

ปีที่ 23 ฉบับที่ 1 [2567] Vol.23, No.1 [2024]

มกราคม - เมษายน 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

Maharakham University, Thailand

Associate Professor Dr. Wantida Chaiyana

Chiang Mai University, Thailand

Assoc.Prof. Dr. Pranee Phinyocheep

Mahidol University, Thailand

Assistant Professor Dr. Kwan Arayathanitkul

Mahidol University, Thailand

Assistant Professor Dr. Narumon Emarat

Mahidol University, Thailand

Assistant Professor Dr. Kitiporn Plaimas

Chulalongkorn University, Thailand

Assistant Professor Dr. Chatchai Khunboa

Khon Kaen University, Thailand

Assistant Professor Dr. Julaluk Khemacheewakul

Chiang Mai University, Thailand

Assistant Professor Dr. Jutarat Iewkittayakorn

Prince of Songkla University, Thailand

Assistant Professor Dr. Yanisa Laoong-u-thai

Burapha University, Thailand

Assistant Professor Dr. Sararat Mahasaranon

Naresuan University, Thailand

Dr. Worawut Srisukkhram

Chiang Mai University, Thailand

Management Staff

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

Miss Wilawan Sae-jeng

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

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

TABLE OF CONTENT

Editorial Corner (invitation article)

Seaweed biorefinery potential: Utilization of sulfated polysaccharide for chemical feedstock via pyrolysis

Wawat Rodiahwati* and Malinee Sriariyanun.....e900002

Research Articles

Wave solutions to the Landau-Ginzburg-Higgs equation and the modified KdV-Zakharov-Kuznetsov equation by the Riccati-Bernoulli sub-ODE method

Jiraporn Sanjun, Wiphawan Aphaisawat and Thanon Korkiatrakul*.....e253520

Estimation of Loan Repayment Events in Microfinance Bank Using L1 - Lasso Penalized Cox Proportional Hazards Approach

Usman Mohammed, Doguwa Sani, Alhaji Bukar, Dikko Hussaini and Anuwat Tangthanawatsakul*.....e253276

Global Stability and Sensitivity Analysis of a Conjunctivitis Epidemic Model in Two Populations with Patient Isolation, Treatment and Insecticide Control

Surapol Naowarat and Kanyakon Onruk*.....e252376

On Solving the Quantum Oscillator Equation by Using the Differential Transformation

Jutarat Pimsud, Kamonthip Ongartyuthanakorn, Kanokvon Panchuay and Jaipong Kasemsuwan*.....e252913

Preparation, Nutrition Analysis, and Sensory Evaluation of Stingless Bee Honey Candy

Imron Meechai*, Romlee Chedoloh, Isma-ae Chelong and Hasan Daupor.....e246591

Development product of chili-mulberry sauce mixed with Ladyfinger banana

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนาง

Supaporn Apirattananusorn*, Arunothai Juemanee and Ruangnalin Thepnuan.....e250613

Effect of Herp Seasoning on Physicochemical, Antioxidative and Sensory Properties of Seasoned Crispy Oyster Mushroom

ผลของผงปรุงรสสมุนไพรต่อคุณภาพด้านเคมีกายภาพ กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระและทางประสาทสัมผัสของเห็ดนางฟ้าอบกรอบปรุงรส

Wijitra Liaotrakoon*, Pakkaphoom Jaikang and Wasan Lertwimonkarn.....e247611

Analysis of mitragynine and antioxidant content in kratom leaves tea

การวิเคราะห์ปริมาณสารไมทราไจนีนและสารต้านอนุมูลอิสระในชาใบกระท่อม

Juntima Chungsiriporn*, Pruksaya Pongyeela and Nirana Chairerk.....e252508

Efficiency comparison of TEWMA FIR-TEWMA MFIR-TEWMA QEWMA FIR-QEWMA and MFIR-QEWMA control charts for Lognormal distribution

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุม TEWMA FIR-TEWMA MFIR-TEWMA QEWMA FIR-QEWMA และ MFIR-QEWMA สำหรับข้อมูลที่มีการแจกแจงลอการิทึม

Piyaphon Paichit*, Chaitawat Seedang, Chawanagorn Sujintawong and Chanakan Sungboonchoo.....e251335

Factors influencing the mortality of COVID-19 patients

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสียชีวิตของผู้ป่วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019

Surfa Aphibalae, Nichanan Aksornchoo and Klairung Samart*.....e251824

Seaweed biorefinery potential: Utilization of sulfated polysaccharide for chemical feedstock via pyrolysis

Wawat Rodiahwati^{1,2*}, Malinee Sriariyanun³

¹Chemistry, School of Science and Technology, University of New England, Australia

²Department of Agro Industrial Technology, Sumbawa University of Technology, Indonesia

³Biorefinery and Process Automation Engineering Center, Department of Chemical and Process Engineering,
The Sirindhorn International Thai-German Graduate School of Engineering,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

KEYWORDS: Biomass, Biorefinery, Pyrolysis, Seaweed, Sulfated polysaccharide

*Corresponding Author: wrodiahw@myune.edu.au

Since the 20th century, different types of first- and second-generation biomass, including sugar crops, starch crops, vegetable oils, and lignocellulose (residue and by-products), have been developed and investigated. (Phakeenuya & Kitiborwornkul, 2024, Guo et al., 2015: 712–725, Phakeenuya & Kitiborwornkul, 2022: 1087–1101, Alalwan et al., 2019: 127–139) Transitioning from a conventional refinery to a biorefinery has prompted the search for biomass resources capable of generating both energy and valuable products, essential for the economic viability of the biorefinery. The consequent losses of food and fiber production due to issues surrounding conventional biomass have led to the exploration of marine resources, known as the third-generation biomass. (Jung et al., 2013: 182–190, Michalak, 2018: e288, Chowdhury & Loganathan, 2019: 39–44) Marine biomass, such as microalgae and seaweeds, is considered more sustainable and environmentally friendly because they can be grown in non-arable land, use less water, and capture carbon dioxide. (Baghel et al., 2015: 2436–2443, Konda et al., 2015: 1046–1056, Cesário et al., 2018: 798–817) However, investigations into seaweed for both energy production and valuable chemical products are limited.

Little attention has been given to research into new compounds derived from distinctive seaweed polysaccharides. While most reports on seaweed biorefining have concentrated on the production of bioethanol, hydrocolloids, or fertilizer and animal feeds, (Baghel et al., 2015: 2436–2443, Zaky et al., 2018: 12127) the extraction and/or production of valuable chemicals from seaweed polysaccharides are still in the early development stages. Consequently, the production of fine chemicals from seaweeds is intriguing and could enhance the value of a seaweed biorefinery.

Pyrolysis is a widely recognized method for breaking down biomass into valuable products, including bio-oil, bio-chars, and platform chemicals. (Bridgwater et al., 1999: 1479–1493, Yang et al., 2007: 1781–1788) The considerable interest in bio-oil is attributed to its practical applications, potentially containing diverse organic compounds convertible into valuable chemicals. (Yang et al., 2007: 1781–1788) To target these specific chemicals, addressing the challenge associated with the complex mixtures formed in bio-oil is crucial. Parameters influencing pyrolysis outcomes encompass the catalyst, feedstock, pretreatment method, and overall pyrolysis conditions. (Guo et al., 2015: 712–725) While some studies have

investigated the thermal behavior of seaweed and its polysaccharides (e.g., carrageenan and alginate), (Wang et al., 2017: 373–383, Xue et al., 2017: 25253–25264, Kim et al., 2018: 60–69) there is a scarcity of research on the acid-catalyzed decomposition of this biomass. In contrast, the pyrolysis of terrestrial plants, such as cellulose, has undergone extensive examination. (Halpern et al., 1973: 204–209, Kawamoto et al., 2007: 127–133, Klepp et al., 2020: 38–53) The industrial-scale of acid-catalyzed pyrolysis of cellulose has been applied to produce levoglucosenone (LGO) and its reduced analogue, Cyrene™ (CircaGroup, 2023). These compounds are chiral platform chemicals and biorenewable solvents with wide application in the materials and pharmaceutical sectors. (Sarotti et al., 2012: 439–459, Comba et al., 2018: 590–604, Camp & Greatrex, 2022: 902239)

Numerous investigations have documented the thermochemical conversion of different seaweeds and their polysaccharides through conventional pyrolysis (Wang et al., 2017: 373–383, Jiang et al., 2019: 104680, Hu et al., 2021: 69–76) or microwave-assisted pyrolysis. (Bermúdez et al., 2014: 38144–38151, Budarin et al., 2011: 2330–2333, Gautam et al., 2019: 3009–3020) The predominant focus of these studies lies in the production of biochar and bio-oils, primarily for biofuel applications. Torres et al. (2019) concluded that the pyrolysis of seaweeds yields oils comparable to those from terrestrial biomass pyrolysis. (Torres et al., 2019: 335–388) Bio-oil, as commonly observed, contains aromatic compounds, (Budarin et al., 2011: 2330–2333) furfurals, (Jiang et al., 2019: 104680) ketones, (Bae et al., 2011: 3512–3520) and furan derivatives. (Gautam et al., 2019: 3009–3020)

The pyrolysis characteristics of polysaccharides from *Enteromorpha clathrata* (green seaweed) and *Sargassum fusiforme* (brown seaweed) were investigated using thermogravimetric-mass spectrometry (TG-MS) and pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry (Py-GC/MS). (Wang et al., 2017: 373–383) *E. clathrata*

polysaccharides primarily comprise glucan, xylan, and glucuronide-sulfate-rhamnose, while *S. fusiforme* is mainly composed of uranic acid, sulfate group-fucose, and polysaccharide galactose. The primary pyrolysis products from *E. clathrata* and *S. fusiforme* polysaccharides are furans and esters, respectively.

In their research, Jiang et al. (2019) conducted catalytic pyrolysis on sulfated polysaccharide extracted from *Enteromorpha clathrata* using Py-GC/MS over ZSM-5 catalysts at a temperature of 550 °C. (Jiang et al., 2019: 104680) Furfural emerged as the predominant product in the bio-oil, constituting 50.3%, along with other furan-containing compounds. The mechanism aligns with the findings of Wang et al. (2017), suggesting that volatile compounds result from the decomposition of glucuronic acid and rhamnose units. The authors verified that the ZSM-5 catalyst played a role in promoting hydrodeoxygenation reactions, consequently modifying the bio-oil and enhancing 5-methylfurfural production.

Recent studies on pyrolysis of carrageenans, main polysaccharides of red seaweeds, have been reported. (Rodiahwati et al., 2023: 105904, Rodiahwati et al., 2023: 101576) The authors investigated three different carrageenans in the H₂SO₄-catalyzed pyrolysis in polyethylene glycol (PEG). The use of PEG as a reaction medium promotes the carbocation rearrangement and allows a higher loading of carbohydrates, 20% w/w, (Rodiahwati et al., 2023: 105904) compared to those in using tetrahydrofuran (THF) 1% w/w. (He et al., 2017: 3642–3653) The findings show that platform chemical LGO was the major product followed by furfural, the general product from biomass pyrolysis. Although the yields from these studies are still lower compared to LGO from cellulose pyrolysis, this research is the first study reported LGO production from acid-catalyzed pyrolysis of carrageenan in PEG. Hence, this has given insight into utilizing red seaweeds for the production of chemicals as a support of future seaweed biorefinery and coalign with the concept of circular, bio and green economy (BCG economy) (Kitiborwornkul & Sriariyanun, 2024).

REFERENCES

- Alalwan, H., Alminshid, A., & Aljaafari, H. (2019). Promising evolution of biofuel generations. Subject review. *Renewable Energy Focus*, 28, 127–139.
- Bae, Y., Ryu, C., Jeon, J., Park, J., Suh, D., Suh, Y., Chang, D., & Park, Y. (2011). The characteristics of bio-oil produced from the pyrolysis of three marine macroalgae. *Bioresource Technology*, 102(3), 3512–3520.
- Baghel, R., Trivedi, N., Gupta, V., Neori, A., Reddy, C., Lali, A., & Jha, B. (2015). Biorefining of marine macroalgal biomass for production of biofuel and commodity chemicals. *Green Chemistry*, 17(4), 2436–2443.
- Bermúdez, J., Francavilla, M., Calvo, E., Arenillas, A., Franchi, M., Menéndez, J., & Luque, R. (2014). Microwave-induced low temperature pyrolysis of macroalgae for unprecedented hydrogen-enriched syngas production. *Rsc Advances*, 4(72), 38144–38151.
- Bridgwater, A., Meier, D., & Radlein, D. (1999). An overview of fast pyrolysis of biomass. *Organic Geochemistry*, 30(12), 1479–1493.
- Budarin, V., Zhao, Y., Gronnow, M., Shuttleworth, P., Breeden, S., Macquarrie, D., & Clark, J. (2011). Microwave-mediated pyrolysis of macro-algae. *Green Chemistry*, 13(9), 2330–2333.
- Camp, J., & Greatrex, B. (2022). Levoglucosenone: Bio-based platform for drug discovery. *Frontiers in Chemistry*, 10, 902239.
- Cesário, M., Da Fonseca, M., Marques, M., & De Almeida, M. (2018). Marine algal carbohydrates as carbon sources for the production of biochemicals and biomaterials. *Biotechnology Advances*, 36(3), 798–817.
- Chowdhury, H., & Loganathan, B. (2019). Third-generation biofuels from microalgae: a review. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 20, 39–44.
- Comba, M., Tsai, Y., Sarotti, A., Mangione, M., Suárez, A., & Spanevello, R. (2018). Levoglucosenone and its new applications: valorization of cellulose residues. *European Journal of Organic Chemistry*, 2018(5), 590–604.
- Gautam, R., Shyam, S., Reddy, B., Govindaraju, K., & Vinu, R. (2019). Microwave-assisted pyrolysis and analytical fast pyrolysis of macroalgae: product analysis and effect of heating mechanism. *Sustainable Energy & Fuels*, 3(11), 3009–3020.
- Guo, M., Song, W., & Buhain, J. (2015). Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 712–725.
- Halpern, Y., Riffer, R., & Broido, A. (1973). Major product of the acid-catalyzed pyrolysis of cellulose and related carbohydrates. *Journal of Organic Chemistry Research*, 38(2), 204–209.
- He, J., Liu, M., Huang, K., Walker, T., Maravelias, C., Dumesic, J., & Huber, G. (2017). Production of levoglucosenone and 5-hydroxymethylfurfural from cellulose in polar aprotic solvent–water mixtures. *Green Chemistry*, 19(15), 3642–3653.
- Hu, Y., Li, J., Wang, S., Xu, L., Barati, B., Cao, B., Wang, H., Xie, K., & Wang, Q. (2021). Catalytic fast hydrolysis of seaweed biomass with different zeolite catalysts to produce high-grade bio-oil. *Process Safety and Environmental Protection*, 146, 69–76.
- Jiang, D., Xia, Z., Wang, S., Li, H., Gong, X., Yuan, C., Abomohra, A., Cao, B., Hu, X., He, Z., & Wang, Q. (2019). Mechanism research on catalytic pyrolysis of sulfated polysaccharide using ZSM-5 catalysts by Py-GC/MS and density functional theory studies. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 143, 104680.
- Jung, K., Lim, S., Kim, Y., & Park, J. (2013). Potentials of macroalgae as feedstocks for biorefinery. *Bioresource Technology*, 135, 182–190.
- Kawamoto, H., Saito, S., Hatanaka, W., & Saka, S. (2007). Catalytic pyrolysis of cellulose in sulfolane with some acidic catalysts. *Journal of Wood Science*, 53, 127–133.
- Kim, Y., Han, T., Lee, B., Watanabe, A., Teramae, N., Kim, J., Park, Y., Park, H., & Kim, S. (2018). Analytical pyrolysis reaction characteristics of *Porphyra tenera*. *Algal Research*, 32, 60–69.
- Kitiborwornkul, N., & Sriariyanun, M. (2024). Bio-circular-green economic model BCG and lignocellulose biorefinery: Advancing sustainable development and climate change mitigation. *The Journal of KMUTNB*, 34(1), 241–007308. <https://doi.org/10.14416/j.kmutnb.2023.11.006>
- Klepp, J., Dillon, W., Lin, Y., Feng, P., & Greatrex, B. (2020). Preparation of (–)-levoglucosenone from cellulose using sulfuric acid in polyethylene glycol. *Organic Syntheses*, 97, 38–53.
- Konda, N., Singh, S., Simmons, B., & Klein-Marcuschamer, D. (2015). An investigation on the economic feasibility of macroalgae as a potential feedstock for biorefineries. *BioEnergy Research*, 8, 1046–1056.
- Michalak, I. (2018). Experimental processing of seaweeds for biofuels. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Energy and Environment*, 7(3), e288. <https://doi.org/10.1002/wene.288>
- Phakeenuya, V., & Kitiborwornkul, N. (2023). Recent progress in biorefining process for production of biofuels, biochemicals and biomaterials from lignocellulosic biomass. *The Journal of KMUTNB*, 34(4), 1–8. <https://doi.org/10.14416/j.kmutnb.2023.03.002>
- Phusantisampan, T., & Kitiborwornkul, N. (2022). Progress in chemical pretreatment of lignocellulose biomass for applications in biorefinery. *The Journal of KMUTNB*, 32(4), 1087–1101.
- Rodiahwati, W., Brown, T., & Greatrex, B. (2023). Formation of levoglucosenone and furfural from three different carrageenans via acid-catalyzed pyrolysis in polyethylene glycol. *Bioresource Technology Reports*, 23, 101576.
- Rodiahwati, W., Brown, T., & Greatrex, B. (2023). Sulfuric acid-catalyzed pyrolysis of iota-carrageenan in polyethylene glycol. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 170, 105904.
- Sarotti, A., Zanardi, M., Spanevello, R., & Suarez, A. (2012). Recent applications of levoglucosenone as chiral synthon. *Current Organic Synthesis*, 9(4), 439–459.
- Torres, M., Kraan, S., & Domínguez, H. (2019). Seaweed biorefinery. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18, 335–388.
- Wang, S., Hu, Y., Uzoejinwa, B., Cao, B., He, Z., Wang, Q., & Xu, S. (2017). Pyrolysis mechanisms of typical seaweed polysaccharides. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 124, 373–383.
- Xue, Z., Zhang, W., Yan, M., Liu, J., Wang, B., & Xia, Y. (2017). Pyrolysis products and thermal degradation mechanism of intrinsically flame-retardant carrageenan fiber. *RSC Advances*, 7(41), 25253–25264.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12–13), 1781–1788.
- Zaky, A., Greetham, D., Tucker, G., & Du, C. (2018). The establishment of a marine focused biorefinery for bioethanol production using seawater and a novel marine yeast strain. *Scientific Reports*, 8(1), 12127.

Wave solutions to the Landau-Ginzburg-Higgs equation and the modified KdV-Zakharov-Kuznetsov equation by the Riccati-Bernoulli sub-ODE method

Jiraporn Sanjun¹, Wiphawan Aphaisawat¹, Thanon Korkiatsakul^{1*}

¹Department of Mathematics, Faculty of Science and Technology, Surattani Rajabhat University, Surattani 84100, Thailand

ABSTRACT

In this paper, exact traveling wave solutions of the (1+1)-dimensional Landau-Ginzburg-Higgs equation and the (3+1)-dimensional modified KdV-Zakharov-Kuznetsov equation, which are the partial differential equations for ion wave equations, are extracted using the Riccati-Bernoulli sub-ODE method. The obtained solutions are shown by hyperbolic and trigonometric functions, which can be transformed into kink waves and periodic waves in their physical nature.

KEYWORDS: Riccati-Bernoulli sub-ODE method, partial differential equations, (1+1)-dimensional Landau-Ginzburg-Higgs, (3+1)-dimensional modified KdV-Zakharov-Kuznetsov equation.

*Corresponding Author: thanon.kor@sru.ac.th

Received: 17/07/2023; Revised: 14/12/2023; Accepted: 19/12/2023

1. INTRODUCTION

Partial differential equations are highly useful equations used in real-world situations in applied and engineering sciences. The most widely used scenarios are plasma physics, atmospheric pollutant dispersion, solid state physics, plasma waves, fluid mechanics, chemical kinematics, chemical physics, etc. Many researchers have employed a variety of methods to get exact solutions of partial differential equations, namely the simple equation method (Sanjun & Chankaew, 2022), the Runge-Kutta method (Hosseini et al., 2023), the modified simple equation method (Akter & Akbar, 2015), the tanh-coth method (Kumar & Pankaj, 2015), the tanh method (Babi & Mohyud-Din, 2014), the sin-cosine method (Raslan et al., 2017), the sine-Gordon expansion method (Iatklaiang et al., 2023), the unified method (Abdel-Gawad et al., 2022), the ansatz method (Hosseini et al., 2023),

the new generalized (G'/G)-expansion method (Akbar et al., 2018), the Exp-expansion method (He & Wu, 2006), the homotopy perturbation method (Roozi et al., 2011), the Jacobi elliptic function method (Ali, 2011 and Hosseini et al., 2023), the generalized method (Hosseini et al., 2023), etc.

The Landau-Ginzburg-Higgs equation (LGHE) is a typical nonlinear wave equation that was used to explain the drift cyclotron waves for a coherent ion-cyclotron wave in a radially inhomogeneous plasma and has the following form:

$$\frac{\partial^2 q}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} - g^2 q + h^2 q^3 = 0,$$

where x and t are normalized space and time coordinates, respectively, and $q(x, t)$ is the ion-cyclotron wave is electrostatic potential (Barman et al., 2021).

The Zakharov–Kuznetsov (ZK) equation governs the behavior of weakly nonlinear ion–acoustic waves in a plasma comprising cold ions and hot isothermal electrons in the presence of a uniform magnetic field (Munro & Parkes, 1999). The modified (3+1)–dimensional KdV–ZK equation is shown as:

$$u_t + au^2u_x + (u_{xx} + u_{yy} + u_{zz})_x = 0,$$

where $u = u(x, y, z, t)$ and a is a nonzero constant (Alam et al., 2015).

The Riccati–Bernoulli sub–ODE method was first proposed to construct exact traveling wave solutions, solitary wave solutions, and peaked wave solutions for nonlinear partial differential equations (Yang, 2015). The Riccati–Bernoulli sub–ODE method was used to investigate exact solutions to various equations, such as the perturbed nonlinear Schrodinger equation in 2016 (Shehata, 2016). The thin film equation, the dispersive long wave equation, the modified KdV–KP equation and the nonlinear ZK–MEW equation in 2020 (Alharbi & Almatrafi, 2020). Hassan & Abdelrahman, 2019) were solved by the Riccati–Bernoulli sub–ODE method to investigate the exact solutions of the Schrödinger equation and the 2D Ginzburg–Landau equation.

In this work, we use the traveling wave to transform the (1+1)–dimensional LGH equation and the (3+1)–dimension modified KdV–ZK equation into nonlinear ordinary differential equations. Then, using the Riccati–Bernoulli sub–ODE method, we have obtained the wave solutions in 3D graphs.

2. Algorithm of the Riccati–bernoulli sub–ODE method

In this section, we provide a straightforward approach for finding traveling wave solutions to nonlinear equations, namely the Riccati–Bernoulli sub–ODE method. Assume that the nonlinear partial differential equation with two independent variables x and t is represented by:

$$P(u, u_t, u_x, u_{tt}, u_{xx}, u_{xt} \dots) = 0, \quad (1)$$

where P is a polynomial in $u(x, t)$ and its partial derivatives in which the highest–order derivatives and nonlinear terms are involved. The following steps are the main procedure of the Riccati–Bernoulli sub–ODE method (Abdelrahman et al., 2019):

Step 1: Denoting the traveling wave solution of PDE (1) as:

$$u(x, t) = u(\xi), \quad \xi = x - \lambda t, \quad (2)$$

where λ is speed of traveling wave, then Equation (1) reduces to a nonlinear ordinary differential equation ODE:

$$Q(u, u', u'', \dots) = 0, \quad (3)$$

where Q is a polynomial of $u(\xi)$ and its derivatives, where the prime represents the derivative with respect to ξ .

Step 2: Assume the solution (2) of Equation (3) satisfies

$$u'(\xi) = au^{2-n} + bu + cu^n, \quad (4)$$

where a, b, c and n are constants to be determined.

From Equation (4), we get

$$\begin{aligned} u''(\xi) &= ab(3-n)u^{2-n} + a^2(2-n)u^{3-2n} \\ &\quad + nc^2u^{2n-1} + bc(n+1)u^n + (2ac + b^2)u, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} u'''(\xi) &= (ab(3-n)(2-n)u^{1-n} + a^2(2-n) \times \\ &\quad (3-2n)u^{2-2n} + n(2n-1)c^2u^{2n-2} \\ &\quad + bcn(n+1)u^{n-1} + (2ac + b^2))u'. \end{aligned} \quad (6)$$

2.1 Classification of the solution

The solution of Equation (4) can be classified into the following cases.

Case 1: When $n = 1$, then

$$u(\xi) = \mu e^{(a+b+c)\xi}. \quad (7)$$

Case 2: When $n \neq 1, b = 0$ and $c = 0$ then

$$u(\xi) = (a(n-1)(\xi + \mu))^{\frac{1}{n-1}}. \quad (8)$$

Case 3: When $n \neq 1, b \neq 0$ and $c = 0$ then

$$u(\xi) = \left(-\frac{a}{b} + \mu e^{b(n-1)\xi} \right)^{\frac{1}{n-1}}. \quad (9)$$

Case 4: When $n \neq 1, a \neq 0$ and $b^2 - 4ac < 0$, then

$$u(\xi) = \left(\frac{-b}{2a} + \frac{\sqrt{4ac - b^2}}{2a} \tan \left(\frac{(1-n)\sqrt{4ac - b^2}}{2} (\xi + \mu) \right) \right)^{\frac{1}{1-n}}, \quad (10)$$

and

$$u(\xi) = \left(\frac{-b}{2a} - \frac{\sqrt{4ac - b^2}}{2a} \cot \left(\frac{(1-n)\sqrt{4ac - b^2}}{2} (\xi + \mu) \right) \right)^{\frac{1}{1-n}}. \quad (11)$$

Case 5: When $n \neq 1, a \neq 0$ and $b^2 - 4ac > 0$, then

$$u(\xi) = \left(\frac{-b}{2a} - \frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \coth \left(\frac{(1-n)\sqrt{b^2 - 4ac}}{2} (\xi + \mu) \right) \right)^{\frac{1}{1-n}}, \quad (12)$$

and

$$u(\xi) = \left(\frac{-b}{2a} - \frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \tanh \left(\frac{(1-n)\sqrt{b^2 - 4ac}}{2} (\xi + \mu) \right) \right)^{\frac{1}{1-n}}. \quad (13)$$

Case 6: When $n \neq 1, a \neq 0$ and $b^2 - 4ac = 0$, then

$$u(\xi) = \left(\frac{1}{a(n-1)(\xi + \mu)} - \frac{b}{2a} \right)^{\frac{1}{(1-n)}}. \quad (14)$$

For Equations (7) – (14), the parameter μ is an arbitrary constant.

Step 3: Substituting the derivatives of u into Equation (3) gives an algebraic equation for u . Then setting the coefficients of $u^i, (i = 0, 1, 2, \dots)$, to be zero yields a set of algebraic equations for a, b, c , and λ . Solving these algebraic equations and substituting a, b, c, n, λ , and $\xi = x - \lambda t$ into Equations (7)–(14), we have traveling wave solutions of Equation (1).

3. RESULTS

Next, using the Riccati–Bernoulli sub-ode method explained above, we want to solve the Landau–Ginzburg–Higgs equation and the (3+1)–dimensional modified KdV–Zakharov equation as follows.

3.1 Results of the (1+1)–dimensional LGH equation

The (1+1)–dimensional Landau–Ginzburg–Higgs equation is

$$u_{tt} - u_{xx} - p^2 u + q^2 u^3 = 0, \quad (15)$$

where p and q are parameters. We will reduce it to an ODE using $u(\xi) = u(x, t)$ and the traveling wave variable $\xi = x - \lambda t$. The substitution of the transformation into equation (15) yields

$$(\lambda^2 - 1)u'' - p^2 u + q^2 u^3 = 0. \quad (16)$$

Substituting Equation (5) into Equation (16), the outcome is

$$\begin{aligned} & (\lambda^2 - 1) \left(ab(3-n)u^{2-n} + a^2(2-n)u^{3-2n} + nc^2u^{2n-1} \right. \\ & \left. + bc(n+1)u^n + (2ac + b^2)u \right) - p^2 u + q^2 u^3 = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Setting $n = 0$, Equation (17) is rewritten as

$$\begin{aligned} & (\lambda^2 - 1)bc + ((\lambda^2 - 1)(2ac + b^2) - p^2)u \\ & + (\lambda^2 - 1)3abu^2 + q^2 u^3 = 0, \end{aligned} \quad (18)$$

then, equating the coefficient of u^i to zero, where u^0, u^1, u^2 and u^3 yields:

$$(\lambda^2 - 1)bc = 0, \quad (19)$$

$$(\lambda^2 - 1)(2ac + b^2) - p^2 = 0, \quad (20)$$

$$(\lambda^2 - 1)3ab = 0, \quad (21)$$

$$(\lambda^2 - 1)(2a^2) + q^2 = 0. \quad (22)$$

Solving Eq. (19)–(22), we obtain

$$b = 0, \quad (23)$$

$$a = \pm \frac{q}{\sqrt{2(1 - \lambda^2)}}, \quad (24)$$

$$c = \mp \frac{p^2}{q\sqrt{2(1-\lambda^2)}}, \quad (25)$$

$$ac = \frac{p^2}{2(\lambda^2 - 1)}. \quad (26)$$

The solution of Equation (15) can be classified into the following cases according to Section 2.1:

Case I: When $n = 0$, $a \neq 0$ and $b^2 - 4ac > 0$, we get

$$u_{1,2}(x, t) = \pm \frac{p}{q} \coth \left(\frac{p}{\sqrt{2(1-\lambda^2)}} (x - \lambda t + \mu) \right), \quad (27)$$

and

$$u_{3,4}(x, t) = \pm \frac{p}{q} \tanh \left(\frac{p}{\sqrt{2(1-\lambda^2)}} (x - \lambda t + \mu) \right). \quad (28)$$

When λ and μ are arbitrary constants.

If equation (17) is set to $n = 1$, we will get $q = 0$, causing the equation of the (1+1)-dimensional Landau-Ginzburg-Higgs to have some terms missing, and therefore incomplete.

3.2 Results of the (3+1)-dimensional modified KdV-ZK equation

The (3+1)-dimensional modified KdV-ZK equation:

$$v_t + \beta v^2 v_x + (v_{xx} + v_{yy} + v_{zz})_x = 0, \quad (29)$$

where β is a nonzero constant. Using

$v(\xi) = v(x + y + z - \lambda t)$ and the traveling wave variable $\xi = x + y + z - \lambda t$, (31) is transformed into the following ODE:

$$-\lambda v' + \beta v^2 v' + (3v'')' = 0. \quad (30)$$

Integrating Eq. (32) with zero constant, we get:

$$-\lambda v + \frac{1}{3} \beta v^3 + 3v'' = 0. \quad (31)$$

Substituting $v''(\xi) = ab(3-n)v^{2-n} + a^2(2-n)v^{3-2n} +$

$nc^2 v^{2n-1} + bc(n+1)v^n + (2ac + b^2)v$, into Equation

(31), and also the outcome is:

$$-\lambda v + \frac{1}{3} \beta v^3 + 3 \left(ab(3-n)v^{2-n} + a^2(2-n)v^{3-2n} + nc^2 v^{2n-1} + bc(n+1)v^n + (2ac + b^2)v \right) = 0. \quad (32)$$

Setting $n = 0$, Equation (32) is rewritten to:

$$3bc + (6ac + 3b^2 - \lambda)v + 9abv^2 + \left(\frac{1}{3} \beta + 6a^2 \right) v^3 = 0, \quad (33)$$

then, equating the coefficient of v^i to zero, where

v^0, v^1, v^2 and v^3 yields:

$$3bc = 0, \quad (34)$$

$$6ac - 3b^2 - \lambda = 0, \quad (35)$$

$$9ab = 0, \quad (36)$$

$$\frac{1}{3} \beta + 6a^2 = 0. \quad (37)$$

Solving Eq. (34)-(37), we obtain

$$b = 0, \quad (38)$$

$$a = \pm \frac{1}{3} \sqrt{-\frac{\beta}{2}}, \quad (39)$$

$$c = \pm \frac{\lambda}{\sqrt{-2\beta}}. \quad (40)$$

$$ac = \frac{\lambda}{6}. \quad (41)$$

The solution Equation (29) can be classified into the following cases according to Section 2.1:

Case I: When $n = 0$, $a \neq 0$ and $b^2 - 4ac < 0$, we get

$$v_{1,2}(x, y, z, t) = \pm \sqrt{-\frac{3\lambda}{\beta}} \tan \left(\sqrt{\frac{\lambda}{6}} (x + y + z - \lambda t + \mu) \right), \quad (42)$$

and

$$v_{3,4}(x, y, z, t) = \pm \sqrt{-\frac{3\lambda}{\beta}} \cot \left(\sqrt{\frac{\lambda}{6}} (x + y + z - \lambda t + \mu) \right). \quad (43)$$

When λ and μ are arbitrary constants.

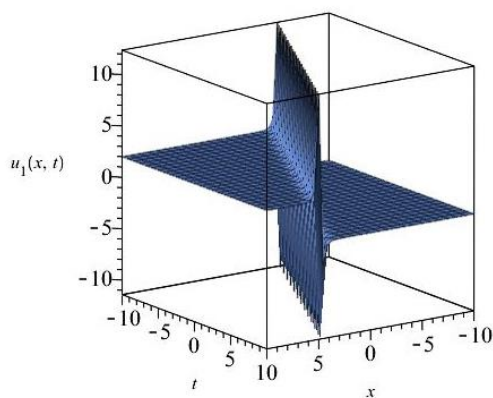
Similarly, if equation (32) is set to $n = 1$, we will get $\beta = 0$, causing the equation of the (3+1)-dimensional modified KdV-ZK to have some terms missing, therefore incomplete.

4. Graphical representation of some obtained solution

In this section, we will discuss the physical interpretations from the graphical representations of the solution of the (1+1)-dimensional LGH equation and the (3+1)-dimensional modified KdV-ZK equation.

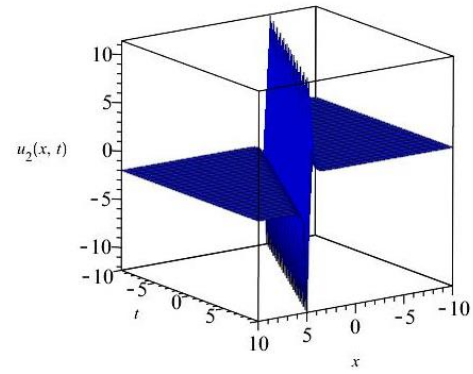
4.1 Graphical representation of the (1+1)-dimensional LGH equation

We present the three-dimensional plots of the exact solutions $u_{1,2}(x, t)$ in Case I shown in Figure 1 and Figure 2 which both plots represent the shape of a kink wave solution.



$$u_1(x, t) = \frac{p}{q} \coth \left(\frac{p}{\sqrt{2(1-\lambda^2)}} (x - \lambda t + \mu) \right).$$

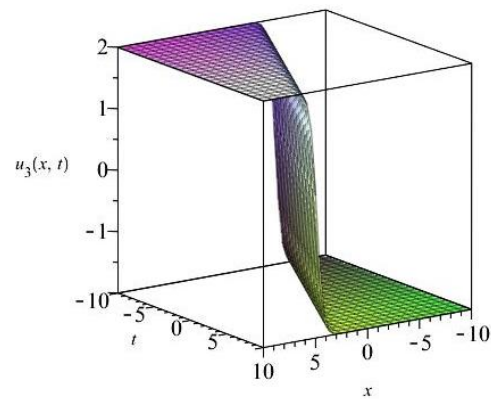
Figure 1 The solution $u_1(x, t)$ with $p = 2, q = 1$, $\lambda = 0.5, \mu = 0.1$ and $-10 \leq x, t \leq 10$.



$$u_2(x, t) = -\frac{p}{q} \coth \left(\frac{p}{\sqrt{2(1-\lambda^2)}} (x - \lambda t + \mu) \right).$$

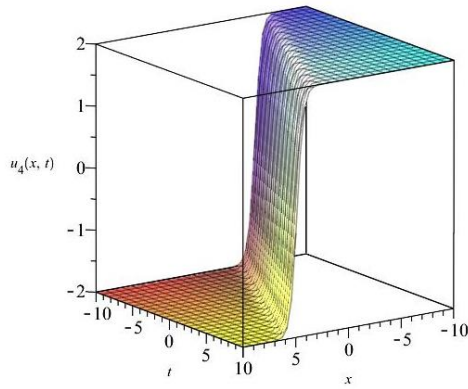
Figure 2 The solution $u_2(x, t)$ with $p = 2, q = 1$, $\lambda = 0.5, \mu = 0.1$ and $-10 \leq x, t \leq 10$.

The graphs of $u_{3,4}(x, t)$ in Case I, as shown in Figure 3 and Figure 4, are the shapes of kink waves that rise or descend from one asymptotic state to another.



$$u_3(x, t) = \frac{p}{q} \tanh \left(\frac{p}{\sqrt{2(1-\lambda^2)}} (x - \lambda t + \mu) \right).$$

Figure 3 The solution $u_3(x, t)$ with $p = 2, q = 1$, $\lambda = 0.5, \mu = 0.1$ and $-10 \leq x, t \leq 10$.

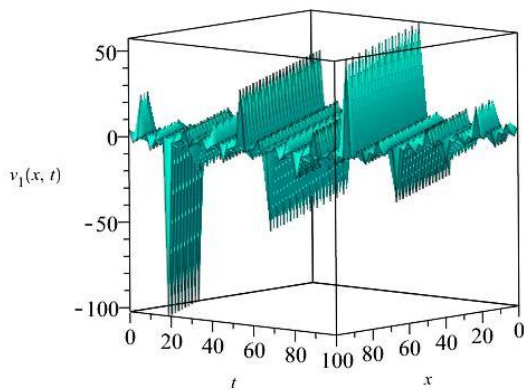


$$u_4(x, t) = -\frac{p}{q} \tanh \left(\frac{p}{\sqrt{2(1-\lambda^2)}} (x - \lambda t + \mu) \right),$$

Figure 4 The solution $u_4(x, t)$ with $p = 2, q = 1$, $\lambda = 0.5, \mu = 0$ and $-10 \leq x, t \leq 10$.

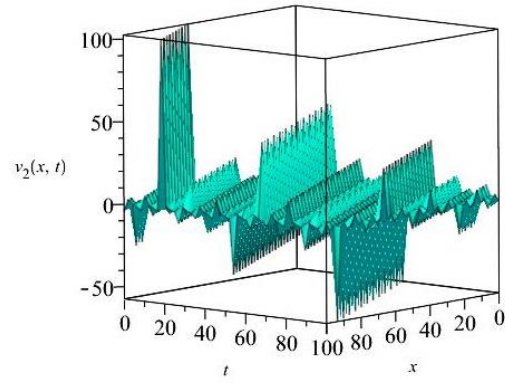
4.2 Graphical representation of the (3+1)-dimensional modified KdV-ZK equation

Next, we present the shape of solutions to the (3+1)-dimensional modified KdV-ZK equation. Solutions $v_{1,2}(x, y, z, t)$ correspond to Figures 5 and 6, and solutions $v_{3,4}(x, y, z, t)$ correspond to Figures 7 and 8. All of them produce a periodic traveling wave solution.



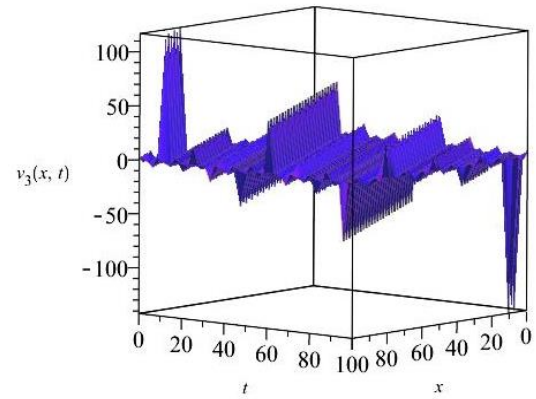
$$v_1(x, y, z, t) = \sqrt{-\frac{3\lambda}{\beta}} \tan \left(\sqrt{\frac{\lambda}{6}} (x + y + z - \lambda t + \mu) \right),$$

Figure 5 The solution $v_1(x, y, z, t)$ with $\beta = -3$, $\lambda = 2, \mu = 0.1$ and $0 \leq x, t \leq 100$ for $y = z = 0$.



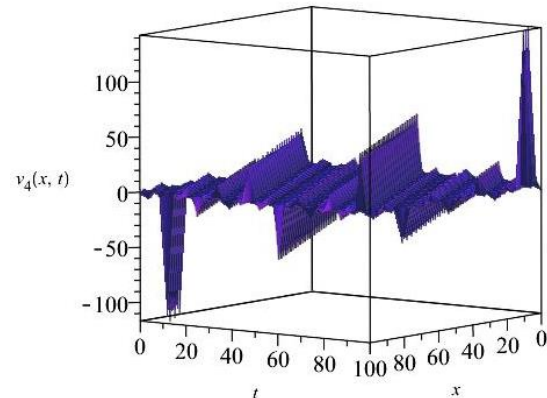
$$v_2(x, y, z, t) = -\sqrt{-\frac{3\lambda}{\beta}} \tan \left(\sqrt{\frac{\lambda}{6}} (x + y + z - \lambda t + \mu) \right),$$

Figure 6 The solution $v_2(x, y, z, t)$ with $\beta = -3$, $\lambda = 2, \mu = 0.1$ and $0 \leq x, t \leq 100$ for $y = z = 0$.



$$v_3(x, y, z, t) = \sqrt{-\frac{3\lambda}{\beta}} \cot \left(\sqrt{\frac{\lambda}{6}} (x + y + z - \lambda t + \mu) \right).$$

Figure 7 The solution $v_3(x, y, z, t)$ with $\beta = -3$, $\lambda = 2, \mu = 10$ and $0 \leq x, t \leq 100$ for $y = z = 0$.



$$v_4(x, y, z, t) = -\sqrt{-\frac{3\lambda}{\beta}} \cot \left(\sqrt{\frac{\lambda}{6}} (x + y + z - \lambda t + \mu) \right).$$

Figure 8 The solution $v_4(x, y, z, t)$ with $\beta = -3$, $\lambda = 2, \mu = 10$ and $0 \leq x, t \leq 100$ for $y = z = 0$.

5. Conclusion

In this work, using the Riccati–Bernoulli sub-ODE method, we investigated exact traveling wave solutions for the (1+1)–dimensional Landau–Ginzburg–Higgs equation and the (3+1)–dimensional modified KdV–Zakharov–Kuznetsov equation. The solutions are found in trigonometric and hyperbolic forms. In addition, we can solve nonlinear evolution equations in mathematical physics using this method.

The Riccati–Bernoulli sub-ODE method is easy to understand. This research also demonstrates that the proposed method is quite practical and appropriate for finding exact solutions to the (1+1)–dimensional Landau–Ginzburg–Higgs equation and the (3+1)–dimensional modified KdV–Zakharov–Kuznetsov equation. The performance of this method is reliable and effective, and it gives exact solitary wave solutions.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank reviewers for their hard work in improving the manuscript's overall quality and for their insightful comments that helped shape this paper even further.

REFERENCES

- Abdelrahman, M. A., Sohaly, M. A. & Alharbi, A. (2019). The new exact solutions for the deterministic and stochastic (2+1)–dimensional equations in natural sciences. *Journal of Taibah University for Science*, 13(1), 834–843.
- Abdel-Gawad, H. I., Tantawy, M., & Abdelwahab, A. M. (2022). A new technique for solving Burgers–Kadomtsev–Petviashvili equation with an external source. Suppression of wave breaking and shock wave. *Alexandria Engineering Journal*, 69(1), 167–176.
- Akter, J., & Akbar, M. A. (2015). Exact solutions to the Benney–Luke equation and the Phi-4 equations by using modified simple equation method. *Results in Physics*, 5(1), 125–130.
- 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.
- Alam, M. N., Hafez, M. G., & Akbar, M. A. (2015). Exact traveling wave solutions to the (3+1)–dimensional mKdV–ZK and the (2+1)–dimensional Burgers equations via $\exp(-\Phi(\eta))$ –expansion method. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 635–644.
- Alharbi, A. R., & Almatrafi, M. B. (2020). Riccati–Bernoulli sub-ODE approach on the partial differential equations and applications. *International Journal of Mathematics and Computer Science*, 15(1), 367–388.
- Ali, A. T. (2011). New generalized Jacobi elliptic function rational expansion method. *Journal of computational and applied mathematics*, 235(14), 4117–4127.
- Babi, S. & Mohyud-Din, S. T. (2014). New traveling wave solutions of Drinefel'd–Sokolov–Wilson Equation using Tanh and Extended Tanh methods. *Journal of the Egyptian Mathematical Society*, 22(3), 517–523.
- Barman, H. K., Akbar, M. A., Osman, M. S., Nisar, K. S., Zakarya, M., Abdel-Aty, A. H., & Eleuch, H. (2021). Solutions to the Konopelchenko–Dubrovsky equation and the Landau–Ginzburg–Higgs equation via the generalized Kudryashov technique. *Results in Physics*, 24, 104092.
- Hassan, S. Z., Alyamani, N. A., & Abdelrahman, M. A. (2019). A construction of new traveling wave solutions for the 2D Ginzburg–Landau equation. *The European Physical Journal Plus*, 134(9), 425.
- He, J. H., & Wu, X. H. (2006). Exp–function method for nonlinear wave equations. *Chaos, Solitons & Fractals*, 30(3), 700–708.
- Hosseini, K., Hincal, E., & Ilie, M. (2023). Bifurcation analysis, chaotic behaviors, sensitivity analysis, and soliton solutions of a generalized Schrödinger equation. *Nonlinear Dynamics*, 111(18), 17455–17462.
- Hosseini, K., Hincal, E., Mirekhtiary, F., Sadri, K., Obi, O. A., Denker, A., & Mirzazadeh, M. (2023). A fourth-order nonlinear Schrödinger equation involving power law and weak nonlocality: Its solitary waves and modulational instability analysis. *Optik*, 284, 170927.
- Hosseini, K., Sadri, K., Hincal, E., Sirisubtawee, S., & Mirzazadeh, M. (2023). A generalized nonlinear Schrödinger involving the weak nonlocality: its Jacobi elliptic function solutions and modulational instability. *Optik*, 288, 171176.
- Hosseini, K., Sadri, K., Hincal, E., Abbasi, A., Baleanu, D., & Salahshour, S. (2023). Periodic and solitary waves of the nonlinear Konno–Oono model: generalized methods. *Optical and Quantum Electronics*, 55(6), 564.
- Iatkiang, T., Kaewta, S., Tuan, N. M., & Sirisubtawee, S. (2023). Novel Exact Traveling Wave Solutions for Nonlinear Wave Equations with Beta–Derivatives via the sine–Gordon Expansion Method. *Wseas transactions on mathematics*, 22, 432–450.
- 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.
- Munro, S., & Parkes, E. J. (1999). The derivation of a modified Zakharov–Kuznetsov equation and the stability of its solutions. *Journal of Plasma Physics*, 62(3), 305–317.
- 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.
- Roozi, A., Alibeiki, E., Hosseini, S. S., Shafiof, S. M., & Ebrahimi, M. (2011). Homotopy perturbation method for special nonlinear partial differential equations. *Journal of King Saud University–Science*, 23(1), 99–103.
- 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, 952668.
- Shehata, M. S. (2016). A new solitary wave solution of the perturbed nonlinear Schrodinger equation using a Riccati–Bernoulli Sub-ODE method. *International Journal of the Physical Sciences*, 11(6), 80–84.
- 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), 1–17.

Estimation of Loan Repayment Events in Microfinance Bank Using

L1 – Lasso Penalized Cox Proportional Hazards Approach

Usman Mohammed^{1*}, Doguwa Sani¹, Alhaji Bukar², Dikko Hussaini¹ and Anuwat Tangtha³

¹Department of Statistics, Ahmadu Bello University Zaria, Nigeria

²Department of Mathematics, Nigerian Defence Academy Kaduna, Nigeria

³Department of Mathematics, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok Thailand

ABSTRACT

This study applied L1– Lasso estimation for Cox proportional hazards model to select variables that are relevant to credit repayment rates of loan in Microfinance bank. Records of 186 borrowers in Federal College of Education Zaria Nigeria Microfinance bank who took loans from 2017 to 2022 were used to identify the most predictive variables for repayment rates of loan. The findings of this study reveal that age of the borrowers, loan amount, occupation, type of collateral, residence and amount of loan influence the repayment rates of loan. Finally, the variables selected by the model can be used in granting loan to borrowers in Microfinance banking. R Programming Language was used for the analysis.

KEYWORDS: Bank Credit, L1 – Lasso, Cox Model, Penalization and Predictive Variables

*Corresponding Author: Author:ummohammed67@yahoo.com

Received: 27/06/2023; Revised: 30/11/2023; Accepted: 19/01/2024

1. INTRODUCTION

Basically, banks and other financial institutions engage in the following essential activities. These are:

- 1) accepting and safeguarding customer deposits including other assets.
- 2) making payments on behalf of customers.
- 3) granting credit to customers and
- 4) making investment.

The primary activity amongst these have been granting credit, and sometimes customers fail to repay the debt in time which they contractually owe in form of principal, interest and other fees, thereby defaulting on their obligation. This exposes such institutions to credit risk (Thackham, 2021). The term bank credit refers to the amount of credit available to a business or individual from a banking institution in the form of loans. It is the sum of money a person or business can borrow from a bank or other financial institutions (Twin, 2020). Risk Management is an important facet of Bank's policies. According to (Gunduz, 2020) credit risk is arguably the most significant, especially

for commercial banks. In (Apostolik et al., 2009) defined credit risk as “the potential loss a bank would suffer if a borrower fails to meets its obligations”. Socio-political and economic development of any country mostly rely on the ability of its banking institutions to give loans to their customers. It is one of the major economic functions of banks to finance investment activities by government, business and individuals. Granting credit to customers supports the growth of new businesses and jobs which promote economic activities. Banks earn most of their revenues from loan accounts. The repayment behavior of such loans is associated with many factors in the banking system (Li et al., 2022). When a bank experiences a financial problem, it may be as a result of bad loans. Banks are interested in ascertaining factors that are mostly influential in predicting loan repayment rates of the customers.

Survival analysis methods possess the ability to model the loan repayment rates of borrowers. It is a statistical procedure for data analysis for the estimation

of time until an event occurs. In this paper the event of interest is the loan repayment. In survival analysis, the estimated time for loan repayment can be the number of months (or days) from the day this loan is granted to the day the loan is repaid.

An event in survival analysis can be referred to as different outcomes obtained in a study. In medicine, the event can be the onset of a disease or death. In engineering, event can be a failure of a machine or an equipment system. In social sciences, event can be a change in social status of an individual. Survival analysis can also be applied in credit modelling, where the time to repayment of loan can be modelled. Survival data can be divided into complete and censored. Complete data refers to an observation that contains the beginning and end date which is determined by the event time. On the other hand, censored data is incomplete and it occurs when the required information is not available from the beginning to the end of the study. The three types of censored observations can be collected in survival analysis studies. These are:

- 1) right-censored observations
- 2) left-censored observations and
- 3) interval censored observations

Right-censored observations occur most in survival analysis studies because, the actual survival times of the individual which is “incomplete” (i.e censored) at the right-hand side of the follow-up period of the study giving the observations that is short of the actual survival time (Kleinbaum & Mitchel, 2005). Right-censoring occurs when an individual did not experience the event before the study end, when an individual is lost to follow up and when an individual withdraws from the study.

The traditional linear regression models cannot be applied to survival data or time-to-event data. This may result in biased estimation and the results may be misleading (Zhang et al., 2021).

The methods of survival analysis can be applied to credit risk management due to the need of accurate credit risk calculations. Credit risk analysis is important in financial risk management, especially, in practical applications (Assef & Steiner, 2020). In (Doris et al.,

2022) observed that, survival analysis studies allow for the prediction of time to default of loan obtained by considering the length of time taken, between the origin of loan and its default. Credit risk in finance and banking has drawn a considerable research attention (Mungasi & Odhiambo, 2019). Repayment of loan performance refers to the total sum of loans, a customer paid on time which was agreed between the parties. When a loan is not repaid, it may be due to inability of the customer to repay or he/she is not willing to repay (Nawai & Shariff, 2013). Ganiyu states that in the study of perspective on Nigerian financial safety net with qualitative analysis procedures, most banks had poor credit policies. Large amount of loans was granted without due regard of the ability of the customers to repay. In (Okpara, 2009) noted that the high rates of bank failure in Nigeria may be as a result of poor credit policies in place. According to (Xia et al., 2021) with recent advancement, accurate survival models are applied in the assessment of credit risk.

2. MATERIALS AND METHODS

A total of 186 customers who took loans from Federal College of Education Microfinance Bank Zaria, Nigeria were included in the study. The study aims to identify the factors that are associated with customers' repayments rates of loan in Microfinance bank. The dataset contains client descriptive variables which can influence the loan repayment rates. These are personal information about the client. It includes age (x_1), gender (x_2), marital status (x_3), educational background (x_4), residence (urban/rural) (x_5), occupation (civil servant/business) (x_6), purpose of loan (x_7), type of collateral (x_8), loan amount (x_9), repayment time (x_{10}) and repayment periods (y). Cox with L1-Lasso models were applied to perform variable selection, examine the regression coefficients path and build a model that can predict time-to-event of repayment rates of loan.

The following are some of the functions that are studied in survival analysis methods. These are survival function, hazard function, probability density function and cumulative hazard function. Let ‘ T ’ be a non-

negative random variable of survival time of a bank borrower from the time the loan is granted to the time the loan is repaid representing time until some events of interest occurs (such as repayment of loan). The response (dependent) variable has two parts – survival function and hazard function. The survival function is the complement of the hazards function and survival function describes the probability of loan repayment up to a specified duration of time. The hazard function on the other hand, describes the probability of not paying the loan in a specified period of time given $T > t$ (cond. prob) (Sangeetha & Chitra, 2021).

Given a distribution of a random variable ‘ T ’ the survival function denoted as $S(t)$ is given as:

$$S(t) = P(T > t) = 1 - F(t) \quad (1)$$

where $F(t)$ is the cumulative distribution function of ‘ T ’ representing the cumulative probability of a customer chosen at random to have a survival time ‘ T ’ less than some stated value ‘ t ’, and is given as:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(u)du \quad (2)$$

where ‘ f ’ is the probability density function of ‘ T ’

The hazard function denoted as $h(t)$ and is given as:

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{S(t)} \quad (3)$$

Here, the hazard function $h(t)$ is the conditional probability that the loan repayment occurs in time interval $(t, t + \Delta t)$ given that the loan repayment has not occurred before time t . (3) can be written as:

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (4)$$

Probability density function $f(t)$ of survival time ‘ T ’, refers to the limit of probability in which a customer repays the loan in a small time period ‘ t ’ to $(t + \Delta t)$ per its time interval of length Δt and is given as:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (5)$$

Cumulative hazard explains the accumulated hazards to time ‘ t ’. Thus, the cumulative hazard function, denoted as $H(t)$ is obtained by taking the integral of hazard function given as:

$$H(t) = \int_0^t h(u)du. \quad (6)$$

The cumulative hazard describes the cumulation of risks of a customer when the time passes from 0 to t .

