฤดูกาล ของอนุกรมเวลา ณ เวลา t โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (13) (14) และ (15)

$$\hat{T}_t = \alpha\left(\frac{Y_t}{\hat{S}_{t-s}}\right) + (1-\alpha)(\hat{T}_{t-1} + \hat{\beta}_{t-1}) \quad (13)$$

$$\hat{\beta}_t = \gamma(\hat{T}_t - \hat{T}_{t-1}) + (1-\gamma)\hat{\beta}_{t-1} \quad (14)$$

$$\hat{S}_t = \delta\left(\frac{Y_t}{\hat{T}_t}\right) + (1-\delta)\hat{S}_{t-s} \quad (15)$$

โดยค่าเริ่มต้นกำหนดได้ดังนี้ $\hat{T}_{initial} = \frac{\sum_{i=1}^s Y_i}{s}$, $\hat{\beta}_{initial} = 0$,

และกรณีรูปแบบบวก $\hat{S}_{initial,j} = Y_j - \hat{T}_{initial}$; $j=1,2,\dots,s$

กรณีรูปแบบคูณ $\hat{S}_{initial,j} = Y_j / \hat{T}_{initial}$; $j=1,2,\dots,s$

2.3.3 วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ (Box et al., 1994)

เป็นวิธีที่ให้ค่าพยากรณ์ที่มีความถูกต้องสูงกว่าค่าพยากรณ์จากวิธีการอื่นในการพยากรณ์ระยะสั้น การกำหนดตัวแบบพยากรณ์ทำได้โดยการตรวจสอบฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัวเอง (Autocorrelation Function: ACF) และฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัวเองบางส่วน (Partial Autocorrelation Function: PACF) ของอนุกรมเวลาแบบคงที่ (Stationary Time Series) หรืออนุกรมเวลาที่มีค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนคงที่ (Taesombat, 2006) ตัวแบบทั่วไปวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ คือ Seasonal Autoregressive Integrated

Moving Average หรือ SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)_s ดังที่แสดงใน (16)

$$\phi_p(\mathbf{B})\Phi_p(\mathbf{B}^s)(1-\mathbf{B})^d(1-\mathbf{B}^s)^D Y_t = \delta + \theta_q(\mathbf{B})\Theta_q(\mathbf{B}^s)\varepsilon_t \quad (16)$$

เมื่อ $\phi_p(\mathbf{B}) = 1 - \phi_1\mathbf{B} - \phi_2\mathbf{B}^2 - \phi_3\mathbf{B}^3 \dots - \phi_p\mathbf{B}^p$ แทนการถดถอยในตัวแบบไม่มีฤดูกาลอันดับ p (Non-seasonal Autoregressive Operator of Order p : AR(p))

$\Phi_p(\mathbf{B}^s) = 1 - \Phi_1\mathbf{B}^s - \Phi_2\mathbf{B}^{2s} - \Phi_3\mathbf{B}^{3s} \dots - \Phi_p\mathbf{B}^{Ps}$ แทนการถดถอยในตัวแบบมีฤดูกาลอันดับ P (Seasonal Autoregressive Operator of Order P : SAR(P))

$(1-\mathbf{B})^d$ คือ อันดับของผลต่างแบบไม่มีฤดูกาล (Non-seasonal Difference)

$(1-\mathbf{B}^s)^D$ คือ อันดับของผลต่างแบบมีฤดูกาล (Seasonal Difference)

$\delta = \phi_p(\mathbf{B})\Phi_p(\mathbf{B}^s)\mu$ คือ ค่าคงตัว โดยที่ μ คือ ค่าเฉลี่ยของอนุกรมเวลาที่คงที่

$\theta_q(\mathbf{B}) = 1 - \theta_1\mathbf{B} - \theta_2\mathbf{B}^2 - \theta_3\mathbf{B}^3 \dots - \theta_q\mathbf{B}^q$ แทนค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบไม่มีฤดูกาลอันดับ q (Non-seasonal Moving Average Operator of Order q : MA(q))

$\Theta_Q(\mathbf{B}^s) = 1 - \Theta_1\mathbf{B}^s - \Theta_2\mathbf{B}^{2s} - \Theta_3\mathbf{B}^{3s} \dots - \Theta_Q\mathbf{B}^{Qs}$ แทนค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบมีฤดูกาลอันดับ Q (Seasonal Moving Average Operator of Order Q : SMA(Q))

\mathbf{B} คือ ตัวดำเนินการถอยหลัง (Backward Operator) โดยที่ $\mathbf{B}^s Y_t = Y_{t-s}$

d และ D คือ ลำดับที่ของการหาผลต่างและผลต่างฤดูกาลของอนุกรมเวลา ตามลำดับ

t คือ ช่วงเวลา มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n_1 หรือ n_2 หรือ n แล้วแต่กรณี

การสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธี บ็อกซ์-เจนกินส์ มีขั้นตอนดังนี้

- 1) การตรวจสอบข้อมูลเพื่อพิจารณาว่าอนุกรมเวลาคงที่หรือไม่ โดยพิจารณาจากกราฟอนุกรมเวลาและพิจารณาจากกราฟ ACF และ PACF และการตรวจสอบ Unit Root ด้วยการทดสอบ Dickey-Fuller (Dickey-Fuller Test) ในงานวิจัยนี้กำหนดลำดับมากที่สุดของ Lag = 12 เนื่องไขในการเลือกลำดับ Lag ที่เหมาะสมคือค่าต่ำที่สุดของเกณฑ์สารสนเทศของอะกะอิเกะ (Akaike's Information Criterion: AIC) หากพบว่าอนุกรมเวลาไม่คงที่ (Non-

stationary) ต้องแปลงอนุกรมเวลาให้คงที่ก่อนที่จะดำเนินการในขั้นตอนต่อไป เช่น การแปลงข้อมูลด้วยการหาผลต่างและ/หรือผลต่างฤดูกาล (Regular Difference or Seasonal Difference) เมื่ออนุกรมเวลามีแนวโน้มและ/หรือฤดูกาล การแปลงข้อมูลแบบ Box-Cox เมื่อความแปรปรวนของอนุกรมเวลาไม่คงที่ เป็นต้น

2) การกำหนดตัวแบบพยากรณ์ที่เป็นไปได้จากกราฟ ACF และ PACF ของอนุกรมเวลาใหม่ที่อนุกรมเวลาแบบคงที่ นั่นคือ กำหนดค่า p, q, P และ Q พร้อมทั้ง ประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Ordinary Least Squares Method)

3) การตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ที่กำหนด โดยการพิจารณาคัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่มีค่าเกณฑ์ AIC ที่ต่ำที่สุด ทดสอบตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบโดยสถิติการทดสอบที (t-test) และตรวจสอบข้อสมมติเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ (e_t) ที่ต้องมีคุณลักษณะความเป็นอิสระกันและมีการแจกแจงปกติด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และความแปรปรวนคงที่ทุกช่วงเวลา นั่นคือ

- ความเป็นอิสระกัน โดยสถิติการทดสอบ Ljung-Box เมื่อกำหนดจำนวน Lag ที่พิจารณาเท่ากับ 36 (LB Lag36)
- การแจกแจงปกติ โดยสถิติการทดสอบคอลโมโกรอฟ-สมิรโนฟ (Kolmogorov-Smirnov Test: KS)
- ค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ โดยสถิติการทดสอบที (t-test)
- ความแปรปรวนคงที่ทุกช่วงเวลา โดยสถิติการทดสอบของเลวี (Levene's Test: Levene)

4) พยากรณ์อนุกรมเวลาโดยใช้ตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุดจากขั้นตอนที่ 3

2.3.4 การสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีพยากรณ์รวม (Combined Forecasting Method)

การพยากรณ์รวมเป็นวิธีการประยุกต์ที่มีการรวมค่าพยากรณ์จากวิธีการพยากรณ์เดี่ยวตั้งแต่ 2 วิธีขึ้นไปเพื่อให้ได้ค่าพยากรณ์ใหม่ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด การพยากรณ์รวมมีด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีถ่วงน้ำหนักความ

คลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยผกผัน (Inverse of Mean Squares Error) วิธีถ่วงน้ำหนักความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เฉลี่ยต่ำสุด (Min Mean Absolute Error) และ วิธีหาค่าเหมาะที่สุดแบบวาฬ (Whale Optimization Algorithm) (Minsan et al., 2021; Minsan & Minsan, 2023) และวิธีถ่วงน้ำหนักด้วยสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Analysis: REG) เป็นต้น Keerativibool (2016) และ Nakunthod & Khamkhod (2018) ที่ได้ศึกษาตัวแบบพยากรณ์อนุกรมเวลาผู้ป่วยโรคปอดอักเสบ พบว่าการพยากรณ์รวมด้วยวิธี REG เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับทั้ง 2 งานวิจัย โดยมีข้อแตกต่างที่ Keerativibool (2016) จะนำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยไปคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักก่อนนำไปใช้ แต่ Nakunthod & Khamkhod (2018) จะนำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่คำนวณได้ไปใช้ในการพยากรณ์รวมด้วยลักษณะการถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression) และเมื่อศึกษางานวิจัยอื่นเพิ่มเติมเกี่ยวกับการพยากรณ์รวมที่นำไปใช้พยากรณ์ในข้อมูลหลากหลาย

Saeying et. al. (2023) พบว่าตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมสำหรับพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) 11 แห่ง วิธีพยากรณ์รวม REG เป็นวิธีที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนทั้ง 11 แห่ง Tunkaew et. al. (2023) หาตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมสำหรับพยากรณ์อัตราแลกเปลี่ยนสกุลเงินต่างประเทศ 10 สกุลที่คนไทยนิยมไปท่องเที่ยวมากที่สุดเทียบกับค่าเงินบาท พบว่าวิธีพยากรณ์รวม REG เป็นวิธีการการพยากรณ์ที่เหมาะสมเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีพยากรณ์รวม REG ด้วยลักษณะการถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression) ตัวแบบพยากรณ์ในสมการที่ (17) ดังนี้

$$\hat{Y}_t = b_0 + b_1 \hat{Y}_{1t} + b_2 \hat{Y}_{2t} + b_3 \hat{Y}_{3t} \quad (17)$$

เมื่อ \hat{Y}_t คือ ค่าพยากรณ์รวม ณ เวลา t และ $\hat{Y}_{1t}, \hat{Y}_{2t}$ และ \hat{Y}_{3t} แทนค่าพยากรณ์เดี่ยว ณ เวลา t จากวิธีแยกส่วนประกอบ วิธีทำให้เรียบ และวิธีบอกซ์-เจนกินส์ตามลำดับ

b_0 คือ ตัวประมาณค่าคงตัวของตัวแบบการวิเคราะห์ถดถอย

b_1, b_2 และ b_3 แทนตัวประมาณค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวิธีพยากรณ์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Method) (Montgomery et al., 2006)

2.3.5 การเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าพยากรณ์ด้วยร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยแบบสมมาตร (Symmetry Mean Absolute Percent Error: sMAPE)

ความถูกต้องของการพยากรณ์เป็นสิ่งที่ผู้ใช้ค่าพยากรณ์ต้องการ ความถูกต้องมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ (Forecast Error: e_t) ซึ่งเป็นผลต่างของค่าจริงและค่าพยากรณ์ ($e_t = Y_t - \hat{Y}_t$) ความคลาดเคลื่อนจะมากถ้าค่าจริงห่างจากค่าพยากรณ์มาก และจะน้อยถ้าค่าพยากรณ์ใกล้เคียงกับค่าจริง ในที่นี้เลือกการพิจารณาค่าความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ใช้ sMAPE (Armstrong, 1985) (Flores, 1986) ซึ่งเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย แสดงผลลัพธ์เป็นร้อยละ เป็นวิธีที่เหมาะสมเพื่อใช้เปรียบเทียบอนุกรมเวลาหลายชุดเมื่อใช้วิธีพยากรณ์เดียวกัน และ/หรือเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์หลายวิธีเมื่อใช้อนุกรมเวลาชุดเดียวกัน และมีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ที่มีข้อมูลจริง (Actual Data) มีค่าบางค่าที่ค่าเป็นศูนย์หรือใกล้เคียงศูนย์ สมการแสดงใน (18)

$$sMAPE = \frac{100}{n_2} \sum_{t=1}^{n_2} \frac{|e_t|}{(Y_t + \hat{Y}_t)/2}, \quad (18)$$

(Hyndman & Koehler, 2006)

เมื่อ n_2 แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาชุดข้อมูลทดสอบ ($n_2 = 12$)

3. ผลการวิจัย

จากการพิจารณาลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในเขตสุขภาพ 13 เขตของชุดข้อมูลฝึกฝนตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2558 ถึงเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2564 จำนวน 84 ค่า สำหรับเขตสุขภาพที่ 1-12 และจำนวน 44 ค่า สำหรับเขตสุขภาพที่ 13 ได้ผลการพิจารณาการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาและการวิเคราะห์ด้วยวิธีการพยากรณ์ 4 วิธี มีรายละเอียดดังนี้

3.1. การพิจารณาการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลา

ผลการวิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลา ทดสอบองค์ประกอบแนวโน้ม ฤดูกาล และความแปรปรวนของข้อมูล โดยการใช้สถิติทดสอบรันส์ ทดสอบ Kruskal-Wallis และทดสอบของเลวิน ตามลำดับ แสดง

ในตารางที่ 1 พบว่าข้อมูลผู้ป่วยโรคปอดอักเสบเขตสุขภาพที่ 1 ถึง 12 สถิติทดสอบรันส์และ Kruskal-Wallis ค่าพินัยต่ำกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด แสดงว่าข้อมูลอนุกรมเวลามีอิทธิพลจากแนวโน้มและฤดูกาล ส่วนเขตสุขภาพที่ 13 สถิติทดสอบรันส์ค่าพินัยต่ำกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด แต่สถิติทดสอบ Kruskal-Wallis ค่าพินัยมากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด ดังนั้นเขตสุขภาพที่ 13 จึงมีเฉพาะแนวโน้ม

เมื่อพิจารณาสถิติทดสอบของเลวินค่าพินัยมากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดในเขตสุขภาพที่ 1, 2, 8, 9, 10, 11, 12 และ 13 แสดงว่า ข้อมูลผู้ป่วยโรคปอดอักเสบมีความแปรปรวนคงที่ ดังนั้นจึงกำหนดให้เขตสุขภาพที่ 1, 2, 8, 9, 10, 11 และ 12 มีอิทธิพลจากแนวโน้มและฤดูกาลเป็นตัวแบบรูปแบบบวก ข้อมูลผู้ป่วยโรคปอดอักเสบที่มีความแปรปรวนไม่คงที่ประกอบด้วย 5 เขต คือ เขตสุขภาพที่ 3 ถึง 7 กำหนดให้มีอิทธิพลจากแนวโน้มและฤดูกาลเป็นตัวแบบรูปแบบคูณ ดังนั้นผลสรุปเขตสุขภาพที่ 1 ถึง 12 จะไปกำหนดตัวแบบในวิธีแยกส่วนประกอบที่มีอิทธิพลจากแนวโน้มและฤดูกาล และวิธีปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของโฮลต์-วินเทอร์

สุดท้ายเขตสุขภาพที่ 13 ที่มีอิทธิพลจากแนวโน้มเพียงอย่างเดียวจะใช้วิธีแยกส่วนประกอบที่มีเฉพาะแนวโน้มเส้นตรงและวิธีทำให้เรียบเอ็กโปเนนเชียลสองครั้งในการสร้างตัวแบบ

3.2. การวิเคราะห์อนุกรมเวลาโดยวิธีแยกส่วนประกอบ

การคำนวณหาความแปรผันฤดูกาล กรณีที่เป็นตัวแบบบวกความแปรผันของฤดูกาลจะแสดงด้วยค่าดัชนีวัดความแปรผันเนื่องจากฤดูกาลที่มีเกณฑ์เทียบจำนวนผู้ป่วยโรคปอดอักเสบปกติจะอยู่ที่ค่าเท่ากับ 0 กรณีที่เป็นตัวแบบคูณความแปรผันของฤดูกาลจะแสดงด้วยค่าดัชนีวัดความแปรผันเนื่องจากฤดูกาลที่มีเกณฑ์เทียบจำนวนผู้ป่วยโรคปอดอักเสบปกติจะอยู่ที่ค่าเท่ากับ 1 แสดงในตารางที่ 2 และตัวแบบเส้นตรงแสดงในตารางที่ 3

จากตารางที่ 2 พบว่าอิทธิพลของฤดูกาลของแต่ละเขตสุขภาพที่ 1 ถึง 12 มีลักษณะคล้ายกันที่ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด นั่นคือจำนวนผู้ป่วยโรคปอดอักเสบจะมีจำนวนน้อยที่สุดทุกเขตสุขภาพในช่วงเดือนธันวาคม และมีจำนวนมากที่สุด ในช่วงฤดูฝนคือประมาณเดือนสิงหาคม

ถึง ตุลาคม และมีจำนวนผู้ป่วยค่อนข้างสูงในช่วงฤดูหนาว คือประมาณเดือน มกราคม ถึง กุมภาพันธ์

3.3 การสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีปรับให้เรียบ

การสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของโฮลด์-วินเทอร์รูปแบบบวกหรือคูณสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ของอนุกรมเวลาผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในเขตสุขภาพ 1 ถึง 12 เขต ได้ค่า α , γ และ δ และวิธีทำให้เรียบอีกโบนเนลสองครั้งในเขตสุขภาพ 13 ได้ค่า α ในตารางที่ 4

3.4 การสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์

ตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ ของอนุกรมเวลาผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในเขตสุขภาพ 13 เขต ประกอบไปด้วยตัวแบบ SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)₁₂ แตกต่างกันแสดงในตารางที่ 5 และ 6

จากตารางที่ 6 พบว่า การทดสอบตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบโดยสถิติการทดสอบที่ผ่านทุกตัวแบบ และจากตารางที่ 5 พบว่า ข้อมูลอนุกรมเวลาผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในเขตสุขภาพ 1 2 3 5 7 8 9 10 11 และ 12 ได้ตัวแบบ SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)₁₂ ที่เหมาะสมผ่านทุกเงื่อนไข มีเพียงเขตสุขภาพที่ 4 ที่ไม่ผ่านเงื่อนไขความคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนคงที่ เขตสุขภาพที่ 6 ที่ไม่ผ่านเงื่อนไขความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปรกติ และ เขตสุขภาพที่ 13 ที่ไม่ผ่านเงื่อนไขความคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนคงที่และความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปรกติ ดังนั้นตัวแบบเขตสุขภาพที่ 4 6 และ 13 จะไม่นำไปใช้ในการพยากรณ์

3.5 การสร้างตัวแบบการพยากรณ์โดยวิธีพยากรณ์รวม

การใช้ตัวแบบพยากรณ์ 3 วิธีแรกมาสร้างตัวแบบการพยากรณ์รวม โดยใช้วิธีถ่วงด้วยสัมประสิทธิ์การถดถอย (REG) สามารถหาค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวิธีได้ผลในตารางที่ 7

3.6 การเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์

จากการพยากรณ์ผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในเขตสุขภาพ 13 เขต ของประเทศไทย ทั้ง 4 วิธีได้ค่าพยากรณ์รายเดือน ตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2565 ถึง เดือน ธันวาคม พ.ศ.

2565 แล้วนำมาคำนวณค่า sMAPE แต่ละวิธี เพื่อเปรียบเทียบตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมได้ผลในตารางที่ 8

จากตารางที่ 8 จะเลือกวิธีการพยากรณ์ที่ให้ค่า sMAPE ต่ำที่สุด แต่ถ้าหากมีกรณีค่า sMAPE ของการพยากรณ์เดี่ยว และพยากรณ์รวมได้ค่าเท่ากันจะเลือกใช้วิธีการพยากรณ์เดี่ยว สรุปผลได้ว่า ส่วนใหญ่แล้วตัวแบบที่มีความเหมาะสมจะใช้เทคนิคตัวแบบพยากรณ์รวม โดยใช้วิธี REG ใช้ตัวแบบนี้ด้วยกันทั้งหมด 11 เขต คือ เขตสุขภาพที่ 1 ถึง 6 และเขตสุขภาพที่ 8 ถึง 10 และเขตสุขภาพที่ 12 และ 13 และตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมของเขตสุขภาพที่ 7 คือ วิธีแยกส่วนประกอบที่มีส่วนประกอบของแนวโน้ม และฤดูกาลรูปแบบคูณและเขตสุขภาพที่ 11 ตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมคือ ตัวแบบพยากรณ์บ็อกซ์-เจนกินส์

3.7 การพยากรณ์ผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในเขตสุขภาพ 13 เขต ของประเทศไทย

ในการพยากรณ์ผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในเขตสุขภาพ 13 เขต ของประเทศไทยรายเดือนในเดือน มกราคม พ.ศ. 2566 ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2566 เลือกใช้วิธีการพยากรณ์ที่ตัวแบบพยากรณ์ให้ค่า sMAPE น้อยที่สุดในแต่ละเขตสุขภาพ ได้ผลการพยากรณ์แสดงในตารางที่ 9 และรูปที่ 2 และ 3

จากรูปที่ 2 และ 3 พบว่าผู้ป่วยโรคปอดอักเสบในแต่ละเขตสุขภาพ 1 ถึง 12 นั้นมีลักษณะฤดูกาลของโรคคล้ายคลึงกัน คือมีลักษณะฤดูกาลเป็นรูปตัวอักษร M โดยจะมีช่วงผู้ป่วยมากในช่วงปลายฤดูหนาวคาบเกี่ยวไปต้นฤดูร้อน และ ช่วงปลายฤดูฝนคาบเกี่ยวไปต้นฤดูหนาว นั่นคือ ช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงผ่านของฤดูกาลจะเป็นเหตุให้มีผู้ป่วยโรคปอดอักเสบมาก อย่างไรก็ตามไม่สามารถใช้เหตุผลนี้สรุปในเขตสุขภาพที่ 13 คือจังหวัดกรุงเทพมหานครได้ จังหวัดนี้ไม่พบลักษณะที่เป็นฤดูกาล เป็นจังหวัดที่มีความผันผวนของจำนวนผู้ป่วยที่คาดการณ์ได้ยาก (ค่า sMAPE สูง) แต่ตัวแบบพยากรณ์ก็พยากรณ์ให้เห็นถึงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของจำนวนผู้ป่วย จึงจำเป็นต้องเฝ้าระวังในเขตสุขภาพนี้

ตารางที่ 1 สถิติทดสอบและค่าพิกัดของสถิติทดสอบรันส์ Kruskal-Wallis และของเลวีเน่ แยกตามเขตสุขภาพ 13 เขต

Health Districts	Runs Test		Kruskal-Wallis Test		Levene's Test	
	Test Statistic	P-value	Test Statistic	P-value	Test Statistic	P-value
1	-8.071	0.000*	54.84	0.000*	0.004	0.952
2	-8.071	0.000*	50.26	0.000*	0.036	0.850
3	-7.121	0.000*	46.37	0.000*	4.219	0.043*
4	-7.834	0.000*	37.54	0.000*	6.891	0.010*
5	-7.596	0.000*	47.82	0.000*	4.243	0.043*
6	-7.359	0.000*	43.36	0.000*	5.252	0.024*
7	-7.596	0.000*	47.45	0.000*	9.224	0.003*
8	-7.359	0.000*	37.58	0.000*	2.844	0.096
9	-7.121	0.000*	50.91	0.000*	0.861	0.356
10	-7.596	0.000*	35.96	0.000*	0.269	0.605
11	-8.071	0.000*	54.11	0.000*	0.041	0.839
12	-7.359	0.000*	46.49	0.000*	1.964	0.165
13	-5.391	0.000*	9.56	0.570	3.12	0.085

หมายเหตุ * ปฏิเสธสมมติฐานว่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 2 ค่าประมาณดัชนีวัดความแปรผันเนื่องจากฤดูกาลด้วยวิธีแยกส่วนประกอบแยกตามเขตสุขภาพ 13 เขต

Health Districts	Seasonal Indices											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1 ^A	1,855	1,722	2,043	-105	-1,243	-1,511	-1,737	-30	1,653	2,730	983	-6,360
2 ^A	818	1,474	889	-726	-852	-837	-519	890	1,999	1,404	-201	-4,340
3 ^B	1.24	1.21	1.21	0.90	0.73	0.76	0.93	1.00	1.27	1.31	1.01	0.43
4 ^B	1.17	1.16	1.15	0.78	0.72	0.88	0.93	1.14	1.53	1.34	0.93	0.27
5 ^B	1.21	1.19	1.08	0.79	0.80	0.88	0.96	1.10	1.38	1.32	0.97	0.32
6 ^B	1.22	1.04	1.07	0.79	0.77	0.89	1.09	1.36	1.37	1.30	0.93	0.17
7 ^B	1.14	1.18	1.21	0.86	0.81	0.84	0.85	1.09	1.29	1.43	1.12	0.19
8 ^A	547	525	989	-1,087	-465	-667	-527	811	1,813	1,113	-281	-2,769
9 ^A	2,238	2,927	1,978	-1,256	-2,021	-1,621	-2,065	704	2,257	4,191	-224	-7,109
10 ^A	1,084	1,324	1,808	-1,808	-2,177	-1,714	-284	351	4,604	3,498	-223	-6,461
11 ^A	1,497	741	476	-1,581	-1,560	-1,141	-184	1,039	3,136	1,655	-363	-3,715
12 ^A	1,414	170	-23	-1,706	-1,812	-784	10	1,563	2,492	1,322	264	-2,910
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ ค่าน้อย ค่ามากสำหรับแต่ละเขตสุขภาพ

^A ส่วนประกอบแนวโน้มและฤดูกาลรูปแบบบวก

^B ส่วนประกอบแนวโน้มและฤดูกาลรูปแบบคูณ

ตารางที่ 3 ค่าประมาณพารามิเตอร์ของตัวแบบเส้นตรง $\hat{\beta}_0$ และ $\hat{\beta}_1$ วิธีแยกส่วนประกอบแยกตามเขตสุขภาพ 13 เขต

Health Districts	Parameters	
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$
1	8,201.0	0.40
2	6,713.0	-45.39
3	3,109.0	-5.99
4	-2,948.0	312.50
5	5,714.0	-18.15
6	4,434.0	88.80
7	14,899.0	-70.40
8	7,403.0	-47.64
9	12,581.0	-58.10
10	12,424.0	-41.00
11	5,616.0	-5.99
12	4,618.0	15.81
13	28.0	9.23

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ α , γ และ δ วิธีเปรียบเทียบแยกตามเขตสุขภาพ 13 เขต

Health Districts	Parameters		
	α	γ	δ
1	0.54	0.00	0.46
2	0.94	0.00	1.00
3	0.21	0.00	0.58
4	0.36	0.41	0.97
5	0.15	0.00	0.48
6	0.00	1.00	0.00
7	0.00	0.03	0.78
8	0.85	0.00	1.00
9	0.89	0.00	1.00
10	0.80	0.00	1.00
11	0.91	0.00	0.84
12	0.65	0.00	1.00
13	0.07	-	-

หมายเหตุ ค่าน้อย ค่ามากสำหรับแต่ละเขตสุขภาพ
 0.00 ใช้แสดงแทนเมื่อค่าเข้าใกล้ศูนย์เกินทศนิยมตำแหน่งที่ 2
 1.00 ใช้แสดงแทนเมื่อค่าเข้าใกล้หนึ่งเกินทศนิยมตำแหน่งที่ 2

ตารางที่ 5 ตัวแบบบอซ-เจนกินส์ และการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบแยกตามเขตสุขภาพ 13 เขต

Health Districts	Box-Jenkins	t-test	Levene	KS	LB Lag 36
		P-value	P-value	P-value	P-value
1	SARIMA(2,1,2)(0,1,0) ₁₂	-0.218	0.537	0.094	20.517
		0.828	0.466	0.120	0.942
2	SARIMA(1,1,2)(0,1,0) ₁₂	-0.856	2.597	0.103	38.162
		0.395	0.112	0.061	0.246
3	SARIMA(0,1,0)(0,1,1) ₁₂	0.128	1.573	0.089	30.220
		0.899	0.214	>0.150	0.698
4	SARIMA(2,1,2)(0,1,0) ₁₂ ^A	-0.302	8.892	0.065	24.115
		0.763	0.004*	>0.150	0.840
5	SARIMA(0,1,2)(1,1,0) ₁₂	-1.081	1.012	0.088	33.987
		0.283	0.318	>0.150	0.420
6	SARIMA(1,0,0)(0,1,1) ₁₂ ^{A,B}	0.452	0.439	0.193	15.735
		0.653	0.510	0.010*	0.995
7	SARIMA(2,1,0)(0,1,1) ₁₂	-0.181	0.809	0.073	27.373
		0.857	0.372	>0.150	0.743
8	SARIMA(0,1,0)(2,1,0) ₁₂	0.078	1.557	0.078	44.357
		0.938	0.216	>0.150	0.110
9	SARIMA(0,1,0)(0,1,1) ₁₂	-0.128	0.776	0.081	46.500
		0.899	0.381	>0.150	0.093
10	SARIMA(1,0,0)(0,1,1) ₁₂	0.052	0.012	0.087	37.110
		0.959	0.913	>0.150	0.328
11	SARIMA(1,0,0)(0,1,1) ₁₂	0.250	0.235	0.096	47.241
		0.803	0.629	0.098	0.065
12	SARIMA(1,1,1)(0,1,0) ₁₂	-0.237	2.770	0.100	28.723
		0.814	0.101	0.077	0.724
13	SARIMA(1,0,1)(2,0,0) ₁₂ ^B	-0.042	16.760	0.324	21.163
		0.967	0.000*	<0.010*	0.908

หมายเหตุ * ปฏิเสธสมมติฐานว่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05
^A Box-Cox transformation by natural log
^B the model that include a constant term.

ตารางที่ 6 สถิติทดสอบที่ ค่าคงตัว AR MA SAR และ SMA ของตัวแบบบอซ-เจนกินส์ แยกตามเขตสุขภาพ 13 เขต

Health Districts	SARIMA (p, d, q) (P, D, Q) ₁₂											
	Ln	d=1	D=1	Constant P-value	AR(1) P-value	AR(2) P-value	MA(1) P-value	MA(2) P-value	SAR(1) P-value	SAR(2) P-value	SMA(1) P-value	SMA(2) P-value
1	No	Yes	Yes		12.800 0.000*	-11.200 0.000*	15.900 0.000*	-15.600 0.000*				
2	No	Yes	Yes		2.300 0.024*		2.900 0.005*	2.200 0.029*				
3	No	Yes	Yes								7.400 0.000*	
4	Yes	Yes	Yes		7.200 0.000*	-3.700 0.000*	8.900 0.000*	-10.100 0.000*				
5	No	Yes	Yes				2.100 0.040*	3.700 0.000*	-5.900 0.000*			
6	Yes	No	Yes	2.400 0.018*	7.800 0.000*						6.300 0.000*	
7	No	Yes	Yes		2.100 0.037*	-3.800 0.000*					7.400 0.000*	
8	No	Yes	Yes					-7.000 0.000*	-2.700 0.008*			
9	No	Yes	Yes								5.900 0.000*	
10	No	No	Yes		8.700 0.000*						7.100 0.000*	
11	No	No	Yes		13.500 0.000*						6.900 0.000*	
12	No	Yes	Yes		6.800 0.000*		18.400 0.000*					
13	No	No	No	10.200 0.000*	-2.200 0.031*		3.700 0.001*		-6.000 0.000*	-6.900 0.000*		

หมายเหตุ * ปฏิเสธสมมติฐานว่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 7 การประมาณค่าพารามิเตอร์ b₀, b₁, b₂ and b₃ ของวิธี REG แยกตามเขตสุขภาพ 13 เขต

Health Districts	Parameters			
	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃
1	-903.06	0.29	0.21	0.62
2	110.53	0.35	-0.03	0.68
3	132.51	0.28	0.10	0.58
4	760.53	0.21	0.71	-
5	147.32	0.25	0.04	0.69
6	-412.99	1.69	-0.61	-
7	316.36	0.41	-0.15	0.74
8	-103.28	0.33	0.07	0.63
9	84.50	0.53	-0.44	0.92
10	-292.40	0.22	0.02	0.80
11	199.35	0.05	-0.19	1.13
12	-	0.65	0.54	0.01
13	2.56	0.87	0.12	-

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบค่า sMAPE ของวิธีแยกส่วนประกอบ การปรับเรียบ บอซ-เจนกินส์ และการพยากรณ์รวมแยกตามเขตสุขภาพ 13 เขต

Health Districts	sMAPE			
	Decomposition	Smoothing	Box-Jenkins	Combined
1	17.15	47.40	74.91	16.61*
2	61.87	50.34	115.59	27.62*
3	27.16	35.71	32.93	16.99*
4	114.32	106.28	-	47.20*
5	31.46	51.95	115.42	20.59*
6	76.31	100.21	-	53.43*
7	16.15*	31.13	36.18	18.97
8	39.80	34.88	75.36	15.01*
9	35.87	36.17	32.88	28.37*
10	33.83	33.92	23.00	19.40*
11	24.89	30.01	16.75*	19.92
12	30.84	87.41	55.87	23.51*
13	105.70	104.49	-	97.84*

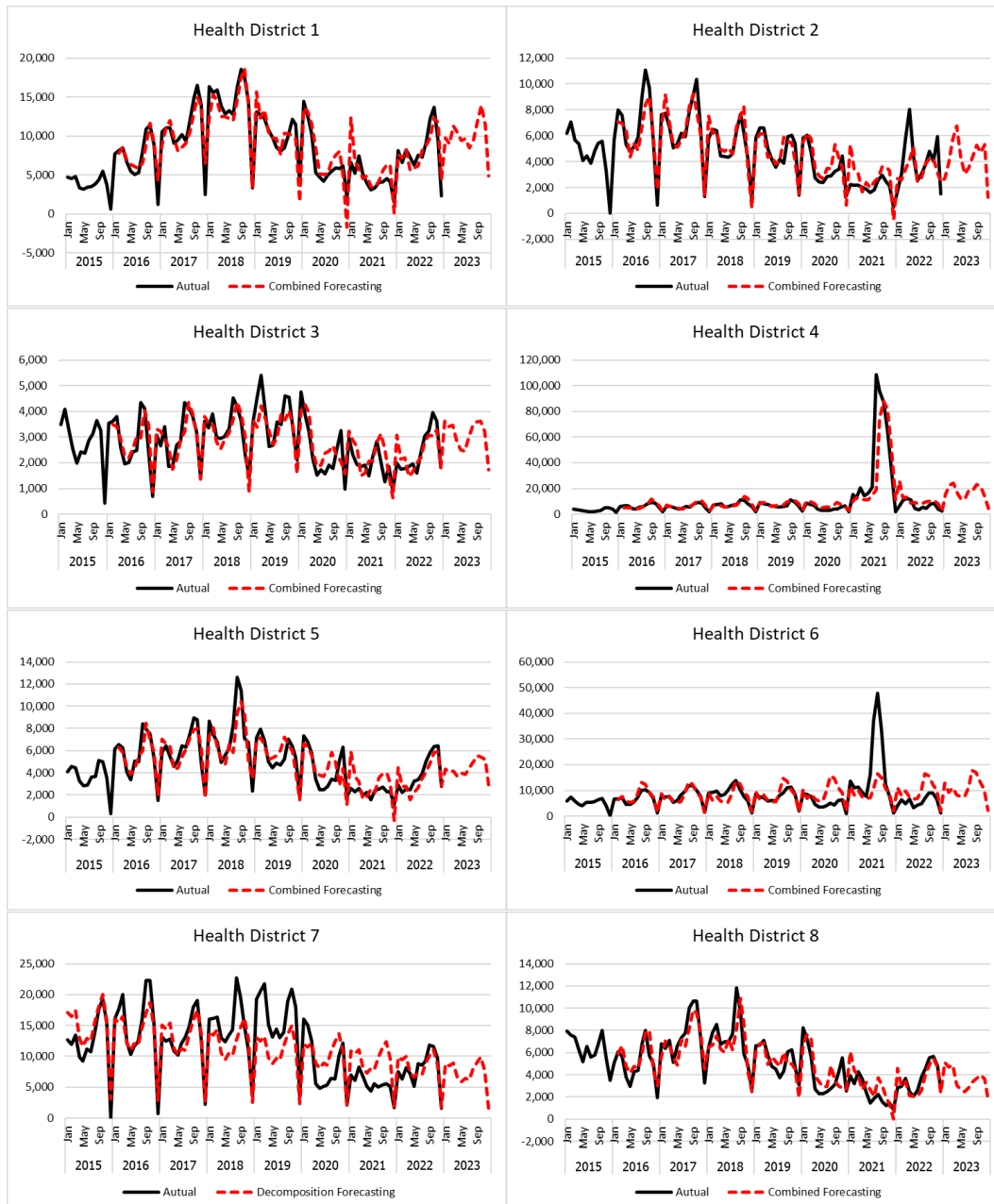
หมายเหตุ * ค่า sMAPE ต่ำที่สุด

ตารางที่ 9 ค่าพยากรณ์ผู้ป่วยโรคปอดอักเสบเขตสุขภาพ 13 เขตตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2566 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2566

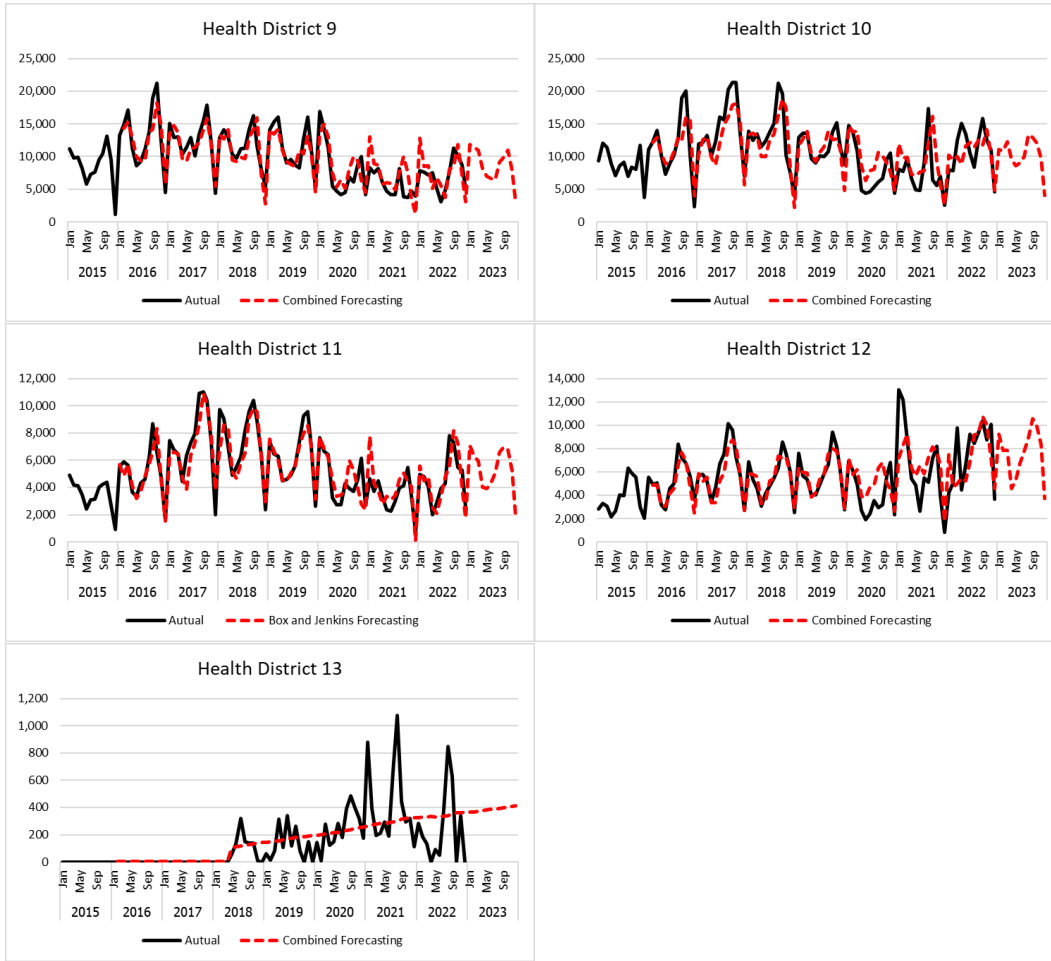
Health Districts	2023											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	9,750	8,959	11,280	10,444	9,448	9,632	8,463	9,433	11,772	13,964	11,396	4,874
2	2,705	3,934	5,750	6,778	4,357	3,034	3,501	4,371	5,267	4,694	5,303	1,273
3	3,615	3,404	3,460	2,830	2,508	2,460	2,977	3,436	3,600	3,616	3,231	1,713
4	15,300	22,443	24,338	16,475	11,007	12,500	18,565	18,537	23,323	21,651	13,902	3,748
5	4,341	4,098	4,134	3,658	4,001	3,828	4,476	5,019	5,515	5,419	5,184	2,863
6	12,758	9,348	11,109	8,295	7,602	7,789	11,396	17,868	17,089	13,431	10,565	2,143
7	8,823	8,458	8,933	6,557	5,901	6,473	6,252	7,786	8,972	9,858	7,704	1,518
8	5,119	4,716	4,903	3,075	2,675	2,450	2,842	3,351	3,693	3,947	3,617	1,786
9	11,830	11,379	11,004	8,183	7,004	6,664	6,424	9,098	9,883	10,949	7,831	3,015
10	11,030	10,876	12,220	9,522	8,644	9,047	10,000	13,297	12,914	12,066	9,685	4,014
11	7,072	6,316	5,954	4,030	3,927	4,332	5,060	6,579	7,000	6,753	5,232	1,841
12	9,240	7,836	7,842	4,569	5,302	6,745	7,765	8,935	10,541	9,903	8,339	3,733
13	363	368	372	376	380	385	389	393	398	402	406	410

หมายเหตุ: ค่าน้อย (สีเหลือง) ถึง ค่ามากสำหรับแต่ละเขตสุขภาพ (สีเขียว)

รูปที่ 2 การเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าพยากรณ์โดยวิธีพยากรณ์ที่เหมาะสมเขตสุขภาพที่ 1 ถึง 8



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าพยากรณ์โดยวิธีพยากรณ์ที่เหมาะสมเขตสุขภาพที่ 9 ถึง 13



ตารางที่ 10 ร้อยละอิทธิพลฤดูกาลและร้อยละการเปลี่ยนแปลงของผู้ป่วยโรคปอดอักเสบปี พ.ศ. 2566 เมื่อเทียบกับปีก่อนแยกตามเขตสุขภาพ 13 เขต

Health District	2023												%change relative to the previous year
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
1	98	90	113	105	95	97	85	95	118	140	115	49	122
2	64	93	135	160	103	71	82	103	124	111	125	30	105
3	118	111	113	92	82	80	97	112	117	118	105	56	127
4	91	133	145	98	65	74	110	110	139	129	83	22	247
5	99	94	94	84	91	87	102	115	126	124	118	65	111
6	118	87	103	77	71	72	106	166	158	125	98	20	193
7	121	116	123	90	81	89	86	107	123	136	106	21	91
8	146	134	140	87	76	70	81	95	105	112	103	51	97
9	137	132	128	95	81	77	75	106	115	127	91	35	120
10	107	106	119	93	84	88	97	129	126	117	94	39	93
11	132	118	111	75	74	81	95	123	131	126	98	34	116
12	122	104	104	60	70	89	103	118	139	131	110	49	101
13	94	95	96	97	98	99	101	102	103	104	105	106	157

หมายเหตุ: สีชมพู ค่าร้อยละที่มีค่าเกิน 100

4. การอภิปราย

จากการพยากรณ์ด้วยตัวแบบที่เหมาะสมทั้ง 13 เขตสุขภาพของประเทศไทยตามตารางที่ 9 เมื่อนำผลค่าการพยากรณ์มาวิเคราะห์แนวโน้มและฤดูกาลได้ผลตาม ตารางที่ 10 ทำให้ทราบว่า เขตสุขภาพจำนวน 10 เขต คือ 1 2 3

4 5 6 9 11 12 และ 13 มีจำนวนผู้ป่วยเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2565 โดยเขตที่ต้องเฝ้าระวังเพราะมีโอกาสผู้ป่วยเพิ่มขึ้นสูงที่สุดคือ เขตสุขภาพที่ 4 เพิ่มเป็นร้อยละ 247 รองลงมา เป็นเขตสุขภาพที่ 6 เพิ่มเป็นร้อยละ 193 ส่วนเขตสุขภาพที่ 7 8 และ 10 มีจำนวนผู้ป่วยลดลงจากปี พ.ศ. 2565

เล็กน้อย คือ ลดลงจากปรกติร้อยละ 100 เหลือร้อยละ 91 97 และ 93 ตามลำดับเขตสุขภาพ

ในการพิจารณาฤดูกาลของโรค ทำให้ทราบความชุกของโรคปอดอักเสบว่าจะมีโอกาสเกิดขึ้นในช่วงไหนเป็นจำนวนมากเพื่อเพิ่มการเฝ้าระวังในพื้นที่ต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ พบว่าทุกเขตสุขภาพมีช่วงที่ต้องเฝ้าระวังเป็นพิเศษเพราะมีโอกาสเกิดโรคมามากที่สุดในช่วงฤดูฝนไปต้นฤดูหนาวคือประมาณช่วงเดือน สิงหาคม ถึงเดือนตุลาคม และช่วงฤดูหนาวไปต้นฤดูร้อนที่มีความเกิดการระบาดของโรคมามากกว่าปรกติคือประมาณช่วงเดือน มกราคม ถึงเดือน มีนาคม ยกเว้นเขตสุขภาพที่ 1 2 5 และ 13 โดยในกรณีเขตสุขภาพที่ 1 และ 2 มีข้อสังเกตเพิ่มเติมเนื่องจากเป็นพื้นที่ตอนเหนือของประเทศไทยการระบาดของโรคมามากกว่าปรกติจะเป็นช่วงเริ่มต้นฤดูร้อนคือช่วงเดือน มีนาคม ถึงเดือนเมษายน ทั้งนี้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปว่าเหตุใดในเขตสุขภาพทั้ง 2 มีช่วงเวลากการป่วยโรคปอดอักเสบที่แตกต่างไปจากเขตสุขภาพอื่นๆ ซึ่งสมมติฐานเบื้องต้นอาจจะคาดการณ์จากภาวะฝุ่นควันที่เป็นปัญหาอย่างมากในทุกปีของพื้นที่ตอนเหนือของประเทศไทย นั้น อาจจะเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ผู้ป่วยโรคปอดอักเสบมีความชุกของโรคเพิ่มขึ้นเป็นพิเศษในช่วงฤดูร้อนต่างๆ ที่เขตสุขภาพอื่นๆ ช่วงเดือนเมษายนจะเป็นช่วงจำนวนผู้ป่วยลดลง

5. บทสรุป

การวิจัยครั้งนี้ได้นำเสนอการเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาข้อมูลผู้ป่วยโรคปอดอักเสบรายเดือนในเขตสุขภาพ 13 เขตของประเทศไทย โดยใช้ อนุกรมเวลารายเดือนจากเว็บไซต์ของ Health Data Center กระทรวงสาธารณสุข พบว่า เขตสุขภาพจำนวน 11 เขต คือ 1 2 3 4 5 6 8 9 10 12 และ 13 ตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมคือ ตัวแบบพยากรณ์รวม โดยใช้วิธีถ่วงน้ำหนักด้วยสัมประสิทธิ์การถดถอย (REG) สอดคล้องกับงานวิจัย Keerativibool (2016) และ Nakunthod & Khamkhod (2018) ที่ศึกษาตัวแบบการพยากรณ์ผู้ป่วยโรคปอดอักเสบ อย่างไรก็ตามวิธีการพยากรณ์อื่นๆ ก็อาจจะเป็นวิธีที่ให้ความแม่นยำในการพยากรณ์ที่ดีได้เช่นเดียวกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อมูลของเรื่องที่ทำการศึกษาและช่วงเวลาที่ทำการศึกษา ดังนั้นในการสร้างตัวแบบการพยากรณ์จึง

จำเป็นจะต้องทำการศึกษาวิธีการทางสถิติในหลายตัวแบบ เพื่อใช้เป็นทางเลือกในการตัดสินใจที่ดีของงานวิจัย เช่น วิธีแยกส่วนประกอบที่มีส่วนประกอบของแนวโน้มและฤดูกาล รูปแบบคุณเป็นตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมของเขตสุขภาพที่ 7 และตัวแบบพยากรณ์บอกซ์-เจนกินส์เป็นตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมเขตสุขภาพที่ 11 เป็นต้น

ผลการศึกษาข้อมูลจริงและค่าพยากรณ์ที่ได้จากตัวแบบที่เหมาะสมในแต่ละเขตสุขภาพทั้ง 13 เขต พบว่า แนวโน้มผู้ป่วยโรคปอดอักเสบลดลงในช่วงปี พ.ศ. 2562 จนถึงปี พ.ศ. 2564 เกือบทุกเขตสุขภาพ ยกเว้นเขตสุขภาพที่ 4 6 12 และ 13 เท่านั้นที่เพิ่มขึ้น การลดลงของผู้ป่วยโรคปอดอักเสบนี้มีความเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับช่วงสถานการณ์ระบาดของเชื้อโควิด-19 เนื่องจากประชากรไทยมีการระมัดระวังสุขภาพเกี่ยวกับโรคปอดกันมากขึ้นในช่วงเวลาปลายปี พ.ศ. 2562 จนถึงกลางปี พ.ศ. 2564 ที่เป็นช่วงการระบาดของโควิด-19 จึงเป็นผลดีต่อการลดจำนวนผู้ป่วยโรคปอดอักเสบของประเทศไทยในภาพรวมทั้งหมด อย่างไรก็ตามเมื่อฟื้นความตื่นตระหนกของวิกฤตการณ์ของโควิด-19 แล้ว คือช่วงหลังของปี พ.ศ. 2564 ถึง พ.ศ. 2565 ผู้ป่วยโรคปอดอักเสบมีจำนวนเพิ่มขึ้นเกือบทุกเขตสุขภาพ

โรคนี้ก็เป็นโรคประจำฤดูกาล ซึ่งจะเห็นได้ชัดจากตารางที่ 10 ว่าโรคนี้ส่วนใหญ่จะเป็นในช่วงปลายฤดูหนาวคาบเกี่ยวไปต้นฤดูร้อนและช่วงปลายฤดูฝนคาบเกี่ยวไปต้นฤดูหนาวของประเทศไทย ดังนั้นในช่วงเวลาดังกล่าวหน่วยงานสาธารณสุขของไทยยังจำเป็นต้องเฝ้าระวังการระบาดของโรคนี้เป็นพิเศษ

ในเขตสุขภาพที่ 13 เป็นเขตสุขภาพที่มีผลการพยากรณ์ที่ไม่แม่นยำ การใช้วิธีการพยากรณ์อนุกรมเวลาในการศึกษานี้อาจจะไม่สามารถจับรูปแบบจำนวนผู้ป่วยที่ถูกต้องของเขตสุขภาพนี้ได้ จำนวนผู้ป่วยโรคปอดอักเสบอาจจะขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นนอกเหนือจากเวลาหรือข้อมูลอนุกรมเวลา เช่น ระดับความเข้มข้นของค่า PM2.5 ในอากาศ อุณหภูมิ หรือปริมาณน้ำฝน เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาดัชนีแบบถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression) หรือ Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Regressors (SARIMAX) ทั้งสองตัวแบบนี้สามารถพิจารณาปัจจัยอื่นๆ นอกเหนือจากเวลาหรือข้อมูลอนุกรมเวลาในการพยากรณ์ได้ การศึกษาเพิ่มเติมอาจช่วยให้เข้าใจปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนผู้ป่วยโรคปอด

อีกเสบนในเขตสุขภาพที่ 13 ได้ดียิ่งขึ้น และนำไปสู่การพัฒนาวิธีการพยากรณ์ที่แม่นยำยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตามวิธีการพยากรณ์อนุกรมเวลานั้นยังสามารถใช้เทคนิคอื่นๆ ทางด้านวิทยาการข้อมูลที่ใช้การเรียนรู้ของเครื่องช่วยในการหาคำตอบ เช่น การใช้โครงข่ายระบบประสาทแบบย้อนกลับ (Recurrent Neural Network: RNN) (Hewamalage et al., 2021) เป็นเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ที่เป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน เมื่อดึงนำเทคนิคนี้มาใช้ในการพยากรณ์ผู้ป่วยโรคปอดอักเสบ โดยกำหนดค่าของไฮเปอร์พารามิเตอร์ ดังนี้ ฟังก์ชันความสูญเสีย (Loss Function) เป็นวิธีคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error) ตัวเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimizer) เป็นวิธี adam ทำการฝึกสอน (Epoch) จำนวน 100 ครั้ง และจำนวนข้อมูลย้อนหลัง (Look Back) เท่ากับ 12 และ 24 ประมวลผลด้วยไพทอน (Python) แล้วเลือกค่า sMAPE ที่ต่ำที่สุดของแต่ละเขตสุขภาพจากการทดลอง ได้ค่าร้อยละ sMAPE ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่า sMAPE ของ RNN แยกตามเขตสุขภาพ 13 เขต ในชุดข้อมูล

ทดสอบ	Health	RNN
	District	
1		35.12
2		82.07
3		43.07
4		141.97
5		38.18
6		90.39
7		117.60
8		127.48
9		40.14
10		40.03
11		46.33
12		37.53
13		99.81

ค่าร้อยละของ sMAPE ของทั้ง 13 เขตสุขภาพจากตารางที่ 11 นั้น บางเขตสุขภาพได้ผลลัพธ์ที่ดีแต่ยังได้ผลไม่ดีกว่าค่าต่ำที่สุดจากวิธีทางสถิติในตารางที่ 8 อย่างไรก็ตามผู้ที่สนใจศึกษาทางด้านเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องอาจจะศึกษาเชิงลึกและทำการทดลองเพิ่มเติมเรื่องการกำหนดค่าของไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่แตกต่างจากงานวิจัยนี้ เพื่อให้ค่าพยากรณ์แม่นยำมากขึ้นได้

เอกสารอ้างอิง

Armstrong, J. S. (1985). *Long-range Forecasting: From Crystal Ball to Computer*, 2nd ed. Wiley.

