

ปีที่ 24 ฉบับที่ 1 [2568] Vol.24, No.1 [2025]

มกราคม - เมษายน 2568

ISSN 2822-1508 [Online]



Approved by TCI during
2025-2029



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. Malinee Sriariyanun

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

Assistant Professor Dr. Chatchawan Singhapol

Dr. Wannarak Nopcharoenkul

Managing Editor

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

Assistant Professor Dr. Chonnikarn Rodmorn

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

Associate Professor Dr. Sukanya Thepwatee

Assistant Professor Dr. Anusara Srisrual

Assistant Professor Dr. Theerawut Phusantisampan

Assistant Professor Dr. Jintawat Tanamatayarat

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

Professor Dr. Andrea De Gaetano

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

Editorial Board (cont.)

Associate Professor Dr. Nutapong Somjit

University of Leeds, United Kingdom

Dr. Nutsuda Sumonsiri

Teesside University, United Kingdom

Professor Dr. Sergey Meleshko

Suranaree University of Technology, Thailand

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

Professor 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

Associate Professor 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

Editorial Board (cont.)

Dr. Worawut Srisukkhom

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 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©2025 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)

Enhanced Frameworks for Accurate ARL Estimation in Statistical Process Control Systems

Yupaporn Areepong*, and Saowanit Sukparungsee.....e900005

Research Articles

Modifications of Linear Regression Classification Method for Face Recognition with Image Resizing by Using Bicubic Interpolation

Krailikhit Latpala.....e257253

Generalization of α - G -Contractions to j - G -Contractions on Uniform Spaces

Atthakorn Sakda, and Sittichoke Songsa-ard*.....e260436

Application of Yeast Strain *Saccharomyces cerevisiae* to Produce Wine by Using Rice and Pineapple as Raw Material

Nutthawut Meesilp*, and Yanapath Suksoem.....e255747

Value-Added Utilization of Sugarcane Juice Through Levulinic Acid Synthesis

การเพิ่มมูลค่าจากน้ำอ้อยด้วยการสังเคราะห์กรดลิวูลินิก

Pakamas Chetpattananondh, Kanjana Kantakapun*, Kulchanat Prasertsit, and Sininart Chongkhong.....e258792

Selection of Waste-to-Energy Technologies with Economic and Financial Analysis for Application in the Integrated Solid Waste Management Center, Rayong Province

การคัดเลือกเทคโนโลยีผลิตพลังงานจากขยะและการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์และการเงินเพื่อประยุกต์ใช้ในศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยรวมแบบครบวงจร จังหวัดระยอง

Sakaradhorn Boontaveeyuwat*, Kiatkrai Ayuwat, and Peerawas Wangstittaporn.....e255327

The Study of Microalgae Growth *Monoraphidium* sp. Using Carbon Dioxide Absorption from Biogas via Photo-Bioreactor System

การศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Monoraphidium* sp. เพื่อดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพผ่านระบบ Photo-Bioreactor

Patomporn Pulsawad, Watcharee Kunyalung, and Nantanit Tohpong*.....e257430

A Predictive Model for the Work Needs of the Elderly in Thailand in 2021

ตัวแบบพยากรณ์ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุไทย พ.ศ. 2564

Khemika Urawong*, Warisara Hem-aran, Wasinee Khaosomboon, and Wilawan Janduang.....e259928

Model for Forecasting the Value of Fresh or Chilled Fish Exports in Thailand

ตัวแบบพยากรณ์มูลค่าการส่งออกปลาสดหรือแช่เย็นของประเทศไทย

Warangkhan Riansut.....e254679

Enhanced Frameworks for Accurate ARL Estimation in Statistical Process Control Systems

Yupaporn Areepong^{1*}, and Saowanit Sukparungsee¹

¹Department of Applied Statistics, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800 Thailand

* Corresponding Author, E-mail: yupaporn.a@sci.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.01.001

Received 17 April 2025; Revised 22 April 2025; Accepted 28 April 2025

ABSTRACT

This study presents an enhanced framework for accurately estimating the Average Run Length (ARL) in Statistical Process Control (SPC) systems especially for control charts, which are essential for monitoring, maintaining, and improving process quality in industrial and economic applications. The ARL, a key performance metric in SPC, indicates the average number of samples taken before a control signal is triggered, with ARL_0 representing false alarms and ARL_1 indicating true detections. This paper reviews and compares four prominent ARL evaluation methods: Monte Carlo Simulation, Markov Chain Approach, Numerical Integral Equation, and Explicit Formulas. Each method's strengths and limitations are discussed in terms of accuracy, and flexibility. The findings highlight the need for method selection based on the complexity of monitored processes, particularly in autocorrelation and non-normality are prevalent. Furthermore, integrating these methods with AI-driven optimization techniques - such as machine learning algorithms for data analysis and adaptive control - offers promising avenues for enhancing the precision and responsiveness of process monitoring in dynamic and complex environments.

KEYWORDS: Statistical process control, Average run length, Markov chain approach, Numerical integral equation, Explicit formulas.

In modern industrial and economic systems, process monitoring and quality control have become critical for ensuring stability, minimising costs, and maximising efficiency. The application of Statistical Quality Control (SQC) tools has expanded beyond manufacturing to areas such as healthcare, environmental science, and econometrics. Among these tools, control charts are fundamental instruments for detecting shifts in process behaviour over time.

Introduced by Shewhart (1931), the classical control chart focuses on detecting significant deviations by monitoring sample statistics against predetermined control limits. However, classical methods like the Shewhart chart often lack sensitivity to small or gradual process shifts. This limitation led to the development of more sophisticated techniques, such as the Cumulative Sum (CUSUM) introduced by Page (1954) and Exponentially Weighted Moving Average (EWMA) charts proposed by Roberts (1959), which enhance sensitivity and allow for earlier detection of shifts.

The performance of any control chart is commonly evaluated using the Average Run Length (ARL), which represents the expected number of samples taken before a signal indicates a potential process change. The ARL_0 refers to the expected run length when the process is in-control, and the ARL_1 refers to when the process is out-of-control. Optimising ARL values is crucial: a high ARL_0 minimises false alarms, while a low ARL_1 ensures prompt detection of actual process changes. Given the importance of ARL, several analytical and numerical methods have been developed to evaluate it accurately, especially in econometric applications where data often exhibit autocorrelation, non-normality, and structural breaks.

The ARL is a probabilistic metric that quantifies the average number of observations needed before a control chart signals. Formally:

ARL_0 : Expected number of samples before a false alarm when the process is in control.

ARL_1 : Expected number of samples until a true signal when the process is out of control.

The choice of ARL evaluation method depends on factors such as the type of control chart, the probability distributions: discrete and continuous, and the nature of the monitored process (stationary vs. non-stationary).

Methods for Evaluating Average Run Length

1. Monte Carlo Simulation (MC)

Monte Carlo Simulation is one of the most flexible and widely used methods for ARL estimation, especially when analytical solutions are intractable.

Process: Simulate a large number of process runs (typically 10,000 or more) under both in-control and out-of-control conditions. For each simulation, count the number of observations until a control limit is breached.

Strengths: High flexibility, applicable to complex models including non-linear, non-normal, or dependent data.

Limitations: Computationally intensive; requires significant time for high-precision results.

Example: Sales et al. (2020) used the Monte Carlo method to evaluate ARL in Poisson mixed integer autoregressive processes for crime and network data. See details in the reference; Saengsura et. al. (2024), Talordphop et. al. (2025).

2. Markov Chain Approach (MCA)

The Markov Chain Approach proposed by Brook & Evans (1972) is a powerful technique that models the transition probabilities between different process states.

Table 1 Comparative Analysis of ARL Evaluation Methods

Method	Accuracy	Flexibility	Best Use Cases
MC	High (with samples)	Very High (all data types)	Complex models, unknown distributions
MCA	Medium to High	Medium (discrete states)	CUSUM/EWMA, simple discrete processes
NIE	Very High	Medium (continuous only)	Continuous distributions, time series models
Explicit	Very High	Low (specific assumptions)	Standard distributions, quick estimation

Process: Define discrete states (e.g., in-control, out-of-control), establish a transition probability matrix, and solve for steady-state probabilities.

Strengths: Efficient for processes that can be discretised into finite states; suitable for CUSUM and EWMA charts.

Limitations: May not converge for some high-dimensional or continuous-state processes; assumes Markovian properties.

Example: Lucas and Saccucci (1990) applied MCA to evaluate ARL for EWMA charts. Chananet et al. (2015) studied MCA to evaluate ARL on EWMA and CUSUM control charts based on the ZINB process.

3. Numerical Integral Equation (NIE) Method

The NIE method involves formulating ARL estimation as an integral equation, which is then solved numerically.

Process: Represent ARL as a Fredholm integral equation, discretise using numerical techniques (e.g., Simpson's Rule), and solve iteratively.

Strengths: High precision, especially for continuous control charts; applicable to time series with continuous distributions.

Limitations: Limited to continuous distributions; requires careful numerical implementation.

Example: Crowder (1987) used NIE for the EWMA chart, achieving highly accurate ARL estimates. For more information, see the following references: Bualuang & Peerajit (2023), Saesuntia et. al. (2023).

4. Explicit Formulas

Explicit formulas provide closed-form expressions for ARL based on assumptions about the data and control chart structure.

Process: Derive ARL using mathematical tools like probability theory, the central limit theorem, or Laplace transforms.

Strengths: Extremely fast computation; no need for simulation or iteration.

Limitations: Valid only for specific distributions (e.g., normal, exponential); lacks flexibility for complex or non-standard processes.

Example: Sukparungsee and Areepong (2017) derived explicit ARL formulas for EWMA charts in autoregressive processes. Refer to the following sources for more details: Phanyaem (2022), Petcharat (2022), Suriyakat & Petcharat (2022), Supharakonsakun & Areepong (2023), Areepong & Sukparungsee (2023), Areepong & Peerajit (2024), Neammai et. al. (2025).

In practice, the choice of method depends on the trade-off between accuracy, flexibility, and computational cost. Table 1 shows the comparative analysis of four methods. For example, in econometric models involving autocorrelated or heteroskedastic data, Monte Carlo or NIE methods may be preferred due to their robustness.

Evaluating Average Run Length (ARL) is central to assessing and improving the effectiveness of control charts in process monitoring. While traditional control charts suffice for simple, well-behaved data, modern applications - especially in econometrics - require more sophisticated evaluation techniques.

Monte Carlo simulations give unparalleled flexibility, although at the time consuming, whilst Markov Chain and NIE approaches deliver analytical rigour under specific constraints. Explicit formulas are

essential for obtaining rapid and precise results under conventional assumptions.

As data complexity grows, integrating these methods with AI-driven optimisation and real-time analytics could further enhance their applicability in dynamic systems.

REFERENCES

- Areepong, Y., & Sukparungsee, S. (2023). Capability process on a two-sided extended EWMA control chart for moving average with exogenous factors model. *IAENG International Journal of Applied Mathematics*, 53(3), 201-213.
- Areepong, Y., & Peerajit, W. (2024). Enhancing the Ability of the EWMA Control Chart to Detect Changes in the Mean of a Time-Series Model. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 20(6), 1420-1439.
- Areepong, Y., & Peerajit, W. (2022). Integral equation solutions for the average run length for monitoring shifts in the mean of a generalized seasonal ARFIMAX (P, D, Q, r) s process running on a CUSUM control chart. *Plos one*, 17(2), e0264283.
- Brook, D. A. E. D., & Evans, D. (1972). An approach to the probability distribution of CUSUM run length. *Biometrika*, 59(3), 539-549.
- Bualuang, D., & Peerajit, W. (2023). Performance of the CUSUM control chart using approximation to ARL for long-memory fractionally integrated autoregressive process with exogenous variable. *Applied Science and Engineering Progress*, 16(2), 5917.
- Chanant, C., Areepong, Y., & Sukparungsee, S. (2015). A Markov chain approach for average run length of EWMA and CUSUM control chart based on ZINB Model. *International Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 53(1), 126-137.
- Crowder, S. V. (1987). A simple method for studying run-length distributions of exponentially weighted moving average charts. *Technometrics*, 29(4), 401-407.
- Lucas, J. M., & Saccucci, M. S. (1990). Exponentially weighted moving average control schemes: properties and enhancements. *Technometrics*, 32(1), 1-12.
- Neammai, J., Sukparungsee, S., & Areepong, Y. (2025). Explicit Analytical Form for the Average Run Length of Double-Modified Exponentially Weighted Moving Average Control Charts Through the MA (q) Process and Applications. *Symmetry*, 17(2), 238.
- Page, E. S. (1954). Continuous inspection schemes. *Biometrika*, 41(1/2), 100-115.
- Petcharat, K. (2022). The effectiveness of CUSUM control chart for trend stationary seasonal autocorrelated data. *Thailand Statistician*, 20(2), 475-488.
- Phanyaem, S. (2022). Explicit formulas and numerical integral equation of ARL for SARX (P, r) L model based on CUSUM chart. *Mathematics and Statistics*, 10(1), 88-99.
- Roberts, S. W. (2000). Control chart tests based on geometric moving averages. *Technometrics*, 42(1), 97-101.
- Sales, L. O., Pinho, A. L., Vivacqua, C. A., & Ho, L. L. (2020). Shewhart control chart for monitoring the mean of Poisson mixed integer autoregressive processes via Monte Carlo simulation. *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106245.
- Shewhart, W. A. (1931). *Economic control of quality of manufactured product*, D. Van Nostrand Company.
- Saengsura, N., Areepong, Y., & Sukparungsee, S. (2024). Distribution-free Mixed CUSUM-MA Control Chart to Detect Mean Shifts. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 45(9), 4348-4360.
- Saesuntia, P., Areepong, Y., & Sukparungsee, S. (2023). On the average run lengths of quality control schemes using a numerical integral equation approach. *Applied Science and Engineering Progress*, 16(2), 1-11.
- Sukparungsee, S., & Areepong, Y. (2017). An explicit analytical solution of the average run length of an exponentially weighted moving average control chart using an autoregressive model. *Chiang Mai Journal of Science*, 44(3), 1172-1179.
- Supharakonsakun, Y., & Areepong, Y. (2023). ARL evaluation of a DEWMA control chart for autocorrelated data: a case study on prices of major industrial commodities. *Emerging Science Journal*, 7(5), 1771-1786.
- Suriyakat, W., & Petcharat, K. (2022). Exact run length computation on EWMA control chart for stationary moving average process with exogenous variables. *Mathematics and Statistics*, 10(3), 624-635.
- Talordphop, K., Areepong, Y., & Sukparungsee, S. (2025). An empirical assessment of Tukey combined extended exponentially weighted moving average control chart. *AIMS Mathematics*, 10(2), 3945-3960.

Modifications of Linear Regression Classification Method for Face Recognition with Image Resizing by Using Bicubic Interpolation

Krailikhit Latpala^{1*}

¹Department of Mathematics, Faculty of Education, Sakon Nakhon Rajabhat University, Sakon Nakhon, 47000 Thailand.

* Corresponding Author, E-mail: Krailikhit@snru.ac.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.01.002

Received 22 June 2024; Revised 15 October 2024; Accepted 10 February 2025

ABSTRACT

Linear Regression Classification (LRC) is a method used in face recognition to identify a person by extracting features of a test image and comparing them with the features of representative images in a dataset. The LRC represents a test image vector as a linear combination of image vectors from each individual in the dataset, using the least squares method to find the minimum distance to the test image vector. The least distance from all the models of representative sets is used to identify the test image. However, the effectiveness of LRC depends on various facial variations. In this research, applied bicubic interpolation to resize images and extract new features from facial data, which enhanced the discriminative power of the extracted features. Also used K-means clustering techniques to select the most suitable representative images from each individual for the dataset. Additionally, used the Manhattan norm to measure distances during the identification process. Experimental results indicate that these suggested enhancements improve the efficiency of face recognition when integrated into the LRC algorithm.

KEYWORDS: Face recognition, Linear regression classification, Least squares method, K-means clustering.

1. INTRODUCTION

Face recognition is a technology that involves identifying or verifying individuals based on their facial features, often used in security systems, access control, and biometric authentication. It works by analyzing unique characteristics of a person's face, such as the distances between eyes, nose, and mouth to distinguish one individual from another. Many face recognition methods, such as principle component analysis (PCA) (Turk & Pentland, 1991), linear discriminant analysis (LDA) (Belhumeur et al., 1997), independent component analysis (ICA) (Bartlett et al., 2002), and linear regression classification (LRC) (Naseem et al., 2010), have been proposed in the literature. The adaptive linear regression classifier (ALRC), leveraging the observation of similar subjects sharing comparable intra-personal variations, demonstrates superior performance over existing methods, particularly in handling variations such as expression, illumination, and disguise (Wang et al., 2013). Many studies research the impact of pre-processing on face recognition rates and present a qualitative overview of diverse pre-processing techniques and feature extraction methods, with results indicating the combined spatial and frequency feature extraction method outperforms individual approaches, demonstrating efficacy even in the absence of pre-processing (Dharavath et al., 2014). Face recognition using pre-processing techniques such as brightness adjustment and image resizing has been shown to achieve high recognition rates (Barnouti, 2016). The utilization of the K-means algorithm for facial feature analysis, followed by SVM classification, demonstrates high recognition performance with reduced feature numbers, highlighting its efficacy in enhancing face recognition accuracy and efficiency (Wei et al., 2018). The clustering method for face recognition effectively aligns feature domains

globally while distinguishing target clusters locally demonstrating superior performance across various benchmark datasets (Wang & Deng, 2020). Face recognition algorithms combined with image super-resolution techniques improve the quality of low-resolution input images. Results demonstrate the effectiveness of the proposed approach in enhancing recognition accuracy for low-resolution face datasets. This significantly contributes to the advancement of face recognition technology for practical applications, particularly in scenarios where image resolution is limited (Bhadkare & Jotwani, 2024). The study of pre-processing methods with image resizing improves face recognition algorithm success. Image resizing is considered alongside other techniques like face detection, image cropping, and normalization as a part of the pre-processing stage to enhance facial recognition systems (Gülşen et al., 2024). The present research focuses on the LRC method, introduced by Naseem et al. (2010), which offers a straightforward and effective approach to face recognition. LRC represents a test image vector as a linear combination of image vectors for each individual in the dataset, with the optimal linear combination determined through regression or least-squares analysis. The method evaluates distances between the test image vector and the representative model for each individual, selecting the model of representative with the minimum distance, the performance of LRC contingent upon different facial variations.

This research improves face recognition using the Linear Regression Classification (LRC) method by: Employing image resizing to extract new features, applying K-means clustering to select representative images for the dataset, and utilizing different norms to compute distances during the identification process.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 The datasets

The study focuses on four benchmark face datasets: Grimace, Faces95, Faces96, and Orl. Each dataset (Cambridge University Computer Laboratory, 1992-1994; Hond & Spacek, 1997) has details as shown in Table 1.

2.2 LRC algorithm

The image used for face recognition is a gray-scaled image with the value of each pixel between 0–255. It is stored as a matrix of size $a \times b$ when a and b are the number of rows and columns respectively. Then it is converted into a column

Table 1 Details of 4 benchmark face datasets

Dataset	Grimace	Faces95	Faces96	ORL
Image size	200 X 80	200 X 180	196 X 196	112 X 92
Number of people (individual)	n=18	n=72	n=147	n=40
Number of images for each individual	m=20	m=20	m=20	m=10

The figures below show example face datasets which are used for the experiments.



Figure 1 Sample facial images from the Grimace dataset



Figure 2 Sample facial images from the Faces95 dataset



Figure 3 Sample facial images from the Faces96 dataset

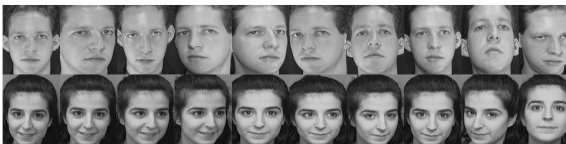


Figure 4 Sample facial images from the Orl dataset

vector of size $ab \times 1$ by concatenation all its columns.

The LRC method can be described as follows. The dataset consists of n individuals, where each individual has m images. The dataset of all images is denoted by

$$X = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_n],$$

where $X_i = [x_{i,1} \ x_{i,2} \ \dots \ x_{i,m}]$ is the image vectors of the i th individual for $i = 1, 2, \dots, n$.

Let y be a test image vector. For each individual, the LRC will find the model of representative image

$$\hat{y}_i = X_i \beta_i,$$

which is the linear combination of the image vectors of the i -th individual where

$$\beta_i = [\beta_{i,1} \ \beta_{i,2} \ \dots \ \beta_{i,m}]^T,$$

is a coefficient vector of size $m \times 1$ which obtained from solving the least squared distance $\hat{y}_i$ and y . The coefficient vector is obtained by the least-squares method using the equation

$$\beta_i = (X_i^T X_i)^{-1} X_i^T y.$$

The distance of y and all $\hat{y}_i$ is calculated by the Euclidean norm

$$d_i(y) = \|y - \hat{y}_i\|_2,$$

then, the least minimum distance from all models of representatives for each individual is used to identify the test image y .

2.3 Bicubic interpolation method

Reducing the size of the images used in the datasets helps to create unique features for each individual. It also helps to reduce the storage space for the datasets and the processing time for creating representative image sets for each individual.

The bicubic interpolation is a cubic interpolation for two variables or 2D interpolation by

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i y^j.$$

The bicubic interpolation estimates the value within the surface using surrounding points by normalizing the range into $-1 \leq x, y \leq 2$.

Simply insert all $x, y = -1, 0, 1, 2$ combinations to derive 16 equations.

$$f(0, 0) = a_{00}$$

$$f(0, 1) = a_{00} + a_{01} + a_{02} + a_{03}$$

$$f(1, 0) = a_{00} + a_{10} + a_{20} + a_{30}$$

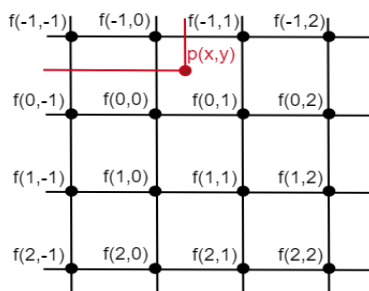
The system of equations can be rewritten in the form $F = CAC^T$,

$$\underbrace{\begin{bmatrix} f(-1, -1) & f(-1, 0) & f(-1, 1) & f(-1, 2) \\ f(0, -1) & f(0, 0) & f(0, 1) & f(0, 2) \\ f(1, -1) & f(1, 0) & f(1, 1) & f(1, 2) \\ f(2, -1) & f(2, 0) & f(2, 1) & f(2, 2) \end{bmatrix}}_F = \underbrace{\begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ (-1) & 0 & 1 & 2 \\ (-1)^2 & 0^2 & 1^2 & 2^2 \\ (-1)^3 & 0^3 & 1^3 & 2^3 \end{bmatrix}}_{C^T}.$$

The coefficients a_{ij} when $i, j = 0, 1, 2, 3$ are obtained from solving the system of equations by:

$$A = C^{-1}F(C^T)^{-1} \quad \text{or} \quad A = C^{-1}F(C^{-1})^T.$$

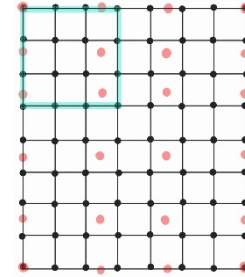
To compute the value of $p(x, y)$ within range $-1 \leq x, y \leq 2$ refer to grid mask below,



the value of $f(0, 0)$ represents the value of the image at position $(0, 0)$ corresponding to the grid mask, the interpolation of $p(x, y)$ is obtained by:

$$p(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & x & x^2 & x^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ y \\ y^2 \\ y^3 \end{bmatrix}.$$

Example: resizing the image from its original size of 9×8 to 6×4 .



Step 1: Calculate the position of all the new pixels (red points).

Step 2: Place the grid mask on the image by normalizing the range into $-1 \leq x, y \leq 2$.

Step 3: Calculate the coefficient matrix A from the system of equations $F = CAC^T$ where

$$A = C^{-1}F(C^T)^{-1} \quad \text{or} \quad A = C^{-1}F(C^{-1})^T.$$

Each $f(x, y)$ represents the value of the image at position (x, y) corresponding to the grid mask.

Step 4: Calculate all new pixels in the grid mask by normalizing the range into $-1 \leq x, y \leq 2$ from

$$p(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & x & x^2 & x^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ y \\ y^2 \\ y^3 \end{bmatrix}.$$

Step 5: Shift the mask and repeat step 2 until all the new pixels are obtained.

Note: If the new pixels overlap with the original image, we use the original value.

2.4 K-means clustering method

Choosing diverse image representatives from a dataset for each individual enhanced the efficiency of the LRC method. K-means clustering is therefore used in this step.



Figure 5 Training-test split of the Grimace dataset (75% training ratio)



Figure 6 Original-sized training set images from the Grimace dataset



Figure 7 Training set resized to 30% of original images



Figure 8 Training set resized to 20% of original images



Figure 9 Training set resized to 10% of original images

Let $X_i = [x_{i,1} \ x_{i,2} \ \dots \ x_{i,p}]$ be the set of image vectors for the i th individual. Select m images to be the new dataset. The K-means method can be described as follows.

Step 1: Random m image vectors from this class to be the initial centroids.

Step 2: Assign each of the remaining image vectors to the centroid which gives the least Euclidean distance.

Step 3: Compute the new centroid for each group using the mean of the image vectors in those groups.

Step 4: Repeat steps 2 and 3 until all the new centroids are not different from those in the previous round.

Note: A random sampling of different centers in the first round may produce varying data clustering results. If the results do not yield the desired number of groups, repeat step 1.

3. EXPERIMENTAL DESIGN

This section shows the experimental design to improve the performance of the LRC method for face recognition. There are three experiments for modifications of the LRC method. To evaluate the performance of the LRC method. Each experiment performs twenty independent tests. Each test uses the selected representative images as the training dataset and the remaining images as the test images to perform the identification and report the recognition accuracy which is calculated by the following.

$$\text{Recognition accuracy} = \frac{\text{The number of correctly identified images}}{\text{The number of all test images}}$$

The research has conducted a study on reducing the number of images as a training set and found that LRC still performs well in identifying identity and reduces the processing time of creating representative images in the group compared to using all images. From the benchmark face datasets, we found that we can reduce the number of images by 20%-25% depending on the characteristics of the dataset. In this case, we will use 25% for grimace, Faces95, and Faces96 because they have various image features, different facial distances, and backgrounds in the images, and 20% for ORL, which is appropriate with the number of images.

3.1 Studying LRC performances with bicubic interpolation for image resizing

This study evaluates the performance of bicubic interpolation for resizing training and testing datasets and examines its impact on the accuracy

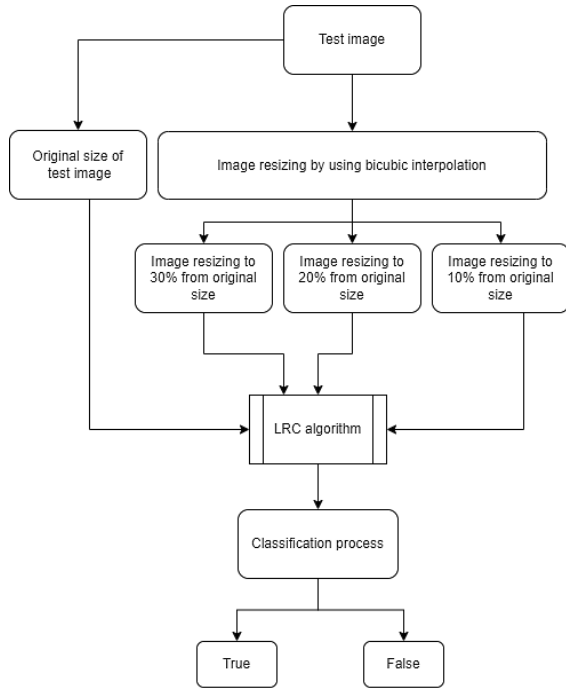


Figure 10 Workflow of the LRC algorithm integrated with bicubic interpolation

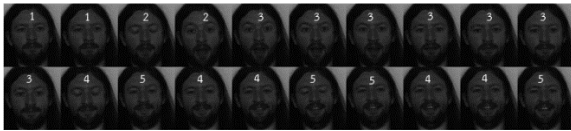


Figure 11 Example: the numbers represent image labels for each group based on K-means clustering



Figure 12 Examples: the image labels are the representative image closest to the centroids for each group

of identifying individuals at different reduction scales (30%, 20%, and 10% of the original size). After progressively resizing the images, the results are analyzed using the methodology outlined below.

1. For the benchmark face dataset, randomly choose five images for each individual to be representative of the training dataset and use the remaining fifteen images to be the test images except for the ORL dataset, which has only ten images per person, two images for representative images, and the remaining eight are the test images.

2. For each training and testing dataset, resize to 30%, 20%, and 10% of the original images, respectively.

3. For each size reduction, the least-squares method is used to create a model of representative for each individual $\hat{y}_i$. This model minimizes the distance from the test image y . The identification process involves all representative models, identifying which model provides the smallest distance from y . Finally, the recognition accuracy is calculated.

4. To ensure statistical reliability, twenty independent experiments were conducted. The average recognition accuracy and standard deviations were computed for each image resizing scale (30%, 20%, and 10% of the original dimensions).

3.2 Studying LRC performances with K-means clustering

To compare the results of this experiment with 3.1, we set the grouping of each dataset to be the same as the last one. Using K-means clustering to select representative image sets helps reduce bias, as opposed to manual selection by researchers, which can affect the results and increase or decrease identifying identities for the LRC method. Additionally, using different initial random values in each group will result in different groupings by K-means, affecting the resulting suitable image representative in each group. To avoid this issue, operated twenty independent experiments for each dataset instead of just one experiment and summarized the results as follows:

1. For each benchmark face dataset, K-means clustering to classify images of each individual into five groups, except for the ORL dataset, which has only ten images per person, two groups are used for K-means clustering.

2. Each group will have a different number of images depending on the number of images that share similar characteristics. Select a representative image from the group based on the one closest to the centroid to be the training dataset for each individual.

Note: Centroids are average faces for each group, and images near the centroids refer to the image faces that are the closest to the average feature for each group. Thus, it contained almost all the characteristics of that group.

3. For the obtained training dataset, the least-squares method is used to create a model of representative for each individual $\hat{y}_i$. This model minimizes the distance from the test image y . The identification process involves all representative models, identifying which model provides the smallest distance from y . Finally, the recognition accuracy is calculated.

4. To ensure statistical reliability, twenty independent experiments were conducted.

The average recognition accuracy and standard deviations were computed.

3.3 Studying LRC performances with Manhattan distance measurements (norm1)

Studying the change in distance measurement in the LRC method to verify the effect of recognition rate when changing the distance measurement method.

1. Implementation of Manhattan Distance: The Manhattan distance metric is integrated into the LRC algorithm to measure the dissimilarity between a test image vector y and the representative model $\hat{y}$ for each individual. The distance is calculated as:

$$d_i(y) = \|\hat{y}_i - y\|_1 = \sum_{k=1}^n |\hat{y}_{i,k} - y_k|,$$

where $y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T$ denotes the test image vector and the vector $\hat{y}_i = [\hat{y}_{i,1} \ \hat{y}_{i,2} \ \dots \ \hat{y}_{i,n}]^T$ represents the reconstructed model for the i -th individual.

2. To ensure statistical reliability, twenty independent experiments were conducted. The average recognition accuracy and standard deviations were computed.

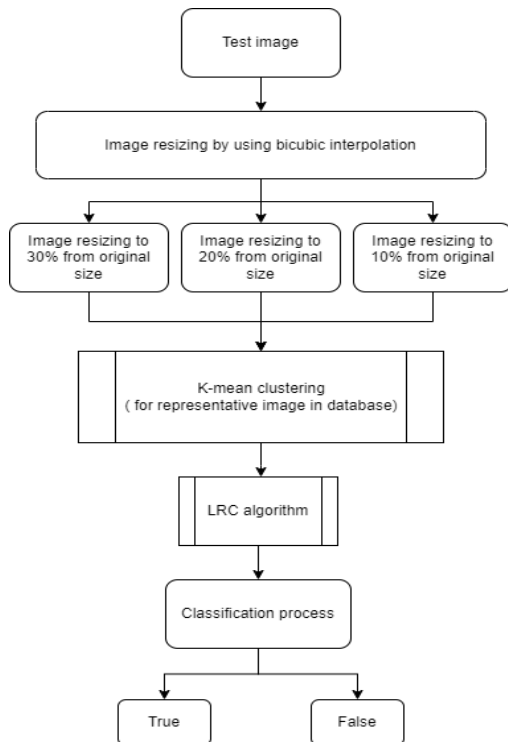


Figure 13 Workflow of the LRC algorithm integrated with K-means clustering

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Recognition accuracy obtained from LRC with image resizing

Results of experimentation 4.1 were found that reducing the size of the image did not decrease the effectiveness of the LRC method. However, it improved the ability to identify individuals and reduced the time to obtain the model representative for each group when solving the least-squares method. The recognition accuracy increased by 0.11%, 0.56%, 0.15%, and 1.18% for the grimace, faces95, faces96, and ORL datasets respectively.