2.1 Least Absolute and Shrinkage Selection Operator (Lasso)

In this study, we focus on identifying the predictor variables (or exposure variables) that have the strongest impact on the repayment rates of loan by a customer. The study aims to use those predictor variables (x ’s) to predict the repayment rates of loan. The study will utilize the L1 – Lasso and Cox proportional hazards approaches to the dataset. The Cox proportional hazards model is used to investigate the impact of different predictor variables on the probability of loan repayment while the L1 – Lasso penalized model, select the most predictive variables and avoid overfitting. L1 – Lasso method proposed by (Tibshirani, 1996), regularizes linear regression method which shrinks the coefficients closer to zero and other coefficients to exactly zero for a sparse solution and therefore, improving the interpretation of the model.

Nowadays, we collect more and more data. Sometimes with many and poorly described different kind of variables. In some researches, data are collected with more variables than the observations. Lasso is a procedure designed to scout through the data and extract few variables that have the ability to predict outcomes with accuracy. The main purpose of Lasso is to perform variable selection and regularization in order to enhance simplicity and accuracy of the model. This is achieved by adding penalty term to the linear regression. Lasso shrink unimportant variables to zero and the nonzero variables are selected to be utilized in the model. Lasso is a refined procedure that minimize the prediction errors encountered in statistical modeling.

L1 – Lasso model forms a diamond shape in the plot for its constrained region, as shown in Figure 1. The diamond shape includes corners, and the proximity of the first point to the corner shows that the model comes with one coefficient, which is equal to zero. Thus, shrinking the regression coefficient of the variable to zero to perform variable selection. The closeness of the first point to the corner of the diamond shape shows that L1 – Lasso model comes with one coefficient of a variable, which equal to zero. Thus, shrinking the coefficient in the model to zero to select variable. In Figure 1, x-axis represents the coefficient (β_1) and y-axis represents the coefficient (β_2). The red ellipses contour represents the Residual Sum of Squares (RSS).

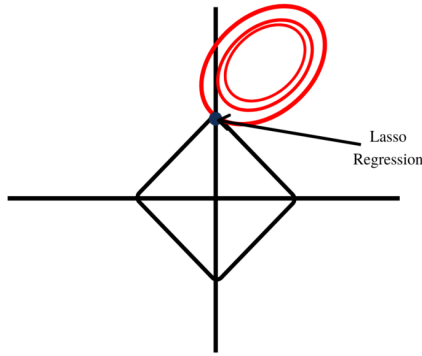


Figure 1 Lasso Geometry (<https://corporate.financeinstitute.com/data-science/lasso>)

L1 – Lasso model adds a constraint (or penalty) ($\lambda \|\beta\|_1$) to obtain equation (8). The consequence of applying this constraint is to reduce the regression coefficient towards zero, so that less contributive variables will have a regression coefficient close to zero or exactly equal to zero. In penalized regression, the aim is to reduce the impact of multicollinearity since predictor variables in the study may be highly related to one another (Abhinaya et al., 2021). L1 – Lasso selects variable and estimate the coefficient simultaneously by constraining the log-likelihood function of variable coefficients. Given a linear regression model:

$$Y = X^T \beta + \varepsilon \quad (7)$$

where Y is an $n \times 1$ column vector of dependent variable, X is an $n \times p$ matrix of predictor variables and β is a $p \times 1$ column vector of parameters. The last $n \times 1$ column vector is a vector of error terms. Also, $b_0, b_1, b_2, \dots, b_p$ are the estimates of unknown parameters $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$. In L1 – Lasso method, the coefficient β are estimated by minimizing

$$\hat{\beta}_{Lasso} = \arg \min_{\beta} \|y - x\beta\|_2^2 + \lambda \|\beta\|_1 \quad (8)$$

$$\hat{\beta}_{Lasso} = \arg \min_{\beta} \left[\sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij} \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_j| \right] \quad (9)$$

where

n is the number of observations

p is the number of predictor variables

$\lambda > 0$ is the regularization parameter.

$$\hat{\beta} = \arg \min_{\beta} \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij} \right)^2 \quad (10)$$

$$\text{where } \sum_{j=1}^p |\beta_j| \leq t$$

Lambda (λ) is the regularization parameter which controls the shrinkage in estimating the coefficients of L1 – Lasso model and $\lambda \geq 0$. If the lambda (λ) value is large enough more variables of estimated coefficient β become zero, and the nonzero coefficient of variables will be shrunk toward zero. If lambda (λ) is small, it implies less regularization by the model. Cross-validation is a method applied to estimate the lambda (λ) parameter. When a small value of lambda (λ) is estimated, it may result in over fitting of the model. On the other hands, a large value of lambda (λ) would lead to under fitting, because the procedure may not be able to capture the relationship in the model (Thevaraja et al., 2019). A ‘one-standard-error rule’ method in cross-validation, will be applied to select the best lambda (λ). For each $MSE(\lambda_s)$ the standard error of the mean is obtained, and the largest λ_s is selected for which $MSE(\lambda_s)$ is within one standard error of the minimum MSE value. Thus, we obtain a regularized

regression model while the MSE is increased by one standard error.

2.2 L1 - Lasso with Cox Proportional Hazards Model

Cox proportional hazards model is a regression model proposed by (Cox, 1972). It is an effective approach in survival analysis studies. The model is mostly used for multivariate regression analysis to analyze survival data. Cox model investigates the relationship between an event occurrence and a set of predictor variables (or covariates). The hazard function is the probability or the chance that an individual or subject will be affected by an event within an interval of time given that the individual or subject has survived up to the beginning of that interval of time. The response variable or outcome in Cox proportional hazards model is the hazard function at a given time. If a number of variables are involved, then the hazard or risk of an event', can be modeled by:

$$h(t, X) = h_0(t) \exp(\beta^T X) \quad (11)$$

where $h_0(t)$ is the unspecified baseline hazard function which is the probability of an event when all the predictor variables (X) equal to 0.

β is a vector of parameters

X is a matrix of predictive variables.

Cox proportional hazards model, computes hazard ratio (HR), which measures the effect of predictor variables on the hazard of event. Estimate of HR of two individuals with different predictor variables X and X* is given as:

$$\hat{HR} = \frac{h_0(t) \exp(\hat{\beta}^T X)}{h_0(t) \exp(\hat{\beta}^T X^*)} = \exp \left[\sum \hat{\beta} (X - X^*) \right] \quad (12)$$

The HR does not depend on time. This is the reason why the model is refers to as proportional hazards model. In other words, proportional hazard is a required assumption in Cox regression. It means the relative hazard or risk of event which is the value of the coefficient β in the model is constant over time 't'.

Cox model can also be expressed by taking the natural logarithm of equation (11) and divide both sides by the baseline hazard function. $h_1(t)$ and $h_2(t)$ are the baseline hazards functions of the two individuals whose hazards of event are compared.

$$\log \left\{ \frac{h_2(t)}{h_1(t)} \right\} = \log(\exp(\beta^T X)) \quad (13)$$

$$\log_e \left\{ \frac{h(t, X)}{h_0(t)} \right\} = \beta^T X \quad (14)$$

In Cox model, there is no assumption made on the probability distribution of the hazards i.e baseline hazards function. Cox model assumes that the ratio of the hazard function of two individuals is constant over survival time and that there is log-linear relationship between predictor variables and hazard function. This assumption makes Cox proportional hazards model to be a semiparametric. The results of the analysis of Cox model can be interpreted as, for a unit increase in variable (X_i) the hazard function is multiplied by the term e^{β_i} . With this, the predictor variables have multiplicative effect with hazard function. Taking a unit increase in one variable for an individual with the hazard function in Cox model:

$$h_1(t) = h_0(t) e^{\beta x_1} \quad (15)$$

Then for one unit increase

$$h_2(t) = h_0(t) e^{\beta(x_1+1)} \quad (16)$$

$$\frac{h_2(t)}{h_1(t)} = \frac{h_0(t) e^{\beta(x_1+1)}}{h_0(t) e^{\beta x_1}} \quad (17)$$

$$\frac{h_2(t)}{h_1(t)} = e^{\beta(x_1+1-x_1)} \quad (18)$$

$$\frac{h_2(t)}{h_1(t)} = e^{\beta} \quad (19)$$

then taking the logarithm of both sides we have:

$$\log \left\{ \frac{h_2(t)}{h_1(t)} \right\} = \log e^{\beta} \quad (20)$$

$$\log \left\{ \frac{h_2(t)}{h_1(t)} \right\} = \beta \quad (21)$$

In equation (21), the coefficient β is the logarithm of hazard ratio for a single unit increase in x_p . But when the variable increases by a single unit, the hazard of event happening (called hazard ratio) will increase by e^β unit. The β - parameter in equation (11) is estimated by maximizing the partial likelihood method.

Researchers are interested in the associations between each of the risk factors ($X_1, X_2, \dots, X_p$) and the results or outcome. The associations are determined by the coefficients in the model ($b_1, b_2, \dots, b_p$). The estimated coefficients in the Cox regression model say b_1 , is the change in the expected log of the hazard ratio relative to a one unit change in predictor variable X_1 , holding all other predictors constant.

Given a vector (t, δ, x) that consist of three items t is the length of time taken until an event occur or not occurring (censoring)

δ is the censoring indicator, 0 = censored, 1 = event. Here, x is a matrix of predictor variables.

Let ' n ' be the number of observed individuals in a study, ' r ' of them are affected by the event, and $n - r$ individuals become right censored observations.

If $t_{(1)} < t_{(2)} < \dots < t_{(r)}$ be an ordered event times and we let $X_{(i)}$ be the vector of predictor variables with individual whose survival time is $t_{(i)}$. We define $R(t_{(i)})$, to be the risk of a set at $t_{(i)}$ as the set of individuals who are still in the study, the time earlier to $t_{(i)}$, then the probability or chance, that the individuals with predictor variable $X_{(i)}$ experience the event at $t_{(i)}$ given that one individual from $R(t_{(i)})$ experience the event at $t_{(i)}$ is given as:

$$\frac{h(t_{(i)}, X_{(i)})}{\sum_{j \in R(t_{(i)})} h(t_{(i)}, X_{(j)})} \quad \text{by equation (11)}$$

The probability can be written in terms of the baseline hazard function and relative risk as:

$$\frac{h_0(t_{(i)}) \exp(\beta^T X_{j(i)})}{\sum_{j \in R(t_{(i)})} h_0(t_{(i)}) \exp(\beta^T X_j)}$$

The probability now, is given as:

$$\frac{\exp(\beta^T X_i)}{\sum_{j \in R(t_{(i)})} \exp(\beta^T X_j)}$$

It does not depends on the baseline hazard function since the baseline hazard function $h_0(t)$ cancel out. Cox (1972) made the assumption that if there is no tied event meaning that no two or more events occur at the same time, then parameter β can be estimated by the method of partial likelihood function. The probabilities are multiplied together over all distinct event times and the resulting product become conditional likelihood since it is a product of conditional probabilities.

$$L_p(\beta) = \prod_{i=1}^n \left[\frac{\exp(\beta^T x_{(i)})}{\sum_{j \in R(t_{(i)})} \exp(\beta^T x_j)} \right] \quad (22)$$

In equation (22), n is the number of individuals who have experienced the event – repayment of loan at time ' t ', $x_{(i)} = (x_{(i)1}, x_{(i)2}, \dots, x_{(i)p})$ are the predictor variables for the individual that experienced the event at the i^{th} ordered time $t_{(i)}$ and R_i is the set of subjects that are at risk just before time $t_{(i)}$. Taking the logarithm of both sides of Cox partial likelihood of equation (22), we have:

$$\log(L_p(\beta)) = \sum_{i=1}^n \left[\log \frac{\exp(\beta^T x_{(i)})}{\sum_{j \in R(t_i)} \exp(\beta^T x_j)} \right] \quad (23)$$

$$\log(L_p(\beta)) = \sum_{i=1}^n \log(\exp(\beta^T x_{(i)})) - \sum_{i=1}^n \log \left[\sum_{j \in R(t_i)} \exp(\beta^T x_j) \right] \quad (24)$$

$$\log(L_p(\beta)) = \sum_{i=1}^n \beta^T x_{(i)} - \sum_{i=1}^n \log \left[\sum_{j \in R(t_i)} \exp(\beta^T x_j) \right] \quad (25)$$

And taking the partial derivatives of equation (25) with respect to each parameter β_h , $h = i, \dots, p$

$$U_h(\beta) = \frac{\partial}{\partial \beta_h} \log(L_p(\beta)) = \sum_{i=1}^n x_{(i)h} - \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j \in R(t_i)} x_{(j)h} \exp(\beta^T x_j)}{\sum_{j \in R(t_i)} \exp(\beta^T x_j)} \quad (26)$$

Equation (26) refers to as the scores and the estimates of the model are obtained by solving the equations i.e setting $U_h(\beta) = 0$ according to (Ekman, 2017). Numerical method can be used to estimate the parameter β , for example Newton Raphson method. In Cox model the baseline hazard function is measured non-parametrically and therefore, the survival times are not assumed to follow a particular probability distribution at time 't' and the Cox model indicates that the hazard function or hazard rate may change over time. Estimates of the coefficient β in

Cox model with L1-Lasso are found by (27)

$$\hat{\beta} = \arg \min_{\beta} \left(- \sum_{i \in m} \log \left[\frac{\exp(\beta^T x_{(i)})}{\sum_{j \in R_i} \exp(\beta^T x_j)} \right] + \lambda \|\beta\|_1 \right) \quad (27)$$

$$\hat{\beta} = \arg \min_{\beta} \left(- \sum_{i \in m} \left[\beta^T x_{(i)} - \log \sum_{j \in R_i} \exp(\beta^T x_j) \right] + \lambda \|\beta\|_1 \right) \quad (28)$$

where $\lambda \|\beta\|_1$ is the penalty term of

L1 - Lasso model

The first term in equation (28)

is the log of the partial

likelihood of Cox model.

L1-Lasso performs variable selection. The regularized parameter lambda (λ) is chosen by k -fold cross-validation method, and k takes value between 5 and 10 (Hastie et al., 2015).

3. RESULTS AND DISCUSSION

This study utilized bank loans data of 186 customers obtained from Microfinance bank. The dataset consists of actual observations and censored. The censoring observation indicator is 0 for defaulting i.e non-payment of loan within the agreed period of time. and 1 for non-defaulting/event occurrence i.e payment of loan on time. From Table 1, the total number of borrowers is 186. 35 (18.8%) of them

Table 1 Status of Repayment of Loan

	N	Percent (%)
Event	151	81.2
Censored	35	18.8
Total	186	100

defaulted (unpaid loan as at when due) and 151 (81.2%) of them repaid their loan on time.

In regression analysis, presence of multicollinearity in a dataset is a violation of one of the assumptions required by regression model. Multicollinearity is a situation whereby some variables in the regression model are related. A small bit of multicollinearity can cause huge problem in regression analysis. Therefore, detection of multicollinearity in a dataset is very important. The impact of multicollinearity can affect the precision of the estimated regression coefficients negatively on the power of a model. The variance inflation factor (VIF) is a method that quantifies the extent of correlation between one predictor and the others in a regression model. The VIF estimates how much the coefficient of a variable is inflated or influenced as a result of the predictor variables in the analysis. Higher values of VIF indicates that it is difficult or impossible to accurately assess the contribution of predictor variable in a model. The VIF value of one means that the predictor variable is not related with other variables. The VIF values greater than five (5) indicates the presence of multicollinearity.

Table 2 reports the VIF value of each predictor variable in the dataset, and since all VIF values are less than five, this indicates that multicollinearity is not present in the dataset. In other words, no two or more predictor variables are related to each other and therefore, we can proceed with the analysis.

Table 3 gives the summary statistics for sample size of the customers included in the study. Out of 186, 140(75.3%) males customers participated in the study, while only 46(24.7%) females customers participated in the study. The mean and median of survival times (repayment periods) in months for male customers are 7.29 and 7.00 respectively, while the mean and median of survival times for female customers in months are 7.08 and 7.00 respectively.

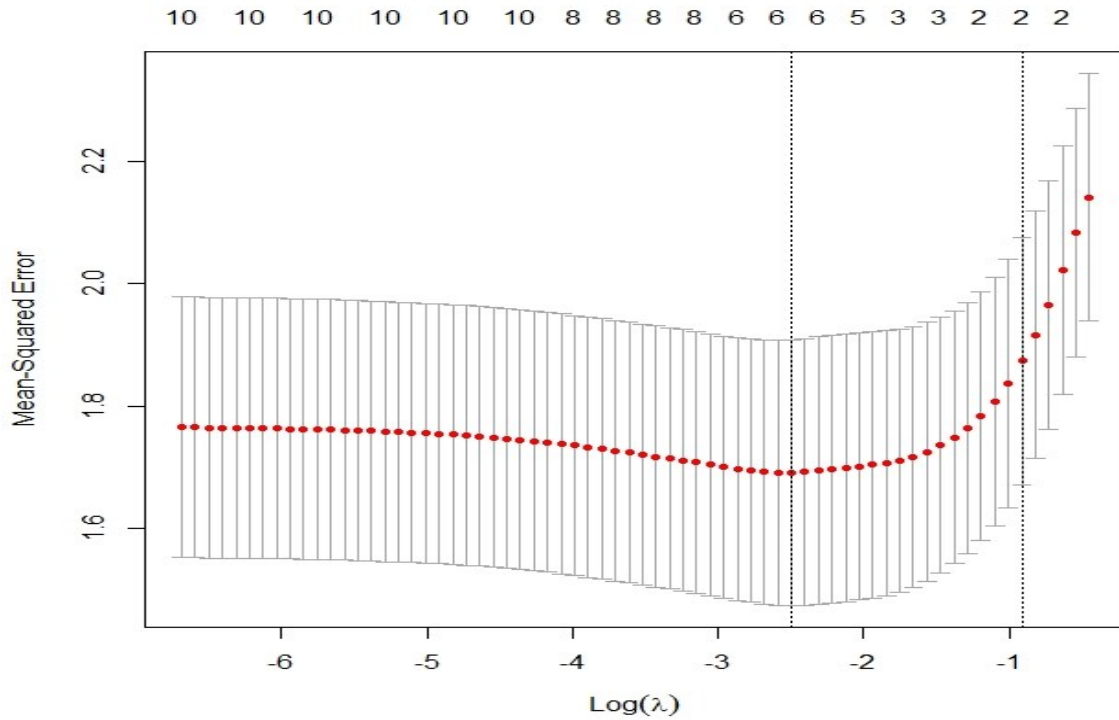


Figure 1 L1-Lasso Cross-validation Estimate for Mean Square Error

Table 2 VIF Values of the Ten (10) Variables

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
1.38205	2.72735	0.32670	0.18461	1.59489	1.10752	2.38065	0.98787	1.10251	1.2354

Table 3 Summary Statistics for Sample Size

	N	Percent (%)
Male	140	75.3
Female	46	24.7
Total	186	100

The Cox model with L1-Lasso model were employed to perform variable selection and build a model that can predict for event occurrence i.e repayment rates of loan. L1-Lasso was applied to identified the important variables associated with the repayment rates of loan and Cox model estimates the hazards ratio (HR), obtains as the exponential of regression coefficient, and it gives the effect size of the important variables.

In Figure 1, the values at the top of the plot indicate the number of predictor variables in the model when lambda (λ) changes. Vertical dotted line on the left-hand side gives the lambda (λ) value for the minimum MSE and vertical dotted line on the right-hand side

indicates the lambda (λ) that was chosen according to the model i.e MSE is within one standard error of the minimum MSE. Ten folds were used in cross-validation to obtained the optimal value of λ . From cross-validation results, the optimal value for lambda (λ) was found to be 0.06227052.

Figure 2 displays the path of the coefficients (lasso path) for every variable when using L1-Lasso penalized Cox model. In Figure 2, the curves that are away from the center line represent the selected variables that can influenced the repayment rates of loan. Those variables selected with statistical association for repayment rates of loan were suitable for multivariate analysis in Cox model. The Cox model was used to investigate the effect of those variables that can affect the risks of repayment rates of loan. Table 4 gives the six selected predictor variables by L1-Lasso model that can affect the time to survival of repayment rates of loan.

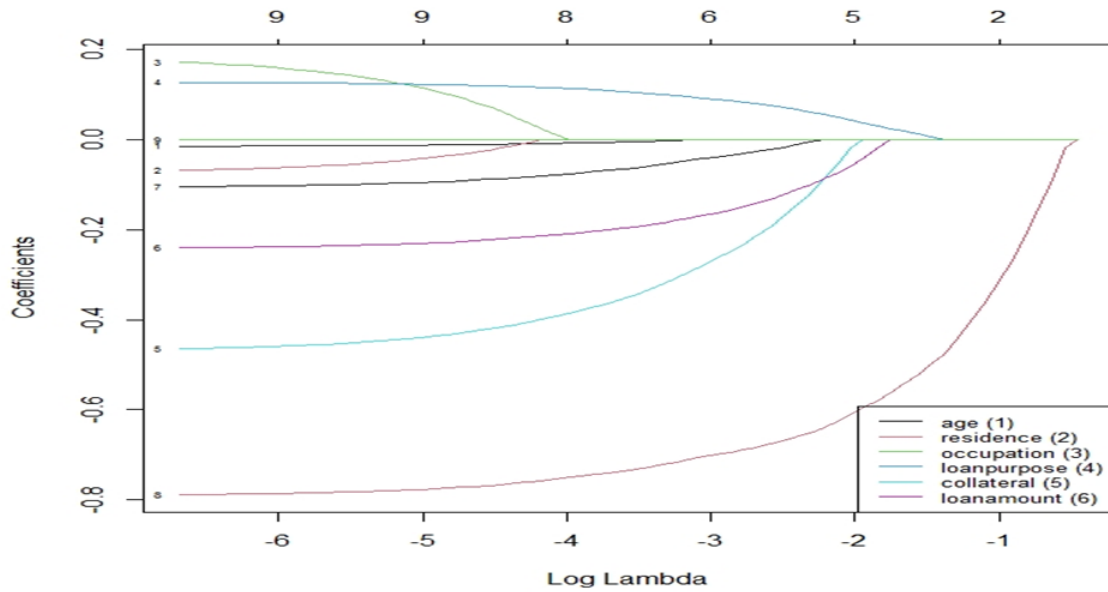


Figure 2 Coefficient Path (lasso path) for the Predictor Variables

Table 4 Multivariate Cox Proportional Hazard Results on the Time to the Repayment of Loans

Variables	coef (β)	exp(β) (HR)	se(β)	z-value	p-value
age 30–50 (Ref.)	-0.0377	0.9630	0.0498	-0.7590	0.4480
51–70					
loanpurpose personal (Ref.)	0.0732	1.0760	0.3240	0.5540	0.5800
trading					
occupation business (Ref.)	0.1711	1.1870	0.1728	0.9900	0.3220
civil servant					
Collateral CFO (Ref.)	0.1469	1.1580	0.2113	0.6960	0.0121
salary acct					
residence rural (Ref.)	0.0925	0.0970	0.2083	0.4440	0.4870
urban					
loanamount	-0.0053	1.0000	0.0044	-1.1940	0.2320

CFO = certificate of occupancy

Ref. = reference category

3.1 Interpretation of the Predictor Variables in Cox PH Model

If the hazard ratio (HR) is greater than one, it indicates increase in the risk of the event i.e increase in the repayment rates of loan by a customer. On the other hand, a HR less than one indicates decrease in the event of interest i.e decrease in the risk of experiencing the event. Thus, decrease in repayment rates of loan by a customer. When the HR equals one it implies equal hazards of experiencing the event between the two categories of the customers.

i) Age

From Table 4, the HR of age is 0.9630 and the value is less than one. $100(1 - 0.9630) = 3.7\%$. This implies that a customer in age group 51 – 70 years is 3.7% times less likely to repay the loan within the agreed period of time compared to those customers in age group 30 – 50 years. In other words, granting loan to those customers in age group 51 – 70 years is a little bit risky.

ii) Loan purpose

The HR of loan purpose from Table 4, is 1.0760. The value is greater than one.

$100(1.0760 - 1) = 7.6\%$. This means that a customer who is a trader is 7.6% times more likely to repay the loan in time compared to those customers who secured the loan for personal reasons.

iii) Occupation

Table 4, gives the HR of occupation to be 1.1870 and the value is greater than one. $100(1.1870 - 1) = 18.7\%$. This indicates that a customer who is a civil servant is 18.7% times more likely to repay the loan in time compared to those customers who obtained the loan for business.

iv) Collateral

The HR of collateral from Table 4, is 1.1580 and the value is greater than one. $100(1.1580 - 1) = 15.8\%$. This means that a customer whose salary acct was used as security against the loan by the bank is 15.8% times more likely to repay the loan in time compared to those customers whose CFO was collected by bank as security against the loan.

v) residence

Table 4, also reports the HR of residence to be 0.0970. The value is less than one and $100(1 - 0.0970) = 90.3\%$. This means that a customer who lives in urban area is 90.3% times less likely to repay the loan in time compared to those customers who live in rural areas. In other words, loan advanced to customers in urban areas are more risky.

vi) loan amount

From Table 4, the HR of loan amount is one. This implies equal hazards or risks in the repayment rates of loan between the categories of the amount of loan granted to customers.

4. CONCLUSION

This study applied the L1-Lasso regularized Cox proportional hazards method to predict the event – repayment rates of loan of FCE Microfinance bank. With the number of selected variables that are truly informative, the method drops non-relevant variables. By discarding variables that are less important in L1-Lasso penalized Cox method, a parsimonious model was produced which can improve the interpretation of

the model as compared to the classical statistical models. When a model is simple, its application and interpretation will be easier. This research identified the factors that affect the repayment rates of loan of Microfinance bank. From L1-Lasso Cox proportional hazards analysis, it is found that the repayment rates of loan is greatly influence by the predictor variable collateral with the p-value less than 0.05

Finally, the selected variables by the model can be used in issuing the loan in Microfinance banking. This study recommends that Microfinance banks should monitor the loans given to their customers in order to check any character change as it may affect the repayment rates of loan negatively.

REFERENCES

- Abhinaya, D., Patil, S. G., Dheebakaran, G., Djanaguiraman, M., & Arockia, S. R. (2021). Use of statistical models in predicting groundnut yield in relation to weather parameters.
- Apostolik, R., Donohue, C., & Went, P. (2009). *Foundations of banking risk: an overview of banking, banking risks, and risk-based banking regulation*. John Wiley & Sons. (pp. 16-22)
- Cox, D. R. (1972). Regression models and life-tables. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 34(2), 187-202.
- Ekman, A. (2017). *Variable selection for the Cox proportional hazards model: A simulation study comparing the stepwise, lasso and bootstrap approach* [Master thesis]. UMEÅ University University.
- Fejza, D., Nace, D., & Kulla, O. (2022). The Credit Risk Problem-A Developing Country Case Study. *Risks*, 10(8), 146.
- Gunduz, V. (2020). *Risk Management in Banking Sector*. Bahçeşehir Cyprus University Banking and Finance. Publisher: Artikel Akademik. (pp. 121-135).
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Wainwright, M. (2015). Statistical learning with sparsity. *Monographs on statistics and applied probability*, 143(143), 8.
- Kleinbaum, D. G., & Mitchel, S. (2005). *Survival Analysis: A Self-Learning Text* (3rd ed.). Springer. (pp. 98-164).
- Li, H., Campbell, D., & Erdem, S. (2022). Measuring time preferences using stated credit repayment choices. *Journal of Quantitative Economics*, 20(1), 43-67.
- Mungasi, S., Odhiambo, C. (2019). Comparison of Survival Analysis Approaches to Credit Risks. *American Journal of Theoretical and Applied Statistics*, 8(2), 39-46.
- Nawai, N., & Shariff, M. N. M. (2013). Loan Repayment Problems in Microfinance Programs that use Individual Lending Approach: A Qualitative Analysis. *Journal of Transformative Entrepreneurship*, 1(2), 93-99.
- Ogunleye, G. A. (2010). *Perspectives on the Nigerian financial safety-net*. Nigeria Deposit Insurance Corporation.
- Okpara, G. C. (2009). A synthesis of the critical factors affecting performance of the Nigerian banking system. *European Journal of Economics, Finance and Administrative Sciences*, 17(17), 34-44.

- Sangeetha, S., & Chitra, K. (2021). Solvency and Survival of Microfinance Institutions: An Indian Scenario-Policy Implications to Improve Endurance. *Indian Journal of Finance and Banking*, 5(2), 130-140.
- Thackham, M. (2021). *Survival Analysis: Applications to Credit Risk Default Modelling* [Doctoral thesis]. Macquarie University.
- Thevaraja, M., Rahman, A., & Gabirial, M. (2019, April). Recent developments in data science: Comparing linear, ridge and lasso regressions techniques using wine data. In *Proceedings of the international conference on digital image & signal processing* (pp. 1-6).
- Tibshirani, R. (1996). Regression shrinkage and selection via the lasso. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 58(1), 267-288.
- Twin, A. (2020). The Investopedia Express Podcast. Retrieved 2020, from <http://www.investopedia.com/terms/b/bank-redit.asp>
- Xia, Y., He, L., Li, Y., Fu, Y., & Xu, Y. (2021). A dynamic credit scoring model based on survival gradient boosting decision tree approach. *Technological and Economic Development of Economy*, 27(1), 96-119.
- Zhang, D. F., Bhandari, B., & Black, D. (2020). Covariate Selection for Mortgage Default. Anareview approach and discussion. *Ingenier iac Investigación*, 40(2), 50-71.

Global Stability and Sensitivity Analysis of a Conjunctivitis Epidemic Model in Two Populations with Patient Isolation, Treatment and Insecticide Control

Surapol Naowarat¹ and Kanyakorn Onruk^{1*}

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

ABSTRACT

Conjunctivitis (pink eye) is a conjunctive infection. It is caused by viruses, bacteria, or allergies. In this study, we present and analyze a conjunctivitis model that includes the consequences of patient isolation, treatment control, and insecticide control. This SIR-SI (susceptible, infected, recovery – susceptible, infected) model describes disease transmission between humans and fly populations. The proposed model is examined using the standard method. The next generation matrix approach is used to calculate the basic reproductive number. The Lyapunov function is applied to determine the model's stability. The disease-free equilibrium point (DFE) is global asymptotically stable if $R_0 < 1$, whereas the endemic equilibrium point (EE) is global asymptotically stable if $R_0 > 1$. In addition, a sensitivity analysis of the model is performed to determine the significance of model parameters on disease transmission. According to DFE's sensitivity analysis, the effectiveness of patient isolation or human-fly contact prevention is the most sensitive parameter. The numerical results are used to support the theoretical findings. It has been determined that when the effectiveness of patient isolation and recovery of infected humans who visit the doctor increases, the number of infected humans decreases. Furthermore, when the effectiveness of insecticides to protect flies increases, the number of infected flies also decreases.

KEYWORDS: global stability, sensitivity analysis, conjunctivitis, patient isolation, treatment, insecticide control

*Corresponding Author: kanyakorn.onr@sru.ac.th

Received: 13/04/2023; Revised: 10/02/2024; Accepted: 14/02/2024

1. INTRODUCTION

Conjunctivitis (pinkeye) is an infection or inflammation of the conjunctiva (the thin, clear tissue that lies over the white part of the eye) and the inner side of the eyelid. It may be caused by viruses, some bacteria, and an allergic reaction like pollen, smoke, dust, or toxic substances. In this paper, we focus on the conjunctivitis caused by the virus. The symptoms of conjunctivitis are characterized by the white part of the eye becoming red, itchy eyes, blurred vision, and an increased amount of tears. It is transmitted by direct contact with infected people by touching their hands to an infected eye or by contact with infectious tears or susceptible individuals which their eyes contacted with carrier flies. The incubation period of susceptible individuals who get infected with the virus is about 1–2 days, and the period of infection is about 14 days (Alkhubari et al., 2014). Mathematical modeling plays an important role

in terms of understanding the underlying mechanisms that influence the spread of the disease and is used as a crucial instrument for effective prevention and intervention strategies against conjunctivitis. In 2014 (Unyong & Naowarat, 2014), the authors proposed an SEIR model of conjunctivitis that considers a nonlinear incidence term. The local stability of the model was carried out. It was concluded that a decrease in the number of infected humans was dependent on the increase in the number of infected individuals. In 2014 (Suksawat & Naowarat, 2014), the authors proposed and analyzed the conjunctivitis model, incorporating rainfall. It is concluded that the rainfall has an effect on the transmission of disease. In 2015 (Sangthongjeen et al., 2015), the authors proposed a modified model of conjunctivitis that incorporated the effects of educational campaigns. To obtain better results, a combination of the perturbation iteration method and

Taylor series expansion was applied. In 2019 (Viriyapong & Khedwan, 2019), the authors proposed and analyzed the extended model by adding the effect of patients' isolation and the role of recovered individuals, who are not educated enough by the doctor to protect themselves. In 2019 (Nana-Kyer et al., 2019), the authors proposed a stochastic optimal control model for AHC. The maximum principle was applied to derive the necessary conditions for the existence of optimal control. In 2019 (Uchenna et al., 2019), the authors proposed and analyzed the model of AHC both analytically and numerically. Furthermore, the modified model was extended as an optimal control problem, taking into account the effects of proper sanitation and the training of the educators. The maximum principle was applied to obtain the necessary conditions for the existence of optimal control. The results showed agreement between analytical and numerical solutions. In addition, if sanitation, which includes the serenity of the school environment, conduciveness of the classrooms, and personal hygiene, is observed in and outside the school and the education of the caregivers (teachers, menders, parents, and even pupils) is an articulated property, the number of infected students will decrease drastically over time. In 2006 (Chowell et al., 2006), the authors suggested that the patient's isolation is an intervention to prevent the transmission of this disease. From the reviewed literature, most researchers proposed conjunctivitis models that consist of only the human population. In 2017 (Thongtha et al., 2017), the authors proposed a new model that considers human-human and fly-human transmission, while human-human transmission is defined in the context of infection by hyper infection vibrio. In 2021 (Thongtha & Modnak, 2021), the authors studied the transmission of cholera models that incorporate data on public health interventions. They were interested in the spread of cholera from vibrios and fly transmission to human populations. In this study, the fly population is divided into two groups: susceptible flies and infected flies. In addition, flies are the vector of conjunctivitis. Therefore, in this study, we will

include the fly population in our model to investigate conjunctivitis transmission.

The objective of this paper is to propose and analyze an SIR-SI model of conjunctivitis in two populations with the effects of patients' isolation, treatment control, and insecticide control. In this paper, a mathematical model is formulated for the dynamics model of conjunctivitis in Section 2. The model properties, both positivity and boundedness of solutions, are derived in Section 3. Model analysis, which consists of equilibrium points, basic reproductive numbers, stability analysis, and sensitivity analysis, is performed in Section 4. In Section 5, the numerical results are presented to support the theoretical results. Finally, the conclusions are summarized in Section 6.

2. MODEL FORMULATION

In this section, a human and fly (SIR-SI) model of conjunctivitis transmission is formulated by taking into account the patient's isolation, treatment control, and insecticide control strategies. The human population and the fly population are denoted by N_h and N_f , respectively. The schematic diagram of this model is shown in Figure 1. The human population is divided into three compartments, namely susceptible human (S_h), infected human (I_h), and recovered human (R_h). The fly population is also classified into two compartments, namely susceptible flies (S_f), and infected flies (I_f). For the proposed model, there are some assumptions: all newborn flies are susceptible, and they will become infected flies if they are contacted with the discharges or gums of an infected human.

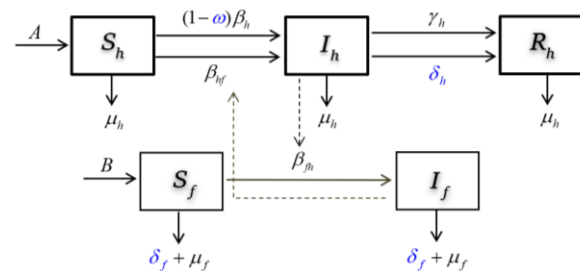


Figure 1 A schematic diagram of conjunctivitis model.

The system of ordinary differential equations is as follows:

$$\frac{dS_h}{dt} = A - ((1-\omega)\beta_h I_h + \beta_{hf} I_f) S_h - \mu_h S_h, \quad (1)$$

$$\frac{dI_h}{dt} = ((1-\omega)\beta_h I_h + \beta_{hf} I_f) S_h - (\gamma_h + \delta_h + \mu_h) I_h, \quad (2)$$

$$\frac{dR_h}{dt} = (\gamma_h + \delta_h) I_h - \mu_h R_h, \quad (3)$$

$$\frac{dS_f}{dt} = B - \beta_{fh} S_f I_h - (\delta_f + \mu_f) S_f, \quad (4)$$

$$\frac{dI_f}{dt} = \beta_{fh} S_f I_h - (\delta_f + \mu_f) I_f, \quad (5)$$

with $N_h = S_h + I_h + R_h$ and $N_f = S_f + I_f$,

where A is the recruitment rate of the human population, ω is the effectiveness of patient isolation, β_h is the transmission rate of conjunctivitis from infected human to susceptible human, β_{hf} is the transmission rate of conjunctivitis from infected flies to susceptible human, β_{fh} is the transmission rate of conjunctivitis from infected human to susceptible flies, μ_h is the natural death rate of human population, γ_h is the recovery rate of an infected human who does not visits a doctor, δ_h is the recovery rate of an infected human who visits a doctor, B is the recruitment rate of the fly population, δ_f is the effectiveness of insecticides in protecting flies, and μ_f is the natural death rate of fly population.

3. MODEL PROPERTIES

In this section, we find the fundamental properties of the system, which are essential in the proof of the following section.

3.1 Positivity of Solutions

The associated parameters of the system (1) – (5) with respect to the initial conditions are non-negative for all $t > 0$ and we prove this in the following procedures to get the results.

Lemma 1. If $S_h(0), I_h(0), R_h(0), S_f(0), I_f(0)$ and all associated parameters of the system are positive, then solutions $S_h(t), I_h(t), R_h(t), S_f(t), I_f(t)$ are positive for all time $t > 0$.

Proof If $S_h(0) \geq 0, I_h(0) \geq 0, R_h(0) \geq 0, S_f(0) \geq 0, I_f(0) \geq 0$, it follows by the first equation, we have

$$\frac{dS_h}{dt} + (\phi_1 + \mu_h) S_h = A, \text{ where } \phi_1 = (1-\omega)\beta_h I_h + \beta_{hf} I_f$$

It can be re-written as:

$$\frac{dS_h}{dt} e^{\int_0^t (\phi_1 + \mu_h) dt} + S_h (\phi_1 + \mu_h) e^{\int_0^t (\phi_1 + \mu_h) dt} = A e^{\int_0^t (\phi_1 + \mu_h) dt},$$

$$\frac{d}{dt} \left(S_h e^{\int_0^t (\phi_1 + \mu_h) dt} \right) = A e^{\int_0^t (\phi_1 + \mu_h) dt}.$$

$$\text{Therefore, } S_h e^{\int_0^t (\phi_1 + \mu_h) dt} + S_h(0) = \int_0^t A e^{\int_0^s (\phi_1 + \mu_h) ds} dt.$$

Consequently,

$$S_h(t) = S_h(0) e^{-\int_0^t (\phi_1 + \mu_h) dt} + e^{-\int_0^t (\phi_1 + \mu_h) dt} \int_0^t A e^{\int_0^s (\phi_1 + \mu_h) ds} dt > 0.$$

For the state variables $I_h(t), R_h(t), S_f(t)$ and $I_f(t)$, we can apply the same method to get $I_h(t) \geq 0, R_h(t) \geq 0, S_f(t) > 0, I_f(t) \geq 0$ for $t > 0$.

3.2 Boundness of Solutions

In this section, the boundary of the solutions of a system of equations is determined. The total human population in this model is $N_h = S_h + I_h + R_h$.

Therefore, we have

$$\frac{dN_h}{dt} = A - \mu_h N_h.$$

$$\text{Hence, } N_h(t) = \frac{A}{\mu_h} - \left(\frac{A}{\mu_h} - N_h(0) \right) e^{-\mu_h t}, \text{ where } N_h(0)$$

denotes the initial values of the total human population

and $N_h(0) \leq \frac{A}{\mu_h}$. As $t \rightarrow \infty$ then $N_h(t) \rightarrow \frac{A}{\mu_h}$, implies

that $N_h(t) \leq \frac{A}{\mu_h}$, and $N_f = S_f + I_f$,

$$\frac{dN_f}{dt} = B - (\delta_f + \mu_f) N_f.$$

$$\text{We obtain } N_f = \frac{B}{\delta_f + \mu_f} - \left(\frac{B}{\delta_f + \mu_f} - N_f(0) \right) e^{-\mu_f t},$$

where $N_f(0)$ denotes the initial values of the total fly population and $N_f(0) \leq \frac{B}{\delta_f + \mu_f}$. As $t \rightarrow \infty$ then

$N_f \rightarrow \frac{B}{\delta_f + \mu_f}$ implies that $N_f \leq \frac{B}{\delta_f + \mu_f}$. Therefore,

all solutions of this model are bounded and enter the region Ω

$$\left\{ (S_h, I_h, R_h, S_f, I_f) \in \mathfrak{R}_+^5 : 0 < N_h \leq \frac{A}{\mu_h}, 0 < N_f \leq \frac{B}{\delta_f + \mu_f} \right\}. \quad (6)$$

Hence, Ω is the positively invariance. This means that every solution of this model remains in the region for all $t > 0$.

4. MODEL ANALYSIS

4.1 Equilibrium points

By applying the standard method to analyze the present model, it is found that there are two equilibrium points, as follows:

1) Disease-free equilibrium (DFE) denoted by

$$E_0 = \left(\frac{A}{\mu_h}, 0, 0, \frac{B}{\delta_f + \mu_f}, 0 \right)$$

2) Endemic equilibrium (EE) denoted by

$$E_1 = (S_h^*, I_h^*, R_h^*, S_f^*, I_f^*),$$

$$S_h^* = \frac{A - (\delta_h + \gamma_h + \mu_h)I_h^*}{\mu_h}, \quad I_h^* = \frac{-a_1 + \sqrt{a_1^2 + 4a_2}}{2},$$

$$R_h^* = \frac{(\delta_h + \gamma_h)I_h^*}{\mu_h}, \quad S_f^* = \frac{B}{\beta_{fh}I_h^* + \delta_f + \mu_f},$$

$$I_f^* = \frac{B\beta_{fh}I_h^*}{(\delta_f + \mu_f)(\beta_{fh}I_h^* + \delta_f + \mu_f)},$$

$$\text{where } a_1 = \frac{m_1 - Am_2}{(\delta_h + \gamma_h + \mu_h)m_2},$$

$$a_2 = \frac{\mu_h(\gamma_h + \delta_h + \mu_h)(\gamma_h + \delta_h)(R_0 - 1)}{(1 - \omega)\beta_{fh}\beta_{fh}},$$

$$m_1 = (1 - \omega)\beta_{fh}(\gamma_h + \delta_h)^2 + B\beta_{fh}\beta_{fh} > 0,$$

$$m_2 = (1 - \omega)(\delta_f + \mu_f)\beta_{fh}\beta_{fh} > 0,$$

$$m_3 = (1 - \omega)\beta_{fh}(\delta_f + \mu_f)^2 + B\beta_{fh}\beta_{fh} > 0,$$

$$R_0 = \frac{A[(1 - \omega)\beta_{fh}(\delta_f + \mu_f)^2 + \beta_{fh}\beta_{fh}B]}{\mu_h(\delta_h + \gamma_h + \mu_h)(\delta_f + \mu_f)^2}.$$

From I_h^* , it was found that (i) if $m_1 > Am_2$ and $R_0 < 1$, then $a_1 > 0$, $a_2 < 0$ and there is no positive equilibrium point. (ii) If $m_1 < Am_2$ and $R_0 > 1$, then $a_1 < 0$, $a_2 > 0$ and the system has the positive equilibrium point (E_1). (iii) If $m_1 > Am_2$, $R_0 > 1$ and $\sqrt{a_1^2 + 4a_2} > a_1$, then the system has one positive equilibrium point (E_1). The basic reproductive number R_0 , obtained from the equilibrium analysis, is computed by using the next generation matrix method, which has been shown in the next topic.

4.2 Basic reproductive number

The basic reproductive number (R_0) is the average number of secondary infections induced by an infected individual introduced into the total susceptible population. It is one of the threshold conditions in an epidemic that allow us to predict whether the disease will be died out or persist (Heffernan et al., 2005 and Diekmann et al., 2019). We calculate our basic reproductive number using the next generation method and use the spectral radius (Van den Driessche & Watmough, 2002). By applying this approach, it is given by $R_0 = \rho(FV^{-1})$ where $\rho(A)$ denotes the spectral radius of a matrix A (the largest eigenvalues of A), where $F(X)$ is the non-negative matrix of new infection terms and $V(X)$ is the non-singular matrix of the remaining transfer terms. The system (1) – (5) is rewritten in a matrix form:

$$\frac{dX}{dt} = F(X) - V(X), \quad X = (S_h, I_h, R_h, S_f, I_f)^T \quad (7)$$

$$F(X) = \begin{bmatrix} 0 \\ (1 - \omega)\beta_{fh}S_hI_h + \beta_{hf}S_hI_f \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$V(X) = \begin{bmatrix} -A + (1 - \omega)\beta_{fh}S_hI_h + \beta_{hf}S_hI_f + \mu_hS_h \\ (\delta_h + \gamma_h + \mu_h)I_h \\ -(\delta_h + \gamma_h)I_h + \mu_hR_h \\ -B + \beta_{fh}S_fI_h + (\delta_f + \mu_f)S_f \\ -\beta_{fh}S_fI_h + (\delta_f + \mu_f)I_f \end{bmatrix}.$$

By finding the Jacobian matrix of F and V at E_0 , respectively, the following matrices are obtained

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(1 - \omega)\beta_{fh}A}{\mu_h} & 0 & 0 & \frac{\beta_{hf}A}{\mu_h} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{E_0},$$

$$V = \begin{bmatrix} \mu_h & \frac{(1 - \omega)\beta_{fh}A}{\mu_h} & 0 & 0 & \frac{\beta_{hf}A}{\mu_h} \\ 0 & \delta_h + \gamma_h + \mu_h & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(\delta_h + \gamma_h) & \mu_h & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\beta_{fh}B}{\delta_f + \mu_f} & 0 & \delta_f + \mu_f & 0 \\ 0 & -\frac{\beta_{fh}B}{\delta_f + \mu_f} & 0 & 0 & \delta_f + \mu_f \end{bmatrix}_{E_0}.$$

Moreover, FV^{-1} is obtained as

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(1-\omega)\beta_h A(\delta_f + \mu_f)^2 + \beta_{hf}\beta_{fh}AB}{\mu_h(\delta_h + \gamma_h + \mu_h)(\delta_f + \mu_f)^2} & 0 & 0 & \frac{(1-\omega)\beta_h A}{\mu_h(\delta_f + \mu_f)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

So, the basic reproductive number is obtained as

$$R_0 = \frac{A \left[(1-\omega)\beta_h(\delta_f + \mu_f)^2 + \beta_{hf}\beta_{fh}B \right]}{\mu_h(\delta_h + \gamma_h + \mu_h)(\delta_f + \mu_f)^2}. \quad (8)$$

From the basic reproductive number, it was found that the parameters of interest, such as the effectiveness of patient separation (ω), the recovery rate of infected people who see a doctor (δ_h), and the effectiveness of insecticides in protecting flies (δ_f), affect R_0 . Therefore, the condition of the epidemic of the conjunctivitis infection is that if $R_0 < 1$, then the epidemic of conjunctivitis decreases. However, if $R_0 > 1$, the epidemic of conjunctivitis increases.

4.3 Global stability of disease-free equilibrium point

We prove the global stability of the disease-free equilibrium point (E_0) by using the Lyapunov theorem (see, e.g., Alkhudhari et al., 2014 and Van den Driessche & Watmough, 2002).

Theorem 1. If $R_0 \leq 1$, then the disease-free equilibrium point (E_0) is globally asymptotically stable on Ω .

Proof Let $V(t) = S_h^* \left(\frac{S_h}{S_h^*} - S_h^* \ln \left(\frac{S_h}{S_h^*} \right) \right) + I_h$

$$+ \frac{\beta_{fh}A}{(\delta_f + \mu_f)\mu_h} S_f^* \left(\frac{S_f}{S_f^*} - S_f^* \ln \left(\frac{S_f}{S_f^*} \right) \right) + \frac{\beta_{fh}A}{\mu_h(\delta_f + \mu_f)} I_f. \quad (9)$$

Next, for the derivative of V with respect to time t , we have

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \frac{dS_h}{dt} - \frac{S_h^*}{S_h} \frac{dS_h}{dt} + \frac{dI_h}{dt} + \frac{\beta_{hf}A}{(\delta_f + \mu_f)\mu_h} \left(\frac{dS_f}{dt} - \frac{S_f^*}{S_f} \frac{dS_f}{dt} \right) \\ &+ \frac{\beta_{hf}A}{(\delta_f + \mu_f)\mu_h} \frac{dI_f}{dt} \\ &= \left(1 - \frac{S_h^*}{S_h} \right) \frac{dS_h}{dt} + \frac{dI_h}{dt} + \frac{\beta_{hf}A}{(\delta_f + \mu_f)\mu_h} \left(1 - \frac{S_f^*}{S_f} \right) \frac{dS_f}{dt} \\ &+ \frac{\beta_{hf}A}{(\delta_f + \mu_f)\mu_h} \frac{dI_f}{dt} \end{aligned}$$

Substituting, the equations (1), (2), (4), and (5), we have

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \left(1 - \frac{S_h^*}{S_h} \right) \left[A - ((1-\omega)\beta_h S_h I_h + \beta_{hf} S_h I_f) - \mu_h S_h \right] \\ &+ (1-\omega)\beta_h S_h I_h + \beta_{hf} S_h I_f - (\gamma_h + \delta_h + \mu_h) I_h \\ &+ \frac{\beta_{hf}A}{(\delta_f + \mu_f)\mu_h} \left(1 - \frac{S_f^*}{S_f} \right) \left[B - \beta_{fh} S_f I_h - (\delta_f + \mu_f) S_f \right] \\ &+ \frac{\beta_{hf}A}{(\delta_f + \mu_f)\mu_h} \left[\beta_{fh} S_f I_h - (\delta_f + \mu_f) I_f \right], \\ &= - \frac{\mu_h (S_h^* - S_h)^2}{S_h} - \frac{\beta_{hf}A (S_f^* - S_f)^2}{\mu_h S_f} \\ &+ \left[\frac{(1-\omega)\beta_h A}{\mu_h} + \frac{\beta_{hf}\beta_{fh}AB}{\mu_h(\delta_f + \mu_f)^2} - (\gamma_h + \delta_h + \mu_h) \right] I_h, \\ &= - \frac{\mu_h (S_h^* - S_h)^2}{S_h} - \frac{\beta_{hf}A (S_f^* - S_f)^2}{\mu_h S_f} - (\gamma_h + \delta_h + \mu_h)(1-R_0)I_h. \end{aligned}$$

The condition $\frac{dV}{dt} = 0$ is true only if $S_h = S_h^*$,

$S_f = S_f^*$, $I_h = 0$, and the condition $\frac{dV}{dt} < 0$ holds if $R_0 \leq 1$. Therefore, the disease-free point is the only positive invariant set in Ω . Consequently, if $R_0 \leq 1$ then the disease-free equilibrium point is globally asymptotically stable on Ω .

4.4 Global stability of endemic equilibrium point

Global stability analysis of endemic equilibrium (E_1) is explored via the construction of the Lyapunov function (see, e.g., Xu et al., 2020 and Elkaranshaw et al., 2021).

Theorem 2. If $R_0 > 1$ then the system has a unique endemic equilibrium point $E_1(S_h^*, I_h^*, R_h^*, S_f^*, I_f^*)$ which is global asymptotically stable on Ω .

Proof Consider the following Lyapunov function.

$$\begin{aligned} V &= S_h^* \left(\frac{S_h}{S_h^*} - 1 - \ln \left(\frac{S_h}{S_h^*} \right) \right) + I_h^* \left(\frac{I_h}{I_h^*} - 1 - \ln \left(\frac{I_h}{I_h^*} \right) \right) \\ &+ \frac{S_h^* I_f^*}{S_f^* I_h^*} S_f^* \left(\frac{S_f}{S_f^*} - 1 - \ln \left(\frac{S_f}{S_f^*} \right) \right) \\ &+ \frac{S_h^* I_f^*}{S_f^* I_h^*} I_f^* \left(\frac{I_f}{I_f^*} - 1 - \ln \left(\frac{I_f}{I_f^*} \right) \right). \quad (10) \end{aligned}$$

We have that

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \left(1 - \frac{S_h^*}{S_h} \right) \frac{dS_h}{dt} + \left(1 - \frac{I_h^*}{I_h} \right) \frac{dI_h}{dt} + \frac{S_h^* I_f^*}{S_f^* I_h^*} \left(1 - \frac{S_f^*}{S_f} \right) \frac{dS_f}{dt} \\ &+ \frac{S_h^* I_f^*}{S_f^* I_h^*} \left(1 - \frac{I_f^*}{I_f} \right) \frac{dI_f}{dt}. \end{aligned}$$

Substituting, the equations (1), (2), (4), and (5) into the resulting equation, we have

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & \left(1 - \frac{S_h^*}{S_h}\right) \left[A - ((1-\omega)\beta_h S_h I_h + \beta_{hf} S_h I_f) - \mu_h S_h \right] \\ & + \left(1 - \frac{I_h}{I_h^*}\right) \left[(1-\omega)\beta_h S_h I_h + \beta_{hf} S_h I_f - (\delta_h + \gamma_h + \mu_h) I_h \right] \\ & + \frac{S_h^* I_f^*}{S_f^* I_h^*} \left(1 - \frac{S_f}{S_f^*}\right) \left[B - \beta_{fh} S_f I_h - (\delta_f + \mu_f) S_f \right] \\ & + \frac{S_h^* I_f^*}{S_f^* I_h^*} \left(1 - \frac{I_f}{I_f^*}\right) \left[\beta_{fh} S_f I_h - (\delta_f + \mu_f) I_f \right]. \quad (11) \end{aligned}$$

Rewrite some parameter in terms of E_1 , from the system (1)–(5), we have

$$\begin{aligned} A &= (1-\omega)\beta_h S_h^* I_h^* + \beta_{hf} S_h^* I_f^* + \mu_h S_h^*, \\ \delta_h + \gamma_h + \mu_h &= \frac{(1-\omega)\beta_h S_h^* I_h^* + \beta_{hf} S_h^* I_f^*}{I_h^*}, \\ B &= \beta_{fh} S_f^* I_h^* + (\delta_f + \mu_f) S_f^*, \\ \delta_f + \mu_f &= \frac{\beta_{fh} S_f^* I_h^*}{I_f^*}. \end{aligned}$$

Substitute the parameter into (11), and it obtains

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & \left(1 - \frac{S_h^*}{S_h}\right) \left[(1-\omega)\beta_h S_h^* I_h^* + \beta_{hf} S_h^* I_f^* + \mu_h S_h^* \right. \\ & \left. - (1-\omega)\beta_h S_h I_h - \beta_{hf} S_h I_f - \mu_h S_h \right] + \left(1 - \frac{I_h}{I_h^*}\right) \\ & \times \left[(1-\omega)\beta_h S_h I_h + \beta_{hf} S_h I_f - \frac{(1-\omega)\beta_h S_h^* I_h^* + \beta_{hf} S_h^* I_f^*}{I_h^*} I_h \right] \\ & + \frac{S_h^* I_f^*}{S_f^* I_h^*} \left(1 - \frac{S_f}{S_f^*}\right) \left[\beta_{fh} S_f^* I_h^* + (\delta_f + \mu_f) S_f^* - \beta_{fh} S_f I_h \right. \\ & \left. - (\delta_f + \mu_f) S_f \right] + \frac{S_h^* I_f^*}{S_f^* I_h^*} \left(1 - \frac{I_f}{I_f^*}\right) \left[\beta_{fh} S_f I_h - \frac{\beta_{fh} S_f^* I_h^*}{I_f^*} I_f \right], \\ = & -\frac{\mu_h (S_h - S_h^*)^2}{S_h} - \frac{(\delta_f + \mu_f) S_h^* I_f^* (S_f - S_f^*)^2}{S_f^* I_h^* S_f} \\ & + \left(2 - \frac{S_h^*}{S_h} - \frac{S_h}{S_h^*}\right) (1-\omega)\beta_h S_h^* I_h^* \\ & + \left(4 - \frac{S_h^*}{S_h} - \frac{S_h I_f I_h^*}{S_h^* I_f^* I_h} - \frac{S_f^*}{S_f} - \frac{S_f I_h I_f^*}{S_f^* I_h^* I_f}\right) \beta_{hf} S_h^* I_f^*. \end{aligned}$$

It is obtained that

$$2 - \frac{S_h^*}{S_h} - \frac{S_h}{S_h^*} \leq 0, \quad 4 - \frac{S_h^*}{S_h} - \frac{S_h I_f I_h^*}{S_h^* I_f^* I_h} - \frac{S_f^*}{S_f} - \frac{S_f I_h I_f^*}{S_f^* I_h^* I_f} \leq 0,$$

since the geometric mean is less than or equal mean for $S_h, I_h, S_f, I_f > 0$. From E_1 , it is found that $S_h, I_h, S_f, I_f > 0$ when $R_0 > 1$. Therefore, if $R_0 > 1$, then $\frac{dV}{dt} < 0$.