Box, G. E. P., Jenkins, G. M., & Reinsel, G. C. (1994). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall.

Bureau of Epidemiology, Department of Disease Control, Ministry of Public Health. (2015). *Annual Epidemiological Surveillance Report 2015*. Bangkok, Thailand: The Agricultural Co-operative Federation of Thailand., Ltd. Publisher. Retrieved May 3, 2023, from <https://apps-doe.moph.go.th/boeeng/annual/Annual/AESR2015/> (in Thai)

Charupronpravit, R., Sirirat, B., & Sumtip, J. (2017). *Statistical Thailand 2017*. Nontaburi, Bureau of Policy and Strategy, Ministry of Public Health. Retrieved May 3, 2023, from <http://digital.nlt.go.th/dlib/items/show/10642> (in Thai)

Charupronpravit, R., Suthiart, A., Sirirat, B., & Dumrongchat, B. (2016). *Statistical Thailand 2016*. Nontaburi, Bureau of Policy and Strategy, Ministry of Public Health. Retrieved May 3, 2023, from <http://digital.nlt.go.th/dlib/items/show/10640> (in Thai)

Ekachampaka, P., Sriprayoon, P., & Thammachart, S. (2018). *Thailand Regional Health Profile 2012 - 2017*. Strategy and Planning Division of Office of the Permanent Secretary Ministry of Public Health, Bangkok: Chinauksorn Printing. (In Thai)

Flores, B. E. (1986). A pragmatic view of accuracy measurement in forecasting. *Omega*, 14(2), 93-98.

Health Data Center, Ministry of Public Health. (2023). *Rates of Pneumonia Cases*. Retrieved May 3, 2023, from <https://hdcservice.moph.go.th/hdc/main/index.php>

Hewamalage, H., Bergmeir, C., & Bandara, K. (2021). Recurrent neural networks for time series forecasting: Current status and future directions. *International Journal of Forecasting*, 37(1), 388-427.

Hyndman, R. J., & Koehler, A. B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22(4), 679-688.

Keerativibool, W. (2016). Forecasting model for the number of patients with pneumonia in Thailand. *Public Health Journal Burapha University*, 11(1), 24-38. (in Thai).

Minsan, P. (2022). Forecasting model for export condom quantity of Thailand on the COVID-19 situation. *The Journal of Applied Science*, 21(1), 1-21. (in Thai). <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/JASCI/article/view/244500>

Minsan, W., & Minsan, P. (2023). Incorporating decomposition and the holt-winters method into the whale optimization algorithm for forecasting monthly government revenue in Thailand. *Science & Technology Asia*, 28(4), 38-53. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/SciTechAsia/article/view/250335>

Minsan, W., Saengngamuang, N., Taninpong, P., & Thumronglaohapun, S. (2021). Comparing methods of optimization in solver of excel 2019 and whale optimization algorithm. *UTK Journal*, 15(2), 107-120. (in Thai). <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/rmutk/article/view/245178>

Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2006). *Introduction to Linear Regression Analysis*, 4th ed. New York: Wiley.

Nakunthod, I., & Khamkhod, K. (2018). Time series modeling for the pneumonia rate of patients in Lampang province. In: *Proceeding of the 18th Graduate Studies of Northern Rajabhat, University Network Conference and the 4th Lampang Research*, 20 July 2018, pp. 340-358. Lampang, Thailand. (in Thai)

Persons, W. (1919). Indices of business conditions. *Review of Economics and Statistics*, 1, 5-110.

- Saeying, J., Minsan, W., & Taninpong, P. (2023). Forecasting model for the amount of water flowing into the reservoirs of the electricity generating authority of Thailand (EGAT). *RMUTSV Research Journal*, 15(2), 494-510. (in Thai). <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsvrj/article/view/252100>
- Taesombat, S. (2006). *Quantitative Forecasting*. Bangkok: Kasetsart University Press. (in Thai)
- Tunkaew, T., Minsan, P., Nontapa, C., & Minsan, W. (2023). A suitable forecasting model for exchange rates of the top 10 foreign currencies most preferred by Thai tourists compared to the Thai baht. *Thai Science and Technology Journal*, 31(3), 1-21. (in Thai) <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/tstj/article/view/258445>

การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวและป่าสุ่ม สำหรับการทำนายราคาปิดหุ้น GULF

Comparative Analysis of Long Short-Term Memory and Random Forest

Models for GULF Stock Closing Price Prediction

คณิน พงษ์ธนาวงศ์, ณรงค์ฤทธิ์ แก้วบรรจักษ์*

Kanin Pongtanavong, Narongrit Kaewbanjak*

คณะวิทยาศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ประเทศไทย

Faculty of Science at Sriracha, Kasetsart University, Sriracha Campus, Thailand

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบป่าสุ่ม และตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาว (Long Short-Term Memory: LSTM) ในการทำนายราคาปิดของหุ้น GULF ซึ่งลักษณะราคาหุ้นอยู่ในแนวโน้มขาขึ้นระยะยาว โดยใช้ข้อมูลราคาปิดและราคาเปิดตั้งแต่วันที่ 21 มีนาคม พ.ศ. 2561 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2565 ร่วมกับตัวชี้วัดเชิงเทคนิคได้แก่ EMA TEMA และ WMA ซึ่งได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบทั้งหมด 3 กรณีศึกษา ประกอบไปด้วย กรณีแรกการใช้ตัวแบบป่าสุ่มที่มีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม กรณีที่ 2 การใช้ตัวแบบ LSTM ที่มีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม และกรณีสุดท้ายซึ่งจะคล้ายกับกรณีที่ 2 แต่จะทำการปรับค่าฟังก์ชันกระตุ้นจากฟังก์ชัน Hyperbolic Tangent (Tanh) เป็นฟังก์ชัน Exponential Linear Unit (ELU) โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบทั้งสามกรณีด้วยค่าความคลาดเคลื่อนและกราฟแสดงค่าทำนาย ผลการศึกษา พบว่า ตัวแบบป่าสุ่มนั้น มีประสิทธิภาพในการทำนายราคาปิดของหุ้น GULF น้อยที่สุด และตัวแบบ LSTM ที่ได้มีการปรับค่าฟังก์ชันกระตุ้นเป็นฟังก์ชัน ELU ในกรณีที่ 3 นั้นมีประสิทธิภาพมากที่สุดจากทั้งสามกรณี

คำสำคัญ: การทำนายราคาปิดของหุ้น, การเรียนรู้ของเครื่อง, การเรียนรู้เชิงลึก, ตัวแบบป่าสุ่ม, ตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาว

ABSTRACT

In this study, we conducted a comparative analysis of the performance of a Random Forest model and a Long Short-term Memory model (LSTM) in predicting the closing price of GULF stock, which has an Uptrend characteristic. The data used in this study included closing and opening prices from March 21, 2018, to December 31, 2022, along with technical indicators such as EMA, TEMA, and WMA. Three comparative studies were conducted: the first case utilized a Random Forest model with optimal parameters, the second one utilized an LSTM model with optimal parameters, and the third case was similar to the second one but with a modification in the activation function from Hyperbolic Tangent function (Tanh) to Exponential Linear Unit function (ELU). The performance of these three models was evaluated based on the error values and the predicted value graphs. Our findings indicate that the Random Forest model had the lowest performance for GULF stock closing price prediction among the three cases. Conversely, the modified LSTM model with the ELU activation function in the third case demonstrated the highest performance among the three cases.

KEYWORDS: Stock Closing Price Prediction, Machine Learning, Deep Learning, Random Forest Model, Long Short-Term Memory Model

*Corresponding Author:

Received: 17/06/2023; Revised: 27/02/2024; Accepted: 19/06/2024

1. บทนำ

หุ้นเป็นสินทรัพย์ประเภทหนึ่งที่เกิดการออกให้แก่ผู้ถือ เพื่อระดมเงินทุนไปต่อยอด หรือลงทุนในการขยายกิจการ โดยที่ผู้ถือจะมีส่วนได้ส่วนเสีย หรือมีสิทธิในสินทรัพย์ และรายได้ของบริษัท รวมทั้งมีโอกาสได้รับเงินปันผลซึ่งขึ้นอยู่กับผลประกอบการของบริษัทในแต่ละไตรมาส หรือแต่ละปี ในประเทศไทยนั้นได้มีการจัดตั้งตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทยขึ้นตามพระราชบัญญัติตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย พ.ศ. 2517 โดยมีวัตถุประสงค์ให้เป็นตลาดรองเพื่อการระดมทุนในการพัฒนาประเทศ พัฒนาการลงทุน และเป็นศูนย์กลางการซื้อขายหลักทรัพย์

สินทรัพย์ประเภทหุ้นเป็นสินทรัพย์ที่มีความผันผวนไปตามสภาวะเศรษฐกิจโลก ซึ่งในปัจจุบันที่สภาวะเศรษฐกิจโลกอยู่ระหว่างการฟื้นตัวจากเหตุการณ์ต่าง ๆ ในระยะเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมาไม่ว่าจะเป็น การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ที่มีการแพร่ระบาดไปทั่วโลก สถานการณ์ความตึงเครียดระหว่างสาธารณรัฐประชาชนยูเครนและสหพันธรัฐรัสเซีย การปรับขึ้นอัตราดอกเบี้ยเพื่อแก้เงินเฟ้อของธนาคารกลางสหรัฐอเมริกา ค่าเงินบาทที่ผันผวน อีกทั้งยังมีปัจจัยภายในประเทศ เช่น นโยบายของภาครัฐ ปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อสภาวะเศรษฐกิจและตลาดหุ้นไทย จึงส่งผลให้มีนักลงทุนมากมายที่ต้องการแสวงหาผลกำไรภายใต้สภาวะความผันผวนเช่นนี้เพิ่มขึ้นจำนวนมาก และพยายามที่จะทำนายหรือพยากรณ์ราคาหุ้นทั้งในเชิงเทคนิค และการทำนายโดยใช้ตัวแบบต่าง ๆ เพื่อให้สามารถวางแผนเตรียมการรับมือป้องกันหรือวางแผนเพื่อให้สามารถสร้างกำไรได้จากการลงทุนแต่อย่างไรก็ตามการทำนายราคาของหุ้นให้มีความแม่นยำสูงนั้นเป็นความท้าทายอย่างมาก วิธีที่ได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้ในการทำนายราคาของหุ้นกันอย่างแพร่หลายคือ การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning : ML) และการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning : DL) โดยตัวแบบที่นิยมนำมาใช้งาน อาทิเช่น ตัวแบบป่าสุ่ม (Random Forest Model : RF) ที่พัฒนามาจากตัวแบบต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree Model : DT) โดย Breiman (2001) และตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาว (Long Short-Term Memory Model : LSTM) ที่พัฒนามาจากโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับ (Recurrent Neural Network : RNN) โดย Hochreiter & Schmidhuber (1997)

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยมากมายที่ได้ศึกษาการสร้างตัวแบบเพื่อใช้ในการทำนายทั้งดัชนีของตลาดหลักทรัพย์และราคาหุ้นรายตัว โดยเริ่มจากการใช้เพียงข้อมูลพื้นฐานในอดีตไปจนถึงการใช้ตัวชี้วัดเชิงเทคนิคร่วมด้วย อาทิเช่น Hum Nath Bhandari et al. (2022) ได้ศึกษาการใช้ตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวในการทำนายราคาปิดในวันถัดไปของดัชนี S&P 500 โดยใช้ตัวแปรนำเข้าจำนวน 9 ตัวที่มีการนำมารวมกันอย่างลงตัวจากข้อมูลพื้นฐานของตลาด ข้อมูลเศรษฐศาสตร์มหภาค และตัวชี้วัดเชิงเทคนิคเพื่อจับพฤติกรรมของตลาดหลักทรัพย์ และสร้างตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวแบบชั้นเดียวและหลายชั้นโดยใช้ตัวแปรนำเข้าที่ถูกละเลือกไว้ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวแบบชั้นเดียวมีผลการทำนายที่แม่นยำกว่าตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวแบบหลายชั้น Manuel R. Vargas et al. (2017) ได้นำหลักการเรียนรู้เชิงลึกไปประยุกต์ใช้สำหรับการทำนายทิศทาง การเคลื่อนไหวของราคาหุ้นรายวันโดยใช้ตัวชี้วัดเชิงเทคนิคร่วมกับบทความข่าวการเงินเป็นตัวแปรนำเข้า ผลการศึกษาพบว่าบทความข่าวการเงินนั้นมีส่วนสำคัญที่ทำให้ผลลัพธ์มีเสถียรภาพมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ตัวชี้วัดเชิงเทคนิคเป็นตัวแปรนำเข้าเพียงอย่างเดียว และมีผลลัพธ์สอดคล้องกันเมื่อเปรียบเทียบกับชุดของตัวชี้วัดเชิงเทคนิคที่แตกต่างกัน Mehar Vijh et al. (2019) ได้ศึกษาการทำนายราคาปิดในวันถัดไปของหุ้นจาก 5 บริษัทที่อยู่ในกลุ่มอุตสาหกรรมที่แตกต่างกันโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม และตัวแบบป่าสุ่ม จากผลการศึกษา พบว่า ในการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมนั้น ให้ผลการทำนายที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการประยุกต์ใช้ตัวแบบป่าสุ่ม ไม่เพียงเท่านั้นยังมีการนำการเรียนรู้ของเครื่อง มาใช้กับสกุลเงินดิจิทัล (Cryptocurrency) เช่น การศึกษาของ Huang et al. (2019) ได้ศึกษาความสามารถในการทำนายผลตอบแทนของบิตคอยน์ ด้วยการสร้างตัวแบบต้นไม้ตัดสินใจเพื่อจำแนกข้อมูลสำหรับการทำนายผลตอบแทนโดยใช้ตัวชี้วัดเชิงเทคนิค 124 ตัว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้ข้อมูลขนาดใหญ่และการวิเคราะห์เชิงเทคนิคสามารถช่วยทำนายผลตอบแทนของบิตคอยน์ซึ่งไม่ได้ขับเคลื่อนด้วยปัจจัยพื้นฐานได้ ในประเทศไทยเองก็มีงานวิจัยด้านนี้เช่นเดียวกัน อาทิเช่น การศึกษาของ Kaewmaha & Punyachaporn (2021) ได้ศึกษาการคาดการณ์

ผลตอบแทนในขนาดของตราสารทุนหุ้นสามัญโดยการ
ใช้การเรียนรู้ของเครื่อง จากผลการศึกษา พบว่า ตัวแบบ
การเรียนรู้ของเครื่องที่สามารถทำนายผลตอบแทนได้
แม่นยำที่สุดก็คือตัวแบบป่าสุ่มซึ่งมีความคลาดเคลื่อน
ต่ำที่สุดในทุกช่วงของการคาดการณ์ผลตอบแทน (ราย 1
วัน 1 เดือน และ 3 เดือน)

จากแนวคิดที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยนี้
ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาประสิทธิภาพในการทำนายราคาปิด
ของหุ้นในตลาดหุ้นไทย โดยการใช้ตัวแบบป่าสุ่มและตัว
แบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาว เพื่อทำนาย
พฤติกรรมราคาเคลื่อนไหวของราคาปิดของหุ้นในเวลา
ถัดไปที่มีการผันแปรในลักษณะขึ้นหรือลงตามเวลา ซึ่ง
กรณีที่จะถูกนำมาเปรียบเทียบนั้นได้แก่ กรณีแรก การใช้
ตัวแบบป่าสุ่มที่มีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยการ
ใช้ Randomized Search CV จากไลบรารี Sci-kit learn
กรณีที่สองการใช้ตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวที่
มีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้ Bayesian
Optimization จากไลบรารี Keras Tuner และกรณีที่สาม
จะคล้ายกับกรณีที่สองแต่ผู้วิจัยจะทำการปรับค่าฟังก์ชัน
กระตุ้น (Activation Function) จากฟังก์ชัน Tanh เป็น
ฟังก์ชัน ELU ซึ่งเหมาะกับข้อมูลที่มี Noise และสามารถ
แก้ปัญหา Vanishing Gradient ตลอดจนสามารถทำงาน
ได้ดีกับข้อมูลใหม่ที่ไม่เคยเห็นมาก่อน สำหรับข้อมูลที่ใช้
ในการศึกษานั้นเป็นชุดข้อมูลพื้นฐานในอดีตของหุ้น ซึ่ง
ประกอบด้วย ราคาเปิดและราคาปิด ตั้งแต่วันที่ 21
มีนาคม พ.ศ. 2561 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2565 ร่วมกับ
ตัวชี้วัดเชิงเทคนิคได้แก่ EMA TEMA และ WMA โดย
เลือกกรณีศึกษาสำหรับหุ้น GULF ซึ่งเป็นหุ้นที่น่าสนใจ
เนื่องจากราคาอยู่ในแนวโน้มขาขึ้นระยะยาว หรือ Uptrend
นับตั้งแต่เริ่มทำการซื้อขายในตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย โดยทำจุดสูงสุดใหม่ (New High) อยู่
บ่อยครั้ง

2. ความรู้พื้นฐาน

การเรียนรู้ของเครื่อง (กอบเกียรติ สระอุบล, 2565) เป็นศาสตร์อีกแขนงหนึ่งที่ใช้สำหรับสร้างการ
เรียนรู้ให้กับเครื่อง โดยอาศัยวิธีการทางคณิตศาสตร์และ
สถิติในการสร้างตัวแบบจากข้อมูลที่มีอยู่เพื่อใช้ในการ
ทำนายผลและตัดสินใจ ทั้งนี้ การเรียนรู้ของเครื่องถือเป็น
ส่วนหนึ่งของการสร้างปัญญาประดิษฐ์และยังต้องนำ
ความรู้ด้านวิทยาการข้อมูลมาเป็นพื้นฐานในการคำนวณ

อีกด้วย โดยแบ่งประเภทของการเรียนรู้ออกเป็นสอง
ประเภทหลัก คือ การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised
Learning) เป็นการเรียนรู้จากลักษณะของข้อมูลตัวอย่างที่
มีการระบุผลที่ต้องการหรือประเภทไว้ แล้วนำไปทำนาย
ข้อมูลอื่นที่ไม่ทราบค่าตอบมาก่อน ซึ่งการเรียนรู้แบบมี
ผู้สอนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การจำแนกประเภท
(Classification) และ การวิเคราะห์การถดถอย
(Regression) ในส่วนของการเรียนรู้ของเครื่องอีกประเภท
หนึ่งคือ การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised
Learning) เป็นการสร้างตัวแบบที่เหมาะสมกับข้อมูลเพื่อ
วิเคราะห์และจัดกลุ่มข้อมูล ตัวแบบประเภทนี้ถูกใช้ในการ
ค้นหารูปแบบที่ซ่อนอยู่ในข้อมูล หรือการจัดกลุ่มข้อมูล
ข้อมูลโดยระบบจะประมวลผลเอง ซึ่งที่ผู้ใช้งานไม่ต้อง
แทรกแซงการทำงานของระบบ

การเรียนรู้เชิงลึก (กอบเกียรติ สระอุบล, 2565)
เป็นศาสตร์แขนงย่อยซึ่งอยู่ในการเรียนรู้ของเครื่องอีก
ชั้นหนึ่ง ที่มีเป้าหมายเช่นเดียวกับการเรียนรู้ของเครื่อง
คือทำให้คอมพิวเตอร์เกิดการเรียนรู้แล้วนำความรู้ขึ้นมา
ใช้งาน แต่การเรียนรู้เชิงลึกนั้นจะใช้วิธีหรือเทคนิค
โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ซึ่ง
มีความลึกหลายชั้นที่จำลองการทำงานของเซลล์ประสาท
ในสมองมนุษย์ โดยตัวอย่างที่เด่นชัดของการประยุกต์ใช้
การเรียนรู้เชิงลึก เช่น การจำแนกภาพ การตรวจจับวัตถุ
และการรู้จำใบหน้า

ตัวแบบป่าสุ่มเป็นการเรียนรู้แบบรวมกลุ่ม
(Ensemble Learning) ซึ่งถูกพัฒนามาจากตัวแบบต้นไม้
ตัดสินใจโดย Breiman (2001) สามารถใช้งานได้ทั้ง
สำหรับการจำแนกประเภทและการวิเคราะห์การถดถอย
หลักการทำงานของตัวแบบป่าสุ่มคือจะทำการสร้างตัว
แบบต้นไม้ตัดสินใจหลาย ๆ ต้น โดยสร้างจากการสุ่ม
ข้อมูลตัวอย่างแบบเลือกแล้วใส่กลับ และสุ่มตัวแปรเพื่อ
นำมาสร้างเป็นตัวแบบต้นไม้ตัดสินใจที่มีลักษณะแตกต่างกัน
ในแต่ละต้น โดยให้ต้นไม้ตัดสินใจแต่ละต้นทำนาย
ผลลัพธ์แล้วนำไปหาผลลัพธ์สุดท้าย หากเป็นการจำแนก
ประเภทจะแสดงผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่าที่ได้รับการทำนาย
มากที่สุดจากต้นไม้ตัดสินใจทั้งหมด ถ้าในกรณีที่เป็นการ
วิเคราะห์การถดถอยจะแสดงผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่าเฉลี่ย
ของผลลัพธ์จากต้นไม้ตัดสินใจทั้งหมด

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นขั้นตอนวิธีสำหรับ
ประมวลผลสารสนเทศโดยการคำนวณแบบคอนเนคชัน
นิสต์ (Connectionist) เพื่อจำลองการทำงานของระบบ

โครงข่ายประสาทในสมองของมนุษย์ โดยนำหลักการมาจากระบบประสาทจริงทางชีววิทยา (Biological Neuron) ที่ประกอบด้วยเซลล์ประสาทหรือนิวรอน (Neurons) และจุดประสานประสาท (Synapses) ทำหน้าที่เชื่อมต่อเซลล์ประสาทหนึ่งกับเซลล์ประสาทอื่น ซึ่งภายในโครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบไปด้วยชั้นนำเข้า (input layer) ชั้นซ่อน (hidden layer) และชั้นส่งออก (output layer)

โครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับ (ล่อ บัญ เภษม, 2564) เป็นโครงข่ายประสาทที่มีการเก็บสถานะก่อนหน้าเพื่อนำไปประมวลผลสำหรับข้อมูลลำดับถัดไป โดยโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับนั้นมีลักษณะคล้ายกับโครงข่ายประสาทเทียมแบบปกติ แต่จะมีการส่งต่อข้อมูลชั้นซ่อนของช่วงเวลาก่อนหน้าไปเป็นข้อมูลนำเข้าของช่วงเวลาถัดไปเพิ่มเติมขึ้นมา ซึ่งเหมาะสำหรับข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ในลักษณะของลำดับ (Sequence) เช่น ข้อมูลชนิดอนุกรมเวลา (Time-series)

ตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวถูกนำเสนอโดย Hochreiter & Schmidhuber (1997) เป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับที่มีการปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อแก้ปัญหาการสูญหายของเกรเดียนต์ โดยการนำเอาหน่วยประตูสัญญาณ (Gated Unit) มาใช้เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมมีความรวดเร็วมากขึ้นและใช้หน่วยความจำน้อยลง โดยประกอบไปด้วย ประตูสัญญาณฟอรัเก็ต (forget gate) ประตูสัญญาณนำเข้า (input gate) และ ประตูสัญญาณส่งออก (output gate) ซึ่งทำให้ตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวนั้นแตกต่างจากโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับจากการที่สามารถจดจำข้อมูลในอดีตได้ดีกว่า

ตัวชี้วัดเชิงเทคนิค (Technical indicator) (Pardeshi & Kale, 2021) คือการคำนวณด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้ข้อมูลพื้นฐานเช่น ราคา หรือปริมาณการซื้อขายเพื่อนำมาใช้ในการหาสัญญาณของการซื้อขายหรือทำนายแนวโน้มราคาในอนาคต หนึ่งในตัวชี้วัดเชิงเทคนิคที่ได้รับความนิยมคือ ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average: MA) ซึ่งถูกนำมาใช้เพื่อระบุลักษณะแนวโน้มของตลาด โดยมีหลายรูปแบบดังนี้

ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่าย (Simple Moving Average: SMA) (Hansun, 2013) เป็นค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่สามารถคำนวณได้ง่ายที่สุดซึ่งมีสูตรดังนี้

$$SMA_t = \frac{P_t + P_{t-1} + \dots + P_{t-(n-1)}}{n} \quad (1)$$

โดยที่ P_t คือ ราคาปิดของหุ้น ณ วันที่ t

n คือ จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted Moving Average: WMA) (Hansun, 2013) ถูกพัฒนามาจากค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่าย โดยจะมีการถ่วงน้ำหนักเพื่อให้ความสำคัญกับข้อมูลที่ใหม่ที่สุดที่ใช้ในการคำนวณมากกว่าข้อมูลเก่าซึ่งมีสูตรดังนี้

$$WMA_t = \frac{nP_t + (n-1)P_{t-1} + \dots + P_{t-(n+1)}}{n + (n-1) + \dots + 1} \quad (2)$$

โดยที่ P_t คือ ราคาปิดของหุ้น ณ วันที่ t

n คือ จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential Moving Average: EMA) (Hansun, 2013) เป็นรูปแบบหนึ่งของค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก แต่น้ำหนักของข้อมูลเก่าจะมีการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลเพื่อไม่ให้ค่าลดลงจนถึง 0 ซึ่งมีสูตรดังนี้

$$EMA_t = \alpha P_t + (1 - \alpha) EMA_{t-1}; t > 1 \quad (3)$$

เมื่อ $EMA_t = P_t$

โดยที่ P_t คือ ราคาปิดของหุ้น ณ วันที่ t

α คือ ค่าคงตัวการปรับเรียบ (smoothing constant) ซึ่งกำหนดให้ $\alpha = 2 / (n + 1)$

ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบเอกซ์โพเนนเชียลสามเท่า (Triple Exponential Moving Average: TEMA) (Mulloy, 1994) เป็นตัวชี้วัดที่พัฒนามาจากค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบเอกซ์โพเนนเชียล โดยการใช้วิธีการปรับให้เรียบ 3 ชั้นเพื่อลดความล่าช้า และเพิ่มการตอบสนองต่อราคาที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีสูตรดังนี้

$$TEMA_t = 3EMA1 - 3EMA2 + EMA3 \quad (4)$$

โดยที่ $EMA1$ คือ EMA ของราคาปิดของหุ้น

$EMA2$ คือ EMA ของ $EMA1$

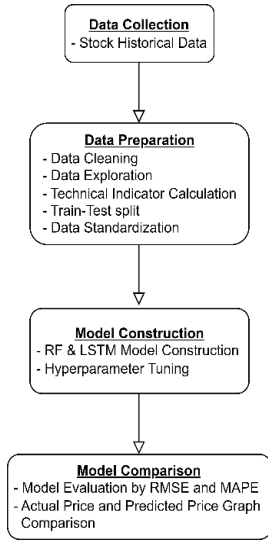
$EMA3$ คือ EMA ของ $EMA2$

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขั้นตอนการดำเนินงานประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ การเก็บรวบรวมข้อมูล การเตรียมข้อมูล การสร้างตัวแบบ และการเปรียบเทียบความเหมาะสมของตัวแบบดังแผนภาพในรูปที่ 1

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ได้รวบรวมชุดข้อมูลจากเว็บไซต์ investing.com ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลราคาเปิด ราคาปิด ราคาสูงสุด และราคาต่ำสุดรายวันของหุ้น GULF ตั้งแต่วันที่ 21 มีนาคม พ.ศ. 2561 ถึง วันที่ 30 ธันวาคม พ.ศ. 2565 ซึ่งมีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 1160 ค่า โดยกราฟราคาปิดของหุ้น GULF สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 การเตรียมข้อมูล

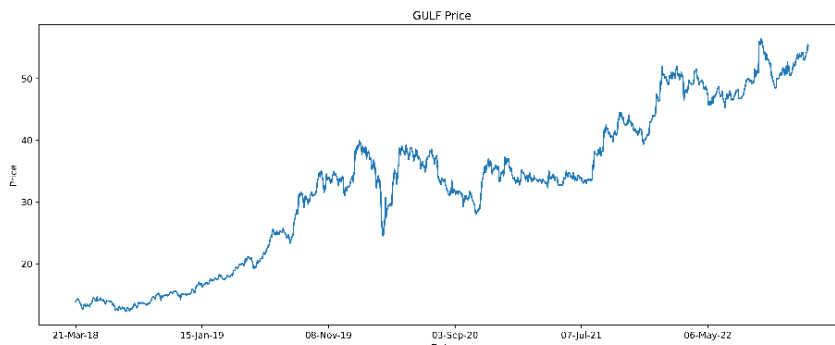
ในการเตรียมข้อมูลก่อนที่จะนำไปใช้สำหรับการสร้างตัวแบบนั้น เมื่อได้รับข้อมูลมาแล้วจะต้องทำการจัดเรียงข้อมูลใหม่ เนื่องจากชุดข้อมูลที่รวบรวมมามีการเรียงข้อมูลจากวันสุดท้ายไปยังวันแรก หลังจากนั้นจึงนำเข้าสู่ชุดข้อมูลไปยัง Jupyter Notebook เมื่อนำเข้าสู่ชุดข้อมูลแล้วจึงดำเนินการตรวจสอบชุดข้อมูล และทำความสะอาดข้อมูลก่อนเนื่องจากอาจจะมีข้อมูลที่สูญหายหรือข้อมูลที่ไม่ถูกต้อง ซึ่งจากการตรวจสอบข้อมูลที่รวบรวมมาเพื่อใช้สำหรับการศึกษานี้พบว่าไม่มีข้อมูลสูญหายหรือข้อมูลผิดปกติ ดังนั้น จึงทำให้ได้ข้อมูลทั้งหมดจำนวน 1160 ค่า หลังจากนั้นทำการคำนวณค่าของ EMA TEMA และ WMA โดยใช้ข้อมูลราคาปิดย้อนหลัง 7 วัน

ทำการของตลาดหลักทรัพย์เป็นค่าเริ่มต้น ซึ่งข้อมูล 7 วันแรกที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณค่าตัวชี้วัดเชิงเทคนิคดังกล่าว เริ่มตั้งแต่วันที่ 21 มีนาคม พ.ศ. 2561 ถึง 29 มีนาคม พ.ศ. 2561 จึงทำให้เหลือข้อมูลสำหรับการฝึกและทดสอบตัวแบบรวมทั้งหมดจำนวน 1153 ค่า ประกอบด้วย ข้อมูลตั้งแต่วันที่ 30 มีนาคม พ.ศ. 2561 ถึงวันที่ 30 ธันวาคม พ.ศ. 2565

ในการศึกษานี้จะพิจารณาเปรียบเทียบทั้งหมด 3 กรณีที่มีผลต่อการทำนายราคาปิดของหุ้นทั้ง GULF โดยการใช้ตัวแบบป่าสุ่ม และตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาว ดังนั้นจึงกำหนดตัวแปรนำเข้า $x_i \in \mathbb{R}^5$ ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลราคาปิด ราคาเปิด EMA TEMA WMA และ $y_j \in \mathbb{R}$ แทนตัวแปรตามหรือตัวแปรตอบสนองสำหรับการทำนายราคาปิดของหุ้น เมื่อ $i=0,1,2,\dots,1152$ และ $j=i+1$

เมื่อได้กำหนดตัวแปรนำเข้าและตัวแปรตอบสนองของทั้ง 3 กรณีแล้วจึงนำมาแบ่งเป็นชุดข้อมูลสำหรับการฝึกและทดสอบในอัตราส่วน 70:30 นั่นคือ ชุดข้อมูลสำหรับการฝึกร้อยละ 70 และชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบร้อยละ 30 ของข้อมูลทั้งหมดตามลำดับ จึงทำให้ได้ข้อมูลสำหรับการฝึกเป็นจำนวน 806 ค่า ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลตั้งแต่วันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2561 ถึงวันที่ 23 กรกฎาคม พ.ศ. 2564 และข้อมูลสำหรับการทดสอบเป็นจำนวน 345 ค่า ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลตั้งแต่วันที่ 29

กรกฎาคม พ.ศ. 2564 ถึงวันที่ 30 ธันวาคม พ.ศ. 2565 หลังจากนั้นจึงทำการสร้างมาตรฐานชุดข้อมูล (Standardization) และแปลงมิติของตัวแปรนำเข้าสำหรับตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวให้เป็นแถวลำดับขนาด 3 มิติ



รูปที่ 2 กราฟแสดงราคาปิดของหุ้น GULF ตั้งแต่วันที่ 21 มีนาคม พ.ศ. 2561 ถึง 30 ธันวาคม พ.ศ. 2565

3.3 การสร้างตัวแบบ

ดังที่ได้กล่าวไปในการศึกษานี้ผู้วิจัยจะสร้างตัวแบบป่าสุ่ม และตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวสำหรับการทำนายราคาปิดของหุ้น GULF โดยจะทำการศึกษาทั้งหมด 3 กรณีด้วยกัน กรณีแรก Random Forest จะใช้ตัวแบบป่าสุ่มที่มีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยการใช้วิธี Randomized Search CV จากไลบรารี scikit-learn กรณีที่ 2 LSTM 1 จะใช้ตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวที่มีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยการใช้วิธี Bayesian Optimization จากไลบรารี Keras Tuner สำหรับกรณีสุดท้าย LSTM 2 จะคล้ายกับกรณีที่ 2 แต่ผู้วิจัยจะทำการปรับค่าฟังก์ชันกระตุ้นจากค่าดั้งเดิมนั่นคือ Tanh เป็น ELU ซึ่งทั้ง 3 กรณีจะใช้ข้อมูลราคาเปิด และราคาปิดในอดีตร่วมกับตัวชี้วัดเชิงเทคนิค EMA TEMA WMA สำหรับขั้นตอนการสร้างตัวแบบทั้ง มีดังนี้ 2

1) การสร้างตัวแบบป่าสุ่ม

ผู้วิจัยเลือกใช้ไลบรารี scikit-learn สำหรับการสร้างตัวแบบป่าสุ่มและใช้วิธี Randomized Search CV ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวแบบป่าสุ่ม ซึ่งในการใช้ Randomized Search CV นั้นจะต้องกำหนดรายการของค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหา ซึ่งผู้วิจัยกำหนดรายการของค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 1 และกำหนดพารามิเตอร์ของ Randomized Search CV ประกอบด้วย estimator = RandomForestRegressor, cv = 6, n_jobs = -1, n_iter = 200

2) การสร้างตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาว

ผู้วิจัยเลือกใช้ไลบรารี Keras สำหรับการสร้างตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวและใช้วิธี Bayesian Optimization ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากไลบรารี Keras Tuner โดยประยุกต์ใช้กับชุดข้อมูลสำหรับการฝึก ซึ่งมีรายละเอียดของค่าต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2 และจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ Bayesian Optimization ดัง นี้ objective = (“root_mean_squared_error”, direction=”min”), max_trials = 10, executions_per_trial = 3 และกำหนด validation_split = 0.1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบป่าสุ่มที่เป็นไปได้

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์ที่เป็นไปได้
n_estimators	20,50,100,500,1000
max_depth	10,20,30,40
min_samples_split	3, 5, 7, 9, 12
min_samples_leaf	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15
bootstrap	True, False
random_state	1,2,30,42

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวที่เป็นไปได้

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์ที่เป็นไปได้
n_layers	(1,2,3,4,5)
units	(32,64,96,128,160)
dropout	(0.1,0.2,0.3,0.4,0.5)
optimizer	Adam
learning_rate	(0.0001,0.001,0.01)
loss	MSE
metrics	RMSE
epochs	(10,20)
batch_size	(16,30)

หลังจากที่ดำเนินการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับทั้งสองตัวแบบในทั้ง 3 กรณีเสร็จสิ้นแล้วจึงนำตัวแบบที่ให้ผลลัพธ์แม่นยำมากที่สุดโดยพิจารณาจากค่า RMSE น้อยที่สุดมาประยุกต์ใช้กับชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบ

3.4 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของตัวแบบ

ในการศึกษานี้ผู้วิจัยจะวิเคราะห์และเปรียบเทียบความเหมาะสมของผลการทำนายราคาปิดของหุ้นที่ได้รับจากทั้ง 2 ตัวแบบใน 3 กรณีศึกษาที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อน และกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าจริงและค่าทำนาย ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ได้แก่ ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error : RMSE) ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error : MAPE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R²) โดยมีนิยามดังนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (5)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (6)$$

และ
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

โดยที่ y_i คือ ค่าจริงที่ i
 \hat{y}_i คือ ค่าทำนายที่ i
 \bar{y} คือ ค่าเฉลี่ยของค่าจริง
 N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการทำนายราคาปิดของหุ้น GULF สำหรับทั้ง 3 กรณีที่เป็นกรณีศึกษา พร้อมทั้งเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทำนายซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

จากการประยุกต์ใช้ตัวแบบป่าสุ่ม และตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวกับชุดข้อมูลสำหรับการฝึกของหุ้น GULF (ข้อมูล ณ วันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2561 ถึงวันที่ 23 กรกฎาคม พ.ศ. 2564) เพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวแบบทั้ง 3 กรณีนั้น ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละตัวแบบดังรายละเอียดในตารางที่ 3 และมีค่า RMSE แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวแบบสำหรับหุ้น GULF ในแต่ละกรณี

Model	Parameter
Random Forest	n_estimators = 1000, max_depth = 10, min_samples_split = 7, min_samples_leaf = 1, bootstrap = True, random_state = 2
LSTM 1	n_layers = 1, units = 160, Dropout_rate = 0, learning_rate = 0.01, epochs = 20, batch_size = 30
LSTM 2	n_layers = 1, units = 160, Dropout_rate = 0, learning_rate = 0.01, epochs = 10, batch_size = 30

ตารางที่ 4 ค่า RMSE ของตัวแบบทั้ง 3 กรณี จากการประยุกต์ใช้ตัวแบบกับชุดข้อมูลสำหรับการฝึก

Error	Random Forest	LSTM 1	LSTM 2
RMSE	0.3708	0.6939	0.7025

ซึ่งลักษณะสถาปัตยกรรมของตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวที่ใช้ในการทดลองสามารถสรุป (Model Summary) ได้ดังรูปที่ 3

Model: "sequential"

Layer (type)	Output Shape	Param #
lstm (LSTM)	(None, 1, 160)	106240
dropout (Dropout)	(None, 1, 160)	0
dense (Dense)	(None, 1, 1)	161

=====
 Total params: 106,401
 Trainable params: 106,401
 Non-trainable params: 0

รูปที่ 3 Model Summary ของตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาว

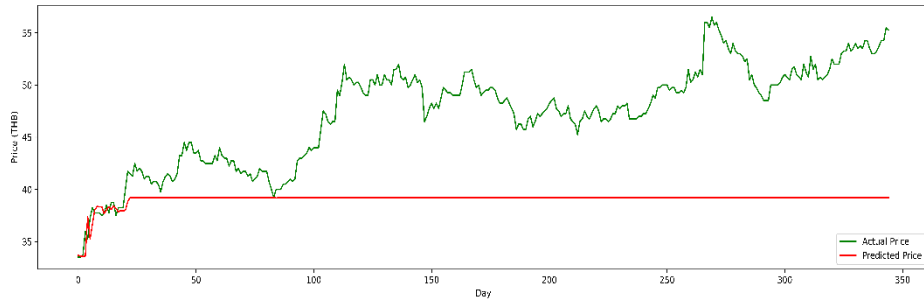
และจากการประยุกต์ใช้ค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 3 กับตัวแบบในแต่ละกรณีกับชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบของหุ้น GULF (ข้อมูล ณ วันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2564 ถึงวันที่ 30 ธันวาคม พ.ศ. 2565) ได้ค่า MAPE RMSE และ R^2 แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่า MAPE RMSE และ R^2 ของตัวแบบทั้ง 3 กรณี จากการประยุกต์ใช้ตัวแบบกับชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบ

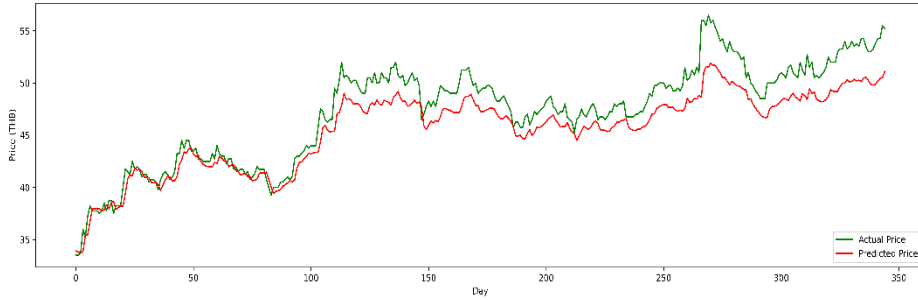
Error	Random Forest	LSTM 1	LSTM 2
MAPE	0.1654	0.0355	0.0115
RMSE	9.2876	2.1028	0.7723
R^2	-2.8607	0.8021	0.9733

จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าตัวแบบ LSTM 2 มีค่า MAPE และ RMSE น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 3 กรณี อีกทั้งยังมีค่า R^2 สูงที่สุด โดยสามารถแสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่างราคาปิดจริง และผลลัพธ์จากการประยุกต์ตัวแบบกับข้อมูลสำหรับชุดทดสอบเพื่อทำนายราคาปิดของหุ้น GULF ในแต่ละกรณีดังรูปที่ 4 ถึง 6 ตามลำดับ

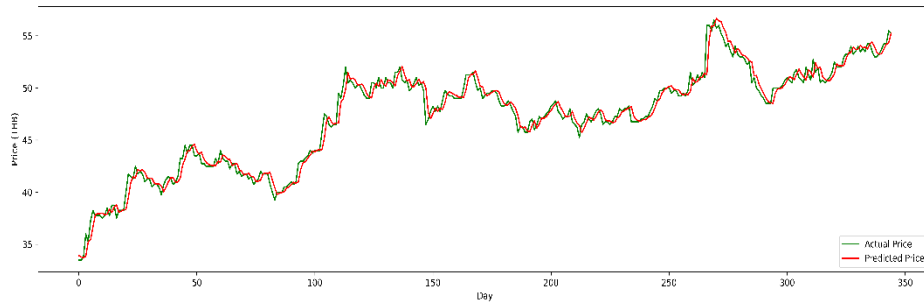
จากกราฟจะเห็นได้ว่าผลลัพธ์การทำนายราคาปิดของหุ้น GULF ที่ได้จากตัวแบบ LSTM 2 นั้นมีลักษณะใกล้เคียงกับราคาปิดจริงมากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกราฟแสดงค่าทำนายของราคาหุ้น GULF ที่ได้จากตัวแบบทั้ง 3 กรณีดังรูปที่ 7 เห็นชัดว่า ผลลัพธ์จากตัวแบบ Random Forest นั้นมีลักษณะของกราฟที่ไม่สอดคล้องกับราคาปิดจริง และเมื่อเปรียบเทียบกราฟแสดงผลลัพธ์จากตัวแบบ LSTM 1 และ LSTM 2 นั้นพบว่า มีลักษณะของกราฟสอดคล้องกับราคาปิดจริง แต่ตัวแบบ LSTM 2 ให้ผลลัพธ์ที่มีลักษณะของกราฟใกล้เคียงกับราคาปิดจริงมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่า MAPE และ RMSE ของตัวแบบ LSTM 2 ที่มีค่าน้อยที่สุด และมีค่า R^2 สูงที่สุด



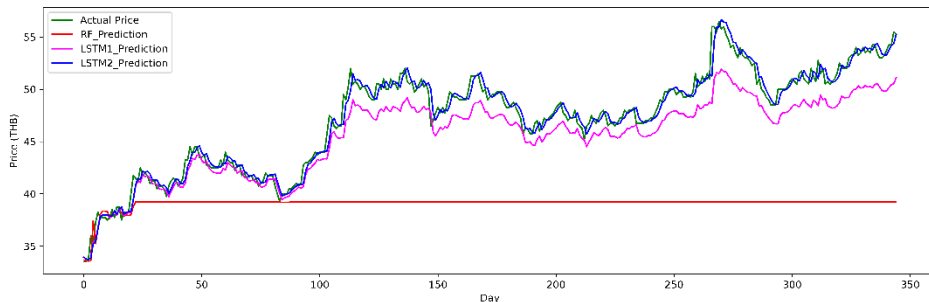
รูปที่ 4 กราฟเปรียบเทียบราคาปิดของหุ้น GULF ระหว่างค่าจริงและทำนายสำหรับตัวแบบ Random Forest



รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบราคาปิดของหุ้น GULF ระหว่างค่าจริงและทำนายสำหรับตัวแบบ LSTM 1



รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบราคาปิดของหุ้น GULF ระหว่างค่าจริงและทำนายสำหรับตัวแบบ LSTM 2



รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบราคาปิดของหุ้น GULF ระหว่างค่าจริงและค่าทำนายจากทั้ง กรณที่ 3

5.สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาศักยภาพในการทำนายราคาปิดของหุ้น GULF โดยการใช้ตัวแบบป่าสุ่มและตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาว ซึ่งมีกรณีศึกษาทั้งหมด 3 กรณี ประกอบด้วย กรณีแรกการใช้ตัวแบบป่าสุ่มที่มีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม หรือเรียกว่าตัวแบบ Random Forest กรณีที่สองการใช้ตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวที่มีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม หรือเรียกว่าตัวแบบ LSTM 1 และกรณีที่สาม

จะคล้ายกับกรณีที่สองแต่ทำการปรับค่าฟังก์ชันกระตุ้นจากฟังก์ชัน Tanh เป็นฟังก์ชัน ELU หรือเรียกว่าตัวแบบ LSTM 2 โดยใช้ชุดข้อมูลพื้นฐานในอดีตของหุ้นที่ประกอบด้วย ราคาเปิด และราคาปิดของหุ้น GULF ตั้งแต่วันที่ 21 มีนาคม พ.ศ. 2561 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2565 ร่วมกับตัวชี้วัดเชิงเทคนิค ได้แก่ EMA TEMA และ WMA

ผลการศึกษา พบว่า ตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวทั้งสองกรณี (LSTM 1 และ LSTM 2) นั้นมีประสิทธิภาพในการทำนายราคาปิดของหุ้น GULF

มากกว่าตัวแบบป่าสุ่ม (Random Forest) ดังจะเห็นได้จากการมีค่า MAPE และ RMSE ที่น้อยกว่า และมีค่า R^2 สูงกว่า ตลอดจนกราฟแสดงค่าทำนายราคาปิดของหุ้นมีลักษณะใกล้เคียงกับราคาปิดจริงมากกว่า และเมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้จากตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวทั้งสองกรณีมาเปรียบเทียบกัน พบว่าตัวแบบ LSTM 2 ที่มีการปรับใช้ฟังก์ชัน ELU เป็นฟังก์ชันกระตุ้นแทนฟังก์ชัน Tanh นั้นมีประสิทธิภาพในการทำนายราคาปิดของหุ้น GULF มากกว่าตัวแบบ LSTM 1 อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกันทั้งสามกรณี ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวนั้นมีประสิทธิภาพในการทำนายราคาปิดของหุ้น GULF ที่มีลักษณะราคาอยู่ในแนวโน้มขาขึ้นระยะยาว หรือ Uptrend นับตั้งแต่เริ่มทำการซื้อขายในตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย และการเลือกใช้ฟังก์ชัน ELU เป็นฟังก์ชันกระตุ้นสำหรับตัวแบบหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวนั้น ส่งผลให้ได้ตัวแบบที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการประเมินราคาหุ้นเพื่อเป็นข้อมูลส่วนหนึ่งสำหรับประกอบการตัดสินใจลงทุนในหุ้นได้

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำตัวแบบทั้ง 3 กรณีมาปรับใช้กับหุ้นที่มีลักษณะแนวโน้มของราคาเคลื่อนที่ออกข้าง (Sideway Trend) และหุ้นวัฏจักร (Cyclical Trend) ในช่วงเวลาเดียวกัน เช่น BCP และ PTTEP พบว่าตัวแบบ LSTM 2 ยังคงมีประสิทธิภาพในการทำนายราคาปิดของหุ้นเหนือกว่าตัวแบบอื่นจากทั้ง 3 กรณีที่ได้นำเสนอ

สำหรับงานวิจัยในอนาคต หากนำข้อมูลปัจจัยพื้นฐานหรือตัวชี้วัดเชิงเทคนิคเพิ่มเติมเข้ามาร่วมพิจารณาในการกำหนดตัวแปรอิสระอาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของตัวแบบมากขึ้นไปอีก ตลอดไปจนถึงการตรวจสอบประสิทธิภาพของตัวแบบในลักษณะดังเช่นในการศึกษานี้กับหุ้นอื่นที่มีลักษณะแนวโน้มของราคาหุ้นคล้ายกัน เพื่อการประยุกต์ใช้ประกอบการตัดสินใจลงทุนในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

Bhandari, H. N., Rimal, B., Pokhrel, N. R., Rimal, R., Dahal, K. R., & Khatri, R. K. (2022). Predicting stock market index using LSTM. *Machine Learning with Applications*, 9, 100320. <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2022.100320>

Boongasame, L. (2021). *DEEP LEARNING*. Paper Print Publishing.

Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

Chollet, F., & others. (2015). Keras. Retrieved from <https://keras.io>

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press. Retrieved from <http://www.deeplearningbook.org>

Goswami, S., & Yadav, S. (2021). Stock Market Prediction Using Deep Learning LSTM Model. *2021 International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON)*, Pune, India, 2021, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/SMARTGENCON51891.2021.9645837>.

Hansun, S. (2013). A new approach of moving average method in time series analysis. *2013 Conference on New Media Studies (CoNMedia)*.

Huang, J.-Z., Huang, W., & Ni, J. (2019). Predicting bitcoin returns using high-dimensional technical indicators. *The Journal of Finance and Data Science*, 5(3), 140-155. <https://doi.org/10.1016/j.jfds.2018.10.001>

Kaewmaha, W., & Punyachitporn, V. (2021). Predicting Stock Return Using Machine Learning. *Journal of Innovation in Business, Management, and Social Sciences*, 2(3), 108-123.

M. R. Vargas, B. S. L. P. de Lima and A. G. Evsukoff. (2017). Deep learning for stock market prediction from financial news articles. In *2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA)*, Annecy, France, 2017, pp. 60-65. <https://doi.org/10.1109/CIVEMSA.2017.7995302>.

Mulloy, P. G. (1994). Smoothing Data With Less Lag. *Technical Analysis of Stocks & Commodities*, 12(2), 72-80.

Pardeshi, Y., & Kale, P. (2021). Technical Analysis Indicators in Stock Market Using Machine Learning: A Comparative Analysis. In *12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*.

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *the Journal of machine Learning research*, 12, 2825-2830.

Saraubon, K. (2022). *Learn AI: Deep Learning with Python*. Intermedia Publishing.

Schmidhuber, J., & Hochreiter, S. (1997). Long short-term memory. *Neural Comput*, 9(8), 1735-1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>

Vijh, M., Chandola, D., Tikkiwal, V. A., & Kumar, A. (2020). Stock Closing Price Prediction using Machine Learning Techniques. *Procedia Computer Science*, 167, 599-606. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.326>

การตรวจจับตำแหน่งเครื่องหมายกากบาทที่เขียนด้วยลายมือบนกระดาษคำตอบ แบบปรนัยด้วยเทคนิคการตรวจจับวัตถุแบบ YOLO

YOLO-Based Object Detection for Locating Handwritten X-Marks on Multiple-Choice Answer Sheets

พิศิษฐ์ นาคใจ¹ สุชานาด พัดเทพ¹, วราภรณ์ ปานอุป², และพัชรี มณีรัตน์^{1*}

Pisit Nakjai, Suchanard Padthep, Waraporn Panup and Patcharee Maneerat*

¹สาขาวิทยาการข้อมูล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์, อุตรดิตถ์, ประเทศไทย

²สาขาคณิตศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์, อุตรดิตถ์, ประเทศไทย

¹Applied Mathematics, Faculty of Science and Technology, Uttaradit Rajabhat University, Uttaradit, Thailand

²Data Science, Faculty of Science and Technology, Uttaradit Rajabhat University, Uttaradit, Thailand

บทคัดย่อ

การประเมินความรู้ของผู้เรียนถือเป็นการวัดผลสัมฤทธิ์ในการเรียน สำหรับเครื่องมือที่นิยมใช้วัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน คือ การสอบแบบปรนัย ซึ่งการตอบคำถามทำได้ทั้งวิธีการฝนและกากบาทลงในกระดาษคำตอบ หากแต่การตอบคำถามโดยวิธีการกากบาทนั้น ทำให้เกิดประเด็นปัญหาที่สำคัญคือ หากผู้เข้าสอบมีจำนวนมากอาจจำเป็นต้องใช้บุคลากรเพิ่มขึ้นและมีความล่าช้าในการตรวจคำตอบ นอกจากนี้อาจเกิดข้อผิดพลาดในตรวจคำตอบซึ่งจะส่งผลทำให้การสรุปผลคะแนนเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่สามารถตรวจจับกากบาทแบบอัตโนมัติในกระดาษคำตอบปรนัยด้วยกระบวนการตรวจจับวัตถุและการเรียนรู้ของเครื่องเชิงลึก สำหรับการตรวจจับวัตถุอาศัยเทคนิค You Only Look Once version 8 (YOLOv8) และการสร้างโมเดลที่สามารถตรวจจับกากบาทแบบอัตโนมัติอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolution Neural Network : CNN) พร้อมทั้งการวัดประสิทธิภาพโมเดลที่พัฒนาขึ้นซึ่งพิจารณาจากค่าความแม่นยำ (Precision) ค่าคืนคืน (Recall) และ F1-score ผลการศึกษา พบว่า เมื่อกำหนดค่าของ Threshold เท่ากับ 0.496 โมเดลสำหรับการตรวจจับกากบาทแบบอัตโนมัติในกระดาษคำตอบปรนัยให้ค่าความแม่นยำสูงสุด และให้ค่า F1-score สูงสุดเท่ากับ 0.989 ซึ่งส่งผลทำให้โมเดลมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับการตรวจจับและระบุตำแหน่งของกากบาทแบบอัตโนมัติในกระดาษคำตอบปรนัย

คำสำคัญ: การตรวจจับกากบาทแบบอัตโนมัติ, กระบวนการตรวจจับวัตถุ, การเรียนรู้ของเครื่องเชิงลึก, เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน, Yolo

ABSTRACT

Student assessment is considered a measure of learning achievement. Among the various assessment tools available, multiple-choice tests are commonly used, allowing students to mark their answers by filling or marking crosses on provided answer sheets. However, this method presents significant challenges, particularly when dealing with a large number of questions, as it may require additional personnel for grading, leading to delays in the assessment process. Additionally, manual grading can introduce errors, resulting in inaccuracies in score calculation. This study aims to address these challenges by developing a mathematical model capable of automatically detecting crosses on multiple-choice answer sheets using object detection techniques and deep learning. The model is based on the You Only Look Once version 8 (YOLOv8) technique for object detection. It employs a Convolutional Neural Network (CNN) for cross detection. The performance of the model is evaluated using metrics such as Precision, Recall, and F1-score. The results indicate that at a Threshold value of 0.496, the model achieves the highest F1-score of 0.989. This suggests that the model is effective in automatically detecting and identifying cross markings on multiple-choice answer sheets.

KEYWORDS: Automatic X-mark detection, Object detection, Deep learning, Convolution neural network, Yolo

*Corresponding Author: m.patcharee@uru.ac.th

Received: 09/04/2024; Revised: 28/05/2024; Accepted: 14/06/2024

1. บทนำ

การวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนนั้นเป็นส่วนหนึ่งสำหรับประเมินความรู้ความเข้าใจของผู้เรียน ซึ่งข้อสอบถือเป็นเครื่องมือวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนอย่างหนึ่ง สำหรับข้อสอบที่นิยมใช้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ข้อสอบแบบเขียนตอบ (Supply Type) และข้อสอบแบบปรนัยหรือข้อสอบแบบเลือกตอบ (Multiple Choice Questions: MCQ) ซึ่งข้อสอบแบบ MCQ เป็นวิธีที่ง่ายในการวัดความเข้าใจมากกว่าการใช้ข้อสอบแบบเขียนตอบ ในปัจจุบันมีเครื่องมือที่ช่วยในการตรวจข้อสอบแบบ MCQ ซึ่งจะมีอุปกรณ์พิเศษในการตรวจคำตอบคือ เครื่องโอเอ็มอาร์ (Optical Mark Reader) สร้างโดยอาศัยกระบวนการรู้จำเครื่องหมายด้วยแสง (Optical Mark Recognition: OMR) ซึ่งเครื่องโอเอ็มอาร์จะทำการอ่านสัญลักษณ์โดยอาศัยหลักการอ่านค่าการสะท้อนของแสง ซึ่งผู้เข้าสอบจำเป็นต้องทำการฝนที่บับตัวเลือกที่ต้องการ หากใช้ดินสอที่มีความเข้มต่ำกว่าระดับที่กำหนดอาจทำให้เครื่องไม่สามารถอ่านได้ชัดเจน และที่สำคัญจำเป็นต้องใช้กระดาษคำตอบที่เครื่องตั้งกล่าวรองรับเท่านั้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าอาจเกิดค่าใช้จ่ายทั้งในส่วนอุปกรณ์และการเปลี่ยนแปลงกรรมการเลือกคำตอบจากเดิมที่ใช้การทำเครื่องหมายกากบาทเป็นการฝนทับแทน นอกจากนี้หากมีการเปลี่ยนคำตอบที่ผู้เข้าสอบจะต้องทำให้ตัวเลือกที่ยกเลิกมีความสะอาดเพียงพอเพื่อให้แสงสะท้อนผ่านได้

เนื่องด้วยวิธีการดั้งเดิมเป็นการเลือกคำตอบโดยวิธีการกากบาทลงในกระดาษคำตอบซึ่งเป็นวิธีการเลือกคำตอบที่ไม่ซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตามทำให้เกิดประเด็นปัญหาที่สำคัญคือ การจำเป็นต้องใช้บุคลากรในการตรวจหาตำแหน่งตัวเลือกที่ทำเครื่องหมายกากบาทเทียบกับตัวเลือกที่ทำเครื่องหมายในข้อสอบชุดเฉลยคำตอบ หากผู้เข้าสอบมีจำนวนมากหรือข้อคำถามมีจำนวนมาก อาจส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการตรวจคำตอบ และที่สำคัญอาจเกิดข้อผิดพลาดในตรวจคำตอบซึ่งจะส่งผลทำให้การสรุปผลคะแนนเกิดความคลาดเคลื่อนได้ จากข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเลือกคำตอบด้วยวิธีการกากบาทเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนแต่อาจจะเกิดข้อผิดพลาดจากบุคคลากรที่ทำการระบุตำแหน่งของการทำเครื่องหมายกากบาท

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่สามารถตรวจจับกากบาทแบบอัตโนมัติในกระดาษคำตอบแบบปรนัย ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Deep Machine Learning: DML) เพื่อทำการรู้จำเครื่องหมายกากบาท และอาศัยกระบวนการ

ตรวจจับวัตถุ (Object Detection) สำหรับการตรวจจับและระบุตำแหน่งของเครื่องหมายกากบาท

2. เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในระบบการตรวจข้อสอบแบบ MCQ ผู้เข้าสอบจำเป็นต้องทำการเลือกตอบหรือทำเครื่องหมายลงในช่องกระดาษคำตอบ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องตรวจกระดาษคำตอบแบบหลายตัวเลือกซึ่งจำเป็นต้องมีอุปกรณ์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการตรวจโดยเฉพาะ สำหรับกระบวนการ OMR อาจจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ต่อพ่วง (Peripheral devices) ประเภทต่าง ๆ เข้าด้วยกัน อาทิเช่น เครื่องแสกนเพื่อนำข้อมูลกระดาษคำตอบให้อยู่ในรูปแบบที่เครื่องโอเอ็มอาร์สามารถนำไปประมวลผลได้ โดยเครื่องโอเอ็มอาร์จะทำการสแกนตำแหน่งของช่องคำตอบโดยอาศัยหลักการสะท้อนแสงของช่องคำตอบเพื่อประมวลผลการสอบแบบอัตโนมัติ โดยปกติแล้วเครื่องสแกนโอเอ็มอาร์จะใช้งานร่วมกับซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น (de Elias et al., 2021; Hussmann & Deng, 2005; Kumar et al., 2018) ซึ่งอุปกรณ์และซอฟต์แวร์เหล่านี้อาจมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้พัฒนากระบวนการและเปลี่ยนจากเครื่องแสกน เป็นกล้องเว็บแคมและกล้องมือถือแทน หลังจากนั้นจะใช้กระบวนการตรวจจับหารูปแบบของการทำ เครื่องหมายในกระดาษคำตอบโดยอาศัยการประมวลผลภาพ (Image Processing: IP)(Tinh & Minh, 2024)

ในยุคเริ่มต้นของการพัฒนาเครื่อง OMR จะเป็นการพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ทำระบุตำแหน่งของการเลือกคำตอบ (Hussmann & Deng, 2005; the School of Engineering, Edith Cowan University, Perth, Australia et al., 2018) ซึ่งสามารถตรวจจับได้ทั้งการทำเครื่องหมาย วงกลม วงรี และสี่เหลี่ยม โดยการทำเครื่องหมายแบบฝนที่อาศัยหลักการของการผ่านของลำแสงร่วมกับค่าเทรชโฮลด์ (Threshold) ของค่าแสงที่ส่องผ่านเพื่อระบุตำแหน่งของการเลือกคำตอบ การใช้หลักการของเทรชโฮลด์นี้เป็นการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน ทำให้ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการใช้ค่าเทรชโฮลด์นี้กับหลักการอื่น ๆ ในการระบุตำแหน่งของการเลือกคำตอบในกระดาษคำตอบ (Deng et al., 2008)

ต่อมาได้มีเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ใช้หลักการของแสงส่องผ่านเปลี่ยนเป็นการใช้ระบบการประมวลผลภาพดิจิทัลมากขึ้นร่วมกับการใช้ค่าเทรชโฮลด์ในการระบุตำแหน่งของคำตอบโดยการใช้ความแตกต่างของค่าสีดำและสีขาว

ของภาพถ่ายดิจิทัล ซึ่ง Nguyen et al. (Nguyen et al., 2011) ได้นำเสนอระบบที่นำเอกลักษณ์ดิจิทัลแทนการใช้เครื่องสแกนในการเก็บข้อมูลภาพถ่ายกระดาษคำตอบ หากแต่เกิดข้อจำกัดของการใช้กล้องดิจิทัลในการถ่ายภาพกระดาษคำตอบจะเกิดปัญหามุมเอียงของการตั้งกล้องดิจิทัล และได้เสนอวิธีการปรับมุมเพื่อแก้ไขภาพกระดาษคำตอบที่เอียงและใช้ค่าเทรซโซลต์เพื่อระบุตำแหน่งคำตอบที่ถูกระบายทับได้ ต่อมา Spadaccini and Rizzo (Spadaccini & Rizzo, 2011) ได้ทำการนำภาพถ่ายกระดาษคำตอบที่กล้องดิจิทัลมาประมวลผลเพื่อหาตำแหน่งของเครื่องหมายกากบาทในกระดาษคำตอบโดยใช้เทคนิค Gamera Framework (GF) ร่วมกับการกำหนดค่าเทรซโซลต์ และที่สำคัญได้ระบบ JECT-OMR ที่นำเสนอสามารถตรวจจับการยกเลิกการเลือกคำตอบได้โดยการใช้วิธีการฝนที่ลงในช่องของคำตอบ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Fistesu et al. (Fistesu et al., 2013) ได้ใช้วิธีการยกเลิกตัวเลือกคำตอบด้วยวิธีการฝนที่บดและได้นำเสนอวิธีการหาเครื่องหมายกากบาทด้วยระบบ Eyegrade ซึ่งประกอบไปด้วยการระบุค่าเทรซโซลต์และประมวลผลภาพถ่ายกระดาษคำตอบที่ได้จากกล้องเว็บแคมในการตรวจจับเครื่องหมายกากบาทซึ่งเป็นสิ่งที่ทำลายสำหรับกระบวนการตรวจกระดาษคำตอบที่ใช้กระบวนการ IP โดย นอกจากนี้ Sanguansat (Sanguansat, 2015) ได้เสนอเทคนิคการตรวจจับการทำเครื่องหมายที่มีลักษณะหลากหลายรูปแบบโดยใช้วิธี Adaptive Threshold สำหรับประสิทธิภาพในการตรวจจับคิดเป็นร้อยละ 85.72

นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยหลากหลายท่านที่ได้พัฒนาระบบการในการตรวจสอบด้วยเทคนิคต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น กฤษณะและยุทธพงษ์ (กฤษณะ ชินสาร & ยุทธพงษ์ รั้ง สรรค์ เสรี, 1998) นำเสนอการใช้ฮิสโตแกรม (Histogram) ซึ่งเป็นเทคนิควิธีการประมวลผลภาพ เบื้องต้นที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งของการเลือกคำตอบโดยใช้วิธีการหาค่า ตำแหน่งสูงสุดของ Histogram ซึ่งจะได้ตำแหน่งของตัวเลือกคำตอบใน กระดาษคำตอบ ผลการศึกษา พบว่า เทคนิคนี้ทำงานได้ดี กรณีที่กระดาษคำตอบเป็นการตอบแบบฝน สำหรับการใช่วิธีเลือกคำตอบแบบกากบาทยังมีข้อจำกัดคือ หากกากบาทที่บังกลมมีขนาดเล็กเกินไปทำให้เมื่อนับจำนวนจุดภาพดำที่เกิดขึ้นในวงกลมแต่ละวงมีความแตกต่างกันน้อยมาก ต่อมาพุทธินันท์ (พุทธินันท์ พัดกระจำ, 2010) ประยุกต์ ใช้กระบวนการหาขอบของส่วนที่เป็นกระดาษคำตอบและ ทำ Perspective Transformation

ในกรณีที่ภาพกระดาษ คำตอบไม่เป็นสี่เหลี่ยมมุมฉาก และหาตำแหน่งของกากบาทโดยพิจารณาความเข้มของพิกเซลในภาพ ซึ่งให้ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งคิดเป็นร้อยละ 90.47 อย่างไรก็ตามเทคนิคดังกล่าวยังมีข้อผิดพลาดเกิดจาก กรณีที่มีการตรวจพบกากบาทในข้อมากกว่า 1 คำตอบ

ต่อมา ภูมินทร์ (ภูมินทร์ ต้นอุตม์, 2017) ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคด้าน ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) และการประมวลผลภาพในการตรวจคำตอบ ซึ่งได้เสนอวิธีการตรวจหากากบาทบนภาพกระดาษคำตอบแบบปรนัย 5 ตัวเลือกด้วยกระบวนการ IP ร่วมกับการแบ่งกลุ่มของตำแหน่งกากบาทเพื่อตรวจคำตอบ ในการหากากบาทใช้กระบวนการประมวลผลแบบมอร์โฟโลยี (Morphology Technique) ร่วมกับสตรัคเจอร์ อิลิเมนต์ (Structure Element) แนว 45 และ -45 องศาทำให้ได้ตำแหน่งของกากบาทปรากฏขึ้นและใช้เทคนิคเคมีน (K-means) ในการตัดสินใจว่ากากบาทที่เลือกอยู่กลุ่มเดียวกับเฉลยของคำตอบหรือไม่ อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดคือ กระดาษ คำตอบที่มีการกากบาทจะต้องมีรูปแบบคือ กากบาทเพียง 1 ข้อ ไม่สามารถใช้ปากกาลบ คำผิดทับเส้นและไม่ขีดทับคำตอบได้

จากข้างต้นจะเห็นได้ว่าเทคนิคต่าง ๆ ที่นำเสนอ ยังมีข้อจำกัดในการตรวจจับกากบาท ด้วยเหตุผลเหล่านี้ ทำให้การศึกษารุ่นนี้มุ่งเน้นการโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่สามารถตรวจจับกากบาทแบบอัตโนมัติในกระดาษคำตอบปรนัยด้วยกระบวนการตรวจจับวัตถุและการเรียนรู้ของเครื่องเชิงลึก สำหรับการตรวจจับวัตถุอาศัยเทคนิค You Only Look Once version 8 (YOLOv8) และทำการสร้างโมเดลที่สามารถตรวจจับกากบาทแบบอัตโนมัติในกระดาษคำตอบปรนัยอาศัยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolution Neural Network: CNN) พร้อมทั้งการวัดประสิทธิภาพโมเดลที่พัฒนาขึ้น ซึ่งคณะผู้วิจัยคาดหวังว่าในการศึกษารุ่นนี้จะช่วยแก้ปัญหาและลดความผิดพลาดในการตรวจคำตอบต่อไป

3. YOLO-BASED ARCHITECTURE

3.1 YOLO

ในการศึกษารุ่นนี้ระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้คือกระบวนการตรวจจับวัตถุ (Object Detection) (Liu et al., 2016) และการเรียนรู้ของเชิงลึก (Deep Machine Learning : DML) ซึ่ง DML เป็นส่วนหนึ่งของการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ใน AI

ที่เลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์ในการประมวลผล และการสร้างรูปแบบของข้อมูลสำหรับการใช้ในการตัดสินใจ เนื่องด้วย DML สามารถรองรับการทำงานกับข้อมูลภาพที่เพิ่มขึ้นอย่างมหาศาล และใช้การประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ (Cloud Computing Service) ที่สามารถเข้าถึงหน่วยการคำนวณ (Computation Unit) ได้ง่ายขึ้น ในราคาที่ถูกลง (Deepak Kumar P, 2023)

สำหรับการสร้างโมเดลที่สามารถตรวจจับภาพแบบอัตโนมัติในกระดาษคำตอบปรนัยอาศัยเทคนิค CNN ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งใน DML ซึ่งให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับข้อมูลภาพ และเป็นเทคนิคที่ใช้การเรียนรู้ตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการ (End-to-End Learning) เริ่มต้นตั้งแต่การสกัดและหาคุณลักษณะพิเศษจากภาพ (Feature Extraction) ตลอดจนการระบุตำแหน่งของวัตถุชนิดของวัตถุหรือการทำนายข้อมูลในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งเทคนิคนี้สามารถลดขั้นตอนที่มีความยุ่งยากในการตรวจจับภาพจากการใช้การเรียนรู้ของเครื่องแบบดั้งเดิมที่ต้องสกัดคุณลักษณะพิเศษจากภาพเพื่อหาเส้น สี รูปทรง และอื่น ๆ ด้วยตนเอง (Hand-crafted Features) (Lin et al., 2020) เพื่อให้เห็นได้ว่าคุณลักษณะเฉพาะที่เหมาะสมกับปัญหาและชุดข้อมูลนั้น ๆ ก่อนที่นำไปสู่การสร้างโมเดล และที่สำคัญเทคนิค CNN มีประสิทธิภาพที่ให้ความแม่นยำสูงกว่าการเรียนรู้ของเครื่องแบบดั้งเดิม

ในการตรวจจับภาพในกระดาษคำตอบปรนัยจะอาศัยเทคนิค YOLO (Redmon et al., 2016) ซึ่งถือว่าเป็นกระบวนการที่ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องสำหรับการตรวจจับแบบเรียลไทม์ (Real Time) ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ YOLOv8 (Jocher et al., 2023) ซึ่งแบ่งโครงสร้างออกเป็น 2 ส่วน คือ แกนหลัก (Backbone) และส่วนหัวทำนาย (Head Detection)

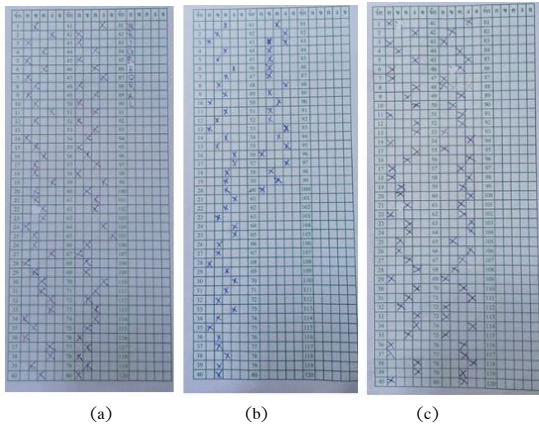
ส่วนแกนหลักมีหน้าที่ในการสกัดคุณลักษณะของภาพออกมา โดยกระบวนการการคอนโวลูชันซึ่งทำให้ในขณะที่ภาพถูกคอนโวลูชันจะมีมิติที่เล็กลงแต่จะได้คุณลักษณะที่แตกต่างกันมากขึ้น ในส่วนแกนหลักได้ใช้เทคนิคซีทู (C2 : CSP Bottleneck with 2 convolutions) โดยมีโครงสร้างแบบซีเอสพี (CSP: Cross Stage Partial) (Wang et al., 2020) มาพัฒนาต่อเป็นซีทูเอฟ (C2F) ทำให้ช่วยลดเวลาในการคำนวณลงแต่ยังคงประสิทธิภาพเดิมของโมเดลไว้ได้

ส่วนหัวทำนายของ YOLO จะทำการย่อและขยายขนาดมิติของคุณลักษณะออกมาเพื่อช่วยในการตรวจจับวัตถุที่มีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ซึ่งอาจปรากฏในภาพ

เดียวกัน โดยส่วนหัวทำนายประกอบไปด้วยสองส่วนคือ ส่วนของการย่อและขยายขนาดมิติของคุณลักษณะและ ส่วนของการตรวจจับ ในส่วนของย่อและขยายขนาดมิติคุณลักษณะจะใช้เทคนิคเอสพีพีเอฟ (Spatial Pyramid Pooling Fast: SPPF) (He et al., 2015) เพื่อช่วยให้สามารถสกัดคุณลักษณะและขยายมิติให้มีความแตกต่างกัน เพื่อให้มิติของคุณลักษณะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นจำนวน 3 ขนาด ในส่วนสุดท้ายเป็นส่วนของการตรวจจับภาพ เมื่อทำการขยายมิติ คุณลักษณะ 3 ขนาดมาแล้ว แต่ละขนาดจะทำการตีกรอบที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมล้อมรอบวัตถุเพื่อทำนายและระบุตำแหน่งของวัตถุ โดยจะทำการทำนายพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ความกว้างและส่วนสูงของกรอบ (w,h) จุดกึ่งกลาง ของกรอบ (b_x, b_y) ความน่าจะเป็นที่มีวัตถุอยู่ในกรอบ (P_c) และความน่าจะเป็นของการเป็นชนิดวัตถุที่ c_i ที่อยู่ภายในกรอบ $p(c_1, c_2, \dots, c_n)$ โดยที่ $i = 1, \dots, n$ และ n แทนจำนวนชนิดของวัตถุที่ YOLO สามารถ ทำนายได้ สำหรับการฝึกสอนให้ YOLOv8 เพื่อตรวจจับภาพในกระดาษคำตอบนั้น จำเป็นจะต้องมีการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อฝึกสอนให้กับ YOLOv8 ใหม่ เนื่องจาก YOLOv8 ไม่มีข้อมูลพื้นฐาน ของวัตถุที่เป็นลักษณะภาพโดยคณะผู้วิจัยได้เลือก YOLOv8 ขนาดกลาง (YOLOv8m) โดยทำการฝึกสอนแบบ Pre-trained โดยจะทำการปรับจูน พารามิเตอร์ต่อจากค่าพารามิเตอร์ที่ YOLOv8 ทำงานได้อยู่แล้ว

3.2 ข้อมูล

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลภาพกระดาษคำตอบแบบปรนัย 120 ข้อ แบบ 5 ตัวเลือก จำนวนทั้งหมด 163 ชุด แบ่งออกเป็น 100 ชุด สำหรับชุดฝึกสอน และ 63 ชุด สำหรับทำการทดสอบ ซึ่งภายในกระดาษคำตอบมีทั้งเครื่องหมายกากบาทและตัวอักษรอื่น ๆ ปรากฏร่วมด้วย ในช่องตัวเลือกคำตอบ ดังรูปที่ 1a นอกจากนี้ภายในช่องตัวเลือกอาจมีการทำเครื่องหมายอื่นที่ไม่ใช่ลักษณะที่เป็นกากบาท ได้แก่ การเปลี่ยนตัวเลือกด้วยการฝนทับ ดังรูปที่ 1b และการใช้น้ำยาลบคำผิดแต่ยังปรากฏเครื่องหมายกากบาทเดิมอยู่ ดังรูปที่ 1c



รูปที่ 1 ภาพตัวอย่างกระดาษคำตอบแบบปรนัย: (a) กระดาษคำตอบมีทั้งกากบาทและตัวอักษรอื่น ๆ (b) การเปลี่ยนตัวเลือกด้วยการฝนทับ และ (c) การใช้ไม้ยาลบคำผิดแต่ยังปรากฏเครื่องหมายกากบาทเดิมอยู่

3.3 การฝึกสอนโมเดล

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้กระบวนการตรวจจับวัตถุ โดยใช้เทคนิค YOLOv8m (Jocher et al., 2023) ซึ่งจะมีค่าของพารามิเตอร์ที่ต้องการปรับจูนทั้งหมด สามล้านสองแสนพารามิเตอร์ โดยที่ YOLOv8m จะรับรูปภาพขนาด 640 พิกเซล เพื่อใช้สำหรับการตรวจจับกากบาทในภาพ โดยจำนวนเครื่องหมายกากบาทจากภาพสำหรับฝึกสอน 100 ภาพ มีจำนวนเครื่องหมายกากบาทจำนวน 7,396 เครื่องหมายและทำการเพิ่มจำนวนภาพด้วยการทำ การเสริมข้อมูล (Augment Data) เพื่อให้โมเดลได้ข้อมูลของเครื่องหมายกากบาทที่หลากหลาย สำหรับการฝึกสอนเพิ่มขึ้น ในการฝึกสอน YOLOv8m นั้น เพื่อให้ YOLOv8m สามารถทำการตรวจจับเครื่องหมายกากบาทในภาพได้นั้นจะทำการฝึกสอนโมเดลด้วยการกำหนด Loss function ดังนี้

$$Loss = Loss_{CIoU} + Loss_{Conf} + Loss_{Class}$$

โดยที่

$$Loss_{CIoU} = 1 - IoU + \frac{\rho^2(b, b^{gt})}{c^2} + \alpha \nu$$

$$Loss_{Conf} = \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B I_{ij}^{obj} [\hat{C}_i \log(C_i) + (1 - \hat{C}_i) \log(1 - C_i)] - \lambda_{noobj} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B I_{ij}^{noobj} [\hat{C}_i \log(C_i) + (1 - \hat{C}_i) \log(1 - C_i)]$$

$$Loss_{Class} = \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{c \in \text{classes}} \{ \hat{p}_i(c) \log p_i(c) + [1 - \hat{p}_i(c)] \log [1 - p_i(c)] \}$$

$$\alpha = \frac{\nu}{1 - IoU + \nu}$$

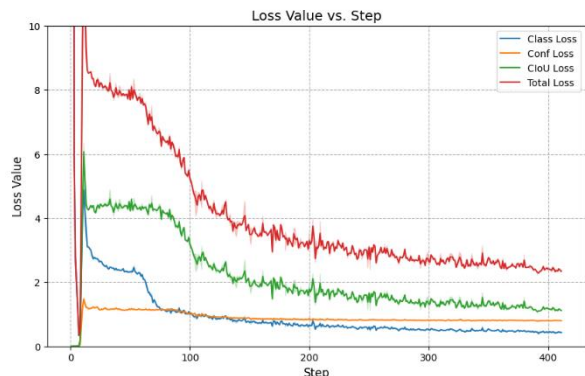
$$\nu = \frac{4}{\pi^2} \left[\tan^{-1} \left(\frac{w^{gt}}{h^{gt}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{w}{h} \right) \right]^2$$

จากข้างต้น Loss function ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ $Loss_{CIoU}$ แทนส่วนของการทำนายขนาดและตำแหน่งของกรอบล้อมรอบวัตถุ ขณะที่ $\rho^2(.)$ เป็นการหาระยะทางของจุดกึ่งกลางของวัตถุกับกรอบการ

ทำนายโดยใช้ระยะทางแบบยูคลิด (Euclidean Distance) และ c เป็นความยาวเส้นทแยงมุมของกล่องที่เล็กที่สุดระหว่างกรอบวัตถุจริงกับกรอบการทำนาย นอกจากนี้ $Loss_{Conf}$ แทนส่วนทำนายการปรากฏของวัตถุและ $Loss_{Class}$ แทนส่วนของการทำนายชนิดวัตถุ

สำหรับภาพที่นำเข้าของ YOLO จะถูกปรับขนาดจากเดิม 4000 x 6000 พิกเซล เป็นขนาด 640 x 640 พิกเซลก่อนและจะแบ่งส่วนของรูปภาพออกเป็นตารางทั้งหมด S^2 ส่วน ($S \times S$) แต่ละส่วนสามารถทำนายว่า มีวัตถุอยู่ในส่วนนั้นๆ ได้จำนวน B กล่อง หาก $I^{obj} = 1$ เกิดขึ้นในกรณีที่มีวัตถุปรากฏอยู่ภายในกล่องนอกเหนือจากนั้นมีค่าเป็น 0 ในทางตรงกันข้าม หาก $I^{noobj} = 1$ เกิดขึ้นในกรณีที่ไม่มีมีวัตถุปรากฏอยู่ภายในกล่อง สำหรับ λ ทำหน้าที่ควบคุมสมดุลของวัตถุที่สนใจ (Positive sample) และวัตถุที่ไม่สนใจ (Negative sample) ในที่นี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.5 สำหรับค่า C เป็นค่าความมั่นใจที่จะมีวัตถุปรากฏอยู่ภายในกล่องซึ่งได้จากการทำนายของ YOLO สำหรับส่วนสุดท้าย $p(c)$ เป็นค่าความน่าจะเป็นของแต่ละชนิดของวัตถุที่จะปรากฏภายในกล่องได้มาจากการทำนายของ YOLO เช่นกัน

ในกระบวนการฝึกสอนจะทำการปรับพารามิเตอร์ของโมเดลด้วย Adam Optimizer (Kingma & Ba, 2017) ทำการฝึกสอนทั้งหมด 500 รอบ ใช้ค่า dropout (Dropout) เท่ากับ 0.5 ใช้ละครึ่งของการฝึกสอนทำการนำรูปเข้าจำนวน 4 ภาพ (batch size เท่ากับ 4) โดยมีเงื่อนไข หากมีการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดของ Loss ทั้งหมดไม่เกิน 0.001 เมื่อทำการเปรียบเทียบในรอบติดต่อกันมากกว่า 50 ครั้งจึงจะทำการหยุดการฝึกสอน จากการทำฝึกสอนทำให้ได้ค่าของ Loss ต่ำสุดอยู่ที่ 2.355 ที่รอบ 411 และทำการหยุดการฝึกสอนก่อนครบ 500 รอบ รายละเอียดของค่า Loss ของแต่ละรอบแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ค่า Loss ที่ทำการฝึกสอนโมเดลในแต่ละรอบโดยแสดงแบ่งออกเป็น Class Loss, Conf Loss, และ CIoU Loss

3.4 การวัดประสิทธิภาพของโมเดล

การวัดประสิทธิภาพของโมเดลสำหรับตรวจจับ กากบาทแบบอัตโนมัติในกระดาษคำตอบปรนัยนั้น พิจารณาจากค่า F_{1score} ซึ่งสร้างขึ้นมาเพื่อเป็นการวัด ประสิทธิภาพของโมเดล โดยพิจารณาจากค่าความแม่นยำ (Precision) และความสามารถในการค้นคืน (Recall) ค่าของ F_{1score} จะอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 หาก ให้ค่าเข้าใกล้ 1 นั้นแสดงว่าโมเดลมีประสิทธิภาพในการ ทำงานที่ดี สำหรับค่าของ F_{1score} แสดงดังนี้

$$F_{1score} = 2 \left(\frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \right)$$

โดยที่

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}$$

ในขณะที่

True Positive (TP) คือ จำนวนตำแหน่งที่ โมเดลระบุว่ามีการกากบาท และ ณ ตำแหน่งนั้นมีการกากบาท จริง

False Positive (FP) คือ จำนวนตำแหน่งที่ โมเดลระบุว่ามีการกากบาท แต่ ณ ตำแหน่งนั้นไม่มีการกากบาท

False Negative (FN) คือ จำนวนตำแหน่งที่ โมเดลระบุว่าไม่มีการกากบาท แต่ ณ ตำแหน่งนั้นมีการกากบาท



รูปที่ 3 ภาพแสดงการพิจารณาการเกิด TP, FP และ FN ของการตรวจ จับกากบาทบนกระดาษคำตอบปรนัย

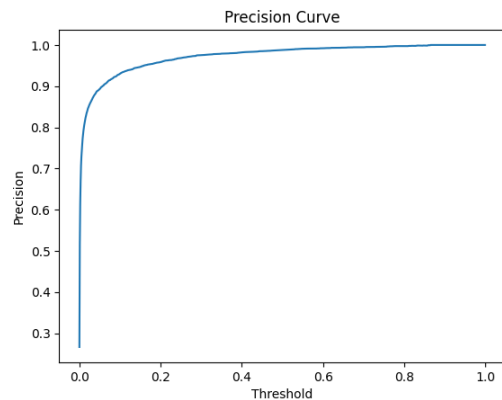
โดยตัวอย่างการพิจารณาว่าเป็น TP FP และ FN แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากรอบสี่ที่ปรากฏขึ้นบน ภาพเป็นการระบุตำแหน่งโดยที่โมเดลคาดว่ามีการกากบาท ปรากฏอยู่ ณ ตำแหน่งนั้นๆ ภายในกรอบ โดยกรอบ สี่แดงแสดงถึงกรณีที่โมเดลระบุว่าตำแหน่งนั้น ๆ มี กากบาทปรากฏอยู่และมีการกากบาทปรากฏขึ้นจริง (TP) สำหรับกรอบน้ำเงินแสดงถึงกรณีที่โมเดลระบุว่าตำแหน่ง นั้น ๆ มีการกากบาทปรากฏอยู่ แต่ไม่มีการกากบาทปรากฏอยู่ หรืออาจเป็นสัญลักษณ์อื่น ๆ ที่ไม่ใช่กากบาท จึงนับว่า

เป็นการทำนายผิด (FP) สำหรับกากบาทที่ไม่ถูกตีกรอบ จะเป็นกรณีที่โมเดลทำนายว่าไม่มีกากบาทบริเวณนั้นจึง นับว่าเป็นการทำนายที่ผิด (FN)

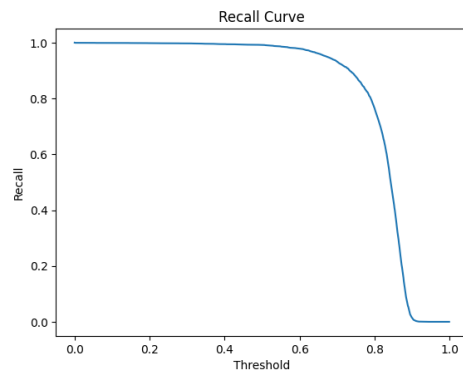
4. ผลการวิจัย

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของโมเดลสำหรับ การตรวจจับเครื่องหมายกากบาทภายในกระดาษคำตอบ ปรนัย โดยจะทำการกำหนดค่า IOU อยู่ที่ 0.7 สำหรับการ ทดสอบและทำการปรับเทรชโฮลด์ (Threshold) โดย กำหนดค่าตั้งแต่ 0.0 ถึงค่า 0.99 หากตำแหน่งใด มีความมั่นใจว่ามีตำแหน่งของกากบาท ปรากฏ (Confidence) อยู่ มากกว่าค่า Threshold จะทำการแสดงกรอบหรือตำแหน่งนั้นขึ้นมา และในทาง ตรงกันข้ามหากค่าความมั่นใจของตำแหน่งนั้น ๆ น้อยกว่า ค่า Threshold จะไม่นำมาแสดงบนภาพหลังจากทำการ ฝึกสอนโมเดลกับชุดฝึกสอน 100 ภาพ และทดสอบกับ ภาพชุดทดสอบ 63 ภาพแล้ว ผลการทดลอง พบว่า เมื่อกำหนดค่า Threshold ที่แตกต่างกัน จากนั้นทำการ ประเมินค่าของ Precision และ Recall แสดงดัง

รูปที่ 4



(a) Precision

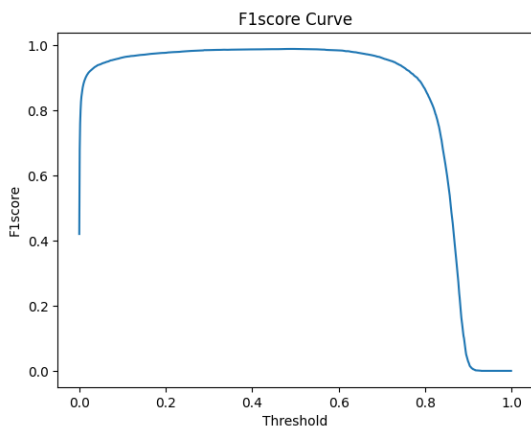


(b) Recall

รูปที่ 4 ภาพความสัมพันธ์ของ (a) Precision และ (b) Recall เมื่อกำหนดค่า Threshold ที่แตกต่างกัน

รูปที่ 4b แสดงค่าประสิทธิภาพของโมเดลในการค้นหาตำแหน่งของวัตถุ (Recall) พบว่า ค่า Recall มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่า Threshold ขึ้น สำหรับการตรวจสอบค่าความแม่นยำในการระบุวัตถุนั้นว่าเป็นกากบาทหรือไม่จะพิจารณาจาก ค่าของ Precision ซึ่งแสดงใน

รูปที่ 4a หากค่าของ Precision เข้าใกล้ 1 แสดงถึง โมเดลมีความแม่นยำสูง ผลการทดลองพบว่า เมื่อค่า Threshold เพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่า Precision ของโมเดล เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งค่า Precision สูงสุดที่ 1 เมื่อ Threshold ที่ 0.891 นอกจากนี้ หากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Precision และ Recall แล้ว พบว่า Recall จะแสดงถึงประสิทธิภาพของโมเดลในการค้นหาตำแหน่งของวัตถุที่เป็นไปได้ทั้งหมด ตามค่าของ Threshold ที่กำหนดไว้ หากค่า Threshold มีค่าต่ำจะทำให้โมเดลแสดงทำนายตำแหน่งของวัตถุมากขึ้น และมีโอกาสมากที่จะสามารถระบุตำแหน่งของกากบาทที่มีในกระดาดคำตอบที่ครบ แต่จะส่งผลทำให้ค่า Precision สำหรับระบุตำแหน่งนั้นเป็นเครื่องหมายกากบาทหรือไม่ มีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งเป็นเพราะมีการระบุตำแหน่งของวัตถุ เกินกว่าจำนวนของกากบาทที่มีอยู่จริง ในทางตรงกันข้ามหากค่า Threshold มีค่าสูงจะทำให้โมเดลทำการทำนายตำแหน่งของวัตถุได้น้อยลง แต่จะมีความแม่นยำในการระบุตำแหน่งนั้นเป็นกากบาทหรือไม่ สูงขึ้นดังนั้นจึงมีความจำเป็นจะทำการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดในการกำหนดค่า Threshold ซึ่งพิจารณาจากค่า F_{1score} แสดงดังรูปที่ 5