Table 2 Recognition accuracy of LRC with image resizing across benchmark datasets

Database	Size of images			
	Original size	Resize to 30%	Resize to 20%	Resize to 10%
	200 X 180	60 X 54	40 X 36	20 X 10
Grimace	99.48% (sd=0.76)	99.52% (sd =0.76)	99.56% (sd=0.71)	99.59% (sd=0.67)
Faces95	75.84% (sd=1.35)	76.08% (sd=1.33)	76.29% (sd=1.43)	76.4% (sd=1.3)
Database	Size of images			
	Original size	Resize to 30%	Resize to 20%	Resize to 10%
	196 X 196	59 X 59	39 X 39	20 X 20
Faces96	95.46% (sd=0.78)	95.56% (sd=0.79)	95.61% (sd=0.74)	95.36% (sd=0.69)
Database	Size of images			
	Original size	Resize to 30%	Resize to 20%	Resize to 10%
	112 X 92	34 X 28	22 X 18	11 X 9
ORL	79.8% (sd=2.33)	80.77% (sd=2.63)	80.98% (sd=2.38)	78.3% (sd=2.31)

Table 3 Recognition accuracy of LRC with K-means clustering across benchmark datasets

Dataset	Grimace	Faces95	Faces96	ORL
Original size	200 X 180	200 X 180	196 X 196	112 X 92
LRC method	99.48% (sd=0.76)	75.84% (sd=1.35)	95.46% (sd=0.78)	79.8% (sd=2.33)
LRC method and K-means	99.83% (sd=0.18)	86.15% (sd=0.85)	98.68% (sd=0.19)	91.72% (sd=1.36)

Table 4 Comparative analysis of LRC recognition accuracy using Manhattan distance across benchmark datasets

Dataset	Grimace	Faces95	Faces96	ORL
Original size	200 X 180	200 X 180	196 X 196	112 X 92
LRC	99.48% (sd=0.76)	75.84% (sd=1.35)	95.46% (sd=0.78)	79.8% (sd=2.33)
LRC method and Manhattan distance	99.81% (sd=0.25)	80.06% (sd=1.61)	95.94% (sd=0.75)	83.06% (sd=2.34)

Table 5 Recognition accuracy of integrated LRC with image resizing, K-means clustering, and Manhattan distance across benchmark datasets

Database	Size of images			
	Original size	Resize to 30%	Resize to 20%	Resize to 10%
	200 X 180	60 X 54	40 X 36	20 X 10
Grimace	99.48% (sd=0.76)	99.93% (sd =0.15)	99.94% (sd=0.14)	99.85% (sd=0.19)
Faces95	75.84% (sd=1.35)	89.76% (sd=0.91)	89.92% (sd=0.76)	90.28% (sd=0.67)
Database	Size of images			
	Original size	Resize to 30%	Resize to 20%	Resize to 10%
	196 X 196	59 X 59	39 X 39	20 X 20
Faces96	95.46% (sd=0.78)	98.74% (sd=0.23)	98.84% (sd=0.2)	98.76% (sd=0.21)
Database	Size of images			
	Original size	Resize to 30%	Resize to 20%	Resize to 10%
	112 X 92	34 X 28	22 X 18	11 X 9
ORL	79.8% (sd=2.33)	93.84% (sd=0.9)	93.41% (sd=1.11)	93.28% (sd=0.99)

4.2 Recognition accuracy obtained from LRC with K-means clustering method

Results of experimentation 4.2 found that using k-means clustering to select representative dataset entries for each individual, rather than random selection, consistently yielded improved results across all experiments. It also significantly reduced the number of images in the dataset. Selecting appropriate group representatives still preserves the specific characteristics of almost all the images. The recognition accuracy increased by 0.35%, 10.84%, 3.22%, and 11.92% for the grimace, faces95, faces96, and ORL datasets, respectively.

4.3 Recognition accuracy obtained from LRC and Manhattan distance measurements (norm1)

Results of experimentation 4.3 were found that changing the distance measurement method can slightly improve the efficiency of the LRC method compared to the two previous experiments. The recognition accuracy increased by 0.33%, 4.22%, 0.48%, and 3.14% for the grimace, faces95, faces96, and ORL datasets respectively.

4.4 Recognition accuracy obtained from integrated LRC with image resizing, K-means clustering, and Manhattan distance measurements

The previous experiment results indicated that we could combine all methods to boost the maximum efficiency of each dataset in this research. Compared the experiment on the original size from Table 2 with the LRC method combined three processes: image resizing, K-means clustering, and Manhattan distance measurements. The recognition accuracy increased by 0.45%, 14.44%, 3.38%, and 14.04% for the grimace, faces95, faces96, and ORL datasets respectively.

5. CONCLUSION

In this research, our goal is to explore the workings of the LRC method to enhance the efficiency of facial recognition. We aim to identify the factors that contribute to improving the ability to identify individuals by thoroughly studying the working process of the LRC method at each stage and finding ways to enhance its efficiency. We found that the three main factors with the most significant impact are as follows:

1. Selecting diverse characteristics of representative images in the dataset for each individual enhances the efficiency of the LRC method and decreases the number of datasets for each individual. We use K-means clustering in this process.
2. Reducing the size of the images used in the dataset that makes the specific characteristics for each individual, as well as reducing the storage space and processing time to obtain the best representative image for each individual.
3. Changing the distance measurement method for the classification process to Manhattan distance improves the performance of distinguishing differences in each group and reduces the identification processing times.

6. LIMITATIONS AND FUTURE WORKS

The study's limitations include understanding the detailed working principles of each step of the LRC method to identify the main factors in correctly classifying individuals at each step. This understanding is crucial for selecting the appropriate improvement technique. The K-means clustering may not always result in the desired number of groups. It might be necessary to reinitiate the image sets until each individual is divided into five groups. Additionally, image resizing is necessary to solve the multiple times of the system of

equations to obtain all the pixel values of the new image. The selected four benchmark datasets for our tests based on the hypothesis that choosing a good set of representative images, even when the dataset is similar, will enhance the recognition accuracy before expanding our approach to the complex situation of the dataset.

Future research directions could involve selecting novel grouping and image reduction techniques for the LRC method with specific situations of datasets or studying the working principles of other deep learning techniques, such as convolutional neural networks (CNN). That could involve identifying all factors that affect identity verification at each stage and finding suitable techniques for improvement.

ACKNOWLEDGMENT(S)

Financial support was provided by The Fundamental Fund (FF) for basic researchers in the university under the Office of Higher Education, Thailand. We thank the referees for their valuable reports that have improved this work.

REFERENCES

- Barnouti, N. H. (2016). Improve face recognition rate using different image pre-processing techniques. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 5(4), 46-53.
- Bartlett, M. S., Movellan, J. R., & Sejnowski, T. J. (2002). Face recognition by independent component analysis. *IEEE transactions on neural networks*, 13(6), 1450–1464. <https://doi.org/10.1109/TNN.2002.804287>
- Belhumeur, P. N., Hespanha, J. P., & Kriegman, D. J. (1997). Eigenfaces vs. fisherfaces: Recognition using class specific linear projection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 19(7), 711-720. <https://doi.org/10.1109/34.598228>
- Bhadkare, B., & Jotwani, V. (2024). Enhancing Face Recognition Accuracy On Low-Resolution Databases Using Interpolation Techniques And Feature Extraction Techniques. *Journal of Advanced Zoology*, 45(3), 465-482.
- Cambridge University Computer Laboratory. (1992-1994). AT&T Laboratories Cambridge, Retrieved January 12, 2024, from <http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/facedatabase.html>
- Dharavath, K., Talukdar, F. A., & Laskar, R. H. (2014). Improving face recognition rate with image preprocessing. *Indian Journal of Science and Technology*, 7(8), 1170-1175.
- Gülşen, M. F., Taşkıran, M., Taşçı, S. E., & Kahraman, N. (2024). An Optimal Flow for Face Recognition: Analysis/Effects of Face Detection, Alignment and Cropping Techniques. In *26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA)* IEEE 2024. pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/DSPA60853.2024.10510128>
- Hond, D., & Spacek, L. (1997). Collection of Facial Images Databases. Retrieved January 12, 2024, from <https://cmp.felk.cvut.cz/~spacelib/faces/>
- Naseem, I., Togneri, R., & Bennamoun, M. (2010). Linear regression for face recognition. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 32(11), 2106-2112. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2010.128>
- Turk, M., & Pentland, A. (1991). Eigenfaces for recognition. *Journal of cognitive neuroscience*, 3(1), 71-86. <https://doi.org/10.1162/jocn.1991.3.1.71>
- Wang, B., Li, W., Li, Z., & Liao, Q. (2013). Adaptive linear regression for single-sample face recognition. *Neurocomputing*, 115, 186-191. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2013.02.004>
- Wang, M., & Deng, W. (2020). Deep face recognition with clustering based domain adaptation. *Neurocomputing*, 393, 1-14, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.02.005>
- Wei, P., Zhou, Z., Li, L., & Jiang, J. (2018). Research on face feature extraction based on K-mean algorithm. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 83, 1-9. <https://doi.org/10.1186/s13640-018-0313-7>

Generalization of α - G -Contractions to j - G -Contractions on Uniform Spaces

Atthakorn Sakda¹, and Sittichoke Songsa-ard^{1*}

¹Faculty of Science and Technology, Surattani Rajabhat University, 272 Surat-Nasan Road, Khun Thale Subdistrict, Mueang Surat Thani District, Surat Thani, 84100 Thailand.

* Corresponding Author, E-mail: sittichoke.son@sru.ac.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.01.003

Received 14 January 2025; Revised 6 April 2025; Accepted 12 April 2025

ABSTRACT

This work introduces the concept of j - G -contractions on uniform spaces generated by a saturated collection of pseudo-metrics, extending the theoretical framework of α - G -contractions. Two main theorems are presented, both of which establish that if the map satisfies certain conditions, then it is a Picard operator. The first theorem relies on conditions defined by the structure of the space and the graph, while the second theorem utilizes conditions related to orbital G -continuity. Criteria are provided for verifying j - G -contraction conditions, and it is shown that these maps satisfy the conditions of the main theorems. Some findings demonstrate that modifying the graph to satisfy j - G -contraction conditions can lead to an enlarged convergence set.

KEYWORDS: Uniform spaces, Fixed point theory, j - G -contractions, Picard operator

1. INTRODUCTION

Over the past few decades, fixed point theory has emerged as a valuable tool in various branches of mathematics, particularly in the study of functional equations, differential equations, and optimization. One of its fundamental results is the Banach Contraction Principle, which states that every contraction mapping on a complete metric space has a unique fixed point. Furthermore, given any initial point in the space, the Picard iteration sequence generated by the mapping converges to this fixed point, ensuring uniqueness in iterative processes.

Many researchers have sought to generalize the Banach Contraction Principle within the framework of metric spaces, particularly by incorporating graph structures and partial orders. The study of contractions in partially ordered metric spaces was first initiated by Ran and Reurings (2004), who extended Banach's theorem to such settings. Building on this foundation, Nieto and Rodríguez-López (2007) introduced Picard operators within partially ordered sets, refining fixed point results under ordered conditions. Later, Jachymski (2008) extended these ideas by introducing graph-based contractions, proving that Banach's theorem remains valid in metric spaces endowed with a directed graph. Further advancements were made by Bojor (2012), who introduced G -Reich type contractions, a generalization that relaxes the Banach contraction condition while ensuring fixed points exist under suitable graph connectivity assumptions. These contributions have played a crucial role in extending fixed point results beyond classical contraction mappings, particularly in metric spaces incorporating graph structures and partial orders.

In parallel with these advancements, research on contractions within uniform spaces, which

generalize metric spaces, has also progressed. Notably, uniform spaces permit the definition of Cauchy sequences and Cauchy filters, allowing for broader fixed point results. One direction of study focuses on the concept of E -distance, which provides a generalized way to measure distances in uniform spaces and has been widely used in contraction conditions. Another approach considers collections of saturated pseudo-metrics. These perspectives offer distinct formulations of contraction principles in uniform spaces, each contributing to the development of fixed point theory in different ways.

E -distance has been studied as a generalization of metric distance, allowing more general contraction conditions in uniform spaces. Several studies have explored its applications in fixed point theory. Olatinwo (2008) introduced integral-type contractions, incorporating E -distance and A -distance to define contractive conditions based on integral inequalities. Dhagat et al. (2009) established common fixed point theorems using E -distance, providing foundational results for contraction mappings in uniform spaces. Ali et al. (2014) applied E -distance to α - ψ -contractive mappings, extending function-based contractions in uniform spaces, while Ali et al. (2017) introduced E_s -distance, an extension of E -distance, to study FG-contractions and G -contractions in graph-based uniform spaces. Hosseini & Mirmostafae (2020) developed common fixed point results in Hausdorff uniform spaces, incorporating A -distance and E -distance into contractive mappings with graph structures. Umudu & Adewale (2021) further extended these results by integrating E -distance into α -admissible mappings and simulation functions, establishing fixed point results under more general contractive conditions.

An alternative approach in fixed point theory for uniform spaces involves using a collection of pseudo-metrics. Nashed (1971) was among the first to introduce γ -contractions in locally convex spaces, extending Banach contraction principle beyond standard metric spaces. Angelov (1987) built on this by proposing Φ -contractions in Hausdorff uniform spaces, incorporating both contractions and γ -contractions, and proving fixed point existence under broader conditions. Later, Angelov (1991) further generalized Φ -contractions to j -nonexpansive and j -contraction maps, which preserve non-expansiveness while allowing different pseudo-metrics before and after mapping. Angelov also established sufficient conditions for fixed points in uniform spaces under this framework. These contributions significantly expanded contraction principles beyond classical metric spaces, forming the foundation for graph-based contractions and multi-metric fixed point theory.

Building on this line of research, P. Chaoha and S. Songsa-ard (2014b) investigated functionally Lipschitzian (FL) mappings and functionally uniformly Lipschitzian (FUL) mappings in locally convex spaces, examining the weak topology on normed spaces and establishing criteria for FL and FUL mappings, showing that FL mappings are weakly continuous and the fixed point set of FUL mappings is a retract of their convergence set. Furthermore, they explored fixed points in uniform spaces (Chaoha & Songsa-ard, 2014a), focusing on sufficient conditions for the existence of fixed points of J -contractions in uniform spaces endowed with a collection of pseudo-metrics and investing the convergence set of J -nonexpansive mappings. As a result, they showed that the fixed point set of J -nonexpansive mappings is a retract of their convergence set and also provided examples of

ordinary differential equations (ODEs) that utilize these fixed point results to guarantee the existence of solutions.

A further extension was developed by Songsa-ard (2024), who introduced α - G -contractions on uniform spaces generated by a collection of pseudo-metrics, combining the concepts of γ -contractions and graph-based contractions. The study also provided corresponding criteria and illustrative examples. Under certain conditions, these α - G -contractions are Picard operators on specific subsets with respect to the given graph.

The previously discussed work provides the motivation to extend the concept of α - G -contractions to j - G -contractions, drawing inspiration from the framework of j -nonexpansive maps. Our investigation focuses on j - G -contractions within uniform spaces generated by a saturated collection of pseudo-metrics. This work not only introduces a new notion of j - G -contraction, which involves a somewhat intricate definition, but also provides criteria for determining whether a mapping satisfies the j - G -contraction condition.

In general, proving that a mapping is a contraction is challenging because it requires demonstrating that the distance between any two mapped points is at most their original distance scaled by a real number no greater than 1. However, the key advantage of j - G -contractions defined on a uniform space generated by a collection of pseudo-metrics is that the contraction condition has a higher likelihood of being satisfied. This is because the distances before and after applying the mapping may not need to be measured using the same pseudo-metric. Moreover, incorporating graph structure reduces the points requiring verification under the contraction condition, increasing the likelihood of a mapping satisfying the j - G -contraction condition. Consequently, the size

of the convergence set also depends on the structure of the graph G .

2. PRELIMINARIES

We provide the necessary definitions and background, including uniform spaces generated by a saturated collection of pseudo metrics, graph-based contractions.

Definition 2.1. A pseudo-metric on a nonempty set X is a mapping $p: X \times X \rightarrow \mathbb{R}$ having the following properties:

1. $p(x, y) \geq 0$ for all $x, y \in X$.
2. $p(x, y) = p(y, x)$ for all $x, y \in X$.
3. $p(x, y) \leq p(x, z) + p(z, y)$ for all $x, y, z \in X$.

Next, we define the topology induced by a given collection of pseudo-metrics.

Definition 2.2. Suppose A is an index set and $\mathcal{A} = \{p_\alpha : \alpha \in A\}$ where p_α is a pseudo-metric on X . Let $\varepsilon > 0$, $\alpha \in A$, $x \in X$ and define $B_{\alpha, x}(\varepsilon) = \{y \in X : p_\alpha(y, x) < \varepsilon\}$. Then the set $\mathcal{S} = \{B_{\alpha, x}(\varepsilon) : \varepsilon > 0, \alpha \in A, x \in X\}$ is a subbasis for topology on X . The space $(X, \mathcal{A})$, endowed with the topology generated by $\mathcal{S}$, is called a uniform space generated by a collection $\mathcal{A}$ of pseudo-metrics. A collection $\mathcal{A}$ is saturated if and only if for all $x, y \in E$, if $\alpha \in A$, $p_\alpha(x, y) = 0$, then $x = y$.

In a uniform space, we have the advantage of explicitly describing the notion of closeness between any two points, which naturally leads to the following definition of a Cauchy sequence.

Definition 2.3. Let $(X, \mathcal{A})$ be a uniform space generated by a collection $\mathcal{A} = \{p_\alpha : \alpha \in A\}$ of pseudo-metrics indexed by A . Then (x_n) is a Cauchy sequence if and only if for all $\varepsilon > 0$, $\alpha \in A$, there exists $N \in \mathbb{N}$ such that for any $m, n \geq N$, $p_\alpha(x_n, x_m) < \varepsilon$. A uniform space $(X, \mathcal{A})$ is said to be sequentially complete if every Cauchy sequence in X converges to a point in X .

Next, we introduce several graph-theoretic concepts used specifically in this paper.

Definition 2.4. Let $(X, \mathcal{A})$ be a uniform space generated by a collection $\mathcal{A}$ of pseudo-metrics. A weighted directed graph associated with $(X, \mathcal{A})$ is defined as an ordered pair $G = (V(G), E(G))$ satisfying:

1. $V(G) = X$.
2. For any $x \in V(G)$, $(x, x) \in E(G)$.
3. Each edge $(x, y) \in E(G)$ is assigned a set of weights indexed by pseudo-metrics in $\mathcal{A}$ given by $\{p(x, y) : p \in \mathcal{A}\}$.

We also introduce the notion of conversion graphs and the concept of undirected graphs.

Definition 2.5. A conversion graph of a graph G , denoted G^{-1} , is obtained by reversing all edges of G and the vertex of G^{-1} is the same as G , so $V(G^{-1}) = V(G)$, and the edge set is given by

$$E(G^{-1}) = \{(x, y) : (y, x) \in E(G)\}.$$

An undirected graph of G , denoted by $\tilde{G}$, is constructed in such a way that its set of vertices is the vertices of G i.e., $V(\tilde{G}) = V(G)$, and its set of edges is taken as the union of the edges of G and those of its conversion graph G^{-1} ($E(\tilde{G}) = E(G) \cup E(G^{-1})$).

Next, we recall the standard definitions related to connectivity in graphs, including the notions of a **path**, **connectedness**, and **weak connectedness**, which will be essential in our discussion.

Definition 2.6. A path of length $N \in \mathbb{N}$ in a graph G from a vertex x to a vertex y is a sequence of $N+1$ vertices $(x_i)_{i=0}^N$ satisfying $x_0 = x$, $x_N = y$, and $(x_{i-1}, x_i) \in E(G)$ for $i = 1, 2, \dots, N$. The graph G is called connected if for every pair of x and y in $V(G)$, there is a path from x to y and a path from y back to x . Moreover, G is called weakly connected if $\tilde{G}$ is connected.

We now introduce two additional concepts specific to the work of Jachymski (2008): the definition of a

component and the notion of orbital G -continuity.

Definition 2.7. (Jachymski, 2008). The equivalence class of x in a graph G , denoted by $[x]_G$, is defined as the set of vertices of G that are linked to x by a path on G . Moreover, the component of G containing x , denoted by G_x , is the largest connected subgraph of G that includes x among its vertices. The vertices of this connected subgraph form the equivalence class $[x]_G$.

Definition 2.8. (Jachymski, 2008). A map $T: X \rightarrow X$ is said to be an orbitally G -continuous for all $x, y \in X$ and sequence (k_n) of positive integers such that $T^{k_n}x \rightarrow y$ and $(T^{k_n}x, T^{k_n+1}x) \in E(G)$ for any $n \in \mathbb{N}$, imply $T^{k_n+1}x = T(T^{k_n}x) \rightarrow Ty$.

The notion of **orbital G -continuity** is presented as a sufficient condition ensuring that the mapping under consideration is a **Picard operator**.

Definition. 2.9. (Nieto & Rodríguez-López, 2007) Let X be a nonempty subset of a Hausdorff space E . A map $T: X \rightarrow X$ is said to be a Picard operator if there exists a unique fixed point $x_0 \in X$ and $T^n x \rightarrow x_0$ as $n \rightarrow \infty$ for any $y \in X$.

Next, we introduce the recent definitions given by Songsa-ard (2024), including the concept of an α - G -contraction and the notion of **Cauchy equivalence** between two sequences in uniform spaces.

Definition 2.10. (Songsa-ard, 2024). Let $(E, \mathcal{A})$ be a uniform space generated by a saturated collection of pseudo metrics $\mathcal{A}$ with an indexed set A . Suppose $X \subseteq E$ is nonempty. A map $T: X \rightarrow X$ is called a α - G -contraction if there exists a graph G satisfying the following two conditions:

1. For each $(x, y) \in E(G)$, $(Tx, Ty) \in E(G)$.
2. For each $\alpha \in A$, there exists a constant $c_\alpha \in (0, 1)$ such that

$$p_\alpha(Tx, Ty) \leq c_\alpha p_\alpha(x, y)$$

for any $(x, y) \in E(G)$.

Definition 2.11. (Songsa-ard, 2024). Sequences (x_n) and (y_n) are said to be Cauchy equivalent in a uniform space $(E, \mathcal{A})$ generated by a saturated collection $\mathcal{A}$ of pseudo metrics with A as the index set, if (x_n) , and (y_n) are Cauchy sequences, and for all $\alpha \in A$, $p_\alpha(x_n, y_n)$ converges to 0 as $n \rightarrow \infty$.

Moreover, Songsa-ard presented the following theorem as a criterion for determining α - G -contractions.

Theorem 2.12. (Songsa-ard, 2024). Let $1 < p < \infty$ and let $f_1, f_2, \dots, f_N$ be non-decreasing contraction functions with respective contraction constants $k_1, k_2, \dots, k_N$. Let $c \in (0, 1)$. Suppose $T: \ell_p \rightarrow \ell_p$ is defined by

$$T(x_m) = (f_1 x_1, f_2 x_2, \dots, f_N x_N, c x_{N+1}, c x_{N+2}, \dots).$$

Let G be a graph with $V(G) = \ell_p$ and

$$E(G) = \left\{ (x_m), (y_m) : x_i = y_i \text{ for all } i = 1, \dots, N \right\}.$$

Then T is a α - G -contraction on ℓ_p endowed with the weak topology.

Next, we briefly recall the definitions and essential properties of certain sequence spaces along with their associated topologies, as these will be used to illustrate examples later in this work.

Definition 2.13. Let $1 < p < \infty$. The sequence space ℓ_p is defined by

$$\ell_p = \left\{ (x_n) \subseteq \mathbb{R} : \sum_{i=1}^{\infty} |x_i|^p < \infty \right\} \text{ and } \|\cdot\|_p: \ell_p \rightarrow \mathbb{R} \text{ is}$$

$$\text{defined by } \|(x_n)\|_p = \left(\sum_{i=1}^{\infty} |x_i|^p \right)^{\frac{1}{p}}.$$

Thus ℓ_p is a vector space (over $\mathbb{R}$) and $\|\cdot\|_p$ is a norm on ℓ_p . It is well-known that the dual space ℓ_p^* can be identified with the sequence space ℓ_q where $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. Precisely, every bounded linear functional $f \in \ell_p^*$ is uniquely represented by a sequence $(y_n) \in \ell_q$ such that $f(x_n) = \sum_{i=1}^{\infty} x_i y_i$ for all $(x_n) \in \ell_p$. The weak topology on ℓ_p is the coarsest topology on ℓ_p in which each bounded linear functional remains continuous. A sequence

(w_n) in ℓ_p converges weakly to a point $w \in \ell_p$, denoted by $w_n \xrightarrow{w} w$ as $n \rightarrow \infty$, if for each $f \in \ell_p^*$, $|f(w_n - w)| \rightarrow 0$ as $n \rightarrow \infty$.

Definition 2.14. The standard Schauder basis for ℓ_p is given by the canonical unit vectors $e_n = (\delta_{n,k})_{k=1}^\infty$ in ℓ_p where $\delta_{n,k}$ denotes the Kronecker delta such that for any $(x_m) \in \ell_p$, there exists a unique sequence of real numbers (a_m) , $(x_m) = \sum_{n=1}^\infty a_n e_n$ (in the weak topology). The associated coordinate functionals e_n^* are given explicitly by $e_n^*(x_k) = x_n$ for any $(x_k) \in \ell_p$.

The space ℓ_p , endowed with the weak topology induced by its dual ℓ_q , provides a canonical example of a locally convex space. As is well known in function analysis, the weak topology on ℓ_p is **Hausdorff** and it is **sequentially complete**. Moreover, it is generated by a collection of seminorms given by $s_{(\alpha_n)}(x_n) = \left| \sum_{i=1}^\infty \alpha_i x_i \right|$ where $(\alpha_n) \in \ell_q$ and $(x_n) \in \ell_p$ and each seminorm $s_{(\alpha_n)}$ corresponds naturally to a pseudo-metric $p_{(\alpha_n)}$, defined by

$p_{(\alpha_n)}(x, y) = s_{(\alpha_n)}(x - y) = \left| \sum_{i=1}^\infty \alpha_i (x_i - y_i) \right|$, $x, y \in \ell_p$, explicitly connecting the locally convex structure to the uniform structure. This viewpoint provides the conceptual background required for constructing examples considered later in this paper.

Finally, we introduce the definition of the **convergence set** in the general topology on X .

Definition 2.15. Let $T: X \rightarrow X$ be a mapping on a Hausdorff topological space X . The convergence set of T , denoted by $C(T)$, is given by

$$C(T) = \{x \in X : \text{the sequence } (T^n x) \text{ converges}\}.$$

3. MAIN RESULTS

In this section, we formally introduce the concept of j - G -contractions and provide explicit criteria for verifying whether a mapping satisfies this condition. We present illustrative examples, including cases

where a mapping is a j - G -contraction but not an α - G -contraction, as well as examples demonstrating the crucial role of graph structure in establishing j - G -contractions. Following this, we provide key lemmas essential for proving the main theorems, which are structured as follows: (1) conditions imposed on the space and the graph (Main Theorem 1) and (2) conditions imposed on the mapping (Main Theorem 2). Finally, we show that the proposed criteria and examples align with these conditions, leading to the conclusion that the mapping is a Picard operator on specific subsets with respect to the given graph. Moreover, we establish that the size of the convergence set depends on the underlying graph structure.

This definition is inspired by α - G -contractions, allowing the distance measurements in the contraction condition to be taken with different pseudo-metrics.

Definition 3.1. Let $(E, \mathcal{A})$ be a uniform space generated by a saturated collection of pseudo-metrics $\mathcal{A}$ with an indexed set A . Suppose $X \subseteq E$ is nonempty. A map $T: X \rightarrow X$ is called a j - G -contraction if there exists a mapping $j: A \rightarrow A$ and a weighted directed graph G associated with $(X, \mathcal{A})$ that satisfy the following two conditions:

1. **Edge preservation:** For each $(x, y) \in E(G)$, we have $(Tx, Ty) \in E(G)$.
2. **Contraction condition:** For each $\alpha \in A$, there exists a constant $c_\alpha \in (0, 1)$ such that
$$p_\alpha(Tx, Ty) \leq c_\alpha p_{j(\alpha)}(x, y)$$
for any $(x, y) \in E(G)$.

Example 3.2. Every α - G -contraction is a j - G -contraction when j is the identity on the index set of a collection of pseudo-metrics.

Moreover, in this work, a criterion is given for checking whether a map $T: \ell_p \rightarrow \ell_p$ is a j - G -contraction on ℓ_p endowed with the weak

topology, for $1 < p < \infty$. This is presented in the following the theorem.

Theorem 3.3. Let $1 < p < \infty$ and let $f_1, f_2, \dots, f_N$ be non-decreasing contraction functions with respective contraction constants $k_1, k_2, \dots, k_N$. Let $c \in (0, 1)$. Suppose $T: \ell_p \rightarrow \ell_p$ is defined by

$$T(x_m) = (f_1 x_1, f_2 x_2, \dots, f_N x_N, cx_{N+1}, cx_{N+2}, \dots).$$

Let G be a graph with $V(G) = \ell_p$ and

$$E(G) = \{((x_m), (y_m)) : x_i \geq y_i \text{ for all } i \in \mathbb{N}\}.$$

Then T is a j - G -contraction on ℓ_p endowed with the weak topology.

Proof. Choose $j((\alpha_i)) = (|\alpha_i|)_{i \in \mathbb{N}}$. To prove edge preservation, let $((x_m), (y_m)) \in E(G)$. By the definition of $E(G)$, for all $i = 1, \dots, N$, $f_i x_i \geq f_i y_i$ and for all $i \in \mathbb{N}$, $cx_{N+i} \geq cy_{N+i}$, so $(T((x_m)), T((y_m))) \in E(G)$.

Finally, to prove a contraction condition, let $(\alpha_m) \in \ell_q$ with $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$, $((x_m), (y_m)) \in E(G)$.

Define $K = \max\{k_i : i \in \mathbb{N}\} \cup \{c\} \in (0, 1)$.

Then $\left| \sum_{m=1}^{\infty} \alpha_m e^*_{-m} (T((x_m)) - T((y_m))) \right| \leq A + B$ where $A = \left| \sum_{i=1}^N \alpha_i (f_i x_i - f_i y_i) \right|$ and $B = c \left| \sum_{i=N+1}^{\infty} \alpha_i (x_i - y_i) \right|$.

Therefore

$$\left| \sum_{m=1}^{\infty} \alpha_m e^*_{-m} (T((x_m)) - T((y_m))) \right| \leq K \left| \sum_{i=1}^{\infty} |\alpha_i| (x_i - y_i) \right|.$$

Note that a constant K does not depend on $(\alpha_m) \in \ell_q$.

#

Example 3.4. Let $T: \ell_2 \rightarrow \ell_2$ is defined by

$$T(x_m) = \left(f_1 x_1, f_2 x_2, f_3 x_3, \frac{1}{3} x_4, \frac{1}{3} x_5, \dots \right),$$

where $f_1(x) = f_2(x) = \frac{\sin x + 2x + 1}{5}$ and

$$f_3(x) = \frac{2}{3}x.$$

Let G be a graph with $V(G) = \ell_2$ and

$$E(G) = \{((x_m), (y_m)) : x_i \geq y_i \text{ for all } i \in \mathbb{N}\}.$$

Then T is a j - G -contraction but it is not α - G -contraction.

Proof. Since f_1, f_2 and f_3 are non-decreasing contraction functions with respective contraction constants $k_1 = k_2 = \frac{3}{5}$ and $k_3 = \frac{2}{3}$, by theorem 3.3, T is a j - G -contraction.

To show that T is not an α - G -contraction, let $(\alpha_m) = (0, 0, -1, 1, 0, \dots)$ be a sequence in ℓ_2 and $b \in (0, 1)$. Choose $(x_m) = (1, 1, 9, 9, 1, 0, \dots)$ and $(y_m) = (0, 0, \dots)$ in ℓ_2 . Then

$$\left| \sum_{m=1}^{\infty} \alpha_m e^*_{-m} (T((x_m)) - T((y_m))) \right| = \left| (-1)f_3(9) + \frac{1}{3}(9) \right| = 3.$$

However,

$$b \left| \sum_{m=1}^{\infty} \alpha_m (x_m - y_m) \right| = b|-9+9|=0.$$

Therefore T is not α - G -contraction.

#

This example illustrates that the class of j - G -contraction is more general than the class of not α - G -contraction. We present an additional example to further illustrate the flexibility of j - G -contraction in selecting an appropriate graph structure.

The next example demonstrates how the choice of a graph can be utilized to enforce a mapping to satisfy the j - G -contraction condition.