Since $S_h - S_h^*, S_f - S_f^*, 2 - \frac{S_h^*}{S_h} - \frac{S_h}{S_h^*},$ and

$$4 - \frac{S_h^*}{S_h} - \frac{S_h I_f I_h^*}{S_h^* I_f^* I_h} - \frac{S_f^*}{S_f} - \frac{S_f I_h I_f^*}{S_f^* I_h^* I_f} \text{ equal to zero at } E_1,$$

then $\frac{dV}{dt} = 0$.

Hence, if $R_0 > 1$. then the endemic equilibrium point (E_1) is globally asymptotically stable on Ω .

4.5 Sensitivity analysis

The necessity of investigating tells us how sensitive the basic reproductive number is with respect to its parameters. This will help us to know the parameters having the most significant impact on the outcome of the numerical results of the model. Sensitivity analysis tells us the importance of each parameter to disease transmission, which will help public health. Authorities must place priority on a well-posed investigation strategy for preventing and controlling the spread of disease in the population. The sensitivity indices are calculated using the technique of normalized forward (Samsuzzoha et al., 2013 and Ngoteya & Nkansah-Gyekye, 2015). The normalized forward sensitivity of the reproduction number (R_0) with respect to the parameter k is given by,

$$\Upsilon_k^{R_0} = \frac{\partial R_0}{\partial k} \times \frac{k}{R_0}. \quad (12)$$

Using the formula presented in (12) and the baseline parameters, the numerical values for the sensitivity index are obtained. The sensitivity index is estimated with respect to each parameter. Results are shown in Table 1 and Table 2.

Table 1 Sensitivity indexes of the Conjunctivitis Model's parameter with respect to R_0 at E_0 .

Parameters	Baseline Value	Sensitivity Indexes	Sign
ω	0.7	- 1.08971	Negative
μ_h	0.000256 per day	- 1.00039	Negative
A	0.00128 per day	+ 1.00000	Positive
β_{hf}	0.065 per day	+ 0.83298	Positive
β_{fh}	0.065 per day	+ 0.83298	Positive
B	0.5 per day	+ 0.83298	Positive
δ_h	1/2 per day	- 0.77747	Negative
δ_f	1/7 per day	- 0.56851	Negative
μ_f	0.125 per day	- 0.49744	Negative
β_h	0.086 per day	+ 0.46702	Positive
γ_h	0.1428 per day	- 0.22213	Negative

Table 1 shows that the most effective methods of decreasing R_0 evaluated at E_0 are ranked in order of effectiveness: (1) to increase ω , (2) to increase μ_h , (3) to decrease β_{hf} , (4) to decrease β_{fh} , (5) to decrease B , (6) to decrease A , (7) to increase δ_h , (8) to increase δ_f , (9) to increase μ_f , (10) to decrease β_h , and (11) to increase γ_h .

Table 2 Sensitivity indexes of the Conjunctivitis Model's parameter with respect to R_0 at E_1 .

Parameters	Baseline Value	Sensitivity Indexes	Sign
μ_h	0.000256 per day	- 1.00040	Negative
A	0.00128 per day	+ 1.00000	Positive
δ_h	0.48 per day	- 0.77746	Negative
β_h	0.086 per day	+ 0.72442	Positive
β_{hf}	0.065 per day	+ 0.27558	Positive
β_{fh}	0.065 per day	+ 0.27558	Positive
B	0.5 per day	+ 0.27558	Positive
δ_f	1/20 per day	- 0.29395	Negative
μ_f	1/8 per day	- 0.67319	Negative
γ_h	1/2 per day	- 0.22213	Negative
ω	0.1	- 0.08049	Negative

From Table 2, we can see that the most effective methods of decreasing R_0 evaluated at E_1 are ranked in order of effectiveness: (1) to increase μ_h , (2) to decrease A , (3) to increase δ_h , (4) to decrease β_{hf} , (5) to decrease β_{fh} , (6) to decrease B , (7) to decrease β_h , (8) to increase δ_f , (9) to increase μ_f , (10) to increase γ_h , and (11) to increase ω .

Finally, we found that the most important parameters for preventing the disease are in order of effectiveness (1) increasing ω , by isolating patients from the community or preventing infection by maintaining hygiene, (2) increasing μ_h , by increasing the natural death rate of the human population, but it is not an acceptable method, (3) decreasing β_{hf} , by reducing the infection from mosquitoes to humans, such as using mosquito repellent or mosquito nets, etc. Moreover, the most important parameters for controlling the disease is (1) increasing μ_h , (2) to decrease A by quarantining the infected area, (3) increasing δ_h , by decreasing the duration of treatment or the time it takes to transmit conjunctivitis among infected individuals.

5. NUMERICAL RESULTS

In the present work, we use SIR-SI epidemic model with control measures. The numerical simulations are carried out to determine the impact of control measures on the conjunctivitis dynamics. The parameters used in the numerical simulations are given in Table 3.

Table 3 Parameter values in numerical simulations at disease-free state.

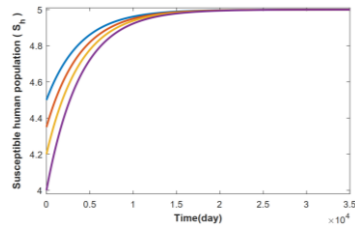
Parameters	Description	Value	Ref.
A	the recruitment rate of human population	+ 1.0000128 per day	Positive
β_h	the transmission rate of conjunctivitis from human to human	0.086 per day	Viriyapong & Khedwan, 2019
μ_h	the natural death rate of human population	0.000256 per day	
γ_h	the recovery rate of infected human	1/7 per day	
δ_h	the recovery of infected human who go to see the doctor	1/2 per day	
B	the recruitment rate of fly population	0.5 per day	Assumed
β_{hf}	the transmission rate of conjunctivitis from infected flies to susceptible human	0.065 per day	
β_{fh}	the transmission rate of conjunctivitis from infected human to susceptible flies	0.065 per day	
μ_f	the natural death rate of fly population	0.125 per day	
ω	the effective of patient's isolation	0.7	
δ_f	the efficacy of insecticide for protecting the flies	1/7 per day	

5.1 Stability of disease-free state

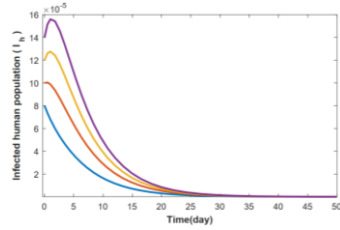
Using the values of parameters as shown in Table 3, the eigenvalues of the system (1) – (5) at disease-free equilibrium point and basic reproductive number are obtained as follow:

$$\lambda_{1,2} = -0.000256, \quad \lambda_3 = -0.000256, \quad \lambda_4 = -0.1573319, \\ \lambda_5 = -0.267857, \quad R_0 = 0.429501 < 1.$$

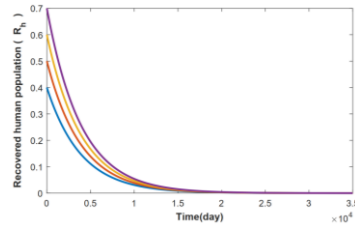
Since all eigenvalues are negative and the basic reproductive number is less than one, the disease-free equilibrium point, E_0 , will be local asymptotically stable, as shown in Figure 2.



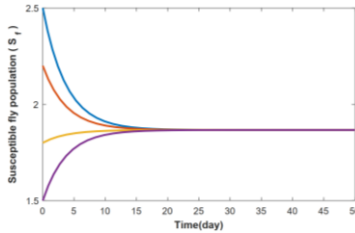
(1a) Susceptible human population



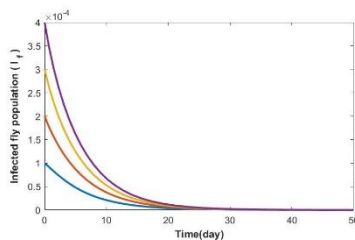
(1b) Infected human population



(1c) Recovered human population



(1d) Susceptible fly population



(1e) Infected fly population

Figure 2 Time series of (1a) susceptible human population, (1b) infected human population, (1c) recovered human population, (1d) susceptible fly population, (1e) infected fly population. The state variables approach DFE, $E_0 = (5, 0, 0, 1.86666, 0)$.

From Figure 2, graphs (1a)–(1e) presenting numerical solutions for susceptible human population, infected human population, recovered human population, susceptible fly population, and infected fly population show convergence to DFE, $E_0 = (5, 0, 0, 1.86666, 0)$ for four different sets of initial condition where $R_0 < 1$.

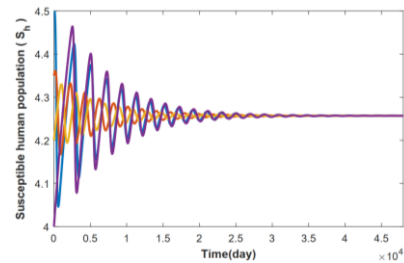
Therefore, there will not be an epidemic of conjunctivitis in the future when the efficiency in isolating patients is 70% and the treatment period for conjunctivitis is 2 days, along with using insecticides every 7 days per time.

5.2 Stability of endemic state

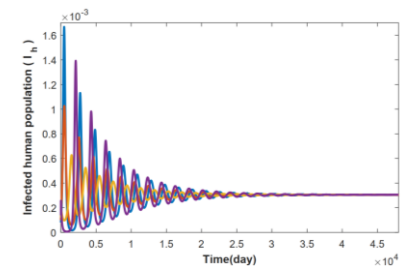
We change the values of the effective patient's isolation (ω) to 0.1, the recovery rate from treatment (δ_h) to 0.48 (Viriyapong & Khedwan, 2019), and the efficacy of insecticides for protecting the flies (δ_f) to 1/20, and keep the other values of parameters to be those given in Table 3. We obtain the eigenvalues of the system (1) – (5) at endemic equilibrium point and basic reproductive number as follows:

$$\lambda_1 = -0.000256, \quad \lambda_2 = -0.468615, \quad \lambda_3 = -0.175000, \\ \lambda_{4,5} = -0.000161 \pm 0.003221i, \quad R_0 = 1.174582 > 1.$$

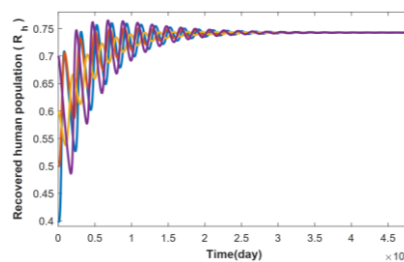
Since all real part of eigenvalues are negative and the basic reproductive number is more than one, the endemic state, E_1 , will be local asymptotically stable, as shown in Figure 3.



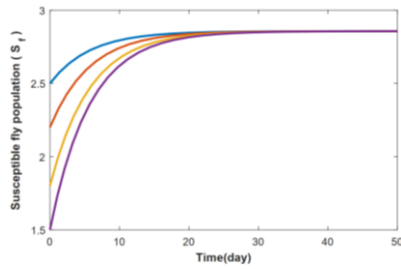
(2a) Susceptible human population



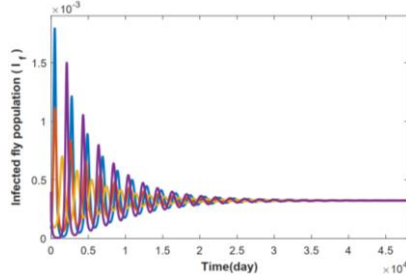
(2b) Infected human population



(2c) Recovered human population



(2d) Susceptible fly population



(2e) Infected fly population

Figure 3 Time series of (a) susceptible human population, (b) infected human population, (c) recovered human population, (d) susceptible fly population, (e) infected fly population. The state variables approach EE, $E_1 = (4.257058, 0.000305, 0.742636, 2.856819, 0.000324)$.

Figure 3 shows that if reducing patient separation efficiency is 10%, the duration of treatment for conjunctivitis is increased from 2 days to 3 days, and the duration of insecticide use is increased from 7 days per time to 20 days per time, then the graph (2a)–(3e) of numerical solutions convergence EE, $E_1 = (4.257058, 0.000305, 0.742636, 2.856819, 0.000324)$, and $R_0 = 1.174582 > 1$. That means that if we decrease the effectiveness of the patient's isolation to 10%, increase the recovery rate of treatment to 0.48 per day, and decrease the efficacy of insecticides for protecting the flies to 1/20 per day, then it is not sufficient to control the spread of disease.

5.3 Numerical results for infected human population with different values of ω , δ_h and δ_f

From Sections 4.1–4.2, it was found that the effectiveness of the patient's isolation, the recovery rate of treatment, and the effectiveness of insecticides in protecting flies affect the convergence of the equilibrium point and changes in the R_0 . In Section 4.3, we are considering the relationship between infected human populations and values of ω , δ_h and δ_f as follows.

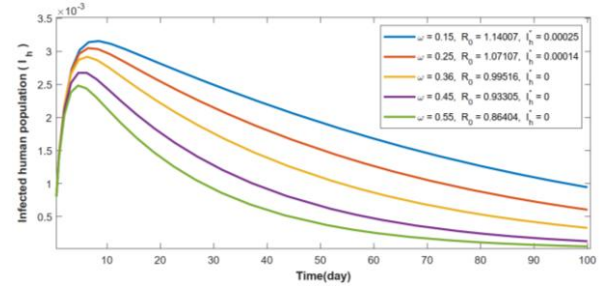


Figure 4 Time series of infected human populations with different values of ω .

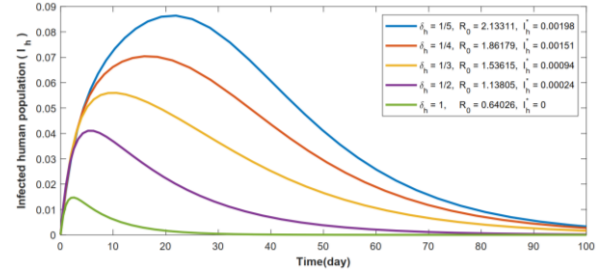


Figure 5 Time series of infected human populations with different values of δ_h .

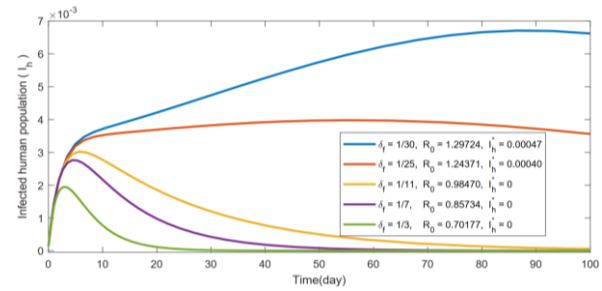


Figure 6 Time series of infected human populations with different values of δ_f .

Figure 4 indicates that the effectiveness of the patient's isolation has an effect on the infected human population when other parameters are set according to the EE point with the values of $\delta_h = 0.48$ $\delta_f = 1/20$. When the values of effectiveness of the patient's isolation (ω) are 0.15, 0.25, 0.36, and 0.55, the values of R_0 are 1.14007, 1.07107, 0.99516, 0.93305, and 0.86404, respectively, and the values of I_h^* are 0.00025, 0.00014, 0, 0, and 0, respectively. It can be observed that increasing the effectiveness of the patient's isolation affects infected human populations decreased. Similarly, Figures 5–6 show that the number of infected humans population decreases when the recovery rate of treatment increases and the effectiveness of insecticides in protecting flies increases.

6. CONCLUSION

In this paper, the SIR-SI (human–host) epidemic model of conjunctivitis which incorporates the effects of the effective of patient’s isolation, treatment control and insecticide control is proposed and analyzed. We have analyzed the disease–free equilibrium (E_0), the endemic equilibrium point (E_1), and the basic reproductive number, $R_0 = \frac{A((1-\omega)\beta_h(\delta_f + \mu_f)^2 + \beta_f^2 B)}{\mu_h(\delta_h + \gamma_h + \mu_h)(\delta_f + \mu_f)^2}$,

where it becomes a threshold condition for the stability of the system at equilibrium points. The global asymptotically stability of the disease–free equilibrium point and endemic equilibrium point has been shown in Fig 2 and Fig 3, respectively. It has shown that the endemic equilibrium point is global asymptotically stable if $R_0 > 1$, and this means that the conjunctivitis will persist in community. It has also been shown that if $R_0 < 1$, the conjunctivitis will die out in the community. The sensitivity analysis is carried out by computing the sensitivity indexes at the disease–free equilibrium point. It can be found that the most sensitive parameter is the patient’s isolation. It means that if most people have a high rate of patient isolation, then there are no conjunctivitis patients in the community. Every house must use insecticide to kill flies and maintain sanitation. The best intervention depends on how to control the density of people in the community. In addition, the sensitivity analysis also indicated that increasing the percentage of the effectiveness of the patient’s isolation, the recovery rate of treatment, and the effectiveness of insecticides in protecting flies will reduce the basic reproductive number. Consequently, the disease–free equilibrium is stable instead of the endemic equilibrium point. It is concluded that when the effectiveness of the patient’s isolation, the recovery rate of treatment, and the effectiveness of insecticides in protecting flies increase, the number of infected humans will decrease.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to the Department of Mathematics, Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University, Surat Thani, Thailand for providing the facilities to carry out the research.

REFERENCES

- Alkhudhari, Z., Al Sheikh, S., & Al-Tuwairqi, S. (2014). Global dynamics of a mathematical model on smoking. *International Scholarly Research Notices*, 2014, 1–7.
- Chowell, G., Shim, E., Brauer, F., Diaz-Dueñas, P., Hyman, J. M., & Castillo-Chavez, C. (2006). Modelling the transmission dynamics of acute haemorrhagic conjunctivitis: application to the 2003 outbreak in Mexico. *Statistics in medicine*, 25(11), 1840–1857.
- Diekmann, O., Heesterbeek, J. A., & Metz, J. A. (1990). On the definition and the computation of the basic reproduction ratio R_0 in models for infectious diseases in heterogeneous populations. *Journal of mathematical biology*, 28(4), 365–382.
- Elkaranshaw, H. A., Ezzat, H. M., & Ibrahim, N. N. (2021). Lyapunov function and global asymptotic stability for a new multiscale viral dynamics model incorporating the immune system response: Implemented upon HCV. *PloS one*, 16(10), 1–26.
- Heffernan, J. M., Smith, R. J., & Wahl, L. M. (2005). Perspectives on the basic reproductive ratio. *Journal of the Royal Society Interface*, 2(4), 281–293.
- Nana-Kyere, S., Banon, D. T., Marmah, S. N., & Kwarteng, D. (2019). Stochastic Optimal Control Model of Haemorrhagic Conjunctivitis Disease. *Journal of Advances in Mathematics and Computer Science*, 31(3), 1–19.
- Ngoteya, F.N., & Nkansah-Gyekye, Y. (2015). Sensitivity Analysis of Parameters in a Competition Model. *Applied and Computational Mathematics*, 4(5), 363–368.
- Samsuzzoha, M. D., Singh, M., & Lucy, D. (2013). Uncertainty and sensitivity analysis of the basic reproduction number of a vaccinated epidemic model of influenza. *Applied Mathematical Modelling*, 37(3), 903–915.
- Sangthongjeen, S., Sudchumnong, A., & Naowarat, S. (2015). Effect of Education Campaign on Transmission Model of Conjunctivitis. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 9(7), 811–815.
- Suksawat, J., & Naowarat, S. (2014). Effect of rainfall on the transmission model of conjunctivitis. *Advances in Environmental Biology*, 8(14), 99–104.
- Thongtha, A., Modnak, C., & Thakjak, A. (2017). Optimal control for a mathematical model with transmission for house flies. *Pibul Research*, 28–36.
- Thongtha, A., & Modnak, C. (2021). Optimal Control Strategy of Cholera Epidemic Dynamics from Vibrio and Flies Transmission. *NU. International Journal of Science*, 18(1), 15–27.
- Uchenna, M., Offia, A., & Kafayat, E. (2019). Control model on transmission dynamic of conjunctivitis during harmattan in public schools. *Applied and Computational Mathematics*, 8(2), 29–36.
- Unyong, B., & Naowarat, S. (2014). Stability analysis of conjunctivitis model with nonlinear incidence term. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 8(24), 52–58.
- 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.
- Viriyaopong, R., & Khedwan, N. (2019). Effects of isolation by taking sick leaves of conjunctivitis infected individuals and treatment control on stability of mathematical modeling of conjunctivitis. *Science, Engineering and Health Studies*, 13(1), 20–28.
- Xu, L., Lou, S., & Han, R. (2020). Global Stability for a Semidiscrete Logistic System with Feedback Control. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2020, 1–7.

On Solving the Quantum Oscillator Equation by Using the Differential Transformation

Jutarat Pimsud¹, Kamonthip Ongartyuthanakorn¹, Kanokvon Panchuay¹ and Jaipong Kasemsuwan^{1*}

¹Department of Mathematics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

ABSTRACT

In this paper, we present a simple yet accurate semi-analytical solution of the quantum oscillator equation, which is an eigenvalue problem, by using the differential transformation method (DTM). The quantum oscillator equation is studied under various boundary conditions via differential associated coefficients. Eigenfunctions and eigenvalues are calculated semi-analytically and shown graphically. They are verified and shown to be accurate.

KEYWORDS: Differential Transformation Method, Eigenvalue Problem, Quantum Oscillator Equation.

*Corresponding Author: jaipong.ka@kmitl.ac.th

Received: 02/06/2023; Revised: 27/02/2024; Accepted: 01/03/2024

1. INTRODUCTION

The differential transformation method (DTM) is one among numerical methods and can be used as a semi-analytical method to a certain class of ordinary differential equations, partial differential equations and integral equations (Hussin et al. (2010); Hassan (2008); Jang et al. (2001); Ayaz (2004); Ayaz (2014); Zhou (1986)) used the DTM to solve various scientific problems such as linear and non-linear initial value problems in many electric circuit problems. Chen and Ho (1996) solved eigenvalue problems by using the DTM. Later on, Hassan (2002) studied and improved the DTM in order to solve eigenvalue problems more comprehensively.

In this paper, we present a simple yet accurate semi-analytical solution of the quantum oscillator equation using the DTM method. We found that this semi-analytical approach is very simple and easier to write a program to find the i th eigenfunctions compared to other existing analytical and numerical methods.

Moreover, we found that the obtained results are in the polynomial form.

The definitions, theorems and some basic mathematical operations of the DTM for solving our problems are stated in the section 2. A procedure involved of how the semi-analytical methods using the DTM is employed to solve an eigenvalue problem of the quantum oscillator equation is shown in section 3. Finally, we illustrate the quantum oscillator equation under some boundary conditions using different associated coefficients and apply the DTM to find a semi-analytical solutions.

The eigenvalue problem of the quantum oscillator equation is shown below

$$y''(x) + (\lambda - x^2)y(x) = 0 \quad (1.1)$$

subjected to the following boundary conditions

$$\alpha_1 y(0) - \beta_1 y'(0) = 0, \quad (1.2)$$

$$\alpha_2 y(1) + \beta_2 y'(1) = 0, \quad (1.3)$$

where $\alpha_i \geq 0$, $\beta_i \geq 0$ and $\alpha_i + \beta_i \geq 0$ for $i = 1, 2$.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 The differential transformation methods

Definition 2.1. The differential transformation of the function $y(x)$ is defined as follows:

$$Y(k) = \frac{1}{k!} \left[\frac{d^k}{dx^k} y(x) \right]_{x=0} \quad (2.1)$$

where $y(x)$ is the original function and $Y(k)$ is the transformed function.

Definition 2.2. The differential inverse transformation of the function $y(x)$ is defined as follows:

$$y(x) = \sum_{k=0}^{\infty} x^k Y(k). \quad (2.2)$$

We have from (2.1) and (2.2) that

$$y(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!} \left[\frac{d^k}{dx^k} y(x) \right]_{x=0}. \quad (2.3)$$

Eq. (2.3) implies that the DTM is developed based on the Taylor's series expansion. This method constructs a semi-analytical solution in the form of polynomial.

2.2 Some basic mathematical operations

The following is the basic mathematical operations of the DTM which is necessary for solving our problems. The proof of them can be found in Kerdpol (2015).

Original function	Transformed function	
$y(x) = \lambda \phi(x)$	$Y(k) = \lambda \Phi(k)$,	(2.4)

$y(x) = \phi(x) \pm \theta(x)$	$Y(k) = \Phi(k) \pm \Theta(k)$,	(2.5)
--------------------------------	----------------------------------	-------

$y(x) = \frac{d\phi(x)}{dx}$	$Y(k) = (k+1)\Phi(k+1)$,	(2.6)
------------------------------	---------------------------	-------

$y(x) = \frac{d^2\phi(x)}{dx^2}$	$Y(k) = (k+1)(k+2)\Phi(k+2)$,	(2.7)
----------------------------------	--------------------------------	-------

$y(x) = \phi(x)\theta(x)$	$Y(k) = \sum_{l=0}^k \Phi(l)\Theta(k-l)$,	(2.8)
---------------------------	--	-------

$y(x) = x^m$	$Y(k) = \delta(k-m) = \begin{cases} 1; & k=m, \\ 0; & k \neq m, \end{cases}$	(2.9)
--------------	--	-------

$y(x) = x^2 \phi(x)$	$Y(k) = \sum_{l=0}^k \delta(l-2)\Phi(k-l)$,	
----------------------	--	--

where $\delta(l-2) = \begin{cases} 1; & l=2 \\ 0; & l \neq 2. \end{cases}$	(2.10)
--	--------

3. EIGENVALUE PROBLEMS OF

QUANTUM OSCILLATOR EQUATION USING DTM

We consider the regular Sturm-Liouville eigenvalue problem.

$$\frac{d}{dx} \left[p(x) \frac{dy(x)}{dx} \right] + [\lambda r(x) - q(x)] y(x) = 0 \quad (3.1)$$

with the following boundary conditions

$$\alpha_1 y(0) - \beta_1 y'(0) = 0, \quad (3.2)$$

$$\alpha_2 y(1) + \beta_2 y'(1) = 0, \quad (3.3)$$

where $p(x) > 0, r(x) > 0$ and $q(x) \geq 0$ and

$p(x), r(x), q(x)$ and $p'(x)$ are continuous on the closed interval $[0, 1]$ and $\alpha_i \geq 0, \beta_i \geq 0$ and $\alpha_i + \beta_i > 0$ for $i = 1, 2$.

In case of the quantum oscillator equation, the value of $p(x), r(x)$ and $q(x)$ are $p(x)=1, r(x)=1$ and $q(x)=x^2$ and, as a result, we obtain

$$y''(x) + (\lambda - x^2)y(x) = 0. \quad (3.4)$$

Transforming (3.4) by using operations (2.4), (2.5), (2.7), (2.10), we obtain

$$Y(k+2) = \frac{\left(\sum_{l=0}^k \delta(l-2)Y(k-l) \right) - \lambda Y(k)}{(k+1)(k+2)}. \quad (3.5)$$

Transforming the boundary conditions (3.2) and (3.3) by using operations (2.1) and (2.2), we obtain

$$\alpha_1 Y(0) - \beta_1 Y(1) = 0, \quad (3.6)$$

$$\sum_{k=0}^n (\alpha_2 + \beta_2 k) Y(k) = 0. \quad (3.7)$$

$$\text{Assume that } Y(0) = c. \quad (3.8)$$

From (3.6) we have

$$Y(1) = \frac{\alpha_1 c}{\beta_1}. \quad (3.9)$$

Considering (3.5) when $k=0$ and applying (3.8), (3.9) and the value of function $\delta(l-2)$ from (2.10), we get

$$Y(2) = \frac{-c\lambda}{2}. \quad (3.10)$$

Considering (3.5) when $k=1$ and applying (3.8)–(3.10) and the value of function $\delta(l-2)$ from (2.10), we obtain

$$Y(3) = \frac{-\alpha_1 c \lambda}{6\beta_1}. \quad (3.11)$$

Similarly,

$$Y(4) = \frac{(2-\lambda^2)c}{24}. \quad (3.12)$$

The same way is used to find $Y(5)$ until $Y(n)$ and then substituting $Y(1)$ to $Y(n)$ into (3.7) we get

$$\sum_{k=0}^n (\alpha_2 + \beta_2 k) Y(k) = c [f^{(n)}(\lambda)] = 0, \quad (3.13)$$

where $f^{(n)}(\lambda)$ is a polynomial of λ corresponding to n .

In case that $c \neq 0$, we have

$$f^{(n)}(\lambda) = 0. \quad (3.14)$$

Solving (3.14), we obtain $\lambda = \lambda_i^{(n)}$, $i=1,2,3,..$ where $\lambda_i^{(n)}$ is the i th estimated eigenvalue corresponding to n and $\lambda_i^{(n)}$ has to be real root and n satisfies

$$|\lambda_i^{(n)} - \lambda_i^{(n-1)}| \leq \xi \quad (3.15)$$

where $\lambda_i^{(n-1)}$ is the i th estimated eigenvalue corresponding to $n-1$.

Considering (3.15), in this work, we set $\xi = 0.01$ then the following procedure is used for finding $\lambda_i^{(n)}$.

In case that (3.15) is satisfied, we will choose $\lambda_i^{(n)}$ to be the i th eigenvalue corresponding to n and then substituting $\lambda_i^{(n)}$ into $Y(0)$ to $Y(n)$ and using (2.2), we get

$$y_i(x) = \sum_{k=0}^n x^k Y_{\lambda_i^{(n)}}(k) \quad (3.16)$$

where $y_i(x)$ is i th eigenfunction corresponding to the eigenvalue λ_i .

Note that the function $y_i(x)$ in (3.16) is expressed by a finite series of $\sum_{k=n+1}^{\infty} x^k Y(k)$ which is negligibly small and n is decided by the convergence of the eigenvalue.

The i th normalized eigenfunction is defined as follows:

$$\hat{y}_i(x) = \frac{y_i(x)}{\int_0^1 |y_i(x)| dx}. \quad (3.17)$$

In case that (3.15) is unsatisfied, we will replace n by $n+1$ and repeat the same procedure in (3.13)–(3.15) until (3.15) is satisfied.

4. SOLVING PROBLEM AND MAIN

RESULT

In this section, we will show how to apply the DTM to solve the quantum oscillator equation under various boundary conditions via differential associated coefficients. The obtained solutions are substituted back into the boundary eigenvalue problems to verify our proposed method accuracy.

Problem 4.1.

$$y''(x) + (\lambda - x^2)y(x) = 0, \quad (4.1)$$

$$y'(0) = 0, \quad (4.2)$$

$$y(1) = 0. \quad (4.3)$$

From transformation (3.5), we have

$$Y(k+2) = \frac{\left(\sum_{l=0}^k \delta(l-2) Y(k-l) \right) - \lambda Y(k)}{(k+1)(k+2)}. \quad (4.4)$$

From transformation (3.6) and (3.7) when $\alpha_1 = 0$,

$\beta_1 = 1$, $\alpha_2 = 1$ and $\alpha_2 = 0$ we have

$$Y(1) = 0, \quad (4.5)$$

$$\sum_{k=0}^n Y(k) = 0. \quad (4.6)$$

(I) *Solving the first eigenvalue and eigenfunction:*

Assume that $Y(0) = c$. (4.7)

Considering (4.4) when $k=0$ and applying (4.5), (4.7) and the value of function $\delta(l-2)$ from (2.10), we obtain

$$Y(2) = \frac{-c\lambda}{2}. \quad (4.8)$$

Considering (4.4) when $k=1$ and applying (4.7) – (4.8) and the value of function $\delta(l-2)$ from (2.10), we obtain $Y(3) = 0$. (4.9)

Similarly, $Y(4)$, $Y(5)$ can be founded by substituting $k=2$ and $k=3$ into (4.4), respectively. We obtain that

$$Y(4) = \frac{c(2+\lambda^2)}{24},$$

$$Y(5) = 0.$$

In our work we set $n=10$ and using the same way to find $Y(6)$ until $Y(10)$

$$Y(6) = -\frac{c\lambda(14+\lambda^2)}{720},$$

$$Y(8) = \frac{c(60 + 44\lambda^2 + \lambda^4)}{40320},$$

$$Y(10) = -\frac{c\lambda(844 + 100\lambda^2 + \lambda^4)}{3628800}.$$

At $Y(2k+1)=0$ for $k=1, 2, 3, \dots$

Substituting $Y(0)$ until $Y(10)$ into (4.6), we obtain a polynomial of λ corresponding to

$$\sum_{k=0}^{10} Y(k) = c[f^{(10)}(\lambda)] = 0,$$

$$f^{(10)}(\lambda) = 1 - \frac{\lambda}{2} + \frac{2 + \lambda^2}{24} - \frac{\lambda(14 + \lambda^2)}{720} + \frac{60 + 44\lambda^2 + \lambda^4}{40320} - \frac{\lambda(844 + 100\lambda^2 + \lambda^4)}{3628800} = 0. \quad (4.10)$$

Solving (4.10), we get

$$\lambda = 2.597, 19.081 \pm 45.154i, 24.621 \pm 4.972i.$$

Choosing real root $\lambda_1^{(10)} = 2.597$. (4.11)

When $n=8$, substituting $Y(0)$ to $Y(8)$ into (4.6), we obtain

$$\sum_{k=0}^8 Y(k) = c[f^{(8)}(\lambda)] = 0.$$

$$f^{(8)}(\lambda) = 1 - \frac{\lambda}{2} + \frac{2 + \lambda^2}{24} - \frac{\lambda(14 + \lambda^2)}{720} + \frac{60 + 44\lambda^2 + \lambda^4}{40320} = 0.$$

Solving the above equation, we have

$$\lambda = 2.60, 17.621, 17.89 \pm 25.193i.$$

Choosing $\lambda_1^{(8)} = 2.60$. (4.12)

Substituting (4.11) and (4.12) into (3.15) we obtain

$$|\lambda_1^{(10)} - \lambda_1^{(8)}| = |2.597 - 2.60| = 0.003 \leq \xi. \quad (4.13)$$

Since (4.13) is satisfied, so we choose $\lambda_1^{(10)} = 2.597$ to be the first eigenvalue and substituting λ_1 into $Y(0)$ to $Y(10)$ and by (3.16), we get the first eigenfunction.

$$y_1(x) = \sum_{k=0}^n x^k Y(k)$$

$$= Y(0) + x^2 Y(2) + x^4 Y(4) + x^6 Y(6) + x^8 Y(8) + x^{10} Y(10)$$

$$= c - \frac{c\lambda}{2} x^2 + \frac{c(2 + \lambda^2)}{24} x^4 - \frac{c\lambda(14 + \lambda^2)}{720} x^6 + \frac{c(60 + 44\lambda^2 + \lambda^4)}{40320} x^8 - \frac{c\lambda(844 + 100\lambda^2 + \lambda^4)}{3628800} x^{10}$$

$$= \left(1 - 1.3x^2 + 0.365x^4 - 0.0749667x^6 + 9.99845 \times 10^{-3} x^8 - 1.12181 \times 10^{-3} x^{10} \right) c.$$

By using (3.17), the first normalized eigenfunction is shown below.

$$\hat{y}_1(x) = \frac{y_1(x)}{\int_0^1 |y_1(x)| dx}$$

$$= \frac{\left(1 - 1.3x^2 + 0.365x^4 - 0.0749667x^6 + 9.99845 \times 10^{-3} x^8 - 1.12181 \times 10^{-3} x^{10} \right) c}{\left(x - \frac{1.3x^3}{3} + \frac{0.365x^5}{5} - \frac{0.0749667x^7}{7} + \frac{9.99845 \times 10^{-3} x^9}{9} - \frac{1.12181 \times 10^{-3} x^{11}}{11} \right) c} \Bigg|_0^1$$

$$= 1.58739 \left(1 - 1.3x^2 + 0.365x^4 - 0.0749667x^6 + 9.99845 \times 10^{-3} x^8 - 1.12181 \times 10^{-3} x^{10} \right). \quad (4.14)$$

Finally, we plot the calculated normalized first eigenfunction in (4.14) as shown in Fig. 1. In addition, by substituting (4.14) into the quantum oscillator equation and boundary conditions in (4.1)-(4.3), satisfactory results are achieved where the corresponding errors are very close to zero and summarized in Table 1.

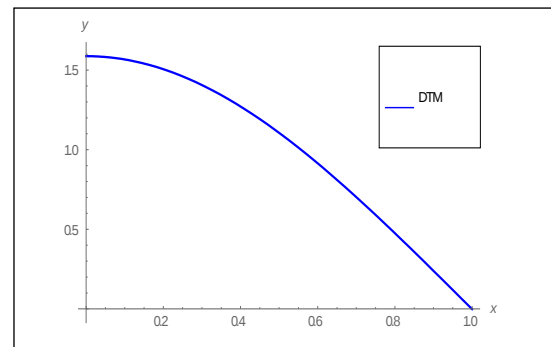


Figure 1 The calculated first eigenfunction (4.14) by DTM.

Table 1 Corresponding errors after substituting the DTM first eigenfunction (4.14) to the problem.

x	$\hat{y}_1''(x) + (\lambda - x^2)\hat{y}_1(x)$
0	0
0.1	2.04834*10 ⁻¹²
0.2	2.09204*10 ⁻⁹
0.3	1.20112*10 ⁻⁷
0.4	2.11985*10 ⁻⁶
0.5	0.0000195861
0.6	-0.000120087
0.7	-0.000554464
0.8	-0.00207894
0.9	-0.00664544
1	-0.0187206

(II) Solving the second eigenvalue and eigenfunction:

When $n=18$ and using the same procedure, we solve $f^{(18)}(\lambda) = 0$ and choose the real roots, we have

$$\lambda_1^{(18)} = 2.597 \text{ and } \lambda_2^{(18)} = 22.52.$$

Since $\lambda_1^{(18)} = \lambda_1^{(10)} = 2.597$ then we use $\lambda_2^{(18)} = 22.52$ and $|\lambda_2^{(18)} - \lambda_2^{(16)}| = |22.52 - 22.51| = 0.01 \leq \xi$, so we choose $\lambda_2^{(18)} = 22.52$ to be the second eigenvalue. Substituting λ_1 into $Y(0)$ to $Y(18)$ and using (3.17), the second normalized eigenfunction is calculated as

$$\hat{y}_2(x) = -4.60671 \begin{pmatrix} 1 - 11.26x^2 + 21.2146x^4 - 16.3004x^6 + 6.93393x^8 \\ -1.91614x^{10} + 0.379435x^{12} - 0.0574781x^{14} \\ + 0.00697434x^{16} - 7.01112 \times 10^{-4}x^{18} \end{pmatrix}. \quad (4.15)$$

Similarly, we plot the calculated normalized second eigenfunction in (4.15) as shown in Figure 2 and after substituting (4.15) into the quantum oscillator equation and boundary conditions in (4.1)–(4.3), we achieve satisfactory results. The corresponding errors are again close to zero and listed in Table 2.

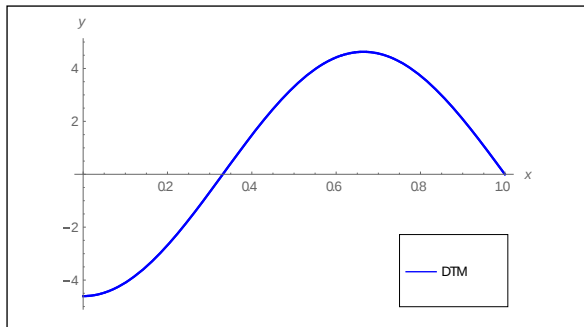


Figure 2 The calculated second eigenfunction (4.15) by DTM.

Table 2 Corresponding errors after substituting the DTM second eigenfunction (4.15) to the problem.

x	$\hat{y}_2''(x) + (\lambda - x^2)\hat{y}_2(x)$
0	0
0.1	4.53511×10^{-17}
0.2	2.81684×10^{-14}
0.3	4.05175×10^{-11}
0.4	7.17072×10^{-9}
0.5	3.96946×10^{-7}
0.6	0.0000105319
0.7	0.000168185
0.8	0.00185183
0.9	0.0153469
1	0.101635

(III) Solving the third eigenvalue and eigenfunction:

When $n=28$ and apply the same procedure, we solve $f^{(28)}(\lambda) = 0$ and choose real roots, we have

$$\lambda_1^{(28)} = 2.60, \lambda_2^{(28)} = 22.52 \text{ and } \lambda_3^{(28)} = 62.01.$$

Since $\lambda_1^{(28)} = \lambda_1^{(18)} = \lambda_1^{(10)} = 2.60$ and

$\lambda_2^{(28)} = \lambda_2^{(18)} = 22.52$ then we use $\lambda_3^{(28)} = 62.01$ from

$|\lambda_3^{(28)} - \lambda_3^{(26)}| \leq \xi$, so we choose $\lambda_3^{(28)} = 62.01$ to be

the third eigenvalue and then the third normalized

eigenfunction is calculated as

$$\hat{y}_3(x) = 7.78311 \begin{pmatrix} 1 - 31.005x^2 + 160.302x^4 - 332.377x^6 + 370.911x^8 - 259.251x^{10} \\ + 124.599x^{12} - 43.877x^{14} + 11.8559x^{16} - 2.54595x^{18} \\ + 0.446659x^{20} - 0.0654616x^{22} + 0.00816292x^{24} \\ - 8.79453 \times 10^{-4}x^{26} + 8.29336 \times 10^{-5}x^{28} \end{pmatrix}. \quad (4.16)$$

We plot the calculated normalized third eigenfunction in (4.16) as shown in Figure 3. Similarly, after substituting (4.16) into the quantum oscillator equation and boundary conditions in (4.1)–(4.3), we achieve satisfactory results. The corresponding errors are close to zero and listed in Table 3.

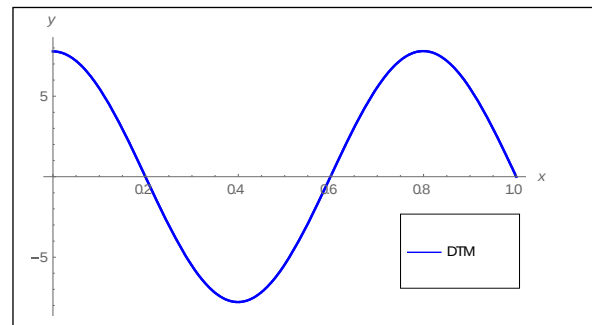


Figure 3 The calculated third eigenfunction (4.16) by DTM.

Table 3 Corresponding errors after substituting the DTM third eigenfunction (4.16) to the problem.

x	$\hat{y}_3''(x) + (\lambda - x^2)\hat{y}_3(x)$
0	0.
0.1	-3.78638×10^{-14}
0.2	-1.7059×10^{-13}
0.3	-4.64489×10^{-13}
0.4	-7.17753×10^{-13}
0.5	1.71847×10^{-10}
0.6	2.86365×10^{-8}
0.7	2.14145×10^{-6}
0.8	0.0000898629
0.9	0.00242563
1	0.0462257

Problem 4.2.

$$y''(x) + (\lambda - x^2)y(x) = 0, \quad (4.17)$$

$$2y(0) - y'(0) = 0, \quad (4.18)$$

$$3y(1) + y'(1) = 0. \quad (4.19)$$

Taking differential transformation of (4.17), we obtain

$$Y(k+2) = \frac{\left(\sum_{l=0}^k \delta(l-2)Y(k-l) \right) - \lambda Y(k)}{(k+1)(k+2)}. \quad (4.20)$$

Using (2.1), the boundary condition (4.18) becomes

$$2Y(0) - Y(1) = 0. \quad (4.21)$$

Using (2.2), the boundary condition (4.19) becomes

$$\sum_{k=0}^n (3+k)Y(k) = 0. \quad (4.22)$$

(I) Solving the first eigenvalue and eigenfunction

$$\text{Let } Y(0) = c. \quad (4.23)$$

Substituting (4.23) into (4.21), we have

$$Y(1) = 2c. \quad (4.24)$$

At $k=0$ and substituting (4.23), (4.24) and the function $\delta(l-2)$ from (2.10) into (4.20), we have

$$Y(2) = \frac{-c\lambda}{2}. \quad (4.25)$$

At $k=1$ and substituting from (4.23) to (4.25) and the function $\delta(l-2)$ from (2.10) into (4.20), we have

$$Y(3) = \frac{-c\lambda}{3}. \quad (4.26)$$

At $k=2$ and substituting from (4.23) to (4.26) and the function $\delta(l-2)$ from (2.10) into (4.20), we have

$$Y(4) = \frac{c(2+\lambda^2)}{24}. \quad (4.27)$$

At $k=3$ and substituting from (4.23) to (4.27) and the function $\delta(l-2)$ from (2.10) into (4.20), we have

$$Y(5) = \frac{c(6+\lambda^2)}{60}. \quad (4.28)$$

From the above procedure, we found the result corresponding to $n=11$ as

$$\begin{aligned} Y(6) &= -\frac{c\lambda(14+\lambda^2)}{720}, \\ Y(7) &= -\frac{c\lambda(26+\lambda^2)}{2520}, \\ Y(8) &= \frac{c(60+44\lambda^2+\lambda^4)}{40320}, \\ Y(9) &= \frac{c(844+100\lambda^2+\lambda^4)}{3628800}, \\ Y(10) &= -\frac{c\lambda(844+100\lambda^2+\lambda^4)}{3628800}, \\ Y(11) &= -\frac{c\lambda(2124+140\lambda^2+\lambda^4)}{19958400}. \end{aligned} \quad (4.29)$$

Substituting from $Y(0)$ to $Y(11)$ into (4.22), we obtain

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{11} Y(k) &= c[f^{(11)}(\lambda)] = 0, \\ f^{(11)}(\lambda) &= 11 - \frac{5\lambda}{2} - 2\lambda + \frac{7(2+\lambda^2)}{24} + \frac{2(6+\lambda^2)}{15} \\ &\quad - \frac{\lambda(14+\lambda^2)}{80} - \frac{\lambda(26+\lambda^2)}{252} + \frac{11(60+44\lambda^2+\lambda^4)}{40320} \\ &\quad + \frac{252+68\lambda^2+\lambda^4}{15120} - \frac{13\lambda(844+100\lambda^2+\lambda^4)}{3628800} \\ &\quad - \frac{\lambda(2124+140\lambda^2+\lambda^4)}{1425600} = 0. \end{aligned} \quad (4.30)$$

Solving (4.30), we get

$$\lambda = 3.685, 17.323 \pm 39.109i, 20.3956 \pm 3.7289i.$$

$$\text{Choose } \lambda_1^{(10)} = 3.685. \quad (4.31)$$

At $n=10$ Substituting from $Y(0)$ to $Y(11)$ into (4.22) we obtain

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{10} Y(k) &= c[f^{(10)}(\lambda)] = 0, \\ f^{(10)}(\lambda) &= 11 - \frac{5\lambda}{2} - 2\lambda + \frac{7(2+\lambda^2)}{24} + \frac{2(6+\lambda^2)}{15} \\ &\quad - \frac{\lambda(14+\lambda^2)}{80} - \frac{\lambda(26+\lambda^2)}{252} + \frac{11(60+44\lambda^2+\lambda^4)}{40320} \\ &\quad + \frac{252+68\lambda^2+\lambda^4}{15120} - \frac{13\lambda(844+100\lambda^2+\lambda^4)}{3628800} = 0. \end{aligned}$$

Solving the above equation we have

$$\lambda = 3.69, 17.8975, 29.6899, 21.6698 \pm 36.0299i.$$

$$\text{Choose } \lambda_1^{(10)} = 3.69. \quad (4.32)$$

By substituting (4.31) and (4.32) into (3.15) we obtain

$$|\lambda_1^{(11)} - \lambda_1^{(10)}| = |3.685 - 3.69| = 0.005 \leq \xi. \quad (4.33)$$

From (4.33), $\lambda_1 = 3.69$ is the first eigenvalue. Substituting λ_1 into $Y(0)$ to $Y(11)$ and using (3.16) we have the first eigenfunction.

$$\begin{aligned} y_1(x) &= \sum_{k=0}^{11} x^k Y(k) \\ &= Y(0) + xY(1) + x^2Y(2) + \dots + x^{10}Y(10) \\ &= c + 2cx - \frac{c\lambda}{2}x^2 - \frac{c\lambda}{3}x^3 + \frac{c(2+\lambda^2)}{24}x^4 + \frac{c(6+\lambda^2)}{60}x^5 \\ &\quad - \frac{c\lambda(14+\lambda^2)}{720}x^6 - \frac{c\lambda(26+\lambda^2)}{2520}x^7 + \frac{c(60+44\lambda^2+\lambda^4)}{40320}x^8 \\ &\quad + \frac{c(252+68\lambda^2+\lambda^4)}{181440}x^9 - \frac{c\lambda(844+100\lambda^2+\lambda^4)}{3628800}x^{10} \\ &\quad - \frac{c\lambda(2124+140\lambda^2+\lambda^4)}{19958400}x^{11} \end{aligned}$$

$$= \begin{pmatrix} 1+2x-1.845x^2-1.23x^3+0.650671x^4+0.326935x^5 \\ -0.141533x^6-0.0580093x^7+0.0209451x^8 \\ +0.00751374x^9-0.00243133x^{10}-7.79409 \times 10^{-4}x^{11} \end{pmatrix}^c.$$

Using (3.17), the first normalized eigenfunction is shown belows

$$\begin{aligned} \hat{y}_1(x) &= \frac{y_i(x)}{\int_0^1 |y_i(x)| dx} \\ &= \frac{\begin{pmatrix} 1+2x-1.845x^2-1.23x^3+0.650671x^4+0.326935x^5 \\ -0.141533x^6-0.0580093x^7+0.0209451x^8 \\ +0.00751374x^9-0.00243133x^{10}-7.79409 \times 10^{-4}x^{11} \end{pmatrix}^c}{\begin{pmatrix} x+x^2-0.615x^3-0.3075x^4+0.130134x^5+0.05449x^6 \\ -0.0202189x^7-0.00725116x^8+0.00232723x^9 \\ +0.000751374x^{10}-0.00022103x^{11}-6.49507 \times 10^{-5}x^{12} \end{pmatrix}^1} \\ &= 0.808116 \begin{pmatrix} 1+2x-1.845x^2-1.23x^3+0.650671x^4+0.326935x^5 \\ -0.141533x^6-0.0580093x^7+0.0209451x^8 \\ +0.00751374x^9-0.00243133x^{10}-7.79409 \times 10^{-4}x^{11} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (4.34)$$

The calculated solutions from (4.34) is shown in Figure 4.

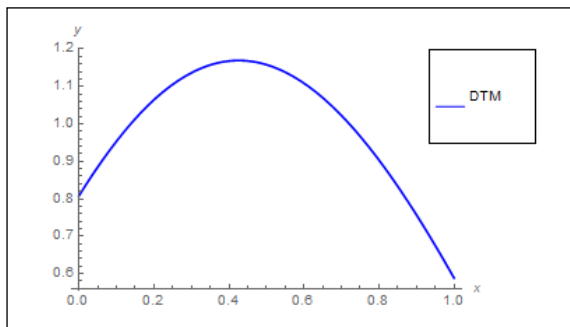


Figure 4 The calculated first eigenfunction (4.34) by DTM.

Table 4 The values of the problem close to zero after substituting the DTM first eigenfunction (4.34) to the problem.

x	$\hat{y}_1''(x) + (\lambda - x^2)\hat{y}_1(x)$
0	0
0.1	2.04834×10^{-12}
0.2	2.09204×10^{-9}
0.3	1.20112×10^{-7}
0.4	2.11985×10^{-6}
0.5	0.0000195861
0.6	-0.000120087
0.7	-0.000554464
0.8	-0.00207894
0.9	-0.00664544
1	-0.0187206

(II) Solving the second eigenvalue and eigenfunction

When $n=18$ and apply the same procedure, we solve $f^{(18)}(\lambda)=0$ and choose real roots, we have

$$\lambda_1^{(18)} = 3.69, \lambda_2^{(18)} = 18.06.$$

Note that since $\lambda_1^{(18)} = \lambda_1^{(11)}$ and

$$|\lambda_2^{(18)} - \lambda_2^{(17)}| = |18.05 - 18.06| = 0.01 \leq \xi \text{ so we get}$$

the second eigenvalue $\lambda_2 = 18.06$ and the second normalized eigenfunction is shown as

$$\hat{y}_2(x) = -18.6613 \begin{pmatrix} 1+2x-9.03x^2-6.02x^3+13.6735x^4+5.53606x^5-8.53244x^6 \\ -2.52384x^7+2.99588x^8+0.709953x^9-0.695978x^{10}-0.13951x^{11} \\ +0.117919x^{12}+0.0207014x^{13}-0.0155252x^{14}-0.00244463x^{15} \\ +0.0016596x^{16}+2.38424 \times 10^{-4}x^{17}-148685 \times 10^{-4}x^{18} \end{pmatrix}. \quad (4.35)$$

The calculated normalized semi-analytical solutions from (4.35) is shown in Figure 5.

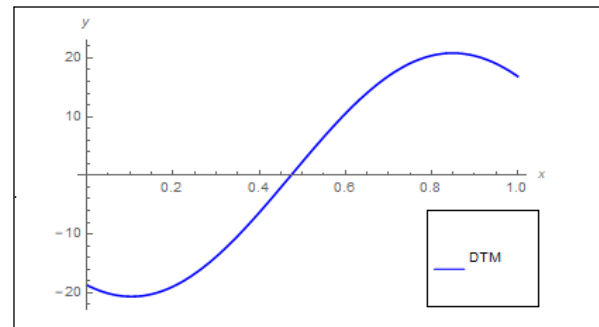


Figure 5 The calculated second eigenfunction (4.35) by DTM.