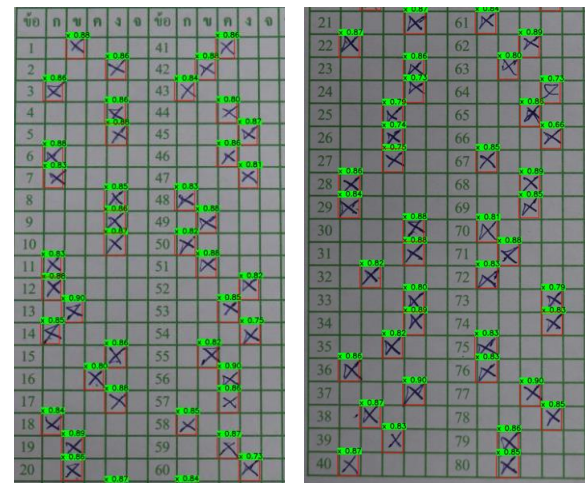


รูปที่ 5 ภาพแสดงค่าประสิทธิภาพ F_{1score} ของโมเดลเมื่อกำหนดค่า Threshold ที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าค่า Threshold อยู่ที่ตั้งแต่ 0.2 ถึง 0.6 จะให้ค่า F_{1score} ที่เข้าใกล้ 1 หากและให้ค่า F_{1score} สูงสุดอยู่ที่ 0.989 เมื่อกำหนดค่า Threshold ที่ 0.496 ดังนั้นหากทำการปรับค่า Threshold ที่ 0.496 จะทำให้โมเดลมีประสิทธิภาพดีที่สุด สำหรับการตรวจจับและระบุตำแหน่งของกากบาทในกระดาดคำตอบปรนัย โดยตัวอย่างการตรวจจับกากบาทในภาพของกระดาดคำตอบปรนัย เมื่อกำหนดค่า Threshold ที่ 0.496 แสดงดังรูปที่ 6

5. การวิเคราะห์ความผิดพลาด

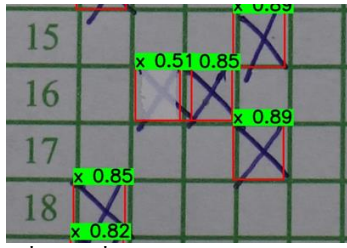
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าโมเดลสามารถทำงานได้ดีในการตรวจจับและระบุตำแหน่งของกากบาท อย่างไรก็ตามพบว่าการตรวจจับกากบาทนั้นโมเดลยังมีข้อผิดพลาดอยู่ซึ่ง ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบ



(a) ส่วนต้น (b) ส่วนท้าย

รูปที่ 6 แสดงการตรวจจับกากบาทของกระดาดคำตอบปรนัยแบ่งเป็น (a) ส่วนต้นและ (b) ส่วนท้ายของ กระดาดคำตอบ

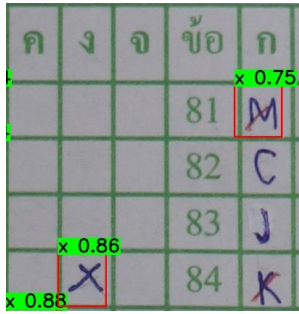
ข้อผิดพลาดของระบุตำแหน่งของกากบาทที่เกิดขึ้นแล้วพบว่า การกากบาทในตัวเลือกของกระดาดคำตอบบางชุดไม่ชัดเจน ซึ่งอาจส่งผลให้โมเดลทำการตรวจจับได้ว่าเป็นสัญลักษณ์กากบาท อาทิเช่น กรณีที่มีการเปลี่ยนคำตอบโดยการใช้ปากกาลบคำผิด แต่ยังคงปรากฏรอยตัวเลขที่ยังเป็นสัญลักษณ์ของกากบาทปรากฏอยู่ แสดงดังรูปที่ 7a และการเปลี่ยนแปลงคำตอบโดยการฝนทับตัวเลขเดิม แต่ยังคงมีลักษณะเฉพาะของกากบาทปรากฏทำให้โมเดลทำนายว่าเป็นกากบาทแสดงดังรูปที่ 7b สำหรับในกรณีที่มีสัญลักษณ์อื่น ๆ ที่คล้ายคลึงกับกากบาท เช่น ตัวอักษร R แสดงดังรูปที่ 7c ซึ่งโมเดลพยายามทำนายว่าตำแหน่งนั้นมีสัญลักษณ์กากบาทปรากฏอยู่



(a) กรณีที่มีการเปลี่ยนคำตอบโดยการใช้ปากกาลบคำผิด



(b) กรณีที่มีการเปลี่ยนคำตอบโดยทำสัญลักษณ์อื่น



(c) กรณีการตรวจจับสัญลักษณ์อื่นที่คล้ายกับกากบาท

รูปที่ 7 ตัวอย่างข้อผิดพลาดของโมเดลในการตรวจจับกากบาทในกรณีดังนี้ (a) กรณีที่มีการเปลี่ยนคำตอบโดยการใช้ปากกาลบคำผิด (b) กรณีที่มีการเปลี่ยนคำตอบโดยทำสัญลักษณ์อื่น และ (c) กรณีการตรวจจับสัญลักษณ์อื่นที่คล้ายกับกากบาท

6. สรุปผลวิจัย

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่สามารถตรวจจับกากบาทแบบอัตโนมัติในกระดาษคำตอบปรนัยด้วยกระบวนการตรวจจับวัตถุและการเรียนรู้ของเครื่องเชิงลึก สำหรับการตรวจจับกากบาทในกระดาษคำตอบปรนัยจะอาศัยเทคนิค YOLOv8 และทำการสร้างโมเดลที่สามารถตรวจจับกากบาทแบบอัตโนมัติในกระดาษคำตอบปรนัยอาศัยเทคนิค CNN จากนั้นทำการวัดประสิทธิภาพโมเดลที่พัฒนาขึ้นจากค่าของ Precision, Recall และ F_{1score} ตามลำดับ

ผลการศึกษาพบว่า เมื่อกำหนดให้ Threshold เพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่า Precision ของโมเดลเพิ่มมากขึ้น แต่สำหรับค่าของ Recall ของโมเดลมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มค่าของ Threshold เพิ่มขึ้น และที่สำคัญการพิจารณาจุดที่เหมาะสมที่สุดในการกำหนดค่า Threshold

ซึ่งจะพิจารณาจากค่าของ F_{1score} พบว่า เมื่อทำการปรับค่า Threshold ที่ 0.496 ทำให้ได้ ค่าของ F_{1score} สูงสุดเท่ากับ 0.989 ซึ่งส่งผลทำให้โมเดลมีประสิทธิภาพดีที่สุดสำหรับการตรวจจับและระบุตำแหน่งของกากบาทแบบอัตโนมัติในกระดาษคำตอบปรนัย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ที่สนับสนุนเรื่องแม่ข่าย สำหรับประมวลผลและชุดข้อมูลสอบในการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Alomran, M., & Chai, D. (2018). Automated scoring system for multiple choice test with quick feedback. *International Journal of Information and Education Technology*, 8(8), 538-545. <https://doi.org/10.18178/ijiet.2018.8.8.1096>

Chinnasarn, K., & Ranganseri, Y. (1998). A multiple choice test checking system that uses the principles of image processing. *The 36th Kasetsart University Academic Conference*, 218. (in Thai)

de Elias, E. M., Tasinaffo, P. M., & Hirata Jr, R. (2021). Optical mark recognition: Advances, difficulties, and limitations. *SN Computer Science*, 2(5), 367.

Deepak Kumar P. (2023). Cloud computing. *International Scientific Journal of Engineering and Management*, 02. <https://doi.org/10.55041/ISJEM00289>

Deng, H., Wang, F., & Liang, B. (2008, December). A low-cost OMR solution for educational applications. *In 2008 IEEE international symposium on parallel and distributed processing with applications*. pp. 967-970. <https://doi.org/10.1109/ISPA.2008.130>

Fisteus, J. A., Pardo, A., & García, N. F. (2013). Grading multiple choice exams with low-cost and portable computer-vision techniques. *Journal of Science Education and Technology*, 22, 560-571. <https://doi.org/10.1007/s10956-012-9414-8>

He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2015). Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 37(9), 1904-1916.

Hussmann, S., & Deng, P. W. (2005). A high-speed optical mark reader hardware implementation at low cost using programmable logic. *Real-Time Imaging*, 11(1), 19-30. <https://doi.org/10.1016/j.rti.2005.03.001>

Jocher, G., Chaurasia, A., & Qiu, J. (2023). Ultralytics YOLO (8.0.0) [Computer software]. <https://github.com/ultralytics/ultralytics>

Kingma, D. P., & Ba, J. (2017). Adam: A Method for Stochastic Optimization, *Published as a conference paper at ICLR 2017*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>

Kumar, A., Singal, H., & Bhavsar, A. (2018). Cost effective real-time image processing based optical mark reader. *World Acad. Sci. Eng. International Journal of Information Technology and Computer Engineering*, 12(9), 787-791.

- Lin, W., Hasenstab, K., Moura Cunha, G., & Schwartzman, A. (2020). Comparison of handcrafted features and convolutional neural networks for liver MR image adequacy assessment. *Scientific Reports*, 10(1), 20336. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77264-y>
- Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C. Y., & Berg, A. C. (2016). Ssd: Single shot multibox detector. In *Computer Vision–ECCV 2016: 14th European Conference, Amsterdam, The Netherlands, October 11–14, 2016, Proceedings, Part I* 14. pp. 21–37. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_2
- Nguyen, T. D., Manh, Q. H., Minh, P. B., Thanh, L. N., & Hoang, T. M. (2011). Efficient and reliable camera based multiple-choice test grading system. In *The 2011 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2011)*. pp. 268–271. <https://doi.org/10.1109/ATC.2011.6027482>
- Phatkrajang, P. (2010). Thesis database system, Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Kamphaeng Saen. http://cpe.eng.kps.ku.ac.th/db_cpeproj/paperShowFile.php?id_pro=66 (in Thai)
- Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. pp. 779–788.
- Sanguansat, P. (2015, June). Robust and low-cost Optical Mark Recognition for automated data entry. In *2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ECTICon.2015.7206937>
- Spadaccini, A., & Rizzo, V. (2011). A multiple-choice test recognition system based on the gamera framework. arXiv preprint arXiv:1105.3834. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1105.3834>
- Tan-ut, P. (2017). Development of a program for checking multiple choice answer sheets using image processing. *Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal*, 9(10). (in Thai)
- Tinh, P. D., & Minh, T. Q. (2024). Automated Paper-based Multiple Choice Scoring Framework using Fast Object Detection Algorithm. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*, 15(1). <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2024.01501115>
- Wang, C. Y., Liao, H. Y. M., Wu, Y. H., Chen, P. Y., Hsieh, J. W., & Yeh, I. H. (2020). CSPNet: A new backbone that can enhance learning capability of CNN. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition workshops*. pp. 390–391.

การพัฒนาผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมคุณค่าทางโภชนาการจากกล้วย

Development of crispy pork product to enhance nutritional value from banana

นุจรี สอนสะอาด^{1*} นฤทธิ วัตเขียน¹ วาสนา วงศ์งาม¹

Nootjaree Somsaard^{1*}, Narit Wardkhean¹ and Wasana Wongngam¹

¹สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, สุรินทร์, ประเทศไทย

¹Department of Agro-Industry, Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan SURIN Campus, Surin, Thailand

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกส่วนต่างๆ ของกล้วยที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและพัฒนาการผลิตผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมโภชนาการจากกล้วย ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของส่วนต่างๆ ของกล้วยน้ำว้ามะลิอ่องในจังหวัดสุรินทร์ ได้แก่ ผงปลีกล้วย ผงหอยกล้วย และผงผลดิบ ผลพบว่าผงปลีกล้วยมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าผงหอยกล้วย และผงผลดิบ โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 7.87 1.83 และ 2.42 (โดยน้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ อีกทั้งผงปลีกล้วยยังมีปริมาณใยสูงถึงร้อยละ 29.87 ดังนั้นผงปลีกล้วยจึงถูกเลือกไปพัฒนาจากสูตรพื้นฐานเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมผงปลีกล้วยที่ร้อยละ 1 3 และ 5 ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณผงปลีกล้วยทำให้ค่าความสว่าง (L*) ของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงและผลิตภัณฑ์มีสีเข้มเพิ่มขึ้น ค่าความชื้นและปริมาณน้ำอิสระลดลงเทียบกับสูตรควบคุมจากร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง 3.3 เป็น 1.85 และจาก 0.43 เป็น 0.13 ตามลำดับ ผลผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมผงปลีกล้วยร้อยละ 1 พบว่าคะแนนการยอมรับด้านความชอบโดยรวมมากที่สุดที่ 7.73 การเสริมผงปลีกล้วยร้อยละ 5 ผลทำให้กรอบเพิ่มสูงสุดแต่มีค่าความแข็งต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 18.10 และ 79.07 นิวตัน ตามลำดับ เมื่อเทียบกับสูตรควบคุม นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้คุณค่าทางโภชนาการเพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณโปรตีน และใยสูงร้อยละโดยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 28.81 และ 2.67 ตามลำดับ และมีพลังงานทั้งหมดลดน้อยลงเมื่อเทียบกับสูตรควบคุมจากเดิม 505.32 ลดลงเป็น 458.25 กิโลแคลอรี/100 กรัม ดังนั้นการเสริมปลีกล้วยจึงเป็นแนวทางที่สามารถนำไปเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวและให้คุณค่าทางโภชนาการสูงแก่ผู้บริโภคได้

คำสำคัญ: กล้วย, คุณค่าทางโภชนาการ, ปลีกล้วย, หมูแผ่นกรอบ

ABSTRACT

The objective of this research was subjected to select various parts of banana with high nutritional value and to develop the production of crispy pork slices with supplementary of a nutrition from banana. The study was a chemical composition of various parts of banana (*Musa ABB cv. Klui 'Namwa*) from Surin province including banana flower powder, banana stalk powder and raw banana powder. The results showed that banana flower powder was higher protein content more than banana stalk powder and raw banana powder at 7.87, 1.83 and 2.42% (dry basis, db), respectively. In addition, banana flower powder contained a high dietary fiber at 29.87%. Thus, the banana flower powder was selected to develop a standard formula of crispy pork slices by supplementing banana flower powder at 1, 3 and 5%, respectively. By increasing the amount of banana flower powder resulted in the brightness value (L*) decreased and the product became darker in color. The moisture content and free water content (a_w) decreased from 3.3 to 1.85% and from 0.43 to 0.13, respectively, compared to the control formular. The result was found that the crispy pork slices supplemented with banana flower powder at 1% was accepted with the highest overall liking score at 7.73. At 5% of banana flower powder, the result showed the highest crispness value with the lowest hardness value at 18.10 and 79.07 N, respectively, compared to the control formular. In addition, the resulting with the nutritional value increased that it was a high content of protein and dietary fiber at 28.81 and 2.67%db, respectively. And the total energy decreased from 505.32 to 458.25 kcal/100g, the comparing between the control formular and the supplemented formular at 5%. Therefore, the supplementation of banana flower is a potential value-adding approach for snack food products that also can provide a high nutritional of consumers.

KEYWORDS: Banana, Banana Flower, Crispy pork, Nutritional value

*Corresponding Author: *E-mail: Nootjaree.sn@rmuti.ac.th

Received: 02/02/2022; Revised: 04/12/2023; Accepted: 18/01/2024

1. บทนำ

ขนมขบเคี้ยวเป็นอาหารว่างที่มีไว้เพื่อระงับความหิวระหว่างมื้อ และให้พลังงานสูง แต่มีคุณค่าทางโภชนาการต่ำ การรับประทานขนมมีรายงานว่าการรับประทานขนมขบเคี้ยวของประเทศกำลังพัฒนามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 57 โดยเฉพาะในกลุ่ม เด็ก วัยรุ่น และนักศึกษา (กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์, 2566) การบริโภคของว่างที่มีแคลอรีสูงแต่ไม่ดีต่อสุขภาพก็เพิ่มขึ้น นิสัยการกินดังกล่าวมีส่วนทำให้โรคอ้วนเพิ่มขึ้นในช่วงวัยรุ่น ผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยว ส่วนใหญ่ผลิตมาจากแป้งของธัญพืชต่าง ๆ ผสมกับผงปรุงรสเพื่อให้เกิดรสชาติ ขนมขบเคี้ยวที่ทำจากเนื้อสัตว์ในส่วนผสมซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมมาเป็นเวลานาน ได้แก่ ผลิตภัณฑ์เนื้อแผ่นอบกรอบ ปลาเส้นปรุงรส เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม ขนมขบเคี้ยวที่ทำจากเนื้อสัตว์ก็ยังมีรสชาติของสารสำคัญต่าง ๆ ที่มีประโยชน์ที่จำเป็นต่อร่างกายอีกมากมาย จากกระแสการดูแลสุขภาพเชิงป้องกันหรือ Self-Care กลายเป็นเทรนด์ที่ถูกจับตามองมากที่สุดหลังเกิดโรคอุบัติใหม่ ผู้บริโภคยังคงดูแลสุขภาพอย่างต่อเนื่องมายังปี 2566 จากการสำรวจโดยแมคคินซี แอนด์ คอมพานี (Mckinsey & Company) พบว่าผู้บริโภคหันมาให้ความสนใจการบริโภคอาหารซูเปอร์ฟู้ดซึ่งเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง อุดมไปด้วยวิตามิน และมีประโยชน์ต่อร่างกาย ได้แก่ กลุ่มฟังก์ชันนอลฟู้ด หรือผลิตภัณฑ์ที่ทำหน้าที่ให้คุณค่าทางอาหารที่จำเป็นกับร่างกาย เช่น ปรับระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย ชะลอการเสื่อมโทรมของอวัยวะต่าง ๆ จึงนับว่ามีความน่าสนใจอย่างยิ่งที่จะพัฒนาอาหารประเภทนี้สู่ท้องตลาด (ฐานเศรษฐกิจดิจิทัล, 2566)

กล้วยมีเบต้าแคโรทีน ให้พลังงาน อุดมด้วยน้ำตาลธรรมชาติ 3 ชนิด คือ ซูโครส ฟรุคโทส และ กลูโคส รวมกับเส้นใยและกากอาหาร (Bjarnadottir and Shoemaker, 2022) หยวกกล้วยพบว่า มีเบต้าแคโรทีน วิตามินซี ที่และใยอาหารสูง (ธัญนันท์ฤทธิมณ, 2561) นอกจากนี้ปลีกล้วยยังมีสารสำคัญกลุ่มฟีนอลิก เช่น แอนโทไซยานิน และแคโรทีนอยล์ ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ช่วยป้องกันการเกิดโรคเรื้อรังต่าง ๆ เช่น โรคเกี่ยวกับหลอดเลือดและหัวใจ มะเร็ง เบาหวาน และกระเพาะอาหาร เป็นต้น (Ramu et al., 2014) อีกทั้งปลีกล้วยมีแคลอรีน้อยกว่าผลกล้วยประมาณ 4-5 เท่า นอกจากนี้ ปลีกล้วยยังมีปริมาณแคลเซียมใกล้เคียงกับผลกล้วยน้ำว้า และส่วนของหยวกกล้วยที่มีใยอาหารอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งทุกส่วนของ

กล้วยยังสามารถนำไปประกอบอาหารหวานเช่น แกงกล้วยดิบ ยำหัวปลี แกงหยวกกล้วยใส่วุ้นเส้น กล้วยบวชกล้วยเชื่อม เป็นต้น ดังนั้นจะพบได้ว่าส่วนต่าง ๆ ของกล้วยนับว่าเป็นส่วนที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและนอกจากนี้ยังมีสารสำคัญที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจที่จะนำส่วนต่าง ๆ ของกล้วยมาเพิ่มประโยชน์และคุณค่าทางโภชนาการให้กับผลิตภัณฑ์อาหารที่หลากหลายขึ้น (Bjarnadottir and Shoemaker, 2022)

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่เป็นผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบที่เสริมโภชนาการ โดยการคัดเลือกจากส่วนต่าง ๆ ของกล้วย ได้แก่ ผลดิบของกล้วย ปลีกล้วย และหยวกกล้วย เพื่อพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์ให้ตรงกับความต้องการของผู้บริโภค และยังเป็นทางเลือกหนึ่งให้แก่ผู้บริโภค ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวเพื่อให้ได้รสชาติและเนื้อสัมผัสที่แปลกใหม่ นอกจากนี้จะช่วยเพิ่มคุณประโยชน์ทางโภชนาการให้กับผลิตภัณฑ์แล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบทางการเกษตรที่มีอยู่ในท้องถิ่นให้เกิดประโยชน์ได้อีกทางหนึ่ง

2. วัสดุและวิธีการ

2.1 การคัดเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสม

2.1.1 การเตรียมตัวอย่าง

กล้วยที่ใช้ในการทดลองคือ กล้วยน้ำว้า (*Musa ABB cv. Klui* 'Namwa') พันธุ์มะลิอ่อน จากสวนในจังหวัดสุรินทร์ โดยคัดเลือกผลกล้วย ระยะที่ 1 เปลือกมีสีเขียว ผลแข็ง ปอกเปลือกยาก เนื้อกล้วยมีสีขาว ไม่มีการสุกและไม่มีการกลืนกล้วย (วรพรรณ บัญชาจรรุรัตน์ วรางคณา สมพงษ์ และสมโภช พจนพิมล, 2552)

1) การเตรียมตัวอย่างผงจากส่วนต่าง ๆ ของกล้วย โดยส่วนของหยวกกล้วยลอกกาบด้านนอกออกเอาเฉพาะแกนกลางสีขาวด้านใน ส่วนของปลีกล้วยลอกเอากาบสีม่วงออกจนถึงสีขาว และส่วนของผลกล้วยดิบนำมาตัดแต่งโดยไม่ต้องปอกเปลือก นำตัวอย่างทั้งสามส่วนของกล้วยมาล้างทำความสะอาด หั่นให้มีความหนา 0.2 มิลลิเมตร แช่ในสารละลายกรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 0.5 (w/v) นาน 30 นาที แล้วล้างน้ำสะอาด 3 ครั้ง และนำไปผลิตเป็นผงแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนแบบถาด (tray dryer) ยี่ห้อ SEMON รุ่น SI-CO8H ประเทศจีน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง บดตัวอย่างให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช

2) นำตัวอย่างวิเคราะห์ค่าความชื้นด้วยเครื่อง Moisture balance (ยี่ห้อ Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. รุ่น MA160-1 KG ประเทศเยอรมัน) และวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) ด้วยเครื่อง Water activity ยี่ห้อ AQUALAB รุ่น series 3TE ประเทศสหรัฐอเมริกา และวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่องวัดสี ยี่ห้อ HunterLab รุ่น UltraScan VIS ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยวัดค่าสีจากการวัดระบบ CIE $L^* a^* b^*$ ซึ่งค่า L^* หมายถึงความสว่าง (0 = สีดำ, 100 = สีขาว) ค่า a^* หมายถึงค่าสีแดงและสีเขียว (+a = สีแดง, -a = สีเขียว) ค่า b^* หมายถึงค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน (+b = สีเหลือง, -b = สีน้ำเงิน)

2.1.2 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบจากส่วนต่างๆ ของผงกล้วย

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน และเยื่อใย (AOAC, 2005) และการวิเคราะห์คาร์โบไฮเดรตโดยการคำนวณจากสมการที่ 1

$$\text{คาร์โบไฮเดรต} = 100 - (\text{ร้อยละความชื้น} + \text{ร้อยละโปรตีน} + \text{ร้อยละไขมัน} + \text{ร้อยละเถ้า} + \text{ร้อยละเส้นใย}) \quad \text{--- สมการที่ 1}$$

คำนวณพลังงานทั้งหมดที่แสดงในสมการที่ 2

$$\begin{aligned} \text{พลังงานทั้งหมดในตัวอย่าง 100 กรัม (กิโลแคลอรี)} \\ = [\text{ปริมาณโปรตีน (กรัม)} \times 4] + \\ [\text{ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (กรัม)} \times 4] + \\ [\text{ปริมาณไขมัน (กรัม)} \times 9] \quad \text{--- สมการที่ 2} \end{aligned}$$

ส่วนของกล้วยที่มีปริมาณโปรตีนและเยื่อใยสูงที่สุด จะถูกคัดเลือกไปเสริมโภชนาการในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบ

2.2 ศึกษาการเสริมโภชนาการจากผงกล้วยในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบ

กรรมวิธีการผลิตหมูแผ่นกรอบโดยดัดแปลงสูตรของหมูแผ่นกรอบของอารียา ปอเจริญ และ เสาวณีย์ เลิศวรสิริกกุล (2561) วัตถุดิบที่ใช้มีดังนี้ คือ เนื้อหมูบด 70 กรัม น้ำตาลทราย 12 กรัม เกลือ 1.2 กรัม พริกไทยป่น 0.8 กรัม และ ซีอิ้วขาว 1 กรัม พัฒนาปรับปรุงการทำหมูแผ่นเสริมผงกล้วย 3 ระดับที่ร้อยละ 1 3 และ 5 โดยมีกรรมวิธีดังนี้ นำเนื้อบดและส่วนผสมทั้งหมด ใส่ลงในเครื่องปั่นบดหั่น ยี่ห้อ Mara รุ่น MR-1268 ประเทศไทย ปั่นละเอียดนาน 5 นาที จากนั้นเติมผงกล้วยที่ระดับ

ต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น ปั่นต่อจนส่วนผสมเข้ากัน นำส่วนผสมหมูแผ่นใส่ในถุงพลาสติกปิดไบบาง มีขนาดความหนาที่ 0.3 มิลลิเมตร ขึ้นรูปหมูแผ่น ใช้พิมพ์กดขึ้นรูปเป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร นำหมูแผ่นเข้าตู้อบลมร้อนแบบถาด ยี่ห้อ SEMON รุ่น SI-CO8H ประเทศจีน อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง นำหมูแผ่นทอดในน้ำมันที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที ผึ่งให้เย็น และบรรจุในถุงสุญญากาศ เพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพดังต่อไปนี้

2.3.1 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมผงกล้วย

1) วิเคราะห์ค่าสี โดยนำผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมผงกล้วยวิเคราะห์ค่าสี ด้วยเครื่องวัดสี ยี่ห้อ HunterLab รุ่น UltraScan VIS ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยวัดค่าสีจากการวัดระบบ CIE $L^* a^* b^*$

2) การวัดค่าเนื้อสัมผัส ด้วยเครื่อง Texture analyzer ยี่ห้อ Stable Micro System รุ่น TA-XT plus ประเทศสหรัฐอเมริกา ตัวอย่างผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมผงกล้วยทั้ง 3 สูตร วัดค่าเนื้อสัมผัสโดยวัดค่าความแข็ง และค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบด้วยวิธี Texture profile analysis (TPA) ซึ่งค่าแรงกดโดยใช้หัววัดเบอร์ P/0.25 วินาที แรงกด 5 กิโลกรัม ความเร็วในการกด 10 เมตร/วินาที² ระยะกดจากผิวหมูแผ่นกรอบ 3 มิลลิเมตร โดยค่าความแข็ง (hardness) คำนวณจากค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการกดหรือเทียบได้กับการเคี้ยวครั้งแรก มีหน่วยเป็นหน่วยของแรง เช่น นิวตัน (N) และค่าความกรอบ (crispness หรือ cohesiveness) เป็นพลังงานยึดเกาะกันภายในเนื้ออาหาร คำนวณจากอัตราส่วนของพื้นที่ใต้กราฟส่วนที่เป็นค่าบวกของการกดหรือการเคี้ยวครั้งที่ 2 (Area 2) และครั้งที่ 1 (Area 1) (สมการที่ 3)

$$\text{ค่าความกรอบ} = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ 2}}{\text{พื้นที่ใต้กราฟ 1}}$$

--- สมการที่ 3

3) วิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมผงกล้วย ที่บดละเอียด วิเคราะห์หาปริมาณน้ำอิสระ ด้วยเครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ ยี่ห้อ AQUALAB รุ่น series 3TE ประเทศสหรัฐอเมริกา

2.3.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมผงกล้วย

วิเคราะห์ปริมาณความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน และเยื่อใย (AOAC, 2005) การวิเคราะห์คาร์โบไฮเดรต ดังสูตรที่ 1 และการคำนวณพลังงานสุดท้าย ดังสูตรที่ 2 ข้างต้น

2.3.3 การทดสอบการยอมรับ (Acceptance test)

การทดสอบการยอมรับ หรือการทดสอบระดับความพอใจของผู้บริโภคของผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริม ผงปลีกกล้วย โดยวิธี 9-Point Hedonic Scaling test วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) ทำการประเมินโดยผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน ประเมินการยอมรับด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยให้คะแนน 1 = ไม่ชอบมากที่สุด 5 = เฉย ๆ และ 9 = ชอบมากที่สุด นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อหาความแตกต่างทางสถิติโดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

3. ผลลัพธ์

3.1 การคัดเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสม

จากการวิเคราะห์ทางกายภาพของผงหอยกกล้วย ผงปลีกกล้วย และผงผลกล้วยที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง พบว่าผงจากส่วนต่างๆ ของกล้วยเมื่อผ่านการทำให้แห้งมีปริมาณความชื้นสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 7 และปริมาณน้ำอิสระประมาณ 0.4 ซึ่งเป็นระดับความชื้นและปริมาณน้ำอิสระที่จุลินทรีย์เจริญไม่สามารถเติบโตได้ (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ค่าความชื้น และปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของผงหอยกกล้วย ผงปลีกกล้วย และผงผลกล้วยอบแห้ง

ส่วนต่างๆ ของกล้วย	ความชื้น (ร้อยละ)	ปริมาณน้ำอิสระ (a_w)
ผงหอยกกล้วย	5.41 ± 0.17	0.43 ± 0.00
ผงปลีกกล้วย	7.04 ± 0.21	0.43 ± 0.00
ผงผลกล้วย	5.22 ± 0.08	0.42 ± 0.00

การวิเคราะห์ค่าสีของผงจากส่วนต่าง ๆ ของกล้วย เพื่อใช้สำหรับเป็นข้อมูลเบื้องต้นของวัตถุดิบ พบว่าการอบแห้งมีผลทำให้ค่าสีของตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด มีค่าความ

ตารางที่ 2 ค่าสีของผงหอยกกล้วย ผงปลีกกล้วย และผงผลกล้วยอบแห้ง

ส่วนต่างๆ ของกล้วย	L^*	a^*	b^*
ผงหอยกกล้วย	64.32 ± 1.65	3.92 ± 0.25	14.50 ± 0.46
ผงปลีกกล้วย	40.57 ± 0.82	4.32 ± 0.08	9.03 ± 0.15
ผงผลกล้วย	64.12 ± 1.37	2.05 ± 0.12	11.99 ± 0.33

สว่าง L^* ลดลง โดยเฉพาะผงปลีกกล้วยซึ่งจะมีลักษณะที่มีสีคล้ำมากที่สุดเท่ากับ 40.57 ในขณะที่ผงหอยกกล้วย และผงผลกล้วย มีค่าความสว่าง L^* ประมาณ 64.0 (ตารางที่ 2) ส่วนค่า a^* มีแนวโน้มเป็นสีแดง และค่า b^* ซึ่งให้ค่าไปในแนวโน้มเป็นสีเหลืองของทั้งสามตัวอย่างซึ่งมีค่าในช่วง 2.0-4.3 และ 9.0-14.5 ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงจากส่วนต่างๆ ของกล้วย (ตารางที่ 3) พบว่าผงปลีกกล้วยมีปริมาณโปรตีนสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 7.84 และมีปริมาณโปรตีนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$, ตารางที่ 3) กับส่วนของผงผลกล้วย และผงหอยกกล้วย ซึ่งมีปริมาณโปรตีนเท่ากับร้อยละ 2.43 และ 1.83 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณเยื่อใยของผงจากทั้งสามส่วนของกล้วยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$, ตารางที่ 3) โดยปริมาณเยื่อใยของผงหอยกกล้วยมีปริมาณสูงมากที่สุดคือร้อยละ 34.34 ในขณะที่ปริมาณเยื่อใยของผงผลกล้วยมีปริมาณน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 6.65 เมื่อพิจารณาค่าปริมาณคาร์โบไฮเดรต และพลังงานทั้งหมด พบว่าผงปลีกกล้วยมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 69.53 และมีพลังงานทั้งหมดต่ำสุดเท่ากับ 338.10 kcal/100g (ตารางที่ 3)

3.2 การเสริมโภชนาการจากผงปลีกกล้วยในผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของผงหอยกกล้วย ผงปลีกกล้วย และผงผลกล้วยอบแห้ง

องค์ประกอบทางเคมี	ผงหอยกกล้วย	ผงปลีกกล้วย	ผงผลกล้วย
ความชื้น (ร้อยละ)	6.71 ^b ± 0.1	7.04 ^a ± 0.1	5.57 ^c ± 0.0
เถ้า*	5.01 ^b ± 0.9	12.34 ^a ± 0.1	2.08 ^c ± 0.2
ไขมัน*	0.61 ^b ± 0.3	3.17 ^a ± 0.0	0.58 ^b ± 0.0
โปรตีน*	1.83 ^b ± 0.4	7.84 ^a ± 0.6	2.42 ^b ± 0.0
เยื่อใย*	34.34 ^a ± 5.2	29.87 ^a ± 3.2	6.65 ^b ± 0.40
คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด*	85.30 ^b ± 1.4	69.53 ^c ± 0.5	89.42 ^a ± 0.2
พลังงานทั้งหมด (kcal/100g)	355.48 ^b ± 3.4	338.10 ^c ± 0.0	372.52 ^a ± 0.6

หมายเหตุ: * ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง





อักษร ^{a-c} ในแนวนอนแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

หมูแผ่นกรอบ

ผลการเสริมผงปลีกกล้วยในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบที่ระดับร้อยละ 1 3 และ 5 พบลักษณะหมูแผ่นกรอบที่มีสีเหลืองทอง แต่เมื่อเติมผงปลีกกล้วยเสริมลงไปในผลิตภัณฑ์พบว่าลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านสีของผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบมีสีเข้มขึ้น และเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงปลีกกล้วย

ที่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4) เมื่อนำหมูแผ่นกรอบที่มีการเสริมผงปลีกล้วยวัดค่าสีโดยใช้เครื่องวัดสี Hunter Lab จะเห็นได้ชัดว่าค่าความสว่าง (L*) มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับหมูแผ่นกรอบสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$, ตารางที่ 4) ซึ่งหมูแผ่นกรอบสูตรควบคุมมีค่าความสว่าง (L*) เท่ากับ 48.34 และหมูแผ่นกรอบที่เสริม

ตารางที่ 4 ลักษณะปรากฏ และลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมผงปลีกล้วย

เสริมผงปลีกล้วย (ร้อยละ)	ลักษณะปรากฏ	ลักษณะทางประสาทสัมผัส
สูตรควบคุม		- มีสีเหลืองทองน้ำตาล - มีกลิ่นหอมของหมูสุกปรุงรส - มีรสอู่อร่อย (umami) - เมื่อกัดมีความกรอบแข็ง
1		- มีสีเหลืองอมน้ำตาลเข้มเล็กน้อย - มีกลิ่นหอมของหมูสุกปรุงรส - มีรสอู่อร่อย (umami) - เมื่อกัดมีความกรอบแข็ง
3		- มีสีเหลืองอมน้ำตาลเข้มออกดำคล้ำ - มีกลิ่นหอมของหมูสุกปรุงรสลดลง - มีรสฝาดเล็กน้อย - เมื่อกัดมีความกรอบแข็ง
5		- มีสีเหลืองอมน้ำตาลเข้มออกดำคล้ำ - มีกลิ่นหอมของหมูสุกปรุงรสลดลง - มีรสฝาดเล็กน้อย - เมื่อกัดมีความกรอบ หักง่าย เวลาเคี้ยวเนื้อร่วน

ตารางที่ 5 ค่าสี ค่าความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) และคุณภาพเนื้อสัมผัสของหมูแผ่นกรอบเสริมผงปลีกล้วย

เสริมผงปลีกล้วย (ร้อยละ)	L*	a*	b*	ความชื้น (ร้อยละ)	ปริมาณน้ำอิสระ (a_w)	ค่าลักษณะทางเนื้อสัมผัสหมูแผ่นกรอบ	
						ค่าความแข็ง (นิวตัน)	ค่าความกรอบ
สูตรควบคุม	48.34 ^a ±0.9	8.64 ^a ±0.40	13.26 ^b ±0.49	3.30 ^b ±0.18	0.43 ^a ±0.04	172.27 ^{ab} ±98.0	7.50 ^b ±4.4
1	47.04 ^b ±0.9	5.77 ^b ±0.42	10.54 ^b ±0.44	2.49 ^b ±0.13	0.40 ^a ±0.02	143.95 ^b ±67.6	14.90 ^b ±8.5
3	46.04 ^c ±1.1	3.63 ^c ±0.47	6.37 ^c ±0.73	2.08 ^c ±0.05	0.36 ^a ±0.02	173.11 ^a ±54.8	13.00 ^b ±4.6
5	36.50 ^d ±2.8	2.21 ^d ±0.67	2.30 ^d ±0.64	1.85 ^d ±0.24	0.13 ^b ±0.01	79.07 ^c ±45.1	18.10 ^a ±4.8

หมายเหตุ อักษร ^{a-d} ในแนวตั้งแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ร้อยละ 1.85 และปริมาณน้ำอิสระเท่ากับ 0.13
($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 6 คะแนนการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมผงปลีกล้วย

หมูแผ่นเสริม ผงปลีกล้วย (ร้อยละ)	คะแนนความชอบ				
	สี	กลิ่น	รสชาติ	เนื้อสัมผัส	ความชอบโดยรวม
สูตรควบคุม	6.80 ^a ± 1.06	6.70 ^a ± 1.34	6.80 ^{ab} ± 1.45	7.03 ^{ab} ± 1.30	7.10 ^b ± 1.24
1	6.60 ^a ± 1.85	6.10 ^{ab} ± 1.71	7.30 ^a ± 1.54	7.53 ^a ± 1.11	7.73 ^a ± 1.29
3	5.60 ^b ± 1.71	6.33 ^a ± 1.58	6.30 ^b ± 1.95	6.43 ^b ± 1.59	7.00 ^b ± 1.23
5	5.07 ^b ± 2.08	5.83 ^b ± 1.91	6.17 ^b ± 1.44	6.60 ^b ± 1.65	6.57 ^b ± 1.33

หมายเหตุ: อักษร ^{a-b} ในแนวตั้งแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 7 องค์ประกอบทางเคมีของหมูแผ่นกรอบเสริมผงปลีกล้วย

องค์ประกอบทางเคมี	หมูแผ่นกรอบเสริมผงปลีกล้วย			
	สูตรควบคุม	ร้อยละ 1	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5
ความชื้น (ร้อยละ)	2.14 ^a ± 0.69	2.73 ^a ± 0.02	3.42 ^a ± 0.44	3.93 ^a ± 0.27
เถ้า*	4.46 ^b ± 0.11	4.75 ^{ab} ± 0.13	5.09 ^a ± 0.04	5.17 ^a ± 0.18
ไขมัน*	27.97 ^a ± 0.26	27.26 ^a ± 0.36	18.57 ^b ± 0.46	13.22 ^c ± 0.97
โปรตีน*	25.40 ^d ± 0.26	26.92 ^c ± 0.19	27.62 ^b ± 0.07	28.81 ^a ± 0.03
เยื่อใย*	1.66 ^b ± 0.07	2.23 ^{ab} ± 0.19	2.61 ^a ± 0.14	2.67 ^a ± 0.41
คาร์โบไฮเดรต*	39.81 ^c ± 0.71	38.12 ^c ± 0.65	45.15 ^b ± 0.05	48.84 ^a ± 0.88
พลังงานทั้งหมด (kcal/100g)	505.32 ^a ± 11.80	506.90 ^a ± 1.25	458.25 ^b ± 4.58	429.63 ^c ± 5.33

หมายเหตุ: *ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง

อักษร ^{a-d} ในแนวนอนแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ผงปลีกล้วยร้อยละ 1 3 และ 5 เท่ากับ 46.04 47.06 และ 36.50 ตามลำดับ ค่าสีแดง (a^*) และ ค่าสีเหลือง (b^*) ก็มีแนวโน้มลดลง เช่นเดียวกันเมื่อเติมผงปลีกล้วยที่เพิ่มขึ้น พบว่าค่าสีแดง (a^*) และ ค่าสีเหลือง (b^*) ต่ำสุดในหมูแผ่นกรอบที่เสริมผงปลีกล้วยร้อยละ 5 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.21 และ 2.30 ตามลำดับ ($p \leq 0.05$, ตารางที่ 4)

ผลการวิเคราะห์ค่าความชื้น และปริมาณน้ำอิสระของหมูแผ่นกรอบเสริมผงปลีกล้วย พบว่าการเสริมผงปลีกล้วยในปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความชื้น และปริมาณน้ำอิสระในผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงอย่างมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับหมูแผ่นกรอบสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$, ตารางที่ 5) ซึ่งค่าความชื้น และปริมาณน้ำอิสระมีปริมาณต่ำสุดในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบที่เสริมผงปลีกล้วยร้อยละ 5 ซึ่งมีค่าความชื้นเท่ากับ

ผลการวิเคราะห์ค่าความชื้น และปริมาณน้ำอิสระของหมูแผ่นกรอบเสริมผงปลีกล้วย พบว่าการเสริมผงปลีกล้วยในปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความชื้น และค่าปริมาณน้ำอิสระในผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงอย่างมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับหมูแผ่นกรอบสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$, ตารางที่ 5) ซึ่งค่าความชื้น และปริมาณน้ำอิสระมีปริมาณต่ำสุดในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบที่เสริมผงปลีกล้วยร้อยละ 5 ซึ่งมีค่าความชื้นเท่ากับร้อยละ 1.85 และปริมาณน้ำอิสระเท่ากับ 0.13 ($p \leq 0.05$)

ลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมผงปลีกล้วยที่ระดับร้อยละ 3 เมื่อกั้มีความกรอบแข็ง และที่ร้อยละ 5 เมื่อกั้มีความกรอบ หักง่าย เวลาเคี้ยวเนื้อร่วน (ตารางที่ 4) ซึ่ง

สอดคล้องกับการวัดคุณภาพเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่อง Texture analyzer ของผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบที่เสริมผงปลีกล้วยที่ระดับร้อยละ 3 จะมีความแข็ง (hardness) มาก

ที่สุดไม่ต่างกันสูตรควบคุม ($p > 0.05$, ตารางที่ 5) ในขณะที่เสริมผงปลีกล้วยร้อยละ 5 มีผลทำให้หมูแผ่นกรอบมีความแข็ง (hardness) ต่ำที่สุด แต่มีความกรอบ (crispness) มากที่สุด ($p \leq 0.05$, ตารางที่ 5) โดยพบว่าการเติมผงปลีกล้วยร้อยละ 5 มีค่าความแข็ง และความกรอบเท่ากับ 79.07 นิวตัน และ 18.1 ตามลำดับ ในขณะที่หมูแผ่นกรอบสูตรควบคุม และเสริมผงปลีกล้วยร้อยละ 1 และ 3 มีความแข็งที่เท่ากับ 172.27 143.95 และ 173.11 นิวตัน ตามลำดับ ส่วนความกรอบเท่ากับ 7.50 14.90 และ 13.0 ตามลำดับ (ตารางที่ 5)

ผลของการทดสอบความชอบของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบ โดยใช้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ได้ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน ประเมินคุณภาพทางด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม (ตารางที่ 6) จากการทดสอบพบว่าผู้บริโภคให้คะแนนความชอบต่อผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบทางด้านสี และกลิ่นลดลง เมื่อมีการเติมผงปลีกล้วยทุกระดับลงไป ในหมูแผ่นกรอบ แต่ก็พบว่าการเติมผงปลีกล้วยมีผลทำให้ผู้บริโภคให้คะแนนความชอบด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมมากกว่าหมูแผ่นกรอบสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$, ตารางที่ 6) อีกทั้งยังพบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบโดยรวมของหมูแผ่นกรอบที่เสริมผงปลีกล้วยร้อยละ 1 มากกว่าหมูแผ่นกรอบสูตรควบคุม โดยผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบโดยรวมสูงสุดเท่ากับ 7.73 คะแนน ($p \leq 0.05$, ตารางที่ 6) แต่เมื่อเพิ่มระดับการเติมผงปลีกล้วยที่เพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้การยอมรับทุกด้านลดลงโดยเฉพาะทางด้านสีและรสชาติ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหมูแผ่นกรอบเสริมผงปลีกล้วย (ตารางที่ 7) จากการวิเคราะห์พบว่าการเสริมผงปลีกล้วยลงในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบมีผลทำให้องค์ประกอบทางเคมี ความชื้น ไขมัน โปรตีน เยื่อใย โดยเฉพาะโปรตีนและเยื่อใยมีปริมาณสูงเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$, ตารางที่ 7) โดยในหมูแผ่นกรอบที่เติมผงปลีกล้วยร้อยละ 5 มีปริมาณโปรตีนและเยื่อใยพบมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 28.81 และ 2.76 ตามลำดับ ในขณะที่หมูแผ่นกรอบสูตรควบคุมมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 25.40 และ 1.66 ตามลำดับ ($p \leq 0.05$) ผลการวิเคราะห์ยังพบ

อีกว่า องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญเพิ่มมากขึ้นเมื่อเติมผงปลีกล้วยในปริมาณที่มากขึ้น แต่พบว่าปริมาณไขมันของผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมผงปลีกล้วยมีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$) โดยพบว่าปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมผงปลีกล้วยร้อยละ 5 เท่ากับร้อยละ 13.22 ส่วนไขมันในหมูแผ่นกรอบสูตรควบคุมมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 27.97 อีกทั้งผลการคำนวณพลังงานทั้งหมดในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบ พบว่าการเสริมผงปลีกล้วยมีผลทำให้พลังงานทั้งหมดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเสริมผงปลีกล้วยในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งพลังงานทั้งหมดในหมูแผ่นกรอบที่เสริมผงปลีกล้วยร้อยละ 1 3 5 มีค่าเท่ากับ 506.90 458.25 และ 429.63 kcal/100g ตามลำดับ

4. การอภิปราย

4.1 การคัดเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสม

จากข้อมูลเบื้องต้นของวัตถุดิบจากส่วนต่างๆ ของกล้วยที่ผ่านการทำแห้ง ได้แก่ ผงหยวกกล้วย ผงปลีกล้วย และผงผลกล้วย ซึ่งปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำอิสระอยู่ในเกณฑ์ที่จุลินทรีย์เจริญไม่สามารถเติบโตได้ มีรายงานปริมาณน้ำอิสระและความชื้นสัมพันธ์กับการเสื่อมเสียและความปลอดภัยของอาหารจากจุลินทรีย์ โดย ตัวอย่างทั้งสามของกล้วยที่ผ่านการทำแห้งอยู่ในเกณฑ์ความปลอดภัย (Lutovska et al., 2016; Labuza et al., 1970) จากการพิจารณาปริมาณโปรตีน เยื่อใย และคาร์โบไฮเดรตใช้เป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกวัตถุดิบเสริมโภชนาการในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบ พบว่าผลปลีกล้วยมีปริมาณโปรตีนสูงที่สุด อีกทั้งยังมีปริมาณเยื่อใยสูง ในขณะที่ปริมาณคาร์โบไฮเดรตน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนอื่นๆ ของผงกล้วย

จากรายงานทางวิชาการพบว่าสารที่มีคุณค่าทางโภชนาการที่สำคัญและมีประโยชน์สามารถพบได้ในส่วนต่างๆ ของกล้วย ซึ่ง Tribess et al. (2009) รายงานว่าผลกล้วยดิบประกอบด้วยสารที่มีความสำคัญทางโภชนาการสูง ได้แก่ แป้งทนการย่อย (resistant starch) ร้อยละ 40.9–58.5 ซึ่งให้พลังงานต่ำ เยื่อใยร้อยละ 6.0–15.5 อีกทั้งยังพบสารประกอบฟีนอลิกในผลกล้วยดิบที่มีศักยภาพนำไปใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์ เช่น ฤทธิ์ต้านการอักเสบในระหว่างกระบวนการอักเสบในลำไส้ สามารถลดความดันโลหิตซิสโตลิกในมนุษย์ และต้านไวรัส influenza A ในหนู (Horie et al., 2020) ส่วนของหยวก

กล้วยก็เป็นอีกส่วนที่สำคัญในประเทศนิยมนำมาปรุงอาหารหลายชนิดเพื่อบริโภค นอกจากนี้หอยกกล้วยนับว่าเป็นวัสดุเหลือทิ้งและไม่มีคุณค่า แต่เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่าหอยกกล้วยมีปริมาณเยื่อใยสูงและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง ซึ่งไฟเบอร์ที่พบในพืชได้แก่ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ลิกนิน (lignin) และ เพกติน (pectin) (Aranguren et al., 2016; Fangueiro & Rana, 2016) ส่วนของปลีกล้วยเป็นส่วนที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งเช่นกัน ปลีกล้วยอุดมไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิก คาเทชิน (catechin) อีพิคาเทชิน (epicatechin) เควอซิทิน (quercetin) รูทีน (rutin) และ ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) (Arun et al., 2017) จากผลการวิเคราะห์พบว่าปลีกล้วยเป็นส่วนที่มีปริมาณโปรตีนที่สูงกว่าส่วนอื่น ๆ ซึ่งเป็นที่ทราบโดยทั่วไปว่าโปรตีนมีประโยชน์ต่อร่างกาย มีรายงานของ Ramu et al. (2017) กล่าวว่าปลีกล้วยมีโปรตีนที่ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่จำเป็นและกรดอะมิโนที่ไม่จำเป็น ซึ่งกรดอะมิโนที่พบมากในปลีกล้วย ได้แก่ กรดกลูตามิก (glutamic acid) กรดแอสพาร์ติก (aspartic acid) ลูซีน (leucine) อะลานีน (alanine) โพรลีน (proline) อาร์จินีน (arginine) ซีสเตอีน (cysteine) และ เซอรีน (serine)

ดังนั้นจึงเลือกผงปลีกล้วยเพื่อเสริมโภชนาการในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบ เพื่อการพัฒนาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่อไป

4.2 การเสริมโภชนาการจากผงปลีกล้วยในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบ

การเสริมผงปลีกล้วยในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบที่ระดับร้อยละ 1 3 และ 5 พบว่าลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านสีของผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบมีสีเหลืองทองอมน้ำตาลเข้มขึ้นหรือมีแนวโน้มสีคล้ำขึ้น เมื่อเติมผงปลีกล้วยที่ระดับเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการวัดทางกายภาพด้วยเครื่องวัดสี โดยค่าความสว่าง L^* ค่าความเป็นสีแดง a^* และค่าความเป็นสีเหลือง b^* มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของผงปลีกล้วยในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบ ทั้งนี้การเสริมผงปลีกล้วยในผลิตภัณฑ์อาจมีผลต่อสีผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก เนื่องจากในกล้วยมีสารประกอบฟีนอลิกในปริมาณมากจึงมีผลทำให้เกิดสีคล้ำ จากรายงานของ Rodrigues และคณะ (2020) ค้นพบว่าส่วนของดอกกล้วย ได้แก่ กาบ ดอก ตัวผู้ แรชชิส และช่อดอกทั้งช่อ มีปริมาณฟีนอลิกเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาน้ำตาลซึ่งมีปริมาณสูงถึง 181.25

มิลลิกรัมกรดแกลลิก/ลิตร (mg GAE/L) การเกิดสีคล้ำพบในผงปลีกล้วยเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาน้ำตาลจากเอนไซม์ โดยมีปริมาณความชื้นและฟีนอลิกในระดับสูง กล้วยจึงไวต่อการเกิดสีน้ำตาลจากเอนไซม์ และการเปลี่ยนสีระหว่างการอบแห้งหรือการจัดเก็บ (Farhaninejad et al., 2017) สีน้ำตาลพบในผงปลีกล้วยเป็นผลมาจากการออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลิกที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) เริ่มต้นที่สารโมโนฟีนอล (monophenol) ไม่มีสีจะถูกออกซิไดซ์เป็นไดฟีนอล (diphenol) ไม่มีสี และถูกออกซิไดซ์ต่อเป็นออร์โท-ควิโนน (*o*-quinone) ทำปฏิกิริยาต่อกับกรดอะมิโนหรือโปรตีนได้เป็นสารสีน้ำตาล และจะรวมตัวกันเป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่และมีสีน้ำตาล เช่น เมลานิน (melanin) (Nguyen and va Doorn, 2004) โดยเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสีน้ำตาลได้แก่ โพลีฟีนอลออกซิเดส (Polyphenoloxidase, PPO) และ เปรอโรไซด์ออกซิเดส (Peroxidase, POD) สามารถเปลี่ยนฟีนอลอิสระให้เป็นควิโนน ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีสี POD ส่งเสริมปฏิกิริยาหลายอย่าง รวมทั้งการเกิดออกซิเดชันของลิพิดและฟีนอล และส่งผลเสียต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Nguyen et al., 2004; Tappi et al., 2017).