Example 3.5. Let $T: \ell_2 \rightarrow \ell_2$ is defined by

$$T(x_m) = \left(f_1 x_1, f_2 x_2, f_3 x_3, \frac{1}{3} x_4, \frac{1}{3} x_5, \dots \right),$$

where $f_1(x) = f_2(x) = \frac{\sin x + x}{2}$ and $f_3(x) = \frac{2}{3}x$.

Let G be a graph with $V(G) = \ell_2$ and

$$E(G) = \{((x_m), (y_m)) : x_1 = y_1, x_2 = y_2, x_i \geq y_i \text{ for all } i \geq 3\}.$$

Then T is a j - G -contraction.

Proof. The proof follows a reasoning similar to that of Theorem 3.3. Since $x_1 = y_1, x_2 = y_2$,

$$\left| \sum_{m=1}^{\infty} \alpha_m e^*_{-m} (T((x_m)) - T((y_m))) \right| \leq A + B \text{ where } A = \left| \alpha_3 (f_3 x_3 - f_3 y_3) \right| \text{ and } B = \frac{1}{3} \left| \sum_{i=4}^{\infty} \alpha_i (x_i - y_i) \right|.$$

Therefore

$$\left| \sum_{m=1}^{\infty} \alpha_m e^*_{-m} (T((x_m)) - T((y_m))) \right| \leq \frac{2}{3} \left| \sum_{i=1}^{\infty} |\alpha_i| (x_i - y_i) \right|.$$

Then T is a j - G -contraction.

#

From the above example, it can be observed that the key factor enabling T to be a j - G -contraction lies in the graph G , where the definition of $E(G)$ ensures that $x_1 = y_1$ and $x_2 = y_2$. This structure removes the need to consider f_1 and f_2 , which create difficulties in establishing bounds.

According to the definition of a j - G -contraction, we observe the following interesting relationship among the graphs G, G^{-1} , and $\tilde{G}$.

Lemma 3.6. Let $(E, \mathcal{A})$ be a uniform space generated by a collection of pseudo metrics $\mathcal{A}$ with an indexed set A , where $\mathcal{A}$ is saturated. Suppose $X \subseteq E$ is nonempty and $T: X \rightarrow X$.

If T is a j - G -contraction, then T is also a j - G^{-1} -contraction and a j - $\tilde{G}$ -contraction.

Proof. Since T is a j - G -contraction, there exist a map $j: A \rightarrow A$ and a graph G . To show that T is a j - G^{-1} -contraction, since $(y, x) \in E(G)$, $(Tx, Ty) \in E(G^{-1})$. Hence, T preserves the edges of G^{-1} .

Let $\alpha \in A$ and $(x, y) \in E(G^{-1})$. Then $(y, x) \in E(G)$, so

$$p_\alpha(Tx, Ty) \leq c_\alpha p_{j(\alpha)}(x, y).$$

To show that T is a j - $\tilde{G}$ -contraction, by the definition of $\tilde{G}$, $E(\tilde{G}) = E(G) \cup E(G^{-1})$. Since T is a j - G -contraction and a j - G^{-1} contraction, T is also a j - $\tilde{G}$ -contraction. #

To prove the main theorem, we need the following lemma and additional supporting results:

Lemma 3.7. Let X be a nonempty subset of a uniform space generated by a saturated collection of pseudo metrics $\mathcal{A}$, where $\mathcal{A}$ is indexed by a set A . Suppose $T: X \rightarrow X$ is a j - G -contraction with constants c_α . Assume further that for every $\alpha \in A$, there exists $n_0 \in \mathbb{N}$ such that for all $n \in \mathbb{N}$ and all $x, y \in X$,

$$p_{j^n(\alpha)}(x, y) \leq p_{j^{n_0}(\alpha)}(x, y).$$

Then for every $x \in X$ and $y \in [x]_{\tilde{G}}$ there exists $r_\alpha(x, y) \geq 0$ such that

$$p_{j^n(\alpha)}(x, y) \leq \left(\prod_{k=0}^{n-1} c_{j^k(\alpha)} \right) r_\alpha(x, y)$$

For all $\alpha \in A$ and $n \in \mathbb{N}$.

Proof. Let $x \in X$ and $y \in [x]_{\tilde{G}}$. Then there is a path $\{x_i\}_{i=0}^N$ in $\tilde{G}$ from x to y for some $N \in \mathbb{N}$ where $x_0 = x$, $x_N = y$ and $(x_{i-1}, x_i) \in E(\tilde{G})$ for all $i = 1, 2, \dots, N$.

Let $\alpha \in A$. Define $r_\alpha(x, y) = \sum_{i=1}^N p_{j^{n_0}(\alpha)}(x_{i-1}, x_i) \geq 0$.

Since T is a j - G -contraction, there is a constant $c_\alpha \in (0, 1)$ such that

$$p_\alpha(T^{n_0}x_{i-1}, T^{n_0}x_i) \leq \left(\prod_{k=0}^{n_0-1} c_{j^k(\alpha)} \right) p_{j^{n_0}(\alpha)}(x_{i-1}, x_i)$$

For all $i = 1, 2, \dots, N$. Then

$$\begin{aligned} p_\alpha(T^n x, T^n y) &\leq \sum_{i=1}^N p_\alpha(T^{n_0}x_{i-1}, T^{n_0}x_i) \\ &\leq \sum_{i=1}^N \left(\prod_{k=0}^{n_0-1} c_{j^k(\alpha)} \right) p_{j^{n_0}(\alpha)}(x_{i-1}, x_i) \\ &\leq \left(\prod_{k=0}^{n_0-1} c_{j^k(\alpha)} \right) \sum_{i=1}^N p_{j^{n_0}(\alpha)}(x_{i-1}, x_i) \\ &= \left(\prod_{k=0}^{n_0-1} c_{j^k(\alpha)} \right) r_\alpha(x, y). \end{aligned}$$

#

Theorem 3.8. A graph G is weakly connected if and only if for every j - G -contractions $T: X \rightarrow X$ such that $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\prod_{k=0}^{n-1} c_{j^k(\alpha)} \right)$ converges, the sequences $(T^n x)$ and $(T^n y)$ are Cauchy equivalent for all $x, y \in X$.

Proof. Suppose G is weakly connected. Let $x \in X$.

Then $[x]_{\tilde{G}} = X$, so $Tx \in [x]_{\tilde{G}}$.

First, to show that $(T^n x)$ is a Cauchy sequence, let $\alpha \in A$ and $\varepsilon > 0$. By Lemma 3.7 and Definition 3.1,

there exists $r_\alpha(x, Tx) > 0$ such that

$$p_{j^n(\alpha)}(x, y) \leq \left(\prod_{k=0}^{n-1} c_{j^k(\alpha)} \right) r_\alpha(x, y).$$

Since $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\prod_{k=0}^{n-1} c_{j^k(\alpha)} \right)$ converges, it is Cauchy. Then

$$\begin{aligned} p_\alpha(T^m x, T^n x) &\leq \sum_{i=m}^{n-1} p_\alpha(T^i x, T^{i+1} x) \\ &\leq \sum_{i=m}^{n-1} \left(\prod_{k=0}^{i-1} c_{j^k(\alpha)} \right) r_\alpha(x, Tx) \\ &< \varepsilon. \end{aligned}$$

By the same argument, $(T^n y)$ is also Cauchy.

Next, to show that $(T^n x)$ and $(T^n y)$ are Cauchy equivalent, let $\alpha \in A$. Since $y \in [x]_{\tilde{G}}$, by Lemma 3.5,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} p_\alpha(T^n x, T^n y) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\prod_{k=0}^{n-1} c_{j^k(\alpha)} \right) r_\alpha(x, y).$$

By the assumption, then $\lim_{n \rightarrow \infty} p_\alpha(T^n x, T^n y) = 0$.

Hence, $(T^n x)$ and $(T^n y)$ are Cauchy equivalent.

Conversely, suppose that G is not weakly connected. That is, $\tilde{G}$ is not a connected graph. Then there exist $x_0, y_0 \in X$ such that there is no path from x_0 to y_0 ; in other words, $y_0 \notin [x_0]_{\tilde{G}}$.

Define a map $T: X \rightarrow X$ by

$$Tx = \begin{cases} x_0, & \text{if } x \in [x_0]_{\tilde{G}}, \\ y_0, & \text{if } x \notin [x_0]_{\tilde{G}}. \end{cases}$$

Then $(T^n x_0) = (x_0)$ and $(T^n y_0) = (y_0)$ are constant sequences with $x_0 \neq y_0$. Since $\mathcal{A}$ is saturated, there exists $\alpha_0 \in A$ such that $p_{\alpha_0}(x_0, y_0) \neq 0$, and hence, $(T^n x)$ and $(T^n y)$ are not Cauchy equivalent.

Finally, it remains to show that T is a j - $\tilde{G}$ -contraction by choosing j to be the identity function on A . If $(x, y) \in E(G)$ then $y \in [x]_{\tilde{G}}$, so (Tx, Ty) is either (x_0, x_0) or (y_0, y_0) , both of which lie in $E(G)$. Therefore, T preserves edges of G .

Let $\alpha \in A$ and choose $c_\alpha = \frac{1}{3}$. If $(x, y) \in E(G)$, then

$$p_\alpha(Tx, Ty) = 0 \leq c_\alpha p_{j(\alpha)}(x, y).$$

Hence, T is a j - $\tilde{G}$ -contraction. #

Theorem 3.9. Let X be a nonempty subset of a uniform space generated by a saturated collection of pseudo metrics $\mathcal{A}$, where $\mathcal{A}$ is indexed by a set A . Suppose $T: X \rightarrow X$ is a j - $\tilde{G}$ -contraction, and there is a point $x_0 \in X$ such that $Tx_0 \in [x_0]_{\tilde{G}}$.

Let $\tilde{G}_{x_0}$ be the connected component of $\tilde{G}$ that has x_0 as a vertex. Then $[x_0]_{\tilde{G}}$ is T -invariant, and $T|_{[x_0]_{\tilde{G}}}$ is a j - $\tilde{G}_{x_0}$ -contraction.

Proof. Let $x \in [x_0]_{\tilde{G}}$. Then there is a path $\{x_i\}_{i=0}^N$ in $\tilde{G}$ from x_0 to x , where $x_N = x$ and $(x_{i-1}, x_i) \in E(\tilde{G})$ for all $i = 1, 2, \dots, N$. Since T preserves edges of $\tilde{G}$, we have $(Tx_{i-1}, Tx_i) \in E(\tilde{G})$ for all $i = 1, 2, \dots, N$. Consequently, $\{Tx_i\}_{i=0}^N$ is a path in $\tilde{G}$ from Tx_0 to Tx . Hence, $Tx \in [Tx_0]_{\tilde{G}} = [x_0]_{\tilde{G}}$.

To show that $T|_{[x_0]_{\tilde{G}}}$ is a j - $\tilde{G}_{x_0}$ -contraction, let $(x, y) \in E(\tilde{G}_{x_0})$. Then there is a path $\{x_i\}_{i=0}^N$ in $\tilde{G}_{x_0}$ from x_0 to y with $x_{N-1} = x$ and $x_N = y$, and each $(x_{i-1}, x_i) \in E(\tilde{G}_{x_0})$.

Since $(x_{N-1}, x_N) = (x, y) \in E(\tilde{G}_{x_0}) \subseteq E(\tilde{G})$, it follows that $(Tx_{N-1}, Tx_N) = (Tx, Ty) \in E(\tilde{G})$.

Moreover, since $Tx_0 \in [x_0]_{\tilde{G}}$ there is a path $\{y_i\}_{i=0}^M$ in $\tilde{G}_{x_0}$ from x_0 to Tx_0 . Consequently, T being a j - $\tilde{G}$ -contraction implies that $\{Tx_i\}_{i=0}^N$ is a path in $\tilde{G}$ from Tx_0 to Ty . Then the sequence

$(x_0 = y_0, y_1, \dots, y_M = Tx_0, Tx_0, Tx_1, \dots, Tx_{N-2}, Tx, Ty)$ is a path in $\tilde{G}$ from x_0 to Ty . Hence $(Tx, Ty) \in E(\tilde{G}_{x_0})$, so $T|_{[x_0]_{\tilde{G}}}$ preserves edges in $\tilde{G}_{x_0}$.

Since T is a j - $\tilde{G}$ -contraction, for each $\alpha \in A$ there is $c_\alpha \in (0, 1)$ such that for every $(x, y) \in E(\tilde{G})$,

$$p_\alpha(Tx, Ty) \leq c_\alpha p_{j(\alpha)}(x, y).$$

If $(x, y) \in E(\tilde{G}_{x_0}) \subseteq E(\tilde{G})$, then

$$p_\alpha(T|_{[x_0]_{\tilde{G}}} x, T|_{[x_0]_{\tilde{G}}} y) = p_\alpha(Tx, Ty) \leq c_\alpha p_{j(\alpha)}(x, y).$$

#

Next, we will present the first main theorem, which utilizes certain properties of these spaces.

Theorem 3.10. (Main Theorem 1). Let X be a nonempty subset of a uniform space generated by a saturated collection of pseudo metrics $\mathcal{A}$, where $\mathcal{A}$ is indexed by a set A . Suppose $(X, \mathcal{A}, G)$ satisfies the following property:

Condition (*). For every sequence (x_n) in X , if $x_n \rightarrow x$ as $n \rightarrow \infty$ and $(x_n, x_{n+1}) \in E(G)$ for all $n \in \mathbb{N}$, then there exists a subsequence (x_{n_k}) of (x_n) such that $(x_{n_k}, x) \in E(G)$ for all $k \in \mathbb{N}$.

Let $T: X \rightarrow X$ be a j - $\tilde{G}$ -contraction, and define

$$X_T = \{x \in X : (x, Tx) \in E(G)\}.$$

If $x \in X_T$ and $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\prod_{k=0}^{n-1} c_{j^k(\alpha)} \right)$ converges then $T|_{[x]_{\tilde{G}}}$ is a Picard operator.

Proof. Let $x \in X_T$. By Theorem 3.7, the set $[x]_{\tilde{G}}$ is invariant under T , and $T|_{[x]_{\tilde{G}}}$ is a j - $\tilde{G}_x$ -contraction. Since $\tilde{G}_x$ is weakly connected, Theorem 3.6, implies that for any $x, y \in [x]_{\tilde{G}}$, the sequences $(T^n x)$ and $(T^n y)$ are Cauchy equivalent.

Since X is sequentially complete, there exists some $x_0 \in X$ such that $T^n x \rightarrow x_0$ and $T^n y \rightarrow x_0$ as $n \rightarrow \infty$. Moreover, since $(x, Tx) \in E(G)$, it follows that $(T^n x, T^{n+1} x) \in E(G)$ for all $n \in \mathbb{N}$. By Condition (*), there is a subsequence $(T^{n_k} x)$ of $(T^n x)$ such that $(T^{n_k} x, x_0) \in E(G)$ for every $k \in \mathbb{N}$. Consequently, $(T^{n_k+1} x, Tx_0) \in E(G)$ as well.

Hence, $(x, Tx, T^2x, \dots, T^{n_1}x, x_0)$ forms a path in $\tilde{G}$ from x to x_0 , so $x_0 \in [x]_{\tilde{G}}$. Since T is a $j\text{-}\tilde{G}$ -contraction, for all $\alpha \in A$ and $k \in \mathbb{N}$,

$$p_\alpha(T^{n_k+1}x, Tx_0) \leq c_\alpha p_{j(\alpha)}(T^{n_k}x, x_0).$$

Since $T^{n_k}x \rightarrow x_0$, it follows that $T^{n_k+1}x \rightarrow Tx_0$. Since $\mathcal{A}$ is saturated, we get $Tx_0 = x_0$. Therefore, x_0 is a fixed point of $T|_{[x]_{\tilde{G}}}$.

Suppose that x, y are fixed points of $T|_{[x]_{\tilde{G}}}$. By Lemma 3.7, for each $\alpha \in A$,

$$\begin{aligned} p_\alpha(x, y) &= \lim_{n \rightarrow \infty} p_\alpha(T^n x, T^n y) \\ &\leq \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\prod_{k=0}^{n-1} c_{j^k(\alpha)} \right) r_\alpha(x, y). \end{aligned}$$

Therefore, $x=y$ since $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\prod_{k=0}^{n-1} c_{j^k(\alpha)} \right) = 0$, so $T|_{[x]_{\tilde{G}}}$ has a unique fixed point.

Hence $T|_{[x]_{\tilde{G}}}$ is a Picard operator. #

Corollary 3.11. Let $T: X \rightarrow X$ be a $j\text{-}G$ -contraction such that $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\prod_{k=0}^{n-1} c_{j^k(\alpha)} \right)$ converges and suppose G is weakly connected. Then T is a Picard operator.

Proof. Since G is weakly connected, we have $X_T = X$. Consequently, for every $x \in X$, $[x]_{\tilde{G}} = X$. By Theorem 3.10, it follows that T is a Picard operator. #

The following results focus on the map from the sequence spaces in Theorem 3.3.

Theorem 3.12. Let $1 < p < \infty$ and G be a graph with $V(G) = \ell_p$ and the edges of G by

$$E(G) = \left\{ ((x_m), (y_m)) : x_i \geq y_i \text{ for all } i \in \mathbb{N} \right\}$$

Then (ℓ_p, ℓ_p^*, G) satisfies **Condition (*)** from Theorem 3.10.

Proof. Let $(x_n^k)_{k \in \mathbb{N}}$ be a sequence in ℓ_p .

Suppose (x_n^k) converges weakly to (x_n^0) as $k \rightarrow \infty$, and that $((x_n^k), (x_n^{k+1})) \in E(G)$ for all $k \in \mathbb{N}$.

Then, for each k , and for every $(\alpha_n) \in \ell_q$, we have

$$\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n x_n^k \rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n x_n^0 \text{ as } k \rightarrow \infty.$$

Since $((x_n^k), (x_n^{k+1})) \in E(G)$ for all $k \in \mathbb{N}$, it follows that for each $i \in \mathbb{N}$,

$$x_i^k = e_i^*(x_n^k) \geq e_i^*(x_n^{k+1}) = x_i^{k+1} \text{ for all } k \in \mathbb{N}.$$

Since $e_i \in \ell_q$ for all $i \in \mathbb{N}$, we also obtain

$$\sum_{n=1}^{\infty} e_i^*(e_i) \cdot x_n^k \rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} e_i^*(e_i) \cdot x_n^0 \text{ as } k \rightarrow \infty$$

Hence $x_i^k \rightarrow x_i^0$ as $k \rightarrow \infty$, which implies $x_i^k \geq x_i^0$.

Therefore, $(x_n^k, x_n^0) \in E(G)$, which shows that (ℓ_p, ℓ_p^*, G) satisfies **Condition (*)** from Theorem 3.10. #

Next, we introduce another important lemma used to prove that the mapping in Theorem 3.3 is a Picard operator on specific subsets with respect to the given graph.

Lemma 3.13. Let $1 < p < \infty$ and let $f_1, f_2, \dots, f_N$ be non-decreasing contraction functions with respective contraction constants $k_1, k_2, \dots, k_N$. Let $c \in (0, 1)$. Suppose $T: \ell_p \rightarrow \ell_p$ is defined by

$$T(x_m) = (f_1 x_1, f_2 x_2, \dots, f_N x_N, cx_{N+1}, cx_{N+2}, \dots).$$

Let G be a graph with $V(G) = \ell_p$ and

$$E(G) = \left\{ ((x_m), (y_m)) : x_i \geq y_i \text{ for all } i \in \mathbb{N} \right\}.$$

Define

$$(\ell_p)_T = \left\{ (x_m) \in \ell_p : ((x_m), T(x_m)) \in E(G) \right\}.$$

Then the following statements hold:

- (1) If each f_i has a fixed point, then $(\ell_p)_T \neq \emptyset$.
- (2) $[(x_m)]_{\tilde{G}}$ is a closed set.

Proof. Assume $f_1, f_2, \dots, f_N$ each admit a fixed point. That is, for each $i=1, 2, \dots, N$ there is x_i such that $f_i x_i = x_i$. Then

$$T((x_m)) = (x_1, x_2, \dots, x_N, cx_{N+1}, cx_{N+2}, \dots).$$

Hence, $((x_m), T(x_m)) \in E(G)$, so $(\ell_p)_T \neq \emptyset$.

We next show that $[(x_m)]_{\tilde{G}}$ is closed.

Let $((w_m^\alpha))_{\alpha \in A}$ be a net in $[(x_m)]_{\tilde{G}}$, and let $(y_m) \in \ell_p$. Suppose

$$(w_m^\alpha) \xrightarrow{w} (y_m) \text{ as } \alpha \rightarrow \infty.$$

Since each (w_m^α) lies in $[(x_m)]_{\tilde{G}}$, we have

$$w_i^\alpha \geq x_i \text{ for all } i=1, \dots, N.$$

Since $e_i^* \in \ell_p^*$ for each $i \in \mathbb{N}$, and (w_m^α) converges weakly to (y_m) , it follows that

$$w_i^\alpha = e_i^*(w_m^\alpha) \rightarrow e_i^*(y_m) = y_i \text{ for all } i \in \mathbb{N}.$$

By the comparison theorem, we get $y_i \geq x_i$ for all $i=1, \dots, N$. Therefore, $(y_m) \in [(x_m)]_{\tilde{G}}$ which proves that $[(x_m)]_{\tilde{G}}$ is closed. #

The next theorem shows that the map in Theorem 3.3 is a Picard operator on specific subsets with respect to the given graph.

Theorem 3.14. Let $1 < p < \infty$ and let $f_1, f_2, \dots, f_N$ be non-decreasing contraction functions with respective contraction constants $k_1, k_2, \dots, k_N$. Let $c \in (0, 1)$. Suppose $T: \ell_p \rightarrow \ell_p$ is defined by

$$T(x_m) = (f_1^{x_1}, f_2^{x_2}, \dots, f_N^{x_N}, cx_{N+1}, cx_{N+2}, \dots).$$

Let G be a graph with $V(G) = \ell_p$ and

$$E(G) = \left\{ \left((x_m), (y_m) \right) : x_i \geq y_i \text{ for all } i \in \mathbb{N} \right\}.$$

Define

$$(\ell_p)_T = \left\{ (x_m) \in \ell_p : \left((x_m), T(x_m) \right) \in E(G) \right\}.$$

Then there exists $(x_m) \in (\ell_p)_T$ such that $T|_{[(x_m)]_{\tilde{G}}}$ is a Picard operator.

Proof. By Lemma 3.13 (1), we have $(\ell_p)_T \neq \emptyset$. That is, there exists $(x_m) \in (\ell_p)_T$. By Theorem 3.2, T is a j - G -contraction with the constant $K \in (0, 1)$ on ℓ_p endowed with the weak topology. By Theorem 3.12, (ℓ_p, ℓ_p^*, G) satisfies **Condition (*)**. Using the main Theorem 3.10, since K does not depend on $(\alpha_m) \in \ell_p^*$, $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\prod_{k=0}^{n-1} c_{j^k(\alpha)} \right) = \sum_{n=1}^{\infty} K^n$ converges, so we have $T|_{[(x_m)]_{\tilde{G}}}$ is a Picard operator. #

Next, we present the second main theorem, which relies on certain properties of the maps.

Theorem 3.15. (Main Theorem 2). Let X be a nonempty subset of a uniform space generated by a saturated collection of pseudo metrics $\mathcal{A}$, where $\mathcal{A}$ is indexed by a set A . Suppose $T: X \rightarrow X$ is a j - G -contraction that is also orbitally G -continuous.

If $x \in X_T$, $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\prod_{k=0}^{n-1} c_{j^k(\alpha)} \right)$ converges, and $[x]_{\tilde{G}}$ is closed, then $T|_{[x]_{\tilde{G}}}$ is a Picard operator.

Proof. Let $x \in X_T$, and assume $[x]_{\tilde{G}}$ is closed. Pick any $y \in [x]_{\tilde{G}}$. We aim to show that the sequence $(T^n y)$ converges to some $x_0 \in [x]_{\tilde{G}}$.

Since $x \in X_T$, we have $(x, Tx) \in E(G)$. By Theorem 3.9, the set $[x]_{\tilde{G}}$ is T -invariant, and $T|_{[x]_{\tilde{G}}}$ is a j - G -contraction.

Since $\tilde{G}_x$ is a connected graph, Theorem 3.9 implies that for any j - $\tilde{G}_x$ -contraction and all $u, x \in [x]_{\tilde{G}}$, the sequences $(T^n u)$ and $(T^n v)$ are Cauchy equivalent. In particular, $(T^n x)$ and $(T^n y)$ are both Cauchy sequences.

Since X is sequentially complete, there exists $x_0 \in X$ such that $(T^n x)$ and $(T^n y)$ converge to x_0 .

Since $T^n y \in [x]_{\tilde{G}}$ for all $n \in \mathbb{N}$, and $[x]_{\tilde{G}}$ is closed, it follows that $x_0 \in [x]_{\tilde{G}}$.

It remains to show that x_0 is a fixed point of $T|_{[x]_{\tilde{G}}}$. Since $(x, Tx) \in E(G)$, we have $(T^n x, T^{n+1} x) \in E(G)$ for each $n \in \mathbb{N}$.

By the orbitally G -continuous property of T , $T(T^n x) \rightarrow Tx_0$ but also $T^{n+1} x \rightarrow x_0$. Since $\mathcal{A}$ is saturated, convergence under all pseudo metrics in $\mathcal{A}$ forces $Tx_0 = x_0$.

Suppose that x, y are fixed points of $T|_{[x]_{\tilde{G}}}$. By Lemma 3.7, for each $\alpha \in A$,

$$p_\alpha(x, y) = \lim_{n \rightarrow \infty} p_\alpha(T^n x, T^n y) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\prod_{k=0}^{n-1} c_{j^k(\alpha)} \right) r_\alpha(x, y).$$

Therefore, $x = y$ since $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\prod_{k=0}^{n-1} c_{j^k(\alpha)} \right) = 0$, so $T|_{[x]_{\tilde{G}}}$ has a unique fixed point.

Therefore, $T|_{[x]_{\tilde{G}}}$ is a Picard operator. #

We will now show that the map T defined in Theorem 3.3 is a j - G -contraction, and moreover, that T is orbitally continuous, as stated in the following theorem.

Theorem 3.16. Let $1 < p < \infty$ and let $f_1, f_2, \dots, f_N$ be non-decreasing contraction functions with respective contraction constants $k_1, k_2, \dots, k_N$. Let $c \in (0, 1)$. Suppose $T: \ell_p \rightarrow \ell_p$ is defined by

$$T(x_m) = (f_1^{x_1}, f_2^{x_2}, \dots, f_N^{x_N}, cx_{N+1}, cx_{N+2}, \dots).$$

Let G be a graph with $V(G) = \ell_p$ and

$$E(G) = \left\{ \left((x_m), (y_m) \right) : x_i \geq y_i \text{ for all } i \in \mathbb{N} \right\}.$$

Then T is G -orbitally continuous.

Proof. Let $(x_m), (y_m) \in \ell_p$ and let (k_a) be a sequence of positive integers, with $a \in \mathbb{N}$.

Suppose

$T^{k_a}((x_m)) \xrightarrow{w} (y_m)$ as $a \rightarrow \infty$,
and $(T^{k_a}((x_m)), T^{k_{a+1}}((x_m))) \in E(G)$ for all $a \in \mathbb{N}$.

Then for every $(\alpha_m) \in \ell_q$ with $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$,

$$\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n e_n^*(T^{k_a}((x_m))) \rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n y_n \text{ as } a \rightarrow \infty.$$

Then

$$\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n e_n^*(T^{k_a}((x_m))) = \sum_{i=1}^N \alpha_i (f_i^{k_a} x_i) + \sum_{i=N+1}^{\infty} \alpha_i (c^{k_a} x_i).$$

Let $(\beta_m) \in \ell_q$. We have:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n e_n^*(T^{k_{a+1}}((x_m))) &= \sum_{i=1}^N \beta_i (f_i^{k_{a+1}} x_i) + \\ &\sum_{i=N+1}^{\infty} \beta_i (c^{k_{a+1}} x_i), \end{aligned}$$

and

$$\sum_{n=1}^{\infty} \beta_n e_n^*(T(y_m)) = \sum_{i=1}^N \beta_i (f_i y_i) + \sum_{i=N+1}^{\infty} \beta_i (c y_i).$$

Define

$$(\alpha_m) = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N, c\beta_{N+1}, c\beta_{N+2}, \dots) \in \ell_q.$$

Since e_i^* is continuous for every $i \in \mathbb{N}$, each f_i is continuous for $i=1, 2, \dots, N$ and $f_i^{k_a} x_i \rightarrow y_i$, it follows that $\alpha_i f_i(f_i^{k_a} x_i) \rightarrow \alpha_i f_i(y_i)$ as $a \rightarrow \infty$.

Hence,

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n e_n^*(T^{k_{a+1}}((x_m))) &= \sum_{i=1}^N \beta_i (f_i^{k_{a+1}} x_i) + \\ &\sum_{i=N+1}^{\infty} \beta_i (c^{k_{a+1}} x_i) \\ &= \sum_{i=1}^N \alpha_i (f_i^{k_{a+1}} x_i) + \\ &\sum_{i=N+1}^{\infty} \alpha_i (c^{k_{a+1}} x_i), \end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n e_n^*(T(y_m)) &= \sum_{i=1}^N \beta_i (f_i y_i) + \sum_{i=N+1}^{\infty} \beta_i (c y_i) \\ &= \sum_{i=1}^N \alpha_i (f_i y_i) + \sum_{i=N+1}^{\infty} \alpha_i y_i. \end{aligned}$$

Since $\sum_{i=1}^N \alpha_i (f_i^{k_{a+1}} x_i) + \sum_{i=N+1}^{\infty} \alpha_i (c^{k_{a+1}} x_i)$ converges to

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i f_i(y_i) + \sum_{i=N+1}^{\infty} \alpha_i y_i \text{ as } a \rightarrow \infty, \text{ it follows that}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \beta_n e_n^*(T^{k_{a+1}}((x_m))) \rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n e_n^*(T(y_m)) \text{ as } a \rightarrow \infty.$$

Therefore,

$$T(T^{k_a}((x_m))) \xrightarrow{w} T(y_m) \text{ as } a \rightarrow \infty. \quad \#$$

Next, we will show that the map defined by Theorem 3.3 satisfies all the conditions of the main

Theorem 3.15. This is illustrated by the following theorem:

Theorem 3.17. Let $1 < p < \infty$ and let $f_1, f_2, \dots, f_N$ be non-decreasing contraction functions with respective contraction constants $k_1, k_2, \dots, k_N$. Let $c \in (0, 1)$. Suppose $T: \ell_p \rightarrow \ell_p$ is defined by

$$T((x_m)) = (f_1 x_1, f_2 x_2, \dots, f_N x_N, c x_{N+1}, c x_{N+2}, \dots).$$

Let G be a graph with $V(G) = \ell_p$ and

$$E(G) = \{((x_m), (y_m)) : x_i \geq y_i \text{ for all } i \in \mathbb{N}\}.$$

Then there exists $(x_m) \in (\ell_p)_T$ such that

$$T|_{[(x_m)]_{\tilde{G}}} \text{ is a Picard operator.}$$

Proof. By Lemma 3.11 (1), we have $(\ell_p)_T \neq \emptyset$. That is, there exists $(x_m) \in (\ell_p)_T$. By Theorem 3.3, T is a j - G -contraction with the constant $K \in (0, 1)$ on ℓ_p endowed with the weak topology. By Theorem 3.12, T is orbitally continuous. Using the main Theorem 3.15, there exists $(x_m) \in (\ell_p)_T$ and since K does not depend on $(\alpha_m) \in \ell_p^*$, $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\prod_{k=0}^{n-1} c^{j^k(\alpha)} \right) = \sum_{n=1}^{\infty} K^n$ converges. Then $T|_{[(x_m)]_{\tilde{G}}}$ is a Picard operator. $\#$

By the result of Theorem 3.14 and 3.17, we conclude that $T|_{[(x_m)]_{\tilde{G}}}$ is a Picard operator where T is the map on ℓ_p . In particular, mappings constructed from Theorem 3.3 remain Picard operators on specific subsets with respect to the given graph.

Example 3.18. Let $T: \ell_2 \rightarrow \ell_2$ is defined by

$$T((x_m)) = \left(f_1 x_1, f_2 x_2, f_3 x_3, \frac{1}{3} x_4, \frac{1}{3} x_5, \dots \right),$$

where $f_1(x) = f_2(x) = \frac{\sin x + 2x + 1}{5}$ and

$$f_3(x) = \frac{2}{3}x.$$

Let G be a graph with $V(G) = \ell_2$ and

$$E(G) = \{((x_m), (y_m)) : x_i \geq y_i \text{ for all } i \in \mathbb{N}\}.$$

Then $T|_{[(0)]_{\tilde{G}}}$ is Picard operator.