Table 5 The values of the problem close to zero after substituting the DTM second eigenfunction (4.35) to the problem.

x	$\hat{y}_2''(x) + (\lambda - x^2)\hat{y}_2(x)$
0	0
0.1	9.0226×10^{-17}
0.2	-1.42174×10^{-13}
0.3	-1.30843×10^{-10}
0.4	-1.59786×10^{-8}
0.5	-6.45971×10^{-7}
0.6	-0.0000129191
0.7	-0.000158165
0.8	-0.00134395
0.9	-0.00857555
1	-0.0432194

(III) Solving the third eigenvalue and eigenfunction:

When $n=25$, and using the same procedure, we solve $f^{(25)}(\lambda)=0$ and choose real roots, we have

$$\lambda_1^{(25)} = 3.69,$$

$$\lambda_2^{(25)} = 18.06,$$

$$\lambda_3^{(25)} = 48.93.$$

Note because $\lambda_1^{(25)} = \lambda_1^{(18)} = \lambda_1^{(11)}$ and $\lambda_2^{(25)} = \lambda_2^{(18)}$ from $|\lambda_3^{(25)} - \lambda_3^{(24)}| \leq \xi$, we get the second eigenvalue $\lambda_3 = 48.93$ and the second normalized eigenfunction is shown as

$$\hat{y}_3(x) = 9.83913 \left(\begin{aligned} &1 + 2x - 24.465x^2 - 16.31x^3 + 99.8394x^4 + 40.0024x^5 - 163.654x^6 \\ &- 46.9911x^7 + 144.775x^8 + 32.49x^9 - 80.5278x^{10} - 14.8793x^{11} \\ &+ 30.947x^{12} + 4.87523x^{13} - 8.76243x^{14} - 1.20678x^{15} + 1.91539x^{16} \\ &+ 0.235011x^{17} - 0.334909x^{18} - 0.0371517x^{19} + 0.0481645x^{20} \\ &+ 0.00488773x^{21} - 0.00582597x^{22} - 5.46063 \times 10^{-4}x^{23} \\ &+ 6.03676 \times 10^{-4}x^{24} + 5.26777 \times 10^{-5}x^{25} \end{aligned} \right) \quad (4.36)$$

The calculated solutions from (4.36) is shown in Figure 6.

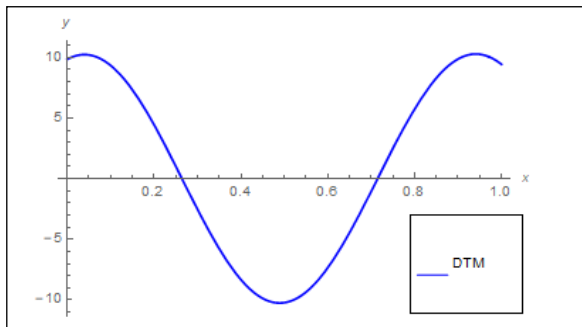


Figure 6 The calculated third eigenfunction (4.36) by DTM.

Table 6 The values of the problem close to zero after substituting the DTM third eigenfunction (4.36) to the problem.

x	$\hat{y}_3''(x) + (\lambda - x^2)\hat{y}_3(x)$
0	0
0.1	-6.04217*10 ⁻¹⁵
0.2	-3.61957*10 ⁻¹⁴
0.3	5.12551*10 ⁻¹⁴
0.4	1.01176*10 ⁻¹⁰
0.5	2.15634*10 ⁻⁸
0.6	1.72543*10 ⁻⁶
0.7	0.0000701905
0.8	0.00174005
0.9	0.0295471
1	0.372225

The eigenvalues of the problems 4.1 and 4.2 are shown in Figure 7.

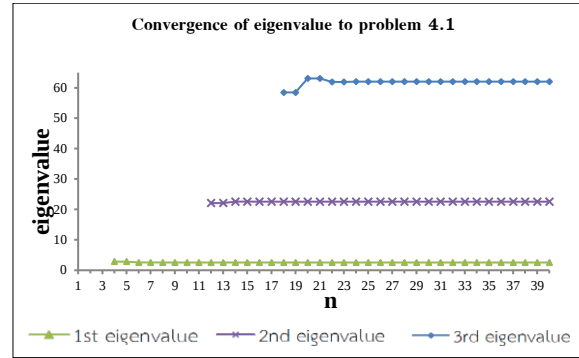


Figure 7 Convergence of eigenvalues λ_1 to λ_3 , where λ_1 , λ_2 and λ_3 converge to 2.60, 22.52 and 62.01, respectively.

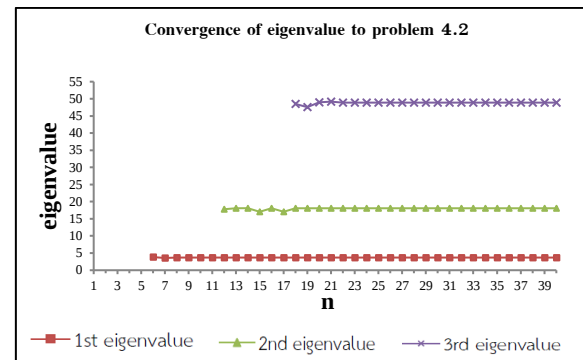


Figure 8 Convergence of eigenvalues λ_1 to λ_3 , where λ_1 , λ_2 and λ_3 converge to 3.69, 18.06 and 48.93, respectively.

5. CONCLUSION

The differential transformation method is an efficient method which can be used to find the semi-analytical solution of the quantum oscillating equation. The procedure is very straightforward and easy to program. The obtained solutions are shown to be accurate since the corresponding errors are very close to zero after substituting eigenfunctions into the quantum oscillator equation and boundary conditions.

REFERENCES

- Ayaz, F. (2004). Two-dimensional differential transform for partial differential equations. *Applied Mathematics and Computation*, 147, 547–567.
- Ayaz, F. (2014). On iterative techniques for numerical solution of linear and nonlinear differential equations. *Journal Mathematical and Computational Science*, 4, 716–727.
- Chen, C. K., & Ho, S. H. (1996). Application of differential transformation to eigenvalue problems. *Applied Mathematics and Computation*, 79, 173–188.
- Hassan, I. H. (2002). On solving some eigenvalue problems by using a differential transformation. *Applied Mathematics and Computation*, 127, 1–22.

- Hassan, I. H. (2008). Application to differential transformation method for solving systems of differential equations. *Applied Mathematical Modeling*, 32, 2552–2559.
- Hussin, C. H., Kilicman, A., & Mandangan, A. (2010). General differential transformation method for higher order of linear boundary value problem. *Borneo Science*, 27, 35–46.
- Jang, M. J., Chen, C. L., & Liu, Y. C. (2001). Solutions of the system of differential equations by differential transform method. *Applied Mathematics and Computation*, 121, 261–270.
- Kerdpol, B. (2015). *Approximated Solutions of Bessel's Equation and Legendre's Equation by Differential Transform Method* [Master's thesis]. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. (in Thai)
- Zhou, J. K. (1986). *Differential Transformation and Its Application for Electrical Circuits*. Wuuhahn, China: Huarjung University Press. (in Chinese)

Preparation, Nutrition Analysis, and Sensory Evaluation of Stingless Bee Honey Candy

Imron Meechai^{1*}, Romlee Chedoloh², Isma-ae Chelong³, Hasan Daupor¹

¹Department of Chemistry, Faculty of Science Technology and Agriculture Yala Rajabhat University, Yala, Thailand

²Department of Food Science and Technology, Faculty of Science Technology and Agriculture Yala Rajabhat University, Yala, Thailand

³Department of Biology, Faculty of Science Technology and Agriculture Yala Rajabhat University, Yala, Thailand

ABSTRACT

Honey of stingless bee has been reported a variety of biological activities, such as antioxidant, anti-inflammatory, antimicrobial, and anticancer, and nutritional contents. The high moisture content of stingless bee honey can cause the fermentation process and affect honey quality. Previously, most of the candy preparations used sugar and syrup as the main ingredients, which can lead to tooth decay and diabetes. Thus, the object of this research was the development of stingless bee honey candy, and its nutrition and sensory were analyzed. Isomalt was used as a bulking agent for this study. The stingless bee honey candy was prepared by mixing honey with isomalt in a ratio of 90:10–10:90 (w/w) with heating at 70–80°C for <60 min. The result showed that the ratio of honey with isomalt at 20:80 (B), 30:70 (C), and 40:60 (D) was suitable preparation of candy. In addition, the sensory evaluation of B–D displayed good agreement. The calories in candies (B–D) showed in the range of 397–398 cal/100g.

KEYWORDS: Stingless bee honey, Candy, Nutrition analysis, Sensory evaluation

*Corresponding Author: imron.me@yru.ac.th

Received: 28/03/2022; Revised: 31/01/2024; Accepted: 16/02/2024

1. INTRODUCTION

Nowadays, the development of foods is growing rapidly with creative ideas that consumers pay more attention to nutritional value and health (Jacobs and Steffen, 2003; Sahlan et al., 2019). Therefore, ingredients are essential to the development of healthy food products.

Honey of stingless bees is produced from the nectar of flowers by stingless bees (Meliponini Tribe, Apidae family) which is an alternative source of natural food products (Michener, 2004; Rao, 2016). It displayed a wide range of biological, such as anti-microbial, anticancer, anti-inflammatory, antioxidant

activities and also has a wound-healing effect (Almeida et al., 2013; Rao, 2016). Moreover, it also contains a variety of amino acids, vitamins (A, B1, and B2), minerals (calcium, sodium, potassium, magnesium and iron), and organic acids (malic, tartaric, citric, lactic and oxalic) (Alvarez-Suarez et al., 2013; Brodschneider and Crailsheim, 2010; Sahlan et al., 2019) Honey has been used as an ingredient in a wide range of benefits, one of which is a candy product (Alvarez-Suarez et al., 2013; Sahlan et al., 2019). As previously reported, the main ingredient in candy is sugar, which is the leading cause of tooth decay and diabetes. Today, there are a variety of sugar substitutes,

one of which is isomalt (Jaggi et al., 2020). It acts as a bulking agent, an anti-caking agent, and does not increase blood glucose or insulin levels. Additionally, it does not promote tooth decay (Grembecka, 2015; Jaggi et al., 2020)

Thus, the object of this research was the development of stingless bee honey candy as an alternative source of products without sugar that may cause tooth decay and diabetes, and its nutrition and sensory were analyzed.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Samples

Stingless bee honey (*Heterotrigona itama*) was collected from Pase Yawo sub-district, Sai Buri district, Pattani, Thailand in January 2019. The honey was filtrated using a thin white cloth and kept at 4°C before studies.

2.2 Preparation of stingless bee honey candy

There are 9 formulations for preparing candy, consisting of formula A, B, C, D, E, F, G, H, and I. Honey was mixed with isomalt with a ratio of 10:90, 20:80, 30:70, 40:60, 50:50, 60:40, 70:30, 80:20, and 90:10 w/w (shown in Table 1) and heated at 70–80°C for 55–60 min. The mixture was poured into candy molds and refrigerated for 15–30 min. The candies were further analyzed for their nutritional value and sensory test.

Table 1 Formulation for preparing all 9 stingless bee honey candies

Formulation	Percentage of stingless bee honey	Percentage of isomalt
A	10	90
B	20	80
C	30	70
D	40	60
E	50	50
F	60	40
G	70	30
H	80	20
I	90	10

2.3 Nutrition analysis of stingless bee honey candy

The nutrition analyzes of honey and candies were done in triplicate for protein, fat, moisture, and ash contents. The methods described in AOAC (2000). Carbohydrate content was calculated using the standard equation ($\% \text{Carbohydrate} = 100\% - \% \text{protein} + \% \text{fat} + \% \text{ash} + \% \text{moisture}$). Energy evaluation was calculated by multiplying the protein, carbohydrate, and fat with the factors 4, 4, and 9, respectively (AOAC, 2000). Determination of moisture content: the empty dish and lid were dried in the hot air oven at 105°C for 3 h, then transferred to the desiccator to cool and weigh. Two grams of sample were weighed into the dish. It was dried in the hot air oven at 105°C for 3 h. After drying, it was transferred to the desiccator to cool. Then the dish and its dried sample were reweighed. Calculation of moisture content was followed (1).

$$\text{Moisture}(\%) = ((W1 - W2) / W1) \times 100 \quad (1)$$

Where: W1 = weight (g) of sample before drying

W2 = weight (g) of sample after drying

Determination of ash content: The crucible and lid were placed in the furnace at 550°C for 30 min, then transferred to the desiccator to cool and weigh. Two grams of the sample were weighed into the crucible. It was dried in the hot air oven at 135±2°C for 30 min and burned in the furnace at 550°C for 6 h. After that, it was transferred to the desiccator to cool. Then it was reweighed. Calculation of ash content was followed (2).

$$\text{Ash}(\%) = (\text{Weigh of ash} / \text{Weigh of sample}) \times 100 \quad (2)$$

Determination of fat content: The beaker was dried in the hot air oven at 100±2°C for 30 min, then transferred to the desiccator for 30 min and weighed. One gram of the sample was weighed into the beaker. The sample was dissolved with 10 mL of distilled water. The solution was transferred into a separatory funnel. Then, 1.23 mL of ammonium solution, 10 mL of ethyl alcohol, and 25 mL of diethyl ether were

added. After that, it was shaken for 1 minute. And, 25 mL of Petroleum ether was added then shaken for 1 minute. The upper level of the sample was aliquoted and extracted with 1 mL of ethyl alcohol, 15 mL of diethyl ether, and 15 mL of petroleum ether two more times. An aliquot of the upper sample was added to the beaker. It was dried in the hot air oven at $100 \pm 2^\circ\text{C}$ for 2 h, then transferred to the desiccator for 30 min and weighed. The sample was reweighed. Calculation of fat content was followed (3).

$$\text{Fat}(\%) = (\text{Weigh of fat} / \text{Weigh of sample}) \times 100 \quad (3)$$

Determination of protein content: Two grams of sample were added to Kjeldahl flask. Then, 2 grams of CuSO_4 and K_2SO_4 in ratio of 1:10 and 25 mL were added. It was digested at 400°C . After the sample cools, 10–15 mL of distilled water and 40–50 mL of NaOH (40 %w/w). Then, the sample is distilled while the 20–25 mL of boric acid (4% w/w) and indicator are in a receiving flask. After that, the solution was titration with 0.1 N HCl. Calculation of protein content was followed (4).

$$\text{Protein}(\%) = (V1 - V2) \times (14.007) \times N \times 100 / \text{mg of Sample} \quad (4)$$

$$\text{Protein}(\%) = \% \text{Nitrogen} \times 6.25$$

Where: V1 = The amount of hydrochloric acid used in the titration of the sample

V2 = The amount of hydrochloric acid used in the titration of the blank sample

N = Concentration of hydrochloric acid

2.4 Sensory evaluation of stingless bee honey candy

Fifty untrained panelists were asked to evaluate the sensory attributes. Different attributes viz. color, taste, aroma, flavor, consistency, sourness, and overall preference were rated based on a 9-point hedonic scale ranging from 1 to 9 (Lim, 2011).

2.5 Statistical analysis

All experimental data were subjected to ANOVA followed by Duncan's multiple range test (DMRT) with a p-value of 0.05 ($p < 0.05$).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The preparation of the stingless bee honey candies of this study found that the suitable ratio of honey and isomalt were 20:80 (B), 30:70 (C), and 40:60 (D) at $70\text{--}80^\circ\text{C}$ for 30–45 min. The characteristic of all formulations is reddish brown like stingless bee honey color. It may involve the advantage of isomalt which is no browning reaction occurs during boiling (McNutt and Sentko, 2003) as shown in Figure 1. In 2019, Sahlan et al. reported on the preparation of honey candies containing water, sugar syrup, and honey, the maximum honey content ratio that can be prepared as a candy was 29% (Sahlan et al., 2019). Compared to this study, candies with a higher ratio of honey were prepared, with a maximum of 40 %. Thus, preparing stingless bee honey candies that use a mixture of honey and isomalt may be a healthier candy alternative.



Figure 1 The visual appearance of stingless bee honey candy of B, C, and D formulation

Nutrition Analysis of stingless bee honey candies is given in Table 2. The energy values of All candies were not significantly different ($p < 0.05$). Although the mix ratio of each formula (B, C, and D) was different. All candies did not appear fat content. The moisture, protein, and ash contents of all candies increased the amount of stingless bee honey. In contrast, candy's carbohydrate content decreases with the amount of isomalt. In 2019, the nutritional values of three types of honey candy were reported: 1) Klanceng honey candy, 2) randu honey candy, and 3) forest honey

candy, which had an energy value in the range of 397.28 – 398.68 kcal. /100g, a protein range of 0.18 – 0.36 (g/100g) and a carbohydrate range of 99 – 99.31 (g/100g), and had no fat content (Sahlan et al., 2019). In 2021, Baka et al. reported a nutritional analysis of stingless bee honey candy which had an energy value of 395.45 kcal. /100g, a protein at 0.03 g/100g, and a carbohydrate at 98.47 g/100g and had no fat content (Baka et al., 2021). Compared to research results, carbohydrate content and energy value are similar. But the protein content gave a higher value, probably because of the protein content of ingredients and honey of bee species. In addition, when comparing the nutritional value of all candies with raw honey, they showed significantly higher protein content ($p < 0.05$). This formulation may be useful for honey candy preparation.

Table 2 Nutrition Analysis of stingless bee honey candies (Formula B, C, and D)

Nutrition	Raw Honey	Stingless bee honey candies		
		Formula B	Formula C	Formula D
Moisture content (g/100g)	30.47±0.95 ^a	0.44±0.24 ^a	0.46±0.10 ^{ac}	0.48±0.16 ^a
Protein content (g/100g)	0.52±0.00 ^a	0.55±0.00 ^a	0.73±0.05 ^a	0.91±0.05 ^a
Carbohydrate content (g/100g)	68.70±0.94 ^a	98.95±0.23 ^a	98.75±0.14 ^{ac}	98.53±0.20 ^a
Fat content (g/100g)	ND	ND	ND	ND
Ash content (g/100g)	0.32±0.01 ^c	0.05±0.00 ^a	0.06±0.00 ^{ab}	0.07±0.01 ^b
Energy value (kcal./100g)	276.85±3.76 ^a	397.79±0.64 ^b	397.94±0.41 ^b	398.01±0.94 ^a

The values with different superscript letters in a column are significantly different ($p < 0.05$).

ND = not detected

Sensory testing of all 3 formulas of honey candies (B, C, and D) found that the odor test gave an intermediate rating that may need to be developed by adding natural scents with essential oils (Irshad et al., 2020). For Formula C, all ratings were in the range of 5–6, possibly due to the higher honey content ratio than the other formulations and resulting in lower overall preference ratings than Formula A with a significant difference ($p < 0.05$) (shown in Table 3). However, all 3 formulas can be used to prepare honey in the form of candies, which may need to be developed with the

addition of natural raw materials to further increase the sensory rating.

Table 3 Sensory testing values of candy formulas (B, C, and D)

Sensory evaluation	Stingless bee honey candies		
	Formula B	Formula C	Formula D
Color	7.07±1.31 ^a	7.20±1.27 ^a	6.27±1.46 ^b
Smell ^{ns}	5.77±1.65 ^a	5.77±1.85 ^a	5.23±1.94
Flavor ^{ns}	6.40±1.50	6.10±2.02	5.63±1.85
Texture	7.00±1.64 ^a	6.57±2.08 ^{ab}	6.00±1.76 ^b
Characteristic	6.80±1.86 ^a	6.53±2.05 ^{ab}	5.60±2.28 ^b
Overall preference	6.87±1.55 ^a	6.57±1.77 ^{ab}	5.83±1.95 ^b

The values with different superscript letters in a row are significantly different ($p < 0.05$).

^{ns} means not significantly different ($p > 0.05$).

4. CONCLUSION

Honey stingless bees are a healthy product from natural. It can be prepared as candy with a high honey content. To prepare candies from a mixture of honey and isomalt, a ratio of 20–40% of honey can be used. In addition, the nutritional value of honey candy is higher than honey. It may be an alternative healthy honey candy product. However, the formulation may need to be revised to obtain additional sensory evaluation values and further stability and shelf-life studies may be required.

ACKNOWLEDGMENT(S)

The authors would like to thank the Yala Rajabhat University, Thailand for financial support. In addition, the authors also would like to thank particularly all the partners who participated in this work.

REFERENCES

- Alvarez-Suarez, J. M., Giampieri, F., & Battino, M. (2013). Honey as a Source of Dietary Antioxidants: Structures, Bioavailability and Evidence of Protective Effects Against Human Chronic Diseases. *Current Medicinal Chemistry*, 20(5), 621–638.
- AOAC. (2000). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (17th ed). USA.: Gaithersburg.

- Baka, A., Yalanae, P., Meechai, I., & Chelong, I. (2021). Preparation and nutritional analysis of stingless bee honey candy. In *Proceeding of The 4th International Malaysia-Indonesia-Thailand Symposium On Innovation and Creativity 2021*, Universiti Teknologi MARA, p.7.
- Brodschneider, R. and Crailsheim K. (2010). Nutrition and health in honey bees. *Apidologie*, 41(3), 278–294.
- Da Silva, I. A. A., da Silva, T. M. S., Camara, C. A., Queiroz, N., Magnani, M., de Novais, J. S., Soledade, L. E. B., de Oliveira, Lima, E., de Souza, A. L. & de Souza, A. G. (2013). Phenolic profile, antioxidant activity and palynological analysis of stingless bee honey from Amazonas, Northern Brazil. *Food Chemistry*, 141(4), 3552–3558.
- Grembecka, M. (2015). Sugar alcohols—their role in the modern world of sweeteners: a review. *European Food Research and Technology*, 241, 1–14.
- Irshad, M., Subhani, M. A., Ali, S., et al. (2020). Biological importance of essential oils. In: El-Shemy H.A., editor. *Essential oils—oils of nature*. London: IntechOpen.
- Jacobs, D. R., & Steffen, L. M. (2003). Nutrients, foods, and dietary patterns as exposures in research: a framework for food synergy. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 78(3), 508–513.
- Jaggi, A., Marya, C. M., Oberoi, S. S., Nagpal, R., Kataria, S., & Taneja, P. (2020). Sugar substitute: Key facts for their use – A review. *Journal of Global Oral Health*, 3(1), 63–71.
- Lim, J. (2011). Hedonic scaling: a review of methods and theory. *Food Qual Prefer*, 22(8), 733–747.
- McNutt, K. & Sentko, A. (2003). Isomalt. In *Encyclopedia of Food Science and Nutrition*. New York: Academic Press. pp. 3401–3407.
- Michener, C. D. & Boongird, S. (2004). A new species of Trigona from Peninsular Thailand (Hymenoptera: Apidae: Meliponini). *Journal of the Kansas Entomological Society*, 77, 143–146.
- Rao, P. V., Krishnana, K. T., Sallehb, N. & Gan, S. H. (2003), Biological and therapeutic effects of honey produced by honey bees and stingless bees: a comparative review. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 26, 657–664.
- Sahlan, M., Ridhowati, A., Hermansyah, H., Wijanarko, A., Rahmawati, O. & Pratami, D. K. (2019). Formulation of Hard Candy contains Pure Honey as Functional Food. In *AIP Conference Proceedings*, 2092.

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนาง

Development product of chili-mulberry sauce mixed with Ladyfinger banana

สุภาพร อภิตานานุสรณ์^{1*}, อรุณทัย เจือมนะ¹ และ รวงนลิน เทพนวล¹

Supaporn Apirattananusorn^{1*}, Arunothai Juemanee¹ and Ruangnalin Thepnuan¹

¹สาขาวิชานวัตกรรมอาหารและโภชนาการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

¹Program in Food Innovation and Nutrition, Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนางให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคตามความต้องการผลิตภัณฑ์แปรรูปผลหม่อนจากวิสาหกิจชุมชน โดยศึกษาถึงปริมาณและ/หรือชนิดของส่วนผสมที่มีผลต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพ และการประเมินค่าทางประสาทสัมผัส ผลการวิจัยพบว่า ส่วนประกอบที่เหมาะสมในการผลิตซอสพริกผลหม่อนฯ คือ พริกชี้ฟ้าแดงสดร้อยละ 12.15 พริกกระเหรียงสดร้อยละ 2.70 พริกชี้ฟ้าแดงแห้งร้อยละ 12.15 น้ำตาลทรายร้อยละ 10 น้ำส้มสายชูร้อยละ 16 กระเทียมร้อยละ 5 เกลือร้อยละ 4 กล้วยเล็บมือนางร้อยละ 9.35 และน้ำผลหม่อนร้อยละ 28.6 การใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปร (Modified Tapioca Starch, MTS) และแซนแทนกัม (Xanthan Gum, XG) ร้อยละ 0.03 และ 0.05 ตามลำดับ มีความเหมาะสมในการปรับปรุงเนื้อสัมผัสด้านความหนืดและความคงตัว ผู้บริโภคทั่วไปจำนวน 80 คน ให้การยอมรับในระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก (7.12-7.73) สามารถเก็บรักษาได้ไม่น้อยกว่า 12 สัปดาห์ ในระหว่างการเก็บรักษาพบว่า ของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 24.51-24.68 มีค่าไม่แตกต่างกัน ค่า pH และปริมาณกรดทั้งหมดอยู่ในช่วง 3.86-3.90 และ ร้อยละ 1.16-1.19 ตามลำดับ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 6 สัปดาห์แรกของการเก็บรักษา จากนั้นมีค่าลดลงจนถึงสัปดาห์ที่ 12 ในขณะที่ค่าแอนโทไซยานินมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ค่า L* และ a* มีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า b* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ไม่พบการแยกชั้นตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา จุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์ และรา และ *E. coli* มีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

คำสำคัญ : ซอส ผลหม่อน กล้วยเล็บมือนาง ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ฟีนอลิกทั้งหมด

ABSTRACT

The objective of this research was to develop chili-mulberry sauce mixed with Ladyfinger banana (MSL) to satisfy consumers, as required by community enterprises. The effect of the quantity and/or types of ingredients on chemical and physical properties, and sensory evaluation of MSL was studied. It was revealed that ingredients of 12.15% fresh red Chi Fah chili, 2.70% fresh Kra Liang chili, 12.15% dried red Chi Fah chili, 10% sugar, 16% vinegar, 5% garlic, 4% salt, 9.35% Ladyfinger banana and 28.6% mulberry juice were appropriate to produce MSL. The amount of modified tapioca starch (MTS) and xanthan gum (XG), 0.03% and 0.05%, respectively were sufficient to improved viscosity and stability of MSL product. The sensory acceptance was evaluated between like moderately to like verymuch (7.12-7.73) by 80 general consumers and could be kept at least 12 weeks. The total solid was not significant different (24.51-24.68%). The pH and total acidity were between 3.86-3.90 and 1.16-1.19%, respectively. The antioxidant capacity (DPPH) and total phenolic content gradually increased during 6-week storage and then decreased until 12-week storage while anthocyanin continuously decreased during 12-week storage. The color explained as L* and a* were likely to decrease while b* was likely to increase. During 12-week storage, layer separation was not found and there were less of total microorganisms, yeasts and molds and *E. coli* than those of Thai specified standard.

KEYWORDS: sauce, mulberry, Ladyfinger banana, antioxidant capacity, total phenolic

*Corresponding Author: supapornapi@yahoo.com

Received: 25/10/2022; Revised: 04/11/2023; Accepted: 06/11/2023

1. บทนำ

ผลหม่อนหรือมัลเบอร์รี่ (Mulberry) เป็นพืชที่อยู่ในวงศ์ Moraceae เมื่อสุกจะมีสีม่วงดำทั้งผลมีรสชาติหวานอมเปรี้ยว ในประเทศไทยมีการพัฒนาสายพันธุ์หม่อนเพื่อให้ได้ผลที่มีขนาดใหญ่สำหรับบริโภคและให้ผลผลิตสูง เช่น สายพันธุ์บุรีรัมย์ 60 สายพันธุ์นครราชสีมา 60 และสายพันธุ์เชียงใหม่ เป็นต้น โดยเฉพาะสายพันธุ์เชียงใหม่ที่นอกจากมีใบในปริมาณสูงสำหรับการเลี้ยงตัวไหมแล้วยังให้ผลหม่อนในปริมาณสูงด้วย (Nuaypirom, 2003) ผลหม่อนเป็นผลไม้ที่ผลิตได้ในประเทศ ปลูกขึ้นได้ดีในดินต่าง ๆ เกือบทุกชนิด และมีระบบการบริหารจัดการแปลงเพื่อให้สามารถมีผลผลิตทั้งปี ในประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกหม่อนอยู่ที่ 42,018.75 ไร่ (The Queen Sirikit Department of Sericulture, 2019) และในพื้นที่ภาคใต้มีการปลูกและมีมูลค่าคิดเป็น 1.1 ล้านบาทต่อปี (สำรวจระหว่างมิถุนายน 2564 – มิถุนายน 2566; The Queen Sirikit Department of Sericulture, 2023) ผลหม่อนมีคุณค่าทางอาหารไม่น้อยไปกว่าผลไม้ชนิดอื่นที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ เช่น ผลราสเบอร์รี่ บลูเบอร์รี่ และแบล็คเบอร์รี่ ที่มีราคาแพง ในผลหม่อนสด 100 กรัม พบว่ามีปริมาณฟีนอลิก 17.38–50.93 mg GAE/g และมีสารแอนโทไซยานินที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายอยู่ในช่วง 61.07 – 65.03 mg/g (Butkhup, 2012; Jiang & Nie, 2015; Kaewruang et al., 2006; Sangteerakij et al., 2023) นอกจากนี้ผลหม่อนยังมีสารสำคัญอีกหลายชนิดที่มีประโยชน์ เช่น กรดโฟลิก แครโทีนอยด์ โทโคฟีรอล และวิตามินซี (Kaewruang et al., 2006; Djilas et al., 2009) ผลหม่อนเป็นผลไม้ที่ผิวบาง เน่าเสียได้ง่าย ทำให้สามารถจำหน่ายในรูปแบบผลสดได้เพียง 1–2 วันเท่านั้น เกษตรกรผู้ปลูกหม่อนผลจึงนิยมเก็บผลหม่อนด้วยการแช่เย็นและแช่แข็ง ซึ่งทำให้ราคาจำหน่ายลดลง เกษตรกรจึงนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้เช่นเดียวกับผลไม้ทั่วไป เช่น นำมาแปรรูปเป็นเครื่องดื่ม ไวน์ แยม เยลลี่ และไอศกรีม เป็นต้น

กล้วยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เนื่องจากให้ผลผลิตที่รวดเร็วและนิยมรับประทานกันมาก สามารถบริโภคได้ในรูปของกล้วยสดและกล้วยแปรรูป โดยเฉพาะกล้วยเล็บมือนางซึ่งเป็นผลไม้ประจำจังหวัดชุมพร โดยกรมทรัพยากรทางปัญญาได้ประกาศรับขึ้นทะเบียนให้กล้วยเล็บมือนาง จังหวัดชุมพร เป็นสินค้าที่เป็นสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ ด้วยสภาวะภูมิศาสตร์ที่มีความเหมาะสมในการปลูกกล้วยเล็บมือนางจึงทำให้กล้วยเล็บมือนางจังหวัดชุมพร มีคุณลักษณะ รสชาติ และกลิ่น

ที่เป็นเอกลักษณ์ โดยมีพื้นที่เพาะปลูกในจังหวัดชุมพรมากเป็นอันดับ 1 ของประเทศ คิดเป็นพื้นที่เพาะปลูกมากกว่า 7,000 ไร่ (Department Intellectual Property, 2015) อย่างไรก็ตามกล้วยเล็บมือนางมีข้อจำกัดเรื่องอายุการเก็บรักษาที่สั้น โดยเฉพาะในช่วงที่มีปริมาณผลผลิตมากทำให้ไม่สามารถบริโภคสดได้ทัน การแปรรูปจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อยืดอายุการเก็บให้กับกล้วยเล็บมือนางได้ ปัจจุบันเกษตรกรจึงนำกล้วยมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากขึ้น เช่น กล้วยเล็บมือนางอบแห้งและกล้วยเล็บมือนางทอดกรอบ เป็นต้น งานวิจัยนี้จึงเป็นการส่งเสริมให้มีการนำกล้วยเล็บมือนางในท้องถิ่นมาใช้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้อีกทางหนึ่ง จากการศึกษาของ Krisada (2546) พบว่า การใช้ประโยชน์จากแป้งกล้วยน้ำว้าในการผลิตซอสพริกเมื่อเปรียบเทียบกับซอสพริกทางการค้าที่จำหน่ายทั่วไปผู้บริโภคให้การยอมรับไม่แตกต่างจากซอสพริกทางการค้าทั้งในด้านลักษณะปรากฏความสามารถในการเทออกจากขวดและการยอมรับโดยรวม แต่อย่างไรก็ตามพบว่าหลังจากการผลิต 7 วัน ผลิตภัณฑ์ซอสพริกเกิดการแยกชั้นขึ้นซึ่งเป็นการแยกตัวของปริมาณของเหลวบางส่วนแยกตัวออกมา (Syneresis) จึงมีการนำสารให้ความข้นหนืดที่มีคุณสมบัติในการจับกับน้ำได้ดีมาใช้ เช่น แชนแทนกัม และสตาร์ชตัดแปร (Pongsawatmanit et al., 2011)

ผลิตภัณฑ์ซอสต่าง ๆ มีการขยายตลาดอย่างรวดเร็วในปัจจุบันเนื่องจากการรับวัฒนธรรมการบริโภคอาหารแบบตะวันตก โดยเฉพาะการขยายตัวของร้านอาหารประเภทฟาสต์ฟู้ด (The Office of Industrial Economics, 2016) ผลิตภัณฑ์ซอสจัดเป็นหนึ่งในเครื่องปรุงรสที่คนไทยนิยมนำมาบริโภคเพื่อเพิ่มรสชาติของอาหารให้มีความกลมกล่อมมากขึ้น พบว่าคนไทยใช้ผลิตภัณฑ์เครื่องปรุงรสเฉลี่ย 5.3 กิโลกรัมต่อคนต่อปี โดยในปัจจุบันมูลค่าทางการตลาดเครื่องปรุงรสอาหารภายในประเทศปี 2559 มีมูลค่าเท่ากับ 39,859 ล้านบาท และมีอัตราการขยายตัวของตลาด เฉลี่ยร้อยละ 5.6 และมีอัตราการขยายตัวของปริมาณการบริโภคในอีก 5 ปี ร้อยละ 48.6 สำหรับซอสพริกจากเดิมที่ใช้เป็นเครื่องจิ้มปัจจุบันถูกนำมาใช้เป็นซอสปรุงรสในการประกอบอาหารได้หลากหลายเมนู ส่งผลให้ตลาดขยายตัวเฉลี่ยร้อยละ 6.3 ต่อปี (Sunitha, 2561) ดังนั้นจึงคาดว่าจะยังมีโอกาสขยายตลาดผลิตภัณฑ์ซอสในประเทศและต่างประเทศได้อีกและเป็นไปได้ที่จะส่งเสริมและยกระดับสินค้าออกจำหน่ายโดยการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มศักยภาพสู่

ตลาดสากลโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ซอสพริกที่เป็นผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องจิ้มที่คนนิยมนำมาบริโภคกับอาหารคาว ในอดีตการบริโภคซอสพริกไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากนัก แต่ในปัจจุบันจากความนิยมในการรับประทานอาหารนานาชาติที่แพร่หลายมากขึ้นจนทำให้ซอสพริกได้รับความนิยมมากขึ้นเนื่องจากซอสพริกมีหลายรสชาติทั้งความเปรี้ยว เค็ม หวานและเผ็ด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพริกที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบและส่วนผสมอื่น ๆ ที่นำมาผสมเพื่อทำให้ซอสพริกมีลักษณะข้นหนืดเป็นเนื้อเดียวกัน จึงมีผู้ผลิตออกมาผลิตซอสพริกมากขึ้นจนมีชื่อเสียงเป็นที่รู้จักอย่างซอสพริกศรีราชา (Krisada, 2546)

ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดแปรรูปผลหมอนโดยการนำมาผลิตเป็นซอสพริกผลหมอนที่มีส่วนผสมของกล้วยเล็บมือนางและศึกษาการใช้สารให้ความคงตัว นอกจากจะเป็นการเพิ่มมูลค่าสินค้า เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการแล้ว ยังเป็นการใช้รสเปรี้ยวจากหมอนเพื่อปรับปรุงคุณภาพของซอสพริกถือเป็นการแปรรูปเพื่อลดการเน่าเสียของผลหมอนและกล้วยเล็บมือนาง ซอสเป็นอาหารที่มีความเป็นกรดอยู่ในตัวทำให้สามารถฆ่าเชื้อได้ง่ายกว่าอาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ และจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าการผลิตซอสพริกผลหมอนผสมกล้วยเล็บมือนางมีสี กลิ่น และรสชาติใกล้เคียงกับซอสพริกที่มีจำหน่ายทั่วไป โดยเฉพาะมีสีส้มสวยงามและโดดเด่นกว่าซอสพริกในท้องตลาด งานวิจัยนี้เป็นประโยชน์แก่กลุ่มเกษตรกรและกลุ่มผู้ผลิตอาหาร โดยเป็นการเพิ่มช่องทางในการรับซื้อผลหมอนสดจากกลุ่มเกษตรกรเพื่อนำไปแปรรูปสินค้าได้อีกทางหนึ่ง

2. วัสดุและวิธีการ

2.1 การเตรียมวัตถุดิบน้ำผลหมอน

ผลหมอนสดสายพันธุ์เชียงใหม่ ระยะห่าม (ผลสีแดงทั้งลูก) ร้อยละ 20 และระยะสุก (ผลสีม่วงแดงออกดำทั้งลูก) ร้อยละ 80 ล้างน้ำแล้วบรรจุถุงพลาสติกปิดสนิท นำมาแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เตรียมน้ำผลหมอนโดยใช้ผลหมอนที่แช่เยือกแข็งไว้ นำมาผสมกับน้ำอัตราส่วน 1:2 ต้มให้เดือดนาน 20 นาทีแล้วกรองด้วยผ้าขาวบาง

2.2. การสร้างแนวคิดผลิตภัณฑ์ของซอสพริกผลหมอนผสมกล้วยเล็บมือนาง

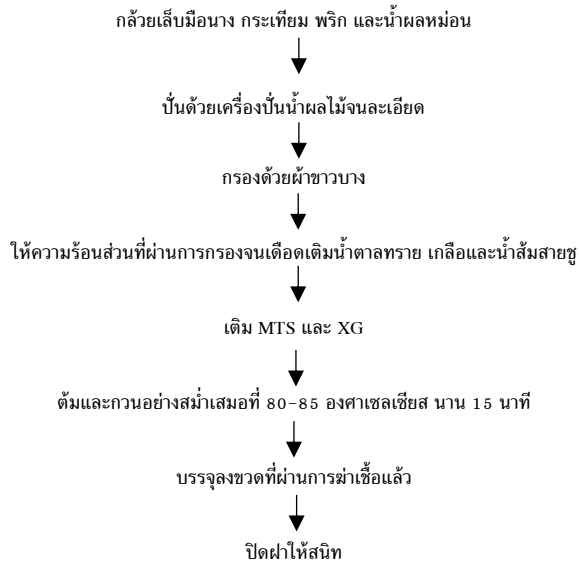
ค้นหาแนวความคิดของผลิตภัณฑ์ซอสพริกผลหมอนฯ ตามที่ผู้บริโภคต้องการ โดยวิธีการสนทนากลุ่ม (focus group) โดยกลุ่มสนทนาเป็นกลุ่มผู้ทดสอบชิมที่

บริโภคซอสอย่างน้อย 1 – 2 ครั้งต่อสัปดาห์ จำนวน 3 กลุ่ม ๆ ละ 6– 12 คนรวมทั้งสิ้น 30 คน โดยการสนทนาจะมีการทดสอบทางประสาทสัมผัสตัวอย่างซอส 6 สูตร โดยมีตัวอย่างซอสพริกผลหมอนฯ เบื้องต้นที่ผลิตขึ้นเอง 2 สูตร ได้แก่ สูตร A1 และ A2 ดังแสดงในตารางที่ 1 และใช้กระบวนการแปรรูปดังแสดงในภาพที่ 1 (Adapted from Siripanporn et al., 1999; Auppatak et al., 2015) เปรียบเทียบกับตัวอย่างซอสพริกที่จำหน่ายทางการค้าอีก 4 ยี่ห้อ ได้แก่ สูตร A3, A4, A5 และ A6 ส่วนประเด็นในการสนทนาจะเกี่ยวข้องกับคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส ได้แก่ ลักษณะปรากฏ (สี ความละเอียด) กลิ่น รส (เผ็ดเปรี้ยว หวาน เค็ม) เนื้อสัมผัส (ความข้นหนืด) และความรู้สึกลักษณะต่าง ๆ (ชอบหรือไม่ชอบ) ซึ่งทำให้ได้ข้อมูลคุณลักษณะที่ดีของซอส และทราบถึงคุณลักษณะที่ควรปรับปรุงและความชอบของตัวอย่างสูตรเบื้องต้น (A1 และ A2)

จากนั้นคัดเลือกสูตรจากสูตร A1 และ A2 ไปปรับส่วนผสมและทำการทดสอบความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส ความหนืด ความสามารถในการเทและความชอบโดยรวมจากผู้บริโภคจำนวน 50 คนด้วยสเกลความชอบแบบ 9 ระดับคะแนน (9-point Hedonic scale, 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด 5 หมายถึง บอกไม่ได้ว่าชอบหรือไม่ชอบ และ 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด) (Stone & Sidel, 2004)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมซอสพริกผลหมอนผสมกล้วยเล็บมือนาง

ส่วนผสม (%)	สูตร					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6
พริกชี้ฟ้าแดงสด	27	24.3	56	50	53	22
พริกกระเทียมสด	-	2.7	-	-	-	-
น้ำตาลทราย	10	10	20	25	19	2
น้ำส้มสายชู	2.5	2.5	9	10	10	9
กระเทียม	5	5	9	10	9	28
เกลือ	2.5	2.5	3.5	5	9	-
กล้วยเล็บมือนาง	24.35	24.35	-	-	-	-
น้ำผลหมอน	28.6	28.6	-	-	-	-
MTS (ของส่วนผสมทั้งหมด)	0.03	0.03	1.25	-	-	-
XG (ของส่วนผสมทั้งหมด)	0.03	0.03	1.25	-	-	-



รูปที่ 1 กระบวนการแปรรูปของสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนาง

2.3 การพัฒนาคุณภาพโดยศึกษาการใช้ MTS และ XG ในซอสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนาง

ในการพัฒนาครั้งนี้มุ่งเน้นให้ผลิตภัณฑ์มีระยะเวลาการเก็บรักษาที่เหมาะสมต่อการจำหน่ายของผู้ผลิต จึงทำการศึกษาการใช้สารให้ความคงตัวต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยคัดเลือกซอสพริกผลหม่อนฯ ที่ได้จากข้อ 2. จำนวน 1 สูตร นำมาศึกษาปริมาณ MTS (Chemipan Corporation Co., Ltd.) และปริมาณ XG (Chemipan Corporation Co., Ltd.) อย่างละ 2 ระดับ คือ ร้อยละ 0.03 และ 0.05 โดยใช้ปริมาณ MTS ต่อ XG เป็น 0.03:0.03, 0.05:0.03, 0.03:0.05 และ 0.05:0.05

2.4 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด (AOAC, 2000)

ทำการอบตัวอย่างด้วยตู้อบลมร้อน (ยี่ห้อ BINDER, รุ่น RE115) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง แล้วคำนวณหาปริมาณของแข็งทั้งหมดดังนี้ ปริมาณของแข็งทั้งหมด =

$$\frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}$$

2.5 การวัดค่าพีเอช

วัดความเป็นกรด-ด่างหรือค่า pH โดยใช้เครื่อง pH Meter (ยี่ห้อ Mettler toledo รุ่น FE20-LE407)

2.6 การวิเคราะห์ปริมาณกรดทั้งหมด (AOAC, 2000)

นำตัวอย่างละลายในน้ำกลั่นแล้วไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 N จนถึงจุดยุติ จดบันทึกปริมาณสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ นำไปคำนวณหาปริมาณกรดทั้งหมด

ร้อยละปริมาณกรดทั้งหมดในรูปของกรดแอสซิติค=

$$\frac{N \times V \times \text{Eg.wt} \times 100}{W/1000}$$

โดย

N คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N

V คือปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต (mL)

Eg.wt คือ กรัมสมมูลของกรดแอสซิติค

W คือ ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างที่ใช้ในการไทเทรตในรูปกรดแอสซิติค

2.7 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

2.7.1 การเตรียมสารสกัด

ชั่งตัวอย่าง 30 กรัม เติมน้ำเอทานอล (ร้อยละ 80) ปริมาตร 250 มิลลิลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที นำของเหลวที่กรองได้ระเหยสูญญากาศแบบหมุนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนตัวทำละลายระเหยจนหมดเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

2.7.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Adapted from Singleton et al., 1999)

ใช้สารสกัดตัวอย่างความเข้มข้น 100 mg/mL ผสมร่วมกับ Folin-Ciocalteu reagent เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 3 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (ร้อยละ 20) ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เก็บไว้ในที่มืดนาน 1 ชั่วโมง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตรคำนวณปริมาณสารฟีนอลิกเทียบจากกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก (gallic acid) โดยแสดงปริมาณในหน่วย mg ของ gallic acid ต่อ g ของสารสกัด (mg GAE/100 g Extract)

2.7.3 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) (Hatano et al., 1988)

นำสารสกัดตัวอย่างปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำละลาย DPPH (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl) ความเข้มข้น 60 μ M ในสารละลาย เมทานอล ปริมาตร 3.9 มิลลิลิตร เพื่อให้สารละลายเข้ากันทิ้งไว้ในที่มืดนาน 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างและชุดควบคุมที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV/Vis spectrophotometer (ยี่ห้อ PG Instrument รุ่น T60) โดยใช้เอทานอล (ร้อยละ 80) แทนสารสกัดในชุดควบคุม คำนวณค่าร้อยละของความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระตามสมการ

ร้อยละความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) =

$$\frac{(OD_{\text{ชุดควบคุม}} - OD_{\text{ตัวอย่าง}}) \times 100}{OD_{\text{ชุดควบคุม}}}$$

2.8 การวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานิน (Lee et al., 2005)

ปีเปตสารละลายตัวอย่าง (สารสกัด) จำนวน 2 หลอด เจือจางด้วยสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์บัฟเฟอร์ pH 1.0 และสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์บัฟเฟอร์ pH 4.5 ลงในหลอดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เขย่าให้เข้ากัน ตั้งสารละลายตัวอย่างทั้ง 2 หลอด ทิ้งไว้ 15 นาที จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 และ 700 nm ด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer คำนวณหาปริมาณสารแอนโทไซยานินทั้งหมดดังสมการ

ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (mg Extract/L) =

$$\frac{A \times MW \times 1000 \times DF}{\epsilon \times L}$$

โดย

A คือ $(A_{520} - A_{700})_{\text{pH}=1.0} - (A_{520} - A_{700})_{\text{pH}=4.5}$

MW คือน้ำหนักโมเลกุลของ Cyanidin-3-glucoside (Cyd-3-glu) = 449.2 g/mol

DF คือ Dilution factor = 5

ϵ คือ Molar extinction coefficient for Cyd-3-glu = 26900 L $\times$ mol⁻¹ $\times$ cm⁻¹

L คือ Pathlength = ความกว้างของ Cuvette (1 cm)

2.9 ค่าสี

วัดค่าสีด้วยเครื่องวัดค่าสี (ยี่ห้อ Minolta รุ่น CR-400) โดยนำซอสพริกผลหมอนๆ จำนวน 20 g ใส่ในถ้วย วัดค่าสี L* (ค่าความสว่าง) ค่าสี a* (ค่าความเป็นสีแดง) ค่าสี b* (ค่าความเป็นสีเหลือง)

2.10 ความหนืด

วิเคราะห์หาค่าความหนืดโดยวัดระยะทางการไหลของตัวอย่างด้วย Bostwick consistometer (ยี่ห้อ Bostwick รุ่น CRI-BC-30) ใช้ตัวอย่าง 70 กรัม ใส่ลงในช่องใส่ตัวอย่าง แล้ววัดระยะทางที่ตัวอย่างเคลื่อนที่เป็นเวลา 30 วินาทีที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

2.11 การแยกชั้น

บรรจุซอสตัวอย่างใส่ลงในกระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) แล้วตรวจสอบการแยกชั้นด้วยสายตาทุก ๆ 30 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (Adapted from Jeenphakdee, 2003)

2.12.การทดสอบทางประสาทสัมผัสของซอสพริกผลหมอนผสมกล้วยเล็บมือนาง

ในขั้นตอนการศึกษาปริมาณ MTS และ XG ทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยการทดสอบความชอบจากผู้บริโภคทั่วไปที่มีต่อผลิตภัณฑ์ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส ความหนืด ความสามารถในการเท และความชอบโดยรวมจากผู้ทดสอบจำนวน 50 คน ด้วยสเกลความชอบแบบ 9 ระดับคะแนน (เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 2.2)

2.13.การศึกษาอายุการเก็บรักษา

คัดเลือกซอสพริกผลหมอนๆ ที่ได้จากข้อ 2.12 จำนวน 1 สูตร นำมาศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีกายภาพ และจุลินทรีย์ของซอสผลหมอนผสมกล้วยเล็บมือนางที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) โดยสุ่มตัวอย่างทุกๆ 2 สัปดาห์ เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ นำมาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ สี ความหนืด และการแยกชั้นคุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ค่า pH ปริมาณกรดทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ฟีนอลิกทั้งหมด และแอนโทไซยานินและวิเคราะห์ทางด้านจุลินทรีย์ ได้แก่ จุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และราทั้งหมด และ *Escherichia coli* (BAM, 2001)

2.14 การทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค

ในการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 50-100 คน (Howard et al., 2012) จึงทำการทดสอบโดยใช้ผู้บริโภคทั่วไปจำนวน 80 คน ต่อผลิตภัณฑ์ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส ความหนืด ความสามารถในการเท และความชอบโดยรวม ด้วยสเกลความชอบแบบ 9 ระดับคะแนน (เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 2.2)

2.15. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยจากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Version 21)

3. ผลลัพธ์

3.1 การสร้างแนวคิดผลิตภัณฑ์ของซอสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนาง

เนื่องจากผลหม่อนมีเนื้อผลที่ไม่สามารถปั่นเป็นเนื้อละเอียดเหมือนผลไม้เชื้เทศหรือพริก จึงต้มเอาเฉพาะน้ำผลหม่อนที่มีสีแดงมาใช้ในการผลิต และจากการสนทนากลุ่มผู้ทดสอบชิม โดยให้แสดงความคิดเห็นด้านคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น ความหนืด และรสชาติ ของผลิตภัณฑ์ซอสพริกผลหม่อนที่ผลิตขึ้นเอง ได้แก่ สูตร A1 และ A2 เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ซอสพริกที่จำหน่ายทางการค้า อีก 4 ยี่ห้อ ได้แก่ สูตร A3, A4, A5 และ A6 ได้ให้ความคิดเห็นว่า สูตร A1 มีกลิ่นพริกแรงมากเกินไป และมีรสเผ็ดมาก ขณะที่สูตร A2 มีรสชาติเปรี้ยวเล็กน้อย เผ็ดกำลังพอดี และควรมีรสเปรี้ยวมากกว่านี้จึงเลือกสูตร A2 ไปปรับส่วนผสม และทำการทดสอบความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส ความหนืด ความสามารถในการเทและความชอบโดยรวม พบว่าได้คะแนนเป็น 7.56, 7.51, 6.82, 6.91, 7.02, 7.32 และ 7.36 คะแนน ตามลำดับ

3.2. การพัฒนาคุณภาพโดยศึกษาการใช้ MTS และ XG ในซอสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนาง

จากการศึกษาผลของการใช้สารให้ความคงตัว MTS และ XG ในซอสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนาง ต่อคุณภาพทางด้านเคมี (ตารางที่ 2) พบว่า เมื่อวิเคราะห์ค่า pH ซอสพริกผลหม่อนฯ ทั้ง 4 สูตรมีค่า pH 3.86-3.87 และมีปริมาณกรดร้อยละ 1.18-1.19 และจากการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยมีปริมาณของแข็ง ร้อยละ 24.66 - 24.74 นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ค่า DPPH ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณสารแอนโทไซยานิน พบว่าซอสพริกผลหม่อนฯ ทั้ง 4 สูตร มีค่า DPPH อยู่ในช่วงร้อยละ 64.18-64.74 มีปริมาณสารประกอบ ฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากันคือ 59.00 mg GAE/g Extract และมีปริมาณสารแอนโทไซยานินอยู่ในช่วงระหว่าง 3.41-3.44 mg Extract/L แสดงให้เห็นว่าการใช้ MTS และ XG ในซอสพริกผลหม่อนฯ ไม่มีผลต่อค่า DPPH ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณสารแอนโทไซยานินเนื่องจากมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าซอสพริกผลหม่อนฯ ทั้ง 4 สูตร ที่ใช้สารให้ความข้นหนืดที่แตกต่างกันส่งผลให้ค่าสีและความหนืดของตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเมื่อมีการใช้สารให้ความข้นหนืดเพิ่มมากขึ้น ค่า L^* จะมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และค่า a^* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ถึงแม้จะไม่พบความแตกต่างของปริมาณแอนโทไซยานิน ทั้งนี้อาจมีเนื่องจากมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อการเกิดสีของตัวอย่าง ไม่ว่าจะเป็นปริมาณแคโรทีนอยด์ หรืออาจเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากความร้อนไปเร่งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลโดยไม่อาศัยเอนไซม์ทำให้พริกมีสีแดงลดลง (Mercadante, 2008) ในขณะที่ค่าความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ MTS และ XG เพิ่มขึ้นโดยสูตรที่ 4 ที่ใช้ MTS และ XG ปริมาณ 0.05:0.05 มีค่าความหนืดมากที่สุด โดยวัดได้จากระยะทางการไหลน้อยที่สุด (3.23 เซนติเมตร/30 วินาที) ขณะที่ไม่พบการแยกชั้นของตัวอย่างซอสพริกผลหม่อนฯ ทั้ง 4 สูตร

ปริมาณการใช้ MTS และ XG ที่ต่างกัน (ตารางที่ 4) มีผลต่อการให้คะแนนความชอบจากผู้ทดสอบชิม โดยพบว่าด้านกลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส ความหนืดและความสามารถในการเททั้ง 4 สูตร มีคะแนนความชอบไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ในขณะที่ลักษณะปรากฏ

และความชอบโดยรวมแตกต่างกัน ($p < 0.05$) โดยสูตรที่ 2 ได้รับคะแนนความชอบน้อยที่สุด ขณะที่สูตรที่ 3 และ 4 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) และเป็น 2 สูตรที่ได้รับคะแนนความชอบสูงที่สุด

ตารางที่ 2 คุณภาพทางเคมีของซอสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนางที่มีการใช้ MTS และ XG