นอกจากนี้ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำอิสระที่ลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณผงปลีกล้วยในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบ มีอิทธิพลต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านเนื้อสัมผัสและคุณภาพเนื้อสัมผัส โดยใช้เครื่อง Texture analyzer ด้านความกรอบและความแข็งของผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ปริมาณน้ำที่อยู่ภายในตัวของผลิตภัณฑ์มีจำนวนน้อยทำให้เวลาเคี้ยวหรือกัดมีความกรอบแข็งมากขึ้นที่ระดับผงปลีกล้วยร้อยละ 3 แต่อย่างไรก็ตาม ที่ร้อยละ 5 เมื่อกัดมีความกรอบ หักง่าย เวลาเคี้ยวเนื้อนุ่ม อีกทั้งค่าความแข็ง (hardness) ต่ำที่สุด แต่มีความกรอบ (crispness) มากที่สุด เนื่องจากผงปลีกล้วยมีปริมาณเยื่อใยที่สูง เมื่อเพิ่มปริมาณผงปลีกล้วยที่มากเกินไปจะทำให้มีค่าความกรอบมากขึ้นแต่จะไปขัดขวางการยึดเกาะของการขึ้นรูปหมูแผ่นกรอบทำให้ค่าความแข็งต่ำ ทั้งนี้เยื่อใยที่อยู่ในผงปลีกล้วยมีปริมาณของเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายในน้ำ (insoluble dietary fiber) สูง จะพองตัวในน้ำเหมือนฟองน้ำแต่ไม่ให้ความหนืด (Aranguren et al., 2016; Fangueiro & Rana, 2016) ดังนั้นการเพิ่มผงปลีกล้วยที่ระดับร้อยละ 5 ขึ้นไป มีโอกาสทำให้การขึ้นรูปของหมูแผ่นกรอบได้ยากขึ้น และเนื้อสัมผัสที่ร่วน แดกหักง่าย

การทดสอบความชอบของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมผงปลีกล้วยร้อยละ 1 3 และ 5 โดยประเมินคุณภาพทางด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ซึ่งเปรียบเทียบกับหมูแผ่นกรอบสูตรพื้นฐาน (ควบคุม) เพื่อใช้เกณฑ์ในการคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมที่ตรงกับความต้องการของผู้บริโภค พบว่าผู้บริโภคให้คะแนนความชอบด้านสี และกลิ่นลดลงในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมผงปลีกล้วยที่ระดับร้อยละ 3 และ 5 เมื่อเทียบกับสูตรควบคุม ในขณะที่ระดับร้อยละ 1 มีคะแนนความชอบทางด้านสี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบไม่ต่างกับสูตรพื้นฐาน แต่มีคะแนนความชอบโดยรวมสูงกว่าสูตรพื้นฐาน ซึ่งสอดคล้องกับคุณภาพทางเนื้อสัมผัสที่วัดด้วยเครื่อง Texture analyzer โดยสูตรเสริมผงปลีกล้วยที่ระดับร้อยละ 1 มีค่าความกรอบสูงกว่าสูตรพื้นฐาน เมื่อเพิ่มระดับผงปลีกล้วยที่ระดับที่เหมาะสมจะทำให้ผู้บริโภคยอมรับค่าความกรอบสูงขึ้น ทั้งนี้การเติมผงปลีกล้วยที่เพิ่มมากขึ้นที่ร้อยละ 3 และ 5 มีผลทำให้การยอมรับทุกด้านลดลง โดยเฉพาะทางด้านสีและรสชาติ นั่นอาจเป็นสาเหตุเนื่องจากผงปลีกล้วยมีสีที่คล้ำเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่มีสารประกอบฟีนอลิกเป็นสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดสีคล้ำในผงปลีกล้วย (Nguyen and va Doorn, 2004) และมีรสฝาดเมื่อเติมในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบจึงมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีเข้มขึ้นและรสชาติไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคได้

จากผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคสูตรที่เสริมผงปลีกล้วยร้อยละ 1 ได้คะแนนความชอบโดยรวมมากที่สุด โดยมีปริมาณโปรตีนและเยื่อใยสูงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลพื้นฐานของวัตถุดิบเริ่มต้นที่มีปริมาณโปรตีนและเยื่อใยที่สูงเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม นอกจากคุณประโยชน์ทางโภชนาการด้านโปรตีนที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมผงปลีกล้วยแล้ว ยังมีเยื่อใยที่ไม่ละลายน้ำในผงปลีกล้วยซึ่งเป็นการเพิ่มเส้นใยอาหารให้กับผลิตภัณฑ์ เมื่อบริโภคผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมที่เสริมโภชนาการจากผงปลีกล้วยจะส่งผลดีต่อสุขภาพ เนื่องจากเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำมีความสามารถการจับน้ำ เกิดการพองตัวทำให้เพิ่มปริมาณน้ำในกระเพาะอาหาร จึงทำให้รู้สึกอิ่ม ซึ่งเส้นใยอาหารจากผงปลีกล้วยนี้แบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ไม่สามารถย่อยได้ ช่วยเพิ่มเนื้ออุจจาระ ลดปัญหาท้องผูกได้ และลดความเสี่ยงของมะเร็งลำไส้ใหญ่ (Aranguren et al., 2016; Fangeiro & Rana, 2016) อีกทั้งพลังงานทั้งหมดที่ได้รับ

เมื่อบริโภคผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบยังมีปริมาณแคลลอรีต่ำ ดังนั้นผงปลีกล้วยเสริมโภชนาการในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบที่เหลือใช้ อีกทั้งยังมีคุณประโยชน์เสริมโปรตีนและเยื่อใย ซึ่งกำลังเป็นกระแสที่น่าสนใจในยุคปัจจุบัน จะส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบที่เสริมผงปลีกล้วยเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นอาหารฟังก์ชันนอลฟู้ดส์ ที่จะดึงดูดความสนใจของผู้บริโภคในยุคปัจจุบันและอนาคตต่อไป

5. บทสรุป

การคัดเลือกวัตถุดิบจากส่วนต่างๆ ของกล้วย ได้แก่ผงหยาบกล้วย ผงปลีกล้วย และผงผลกล้วย เพื่อเสริมโภชนาการในผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบ โดยคัดเลือกผงปลีกล้วยที่มีปริมาณโปรตีน และเยื่อใยที่สูงเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ และพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมผงปลีกล้วยที่ร้อยละ 1 เป็นสูตรที่ได้รับการยอมรับของผู้บริโภคที่คะแนนความชอบโดยรวมสูงสุดเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม เมื่อบริโภคผลิตภัณฑ์หมูแผ่นกรอบเสริมผงปลีกล้วยยังได้รับคุณค่าทางโภชนาการที่เป็นประโยชน์ทั้งโปรตีน และเยื่อใยสูง อีกทั้งยังมีแคลลอรีต่ำ ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นอาหารฟังก์ชันนอลฟู้ดส์เสริมด้วยผงปลีกล้วย

กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะวิจัยขอขอบคุณ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ ที่ให้การสนับสนุนด้านแหล่งเงินทุนสำหรับการวิจัยในโครงการนี้ พร้อมทั้งเอื้ออำนวยความสะดวก อุปกรณ์เครื่องมือและสถานที่ในการทำการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Aranguren, M. I., Marcovich, N. E., & Reboredo, M. M. (2016). *Vegetable fibers*. In H. F. Mark (Ed.), *Encyclopedia of polymer science and technology*. Hoboken, New Jersey: John Wiley.
- Arun, K. B., Thomas, S., Reshmitha, T. R., Akhil, G. C., & Nisha, P. (2017). Dietary fibre and phenolic-rich extracts from *Musa paradisiaca* inflorescence ameliorates type 2 diabetes and associated cardiovascular risks. *Journal of Functional Foods*, 31, 198–207.
- Association of Official Analysis Chemists (AOAC). (2005). *Official methods of analysis of the association of official analytical chemists*. 14th Edition. Washington, DC: USA
- Banchacharurat, W., Somphong, W., & Phochanapimon, S. (2009). Study of the production process of fried bananas. In *47th Academic Conference, 17–20 March 2009*, Kasetsart University. (in Thai)

- Bjarnadottir, A. and Shoemaker, S. (2022). *11 Evidence-based health benefits of bananas*. Retrieved June 20, 2022 from https://www.healthline.com/nutrition/11-proven-benefits-of-bananas#TOC_TITLE_HDR_4
- Department of International Trade Promotion, Ministry of Commerce. (2023). Snack consumption trends among Gen Z. Retrieved December 20, 2023, from <https://www.ditp.go.th/post/151788>. (in Thai)
- Digital Economic Base. (2023). Trend-Business Opportunity 2023 'Self-Care-Future Food' Expands to Create Money-Making Opportunities. Retrieved December 28, 2023, from <https://www.thansettakij.com/health/wellbeing/>. (in Thai)
- Fangueiro, R., & Rana, S. R. M. E. (2016). *Natural fibres: advances in science and technology towards industrial applications*. Springer.
- Farhaninejad, Z., Fathi, M., Shahedi, M., & Sadeghi, M. (2017). Osmotic dehydration of banana slices using direct and indirect sonication: optimization and microstructure analysis. *Journal of Food Process Engineering*, 40(1), e12336.
- Horie, K., Hossain, M.S., Kim, Y., Akiko, I., Kon, R., Yamatsu, A., Kishima, M., Nishikimi, T., & Kim, M. (2020). The potency of a novel fermented unripe banana powder as a functional immunostimulatory food ingredient. *Journal of Functional Foods*, 70, 103980.
- Labuza, T. P. (1970). Water content and stability of low moisture and intermediate moisture foods. *Food Technol*, 24, 543-550.
- Lutovska, M., Mitrevski, V., Geramitcioski, T., Mijakovski, V., & Andreevski, I. (2016). Water activity vs. equilibrium moisture content vodena aktivnost nasuprot RAVNOTEŽNE VLAŽNOSTI Materijala. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 2(20), 69.
- Nguyen, T. B. T., Ketsa, S., & van Doorn, W. G. (2004). Effect of modified atmosphere packaging on chilling-induced peel browning in banana. *Postharvest Biology and Technology*, 31(3), 313-317.
- Porjaroen, A., & Leotworasirikul, S. (2018). Development of fish snack products using sweeteners instead of sucrose. In *2nd National Academic Conference on Innovation for Learning and Invention 2018*, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. Pp. 699-712. (in Thai)
- Ramu, R., Shirahatti, P. S., Anilakumar, K. R., Nayakavadi, S., Zameer, F., Dhananjaya, B. L., & Nagendra, Prasad, M. N. (2017). Assessment of nutritional quality and global antioxidant response of banana (*Musa sp.* CV. Nanjangud Rasa Bale) pseudostem and flower. *Pharmacognosy Res*, 9(5), S74-S83.
- Rithmanee, T. (2018). Utilization of golden banana stem to increase dietary fiber in Sai Ua. *Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal*, 10(2), 181-190. (in Thai)
- Rodrigues, A. S., Kubota, E. H., da Silva, C. G., dos Santos Alves, J., Hautrive, T. P., Rodrigues, G. S., & Campagnol, P. C. B. (2020). Banana inflorescences: A cheap raw material with great potential to be used as a natural antioxidant in meat products. *Meat science*, 161, 107991.
- Tappi, S., Ragni, L., Tylewicz, U., Romani, S., Ramazzina, I., & Rocculi, P. (2019). Browning response of fresh-cut apples of different cultivars to cold gas plasma treatment. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 53, 56-62.
- Tribess, T. B., Hernández-Urbe, J. P., Méndez-Montealvo, M. G. C., Menezes, E. W. D., Bello-Perez, L. A., & Tadini, C. C. (2009). Thermal properties and resistant starch content of green banana flour (*Musa cavendishii*) produced at different drying conditions. *LWT-Food Science and Technology*, 42(5), 1022-1025.

ผลของปริมาณกลีเซอรอลและน้ำมันหอมระเหยใบกะเพรา ต่อสมบัติของฟิล์มบริโศคได้จากแป้งมันเทศสีม่วง

Effect of glycerol and holy basil essential oil contents on properties of edible films from purple sweet potato flour

น้ำฝน สามสาลี^{1*} ศิริรักษา พรหมมาศ¹ ศรีณย์พร เรืองบุญกรุด¹ นิสา ร่มส้มซ่า¹ ธิดารัตน์ บำรุงภักดี¹
ทิพย์วรินทร์ ริมลำตวน¹ และ สุมาลี มุสิกกา¹

Namfon Samsalee^{1*} Sirinapa Prommat¹ Saranporn Rungboonkrod¹ Nisa Romsomsa¹ Thidarat Bumrunpakdee¹
Thipwarin Rimlumduan¹ and Sumalee Musika¹

¹สาขาชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย

¹Department of Applied Biology, Faculty of Sciences and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan,
Muang District, Nakhon Ratchasima, Thailand

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณกลีเซอรอลและน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราต่อสมบัติของฟิล์มบริโศคได้จากแป้งมันเทศสีม่วง โดยศึกษาผลของปริมาณกลีเซอรอลที่ความเข้มข้น 4 ระดับ (ร้อยละ 20 30 40 และ 50) พบว่า ฟิล์มทุกสูตรสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ดี ความแตกต่างของปริมาณกลีเซอรอลไม่มีผลต่อค่าความหนาของฟิล์ม ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ ความสามารถในการละลายน้ำ และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ของฟิล์ม พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าการต้านทานแรงดึงและค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของฟิล์มมีค่าลดลง จากการศึกษาพบว่า การเติมปริมาณกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 มีสมบัติโดยรวมที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 20 30 และ 50 จากนั้นศึกษาผลของปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากใบกะเพราที่ความเข้มข้น 3 ระดับ (ร้อยละ 0 0.05 และ 0.10) ร่วมกับการเติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 จากการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราไม่มีผลต่อค่าความหนา ความทึบแสง และการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์ม อย่างไรก็ตาม ปริมาณของน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณความชื้น ความสามารถในการละลายน้ำ และปริมาณน้ำอิสระของฟิล์มมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าการต้านทานแรงดึง ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลร้อยละ 40 และน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.10 พบว่า มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของฟิล์มสูงที่สุด (1.12 มิลลิโมลสมมูลโทรลอคซ์ต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่าง และ 149.45 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมตัวอย่าง ตามลำดับ) ดังนั้น การศึกษาฟิล์มบริโศคได้จากแป้งมันเทศสีม่วงร่วมกับการเติมน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการผลิตเป็นแผ่นฟิล์มบริโศคได้ในการห่อหุ้มผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อปกป้องและช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารได้

คำสำคัญ: ฟิล์มบริโศคได้, แป้งมันเทศสีม่วง, น้ำมันหอมระเหย, ใบกะเพรา

ABSTRACT

This research aims to study the content of glycerol and holy basil essential oil on the properties of edible films from purple sweet potato flour. The effect of glycerol content at four concentrations (20, 30, 40 and 50%) was studied. The results showed that all film formulations were able to form a good film. The difference in glycerol content did not show any significant effect on the thickness of films. Moisture content, water activity, water solubility and elongation at break of purple sweet potato flour films increased with the increase of the glycerol content, whereas tensile strength and elastic modulus decreased. Studies have shown that the addition of glycerol at the 40% concentration showed good overall properties compared to 20%, 30% and 50% glycerol content. The effect of holy basil essential oil content was studied at three concentrations (0, 0.05 and 0.10%) in combination with the addition of glycerol at a 40% concentration on film properties. The study found that the amount of holy basil essential oil had no effect on thickness, opacity and elongation at break of films. While the tensile strength, DPPH radical scavenging activity and total phenolic content of the films was increased when the holy basil essential oil concentration increased. The film incorporated with 40% glycerol and 0.10%

holy basil essential oil showed the highest DPPH radical scavenging activity content and total phenolic content (1.12 mM Trolox per 100 g of samples and 149.45 mg of GAE per g of samples, respectively). Therefore, the study of edible films made from purple sweet potato flour in combination with holy basil essential oil demonstrate the potential for produce edible films to protect food products and to preserve the quality of food products.

KEYWORDS: Edible film, Purple sweet potato flour, Essential oil, Holy basil

*Corresponding Author: namfon.sm@rmuti.ac.th

Received: 31/05/2022; Revised: 10/04/2024; Accepted: 10/07/2024

1. บทนำ

จากปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มมากขึ้นทุกวันนี้ในปัจจุบัน หนึ่งในนั้นคือปัญหาจากการใช้บรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากวัสดุที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ง่ายหรือจากวัสดุสังเคราะห์ ซึ่งวัสดุดังกล่าวไม่สามารถย่อยได้ตามธรรมชาติ หรืออาจต้องใช้ระยะเวลาจนถึงจะสามารถย่อยสลายได้ ทำให้ปัจจุบันบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้ (Biodegradable packaging) รวมถึงฟิล์มบริโภคได้ (Edible film) เข้ามามีบทบาทและความสำคัญมากขึ้นเพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยฟิล์มบริโภคได้มีคุณสมบัติที่สามารถรับประทานได้ และสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ (Biodegradable) เนื่องจากสามารถผลิตได้จากวัสดุตามธรรมชาติ เช่น จากพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) โปรตีน (Protein) ลิพิด (Lipid) และเรซิน (Resin) โดยฟิล์มที่ผลิตขึ้นอาจทำจากวัสดุชนิดเดียวหรือใช้วัสดุหลายชนิดรวมกันในการขึ้นรูป (Krochta & Jonhston, 1997; Samsalee & Sothornvit, 2020) การใช้ประโยชน์จากฟิล์มหรือบรรจุภัณฑ์บริโภคได้สามารถช่วยลดการใช้งานบรรจุภัณฑ์สังเคราะห์ พร้อมทั้งยังทำหน้าที่ในการควบคุมการเคลื่อนย้ายของความชื้น กลิ่นรส และน้ำมันระหว่างส่วนประกอบในอาหารกับบรรจุภัณฑ์ด้วย (Krochta & Jonhston, 1997) ซึ่งช่วยรักษาคุณภาพของอาหารและช่วยยืดอายุอาหารได้ โดยคุณสมบัติของฟิล์มจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิต

มันเทศจัดอยู่ในตระกูลพืชหัว เจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อน เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต โดยพบว่ามีมันเทศมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตมากถึงร้อยละ 85.5 อีกทั้งยังเป็นแหล่งของวิตามิน เส้นใยอาหาร และเกลือแร่ มันเทศมีเนื้อสีเป็นแหล่งของฟลาโวนอยด์ (Phytochemicals) ที่สำคัญหลายชนิด โดยพบความแตกต่างของกลุ่มสารสำคัญตรงสีของเนื้อมันเทศ ส่งผลให้มันเทศเนื้อสีเป็นแหล่งอาหารสุขภาพที่ได้รับความสนใจ (Phomkaivon et al., 2013; Kunyane & Sungin, 2019) มันเทศสีม่วงเป็น

แหล่งของแอนโทไซยานิน และสารประกอบฟีนอลิกที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น ยับยั้งการเกิดมะเร็ง ด้านการเกิดออกซิเดชัน ด้านการอักเสบ และด้านการก่อกลายพันธุ์ เป็นต้น (Phomkaivon et al., 2013) มันเทศสีม่วงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหารได้หลากหลายชนิดทั้งอาหารคาวและหวาน การแปรรูปมันเทศให้เป็นแป้ง (Flour) มีขั้นตอนการทำที่ไม่ซับซ้อน สามารถช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับมันเทศสีม่วงและยืดอายุการเก็บรักษาหัวมันเทศให้อยู่ในรูปแบบแป้งที่สามารถเก็บไว้ได้นานได้ อีกทั้งยังสะดวกต่อการนำไปใช้และการขนส่งด้วย นอกจากนี้แป้งมันเทศสามารถนำมาผลิตเป็นฟิล์มย่อยสลายได้เพื่อผลิตเป็นถุงเพาะชำในการปลูกดอกดาวเรืองได้ โดยการเติมกลีเซอรอลในฟิล์มจากแป้งมันเทศพบว่ากลีเซอรอลสามารถช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและความสามารถในการละลายน้ำให้กับฟิล์มได้ ส่วนสมบัติทางกลของฟิล์มจากแป้งมันเทศพบว่าเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้ค่าการต้านทานแรงดึงขาดและค่าการต้านทานแรงเฉาะของฟิล์มลดลง (Theamdee & Rueangrungs, 2019) การเตรียมฟิล์มแป้งมันม่วงโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 10-40 พบว่า ความต้านทานแรงดึงของฟิล์มจะลดลงเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ในขณะที่การยืดตัวของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลจากความเข้มข้นร้อยละ 10 เป็น 20 จากนั้นการยืดตัวของฟิล์มจะลดลงเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการละลายน้ำ ความสามารถในการป้องกันการแพร่ผ่านไอน้ำ และความโปร่งใสของฟิล์มพบว่าเมื่อเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลในฟิล์มเพิ่มขึ้น (Fu et al., 2021) ปริมาณความเข้มข้นของสตาร์ชจากเปลือกและปริมาณกลีเซอรอลมีผลต่อสมบัติของฟิล์มบริโภคได้ ได้แก่ สมบัติการป้องกันการแพร่ผ่านไอน้ำ การต้านทานแรงดึง การยืดตัว ความสามารถในการละลาย และความโปร่งใสของฟิล์ม (Siskawardani & Hidayat, 2020) Basiak et al. (2018) รายงานว่าฟิล์มสตาร์ชข้าวสาลีที่เติมกลีเซอรอล

ร้อยละ 33 และร้อยละ 50 มีสมบัติทางกล ค่าสี การพองตัว และการละลายน้ำของฟิล์มไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากการรายงานก่อนหน้านี้นี้พบว่าปริมาณกลีเซอรอลมีผลต่อการต้านทานแรงดึงและการยืดตัวของฟิล์ม โดยฟิล์มที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอลจะมีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและมีการยืดตัวต่ำที่สุดในทางกลับกันเมื่อมีการเติมกลีเซอรอลพบว่าฟิล์มมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น (Wiset et al., 2014) จากการศึกษาทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มบรีโกลด์จากแป้ง (Mali et al., 2005; Nouraddini et al., 2018; Fu et al., 2021) โดยพลาสติกไซเซอร์ที่เติมในฟิล์มทำหน้าที่ในการลดแรงระหว่างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ เป็นการเพิ่มการเคลื่อนตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ช่วยปรับปรุงความยืดหยุ่น ความยืดตัว และความเหนียวของฟิล์ม (Sanyang et al., 2015)

กะเพรา (*Ocimum sanctum*) จัดเป็นไม้ล้มลุก ที่แตกต่างกันสาขา จัดอยู่ในวงศ์ *Labiataceae* ลำต้นสูงประมาณ 30 – 60 เซนติเมตร มี 3 พันธุ์ คือ กะเพราแดง กะเพราขาว และกะเพราลูกผสม (กะเพราแดงและกะเพราขาว) น้ำมันหอมระเหยจากใบกะเพราพบว่ามีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ ได้แก่ ยูจีนอล (Eugenol) บีตาแคโรโยฟิลลีน (β -caryophyllene) บีตาเอเลมีน (β -elemene) เมทิลยูจีนอล (Methyl eugenol) และเมทิลชิวคอลล (Methyl chavicol) ที่มีสมบัติมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ต้านเชื้อรา และมีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Hakkim et al., 2007; Pandey & Madhuri, 2010; Duanyai et al., 2020) จากการศึกษาของ Hakkim et al. (2007) พบว่า สารสกัดจากกะเพรมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระได้หลายชนิด เช่น อนุมูลเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) อนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical) อนุมูลซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (Superoxide anion radical) เป็นต้น โดยส่วนของใบกะเพรมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระที่สูงกว่าส่วนของกิ่งและดอก ซึ่งน้ำมันหอมระเหยจากพืชจัดเป็นไขมัน (Lipid) ที่น่าสนใจในการนำมาเติมในสารละลายฟิล์ม เนื่องจากเป็นสารสกัดที่มีคุณสมบัติเสริมให้กับฟิล์มทางด้านฤทธิ์การต้านจุลชีพและการต้านอนุมูลอิสระ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณของกลีเซอรอลซึ่งเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมต่อสมบัติของฟิล์มบรีโกลด์จากแป้งมันเทศสีม่วง รวมถึงศึกษาผลของปริมาณของน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราต่อสมบัติของฟิล์มบรีโกลด์จากแป้งมันเทศสีม่วงด้วย ซึ่งฟิล์มบรีโกลด์

ได้จากแป้งมันเทศสีม่วงอาจเป็นอีกหนึ่งทางเลือกโดยนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์บรีโกลด์ ย่อยสลายได้ ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม และเป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติต้านอนุมูลอิสระได้อีกด้วย

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมแป้งมันเทศสีม่วง

นำมันเทศสีม่วงจากตลาดสุรนครเมืองใหม่ จังหวัดนครราชสีมา มาล้างทำความสะอาดเพื่อขจัดเศษดินที่ติดที่ผิวและล้างสิ่งสกปรกออก จากนั้นปอกเปลือกและนำไปล้างน้ำอีกครั้ง หั่นให้เป็นแผ่นบาง ๆ แขนงในสารละลายกรดซิดิกที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 5 นาที นำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาที นำใส่ถาดเพื่อเข้าอบในตู้อบลมร้อน (Hot air oven, รุ่น UN55, MEMMERT, Germany) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมันเทศสีม่วงที่ผ่านการอบแห้งมาบดให้ละเอียดโดยใช้เครื่องปั่นไฟฟ้า (รุ่น IF-329, Imarflex, China) และร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 เมช เพื่อให้ได้แป้งมันเทศสีม่วงที่มีขนาดสม่ำเสมอก่อนนำไปขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม ผงแป้งมันเทศสีม่วงที่ได้มีปริมาณความชื้นร้อยละ 7.02 ค่าสี $L^* = 56.39$ $a^* = 18.66$ และ $b^* = -2.58$ และมีปริมาณน้ำอิสระ (a_w) เท่ากับ 0.522 ผงแป้งมันเทศสีม่วงถูกบรรจุในถุงสุญญากาศเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เป็นวัสดุตั้งในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มต่อไป

2.2 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบรีโกลด์จากแป้งมันเทศสีม่วง

2.2.1 ศึกษาปริมาณกลีเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์มบรีโกลด์จากแป้งมันเทศสีม่วง

เตรียมสารละลายฟิล์มแป้งมันเทศสีม่วง โดยชั่งแป้งมันเทศสีม่วงปริมาณ 5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 95 กรัม กวนผสมพร้อมกับให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ด้วยเครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hotplate stirrer, รุ่น C-MAG-HS7, IKA, Germany) เติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้น 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักของแป้งมันเทศสีม่วง กวนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที ขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการเทหล่อขึ้นรูป (Solution casting method) โดยคำนวณปริมาณของแข็งของสารละลายฟิล์มแต่ละสูตรให้มีปริมาณ 2.4 กรัม (ต่อเพลท) เทสารละลายฟิล์มลงเพลท Petri dish ที่เคลือบเทปลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

140 มิลลิเมตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 ชั่วโมง จากนั้นลอกแผ่นฟิล์มที่ได้และเก็บที่อุณหภูมิ 28 ± 2 องศาเซลเซียส ที่ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH) 50 ± 5 % เป็นเวลาอย่างน้อย 2 วัน ในโถควบคุมความชื้น เพื่อรอการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มต่อไป

2.2.2 ศึกษาปริมาณน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราต่อสมบัติของฟิล์มบรีโกลได้จากแป้งมันเทศสีม่วง

เตรียมสารละลายฟิล์มแป้งมันเทศสีม่วงตามข้อ 2.2.1 โดยเติมกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของแป้งมันเทศสีม่วง กวนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติมน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีการกลั่นด้วยไอน้ำ (Asian Bioplex, AP OPERATIONS CO.,LTD., ประเทศไทย) ที่ความเข้มข้น 3 ระดับ คือ ที่ร้อยละ 0 0.05 และ 0.10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของสารละลาย และเติม Tween 80 ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของน้ำมันหอมระเหย (Tongnuanchan et al., 2012) กวนผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์ที่ความเร็ว 22,000 rpm เป็นเวลา 3 นาที (IKA Labortechnik homogenizer, Malaysia) นำสารละลายฟิล์มแป้งมันเทศสีม่วงที่เติมน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราลงในเพลท Petri dish ที่เคลือบเทปลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 140 มิลลิเมตร โดยคำนวณปริมาณของแข็งของสารละลายฟิล์มแต่ละสูตรให้มีปริมาณ 2.4 กรัม เท่ากันทุกเพลท จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ลอกแผ่นฟิล์มและเก็บที่อุณหภูมิ 28 ± 2 องศาเซลเซียส ที่ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH) 50 ± 5 % เป็นเวลาอย่างน้อย 2 วัน ในโถควบคุมความชื้น เพื่อรอการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มต่อไป

2.3 การวิเคราะห์สมบัติของแผ่นฟิล์ม

2.3.1 ความหนาของแผ่นฟิล์ม (Thickness) โดยใช้เครื่องวัด Thickness gauge (รุ่น 7301, Mitutoyo, Kanagawa, Japan)

2.3.2 ปริมาณความชื้นของแผ่นฟิล์ม (Moisture content) ตามวิธี AOAC (2000)

2.3.3 ความทึบแสงของแผ่นฟิล์ม (Opacity) โดยตัดแผ่นฟิล์มขนาด 10 มิลลิเมตร x 40 มิลลิเมตร บรรจุฟิล์มลงในคิวเวทท์ (Cuvette) นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (รุ่น Genesys 10 UV scanning,

Thermo Fisher Scientific, United States) โดยใช้คิวเวทท์เปล่าเป็นแบล็ก และคำนวณค่าความทึบแสงของแผ่นฟิล์มตามสมการ

$$\text{ความทึบแสง (mm}^{-1}\text{)} = \frac{\text{ค่าการวัดดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 600 nm}}{\text{ความหนาของแผ่นฟิล์ม (mm)}}$$

2.3.4 ค่าสีของแผ่นฟิล์ม (Color) โดยใช้เครื่องวัดสี Colorimeter (Chroma meter, CR 400, Konica Minolta, Inc., Osaka, Japan) ตามระบบ CIE lab system แสดงผลเป็นค่า L* (ความสว่าง 0 หมายถึง สีดำ และ 100 หมายถึงขาว) a* (+a* หมายถึง สีแดง และ -a* หมายถึง สีเขียว) และ b* (+b* หมายถึงสีเหลือง และ -b* หมายถึงสีน้ำเงิน)

2.3.5 ความสามารถในการละลายน้ำของแผ่นฟิล์ม (Water solubility) โดยตัดตัวอย่างฟิล์มขนาด 20 มิลลิเมตร x 20 มิลลิเมตร ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างฟิล์มก่อนละลาย จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง โดยให้น้ำหนักตัวอย่างคงที่ (dm_1) จากนั้นใส่ตัวอย่างลงในหลอดทดลองที่มีน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำไปเขย่าในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นแยกฟิล์มที่เหลืออยู่ (ไม่ละลาย) นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ทำการชั่งน้ำหนัก (dm_2) และคำนวณความสามารถในการละลายของฟิล์มตามสมการ (Samsalee & Sothornvit, 2020)

$$\text{ความสามารถในการละลายน้ำ (\%)} = \frac{dm_1 - dm_2}{dm_1} \times 100$$

โดยที่

dm_1 = เป็นน้ำหนักของตัวอย่างฟิล์มแห้งเริ่มต้น (gram)

dm_2 = เป็นน้ำหนักตัวอย่างฟิล์มแห้งที่ไม่ละลายน้ำ (gram)

2.3.6 ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) โดยใช้เครื่อง Water activity meter (รุ่น Series 4 TE DUO, Aqua Lab, England) นำแผ่นฟิล์มตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ บรรจุใส่ในโถลัทธิพลาสติก นำไปวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการอ่านค่าที่ได้

2.3.7 สมบัติการทางกล (Mechanical properties) โดยวิเคราะห์ค่าการต้านทานแรงดึง (Tensile strength) การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) และมอดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus) ตามมาตรฐาน ASTM D882-97 standard (ASTM, 1997) ใช้เครื่อง Universal testing machine (Instron model 5569, Massachusetts,

USA) ตัดตัวอย่างฟิล์มขนาด 8 มิลลิเมตร x 50 มิลลิเมตร ยึดปลายทั้ง 2 ข้างของฟิล์มเข้ากับหัวหนีบ (Grip) อัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที และค่าขนาด Load cell 50 นิวตัน คำนวณค่าการต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และมอดูลัสความยืดหยุ่นของฟิล์มตามสมการดังนี้

$$\text{การต้านทานแรงดึง (MPa)} = \frac{F_{\max}}{A}$$

$$\text{การยืดตัว ณ จุดขาด (\%)} = \frac{L}{L_0} \times 100$$

$$\text{มอดูลัสความยืดหยุ่น (MPa)} = \frac{(F_{\max}/A)}{(L/L_0)}$$

โดยที่

F_{\max} = ค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ฟิล์มขาด (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของฟิล์ม (mm^2)

L_0 = ความยาวเริ่มต้นของฟิล์ม (mm)

L = ระยะความยาวที่ฟิล์มยืดออก (mm)

2.3.8 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content)

การเตรียมตัวอย่างสารละลายฟิล์มโดยนำตัวอย่างฟิล์มปริมาณ 0.25 กรัม ละลายในเมทานอล ปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง บั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 2,700 rpm เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำการเจือจางสารละลายตัวอย่างฟิล์ม 35 เท่า เพื่อนำไปทดสอบหาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (Tongnuanchan et al., 2012)

วิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH (2,2-Diphenyl-1-Picrylhydrazyl) โดยดูดสารละลายฟิล์มปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น DPPH ความเข้มข้น 0.15 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง Vortex mixer (รุ่น ZX4, VELP, Italy) จากนั้นตั้งไว้ในที่มืด ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร โดยคำนวณฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเทียบกับกราฟมาตรฐาน Trolox รายงานผลเป็น มิลลิโมลสมมูล Trolox ต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่าง (mM Trolox/100 g of sample) (Tongnuanchan et al., 2012)

การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content) ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu reagent โดยการดูดสารละลายฟิล์มแต่ละสูตรใส่หลอดทดลองปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาตร 7 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น Folin-Ciocalteu phenol reagent ความเข้มข้น

ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ลงในหลอดทดลองปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 8 นาที เติมน้ำกลั่นโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ความเข้มข้นร้อยละ 7.5 โดยมวล ต่อปริมาตร ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่น ปริมาตร 0.9 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร คำนวณค่าปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic acid equivalent, GAE) รายงานผลเป็นมิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมตัวอย่าง (mg GAE/g of sample) (Siripatrawan & Harte, 2010)

2.4 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ Analysis of Variance (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ

3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ผลของปริมาณของกลีเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์มบริโภคได้จากแป้งมันเทศสีม่วง

จากการศึกษาฟิล์มบริโภคได้จากแป้งมันเทศสีม่วงที่ปริมาณความเข้มข้นของกลีเซอรอล 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 20 30 40 และ 50 พบว่า ฟิล์มทั้ง 4 สูตรสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ ลักษณะปรากฏของแผ่นฟิล์มมีสีม่วง ลักษณะโปร่งใส แผ่นฟิล์มที่ได้มีผิวเรียบ (รูปที่ 1) ความหนาของฟิล์มแป้งมันเทศสีม่วงที่ปริมาณกลีเซอรอลแตกต่างกัน พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เนื่องจากได้ทำการควบคุมปริมาณของแข็งในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม โดยฟิล์มแป้งมันเทศสีม่วงมีค่าความหนาอยู่ในช่วง 0.22 – 0.23 มิลลิเมตร (ตารางที่ 1) ค่าสีของฟิล์มแป้งมันเทศสีม่วง พบว่า ค่า L^* และ a^* มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า b^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 1) โดยฟิล์มแป้งมันเทศสีม่วงมีค่าสี L^* อยู่ในช่วง 44.49 – 52.03 ค่า a^* อยู่ในช่วง 29.18 – 30.14 และค่า b^* อยู่ในช่วง -0.38 – 1.67 อย่างไรก็ตามค่าสีของฟิล์มแป้งมันเทศสีม่วงมีความแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับลักษณะปรากฏของฟิล์มที่ได้ตั้ง

รูปที่ 1 โดยทั่วไปการเติมกลีเซอรอลไม่มีผลต่อค่าสีของฟิล์ม (Samsalee et al., 2021) อย่างไรก็ตามในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มมีการให้ความร้อนซึ่งอาจส่งผลต่อค่าสีของฟิล์มแป้งมันเทศสีม่วงที่ได้ ฟิล์มแป้งมันเทศสีม่วงที่เติมกลีเซอรอลร้อยละ 20 พบว่ามีค่าความทึบแสงของฟิล์มสูงที่สุด ($3.05 \text{ มิลลิเมตร}^{-1}$) แตกต่างจากการเติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($2.57 \text{ มิลลิเมตร}^{-1}$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Khotsaeng et al. (2023) ที่ได้รายงานว่าการเติมปริมาณ

กลีเซอรอลเพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มมีความโปร่งแสงเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้พบว่าการเติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 มีค่าความทึบแสงของฟิล์มไม่แตกต่างกับกลีเซอรอลร้อยละ 30 และ 40 ($p > 0.05$) โดยความทึบแสงของฟิล์มสามารถช่วยป้องกันผลิตภัณฑ์อาหารที่อยู่ภายในบรรจุภัณฑ์ที่มีความไวต่อแสงได้ ซึ่งถือเป็นข้อดีเนื่องจากแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสีย เช่น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารเกิดกลิ่นหืนที่ไม่พึงประสงค์ได้



รูปที่ 1 ลักษณะปรากฏของฟิล์มบริโคได้จากแป้งมันเทศสีม่วงที่กลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 20 (ก) 30 (ข) 40 (ค) และ 50 (ง)

ตารางที่ 1 ความหนา ความทึบแสง และค่าสีของฟิล์มบริโคได้จากแป้งมันเทศสีม่วงที่กลีเซอรอลระดับต่าง ๆ

ปริมาณกลีเซอรอล (%)	ความหนา ^{ns} (mm)	ความทึบแสง (mm^{-1})	ค่าสี		
			L*	a*	b*
20	0.22 ± 0.02	3.05 ± 0.19 ^b	52.03 ± 1.00 ^b	30.14 ± 0.38 ^b	-0.38 ± 0.19 ^a
30	0.22 ± 0.02	2.94 ± 0.37 ^{ab}	51.27 ± 1.97 ^b	29.18 ± 0.60 ^a	-0.22 ± 0.21 ^a
40	0.23 ± 0.02	2.68 ± 0.17 ^{ab}	48.34 ± 1.15 ^b	29.86 ± 0.52 ^{ab}	1.38 ± 0.16 ^b
50	0.23 ± 0.02	2.57 ± 0.39 ^a	44.49 ± 2.90 ^a	29.59 ± 0.27 ^{ab}	1.67 ± 0.49 ^b

หมายเหตุ a-b หมายถึง ค่าที่แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยของฟิล์มบริโคได้จากแป้งมันเทศสีม่วงแต่ละระดับของปริมาณกลีเซอรอล ($p < 0.05$)

ns หมายถึง ค่าที่แสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยของฟิล์มบริโคได้จากแป้งมันเทศสีม่วงแต่ละระดับของปริมาณกลีเซอรอล ($p > 0.05$)

ตารางที่ 2 ปริมาณความชื้น ความสามารถในการละลายน้ำ และปริมาณน้ำอิสระของฟิล์มบริโคได้จากแป้งมันเทศสีม่วงที่กลีเซอรอลระดับต่าง ๆ

ปริมาณกลีเซอรอล (%)	ความชื้น (%)	ความสามารถในการละลายน้ำ (%)	ปริมาณน้ำอิสระ
20	17.00 ± 2.42 ^a	55.84 ± 2.51 ^a	0.527 ± 0.004 ^a
30	19.76 ± 2.67 ^a	56.78 ± 3.10 ^{ab}	0.539 ± 0.011 ^{ab}
40	23.57 ± 0.33 ^b	62.04 ± 1.98 ^{bc}	0.553 ± 0.015 ^{bc}
50	28.60 ± 0.59 ^c	64.35 ± 3.60 ^c	0.568 ± 0.007 ^c

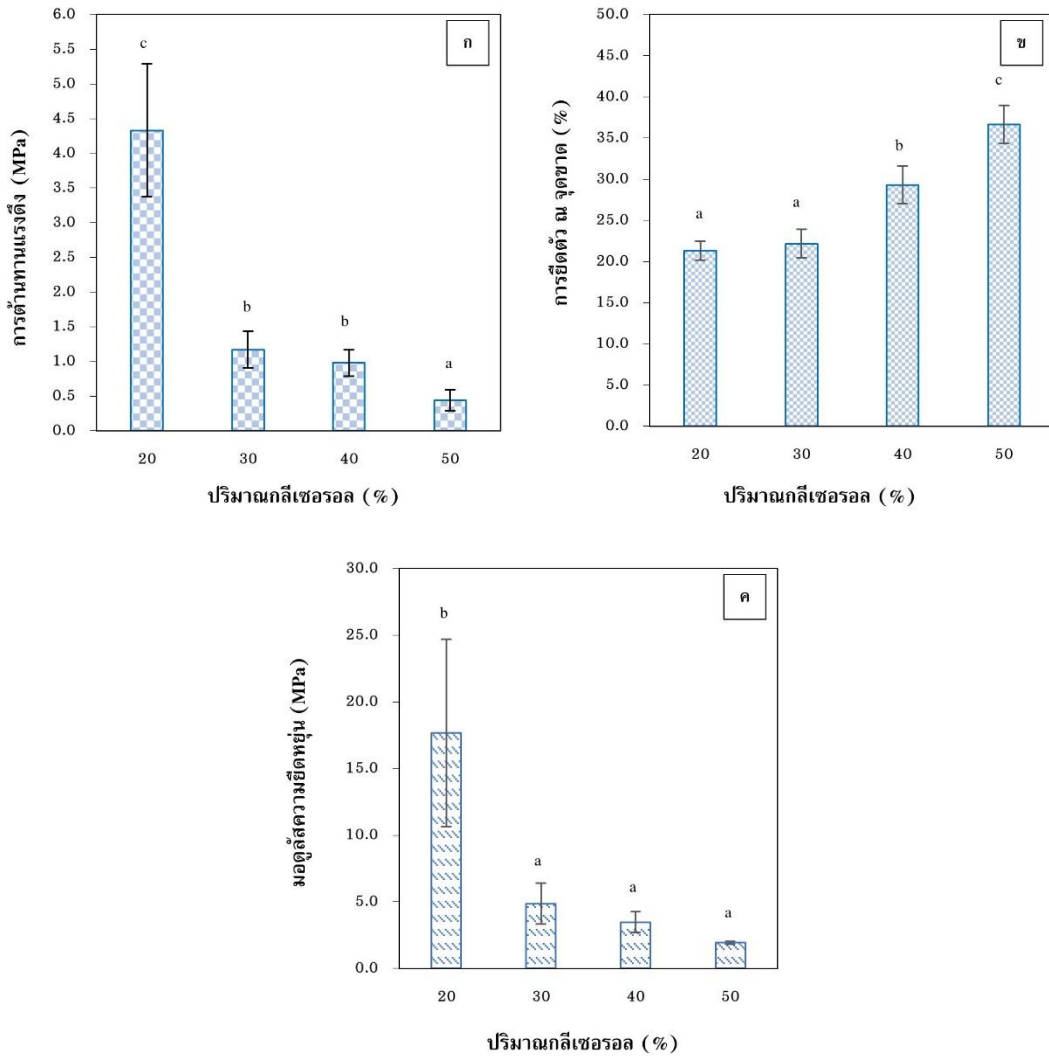
หมายเหตุ a-c หมายถึง ค่าที่แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยของฟิล์มบริโคได้จากแป้งมันเทศสีม่วงแต่ละระดับของปริมาณกลีเซอรอล ($p < 0.05$)