Example 3.19. Let $T: \ell_2 \rightarrow \ell_2$ is defined by

$$T((x_m)) = \left(f_1 x_1, f_2 x_2, f_3 x_3, \frac{1}{3} x_4, \frac{1}{3} x_5, \dots \right),$$

where $f_1(x) = f_2(x) = \frac{\sin x + x}{2}$ and $f_3(x) = \frac{2}{3}x$.

Let G be a graph with $V(G) = \ell_2$ and $E(G) = \{((x_m), (y_m)) : x_1 = y_1, x_2 = y_2, x_i \geq y_i \text{ for all } i \geq 3\}$. Then (ℓ_2, ℓ_2^*, G) satisfies **Condition (*)** from Theorem 3.10, and hence $T|_{[(0)]_{\tilde{G}}}$ is a Picard operator.

Proof. By Theorem 3.12, (ℓ_2, ℓ_2^*, G) satisfies **Condition (*)**. Since $f_1(0) = 0 = f_2(0)$ and f_1, f_2 are nondecreasing, T and G satisfy all the conditions in Lemma 3.13. Therefore $T|_{[(0)]_{\tilde{G}}}$ is a Picard operator for the same reasons as in the proof of Theorem 3.14. #

4. CONCLUSION

This work introduces the concept of j - G -contractions on uniform generated by a saturated collection of pseudo metrics and establishes criteria for a map on ℓ_p endowed with the weak topology. Two main theorems are presented. The first theorem provides conditions on the space and a graph referred to as **condition (*)**, for the map to be a Picard operator on specific subsets with respect to the given graph. The second theorem establishes conditions on the map, specifically orbital G -continuity. Finally, we demonstrate that our examples satisfy all conditions in main theorems, thereby confirming that they are Picard operators with respect to $[x]_{\tilde{G}}$. Furthermore, in future work, we will explore the topological properties of the convergence set of j - G -contractions. Since the graph satisfying the conditions of j - G -contractions can potentially be modified to enlarge the convergence set, this provides a promising direction for studying their topological properties.

ACKNOWLEDGMENT(S)

The authors would like to express their sincere gratitude to the referees for their thorough

examination of the manuscript and for providing valuable feedback.

REFERENCES

- Ali, M. U., Fahimuddin, Kamran, T., & Karapinar, E. (2017). Fixed point theorems in uniform space endowed with graph. *Miskolc Mathematical Notes*, 18(1), 57–69.
- Ali, M. U., Kamran, T., & Karapinar, E. (2014). Fixed point of α - ψ -contractive type mappings in uniform spaces. *Fixed Point Theory and Applications*, 2014, 1–12.
- Angelov, V. G. (1987). Fixed point theorems in uniform spaces and applications. *Czechoslovak Mathematical Journal*, 37, 19–33.
- Angelov, V. G. (1991). J -nonexpansive mappings in uniform spaces and applications. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*, 43, 331–339.
- Bojor, F. (2012). Fixed point theorems for Reich type contractions on metric spaces with a graph. *Nonlinear Analysis*, 75(12), 3895–3901.
- Cain, G., & Nashed, M. (1971). Fixed points and stability for a sum of two operators in locally convex spaces. *Pacific Journal of Mathematics*, 39(3), 581–592.
- Chaotha, P., & Songsa-ard, S. (2014a). Fixed points in uniform spaces. *Fixed Point Theory and Applications*, 2014(1).
- Chaotha, P., & Songsa-ard, S. (2014b). Fixed points of functionally lipschitzian maps. *Journal of Nonlinear and Convex Analysis*, 15(4), 665–679.
- Dhagat, V. B., Singh, V., & Nath, S. (2009). Fixed point theorems in uniform space. *International Journal of Mathematical Analysis*, 3(4), 197–202.
- Hosseini, B., & Mirmostafaei, A. K. (2020). Common fixed points of generalized contractive mappings in uniform spaces. *Matematiski Vesnik*, 72(3), 232–242.
- Jachymski, J. (2008). The contraction principle for mappings on a metric space with a graph. In *Proceedings of the American Mathematical Society*, 136(4), 1359–1373.
- Nieto, J. J., & Rodríguez-López, R. (2007). Existence and uniqueness of fixed point in partially ordered sets and applications to ordinary differential equations. *Acta Mathematica Sinica (English Series)*, 23(12), 2205–2212.
- Olatinwo, M. O. (2008). Some common fixed point theorems for selfmappings satisfying two contractive conditions of integral type in a uniform space. *Central European Journal of Mathematics*, 6(2), 335–341.
- Ran, A. C. M., & Reurings, M. C. B. (2004). A fixed point theorem in partially ordered sets and some applications to matrix equations. In *Proceedings of the American Mathematical Society*, 132(5), 1435–1443.
- Songsa-ard, S., (2024). Fixed point theory for α - G -contraction types on uniform spaces with a graph G . In *Proceedings of the 28th Annual Meeting in Mathematics (AMM2024)*. pp. 80–90.
- Umudu, J. C., & Adewale, O. K. (2021). Fixed point results in uniform spaces via simulation functions. *International Journal of Mathematical Sciences and Optimization: Theory and Applications*, 7(2), 56–64.

Application of Yeast Strain *Saccharomyces cerevisiae* to Produce Wine by Using Rice and Pineapple as Raw Material

Nutthawut Meesilp^{1*}, and Yanapath Suksoem¹

¹Department of Applied Biology, Faculty of Science and Liberal Art, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand

* Corresponding Author, E-mail: nutthawutm@hotmail.com DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.01.004

Received 19 February 2024; Revised 13 January 2025; Accepted 21 January 2025

ABSTRACT

The purpose of this research was to produce fruit-flavored fermented glutinous rice wine by using yeast *S. cerevisiae* with rice and pineapple as raw materials for fermentation. Kiaw-ngu glutinous rice variety and pineapple were prepared as the mixture solutions with different ratios (rice : pineapple) as 100%–20% (v/v). Total 9 formulas of experiment were established for 7 days under anaerobic condition, and measured the characteristics of fermentative solutions in each day. The fermentation exhibited initial pH in acid ranges (4.50–4.70) and high total solid (15.0–21.9 °Brix). Alcohol value, clarity, and yeast population have gradually increased since 2 days of fermentation, whereas, pH and total solid had continuously decreased until 7 days. Especially, the mixture solution of ratio 80:20 exhibited the highest percentage of alcohol value as 9.77%, including, population of *S. cerevisiae* did not decline with average values as 7.51 log cfu/ml. On the other hand, pH, and total solid value have continuously decreased until 7 days of fermentation.

KEYWORDS: Yeast, *Saccharomyces cerevisiae*, Alcoholic beverages, Glutinous rice, Pineapple

1. INTRODUCTION

Wine is healthful alcoholic beverage with unique flavor and chemicals compositions containing water, ethanol, organic acids, phenolic compounds, proteins, polysaccharides, and numerous aroma compounds favored by consumers worldwide. Many popular fruits such as apple, pear, strawberry, cherries, plum, pineapple, oranges kiwi, banana, caja, mango, gabioba, cocoa and cupuassu are widely utilized as majority raw materials to produce wine (Thungbeni et al., 2020). Colors, mouth feel, and aroma of wine have depended on composition of phenolics and volatile compounds (Zhai et al., 2023; Wang et al., 2022). Macromolecules of polysaccharides in wine compositions have the influence on wine colloidal exhibiting the interaction of phenolics and volatile compounds, including stability and organoleptic properties. Abundant polysaccharides found in several wine are arabinogalactan protein, type II rhamnogalacturonans, and mannoproteins (Zhai et al., 2023). The important role of polysaccharides is protective colloids increasing the clarity and stabilization by inhibiting or limiting aggregation, flocculation and precipitation of colloidal particles (Alcalde-Eon et al., 2014; Riou et al., 2002), including colloidal coloring matter and tannin precipitation at cold temperature or other unstable conditions (Zhai et al., 2023).

Rice (*Oryza sativa*) is vital cereal and important economic crop. This plant contains the major nutrient source of carbohydrate and other dietaries such as protein, lipid, vitamin, and fiber. In present, there are many risks involving in plantation and production of rice such as low price in markets, acid and saline soil, plant pathogen and pests, non-standard rice seed, non-disease resistant breed, drought, and water scarcity (Verma and Srivastav, 2020). Kiaw-ngu glutinous rice is a popular variety,

which widely consumed in Thailand with important nutrients. Characteristics of rice grains is slender and long shape, including, they will be shinier and clearer after cooked than glutinous rice. Abundant vitamin E of rice playing as tocopherols (α -, γ -, and δ -tocopherols), and γ -oryzanol exhibits the antioxidant activity (Sudtasarn et al., 2019). Glutinous rice has explored the highest ethanol in conversion to acetic acid of vinegar fermentation with *S. cerevisiae* and *Acetobacter pasteurianus*, compared to Thai rice-polished, black fragrant rice, and black glutinous rice (Taweekasemsombut et al., 2021). Several rice products and their by-product from processing have been developed as human foods, and animal feeds such as vinegar, bakery, alcoholic beverage, rice bran oil, bran, and rice straw. Rice fermentation can be processed to several kind of foods and beverages such as traditional alcoholic drink (Sato) and fermented rice cake (Khao-Maak). Sato is an alcohol product manufactured from glutinous rice as raw material in fermentation process occurred by microbes in fungal group. These processes have occurred by two step as follow changing rice starch to sugar with molds, and then utilization of sugar for producing alcohol with yeast. Flavor and odor of Sato or Khao-Maak can be adapted by food additive, depended on varieties of rice and other mixtures such as banana, pea, and millet, including herbs as anti-pathogenic microbial agents such as pepper, garlic, and galangal (Tian et al., 2022). The semi-solid state fermentation of rice wine lacking amino acids and glucose due to complex structures would release the sub-units substances at late stage of fermentation slower than liquid-state fermentation of fruits juice (He et al., 2022). Thus, the amount of alcohol is the important indicators of quality of rice wine showing value lower. While, alcohol values of fruit wine are higher than only application of rice,

which depended on types of juice as raw materials. They are used as carbon and nitrogen source in fermentative processes of microorganisms (Hirst and Richter, 2016; Wang et al., 2022, Wei et al., 2016).

Saccharomyces cerevisiae is the major yeast strain used in foods fermentation with or without alcohol products such as bakery, yeast extract, baker yeast, β -glucan, organic acids, alcoholic beverage, and kefir (Liszkowska and Berłowska, 2021). Moreover, other microorganisms that convert cereal starch into sugars, alcohol, and organic acids such as *Amylomyces* sp., *Penicillium* sp., *Aspergillus* sp., *Monascus* sp., *Actinomucor* sp., *Rhizopus oligosporus*, and *Mucor racemosus*, *S. fibuligera*, *Wickerhamomyces anomalus*, and *Pediococcus pentosaceus* (Hesseltine et al., 1988). Sugars found in fruit juice are used and continuously changed into alcohol including organic acid occurred by microorganisms that sugar can be reacted to form aldehydes, esters and other chemical components (Watanabe and Shimazu, 1980).

Pineapple (*Ananas comosus*) is monocotyledonous plant, which is consumed as fresh fruit or applied to manufacture various food products. This fruit has the special aroma and important nutrients. Chemical compositions of pineapple effecting on flavor quality of fruit due to rich in ester compounds consisting methyl-2-methylbutanoate, methyl hexanoate, methyl-3-(methylthiol)-propanoate, methyl octanoate, and 2-methoxy-4-vinyl phenol. Moreover, their phytochemicals and functional bioactive compounds such as antioxidants, organic acids, bromelain, phenolic compounds, and flavonoids have the benefit for health (Ali et al., 2020; Hossain and Rahman, 2011; Roda et al., 2017).

Rice and pineapple contained many beneficial compounds for health. Therefore, the aim of the research was to produce fruit-flavored fermented

glutinous rice wine by using yeast *S. cerevisiae* with rice and pineapple as raw materials.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Rice preparation

Kiaw-ngu glutinous rice variety, as raw material of wine production was prepared by washing with water, and then soaked in distilled water for 6 hours. Soaked rice was washed again for 2 times before steaming at 100 °C for 20–30 minutes, and then washed again following air dry for 10 minutes. Prepared rice 500 g. was blended, filled with sterilized distilled water 1,000.0 ml, and mixed with 0.2% (w/w) alpha-amylase (LD Carlson company) (EC 3.2.1.1) (National Center for Biotechnology Information, 2025) (1.18 g per 100.0 g of raw rice). Rice with enzyme was reacted by incubating at room temperature (25 °C) for 4 hours (Meng and Kim, 2020).

2.2 Yeast preparation

S. cerevisiae was prepared by culturing and purifying on Yeast Malt (YM) medium (yeast extract 3.0 g/l; malt extract 3.0 g/l; peptone 5.0 g/l; glucose 10.0 g/l; agar 15.0 g/l) with incubation at 30 °C for 24–48 hours. Starter of yeast inoculum was prepared by culturing with YM broth with incubation at 30 °C, 120 rpm for 24–48 hours. Yeast cell were harvested by using a centrifuge at 8,000 rpm for 10 minutes, and discarded a supernatant. Cell pellet was twice washed, and re-suspended with distilled water to solution. Turbidity of yeast cell suspension was adjusted with McFarland scale 0.5 (8 log cfu/ml).

2.3 Pineapple preparation

A fruit was washed with tap water, and peeled. Then, pineapple was sliced to small pieces and finely blended for 5 minutes. Pineapple juice was prepared by separating its residue with sterilized thin curtain linen fabric, and then pasteurized at

75 °C for 5 minutes followed by cooling immediately. Finally, pineapple juice with 100% concentration was prepared, and total solid has been estimated by using Hand refractometer.

2.4 Fermentation of wine

2.4.1 Formulas of production

The fermentation was established with 5 formulas with 3 replications based on various concentration of rice as follow 0%, 50%, 60%, 70%, and 80% (v/v), which combined with pineapple juice as 100%, 50%, 40%, 30%, and 20% (v/v), respectively. All formulas were fermented in sterilized glass bottles containing a final contents 1,000.0 ml and closed with airlock, and incubated at room temperature for 7 days. Fermentative suspensions were collected during 0-7 days after inoculation. The samples were measured their physical, chemical, and biological characteristics as follow the percentage of alcohol, total solid, pH value, clarity, yeast amount, color, and gas production.

2.4.2 Total solid measurement

Fermentative suspensions collected from each days during 0–7 days were measured the value of the total solid changing by using Hand refractometer, and expressed the value as Brix degree (°Brix).

2.4.3 Alcoholic estimation

Alcohol value of fermentative suspensions collected from each days during 0–7 days were measured by using Ebulliometer. The suspensions 50.0 ml were prepared in chamber of equipment, and heated until stable temperature. Likewise, distilled water was boiled until constant temperature. The suspensions have reached boiling point with steady temperature, read the values on a thermometer. Alcohol contents of samples were investigated by comparing the boiling point between water and wine products. On the disc, alcohol by volume on outer disc were observed,

which corresponded to the boiling point on the inner disc and express as percentage of alcohol.

2.4.4 pH value

Samples of fermentation from 0–7 days were collected by using 15.0–20.0 ml of solution to measure the value of acid–base changing by using a digital pH meter.

2.4.5 Clarity measurement

Fermentative solutions by 10.0 ml were collected during 0–7 days. Fermentative suspensions were shaken homogeneous to mixture before collection of the samples. Then, the turbidity of suspensions were measured the value by using a spectrophotometer with an absorbance at OD 570 nm.

2.4.6 Yeast amount measurement

Fermentative samples during 0–7 days were shaken before collecting by 1.0 ml. Preparing diluents of fermentative solutions were done by using distilled water by 9.0 ml. Then, the optimal diluents of suspensions were taken to a Haemocytometer for counting amounts of yeast cells under light microscope at 40X lens. The result of yeast numbers from samples were presented in the unit of log cfu/ml.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Yeast characteristic

The characteristics of yeast, *S. cerevisiae*, in the experiment have been proved the purity before application, which exhibited the colony morphology on YM medium after 24 hours as follow white, circular form, raised elevation, and entire margin. In addition, cell characteristics investigated under light microscope have exhibited the cylindrical, spherical, oval shape, and budding cell (Figure 1). Microorganisms could be apply to produce many kinds of foods, which enhanced nutritional properties of food products such as flavor, aroma and texture.

Products of fermented foods and beverage, including bioactive compounds such as alcohol, organic acid, peptides, enzyme, and anti-nutritive have been occurred by using the activities of microbial metabolisms (Wang et al., 2018, 2020). Final stage of fermentation was the important processes, which would release many bioactive and metabolite compounds such as gallic, protocatechuic, caffeic, ferulic, lactate, fumarate, succinate, malate, amino acids, peptides, fatty acids, and unsaturated fatty acids (Lee et al., 2016; Jiang et al., 2020). *S. cerevisiae* as important yeast has been used in food fermentation, especially alcoholic products. Its physiology endured to toxicity of ethanol making yeast continuously grew under the stress conditions (Parapouli et al., 2020). Likewise, *S. bayanus* and *S. ellipsoideus* as other yeast strains contained the ability to produce ethanol in fermentation (Ekechukwu et al., 2020). In addition, yeast could be generally discovered in nature, especially fruits and vegetable, which allowed the spontaneous fermentation.

3.2 Alcohol measurement

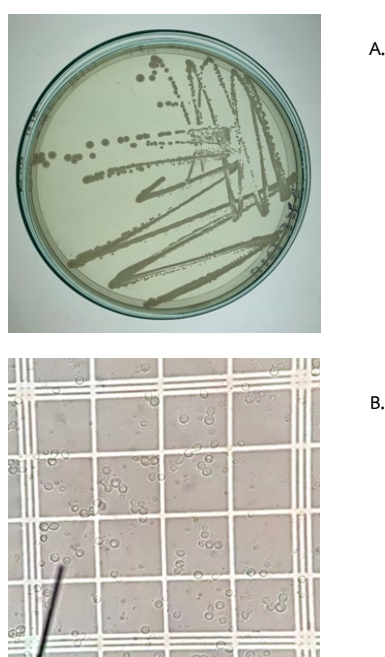


Figure 1 Colony of *S. cerevisiae* on YM medium (A) and cell morphology under 40X of light microscope (B) at 24 hours after incubation.

Alcohol contents of fermentative production have been increased since 1 days until 7 days, which depended on various concentration of pineapple juice as shown in figure 1. All formulas of fermentation at 0 day lacked any alcohol values that they were used as the reference data with other days to compare the value changing. Then, alcohol contents have slowly increased after incubation for 1-2 day with equal value in all formulas. Each formula has been found the different values of alcohol after 3 days of incubation that the application of 100% pineapple juice has continuously increased alcohol showing the highest content, compared to others. All formulas have extremely contained alcohol contents since 3 days until 7 days, and the steady alcohol productions from yeast had been discovered at days 7. At the end of fermentation, high concentration of 80% and 70% rice (20% and 30% pineapple, respectively) exhibited the highest alcohol content, whereas, high concentration of 100% pineapple (0% rice) displayed the lowest content, compared to other formulas. Ethanol yield

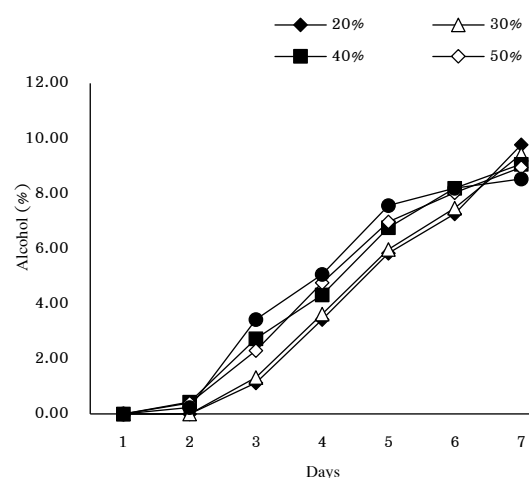


Figure 2 Alcohol contents from rice and pineapple fermentation with *S. cerevisiae* during 1-7 days (20%, 30%, 40%, 50%, and 100% of pineapple juice)

depended on the levels of sugar used as the carbon source for yeast growth. Macromolecules, starch of rice, as raw material of fermentation had to pre-treat with amylolytic enzymes to hydrolyze glycosidic linkages in starch molecule into sugar such as maltose and glucose (Rasiah and Rehm 2009; Magalhães and Souza, 2010). This reaction has occurred by the activities of α -amylase (α -1, 4-glucan-4-glucanohydrolase) and glucoamylase enzyme that they could be obtained from several mold strains such as *Rhizopus*, *Amylomyces* sp., and *Mucor* sp., *Aspergillus* sp. In addition, amylolytic enzymes as amylases could be applied in the processes of starch degradation and liquefaction to produce alcohol products of brewing and sugar industries (Sanghvi et al., 2011), including bread and baking, saccharification, textile desizing, paper, detergent (Metin et al., 2010). The recovery of ethanol from starch has been found as 56.9%, which depended on two molecules of ethanol per glucose repeating unit in starch (Sanchez et al., 1988). Amylose contents displayed as the important factor to recover ethanol. Waxy and low-amylose rice varieties have been found the highest efficiency to recover ethanol. Waxy rice has been greatly developed as traditional rice wines and the Japanese mirin (Kaneko and Kumazawa, 2015), including, low-amylose rice has been used to produce Japanese rice wine sake and adjunct in beer brewing (Marconi et al., 2017). Gelatinization at low temperatures have contained low amylose content. Starch contents have depended on rice varies as follow waxy rice (1.4 - 1.9%), low-amylose rice (4.2 - 18.6%), and intermediate- and high-amylose rice (30.5 - 38.2%) (Sanchez et al., 1988). Modification of important factors as follow the ratio of rice and water, extending steaming time, strains of microbial starter, time of saccharification, and the moisture content of substrates during fermentation

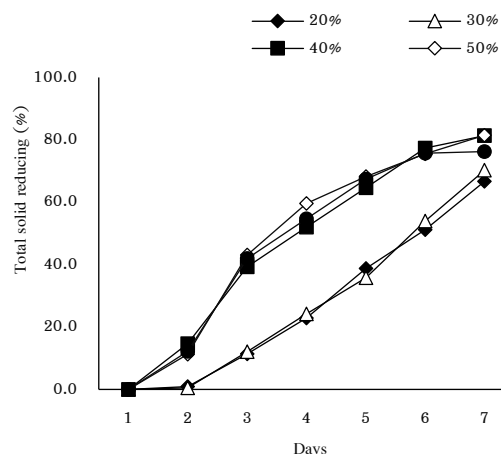


Figure 3 Total solid reducing of rice and pineapple fermentation with *S. cerevisiae* during 1-7 days (20%, 30%, 40%, 50%, and 100% of pineapple juice).

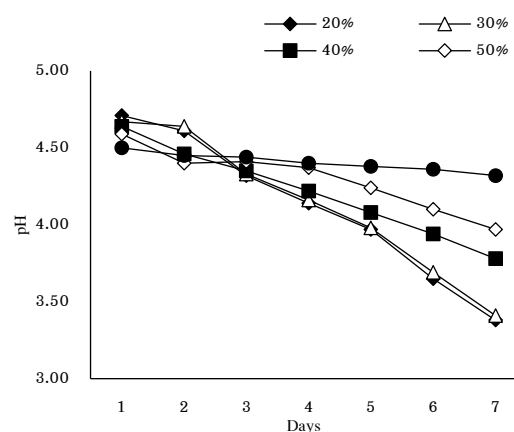


Figure 4 pH changing of rice and pineapple fermentation with *S. cerevisiae* during 1-7 days (20%, 30%, 40%, 50%, and 100% of pineapple juice).

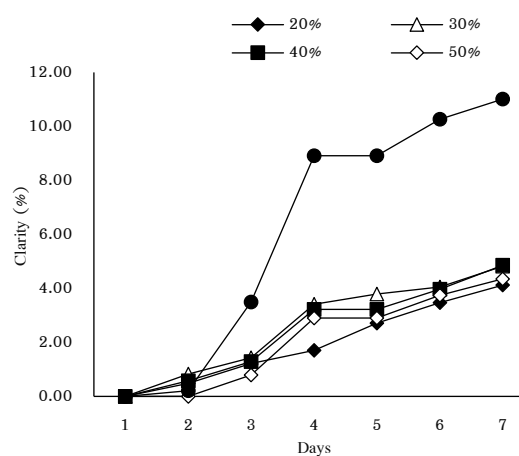


Figure 5 Clarity changing of rice and pineapple fermentation with *S. cerevisiae* during 1-7 days (20%, 30%, 40%, 50%, and 100% of pineapple juice).

have affected to increase yield of alcohol products (16-18%) (Chay et al 1986).

3.3 Total solid

The initial values as 15.0-21.9 °Brix has been found at 0 day. High concentration as 80% and 70% rice mixed 20% and 30% pineapple, respectively, exhibited the highest total solid value as shown in figure 2. Total solid values of fermentation have gradually decreased since 1–7 day after inoculation, especially, rapidly reduced after 1 day (100%, 50%, and 40% pineapple) and 2 days (20%, and 30% pineapple) until 7 days. The formulas of 40% and 50% pineapple exhibited the highest reduction of total solid (85.1%) in fermentative solution at a final day. Soluble sugar contents in liquid-fermentations have affected on high initial total solid of wine fermentation, and reduced by microbial activities in metabolisms for their growth, including conversion of sugar to alcohol products (He et al., 2022; Thungbeni et al., 2020). Total solid contents of liquid-fermentation decreasing have indicated that sugar from pineapple and rice have been used by yeast.

3.4 pH changing

The initial pH as 4.40-4.80 have been found in each formula of rice and pineapple fermentations as shown in figure 4. The highest concentration of 100% pineapple exhibited little reduction of pH from 4.50 (1 days) to 4.32 (7 days), compared to other formulas. Whereas, the concentration of 20%, 30%, and 50% pineapple (80%, 70%, and 50% rice, respectively) demonstrated extreme pH decreasing into lower value than 100% fruit application, especially 20 and 30% pineapple expressed the lowest pH as 3.38 and 3.41, respectively. Low pH (3.8–4.0) occurring in fermentation processes could rapidly allow alcoholic product presence, which inhibited undesirable microorganisms. This condition was not only control many spoilage

organisms, but also increase the optimum environments for yeast growth. The combination of pineapple juice and rice as mixture of wine have operated pH into the appropriate value to perform a successful fermentation by yeast during 0–7 days. Metabolic activities of sugar by yeast have produced carbon-dioxide to form carbonic acids resulting the reduction of pH value into acid range (Roda et al., 2017).

3.5 Clarity measurement

Turbidity values of rice and pineapple mixture solution have depended on the concentration of pineapple juice as shown in figure 5. Formula of high concentration, 100% pineapple juice, without rice supplement exhibited the highest turbidity percentage of suspension at the final days as 11.1%, compared to other formulas. Whereas, application of 20% pineapple (80% rice) in mixture solution demonstrated the lowest turbidity value at the final days as 4.12%. The clarity values in solution of fermentation have regularly increased since 1 days until 7 days. Clarity as one of wine physical characteristic must be modified before consuming. Biological process, bromelain as a cysteine protease has been found in many fruits and their stem tissue, especially pineapple (Mohan et al., 2016; Sunday, 2018; Zhai et al., 2023). Bromelain has performed the enzymatic activity to inhibit browning reaction that it contained a combination with different kinds of proteases with the role similar to other enzymes such as phosphatases, glucosidases, peroxidases, cellulases. In addition, bromelain could be applied to other foods processing such as meat tenderization consisting the hydrolysis of muscle and tissue, clarification of beer, anti-browning agent in fruit, and development of good qualitative dough production in the bakery industry (Arshad et al., 2014). Moreover, the reactions such as oxidation, condensation, and polymerization have also

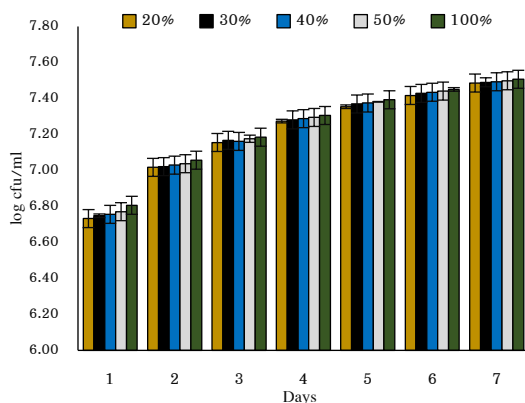


Figure 6 Amount of *S. cerevisiae* in rice and pineapple fermentation during 1-7 days (20%, 30%, 40%, 50%, and 100% of pineapple juice).

caused to make color change, decrease in lightness of products during storage for long times.

3.6 Yeast estimation

Amount of *S. cerevisiae* growing in the mixture of rice and pineapple fermentations have continuously increased during 1–7 days as shown in figure 6. Yeast exhibited the exponential growth phase rapidly within short time after incubation for 1 days at room temperature, which did not decline in cell values until 7 days. At the final day of fermentation exhibited the average value as 7.51 log cfu/ml more than 1 day (average 6.71 log cfu/ml). Especially, the application of 100% pineapple showed higher growth of yeast cell than other formulas. Yeast growths in the mixtures of rice and pineapple juice during fermentation have directly affected on a variation of alcohol contents.

5. CONCLUSION

Alcohol contents of the fermentation have occurred at 2 days after inoculation. The application of 80% rice with 20% pineapple juice exhibited the highest value as 9.77%, while, 100% pineapple displayed the lowest value as 8.53% at the final days. Application of pineapple juice depended on the level of concentrations has assisted the clarity of fermentative solution of rice wine.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by plant genetic conservation project under the Royal Initiative of Her Royal Highness Princess Maha Chakri Sirindhorn and faculty of science and liberal art, Rajamangala University of technology Isan.

REFERENCES

- Alcalde-Eon, C., Garcia-Estevez, I., Puente, V., & et al. (2014). Color stabilization of red wines. A chemical and colloidal approach. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(29), 6984–6994. <https://doi.org/10.1021/jf4055825>.
- Ali, M. M., Hashim, N., Abd Aziz, S., & Lasekan, O. (2020). Pineapple (*Ananas comosus*): A comprehensive review of nutritional values, volatile compounds, health benefits, and potential food products. *Food Research International*, 137, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109675>.
- Arshad, Z. I. M., Amid, A., Yusof, F., & et al. (2014). Bromelain: an overview of industrial application and purification strategies. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98, 7283–7297. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5889-y>.
- Chay, P. B., Atutubo, E. O., & Sanchez, P. C. (1986). Optimization of solid substrate fermentation in rice wine production. *Philippine Agriculture*, 69, 159–172.
- Ekechukwu, C. C., Ikele, C. C., Okafor, C. A., & et al. (2021). Comparative assessment of three yeast samples for wine production from pineapple. *Multidisciplinary Science Journal*, 3(1), 1–8.
- He, Y., Yuan, G., Wang, C., & et al. (2022). Correlation analysis between starch and glucose content in rice wine brewing. *Food and Fermentation Industries*, 48, 28–36. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028723>.
- Hesseltine, C. W., Rogers, R. & Winarno, F. G. (1988). Microbiological studies on amylolytic oriental fermentation starters. *Mycopathologia*, 101, 141–155. <https://doi.org/10.1007/BF00437031>.
- Hirst, M. B., & Richter, C. L. (2016). Review of aroma formation through metabolic pathways of *Saccharomyces cerevisiae* in beverage fermentations. *American Journal of Enology and Viticulture*, 67, 361–370. <https://doi.org/10.5344/ajev.2016.15098>.
- Hossain, M. A., & Rahman, S. M. M. (2011). Total phenolics, flavonoids and antioxidant activity of tropical fruit pineapple. *Food Research International*, 44(3), 672–676. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.11.036>.
- Jiang, L., Su, W., & Mu, Y. (2020). Major metabolites and microbial community of fermented black glutinous rice wine with different starters. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00593>.
- Kaneko, S., & Kumazawa, K. (2015). Aroma compounds in Japanese sweet rice wine (Mirin) screened by aroma extract dilution analysis (AEDA). *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 79(3), 484–487. <http://dx.doi.org/10.1080/09168451.2014.980218>.