MTS:XG	ปริมาณของแข็งทั้งหมด ^{ms} (ร้อยละ)	ค่า pH ^{ms}	ปริมาณกรดทั้งหมด ^{ms} (ร้อยละ)	ความสามารถในการต้านอนุมูล-อิสระ (DPPH) ^{ms, 1} (ร้อยละ)	ฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/g Extract) ^{ms}	แอนโทไซยานิน (mg Extract/L) ^a
0.03:0.03	24.69±0.19	3.87±0.02	1.18±0.02	64.74±0.21	59.00±0.00	3.41±0.49
0.05:0.03	24.66±0.14	3.86±0.02	1.19±0.01	64.60±0.68	59.00±0.03	3.44±0.44
0.03:0.05	24.74±0.10	3.86±0.01	1.19±0.02	64.39±0.61	59.00±0.02	3.41±0.62
0.05:0.05	24.72±0.17	3.86±0.01	1.19±0.05	64.18±0.53	59.00±0.00	3.44±0.19

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

^{ms} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

¹ ที่ความเข้มข้นตัวอย่าง 200 mg/mL

ตารางที่ 3 คุณภาพทางกายภาพของซอสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนางที่มีการใช้ MTS และ XG ต่างกัน

MTS:XG	ค่าสี			ระยะทางการไหล (เซนติเมตร/30 วินาที)	การแยกชั้น*
	L ^a	a ^a	b ^a		
0.03:0.03	27.53±0.10 ^a	27.10±0.16 ^d	18.59±0.14 ^b	6.02±0.17 ^a	ไม่พบการแยกชั้น
0.05:0.03	27.16±0.15 ^b	27.39±0.13 ^b	18.86±0.10 ^a	5.51±0.23 ^b	ไม่พบการแยกชั้น
0.03:0.05	26.23±0.12 ^c	27.65±0.14 ^a	17.96±0.13 ^c	5.14±0.17 ^c	ไม่พบการแยกชั้น
0.05:0.05	26.44 ±0.19 ^d	27.20±0.15 ^c	17.56±0.15 ^d	3.23±0.29 ^d	ไม่พบการแยกชั้น

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

* เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง

ตารางที่ 4 คะแนนความชอบซอสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนางที่มีการใช้ MTS และ XG ต่างกันจากผู้บริโภคจำนวน 50 คน

MTS:XG	คะแนนความชอบ (9 ระดับคะแนน)							
	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่น ^{ms}	รสชาติ ^{ms}	เนื้อสัมผัส ^{ms}	ความหนืด ^{ms}	ความสามารถในการเท ^{ms}	ความชอบโดยรวม
0.03:0.03	7.15±0.80 ^{ab}	6.92±0.83 ^b	6.61±0.91	6.87±1.05	6.83±1.27	6.74±1.15	7.00±1.05	7.04±0.92 ^{ab}
0.05:0.03	6.91±0.82 ^b	7.05±0.90 ^b	6.63±0.90	6.56±1.05	6.96±1.32	6.87±1.15	6.53±1.07	6.81±0.96 ^b
0.03:0.05	7.56±0.86 ^a	7.51±0.87 ^a	6.82±0.86	6.91±1.16	7.02±1.34	7.02±1.17	7.32±1.09	7.36±1.01 ^a
0.05:0.05	7.05±0.93 ^a	7.26±0.94 ^{ab}	6.48±1.06	6.75±1.22	6.66±1.18	6.81±1.16	6.86±1.13	7.02±0.64 ^{ab}

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

^{ms} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

3.3 การทดสอบผู้บริโภคร่วมไป

นำซอสพริกผลหม่อนฯ สูตรที่ 3 ทดสอบผู้บริโภคร่วมไปจำนวน 80 คน โดยทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความชอบ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส ความหนืด ความสามารถในการเท และความชอบโดยรวม ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5 ผู้บริโภคให้คะแนนความชอบอยู่ในช่วง 7.12–7.73 อยู่ในระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก

3.4 อายุการเก็บรักษาซอสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนาง

3.4.1 คุณภาพทางกายภาพ

จากการศึกษาเบื้องต้นของซอสพริกผลหม่อนฯ ที่ไม่ใช้ MTS และ XG เกิดการแยกชั้นของน้ำบนผิวหน้าหลังการเก็บรักษา

ดังนั้นการใช้ MTS และ XG จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการปรับเนื้อสัมผัสซึ่งลดการแยกตัวของซอสได้ โดยพบว่า ไม่พบการแยกชั้นและไม่เกิดการเคลื่อนตัวของน้ำในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 12 สัปดาห์ ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 คะแนนความชอบของซอสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนางจากผู้บริโภคจำนวน 80 คน

คุณลักษณะ	คะแนนความชอบ (9 ระดับคะแนน)
ลักษณะปรากฏ	7.73±0.96
สี	7.34±1.01
กลิ่น	7.11±1.02
รสชาติ	7.64±1.14
เนื้อสัมผัส	7.25±1.16
ความหนืด	7.12±1.13
ความสามารถในการเท	7.45±1.21
ความชอบโดยรวม	7.56±1.10

ตารางที่ 6 คุณภาพทางกายภาพของซอสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนาง

ระยะเวลา การเก็บรักษา (สัปดาห์)	ค่าสี			ระยะเวลาไหล (เซนติเมตร/30 วินาที) ^{ns}	การแยกชั้น
	L*	a*	b*		
0	26.48±0.16 ^a	27.92±0.47 ^a	17.35±0.31 ^c	5.10 ±0.17	ไม่พบการแยกชั้น
2	26.46±0.32 ^a	27.83±0.40 ^a	17.40±0.38 ^c	5.20±0.10	ไม่พบการแยกชั้น
4	26.18±0.46 ^a	27.41±0.25 ^{ab}	17.18±0.16 ^c	5.23±0.35	ไม่พบการแยกชั้น
6	25.73±0.24 ^b	26.89±0.59 ^{bc}	17.63±0.44 ^{bc}	5.27±0.31	ไม่พบการแยกชั้น
8	25.26±0.12 ^c	26.84±0.12 ^{bc}	18.32±0.26 ^{ab}	5.27±0.31	ไม่พบการแยกชั้น
10	25.16±0.09 ^c	26.68±0.16 ^c	18.66±0.55 ^a	5.27±0.12	ไม่พบการแยกชั้น
12	24.68±0.16 ^d	26.61±0.16 ^c	18.91±0.64 ^a	5.30±0.10	ไม่พบการแยกชั้น

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (p≥0.05)

3.4.2 คุณภาพทางเคมี

เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเป็นเวลา 12 สัปดาห์พบว่าซอสพริกผลหม่อนฯ มีปริมาณของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วง 24.45–24.68 ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ มีค่า pH ระหว่าง 3.86–3.90 และมีปริมาณกรดทั้งหมดร้อยละ 1.16–1.19 (ตารางที่ 7) ทั้งค่า pH และปริมาณกรดมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่พบว่าเมื่อทำการเก็บรักษาผ่านไปจนถึงสัปดาห์ที่ 6 ค่า DPPH เพิ่มขึ้น

จากร้อยละ 64.62 เป็น 75.62 สอดคล้องกับค่าฟีนอลิกทั้งหมดที่มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 59.07 เป็น 70.30 mg GAE/g Extract จากนั้นพบว่าค่า DPPH เริ่มมีค่าลดลงจนถึงสัปดาห์ที่ 12 (ร้อยละ 43.97) เช่นเดียวกับค่า ฟีนอลิกที่มีค่าลดลงเช่นกัน (45.43mg GAE/g Extract) ส่วนค่าแอนโทไซยานินมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาจาก 3.42 เป็น 1.17 mg Extract/L

ตารางที่ 7 คุณภาพด้านเคมีของซอสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนาง

ระยะเวลา การเก็บรักษา (สัปดาห์)	ปริมาณ ของแข็งทั้งหมด ^{ns} (%)	ค่า pH	ปริมาณกรด ทั้งหมด	ความสามารถในการ ต้านอนุมูลอิสระ DPPH (%) ¹	ฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/g Extract)	แอนโท- ไซยานิน (mg Extract/L)
0	24.68±0.19	3.86±0.01 ^b	1.19±0.01 ^a	64.62±0.32 ^d	59.07±0.25 ^d	3.42±0.08 ^a
2	24.45±0.20	3.89±0.01 ^a	1.17±0.01 ^b	67.09±0.65 ^c	63.13±0.21 ^c	2.98±0.17 ^b
4	24.54±0.27	3.89±0.02 ^{ab}	1.17±0.01 ^b	70.61±0.63 ^b	67.33±0.06 ^b	2.56±0.96 ^c
6	24.57±0.31	3.89±0.02 ^a	1.17±0.01 ^b	75.62±0.32 ^a	70.30±0.10 ^a	2.25±0.30 ^{cd}
8	24.51±0.45	3.90±0.01 ^a	1.17±0.01 ^{bc}	60.68±0.37 ^c	58.37±0.06 ^c	2.00±0.29 ^d
10	24.54±0.14	3.90±0.02 ^a	1.16±0.01 ^{bc}	53.49±0.56 ^f	50.53±0.12 ^f	1.59±0.30 ^e
12	24.58±0.16	3.90±0.02 ^a	1.16±0.02 ^c	43.97±0.42 ^e	45.43±0.67 ^e	1.17±0.30 ^f

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, ¹ที่ความเข้มข้นตัวอย่าง 200 mg/mL

ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$), ^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

3.4.3 คุณภาพทางด้านจุลินทรีย์

ผลจากการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ซอสพริกผลหม่อนฯ ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ พบว่าจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดรวมทั้งยีสต์และราต่ำกว่า 10 CFU/g (ตัวอย่างซอส) และมีจำนวน *Escherichia coli* ต่ำกว่า 3 MPN/g

4. การอภิปราย

4.1 การสร้างแนวคิดผลิตภัณฑ์ของซอสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนาง

จากการสร้างแนวคิดผลิตภัณฑ์ได้ข้อมูลว่าผู้ทดสอบไม่ชอบสูตรที่มีรสชาติที่เผ็ดจนเกินไปและต้องการให้มีรสเปรี้ยวเพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการพัฒนาปรับปรุงรสชาติจนกระทั่งได้สูตรที่มีลักษณะเผ็ดปานกลางและมีรสชาติเปรี้ยว โดยจากการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีซอสพริกผลหม่อนฯ ที่ได้มีค่า pH ต่ำกว่า 4.5 และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 20 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ โดยมีการปรับส่วนผสมจนได้เป็นซอสพริกผลหม่อนฯ ที่มีส่วนประกอบที่เหมาะสมในการผลิตซอสพริกผลหม่อนฯ คือ พริกชี้ฟ้าแดงสด พริกกระเหรี่ยงสดพริกชี้ฟ้าแดงแห้ง น้ำตาลทราย น้ำส้มสายชู กระเทียมและน้ำผลหม่อน เกลือและกล้วยเล็บมือนางร้อยละ 12.15, 2.70, 12.15, 10, 16, 5, 4, 9.35 และ 28.6 ตามลำดับ ซึ่งได้รับคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส ความหนืด ความสามารถในการเทและความชอบโดยรวม เป็น 7.56, 7.51, 6.82, 6.91, 7.02, 7.32, และ 7.36 คะแนนตามลำดับ จะเห็นว่าทุกด้านมีคะแนนความชอบเฉลี่ยที่

ระดับ 7 คะแนน ซึ่งเป็นระดับที่ยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเกิดการแยกชั้นหลังจากตั้งผลิตภัณฑ์ทิ้งไว้ จึงต้องมีการศึกษาสารให้ความคงตัวโดยใช้ MTS และ XG เป็นสารป้องกันไม่ให้เกิดการแยกชั้นของซอสในขั้นตอนต่อไป

4.2 การพัฒนาคุณภาพโดยศึกษาการใช้ MTS และ XG ในซอสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนาง

จากการใช้ MTS และ XG ในซอสพริกผลหม่อนฯ ทั้ง 4 สูตรมีค่า pH และมีปริมาณกรด อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (Ministry of Industry, 2018) โดยกำหนดให้ซอสพริกต้องมีค่า pH ไม่เกิน 4.5 และมีปริมาณกรดทั้งหมดไม่เกินร้อยละ 10 นอกจากนี้ปริมาณของแข็งทั้งหมดทั้ง 4 สูตรมีค่าไม่แตกต่างกันและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง ซอสบางชนิด (Ministry of Public Health, 2000) โดยกำหนดให้ค่าของแข็งทั้งหมดต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 ทั้งนี้ปริมาณกรดและค่า pH มีค่าใกล้เคียงกับซอสในท้องตลาดทั่วไปที่มีรายงานไว้ว่าอยู่ในช่วงร้อยละ 1.12–1.20 และ 3.82–4.05 ตามลำดับ (Promkhanet al., 2007)

การใช้ MTS และ XG ในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ความหนืดสูงขึ้น โดย MTS เป็นวัตถุเจือปนอาหารทำหน้าที่เพิ่มความข้นหนืดและเพิ่มความคงตัวให้แก่ผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังมีความคงทนต่อความร้อน กรด และแรงเฉือน ส่วน XG เป็นสารที่ให้ความข้นหนืดสูง ทนต่อสภาวะ pH ในช่วงกว้าง และทนต่ออุณหภูมิสูง เมื่อผสมกันช่วยปรับปรุงความหนืดของซอสให้เพิ่มขึ้น

สอดคล้องกับค่าความหนืดที่วัดได้ด้วยการวัดระยะทางการไหลที่มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของ MTS และ XG เพิ่มขึ้นการรวมตัวกันของ MTS และ XG มีผลเสริมฤทธิ์ให้ซอสพริกที่มีลักษณะข้นหนืดโดยความหนืดที่เพิ่มขึ้นเกี่ยวข้องกับความสามารถในการดูดน้ำและการพองตัวของเม็ดแป้ง ทั้งนี้เม็ดแป้งที่มีความสามารถในการพองตัวได้มากส่งผลให้เกิดความหนืดได้สูง การใช้สตาร์ชร่วมกับกัมจะช่วยทำให้เกิดอันตรกิริยาการคงรูปและการกระจายตัว ปรับเนื้อสัมผัสเกิดการอุ้มน้ำไว้ได้ดี (Gamompilas et al., 2011; Souza Almeida & Kawazoe Sato, 2019) และมีผลต่อความสามารถในการแช่ซอส

จากผลการทดสอบความชอบจะเห็นว่าสูตรที่ 3 และ 4 ได้รับคะแนนความชอบในทุกด้านไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาถึงคะแนนความชอบที่เป็นที่ยอมรับ (7 คะแนนขึ้นไป) สูตรที่ 3 มี 6 คุณลักษณะที่ได้รับคะแนนเฉลี่ยมากกว่า 7 คะแนน ขณะที่สูตรที่ 4 มีเพียง 3 คุณลักษณะที่ได้รับคะแนนมากกว่า 7 คะแนน จึงนำสูตรที่ 3 ไปศึกษาทดสอบความชอบกับผู้บริโภคทั่วไปและศึกษาอายุการเก็บรักษาต่อไป

4.3 การทดสอบผู้บริโภคทั่วไป

ซอสที่ได้รับการพัฒนาขึ้นได้รับการยอมรับจากผู้บริโภค โดยมีคะแนนการยอมรับในทุกคุณลักษณะมากกว่า 7 คะแนน โดยการใช้อัตราส่วนของ MTS และ XG ที่เหมาะสม ทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของซอสมีความคงตัว มีความหนืดและมีคุณสมบัติทางรีโอโลยีที่ดี และมีผลต่อคะแนนความชอบ และช่วยให้อายุการเก็บรักษานานขึ้น (Sikora et al., 2003; Sikora et al., 2007) Cai et al. (2020) พบว่าการใช้สตาร์ชมันฝรั่งกับ XG เพื่อเพิ่มความข้นหนืดให้กับซอสมะเขือเทศ ทำให้ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสที่ดี โดย XG สามารถลดการเคลื่อนที่ของน้ำและลดการเกิดรีโอโทรเดชันของสตาร์ชได้ดี และทำให้เนื้อสัมผัสมีความคงตัว

4.4 อายุการเก็บรักษาซอสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนาง

4.4.1. คุณภาพทางกายภาพ

จากการตรวจสอบคุณภาพทางด้านกายภาพของซอสพริกผลหม่อนฯ ในระหว่างการเก็บรักษา พบว่าการเลือกใช้ MTS ร่วมกับ XG สามารถช่วยเสริม

คุณสมบัติในการลดการแยกตัวของซอสได้ เนื่องจากทำให้น้ำเชื่อมสัมผัสของซอสพริกผลหม่อนฯ มีความคงตัว น้ำไม่เกิดการเคลื่อนตัวและแยกชั้นในระหว่างการเก็บรักษาได้ดีกว่าใช้สารให้ความข้นหนืดเพียงชนิดเดียว โดยมีรายงานว่า การใช้สตาร์ชหรือสตาร์ชตัดแปรเพียงอย่างเดียวในซอสมะเขือเทศ ยังมีน้ำบางส่วนเคลื่อนตัวออกมาจากภายหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 2 สัปดาห์ (Cai et al., 2020) อย่างไรก็ตามพบว่าความหนืดของซอสพริกผลหม่อนฯ มีแนวโน้มลดลง (ระยะทางการไหลของซอสเพิ่มขึ้น) แต่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 1-2 สัปดาห์ คล้ายคลึงกับรายงานการศึกษาซอสซันจากสับปะรดและซอสพริก (Promkhan et al., 2007; Srikrum et al., 2019) การใช้ MTS โดยผสมกับ XG สามารถใช้เป็นสารให้ความคงตัวและให้ความข้นหนืดได้ดีตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา (Pongsawatmani et al., 2011) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น พบว่า ค่า L^* และ a^* มีแนวโน้มลดลง (26.48–24.68 และ 27.92–26.61 ตามลำดับ) และค่า b^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (17.35–18.91) อาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์กับกรด อะมิโนที่มีอยู่ตามธรรมชาติในซอส ทำให้เกิดสารที่มีสีคล้ำ โดยมีกรดแสงสว่าง และแร่ธาตุบางชนิด เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว (Michael Eskin, 1990) นอกจากนี้ปริมาณแคโรทีนอยด์ที่เป็นสารสีแดงในพริกสัมพันธ์กับค่าความเข้มสี โดยแคโรทีนอยด์เมื่อสัมผัสกับความร้อนหรือแสงจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากความร้อนไปเร่งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลโดยไม่อาศัยเอนไซม์ทำให้พริกมีสีแดงลดลง (Mercadante, 2008)

ดังนั้นในระหว่างกระบวนการแปรรูปซอสพริกผลหม่อนฯ อาจเกิดปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันของแคโรทีนอยด์ได้ ทำให้สีเนื้อของผลิตภัณฑ์จากลง อีกทั้งหากเก็บไว้ในขวดใสที่อุณหภูมิห้องทำให้แสงและความร้อนในระหว่างกระบวนการเก็บรักษาส่งผลต่อสีของซอสพริกผลหม่อนฯ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีคล้ำขึ้นได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Deesanam et al. (2012) ที่ได้ทำการศึกษการเก็บรักษาน้ำพริกอ่อน พบว่า เมื่อเก็บรักษาน้ำพริกอ่อนนานขึ้นจะส่งผลให้ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดงและสีเหลืองลดลง ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีเข้มขึ้นเมื่อเก็บรักษานานขึ้นได้

4.4.2 คุณภาพทางเคมี

จากการตรวจสอบคุณภาพทางด้านเคมีของซอสพริกผลหม่อนฯ ในระหว่างการเก็บรักษา พบว่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH และปริมาณฟีนอลิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของค่า DPPH และฟีนอลิกในระหว่างการเก็บรักษาอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารได้สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพชนิดอื่นที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระและเป็นสารจำพวกสารประกอบฟีนอลิก (Hur et al., 2014; Lee et al., 2008; Miglio et al., 2008) จึงทำให้ค่า DPPH และปริมาณฟีนอลิกเพิ่มมากขึ้นภายหลังการเก็บรักษาในช่วง 0-6 สัปดาห์ หลังจากนั้นค่าฟีนอลิกเริ่มมีการเสื่อมสลายสอดคล้องกับค่า DPPH ที่ลดลง การเพิ่มขึ้นของค่า DPPH และฟีนอลิก ไม่ได้สัมพันธ์กับค่าแอนโทไซยานินที่มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องในระหว่างการเก็บรักษา อาจเป็นไปได้ว่าสารประกอบบางชนิดที่เกิดขึ้นใหม่เกิดจากการทำปฏิกิริยากันเองระหว่างสารพอลิฟีนอล หรืออาจทำปฏิกิริยากับน้ำตาลรีดิวซ์ สารเอมีน ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กรดแอสคอร์บิก กรดอินทรีย์อื่น หรือสารอื่นที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ทำให้เกิดสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป (Castro-Lopez et al., 2016)

4.4.3 คุณภาพทางด้านจุลินทรีย์

จากการตรวจสอบคุณภาพทางด้านจุลินทรีย์ของซอสพริกผลหม่อนฯ ในระหว่างการเก็บรักษา พบว่า ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์อยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนซอสพริก (Ministry of Industry, 2018) คือ มีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดต่ำกว่า 1×10^4 CFU/g และ ยีสต์และราต่ำกว่า 10 CFU/g และ *E. coli* ต่ำกว่า 3 MPN/g แสดงให้เห็นว่าซอสที่ผ่านการบวนการฆ่าเชื้อด้วยอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมจะสามารถทำลายจุลินทรีย์ และยืดระยะเวลาการเก็บรักษาได้ (Chaikham, 2018; Maina, 2008) Baharfar et al., 2015; Lohachoompol et al., 2004) นอกจากนี้สารประกอบฟีนอลิกและแอนโทไซยานินในผลหม่อนที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระแล้ว ยังสามารถยับยั้งการเกิดเซลล์มะเร็ง และมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้อีกด้วย (Baharfar et al., 2015; Lohachoompol et al., (2004) ส่งผลให้ ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในซอสพริกผลหม่อนฯ ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานในระหว่างกระบวนการเก็บรักษาเป็นเวลา 12 สัปดาห์

5. บทสรุป

ซอสพริกผลหม่อนผสมกล้วยเล็บมือนางที่ได้จากการปรับปรุงรสชาติตามแนวคิดผลิตภัณฑ์ของผู้สนทนากลุ่ม พบว่าการใช้ MTS ร้อยละ 0.03 และ XG ร้อยละ 0.05 มีความเหมาะสมนำมาใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดและให้ความคงตัวในผลิตภัณฑ์ โดยมีค่า pH ปริมาณกรด และค่าของแข็งทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด เมื่อนำมาทดสอบผู้บริโภคทั่วไป พบว่าได้รับคะแนนความชอบอยู่ในระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก สามารถเก็บรักษาเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 12 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิห้อง และการผลิตซอสพริกผลหม่อนที่มีส่วนผสมของกล้วยเล็บมือนาง ยังเป็นการส่งเสริมการใช้วัตถุดิบในท้องถิ่น ช่วยเพิ่มมูลค่าและการใช้ประโยชน์จากกล้วยเล็บมือนางได้มากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏ-สุราษฎร์ธานีที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณวิสาหกิจชุมชนหม่อนไหมบ้านปากกล้วย และวิสาหกิจชุมชนมัลเบอร์รี่เขาช่องคีรีวงค์ จังหวัดชุมพร ที่ให้ความร่วมมือ และมีส่วนร่วมในงานวิจัยด้วยดีเสมอมา

เอกสารอ้างอิง

- Almeida, F. S., & Sato, A. C. K. (2019). Structure of gellan gum-hydrolyzed collagen particles: Effect of starch addition and coating layer. *Food research international*, 121, 394-403.
- AOAC. (2000). *Official Methods of Analysis of AOAC International*. Virginia: Association of Official Analysis Chemists.
- Auppatak, C., Suttha, V., & Bunyasawat, J. (2015). *Development of readymade sauce product from water melon rind waste*. Research report. Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. (in Thai).
- Baharfar, R., Azimi, R., & Mohseni, M. (2015). Antioxidant and antibacterial activity of flavonoid-, polyphenol- and anthocyanin-rich extracts from *Thymus kotschyianus* boiss & hohen aerial parts. *Journal of Food Science and Technology*, 52(10), 6777-6783.
- BAM. (2001). *Bacteriological Analytical Manual*. U.S. Food and Drug Administration. <https://www.fda.gov/Food/FoodScienceResearch/LaboratoryMethods/ucm2006949.htm>.
- Butkhup, L. (2012). *A comparative study of flavonoid content and antioxidant activity in various mulberry cultivars*. Research report. The Thailand Research Fund (TRF). (in Thai).
- Cai, X., Du, X., Zhu, G., Cai, Z., & Cao, C. (2020). The use of potato starch/xanthan gum combinations as a thickening agent in the formulation of tomato ketchup. *CyTA - Journal of Food*, 18(1), 401-408.
- Castro-Lopez, C., Sanchez-Alejo, E. J., Saucedo-Pompa, S., Rojas, R., Aranda-Ruiz, J., & Martínez-Avila, G. C. (2016). Fluctuations in phenolic content, ascorbic acid and total carotenoids and antioxidant activity of fruit beverages during storage. *Heliyon*, 2(9), e00152. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2016.e00152>.

- Chaikhram, P. (2018). Effect of coconut and white sugar on qualities of healthy chili sauce mixed with ripe papaya pulp. *The Golden Teak: Science and Technology Journal*, 5(2), 1–5. (in Thai).
- Department Intellectual Property. (2015). Chumphon Ladyfinger banana. http://www.ipthailand.go.th/images/781/gi_56100097.pdf. (in Thai).
- Đilas, S., Čanadanović, B. J., & Četković, G. (2009). By-products of fruits processing as a source of phytochemicals. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly/CICEQ*, 15(4), 191–202.
- Gamonpilas, C., Pongjaruvat, W., Fuongfuchat, A., Methacanon, P., Seetapan, N., & Thamjedsada, N. (2011). Physicochemical and rheological characteristics of commercial chili sauces as thickened by modified starch or modified starch/xanthan mixture. *Journal of Food Engineering*, 105(2), 233–240.
- Hatano, T., Kagawa, H., Yasuhara, T., & Okuda, T. (1988). Two new flavonoids and other constituents in licorice root: Their relative astringency and radical scavenging effects. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 36, 2090–2097.
- Howard, R. M., Jacqueline, H. B., & Anna, V. A. R. (2012). *Sensory and Consumer Research in Food Product Design and Development*. Wiley–Blackwell.
- Hur, S. J., Lee, S. Y., Kim, Y. -C., Choi, I., & Kim, G. -B. (2014). Effect of fermentation on the antioxidant activity in plant-based foods. *Food Chemistry*, 160, 346–356.
- Jeenphakdee, K. (2003). *Study on chili sauce production from banana flour* [Master's Thesis]. School of Graduate Studies. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. (in Thai).
- Jiang, Y., & Nie, W. J. (2015). Chemical properties in fruits of mulberry species from the Xinjiang province of China. *Food Chemistry*, 174, 460–466.
- Kaewruang, W., Wongcharemwanaikit, S., Ingkaninan, K., & Wongthai, J. (2006). Antioxidant and folic acid in fruit of different mulberry (*Morus* spp.) Varieties. Abstract. <https://qsds.go.th/newosrd/wp-content/uploads/sites/115/2021/08/2549-19.pdf>. (in Thai).
- Lee, I. H., Hung, Y. -H., & Chou, C. C. (2008). Solid-state fermentation with fungi to enhance the antioxidative activity, total phenolic and anthocyanin contents of black bean. *International Journal of Food Microbiology*, 121(2), 150–156.
- Lee, J., Durst, R. W., Wrolstad, R. E., & Collaborators: Eisele T Giusti MM Hach J Hofsommer H Koswig S Krueger DA Kupina; S Martin SK Martinsen BK Miller TC Paquette F Ryabkova A Skrede G Trenn U Wightman JD. (2005). Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: collaborative study. *Journal of AOAC international*, 88(5), 1269–1278.
- Lohachoompol, V., Szrednicki, G., & Craske, J. (2004). The change of total anthocyanins in blueberries and their antioxidant effect after drying and freezing. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2004(5), 248.
- Maina, A. (2008). *Development of chili sauce mixed banana product*. [Master's Thesis]. Graduate School. Chiang Mai University. (in Thai).
- Michael Eskin, N. A. (1990). *Biochemistry of Food*. (2nd ed.). New York, USA: Academic Press.
- Miglio, C., Chiavaro, E., Visconti, A., Fogliano, V., & Pellegrini, N. (2008). Effects of different cooking methods on nutritional and physicochemical characteristics of selected vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(1), 139–147.
- Ministry of Industry. (2018). *Thai Community Product Standard*. Chili sauce 289/2561. (in Thai).
- Ministry of Public Health. (2000). *Notification of the Ministry of Public Health*. Re: Some particular kinds of sauces. No. 201.
- Nacz, M., & Shahidi, F. (2006). Phenolics in cereals, fruits and vegetables: Occurrence, extraction and analysis. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 41(5), 1523–1542.
- Natić, M. M., Dabić, D. Č., Papeti, A., Akšić, M. M. F., Ognjanov, V., Ljubojević, M., & Tešić, Ž. L. (2015). Analysis and characterisation of phytochemicals in mulberry (*Morus alba* L.) fruits grown in Vojvodina, North Serbia. *Food chemistry*, 171, 128–136.
- Nuaypirom, W. (2003). *Mulberry fruit and processing*. Chiang Mai Mulberry Research Institute. Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives. Bangkok, Thailand: Nantakarn Graphic Printing. (in Thai).
- Pongsawatmanit, R., Yakard, N., & Suwonsichon, T. (2011). Effect of xanthan gum on the quality of syrup thickened by modified starch during heating and storage. *Agriculture and Natural Resources*, 45(1), 128–135.
- Promkhan, S., Rimkeeree, H., Chantrapornchai, W., & Cheanuputh, S. (2007). Development of pineapple thick sauce. *Food*, 37(2), 173–185. (in Thai).
- Sangteerakij, D., Rodyu, S., & Junden, S. (2023). Nutrition composition and anthocyanin content of mulberry fruits (*Morus alba* L.) by different ripening stage grown in the south of Thailand, applicants in sorbet and sherbet ice-cream and analysis of physical, chemical and sensory evaluation. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 35(2), 130–138.
- Sikora, M., Juszczak, L., Sady, M., & Krawontka, J. (2003). Use of starch/xanthan gum combinations as thickeners of cocoa syrups. *Food/Nahrung*, 47(2), 106–113.
- Sikora, M., Kowalski, S., Tomasik, P., & Sady, M. (2007). Rheological and sensory properties of dessert sauces thickened by starch-xanthan gum combinations. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1144–1151.
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventos, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152–178.
- Siripanporn, J., Boonpunt, T., & Teangpook, C. (1999). Study on processing of banana sauce. *Food*, 29(3), 167–179. (in Thai).
- Sonsa-ard, N., Thongpliw, N., & Thongmaen, P. (2016). *Production of mixed wine from sunroot and mulberry*. pp. A297–A303. In *The 8th Rajamangala Surin Conference (8th RSC) "Research for Thailand 4.0"*, 22–23 December 2016, Rajamangala University of Technology Isan SURIN Campus, Surin. (in Thai).
- Srikram, A., Tapanapannitikul, O., Saelim, J., & Suwannawong, S. (2019). The production of chili sauce suitable for community enterprises. *Khon Kaen Agriculture Journal*, 47 (Suppl. 1), 1031–1036. (in Thai).
- Stone, H. & Sidel, J. L. (2004). *Sensory Evaluation Practices*. 408 p. Redwood City, Academic Press Inc.
- Thampitak, K., Pimisa, R., Pongcharoen, P., & Hwanhlem, N. (2020). Antioxidant activity, chemical, physical and microbiological properties of ripe black mulberry (*Morus nigra* L.) cultivated in Khaokho, Phetchabun. *Agricultural Science Journal*, 51(1) (Suppl. 1), 26–31. (in Thai).
- The Office of Industrial Economics. (2016). *New market...MENA (Middle East and North Africa)*. Ministry of Industry. http://fic.nfi.or.th/mena/images/pdf/Book_MENA.pdf (in Thai).
- The Queen Sirikit Department of Sericulture. (2019). *Alternative Sericulture Product: Thailand Agriculture Mobile Information System*. Office of Sericulture Research and Development, The Queen Sirikit Department of Sericulture. (in Thai).
- The Queen Sirikit Department of Sericulture. (2023). *The 5-Year Action Plan of The Queen Sirikit Sericulture Office Region 5: Chumphon Province (2023 – 2027)*. The Queen Sirikit Sericulture Office Region 5: Chumphon Province. (in Thai).

ผลของผงปรุงรสสมุนไพรต่อคุณภาพด้านเคมีกายภาพ กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระและทางประสาทสัมผัสของเห็ดนางฟ้าอบกรอบปรุงรส

Effect of Herp Seasoning on Physicochemical, Antioxidative and Sensory Properties of Seasoned Crispy Oyster Mushroom

วิจิตรา เหลียวตระกูล^{1*}, ภัคภูมิ ใจแข็ง¹ และวสันต์ เลิศวิมลกาญจน์¹

Wijitra Liaotrakoon^{1*}, Pakkaphoom Jaikang¹, and Wasan Lertwimonkarn¹

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ประเทศไทย

¹Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Technology and Agro Industry, Rajamangala University of Technology Suvamabhumi, Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของผงปรุงรสสมุนไพรต่อคุณภาพด้านเคมีกายภาพ กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระและทางประสาทสัมผัสของเห็ดนางฟ้าอบกรอบปรุงรส โดยศึกษาการอบแห้งเห็ดนางฟ้าด้วยตู้อบลมร้อน และศึกษาคุณภาพด้านเคมีกายภาพ การต้านอนุมูลอิสระ และทางประสาทสัมผัสของผงปรุงรสสมุนไพรและเห็ดนางฟ้าอบกรอบปรุงรสสมุนไพร จากการทดลองพบว่า การอบแห้งเห็ดนางฟ้าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบลมร้อน มีอัตราการแห้ง 0.47 กรัมต่อนาที ปริมาณผลผลิตร้อยละ 11.54 มีสารประกอบฟีนอลและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ DPPH เป็น 148.44 และ 17.75 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อ 100 กรัม เมื่อนำเห็ดนางฟ้าอบแห้งมาทอดกรอบและปรุงรสสมุนไพร 3 สูตร ได้แก่ รสพริกไทย รสพริกเผ และรสต้มยำพบว่า เห็ดนางฟ้าอบกรอบรสต้มยำมีสารประกอบฟีนอลและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (160.05 และ 17.35 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อ 100 กรัม ตามลำดับ) สูงที่สุด ($p < 0.05$) ดังนั้นกระบวนการผลิตที่เหมาะสมคือ อบเห็ดนางฟ้าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง นำมาทอดและคลุกผงปรุงรสต้มยำในอัตราส่วนเห็ดนางฟ้าอบกรอบต่อผงปรุงรสเป็น 5:1 โดยส่วนผสมผงปรุงรสต้มยำ ได้แก่ ใบโหระพา น้ำตาลทราย เกลือ พริกป่น ใบมะกรูด ตะไคร้ ข่า และกรดซิตริกร้อยละ 21.58, 21.58, 17.99, 10.79, 10.07, 7.19, 7.19 และ 3.61 ตามลำดับ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคมากที่สุด

คำสำคัญ: คำสำคัญ: เห็ดนางฟ้า, ผงปรุงรส, สมุนไพร, กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ

ABSTRACT

The objective of this research was to examine the effect of herb seasoning on physicochemical, antioxidative and sensory properties of seasoned crispy oyster mushroom by studying the drying of oyster mushrooms with a hot-air drier, and the physicochemical, antioxidative and sensory qualities of herb seasoning powders and herb flavored crispy oyster mushrooms. It was found that the mushroom drying at 70 °C by a hot-air drier provided a drying rate of 0.47 g/min, 11.54% yield, phenolic compounds and antioxidant activity DPPH of 148.44 and 17.75 mg gallic acid equivalent per 100 g, respectively. There were 3 formulas of herbal flavors, namely sesame and pepper flavor, chilli paste flavor and Tom Yum flavor. The crispy mushroom Tom Yum flavor contained the highest phenolic compound content and DPPH antioxidant activity (160.05 and 17.35 mg gallic acid equivalent per 100 g, respectively) ($p < 0.05$). The suitable process of crispy oyster mushrooms with herbal flavors was a production process by drying oyster mushrooms at 70 °C for 3 hours, then frying and mixing with Tom Yum seasoning powder at a ratio of mushroom to seasoning powder as 5:1. The ingredients for Tom Yum seasoning powder were Chaya Spinash leaves, sugar, salt, pepper, kaffir lime leaves, lemongrass, galangal and citric acid as 21.58%, 21.58%, 17.99%, 10.79%, 10.07%, 7.19%, 7.19% and 3.61%, respectively, with the most accepted by consumers.

KEYWORDS: oyster mushroom, seasoning powder, herbs, antioxidant activity

*Corresponding Author: Wijitra.l@rmutsb.ac.th

Received: 14/02/2022; Revised: 26/11/2023; Accepted: 18/01/2024

1. บทนำ

เห็ดเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย ปัจจุบันความนิยมในการบริโภคเห็ดมีเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเห็ดอุดมไปด้วยโปรตีน เยื่อใย วิตามินและเกลือแร่ แต่มีไขมันน้อย เห็ดนางฟ้า (*oyster mushroom*, *Pleurotus sajorcaju* (Fr.) Singers) เป็นเห็ดที่นิยมเพาะและจำหน่ายในประเทศไทย มีสีขาวจนถึงสีน้ำตาลอ่อน หมวกดอกเนื้อแน่น สีก้านดอกเป็นสีขาว ขนาดยาว ไม่มีวงแหวนล้อมรอบ เส้นใยค่อนข้างละเอียด เจริญเติบโตได้ดีในบริเวณที่อากาศชื้นและเย็น เห็ดนางฟ้ามีโปรตีนประมาณร้อยละ 19-35 ของน้ำหนักตัวอย่างแห้ง มีดัชนีกรดอะมิโนจำเป็น (essential amino acid index) ร้อยละ 72-98 ของเนื้อสัตว์ ได้แก่ ไลซีน วาลีน ไอโซลิวซีน ลิวซีน ทรีโอนีน ทริปโตเฟน เมไทโอนีน ฟีนิลอะลานีน และฮิสติดีน กรดอะมิโนจำเป็นที่พบมากคือ ลิวซีนและไลซีน นอกจากนี้ยังพบกรดอะมิโนที่ไม่จำเป็นซึ่งมีความสำคัญต่อกลิ่นและรสชาติได้แก่ กรดกลูตามิก ซึ่งทำให้เห็ดมีรสชาติและกลิ่นที่ชวนรับประทาน กรดกลูตามิกทำหน้าที่ช่วยกระตุ้นประสาทการรับรู้รสชาติของลิ้นให้ไวกว่าปกติ และทำให้มีรสชาติคล้ายกับเนื้อสัตว์ โดยปริมาณโปรตีนขึ้นอยู่กับขนาด ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว และชนิดของเห็ด (Chang & Miles, 2004; Bernas et al., 2006; Kanagasabapathy et al., 2011) เห็ดมีสารหอมระเหย (volatiles) เป็นสารประกอบให้กลิ่นที่ต่างกันตามชนิดของเห็ด สารหอมระเหยที่พบมากในเห็ดนางฟ้าคือ สารประกอบ 1-octen-3-ol หรือ mushroom alcohol ส่งกลิ่นคล้ายกลิ่นเห็ดดิบ รูปแบบของสารประกอบกลิ่นในเห็ดนั้นขึ้นกับสายพันธุ์ ชนิด เกรด อายุ ของเห็ด และสภาพแวดล้อมในการปลูก นอกจากนี้การแปรรูปหรือการให้ความร้อนในรูปแบบและสภาวะที่แตกต่างกันยังมีผลต่อสารหอมระเหยในเห็ดอีกด้วย (Picardi & Issenberg, 1973; Usami et al., 2014; Poltowicz et al., 2018; Yao et al., 2023)

เห็ดนางฟ้าถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลากหลายชนิด เช่น ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ซุป ซอส บะหมี่ กึ่งสำเร็จรูป ผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ และพาสต้า และผลิตภัณฑ์จากข้าว (Wan Rosli et al., 2012; Aishah &

Wan Rosli, 2013) รวมทั้งมีการนำมาทดแทนกะทิผงในเครื่องปรุงรสสมุนไพร โดยทำให้ช่วยลดปริมาณไขมัน เพิ่มปริมาณโปรตีนและเส้นใยอาหารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านสีและความหนืดของผลิตภัณฑ์ สามารถใช้เห็ดนางฟ้าทดแทนกะทิผงในเครื่องปรุงรสสมุนไพรได้ร้อยละ 40 (Saiful Bahri & Wan Rosli, 2016) นอกจากนี้เมื่อนำเห็ดนางฟ้ามาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เห็ดนางฟ้ากรอบสามารถทำได้โดยเห็ดนางฟ้าแบบแผ่นอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ได้รับคะแนนความชอบสูงสุด เทียบกับเห็ดแบบเส้นผอย เส้นกลาง และก้านผอย (Sawetwongsakoon, 2010) การอบแห้งเห็ดด้วยลมร้อนก่อนทอด จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการดูดซับน้ำมันลดลง แต่พบว่า การลวกเห็ดด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และนำมาเคลือบด้วยสารละลายเมทิลเซลลูโลสก่อนทอด จะไม่สามารถลดการดูดซับน้ำมันในเห็ดทอดได้ (Vongsawasdi et al., 2011) การผลิตเห็ดขนทอดปรุงรสบาร์บีคิวและรสโนริสหารายได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคเมื่อเทียบกับสูตรทั่วไปและสูตรเจ (Changthong & Chunthanom, 2017) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตเห็ดนางฟ้าอบกรอบปรุงรสสมุนไพร โดยศึกษาผลของผงปรุงรสต่อกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระและคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของเห็ดนางฟ้าอบกรอบปรุงรส

วิธีการทดลอง

1. การอบแห้งเห็ดนางฟ้า

นำเห็ดนางฟ้าสดมาตัดแต่งโคน นำดอกเห็ดมาฉีกเป็นชิ้นขนาดประมาณ 3 เซนติเมตร และอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด (tray dryer) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (Sawetwongsakoon, 2010) ทำการบันทึกน้ำหนักทุก ๆ 15 นาที จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ที่ 3 ชั่วโมงนั้นนำไปคำนวณหาอัตราการทำแห้งดังสมการที่ 1 และพลอตกราฟการทำแห้ง (drying curve) ระหว่างเวลาการทำแห้งและน้ำหนักคงอยู่ของเห็ดแห้ง และคำนวณปริมาณผลผลิต (%yield) ดังสมการที่ 2

$$\text{อัตราการทำแห้ง (กรัม/นาทีก)} = \frac{\text{น้ำหนักเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักหลังอบ (กรัม)}}{\text{เวลาการทำแห้ง (นาทีก)}} \quad (1)$$

$$\text{ปริมาณผลผลิต (ร้อยละ, \%yield)} = \frac{\text{น้ำหนักหลังอบ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)}} \quad (2)$$

2. การเตรียมผงปรุงรสสมุนไพร

ทำการศึกษาผงปรุงรสโดยใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติที่เป็นเครื่องเทศและสมุนไพรจำนวน 3 สูตร ดังนี้ สูตรรากพริกไทย สูตรพริกเผ และสูตรต้มยำ โดยมีกระบวนการในการทำผงปรุงรสสมุนไพรดังนี้ ใบโหระพานำมาล้างทำความสะอาด ต้มในน้ำเดือดนาน 5 นาที สะเด็ดน้ำและนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบลมร้อน นาน 4 ชั่วโมง ส่วนผักและสมุนไพรอื่นๆ นำมาล้างทำความสะอาด และหั่นเป็นชิ้นขนาดเล็กนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบลมร้อน นาน 4 ชั่วโมง จากนั้นนำมาปั่นให้ละเอียด ร่อนและนำมาผสมตามสัดส่วนในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมผงปรุงรสสมุนไพร

ส่วนผสม	ผงปรุงรสรากพริกไทย (ร้อยละ)	ผงปรุงรสพริกเผ (ร้อยละ)	ผงปรุงรสต้มยำ (ร้อยละ)
ใบโหระพา	28.57	7.41	21.58
งาขาว	14.29	-	-
พริกไทย	7.14	-	-
พริกป่น	-	7.41	10.79
หัวหอม	-	7.41	-
กระเทียม	-	7.41	-
ใบมะกรูด	-	-	10.07
ตะไคร้	-	-	7.19
ข่า	-	-	7.19
มะนาวผง	-	22.21	-
น้ำตาลทราย	28.57	29.63	21.58
เกลือป่น	21.43	18.52	17.99
กรดซิตริก	-	-	3.61

3. การผลิตหีตอกรอบปรุงรสสมุนไพร

นำเห็ดนางฟ้าอบแห้งมาทอดในน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ 138–140 องศาเซลเซียส นาน 5 วินาที สะเด็ดน้ำมันโดยวางใส่ตะแกรง นาน 2 นาที จากนั้นนำมาคลุก

ผงปรุงรส ได้แก่ สูตรรากพริกไทย สูตรพริกเผ และสูตรต้มยำในอัตราส่วน 5:1 โดยมีเห็ดนางฟ้าทอดกรอบที่ไม่คลุกผงปรุงรสเป็นชุดควบคุม (control)

4. การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ

นำตัวอย่างไปบดให้ละเอียด และนำมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ ดังนี้ วิเคราะห์ปริมาณความชื้นโดยเครื่องวิเคราะห์ความชื้น (MB90 OHAUS Moisture, USA) วิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (water activity, a_w) โดยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity รุ่น AQUA LAB, USA) และวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (Hunter Lab UltraScan VIS, Thailand) ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

5. การวิเคราะห์กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ

สกัดตัวอย่างโดยชั่งตัวอย่าง 20 กรัม เติมนะซิโตน ความเข้มข้นร้อยละ 80 ปริมาตร 80 มิลลิลิตร บดผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที กรองและนำส่วนใสเก็บในที่มืด ทำการสกัดตัวอย่างละ 3 ซ้ำ (Liaotrakoon et al., 2013) จากนั้นนำตัวอย่างที่สกัดได้มาวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลทั้งหมดโดยวิธี Folin-Ciocalteu's reagent (Lim et al., 2007) สารสกัดจากตัวอย่างปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร ผสมกับ Folin-Ciocalteu's phenol reagent ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นละลายโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้นร้อยละ 7.5 ปริมาตร 1.2 มิลลิลิตร เขย่าให้สารผสมกัน จากนั้นตั้งทิ้งไว้ในที่มืดนาน 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง วัดค่าการดูดกลืนแสงของสีที่เปลี่ยนแปลงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก รายงานเป็นมิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อ 100 กรัมของตัวอย่าง (mg GA/ 100 g) และการวิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH (ดัดแปลงวิธีจาก Wu et al., 2006; Liaotrakoon et al., 2013) โดยเปิดสารสกัดจากตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นละลาย 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ปริมาตร 4 มิลลิลิตร และผสมให้เข้ากันเก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที เขย่าทุก ๆ 10 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก รายงานเป็นมิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อ 100 กรัมของตัวอย่าง (mg GA/ 100 g)

6. การทดสอบทางประสาทสัมผัส

การวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส นำผลิตภัณฑ์ที่ห่อหุ้มกรอบปรุงรสมาทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส ด้วยวิธี 9-point-hedonic scale (1=ไม่ชอบมากที่สุด และ 9=ชอบมากที่สุด) จากการให้คะแนนในคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ด้านลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส รสชาติ กลิ่น สี และความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้ทดสอบชิมจำนวน 30 คน

7. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และนำข้อมูลมาทำการเปรียบเทียบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

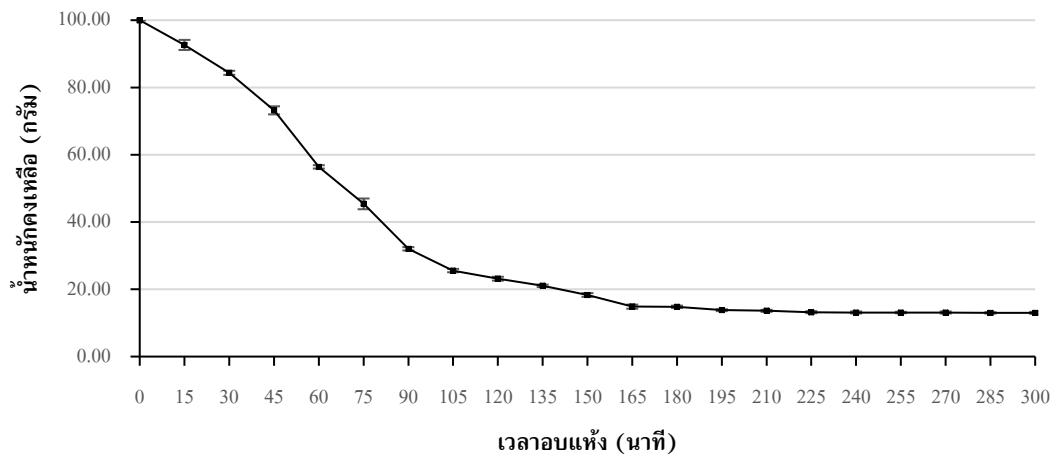
อัตราการทำแห้งและสมบัติของเห็ดนางฟ้าสดและอบแห้ง

จากการศึกษาคุณภาพทางกายภาพและเคมีของเห็ดนางฟ้าสดแสดงดังตารางที่ 2 พบว่า เห็ดนางฟ้าสดมีปริมาณความชื้นร้อยละ 91.66 สารประกอบฟีนอลและกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH เป็น 40.41 และ 15.69 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อ 100 กรัมของตัวอย่าง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Yuenyongputtakal & Limroongreungrat (2015) และยังมีรายงานว่า เห็ดนางฟ้า 100 กรัมจะให้พลังงาน 33.32 กิโลแคลอรี ไขมัน 0.07 กรัม คาร์โบไฮเดรต 4.47 กรัม โปรตีน 3.38 กรัม โยอาหาร 0.47 กรัม แคลเซียม 1.90 มิลลิกรัม เหล็ก 0.85 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัส 87.44 มิลลิกรัม วิตามินบี1 0.006 มิลลิกรัม และวิตามินบี2 0.08 มิลลิกรัม เป็นต้น

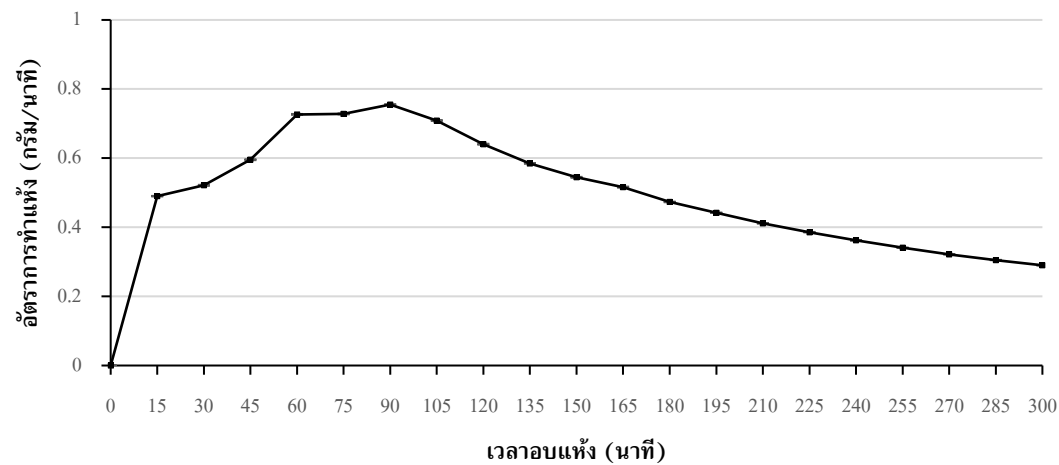
เมื่อนำเห็ดนางฟ้าสดมาอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด (tray dryer) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (Sawetwongsakoon, 2010) ทำการบันทึกน้ำหนักทุก ๆ 15 นาที จนกระทั่งน้ำหนักคงที่พบว่า เมื่อเวลาในการอบแห้งนานขึ้น น้ำหนักของเห็ดจะลดลง แสดงในภาพที่ 1(a) โดยเฉพาะช่วงแรกของการอบแห้งตั้งแต่เวลาที่ 0 ถึงเวลาที่ 135 เนื่องจากปริมาณน้ำซึ่งเป็นน้ำอิสระระเหย

ออกไปอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับความร้อนในการทำแห้ง มีผลทำให้อัตราการทำแห้งมากขึ้น เนื่องจากเห็ดนางฟ้ามีความชื้นเริ่มต้นสูงถึงร้อยละ 91.66 ผิวสัมผัสของเห็ดนางฟ้ามีลักษณะเปียกชื้นเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมร้อนกับเห็ดนางฟ้า ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเห็ดนางฟ้าและใช้ลมร้อนเป็นตัวกลาง อัตราการทำแห้งค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ หลังจากเวลาที่ 135 น้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์จะลดลงอย่างช้า ๆ จนกระทั่งเริ่มคงที่ที่น้ำหนักที่ 180 เป็นต้นไป เห็ดนางฟ้าอบแห้งที่ได้จะมีลักษณะเนื้อสัมผัสกรอบและมีสีน้ำตาล จากภาพที่ 1(b) เมื่อนำเห็ดนางฟ้ามาอบแห้ง โดยใช้อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ในช่วงระยะแรกของการทำแห้ง จะมีอัตราการทำแห้งสูงขึ้นและจะเริ่มคงที่ระหว่างเวลาที่ 60 ถึงเวลาที่ 90 โดยมีอัตราการทำแห้งอยู่ในช่วง 0.73-0.76 กรัม/นาที และหลังจากเวลาที่ 90 อัตราการทำแห้งจะลดลง เมื่ออบแห้งนาน 3 ชั่วโมง ซึ่งเห็ดจะมีน้ำหนักของเห็ดคงเหลือคงที่ จะมีอัตราการทำแห้งเป็น 0.47 กรัม/นาที ซึ่งเห็ดนางฟ้าจะมีปริมาณความชื้นร้อยละ 3.07 Sawetwongsakoon (2010) รายงานว่า เมื่อขนาดของเห็ดนางฟ้าเล็กลง จะทำให้อัตราการทำแห้งสูงขึ้น และเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น จะทำให้อัตราการทำแห้งสูงขึ้นตามลำดับด้วย (Liaotrakoon & Liaotrakoon, 2018) นอกจากนี้ยังพบว่า อุณหภูมิของลมร้อนและอัตราการไหลของลมร้อนมีอิทธิพลต่อระยะเวลาในการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Ruengtharakit et al., 2015)

(a)



(b)



ภาพที่ 1 กราฟการแห้ง (drying curve) ของเห็ดนางฟ้าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (a) น้ำหนักคงเหลือ (กรัม) และ (b) อัตราการแห้ง (กรัม/นาที) ระหว่างการแห้ง