ปริมาณความชื้นของฟิล์มแป้งมันเทศสีม่วงพบว่า ที่ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 20 และ 30 มีปริมาณความชื้นน้อยที่สุดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 17.00 และ 19.76 ตามลำดับ (ตารางที่ 2) การเติมปริมาณกลีเซอรอลที่ร้อยละ 50 พบว่า ฟิล์มมีปริมาณความชื้นสูงที่สุด (ร้อยละ 28.60) ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับฟิล์มสูตรอื่น ($p < 0.05$) โดยปริมาณความชื้นของฟิล์มพบว่าสอดคล้องกับความสามารถในการละลายน้ำ ความสามารถในการ

ละลายน้ำบ่งบอกถึงลักษณะของการต้านทานน้ำของแผ่นฟิล์ม ซึ่งมีผลต่อความเหมาะสมในการนำฟิล์มไปประยุกต์ใช้งาน จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มมากขึ้น โดยการเติมปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 50 พบว่ามีค่าความสามารถในการละลายน้ำสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 64.35 อย่างไรก็ตามมีค่าไม่แตกต่างกับการเติมกลีเซอรอลที่ร้อยละ 40 (ร้อยละ 62.04) จากการศึกษาจะเห็นได้ว่าการเติมกลีเซอรอลในปริมาณมากขึ้นฟิล์มที่ได้

มีค่าปริมาณความชื้นและการละลายที่สูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าวเกี่ยวข้องกับกลีเซอรอล ซึ่งโดยทั่วไปตามธรรมชาติกลีเซอรอลมีลักษณะดูดความชื้น (Hygroscopic) อุณหภูมิของน้ำไว้ในเมทริกซ์ของฟิล์มทำให้พื้นผิวของฟิล์มเปียกและดูดซับความชื้นได้ดี (Ramos et al., 2013) ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของฟิล์มพบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 0.539 – 0.568 (ตารางที่ 2) โดย

ปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระของฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณน้ำอิสระเกี่ยวข้องกับปริมาณความชื้นของฟิล์ม อย่างไรก็ตามค่าปริมาณน้ำอิสระของฟิล์มทั้ง 4 สูตร มีค่าต่ำกว่า 0.61 ซึ่งอาจจะป้องกันการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ได้เนื่องจากสภาวะที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโต (Tee et al., 2017)



รูปที่ 2 การต้านทานแรงดึง (ก) การยืดตัว ณ จุดขาด (ข) และมอดูลัสความยืดหยุ่น (ค) ของฟิล์มจากแป้งมันเทศสีม่วงที่ปริมาณกลีเซอรอลระดับต่าง ๆ

จากการศึกษาสมบัติทางกลของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเทศสีม่วงพบว่าเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นที่ปริมาณร้อยละ 20 ถึง ร้อยละ 50 มีผลทำให้ค่าการต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์มมีค่าลดลง จาก 4.33 เป็น 0.44 เมกะปาสคาล (รูปที่ 2) โดยการเติมกลีเซอรอลที่ระดับร้อยละ 50 พบว่า มีค่าการต้านทานแรงดึงของฟิล์มมีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ 0.44 เมกะปาสคาล โดยทั่วไปค่าการต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์มมีผลต่อความทนทานของฟิล์มต่อความเค้นตึงจากของฟิล์มในระหว่างการ

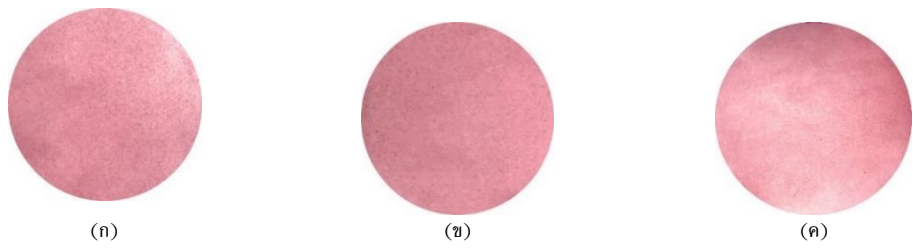
นำไปใช้งาน ขณะที่ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์ม พบว่าปริมาณกลีเซอรอลที่ร้อยละ 20 และ 30 มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ร้อยละ 21.33 และ 22.17 ตามลำดับ) โดยการเติมกลีเซอรอลที่ร้อยละ 50 พบว่า ฟิล์มมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) มีค่าเท่ากับร้อยละ 36.67 ซึ่งบ่งบอกถึงฟิล์มมีความยืดหยุ่นของฟิล์มสูงที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มสูตรอื่น ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของฟิล์มพบว่า มีค่าสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อมีการเติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.68 เมกะปาสคาล แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีความแข็งแรงมากที่สุด แต่มีความยืดหยุ่นน้อยที่สุด ฟิล์มที่ได้จากการเติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 ถึงแม้จะได้อะไรที่แข็งแรงแต่ฟิล์มมีความเปราะเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสูตรอื่น อย่างไรก็ตามการเติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 ถึง ร้อยละ 50 พบว่ามีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1.93 – 4.87 เมกะปาสคาล ดังนั้นจากการศึกษาจะเห็นได้ว่าปริมาณกลีเซอรอลมีผลต่อค่าการต้านทานแรงดึง ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของฟิล์ม เนื่องจากปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นในเมทริกซ์ของฟิล์มจะไปจับกับสายโซ่พอลิเมอร์ของแป้งมันเทศสีม่วง ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลของสายพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้กันอ่อนตัวลง ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ฟิล์มจึงมีความยืดหยุ่นมากขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มมากขึ้น (Sanyang et al., 2015; Theamdee & Rueangrung, 2019) จากการศึกษาพบว่า การเติมปริมาณกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 มีสมบัติของฟิล์มโดยรวมที่ดี โดยเฉพาะสมบัติทางกลของฟิล์มเมื่อเปรียบเทียบกับที่ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 20 30 และ 50 ซึ่งมีค่าการต้านทานแรงดึงของฟิล์มเท่ากับ 1.03 เมกะปาสคาล ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มเท่ากับร้อยละ 29.33 และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของฟิล์มเท่ากับ 3.48 เมกะปาสคาล

3.2 ผลของปริมาณของน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราต่อสมบัติของฟิล์มบรีโกลด์ได้จากแป้งมันเทศสีม่วง

จากศึกษาปริมาณของน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 0.05 และ 0.10 ต่อสมบัติของฟิล์มบรีโกลด์ได้จากแป้งมันเทศสีม่วงร่วมกับการเติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 เป็น

พลาสติกไซเซอร์ พบว่าปริมาณน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในฟิล์มไม่มีผลต่อค่าความหนาและค่าความทึบแสงของฟิล์ม ($p > 0.05$) โดยมีค่าความหนาอยู่ในช่วง 0.23 – 0.24 มิลลิเมตร และค่าความทึบแสงของฟิล์มมีค่าอยู่ในช่วง 2.51 – 2.68 มิลลิเมตร⁻¹ (ตารางที่ 3) งานวิจัยของ Lekjing & Chinarak (2019) ได้รายงานว่าฟิล์มโคโคซานร่วมกับการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.05 เป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยฟิล์มโคโคซานที่ได้มีความทึบแสงเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสารกลุ่มไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้การเติมน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราที่ความเข้มข้นร้อยละ 0 0.05 และ 0.10 มีค่าความทึบแสงของฟิล์มไม่แตกต่างกันอาจเนื่องมาจากการเติมในปริมาณที่น้อยจึงทำให้มีค่าความทึบแสงที่ไม่ต่างกัน นอกจากนั้นเมื่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีค่า L^* และค่า a^* มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าดังกล่าวบ่งบอกถึงค่าความสว่างและค่าความเป็นสีแดงของฟิล์มตามลำดับ ในขณะที่ค่า b^* ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความเป็นสีเหลืองของฟิล์มพบว่ามีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3) โดยค่าสีของฟิล์มอาจจะเกี่ยวข้องกับปริมาณของน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราที่เติม ซึ่งน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราที่เติมในฟิล์มมีลักษณะเป็นของเหลวใสสีเหลืองอ่อน เมื่อรวมกับสารละลายฟิล์มแป้งมันเทศสีม่วงทำให้ได้สีของฟิล์มดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งแสดงลักษณะปรากฏของแผ่นฟิล์มบรีโกลด์ได้จากแป้งมันเทศสีม่วงร่วมกับการเติมน้ำมันหอมระเหยใบกะเพรา นอกจากนั้นแล้วอาจเป็นไปได้ว่าในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม น้ำมันหอมระเหยเกิดการรวมตัวกับออกซิเจนทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟิล์ม ซึ่งผลผลิตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทำให้ค่าสีของฟิล์มที่ได้แตกต่างกันเมื่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่เติมแตกต่างกัน (Lekjing & Chinarak, 2019)

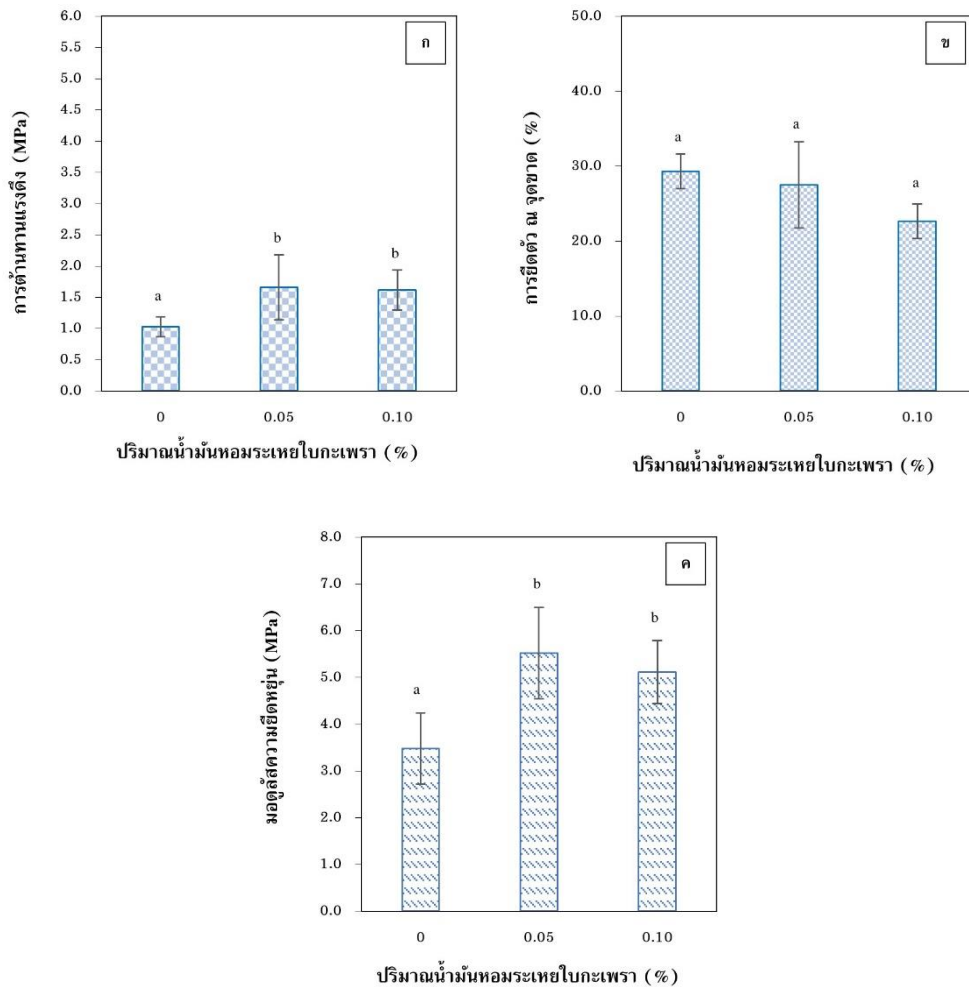


รูปที่ 3 ลักษณะปรากฏของแผ่นฟิล์มบรีโกลด์ได้จากแป้งมันเทศสีม่วงที่กลีเซอรอลร้อยละ 40 ร่วมกับการเติมน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราที่ความเข้มข้นร้อยละ 0 (ก) 0.05 (ข) และ 0.10 (ค)

ตารางที่ 3 สมบัติของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเทศสีม่วงที่กลีเซอรอลร้อยละ 40 ร่วมกับปริมาณน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราที่ระดับต่าง ๆ

สมบัติของฟิล์ม	ปริมาณน้ำมันหอมระเหยใบกะเพรา (%)			
	0	0.05	0.10	
ความหนา ^m (mm)	0.23 ± 0.02	0.24 ± 0.04	0.23 ± 0.03	
ความทึบแสง ^m (mm ⁻¹)	2.68 ± 0.17	2.51 ± 0.31	2.68 ± 0.31	
ค่าสี	L*	38.19 ± 1.58 ^a	45.40 ± 1.87 ^b	48.48 ± 2.75 ^c
	a*	18.77 ± 1.03 ^a	25.61 ± 0.75 ^b	31.62 ± 0.46 ^c
	b*	7.49 ± 0.48 ^c	1.34 ± 0.23 ^b	-0.36 ± 0.11 ^a
ความชื้น (%)	23.57 ± 0.33 ^b	21.71 ± 1.69 ^b	19.39 ± 0.21 ^a	
ความสามารถในการละลายน้ำ (%)	62.04 ± 1.98 ^c	34.66 ± 1.23 ^b	27.38 ± 0.74 ^a	
ปริมาณน้ำอิสระ	0.553 ± 0.015 ^c	0.495 ± 0.016 ^b	0.418 ± 0.021 ^a	

หมายเหตุ a-c หมายถึง ค่าที่แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเทศสีม่วงที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราที่ระดับต่าง ๆ (p < 0.05)



รูปที่ 4 การต้านทานแรงดึง (ก) การยืดตัว ณ จุดขาด (ข) และมอดูลัสความยืดหยุ่น (ค) ของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเทศสีม่วงที่กลีเซอรอลร้อยละ 40 ร่วมกับปริมาณน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราที่ระดับต่าง ๆ

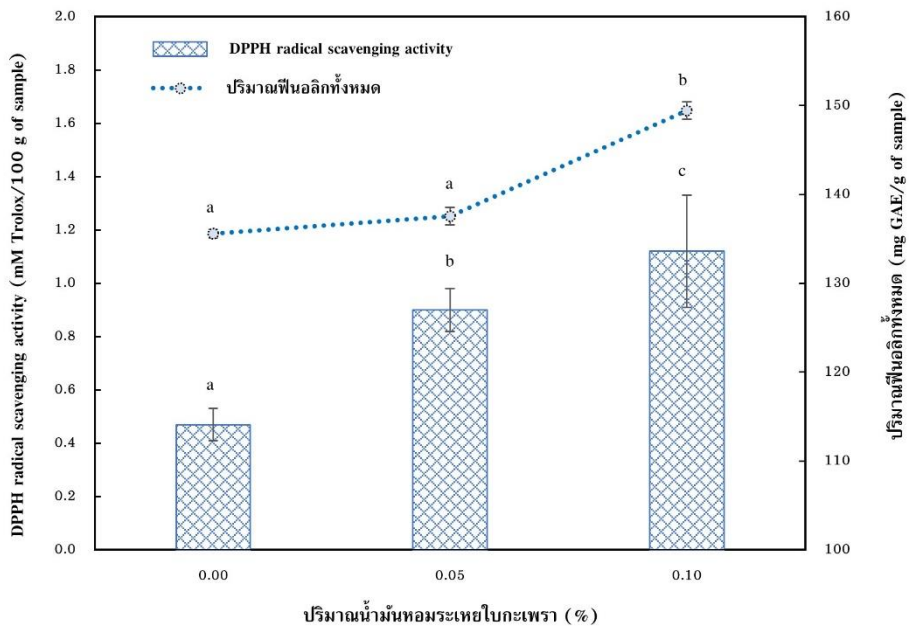
หมายเหตุ a-b หมายถึง ค่าที่แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเทศสีม่วงที่กลีเซอรอลร้อยละ 40 ร่วมกับปริมาณน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราที่ระดับต่าง ๆ (p < 0.05)

จากผลการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราที่ระดับต่าง ๆ ในฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเทศสีม่วง พบว่าการเติมน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราเพิ่มขึ้นทำให้ค่าปริมาณความชื้น ความสามารถในการละลายน้ำ และปริมาณน้ำอิสระของฟิล์มลดลง (ตารางที่ 3) ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันหอมระเหยใบกะเพรามีสมบัติ

ของการเป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ซึ่งมีความไม่ชอบน้ำ และสามารถแทรกตัวและกระจายตัวในโครงสร้างของฟิล์มได้จึงทำให้ความชื้น ความสามารถในการละลายน้ำ และปริมาณน้ำอิสระลดลง (Lekjing & Chinarak, 2019) โดยฟิล์มที่เติมน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.10 พบว่า มีค่าความชื้น ความสามารถในการ

มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมตัวอย่าง และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเท่ากับ 7.79 มิลลิโมลสมมูลโทรลอคซ์ต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่าง (ข้อมูลไม่ได้แสดงในรูป) นอกจากนี้จากการศึกษาจะเห็นได้ว่าฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเทศสีม่วงที่ไม่เติมน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราพบว่า มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH เท่ากับ 0.47 มิลลิโมลสมมูลโทรลอคซ์ต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่าง และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของฟิล์มเท่ากับ 135.57 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมตัวอย่าง ถึงแม้จะไม่มีน้ำมันหอม

ระเหยใบกะเพราในแผ่นฟิล์ม เนื่องจากแป้งมันเทศสีม่วงมีสารประกอบฟีนอลิกที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ เช่น แอนโทไซยานิน ซึ่งเป็นรงควัตถุที่ให้สารสีแดง ม่วง และน้ำเงิน มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ที่ช่วยชะลอความเสื่อมของเซลล์ ช่วยลดอัตราเสี่ยงของการเกิดโรคหัวใจ และเส้นเลือดอุดตันในสมอง ชะลอความเสื่อมของดวงตา และช่วยยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค อีโคไล (*Escherichia coli*) ในระบบทางเดินอาหาร (Charoenphun, 2018)



รูปที่ 5 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเทศสีม่วงที่กลีเซอรอลร้อยละ 40 ร่วมกับปริมาณน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราที่ระดับต่าง ๆ

หมายเหตุ a-b หมายถึง ค่าที่แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเทศสีม่วงที่กลีเซอรอลร้อยละ 40 ร่วมกับปริมาณน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราที่ระดับต่าง ๆ ($p < 0.05$)

4. บทสรุป

จากการศึกษาฟิล์มแป้งมันเทศสีม่วงที่ปริมาณกลีเซอรอล 4 ระดับ พบว่า ฟิล์มทุกสูตรสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ดี ปริมาณกลีเซอรอลในฟิล์มมีผลต่อสมบัติของฟิล์มทางด้านความทึบแสง ค่าสี ปริมาณความชื้น ความสามารถในการละลายน้ำ ปริมาณน้ำอิสระ และสมบัติทางกลของฟิล์ม จากการศึกษาพบว่า การเติมปริมาณกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 มีสมบัติโดยรวมที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 20 30 และ 50 จึงศึกษาปริมาณกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 ร่วมกับการเติมน้ำมันหอมระเหยใบกะเพรา (ร้อยละ 0 0.05 และ 0.10) ต่อสมบัติของฟิล์มแป้งมันเทศสีม่วง โดยการเติมน้ำมันหอมระเหยใบกะเพรา

ในฟิล์ม พบว่า ไม่ส่งผลต่อความหนาและความทึบแสงของแผ่นฟิล์ม อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำมันหอมระเหยใบกะเพรา มีผลต่อสมบัติของฟิล์มทางด้านค่าสี ความชื้น ความสามารถในการละลายน้ำ ปริมาณน้ำอิสระ การต้านทานแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น การยึดตัว ณ จุดขาดของฟิล์ม ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของฟิล์ม โดยการเติมน้ำมันหอมระเหยใบกะเพราที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.10 พบว่า มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของฟิล์มสูงที่สุด รวมถึงเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมจะนำไปใช้ในการศึกษาต่อไป ดังนั้นจะเห็นได้ว่าฟิล์มแป้งมันเทศสีม่วงร่วมกับการเติมน้ำมันหอมระเหยใบกะเพรา มีศักยภาพในการนำไปใช้ประโยชน์เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารบริโกลได้ และสามารถย่อยสลายได้ทาง

ชีวภาพเพื่อปกป้องและช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่สนับสนุนสถานที่ และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

American Society of Testing and Materials (ASTM) International, Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting (D882-97). (1997). ASTM International, West Conshohocken, PA.

Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2000). *Official methods of analysis*, 16th ed. Virginia: Association of official analytical chemists.

Basiak, E., Lenart, A., & Debeaufort, F. (2018). How glycerol and water contents affect the structural and functional properties of starch-based edible films. *Polymers*, 10(4), 412.

Bhatia, S., Abbas Shah, Y., Al-Harrasi, A., Jawad, M., Koca, E., & Aydemir, L. Y. (2024). Enhancing tensile strength, thermal stability, and antioxidant characteristics of transparent kappa carrageenan films using grapefruit essential oil for food packaging applications. *ACS omega*, 9, 9003-9012.

Charoenphun, N. (2018). Development of cookie products from sweet potato. *Journal of Food Technology, Siam University*, 13(1), 32-43. (in Thai)

Duanyai, S., Manok, S., & Rodpo, P. (2020). Antioxidant and antimicrobial activities of essential oil from Thai Herbs to microorganisms causing dermatitis. *KKU Science Journal*, 48(1), 76-85. (in Thai)

Fu, Z. Q., Guo, S. X., Sun, Y., Wu, H. J., Huang, Z. G., & Wu, M. (2021). Effect of glycerol content on the properties of potato flour films. *Starch-Stärke*, 73(5-6), 2000203.

Hakim, F. L., Shankar, C. G., & Girija, S. (2007). Chemical composition and antioxidant property of holy basil (*Ocimum sanctum* L.) leaves, stems, and inflorescence and their in vitro callus cultures. *Journal of agricultural and food chemistry*, 55(22), 9109-9117.

Hosseini, M.H., Razavi, S.H., & Mousavi, M.A. (2009). Antimicrobial, physical and mechanical properties of chitosan-based films incorporated with thyme, clove and cinnamon essential oils. *Journal of food processing and preservation*, 33(6), 727-743.

Khotsaeng, N., Simchuer, W., Imsombut, T., & Srihanam, P. (2023). Effect of glycerol concentrations on the characteristics of cellulose films from Cattail (*Typha angustifolia* L.) flowers. *Polymers*, 15(23), 4535.

Krochta, J. M., & Johnston, C. D. (1997). Edible and biodegradable polymer films: Challenges and opportunities. *Food Science and Technology*, 51(2), 60-74.

Kunyancee, K., & Sungin, P. (2019). The effect of gur gum on the qualities of gluten free crispy waffle from sweet purple potato flour. *Dusit Thani College Journal*, 13(1), 315-329. (in Thai)

Lekjing, S., & Chinarak, K. (2019). Effect of clove essential oil on film properties, antioxidant and antimicrobial activities of chitosan film. *KKU Research Journal (Graduate Studies)*, 19(4), 172-189. (in Thai)

Mali, S., Grossmann, M. V. E., Garcia, M. A., Martino, M. N., & Zaritzky, N. E. (2005). Mechanical and thermal properties of yam starch films. *Food Hydrocolloids*, 19(1), 157-164.

Nouraddini, M., Esmaili, M., & Mohtarami, F. (2018). Development and characterization of edible films based on eggplant flour and corn starch. *International journal of biological macromolecules*, 120, 1639-1645.

Pandey, G., & Madhuri, S. (2010). Pharmacological activities of *Ocimum sanctum* (tulsi): a review. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, 5(1), 61-66.

Phomkaivon, N., Surojanametakul, V., Poolperm, N., & Satmalee, P. (2013). Changes on physico-chemical properties, total anthocyanin contents and antioxidant activity of different pre-treatment purple sweet potato flour. In *Proceedings of 51st Kasetsart University Annual Conference: Agricultural Extension and Home Economics, Agro-Industry*. pp. 281-288, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)

Ramos, Ó. L., Reinas, I., Silva, S. I., Fernandes, J. C., Cerqueira, M. A., Pereira, R. N., Vicente, A. A., Poças, M. F., Pintado, M. E., & Malcata, F. X. (2013). Effect of whey protein purity and glycerol content upon physical properties of edible films manufactured therefrom. *Food Hydrocolloids*, 30(1), 110-122.

Saengwong-ngam, R., Matan, N., & Matan, N. (2020). Physical properties, mechanical properties and antifungal activity of PLA bioplastic film containing *Michelia alba* oil on brown rice. *Journal of Science & Technology, Ubon Ratchathani University*, 22(1), 14-21. (in Thai)

Samsalee, N., & Sothornvit, R. (2020). Characterization of food application and quality of porcine plasma protein-based films incorporated with chitosan or encapsulated turmeric oil. *Food and Bioprocess Technology*, 13(3), 488-500.

Samsalee, N., Romsomsa, N., & Musika, S. (2021). Physicochemical, mechanical and thermal properties of edible film from man lueat (*Dioscorea alata*) flour. *RMUTP Research Journal*, 15(2), 24-39. (in Thai)

Sanyang, M. L., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Ishak, M. R., & Sahari, J. (2015). Effect of plasticizer type and concentration on tensile, thermal and barrier properties of biodegradable films based on sugar palm (*Arenga pinnata*) starch. *Polymers*, 7(6), 1106-1124.

Siripatrawan, U., & Harte, B. R. (2010). Physical properties and antioxidant activity of an active film from chitosan incorporated with green tea extract. *Food hydrocolloids*, 24(8), 770-775.

Siskawardani, D. D., & Hidayat, R. (2020). Physic-mechanical properties of edible film based on taro starch (*Colocasia esculenta* L. Schoott) with glycerol addition. In *Proceedings of Earth and Environmental Science*. pp. 1-7. IOP Publishing.

Tee, Y. B., Tee, L. T., Daengprok, W., & Talib, R. A. (2017). Chemical, physical, and barrier properties of edible film from flaxseed mucilage. *BioResources*, 12(3), 6656-6664.

Theamdee, P., & Rueangrungrong, J. (2019). The effect of glycerol content on physical and mechanical properties of the biodegradable film from sweet potato flour for plastic plant bag application. *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, 21(3), 14-24. (in Thai)

Tongnuanchan, P., Benjakul, S., & Prodpran, T. (2012). Properties and antioxidant activity of fish skin gelatin film incorporated with citrus essential oils. *Food Chemistry*, 134(3), 1571-1579.

Wiset, L., Poomsa-ad, N., Jomlapeeratikul, P., & Borompichaichartkul, C. (2014). Effects of drying temperatures and glycerol concentrations on properties of edible film from konjac flour. *Journal of Medical and Bioengineering*, 3(3), 171-174.

ความหลากหลายชนิดของปลาน้ำจืดในแม่น้ำสายบุรี:

บริเวณชุมชนต้นน้ำบ้านจุฬารณพัฒนา 12 อำเภอสุคิริน จังหวัดนราธิวาส

Diversity of Freshwater Fish in the Sai Buri River: Around the Watershed

Community of Ban Chulabhorn Phatthana 12, Sukhirin District,

Narathiwat Province.

พัน ยี่ลีน¹ สมศักดิ์ บัวทิพย์^{2*} และ ซาการียา สมาแอ²

Pun Yeesin¹ Somsak Buatip^{2*} and Sakareeya Samaae²

¹สาขาวิชาวิทยาการเกษตรและประมง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

²พิพิธภัณฑ์ประวัติศาสตร์ชาติและเครือข่ายเรียนรู้ท้องถิ่น คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

¹Department of Agriculture and Fisheries Science, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani, Thailand

²Natural History Museum and Local Learning Network, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani, Thailand

บทคัดย่อ

บ้านจุฬารณพัฒนา 12 หมู่ที่ 13 ตำบลสุคิริน อำเภอสุคิริน จังหวัดนราธิวาส มีความสูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 121 เมตร เป็นชุมชนต้นน้ำของแม่น้ำสายบุรี โดยแม่น้ำสายบุรีเกิดจากเทือกเขาสันกาลาคีรีในเขตอำเภอสุคิรินและอำเภอศรีสาคร จังหวัดนราธิวาส ไหลผ่านจังหวัดยะลาและลงสู่อ่าวไทยตอนล่างที่อำเภอสายบุรี จังหวัดปัตตานี มีความยาวประมาณ 180 กิโลเมตร ปลาน้ำจืดเป็นสัตว์น้ำที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ เป็นแหล่งโปรตีนที่เข้าถึงได้ง่าย และเป็นตัวชี้วัดความเสื่อมโทรมของชุมชนและสุขภาพของแหล่งน้ำ การศึกษาความหลากหลายชนิดของปลาน้ำจืดในแม่น้ำสายบุรี บริเวณชุมชนต้นน้ำบ้านจุฬารณพัฒนา 12 อำเภอสุคิริน จังหวัดนราธิวาส โดยการสำรวจและเก็บรวบรวมตัวอย่างปลาในคลองกือชา คลองไอร์ตุงอ และคลองไอร์ตากอ โดยสุ่มเก็บตัวอย่างด้วยแหขนาดตา 1.5 มิลลิเมตร เป็นหลัก 2 เดือน/ครั้ง ระหว่างเดือนธันวาคม 2560 – พฤศจิกายน 2561 ผลการศึกษาพบปลาน้ำจืดทั้งหมด 1,129 ตัว 17 วงศ์ 49 ชนิด โดยวงศ์ที่พบมากที่สุด คือ Cyprinidae 21 ชนิด (79.19%) รองลงมาคือ วงศ์ Bagridae 5 ชนิด ค่าดัชนีความหลากหลายชนิดเท่ากับ 2.84 ค่าดัชนีความสม่ำเสมอเท่ากับ 0.73 ดัชนีความมากชนิดเท่ากับ 6.83 โดยปลาเลียหินกัมพูชา (*Ceratogarra cambodgiensis*) มีค่าความชุกชุมสัมพัทธ์สูงที่สุด 21.43 เปอร์เซ็นต์ ส่วนความชุกชุมหรือความถี่ของการปรากฏ พบว่า ปลาในกลุ่มพบน้อย มี 12 ชนิด กลุ่มพบปานกลาง มี 24 ชนิด กลุ่มพบบ่อย มี 9 ชนิด และกลุ่มพบบ่อยมาก มี 4 ชนิด โดยเดือนธันวาคมและมีนาคมเป็นเดือนที่พบชนิดปลาสูงที่สุด คือ 27 ชนิด และจากการศึกษาครั้งนี้มีปลาเพียง 10 ชนิดเท่านั้นที่พบเหมือนกับการศึกษาก่อนหน้านี้ ระบบนิเวศต้นน้ำมีความสำคัญทางเศรษฐกิจสูงแต่กลับเป็นระบบนิเวศถูกคุกคามจากการใช้ประโยชน์และการพัฒนาเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ที่สูงขึ้น การคุกคามต่างๆ ต่อความหลากหลายทางชีวภาพในระบบนิเวศต้นน้ำจะมีผลทั้งทางตรงและทางอ้อมในการทำลายทรัพยากรปลาของบริเวณต้นน้ำไปด้วยโดยหลีกเลี่ยงไม่ได้

คำสำคัญ: จุฬารณพัฒนา 12, ปลาน้ำจืด, ลุ่มน้ำสายบุรี

ABSTRACT

Ban Chulabhorn Phatthana 12, Moo 13, Sookhirin Subdistrict, Sukhirin District, Narathiwat Province, is approximately 121 meters above sea level. It is the source community of the Sai Buri River, with the river originating from the Sankalakiri mountain range in Sukhirin and Sri Sakhon Districts, Narathiwat Province. The river flows through Yala Province and empties into the lower Gulf of Thailand in Sai Buri District, Pattani Province. The river is approximately 180 kilometers long. Freshwater fish are economically important in the region, providing easily accessible protein and serving as indicators of community degradation and water health. A study was conducted on the diversity of freshwater fish in the Sai Buri River: around the watershed community of Ban Chulabhorn Phatthana 12, Sukhirin District, Narathiwat Province. Fish samples were collected randomly from Ai Tu ngo Canal and Ai Ta ko Canal using a 1.5-millimeter mesh seine, every two months between December 2017 to November 2018. The study found

a total of 1,129 fish individuals belonging to 17 families and 49 species. The most dominant family was Cyprinidae, with 21 species (79.19%). Bagridae was the second most abundant family with 5 species. The Shannon–Wiener diversity index was 2.84, the evenness index was 0.73, and the richness index was 6.83. The fish species with the highest relative abundance was *Ceratogarra cambodgiensis*, with a relative abundance of 21.43%. Regarding the frequency of occurrence, 12 species were rare, 24 were moderately common, 9 were common, and 4 were very common. December and March had the highest species richness, with 27 species each. Only 10 fish species were common to both this and a previous study. The freshwater ecosystem is economically significant, but it faces threats from various human activities and development to meet increasing human demands. Such disturbances have direct and indirect impacts on the biodiversity of the freshwater ecosystem, including the fish resources of the upstream areas, which are challenging to avoid.

KEYWORDS: Banchulabhorn Pattana 12, Freshwater fish, Saiburi basin

*Corresponding Author: somsak.bu@psu.ac.th

Received: 29/09/2023; Revised: 31/01/2024; Accepted: 16/02/2024

1. บทนำ

แม่น้ำสายบุรี มีลำน้ำหลักและสาขาหลายสาย ต้นน้ำของลำน้ำสายหลักเกิดจากเทือกเขาสันกาลาคีรี ในเขตอำเภอสุคิรินและอำเภอศรีสาคร จังหวัดนราธิวาส ไหลผ่าน 4 อำเภอ ในจังหวัดนราธิวาส (สุคิริน จะแนะ ศรีสาคร และรือเสาะ) อำเภอรามัน จังหวัดยะลา แล้วไหลลงสู่อ่าวไทยตอนล่างที่อำเภอสายบุรี จังหวัดปัตตานี มียาวตลอดสายประมาณ 180 กิโลเมตร (Lheknim, 2002) โดยบ้านจุฬารณพัฒนา 12 ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่หมู่ที่ 13 ตำบลสุคิริน อำเภอสุคิริน จังหวัดนราธิวาส พิกัด 5°55'22 N, 101°38'30 E มีความสูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 121 เมตร เป็นหมู่บ้านชาวไทยมุสลิมบริเวณชายแดนไทย-มาเลเซีย ที่ตั้งของชุมชนอยู่ในเขตป่าต้นน้ำของแม่น้ำสายบุรี มีคลองกือซาซึ่งเป็นคลองต้นน้ำสายย่อยไหลผ่าน ลักษณะโดยทั่วไปของคลองเป็นหินขนาดเล็กทราย และมีโขดหินเล็ก-ใหญ่ สลับกันตลอดสายน้ำที่ไหลผ่านหมู่บ้าน

ปลาน้ำจืด เป็นสัตว์น้ำที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ สามารถสร้างรายได้ให้กับคนในชุมชน เป็นแหล่งโปรตีนที่เข้าถึงได้ง่าย ทำให้ชุมชนมีความมั่นคงทางอาหาร เป็นตัวชี้วัดความเสื่อมโทรมของชุมชน เป็นตัวชี้วัดสุขภาพของแหล่งน้ำ เนื่องจากปลาอยู่ในน้ำตลอดเวลา กินอาหาร ผสมพันธุ์ วางไข่ และเลี้ยงดูตัวอ่อนในน้ำ โดยพิจารณาได้จากความหลากหลายทางชีวภาพของชนิดพรรณปลาที่มีอยู่ในพื้นที่นั้น รวมทั้งแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการจะใช้ประโยชน์ของคน (Vidthayanon, Karnasuta, & Nabhitabhata, 1997) ในประเทศไทยมีรายงานจำนวนชนิดปลาน้ำจืดแล้ว 297 ชนิด (Saenjundaeng, 2014) โดยปลาน้ำจืดในวงศ์ Cyprinidae มีจำนวนชนิดมากที่สุดในทุกพื้นที่ของประเทศ

ไทยที่มีรายงานการศึกษา ได้แก่ ภาคเหนือ เช่น ในแม่น้ำยาว จังหวัดน่าน พบปลาทั้งหมด 18 วงศ์ 59 ชนิด วงศ์ Cyprinidae มี 29 ชนิด (Lothongkham & Kullama, 2011) ในแม่น้ำจิม จังหวัดพะเยา พบปลาทั้งหมด 11 วงศ์ 27 ชนิด วงศ์ Cyprinidae มี 11 ชนิด (Seetapan, Kaewtip, Supawan, Wongwut, Saensupa, Tanitsorn, Uppaphong, & Pinmongkholgul, 2020) ในแม่น้ำแม่ป๋าน พบปลาทั้งหมด 19 วงศ์ 45 ชนิด วงศ์ Cyprinidae มี 19 ชนิด (Lothongkham, Changsam, & Chaichorfa, 2009) และในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าดอยผาช้าง จังหวัดพะเยา พบปลาทั้งหมด 15 วงศ์ 38 ชนิด วงศ์ Cyprinidae มี 16 ชนิด (Muang-ngern, Sanguanreung, & Seetapan, 2007) เป็นต้น ภาคกลาง เช่น ในพื้นที่กรุงเทพมหานครฝั่งตะวันออก พบปลาทั้งหมด 19 วงศ์ 42 ชนิด วงศ์ Cyprinidae มี 16 ชนิด (Wongroj, 2004) ในแม่น้ำเจ้าพระยา จังหวัดนนทบุรี พบปลาทั้งหมด 41 วงศ์ 122 ชนิด วงศ์ Cyprinidae มี 32 ชนิด (Kulabong & Kunlapapuk, 2011) ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เช่น ในหนองหารจังหวัดสกลนคร พบปลาทั้งหมด 16 วงศ์ 52 ชนิด วงศ์ Cyprinidae มี 23 ชนิด (Rayan, Ngamsnae, & Ngoichansri, 2014) ส่วนในพื้นที่ภาคใต้ เช่น ในจังหวัดระนอง พบปลาทั้งหมด 27 วงศ์ 52 ชนิด วงศ์ Cyprinidae มี 14 ชนิด (Ratmuangkhwang, 2014) อุทยานแห่งชาติเขาลง จังหวัดนครศรีธรรมราช พบปลาทั้งหมด 10 วงศ์ 20 ชนิด วงศ์ Cyprinidae มี 9 ชนิด (Sutin, Jaroensutasinee, & Jaroensutasinee, 2007) บริเวณอุทยานแห่งชาติน้ำตกสี่ขีด จังหวัดนครศรีธรรมราช พบปลาทั้งหมด 13 วงศ์ 34 ชนิด วงศ์ Cyprinidae มี 13 ชนิด (Nualsri, 2012) ลุ่มน้ำภาคใต้ฝั่งตะวันออกตอนบนรวบรวมตัวอย่างในลุ่มน้ำคลองท่าชะ คลองรับร้อ คลอง

ท่าตะเภา คลองชุมพร คลองสวี มาน้ำหลังสวน คลองท่าชนะ คลองไชยา และคลองท่าฉาง พบปลาทั้งสิ้น 27 วงศ์ 85 ชนิด วงศ์ Cyprinidae มี 27 ชนิด (Lheknim,1999) และลุ่มน้ำภาคใต้ฝั่งตะวันออกตอนล่าง และลุ่มน้ำแม่ น้ำปัตตานี รวบรวมตัวอย่างจาก 233 สถานีใน 6 แม่น้ำ 1 ลุ่มน้ำ คือ ลุ่มน้ำคลองนาทับ แม่น้ำเทพา แม่น้ำปัตตานี แม่น้ำสายบุรี แม่น้ำยะกัง แม่น้ำบางนารา แม่น้ำโกลก พบปลาทั้งสิ้น 38 วงศ์ 174 ชนิด วงศ์ Cyprinidae มีจำนวนชนิดมากที่สุด เฉพาะในแม่น้ำสายบุรีพบปลาน้ำจืดทั้งหมด 124 ชนิด มากที่สุดเมื่อเทียบกับทุกแม่น้ำที่เก็บรวบรวมตัวอย่างในการศึกษาโดยวงศ์ Cyprinidae มากที่สุด 47 ชนิด (Lheknim, 2002)

จากรายงานการศึกษาปลาน้ำจืดของ Lheknim (2002) เก็บรวบรวมตัวอย่างในช่วงเดือนเมษายน 2543 -ธันวาคม 2544 พบว่า สถานีเก็บรวบรวมตัวอย่างปลาน้ำจืดในแม่น้ำสายบุรีเฉพาะในอำเภอสุคีริน ไม่ครอบคลุมพื้นที่บ้านจุฬารณพัฒนา 12 พบเฉพาะในพื้นที่บ้านโต๊ะไม้ะ บ้านภูเขาทอง และบ้านต้นทุเรียน ซึ่งอยู่ในตำบลภูเขาทองเท่านั้น ดังนั้นการศึกษาความหลากหลายชนิดของปลาน้ำจืดในแม่น้ำสายบุรี: บริเวณชุมชนต้นน้ำบ้านจุฬารณพัฒนา 12 อำเภอสุคีริน จังหวัดนราธิวาส จึงมีความสำคัญมากเนื่องจากพื้นที่ในการศึกษาในครั้งนี้นี้ยังไม่เคยมีรายงานการศึกษามาก่อน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความหลากหลายชนิดของปลาน้ำจืด บริเวณชุมชนต้นน้ำบ้านจุฬารณพัฒนา 12 และติดตามสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงชนิดพันธุ์ปลาน้ำจืดในแม่น้ำสายบุรีในพื้นที่อำเภอสุคีริน ในรอบมากกว่า 20 ปี หลังจากการศึกษาของ Lheknim (2002) ประกอบกับเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญให้กับชุมชนและท้องถิ่น เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการดูแล รักษา บริหารจัดการ รวมทั้งการอนุรักษ์ สายน้ำและทรัพยากรปลาให้คงอยู่ท่ามกลางการเปลี่ยนแปลงสภาพของพื้นที่ การใช้สารเคมีในระบบการปลูกพืชเศรษฐกิจที่ถูกชะลงสู่แหล่งน้ำ รวมทั้งการพัฒนาพื้นที่ให้เป็นแหล่งท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ เพราะปลาเป็นตัวชี้วัดคุณภาพของสิ่งแวดล้อมของสายน้ำได้เป็นอย่างดี

2. วัสดุและวิธีการ

2.1 การเก็บรวบรวมตัวอย่าง

สำรวจพรรณปลาในคลองกือชา คลองไอร์ตุงอ และคลองไอร์ตากอ ลักษณะโดยทั่วไปของคลองเป็นหินขนาดเล็ก ทราบ และมีโขดหินเล็ก-ใหญ่ สลับกันตลอดสายน้ำ บริเวณตลิ่งมีไม้ยืนต้นและพืชน้ำ (รูปที่ 1) เก็บ

ตัวอย่างปลาด้วยแหขนาดช่องตา 15 มิลลิเมตร ยาว 3.5 เมตร และสวิงขนาดตา 0.20-0.30 มิลลิเมตร โดยกระจายจุดสำรวจและการรวบรวมตัวอย่างจะใช้แหเป็นเครื่องมือหลัก โดยจะเหวี่ยงแบบสุ่มให้ครอบคลุมทุกลักษณะแหล่งน้ำ ได้แก่ บริเวณกลางน้ำ บริเวณโขดหิน บริเวณริมฝั่ง และแอ่งน้ำ แล้วแต่สภาพภูมิประเทศจะเอื้ออำนวยต่อการเก็บตัวอย่างเพื่อรวบรวมให้ได้จำนวนชนิดพรรณปลาสูงสุด ตั้งแต่เดือนธันวาคม 2560-พฤศจิกายน 2561 โดยทำการเก็บรวบรวมตัวอย่าง 2 เดือน/ครั้ง



รูปที่ 1 แผนที่เก็บรวบรวมตัวอย่างปลาน้ำจืด บ้านจุฬารณพัฒนา 12 ต.สุคีริน อ.สุคีริน จ.นราธิวาส

พรรณปลาทุกชนิดที่เก็บรวบรวมได้ในแต่ละครั้งของการสำรวจจะทำการจำแนกชนิดและนับจำนวนในพื้นที่ การจัดจำแนกชนิดปลาจะใช้คู่มือการวิเคราะห์พรรณปลาและเอกสารทางวิชาการด้านอนุกรมวิธานปลา จาก Encyclopedia of freshwater fish of Thailand (Saenjundaeng, 2014) Indochinese Nemacheilines. A Revision of Nemacheiline Loaches (Pisces: Cypriniformes) of Thailand, Burma, Laos, Cambodia and southern Viet Nam (Kottelat, 1990) และ Fishes of Cambodian Mekong (Rainboth, 1996) รวมทั้งตรวจสอบความถูกต้องชื่อวิทยาศาสตร์ของปลาแต่ละชนิดตามฐานข้อมูลของ fishbase.org ver. (06/2023) หลังจากนั้นนำข้อมูลข้างต้นมาทำตารางการพบหรือไม่พบและคำนวณดัชนีที่สำคัญต่าง ๆ

2.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

1. วิเคราะห์ค่าดัชนีความหลากหลายชนิด ตามสูตรของ Shannon-Wiener Index (Shannon, 1949)

$$H' = -\sum p_i \ln(p_i)$$

p_i คือ สัดส่วนจำนวนชนิดของปลาชนิด i ต่อจำนวนของปลาทั้งหมด
 S คือ จำนวนชนิดปลาทั้งหมด
 H' คือ ค่าดัชนีความหลากหลายชนิด

2. วิเคราะห์ค่าดัชนีความสม่ำเสมอ (Evenness Index)

$$E' = H' / \ln(S)$$

H' คือ ค่าดัชนีความหลากหลายชนิดของ Shannon-Wiener
 S คือ จำนวนชนิดปลาทั้งหมด
 E' คือ ค่าความสม่ำเสมอ

3. วิเคราะห์ค่าดัชนีความมากมาย (Richness index) โดยใช้ Margalef diversity index (Lokitsathaporn & Sinlapachai, 2008) ดังนี้

$$R = (S-1) / \ln(N)$$

R = ค่าดัชนีความมากมายชนิด
 S = จำนวนชนิดทั้งหมดที่พบ
 N = จำนวนตัวทั้งหมดที่พบ
 \ln = natural logarithm

4. วิเคราะห์ค่าความสำคัญของปลาแต่ละชนิดจากค่าความชุกชุมสัมพัทธ์ (Relative abundance)

$$\text{Relative abundance} = (n \times 100) / N$$

n คือ จำนวนตัวทั้งหมดในปลาแต่ละชนิดของสัตว์น้ำพลอยจับได้ที่พบ
 N คือ จำนวนตัวทั้งหมดของปลาทุกชนิดที่พบ

5. ความชุกชุมหรือความถี่ของการปรากฏ (frequency of species occurrence) ของปลาแต่ละชนิด โดยดัดแปลงตามวิธีของ Pettingill (1961)
 ร้อยละความถี่ของการปรากฏ = (จำนวนครั้งของการพบปลา $\times 100$) / จำนวนครั้งของการสำรวจทั้งหมด

โดยใช้เกณฑ์ในการแบ่งระดับความถี่สัมพัทธ์ของปลาออกเป็น 5 ระดับ คือ

- ร้อยละ 90- 100 หมายถึง พบบ่อยมาก
- ร้อยละ 65 - 89 หมายถึง พบบ่อย
- ร้อยละ 31 - 64 หมายถึง พบปานกลาง