- Lee, D. E., Lee, S., Jang, E. S., Shin, H. W., Moon, B. S., & Lee, C. H. (2016). Metabolomic profiles of *Aspergillus oryzae* and *Bacillus amyloliquefaciens* during rice koji fermentation. *Molecules*, 21(6), 773. <https://doi.org/10.3390/molecules21060773>.
- Liszkowska, W., & Berłowska, J. (2021). Yeast fermentation at low temperatures: Adaptation to changing environmental conditions and formation of volatile compounds. *Molecules*, 26, 1–21. <https://doi.org/10.3390/molecules26041035>.
- Marconi, O., Sileoni, V., Ceccaroni, D., & Perretti, G. (2017). The use of rice in brewing. Chapter 4. *Advances in International Rice Research*, 49–66. <http://dx.doi.org/10.5772/66450>.
- Meng, L. W., & Kim, S. M. (2020). Effects of different carbohydrates on the physicochemical properties of rice flour, and the quality characteristics of fermented rice cake. *Food Science and Biotechnology*, 29(4), 503–512. <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00693-7>.
- Metin, K., Koc, O., Ateşlier, B. B., & Biyik, H. H. (2010). Purification and characterization of α -amylase produced by *Penicillium citrinum* HBF62. *Afr. J. Biotechnol.*, 9(45), 7692–7701.
- Mohan, R., Sivakumar, V., Rangasamy, T., & Muralidharan, C. (2016). Optimisation of bromelain enzyme extraction from pineapple (*Ananas comosus*) and application in process industry. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 12(3), 188–195. <https://doi.org/10.3844/ajbbsp.2016.188.195>.
- National Center for Biotechnology Information. PubChem Enzyme Summary for Enzyme 3.2.1.1, *Alpha-amylase (EC 3.2.1.1)*. Retrieved Jan, 7, 2025, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/protein/EC:3.2.1.1>.
- Parapouli, M., Vasileiadis, A., Afendra, A. S., & Hatziloukas, E. (2020). *Saccharomyces cerevisiae* and its industrial applications. *AIMS Microbiology*, 6(1), 1–31. <http://doi.org/10.3934/microbiol.2020001>
- Rasiah, I. A., & Rehm, B. H. (2009). One-step production of immobilized α -amylase in recombinant *Escherichia coli*. *Applied and environmental microbiology*, 75(7), 2012–2016. <https://doi.org/10.1128/AEM.02782-08>.
- Riou, V., Vernhet, A., Doco, T., & et al. (2002). Aggregation of grape seed tannins in model wine—effect of wine polysaccharides. *Food Hydrocolloids*, 16(1), 17–23. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(01\)00034-0](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(01)00034-0).
- Roda, A., Lucini, L., Torchio, F., & Moutounet, M. (2017). Metabolite profiling and volatiles of pineapple wine and vinegar obtained from pineapple waste. *Food Chemistry*, 229, 734–742. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.111>.
- Sanchez, P. C., Juliano, B. O., Laude, V. T., & et al. (1988). Non waxy rice for tapuy (rice wine) production. *Cereal Chemistry*, 65(3), 240–243.
- Sanghvi, G. V., Koyani, R. D., & Rajput, K. S. (2011). Isolation, optimization, and partial purification of amylase from *Chrysosporium asperatum* by submerged fermentation. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 21(5), 470–476. <https://doi.org/10.4014/jmb.0910.10014>.
- Souza, P. M., & Magalhães, P. O. (2010). Application of microbial α -amylase in industry—A review. *Brazilian Journal of Microbiology*, 41(4), 850–861. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822010000400004>.
- Sudtasarn, G., Homsombat, W., Chotechuen, S., & Chamarek, V. (2019). Quantification of Tocopherols, Tocotrienols and γ -Oryzanol Contents of Local Rice Varieties in Northeastern Thailand. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology (Tokyo)*, 65(Supplement), S125–S128. <https://doi.org/10.3177/jnsv.65.S125>.
- Sunday, A. (2018). Effect of Clarifying Agents (Gelatin and Kaolin) on Fruit Wine Production. *International Journal of Agriculture Innovations and Research*, 6(4), 130–132.
- Taweekasemsombut, S., Tinoi, J., Mungkornasawakul, P., & Chandet, N. (2021). Thai Rice Vinegars: Production and Biological Properties. *Applied Sciences*, 11(13), 5929. <https://doi.org/10.3390/app11135929>
- Thungbeni, T., Samir, T. E., & Samir, W. (2020). Effect of different levels of wine yeast and sugar in wine production from pineapple (*Ananas comosus*). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(12), 681–693. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.912.082>.
- Tian, S., Zeng, W., Fang, F., Zhou, J., & Du, G. (2022). The microbiome of Chinese rice wine (Huangjiu). *Current Research in Food Science*, 5, 325–335. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.01.007>.
- Verma, D. K., & Srivastav, P. P. (2020). Bioactive compounds of rice (*Oryza sativa* L.): review on paradigm and its potential benefit in human health. *Trends in Food Science and Technology*, 97, 355–65. <http://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.007>.
- Wang, B., Wu, Q., Xu, Y., & et al. (2020). Synergistic effect of multiple saccharifying enzymes on alcoholic fermentation for Chinese Baijiu production. *Applied Environmental Microbiology*, 86(8), 1–12. <https://doi.org/10.1128/AEM.00013-20>.
- Wang, B., Wu, Q., Xu, Y., & Sun, B. (2018). Specific volumetric weight-driven shift in microbiota compositions with saccharifying activity change in starter for Chinese Baijiu fermentation. *Frontiers in Microbiology*, 9, 2349. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02349>.
- Wang, C., Yuan, G., He, Y., Tang, J., Zhou, H., & Qiu, S. (2022). The formation of higher alcohols in rice wine fermentation using different rice cultivars. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1–19. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.978323>.
- Watanabe, M., & Shimazu, Y. (1980). Effect of yeasts on botrytised wine making. *Journal of fermentation technology*, 58(3), 227–235.
- Wei, X. L., Liu, S. P., Yu, J. S., & et al. (2016). Innovation Chinese rice wine brewing technology by biacidification to exclude rice soaking process. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 123(4), 460–465. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2016.11.014>.
- Zhai, H. Y., Li, S. Y., Zhao, X., Lan, Y. B., Zhang, X. K., Shi, Y., & Duan, C. Q. (2023). The compositional characteristics, influencing factors, effects on wine quality and relevant analytical methods of wine polysaccharides: A review. *Food Chemistry*, 403, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022>.

การเพิ่มมูลค่าจากน้ำอ้อยด้วยการสังเคราะห์กรดลิวูลินิก

ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์ กาญจนา ชันทกะพันธ์* กุลชนารุ ประเสริฐสิทธิ์ และ สนิหนาท จงคง

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110 ประเทศไทย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล: kjutharat@eng.psu.ac.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.01.005

รับเมื่อ 11 ตุลาคม 2567 แก้ไขเมื่อ 20 มกราคม 2568 ตอบรับเมื่อ 28 มกราคม 2568

บทคัดย่อ

อ้อย (*Saccharum officinarum*) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ซึ่งสามารถเพิ่มมูลค่าผ่านกระบวนการสังเคราะห์กรดลิวูลินิก (Levulinic Acid) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การผลิตพลาสติกชีวภาพ สารเคมี และเชื้อเพลิงชีวภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระยะเวลาในการเก็บอ้อยก่อนหีบอ้อย (0-5 สัปดาห์) ว่ามีผลต่อผลได้ องค์ประกอบ และสมบัติทางกายภาพของน้ำอ้อยอย่างไร ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตกรดลิวูลินิกจากน้ำอ้อยและการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกรดลิวูลินิก โดยมีปัจจัยการผลิตที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (0.01 และ 0.03 โมลต่อลิตร) อุณหภูมิ (160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส) เวลาการทำปฏิกิริยา (1 และ 3 ชั่วโมง) และความเข้มข้นของน้ำอ้อย (60 และ 80 % โดยปริมาตร) พบว่า ระยะเวลาในการเก็บอ้อยก่อนการหีบ (0-5 สัปดาห์) ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลได้ ค่าความหนาแน่น ความเป็นกรด-ด่าง และค่าความหวานของน้ำอ้อย แต่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและน้ำตาลรีดิวซ์ สถานะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตกรดลิวูลินิก คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.03 โมลาร์ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งให้ความเข้มข้นกรดลิวูลินิกสูงสุด 22.92 ± 0.9 มิลลิกรัมต่อกรัม การเพิ่มความบริสุทธิ์ของกรดลิวูลินิกทำได้ด้วยการเติมดินเบาที่ช่วยตกตะกอนสารปนเปื้อนต่างๆ ซึ่งสามารถเพิ่มความเข้มข้นกรดลิวูลินิกได้ร้อยละ 50 แต่ยังไม่สามารถแยกกรดซัลฟิวริกและสารปนเปื้อนบางส่วนออกจากกรดลิวูลินิกได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น จึงเสนอแนะให้มีการพัฒนากระบวนการเพิ่มเติมเพื่อให้ได้กรดลิวูลินิกที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นถึงร้อยละ 95

คำสำคัญ: น้ำอ้อย, กรดลิวูลินิก, สังเคราะห์

Value-Added Utilization of Sugarcane Juice Through Levulinic Acid Synthesis

Pakamas Chetpattananondh, Kanjana Kantakapun*, Kulchanat Prasertsit, and Sininart Chongkhong

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, 90110 Thailand

* Corresponding Author, E-mail: kjutharat@eng.psu.ac.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.01.005

Received 11 October 2024; Revised 20 January 2025; Accepted 28 January 2025

ABSTRACT

Sugarcane (*Saccharum officinarum*) is a significant economic crop in Thailand, with potential for value addition through the synthesis of levulinic acid, a crucial compound in various industries such as bioplastics, chemicals, and biofuels. This study aims to examine the effect of pre-harvest storage duration (0-5 weeks) on the yield, composition, and physical properties of sugarcane juice, as well as to determine the optimal conditions for producing and purifying levulinic acid from sugarcane juice. The factors considered in this study include sulfuric acid concentration (0.01 and 0.03 mol/L), temperature (160, 180, and 200°C), reaction time (1 and 3 hours), and sugarcane juice concentration (60% and 80% by volume). The results revealed that pre-harvest storage duration (0-5 weeks) had no significant effect on the yield, density, pH, and sweetness of the juice, but did impact the total sugar and reducing sugar content. The optimal conditions for levulinic acid production were found to be a sulfuric acid concentration of 0.03 mol/L, a temperature of 180°C, and a reaction time of 3 hours, yielding the highest concentration of levulinic acid at 22.92 ± 0.9 mg/g. Purification of levulinic acid was achieved by adding diatomaceous earth, which helped precipitate impurities and increased the levulinic acid concentration by 50%. However, the complete removal of sulfuric acid and some impurities was not achieved. Therefore, further process development is recommended to achieve a levulinic acid purity of up to 95%.

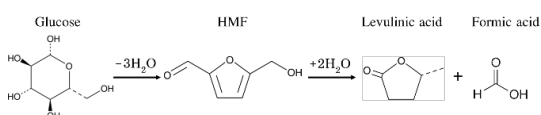
KEYWORDS: Sugarcane juice, Levulinic acid, Synthesis

1. บทนำ

ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกอ้อยรวม 11,125,480 ไร่ (Office of the cane and sugar board, 2024) เป็นผู้ผลิตน้ำตาลและส่งออกเป็นอันดับต้นๆ ของโลก แม้ปริมาณความต้องการน้ำตาลตลาดโลกยังคงเพิ่มขึ้น แต่ราคาน้ำตาลค่อนข้างผันผวน โดยในสถานการณ์ปฏิกิริยาคามีแนวโน้มต่ำลง (Sowcharoensuk, 2023) จึงมีแนวคิดในการนำอ้อยมาเพิ่มมูลค่าโดยการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพใหม่ๆ เช่น กรดลิวูลินิก (Levulinic acid, LA) ปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์ กรดลิวูลินิก และอนุพันธ์ กรดลิวูลินิกในหลากหลายอุตสาหกรรม ได้แก่ อุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง อาหาร เกษตร เคมี และพลังงาน (Li et al., 2019)

การสังเคราะห์กรดลิวูลินิกเกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Dehydration ของน้ำตาลกลูโคส โดยน้ำจะถูกดึงออกไป 3 โมเลกุล ทำให้เกิดสารไฮดรอกซีเมทิลฟูรัล (HMF) และฮิวมิน (Humins) จากนั้น HMF จะเกิดปฏิกิริยา Rehydration กลายเป็นกรดลิวูลินิกและกรดฟอร์มิกในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ปฏิกิริยาเหล่านี้ดำเนินการในสถานะที่มีกรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่ง ซึ่งกรดนี้ช่วยเร่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Rackemann & Doherty, 2012; Antonetti et al., 2016)

การเพิ่มความบริสุทธิ์กรดลิวูลินิกเป็นงานท้าทายเนื่องจากผลผลิตที่ได้จากการสังเคราะห์มีปริมาณน้ำสูง มีสมบัติเป็น Azeotropes ทำให้แยกออกได้ยาก (Cheng et al., 2020) มีการศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยวิธีการ กลั่นสุญญากาศ การแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซิน การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ และการตกผลึก ซึ่งสิทธิบัตร CN113929571A (2021) มีขั้นตอนการเพิ่มความบริสุทธิ์กรดลิวูลินิกดังนี้ 1) ปรับพีเอชด้วยด่าง KOH, NaOH หรือ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ให้มีค่า 7-8 เพื่อให้สารตัวอย่างเหมาะสมต่อการแยกสารปนเปื้อน 2) ลดสีด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์หรือโซเดียมไฮโปคลอไรต์ โดยใช้ปริมาณสารดูดซับสี 3-5 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลา 30-50 นาที 3) แลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซินประเภทไอออนบวก 001, D001 หรือ D113 แล้ว



ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงกระบวนการสังเคราะห์กรดลิวูลินิก

ตามด้วยประเภทไอออนลบ UBA100P, D201 หรือ D301) กรองด้วยเมมเบรน GCS-40NM, GCS-8KD หรือ GCS-500D ใช้ความดัน 3 MPa และ 5) การกลั่นซ้ำ(Rectification)

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตกรดลิวูลินิกจากอ้อย สอดคล้องกับแผนยุทธศาสตร์ของประเทศในการเสริมสร้างความสามารถในการแข่งขันและการพัฒนาเศรษฐกิจสีเขียวอย่างยั่งยืน ตามหลัก BCG Model (Ministry of Industry, 2023)

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

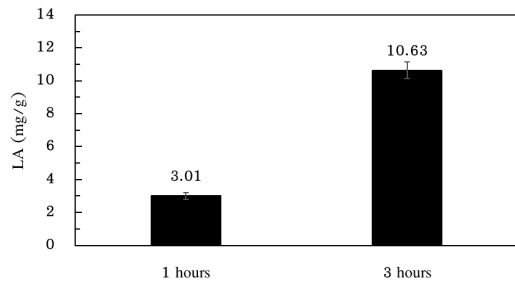
1) ศึกษาระยะเวลาการเก็บอ้อย 0-5 สัปดาห์ โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบในน้ำอ้อยดิบ ได้แก่ น้ำตาลทั้งหมด (Total sugar) และน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar), ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids: SS), ความหนืด, ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และความหวานของน้ำอ้อย เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บต่อผลได้ องค์ประกอบ และสมบัติทางกายภาพ

2) หาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกรดลิวูลินิกโดย ตัวอย่างน้ำอ้อยที่เตรียมไว้จะถูกเติมกรดซัลฟิวริกในความเข้มข้นที่กำหนด (0.01 หรือ 0.03 โมลต่อลิตร) ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้ง จะใช้กรดซัลฟิวริกปริมาณ 10 มิลลิลิตร ต่อสารละลายน้ำอ้อย 200 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ความดันที่อุณหภูมิ 160, 180 หรือ 200 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 หรือ 3 ชั่วโมง หลังจากการสังเคราะห์ตัวอย่างจะถูกทำให้เย็นและกรองด้วยกระดาษกรอง จากนั้นจึงเก็บตัวอย่างในภาชนะสำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดลิวูลินิกด้วยเครื่อง HPLC ตามวิธีของ Hijazi et al. (2022) โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

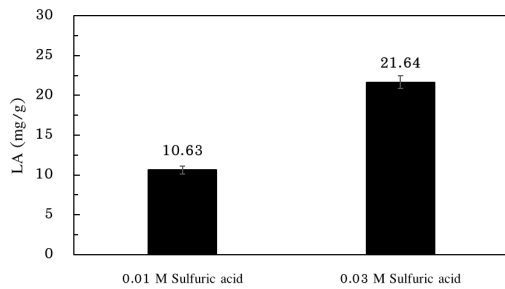
(1) การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับหาปริมาณกรดลิวูลินิกในการทดลองใช้สารลิวูลินิกเกรดสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการความบริสุทธิ์ร้อยละ 98

(2) นำสารมาตรฐานกรดลิวูลินิกมาทำการชั่งที่น้ำหนัก 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 กรัม เติมน้ำ DI (Deionized Water) แต่ละขวดให้ได้ 10 กรัม เขย่าให้เข้ากัน

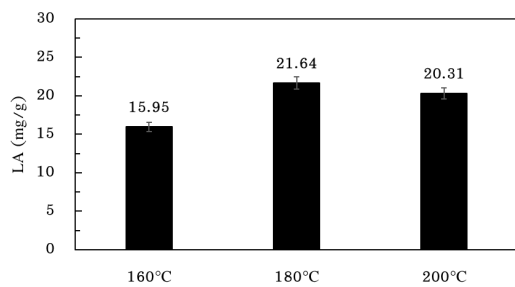
(3) นำสารมาตรฐานที่เตรียมไว้ผ่านกรองด้วย Nylon Syringe filter ขนาด 0.22 ไมครอนเมตร ทำการกรองเก็บไว้ในขวดแก้ว ขนาด 2 มิลลิลิตร ปิดฝาให้สนิท



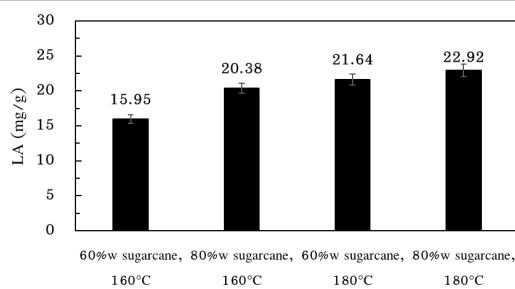
ภาพที่ 2 ผลการศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์กรดสูลูนิค



ภาพที่ 3 ผลการศึกษาปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการสังเคราะห์กรดสูลูนิค



ภาพที่ 4 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์กรดสูลูนิค



ภาพที่ 5 ผลการศึกษาความเข้มข้นของน้ำอ้อยที่ใช้ในการสังเคราะห์กรดสูลูนิค

(4) นำตัวอย่างที่ได้จากการสังเคราะห์ที่สภาวะต่างๆ มาผ่านการกรอง บรรจุใส่ขวดแก้วตัวอย่างขนาด 2 มิลลิลิตร พร้อมปิดฝาให้สนิท

(5) นำสารมาตรฐานและตัวอย่างที่เตรียมจากข้อที่ 3 และ 4 มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC ด้วย คอลัมน์ AcclaimR Organic Acid Dionex (5 ไมโครเมตร, 120 Å, 4.0X250 มิลลิเมตร) ความยาว 250 มิลลิเมตร ดีเทคเตอร์ชนิด UV-DAD ที่ 210 นาโนเมตร เฟสเคลื่อนที่ โซเดียม

ซัลเฟต 0.5 มิลลิโมลาร์ และปรับ pH โดยเติม Methanesulfonic acid ปริมาณ 0.55 mL/L (pH = 2.65) ที่อัตราการไหลของตัวเคลื่อนที่ 0.6 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาตรในการฉีดตัวอย่าง จำนวน 5 ไมโครลิตร และ อุณหภูมิของคอลัมน์ 30 องศาเซลเซียส

(6) นำข้อมูลหาพื้นที่ใต้กราฟสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นในการสร้างสมการเพื่อทำนายความเข้มข้นของ กรดสูลูนิค

3) ศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์กรดสูลูนิค โดยการแยกสารปนเปื้อน ได้แก่ สี กรดซัลฟิวริก กรดฟอร์มิก และ น้ำออกจากกรดสูลูนิคด้วยการดูดซับด้วยเรซิน ร่วมกับ ถ่านกัมมันต์ และการใช้ดินเบา และการระเหยสูญญากาศ

3. ผลลัพธ์และอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาระยะเวลาในการเก็บอ้อยก่อนหีบอ้อย

จากการศึกษาพบว่า ระยะเวลาในการเก็บอ้อยก่อนการหีบ (0-5 สัปดาห์) ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลลัพธ์ที่สำคัญบางประการ เช่น ผลได้ ค่าความหนาแน่น (Density) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าความหวาน (Brix) ของน้ำอ้อยที่ได้จากการหีบอ้อย ดังแสดงในตารางที่ 1 ผลได้จากการหีบอ้อยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 66 ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 5.04-5.32 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 1.12 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความหวานเฉลี่ย 23.30 บริกซ์ และค่า SS ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อระยะเวลาเก็บอ้อยเพิ่มขึ้น แสดงถึงการเสื่อมสภาพขององค์ประกอบในน้ำอ้อย เมื่อระยะเวลาเก็บอ้อยเพิ่มขึ้น กระบวนการย่อยสลายโดยเอนไซม์และจุลินทรีย์ในเซลล์พืชจะเปลี่ยนน้ำตาลที่ไม่รีดิคซ์ (เช่น ซูโครส) ไปเป็นน้ำตาลรีดิคซ์ (กลูโคสและฟรุคโตส) ทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิคซ์เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันค่า SS ลดลงเนื่องจากของแข็งที่ไม่ละลายถูกแปรสภาพเป็นสารละลายที่เล็กลง อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ได้จากการหีบอ้อยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเก็บอ้อยไว้นานขึ้น โดยน้ำตาลที่วัดได้นั้นประกอบด้วยน้ำตาลรีดิคซ์ (Reducing sugar) และนอนรีดิคซ์ (Non-reducing sugar) น้ำตาลรีดิคซ์คือน้ำตาลที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde) หรือคีโตน (Ketone) ที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย เช่น กลูโคส และฟรุคโตส ผลการศึกษาแสดงว่าเมื่อหีบอ้อยทันทีหลังจากได้รับอ้อย ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดจะสูงที่สุด เมื่อเก็บอ้อยไว้เป็นเวลา 2 สัปดาห์ ปริมาณน้ำตาลรีดิคซ์จะเพิ่มขึ้นชัดเจน และเมื่อเก็บ

ตารางที่ 1 ผลของระยะเวลาการเก็บอ้อยต่อคุณสมบัติของน้ำอ้อยดิบ

คุณสมบัติของน้ำอ้อยดิบ	ระยะเวลาการเก็บอ้อย ก่อนหีบ (สัปดาห์)		
	0	2	5
ร้อยละผลได้	65.40±0.5	66.17±0.6	66.61±0.5
SS (mg/L)	626.67±20.0	359.00±15.0	168.33±12.0
Density (g/cm ³)	1.124±0.002	1.121±0.002	1.123±0.002
pH	5.32±0.10	5.04±0.08	5.26±0.09
Brix	23.40±0.3	23.20±0.2	23.40±0.3
Total sugar (g/kg)	352.82±10.0	228.85±80.0	225.20±80.0
Reducing sugar (g/kg)	9.20±0.5	15.42±0.6	15.82±0.7

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลการวิจัยกับงานวิจัยอื่น

วัตถุดิบ	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้นของ H ₂ SO ₄ (M)	เวลา (hrs)	ความเข้มข้น LA (g/L)	อ้างอิง
เชลลูโลส	175	0.2	3	58.63±1.62	Khon Kaen University (2022)
ชานอ้อย	216	0.2	0.56	10.83	Cheng et al. (2020)
น้ำอ้อย	180	0.03	3	22.92±0.9	งานวิจัยนี้

อ้อยไว้เป็นเวลา 5 สัปดาห์ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการหีบอ้อยทันที แต่ไม่ต่างจากการเก็บอ้อย 2 สัปดาห์อย่างมีนัยสำคัญ สรุปได้ว่าระยะเวลาในการเก็บอ้อยก่อนการหีบมีผลต่อปริมาณน้ำตาลในน้ำอ้อย โดยเฉพาะน้ำตาลรีดิวซ์ที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บอ้อยไว้เป็นเวลา 2 สัปดาห์ แต่มีการลดลงของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด

3.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกรดลิวลินิก

ผลการศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์กรดลิวลินิก 1 และ 3 ชั่วโมง ความเข้มข้นน้ำอ้อยร้อยละ 60 โดยปริมาตร อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ปริมาณกรดซัลฟิวริก 0.01 โมลาร์ พบว่า ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมงสามารถสังเคราะห์กรดลิวลินิกได้ ความเข้มข้น 3.01±0.2 และ 10.63±0.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แสดงว่าที่ปริมาณความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกต่ำต้องใช้เวลาการทำปฏิกิริยาที่นาน แสดงดังภาพที่ 1

ผลการศึกษาปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการสังเคราะห์กรดลิวลินิกความเข้มข้น 0.01 และ 0.03 โมลาร์ ซึ่งความเข้มข้นน้ำอ้อยร้อยละ 60 โดยปริมาตร อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง พบว่า ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 0.03 โมลาร์ ให้กรดลิวลินิกสูงกว่าที่ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 0.01 โมลาร์ แสดงดังภาพที่ 2

ผลการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์กรดลิวลินิกที่อุณหภูมิ 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นน้ำอ้อยร้อยละ 60 โดยปริมาตร ความเข้มข้น

กรดซัลฟิวริก 0.03 โมลาร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาตรตั้งต้น 200 มิลลิลิตร หลังทำปฏิกิริยาพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาตรที่ได้หลังทำปฏิกิริยาจะลดลง และอุณหภูมิที่สามารถสังเคราะห์กรดลิวลินิกได้สูงสุดคือ 180 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ความเข้มข้นกรดลิวลินิก 21.64±0.8 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 160 และ 200 องศาเซลเซียส สามารถสังเคราะห์กรดลิวลินิกมีความเข้มข้น 15.95±0.6 และ 20.31±0.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 180°C เป็น 200°C ไม่ได้เพิ่มปริมาณกรดลิวลินิกอย่างมีนัยสำคัญ แม้ว่าอุณหภูมิ 180°C จะให้ผลผลิตสูงสุด แต่การทดลองที่ 160°C ถูกใช้เพื่อยืนยันว่าผลที่ได้จากน้ำอ้อยความเข้มข้นร้อยละ 80 ไม่ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิที่ต่ำกว่าในแง่ของการเกิดผลพลอยได้ การวิเคราะห์นี้ช่วยเพิ่มความมั่นใจในประสิทธิภาพการสังเคราะห์ที่สภาวะ 180°C แสดงดังภาพที่ 3 ดังนั้น อุณหภูมิ 180°C เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นจุดสมดุลระหว่างอัตราเร่งปฏิกิริยาและการเกิดผลพลอยได้ (by-products) เช่น HMF และฟอร์มิก ซึ่งมักเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงเกินไป (200°C) ทำให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงเป็นกรดลิวลินิกลดลง

ผลการศึกษาความเข้มข้นของน้ำอ้อยที่ใช้ในการสังเคราะห์กรดลิวลินิกที่ความเข้มข้นน้ำอ้อยร้อยละ 60 และ 80 โดยปริมาตร ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 0.03 โมลาร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิ 160 และ

180 องศาเซลเซียส พบว่าความเข้มข้นน้ำอ้อยร้อยละ 80 โดยปริมาตร ให้ ความเข้มข้นกรดลิวลินิกสูงกว่า เช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 4 ดังนั้นความเข้มข้นน้ำอ้อยร้อยละ 80 โดยปริมาตรจึงเป็น ความเข้มข้นที่เหมาะสม

ผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิต กรดลิวลินิก (ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 0.03 โมลาร์, อุณหภูมิ 180°C, เวลา 3 ชั่วโมง) ให้ผลผลิตกรด ลิวลินิกสูง สุด 22.92 ± 0.9 กรัม/ลิตร ซึ่งสูงกว่าผลจาก Cheng et al. (2020) ที่สังเคราะห์กรดลิวลินิกจากชานอ้อยด้วยสภาวะที่ เหมาะสม อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 16 มิลลิลิตร/กรัม อุณหภูมิ 216 องศาเซลเซียส เวลา 34 นาที ได้ความเข้มข้น กรดลิวลินิก 10.83 กรัม/ลิตร และใกล้เคียงกับผลจาก โครงการพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำตาลสูงผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง (Khon Kaen University, 2022) ที่สภาวะการสังเคราะห์ กรดลิวลินิกที่เหมาะสมจากน้ำอ้อย คือน้ำอ้อยเข้มข้นร้อยละ 50 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 0.2 โมลาร์ เวลา 3 ชั่วโมง ได้ความเข้มข้นกรดลิวลินิกสูงถึง 58.63 ± 1.62 กรัมต่อลิตร

ค่าผลได้กรดลิวลินิกทางทฤษฎีสูงสุดที่ผลิตจากเซลลูโลส คือ 71.6 เปอร์เซ็นต์ จากซูโครส 67.8 เปอร์เซ็นต์ และจาก น้ำตาลโมโนแซคคาไรด์ 64.4 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลอง สังเคราะห์กรดลิวลินิกด้วยน้ำตาลโดยศึกษาสภาวะต่าง ๆ ได้แก่ ชนิดของกรด (กรดซัลฟิวริก, Methanesulfonic Acid, Ethanesulfonic Acid, p-Toluenesulfonic Acid) ปริมาณ กรด (0.1-0.5 M) ความเข้มข้นกลูโคส (0.05-0.1 M) ความ เข้มข้นไฮโดร (0.017-0.073 M) อุณหภูมิ (160-200 องศา เซลเซียส) เวลา (15-60 นาที) สภาวะที่ให้ กรดลิวลินิกสูงสุดคือใช้กรดซัลฟิวริก ปริมาณ 0.5 M ความ เข้มข้นกลูโคส 0.1 M ความเข้มข้นไฮโดร 0.03 M อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ได้ผลได้กรดลิวลินิก 65.7 เปอร์เซ็นต์ (Reckmann & Doherty, 2012) จากการ รวบรวมข้อมูลการผลิตกรดลิวลินิกจากงานวิจัยต่างๆ พบว่า ผลได้กรดลิวลินิกจากการใช้กลูโคสเป็นวัตถุดิบมีค่าอยู่ในช่วง 5-80.7 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผลได้กรดลิวลินิกจากการใช้ฟรุคโตส เป็นวัตถุดิบมีค่าอยู่ในช่วง 7-79 เปอร์เซ็นต์ โดยปัจจัยที่ ส่งผลต่อผลได้กรดลิวลินิกได้แก่ ชนิดและปริมาณวัตถุดิบ ชนิดและปริมาณคatalyst ชนิดและปริมาณตัวทำละลาย อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา

จากการศึกษาของโครงการพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำตาลสูง ผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง (High Value) ประจำปีงบประมาณ 2565 (Khon Kaen University, 2022) สภาวะ การ สังเคราะห์กรดลิวลินิกที่เหมาะสมจากน้ำอ้อยคือน้ำอ้อย เข้มข้นร้อยละ 50 ในปริมาตร 180 มิลลิลิตร หรือคิดเป็น ร้อยละ 72 ในถึงปฏิกรณ์ความดันอุณหภูมิที่ 175 องศา เซลเซียส ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 0.2 โมลาร์ ที่เวลา 3 ชั่วโมง จะได้ปริมาณกรดลิวลินิก 58.63 ± 1.62 กรัมต่อลิตร และปริมาณกรดฟอริก 17.59 ± 0.65 กรัมต่อลิตร โดยเมื่อ ทำปฏิกิริยาแล้วคงเหลือน้ำตาลกลูโคสปริมาณ 6.58 ± 0.57 กรัมต่อลิตร

3.3 ผลการศึกษาสภาวะที่ทำให้กรดลิวลินิกมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น

1) ผลการศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับสี

กรดซัลฟิวริก กรดลิวลินิก และกรดฟอริก ไม่มี สี เมื่อให้สารละลายตัวอย่างดังกล่าวไหลผ่านถ่านกัมมันต์ สารละลายที่ได้ไม่เปลี่ยนสี แต่เมื่อเติมน้ำอ้อยในสารตัวอย่าง สารที่ได้มีสีเขียว-เหลืองของน้ำอ้อย เมื่อนำสารละลาย น้ำอ้อยไหลผ่านถ่านกัมมันต์ พบว่า สารตัวอย่างมีสีเข้มขึ้น โดยมีสีดำของถ่านกัมมันต์ติดมาด้วย แสดงว่าถ่านกัมมันต์ไม่ สามารถดูดซับสีในน้ำอ้อยได้ จากการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้ ตัวอย่างที่ได้จากการสังเคราะห์กรดลิวลินิกซึ่งมีสีน้ำตาล พบว่า เมื่อไหลผ่านถ่านกัมมันต์สีของสารตัวอย่างเข้มขึ้น ปริมาณกรดลิวลินิกลดลงเล็กน้อย สรุปได้ว่าไม่สามารถใช้ ถ่านกัมมันต์ดูดซับสีจากตัวอย่างได้ และยังทำให้ปริมาณ กรดลิวลินิกลดลง