จากตารางที่ 2 พบว่า ปริมาณผลผลิตของเห็ดนางฟ้าอบแห้งเป็นร้อยละ 11.54 มีปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำอิสระน้อยกว่าเห็ดสด เนื่องจากน้ำได้ระเหยไปในระหว่างกระบวนการอบแห้ง เห็ดนางฟ้าอบแห้งที่ได้มีสีคล้ำกว่าเห็ดสด เห็ดอบแห้งมีค่าสี L^* น้อยกว่าเห็ดสด แต่มีค่าสี b^* มากกว่าเห็ดสด เห็ดนางฟ้าสดมีสารประกอบฟีนอล และออกฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH มากกว่าเห็ดอบแห้งเมื่อเปรียบเทียบโดยน้ำหนักฐานแห้ง (dry basis) แสดงให้เห็นว่า การทำแห้งมีผลต่อความคงตัวหรือการสลายตัวของสารประกอบฟีนอล

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของเห็ดนางฟ้า

คุณภาพ	เห็ดนางฟ้าสด	เห็ดนางฟ้าอบแห้ง
ปริมาณผลผลิต (%yield, ร้อยละ)	-	11.54±0.04
ความชื้น (ร้อยละ)	91.66±0.53	3.07±0.02
ปริมาณน้ำอิสระ (a_w)	0.99±0.01	0.62±0.01
ค่าสี L^* (ค่าความสว่าง)	88.18±1.02	85.73±2.15
ค่าสี a^* (ค่าสีเขียว-สีแดง)	3.52±0.75	3.22±0.83
ค่าสี b^* (ค่าสีน้ำเงิน-สีเหลือง)	15.68±0.87	18.29±1.32
สารประกอบฟีนอล (mg GA/100 g, dry basis)	484.53±0.33	153.14±8.43
กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (mg GA/100 g, dry basis)	188.13±0.03	18.31±0.03

ผลสมบัติทางกายภาพและเคมีของผงปรุงรสสมุนไพร

จากตารางที่ 3 พบว่า ผงปรุงรสสมุนไพรทั้ง 3 สูตรมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 2.04–3.18 และมีปริมาณน้ำอิสระในช่วง 0.59–0.64 ส่วนค่าสีของผงปรุงรสสมุนไพรพบว่า ผงปรุงรสพริกเผาและรสตั้มยำมีค่า L^* (ค่าความสว่าง) สูงกว่ารสพริกไทยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากในส่วนผสมของรสพริกไทยมีใบชาเป็นส่วนผสมหลักให้สีเขียวและมีพริกไทยป่นที่มีสีดำจึงทำให้ค่า L^* ต่ำที่สุด ส่วนผงปรุงรสตั้มยำจะมีปริมาณสารประกอบฟีนอลและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ DPPH สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) รองลงมาคือ ผงปรุงรสพริกเผา และผงปรุงรสพริกไทย เนื่องจากส่วนผสมที่ใช้ในการทำผงปรุงรสตั้มยำมีสมุนไพรหลายชนิด เช่น ข่า ตะไคร้ ใบมะกรูด ใบชาและพริกป่น

จึงทำให้มีสารประกอบฟีนอลสูงที่สุดเมื่อเทียบกับผงปรุงรสพริกเผาและรสพริกไทย โดยพบว่าค่ากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ของผงปรุงรสสมุนไพรมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกับปริมาณสารประกอบฟีนอล เป็นผลมาจากส่วนผสมที่มาจากสมุนไพรและปริมาณของส่วนผสมในแต่ละสูตร เช่น ในพืชสมุนไพรบางชนิดโดยเฉพาะชาจะพบ p-coumaric acid ในปริมาณมาก (Wongsa et al., 2012) และในใบชาพบ coumarin, flavonoids, phenols, tannins, anthraquinones และ flobotanins ที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ (Kuri-García et al., 2017) เป็นต้น

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพและเคมีของผงปรุงรสสมุนไพร

คุณภาพ	ผงปรุงรส		
	รสพริกไทย	รสพริกเผา	รสตั้มยำ
ความชื้น (ร้อยละ)	2.40±0.17 ^b	2.04±0.03 ^c	3.18±0.08 ^a
ปริมาณน้ำอิสระ (a_w)	0.64±0.00 ^a	0.60±0.00 ^b	0.59±0.00 ^c
ค่าสี L^* (ค่าความสว่าง)	51.37±2.78 ^b	76.86±2.15 ^a	73.54±0.88 ^a
ค่าสี a^* (ค่าสีเขียว-สีแดง)	-0.17±0.32 ^b	8.41±0.75 ^a	8.01±0.74 ^a
ค่าสี b^* (ค่าสีน้ำเงิน-สีเหลือง)	16.70±1.17 ^c	21.11±1.70 ^b	24.43±0.75 ^a
สารประกอบฟีนอล (mg GA/100 g)	138.59±5.98 ^b	157.06±0.98 ^b	249.42±5.10 ^a
กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (mg GA/100 g)	14.96±0.16 ^c	17.81±0.12 ^b	18.07±0.01 ^a

หมายเหตุ: ^{abc....} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$), ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (N = 3)

ผลการพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดนางฟ้าอบกรอบปรุงรสสมุนไพร

เห็ดนางฟ้าอบกรอบปรุงรสสมุนไพรและชุดควบคุมคือ เห็ดนางฟ้าอบแห้งและทอดกรอบไม่ผสมผงปรุงรสสมุนไพร มีปริมาณน้ำอิสระอยู่ในช่วง 0.59–0.63 (ตารางที่ 4) ค่าสีของเห็ดนางฟ้าอบกรอบปรุงรสสมุนไพรมีค่าสี L^* ค่าสี a^* และค่าสี b^* น้อยกว่าชุดควบคุม ($p < 0.05$) เนื่องจากเห็ดนางฟ้าอบกรอบชุดควบคุมไม่มีส่วนผสมของผักและสมุนไพร จึงทำให้มีสีสว่างและมีสีของเห็ดอบแห้งชัดเจน และพบว่า เห็ดอบกรอบปรุงรสตั้มยำมีปริมาณสารประกอบฟีนอลสูงที่สุด เมื่อเทียบกับเห็ดอบกรอบปรุงรสพริกเผา รสพริกไทย และชุดควบคุมตามลำดับ ($p < 0.05$) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับตารางที่ 3

จากตารางที่ 4 พบว่า ชุดควบคุมมีปริมาณสารประกอบฟีนอลล้นน้อยกว่าเห็ดนางฟ้าอบกรอบรสพริกไทยและรสพริกเผา แต่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากการออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระอาจเกิดจากสารประกอบที่ไม่ใช่สารประกอบฟีนอลที่มีในตัวอย่าง ซึ่งอาจมีผลมาจากสารสกัดที่อาจมีสารประกอบที่มีความสามารถเสริมฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้ (Terpinc et al., 2012; Tomsone et al., 2012)

จากตารางที่ 5 พบว่า การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เห็ดอบกรอบปรุงรสตั้มยำและรสพริกเผามีคะแนนลักษณะปรากฏและสีไม่แตกต่างกับเห็ดปรุงรสชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่เห็ดอบกรอบปรุงรสพริกไทยมีคะแนน

ลักษณะปรากฏและสีน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากเห็ดรอบรอบปรุงรสจากพริกไทยมีลักษณะสีเขียวจากใบไชยา ซึ่งมีผลต่อลักษณะปรากฏ สี และความชอบโดยรวมของผู้ทดสอบชิม เห็ดนางฟ้าอบกรอบชุดควบคุม รสตั้มยำ และรสพริกเผามีคะแนนความชอบทางด้านเนื้อสัมผัสมากกว่าเห็ดรอบรอบปรุงรสจากพริกไทยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากผงบุงปรุงรสจากพริกไทยมีงาคั่วบดละเอียดเป็นส่วนผสม อาจ

ทำให้มีน้ำมันงาออกมา มีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่กรอบเท่าสูตรอื่น ๆ เห็ดรอบรอบปรุงรสพริกเผารสตั้มยำมีคะแนนความชอบด้านรสชาติมากกว่าเห็ดรอบรอบชุดควบคุมและรสจากพริกไทยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เหมาะสำหรับการเป็นอาหารขบเคี้ยวที่เป็นอาหารเพื่อสุขภาพได้ การทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสด้านกลิ่นพบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่งมีคะแนนอยู่ในช่วง 5.90–6.67

ตารางที่ 4 สมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์เห็ดนางฟ้าอบกรอบปรุงรสสมุนไพร

คุณภาพ	เห็ดนางฟ้าอบกรอบปรุงรส			
	ชุดควบคุม	รสจากพริกไทย	รสพริกเผารส	รสตั้มยำ
ปริมาณน้ำอิสระ (a_w)	0.62±0.01 ^a	0.63±0.00 ^a	0.61±0.00 ^b	0.59±0.00 ^b
ค่าสี L^* (ค่าความสว่าง)	53.95±0.95 ^a	47.52±1.38 ^c	50.99±1.01 ^b	52.55±1.14 ^b
ค่าสี a^* (ค่าสีเขียว-สีแดง)	9.03±1.07 ^a	4.06±0.97 ^c	6.26±0.62 ^b	6.83±0.75 ^b
ค่าสี b^* (ค่าสีน้ำเงิน-สีเหลือง)	15.52±1.92 ^a	12.31±1.47 ^b	12.18±1.65 ^b	13.96±1.08 ^{ab}
สารประกอบฟีนอล (mg GA/100 g)	85.07±40.09 ^c	95.63±1.11 ^{bc}	128.43±5.96 ^{ab}	160.05±4.86 ^a
กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (mg GA/100 g)	16.93±0.04 ^b	16.44±0.11 ^c	16.62±0.06 ^c	17.35±0.12 ^a

หมายเหตุ: ^{abc....} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$), ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (N = 3)

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เห็ดนางฟ้าอบกรอบปรุงรสสมุนไพร

คุณภาพ	เห็ดนางฟ้าอบกรอบปรุงรส			
	ชุดควบคุม	รสจากพริกไทย	รสพริกเผารส	รสตั้มยำ
ลักษณะปรากฏ	6.90±1.27 ^a	5.07±1.50 ^b	6.60±1.56 ^a	6.90±1.33 ^a
เนื้อสัมผัส	6.77±1.50 ^a	5.90±1.60 ^b	6.67±1.70 ^{ab}	6.73±1.29 ^{ab}
รสชาติ	6.10±1.42 ^{bc}	5.57±1.58 ^c	7.07±1.44 ^a	6.63±1.35 ^{ab}
กลิ่น	6.27±1.21 ^a	5.90±1.28 ^a	6.67±1.25 ^a	6.61±1.43 ^a
สี	7.03±1.17 ^a	4.93±1.8 ^b	6.73±1.26 ^a	7.03±1.35 ^a
ความชอบโดยรวม	6.73±1.33 ^a	5.80±1.44 ^b	6.83±1.65 ^a	6.96±1.16 ^a

หมายเหตุ: ^{abc....} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$), ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (N = 30)

สรุปผลการทดลอง

จากการพัฒนาผลิตภัณฑ์เห็ดรอบรอบปรุงรสจากพริกไทย รสพริกเผารสตั้มยำเทียบกับชุดควบคุมพบว่า เห็ดนางฟ้าอบกรอบปรุงรสตั้มยำมีปริมาณสารประกอบฟีนอลและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ DPPH สูงที่สุด และได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังนั้นกระบวนการผลิตเห็ดนางฟ้าอบกรอบปรุงรสสมุนไพรที่เหมาะสมคือ เห็ดนางฟ้าอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง นำมาทอด และคลุกผงบุงปรุงรสตั้มยำใน

อัตราส่วนเห็ดนางฟ้าอบกรอบต่อผงบุงปรุงรสเป็น 5:1 จะได้ผลิตภัณฑ์ที่อุดมด้วยสารต้านอนุมูลอิสระและได้รับการยอมรับจากผู้บริโภค ผลิตภัณฑ์เห็ดนางฟ้าอบกรอบปรุงรสตั้มยำสามารถนำไปต่อยอดเชิงพาณิชย์ได้เป็นการเพิ่มทางเลือกในการบริโภคเห็ดนางฟ้าอีกทางหนึ่ง และเห็ดนางฟ้าเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติที่มีศักยภาพนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพได้ อย่างไรก็ตามในการศึกษาต่อไป ควรมีการพัฒนาผงบุงปรุงรสให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนโดยกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ภายใต้คำรับรองเลขที่ FRB650085/0173-2

เอกสารอ้างอิง

- Aishah, M. S. & Wan Rosli, W. I. (2013). The effect of addition of oyster mushroom (*Pleurotus sajor-caju*) on nutrient composition and sensory acceptance of selected wheat and rice-based products. *International Food Research Journal*, 20(1), 183–188.
- Bernas, E., Jaworska, G. & Lisiewska, Z. (2006). Edible mushrooms as a source of valuable nutritive constituents. *Acta Scientiarum Polonorum, Technologia Alimentaria*, 5(1), 5–20.
- Chang, S. T. & Miles, P. G. (2004). *Mushroom cultivation, nutritional values, medicinal effect, and environmental impact* (2nd ed.). CRC Press.
- Changthog, N. & Chunthanom, P. (2017). The effect of seasoning fried log white mushroom processing on the consumer acceptance. *Khon Kaen Agriculture Journal*, 45(1), 1611–1616. (in Thai)
- Kanagasabapathy, G., Malek, S. N. A., Kuppusamy, U. R. & Vikineswary, S. (2011). Chemical composition and antioxidant properties of extracts of fresh fruiting bodies of *Pleurotus sajor-caju* (Fr.) Singer. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(6), 2618–2626. doi: 10.1021/jf104133g
- Kuri-García, A., & Guzmán, S. H. (2017). Phenolic profile and antioxidant capacity of *Cnidioscolus chayamansa* and *Cnidioscolus aconitifolius*: A review. *Journal of Medicinal Plants Research*, 11(45), 713–727. doi.org/10.5897/jmpr2017.6512
- Liaotrakoon, W., & Liaotrakoon, V. (2018). Influence of drying process on total phenolics, antioxidative activity and selected physical properties of edible bolete (*Phlebopus colossus* (R. Heim) Singer) and changes during storage. *Food Science and Technology*, 38, 231–237. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-457x.34116>
- Liaotrakoon, W., De Clercq, N., Van Hoed, V., Van de Walle, D., Lewille, B. & Dewettinck, K. (2013). Impact of thermal treatment on physicochemical, antioxidative and rheological properties of white-flesh and red-flesh dragon fruit (*Hylocereus* spp.) purees. *Food and Bioprocess Technology*, 6(2), 416–430. doi.org/10.1007/s11947-011-0722-4
- Lim, Y. Y., Lim, T. T. & Tee, J. J. (2007). Antioxidant properties of several tropical fruits: a comparative study. *Food Chemistry*, 103(3), 1003–1008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.08.038>
- Picardi, S. M., & Issenberg, P. (1973). Investigation of some volatile constituents of mushrooms (*Agaricus bisporus*): Changes which occur during heating. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 21, 959–962.
- Politowicz, J., Lech, K., Sánchez-Rodríguez, L., Figiel, A., Szumny, A., Grubor, M. & Carbonell-Barrachina, Á. A. (2018). Volatile composition and sensory profile of oyster mushroom as affected by drying method. *Drying Technology*, 36, 685 – 696.
- Ruengtharakit, W., Patanathavorn, N. & Wongpakdee, C. (2015). *Mushroom drying by hot air* [Master's thesis]. Burapha University. (in Thai)
- Saiful Bahri, S. & Wan Rosli, W. I. (2016). Effect of oyster mushroom (*Pleurotus sajor-caju*) addition on the nutritional composition and sensory evaluation of herbal seasoning. *International Food Research Journal*, 23(1), 262–268.
- Sawetwongsakoon, B. (2010). *Study on processing of crispy seasoned grey oyster mushroom*. Nakhon Si Thammarat Rajabhat University. (in Thai)
- Terpinc, P., Čeh, B., Ulrih, N.P. & Abramovič, H. (2012). Studies of the correlation between antioxidant properties and the total phenolic content of different oil cake extracts. *Industrial Crops and Products*, 39, 210–217. doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.02.023
- Tomsone, L., Kruma, Z. & Galoburda, R. (2012). Comparison of different solvents and extraction methods for isolation of phenolic compounds from Horseradish roots (*Armoracia rusticana*). *International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering*, 6, 236–241.
- Usami, A., Nakaya, S., Nakahashi, H. & Miyazawa, M. (2014). Chemical composition and aroma evaluation of volatile oils from edible mushrooms (*Pleurotus salmoneostramineus* and *Pleurotus sajor-caju*). *Journal of Oleo Science*, 63(12), 1323–1332. <http://dx.doi.org/10.5650/jos.ess14147>
- Vongsawasdi, P., Nopharatana, M., Dejsuk, N., Yodying, P., Aimratchanee, P. & Tripanyasatara, P. (2011). Effect of pre-fried treatments on oil absorption of deep-fat fried mushroom. *Agricultural Science Journal*, 42(2), 513–516. (in Thai)
- Wan Rosli, W. I., Nurhanan A. R. & Aishah, M. S. (2012). Effect of partial replacement of wheat flour with oyster mushroom (*Pleurotus sajor-caju*) powder on nutritional composition and sensory properties of butter biscuit. *Sains Malaysiana*, 41(12), 1565–1570.
- Wongsa, P., Jiranun C. & Anis, Z. (2012). In vitro screening of phenolic compounds, potential inhibition against α -amylase and α -glucosidase of culinary herbs in Thailand. *Food Chemistry*, 131(3), 964–971. doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.09.088
- Wu, L. C., Hsu, H. W., Chen, Y. C., Chiu, C. C., Lin, Y. I. & Ho, J. A. A. (2006). Antioxidant and antiproliferative activities of red pitaya. *Food Chemistry*, 95(2), 319–327. doi: 10.1016/j.foodchem.2005.01.002
- Yao, F., Gao, H., Yin, C.-M., Shi, D.-F. & Fan, X.-Z. (2023). Effect of different cooking methods on the bioactive components, color, texture, microstructure, and volatiles of Shiitake mushrooms, *Foods*, 12(13). doi.org/10.3390/foods12132573
- Yuenyongputtakal, W. & Limroongreungrat, K. (2015). *Study of phytonutrients content from mycelia of commercially mushrooms and application of mushroom micelia powder used in food product*. Resreach Report. Faculty of Science, Burapha University. 170 pp. (in Thai)

การวิเคราะห์ปริมาณสารไมทราไจนีนและสารต้านอนุมูลอิสระในชาใบกระท่อม

Analysis of mitragynine and antioxidant content in kratom leaves tea

จันทิมา ชั่งสิริพร^{1*}, พฤกระยา พงศ์ยี่หล้า¹ และ นิรนา ชัยฤกษ์¹

Juntima Chungsiriporn^{1*}, Prukraya Pongyeela¹ and Nirana Chairerk¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา ประเทศไทย

¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

บทคัดย่อ

ชาเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญและเป็นที่ยอมรับสำหรับผู้รักสุขภาพในปัจจุบัน ใบกระท่อมเป็นพืชสมุนไพรที่สามารถนำมาผลิตเป็นชาได้ โดยใบกระท่อมสายพันธุ์ต่างกันจะให้ปริมาณสารไมทราไจนีน สารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้จึงศึกษาปริมาณสารสำคัญในชาใบกระท่อมด้วยการนำใบแห้งมาบดและใส่ถุงชา นำถุงชาใบกระท่อมมาทดสอบการชงชาสำหรับดื่มด้วยวิธีการต้มและการชงชาด้วยการแช่ในน้ำร้อนเป็นเวลา 5 นาที เปรียบเทียบผลของสารสำคัญที่ได้กับการสกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผลการวิจัยพบว่า การสกัดผงชาใบกระท่อมพันธุ์กันแดง กันเขียว และทางกิ่งพบปริมาณไมทราไจนีนสูงสุด เท่ากับ 5.98 ± 0.09 , 8.15 ± 0.35 และ 8.33 ± 0.15 มิลลิกรัมต่อกรัม ปริมาณฟีนอลิก เท่ากับ 368.60 ± 1.65 , 437.93 ± 1.92 และ 382.23 ± 2.04 มิลลิกรัมแกลลิกต่อกรัม ปริมาณฟลาโวนอยด์ เท่ากับ 210.88 ± 2.58 , 208.50 ± 2.20 และ 138.05 ± 1.97 มิลลิกรัมเคอซิทินต่อกรัม และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเท่ากับ $94.36 \pm 1.23\%$, $98.50 \pm 2.35\%$ และ $93.23 \pm 2.45\%$ ตามลำดับ การแปรรูปใบกระท่อมเป็นชาสำหรับดื่มจะได้รับปริมาณสารไมทราไจนีน ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากสารสกัดด้วยเมทานอล ประมาณ 80%, 90%, 75% และ 15% ตามลำดับ วิธีการชงชาแบบการต้มเป็นกระบวนการที่ได้ปริมาณสารสำคัญสูงกว่าการแช่ในน้ำร้อน ดังนั้นชาใบกระท่อมควรเตรียมด้วยกระบวนการต้มจึงจะได้ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระสูง

คำสำคัญ: ชา, กระท่อม, ไมทราไจนีน, สารต้านอนุมูลอิสระ

ABSTRACT

Tea is a popular and important source of antioxidants, and kratom can be used to make tea. Different varieties of kratom leaves contain varying amounts of mitragynine, phenolic compounds, flavonoids, and other antioxidants. This study aimed to evaluate the mitragynine content, total phenolic content, flavonoid content, and antioxidant activity of kratom tea made from red vine, green vine, and serrate apex species. The dried, crushed kratom leaves were boiled and steeped for 5 min, and the results were compared to an extract obtained with methanol as a solvent for 3 h. The results showed that the extraction of kratom tea powder from the from the red vine, green vine, and serrate apex species resulted in the amount of mitragynine with levels of 5.98 ± 0.09 , 8.15 ± 0.35 and 8.33 ± 0.15 mg/g, respectively. The phenolic content was 368.60 ± 1.65 , 437.93 ± 1.92 and 382.23 ± 2.04 mg GAE/g, respectively. The flavonoid content was 210.88 ± 2.58 , 208.50 ± 2.20 and 138.05 ± 1.97 mg QE/g, respectively, and the antioxidant activity was $94.36 \pm 1.23\%$, $98.50 \pm 2.35\%$ and $93.23 \pm 2.45\%$, respectively. Processing kratom leaves into kratom tea results in a significant decrease in the amount of mitragynine, phenolic compounds, flavonoids and antioxidant activity in methanol extract by about 80%, 90%, 75%, and 15%, respectively. The brewing method of boiling tea was a process that obtains a higher amount of active substances than steeping in hot water. Therefore, boiling is a suitable method for preparing kratom tea to obtain high antioxidant content.

KEYWORDS: tea, kratom, mitragynine, antioxidant

*Corresponding Author: juntima.c@psu.ac.th

Received: 26/04/2023; Revised: 23/01/2024; Accepted: 30/01/2024

1. บทนำ

ชา (Tea) เป็นเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมจากผู้บริโภค เนื่องจากมีการนำพืชสมุนไพรต่าง ๆ ที่มีสรรพคุณทางยามาใช้ในการทำชา ซึ่งชา มีสารต้านอนุมูลอิสระในกลุ่มพอลิฟีนอลและกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่มีความสำคัญต่อการแสดงฤทธิ์ทางเภสัชวิทยามากที่สุด มีฤทธิ์ช่วยเพิ่มการเผาผลาญพลังงานและไขมัน การดื่มชาจึงมีประโยชน์ต่อการป้องกันโรค บำบัดโรค และบำรุงสุขภาพ เช่น ช่วยต้านอนุมูลอิสระ ลดความดัน ช่วยให้อ่อนคลาย ในกระบวนการผลิตชาส่วนใหญ่นิยมนำไปใช้ในการแปรรูป (Prathumthet, 2019) โดยผลิตภัณฑ์ที่เป็นที่นิยม ได้แก่ ชาขาว ชาเขียว ชาอู่หลง ชาดำ และชาสมุนไพร เป็นต้น

ใบกระท่อม (Mitragyna Speciosa) ในประเทศไทยพบอยู่ 3 พันธุ์ คือ แดงกวา (ก้านเขียว) ยักษ์ใหญ่ (หางกิ้ง) และก้านแดง คนในท้องถิ่นนิยมนำใบกระท่อมสดมาเคี้ยว หลังจากที่พักกระท่อมได้รับอนุญาตให้มีการปลูกและบริโภคอย่างถูกกฎหมาย (Department of Agriculture, 2023) จึงได้มีการแปรรูปเป็นสินค้าที่จำแนกได้เป็น 5 กลุ่มหลักๆ ได้แก่ ใบแห้ง ผง แคปซูล สารสกัดเข้มข้น และผลิตภัณฑ์แปรรูปอื่นๆ ที่สะดวกและง่ายสำหรับการบริโภค เช่น เครื่องดื่มผสมกระท่อมพร้อมดื่ม ขนมที่มีส่วนผสมของสารสกัดกระท่อม เป็นต้น การนำใบกระท่อมมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ชาจึงเป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถเก็บรักษาได้นาน สะดวกในการพกพา และชงดื่มได้ง่าย

สารสำคัญที่พบในใบกระท่อมประกอบด้วยแอลคาลอยด์ทั้งหมดประมาณ 0.5% ในจำนวนนี้เป็นสารไมทราไจนีน (Mitragynine) 0.25% โดยชนิดและปริมาณแอลคาลอยด์ที่พบแตกต่างกันตามสถานที่และเวลาที่เก็บเกี่ยว ซึ่งแบ่งตามสูตรโครงสร้างได้สารประกอบ 4 ประเภท คือ อินโดลแอลคาลอยด์ (Indole Alkaloids) ออกอินโดลแอลคาลอยด์ (Oxindole Alkaloids) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) และกลุ่มอื่นๆ เช่น ไฟโตสเตอรอล (Phytosterol) แทนนิน (Tannins) (Tanyaratrisakul, 2012) สารไมทราไจนีนเป็นสารในกลุ่มอินโดลแอลคาลอยด์ที่มีฤทธิ์ระงับปวด รักษาอาการท้องเสีย ลดน้ำหนัก ต้านการอักเสบ ต้านอนุมูลอิสระ รักษาแผลในกระเพาะอาหาร ต้านอาการซึมเศร้า และคลายกล้ามเนื้อลาย เนื่องจากไมทราไจนีนเป็นสารที่ออกฤทธิ์กดประสาทส่วนกลาง จึงอาจทำให้เกิดผลข้างเคียงจากการใช้กระท่อมได้ ข้อเสียที่พบได้ เช่น มึนงง คลื่นไส้ และอาเจียน

สารไมทราไจนีน (Mitragynine) มีข้อกำหนดให้มีขนาดรับประทานที่เหมาะสมในแต่ละวัน การดื่มน้ำใบกระท่อมต้องมีปริมาณไมทราไจนีนไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อวัน การพัฒนาผลิตภัณฑ์ชาใบกระท่อมสำหรับชงดื่มจึงจำเป็นต้องผ่านการวิเคราะห์หาปริมาณสารไมทราไจนีนในน้ำชา ซึ่งต้องทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC และการวิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระด้วยเทคนิคเฉพาะ อันจะช่วยให้ผู้ดื่มชาใบกระท่อมได้ทราบถึงขนาดรับประทานและเห็นถึงประโยชน์ที่จะได้จากการดื่มชา และจะช่วยส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรของการปลูกพืชกระท่อมสู่การเป็นสินค้าสุขภาพได้

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารไมทราไจนีน สารฟีนอลิก สารฟลาโวนอยด์ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของชาใบกระท่อมสายพันธุ์ก้านเขียว ก้านแดง และหางกิ้ง โดยใช้วิธีชงชาแบบต้มชงชาและแช่ชงชาในน้ำร้อน เปรียบเทียบปริมาณสารที่ได้กับการใช้วิธีการสกัด เพื่อการประเมินปริมาณสารที่มีในชาใบกระท่อมสำหรับการต่อยอดพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพต่อไป

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมชาใบกระท่อม

นำใบกระท่อมพันธุ์ก้านแดง พันธุ์ก้านเขียว และหางกิ้ง อายุ 2 ปี จากจังหวัดพัทลุง มาอบที่อุณหภูมิ 40°C จนแห้ง หลังจากนั้นทำการบดใบกระท่อมแห้งให้ละเอียดเป็นชาใบกระท่อม ใช้ชาใบกระท่อมปริมาณ 5 กรัม ใส่ถุงชา ศึกษาผลของวิธีการชงน้ำชาจากถุงชา 2 วิธี คือ วิธีการต้มชงชาด้วยน้ำ 100 มิลลิลิตร บนเครื่องให้ความร้อนเป็นเวลา 5 นาที และแช่ชงชาในน้ำร้อน 100 มิลลิลิตรเป็นเวลา 5 นาที จะได้เป็นสารตัวอย่างน้ำชาใบกระท่อมสำหรับการวิเคราะห์

2.2 การสกัดสารไมทราไจนีนในใบกระท่อม

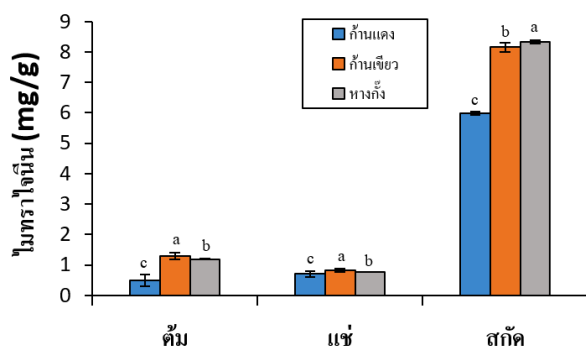
ใช้ใบกระท่อมบดปริมาณ 5 กรัม มาสกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอลความเข้มข้น 100% ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ร่วมกับวิธีอัลตราโซนิก โดยนำส่วนผสมสกัดมาวางในเครื่องอัลตราโซนิกที่ความถี่ 45 กิโลเฮิร์ตซ์ เวลาการสกัด 3 ชั่วโมง นำส่วนผสมที่ได้มากรองจากนั้นปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 6 นาที จะได้เป็นสารตัวอย่างสารสกัดชาใบกระท่อมสำหรับนำไปวิเคราะห์สารไมทราไจนีนด้วยเทคนิค HPLC-DAD



รูปที่ 1 ผงชาใบกระเทียมและถุงชา

3.2 ปริมาณสารไมทราไจนีนในชาใบกระเทียม

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารไมทราไจนีนในน้ำชาใบกระเทียมจากการใช้วิธีชงชา 2 แบบ คือ แบบต้มถุงชา และการแช่ถุงชาในน้ำร้อน เปรียบเทียบกับปริมาณสารที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลาย ดังรูปที่ 2 พบว่า การสกัดผงชาใบกระเทียมพันธุ์ก้านแดง ก้านเขียว และหางกิ้ง ด้วยเมทานอลพบปริมาณไมทราไจนีน 5.98 ± 0.09 , 8.15 ± 0.35 และ 8.33 ± 0.15 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยเมื่อนำใบกระเทียมมาชงชาแบบต้มด้วยความร้อน 5 นาที จะได้ปริมาณไมทราไจนีนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากวิธีการสกัดประมาณ 80% และให้ปริมาณที่สูงกว่าการชงชาด้วยการแช่ในน้ำร้อนประมาณ 22% แสดงว่าการต้มถุงชาจะทำให้เกิดการละลายสารไมทราไจนีนออกมาได้น้อย แต่ยังเป็นวิธีการที่ดีกว่าการชงชาแบบแช่ถุงชาในน้ำร้อน ซึ่งให้ประสิทธิภาพต่ำในการละลายสารไมทราไจนีนออกมาในน้ำชา โดยทั่วไปชากระเทียมจะมีปริมาณไมทราไจนีน ประมาณ 6.25–23 มิลลิกรัม (Trakulsrichai et al., 2015)

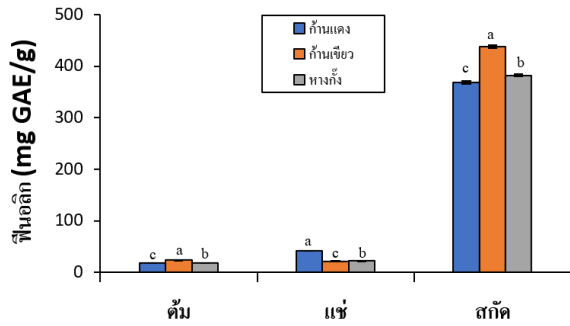


รูปที่ 2 ปริมาณไมทราไจนีนในน้ำชาใบกระเทียมจากการชงชาแบบต้มถุงชาและแช่ถุงชาในน้ำร้อนเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดจากผงชา

การชงชาด้วยการต้มถุงชาใบกระเทียมพันธุ์ก้านเขียวได้ปริมาณไมทราไจนีนสูงสุดเท่ากับ 1.29 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนการแช่ถุงชาในน้ำร้อนจะได้ปริมาณไมทราไจนีน 0.76 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งปริมาณไมทราไจนีนที่คนทั่วไปควรรับประทานไม่เกิน 0.28–0.40 มิลลิกรัม ดังนั้นควรเตรียมชาใบกระเทียมบรรจุถุงไม่เกิน 1 กรัมต่อถุงรับประทานไม่เกิน 1 ถุงต่อวัน และใช้วิธีชงชาแบบต้มถุงชาในน้ำร้อนจะทำให้ได้รับปริมาณสารไมทราไจนีนที่สูง

3.3 ปริมาณสารฟีนอลิก

ผลปริมาณสารฟีนอลิกสายพันธุ์ก้านแดง ก้านเขียว และหางกิ้งของชาใบกระเทียมด้วยวิธีการต้มถุงชา และการแช่ถุงชาในน้ำร้อน เปรียบเทียบกับปริมาณสารฟีนอลิกที่ได้จากการสกัด ดังรูปที่ 3 พบว่าปริมาณฟีนอลิกจากการสกัดกระเทียมสายพันธุ์ก้านแดง ก้านเขียว และหางกิ้งด้วยเมทานอล เท่ากับ 368.60 ± 1.65 , 437.93 ± 1.92 และ 382.23 ± 2.04 มิลลิกรัมแกลลิกต่อกรัม โดยเมื่อนำถุงชาใบกระเทียมมาชงแบบต้มด้วยน้ำร้อนจะได้รับปริมาณฟีนอลิกลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากการสกัดประมาณ 90% โดยการชงชาใบกระเทียมด้วยวิธีการต้มถุงชาจะให้ปริมาณสารฟีนอลิกต่ำกว่าการแช่ถุงชาในน้ำร้อนประมาณ 30% ซึ่งชาใบกระเทียมพันธุ์ก้านแดงที่ชงด้วยการแช่ในน้ำร้อนได้ปริมาณฟีนอลิกสูงเท่ากับ 41.70 ± 1.25 มิลลิกรัมแกลลิกต่อกรัม



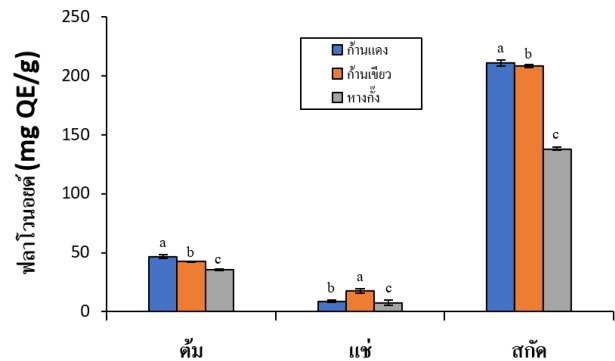
รูปที่ 3 ปริมาณฟีนอลิกในน้ำชาใบกระพุ่มจากการชงชาแบบต้มชงชาและแห้งชงชาในน้ำร้อนเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดจากผงชา

ปริมาณฟีนอลิกในชาใบกระพุ่มอยู่ในช่วง 1.0–6.6% ของน้ำชา (Reilly et al., 2015) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณฟีนอลิกของใบกระพุ่มทั้ง 3 สายพันธุ์กับชาดำและชาเขียว พบว่าชาจากใบกระพุ่มมีปริมาณฟีนอลิกสูงกว่าชาดำ โดยพิจารณาจากชาดำ (*Camellia sinensis* L.) มีปริมาณฟีนอลิก เท่ากับ 1.00 มิลลิกรัมแกลลิกต่อกรัม (Zjehra et al., 2021) ชาดำของ Kenya เท่ากับ 6.71 มิลลิกรัมแกลลิกต่อกรัม และชาเขียว เท่ากับ 7.77 มิลลิกรัมแกลลิกต่อกรัม (Hashish et al., 2018) ทั้งนี้ ปริมาณสารฟีนอลิกที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดและอายุของชา โดยปริมาณฟีนอลิกที่ควรบริโภคต่อวัน เท่ากับ 1,000 มิลลิกรัม (Perry, 2018)

3.4 ปริมาณฟลาโวนอยด์

ผลปริมาณสารฟลาโวนอยด์สายพันธุ์ก้านแดง ก้านเขียว และทางกิ่งของชาใบกระพุ่มด้วยวิธีการชงแบบต้มในน้ำร้อนและแห้งในน้ำร้อนเปรียบเทียบกับปริมาณสารที่ได้จากกระบวนการสกัด ดังรูปที่ 4 พบว่าปริมาณฟลาโวนอยด์จากการสกัดใบกระพุ่มสายพันธุ์ก้านแดง ก้านเขียว และทางกิ่งด้วยเมทานอล เท่ากับ 210.88 ± 2.58 , 208.50 ± 2.20 และ 138.05 ± 1.97 มิลลิกรัมแควอซิทินต่อกรัม ตามลำดับ โดยเมื่อนำใบกระพุ่มมาแปรรูปเป็นชาจะได้รับปริมาณฟลาโวนอยด์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากการสกัดประมาณ 75% การชงชาด้วยวิธีการต้มชงชาจะให้ปริมาณฟลาโวนอยด์สูงกว่าการแห้งชงชาในน้ำร้อนประมาณ 70% ซึ่งในกระบวนการต้มชงชาจากใบกระพุ่มพันธุ์ก้านแดงมีปริมาณฟลาโวนอยด์สูงสุด เท่ากับ 46.83 มิลลิกรัมแควอซิทินต่อกรัม เมื่อพิจารณาปริมาณฟลาโวนอยด์ของชาใบกระพุ่มที่ชงด้วยวิธีการต้มชงชาและแห้งชงชาในน้ำร้อน พบว่าชาใบกระพุ่มจะมีปริมาณฟ

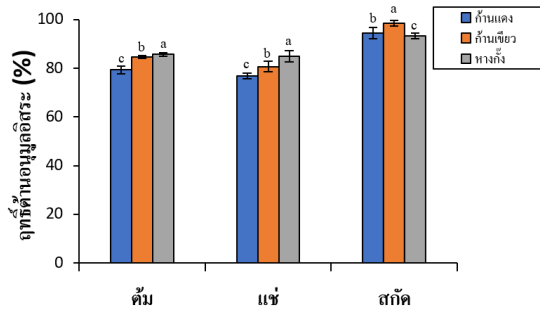
ลาโวนอยด์สูงกว่าชาดำและชาเขียว ซึ่งชาดำมีปริมาณฟลาโวนอยด์ เท่ากับ 0.32 มิลลิกรัมแควอซิทินต่อกรัม (Zjehra et al., 2021) และชาเขียว เท่ากับ 0.19 มิลลิกรัมแควอซิทินต่อกรัม (Hashish et al., 2018) ซึ่งปริมาณฟลาโวนอยด์ที่ร่างกายควรได้รับต่อวันเท่ากับ 150–620 มิลลิกรัม (Godman, 2021)



รูปที่ 4 ปริมาณฟลาโวนอยด์ในน้ำชาใบกระพุ่มจากการชงชาแบบต้มชงชาและแห้งชงชาในน้ำร้อนเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดจากผงชา

3.5 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของกระพุ่มสายพันธุ์ก้านแดง ก้านเขียว และทางกิ่งของชาใบกระพุ่มด้วยวิธีการชงแบบต้มและการแห้งชงชาในน้ำร้อน เปรียบเทียบกับปริมาณสารที่ได้จากกระบวนการสกัด ดังรูปที่ 5 พบว่าสารสกัดกระพุ่มด้วยเมทานอลทั้ง 3 สายพันธุ์ มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเฉลี่ย เท่ากับ $95.36 \pm 1.36\%$ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zailan (2022) ได้ศึกษาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดใบกระพุ่มที่สกัดด้วยเมทานอล พบว่ามีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ เท่ากับ $91.65 \pm 1.53\%$ ซึ่งมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าชาเขียวและชาดำ ที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ เท่ากับ $90.80 \pm 2.35\%$ และ $81.70 \pm 1.25\%$ ตามลำดับ (Von et al., 1997) เมื่อพิจารณาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของชาใบกระพุ่มของทั้ง 3 สายพันธุ์ ที่ชงแบบการต้มและการแห้งชงชาในน้ำร้อนให้ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเฉลี่ย เท่ากับ $83.18 \pm 2.16\%$ และ $80.76 \pm 2.42\%$ ตามลำดับ ดังนั้นการแปรรูปใบกระพุ่มเป็นชาสำหรับดื่มสามารถต้านอนุมูลอิสระได้เป็นอย่างดี โดยปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่ร่างกายควรได้รับต่อวัน เท่ากับ 8,000–11,000 มิลลิกรัม (Greger, 2014)



รูปที่ 5 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระในน้ำชาใบกระพี้จากการชงชาแบบต้มชงชาและแช่ชงชาในน้ำร้อนเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดจากผงชา

4. สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ใบกระพี้ที่ต้มพันธุ์ก้านแดง ก้านเขียว และทางกิ่งด้วยวิธีการสกัดด้วยเมทานอล พบว่า มีปริมาณสารโพรโทไซยานิน เท่ากับ 5.98 ± 0.09 , 8.15 ± 0.35 และ 8.33 ± 0.15 มิลลิกรัมต่อกรัม ปริมาณฟีนอลิก เท่ากับ 368.60 ± 1.65 , 437.93 ± 1.92 และ 382.23 ± 2.04 มิลลิกรัมแกลลิกต่อกรัม ปริมาณฟลาโวนอยด์ เท่ากับ 210.88 ± 2.58 , 208.50 ± 2.20 และ 138.05 ± 1.97 มิลลิกรัมเคอเวอซิดินต่อกรัม และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเท่ากับ $94.36 \pm 1.23\%$, $98.50 \pm 2.35\%$ และ $93.23 \pm 2.45\%$ ตามลำดับ การแปรรูปใบกระพี้พันธุ์ก้านแดง ก้านเขียว และทางกิ่ง เป็นชาสำหรับดื่มจะได้รับปริมาณสารโพรโทไซยานิน ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากสารสกัดประมาณ 80%, 90%, 75% และ 15% ตามลำดับ การชงชาแบบการต้มเป็นกระบวนการที่ได้ปริมาณสารโพรโทไซยานิน ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าการแช่ชงชาในน้ำร้อน ดังนั้นใบกระพี้ทั้ง 3 สายพันธุ์ มีสารต้านอนุมูลอิสระที่สามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชาได้อย่างดี

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่สนับสนุนสถานที่การทำงานวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Department of Agriculture. (2023). *Kraom: market*. Retrieved March 10, 2023, from https://www.doa.go.th/oard8/?page_id=4440
- Godman, H. (2021). *Can flavonoids help fend off forgetfulness?*. Retrieved September 17, 2021, from <https://www.health.harvard.edu/blog/can-flavonoids-help-fend-off-forgetfulness-202109172596>
- Greger, M. (2014). *How to Get Enough Antioxidants Each Day*. Retrieved January 18, 2024, from <https://nutritionfacts.org/blog/how-to-get-enough-antioxidants-each-day/>
- Hashish, A., Zein, H., & El-Bhnsawy, R. M. (2018). Evaluation of total phenolic compounds, flavonoids and antioxidant activity of black and green tea drink among some available brands in the Egyptian market. *Current Science International*, 7(4), 721–730.
- Hu, Z., Tang, X., Liu, J., Zhu, Z., & Shao, S. (2016). Effect of parboiling on phytochemical content, antioxidant activity and physicochemical properties of germinated red rice. *Journal of Food*, 214, 285–292.
- Inchuen, S., Pornchaloempong, P., & Narkruga, W. (2010). Effect of drying methods on chemical composition, color and antioxidant properties of Thai red curry powder. *Kasetsart Journal - Natural Science*, 44, 142–151.
- Namchot, C., Phasuk, S., & Takonphakdee, P. (2013). Efficiency of Feronia lomonía swingle branch crude extract as antioxidant. In the 5th Rajamangala University of Technology National Conference, 28 March 2014, IMPACT Muang Thong Thani, Nonthaburi. (pp. 251–260). (in Thai)
- Perry, M. (2018). *What are polyphenols and how much you need*. Retrieved July 30, 2018, from <https://blog.zonediet.com/lifestyletips/what-are-polyphenols-and-how-much-you-need>
- Prathumthet, J., Taschanda, K., Tewasansern, C., Phuwanna, R., & Drhuan, J. (2019). Evaluation of Antioxidant Property and Total Phenolic Content of Instant Flower Tea Powder from Curcuma sessilis Gage., Clitoria ternatea Linn. and Bombax anceps Pierre. *KKU Science Journal*, 47(3), 490–497. (in Thai)
- Reilly, M. T., Norwood, V., Grabski, M., et al. (2015). Ethnopharmacologic examination of Medicinal Mitragyna speciosa (kratom) in the United States. *Drug and Alcohol Dependence*, 152, 1–13.
- Tanyaratrisakul, A. (2012). Kratom and Health Care among Thais. *Journal of Health Research and Innovation*, 5(1), 1–9. (in Thai)
- Trakulsrichai, S., Sathirakul, K., Auparakkitanon, J., Krongvorakul, J., et al. (2015). Pharmacokinetics of mitragynine in man. *Drug Design, Development and Therapy*, 9, 2421–2429.
- Von, G. A., Joubert, E., & Hansmann, C. F. (1997). Comparison of the antioxidant activity of rooibos tea (Aspalathus linearis) with green, oolong and black tea. *Food Chemistry*, 60(1), 73–77.
- Wungsintaweekul, J., Choo-Malee, J., Charoonratana, T., & Keawpradub N. (2012). Methyl jasmonate and yeast extract stimulate mitragynine production in Mitragyna speciosa. *Biotechnology Letters*, 34(10), 1945–1950.
- Zailan, N. F. Z., Sarchio, S. N. E., & Hassan, M. (2022). Evaluation of Phytochemical Composition, Antioxidant and anti-Diabetic Activities of Mitragyna speciosa Methanolic Extract (MSME). *Malaysian Journal of Medicine and Health Sciences*, 18, 92–99.
- Nugraheni, Z. V., Gunawan, W. D., Laili, H. N., Putro, H. S., & Wahyudi, A. Analysis of antioxidant activity of black tea extract (Camellia sinensis L.) and the effect on organoleptic properties of cassava getuk. In *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/5.0051534>

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุม TEWMA FIR-TEWMA
MFIR-TEWMA QEWMA FIR-QEWMA และ MFIR-QEWMA
สำหรับข้อมูลที่มีการแจกแจงลอการิทึม
Efficiency comparison of TEWMA FIR-TEWMA MFIR-TEWMA
QEWMA FIR-QEWMA and MFIR-QEWMA control charts
for Lognormal distribution

ปิยพล ไพบูลย์^{1*}, ชัยวัชร์ สีแดง¹, ชวนากร สุจินตวงษ์¹, ชนกานต์ สังข์บุญชู¹

Piyaphon Paichit^{1*}, Chaitawat Seedang¹, Chawanagorn Sujintawong¹, Chanakan Sungboonchoo¹

¹ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม ประเทศไทย

¹Department of Statistics, Faculty of Science, Silpakorn University, Sanamchandra Palace Campus,
Nakhon Pathom, Thailand.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสามชั้น (TEWMA) แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสี่ชั้น (QEWMA) รวมทั้งนำเทคนิคการตอบสนองเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว (FIR) และการตอบสนองเริ่มต้นอย่างรวดเร็วที่ปรับปรุง (MFIR) มาใช้กับแผนภูมิควบคุม TEWMA และ QEWMA เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ตำแหน่ง (Location parameter: μ) ดำเนินการโดยการจำลองข้อมูลด้วยวิธีมอนติคาร์โลที่ทำซ้ำ 1,000 รอบ กำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงแบบลอการิทึม โดยพารามิเตอร์ตำแหน่งคือ 1, 2, 3, 7 และ 15 และพารามิเตอร์ขนาด (Scale parameter: σ) คือ 1 และ 2 ตามลำดับ และกำหนดค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบ (λ) ของแผนภูมิควบคุมทั้งหมดเท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 และขนาดการเปลี่ยนแปลงกระบวนการ (δ) เท่ากับ 0.01 ถึง 2 เกณฑ์ที่ใช้วัดประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุม จะพิจารณาจากค่าความยาวรันเฉลี่ย (Average Run Length : ARL) ซึ่งแผนภูมิควบคุมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจะให้ค่าความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุม (ARL_1) น้อยที่สุด ผลการวิจัยพบว่าการเพิ่มเทคนิคการตอบสนองอย่างรวดเร็วและเทคนิคการปรับเรียบให้กับแผนภูมิควบคุมทำให้แผนภูมิควบคุมที่ได้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสามชั้น, แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสี่ชั้น, การตอบสนองเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว, ความยาวรันเฉลี่ย

ABSTRACT

This research aimed to compare efficiency of Triple Exponentially Weighted Moving Average Control Chart (TEWMA) and Quadruple Exponentially Weighted Moving Average Control Chart (QEWMA). In addition, it had techniques of Fast Initial Response (FIR) and Modified Fast Initial Response (MFIR) applied to Triple Exponentially Weighted Moving Average Control Chart (TEWMA) and Quadruple Exponentially Weighted Moving Average Control Chart (QEWMA) so as to detect a change of Location Parameter: μ . It was operated by simulating data through Monte Carlo Method repeating 1,000 rounds. Moreover, data was determined to be distributed in form of Log normal distribution while Location Parameter (μ) was 1,2,3,7, and 15, and Scale Parameter (σ) was 1 and 2 respectively. Meanwhile, Smoothing Parameter (λ) of total control chart was determined as 0.1, 0.3, and 0.5 while the ship size of process (δ) was from 0.01 to 2. What's more, the criteria used for measuring efficiency of Control chart took into account Average Run Length (ARL). In this way, Control chart with utmost efficiency yielded the least Average Run Length (ARL_1) when the process was out of control. According to research findings, it appeared that increasing technique of Fast Initial Response and technique of making Control chart flat led Control chart to yield similar efficiency.