ร้อยละ 1 - 31 หมายถึง พบน้อย

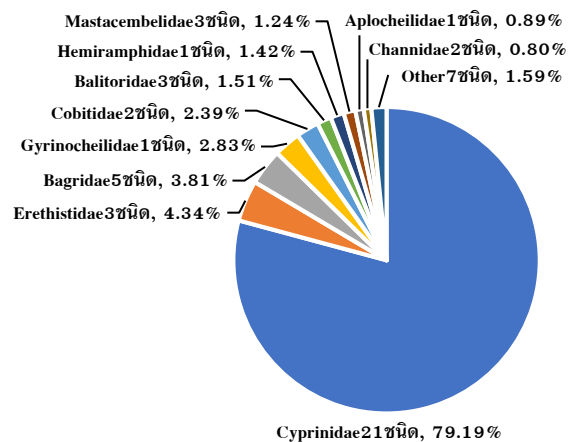
6. การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรหลายตัวระหว่างชนิดปลาน้ำจืด จำนวน และเดือนที่เก็บรวบรวมตัวอย่าง โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป PC-ORD บน Windows 10 pro ด้วยเทคนิคการจัดกลุ่ม CCA วิเคราะห์โดยใช้วิธี Hierarchical Cluster Analysis เพื่อการจัดกลุ่มโดยใช้การรวม Cluster ด้วยวิธี Ward'S Method

3. ผลลัพธ์

จากการสุ่มเก็บตัวอย่างปลาทั้งหมด 1,129 ตัว จัดจำแนกได้ 17 วงศ์ และ 49 ชนิด โดยวงศ์ที่พบชนิดปลามากที่สุด 5 อันดับแรก คือ วงศ์ Cyprinidae 21 ชนิด (79.19%) รองลงมาคือ วงศ์ Bagridae 5 ชนิด และวงศ์ Erethistidae, Balitoridae และ Mastacembelidae วงศ์ละ 3 ชนิดเท่ากัน ตามลำดับ (รูปที่ 2) โดยปลาที่พบมากที่สุด คือ ปลาเลียหินกัมพูชา (*Ceratogarra cambodgiensis*) (ตารางที่ 1)

ค่าดัชนีความหลากหลายชนิด (H') เท่ากับ 2.84 โดยในเดือนมีนาคม เมษายน และพฤศจิกายน 2561 มีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 2.43 รองลงมาคือ ธันวาคม 2560 (2.07) กันยายน 2561 (1.85) และกรกฎาคม 2561 (1.34) ตามลำดับ (รูปที่ 3)

ค่าดัชนีความสม่ำเสมอ (E') เท่ากับ 0.73 โดยในเดือนพฤศจิกายน 2561 มีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 0.80 รองลงมาคือ เมษายน 2561 (0.75) มีนาคม 2561 (0.73) ธันวาคม 2560 (0.63) กันยายน 2561 (0.62) และกรกฎาคม 2561 (0.48) ตามลำดับ (รูปที่ 3)



รูปที่ 2 เปรียบเทียบจำนวนปลาแต่ละวงศ์ที่ถูกรวบรวมในพื้นที่บ้านจุฬารักษ์พัฒนา 12 ต.สุคีริน อ.สุคีริน จ.นราธิวาส ระหว่างเดือนธันวาคม 2560-เดือนพฤศจิกายน 2561

ดัชนีความหลากหลาย (R) เท่ากับ 6.83 โดยในเดือนมีนาคม 2561 มีค่าสูงสุด เท่ากับ 5.10 รองลงมาคือ ธันวาคม 2560 (4.73) เมษายน 2561 (4.53) พฤศจิกายน 2561 (4.20) กันยายน 2561 (3.40) และ กรกฎาคม 2561 (3.04) ตามลำดับ (รูปที่ 3)

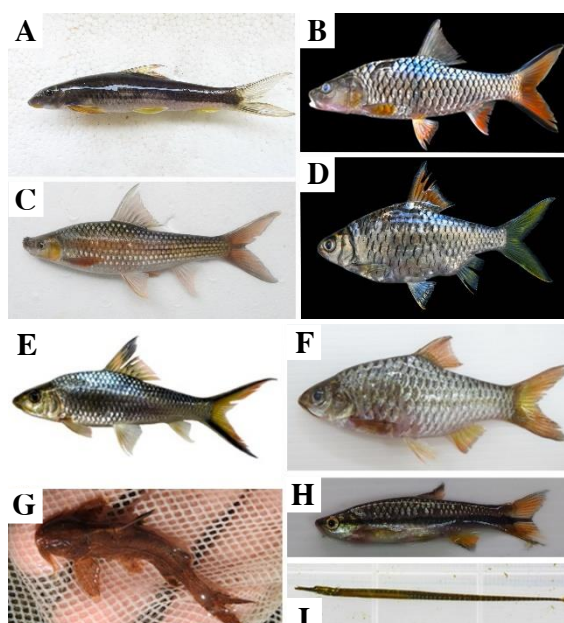
ความชุกชุมสัมพันธ์ พบว่า ปลาที่พบความชุกชุมสัมพันธ์สูงสุด 5 อันดับแรกในการศึกษาครั้งนี้คือ ปลาเลียหินกัมพูชา (*Ceratogarra cambodgiensis*) 21.43 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ ปลาเลียหิน (*Ceratogarra fasciacauda*) 15.06 เปอร์เซ็นต์ ปลาสร้อยลูกบัว (*Lobocheilos rhabdoura*) 13.55 เปอร์เซ็นต์ ปลาชิวควาย (*Rasbora myersi*) 8.50 เปอร์เซ็นต์ และปลาซ่า (*Labiobarbus leptocheilus*) 5.23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 1)

ความชุกชุมหรือความถี่ของการปรากฏ พบว่าความชุกชุมหรือความถี่ของการปรากฏของปลาน้ำจืดในการศึกษาครั้งนี้ แบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม (ตารางที่ 1) ดังนี้

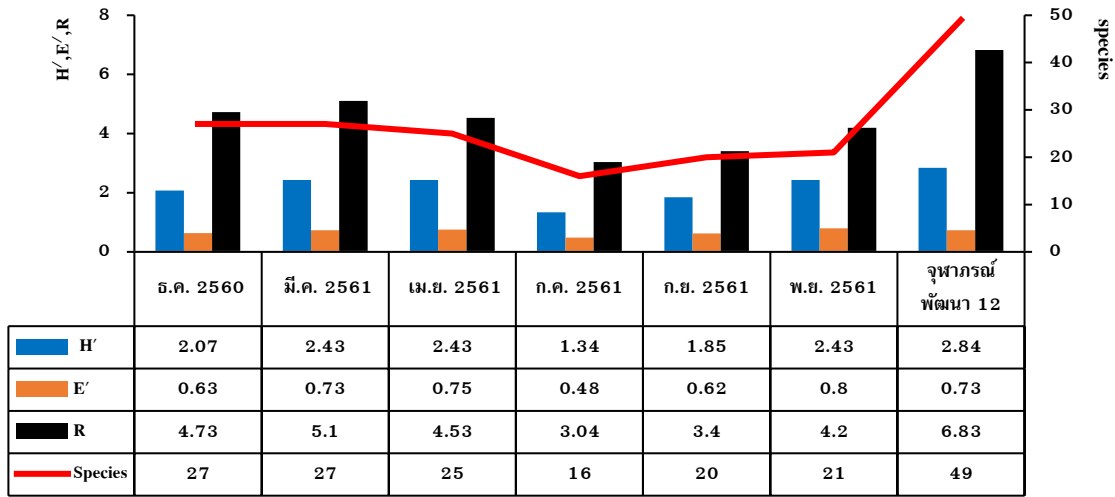
ชนิดปลาในกลุ่มพบน้อย มี 12 ชนิด ได้แก่ ปลาตุ๊กบอน ปลาดัก (*Amblyceps variegatum*) ปลากระทุงเหว (*Xenentodon cancila*) ปลาหางบัว (*Barbichthys laevis*) ปลาตะเพียนทราย (*Puntius brevis*) ปลาชิวแถบฟ้า (*Rasbora einthovenii*) ปลาชิวควาย (*Rasbora argyrotaenia*) และปลาแค้หินสามแถบ (*Glyptothorax trilineatus*) เป็นต้น กลุ่มพบปานกลาง มี 24 ชนิด ได้แก่ ปลาหัวตะกั่ว (*Aplocheilus panchax*) ปลาแขยงภูเขา (*Batasio affinis*) ปลาแขยงกล้วย (*Batasio fluviatilis*) ปลากรดดำ (*Hemibagrus wyckii*) และปลาแขยงขี้ไก่ (*Pseudomystus leiocanthus*) เป็นต้น กลุ่มพบบ่อย มี 9 ชนิด ได้แก่ ปลาพลวงทอง (*Tor tambroides*) ปลาแค้หิน (*Glyptothorax lonah*) ปลาสร้อยน้ำผึ้ง (*Gyrinocheilus aymonieri*) ปลากระทุงเหวแม่ข่าย (*Hemiramphus far*) และปลาหลดภูเขา (*Macrognathus taeniagaster*) เป็นต้น และกลุ่มพบบ่อยมาก มี 4 ชนิด คือ ปลาเลียหินกัมพูชา (*Ceratogarra*

cambodgiensis) ปลากระทุงเหว (*Hampala macrolepidota*) ปลาสร้อยลูกบัว (*Lobocheilos rhabdoura*) และปลาหนามหลัง (*Mystacoleucus marginatus*) (รูปที่ 3)

เดือนธันวาคม 2560 และ มีนาคม 2561 เป็นเดือนที่พบชนิดปลาสูงสุด คือ 27 ชนิดเท่ากัน รองลงมาคือ เมษายน 2561 (25 ชนิด) พฤศจิกายน 2561 (21 ชนิด) ในขณะที่เดือนกรกฎาคม 2561 พบชนิดปลาน้อยที่สุด 16 ชนิด (รูปที่ 4) นอกจากนั้นพบว่า ปลากระทุงเหว (*Hampala macrolepidota*) ปลาสร้อยลูกบัว (*Lobocheilos rhabdoura*) และปลาหนามหลัง (*Mystacoleucus marginatus*) พบได้ทุกเดือนที่สำรวจ ในขณะที่มีปลา 10 ชนิด พบเพียงครั้งเดียวของการสำรวจ (ตารางที่ 1)



รูปที่ 3 ตัวอย่างปลาน้ำจืดที่พบในการเก็บรวบรวมตัวอย่างพื้นที่บ้านจุฬารณพัฒนา 12 ต.สุรินทร์ อ.สุรินทร์ จ.สุรินทร์ ระหว่างเดือนธันวาคม 2560-เดือนพฤศจิกายน 2561 (A: ปลาเลียหินกัมพูชา (*Ceratogarra cambodgiensis*); B: ปลากระทุงเหว (*Hampala macrolepidota*); C: ปลาสร้อยลูกบัว (*Lobocheilos rhabdoura*); D: ปลาหนามหลัง (*Mystacoleucus marginatus*); E: ปลาหางบัว (*Barbichthys laevis*); F: ปลาตะเพียนทราย (*Puntius brevis*); G: ปลาแค้หินสามแถบ (*Glyptothorax trilineatus*); H: ปลาชิวแถบฟ้า (*Rasbora einthovenii*); I: ปลาจิ้มฟันจระเข้ล้าธาร (*Doryichthys* sp.)



รูปที่ 4 ดัชนีความหลากหลายชนิด (H') ดัชนีความสม่ำเสมอ (E') ดัชนีความมากชนิด (R) และจำนวนชนิด ของปลาน้ำจืดที่พบในพื้นที่บ้านจุฬากรณ์พัฒนา 12 ต.สุคริวัน อ.สุคริวัน จ.นราธิวาส ระหว่างเดือนธันวาคม 2560-เดือนพฤศจิกายน 2561

ตารางที่ 1 ชนิด จำนวน สถานภาพการอนุรักษ์ (IUCN Red list) ความชุกชุมสัมพัทธ์ ความถี่ของการปรากฏ และเดือนที่พบปลาน้ำจืด ในพื้นที่บ้านจุฬากรณ์พัฒนา 12 ต.สุคริวัน อ.สุคริวัน จ.นราธิวาส ระหว่างเดือนธันวาคม 2560-เดือนพฤศจิกายน 2561

วงศ์/ชนิด	ชื่อวิทยาศาสตร์	จำนวน (ตัว)	IUCN Red list	ความชุกชุมสัมพัทธ์	ความถี่ของการปรากฏ	เดือนที่พบ
Amblycipitidae						
ปลาตุ๊กบอน, ปลาตัก	<i>Amblyceps variegatum</i>	4	DD	0.35	พบน้อย	พ.ย.
Aplocheilidae						
ปลาหัวตะกั่ว	<i>Aplocheilus panchax</i>	10	LC	0.89	พบปานกลาง	ธ.ค., มี.ค.
Bagridae						
ปลาแขยงภูเขา	<i>Batasio affinis</i>	6	-	0.53	พบปานกลาง	ธ.ค., เม.ย.
ปลาแขยงกล้วย	<i>Batasio fluviatilis</i>	7	LC	0.62	พบปานกลาง	มี.ค., ก.ค., ก.ย.
ปลากดเหลือง	<i>Hemibagrus filamentus</i>	14	DD	1.24	พบน้อย	ธ.ค., มี.ค., เม.ย., ก.ค., ก.ย.
ปลากดดำ	<i>Hemibagrus wyckii</i>	10	LC	0.89	พบปานกลาง	มี.ค., พ.ย.
ปลาแขยงขี้ไก่	<i>Pseudomystus leiacanthus</i>	6	LC	0.53	พบปานกลาง	ธ.ค., เม.ย.
Balitoridae						
ปลาจิ้งจก	<i>Homaloptera confuzona</i>	3	DD	0.27	พบปานกลาง	ธ.ค., ก.ย., พ.ย.
ปลาจิ้งจกใต้	<i>Homaloptera parclitella</i>	9	LC	0.8	พบปานกลาง	ก.ค., ก.ย., พ.ย.
ปลาจิ้งจกดำ	<i>Balitoropsis zollingeri</i>	5	LC	0.44	พบปานกลาง	เม.ย., ก.ย.
Belonidae						
ปลากระทุงเหว	<i>Xenentodon cancila</i>	2	LC	0.18	พบน้อย	พ.ย.
Channidae						
ปลากั้ง	<i>Channa gachua</i>	7	-	0.62	พบปานกลาง	มี.ค., เม.ย., ก.ค.
ปลากระสง	<i>Channa lucius</i>	2	LC	0.18	พบปานกลาง	มี.ค., พ.ย.
Cobitidae						
ปลารากกล้วย	<i>Acantopsis dialuzona</i>	18	-	1.59	พบปานกลาง	ธ.ค., ก.ย., พ.ย.
ปลาหมู	<i>Yasuhikotakia morleti</i>	9	LC	0.8	พบน้อย	ธ.ค., มี.ค., เม.ย., ก.ค., พ.ย.
Cyprinidae						
ปลาหางบัว	<i>Barbichthys laevis</i>	1	LC	0.09	พบน้อย	ธ.ค.
ปลาอีกรอง	<i>Striuntius lateristriga</i>	8	LC	0.71	พบปานกลาง	ก.ย., พ.ย.
ปลาตะเพียนน้ำตัก	<i>Barbodes rhombeus</i>	12	LC	1.06	พบน้อย	มี.ค., เม.ย., ก.ค., พ.ย.
ปลาเล็บมือนาง	<i>Crossocheilus reticulatus</i>	11	LC	0.97	พบปานกลาง	มี.ค., เม.ย., ก.ย.,
ปลาไล่ตันตาแดง	<i>Cyclocheilichthys apogon</i>	3	LC	0.27	พบปานกลาง	ธ.ค., มี.ค.
ปลาชีโวไผ่	<i>Danio dangila</i>	2	-	0.18	พบปานกลาง	ธ.ค., พ.ย.
ปลาเสียวหิน	<i>Ceratogarra fasciacauda</i>	170	LC	15.06	พบปานกลาง	ก.ย., พ.ย.
ปลาเสียวหินกัมพูชา	<i>Ceratogarra cambodgiensis</i>	242	LC	21.43	พบน้อยมาก	ธ.ค., มี.ค., เม.ย., ก.ค., ก.ย.
ปลากระสูบขีด	<i>Hampala macrolepidota</i>	18	LC	1.59	พบน้อยมาก	ธ.ค., มี.ค., เม.ย., ก.ค., ก.ย., พ.ย.
ปลาช้ำ	<i>Labiobarbus leptocheilus</i>	59	LC	5.23	พบปานกลาง	ธ.ค., มี.ค., เม.ย.

วงศ์/ชนิด	ชื่อวิทยาศาสตร์	จำนวน (ตัว)	IUCN Red list	ความชุกชุมสัมพัทธ์	ความถี่ของการปรากฏ	เดือนที่พบ
ปลาสร้อยลูกบัว	<i>Lobocheilos rhabdoura</i>	153	-	13.55	พบบ่อยมาก	ธ.ค., มี.ค., เม.ย., ก.ค., ก.ย., พ.ย.
ปลาชีว้า	<i>Luciosoma bleekeri</i>	6	LC	0.53	พบปานกลาง	ธ.ค., เม.ย., ก.ย.
ปลาหนามหลัง	<i>Mystacoleucus marginatus</i>	47	LC	4.16	พบบ่อยมาก	ธ.ค., มี.ค., เม.ย., ก.ค., ก.ย., พ.ย.
ปลาร่องไม้ตับ	<i>Osteochilus microcephalus</i>	7	LC	0.62	พบปานกลาง	ธ.ค., มี.ค., เม.ย.
ปลาสร้อยนกเขา	<i>Osteochilus vittatus</i>	8	-	0.71	พบปานกลาง	ธ.ค., มี.ค., เม.ย.
ปลาตะเพียนทราย	<i>Puntius brevis</i>	1	LC	0.09	พบน้อย	เม.ย.
ปลาชีวควาย	<i>Rasbora argyrotaenia</i>	9	-	0.8	พบน้อย	พ.ย.
ปลาชีวควาย	<i>Rasbora myersi</i>	96	-	8.5	พบบ่อย	ธ.ค., มี.ค., เม.ย., ก.ค.
ปลาชีวแถบเหลือง	<i>Trigonopoma pauciperforatum</i>	1	LC	0.09	พบน้อย	ธ.ค.
ปลาชีวแถบฟ้า	<i>Rasbora einthovenii</i>	20	-	1.77	พบน้อย	ก.ย.
ปลาลวงทอง	<i>Tor tambroides</i>	20	DD	1.77	พบบ่อย	ธ.ค., มี.ค., เม.ย., ก.ย.
Erethistidae						
ปลาแค้หิน	<i>Hara filamentosa</i>	15	-	1.33	พบปานกลาง	มี.ค., ก.ย.
ปลาแค้หิน	<i>Glyptothorax lonah</i>	30	LC	2.66	พบบ่อย	ธ.ค., มี.ค., เม.ย., ก.ค., พ.ย.
ปลาแค้หินสามแถบ	<i>Glyptothorax trilineatus</i>	4	-	0.35	พบน้อย	ก.ย.
Gyrinocheilidae						
ปลาสร้อยน้ำผึ้ง	<i>Gyrinocheilus aymonieri</i>	32	LC	2.83	พบบ่อย	ธ.ค., มี.ค., ก.ค., ก.ย., พ.ย.
Hemiramphidae						
ปลากระทุงเหวแม่ม้าย	<i>Hemiramphus far</i>	16	-	1.42	พบบ่อย	ธ.ค., มี.ค., เม.ย., ก.ค., ก.ย.
Mastacembelidae						
ปลาหลดต่าง	<i>Macrogathus maculatus</i>	2	LC	0.18	พบปานกลาง	มี.ค., เม.ย.
ปลาหลดภูเขา	<i>Macrogathus taeniagaster</i>	5	LC	0.44	พบบ่อย	มี.ค., เม.ย., ก.ค., พ.ย.
ปลากระทิงลาย	<i>Mastacembelus favus</i>	7	LC	0.62	พบปานกลาง	ธ.ค., มี.ค., เม.ย.
Notopteridae						
ปลาจลลาด	<i>Notopterus notopterus</i>	1	LC	0.09	พบน้อย	ธ.ค.
Pristolepididae						
ปลาหมอช้างเหยียบ	<i>Pristolepis fasciata</i>	6	LC	0.53	พบปานกลาง	ธ.ค., มี.ค., เม.ย.
Synbranchidae						
ปลาไหลนา	<i>Monopterus albus</i>	1	LC	0.09	พบน้อย	ก.ค.
Syngnathidae						
ปลาจิ้มฟันจระเข้ล้าธาร	<i>Doryichthys sp.</i>	3	-	0.27	พบน้อย	พ.ย.
Tetraodontidae						
ปลาปักเป้าพรุ	<i>Dichotomyctere fluviatilis</i>	1	LC	0.09	พบน้อย	ธ.ค.

หมายเหตุ: - = ไม่มีข้อมูลบ่งชี้สถานภาพการอนุรักษ์ในระบบ IUCN Red list

DD = Data deficient species (ข้อมูลไม่เพียงพอที่จะประเมิน)

LC = Least concern species (ไม่ถูกคุกคาม)

นอกจากนั้นในตารางที่ 1 พบว่าในพื้นที่บ้านจุฬารักษ์พัฒนา 12 ไม่พบชนิดปลาที่มีสถานภาพการอนุรักษ์ตามบัญชีแดงของสหภาพเพื่อการอนุรักษ์ธรรมชาติ (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 2020) สูงกว่าสถานภาพไม่ถูกคุกคาม (LC) และมีปลาเพียง 36 ชนิดเท่านั้น ที่อยู่ในฐานข้อมูลดังกล่าว ประกอบด้วยสถานภาพไม่ถูกคุกคาม (LC) 32 ชนิด และสถานภาพข้อมูลไม่เพียงพอที่จะประเมิน (DD) 4 ชนิด

4. การอภิปราย

จากการสำรวจพันธุ์ปลาในพื้นที่อำเภอสุคีริน จังหวัดนราธิวาส ระหว่างเดือนเมษายน 2543-ธันวาคม 2544 พบปลาทั้งหมด 37 ชนิด (Lheknim, 2002) แต่เมื่อเปรียบเทียบการศึกษาคั้งนี้พบว่า มีปลาเพียง 10 ชนิดเท่านั้นที่พบเหมือนกับในการศึกษาคั้งนี้ คือ ปลาจิ้งจกดำ (*Balitoropsis zollingeri*) ปลาเลียหินกัมพูชา (*Ceratogarra cambodgiensis*) ปลากั้ง (*Channa gachua*) ปลากระสูบขีด (*Hampala macrolepidota*) ปลากรดเหลือง (*Hemibagrus filamentus*) ปลาหนามหลัง (*Mystacoleucus marginatus*) ปลาจลลาด (*Notopterus notopterus*) ปลาตะเพียนน้ำตึก (*Puntius*

brevis) ปลาชิวควาย (*Rasbora myersi*) และปลากระทุงเหวเมือง (*Xenentodon cancila*) และมีปลา 22 ชนิด ที่เคยสำรวจพบแต่ไม่พบในการศึกษาครั้งนี้ เช่น ปลาชะโอนหิน (*Silurichthys indragiriensis*) ปลาชิวน้ำตกลึกเล็ก (*Rasbora paucisqualis*) ปลาชิวควาย (*Rasbora paviei*) ปลาคูลีแดง (*Pangio filinaris*) และปลาปล้องอ้อยคูลี (*Pangio kuhlii*) เป็นต้น (ตารางที่ 2) ทั้งนี้สาเหตุที่ทำให้ผลการศึกษาดังกล่าวแตกต่างกัน อาจเกิดจากปัจจัยของพื้นที่เก็บรวบรวมตัวอย่างที่ไม่ใช่จุดเดียวกัน เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างแตกต่างกัน โดยในการศึกษาครั้งนี้ไม่ใช้อวนทับตลิ่งขนาดเล็ก และจำนวนครั้งในการสำรวจและเก็บรวบรวมตัวอย่างไม่เท่ากัน เป็นต้น (Seetapan et al., 2020)

และเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาอื่น ๆ เฉพาะในพื้นที่ภาคใต้ ได้แก่ อุทยานแห่งชาติเขาลง (Sutin et al., 2007) พบปลาทั้งหมด 20 ชนิด มีชนิดปลาที่เหมือนกับในการศึกษาครั้งนี้ 7 ชนิด อุทยานแห่งชาติเขานันและเขาลง (Sutin, 2011) พบปลาทั้งหมด 13 ชนิด มีชนิดปลาที่เหมือนกับในการศึกษาครั้งนี้ 5 ชนิด และอุทยานแห่งชาติน้ำตกลึก (Nualsri, 2012) พบปลาทั้งหมด 28 ชนิด มีชนิดปลาที่เหมือนกับในการศึกษาครั้งนี้ 7 ชนิด รายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบชนิดปลาน้ำจืดที่พบในการศึกษานี้กับพื้นที่อื่น ๆ ในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย (A: อ.สุคีริน จ.นราธิวาส (Lheknum, 2002); B: อุทยานแห่งชาติเขาลง (Sutin et al., 2007); C: อุทยานแห่งชาติเขานันและเขาลง (Sutin, 2011); D: อุทยานแห่งชาติน้ำตกลึก (Nualsri, 2012))

ชนิดปลา	การศึกษาครั้งนี้	การศึกษาครั้งนี้			
		A	B	C	D
ปลาเป็นแก้ว(<i>Parambassis siamensis</i>)	/				/
ปลาตัก(<i>Amblyceps mangois</i>)	/	/			
ปลาตุ๊กบอน(<i>Amblyceps variegatum</i>)	/				
ปลาหัวตะกั่ว(<i>Aplocheilus panchax</i>)	/				
ปลาเขยงเขา(<i>Batasio tengana</i>)	/				/
ปลาเขยงภูเขา(<i>Batasio affinis</i>)	/				
ปลาเขยงกล้วย(<i>Batasio fluviatilis</i>)	/				
ปลากดเหลือง(<i>Hemibagrus filamentus</i>)	/	/			
ปลากดดำ(<i>Hemibagrus wyckii</i>)	/				
ปลาเขยงหิน(<i>Leiocassis poeciloptera</i>)	/				
ปลาเขยงหางจุด(<i>Mystus nigriceps</i>)	/				/
ปลาเขยงนวล(<i>Mystus wolffii</i>)	/		/		
ปลาเขยงหิน(<i>Pseudomystus siamensis</i>)	/				/
ปลาเขยงซี่ไก่อ(<i>Pseudomystus leiocanthus</i>)	/				
ปลาจิ้งจกดำ(<i>Balitoropsis zollingeri</i>)	/	/			
ปลาจิ้งจกแดง(<i>Homaloptera ogilviei</i>)	/				
ปลาติดหิน(<i>Homaloptera orthogoniata</i>)	/				
ปลาจิ้งจกใต้(<i>Homaloptera parclitella</i>)	/				
ปลาจิ้งจก(<i>Homaloptera confuzona</i>)	/				
ปลาจิ้งจก(<i>Homalopteroides nebulosus</i>)	/				
ปลาจิ้งจกสมิธ(<i>Homalopteroides smithi</i>)	/				/
ปลาจิ้งจก(<i>Pseudohomaloptera leonardi</i>)	/				

ชนิดปลา	การศึกษาครั้งนี้	การศึกษาครั้งนี้			
		A	B	C	D
ปลาค้อมคัยะ(<i>Nemacheilus masyae</i>)	/		/		
ปลากระทุงเหวเมือง(<i>Xenentodon cancila</i>)	/	/	/		
ปลากระทุงเหว(<i>Xenentodon cancilloides</i>)	/				/
ปลากัดปิ่น(<i>Betta pugnax</i>)	/			/	
ปลากระตู่จุด(<i>Trichopodus trichopterus</i>)	/				/
ปลากริมข้างลาย(<i>Trichopsis vittata</i>)	/				/
ปลากั้ง(<i>Channa gachua</i>)	/	/		/	/
ปลาช่อน(<i>Channa striata</i>)	/	/	/		
ปลากระสง(<i>Channa lucius</i>)	/	/	/		/
ปลาดุก(<i>Clarias batu</i>)	/			/	/
ปลารากกล้วย(<i>Acanthopsois molobriion</i>)	/	/			
ปลารากกล้วย(<i>Acanthopsis dialuzona</i>)	/				
ปลาอีต(<i>Lepidocephalichthys birmanicus</i>)	/				/
ปลาคูลีแดง(<i>Pangio filinaris</i>)	/	/			
ปลาปล้องอ้อยคูลี(<i>Pangio kuhlii</i>)	/	/			
ปลาสายทองพริกไทย(<i>Pangio piperata</i>)	/	/			
ปลาหมอ(<i>Yasuhikotakia morleti</i>)	/	/			
ปลาหางบัว(<i>Barbichthys laevis</i>)	/	/			
ปลาตะเพียนน้ำตกลึก(<i>Barbodes binotatus</i>)	/		/	/	/
ปลาตะเพียนน้ำตกลึก(<i>Barbodes rhombeus</i>)	/		/	/	/
ปลาเสียนหิน(<i>Ceratogarra fasciacauda</i>)	/				
ปลาเสียนหินกัมพูชา(<i>Ceratogarra cambodgiensis</i>)	/	/	/	/	/
ปลาจิ้งจอก(<i>Crossocheilus oblongus</i>)	/	/		/	
ปลาเล็บมือนาง(<i>Crossocheilus reticulatus</i>)	/	/			
ปลาไส้ตันตาแดง(<i>Cyclocheilichthys apogon</i>)	/	/			
ปลาชิวไบไฟ(<i>Danio dangila</i>)	/	/			
ปลาชิวไบไฟ(<i>Devario aequipinnatus</i>)	/		/		/
ปลาชิวไบไฟยักษ์(<i>Devario regina</i>)	/	/	/	/	/
ปลาชิวหนวดยาว(<i>Esomus metallicus</i>)	/	/			
ปลากระสุนชืด(<i>Hampala macrolepidota</i>)	/	/			
ปลาซ่า(<i>Labiobarbus leptocheilus</i>)	/	/			
ปลาสร้อยลูกบัว(<i>Lobocheilus rhabdoura</i>)	/	/			
ปลาชิวอ่าว(<i>Luciosoma bleekeri</i>)	/	/			
ปลาหนามหลัง(<i>Mystacoleucus marginatus</i>)	/	/			/
ปลาทุงง(<i>Neolissochilus dukai</i>)	/	/			
ปลาพลวง(<i>Neolissochilus soroides</i>)	/	/			/
ปลาพลวงหิน(<i>Neolissochilus sumatranus</i>)	/	/			
ปลาพลวงหิน(<i>Neolissochilus stracheyi</i>)	/	/			/
ปลาพลวงทอง (<i>Tor tambroides</i>)	/	/	/		/
ปลาร่องไม้ตบ(<i>Osteochilus microcephalus</i>)	/	/			/
ปลาสร้อยนกเขา(<i>Osteochilus vittatus</i>)	/	/			/
ปลาเสือข้างลาย(<i>Puntigrus partipentazona</i>)	/	/	/		/
ปลาตะเพียนทราย(<i>Puntius brevis</i>)	/	/			
ปลาชิวควาย(<i>Rasbora myersi</i>)	/	/			/
ปลาชิวน้ำตกลึก(<i>Rasbora paucisqualis</i>)	/	/			/
ปลาชิวควาย(<i>Rasbora paviei</i>)	/	/			/
ปลาชิวควาย(<i>Rasbora argyrotaenia</i>)	/	/			
ปลาชิวควายทอง(<i>Rasbora einthovenii</i>)	/	/			
ปลาชิวควาย(<i>Rasbora myersi</i>)	/	/			
ปลาชิวกางกรไร(<i>Rasbora trilineata</i>)	/	/			/
ปลาอีก้อง(<i>Striuntius lateristriga</i>)	/	/	/	/	/
ปลาชิวแถบเหลือง(<i>Trigonopoma pauciperforatum</i>)	/	/			
ปลาแค้หิน(<i>Glyptothorax lonah</i>)	/	/			
ปลาแค้หินสามแถบ(<i>Glyptothorax trilineatus</i>)	/	/			

ชนิดปลา	การศึกษา ครั้งนี้				
		A	B	C	D
ปลาแค้หิน(<i>Hara filamentosa</i>)	/				
ปลาสร้อยน้ำผึ้ง(<i>Gyrinocheilus aymonieri</i>)	/	/	/		
ปลากระทุงเหวแม่ม้าย(<i>Hemiramphus far</i>)	/				
ปลาหลดภูเขา (<i>Macrogathus circumcinctus</i>)					/
ปลาหลดต่าง(<i>Macrogathus maculatus</i>)	/				
ปลาหลดภูเขา(<i>Macrogathus taeniagaster</i>)	/				
ปลากระทิง(<i>Mastacembelus armatus</i>)		/			/
ปลาหลดจุด(<i>Macrogathus aculeatus</i>)		/			
ปลากระทิงลาย(<i>Mastacembelus favus</i>)	/				
ปลาตุ้มซี(<i>Nandus nebulosus</i>)					/
ปลาฉลาม(<i>Notopterus notopterus</i>)	/	/			
ปลาหมอช้างเหยียบ(<i>Pristolepis fasciata</i>)	/				
ปลาชะโอน(<i>Ompok bimaculatus</i>)					/
ปลานง(<i>Pterocryptis berdmorei</i>)					/
ปลาชะโอนหิน(<i>Silurichthys indragiriensis</i>)		/			
ปลาแค้ดหิน(<i>Glyptothorax major</i>)		/			
ปลาไหลนา(<i>Monopterus albus</i>)	/				
ปลาจิ้มฟันจระเข้ล้าธาร(<i>Doryichthys sp.</i>)	/				
ปลาจิ้มฟันจระเข้แคระ (<i>Doryichthys martensii</i>)		/			
ปลากระทิง(<i>Mastacembelus unicolor</i>)		/			
ปลาปักเป้าพรุ(<i>Dichotomycetere fluviatilis</i>)	/				

จากตารางที่ 2 ปลาที่พบในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จะอาศัยตามพื้นที่ท้องน้ำของลำธารที่เป็นต้นน้ำ ที่มีลักษณะเป็นแนวหินกรวดขวางทางน้ำกระแสไหลเชี่ยวเฉพาะในวันที่ฝนตกหนักในช่วงหน้าฝน (Kottelat, 1990; Rainboth, 1996; Lothongkham & Musikasinthorn, 2006) น้ำใสมากโดยเฉพาะหน้าแล้ง พื้นที่ท้องน้ำเป็นหินกรวด ระดับน้ำไม่ลึกมาก และปลาเหล่านี้ยังจัดว่าเป็นกลุ่มปลาที่บ่งบอกถึงคุณภาพน้ำ (indicator species) ของคลองทั้งสามสายในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ ซึ่งเป็นต้นน้ำของแม่น้ำสายบุรีได้เป็นอย่างดีว่ามีคุณภาพที่ดี เหมือนกับรายงานในพื้นที่ต้นน้ำในอุทยานแห่งชาติน้ำตกสี่ขีด (Nualsri, 2012) และอุทยานแห่งชาติเขาหลวง (Sutin et al., 2007) จังหวัดนครศรีธรรมราช อุทยานแห่งชาติเขาคิชฌกูฏ จังหวัดจันทบุรี (Soonthornkit, Noykongka, & Sungthong, 2010) และแม่น้ำจิม จังหวัดพะเยา (Seetapan et al., 2020) เป็นต้น

ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าดัชนีความหลากหลายของสิ่งมีชีวิต โดยมีค่าเท่ากับ 2.84 แสดงถึงความหลากหลายของสิ่งมีชีวิตในระดับปานกลาง (Magurran, 2004) ในแต่ละเดือนที่เก็บตัวอย่างมีค่าดัชนีความหลากหลายของสิ่งมีชีวิตระหว่าง 1.34–2.43 แสดงว่าคลองกือชา คลองไอร์ตุงอ และคลองไอร์ตากอ ยังคงมี

ความเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของปลาและสัตว์น้ำอื่น ๆ (Tudorance, Green, & Huebner, 1975; Soe-been & Musigatham, 2008) ส่งผลให้ดัชนีความสม่ำเสมอซึ่งเป็นค่าที่อธิบายการกระจายจำนวนของชนิดปลาแต่ละชนิดที่พบตลอดระยะเวลาที่ศึกษามีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.73 โดยสามารถอธิบายได้ว่าชนิดปลาส่วนใหญ่ที่พบในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีจำนวนใกล้เคียงกัน และมีผลให้ค่าดัชนีความมากชนิดซึ่งเป็นค่าที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชนิดปลาทั้งหมดที่พบกับจำนวนตัวปลาทั้งหมดที่ได้จากการสำรวจ โดยในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีค่าเท่ากับ 6.83

ความชุกชุมสัมพัทธ์ เป็นการวิเคราะห์เพื่ออธิบายความมากน้อยของปลาแต่ละชนิดที่พบ ในการศึกษาค้นคว้าพบว่าปลาที่พบความชุกชุมสัมพัทธ์สูงสุดคือ ปลาเลียหินกัมพูชา (*Ceratogarra cambodgiensis*) รองลงมาคือ ปลาเลียหิน(*Ceratogarra fasciacauda*) และปลาสร้อยลูกบัว (*Lobocheilos rhabdoura*) โดยปลาเหล่านี้เป็นปลาที่เป็นพบในแหล่งน้ำบริเวณพื้นที่ป่าต้นน้ำ เนื่องจากมีการปรับตัวให้เหมาะสมกับแหล่งอาศัยที่เป็นเกาะแก่ง มีโขดหิน และน้ำไหลแรง (Suvarnaksha, 2015)

ความชุกชุมหรือความถี่ของการปรากฏ เป็นการวิเคราะห์เพื่ออธิบายความบ่อยครั้งของปลาแต่ละชนิดที่ปรากฏ ในการศึกษาค้นคว้าแบ่งกลุ่มความชุกชุมหรือความถี่ของการปรากฏของปลาออกได้เป็น 4 กลุ่ม โดยเฉพาะชนิดปลาในกลุ่มพบน้อย ได้แก่ ปลาตุ้มซีหรือปลาตุ้ม (*Amblyceps variegatum*) ปลากระทุงเหว (*Xenentodon cancila*) ปลาหางบัว (*Barbichthys laevis*) ปลาตะเพียนทราย (*Puntius brevis*) ปลาชีว แถบ ฟ้า (*Rasbora einthovenii*) ปลาชีวควาย (*Rasbora argyrotaenia*) และปลาแค้หินสามแถบ (*Glyptothorax trilineatus*) เป็นต้น เนื่องจากเป็นปลาที่มีพฤติกรรมชอบอาศัยตามแก่งในลำธารและคลองที่มีน้ำไหลแรง และน้ำมีคุณภาพดี บางชนิดหายไประยะรวดเร็ว บางชนิดหากินตามลำพัง บางชนิดพบเห็นได้บ้างแต่มีจำนวนไม่มากและจับได้ไม่บ่อย บางชนิดมีขนาดเล็ก และมีปลาบางชนิดเป็นกลุ่มปลาที่พบได้ในแม่น้ำลำคลองทั่วไปและในพรุ

มีปลาหลายชนิดที่พบในการศึกษาค้นคว้านี้เป็นปลาที่เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของป่าต้นน้ำได้เป็นอย่างดี เนื่องจากการปรับตัวให้เหมาะสมกับแหล่งอาศัยที่เป็นเกาะแก่ง มีโขดหิน น้ำไหลแรง รวมทั้งลักษณะทางชีววิทยาที่จำเพาะ โดย Suvarnaksha (2015) ได้อธิบายการปรับตัวของ

ปลาต้นน้ำเพื่อให้อยู่รอดในสภาพพื้นที่แบบต้นน้ำไว้หลายประเด็น ซึ่งสอดคล้องกับชนิดปลาที่พบในการศึกษาค้างนี้ เช่น การเปลี่ยนแปลงก้นครีบเดี่ยวของครีบคู่ให้มีจำนวนมาก เพื่อยึดเกาะกับก้อนหิน เช่น ปลาจิ้งจก (*Homaloptera confuzona*) ปลาจิ้งจกใต้ (*Homaloptera parclitella*) และปลาจิ้งจกดำ (*Homaloptera zollingeri*) เปลี่ยนแปลงหนวอกเพื่อการยึดเกาะ เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสให้สามารถยึดเกาะได้ดี เช่น ปลาแค้หิน (*Hara filamentosa*) ปลาแค้หิน (*Glyptothorax lonah*) และปลาแค้หินสามแถบ (*Glyptothorax trilineatus*) และมีการดัดแปลงปากหรือริมฝีปากเพื่อให้สามารถยึดเกาะได้น้ำได้ในขณะกินอาหาร เช่น ปลาเลียหินกัมพูชา (*Ceratogarra cambodgiensis*) ปลาเลียหิน (*Ceratogarra fasciacauda*) และปลาสร้อยน้ำผึ้ง (*Gyrinocheilus aymonieri*) ลดรูปขนาดกระเพาะลมพบในกลุ่มปลาจิ้งจก ปรับตัวให้รูปร่างเปรียวเป็นการปรับรูปทรงให้ลู่ตามหลักอากาศพลศาสตร์ โดยการปรับตัวให้แบนราบในส่วนท้องและสันหลังโค้ง เพื่อลดแรงต้านน้ำพบในกลุ่มปลาจิ้งจก และปรับตัวโดยการหลบไปอาศัยในแอ่งน้ำที่ลึกกว่า เนื่องจากกระแสไหลแรง แต่มีความลึกและบริเวณนั้นมักมีโพรงหินหรือไม้ให้หลบซ่อนตัว เช่น ปลาพลวงทอง (*Tor tambroides*) เป็นต้น

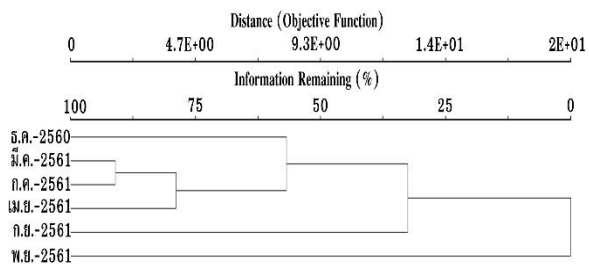
ปลาที่พบจำนวนมาก เช่น ปลาเลียหินกัมพูชา (*Ceratogarra cambodgiensis*) ปลาเลียหิน (*Ceratogarra fasciacauda*) และปลาสร้อยลูกบัว (*Lobocheilus rhabdoura*) ซึ่งเป็นปลาที่พบทุกครั้งที่เก็บรวบรวมตัวอย่าง และเป็นปลาที่คนในพื้นที่นิยมจับมาบริโภค อีกทั้งยังเป็นอาหารพื้นถิ่นที่กลุ่มวิสาหกิจชุมชนการท่องเที่ยวโดยชุมชนบ้านจุฬาภรณ์พัฒนา 12 นำมาประกอบอาหารให้นักท่องเที่ยวบริโภค ปลาเหล่านี้มีศักยภาพที่จะพัฒนาต่อเป็นแหล่งโปรตีนราคาถูกให้กับชุมชนหากสามารถเพาะพันธุ์ได้ และส่งเสริมให้ชุมชนในพื้นที่เลี้ยง หรือมีการวางแผนเพาะพันธุ์และปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ รวมทั้งส่งเสริมให้ชุมชนกำหนดพื้นที่เพื่อเป็นพื้นที่อนุรักษ์ทรัพยากรสัตว์น้ำเพื่อให้ในอนาคตชุมชนมีสัตว์น้ำสำหรับจับบริโภคตลอดปี ดังนั้นหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ เช่น องค์การบริหารส่วนท้องถิ่น สำนักงานการท่องเที่ยวและกีฬาจังหวัดนราธิวาส ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืดนราธิวาส สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดนราธิวาส และ

สถาบันการศึกษาในพื้นที่ เป็นต้น ควรเข้ามามีส่วนร่วมในการจัดการพื้นที่และนำข้อมูลเหล่านี้เป็นฐานในการพัฒนาและต่อยอดให้เกิดประโยชน์สูงสุดกับชุมชนบ้านจุฬาภรณ์พัฒนา 12 ซึ่งเป็นชุมชนท่องเที่ยวที่กำลังได้รับความนิยมและเป็นชุมชนต้นน้ำในลุ่มน้ำสาบายบุรี สอดคล้องกับการศึกษาที่แม่น้ำจิม ตำบลผาซางน้อย อำเภอปาง จังหวัดพะเยา โดยข้อมูลที่ได้สามารถนำมาใช้ในการวางแผนจัดการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติภายในพื้นที่ รวมถึงให้หน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น องค์การบริหารส่วนท้องถิ่น นำข้อมูลไปใช้เป็นเครื่องมือในการวางแผนบริหารจัดการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติในท้องถิ่น หรือนำไปต่อยอดในการเพาะเลี้ยงปลาท้องถิ่นบางชนิดที่มีศักยภาพเพื่อสร้างอาชีพเป็นทางเลือกให้กับชุมชน (Seetapan et al., 2020)

นอกจากนั้นข้อมูลจากการศึกษาค้างนี้สามารถนำไปใช้ในการประยุกต์ใช้ปลาเป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมทางน้ำ (Fish-IBI) เพื่อประเมินความเสื่อมโทรมของคลองกือชา คลองไอร่ตุงอ และคลองไอร่ตากอ หรือแม่น้ำสาบายบุรีจากกิจกรรมของผู้คนในอนาคตได้ ซึ่งในปัจจุบันมีรายงานผลการศึกษาดังกล่าวที่หนองหาร จังหวัดสกลนคร และลุ่มน้ำปิง เป็นต้น (Rayan & Ngamsnae, 2020; Pholdee, 2021) โดยมีการกำหนดตัวแปรชีวภาพที่ใช้ลักษณะของประชาคมปลาเป็นตัวชี้วัดแบ่งกลุ่มเมตริกของกลุ่มชนิดปลาสำหรับการประเมินดัชนีความสมบูรณ์ทางชีวภาพของพื้นที่ชุ่มน้ำ คือ จำนวนชนิดปลาทั้งหมด จำนวนชนิดปลาที่ชอบอาศัยพื้นที่ตื้นน้ำก้น สัตว์หน้าดินเป็นอาหาร จำนวนชนิดปลาที่ชอบอาศัยกลางน้ำ จำนวนชนิดปลาที่มีอายุยาวนาน จำนวนชนิดปลาที่มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลง ร้อยละของจำนวนปลาทำมีความทนทาน ร้อยละของจำนวนปลาที่กินทั้งพืชและสัตว์เป็นอาหาร ร้อยละของจำนวนกลุ่มปลา ตะเพียนที่กินสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังเป็นอาหาร ร้อยละจำนวนตัวของปลาที่เป็นผู้ล่า จำนวนตัวปลาทั้งหมดของตัวอย่าง ร้อยละของจำนวนปลาลูกผสม และร้อยละของจำนวนปลาที่แสดงอาการป่วยหรือผิดปกติ และจากนั้นจะมีระบบการกำหนดคะแนนของ เมตริก โดยค่าคะแนนที่ให้จะอยู่ระหว่างสถานะเสื่อมโทรม 0 คะแนน และสถานะดีมากคือ 100 คะแนน หลังจากได้คะแนนของเมตริกทั้งหมดแล้วจะนำมารวมกันเป็นค่าดัชนีความสมบูรณ์ทางชีวภาพ (IBI

Score) เพื่อใช้ในการประเมินสถานภาพแหล่งน้ำต่อไป (Rayan & Ngamsnae, 2018)