2) ผลการศึกษากรณีไม่ปรับสภาพเรซิน

ผลการศึกษาโดยการเติมสารละลายกรดซัลฟิวริก ร้อยละ 0.5 ลงในคอลัมน์ที่มีเรซินที่ไม่ผ่านการ ปรับสภาพ พบว่าหลังสารตัวอย่างผ่านเรซิน pH มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดัง ตารางที่ 3 ซึ่งเรซินสามารถจับกรดซัลฟิวริกได้ เมื่อเติม กรดลิวลินิกร้อยละ 5 ในสารละลายกรดซัลฟิวริกร้อยละ 0.5 แล้วเติมลงในคอลัมน์ที่มีเรซินที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพบว่า หลังสารตัวอย่างผ่านเรซิน pH เพิ่มขึ้น และปริมาณ กรดลิวลินิกมีค่าลดลงอย่างมาก แสดงให้เห็นว่า เรซิน สามารถจับกรดลิวลินิกได้เช่นกัน

ตารางที่ 3 ค่า pH และปริมาณกรดสูลูนิกรีนไม่ Pretreat เรซิน

	pH	LA ที่เหลือในสารตัวอย่าง (mg/g)
สารละลายกรดซัลฟิวริก		
ก่อนผ่านเรซิน	1±0.1	-
หลังผ่านเรซิน	5±0.2	-
สารละลายกรดซัลฟิวริกที่เติมกรดสูลูนิกรีน		
ก่อนผ่านเรซิน	1±0.1	45.17±1.5
หลังผ่านเรซิน	5±0.2	0.21±0.01
ชะด้วยกรดฟอสฟอริก (รอบ 1 นาน 1 ชั่วโมง)	2±0.1	13.80±0.5
ชะด้วยกรดฟอสฟอริก (รอบ 2 นาน 1 ชั่วโมง)	2±0.1	18.06±0.7
ชะด้วยกรดฟอสฟอริก (ค้างคืน)	2±0.1	16.87±0.6

ตารางที่ 4 ค่า pH และปริมาณกรดสูลูนิกรีนของสารตัวอย่างกรณี Pretreat เรซิน

สารตัวอย่าง	pH	LA (mg/g)
สารตัวอย่างที่ผ่านถ่านแล้ว	3±0.1	2.46±0.10
NaCl 4%	5±0.2	1.50±0.08
NaOH 4%	7±0.2	1.48±0.07
HCl 1%	5±0.2	1.53±0.06
HCl 3%	5±0.2	1.26±0.05
H ₂ SO ₄ 0.5%	6±0.2	0.82±0.03
H ₂ SO ₄ 3%	4±0.1	2.17±0.09

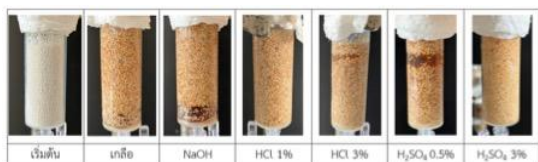
จากทฤษฎีเรซิน D301 ซึ่งเป็นเรซินแบบประจุลบต่าง อ่อนควรกำจัดได้เฉพาะกรดแก่แต่ไม่กำจัดกรดอ่อน ส่วนงานวิจัยของ Cheng et al. (2020) ที่เรซิน D301 จับกรดสูลูนิกรีนและกรดฟอสฟอริกแต่ไม่จับกรดซัลฟิวริก แต่ผลการทดลองที่ดำเนินการนี้พบว่าเรซิน D301 จับทั้งกรดแก่ คือกรดซัลฟิวริกและกรดอ่อนคือกรดสูลูนิกรีน ซึ่งความแตกต่างในประสิทธิภาพการจับกรดของเรซิน D301 ในแต่ละงานวิจัยอาจมาจากปัจจัย เช่น สภาพการปรับสภาพ เรซินก่อนใช้งาน ความเข้มข้นของกรด และชนิดของกรดที่อยู่ในสารตัวอย่าง การปรับสภาพด้วย H₂SO₄ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจับกรดสูลูนิกรีนในบางกรณี ซึ่งผลดังกล่าวทำให้การใช้เรซิน D301 เพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับกรด สูลูนิกรีนยังเป็นไปได้ยาก

3) ผลการศึกษากรณีปรับสภาพเรซิน

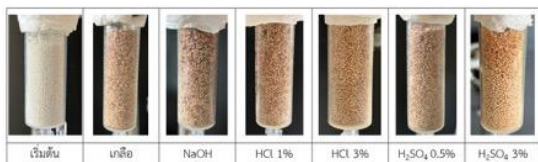
ผลการปรับสภาพเรซินที่ผ่านการแช่ด้วย NaCl ร้อยละ 4, NaOH ร้อยละ 4, HCl ร้อยละ 1, HCl ร้อยละ 3 และ H₂SO₄ ร้อยละ 0.5 เกิดการลอยของเรซิน และ เรซินที่ผ่านการแช่ด้วย H₂SO₄ ร้อยละ 3 เกิดการดูดซับสารตัวอย่าง จนพองตัว แสดงดังรูปภาพ 6 และเมื่อผ่านสารตัวอย่างจนหมดแล้วเรซินมีลักษณะดังรูปภาพ 7 โดยเรซินที่ผ่านการแช่

ด้วย NaCl ร้อยละ 4, NaOH ร้อยละ 4, HCl ร้อยละ 1, HCl ร้อยละ 3 และ H₂SO₄ ร้อยละ 0.5 มีสีไม่สม่ำเสมอ เรซินบางส่วนดำ และเรซินที่ผ่านการแช่ด้วย H₂SO₄ ร้อยละ 3 มีสีสม่ำเสมอ สารหลังผ่านเรซินที่แช่ด้วย NaCl ร้อยละ 4, NaOH ร้อยละ 4 และ HCl ร้อยละ 1 มีสีเข้มกว่าสารตัวอย่างก่อนผ่านเรซิน สารตัวอย่างหลังผ่านเรซินที่แช่ด้วย H₂SO₄ ร้อยละ 0.5 มีสีใกล้เคียงสารตัวอย่างก่อนผ่านเรซิน และสารตัวอย่างหลังผ่านเรซินที่แช่ด้วย HCl ร้อยละ 3, และ H₂SO₄ ร้อยละ 3 มีสีอ่อนกว่าสารตัวอย่างก่อนผ่านเรซิน โดยสารตัวอย่างหลังผ่านเรซินที่แช่ด้วย H₂SO₄ ร้อยละ 3 มีสีอ่อนที่สุด สารหลังผ่านเรซินที่แช่ด้วย NaCl ร้อยละ 4, NaOH ร้อยละ 4 และ HCl ร้อยละ 1 มีสีเข้มขึ้น เนื่องจากสารตกค้างจากเรซินที่ไม่เหมาะสมในกระบวนการปรับสภาพ อาจปนเปื้อนในสารตัวอย่าง ทำให้เกิดการเปลี่ยนสี ดังภาพที่ 8 แสดงว่า เรซินช่วยดูดซับสีของตัวอย่างได้

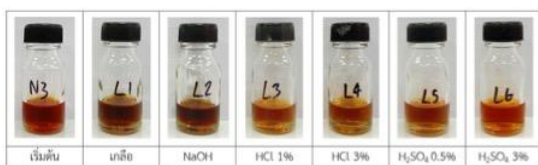
ค่า pH ของสารตัวอย่างหลังผ่านเรซินมีค่าเพิ่มขึ้น โดยสารตัวอย่างหลังผ่านเรซินที่แช่ด้วย NaOH 4% มีค่า pH เป็นกลาง และสารตัวอย่างที่ผ่านเรซินที่แช่ด้วยสารอื่น ๆ มีค่า pH ตั้งแต่ 4-6 และพบว่าปริมาณกรดสูลูนิกรีนในสารตัวอย่างหลังผ่านเรซินมีปริมาณลดลง โดยสารหลังผ่านเรซิน



ภาพที่ 6 เรซินระหว่างการแช่ด้วยสารตัวอย่างที่เติมกรดลิธูมิก



ภาพที่ 7 เรซินหลังจากสารตัวอย่างที่เติมกรดสีวลินิกไหลผ่าน



ภาพที่ 8 สีของสารตัวอย่างที่เติมกรดสีวูลินิกหลังผ่านเรซิน



ภาพที่ 9 การศึกษาการทำปฏิกิริยารีดอกซ์ด้วยเรซินและถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 10 การเพิ่มความบริสุทธิ์กรดสัลฟอนิกด้วยการเติมดินเบา

ที่แช่ด้วย H_2SO_4 ร้อยละ 0.5 มีปริมาณกรดสลิวอลินิกต่ำสุด คือ 0.82 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนสารหลังผ่านเรซินที่แช่ด้วย H_2SO_4 ร้อยละ 3 มีปริมาณกรดสลิวอลินิกสูงสุด คือ 2.17 ± 0.09 มิลลิกรัมต่อกรัม (ตารางที่ 4) แสดงว่าการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก ร้อยละ 3 ทำให้เรซินดูดซับกรดสลิวอลินิกได้น้อยลง

จากการศึกษาการใช้เรซินเพิ่มเติม กรณีเรซินที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและปรับสภาพ โดยศึกษาระยะเวลาการแลกเปลี่ยนตัวอย่างในเรซินเป็นเวลา 30 นาที และ 1 ชั่วโมง กรณีเรซินที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ พบว่าหลังสารตัวอย่างผ่านเรซิน pH มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 5 ทั้งสองเวลาที่ศึกษา ปริมาณกรดสลิลินิกในสารตัวอย่างที่ผ่านเรซินที่แช่ นาน 30 นาที

เหลือน้อยกว่าที่แช่เรซินนาน 1 ชั่วโมง โดยมีอัตราการไหลของสารที่ผ่านเรซินต่ำลง แสดงว่าเรซินดูดซับกรดซัลฟิวริก และกรดสัลฟูลินิกจากตัวอย่าง การแช่นาน 30 นาทีเพียงพอให้เกิดการดูดซับกรดสัลฟูลินิกได้ดี การแช่นาน 1 ชั่วโมงทำให้เรซินเกิดการอิ่มตัว ไม่ดูดซับสารเพิ่มเติม และหลังจากชะเรซินด้วยกรดฟอสฟอริกโดยแช่นาน 15 นาที รอบที่ 1 ค่า pH มีค่าลดลงเท่ากับ 4 ทั้งสองชุด และหลังจากชะเรซินด้วยกรดฟอสฟอริก รอบที่ 1 แช่ทิ้งไว้นาน 15 นาทีเป็นรอบที่ 2 และรอบที่ 3 ค่า pH มีค่าลดลง เท่ากับ 3 ทั้งสองชุด โดยมีปริมาณกรดสัลฟูลินิกบ่งบอกว่าการชะเรซินด้วยกรดฟอสฟอริก รอบที่ 2 ได้ปริมาณกรดสัลฟูลินิกเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่การชะรอบที่ 3 ปริมาณกรดสัลฟูลินิกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

ศึกษาการชะล้างเรซินด้วยการเติมกรดฟอร์มิค 1 M เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Cheng et al. (2020) โดยแช่ทิ้งไว้นาน 1 ชั่วโมง สำหรับรอบที่ 1 และ 2 และค้างคืนสำหรับรอบที่ 3 พบว่า pH ของสารหลังชะเรซินด้วยกรดฟอร์มิคทั้ง 3 รอบ มีค่าลดลงเท่ากับ 2 และปริมาณกรดสปีกูลินิกในสารตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 13.80, 18.06 และ 16.87 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ การชะด้วยกรดฟอร์มิค 1 M จำนวน 3 รอบที่ดำเนินการยังไม่สามารถชะกรดสปีกูลินิกจากเรซินได้หมด และพบว่ามีกรดซัลฟิวริกถูกชะออกมาด้วย

4) ผลการศึกษากการเพิ่มความบริสุทธิ์ของ
กรดลิวลินิกด้วยการใช้เรซินร่วมกับถ่านกัมมันต์

การศึกษาการทำบริสุทธิ์กรดสลิวนิกด้วยเรซินและ
ถ่านกัมมันต์ พบว่า ลักษณะของตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอนต่าง ๆ
โดยปริมาณกรดสลิวนิกของสารหลังผ่านกระบวนการเทียบ
กับตัวอย่างก่อนผ่านกระบวนการ มีค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้น
เพียงเล็กน้อย ลักษณะทางกายภาพ สียังคงเข้มไม่ต่างจาก
เดิม แต่มีความขุ่นลดลง ดังแสดงภาพที่ 9 แสดงว่า
กระบวนการนี้ลดการปนเปื้อนได้ แต่ยังมีประสิทธิภาพไม่สูง
นัก เนื่องจากเรซินและถ่านกัมมันต์ดูดซับกรดสลิวนิกไปมาก
ทำให้กรดสลิวนิกในผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง

5) ผลการศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์ของ
กรดลิวลินิกด้วยการเติมดินเบา

การศึกษากระบวนการใหม่ในการเพิ่มความบริสุทธิ์กรด
ซิลิกาด้วยการเติมดินเบา (Diatomaceous earth) ลงใน
สารตัวอย่าง โดยศึกษาอัตราส่วนดินเบา (กรัม) : ตัวอย่าง
(มิลลิลิตร) 1:3 และ 1:6 ผสมดินเบาและตัวอย่างให้เข้ากันดี

แล้วทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง กรองดินเบาออกด้วยกระดาษกรองพบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการตกตะกอนด้วยดินเบาที่มีสีอ่อนลงมาก ความขุ่นลดลง โดยปริมาณกรดลิวูลินิกลดลงเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ การใช้อัตราส่วน 1:6 ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายเพราะใช้ดินเบาน้อยกว่า แต่ยังคงประสิทธิภาพในการลดสารปนเปื้อนได้ดีเพียงพอ โดยการใช้อัตราส่วนที่ต่ำกว่า (1:3) แม้จะลดสารปนเปื้อนได้มากกว่า แต่ความแตกต่างไม่เพียงพอที่จะชดเชยต้นทุนที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เรซินและถ่านกัมมันต์ การใช้ดินเบาที่มีขั้นตอนน้อยกว่าและลดสารปนเปื้อนได้ดีกว่า และเมื่อนำสารตัวอย่างที่ได้ไปประเหยเอาน้ำและกรดฟอร์มิกออกด้วยเครื่องระเหยสูญญากาศ ที่ความดัน 8 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ผลผลิตกรดลิวูลินิกที่ได้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจากตอนเริ่มต้น 180.24 ± 20.10 มิลลิกรัม/กรัม เป็น 482 ± 23.0 มิลลิกรัม/กรัม คิดเป็นความเข้มข้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 63 เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นที่ได้กับกรดลิวูลินิกมาตรฐานร้อยละ 98 ความเข้มข้นผลผลิตกรดลิวูลินิกคือร้อยละ 50 ซึ่งสูงกว่าผลการศึกษาของ Kang et al. (2018) ได้ผลิตกรดลิวูลินิก (LA) ที่มีความเข้มข้นสูงจากกากน้ำตาลอ้อย โดยมีค่าเฉลี่ยผลได้ร้อยละ 23.9-30.5 ซึ่งสามารถสรุปกระบวนการดังภาพที่ 10 เป็นกระบวนการเพิ่มความบริสุทธิ์กรดลิวูลินิกที่เหมาะสม

5. บทสรุป

การเก็บอ้อยเป็นเวลา 5 สัปดาห์ไม่ส่งผลต่อสมบัติของน้ำอ้อยในการเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตกรดลิวูลินิกอย่างมีนัยสำคัญ การสังเคราะห์กรดลิวูลินิกที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 0.03 โมลาร์ และระยะเวลา 3 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตกรดลิวูลินิกจากน้ำอ้อย นอกจากนี้ การเพิ่มความบริสุทธิ์กรดลิวูลินิกด้วยการเติมดินเบา (Diatomaceous earth) สามารถเพิ่มความเข้มข้นผลผลิตกรดลิวูลินิกได้ร้อยละ 50 ผลการศึกษานี้สามารถนำไปพัฒนาเป็นกระบวนการผลิตกรดลิวูลินิกจากน้ำอ้อยในระดับอุตสาหกรรม เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตจากน้ำอ้อยอย่างยั่งยืนได้

6. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ยังไม่สามารถดำเนินการให้ได้ผลผลิตกรดลิวูลินิกความบริสุทธิ์ 95 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากยังไม่

สามารถแยกกรดซัลฟิวริกและสารปนเปื้อนบางส่วนออกจากกรดลิวูลินิกที่ได้ ตามทฤษฎีการใช้เรซินแบบประจุลบต่างอ่อนกว่าแยกกรดซัลฟิวริกจากกรดลิวูลินิกได้ แต่จากการทดลองผลไม่ได้เป็นเช่นนั้น การใช้ดินเบาช่วยลดสารปนเปื้อนได้ดีกว่าการใช้เรซินร่วมกับถ่านกัมมันต์ แต่ความบริสุทธิ์ได้เพียง 50 เปอร์เซ็นต์ ยังต้องมีการศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์กรดลิวูลินิก นอกจากนี้ จะต้องมีการยืนยันโครงสร้างทางเคมีของกรดลิวูลินิกด้วยวิธี FT-IR ในการวิจัยต่อไป เพื่อให้มั่นใจว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์และคุณลักษณะตรงตามเป้าหมาย เทคนิค FT-IR สามารถช่วยยืนยันลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนากระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรม

เอกสารอ้างอิง

- Antonetti, C., Licursi, D., Fulignati, S., Valentini, G., & Raspolli Galletti, A. M. (2016). New frontiers in the catalytic synthesis of levulinic acid: from sugars to raw and waste biomass as starting feedstock. *Catalysts*, 6(12), 196.
- Changzhou University. (2021). *Method for separating and purifying levulinic acid*. China Patent No. CN113929571A.
- Cheng, S., Zheng, W., Liu, W., Liu, L., & Sun, W. (2020). Optimization and purification of levulinic acid extracted from bagasse. *Sugar Tech*, 22(5), 830-841.
- Hijazi, A., Pisano, I., Illek, P., & Leahy, J. J. (2022). A rapid HPLC method for the simultaneous determination of organic acids and furans: Food applications. *Beverages*, 8(1), 1-13.
- Kang, S., Fu, J., Zhou, N., Liu, R., Peng, Z., & Xu, Y. (2018). Concentrated Levulinic Acid Production from Sugar Cane Molasses. *Energy & Fuels*, 32(3), 3526-3531.
- Khon Kaen University. (2022). *Development of High-Value Sugar Products for the Fiscal Year 2022*. Khon Kaen University.
- Li, X., Xu, R., Yang, J., Nie, S., Liu, D., Liu, Y., & Si, C. (2019). Production of 5-hydroxymethylfurfural and levulinic acid from lignocellulosic biomass and catalytic upgradation. *Industrial Crops and Products*, 130, 184-197.
- Ministry of Industry. (2023). *Measures for the Development of Bio Industry in Thailand (2018-2027)*. Retrieved January 3, 2023, from www.oie.go.th/assets/portals/1/fileups/2/files/action%20plan/bio_plan.pdf.
- Office of the cane and sugar board. (2024). *General Information*. Retrieved January 3, 2023, from <https://www.ocsb.go.th/>
- Rackemann, D. W., Doherty, W. O. S. (2012). A review on the production of levulinic acid and furanics from sugars. *International Sugar Journal*, 114(0000), 30-36.
- Sowcharoensuk, C. (2023). *Business/Industry Trends 2023-2025: Sugar Industry*. Retrieved January 3, 2023, from <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/agriculture/sugar/io/sugar-2023-2025>

การคัดเลือกเทคโนโลยีผลิตพลังงานจากขยะและการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์และการเงินเพื่อประยุกต์ใช้ในศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยรวมแบบครบวงจร จังหวัดระยอง

ศักรธร บุญทวีวัฒน์^{1*} เกียรติไกร आयวัฒน์² และ พีรวัส หวังสถิตย์สถาพร³

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20230 ประเทศไทย

²ศูนย์วิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900 ประเทศไทย

³นักวิจัยอิสระ, ผู้เชี่ยวชาญด้านเศรษฐศาสตร์และการเงิน ประเทศไทย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล: sakaradhorn@eng.src.ku.ac.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.01.006

รับเมื่อ 5 มกราคม 2567 แก้ไขเมื่อ 30 ธันวาคม 2567 ตอรับเมื่อ 19 มกราคม 2568

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน ศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยรวมแบบครบวงจร จังหวัดระยอง เป็นหน่วยงานหลักในการจัดการขยะมูลฝอยตามการแบ่งกลุ่มพื้นที่ในการจัดการมูลฝอย (Clusters) กลุ่มขนาด L และสามารถรองรับขยะมูลฝอยได้มากกว่า 1,000 ตันต่อวัน อย่างไรก็ตาม จากการคาดการณ์ปริมาณขยะในอนาคตในจังหวัดระยองในอีก 20 ปีข้างหน้าจะเพิ่มขึ้นไปถึง 2,000 ตันต่อวัน ดังนั้น การคัดเลือกเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของศูนย์กำจัดขยะฯ และสามารถแปรรูปขยะให้เป็นพลังงานได้จึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยงานวิจัยนี้จะดำเนินการคัดเลือกเทคโนโลยีการกำจัดขยะและสามารถแปรรูปจากขยะให้เป็นพลังงาน ได้แก่ เทคโนโลยีเตาเผาขยะ เทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เทคโนโลยีรวบรวมก๊าซชีวภาพจากหลุมฝังกลบ เทคโนโลยี RDF และเทคโนโลยีก๊าซซิฟิเคชัน โดยคัดเลือกประเภทที่เหมาะสมในแต่ละเทคโนโลยีก่อนโดยการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ จากนั้นประเภทที่เหมาะสมของแต่ละเทคโนโลยีจะถูกเปรียบเทียบกันโดยการให้คะแนนแบ่งออกเป็น 4 หมวด ได้แก่ หมวดด้านเทคนิค หมวดด้านเศรษฐศาสตร์ หมวดด้านสิ่งแวดล้อม และหมวดด้านสังคม หลังจากคัดเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมแล้ว ในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเทคโนโลยีกำจัดขยะที่ถูกคัดเลือก โดยสรุปแล้วเทคโนโลยีเตาเผาขยะแบบตะกรับ เป็นเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสมมากที่สุดที่จะเสริมประสิทธิภาพการกำจัดขยะและการแปรรูปขยะให้เป็นพลังงาน และมีความคุ้มค่าการลงทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ที่ $B/C = 1.22$, $EIRR = 14.96\%$ และ $NPV = 415.54$ ล้านบาท และความคุ้มค่าทางการเงินที่ $R/C = 1.01$, $FIRR = 8.09\%$ และ $NPV = 15.50$ ล้านบาท

คำสำคัญ: เทคโนโลยีการกำจัดขยะ, เทคโนโลยีการแปลงขยะเป็นเชื้อเพลิง, เทคโนโลยีเตาเผาขยะ, การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

Selection of Waste-to-Energy Technologies with Economic and Financial Analysis for Application in the Integrated Solid Waste Management Center, Rayong Province

Sakaradhorn Boontaveeyuwat^{1*}, Kiatkrai Ayuwat², and Peerawas Wangstitstaporn³

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University, Sriracha Campus Chonburi, 20230 Thailand

²The Energy and Environmental Engineering Center (EEEC), Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 10900 Thailand

³Freelance Researcher, Expert in Economic and Finance, Thailand

* Corresponding Author, E-mail: sakaradhorn@eng.src.ku.ac.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.01.006

Received 5 January 2024; Revised 30 December 2024; Accepted 19 January 2025

ABSTRACT

The Rayong Provincial Integrated Solid Waste Management Center serves as a critical hub for managing solid waste in Thailand, designated to handle large-scale waste management clusters (L clusters) with a current capacity of over 1,000 tons per day. However, future waste projections indicate an alarming increase to 2,000 tons per day within the next two decades, necessitating the adoption of advanced technologies to enhance waste management efficiency and facilitate waste-to-energy transformation. This study aims to identify and evaluate innovative waste management technologies to address these challenges, including grate incineration, anaerobic digestion, landfill gas collection, refuse-derived fuel (RDF) processing, and gasification. A systematic methodology was employed, beginning with a qualitative analysis to determine the most suitable technological alternatives for each category. These alternatives were subsequently evaluated and scored across four dimensions: technical performance, economic viability, environmental impact, and social acceptability. The final step involved a comprehensive economic analysis of the selected technologies. The results identify grate incineration technology as the most effective solution for improving waste management efficiency and converting waste into energy. The economic feasibility analysis reveals a benefit-cost ratio (B/C) of 1.22, an economic internal rate of return (EIRR) of 14.96%, and a net present value (NPV) of 415.54 million baht. Additionally, financial feasibility assessments show a revenue-cost ratio (R/C) of 1.01, a financial internal rate of return (FIRR) of 8.09%, and an NPV of 15.50 million baht. These findings highlight the potential of grate incineration technology as a sustainable and economically viable solution to meet future waste management demands in Rayong Province, offering a replicable model for other regions confronting similar challenges.

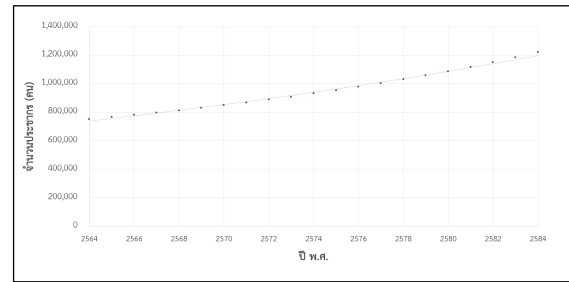
KEYWORDS: Solid waste disposal technology, Waste to energy technology, Incineration, Economics and financial analysis

Please cite this article as: S. Boontaveeyuwat, K. Ayuwat and P. Wangstitstaporn, "Selection of Waste-to-Energy Technologies with Economic and Financial Analysis for Application in the Integrated Solid Waste Management Center, Rayong Province," *Journal of Applied Science and Emerging Technology*, vol 24, no 1, pp. 1-14, ID. 255327, April 2025 (in Thai).

1. บทนำ

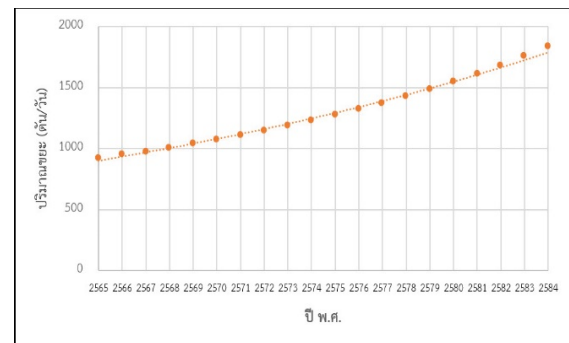
จังหวัดระยองถือเป็นจังหวัดต้นแบบในการบริหารจัดการขยะมูลฝอยแบบครบวงจร โดยมีศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยรวมแบบครบวงจร จ.ระยอง ตั้งอยู่หมู่ที่ 3 ต.น้ำคอก อ.เมือง จ.ระยอง บนพื้นที่ 516 ไร่ 2 งาน 61 ตารางวา เป็นศูนย์หลักในการจัดการขยะมูลฝอยตามการแบ่งกลุ่มพื้นที่ในการจัดการมูลฝอย (Clusters) กลุ่มขนาด L และสามารถรองรับขยะมูลฝอยได้มากกว่า 1,000 ตันต่อวัน โดยนำขยะมูลฝอยมากำจัดอย่างถูกหลักสุขาภิบาล นอกจากนี้ ศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยฯ ยังมุ่งเน้นการนำขยะมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่า โดยเฉพาะกระบวนการผลิตสารปรับปรุงดิน และระบบผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้ องค์การบริหารส่วนจังหวัดระยองได้พัฒนาโครงการประสานความร่วมมือกับบริษัท โกลบอล เพาเวอร์ ซินเนอร์ยี่ จำกัด (มหาชน) เพื่อจัดทำโครงการแปลงขยะเป็นเชื้อเพลิง (Waste to Energy) ในพื้นที่ศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยฯ โดยการติดตั้งกระบวนการแปลงขยะมูลฝอยเป็นเชื้อเพลิง refuse-derived fuel (RDF) เพื่อลดปริมาณขยะมูลฝอยที่นำไปฝังกลบและลดกลิ่นเหม็นภายในศูนย์กำจัดขยะฯ

จากการดำเนินงานขั้นต้นทำให้ศูนย์กำจัดขยะฯ เป็นต้นแบบการจัดการขยะมูลฝอยแบบประชารัฐอย่างแท้จริง ตามแนวทางและกลไกการปฏิบัติงานด้านการบริหารจัดการขยะมูลฝอย “จังหวัดสะอาด” อย่างไรก็ตาม จากผลการศึกษาขององค์การบริหารส่วนจังหวัดระยองมีการคาดการณ์ว่าปริมาณขยะมูลฝอยที่จะเข้ามาใช้บริการภายในศูนย์กำจัดขยะฯ จะเพิ่มมากขึ้นถึง 1,834 ตันต่อวันจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นถึง 1.2 ล้านคน (Rayong Provincial Administrative Organization, 2022) ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 เป็นการแสดงการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและปริมาณขยะต่อวัน ดังนั้น องค์การบริหารส่วนจังหวัดระยองจึงมีความจำเป็นต้องลงทุนเทคโนโลยีการกำจัดขยะใหม่โดยต้องเป็นเทคโนโลยีที่สามารถแปลงขยะมูลฝอยให้เป็นพลังงานได้ เพื่อลดภาระการกำจัดขยะโดยหลุมฝังกลบขยะ เหมือนที่ในปัจจุบัน ศูนย์กำจัดขยะฯ ได้มีโรงไฟฟ้า RDF สามารถรองรับขยะมูลฝอยได้ 500 ตันต่อปี ซึ่งจะไม่เพียงพอในอนาคต อย่างไรก็ตามการพิจารณาเทคโนโลยีการแปลงขยะสู่พลังงานทดแทนจำเป็นต้องการ



รูปที่ 1 แนวโน้มจำนวนประชากรในจังหวัดระยองในอนาคต

ที่มา : Rayong Provincial Administrative Organization (2022)



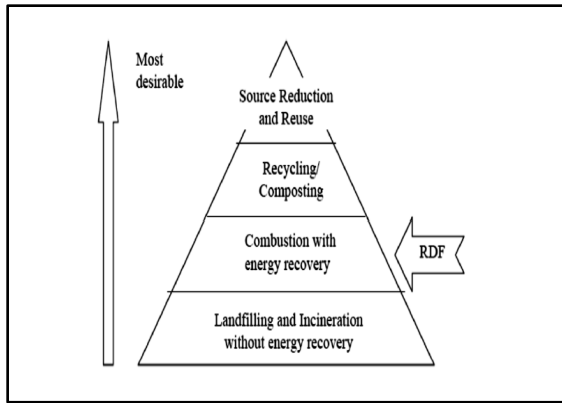
รูปที่ 2 การคาดการณ์ปริมาณขยะในจังหวัดระยองในอนาคต

ที่มา : Rayong Provincial Administrative Organization (2022)

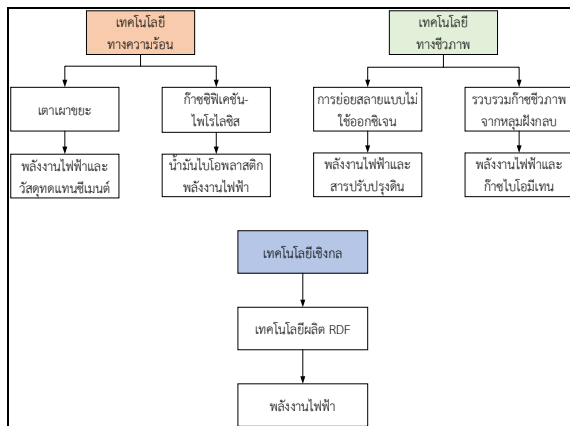
วิเคราะห์เชิงเทคนิคและการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ และการเงินเพื่อเป็นกระบวนการตัดสินใจอย่างรอบคอบ

ในปัจจุบัน ปัญหาขยะเป็นปัญหาสำคัญที่ทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องต้องดำเนินการ กลยุทธ์การจัดการขยะโดยทั่วไปประกอบด้วย 4 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 ได้แก่การจัดการขั้นพื้นฐานโดยการเผาหรือการฝังกลบ ซึ่งเป็นการมุ่งเน้นที่การกำจัดขยะเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการนำพลังงานกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ขั้นที่สองเป็นการเผาโดยมีการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ ขั้นที่สาม คือ การนำขยะหรือของเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยผ่านกระบวนการจัดการที่เหมาะสม และขั้นตอนสุดท้าย คือ การนำขยะกลับมาใช้ซ้ำและลดการเกิดขยะที่แหล่งกำเนิดหรือการใช้มาตรการลดขยะให้เป็นศูนย์ (Zero Waste) สรุปภาพรวมเทคโนโลยีการผลิตขยะแสดงดังรูปที่ 4