KEYWORDS: TEWMA, QEWM, Fast Initial Response, Average Run Length

*Corresponding Author: paichit_p@silpakorn.edu

Received: 12/01/2023; Revised: 12/11/2023; Accepted: 18/01/2024

1. บทนำ

การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (SPC) โดยเฉพาะเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพกลายเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากขึ้นสำหรับการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ได้มาตรฐาน ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพซึ่งจัดเป็นปัจจัยพื้นฐานในเลือกซื้อสินค้าและบริการของผู้บริโภค SPC จึงทำหน้าที่เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาเพื่อให้ได้มาซึ่งความมั่นคง (เสถียร) ของผลิตภัณฑ์และยังช่วยลดความผันแปรที่อาจมาจากเครื่องจักร วัตถุดิบ คน และสภาพแวดล้อม แผนภูมิควบคุมเป็นหนึ่งในเครื่องมือทางสถิติที่ได้รับความนิยมและสำคัญที่สุดสำหรับ SPC แผนภูมิควบคุมจะแสดงลำดับของค่าสังเกตและมีการแจ้งเตือนเมื่อกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงและจำเป็นต้องมีการแก้ไขข้อบกพร่องที่สามารถช่วยลดความผันแปรของตัวแปรซึ่งถูกใช้เป็นตัวแทนของคุณลักษณะของสินค้าและบริการอีกด้วย

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันคุณภาพของผลิตภัณฑ์และบริการที่ผลิตขึ้นมามากได้รับความนิยมเป็นพิเศษ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากความผันแปรของกระบวนการส่งผลให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม หรือไม่ตรงกับความต้องการถึงแม้จะใช้ความระมัดระวังมากแค่ไหนก็ตาม รูปแบบความผันแปรเหล่านี้เป็นได้ทั้งความผันแปรที่เกิดขึ้นโดยบังเอิญหรือแบบสุ่ม (Chance variation) และความผันแปรที่ทราบสาเหตุ (Assignable variation) ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ตรงตามความต้องการจึงจำเป็นต้องแยกความแตกต่างของความผันแปรที่เกิดขึ้นและจัดการกับสาเหตุที่ทำให้กระบวนการเกิดความผันแปรโดยเฉพาะอย่างยิ่งความผันแปรที่ไม่ได้เกิดโดยบังเอิญ การควบคุมและติดตามกระบวนการทางสถิติ (Statistical Process Control and Monitoring) มีการจัดเตรียมเครื่องมือหลักที่สำคัญที่สามารถช่วยลดความผันแปรที่ทราบสาเหตุทำให้กระบวนการเกิดความผันแปรที่ทราบสาเหตุที่สำคัญนั้นคือแผนภูมิควบคุม

แผนภูมิควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ แผนภูมิควบคุมที่ใช้ค่าเฉพาะสถิติปัจจุบันเท่านั้น (memoryless) นำเสนอโดย Shewhart (1932) และแผนภูมิควบคุมที่ใช้ทั้งค่าสถิติปัจจุบันและค่าสถิติในอดีต

(memory) ตัวอย่างเช่น แผนภูมิควบคุมผลรวมสะสม (Cumulative SUM: CUSUM) นำเสนอโดย Page(1954) และแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลัง (Exponentially Weighted Moving Average: EWMA) พัฒนาโดย Roberts(1959) ซึ่งการใช้ค่าสถิติทั้งปัจจุบันและค่าสถิติในอดีตทำให้แผนภูมิ CUSUM และ EWMA มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์เพียงเล็กน้อยในกระบวนการ (Montgomery, 2012) แผนภูมิควบคุมส่วนใหญ่ถูกสร้างมาเพื่อใช้กับข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปกติเช่น แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยชีวสารที่ ซึ่งเป็นแผนภูมิควบคุมที่มีการใช้บ่อยครั้งที่สุดสำหรับตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของกระบวนการภายใต้ข้อมูลที่มีการแจกแจงปกติ อย่างไรก็ตามในการใช้งานจริงข้อมูลที่สังเกตได้อาจมีการแจกแจงแบบเบ้ขวา เช่น การแจกแจงแบบล็อกนอร์มัล ตัวอย่างเช่น ในการประเมินคุณภาพของน้ำมันเครื่องในอุตสาหกรรมยานยนต์ วิศวกรคุณภาพจำเป็นต้องวัดเปอร์เซ็นต์ความหนืดที่เพิ่มขึ้นของน้ำมันเครื่องหลังจากที่ได้นำไปทดสอบตามระยะเวลาที่กำหนด(Huang et al. 2016) สำหรับตัวอย่างการนำแผนภูมิควบคุมไปใช้กับข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบล็อกนอร์มัล ศึกษาจาก Morrison(1958) , Ferrell(1958) , Huang et al. (2018) และ Huang(2021)

สมบัติโรบัสต์ที่มีอยู่ในแผนภูมิควบคุม EWMA ทำให้แผนภูมิควบคุมนี้สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการได้ดีถึงแม้ว่าข้อมูลจะไม่มีแจกแจงแบบปกติ และจากวรรณกรรมของแผนภูมิควบคุม EWMA ที่ได้มีการปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กและในกรณีข้อมูลไม่มีการแจกแจงปกติ ในปี ค.ศ.1992 Shamma & Shamma(1992) ได้นำเสนอแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสองครั้ง (Double Exponentially Weighted Moving Average: DEWMA) โดยอาศัยวิธีการปรับเรียบแบบเลขชี้กำลังมาประยุกต์ใช้กับแผนภูมิควบคุม EWMA โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก อีกทั้งยังนำแผนภูมิควบคุม DEWMA ไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับ

แผนภูมิควบคุม Shewhart และ EWMA ภายใต้การแจกแจงแบบปกติ โดยพิจารณาจากค่าความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุม (ARL_1) พบว่าแผนภูมิควบคุม DEWMA มีประสิทธิภาพดีกว่าสำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก ในปี ค.ศ.1999 Steiner (1999) ได้ปรับปรุงและพัฒนาแผนภูมิควบคุม EWMA โดยนำฟังก์ชันลดแบบเลขชี้กำลังมาคูณกับความกว้างของขีดจำกัดควบคุมทำให้แผนภูมิควบคุมที่ได้สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้รวดเร็วยิ่งขึ้นกว่า EWMA และให้ชื่อแผนภูมิควบคุมนี้คือ แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังที่มีการตอบสนองเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว (Fast Initial Response EWMA: FIR-EWMA) และในปี ค.ศ. 2014 Haq et al. (2014) ได้ปรับปรุงรูปแบบการตอบสนองเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว (Modified Fast Initial Response: MFIR) ทั้งในแผนภูมิควบคุม CUSUM (MFIR-CUSUM) และ EWMA (MFIR-EWMA) โดยปรับฟังก์ชันยกกำลังให้ขึ้นกับเวลา ซึ่งการปรับนี้จะช่วงลดค่าของขีดจำกัดควบคุมทำให้แผนภูมิควบคุมที่ศึกษามีประสิทธิภาพดีกว่า FIR-EWMA และ FIR-CUSUM

ในปี ค.ศ. 2020 Alevizakos et al. (2020) นำเสนอแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสามครั้ง (Triple Exponentially Weighted Moving Average: TEWMA) ซึ่งพัฒนามาจากแผนภูมิควบคุม DEWMA โดยการนำเอาเทคนิคของการปรับเรียบ (Smoothing technique) มาใช้ถึงสามครั้งทำให้แผนภูมิควบคุม TEWMA สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กได้ดียิ่งขึ้นกว่าแผนภูมิควบคุม DEWMA และแผนภูมิควบคุมนี้ยังมีสมบัติโรบัสต์เหมือนกับแผนภูมิควบคุม EWMA ทำให้สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้ดีถึงแม้ข้อมูลไม่มีการแจกแจงปกติ อีกทั้งยังนำแผนภูมิควบคุม TEWMA ไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักทั่วไป (Generally Weighted Moving Average: GWMA) DEWMA และ EWMA ภายใต้การแจกแจงแบบปกติมาตรฐาน การแจกแจงแกมมา การแจกแจงยูนิฟอร์มชนิดต่อเนื่อง โดยพิจารณาจากค่า ARL_1 พบว่าแผนภูมิควบคุม TEWMA มีประสิทธิภาพดีกว่าแผนภูมิควบคุม DEWMA EWMA สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก และดีกว่าแผนภูมิควบคุม GWMA บางกรณีขึ้นอยู่กับการให้น้ำหนักของ GWMA และในปี ค.ศ. 2022 Alevizakos et al. (2022)

ได้พัฒนาแผนภูมิควบคุมขึ้นมาโดยมีวัตถุประสงค์ให้แผนภูมิที่พัฒนาขึ้นมานั้นตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กได้ดีกว่าแผนภูมิควบคุม TEWMA และได้นำเอาเทคนิคของการปรับเรียบมาใช้กับแผนภูมิควบคุม EWMA ถึงสี่ครั้งและเรียกแผนภูมิควบคุมนี้ว่าแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสี่ครั้ง (Quadruple Exponentially Weighted Moving Average: QEWMA) Alevizakos et al. (2022) พบว่าแผนภูมิควบคุมนี้มีสมบัติโรบัสต์เหมือนแผนภูมิควบคุม TEWMA อีกทั้งยังนำแผนภูมิควบคุม QEWMA ไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับแผนภูมิควบคุม TEWMA DEWMA และ EWMA ภายใต้การแจกแจงแบบปกติมาตรฐาน การแจกแจงแกมมา การแจกแจงยูนิฟอร์มชนิดต่อเนื่อง โดยพิจารณาจากค่า ARL_1 พบว่าแผนภูมิควบคุม QEWMA มีประสิทธิภาพดีกว่าแผนภูมิควบคุม TEWMA DEWMA EWMA สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก

แผนภูมิควบคุมที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมนั้นมีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก อีกทั้งยังมีสมบัติโรบัสต์ทำให้สามารถใช้ได้กับข้อมูลที่ไม่มีการแจกแจงปกติ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุม TEWMA และ QEWMA รวมถึงการนำรูปแบบ FIR และ MFIR มาประยุกต์ใช้กับแผนภูมิควบคุม TEWMA และ QEWMA โดยกำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงแบบลือกนอร์มัล (Huang et al. 2016) การวัดประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมจะพิจารณาจากค่า ARL_1 เมื่อกำหนดให้ค่าความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการอยู่ในการควบคุม (ARL_0) คือ 500 และหากแผนภูมิควบคุมใดมีประสิทธิภาพดีค่า ARL_1 จะมีค่าน้อยกว่าแผนภูมิควบคุมอื่นๆ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การแจกแจงแบบลือกนอร์มัล

กำหนดให้ X เป็นตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่องที่มีการแจกแจงลือกนอร์มัลโดยมี μ และ σ เป็นพารามิเตอร์บ่งตำแหน่ง (location) และพารามิเตอร์บ่งขนาด (Scale) ตามลำดับ โดยที่ μ และ $\sigma > 0$ ซึ่ง $f(x)$ เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็น ของ X มีรูปแบบดังนี้

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2} & ; x > 0 \\ 0 & ; x \text{ Otherwise} \end{cases} \quad (2.1)$$

ค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของ X แทนด้วย

$$E(X) = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} \text{ และ } Var(X) = e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)$$

ตามลำดับ

2.2 แผนภูมิควบคุมที่ใช้ในงานวิจัย

1. แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสามครั้ง (Triple Exponentially Weighted Moving Average: TEWMA)

Alevizakos et al. (2020) นำเสนอและพัฒนาแผนภูมิควบคุมเพื่อให้ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กได้ดีกว่าแผนภูมิควบคุม DEWMA โดยการเพิ่มการปรับเรียบเข้าไปใน DEWMA อีกหนึ่งครั้งและให้ชื่อแผนภูมินี้ว่า TEWMA สถิติของแผนภูมิควบคุม TEWMA คือ

$$\begin{aligned} A_t &= \lambda X_t + (1-\lambda)A_{t-1} \\ B_t &= \lambda A_t + (1-\lambda)B_{t-1} \\ C_t &= \lambda B_t + (1-\lambda)C_{t-1} \end{aligned} \quad (2.2)$$

โดยที่ C_t คือ ตัวสถิติ TEWMA ลำดับที่ t ณ เวลา t

X_t คือ ค่าสังเกตของกระบวนการ ณ เวลา t

λ คือ ค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบ ($0 < \lambda < 1$)

A_t และ B_t คือ ตัวสถิติ EWMA ลำดับที่ 1 และ 2 ณ เวลา t ตามลำดับ

กำหนดตัวสถิติเริ่มต้น $A_0 = B_0 = C_0 = \theta_0$ คือ ค่าเฉลี่ยของกระบวนการ

เมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม ค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของ C_t คือ $E(C_t) = \theta_0$ และ

$$Var(C_t) = \left[\frac{6(1-\lambda)^6 \lambda}{(2-\lambda)^5} + \frac{12(1-\lambda)^4 \lambda^2}{(2-\lambda)^4} + \frac{7(1-\lambda)^2 \lambda^3}{(2-\lambda)^3} + \frac{\lambda^4}{(2-\lambda)^2} \right] \sigma^2$$

$$Var(Q_t) = \frac{\lambda^8}{36} \left[\frac{720d^5}{(1-d)^7} + \frac{2520d^4}{(1-d)^6} + \frac{3312d^3}{(1-d)^5} + \frac{1980d^2}{(1-d)^4} + \frac{504d}{(1-d)^3} + \frac{36}{(1-d)^2} \right] \sigma^2$$

$$\text{เมื่อ } d = (1-\lambda)^2$$

ดังนั้นขีดจำกัดควบคุมบน (UCL) และล่าง (LCL) ของแผนภูมิควบคุม QEWMMA คือ

$$\text{ขีดจำกัดควบคุมบนและล่าง } UCL / LCL = \theta_0 \pm L_2 \sqrt{Var(Q_t)} \quad (2.5)$$

เส้นกลาง (Central line: CL) $CL = \theta_0$

โดยที่ θ_0 คือ ค่าเฉลี่ยของกระบวนการ

λ คือ ค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบ ($0 < \lambda < 1$)

ดังนั้นขีดจำกัดควบคุมบน (UCL) และล่าง (LCL)

ของแผนภูมิควบคุม TEWMA คือ

ขีดจำกัดควบคุมบนและล่าง

$$UCL / LCL = \theta_0 \pm L_1 \sqrt{Var(C_t)} \quad (2.3)$$

เส้นกลาง (Central line: CL) $CL = \theta_0$

โดยที่ θ_0 คือ ค่าเฉลี่ยของกระบวนการ

λ คือ ค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบ ($0 < \lambda < 1$)

σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการ

L_1 คือ ความกว้างของขีดจำกัดควบคุมที่สอดคล้องกับ

$ARL_0 = 500$

2. แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสี่ครั้ง (Quadruple Exponentially

Weighted Moving Average: QEWMMA)

Alevizakos et al. (2022) พัฒนาแผนภูมิควบคุม QEWMMA โดยการเพิ่มการปรับเรียบเข้าไปในแผนภูมิควบคุม EWMA ถึงสี่ครั้ง เพื่อให้ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กได้ดีกว่าแผนภูมิควบคุม TEWMA สถิติของแผนภูมิควบคุม QEWMMA คือ

$$\begin{aligned} E_t &= \lambda X_t + (1-\lambda)E_{t-1} \\ D_t &= \lambda E_t + (1-\lambda)D_{t-1} \\ T_t &= \lambda D_t + (1-\lambda)T_{t-1} \\ Q_t &= \lambda T_t + (1-\lambda)Q_{t-1} \end{aligned} \quad (2.4)$$

โดยที่ Q_t คือ ตัวสถิติ QEWMMA ลำดับที่ t ณ เวลา t

X_t คือ ค่าสังเกตของกระบวนการ ณ เวลา t

λ คือ ค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบ ($0 < \lambda < 1$)

E_t, D_t และ T_t คือ ตัวสถิติ EWMA ลำดับที่ 1, 2 และ 3 ณ เวลา t ตามลำดับ

กำหนดตัวสถิติเริ่มต้น $E_0 = D_0 = T_0 = Q_0 = \theta_0$ คือ

ค่าเฉลี่ยของกระบวนการ

เมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม ค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของ Q_t คือ $E(Q_t) = \theta_0$ และ

3. การตอบสนองเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว(Fast Initial Response: FIR)

Steiner SH.(1999) ได้ปรับปรุงและพัฒนาแผนภูมิควบคุม EWMA โดยนำฟังก์ชันลดแบบเลขชี้กำลังมาคูณกับความกว้างของขีดจำกัดควบคุมทำให้แผนภูมิควบคุมสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงเริ่มต้นได้รวดเร็วยิ่งขึ้น รูปแบบของฟังก์ชันที่ทำให้แผนภูมิควบคุมมีการตอบสนองเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว(FIR) คือ

$$FIR = 1 - (1 - f)^{1+a(t-1)} \quad (2.6)$$

โดยงานวิจัยนี้กำหนด $a = 0.3$ และ $f = 0.5$ (Haq et al., 2014) เมื่อนำรูปแบบ FIR มาใช้ร่วมกับแผนภูมิควบคุม TEWMA ทำให้ได้แผนภูมิควบคุม FIR-TEWMA โดยสถิติของแผนภูมิควบคุม FIR-TEWMA จะเป็นเหมือนดังสมการ (2.2) แต่ขีดจำกัดควบคุมจะถูกปรับเป็น ดังนี้

ขีดจำกัดควบคุมบน (UCL) และล่าง (LCL) ของแผนภูมิควบคุม TEWMA คือ

ขีดจำกัดควบคุมบนและล่าง

$$UCL / LCL = \theta_0 \pm L_3(FIR)\sqrt{Var(C_t)} \quad (2.7)$$

เส้นกลาง (Central line: CL) $CL = \theta_0$

โดยที่ θ_0 คือ ค่าเฉลี่ยของกระบวนการ

λ คือ ค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบ ($0 < \lambda < 1$)

σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการ

L_3 คือ ความกว้างของขีดจำกัดควบคุมที่สอดคล้องกับ

$ARL_0 = 500$

เมื่อนำรูปแบบ FIR มาใช้ร่วมกับแผนภูมิควบคุม QEWMMA ทำให้ได้แผนภูมิควบคุม FIR-QEWMMA โดยสถิติของแผนภูมิควบคุม FIR-QEWMMA จะเป็นเหมือนดังสมการ (2.4) แต่ขีดจำกัดควบคุมจะถูกปรับเป็น ดังนี้

ขีดจำกัดควบคุมบน (UCL) และล่าง (LCL) ของแผนภูมิควบคุม QEWMMA คือ

ขีดจำกัดควบคุมบนและล่าง

$$UCL / LCL = \theta_0 \pm L_4(FIR)\sqrt{Var(Q_t)} \quad (2.8)$$

เส้นกลาง (Central line: CL) $CL = \theta_0$

โดยที่ θ_0 คือ ค่าเฉลี่ยของกระบวนการ

λ คือ ค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบ ($0 < \lambda < 1$)

σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการ

L_4 คือ ความกว้างของขีดจำกัดควบคุมที่สอดคล้องกับ

$ARL_0 = 500$

4. การปรับปรุงการตอบสนองเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว(Modified Fast Initial Response: MFIR)

Haq et al. (2014) ได้ปรับปรุงรูปแบบการตอบสนองเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว(Modified Fast Initial Response: MFIR) โดยปรับฟังก์ชันยกกำลังให้ขึ้นกับเวลา ซึ่งการปรับนี้จะช่วงลดค่าของขีดจำกัดควบคุมทำให้แผนภูมิควบคุมที่ศึกษามีประสิทธิภาพดีขึ้น รูปแบบของฟังก์ชันที่ปรับปรุงที่ทำให้แผนภูมิควบคุมมีการตอบสนองเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว(MFIR) คือ

$$MFIR = \left\{ 1 - (1 - f)^{1+a(t-1)} \right\}^{1+\frac{1}{t}} \quad (2.9)$$

โดยงานวิจัยนี้กำหนด $a = 0.3$ และ $f = 0.5$ (Haq et al., 2014) เมื่อนำรูปแบบ MFIR มาใช้ร่วมกับแผนภูมิควบคุม TEWMA ทำให้ได้แผนภูมิควบคุม MFIR-TEWMA สถิติของแผนภูมิควบคุม MFIR-TEWMA จะเป็นเหมือนดังสมการ(2.2) แต่ขีดจำกัดควบคุมจะถูกปรับเป็น ดังนี้

ขีดจำกัดควบคุมบน (UCL) และล่าง (LCL)

ของแผนภูมิควบคุม TEWMA คือ

ขีดจำกัดควบคุมบนและล่าง

$$UCL / LCL = \theta_0 \pm L_5(MFIR)\sqrt{Var(C_t)} \quad (2.10)$$

เส้นกลาง (Central line: CL) $CL = \theta_0$

โดยที่ θ_0 คือ ค่าเฉลี่ยของกระบวนการ

λ คือ ค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบ ($0 < \lambda < 1$)

σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการ

L_5 คือ ความกว้างของขีดจำกัดควบคุมที่สอดคล้องกับ

$ARL_0 = 500$

เมื่อนำรูปแบบ MFIR มาใช้ร่วมกับแผนภูมิควบคุม QEWMMA ทำให้ได้แผนภูมิควบคุม MFIR-QEWMMA โดยสถิติของแผนภูมิควบคุม MFIR-QEWMMA จะเป็นเหมือนดังสมการ (2.4) แต่ขีดจำกัดควบคุมจะถูกปรับเป็น ดังนี้

ขีดจำกัดควบคุมบน (UCL) และล่าง (LCL)

ของแผนภูมิควบคุม QEWMMA คือ

ขีดจำกัดควบคุมบนและล่าง

$$UCL / LCL = \theta_0 \pm L_6(MFIR)\sqrt{Var(Q_t)} \quad (2.11)$$

เส้นกลาง (Central line: CL) $CL = \theta_0$

โดยที่ θ_0 คือ ค่าเฉลี่ยของกระบวนการ

λ คือ ค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบ ($0 < \lambda < 1$)

σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการ

L_6 คือ ความกว้างของขีดจำกัดควบคุมที่สอดคล้องกับ

$ARL_0 = 500$

2.3 ความยาวรันเฉลี่ย (Average Run Length: ARL)

ค่าความยาวรันเฉลี่ย (Average Run Length: ARL) คือ จำนวนตัวอย่างเฉลี่ยที่ตกอยู่ในขีดจำกัดควบคุมก่อนที่กระบวนการส่งสัญญาณออกนอกขีดจำกัดควบคุมเป็นครั้งแรกโดยค่า ARL แบ่งออกเป็น 2 สถานะคือ

1. เมื่อกระบวนการอยู่ในการควบคุม (in-control process) ค่าความยาวรันเฉลี่ยเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $ARL_0 = 1/\alpha$ เมื่อ α คือ ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดประเภทที่ 1 หมายถึงค่าความน่าจะเป็นที่พบว่ากระบวนการออกนอกขีดจำกัดควบคุม เมื่อกระบวนการไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ARL_0

2. เมื่อกระบวนการอยู่นอกการควบคุม (out-of-control process) ค่าความยาวรันเฉลี่ยเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $ARL_1 = 1/(1-\beta)$ เมื่อ β คือ ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดประเภทที่ 2 หมายถึง ความน่าจะเป็นที่กระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม เมื่อกระบวนการเกิดการเปลี่ยนแปลง $1-\beta$ คือความน่าจะเป็นที่พบว่ากระบวนการออกนอกการควบคุม เมื่อกระบวนการเกิดการเปลี่ยนแปลง ค่า ARL_1 ควรจะมีค่าต่ำๆ หรือกล่าวได้ว่าเมื่อกระบวนการอยู่นอกการควบคุม แผนภูมิควบคุมส่งสัญญาณแจ้งเตือนบ่อยมากขึ้น

ในการวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) ในการคำนวณค่า ARL เป็นวิธีการศึกษาทดลองโดยทำการทดลองซ้ำๆ หลายครั้ง ซึ่งสามารถคำนวณค่า ARL ได้ดังนี้

$$ARL = \frac{\sum_{t=1}^M RL_t}{M}$$

โดยที่ M คือ จำนวนรอบการทำซ้ำ

RL_t คือ ค่าความยาวรัน เป็นจำนวนหน่วยตัวอย่างที่ถูกตรวจสอบจนกระทั่งพบว่ากระบวนการออกนอกขีดจำกัดควบคุมเป็นครั้งแรก ในการทำซ้ำครั้งที่ $t; t=1, 2, \dots, 1,000$

3. วิธีการวิจัย

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสามครั้ง (TEWMA) แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสี่ครั้ง (QEWMMA) แผนภูมิควบคุมแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสามครั้งที่มีการตอบสนองเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว (FIR-TEWMA) แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วง

น้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสี่ครั้งที่มีการตอบสนองเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว (FIR-QEWMA) แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสามครั้งที่มีการปรับปรุงการตอบสนองเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว (MFIR-TEWMA) และ แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสี่ครั้งที่มีการปรับปรุงการตอบสนองเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว (MFIR-QEWMA) เมื่อกำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงแบบล็อกนอร์มัล การศึกษาวิจัยนี้ใช้เกณฑ์วัดประสิทธิภาพจากค่าความยาวรันเฉลี่ย (Average Run Length: ARL) เมื่อกระบวนการอยู่นอกการควบคุม (out-of-control process : ARL_1) ถ้าแผนภูมิควบคุมใดที่ให้ค่า ARL_1 ต่ำสุดจะเป็นแผนภูมิควบคุมที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับขนาดการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ตำแหน่ง (Location parameter: μ) ที่ที่สุด เมื่อกำหนด $ARL_0 = 500$ งานวิจัยครั้งนี้จำลองข้อมูลด้วยวิธีมอนติคาร์โล ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. กำหนดค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบ (λ) สำหรับแผนภูมิควบคุม TEWMA QEWMMA FIR-TEWMA FIR-TEWMA MFIR-TEWMA และ MFIR-QEWMA เป็น 0.1, 0.3 และ 0.5 เมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม กำหนดพารามิเตอร์บ่งตำแหน่ง (μ_0) เป็น 1, 2, 3, 7 และ 15 พารามิเตอร์บ่งขนาด (σ_0) เป็น 1 และ 2
2. จำลองข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ

2.1 เมื่อกระบวนการอยู่ในการควบคุม ($ARL_0 = 500$) กำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงล็อกนอร์มัล ดังนี้ $LN(\mu_0 = 1, \sigma_0 = 1)$, $LN(\mu_0 = 3, \sigma_0 = 1)$, $LN(\mu_0 = 7, \sigma_0 = 1)$, $LN(\mu_0 = 15, \sigma_0 = 1)$, และ $LN(\mu_0 = 2, \sigma_0 = 2)$, โดยขนาดตัวอย่าง (n) เท่ากับ 1,000 กำหนดจำนวนรอบในการทำซ้ำ (M) เท่ากับ 1,000

2.2 เมื่อกระบวนการอยู่นอกการควบคุม กำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงล็อกนอร์มัลเป็น $LN(\mu_1, \sigma_0)$ เมื่อกำหนดขนาดการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ $\mu_1 = \mu_0 + \delta$ เมื่อ δ เท่ากับ 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1 และ 2 โดยขนาดตัวอย่าง (n) เท่ากับ 1,000 กำหนดจำนวนรอบในการทำซ้ำ (M) เท่ากับ 1,000

3. นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองในข้อ 2 มาคำนวณค่าสถิติ C_t และ Q_t ตามสมการที่ (2.2) และ (2.4) และตามลำดับ

4. คำนวณขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, QEWMA, FIR-TEWMA, FIR-QEWMA, MFIR-TEWMA และ MFIR-QEWMA คือ UCL และ LCL ตามสมการที่ (2.3), (2.5), (2.7), (2.8), (2.10) และ (2.11) ตามลำดับ

5. นำค่าสถิติที่คำนวณได้ของทั้ง 2 แผนภูมิควบคุมในข้อ 3 มาเปรียบเทียบกับขีดจำกัดควบคุมของแต่ละแผนภูมิควบคุมที่ได้ในข้อ 4 เพื่อหาจำนวนหน่วยตัวอย่างที่อยู่ภายใต้การควบคุมจนกระทั่งพบว่า กระบวนการออกนอกขีดจำกัดควบคุมเป็นครั้งแรกซึ่งเรียกว่า ค่าความยาวรัน (RL_t)

6. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 5 จนกว่าจะครบ 1,000 รอบในแต่ละสถานการณ์ คือ $RL_1, RL_2, \dots, RL_{1,000}$

7. คำนวณค่า ARL แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ
กรณีที่กระบวนการอยู่ในการควบคุม (in-control process)

7.1 นำค่า RL_t ที่ได้จากข้อที่ 6 มาหาค่า ARL_0 ดังนี้ $ARL_0 = (\sum_{t=1}^M RL_t) / 1,000$
โดยที่ RL_t คือ ค่าความยาวรันเป็นจำนวนหน่วยตัวอย่างที่อยู่ภายใต้การควบคุมจนกระทั่งพบว่ากระบวนการออกนอกขีดจำกัดควบคุมเป็นครั้งแรกในการจำลองข้อมูลครั้งที่ $t; t=1, 2, \dots, 1,000$ หากได้ค่า ARL_0 มีค่าเท่ากับ 500 จะทำการเก็บค่า L และคำนวณค่า UCL มาใช้ในการหาค่า ARL_1

กรณีที่กระบวนการอยู่นอกการควบคุม (out-control process)

7.2 นำค่า RL_t ที่ได้จากข้อที่ 6 มาหาค่า ARL_1 (โดยข้อ 5 จะนำค่าสถิติที่ได้มาเปรียบเทียบกับ UCL ที่ได้จาก ARL_0 มีค่าเท่ากับ 500) ดังนี้ $ARL_1 = (\sum_{t=1}^M RL_t) / 1,000$
โดยที่ RL_t คือ ค่าความยาวรันเป็นจำนวนหน่วยตัวอย่างที่อยู่ภายใต้การควบคุมจนกระทั่งพบว่า กระบวนการออกนอกขีดจำกัดควบคุมเป็นครั้งแรกในการจำลองข้อมูลครั้งที่ $t; t=1, 2, \dots, 1,000$

8. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมจากค่าความยาวรันเฉลี่ยที่หาได้มาได้ในข้อ 7.2 กรณีเมื่อกระบวนการผลิตอยู่นอกการควบคุม โดยแผนภูมิควบคุมที่ให้ค่า ARL_1 ต่ำที่สุดจะเป็นแผนภูมิควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

4. ผลการวิจัย

1.การกำหนดความกว้างของขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุม

ตารางที่ 1 เป็นการแสดงค่าความกว้างของขีดจำกัดของแผนภูมิควบคุม TEWMA, FIR-TEWMA, MFIR-TEWMA, QEWMA, FIR-QEWMA และ MFIR-QEWMA โดยกำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงแบบลอการิทึมและกำหนดค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบของทุกแผนภูมิควบคุมคือ 0.1, 0.3 และ 0.5 เมื่อกระบวนการอยู่ในการควบคุม ($ARL_0 = 500$)

2.ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม

2.1 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงลอการิทึม $LN(1,1)$

2.1.1 จากตารางที่ 2 และรูปที่ 1 กรณี $\lambda = 0.1$ พบว่าเมื่อ $0.01 \leq \delta \leq 2$ แผนภูมิควบคุม MFIR-TEWMA, FIR-TEWMA และ TEWMA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีที่สุดใกล้เคียงกัน

2.1.2 จากตารางที่ 2 และรูปที่ 2 กรณี $\lambda = 0.3$ พบว่าเมื่อ $0.01 \leq \delta \leq 0.09$ แผนภูมิควบคุม MFIR-QEWMA มีแนวโน้มมีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีที่สุด เมื่อ $0.1 \leq \delta \leq 0.5$ แผนภูมิควบคุม MFIR-QEWMA และ FIR-QEWMA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีที่สุดใกล้เคียงกัน และเมื่อ $1 \leq \delta \leq 2$ แผนภูมิควบคุม MFIR-TEWMA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีที่สุด

2.1.3 จากตารางที่ 2 และรูปที่ 3 กรณี $\lambda = 0.5$ พบว่าเมื่อ $0.01 \leq \delta \leq 0.5$ แผนภูมิควบคุม MFIR-QEWMA มีแนวโน้มมีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีที่สุด และเมื่อ $1 \leq \delta \leq 2$ แผนภูมิควบคุม MFIR-TEWMA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีที่สุด

2.2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงลอการิทึม $LN(3,1)$

2.2.1 จากตารางที่ 3 และรูปที่ 1 กรณี $\lambda = 0.1$ พบว่าเมื่อ $0.01 \leq \delta \leq 0.09$ แผนภูมิควบคุม FIR-TEWMA และ MFIR-TEWMA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของ

2.3.2 จากตารางที่ 4 และรูปที่ 2 กรณี $\lambda = 0.3$ พบว่าเมื่อ $0.01 \leq \delta \leq 0.09$ แผนภูมิควบคุม FIR-TEWMA, FIR-QEWMA และ MFIR-QEWMA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีที่สุดใกล้เคียงกัน เมื่อ $0.1 \leq \delta \leq 0.5$ แผนภูมิควบคุม FIR-QEWMA และ MFIR-TEWMA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการ

2.4.3 จากตารางที่ 5 และรูปที่ 3 กรณี $\lambda = 0.5$ พบว่าเมื่อ $0.01 \leq \delta \leq 0.09$ แผนภูมิควบคุม MFIR-TEWMA และ MFIR-QEWMA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีที่สุดใกล้เคียงกัน และเมื่อ $0.1 \leq \delta \leq 0.5$ แผนภูมิควบคุม FIR-QEWMA และ MFIR-QEWMA มีแนวโน้มมีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลง

พารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีที่สุดใกล้เคียงกัน เมื่อ $1 \leq \delta \leq 2$ แผนภูมิควบคุม MFIR-TEWMA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีที่สุด

2.5 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงลอกลอนัล

$LN(2, 2)$

2.5.1 จากตารางที่ 6 และรูปที่ 1 กรณี $\lambda = 0.1$ พบว่าเมื่อ $0.01 \leq \delta \leq 0.09$ แผนภูมิควบคุม MFIR-TEWMA และ QEWMMA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีที่สุดใกล้เคียงกัน เมื่อ $0.1 \leq \delta \leq 0.5$ แผนภูมิควบคุม QEWMMA มีแนวโน้มมีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีที่สุด และเมื่อ $1 \leq \delta \leq 2$ แผนภูมิควบคุม FIR-TEWMA และ MFIR-TEWMA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีที่สุดใกล้เคียงกัน

2.5.2 จากตารางที่ 6 และรูปที่ 2 กรณี $\lambda = 0.3$ พบว่าเมื่อ $0.01 \leq \delta \leq 0.09$ แผนภูมิควบคุม TEWMA และ FIR-TEWMA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีที่สุดใกล้เคียงกัน เมื่อ $0.1 \leq \delta \leq 0.5$ แผนภูมิควบคุม QEWMMA และ FIR-QEWMMA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีที่สุดใกล้เคียงกัน และเมื่อ $1 \leq \delta \leq 2$ แผนภูมิควบคุม MFIR-QEWMMA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีที่สุด

2.5.3 จากตารางที่ 6 และรูปที่ 3 กรณี $\lambda = 0.5$ พบว่าเมื่อ $0.01 \leq \delta \leq 0.09$ แผนภูมิควบคุม QEWMMA และ FIR-QEWMMA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีที่สุดใกล้เคียงกัน และเมื่อ $0.1 \leq \delta \leq 2$ แผนภูมิควบคุม MFIR-QEWMMA มีแนวโน้มมีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีที่สุด

ตารางที่ 1 ค่าความกว้างของขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, FIR-TEWMA, MFIR-TEWMA, QEWMMA, FIR-QEWMMA และ MFIR-QEWMMA

การแจกแจงแบบลอกลอนัล	λ	ค่าความกว้างของขีดจำกัดควบคุม					
		TEWMA	FIR-TEWMA	MFIR-TEWMA	QEWMMA	FIR-QEWMMA	MFIR-QEWMMA
$LN(\mu_0 = 1, \sigma_0 = 1)$	0.1	2.1527	2.1527	2.15225	2.0141	2.0140	2.0120
	0.3	3.4025	3.41515	3.4250	3.1450	3.1490	3.1425
	0.5	4.4900	4.5000	4.5355	4.1490	4.1600	4.1475
$LN(\mu_0 = 3, \sigma_0 = 1)$	0.1	2.1515	2.1505	2.1472	2.0193	2.0185	2.0175
	0.3	3.4015	3.4150	3.4350	3.1460	3.1350	3.1465
	0.5	4.4950	4.5100	4.5225	4.1272	4.1741	4.1600
$LN(\mu_0 = 7, \sigma_0 = 1)$	0.1	2.1515	2.1515	2.155	2.0185	2.02145	2.0215
	0.3	3.4000	3.4025	3.4310	3.1465	3.13575	3.1470
	0.5	4.5000	4.5050	4.5495	4.1750	4.1781	4.1775
$LN(\mu_0 = 15, \sigma_0 = 1)$	0.1	2.1510	2.1553	2.1615	2.01867	2.0215	2.0190
	0.3	3.4025	3.42015	3.43095	3.1480	3.1360	3.1480
	0.5	4.4950	4.4998	4.5325	4.1550	4.1755	4.1750
$LN(\mu_0 = 2, \sigma_0 = 2)$	0.1	14.7505	14.6995	14.5700	13.9000	14.02525	14.0250
	0.3	21.8942	21.8950	21.8945	20.3250	20.3300	20.3250
	0.5	28.7500	28.7615	28.7500	26.3110	26.4600	26.4500

ตารางที่ 2 ความยาวคลื่นเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, FIR-TEWMA, MFIR-TEWMA, QEWM, FIR-QEWM และ MFIR-QEWM กรณี $LN(1,1)$

Lambda (λ)	Shift (δ)	ความยาวคลื่นเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
		TEWMA	FIR-TEWMA	MFIR-TEWMA	QEWM	FIR-QEWM	MFIR-QEWM
0.1	0.01	483.0198	479.2723	478.4197	483.6501	483.2883	477.7794
	0.02	465.7977	458.3208	461.4096	453.9182	455.3678	457.7778
	0.03	432.8939	436.1969	431.0833	438.9904	438.7676	437.1313
	0.04	410.7496	410.1703	409.0305	416.2398	416.3066	411.7314
	0.05	393.653	393.7144	387.8723	393.0483	391.5893	393.4979
	0.06	361.7451	359.0508	359.2895	364.6518	365.8722	371.7756
	0.07	339.5169	340.0975	335.5289	342.7651	349.0594	348.9476
	0.08	313.8787	315.4943	321.9327	321.8442	324.5225	320.7444
	0.09	295.1077	298.6805	295.6305	302.9001	299.9595	303.5977
	0.1	276.8942	282.2706	277.3704	281.5091	284.493	277.3919
	0.2	140.829	141.1645	140.7437	142.6897	142.1146	143.3345
	0.3	80.8368	81.3107	79.464	83.0133	83.3486	84.0622
	0.4	52.0074	52.0104	52.3704	55.7207	55.3288	55.9555
	0.5	37.4511	37.0404	36.5602	42.1682	42.1266	41.7401
	1	16.0342	15.6982	15.7473	21.3277	21.148	21.2176
	2	7.7157	7.2062	7.1077	11.9495	11.6957	11.6263
0.3	0.01	482.4633	482.7033	486.0487	481.7413	488.2745	477.9899
	0.02	471.7159	468.9364	461.5802	467.3013	463.506	460.1672
	0.03	447.9396	444.9251	448.1381	452.354	451.3618	442.9585
	0.04	431.415	430.1552	434.349	431.8042	430.7674	425.3804
	0.05	418.1415	413.2971	412.2812	420.1213	416.4845	412.9396
	0.06	396.5489	398.9097	402.7515	398.6454	398.5606	393.4094
	0.07	382.1229	385.8598	381.5713	372.8383	375.7935	377.2342
	0.08	365.7162	360.4596	363.0004	363.1392	357.9454	358.3895
	0.09	350.243	350.4863	351.4681	343.9926	346.6718	340.5349
	0.1	335.5545	333.5946	336.2953	330.0565	332.3106	321.9961
	0.2	206.0779	205.5548	210.2521	199.5415	194.5128	196.9485
	0.3	128.5754	127.4927	125.6589	118.2546	118.2055	116.3831
	0.4	80.8905	79.3555	81.2385	74.7856	74.3361	73.6383
	0.5	52.6965	52.3018	51.7145	48.8717	47.0715	47.5668
	1	12.0951	11.0543	10.8549	12.7094	11.9579	11.9151
	2	3.4352	2.6991	2.4309	4.5781	3.9808	3.7642
0.5	0.01	494.4026	483.6112	478.281	490.7671	484.882	478.7972
	0.02	473.1578	468.2195	477.5198	470.4285	476.2907	466.1464
	0.03	457.5541	458.2205	457.0461	462.9091	459.4666	448.0118
	0.04	445.4689	443.8663	444.2772	456.3887	442.8861	446.4415
	0.05	437.5762	428.9528	428.9077	432.4983	429.4777	430.3864
	0.06	426.5352	419.0216	412.6852	418.2074	412.5116	411.4292
	0.07	407.6746	407.2159	408.3741	409.252	400.8296	397.9335
	0.08	393.6671	390.2663	385.6315	392.1782	385.3072	382.854
	0.09	380.2691	377.1225	378.0894	379.3466	374.3231	369.2826
	0.1	369.896	362.1346	366.7496	362.5787	360.3321	351.9161
	0.2	259.8649	250.3726	249.5082	248.9346	244.4305	238.7314
	0.3	169.1902	167.0487	164.2303	159.4425	159.6523	153.9562
	0.4	114.1713	107.9587	108.242	106.5484	102.7522	100.1793
	0.5	77.4845	73.0618	70.5293	71.206	68.7201	66.9153
	1	15.8618	13.196	12.3167	14.8132	13.0458	12.4443
	2	2.6333	1.7832	1.3601	2.9964	2.253	1.8332

ตารางที่ 3 ความยาวคลื่นเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, FIR-TEWMA, MFIR-TEWMA, QEWM, FIR-QEWM และ MFIR-QEWM กรณี $LN(3,1)$

Lambda (λ)	Shift (δ)	ความยาวคลื่นเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
		TEWMA	FIR-TEWMA	MFIR-TEWMA	QEWM	FIR-QEWM	MFIR-QEWM
0.1	0.01	479.1402	476.4827	478.048	485.4268	485.453	476.4661
	0.02	461.4958	454.6417	443.1974	460.1742	463.9838	465.0416
	0.03	431.9679	428.2551	429.0523	441.1709	441.1526	437.2632
	0.04	409.2245	406.3885	404.4811	417.4126	415.1758	413.8252
	0.05	388.2419	386.0908	383.6481	392.5832	390.0089	398.8022
	0.06	358.8016	360.8749	356.148	368.5939	368.2199	369.2651
	0.07	340.4176	337.5848	338.8505	343.2895	342.9859	337.8602
	0.08	316.0065	314.333	318.4422	317.4763	327.0159	325.9964
	0.09	298.453	294.4466	293.2128	302.3246	297.8542	300.313
	0.1	276.5299	277.9784	275.4254	282.0189	279.3811	280.1253
	0.2	139.0786	139.6641	138.9384	142.0732	140.8847	143.3006
	0.3	80.3901	80.4247	81.0375	83.5434	83.4439	83.6339
	0.4	52.1155	51.9336	52.4169	56.2965	55.5401	56.2064
	0.5	37.1627	37.7896	37.2149	42.0741	41.887	41.9066
	1	15.8929	15.7972	15.6539	21.4017	21.1064	21.2123
	2	7.704	7.2136	7.1398	11.9268	11.7048	11.6509
0.3	0.01	484.6489	482.9525	489.3817	485.7706	479.2624	482.2953
	0.02	470.4089	467.978	470.6887	464.7813	465.3254	459.4538
	0.03	455.7339	453.6747	445.0535	446.1267	452.4977	447.1396
	0.04	430.8436	430.1718	439.4327	434.881	425.3584	431.7874
	0.05	421.5333	413.8882	415.3177	414.4791	411.6143	413.3943
	0.06	399.042	396.0065	400.0046	402.3313	385.7289	395.3603
	0.07	381.4698	384.576	389.1228	377.986	369.4231	374.3431
	0.08	369.6444	368.6679	364.9429	359.7133	360.4603	359.3741
	0.09	350.1965	347.998	356.9057	344.1585	340.8392	345.9438
	0.1	333.6116	335.6521	343.167	329.776	324.2708	324.4537
	0.2	211.1089	205.7806	208.6176	199.657	195.9233	198.3251
	0.3	127.4846	123.7865	127.8802	119.0731	117.015	117.6897
	0.4	80.5095	78.5094	80.0584	74.1668	71.9875	73.4500
	0.5	52.7033	51.9168	52.2280	49.2731	48.4259	49.3147
	1	12.307	11.3156	10.9718	12.7833	12.0053	11.9951
	2	3.4178	2.7359	2.3698	4.6044	3.9992	3.7664
0.5	0.01	484.2506	488.2521	482.8565	483.0992	484.3008	475.8853
	0.02	472.1185	471.7873	473.1784	476.8063	467.6901	469.2786
	0.03	462.989	462.0909	448.5933	460.1837	462.8473	456.8352
	0.04	450.319	445.8905	436.4536	445.0399	454.4227	445.0147
	0.05	436.7853	429.6817	423.7399	429.792	426.9959	423.7709
	0.06	424.8102	423.265	414.0363	420.6574	416.1328	407.4787
	0.07	404.1608	406.5325	403.0577	390.5607	409.5717	400.1931
	0.08	394.3672	397.1061	390.3616	387.0799	391.3242	387.9588
	0.09	379.7559	379.7592	378.6953	378.9759	378.1999	371.4323
	0.1	371.5114	366.0262	357.7473	359.8346	366.9796	362.8678
	0.2	259.8961	254.7476	246.9186	239.6824	243.0554	240.8431
	0.3	172.0499	167.082	163.525	160.3139	160.0839	156.0401
	0.4	115.6256	109.6698	106.7539	104.7638	104.2052	99.9061
	0.5	79.6683	73.2997	72.2405	71.3471	69.4034	66.6976
	1	15.9603	13.1868	12.3736	14.959	12.8843	12.1234
	2	2.6514	1.7955	1.3714	2.9929	2.2467	1.8577

ตารางที่ 4 ความยาวคลื่นเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, FIR-TEWMA, MFIR-TEWMA, QEWM, FIR-QEWM และ MFIR-QEWM กรณี $LN(7,1)$

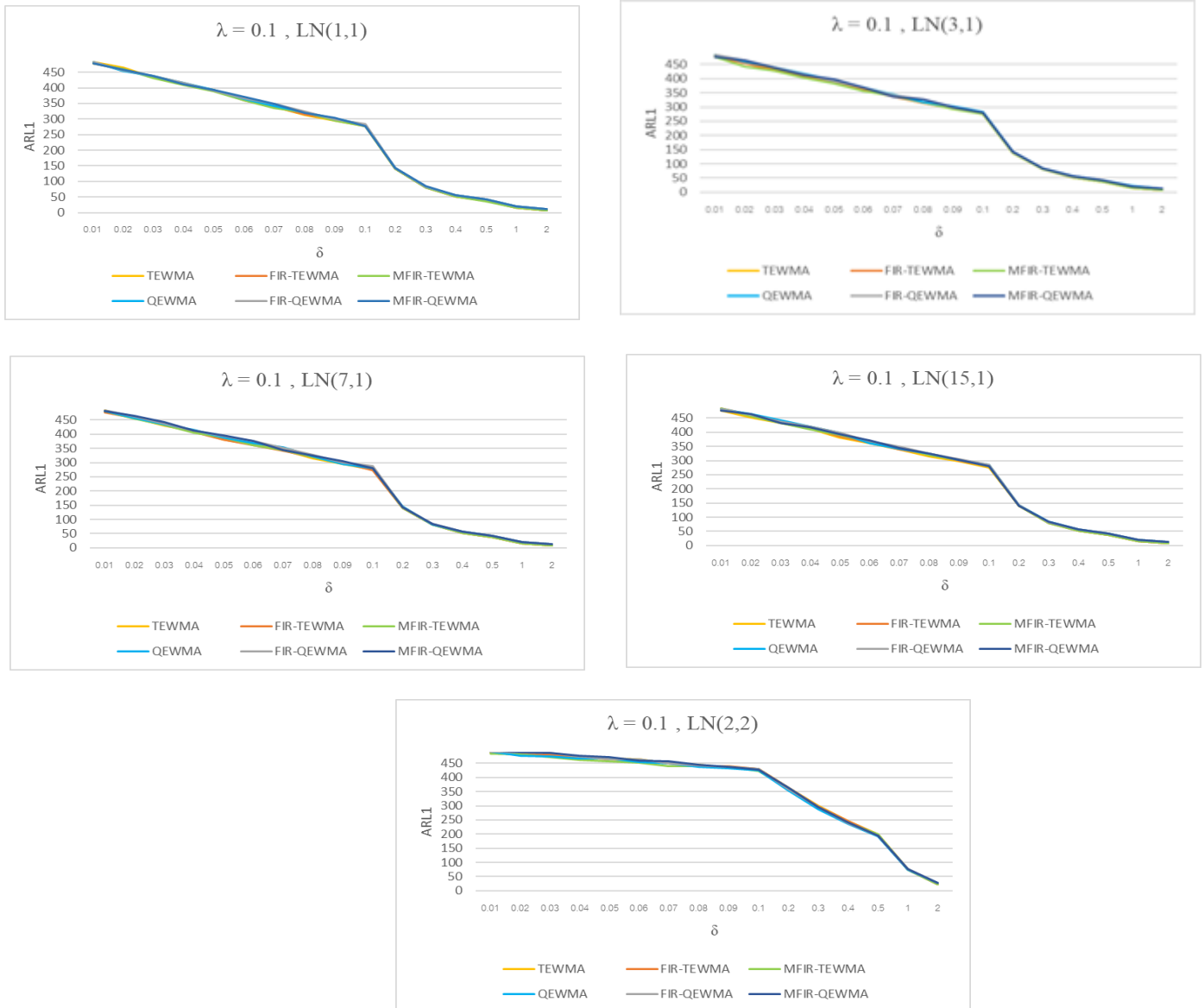
Lambda (λ)	Shift (δ)	ความยาวคลื่นเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
		TEWMA	FIR-TEWMA	MFIR-TEWMA	QEWM	FIR-QEWM	MFIR-QEWM
0.1	0.01	485.1784	477.3888	482.3784	482.3386	484.4017	483.0222
	0.02	456.2084	458.2071	455.669	458.504	461.5795	465.9084
	0.03	430.2092	431.5698	431.7191	436.384	436.5856	441.3879
	0.04	409.938	407.3007	404.9037	415.1097	412.3139	412.3443
	0.05	381.1216	382.2006	389.0028	388.6121	392.2688	395.5346
	0.06	363.5268	362.0141	362.5455	370.0072	376.268	375.3728
	0.07	344.0473	341.0799	345.4635	353.4866	351.0501	344.2625
	0.08	313.7026	320.2128	320.4967	323.1752	326.9719	323.563
	0.09	294.3352	299.0596	295.7443	296.4075	301.1271	305.3474
	0.1	275.6899	273.435	282.1383	281.2918	288.4578	281.5368
	0.2	140.1645	140.0516	141.5231	144.6153	142.3601	143.6711
	0.3	81.0155	80.8731	81.0794	82.2128	83.0128	83.8104
	0.4	52.0254	52.3092	52.0596	55.8826	56.3101	56.5081
	0.5	37.7053	37.3816	37.1188	42.136	41.7689	41.7512
	1	15.9985	15.6528	15.68	21.371	21.1866	21.2976
	2	7.7391	7.2131	7.1299	11.9516	11.7112	11.644
0.3	0.01	482.1133	479.4904	480.5166	483.2927	482.6771	475.7962
	0.02	469.4765	458.4945	468.4915	470.0326	464.1054	464.3508
	0.03	449.9445	447.2383	452.1688	448.7555	443.2361	445.8938
	0.04	424.239	425.3176	430.4331	429.3812	426.2977	429.8854
	0.05	417.6022	415.3145	423.8164	411.552	404.9385	407.6435
	0.06	398.8242	393.1207	403.3224	398.3534	391.1722	395.3899
	0.07	376.1236	372.3425	387.9785	377.7999	371.5902	373.9538
	0.08	367.8237	360.5836	371.088	363.6398	357.665	361.6307
	0.09	354.07	346.8839	355.3938	343.0771	344.9334	339.6619
	0.1	333.6984	331.8303	333.7377	329.8967	328.0402	328.4884
	0.2	208.4228	205.4345	209.2287	197.5064	193.7251	198.7499
	0.3	130.0281	124.6128	127.3964	117.2258	116.5135	116.0897
	0.4	79.6966	77.9685	79.1499	75.1232	73.7485	73.5257
	0.5	52.5559	50.9888	52.1881	49.0841	47.5559	48.7046
	1	12.1993	11.2106	10.9966	12.6969	12.0877	11.9097
	2	3.4373	2.6906	2.4296	4.6001	3.9685	3.7998
0.5	0.01	494.4897	486.7522	484.8588	489.2958	487.4943	483.9532
	0.02	477.4962	481.0851	472.2483	478.45	478.4148	478.1309
	0.03	463.6646	459.9231	456.6821	465.4306	462.7973	460.0177
	0.04	448.2471	448.1441	447.3529	452.9532	449.3272	450.9492
	0.05	438.834	428.8575	437.7252	436.8592	433.6905	428.8177
	0.06	424.947	412.8649	415.2806	423.3926	419.1594	418.2087
	0.07	408.3955	404.6865	406.9122	412.7143	405.5043	406.9633
	0.08	394.6801	390.1487	389.2428	400.5821	392.4522	383.9540
	0.09	379.7615	377.4577	377.5908	380.9974	377.795	377.3381
	0.1	375.474	366.9901	368.414	372.7848	361.0389	359.0972
	0.2	261.3853	248.5686	252.048	249.8725	247.6841	241.3972
	0.3	174.3256	165.8048	167.3307	161.839	158.6265	160.0381
	0.4	116.1433	110.9299	109.9633	106.9188	104.8035	103.177
	0.5	79.5736	73.244	72.5222	73.3927	69.8545	68.1753
	1	15.9813	13.1485	12.2982	15.0325	12.961	12.5597
	2	2.6571	1.7869	1.3664	3.044	2.2775	1.8813

ตารางที่ 5 ความยาวคลื่นเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, FIR-TEWMA, MFIR-TEWMA, QEWMA, FIR-QEWMA และ MFIR-QEWMA กรณี $LN(15,1)$

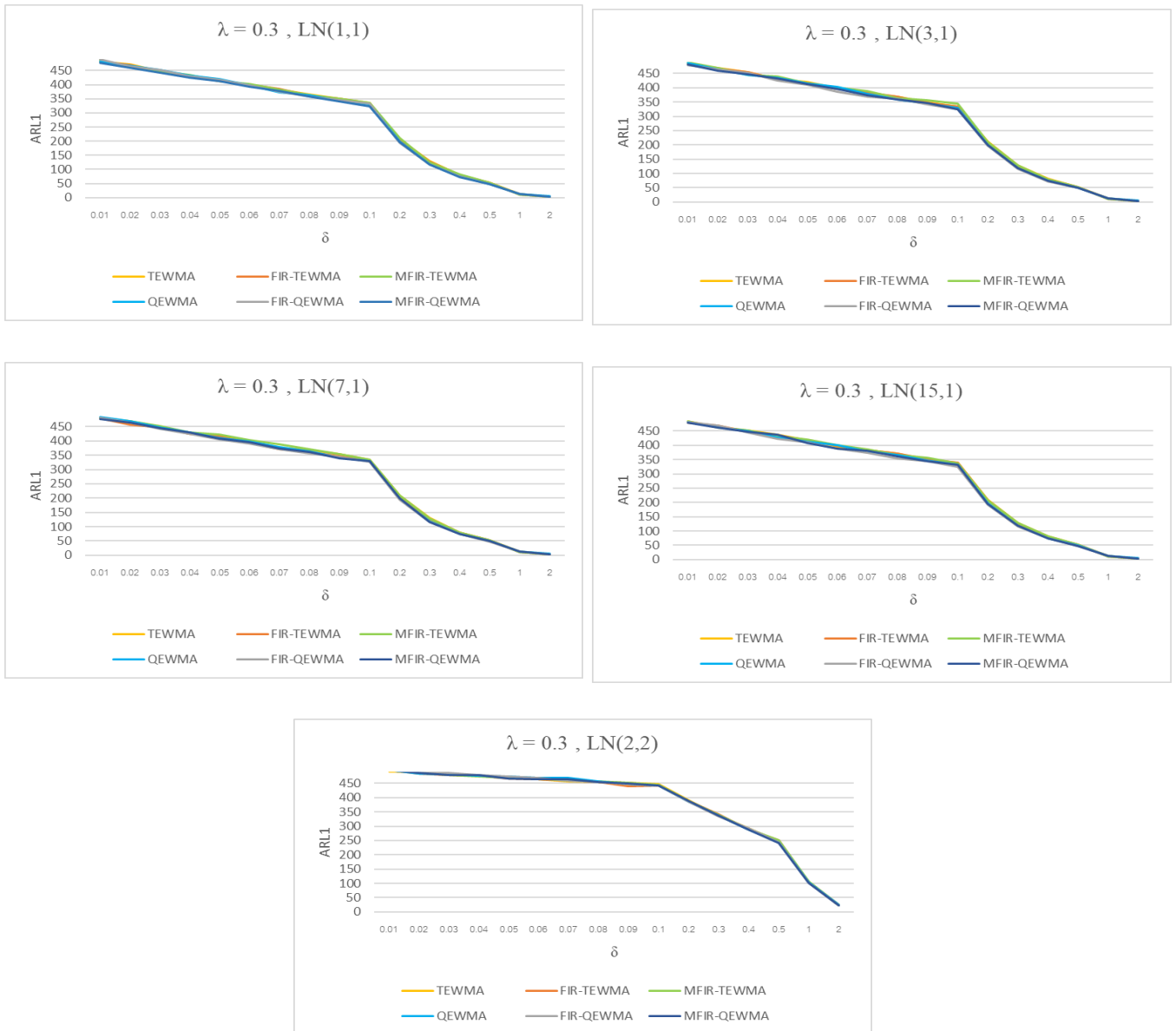
Lambda (λ)	Shift (δ)	ความยาวคลื่นเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
		TEWMA	FIR-TEWMA	MFIR-TEWMA	QEWMA	FIR-QEWMA	MFIR-QEWMA
0.1	0.01	475.937	484.3609	483.5698	481.1846	482.1776	477.9901
	0.02	453.2184	461.5415	456.9397	464.0485	461.7976	465.3355
	0.03	431.6794	438.4721	432.1004	442.9056	438.264	432.2598
	0.04	413.4566	415.7596	410.2992	421.372	421.0863	418.6351
	0.05	381.8502	385.8212	390.9967	398.3444	397.71	393.3018
	0.06	362.2636	363.3203	366.7593	361.3063	367.8424	371.6576
	0.07	339.0266	340.112	346.3671	342.8851	349.1454	343.8576
	0.08	315.5527	324.5711	320.0834	324.1043	324.7158	324.4725
	0.09	296.7949	300.791	303.2816	302.5343	305.036	301.4484
	0.1	276.1328	280.8579	281.5902	284.6658	286.1617	281.4701
	0.2	140.1249	140.8434	140.9699	142.3487	141.8846	141.1982
	0.3	79.5777	81.749	80.2262	83.3128	82.4171	83.3282
	0.4	52.6605	52.4796	51.905	55.8828	56.1896	56.249
	0.5	37.2742	37.2767	37.3942	41.6493	42.1036	42.1446
	1	15.9587	15.6811	15.7175	21.3047	21.1849	21.2736
	2	7.7302	7.204	7.1492	11.9028	11.7269	11.642
0.3	0.01	484.892	479.8528	478.7139	482.8058	481.2121	485.1723
	0.02	464.6367	470.4488	461.9402	464.5402	469.6077	462.4206
	0.03	452.5144	447.6822	451.4246	451.1341	445.429	447.6259
	0.04	438.477	435.2673	432.3623	426.7587	423.7018	438.1182
	0.05	418.6965	417.9733	420.0914	412.2087	411.4656	408.9373
	0.06	396.872	399.0986	401.3514	399.6397	387.5075	389.2805
	0.07	384.502	384.6925	387.121	379.2515	372.9048	380.418
	0.08	370.3842	372.5518	367.1616	367.3267	355.0583	360.3834
	0.09	346.3816	352.1242	357.8124	347.8426	343.3659	344.7073
	0.1	340.2261	339.0176	337.9899	333.2738	324.9559	332.2669
	0.2	210.448	207.1809	206.7497	197.4486	192.5725	194.4035
	0.3	127.9479	125.2521	127.767	118.6335	115.5012	117.7555
	0.4	82.1957	79.9306	80.3887	74.2019	74.1419	72.9727
	0.5	52.9014	52.1191	51.5953	49.4186	48.2214	47.8955
	1	12.0708	11.4476	11.0957	12.7936	11.917	11.8914
	2	3.4359	2.747	2.3985	4.5861	3.9824	3.7689
0.5	0.01	487.2318	486.3471	483.395	493.6334	489.4968	486.4079
	0.02	479.2009	469.2125	467.3122	473.9432	474.7343	468.5222
	0.03	462.672	458.4457	457.0018	466.1539	463.0972	457.884
	0.04	453.9883	442.7568	448.7015	447.8206	441.622	444.5619
	0.05	438.1488	428.6821	426.183	439.675	436.9225	427.7664
	0.06	418.8849	414.1485	418.0803	420.2145	417.3382	418.0414
	0.07	406.1462	404.206	403.6546	406.5173	405.4059	402.4615
	0.08	401.7954	391.8339	392.8169	386.2977	385.9509	388.9392
	0.09	386.4011	373.8616	372.9435	384.8125	381.1549	378.7172
	0.1	370.1771	362.6344	363.0433	365.1663	363.0184	367.685
	0.2	254.7748	250.4892	248.6746	245.5574	242.9802	239.7441
	0.3	171.8404	162.4986	165.9166	161.5904	161.7869	156.8277
	0.4	113.7513	110.4267	106.7785	108.4408	106.33	103.069
	0.5	78.715	73.6954	71.7097	71.9973	68.7825	68.1791
	1	15.7948	13.2234	12.3304	15.022	13.0278	12.5511
	2	2.6594	1.8055	1.3907	2.9828	2.2294	1.8663