การวิเคราะห์โดยใช้วิธี Hierarchical Cluster Analysis เพื่อการจัดกลุ่ม โดยใช้การรวม Cluster ด้วยวิธี Ward'S Method พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน ชนิด และเดือนที่เก็บรวบรวมตัวอย่างปลาน้ำจืด ถูกแบ่ง ออกเป็น 5 กลุ่ม โดยกลุ่มที่มีความคล้ายคลึงกันมากที่สุด ประกอบด้วยเดือนมีนาคม 2561 กับ เดือนกรกฎาคม 2651 มีความคล้ายคลึงมากถึง 91.10 % เนื่องจาก ชนิดปลาที่รวบรวมได้ในเดือนกรกฎาคม 2561 มีชนิดซ้ำ กับเดือนมีนาคม 2561 ถึง 14 ชนิด จาก 16 ชนิด ที่ รวบรวมได้ ส่วนเดือนเมษายน 2561 และเดือนธันวาคม 2560 มีความคล้ายคลึงกับกลุ่มเดือนมีนาคมและ กรกฎาคม 2561 78.87 % และ 56.80 % ตามลำดับ ในขณะที่เดือนพฤศจิกายน 2561 แตกต่างจากเดือนอื่นๆ อย่างชัดเจน 100 % (รูปที่ 5) เนื่องจากชนิดปลาที่ รวบรวมได้ในเดือนนี้มี 21 ชนิด แต่มีชนิดซ้ำกับเดือน อื่นๆ อยู่ระหว่าง 6-9 ชนิด และจำนวนภายในชนิดเด่นที่ รวบรวมได้มีความแตกต่างค่อนข้างมาก อีกทั้งในเดือนนี้ มีจำนวนชนิดปลาที่พบเพียงครั้งเดียวของการเก็บรวบรวม ตัวอย่างสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเดือนอื่นๆ 5 ชนิด คือ ปลาอุกบอน ปลาตัก (*Amblyceps variegatum*) ปลา กระทุงเหว (*Xenentodon cancila*) ปลาชีวกวาย (*Rasbora argyrotaenia*) ปลาชีว แถบ เห ลี อ ง (*Trigonopoma pauciperforatum*) และปลาจิ้มฟันจระเข้ ลำธาร (*Doryichthys sp.*)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิด จำนวน และเดือนที่เก็บรวบรวมตัวอย่างปลาน้ำจืด ในพื้นที่บ้านจุฬารณพัฒนา 12 ต.สุคีริน อ.สุคีริน จ.นราธิวาส โดยวิธี Cluster Analysis

5. บทสรุป

พบปลาทั้งหมด 17 วงศ์ 49 ชนิด โดยวงศ์ที่พบมากที่สุด คือ Cyprinidae 21 ชนิด ค่าดัชนีความหลากหลาย ชนิด เท่ากับ 2.84 ค่าดัชนีความสม่ำเสมอ เท่ากับ 0.73 ค่าดัชนีความมากชนิด เท่ากับ 6.83 ปลาที่มีค่าความชุกชุมสัมพัทธ์สูงที่สุด คือ ปลาเลียหิน (*Ceratogarra*

cambodgiensis) รองลงมา คือ ปลาเลียหิน (*Ceratogarra fasciacauda*) ปลาสร้อยลูกบัว (*Lobocheilos rhabdoura*) ปลาชีวกวาย (*Rasbora myersi*) และปลาซ่า (*Labiobarbus leptocheilus*) ปลาที่พบบ่อยมาก คือ ปลาเลียหินกัมพูชา (*Ceratogarra cambodgiensis*) ปลาสร้อยลูกบัว (*Lobocheilos rhabdoura*) ปลากระสูบขีด (*Hampala macrolepidota*) และปลาหนามหลัง (*Mystacoleucus marginatus*) เป็นต้น และจากการศึกษาครั้งนี้มีปลาเพียง 10 ชนิดเท่านั้น ที่พบเหมือนกับรายงานการศึกษาของ Lheknim (2002) ระหว่างเดือนเมษายน 2543-ธันวาคม 2544 เฉพาะในพื้นที่อำเภอสุคีริน จังหวัดนราธิวาส

ระบบนิเวศต้นน้ำนอกจากจะมีความสำคัญทางเศรษฐกิจสูงแล้ว ยังเป็นอีกระบบนิเวศที่กำลังถูกคุกคามจากการใช้ประโยชน์และพัฒนาที่เกินขอบเขตจากความต้องการของมนุษย์ที่สูงขึ้นตามการขยายตัวของประชากร ดังนั้นการคุกคามต่าง ๆ ต่อความหลากหลายทางชีวภาพในระบบนิเวศต้นน้ำ เช่น การสูญเสียต้นน้ำจากการตัดไม้ และการบุกรุกป่าของคน การสร้างฝายและเขื่อน มลภาวะจากบ้านเรือนและอุตสาหกรรม และการจับสัตว์น้ำขึ้นมาใช้ประโยชน์มากเกินไป (Suvamaraksha, 2015) จะมีผลทั้งทางตรงและทางอ้อมในการทำลายทรัพยากรปลาของบริเวณต้นน้ำไปด้วยโดยหลีกเลี่ยงไม่ได้ เนื่องจากปลาในพื้นที่ป่าต้นน้ำ หลายชนิดมีความจำเพาะและพบได้เฉพาะในระบบนิเวศแบบนี้เท่านั้น เนื่องจากมีวิวัฒนาการและการปรับตัว ในด้านต่างๆ เช่น รูปร่าง อวัยวะพิเศษ และการกินอาหาร เป็นต้น ให้มีความจำเพาะกับระบบนิเวศและแหล่งอาหารแต่ยังคงดำรงเผ่าพันธุ์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากโครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี (อพ.สธ.) ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย และขอขอบคุณชาวบ้านในพื้นที่ที่คอยอำนวยความสะดวกในการเก็บรวบรวมตัวอย่าง

เอกสารอ้างอิง

- International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. (2020). *The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2020-1*. Retrieved May 20, 2020 from <https://www.iucnredlist.org/>
- Kottelat, M. (1990). *Indochinese Nemacheilines. A Revision of Nemacheiline Loaches (Pisces: Cypriniformes) of Thailand, Burma, Laos, Cambodia and southern Viet Nam (1st ed.)*. Munchen: Verlag Dr. Friedrich Pfeil.
- Kulabong, S., & Kunlapapuk, S. (2011). Checklist of freshwater fishes in the Chao Phraya River, Nontaburi province. In *proceedings of 49th Kasetsart University Annual Conference: Fisheries*. pp. 463-471. Bangkok: Kasetsart University. (in Thai)
- Lheknim, V. (1999). *A survey of freshwater fishes in upper eastern basin of southern Thailand*, Prince of Songkla University, Songkla, Thailand. (in Thai)
- Lheknim, V. (2002). *A survey of freshwater fishes in lower eastern river basin and Pattani river basin of Southern Thailand*. Songkla: Prince of Songkla University. (in Thai)
- Lokitsathaporn, A., & Sinlapachai, W. (2008). Abundance and diversity of benthic fauna in Phra Ong Chao Chaiyanuchit Canal. In *28th ed. Bangkok: Coastal Research and Inland Fisheries Development Center Inland Fisheries Research and Development Office*, Fisheries Department. pp. 1-84. (in Thai)
- Lothongkham, A., & Kullama, P. (2011). Fish diversity in Yao River (A Tributary of the Upper Nan River Basin) Nan Province, Northern Thailand. In *proceedings of 49th Kasetsart University Annual Conference: Fisheries*, pp. 454-462. Bangkok: Kasetsart University. (in Thai)
- Lothongkham, A., & Musikasinthorn, P. (2005). First record of the cyprinid fish, *Onychostoma gerlachi* (Cypriniformes: Cyprinidae) from the Nan river basin of the Chao Phraya river system, Northern Thailand. *The Natural History Bulletin of the Siam Society*, 53(2), 237-43.
- Lothongkham, A., Changsarn, J., & Chaichorfa, A. (2009). Survey on diversity of fish species in Hang River, the tributary of upper Nan river, northern Thailand. In *proceedings of 47th Kasetsart University Annual Conference: Fisheries*. pp. 517-524. Bangkok: Kasetsart University. (in Thai)
- Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological diversity*, 1st ed., Oxford: Blackwell Publishing.
- Muang-ngern, S., Sanganreung, R., & Seetapan, K. (2007). Preliminary survey on fish species diversity in Dio Pha Chang Wildlife Sanctuary, Phayao province. In *proceedings of 45th Kasetsart University Annual Conference: Fisheries*. pp. 688-695. Bangkok: Kasetsart University. (in Thai)
- Nualsri, S. (2012). *Study on water quality and freshwater fishes at sikiet waterfall national park Nakhon si thammarat province* [Master's thesis]. Nakhon Si Thammarat Rajabhat University. (in Thai)
- Pettingill, O. S. (1961). *A laboratory and field manual of ornithology*, 3rd ed., United States: Bures Publishing Company.
- Pholdee, T. (2021). *Application of fish-based index of biotic integrity (F-IBI) for aquatic resources environment in Ping River Basin* [Doctoral's thesis]. Maejo University. (in Thai)
- Rainboth, W. J. (1996). *FAO species identification field guide for fisheries purpose: Fishes of Cambodian Mekong*, 1st ed., Rome: FAO.
- Ratmuangkhwang, S. (2014). *Freshwater fishes of Ranong*, 1st ed., Bangkok: Kasetsart University. (in Thai)
- Rayan, S., & Ngamsnae, P. (2018). Fish-based index of biological integrity (IBI) for freshwater ecosystems. *Burapha science journal*, 23(2), 928-943. (in Thai)
- Rayan, S., & Ngamsnae, P. (2020). Application of Fish Index of Biotic Integrity (Fish-IBI) for Quality Evaluation of Nong Han Wetland. *Rajamangala University of Technology Tawan-Ok Research Journal*, 13(1), 59-70. (in Thai)
- Rayan, S., Ngamsnae, P., & Ngoichansri, S. (2014). Fish community distribution in Nong Han, Sakon Nakhon province. *Khon Kaen Agr. J.*, 42(1), 762-767. (in Thai)
- Saenjundaeng, P. (2014). *Encyclopedia of freshwater fish of Thailand*, 1st ed., Khon Kaen: Klungnana Vitthaya press. (in Thai)
- Seetapan, K., Kaewtip, J., Supawan, C., Wongwut, A., Saensupa, I., Tanitsorn, J., Uppaphong, S., & Pinmongkhogul, S. (2020). Diversity of fish species in Ngim River, Phayao Province. *Burapha science journal*, 25(1), 270-284. (in Thai)
- Shannon, C. E. (1949). Mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 379-423.
- Soe-been, S., & Musigathum, P. (2008). Structure and distribution of fish community in Kwan Phayao, Phayao province. In *Technical Paper*, 3rd ed., pp. 1-54. Phayao: Phayao Coastal Research and Inland Fisheries Development Center Inland Fisheries Research and Development Office, Fisheries Department. (in Thai)
- Soonthornkit, Y., Noykongka, W., & Sungthong, S. (2010). Water quality and freshwater fishes of Karthing waterfall Khao Kitchagoot nation park, Chanthaburi province. *Chanthaburi: Rajamangala University of Technology Tawan-ok*. (in Thai)
- Sutin, S. (2011). *Habitat and diversity of freshwater fishes found in Khao Nan National Park and Khao Luang National Park, Nakhon Si Thammarat Province* [Doctoral's thesis]. Walailak University. (in Thai)
- Sutin, S., Jaroensutasinee, M., & Jaroensutasinee, K. (2007). Water quality and freshwater fish diversity at Khao Luang National Park, Thailand. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 1(12): 112-115.
- Suvararaksha, A. (2015). Upstream fish adaptation. *Maejo vision*, 16(5): 74-80. (in Thai)
- Tudorancea, C., Green, R. H., & Huebner, J. (1979). Structure, dynamics and production of the benthic fauna in Lake Manitoba. *Hydrobiologia*, 64, 59-95.
- Vidhayanon, C., Karnasuta, J., & Nabhitabhata, J. (1997). *Diversity of freshwater fishes in Thailand*, 1st ed., Bangkok: Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. (in Thai)
- Wongroj, S. (2004). *A taxonomic study on the freshwater fishes in the eastern area of Bangkok* [Master's thesis]. Srinakharinwirot University. (in Thai)

ผลของการทำลายการพักตัวและวัสดุเพาะต่อการเจริญของเมล็ดเหียงสีดำ
Effects of Breaking Dormancy and Nursery Materials on the Growth of Black
Seed Riang (*Parkia timoriana* (DC.) Merr.)

กนกกาญจน์ ชูสงศ์¹ วรางคณา เรียนสุทธิ^{2*}

Kanokkarn Choosong¹ Warangkha Riansut^{2*}

¹สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยทักษิณ อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง ประเทศไทย

²สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยทักษิณ อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง ประเทศไทย

¹Department of Biology, Faculty of Science and Digital Innovation, Thaksin University, Pa Phayom, Phattalung, Thailand

²Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science and Digital Innovation, Thaksin University, Pa Phayom, Phattalung, Thailand

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อศึกษาผลของการทำลายการพักตัวโดยวิธีการตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะต่อการเจริญของเมล็ดเหียงสีดำ วางแผนการทดลองแบบ 3×2 แฟกทอเรียลชนิดสุ่มสมบูรณ์ จำนวน 2 ซ้ำ ซึ่งการตัดปลายเมล็ดที่ศึกษามี 3 ระยะ คือ 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร และวัสดุเพาะ 2 ชนิด คือ ทรายและผ้าฝ้าย เก็บข้อมูลร้อยละการงอก ความยาวราก และน้ำหนักสด ผลการศึกษาพบว่าการทำลายการพักตัวโดยวิธีการตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะมีอิทธิพลร่วมกัน ส่งผลให้ทั้งร้อยละการงอก ความยาวราก และน้ำหนักสดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยวิธีการทำลายการพักตัวด้วยการตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 2 มิลลิเมตร และใช้วัสดุเพาะ คือ ทราย ให้ค่าเฉลี่ยของร้อยละการงอก ความยาวราก และน้ำหนักสดสูงที่สุด

คำสำคัญ: การทำลายการพักตัว, เมล็ดเหียง, การตัดปลายเมล็ด, วัสดุเพาะ

ABSTRACT

The objective of this study was to study the effects of breaking dormancy by clipping the end of the seed and nursery materials on the growth of black seed Riang (*Parkia timoriana* (DC.) Merr.). The experiments were conducted by a 3×2 factorial experiment using a completely randomized design with two replications. There were three level of clipping seed: 1, 1.5, and 2 millimeters. Two types of nursery materials were used: sand and cotton. Growth data were collected, including the percentage of germination, root length, and fresh weight. The result demonstrated that there was a significant difference ($p < 0.05$) in the interaction between breaking dormancy and nursery materials on the percentage of germination, root length, and fresh weight. The breaking dormancy by clipping the end of the seed at 2 millimeters and the nursery material by sand gave the highest mean percentage of germination, root length, and fresh weight.

KEYWORDS: breaking dormancy, *Parkia timoriana* (DC.) Merr., clipping seed, nursery materials

*Corresponding Author: warang27@gmail.com

Received: 23/11/2021; Revised: 29/06/2023; Accepted: 09/07/2024

1. บทนำ

เหรียญ มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Parkia timoriana* (DC.) Merr. อยู่ในวงศ์ Fabaceae เป็นพืชเฉพาะถิ่นของภาคใต้ จัดเป็นพืชยืนต้นขนาดใหญ่ ลักษณะใกล้เคียงกับสะตอ นิยมเรียกหน่อเหรียญหรือลูกเหรียญ มีลักษณะคล้ายกับถั่วอก แต่หัวจะโต มีขนาดใหญ่กว่าและมีสีเขียว มีรสมัน กลิ่นฉุน และราคาค่อนข้างสูง จึงจัดเป็นพืชที่สำคัญทางเศรษฐกิจของภาคใต้ ผลผลิตหลักที่ได้จากต้นเหรียญ คือ เมล็ดภายในฝัก ฝักเหรียญหนึ่งฝักมีเมล็ดประมาณ 15 – 20 เมล็ด เมื่อสุกจัดฝักจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแก่ปนดำ (Apirattanusorn, 2013) หน่อเหรียญเกิดจากการนำ เมล็ดเหรียญของฝักแก่ไปเพาะในกระบะทรายเพื่อให้เมล็ด งอกรากและมีใบเลี้ยงโผล่ขึ้นมาเหมือนกับถั่วอก ใช้ระยะเวลาในการเพาะประมาณ 4 – 7 วัน จึงจะสามารถ นำมารับประทานได้ โดยรับประทานเป็นผักสดได้ เช่นเดียวกับสะตอ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาประกอบ อาหารได้หลายเมนูไม่ว่าจะผัดหรือแกง (MedThai, 2017) โดยเหรียญจัดอยู่ในพืชวงศ์ถั่ว มีการพักตัวแบบ เมล็ดแข็งและไม่ยอมให้น้ำซึมผ่านเข้าไปในเมล็ด ทำให้มี การพักตัวนาน จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิธีการทำลายการ พักตัวและกระบวนการช่วยให้น้ำซึมผ่านเข้าไปในเมล็ด ได้ง่ายขึ้น ซึ่งการตัดปลายเมล็ดเป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้เมล็ด เหรียญงอกได้ (Sawatdikam, 2009) รวมถึงควรศึกษา เกี่ยวกับวัสดุเพาะของเมล็ดเหรียญ เนื่องจากยังไม่มี งานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับวัสดุเพาะ มีเพียงภูมิปัญญา ชาวบ้านที่บอกต่อกันมาว่าควรเพาะเมล็ดเหรียญในกระบะ ทราย จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่า Sawatdikam (2009) ได้ศึกษาการแก้การพักตัวของเมล็ด เหรียญ 2 ชนิด คือ เมล็ดสีดำและสีน้ำตาล โดยการตัด ปลายเมล็ด 4 ระยะ คือ 1, 2, 3 และ 4 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับการไม่ตัดปลายเมล็ด เพาะเป็นระยะเวลา 14 วัน ในตู้ควบคุมการเจริญแบบอุณหภูมิสถับ 20 – 30 องศาเซลเซียส วัดค่าร้อยละการงอก ความเร็วในการงอก ความยาวยอด ความยาวราก น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง ผลการศึกษาพบว่า ระยะการตัดปลายเมล็ดที่ทำให้ เมล็ดเหรียญมีร้อยละการงอก มีคุณภาพ และมีความ แข็งแรงสูงที่สุดไม่ว่าจะเป็นความเร็วในการงอก ความยาว ยอด ความยาวราก น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง คือ ระยะ 2 มิลลิเมตร มีร้อยละการงอก 79 และ 62 ของเมล็ดเหรียญ

สีดำและสีน้ำตาล ตามลำดับ รองลงมาคือ ระยะ 1, 3 และ 4 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนเมล็ดเหรียญที่ไม่ตัดปลาย เมล็ดเมื่อนำไปเพาะ พบว่า เมล็ดเหรียญทั้งสองชนิดนั้น ไม่สามารถงอกได้ Charoenkul (2020) ได้ศึกษาผลของ การตัดปลายเมล็ด 3 ระยะ คือ 1, 2 และ 2.5 มิลลิเมตร และระยะเวลาการแช่เมล็ดในน้ำ คือ 12 และ 24 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับการไม่แช่น้ำ เพาะเป็นระยะเวลา 7 วัน โดยใช้ทรายเป็นวัสดุเพาะ วัดค่าร้อยละการงอก ดัชนี ความเร็วในการงอก ความยาวราก น้ำหนักสด และน้ำหนัก แห้ง ผลการศึกษาพบว่า การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1 มิลลิเมตร และแช่น้ำ 12 ชั่วโมง ให้การงอกสูงที่สุด คือ ร้อยละ 100 การตัดปลายเมล็ดทุกระยะที่ผ่านการแช่น้ำ 12 และ 24 ชั่วโมง มีแนวโน้มทำให้ดัชนีความเร็วในการ งอกสูงขึ้นกว่าการไม่แช่น้ำ การตัดปลายเมล็ดที่ระยะต่าง ๆ และไม่แช่น้ำให้ความยาวรากสูงกว่าเมล็ดเหรียญที่แช่น้ำ 12 และ 24 ชั่วโมง การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 2 มิลลิเมตร โดยผ่านการแช่น้ำ 12 ชั่วโมง ให้น้ำหนักสดเฉลี่ยสูงที่สุด และแต่ละกรรมวิธีที่ศึกษาไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งของ ต้นกล้าของเมล็ดเหรียญ และ Kimleng (2017) ได้แนะนำ วัสดุเพาะเมล็ดเหรียญด้วยผ้า โดยพบว่า เมล็ดเหรียญยัง สามารถงอกได้ จึงเป็นอีกทางเลือกที่นอกเหนือจากการใช้ ทรายเป็นวัสดุเพาะ

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ระยะการตัดปลายเมล็ด ที่เหมาะสมยังคงมีข้อสรุปที่แตกต่างกันระหว่างระยะ 1 และ 2 มิลลิเมตร และยังไม่เคยมีการศึกษาเปรียบเทียบ ผลของวัสดุเพาะเมล็ดเหรียญระหว่างทรายและผ้าฝ้าย โดยใช้กระบวนการทางสถิติ อีกทั้งยังไม่เคยมีการศึกษาถึง อิทธิพลร่วมระหว่างระยะการตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาระยะการตัดปลาย เมล็ดในระยะเวลาที่ละเอียดมากยิ่งขึ้น 3 ระยะ คือ 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร ร่วมกับวัสดุเพาะที่ใช้ คือ ทรายและผ้าฝ้าย เพื่อนำผลของระยะการตัดปลายเมล็ดที่เหมาะสมแก่การ ทำลายการพักตัวและวัสดุเพาะที่เหมาะสมที่สุดมาเพิ่ม ศักยภาพในการเพาะเมล็ดเหรียญ ซึ่งเหรียญเป็นพืชที่มี มูลค่าเนื่องจากมีราคาจำหน่ายในตลาดค่อนข้างสูง ผู้วิจัย มีความคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการศึกษาครั้งนี้จะ สามารถใช้เป็นจุดเริ่มต้นของการวางแผนการเพาะออก เมล็ดเหรียญในเชิงพาณิชย์ โดยจะส่งผลต่อการตัดสินใจ ของเกษตรกร เพื่อเป็นแนวทางให้ได้เมล็ดเหรียญเพาะงอก

ที่มีประสิทธิภาพและเพิ่มมูลค่ามากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นประโยชน์แก่ชาวบ้านที่สนใจเพาะงอกเมล็ดเหรียญสำหรับการบริโภคเองที่บ้านและอาจต่อยอดเป็นอาชีพต่อไปในอนาคต

2. วัสดุและวิธีการ

ศึกษาผลของการทำลายการพักตัวโดยวิธีการตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะต่อการเจริญของเมล็ดเหรียญสีดำตั้งแต่วันที่ 20 – 27 กันยายน พ.ศ. 2564 วางแผนการทดลองแบบ 3 × 2 แฟกทอเรียลชนิดสุ่มสมบูรณ์ (3 × 2 Factorial in completely randomized design) จำนวน 2

ซ้ำ ซึ่งมีปัจจัยที่ศึกษา ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 คือ การตัดปลายเมล็ด 3 ระยะ ได้แก่ 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร และปัจจัยที่ 2 คือ วัสดุเพาะ 2 ชนิด ได้แก่ ทรายและผ้าฝ้าย

2.1 การเตรียมเมล็ด

เตรียมเมล็ดเหรียญสีดำจากแหล่งผลิตเดียวกัน ขนาดใกล้เคียงกันโดยไม่มีการคละเมล็ด จำนวน 240 เมล็ด แบ่งเมล็ดเหรียญออกเป็นชุด ชุดละ 20 เมล็ด จำนวน 12 ชุด ใส่ในถุงพลาสติกใส ขนาด 2 × 5 เซนติเมตร พร้อมทั้งติดหมายเลข 1 – 12 ไว้ที่ถุงพลาสติกใส เพื่อใช้ในการสุ่มหน่วยทดลองให้ได้รับปัจจัยในการทำลายการพักตัวและวัสดุเพาะ (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ลำดับในการสุ่มเมล็ดเหรียญที่ได้รับปัจจัยในการทำลายการพักตัวโดยวิธีการตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะ

ระยะการตัดปลายเมล็ด	วัสดุเพาะ			
	ทราย		ผ้าฝ้าย	
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2
1 มม.	11	3	5	9
1.5 มม.	7	2	4	10
2 มม.	12	8	1	6

2.2 อุปกรณ์ทำลายการพักตัว

2.2.1 เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Calipers) เพื่อใช้วัดระยะการตัดปลายเมล็ด

2.2.2 กรรไกรสำหรับการตัดปลายเมล็ด

2.2.3 ถ้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร จำนวน 12 ใบ เพื่อใส่เมล็ดเหรียญแต่ละชุด

2.3 อุปกรณ์ในการเพาะงอก

2.3.1 ทรายปริมาณ 9,000 กรัม แบ่งออกเป็น 6 ชุด ชุดละ 1,500 กรัม เพื่อใช้เป็นวัสดุเพาะ

2.3.2 ผ้าฝ้ายสะอาดขนาด 16 × 21 เซนติเมตร จำนวน 6 ผืน เพื่อใช้เป็นวัสดุเพาะ และผ้าขาวบางสะอาดขนาด 32 × 27 เซนติเมตร จำนวน 6 ผืน เพื่อใช้คลุมเมล็ดเหรียญสำหรับการป้องกันแมลง

2.3.3 กระบะขนาด 36 × 20 เซนติเมตร จำนวน 6 กระบะ เพื่อใส่ทรายกระบะละ 1,500 กรัม

2.3.4 ตะกร้าขนาด 27 × 22 เซนติเมตร จำนวน 6 ใบ เพื่อใช้รองการเพาะด้วยผ้าฝ้าย

2.4 วิธีการเพาะงอก

2.4.1 ตัดปลายเมล็ดเหรียญแต่ละชุด ทั้งหมด 12 ชุด โดยวัดจากปลายด้านที่มีรอยเว้าสีแดง (Micropyle) ดังรูปที่ 1 เข้าไประยะ 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับการสุ่ม



รูปที่ 1 เมล็ดเหรียญด้านที่มีรอยเว้าสีแดง

2.4.2 นำเมล็ดเหรียญแต่ละชุดไปแช่น้ำเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมงในถ้วยที่เตรียมไว้ โดยแต่ละถ้วยจะตวงน้ำด้วยเหยือกในปริมาตร 500 มิลลิลิตร

2.4.3 หลังจากแช่เมล็ดเหรียญครบ 12 ชั่วโมง นำมาเพาะในวัสดุเพาะตามลำดับการสุ่ม โดยเพาะในเรือนเพาะชำ ให้โดนแสงแดดเพียงเล็กน้อย และไม่ให้โดนฝน สำหรับเมล็ดเหรียญที่เพาะด้วยทราย เมื่อฝังเมล็ดเรียบร้อยแล้วจะใช้ทรายในกระบะกลบเมล็ดเหรียญจนมิดแล้วจึงรดน้ำ ส่วนการเพาะด้วยผ้าฝ้าย เมื่อวางเมล็ดเรียบร้อยแล้วจะรดน้ำแล้วจึงใช้ผ้าขาวบางคลุมเมล็ดเหรียญเพื่อป้องกันแมลง การรดน้ำจะรดในปริมาตร 400 มิลลิลิตร เวลา 08.30 น. และ 18.00 น. ของทุกวันที่ทำการทดลอง คือ วันที่ 20 – 27 กันยายน พ.ศ. 2564 โดยใช้เหยือกในการตวงน้ำ

2.5 การเก็บข้อมูล

เมื่อครบกำหนดการเพาะเป็นเวลา 7 วัน วัดการเจริญ โดยการนับจำนวนเมล็ดเหรียญที่งอกในวันที่ 7 ของการทดลอง คือ วันที่ 27 กันยายน พ.ศ. 2564 เวลา 10.00 น.

แล้วคำนวณเป็นร้อยละการงอก โดยการงอก หมายถึง เมล็ดที่มีรากงอกออกมาจากเมล็ดอย่างน้อย 1 มิลลิเมตร และวัดความยาวรากและน้ำหนักสด ตั้งรายละเอียดต่อไป

2.5.1 ร้อยละการงอก คำนวณดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละการงอก} = \frac{\text{จำนวนเมล็ดที่เรียงที่งอก}}{20} \times 100$$

2.5.2 ความยาวราก จะวัดความยาวรากแรกเกิด (Radical) ของเมล็ดที่เรียงที่งอกด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ แล้วหาค่าเฉลี่ย

2.5.3 น้ำหนักสด หลังจากคำนวณร้อยละการงอก และวัดความยาวราก จะนำเหรียญงอกไปชั่งน้ำหนักสดด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล 1 ตำแหน่ง แล้วบันทึกผล

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลการเจริญ ได้แก่ ร้อยละการงอก ความยาวราก และน้ำหนักสด โดยใช้โปรแกรม SPSS ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA) ของแผนการทดลองแบบ 3×2 แฟกทอเรียลชนิดสุ่มสมบูรณ์ จำนวน 2 ซ้ำ พิจารณาการมีนัยสำคัญของปัจจัยหลักทั้ง 2 ปัจจัย ได้แก่ ระยะเวลาตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะ และพิจารณาการมีนัยสำคัญของอิทธิพลร่วมของปัจจัยหลักทั้ง 2 ปัจจัย หากพบว่ามีนัยสำคัญจะทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยการทดสอบการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple comparisons test) โดยวิธีการทดสอบของสตีวเดนต์-นิวแมน-คูล (The Student-Newman-Keuls test: SNK) ซึ่งถ้าอิทธิพลร่วมมีความแตกต่างทาง

สถิติ จะเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยการทดสอบการเปรียบเทียบพหุคูณเฉพาะอิทธิพลร่วมเท่านั้น แต่ถ้าอิทธิพลร่วมไม่มีความแตกต่างทางสถิติ จะเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยการทดสอบการเปรียบเทียบพหุคูณของปัจจัยหลักที่มีความแตกต่างทางสถิติ (Riansut, 2016)

3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาผลของการทำลายการพักตัวโดยวิธีการตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะต่อการเจริญของเมล็ดเหรียญสด เก็บรวบรวมข้อมูลการเจริญ ได้แก่ ร้อยละการงอก ความยาวราก และน้ำหนักสด แบ่งผลและวิจารณ์ผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ เชิงพรรณนาและเชิงอนุมาน ดังนี้

3.1 ผลและวิจารณ์ผลการทดลองเชิงพรรณนา

ผลการศึกษาพบว่า การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1.5 มิลลิเมตรและเพาะด้วยผ้าฝ้ายมีร้อยละการงอกเฉลี่ยสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 100 หมายความว่า เมล็ดเหรียญสดทั้ง 20 เมล็ดมีการงอกทั้งหมด รองลงมาคือ การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 2 มิลลิเมตรและเพาะด้วยผ้าฝ้ายมีร้อยละการงอกเฉลี่ยเท่ากับ 97.5 การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1 มิลลิเมตรและเพาะด้วยผ้าฝ้ายมีความยาวรากเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 6.74 เซนติเมตร รองลงมาคือ การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1 มิลลิเมตรและเพาะด้วยทรายมีความยาวรากเฉลี่ยเท่ากับ 6.4 เซนติเมตร การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 2 มิลลิเมตรและเพาะด้วยทรายมีน้ำหนักสดเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 21.95 กรัม รองลงมาคือ การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1 มิลลิเมตรและเพาะด้วยผ้าฝ้ายมีน้ำหนักสดเฉลี่ยเท่ากับ 19.55 กรัม (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ร้อยละการงอก ความยาวราก และน้ำหนักสดเฉลี่ย

ระยะการตัดปลายเมล็ด	ร้อยละการงอก		ความยาวราก (เซนติเมตร)		น้ำหนักสด (กรัม)	
	วัสดุเพาะทราย	วัสดุเพาะผ้าฝ้าย	วัสดุเพาะทราย	วัสดุเพาะผ้าฝ้าย	วัสดุเพาะทราย	วัสดุเพาะผ้าฝ้าย
1 มม.	57.50	90.00	6.40	6.74	13.95	19.55
1.5 มม.	40.00	100.00	4.18	5.00	8.65	19.15
2 มม.	95.00	97.50	6.34	3.50	21.95	16.45

ตัวหนา หมายถึง ค่าเฉลี่ยสูงสุด

ขีดเส้นใต้ หมายถึง ค่าเฉลี่ยสูงเป็นอันดับที่ 2

3.2 ผลและวิจารณ์ผลการทดลองเชิงอนุมาน

3.2.1 ร้อยละการงอกของเมล็ดเหรียญ

ผลการศึกษาพบว่า ระยะเวลาตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะมีอิทธิพลร่วมกันต่อร้อยละการงอกเฉลี่ยของเมล็ดเหรียญอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 กล่าวคือ เมล็ดเหรียญจะมีร้อยละการงอกมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับทั้งระยะการตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะ ซึ่งผลการเปรียบเทียบพหุคูณด้วยการทดสอบของสตีวเดนต์-นิวแมน-คูล พบว่า การ

ตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1.5 มิลลิเมตร เพาะด้วยผ้าฝ้าย, การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 2 มิลลิเมตร เพาะด้วยผ้าฝ้าย, การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 2 มิลลิเมตร เพาะด้วยทราย และการตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1 มิลลิเมตร เพาะด้วยผ้าฝ้าย เป็นกลุ่มของกรรมวิธีที่มีร้อยละการงอกเฉลี่ยของเมล็ดเหรียญสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ร้อยละการงอกเฉลี่ยเท่ากับ 100, 97.5, 95 และ 90 ตามลำดับ) รองลงมาคือ การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1 มิลลิเมตร เพาะ

ด้วยทราย และการตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1.5 มิลลิเมตร เพาะด้วยทราย มีร้อยละการงอกเฉลี่ยของเมล็ดเหรียญเท่ากับ 57.5 และ 40 ตามลำดับ (ตารางที่ 3) สอดคล้องกับการศึกษาของ Sawatdikarn (2009) ที่พบว่า การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 2 มิลลิเมตร ทำให้เมล็ดเหรียญมีร้อยละการงอกสูงสุด คือ มีร้อยละการงอกของเมล็ดเหรียญสีดา ร้อยละ 79 และของเมล็ดเหรียญสีน้ำตาลร้อยละ 62 ซึ่งระยะการตัดปลายเมล็ดที่ 2 มิลลิเมตร อาจเป็นระยะที่เหมาะสมที่ช่วยทำลายกระบวนการพักตัวของเมล็ดเหรียญ และช่วยส่งเสริมให้เมล็ดเหรียญงอกได้ง่ายขึ้น แต่ขัดแย้งกับการศึกษาของ Charoenkul (2020) ที่พบว่า การตัด

ปลายเมล็ดเหรียญที่ระยะ 1 มิลลิเมตร และแช่น้ำ 12 ชั่วโมง ทำให้ร้อยละการงอกสูงสุด คือ ร้อยละ 100 อาจเนื่องมาจาก Charoenkul (2020) ไม่ได้ศึกษาวัสดุเพาะโดยใช้ผ้าฝ้าย ซึ่งผลการศึกษานี้ยังพบว่า เมล็ดเหรียญที่เพาะด้วยผ้าฝ้ายส่งผลให้ร้อยละการงอกสูงกว่าเมล็ดเหรียญที่เพาะโดยใช้ทราย อาจเนื่องมาจากผ้าฝ้ายสามารถกักเก็บน้ำได้ดีกว่าทราย จึงกระตุ้นให้เมล็ดเกิดการงอกได้ดีกว่า ดังนั้นการเพาะเมล็ดเหรียญด้วยผ้าฝ้ายจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งนอกเหนือจากการใช้ทรายเป็นวัสดุเพาะ (Kimheng, 2017)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและผลการเปรียบเทียบพหุคูณด้วยการทดสอบของสตีวเดนต์-นิวแมน-คูล ของร้อยละการงอกของเมล็ดเหรียญ

	ปัจจัย	ร้อยละการงอก (ค่าเฉลี่ย ± S.D.)	F	p-value
ระยะการตัดปลายเมล็ด	1 มม.	73.75 ^b ± 19.74	27.64	0.0009*
	1.5 มม.	70.00 ^b ± 34.88		
	2 มม.	96.25 ^a ± 2.50		
วัสดุเพาะ	ทราย	64.17 ^b ± 25.77	103.14	0.0001*
	ผ้าฝ้าย	95.83 ^a ± 4.92		
อิทธิพลร่วม	1 มม., ทราย	57.50 ^b ± 10.61	28.36	0.0009*
	1 มม., ผ้าฝ้าย	90.00 ^a ± 0.00		
	1.5 มม., ทราย	40.00 ^c ± 7.07		
	1.5 มม., ผ้าฝ้าย	100.00 ^a ± 0.00		
	2 มม., ทราย	95.00 ^a ± 0.00		
	2 มม., ผ้าฝ้าย	97.50 ^a ± 3.54		

* แทนความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

สัญลักษณ์ a, b, c แทนค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 โดยวิธีการทดสอบของสตีวเดนต์-นิวแมน-คูล

3.2.2 ความยาวรากของเมล็ดเหรียญ

ผลการศึกษาพบว่า ระยะการตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะมีอิทธิพลร่วมกันต่อความยาวรากเฉลี่ยของเมล็ดเหรียญอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 กล่าวคือ เมล็ดเหรียญจะมีความยาวรากมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับทั้งระยะการตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะ ซึ่งผลการเปรียบเทียบพหุคูณด้วยการทดสอบของสตีวเดนต์-นิวแมน-คูล พบว่า การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1 มิลลิเมตร เพาะด้วยผ้าฝ้าย, การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1 มิลลิเมตร เพาะด้วยทราย และการตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 2 มิลลิเมตร เพาะด้วยทราย เป็นกลุ่มของกรรมวิธีที่มีความยาวรากเฉลี่ยของเมล็ดเหรียญสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ความยาวรากเฉลี่ยเท่ากับ 6.74, 6.4 และ 6.34 เซนติเมตร ตามลำดับ) ขณะที่การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1.5 มิลลิเมตร เพาะด้วยผ้าฝ้าย, การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ

1.5 มิลลิเมตร เพาะด้วยทราย และการตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 2 มิลลิเมตร เพาะด้วยผ้าฝ้าย เป็นกลุ่มของกรรมวิธีที่มีความยาวรากเฉลี่ยของเมล็ดเหรียญต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (ความยาวรากเฉลี่ยเท่ากับ 5, 4.18 และ 3.5 เซนติเมตร ตามลำดับ) (ตารางที่ 4) สอดคล้องกับการศึกษาของ Sawatdikarn (2009) ที่พบว่า การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1 หรือ 2 มิลลิเมตร ทำให้ความยาวยอดและรากของต้นกล้าสูงที่สุด เนื่องจากการตัดปลายเมล็ดทำให้เมล็ดเหรียญที่มีการพักตัวแบบเมล็ดแข็งสามารถงอกได้และให้ต้นกล้าที่มีความยาวยอดและรากรวมทั้งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นกล้าแตกต่างกันทางสถิติกับการไม่ตัดปลายเมล็ด ทั้งนี้เพราะการไม่ตัดปลายเมล็ดทำให้เซลล์บริเวณเปลือกหุ้มเมล็ดยังมีลักษณะแข็งและไม่ถูกเปิดออก ดังนั้นน้ำจึงไม่สามารถผ่านเข้าไปภายในเมล็ดได้

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและผลการเปรียบเทียบพหุคูณด้วยการทดสอบของสตีวเดนต์-นิวแมน-คูล ของความยาวรากของเมล็ดเหียง (เซนติเมตร)

ปัจจัย		ความยาวราก (ค่าเฉลี่ย \pm S.D.)	F	p-value
ระยะการตัดปลายเมล็ด	1 มม.	6.57 ^a \pm 0.25	12.51	0.0072*
	1.5 มม.	4.59 ^b \pm 0.76		
	2 มม.	4.92 ^b \pm 1.74		
วัสดุเพาะ	ทราย	5.64 \pm 1.23	2.63	0.1559
	ผ้าฝ้าย	5.08 \pm 1.52		
อิทธิพลร่วม	1 มม., ทราย	6.40 ^a \pm 0.18	11.04	0.0098*
	1 มม., ผ้าฝ้าย	6.74 ^a \pm 0.22		
	1.5 มม., ทราย	4.18 ^b \pm 0.62		
	1.5 มม., ผ้าฝ้าย	5.00 ^b \pm 0.82		
	2 มม., ทราย	6.34 ^a \pm 0.86		
	2 มม., ผ้าฝ้าย	3.50 ^b \pm 0.53		

* แทนความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

สัญลักษณ์ a, b, c แทนค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 โดยวิธีการทดสอบของสตีวเดนต์-นิวแมน-คูล

3.2.3 น้ำหนักสดของเมล็ดเหียง

ผลการศึกษาพบว่า ระยะการตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะมีอิทธิพลร่วมกันต่อน้ำหนักสดเฉลี่ยของเมล็ดเหียงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 กล่าวคือ เมล็ดเหียงจะมีน้ำหนักสดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับทั้งระยะการตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะ ซึ่งผลการเปรียบเทียบพหุคูณด้วยการทดสอบของสตีวเดนต์-นิวแมน-คูล พบว่า การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 2 มิลลิเมตร เพาะด้วยทราย, การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1 มิลลิเมตร เพาะด้วยผ้าฝ้าย, การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1.5 มิลลิเมตร เพาะด้วยผ้าฝ้าย และการตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 2 มิลลิเมตร เพาะด้วยผ้าฝ้าย เป็นกลุ่มของกรรมวิธีที่มีน้ำหนักสดเฉลี่ยของเมล็ดเหียงสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (น้ำหนักสดเฉลี่ยเท่ากับ 21.95, 19.55, 19.15 และ 16.45 กรัม ตามลำดับ) ขณะที่การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1.5 มิลลิเมตร เพาะด้วย

ทรายทำให้น้ำหนักสดเฉลี่ยของเมล็ดเหียงต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 โดยมีน้ำหนักสดเฉลี่ยเพียง 8.65 กรัม (ตารางที่ 5) สอดคล้องกับการศึกษาของ Sawatdikarn (2009) ที่พบว่า การตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1 หรือ 2 มิลลิเมตร ส่งผลให้น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นกล้าสูงกว่าการตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 3 หรือ 4 มิลลิเมตร อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 อีกทั้งยังพบว่าการไม่ตัดปลายเมล็ดทำให้เมล็ดเหียงไม่สามารถงอกได้ เนื่องจากการตัดปลายเมล็ดทำให้เซลล์ที่มีลักษณะแข็งของเปลือกหุ้มเมล็ดถูกเปิดออก และยอมให้น้ำผ่านเข้าไปในเมล็ดจึงทำให้เมล็ดงอกได้ และสอดคล้องกับการศึกษาของ Charoenkul (2020) ที่พบว่า การตัดปลายเมล็ดเหียงที่ระยะ 2 มิลลิเมตร และแช่น้ำ 12 ชั่วโมง ทำให้น้ำหนักสดเฉลี่ยสูงที่สุด อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและผลการเปรียบเทียบพหุคูณด้วยการทดสอบของสตีวเดนต์-นิวแมน-คูล ของน้ำหนักสดของเมล็ดเหียง (กรัม)

ปัจจัย		น้ำหนักสด (ค่าเฉลี่ย \pm S.D.)	F	p-value
ระยะการตัดปลายเมล็ด	1 มม.	16.75 ^{ab} \pm 3.72	7.49	0.0234*
	1.5 มม.	13.90 ^b \pm 6.27		
	2 มม.	19.20 ^a \pm 3.42		
วัสดุเพาะ	ทราย	14.85 ^b \pm 6.34	9.97	0.0196*
	ผ้าฝ้าย	18.38 ^a \pm 1.57		
อิทธิพลร่วม	1 มม., ทราย	13.95 ^b \pm 3.04	17.88	0.0030*
	1 มม., ผ้าฝ้าย	19.55 ^{ab} \pm 0.92		
	1.5 มม., ทราย	8.65 ^c \pm 2.76		
	1.5 มม., ผ้าฝ้าย	19.15 ^{ab} \pm 0.21		
	2 มม., ทราย	21.95 ^a \pm 2.19		
	2 มม., ผ้าฝ้าย	16.45 ^{ab} \pm 0.07		

* แทนความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

สัญลักษณ์ a, b, c แทนค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 โดยวิธีการทดสอบของสตีวเดนต์-นิวแมน-คูล

4. บทสรุป

ผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ระยะเวลาตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะมีอิทธิพลร่วมกัน ส่งผลให้ร้อยละการงอกเฉลี่ยของเมล็ดเหรียญแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 โดยระยะเวลาตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะที่เหมาะสมแก่การเพาะงอกคือ ระยะ 1 หรือ 1.5 มิลลิเมตร เพาะด้วยผ้าฝ้าย หรือ ระยะ 2 มิลลิเมตร เพาะด้วยทรายหรือผ้าฝ้าย จะทำให้ร้อยละการงอกเฉลี่ยสูงสุด และไม่ควรตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1.5 มิลลิเมตร เพาะด้วยทราย เนื่องจากทำให้ร้อยละการงอกเฉลี่ยต่ำที่สุด

2) ระยะเวลาตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะมีอิทธิพลร่วมกัน ส่งผลให้ความยาวรากเฉลี่ยของเมล็ดเหรียญแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 โดยระยะเวลาตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะที่เหมาะสมแก่การเพาะงอกคือ ระยะ 1 มิลลิเมตร เพาะด้วยทรายหรือผ้าฝ้าย หรือ ระยะ 2 มิลลิเมตร เพาะด้วยทราย จะทำให้ความยาวรากเฉลี่ยสูงสุด และไม่ควรตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1.5 มิลลิเมตร เพาะด้วยทรายหรือผ้าฝ้าย และระยะ 2 มิลลิเมตร เพาะด้วยผ้าฝ้าย เนื่องจากทำให้ความยาวรากเฉลี่ยต่ำที่สุด

3) ระยะเวลาตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะมีอิทธิพลร่วมกัน ส่งผลให้น้ำหนักสดเฉลี่ยของเมล็ดเหรียญแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 โดยระยะเวลาตัดปลายเมล็ดและวัสดุเพาะที่เหมาะสมแก่การเพาะงอกคือ ระยะ 1 หรือ 1.5 มิลลิเมตร เพาะด้วยผ้าฝ้าย หรือระยะ 2 มิลลิเมตร เพาะด้วยทรายหรือผ้าฝ้าย จะทำให้น้ำหนักสดเฉลี่ยสูงสุด และไม่ควรตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1.5 มิลลิเมตร เพาะด้วยทราย เนื่องจากทำให้น้ำหนักสดเฉลี่ยต่ำที่สุด

จากผลการศึกษาข้างต้นสรุปได้ว่า การวางแผนการเพาะงอกเมล็ดเหรียญในเชิงพาณิชย์หรือผู้สนใจเพาะงอกเมล็ดเหรียญสำหรับการบริโภคเองที่บ้าน รวมถึงการต่อยอดเป็นอาชีพต่อไปในอนาคต ควรใช้ระยะเวลาตัดปลายเมล็ด 2 มิลลิเมตรและเพาะด้วยทราย จะทำให้ค่าเฉลี่ยของร้อยละการงอก ความยาวราก และน้ำหนักสดสูงสุด อาจเนื่องมาจากระยะเวลาตัดปลายเมล็ด 1 และ 1.5 มิลลิเมตร เป็นระยะที่สั้นเกินไปสำหรับการตัดปลายเมล็ดให้ถึงส่วนที่สามารถกระตุ้นการงอกและเพิ่มช่องทางให้น้ำซึมเข้าไปได้น้อยกว่าระยะ 2 มิลลิเมตร และควรนำเมล็ดเหรียญไปเพาะในกระบะทรายเพื่อให้เมล็ดงอกรากและมีใบเลี้ยงโผล่ขึ้นมาเหมือนกับถั่วงอกก่อนนำมารับประทาน เนื่องจากเมล็ดเหรียญมีเปลือกแข็งจึงไม่สามารถรับประทานได้โดยตรง อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้พบว่า ไม่ควรตัดปลายเมล็ดที่ระยะ 1.5 มิลลิเมตรและเพาะด้วยทราย เนื่องจากจะทำให้ค่าเฉลี่ยของร้อยละการงอก ความยาวราก และน้ำหนักสดต่ำที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- Apirattanusorn, S. (2013). Pectin from pods of riang (*Parkia timoriana* (DC.) Merr.): chemical properties and jelly product. *KKU Journal*, 18(6), 971-982.
- Charoenkul, N. (2020). *Effects of seed clipping and seed soaking in water on breaking seed dormancy in Parkia timoriana (DC.)* [Master's thesis]. Thaksin University.
- Kimleng. (2017). *How to Plant Seeds Riang*. Retrieved September 7, 2021, from <http://www.sookjai.com/index.php?topic=187243.0>.
- MedThai. (2017). *Properties and benefits of the Rieng tree, Luk Rieng, 10 items!*. Retrieved September 4, 2021, from [https://medthai.com/Parkia timoriana/](https://medthai.com/Parkia%20timoriana/).
- Riansut, W. (2016). *Experimental Designs*. Songkhla: Thaksin University Book Center.
- Sawatdikarn, S. (2009). Breaking Seed Dormancy in *Parkia timoriana* (DC.) Merr. *Agricultural Science Journal*, 40(3), 161-164.