งานศึกษานี้จะดำเนินการคัดเลือก 4 เทคโนโลยีหลัก เพื่อมาประยุกต์ใช้ภายในศูนย์กำจัดขยะฯ เพิ่มเติม ได้แก่ เตาเผาขยะ เทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เทคโนโลยีรวบรวมก๊าซชีวภาพจากหลุมฝังกลบ เทคโนโลยี RDF และเทคโนโลยีก๊าซซิพิเคชัน-ไพโรไลซิส ในส่วนนี้จะดำเนินการทบทวนแนวคิดหลักของ 4 เทคโนโลยีจาก (ERDI-CMU, 2022; Williams, 2005) ดังนี้



รูปที่ 3 การจัดการขยะชุมชน 4 ระดับ ที่มา : Nithikul



รูปที่ 4 สรุปภาพรวมเทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากขยะ

1. เทคโนโลยีเตาเผาขยะ เป็นการเผาขยะเพื่อทำลายมวลและปริมาตรของขยะมูลฝอยด้วยความร้อนในเตาที่ออกแบบสำหรับเผาขยะโดยเฉพาะประมาณร้อยละ 80-90 ของปริมาณขยะ โดยต้องมีการออกแบบเตาเผาให้เหมาะสมกับปริมาณและลักษณะองค์ประกอบของขยะมูลฝอยและปัจจัยสำคัญ 2 ประการ ได้แก่ ค่าความชื้น และค่าความร้อนของขยะมูลฝอยซึ่งมีการผันแปรตามฤดูกาล ซึ่งจะต้องมีระบบควบคุมเป็นอย่างดีเพื่อป้องกันการปล่อยมลพิษ เช่น ก๊าซพิษ เขม่า กลิ่น ฯลฯ สู่ชั้นบรรยากาศที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยประเภทของเตาเผาที่ใช้ในปัจจุบันได้แก่ เตาเผาแบบตะกรับ เตาเผาแบบหมุน และเตาเผาแบบฟลูอิโดเบด พลังงานความร้อนที่ได้จากเตาเผาขยะจะสามารถถูกนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำและกระแสไฟฟ้าได้ และ ซี้เก้าจากการเผาไหม้จะถูกนำไปฝังกลบที่หลุมฝังกลบ ในส่วนของเถ้าลอย จะถูกนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้

2. ระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ระบบนี้เป็นระบบที่มีการดำเนินการอยู่ในศูนย์กำจัดขยะฯ ซึ่งเป็นระบบแบบเปียกหลายขั้นตอน ระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้

ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) เป็นการนำขยะประเภทเศษอาหาร เศษผัก และผลไม้ไปหมักในบ่อหมักหรือถังหมักแบบปิด ทำให้ได้ก๊าซชีวภาพประมาณ 100-200 ลูกบาศก์เมตรต่อปริมาณขยะอินทรีย์ 1 ตัน ก๊าซชีวภาพที่ได้มีส่วนของก๊าซมีเทนประมาณร้อยละ 55-70 มีค่าความร้อน 20-25 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร โดยสามารถนำไปผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยเครื่องยนต์ชีวภาพ ส่วนกากที่เหลือจากการย่อยสลายสามารถนำไปใช้เป็นสารปรับปรุงดินเพื่อการเกษตร

3. เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพจากหลุมฝังกลบขยะ คือ การกักเก็บก๊าซต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาย่อยสลายทางชีวเคมีของขยะมูลฝอยในบริเวณหลุมฝังกลบที่มีความลึกตั้งแต่ 12 เมตรขึ้นไป โดยช่วงแรกจะเป็นการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน จากนั้นจึงเป็นการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งจะก่อให้เกิดก๊าซต่างๆ ได้แก่ ก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไนโตรเจน โดยสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือใช้เป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงในรถยนต์ได้ การกำจัดขยะชุมชนด้วยวิธีการฝังกลบนั้นเป็นการนำขยะมากองหรือฝังกลบในพื้นที่จัดเตรียมไว้แล้วใช้เครื่องจักรเกลี่ยและบดอัดให้ขยะมูลฝอยยุบตัวลงจนมีความหนาแน่นของชั้นขยะมูลฝอยตามที่กำหนด จากนั้นจึงใช้ดินบดทับและอัดให้แน่นอีกครั้งหนึ่งแล้วจึงนำขยะมูลฝอยมาเกลี่ยและบดอัดอีกเป็นชั้นๆ สลับด้วยชั้นดินกลบทับ เทคโนโลยีการฝังกลบขยะมูลฝอยชุมชนอาศัยทั้งกระบวนการทางชีวภาพ ทางเคมีและทางกายภาพในการย่อยสลายขยะมูลฝอย (Williams,2005)

เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากก๊าซชีวภาพจากการฝังกลบขยะมูลฝอยนั้น สามารถจำแนกตามวิธีการดำเนินงานฝังกลบขยะมูลฝอยได้เป็น 2 วิธี คือ เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากก๊าซชีวภาพจากการฝังกลบขยะมูลฝอยแบบถูกหลักสุขาภิบาล และเทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากก๊าซชีวภาพจากการฝังกลบขยะมูลฝอยแบบ Bioreactor อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบัน องค์การบริหารส่วนจังหวัดระยองได้มีการดำเนินการฝังกลบขยะแบบถูกหลักสุขาภิบาลอยู่แล้ว

4. เทคโนโลยีผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel: RDF) เป็นการนำเทคโนโลยีในการแปรรูปขยะมูลฝอยและปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของขยะด้วยกระบวนการจัดการต่างๆ เพื่อให้มีคุณสมบัติในด้านค่าความร้อน ความชื้น และมีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยต้องมีการคัดแยกขยะอันตรายและ

ขยะที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ออกไป จากนั้นจึงนำขยะไปเข้าสู่กระบวนการการผลิตเชื้อเพลิงโดยการย่อยขนาด เช่น การสีก ตัด สับ และทำให้แห้ง จากนั้นจึงนำไปอัดแท่งหรืออัดก้อนเพื่อความสะดวกในการใช้งานและการขนส่ง ถือเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถทดแทนการใช้ถ่านหินได้ดี (Kourkoumpas et al., 2018 ; Velis et al., 2010 ; Arena., 2012 ; Lombardi et al., 2015 ; Consonni et al., 2005) อีกหนึ่งข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีนี้เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการเผาขยะโดยตรง คือ การใช้ขยะมูลฝอยที่เก็บรวบรวมได้เพื่อการเผาไหม้โดยตรงมักก่อให้เกิดความยุ่งยากในการใช้งานเนื่องจากความไม่แน่นอนในองค์ประกอบต่างๆ ที่ประกอบกันขึ้นเป็นขยะมูลฝอย ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามชุมชนและตามฤดูกาล อีกทั้งขยะมูลฝอยเหล่านี้มีค่าความร้อนต่ำ มีปริมาณแฉะ และความชื้นสูง สิ่งเหล่านี้ก่อให้เกิดความยุ่งยากให้กับผู้ออกแบบโรงเผาขยะ ผู้ปฏิบัติงานและผู้ควบคุมการเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการแปรรูปขยะมูลฝอยโดยผ่านกระบวนการจัดการต่างๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของขยะมูลฝอยเพื่อทำให้กลายเป็นเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel : RDF) จะสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นได้ ซึ่งเชื้อเพลิงขยะที่ได้นั้นสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ต่อไป เชื้อเพลิงขยะที่ได้นี้จะมีค่าความร้อนสูงกว่าหรือมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงที่ดีกว่าการนำขยะมูลฝอยที่เก็บรวบรวมมาใช้โดยตรง (Fodor and Klemes., 2012; Gallardo et al., 2014; Astrup et al., 2009 and Swithenbank et al., 2003) เนื่องจากมีองค์ประกอบทั้งทางเคมีและกายภาพสม่ำเสมอว่า ข้อดีของเชื้อเพลิงขยะคือ มีค่าความร้อนสูง (เมื่อเปรียบเทียบกับขยะมูลฝอยที่เก็บรวบรวมมา) ง่ายต่อการจัดเก็บ การขนส่ง การจัดการต่างๆ รวมทั้งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำกว่า

5. เทคโนโลยีก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นเทคโนโลยีที่ยังไม่มีการใช้ภายในศูนย์กำจัดขยะฯ เป็นกระบวนการที่ทำให้ขยะเป็นก๊าซโดยการทำให้ปฏิกิริยาสันดาปแบบไม่สมบูรณ์ (Partial combustion) หรือ Synthesis Gas โดยสารไฮโดรคาร์บอนในขยะจะทำปฏิกิริยากับอากาศหรือออกซิเจนในปริมาณจำกัด ทำให้เกิดก๊าซต่าง ๆ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน ก๊าซเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นก๊าซเชื้อเพลิง เรียกว่า “Producer Gas” เทคโนโลยีที่ใช้วิธีการเผาเช่นนี้ เรียกว่า

เทคโนโลยีก๊าซซิฟิเคชันและไพโรไลซิส กระบวนการเผาคล้ายกับการเผาถ่าน นอกจากจะได้ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงแล้วยังได้ผลผลิตอย่างอื่นด้วย เช่น ถ่านชาร์ หรือ น้ำมันไพโรซิส ประเภทของก๊าซซิฟิเคชันที่ใช้ในเทคโนโลยีนี้แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ ก๊าซซิฟิเคชันแบบ Fixed Bed, Fluidized Bed และ Entrained Flow (Belgiorno et al, 2003 ; Wang and Nakakubo, 2020)

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาจะเห็นว่า การเปรียบเทียบเทคโนโลยีการจัดการขยะไปสู่พลังงานเป็นการเปรียบเทียบในเชิงคุณภาพ ซึ่งจำเป็นต้องได้ยากและไม่เป็นรูปธรรมที่ชัดเจน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้การคัดเลือกเทคโนโลยีการจัดการขยะตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process : AHP) ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์แบบลำดับชั้นได้เป็นระบบได้มากกว่า เนื่องจากแต่ละเทคโนโลยีจะมีประเภทที่แยกย่อยออกไปแต่ละลำดับชั้น นอกจากนี้ในลำดับการตัดสินใจขั้นสุดท้ายจะมีการให้คะแนนความเหมาะสมออกเป็น 4 ด้านตามสัดส่วนน้ำหนักเฉลี่ยจากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดการขยะและพลังงานหมุนเวียนจำนวน 10 คน ซึ่งจะสามารถคัดเลือกเทคโนโลยีที่เพิ่มประสิทธิภาพการจัดการปริมาณขยะในขนาดของศูนย์กำจัดขยะฯ ได้แม่นยำสูงกว่าการวิเคราะห์เชิงคุณภาพแต่เพียงอย่างเดียว และบทสรุปของงานวิจัยนี้จะเป็นการวิเคราะห์โครงการทางด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อประเมินความคุ้มค่าของโครงการ

2. วัสดุและวิธีการ

2.1 การวิเคราะห์เทคโนโลยีการจัดการขยะที่เหมาะสม

การวิเคราะห์เทคโนโลยีการจัดการขยะมูลฝอยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยรวมแบบครบวงจร จังหวัดระยอง จะใช้วิธีวิเคราะห์แบบคุณภาพเพื่อเลือกประเภทเทคโนโลยีกำจัดขยะโดยการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องใน Nithikul (2007) , Williams (2005) , Belgiorno et al, (2003) และ Wang (2020) โดยการวิเคราะห์จากล่างขึ้นบน หรือ Bottom up Approach คือ การวิเคราะห์ประเภทที่เหมาะสมกับศูนย์กำจัดขยะฯ ของแต่ละเทคโนโลยีการจัดการขยะมาก่อน ดังแสดงในรูปที่ 5 จากนั้นประเภทที่เหมาะสมของแต่ละเทคโนโลยีจะถูกเลือกมาเปรียบเทียบกันอีกครั้งหนึ่งในขั้นตอนที่ 2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดขยะที่ศูนย์กำจัดขยะฯ โดยการพิจารณาให้คะแนนถ่วงตาม

น้ำหนัก 4 หมวดตามแนวคิดของ AHP (Taherdoost,2017) ได้แก่ หมวดด้านเทคนิค หมวดด้านเศรษฐศาสตร์ หมวดด้านสิ่งแวดล้อม และหมวดด้านสังคม จากการสำรวจผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดการขยะและเทคโนโลยีจำนวน 10 คน เพื่อคัดเลือกเทคโนโลยีในการจัดการขยะที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพภายในศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยรวมแบบครบวงจร จังหวัดระยองมากที่สุด ดังนี้

1. หมวดด้านเทคนิค มีสัดส่วนน้ำหนักถ่วงร้อยละ 45 ประกอบด้วย

- | | |
|--|-----------|
| 1.1 ความเหมาะสมของเทคโนโลยีที่มีต่อลักษณะและปริมาณของขยะมูลฝอย | ร้อยละ 10 |
| 1.2 ความซับซ้อนในการควบคุมระบบ | ร้อยละ 10 |
| 1.3 การยอมรับของเทคโนโลยี | ร้อยละ 5 |
| 1.4 การเสริมประสิทธิภาพการกำจัดขยะ | ร้อยละ 10 |
| 1.5 ความต้องการใช้พื้นที่ในการติดตั้งระบบ | ร้อยละ 10 |

2. หมวดทางด้านเศรษฐศาสตร์ มีสัดส่วนน้ำหนักร้อยละ 30 ประกอบด้วย

- | | |
|-----------------------------|-----------|
| 2.1 ต้นทุนการติดตั้งระบบ | ร้อยละ 10 |
| 2.2 ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ | ร้อยละ 10 |
| 2.3 ผลกระทบที่ได้จากระบบ | ร้อยละ 10 |

3. หมวดด้านสิ่งแวดล้อม มีสัดส่วนน้ำหนักร้อยละ 20 ประกอบด้วย

- | | |
|-----------------------------|----------|
| 3.1 ผลกระทบต่อน้ำผิวดิน | ร้อยละ 5 |
| 3.2 ผลกระทบต่อน้ำใต้ดิน | ร้อยละ 5 |
| 3.3 มลพิษทางอากาศ | ร้อยละ 5 |
| 3.4 กลิ่น แหม่ง และเชื้อโรค | ร้อยละ 5 |

4. หมวดด้านสังคม มีสัดส่วนร้อยละ 5 ประกอบด้วย

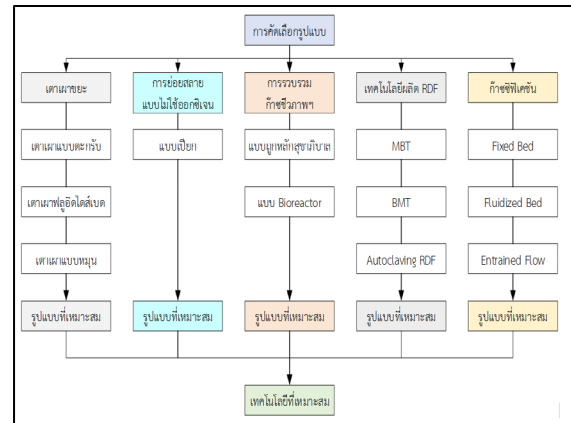
- | | |
|-------------------------------------|----------|
| 4.1 การสร้างการมีส่วนร่วมของประชาชน | ร้อยละ 3 |
| 4.2 การยอมรับของประชาชน | ร้อยละ 2 |

โดยทั้ง 4 หมวดมีระดับคะแนนของความเหมาะสมของเทคโนโลยีที่เลือกใช้ แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ประกอบด้วย

- ระดับ 3 คะแนน หมายถึง มีความเหมาะสมมาก
- ระดับ 2 คะแนน หมายถึง มีความเหมาะสมปานกลาง
- ระดับ 1 คะแนน หมายถึง มีความเหมาะสมน้อย หรือไม่เหมาะสม

2.2 การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

การศึกษาในหัวข้อย่อยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการมีส่วนร่วมของเอกชนในการลงทุนและบริหารจัดการเทคโนโลยีระบบกำจัดขยะมูลฝอยที่ถูก



รูปที่ 5 การคัดเลือกรูปแบบเทคโนโลยีการจัดการขยะ

คัดเลือกมาจากหัวข้อที่ 2.1 จึงให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์ทางการเงิน แต่เนื่องจากโครงการดังกล่าวสามารถลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและคุณภาพชีวิตแก่สังคมได้ด้วย ซึ่งจะเป็นผลประโยชน์ด้านเศรษฐกิจของ โครงการ (Economic Benefit) นอกเหนือจากผลประโยชน์ด้านการเงิน ดังนั้น การศึกษานี้จึงได้นำเสนอการวิเคราะห์โครงการทางด้านเศรษฐกิจควบคู่ทางด้านการเงินไปด้วยเพื่อประโยชน์ส่วนรวมทางด้านสังคมและประเทศชาติต่อไป

ผลการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ จะเป็นการนำเสนออัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (Economic Internal Rate of Return : EIRR) มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ (Net Present Value: NPV) และ อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit Cost Ratio : B/C Ratio)

2.2.1 ข้อมูลการลงทุนของโครงการ

งานศึกษานี้ได้ทำการประเมินผลค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการดำเนินงาน ซึ่งเป็นเงินลงทุนเบื้องต้น (Initial Cost) รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการบริหารจัดการ ค่าใช้จ่ายในงานบำรุงรักษา (Operation and Maintenance Cost) และการจัดทำแผนการลงทุน โดยคำนึงถึงต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของโครงการในการประมาณการต้นทุนและค่าใช้จ่ายของโครงการจะใช้ราคา ณ ปี พ.ศ. 2565 โดยการประเมินจะคำนวณเป็นมูลค่าทางการเงิน (Financial Prices) ก่อนแล้วนำมามูลค่าทางการเงินคูณด้วยตัวแปรราคาทาง เศรษฐ ศาสตร์ (Economic Conversion Factor) องค์ประกอบค่าใช้จ่าย

1) ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นการดำเนินงาน (Initial Cost) ของโครงการ

ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นการดำเนินงาน คือ ค่าใช้จ่ายด้านหมวดงานอาคาร ค่าใช้จ่ายด้านหมวดงานเฉพาะ ค่าใช้จ่าย

ด้านหมวดงานควบคุมก่อสร้างและค่ามาตรการด้านสิ่งแวดล้อม

2) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (Operating Cost) ของโครงการ

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของเป็นค่าใช้จ่ายรายปี ซึ่งถูกประเมินจากปี 2565 โดยค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานแบ่งออกเป็น

- (1) ค่าใช้จ่ายด้านเงินเดือนของเจ้าหน้าที่
- (2) ค่าใช้จ่ายคงที่สำหรับบุคลากรและการบริหารในปีแรกของการเดินระบบ
- (3) ค่าใช้จ่ายผันแปรในปีแรกที่เริ่มเดินระบบ
- (4) ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษาประจำปีในปีแรกที่เริ่มเดินระบบ
- (5) ค่าใช้จ่ายในการซ่อม

2.2.2 การประมาณการรายได้

1) ค่ากำจัดขยะมูลฝอย

รายได้ส่วนนี้เกิดจากการให้บริการกำจัดขยะมูลฝอย รายได้จะมาจากการประมาณการปริมาณขยะในอนาคตและสัดส่วนของปริมาณขยะแต่ละประเภทอยู่ภายใต้ข้อสมมติฐาน

2) รายได้จากการจำหน่ายไฟฟ้า

รายได้จากการจำหน่ายไฟฟ้า เมื่อนำมาคิดรายได้ในแต่ละปี โดยคิดอัตราค่าไฟฟ้า 5.08 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง (อ้างอิงจากมติคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กพข.) เห็นชอบกรอบอัตรา FIT โรงไฟฟ้าขยะชุมชนปี 2565 สำหรับ ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP)

อัตราค่าไฟฟ้าสูงสุดที่ 5.08 บาทต่อหน่วย 20 ปีแรก) โดยมีขนาดของโครงการโดยสมมติฐานมีขยะเข้าสู่เตาเผาสูงสุด 650 ตันต่อวัน หรือ 20.83 ตันต่อชั่วโมง ค่าความร้อนขยะ 7,536.24 Kj/kg หรือ 1,800 Kcal/kg ชั่วโมงในการเดินระบบในรอบปี 8,000 ชั่วโมง โดยคาดว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมดเท่ากับ 9.74 MW และประสิทธิภาพโรงเตาเผาเท่ากับร้อยละ 22.32 โดยในแต่ละปีจะมีขยะเข้าสู่เตาเผาขยะเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 5 ประมาณการรายได้จากการจำหน่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ โดยสรุปรายได้ทั้งหมดจากค่ากำจัดขยะมูลฝอยและรายได้จากการจำหน่ายไฟฟ้าเท่ากับ 6.25 พันล้านบาท ตลอด 20 ปีตั้งแต่ปี พ.ศ.2568 – 2587

2.2.3 การวิเคราะห์ผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์

ผลประโยชน์ทางด้านเศรษฐศาสตร์จะมีผลประโยชน์เพิ่มมาในส่วนที่ไม่ใช่ตัวเงินโดยตรง ได้แก่ผลประโยชน์ของสภาพแวดล้อมที่ดีขึ้น ผลประโยชน์ในส่วนนี้เกิดจากเมื่อมีโครงการ จะทำให้สภาพแวดล้อมดีขึ้น อันประกอบด้วย ชุมชนมีความสะอาดเป็นระเบียบ ไม่มีแหล่งเพาะเชื้อโรค มูลค่าที่ดินที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในที่สุดจะทำให้คุณภาพชีวิตดีขึ้น จึงนับว่าเป็นผลประโยชน์โดยตรงที่ประชาชนได้รับ การประเมินในส่วนนี้จะวัดจากความยินดีที่จะจ่ายเพื่อให้เกิดโครงการ ซึ่งจะคำนวณได้จากสมการ (1)

ผลประโยชน์จากสภาพแวดล้อมที่ดีขึ้น =

ปริมาณขยะมูลฝอย X ความยินดีที่จะจ่ายต่อครัวเรือน (1)

2.3 การวิเคราะห์ทางการเงิน

ข้อมูลต้นทุนของโครงการที่ได้จากการประมาณราคาและรายได้ทางการเงินมาทำการวิเคราะห์หาผลตอบแทน โดยต้นทุนเดียวกันแต่ต่างกันที่ผลประโยชน์ที่นำมาคำนวณวิเคราะห์ซึ่งจะไม่รวมผลประโยชน์จากสภาพแวดล้อมที่ดีขึ้น โดยดัชนีชี้วัดผลตอบแทนทางการเงิน ประกอบด้วย มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV) อัตราผลตอบแทนทางการเงิน (Financial Internal Rate of Return : FIRR) และอัตราส่วนรายได้ต่อต้นทุน (Revenue-Cost Ratio : R/C Ratio) และระยะเวลาคืนทุน(Payback Period)

3. ผลลัพธ์

3.1 ผลการคัดเลือกประเภทของเทคโนโลยี

3.1.1 เตาเผาขยะ

ระบบเตาเผาขยะทั้ง 3 ระบบ ได้แก่ เตาเผาแบบตะกรับ เตาเผาฟลูอิดไบล์เบดและเตาเผาแบบหมุนดังรายละเอียดใน TEI (2019) และ ERDI-CMU (2022) จากการวิเคราะห์ข้อได้เปรียบเรื่องปริมาณขยะที่สามารถรองรับได้ 1,200-1,500 ตันต่อวัน ดังนั้น เตาเผาแบบตะกรับ จึงถูกเลือกเหนือประเภทอื่นๆ

3.1.2 ระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

เทคโนโลยีนี้เป็นเทคโนโลยีที่มีการดำเนินการภายในศูนย์กำจัดขยะฯ อยู่แล้ว การคัดเลือกเทคโนโลยีในระบบนี้จึงเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพระบบที่มีอยู่เดิม ด้านการส่งเสริมการคัดแยกขยะให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นจากต้นทาง และการรับขยะสดจำพวกเศษผักและผลไม้จากตลาดสดโดยไม่คิดค่ากำจัดและในอนาคตควรส่งเสริมการทำ

สัญญาขายไฟฟ้าเชิงพาณิชย์กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยการรอประกาศอัตรการรับซื้อไฟฟ้าจากขยะชุมชนจาก คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) ซึ่งอาจจะสร้างผลประโยชน์เข้าสู่ศูนย์กำจัดขยะฯ ได้มากกว่าการผลิต กระแสไฟฟ้าใช้เอง ในกรณีที่อัตรการรับซื้อไฟสูงกว่า 5 บาทต่อหน่วย

3.1.3 เทคโนโลยีผลิตก๊าซชีวภาพจากหลุมฝังกลบขยะ (Landfill Gas to Energy)

เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพจากหลุมฝังกลบมี 2 ระบบ ได้แก่ แบบถูกหลักสุขาภิบาลและแบบ Bioreactor ซึ่งเป็นระบบที่สามารถช่วยย่นระยะเวลาของการย่อยสลาย สารอินทรีย์ในขยะมูลฝอยชุมชนให้มีสถานะเสถียรและคงที่ ภายใน 5-10 ปี เพื่อเพิ่มอัตรการผลิตก๊าซชีวภาพและเพิ่ม ประสิทธิภาพให้ สูงกว่าระบบถูกหลักสุขาภิบาล (Williams,2005)

เทคโนโลยีนี้สามารถทำประโยชน์ได้ 3 แนวทาง ได้แก่ การเผาทิ้ง (Flare) เพื่อลดการปล่อยก๊าซมีเทนขึ้นสู่ชั้น บรรยากาศโดยตรง การนำก๊าซเชื้อเพลิงไปใช้โดยตรง (Direct Use) ในพื้นที่ใกล้เคียง และการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้เครื่องยนต์ อย่างไรก็ตาม การใช้ประโยชน์ดังกล่าว จำเป็นต้องใช้ปริมาณขยะระดับ 1 ล้านตัน และเก็บสะสมไว้อย่างน้อย 2 ปี เพื่อให้เกิดปริมาณก๊าซมีเทนขึ้นสูงสุด (Bagchi,2004) จากนั้นจะมีอัตรการย่อยสลายและอัตร การเกิดก๊าซซัลเฟอร์ ซึ่งปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับสภาพการบดอัดของหลุมฝังกลบขยะด้วย การกลบทับชั้น ขยะมูลฝอยด้วยวัสดุกลบทับในกระบวนการฝังกลบจะทำให้ มีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นได้มากขึ้นในสถานะแวดล้อมแบบไร้ออกซิเจน ศูนย์กำจัดขยะฯ ประยุกต์ใช้วิธีการฝังกลบขยะ แบบสุขาภิบาลอยู่แล้ว ดังนั้นจะคงวิธีประเภทถูกหลัก สุขาภิบาลไว้ในเทคโนโลยีนี้

3.1.4 เทคโนโลยีผลิตเชื้อเพลิงขยะ RDF

การพิจารณาที่จะเพิ่มเทคโนโลยี RDF ภายในศูนย์กำจัด ขยะฯ ในอนาคตเพื่อรองรับปริมาณขยะที่จะเพิ่มมากขึ้นใน อนาคต การพิจารณาต้องครอบคลุมทั้ง 3 ระบบของ การผลิต RDF ได้แก่ MBT, BMT และ Autoclaving RDF

เมื่อพิจารณาด้านเงินลงทุนและค่าดำเนินการเทคโนโลยี แบบ Autoclaving RDF มีข้อจำกัดในด้านราคา เนื่องจา เป็นการใช้ไอน้ำอุณหภูมิและความดันสูงในการอบขยะมูล ฝอย ดังนั้นจึงมีราคาต้นทุนและค่าดำเนินการที่สูงกว่าระบบ

อื่นๆ ในการติดตั้งเครื่องผลิตไอน้ำและการใช้พลังงานในการ ผลิตไอน้ำ นอกจากนี้การใช้ไอน้ำอุณหภูมิและความดันสูงใน การอบขยะจำพวกพลาสติก อาจจะทำให้พลาสติกเกิดการ หลอมละลายเป็นของเหลวอยู่ภายในเตา และก่อให้เกิด อันตรายได้ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการคัดเลือกเทคโนโลยี คือ คุณสมบัติของขยะมูลฝอย เนื่องจากขยะมูลฝอยที่เก็บขน ได้ในจังหวัดระยอง ประกอบด้วยขยะพลาสติกและขยะ อินทรีย์เป็นหลักในสัดส่วนรวมกันมากกว่าร้อยละ 50 ซึ่งเป็น ขยะที่มีความชื้นสูง และมีถุงพลาสติกปะปนอยู่เป็นจำนวน มาก (ERDI-CMU, 2022)

ปัญหาอย่างหนึ่งคือการนำขยะทิ้งรวมเหล่านี้ไปป้อนเข้า สู่ระบบคัดแยกทางกล จะส่งผลให้เครื่องคัดแยกไม่สามารถ คัดแยกขยะมูลฝอยได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ เช่น มีเศษ ถุงพลาสติกไปติดอยู่บนสายพาน หรือเศษอาหารที่มี ความชื้นสูงจะทำให้สายพานเสียหาย จึงอาจกล่าวได้ว่า การนำขยะทิ้งรวมไปป้อนเข้าสู่ระบบคัดแยกทางกลโดยตรง หรือ การใช้เทคโนโลยีการผลิตขยะเชื้อเพลิงแบบ MBT จึงไม่เหมาะสมสำหรับขยะมูลฝอยทิ้งรวม

ในขณะที่ระบบแบบ BMT หากนำขยะทิ้งรวมไปฝังกลบ หรือ เพื่อให้เกิดกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของขยะ อินทรีย์ จะทำให้ขยะที่เหลือเป็นขยะแห้ง หากหรือทำการรื้อ บ่อฝังกลบ ร่อนเอาเศษดินที่ปะปนอยู่ออก แล้วนำขยะแห้ง เหล่านี้ไปเข้าระบบคัดแยกทางกล จะทำให้ระบบคัดแยก สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าขยะเชื้อเพลิง ที่ได้จะมีค่าความร้อนสูง อย่างไรก็ตามระบบแบบ BMT ข้อจำกัดด้านพื้นที่ในการฝังกลบขยะในปริมาณมากขนาด 1,000 ตันต่อวัน ซึ่งในปัจจุบัน ศูนย์ กำจัดขยะ มูลฝอยฯ กำลังประสบปัญหาหลุมฝังกลบขยะใกล้เต็ม นอกจากนี้ ต้องใช้เวลาในการหมักขยะในหลุมฝังกลบอีก 2-3 เดือนเพื่อร่อนขยะแห้งนำมาคัดแยกต่อ นอกจากนี้ ยังไม่มีข้อมูลสำคัญว่าระบบ BMT ดำเนินการได้อย่างประสบ ความสำเร็จ ดังนั้น ระบบ RDF แบบ MBT ยังคงมีความ เหมาะสมในกรณีที่มีการขยายระบบเพิ่มเพื่อทำโรงไฟฟ้า พลังงานขยะชุมชนระยะที่ 2 แต่จำเป็นต้องเพิ่มประสิทธิภาพ ของเชื้อเพลิงขยะ RDF

3.1.5 เทคโนโลยีก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification)

จากการเปรียบเทียบประเภทของก๊าซซิฟิเคชันทั้ง 3 ประเภทพบว่าก๊าซซิไฟเออร์แบบ Fixed Bed มีข้อได้เปรียบ เมื่อเทียบกับก๊าซซิไฟเออร์แบบอื่นๆ เนื่องจากสามารถใช้

ตารางที่ 1 ผลการให้คะแนนการคัดเลือกเทคโนโลยี

ด้าน	หัวข้อประเมิน	ร้อยละ	เทคโนโลยีการผลิตพลังงาน*				
			ก	ข	ค	ง	จ
เทคนิค	ความเหมาะสม	10	3	3	1	3	2
	ความซับซ้อน	10	2	1	2	3	2
	การยอมรับของเทคโนโลยี	5	3	3	3	3	3
	การเสริมประสิทธิภาพ	10	3	1	2	1	2
	ความต้องการใช้พื้นที่	10	3	3	3	3	3
เศรษฐศาสตร์	ต้นทุน	10	1	2	3	1	1
	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ	10	1	2	3	1	1
	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบ	10	3	3	3	3	3
สิ่งแวดล้อม	ผลกระทบต่อน้ำผิวดิน	5	3	3	1	3	3
	ผลกระทบต่อน้ำใต้ดิน	5	3	3	1	3	3
	มลพิษทางอากาศ	5	2	3	2	3	3
	กลิ่น แสง และเชื้อโรค	5	3	3	1	3	3
สังคม	การมีส่วนร่วมของประชาชน	3	3	3	3	3	3
	การยอมรับของประชาชน	2	2	2	2	2	2
100							