ตารางที่ 6 ความยาวคลื่นเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, FIR-TEWMA, MFIR-TEWMA, QEWM, FIR-QEWM, MFIR-QEWM กรณี $LN(2, 2)$

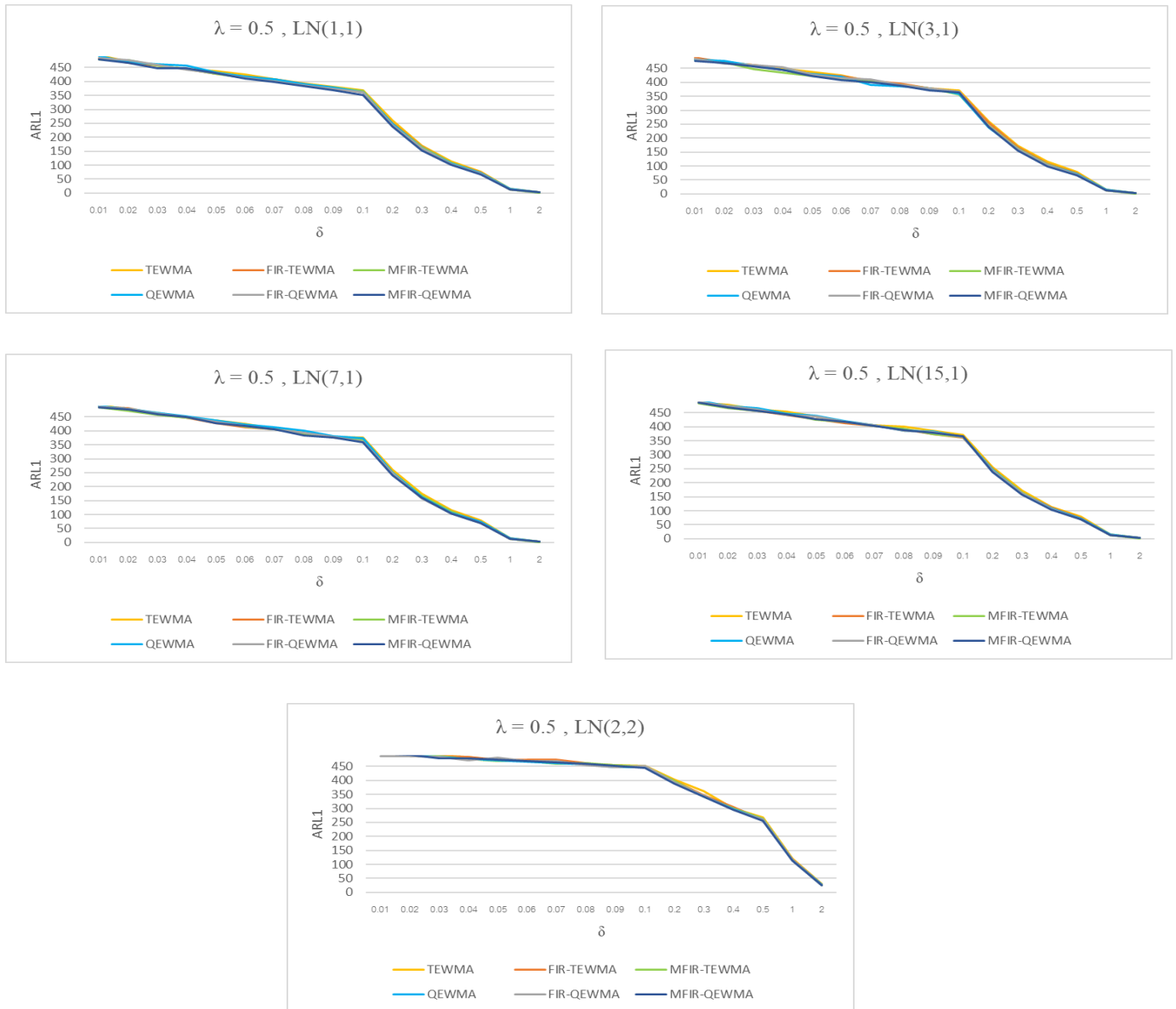
Lambda (λ)	Shift (δ)	ความยาวคลื่นเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
		TEWMA	FIR-TEWMA	MFIR-TEWMA	QEWM	FIR-QEWM	MFIR-QEWM
0.1	0.01	489.6952	488.9869	484.8269	492.814	491.5941	495.7707
	0.02	485.408	483.7966	481.7152	477.7324	489.389	489.8652
	0.03	482.3686	478.8612	471.7521	474.5096	488.0107	487.8347
	0.04	475.0468	471.1831	463.4535	468.1156	474.4234	477.4935
	0.05	467.9984	463.9843	458.1458	467.4939	465.4308	471.0919
	0.06	464.4584	460.5592	451.2832	454.231	465.3408	460.2584
	0.07	449.7521	452.5032	440.6421	450.6621	449.3001	457.5036
	0.08	446.1454	439.7064	440.7077	437.522	443.5299	445.2607
	0.09	435.4716	439.196	437.2267	432.0665	437.4557	438.2297
	0.1	431.4639	430.3146	422.5696	426.4326	429.2824	428.6779
	0.2	362.9555	363.1745	361.433	355.3018	359.508	362.8332
	0.3	300.5711	297.6072	294.6589	286.9166	294.627	295.2983
	0.4	246.7231	246.8283	238.8543	237.259	238.8241	241.4155
	0.5	199.1183	196.5638	199.734	191.9831	195.6554	194.9532
	1	76.3521	74.6839	74.7785	75.0525	77.4864	76.4595
	2	23.4968	23.1439	23.1369	28.3708	28.3577	28.2247
0.3	0.01	490.8208	496.898	497.3691	496.0298	497.8163	495.9358
	0.02	488.1931	484.9808	486.1531	484.8449	488.2825	486.8148
	0.03	482.3669	478.9003	479.0184	481.7298	486.3656	479.0475
	0.04	475.966	477.0975	474.9011	475.9945	478.2793	479.0768
	0.05	469.9457	467.395	469.3133	474.8471	473.8775	467.0866
	0.06	464.259	465.5195	467.2059	470.3541	468.9031	465.2898
	0.07	458.2008	459.455	460.1824	469.6939	459.7603	463.5429
	0.08	455.2126	455.1727	457.3789	456.3822	453.8041	454.2034
	0.09	452.4232	439.4132	451.589	446.7577	446.4079	449.9964
	0.1	448.3089	443.5449	445.5791	441.6283	441.6147	443.2012
	0.2	389.8521	388.8308	388.1517	384.9588	386.6029	388.6237
	0.3	337.2932	341.6392	338.6271	337.5791	334.1731	337.094
	0.4	292.3936	287.5214	289.4014	287.999	293.0663	288.2155
	0.5	246.8162	250.1817	251.221	244.1706	243.6044	240.6935
	1	107.2158	103.7591	105.3498	104.2825	101.6838	101.0529
	2	24.6266	23.3074	22.8007	24.0231	23.2465	23.1052
0.5	0.01	497.3417	496.207	493.5659	493.1819	486.6388	496.5297
	0.02	497.0889	492.6538	492.6028	490.0014	486.9109	491.9119
	0.03	489.6173	487.4976	487.7349	483.538	484.3772	479.7384
	0.04	484.0834	484.9974	476.215	476.9411	471.7946	480.0258
	0.05	472.8123	475.278	468.7687	473.0214	482.0376	474.483
	0.06	468.8296	474.1912	469.1841	469.8272	469.6383	466.5921
	0.07	467.2927	474.1295	459.0634	462.0407	468.8479	464.4248
	0.08	460.9532	461.7278	462.5594	457.7464	455.8424	458.8691
	0.09	454.2211	450.3349	455.5699	448.1815	447.8063	451.2214
	0.1	451.2126	447.822	450.424	447.5469	451.3138	444.8733
	0.2	403.572	397.3266	398.7123	392.0726	393.3612	389.0673
	0.3	360.5866	346.2253	341.9914	343.8676	344.9325	342.4837
	0.4	300.3068	304.4443	300.8115	298.2837	294.9509	296.34
	0.5	267.7441	257.6446	264.1503	261.389	260.3457	254.8124
	1	122.0227	118.682	116.7396	115.7299	116.4984	114.6894
	2	29.0737	26.5294	24.9971	27.4595	25.6059	25.8536



รูปที่ 1 ค่า ARL_1 ของแผนภูมิควบคุมสำหรับการแจกแจง กรณีใช้ $\lambda = 0.1$



รูปที่ 2 ค่า ARL_1 ของแผนภูมิควบคุมสำหรับทุกการแจกแจง กรณีใช้ $\lambda = 0.3$



รูปที่ 3 ค่า ARL_1 ของแผนภูมิควบคุมสำหรับการแจกแจง กรณีใช้ $\lambda = 0.5$

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมโดยพิจารณาจากค่าความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุม (ARL_1) ดังนั้นหากแผนภูมิควบคุมใดมีประสิทธิภาพดีที่สุดแผนภูมินั้นจะมีค่าความยาวรันเฉลี่ยน้อยที่สุด

ค่าความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสามครั้ง (TEWMA) แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสามครั้งที่มีการตอบสนองเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว (FIR-TEWMA) แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสามครั้งที่มีการตอบสนองเริ่มต้นอย่างรวดเร็วปรับปรุง (MFIR-TEWMA) แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสี่ครั้ง (QEWMA) แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสี่ครั้งที่มีการตอบสนองเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว (FIR-QEWMA) แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสี่ครั้งที่มีการตอบสนองเริ่มต้นอย่างรวดเร็วปรับปรุง (MFIR-QEWMA) เมื่อข้อมูลมีการแจกแจงลอการิทึม (LN) ซึ่งกำหนดพารามิเตอร์บ่งตำแหน่งเท่ากับ 1, 3, 7, 15, 2 พารามิเตอร์บ่งขนาดเท่ากับ 1, 2 และกำหนดพารามิเตอร์ปรับเรียบ (λ) ของแผนภูมิควบคุมทั้ง 6 ชนิด เท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5 พบว่าเมื่อกำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจง $LN(1,1)$, $LN(3,1)$, $LN(7,1)$, $LN(15,1)$ และกำหนดให้ $\lambda = 0.1$ แล้วจะทำให้แผนภูมิควบคุม TEWMA, FIR-TEWMA และ MFIR-TEWMA มีประสิทธิภาพดีที่สุดใกล้เคียงกัน และเมื่อให้ $\lambda = 0.3$ แล้วจะทำให้แผนภูมิควบคุม FIR-QEWMA และ MFIR-QEWMA มีประสิทธิภาพดีที่สุดใกล้เคียงกัน และแผนภูมิควบคุม MFIR-QEWMA จะมีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อกำหนด $\lambda = 0.5$ อย่างไรก็ตามเมื่อกำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจง $LN(2,2)$ และ $\lambda = 0.1, 0.3$ และ 0.5 พบว่า แผนภูมิควบคุมที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดใกล้เคียงกันคือ QEWMA, FIR-QEWMA และ MFIR-QEWMA

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกนำแผนภูมิควบคุม EWMA ที่นำเทคนิคปรับเรียบสามครั้ง (TEWMA) และสี่ครั้ง (QEWMA) อีกทั้งยังนำเทคนิคการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (FIR) และเทคนิคการตอบสนองอย่างรวดเร็วที่มีการปรับปรุง (MFIR) มาใช้กับแผนภูมิควบคุม TEWMA และ QEWMA โดยนำแผนภูมิควบคุมเหล่านี้มา

เปรียบเทียบประสิทธิภาพพบว่า แผนภูมิควบคุม QEWMA ให้ประสิทธิภาพดีกว่าแผนภูมิควบคุม TEWMA เพียงเล็กน้อยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกำหนัด λ ซึ่งจากผลดังตารางที่ 2 ถึงตารางที่ 6 พบว่า ค่า $\lambda = 0.3$ และ $\lambda = 0.5$ จะทำให้แผนภูมิควบคุม QEWMA ให้ประสิทธิภาพดีกว่าแผนภูมิควบคุม TEWMA ในทำนองเดียวกันพบว่าการนำ FIR และ MFIR มาใช้กับ TEWMA จะทำให้แผนภูมิควบคุม TEWMA มีประสิทธิภาพดีกว่าแผนภูมิควบคุม QEWMA หรือ การนำเทคนิคการตอบสนองอย่างรวดเร็วมาใช้กับแผนภูมิควบคุม TEWMA ทำให้แผนภูมิควบคุมที่ได้มีประสิทธิภาพดีกว่าการเพิ่มเทคนิคการปรับเรียบอีก 1 ครั้งให้กับแผนภูมิควบคุม TEWMA

6. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุม เมื่อกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ (Out of Control) โดยพิจารณาจากค่า ARL_1 ภายใต้ $ARL_0 = 500$ เท่านั้น แต่จะไม่นำ ARL_0 มาเปรียบเทียบกับเพราะถือว่ากระบวนการยังคงทำงานเป็นปกติหรือยังอยู่ภายใต้การควบคุม (In Control)

7. การประยุกต์กับข้อมูลจริง

ข้อมูลที่นำมาใช้เป็นชุดข้อมูลที่แสดงถึงค่าความเครียดสูงสุดที่วัสดุสามารถทนได้ก่อนการแตกหักเรียกว่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (UTS) มีหน่วยเป็น MPa ที่ได้รับการทดลอง (Ivana, et.al, 2019) เมื่อนำมาทดสอบด้วยสถิติแอนเดอร์สันพบว่าการแจกแจงแบบลอการิทึมโดยมีพารามิเตอร์บ่งตำแหน่งและขนาดคือ 6.11 และ 0.009 ตามลำดับและจะกำหนดให้เป็นพารามิเตอร์เมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุม ส่วนค่าสถิติแอนเดอร์สันและค่าพีมีค่าเท่ากับ 0.334 และ 0.477 ตามลำดับ

ตารางที่ 7 ค่าสถิติและค่าขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, FIR-TEWMA, MFIR-TEWMA, QEWMA, FIR-QEWMA และ MFIR-QEWMA

t	data set	TEWMA		FIR-TEWMA		MFIR-TEWMA		QEWMA		FIR-QEWMA		MFIR-QEWMA	
		L=0.50625		L=0.50565		L=0.50495		L=0.524		L=0.5235		L=0.5234	
		สถิติ	UCL	สถิติ	UCL	สถิติ	UCL	สถิติ	UCL	สถิติ	UCL	สถิติ	UCL
1	448.1	410.60	407.99	410.60	406.88	410.60	406.21	407.93	407.84	407.93	406.79	407.93	406.16
2	449.4	418.80	407.99	418.80	407.08	418.80	406.75	413.36	407.84	413.36	406.98	413.36	406.67
3	450.8	427.26	407.99	427.26	407.25	427.26	407.05	420.31	407.84	420.31	407.14	420.31	406.96
4	445.6	433.81	407.99	433.81	407.39	433.81	407.26	427.06	407.84	427.06	407.27	427.06	407.15
5	457.4	439.79	407.99	439.79	407.50	439.79	407.41	433.43	407.84	433.43	407.38	433.43	407.30
6	452.1	444.26	407.99	444.26	407.59	444.26	407.53	438.84	407.84	438.84	407.47	438.84	407.41
7	448.1	446.78	407.99	446.78	407.67	446.78	407.62	442.81	407.84	442.81	407.54	442.81	407.49
8	444.1	447.46	407.99	447.46	407.73	447.46	407.69	445.13	407.84	445.13	407.59	445.13	407.56
9	450.8	447.99	407.99	447.99	407.78	447.99	407.75	446.56	407.84	446.56	407.64	446.56	407.62
10	456.1	449.25	407.99	449.25	407.82	449.25	407.80	447.90	407.84	447.90	407.68	447.90	407.66
11	458.7	451.15	407.99	451.15	407.85	451.15	407.83	449.53	407.84	449.53	407.71	449.53	407.69
12	456.1	452.80	407.99	452.80	407.88	452.80	407.86	451.16	407.84	451.16	407.73	451.16	407.72
13	448.1	453.01	407.99	453.01	407.90	453.01	407.89	452.09	407.84	452.09	407.75	452.09	407.74
14	452.1	452.82	407.99	452.82	407.91	452.82	407.90	452.45	407.84	452.45	407.77	452.45	407.76
15	450.8	452.42	407.99	452.42	407.93	452.42	407.92	452.43	407.84	452.43	407.78	452.43	407.78
16	442.8	450.99	407.99	450.99	407.94	450.99	407.93	451.71	407.84	451.71	407.79	451.71	407.79
17	449.4	449.95	407.99	449.95	407.95	449.95	407.94	450.83	407.84	450.83	407.80	450.83	407.80
18	445.5	448.92	407.99	448.92	407.96	448.92	407.95	449.88	407.84	449.88	407.81	449.88	407.80
19	450.8	448.64	407.99	448.64	407.96	448.64	407.96	449.26	407.84	449.26	407.81	449.26	407.81
20	452.1	449.03	407.99	449.03	407.97	449.03	407.96	449.15	407.84	449.15	407.82	449.15	407.82

จากตารางที่ 7 เมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม กำหนดให้พารามิเตอร์บ่งตำแหน่งและพารามิเตอร์บ่งขนาดเท่ากับ 6 และ 0.009 ตามลำดับซึ่งจะทำให้ได้ค่า L ของสถิติแต่ละแผนภูมิควบคุมมาคำนวณค่าสถิติและขีดจำกัดควบคุมบนของแต่ละแผนภูมิควบคุมดังตารางที่ 7 และกำหนดค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบสำหรับทุกแผนภูมิควบคุมเป็น 0.1 จากตารางที่ 7 พบว่าแผนภูมิควบคุม TEWMA, FIR-TEWMA, MFIR-TEWMA, QEWMA, FIR-QEWMA และ MFIR-QEWMA สามารถตรวจพบค่าที่ออกนอกการควบคุม ได้ในครั้งแรกในลำดับที่ $t = 1$ ซึ่งจากการเปรียบเทียบพบว่าแผนภูมิควบคุมทั้ง 6 มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

เอกสารอ้างอิง

- Alevizakos, V., Chatterjee, K., & Koukouvinos, C. (2021). The triple exponentially weighted moving average control chart. *Quality Technology & Quantitative Management*, 18(3), 326–354. <http://dx.doi.org/10.1080/16843703.2020.1809063>
- Alevizakos, V., Chatterjee, K., & Koukouvinos, C. (2022). The quadruple exponentially weighted moving average control chart. *Quality Technology & Quantitative Management*, 19(1), 50–73. <http://dx.doi.org/10.1080/16843703.2021.1989141>
- Ferrell, E. D. (1958). Control charts for lognormal universe. *Industrial Quality Control*, 15, 4–6.
- Haq, A., Brown, J., & Moltchanova, E. (2014). Improved fast initial response features for exponentially weighted moving average and cumulative sum control charts. *Quality and Reliability Engineering*

International, 30(5), 697–710. <http://dx.doi.org/10.1002/qre.1521>

- Huang, W.H.(2021). Control Charts for Joint Monitoring of the Lognormal Mean and Standard Deviation. *Symmetry*. 13(4),1–28. <https://doi.org/10.3390/sym13040549>
- Huang, W. H., Yeh, A. B., & Wang, H. (2018). A control chart for the lognormal standard deviation. *Quality Technology & Quantitative Management*, 15(1), 1–36. <https://doi.org/10.1080/16843703.2017.1304044>
- Huang, W. H., Wang, H., & Yeh, A. B. (2016). Control charts for the lognormal mean. *Quality and Reliability Engineering International*, 32(4), 1407–1416. <https://doi.org/10.1002/qre.1841>
- PoboČíková, I., SedliaČková, Z., Michalková, M., & Kuchariková, L. (2019). Monte Carlo comparison of estimation methods for the two-parameter lognormal distribution. In *MATEC Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925408002>
- Montgomery, D. C. (2012), *Introduction to statistical quality control*. 7th ed., New York. Wiley.
- Morrison, J. (1958). The lognormal distribution in quality control. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 7(3), 160–172.
- Page, E. S. (1954). Cumulative Sum Control Chart. *Technometrics*, 3, 1–9.
- Roberts, S. W. (1959). Control chart tests based on geometric moving averages. *Technometrics*, 1(3), 239–250.
- Shamma, S. E. & Shamma, A.K.(1992). Development and evaluation of control charts using double exponentially weighted moving averages. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 9(6), 18–25, <https://doi.org/10.1108/02656719210018570>
- Shewhart, W. A. (1932). *Economic control of quality of manufactured product*. Van Nostrand.

Steiner, S. H. (1999). EWMA control charts with time-varying control limits and fast initial response. *Journal of Quality Technology*, 31(1), 75–86. <http://dx.doi.org/10.1080/00224065.1999.11979899>.

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสียชีวิตของผู้ป่วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019

Factors influencing the mortality of COVID-19 patients

ซุรฟา อภิบาลแบ¹, นิชนันท์ อักษรชู¹, ไกลรุ่ง สามารถ^{1,2*}

Surfa Aphibalbae¹, Nichanan Aksornchoo¹, Klairung Samart^{1,2*}

¹สาขาวิทยาศาสตร์การคำนวณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประเทศไทย

¹Division of Computational Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Thailand

²หน่วยวิจัยสถิติและการประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประเทศไทย

²Statistics and Applications Research Unit, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Thailand

บทคัดย่อ

การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา หรือโรคติดเชื้อไวรัสโควิด-19 ได้แพร่กระจายไปทั่วโลกอย่างรวดเร็วส่งผลกระทบต่ออย่างร้ายแรงต่อระบบสาธารณสุข สำหรับผู้ที่ติดเชื้อโควิด-19 ที่มีโรคประจำตัวอยู่ก่อนแล้วยิ่งทำให้เพิ่มอาการความรุนแรงและความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตเพิ่มขึ้น การวิจัยในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะทางประชากรของผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสียชีวิตของผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 ประชากรในการศึกษานี้ ได้แก่ ผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 ที่ได้รับการรายงานระหว่างวันที่ 14 กุมภาพันธ์ - 31 เมษายน พ.ศ. 2563 โดยข้อมูลเป็นแบบเรียลไทม์ (Real-time Data) ถูกรวบรวมจากแหล่งเก็บข้อมูล COVID-19 แบบโอเพนซอร์ส (open-source) ซึ่งได้ข้อมูลผู้ติดเชื้อโควิด-19 จำนวน 481,289 ราย จาก 141 ประเทศ มีขนาดตัวอย่างจำนวน 1,143 คน ที่มีข้อมูลครบถ้วนสมบูรณ์ ใช้สถิติเชิงพรรณนาและสถิติเชิงอนุมาน วิเคราะห์โดยใช้การทดสอบไคกำลังสอง (Chi-square test) หรือ Fisher's exact test และใช้การวิเคราะห์การถดถอยลอจิสติก (Logistic regression) วิเคราะห์หาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการเสียชีวิตในผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 และสร้าง ROC curve เพื่อหาจุดตัด (cut-off) ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทำนายโอกาสของการเสียชีวิตของผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสียชีวิตของผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 คือ เพศ (OR=2.262 ; 95%CI= 1.519-3.367) อายุ (OR=1.118; 95%CI= 1.102-1.134) การเป็นโรคมะเร็ง (OR=0.193 ; 95%CI=0.039-0.949) อาการปอดอักเสบ (OR=7.173 ; 95%CI= 2.818-18.254) และอาการหายใจลำบากเฉียบพลัน (OR=11.488 ; 95%CI=4.105-32.148) โดยจะเพิ่มความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตในผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 อย่างมีนัยสำคัญ และมีความถูกต้องของการพยากรณ์ร้อยละ 86.0 ส่วนการวิเคราะห์ความไวด้วยเส้นโค้ง ROC พบว่ามีความถูกต้องสูง

คำสำคัญ: โควิด-19, โรคร่วม, กราฟเส้นโค้ง ROC, การวิเคราะห์การถดถอยลอจิสติก

ABSTRACT

COVID-19 has spread quickly throughout the world. The public health system has been significantly impacted by this pandemic. For people infected with COVID-19 who have comorbidity, this increases the severity of symptoms and increases the risk of mortality. The objective of this research was to characterize the COVID-19 patient and find the influence factors for the mortality of COVID-19 patients. The study population included COVID-19 cases collected between 14 February and 31 April 2020. Real-time data were collected from open-source COVID-19 repositories which collected data on 481,289 COVID-19 cases from 141 countries with a sample size of 1,143 people with complete data. The data were analyzed using descriptive statistics and inferential statistics. The Chi-square test or Fisher's exact test and multivariable logistic regression were used for identifying the factors associated with mortality in patients with COVID-19 and constructed ROC curves to determine the appropriate cut-off point to predict the chance of mortality in patients with COVID-19. The results found that five factors: Gender (OR=2.262 ; 95%CI= 1.519-3.367), Age (OR= 1.118 ; 95%CI= 1.102 - 1.134), Malignancy (OR= 0.193 ; 95%CI=0.039 - 0.949), Pneumonia (OR= 7.173 ; 95%CI= 2.818 - 18.254), and ARDS (OR=11.488 ; 95%CI=4.105 - 32.148) influenced the mortality of COVID-19 patients with percentage of correct predictions of 86%. Moreover, the sensitivity by ROC curve also showed very high accuracy.

KEYWORDS: Covid-19, Comorbidity, ROC-curve, Logistic regression

*Corresponding Author: klairung.s@psu.ac.th

Received: 03/03/2023; Revised: 21/01/2024; Accepted: 30/01/2024

1. บทนำ

จากสถานการณ์การระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา - 19 ตั้งแต่ เดือนธันวาคม 2562 เป็นต้นมา ณ เมืองอู่ฮั่น มณฑลหูเป่ย์ ประเทศจีน ได้แพร่กระจายไปทั่วโลกอย่างรวดเร็วและการระบาดในครั้งนี้ได้ส่งผลกระทบต่อระบบสาธารณสุข และในต้นเดือนตุลาคม 2565 ได้มีการยืนยันผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 ประมาณ 616 ล้านรายทั่วโลก และมีผู้เสียชีวิตมากกว่า 6 ล้านราย (World Health Organization, 2022) โดยผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด - 19 อาจมีอาการไม่รุนแรงแต่ต้องใช้ระยะเวลาในการฟื้นตัว เช่น สูญเสียกลิ่นหรือต่อมรับรส ท้องร่วง (Alali et al., 2021) ไข้หนาวสั่น และไอ (Ryan et al., 2021) ไปจนถึงปอดบวมขั้นรุนแรง ผู้ป่วยที่ป่วยหนักมักมีอาการเฉียบพลัน อาการหายใจลำบาก (ARDS) ที่ต้องการการบำบัดด้วยเครื่องช่วยหายใจแบบบูรณาการในหอผู้ป่วยหนัก (ICU) อาจเป็นขั้นวิกฤตถึงขั้นเสียชีวิตได้ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญทางด้านสาธารณสุขที่ทำให้เกิดการสูญเสียแก่ประชาชน (ปิยนุช, 2565)

นอกเหนือจากสถานการณ์การแพร่ระบาดที่ร้ายแรงแล้ว ความรุนแรงของโรคโควิด-19 เป็นอีกประเด็นหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากผู้ติดเชื้อมีความรุนแรงของอาการหลายระดับทั้งกลุ่มที่ไม่มีอาการเลย มีอาการเล็กน้อย ไปจนถึงมีอาการขั้นรุนแรง จากการศึกษาผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 ในประเทศจีนและอิหร่าน พบว่าผู้ป่วยส่วนใหญ่เป็นกลุ่มผู้สูงอายุและผู้ที่มีโรคประจำตัว เช่น โรคเบาหวาน โรคความดันโลหิตสูง โรคหัวใจและหลอดเลือด โรคปอด โรคเมะเร็ง และโรคไตเรื้อรัง ซึ่งโรคเรื้อรังเหล่านี้นับเป็นหนึ่งในปัจจัยเสี่ยงที่ทำให้อาการของผู้ป่วยโรคโควิด-19 รุนแรงยิ่งขึ้น (Ma et al., 2020; Wu & McGoogan, 2020; Emami et al., 2021) โดยเฉพาะผู้ป่วยที่อายุมากกว่า 60 ปี ที่เป็นโรคเบาหวาน โรคความดันโลหิตสูง โรคอ้วน และโรคไตเรื้อรังในประเทศสเปนและเม็กซิโก มีความสัมพันธ์กับการเสียชีวิตอย่างมีนัยสำคัญ (Posso et al., 2020; Salinas-Aguirre et al.,

2022) โดยเฉพาะโรคเมะเร็งมีแนวโน้มที่จะส่งผลทำให้เกิดเหตุการณ์ไม่พึงประสงค์ในผู้ป่วยโรคโควิด-19 ในประเทศจีน อินเดีย และอิตาลี โดยพบว่าโรคเมะเร็งมีผลต่อการเสียชีวิตหลังจากออกจากโรงพยาบาลสูงเป็น 3.64 เท่า (Guan et al., 2020; Djaharuddin et al., 2021; Novelli et al., 2023)

นอกจากนี้ จากการศึกษาของ Aktar et al. (2021) ซึ่งใช้ machine learning ในการหาปัจจัยเสี่ยงต่อการเสียชีวิตของผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 จาก 141 ประเทศ พบว่าโรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง โรคหัวใจและหลอดเลือด โรคไตเรื้อรัง โรคเบาหวาน โรคเมะเร็ง โรคความดันโลหิตสูง รวมถึงโรคหอบหืด เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการจำแนกผู้ป่วยที่เสียชีวิตเทียบกับผู้ที่รอดชีวิตจากโควิด-19 ในขณะที่อายุและเพศเป็นตัวทำนายการตายที่สำคัญที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น แต่ก็ยังมีบางการศึกษาที่ได้ผลการศึกษาที่ไม่สอดคล้องกัน เช่น จากการศึกษาอัตราการตายและปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการเสียชีวิตของผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 ในประเทศไทยของ พิศาล และ สิทธิชัย (2565) พบว่า เพศ โรคถุงลมโป่งพองและโรคปอดเรื้อรัง โรคเมะเร็ง และโรคตับแข็ง ไม่มีความสัมพันธ์กับการเสียชีวิตของผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19

ในการศึกษานี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาลักษณะทางประชากรของผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเสียชีวิตของผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 เพื่อเป็นแนวทางให้หน่วยงานทางสาธารณสุขในการรักษาให้เหมาะสม ลดความรุนแรงของการเจ็บป่วย และลดอัตราการเสียชีวิตของผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 โดยงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยลอจิสติก (Logistic regression) และสร้างเส้นโค้ง Receiver Operating Characteristic (ROC) เพื่อหาจุดตัดที่เหมาะสมในการทำนายโอกาสของการเสียชีวิตของผู้ป่วยติดเชื้อโควิด-19 โดยพิจารณาพื้นที่ใต้โค้ง ROC หรือที่เรียกว่า AUC (Area under the ROC Curve)

ตารางที่ 1 แสดงผลวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นกับโรคร่วมและอาการทางคลินิก

ปัจจัย	ผลการรักษา (ร้อยละ)		จำนวน (ร้อยละ)	p-value
	เสียชีวิต	รอดชีวิต		
เพศ				0.009
	ชาย	208 (18.2)	468 (40.9)	676 (59.1)
	หญิง	111 (9.7)	356 (31.1)	467 (40.9)
อายุ (ปี)				<0.001
	< 20 ปี	1 (0.1)	56 (4.9)	57 (5.0)
	20-39 ปี	9 (0.8)	271 (23.7)	280 (24.5)
	40-59 ปี	68 (5.9)	378 (33.1)	446 (39.0)
	60-80 ปี	146 (12.8)	107 (9.4)	253 (22.1)
	> 80 ปี	95 (8.3)	12 (1.0)	107 (9.4)
โรคความดันโลหิต				<0.001
	ไม่มีโรค	245 (21.4)	798 (69.8)	1043 (91.3)
	มีโรค	74 (6.5)	26 (2.3)	100 (8.7)
โรคหัวใจและหลอดเลือด				<0.001
	ไม่มีโรค	303 (26.5)	819 (71.7)	1122 (98.2)
	มีโรค	16 (1.4)	5 (0.4)	21 (1.8)
โรคหลอดเลือดสมอง				0.006
	ไม่มีโรค	315 (27.6)	824 (72.1)	1139 (99.7)
	มีโรค	4 (0.3)	0 (0.0)	4 (0.3)
โรคมะเร็ง				0.275
	ไม่มีโรค	315 (27.6)	819 (71.7)	1134 (99.2)
	มีโรค	4 (0.3)	5 (0.4)	9 (0.8)
โรคเบาหวาน				<0.001
	ไม่มีโรค	262 (22.9)	801 (70.1)	1063 (93.0)
	มีโรค	57 (5.0)	23 (2.0)	80 (7.0)
โรคตับ				0.078
	ไม่มีโรค	317 (27.7)	824 (72.1)	1141 (99.8)
	มีโรค	2 (0.2)	0 (0.0)	2 (0.2)
โรคไตเรื้อรัง				<0.001
	ไม่มีโรค	301 (26.3)	822 (71.9)	1123 (98.3)
	มีโรค	18 (1.6)	2 (0.2)	20 (1.7)
โรคระบบประสาทเสื่อม				0.078
	ไม่มีโรค	317 (27.7)	824 (72.1)	1141 (99.8)
	มีโรค	2 (0.2)	0 (0.0)	2 (0.2)
โรคติดเชื้อ				1.000
	ไม่มีโรค	319 (27.9)	822 (71.9)	1141 (99.8)
	มีโรค	0 (0.0)	2 (0.2)	2 (0.2)
การมีประวัติการผ่าตัด				1.000
	ไม่มีโรค	318 (27.8)	822 (71.9)	1140 (99.7)
	มีโรค	1 (0.1)	2 (0.2)	3 (0.3)
โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง				0.007
	ไม่มีโรค	313 (27.4)	822 (71.9)	1135 (99.3)
	มีโรค	6 (0.5)	2 (0.2)	8 (0.7)
โรคหอบหืด				0.153
	ไม่มีโรค	314 (27.5)	819 (71.7)	1133 (99.1)
	มีโรค	5 (0.4)	5 (0.4)	10 (0.9)
อาการหายใจลำบาก				<0.001
	ไม่มีอาการ	271 (23.7)	813 (71.1)	1084 (94.8)
	มีอาการ	48 (4.2)	11 (1.0)	59 (5.2)
อาการปวดอวัยวะ				<0.001
	ไม่มีอาการ	253 (22.1)	816 (71.4)	1069 (93.5)
	มีอาการ	66 (5.8)	8 (0.7)	74 (6.5)
อาการหายใจล้มเหลวเฉียบพลัน				<0.001
	ไม่มีอาการ	259 (22.7)	817 (71.5)	1076 (94.1)
	มีอาการ	60 (5.2)	7 (0.6)	67 (5.9)

<0.001

ปัจจัย	ผลการรักษา (ร้อยละ)		จำนวน (ร้อยละ)	p-value
	เสียชีวิต	รอดชีวิต		
ภาวะช็อค	ไม่มีอาการ	303 (26.5)	822 (71.9)	1125 (98.4)
	มีอาการ	16 (1.4)	2 (0.2)	18 (1.6)

2. จากการวิเคราะห์ตัวแบบถดถอยลอจิสติก โดยใช้เทคนิคการเลือกตัวแปรด้วยวิธีการกำจัดแบบถอยหลัง พบว่า เพศ (OR=2.262 , p-value= <0.001) อายุ (OR=1.118 , p-value= <0.001) โรคมะเร็ง (OR=0.193 , p-value= 0.043) อาการปอดอักเสบ (OR=7.173 , p-value= <0.001) และอาการหายใจล้มเหลวเฉียบพลัน (OR=11.488 , p-value= <0.001) มีนัยสำคัญต่อการเสียชีวิตของผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสียชีวิตของผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยลอจิสติก

ปัจจัย	OR	95% CI	p-value
เพศ(ชาย)	2.262	1.519–3.367	<0.001
อายุ	1.118	1.102–1.134	<0.001
โรคมะเร็ง (Malignancy)	0.193	0.039–0.949	0.043
อาการปอดอักเสบ (Pneumonia)	7.173	2.818–18.254	<0.001
อาการหายใจล้มเหลวเฉียบพลัน (ARDS)	11.488	4.105–32.148	<0.001

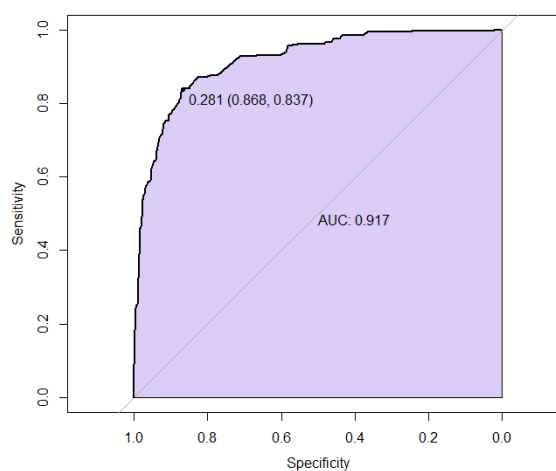
3. ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวแบบจากตารางที่ 3 พบว่าการทำนายที่มีความถูกต้องโดยรวมร้อยละ 86.8 โดยมีการทำนายการเสียชีวิตของผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 ได้ถูกต้อง ร้อยละ 70.5 อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ ROC curve ดังภาพที่ 1 เพื่อพิจารณาค่าความไวและความจำเพาะของจุดตัดพื้นที่ผิว ดังตารางที่ 4 พบว่า

จุดตัดที่เหมาะสม คือ 0.281 โดยมีค่าความไว 0.837 ความจำเพาะ 0.868 และค่าพื้นที่ใต้โค้ง (AUC) คือ 0.917 ดังนั้น เมื่อเปลี่ยนจุดตัดการทำนายของตัวแบบเป็น 0.28 ในการทำนายการเสียชีวิตของผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพของการทำนายมีความถูกต้องโดยรวมคิดเป็นร้อยละ 86.0 ดังตารางที่ 5 แต่ร้อยละความถูกต้องของการทำนายการเสียชีวิตจะสูงถึง 83.1 ซึ่งสูงกว่าจุดตัดที่ 0.5

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพของตัวแบบ ที่จุดตัด 0.5

ค่าสังเกต (observed)	การพยากรณ์ (predicted)		
	การรอดชีวิต	การเสียชีวิต	ร้อยละความถูกต้อง
การรอดชีวิต	767	57	93.1
การเสียชีวิต	94	225	70.5
ความถูกต้องโดยรวม (overall percentage)			86.8*

$$*(767+225)/1143$$



ภาพที่ 1 ROC curve

ตารางที่ 4 ค่าความไว ความจำเพาะ ของจุดตัดพื้นที่ผิว

	จุดตัด (ตารางมิลลิเมตร)	ความไว (Sensitivity)	ความจำเพาะ (1-Specificity)	Area under the ROC Curve		
				AUC (95%CI)	SE	p-value
ขนาดพื้นที่ผิว	0.281	0.837	0.868	0.917 (0.899–0.935)	0.009	<0.001

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพของตัวแบบ ที่จุดตัด 0.28

ค่าสังเกต (observed)	การพยากรณ์ (predicted)		
	การรอดชีวิต	การเสียชีวิต	ร้อยละความถูกต้อง
การรอดชีวิต	718	106	87.1
การเสียชีวิต	54	265	83.1
ความถูกต้องโดยรวม(overall Percentage)			86.0*

$$*(718+265)/1143$$

2. วิจัยผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์การถดถอยลอจิสติก พบว่า เพศ (OR=2.262; 95%CI= 1.519-3.367) อายุ (OR= 1.118; 95%CI= 1.102-1.134) โรคประจำตัว (OR= 0.193 ; 95%CI=0.039-0.949) อาการปอดอักเสบ (OR=7.173; 95%CI= 2.818-18.254) อาการหายใจลำบากเฉียบพลัน (OR=11.488; 95%CI=4.105-32.148) มีความสัมพันธ์กับการเสียชีวิตของผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม จะสังเกตว่า

ด้านเพศ พบว่าเพศชายมีโอกาสที่จะเสียชีวิตสูงกว่าเพศหญิง 2.26 เท่า ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับการศึกษาของ Ryan et al. (2021) ในสหรัฐอเมริกา ที่พบว่าเพศชายเป็นตัวแทนที่สำคัญของโควิด-19 ที่รุนแรง ซึ่งต่างจากข้อมูลของ พิศาล และ ลิทธิชัย (2565) ที่เป็นการศึกษาในไทย ที่พบว่าปัจจัยด้านเพศไม่มีความสัมพันธ์ต่อการเสียชีวิตของผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19

ด้านอายุ พบว่าเมื่ออายุเพิ่มขึ้น 1 ปี จะมีโอกาสเสียชีวิตเพิ่มขึ้น 12% ซึ่งคล้ายคลึงกับการศึกษาของ ปิยนุช (2565) ที่เป็นการศึกษาในโรงพยาบาลกาฬสินธุ์ ประเทศไทย พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเสียชีวิตของผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 มีนัยสำคัญทางสถิติ คือ อายุที่เพิ่มขึ้นทุก 10 ปี จะมีความเสี่ยงในการเสียชีวิตเพิ่มขึ้น 2.2 เท่า และการศึกษาต่าง ๆ ในต่างประเทศ เช่น ประเทศญี่ปุ่น ซาอุดีอาระเบีย เม็กซิโก พบว่า อายุที่มากขึ้น เพิ่มความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตในผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 (Badedi et al., 2021) และพบว่ามีอัตราการเสียชีวิตที่เพิ่มขึ้น 3.1 เท่าในผู้ป่วยที่มีอายุมากกว่า 55 ปี เมื่อเทียบกับผู้ที่มีอายุน้อยกว่า 55 ปี (Emami et al., 2021) และมีรายงานอัตราการเสียชีวิต 6.3% โดยส่วนใหญ่จะมีอายุมากกว่า 60 ปี (Salinas-Aguirre et al., 2022)

ด้านโรคร่วม พบว่าผู้ป่วยที่มีอาการหายใจลำบากเฉียบพลัน มีโอกาสที่จะเสียชีวิตมากกว่าคนที่ไม่มีอาการนี้ถึง 11.49 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu et al. (2022) ที่เป็นการศึกษาในประเทศจีน รองลงมาคือผู้ป่วยที่มีอาการปอดอักเสบ มีโอกาสที่จะเสียชีวิตเพิ่มขึ้น 7.17 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fachri et al. (2022) ในประเทศอินโดนีเซีย อย่างไรก็ตาม สำหรับผู้ป่วยที่มีโรคประจำตัว มีโอกาสที่จะเสียชีวิตต่ำเมื่อเทียบกับคนที่ไม่ได้เป็นโรคประจำตัว ซึ่งขัดแย้งกับงานวิจัยของ Guan et al. (2020) ในประเทศจีน Djaharuddin et al. (2021) ในประเทศอินโดนีเซีย และ งานวิจัยของ Novelli et al. (2023) ในประเทศอิตาลี ที่พบว่าโรคประจำตัวมีแนวโน้มที่

จะส่งผลทำให้เกิดเหตุการณ์ไม่พึงประสงค์ในผู้ป่วยโรคโควิด-19 โดยพบว่าโรคประจำตัวมีผลต่อการเสียชีวิตของผู้ที่ติดเชื้อโควิด-19 ร้อยละ 15.38 และโรคประจำตัวมีผลต่อการเสียชีวิตหลังจากออกจากโรงพยาบาลสูงเป็น 3.64 เท่า สาเหตุของความไม่สอดคล้องกันของผลการวิจัยในงานวิจัยนี้ อาจจะสืบเนื่องจากในชุดข้อมูลนี้มีจำนวนผู้ป่วยที่เป็นโรคประจำตัวที่เสียชีวิตจาก COVID-19 น้อยมากเมื่อเทียบกับคนที่ไม่ได้เป็นโรคประจำตัว ดังนั้นจึงให้ผลการศึกษที่แตกต่างกับงานวิจัยก่อนหน้านี้

นอกจากนี้ ผลการศึกษานี้ยังพบว่า โรคหัวใจและหลอดเลือด โรคหลอดเลือดสมอง โรคปอด โรคเบาหวาน โรคตับ โรคไตเรื้อรัง โรคระบบประสาทเสื่อม การผ่าตัดติดเชื้อ การศัลยกรรม โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง โรคหอบหืด และโรคความดันโลหิต อาการทางคลินิก ได้แก่ อาการหายใจลำบาก และภาวะช็อก ไม่มีความสัมพันธ์กับการเสียชีวิตซึ่งแตกต่างจากการศึกษาของ พิศาล และ ลิทธิชัย (2565) ที่พบว่า โรคความดันโลหิตสูง โรคเบาหวาน โรคหัวใจ โรคไตเรื้อรัง โรคหลอดเลือดสมอง มีความสัมพันธ์กับการเสียชีวิตอย่างมีนัยสำคัญ และจากการศึกษาในประเทศจีน พบว่าโรคความดันโลหิตสูง โรคเบาหวาน โรคหัวใจและหลอดเลือด โรคไขมันพอกตับ โรคไขมันในเลือดสูง เป็นปัจจัยเสี่ยงต่อความรุนแรงของโรคโควิด-19 (Ma et al., 2020)

3. สรุปผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาและคัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสม และทำการเลือกจุดตัดที่เหมาะสมในการจำแนกกลุ่มของสถานะของคนที่ใช้ โดยใช้พื้นที่ใต้เส้นโค้ง ROC Curve ที่มีค่าจุดตัดที่เหมาะสมที่สุด เท่ากับ 0.281 และพบว่า เพศ อายุ โรคประจำตัว อาการปอดอักเสบ และอาการหายใจลำบากเฉียบพลัน เพิ่มความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตในผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการวิเคราะห์ความไวของตัวแบบ พบว่ามีความไวสูงและมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ถูกต้องร้อยละ 86.0 ดังนั้น ควรมีระบบประเมินและเฝ้าติดตามในการรักษาผู้ป่วยที่มีปัจจัยเสี่ยงเหล่านี้ เพื่อลดอัตราการเสียชีวิตในผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 รวมทั้งควรมีการศึกษาความเสี่ยงในกลุ่มประชากร โรคต่าง ๆ เพิ่มเติม ในแง่ของจำนวนโรคร่วมอื่น ๆ ของแต่ละกลุ่มภูมิภาค เพื่อนำไปใช้ศึกษาผลลัพธ์ทางการแพทย์ในการศึกษาต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณแหล่งข้อมูลจากงานวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งเป็นข้อมูลทุติยภูมิที่ได้มาจากเว็บไซต์ Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community ที่ได้มีการเผยแพร่ข้อมูลให้ได้อีกศึกษา โดยชุดข้อมูลของผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 มีชื่อข้อมูลว่า “Comorbidities and Symptoms of COVID-19 patient’s” และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนการศึกษาการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Aktar, S., Talukder, A., Ahamad, M. M., Kamal, A. H. M., Khan, J. R., Protikuzzaman, M., Hossain, N., Azad, A. K. M., Quinn, J. M. W., Summers, M. A., Liaw, T., Eapen, V., & Moni, M. A. (2021). Machine learning approaches to identify patient comorbidities and symptoms that increased risk of mortality in COVID-19. *Diagnostics*, 11(8), 1383. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11081383>
- Alali, A. S., Alshehri, A. O., Assiri, A., Khan, S., Alkathiri, M. A., Almoammed, O. A., Badoghaish, W., AlQahtani, S. M., Alshammari, M. A., Mohany, M., Alamri, F. F., AlRuthia, Y., & Alqahtani, F. (2021). Demographics, comorbidities, and outcomes among young and middle-aged COVID-19 patients in Saudi Arabia. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 29(8), 833–842. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2021.06.005>
- Badedi, M., Makrami, A., & Alnami, A. (2021). Co-morbidity and blood group type risk in coronavirus disease 2019 patients: A case-control study. *Journal of Infection and Public Health*, 14(4), 550–554. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2020.12.035>
- Djagaruddin, I., Munawwarah, S., Nurulita, A., Ilyas, M., Tabri, N. A., & Lihawa, N. (2021). Comorbidities and mortality in COVID-19 patients. *Gaceta Sanitaria*, 35(S2), S530–S532. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2021.10.085>
- Emami, A., Akbari, A., Basirat, A., Zare, H., Javanmardi, F., Falahati, F., & Rezaei, A. (2021). The role of comorbidities on mortality of COVID-19 in patients with diabetes. *Obesity Medicine*, 25, 100352. <https://doi.org/10.1016/j.obmed.2021.100352>
- Fachri, M., Hatta, M., Widowati, E., Akaputra, R., Dwiyantri, R., Syukri, A., Junita, A. R., Febrianti, A., & Primaguna, M. R. (2022). Correlations between comorbidities, chest x-ray findings, and C-Reactive protein level in patients with COVID-19. *Annals of Medicine and Surgery*, 77(5), 103553. <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2022.103553>
- Guan, W., Liang, W., Zhao, Y., Liang, H., Chen, Z., Li, Y., Liu, X., Chen, R., Tang, C., Wang, T., Ou, C., Li, L., Chen, P., Sang, L., Wang, W., Li, J., Li, C., Ou, L., Cheng, B., ... He, J. (2020). Comorbidity and its impact on 1590 patients with COVID-19 in China: A nationwide analysis. *European Respiratory Journal*, 55(5), 2000547. <https://doi.org/10.1183/13993003.00547-2020>
- Liu, W., Yang, C., Liao, Y., Wan, F., Lin, L., Huang, X., Zhang, B.-H., Yuan, Y., Zhang, P., Zhang, X.-J., She, Z.-G., Wang, L., & Li, H. (2022). Risk factors for COVID-19 progression and mortality in hospitalized patients without pre-existing comorbidities. *Journal of infection and public health*, 15(1), 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2021.11.012>
- Ma, Y., Zhu, D. S., Chen, R. B., Shi, N. N., et al., (2020). Association of Overlapped and Un-overlapped Comorbidities with COVID-19 Severity and Treatment Outcomes: A Retrospective Cohort Study from Nine Provinces in China. *Biomedical and Environmental Sciences*, 33(12), 893–905. <https://doi.org/10.3967/bes2020.123>
- Novelli, L., Raimondi, F., Carioli, G., Carobbio, A., et al., (2023). One-year mortality in COVID-19 is associated with patients’ comorbidities rather than pneumonia severity. *Respiratory Medicine and Research*, 83(1), 100976. <https://doi.org/10.1016/j.resmer.2022.100976>
- Posso, M., Comas, M., Román, M., Domingo, L., Louro, J., González, C., Sala, M., Anglès, A., Cirera, I., Cots, F., Frías, V.-M., Gea, J., Güerri-Fernández, R., Masclans, J. R., Nogués, X., Vázquez, O., Villar-García, J., Horcajada, J. P., Pascual, J., & Castells, X. (2020). Comorbidities and Mortality in Patients With COVID-19 Aged 60 Years and Older in a University Hospital in Spain. *Archivos de Bronconeumología*, 56(11), 756–758. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2020.06.012>
- Ryan, C., Minc, A., Caceres, J., Balsalobre, A., Dixit, A., KaPik, B., Schmitzberger, F., Syed-Abdul, S., & Fung, C. (2021). Predicting severe outcomes in Covid-19 related illness using only patient demographics, comorbidities and symptoms. *The American Journal of Emergency Medicine*, 45, 378–384. <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2020.09.017>
- Salinas-Aguirre, J. E., Sánchez-García, C., Rodríguez-Sánchez, R., Rodríguez-Muñoz, L., Díaz-Castaño, A., & Bernal-Gómez, R. (2022). Clinical characteristics and comorbidities associated with mortality in patients with COVID-19 in Coahuila (Mexico). *Revista Clínica Española (English Edition)*, 222(5), 288–292. <https://doi.org/10.1016/j.rceng.2020.12.007>
- World Health Organization. (2022). WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard. <https://covid19.who.int>
- Wu, Z., & McGoogan, J. M. (2020). Characteristics of and Important Lessons from the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Outbreak in China: Summary of a Report of 72 314 Cases From the Chinese Center for Disease Control and Prevention. *JAMA*, 323(13), 1239–1242. <https://doi.org/10.1001/jama.2020.2648>
- Wu, Z., & McGoogan, J. M. (2020). Characteristics of and important lessons from the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak in China: summary of a report of 72 314 cases from the Chinese Center for Disease Control and Prevention. *JAMA*, 323(13), 1239–1242. <https://doi.org/10.1001/jama.2020.2648>
- Patipanawat, P. (2565). Factors affecting death of patients with coronavirus disease 2019 (COVID-19), Kalasin Hospital. *Journal of Health and Environmental Studies*, 7(1), 64–71. (in thai)
- Chumcheun, P., & Buanjunglert, S. (2565). Mortality rate and factors related to death of COVID-19 patients Damnoen Saduak Hospital, Ratchaburi. *Journal of research for promoting health and quality of life*, 2(1), 25–37. (in thai)