ตารางที่ 2 รายละเอียดค่าใช้จ่ายโครงการ

ประเภทค่าใช้จ่าย	โครงการเตาเผาขยะเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า	
	ราคาต้นทุนการเงิน	ราคาต้นทุนเศรษฐศาสตร์
ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นการดำเนินงาน (ล้านบาท) ช่วงปีที่ 1-2		
หมวดงานอาคาร	320.27	281.84
ค่าลงทุนเตาเผาขยะเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า	193.02	1,775.77
ค่าใช้จ่ายด้านหมวดงานควบคุมก่อสร้าง	48.25	44.39
ค่ามาตรการด้านสิ่งแวดล้อม	22.99	21.15
รวมค่าใช้จ่ายเริ่มต้นการดำเนินงาน (2 ปี)	2,321.69	2,123.15
ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นการดำเนินงาน (ล้านบาท) ช่วงปีที่ 3-22		
ค่าใช้จ่ายค่าน้ำเงินเดือนของเจ้าหน้าที่ (บาทต่อปี) (53 คน)	28.76	26.46
ค่าใช้จ่ายคงที่สำหรับบุคลากรและการบริหารในปีแรก 1%ของมูลค่าโครงการ	22.99	21.15
ค่าใช้จ่ายผันแปรในปีแรกที่เริ่มเดินระบบ เท่ากับ 1% ของมูลค่าโครงการ	22.99	21.15
ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษาประจำปีในปีแรกที่เริ่มเดินระบบ เท่ากับ 1.25% ของมูลค่าโครงการ	27.58	25.38
ค่าใช้จ่ายในการซ่อม เปลี่ยนชิ้นส่วนของเครื่องจักรทุก 4 ปี สำหรับปีที่ 5 เท่ากับ 56,250,000 บาท (รวม 5 ปี)	321.82	296.07
ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ปีละ 1,200,000 บาท (รวม 20 ปี)	24.00	22.08
รวมค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (20 ปี)	448.14	412.29
รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น	2,769.83	2,535.43

ขยะมูลฝอยที่มีขนาดใหญ่ได้ คือ ขนาดประมาณ 20-100 มิลลิเมตร ในขณะที่ก๊าซซิไฟเออร์แบบ Fluidized Bed และ Entrained Flow ต้องใช้ขยะมูลฝอยขนาดเล็ก ทำให้ต้องมีระบบเตรียมขยะมูลฝอยขั้นต้นเพิ่มเติม นอกจากนี้ ก๊าซซิไฟเออร์แบบ Fixed Bed ยังสามารถใช้อากาศเป็นสาร

ออกซิไดเซอร์ได้ ในขณะที่ก๊าซซิไฟเออร์แบบ Entrained Flow ต้องใช้ออกซิเจนเป็นสารออกซิไดเซอร์ ซึ่งทำให้ต้องมีระบบผลิตออกซิเจน จากเหตุผลดังกล่าว ทำให้ราคาลงทุนและค่าการดำเนินระบบของก๊าซซิไฟเออร์แบบ Fixed Bed มีราคาต่ำกว่าก๊าซซิไฟเออร์แบบอื่นๆ รวมทั้งสามารถควบคุม

ตารางที่ 3 รายได้จากค่ากำจัดขยะมูลฝอย

ปีที่	พ.ศ.	ปริมาณขยะมูลฝอยที่รวบรวมได้ทั้งหมด (ตัน/ปี)	ค่ากำจัดขยะมูลฝอย (บาทต่อตัน)	รายได้ (ล้านบาท/ปี)
1	2566			
2	2567			
3	2568	110.40	114	12,585.60
4	2569	113.88	114	12,981.75
5	2570	117.55	114	13,400.93
6	2571	121.45	114	13,844.84
7	2572	125.57	114	14,315.09
8	2573	129.94	114	14,813.62
9	2574	134.58	114	15,342.46
10	2575	139.51	114	15,904.03
11	2576	144.74	114	16,500.70
12	2577	150.31	114	17,135.11
13	2578	156.23	114	17,809.88
14	2579	162.53	114	18,528.19
15	2580	169.24	114	19,293.47
16	2581	176.40	114	20,108.92
17	2582	184.02	114	20,978.74
18	2583	192.17	114	21,906.81
19	2584	200.86	114	22,897.58
20	2585	208.05	114	23,717.70
21	2586	215.96	114	24,618.98
22	2587	223.90	114	25,524.83
รวม		3,177.28		362,209.24

ตารางที่ 4 การประมาณการรายได้จากการจำหน่ายไฟฟ้า

ปี พ.ศ.	ขยะที่จะส่งเข้าเตาเผา (ตันต่อวัน)	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมด (MWh)	พลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะจำหน่ายเข้าระบบ (MWh)	รายได้จากการจำหน่ายเข้าระบบ (ล้านบาท)
2568	302	47,136.13	40,264.13	204.54
2569	312	48,619.92	41,531.60	210.98
2570	322	50,189.93	42,872.71	217.79
2571	333	51,852.31	44,292.73	225.01
2572	344	53,613.73	45,797.36	232.65
2573	356	55,480.65	47,392.10	240.75
2574	369	57,461.55	49,084.19	249.35
2575	382	59,564.78	50,880.79	258.47
2576	397	61,799.38	52,789.61	268.17
2577	412	64,175.11	54,818.98	278.48
2578	428	66,702.50	56,977.91	289.45
2579	445	69,392.94	59,276.11	301.12
2580	464	72,258.73	61,724.09	313.56
2581	483	75,313.16	64,333.21	326.81
2582	504	78,570.59	67,115.74	340.95
2583	526	82,046.57	70,084.96	356.03
2584	550	85,757.89	73,255.20	372.14
2585	570	88,828.80	75,878.40	385.46
2586	592	92,204.29	78,761.78	400.11
2587	613	95,596.93	81,659.80	414.83
รายได้รวม				5,886.66

ที่มา : ดัดแปลงจาก Department of Alternative Energy Development and Efficiency (2015)

ตารางที่ 5 ผลประโยชน์จากสภาพแวดล้อมที่ดีขึ้น

ปี	พ.ศ.	ปริมาณขยะ (ตัน/ปี)	ความยินดีที่จะจ่าย (บาท/ตัน)	ผลประโยชน์จากสภาพแวดล้อมที่ดีขึ้น (ล้านบาท) (3)=(1)*(2)
		(1)	(2)	(3)
1	2566	-	-	-
2	2567	-	-	-
3	2568	110.40	2.79	307.54
4	2569	113.88	2.79	317.22
5	2570	117.56	2.79	327.46
6	2571	121.45	2.79	338.31
7	2572	125.57	2.79	349.80
8	2573	129.94	2.79	361.98
9	2574	134.58	2.79	374.90
10	2575	139.51	2.79	388.62
11	2576	144.74	2.79	403.20
12	2577	150.31	2.79	418.71
13	2578	156.23	2.79	435.19
14	2579	162.53	2.79	452.75
15	2580	169.24	2.79	471.45
16	2581	176.39	2.79	491.37
17	2582	184.02	2.79	512.63
18	2583	192.17	2.79	535.30
19	2584	200.86	2.79	559.51
20	2585	208.05	2.79	579.55
21	2586	215.96	2.79	601.58
22	2587	223.90	2.79	623.71
รวม		3,177.28		8,850.77

ตารางที่ 6 ผลตอบแทนด้านเศรษฐกิจของโครงการเตาเผาขยะเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า

ดัชนีชี้วัดทางการเงิน	ผลตอบแทนด้านการเงิน ณ อัตราคิดลด (Discount Rate) ร้อยละ 8
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) (บาท)	415,542,964.43
อัตราผลตอบแทนด้านการเงิน (FIRR) (%)	14.96%
อัตราส่วนรายได้ต่อต้นทุน (R/C Ratio) (เท่า)	1.22

ตารางที่ 7 ผลตอบแทนด้านการเงินของโครงการเตาเผาขยะเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า

ดัชนีชี้วัดทางการเงิน	ผลตอบแทนด้านการเงิน ณ อัตราคิดลด (Discount Rate) ร้อยละ 8
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) (บาท)	15,503,036.28
อัตราผลตอบแทนด้านการเงิน (FIRR) (%)	8.09%
อัตราส่วนรายได้ต่อต้นทุน (R/C Ratio) (เท่า)	1.01
ระยะเวลาคืนทุน (Pay Back Period) (ปี)	13

การทำงานของระบบได้ง่ายกว่าก๊าซซีไฟเออร์แบบอื่นๆ ดังนั้นเทคโนโลยีก๊าซซีไฟเออร์แบบ Fixed Bed คือ เทคโนโลยีที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้ภายในศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยรวมแบบครบวงจร จังหวัดระยอง

3.2 ผลการให้คะแนนเทคโนโลยีการจัดการขยะที่เหมาะสม

เมื่อได้ประเภทของเทคโนโลยีขยะที่เหมาะสมในแต่ละเทคโนโลยีแล้ว ต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์ผลการให้คะแนนของการคัดเลือกระบบเทคโนโลยีเพื่อเสริมประสิทธิภาพศูนย์

การจัดขยะมูลฝอยรวมแบบครบวงจรแสดงดังตารางที่ 1 การวิเคราะห์และคัดเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมในที่นี้จะตั้งอยู่บนพื้นฐานของปริมาณขยะในอีก 20 ปีข้างหน้า คือประมาณ 2,000 ตันต่อวัน

จากตารางที่ 1 เมื่อรวมคะแนนเต็ม 300 คะแนน และมีผลสรุปของการให้คะแนนเพื่อคัดเลือกรูปแบบเทคโนโลยีการจัดขยะและแปรรูปขยะให้เป็นพลังงานที่สามารถเสริมประสิทธิภาพของศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยรวมแบบครบวงจรจังหวัดระยองที่เหมาะสมที่สุดคือ เทคโนโลยีเตาเผาขยะที่ 243 คะแนน รองลงมาเป็นเทคโนโลยีหมักก๊าซชีวภาพ และเทคโนโลยีผลิต RDF มีคะแนนเท่ากับ 238 คะแนน ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบขยะของจังหวัดระยองที่ประกอบด้วยขยะพลาสติกและขยะอินทรีย์เป็นหลัก อันดับที่ 4 เป็นเทคโนโลยีผลิตก๊าซซิพีเคชั่น มีคะแนนเท่ากับ 228 คะแนน ซึ่งข้อจำกัดของเทคโนโลยีนี้ คือ ไม่ได้เป็นการกำจัดขยะโดยตรง และต้องคำนึงถึงขนาด ความชื้นและค่าความร้อนของขยะ โดยเหมาะสมสำหรับขยะ

*เทคโนโลยี ก = เตาเผาขยะแบบตะกรับ ; ข = ย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ; ค = ผลิตก๊าซชีวภาพจากหลุมฝังกลบ ; ง = RDF แบบ MBT ; จ = ก๊าซซิพีเคชั่น แบบ Fixed Bed

ที่มีความชื้นต่ำและค่าความร้อนสูงเท่านั้น จึงทำให้คะแนนน้อยกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ ที่กล่าวมา และลำดับสุดท้าย คือ เทคโนโลยีรวบรวมก๊าซชีวภาพจากหลุมฝังกลบ เนื่องจากปริมาณขยะที่หลุมฝังกลบมีไม่มากพอ และข้อจำกัดของขนาดพื้นที่หลุมฝังกลบ ทำให้เทคโนโลยีไม่เหมาะสมทั้งในปัจจุบันและในอนาคต การเลือกใช้เทคโนโลยีเตาเผาขยะสามารถกำจัดขยะส่วนที่จะเพิ่มมากขึ้นในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และผลิตภัณฑ์จากเทคโนโลยีดังกล่าวยังสามารถแปรรูปไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และแกลลวยที่ได้จากการเผาสามารถนำมาผลิตเป็นวัสดุทดแทนการผลิตซีเมนต์ได้ต่อไป ในหัวข้อถัดไปจะเป็นผลการวิเคราะห์โครงการเตาเผาขยะแบบตะกรับทางด้านเศรษฐศาสตร์และการเงิน

3.3 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายโครงการ

ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายโครงการสำหรับการลงทุนเทคโนโลยีเตาเผาขยะแบบตะกรับที่ 650 ตันต่อวันแสดงดังตารางที่ 2

3.4 ผลการวิเคราะห์การประมาณรายได้ของโครงการ

ผลการวิเคราะห์การประมาณรายได้ของโครงการทางด้านเศรษฐศาสตร์แสดงดังตารางที่ 3 4 และ 5 ในส่วน

ของการวิเคราะห์โครงการทางการเงินก็จะใช้ข้อมูลจากรายได้ในตารางที่ 3 และ 4 ยกเว้นตารางที่ 5

จากการศึกษาถึงค่าความเต็มใจที่จะจ่ายค่าจัดการขยะมูลฝอยโดยใช้แบบจำลองโลจิสติกส์ พบว่า ผู้ที่เต็มใจที่จะจ่ายมีค่าความเต็มใจที่จะจ่ายเฉลี่ยเท่ากับ 42.86 บาท/คน/ครัวเรือน ปรับเป็นมูลค่าปีศึกษาเท่ากับ 70.23 บาท/คน/ครัวเรือน คิดเป็น 2,785.65 บาท/ตัน ซึ่งจะใช้ตัวแทนในการประเมินผลประโยชน์ เมื่อนำไปประเมินผลประโยชน์ พบว่ามีผลประโยชน์ 307.54 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2568 และเพิ่มขึ้นเป็น 623.71 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2587 รวมตลอดอายุโครงการเท่ากับ 8,850.77 ล้านบาท ดังแสดงในตารางที่ 5 ผลประโยชน์จากสภาพแวดล้อมที่ดีขึ้น เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงการทางด้านเศรษฐศาสตร์

3.5 ผลการวิเคราะห์โครงการทางด้านเศรษฐศาสตร์และการเงิน

สรุปผลการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์และการเงิน ณ อัตราคิดลด (Discount Rate) เท่ากับ 8.00 % โครงการฯ ที่สามารถผ่านเกณฑ์ดัชนีชี้วัดทางการเงินดังแสดงในตารางที่ 6 และ 7

4. การอภิปราย

จากตารางที่ 1 รวมคะแนนเต็ม 300 คะแนน ผลสรุปของการให้คะแนนเพื่อคัดเลือกรูปแบบเทคโนโลยีการจัดขยะและแปรรูปขยะให้เป็นพลังงานที่สามารถเสริมประสิทธิภาพของศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยรวมแบบครบวงจรจังหวัดระยองที่เหมาะสมที่สุด ดังนี้

- อันดับที่ 1 ได้แก่ เทคโนโลยีเตาเผาขยะ มีคะแนนเท่ากับ 243 คะแนน โดยจะสามารถกำจัดขยะส่วนที่จะเพิ่มมากขึ้นในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และผลิตภัณฑ์จากเทคโนโลยีดังกล่าวยังสามารถแปรรูปไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และแกลลวยที่ได้จากการเผาสามารถนำมาผลิตเป็นวัสดุทดแทนการผลิตซีเมนต์ได้ต่อไป
- อันดับที่ 2 และ 3 ได้แก่ เทคโนโลยีหมักก๊าซชีวภาพ และ เทคโนโลยีผลิต RDF มีคะแนนเท่ากับ 238 คะแนน ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบขยะของจังหวัดระยองที่ประกอบด้วยขยะพลาสติกและขยะอินทรีย์เป็นหลัก

- อันดับที่ 4 ได้แก่ เทคโนโลยีผลิตก๊าซซิฟิเคชัน มีคะแนนเท่ากับ 228 คะแนน ซึ่งข้อจำกัดของเทคโนโลยีนี้ คือ ไม่ได้เป็นการกำจัดขยะโดยตรง และต้องคำนึงถึงขนาด ความชื้นและค่าความร้อนของขยะ โดยเหมาะสำหรับขยะที่มีความชื้นต่ำ และค่าความร้อนสูงเท่านั้น จึงทำให้คะแนนน้อยกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ ที่กล่าวมา
- อันดับที่ 5 ได้แก่ เทคโนโลยีรวบรวมก๊าซชีวภาพจากหลุมฝังกลบ มีคะแนนเท่ากับ 223 คะแนน เนื่องจากปริมาณขยะที่หลุมฝังกลบมีไม่มากพอ และข้อจำกัดของขนาดพื้นที่หลุมฝังกลบ ทำให้เทคโนโลยีไม่เหมาะสมทั้งในปัจจุบันและในอนาคต เมื่อได้ผลการคัดเลือกแล้วว่าเตาเผาขยะแบบตะกรับ คือ เทคโนโลยีที่ถูกคัดเลือกว่าเหมาะสมที่จะนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพที่ศูนย์กำจัดขยะฯ ก็จะมีการประเมินโครงการทางด้านเศรษฐศาสตร์และการเงินซึ่งขนาดของเตาเผาขยะแบบตะกรับที่ถูกประเมินมีความจุที่ 650 ตัน/วัน ซึ่งผลการวิเคราะห์โครงการทางด้านเศรษฐศาสตร์และการเงินพบว่าสามารถผ่านเกณฑ์ได้ทั้งคู่ ดังนั้น เทคโนโลยีดังกล่าวสามารถถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการขยะที่ศูนย์กำจัดขยะฯ จ.ระยอง

5. บทสรุป

งานศึกษานี้เป็นงานศึกษาการคัดเลือกเทคโนโลยีการกำจัดขยะและสามารถแปรรูปเป็นพลังงานที่เหมาะสมสำหรับศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยรวมแบบครบวงจร จังหวัดระยอง จากผลการศึกษาพบว่าเทคโนโลยีเตาเผาขยะแบบตะกรับเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่สุดที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดขยะของศูนย์กำจัดขยะฯ ที่จะรองรับปริมาณขยะมากถึง 2,000 ตัน/วัน ในอีก 20 ปีข้างหน้า และสามารถตอบโจทยกลยุทธ์การลดขยะมูลฝอยในหลุมฝังกลบภายในศูนย์กำจัดขยะฯ ในอนาคตข้างหน้าตามแนวทางของ zero waste เพื่อลดการส่งกลิ่นเหม็นแก่ชุมชนรอบข้างของศูนย์กำจัดขยะฯ ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าโครงการเตาเผาขยะเป็นโครงการที่คุ้มค่าการลงทุน

เมื่อมีการติดตั้งเตาเผาขยะภายในศูนย์กำจัดขยะฯ แล้ว การกำจัดขยะส่วนที่เหลือแบบขุดหลุมฝังกลบขยะก็จะลดน้อยลงส่งผลให้ลดการส่งกลิ่นเหม็นมากขึ้น กลยุทธ์การรื้อถอนขยะเก่าในหลุมฝังกลบขยะกลับมาใช้ประโยชน์โดยการ

เผาขยะเพื่อการทำจัด และผลิตกระแสไฟฟ้า โดยการเตรียมขุดลอกสระเก็บน้ำดิบไว้เตรียมรองรับโรงไฟฟ้าแห่งที่ 2 ตลอดจนการใช้ประโยชน์จากเถ้าลอยและเถ้าหนักซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าแห่งที่ 2 มาใช้ในการสร้างถนนจะสามารถช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพการลงทุนในเตาเผาขยะของศูนย์กำจัดขยะฯ ได้เต็มประสิทธิภาพมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งในโครงการ “การพัฒนาศูนย์กำจัดขยะมูลฝอยรวมแบบครบวงจร จังหวัดระยอง ต้นแบบพลังงานยั่งยืน” ซึ่งได้รับการสนับสนุนงบประมาณวิจัยจากองค์การบริหารส่วนจังหวัดระยอง

เอกสารอ้างอิง

- Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste management*, 32(4), 625-639. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025>
- Astrup, T., Møller, J., & Fruergaard, T. (2009). Incineration and co-combustion of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research*, 27(8), 789-799. <https://doi.org/10.1177/0734242X09348677>
- Bagchi, A. (2004). *Design of Landfills and Integrated Solid Waste Management*, 3th ed., John Wiley & Son, INC.
- Belgiorio, V., De Feo, G., Della Rocca, C., & Napoli, R. M. A. (2003). Energy from gasification of solid wastes. *Waste management*, 23(1), 1-15.
- Consonni, S., Giugliano, M., & Grosso, M. (2005). Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste: Part B: Emission and cost estimates. *Waste management*, 25(2), 137-148. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.12.006>
- Department of Alternative Energy Development and Efficiency (2015). Feasibility Study of Energy Production from Solid Waste by Incineration. Retrieved Nov 15, 2015, from <https://webkc.dede.go.th/testmax/node/2245>
- ERDI-CMU (2022). *Six Technologies : Waste to Energy*. Retrieved May 24, 2022 from <https://erdi.cmu.ac.th>
- Fodor, Z., & Klemeš, J. J. (2012). Waste as Secondary Raw Material and RDF as an Alternative Fuel in Cement Plants. *Applied Thermal Engineering*, 29(1), 298-303. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.03.021>
- Gallardo, A., Carlos, M., Bovea, M. D., Colomer, F. J., & Albarrán, F. (2014). Analysis of refuse-derived fuel from the municipal solid waste reject fraction and its compliance with quality standards. *Journal of cleaner production*, 83, 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.083>
- Kourkoupas, D.-S., Papadakis, V. G., Kyriakarakos, G., Kavadias, K., & Grigoriou, D. (2018). Refuse-Derived Fuel (RDF): Applications and Challenges in Waste-to-Energy Conversion Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1853-1868. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.278>

- Lombardi, L., Carnevale, E., & Corti, A. (2015). A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. *Waste management*, 37, 26-44. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.010>
- Nithikul, J. (2007). Potential of refuse derived fuel production from Bangkok municipal solid waste. *Thailand, Asian Institute of Technology School of Environment, Resources and Development*.
- Rayong Provincial Administrative Organization.(2022). Development of the Center of Integrated Solid Waste Management (CISWM), The Model of Sustainable Energy. Rayong Provincial Administrative Organization.
- Sumio,Y., Mazuto, S., Fumihiro,M. (2004). Thermo select Waste Gasification and Reforming Process, JFE Technical Report. Retrieved June 24, 2022 : <http://www.jfesteel.co.jp/en/research/report/003/pdf/003-05.pdf>
- Swithenbank, J., Nasserzadeh, V., & Goh, R. (2003). Refuse-Derived Fuel for Waste Management and Power Production. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 217(2), 115–124. <https://doi.org/10.1243/095440803322328931>
- Taherdoost,H (2017). Decision Making by Analytic Hierarchy Process (AHP), *International Journal of Economics and Management Systems* 2. Retrieved Jan 5, 2024, from <https://ssrn.com/abstract=3224206>
- TEI. (2019). *Development of the Cooperation in Waste to Energy Management TEI*.
- Velis, C. A., Longhurst, P. J., Drew, G. H., Smith, R., & Pollard, S. J. T. (2010). Production and Quality Assurance of Refuse-Derived Fuels (RDF). *Waste Management*, 30(4), 573–584. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.013>
- Wang, K., & Nakakubo, T. (2020). Comparative assessment of waste disposal systems and technologies with regard to greenhouse gas emissions: A case study of municipal solid waste treatment options in China. *Journal of cleaner production*, 260, 120827.
- Williams, P. T. (2005). *Waste Treatment and Disposal*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd.

การศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Monoraphidium* sp. เพื่อดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพผ่านระบบ Photo-Bioreactor

ปฐมพร พูลสวัสดิ์¹ วชิร กัลยาลัง¹ และ นันทนิตย์ โต๊ะปอง^{1*}

¹สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย 35 หมู่ 3 เทคโนโลยีธานี ตำบลคลองห้า อำเภอลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120 ประเทศไทย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล: patomporn@tistr.or.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.01.007

รับเมื่อ 5 กรกฎาคม 2567 แก้ไขเมื่อ 13 กุมภาพันธ์ 2568 ตอรับเมื่อ 4 เมษายน 2568

บทคัดย่อ

การนำศักยภาพของสาหร่ายมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพในการดักจับเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) (Carbon dioxide capture or Biological CO₂ mitigation) เป็นแนวทางการใช้ประโยชน์จากขบวนการทางชีวเคมีของสาหร่ายขนาดเล็ก เนื่องจากสาหร่ายขนาดเล็กเป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวที่มีวงจรชีวิตในการดูดกลืนพลังงานแสงแดดเพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสงและใช้ CO₂ เป็นแหล่งคาร์บอนในการสร้างเป็นชีวมวล (biomass) ของเซลล์ งานวิจัยนี้เป็นการนำหลักการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็กมาประยุกต์ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพด้วยการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพเป็นการเพิ่มสัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ (ไบโอมีเทน) แนวทางงานวิจัยนี้ทำการเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Monoraphidium* sp. ในสภาวะต่างๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโต การผลิตชีวมวล การผลิตตรงวัตถุ และประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ การศึกษาแบ่งการทดลองเป็น 3 ชุดการทดลอง ได้แก่ชุดควบคุม ชุดให้อากาศและชุดให้ก๊าซชีวภาพ เลี้ยงสาหร่ายในอาหารสูตร BG-11 พีเอช 7 ที่อุณหภูมิห้อง ความเข้มแสง 60 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ($\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ช่วงเวลาได้รับแสง:ไม่ได้รับแสง (สว่างสลับมืด) คือ 12:12 ชั่วโมง โดยการให้ก๊าซชีวภาพ (ชุดควบคุมและชุดให้ก๊าซชีวภาพ) ด้วยอัตรา 3 ml/min ในช่วง 12 ชั่วโมงพร้อมกับการให้แสง และให้อากาศทั่วไปด้วยเครื่องปั๊มอากาศ (air pump) ผลการทดลองพบว่า ชุดให้ก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงก๊าซชีวภาพได้สูงสุด การเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนสูงขึ้นถึง 96.41% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงถึง 96.78% ปริมาณน้ำหนักรวมแห้งสูงสุดเท่ากับ 1.42 g/l ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์เอบีและแคโรทีนอยด์สูงสุดเท่ากับ 15.85, 4.84, 21.22 และ 81.48 $\mu\text{g/ml}$ ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นสาเหตุหลักในการเกิดก๊าซเรือนกระจก นับเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญในระดับโลก ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นอีกหนึ่งแนวทางเลือกในการแก้ไขปัญหาและการลดปริมาณ CO₂ ที่ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: ก๊าซชีวภาพ, การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ, การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ไบโอมีเทน

The Study of Microalgae Growth *Monoraphidium* sp. Using Carbon Dioxide Absorption from Biogas via Photo-Bioreactor System

Patomporn Pulsawad¹, Watcharee Kunyalung¹, and Nantanit Tohpong^{1*}

¹Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR), 35 Mu 3 Technopolis, Tambon Khlong Ha, Amphoe Khlong Luang, Pathum Thani, 12120 Thailand

* Corresponding Author, E-mail: patomporn@tistr.or.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.01.007

Received 5 July 2024; Revised 13 February 2025; Accepted 4 April 2025

ABSTRACT

The potential of algal in order to capture and reduce the amount of carbon dioxide (CO₂) is referred to Carbon dioxide capture or Biological CO₂ mitigation. It is the alternative process to take advantage of biochemical reactions of microalgae called photosynthesis. Consequently, microalgae are the single cell that contains with photosynthetic pigment to absorb and utilize energy from sunlight. Particularly, using CO₂ is carbon source while photosynthesis to create biomass of cell. This research implements the theory of photosynthetic process to aim upgrading biogas via carbon dioxide absorption. The ability of CO₂ absorption impacts the ratio of methane in biogas to become biomethane. The main point of this research focuses on *Monoraphidium* sp. strain that is cultured in the various growth conditions to affect biomass production, increase of photosynthetic pigment and efficiency in biogas upgrading. The experimental design is divided into three sets of experiments including a control set, aeration and biogas set. Microalgae was cultured in media; BG-11, pH 7, at room temperature with a light intensity of 60 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ($\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). The light exposure is 12 hours and dark period 12 hours. Practically, the control and biogas feeding set was operated with a biogas flow rate at 3 ml/min during time 12 hours simultaneously light explosion and aeration. The experiment found that biogas feeding set showed the highest efficiency in the biogas upgrading. The increased biogas reached to 96.41% and the CO₂ reduced by 96.78%. In portion of biomass, the weight of dry cell was maximum at 1.42 g/l. In the same way, the amounts of photosynthetic pigment, chlorophyll A, chlorophyll B, chlorophyll AB and carotenoid were detected in the highest level at 15.85, 4.84, 21.22 and 81.48 $\mu\text{g/l}$, respectively. Presently, the continuous increase of CO₂ is the crucial cause of greenhouse gases that are inevitable to become the environmental problem of the global. Accordingly, this research is the alternative approach to solving and reducing the released CO₂ through environment.

KEYWORDS: Biogas, Biogas upgrading, Carbon dioxide absorption, Bio-methane

Please cite this article as: P. Pulsawad, W. Kunyalung and N. Tohpong*, "The Study of Microalgae Growth *Monoraphidium* sp. Using Carbon Dioxide Absorption from Biogas via Photo-Bioreactor System," *Journal of Applied Science and Emerging Technology*, vol 24, no 1, pp. 1-11, ID. 257430, April 2025 (in Thai).

1. บทนำ

สาหร่ายขนาดเล็กเป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวที่มีความสามารถในการสังเคราะห์แสง เนื่องจากมีคลอโรพิลล์เป็นรงควัตถุที่สำคัญในกระบวนการดูดซับพลังงานจากแสงแดดในช่วงความยาวคลื่นที่ 580- 730 nm และดูดซับปริมาณก๊าซ CO₂ พร้อมทั้งอาศัยปฏิกิริยาชีวเคมีภายในเซลล์เพื่อสร้างชีวมวล (biomass) ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นปฏิกิริยาการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) ที่เกิดขึ้นภายในสาหร่ายขนาดเล็ก มีสารตั้งต้นคือน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์สร้างผลิตภัณฑ์ได้แก่ ก๊าซออกซิเจนและน้ำตาลเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและมวลของสาหร่าย (biomass) ดังสมการการสังเคราะห์ด้วยแสง (1) (Vecchi, et al., 2020)

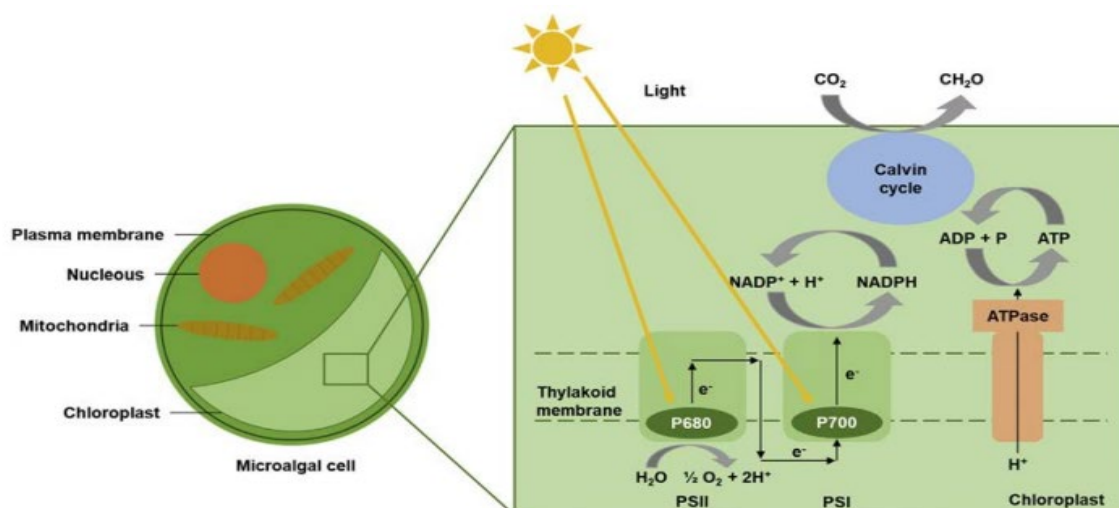
$6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$ สมการที่ 1

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสามารถเลี้ยงได้ทั้งระบบเปิด (Open system) และระบบปิด (Closed system) แต่เนื่องจากสาหร่ายขนาดเล็กหลายชนิดซึ่งมีความสามารถในการนำก๊าซ CO₂ ที่มีความเข้มข้นสูงมาใช้ในการเจริญเติบโตได้ (Salih, 2011) จึงเป็นประยุกต์ใช้เพื่อการปรับปรุงคุณภาพการก๊าซชีวภาพให้มีความบริสุทธิ์เพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย ด้วยการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำ (CO₂ capture) เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนให้กับเซลล์สาหร่ายขนาดเล็ก เป็นการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการเคมีร่วมกับกระบวนการทางชีวภาพ ในปัจจุบันถือเป็นแนวทางเลือกของการนำศักยภาพของสาหร่ายมาใช้ประโยชน์ในการลดปริมาณ CO₂ (Biological CO₂ mitigation) เพื่อเพิ่ม

ประสิทธิภาพของก๊าซชีวภาพให้มีคุณสมบัติของการเป็นก๊าซเชื้อเพลิงสูงขึ้น

ระบบจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป เช่น ระบบเปิดแบบบ่อร่องน้ำ (Raceway pond) เป็นระบบที่ใช้พลังงานต่ำ ทำความสะอาดและซ่อมบำรุงได้ง่าย แต่จะให้ผลผลิตที่ต่ำ ต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ และสามารถปนเปื้อนได้ง่าย ส่วนระบบปิดโฟโตไบโอรีแอคเตอร์ (Closed photobioreactor) จะเป็นระบบที่ให้ผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่สูง ไม่มีการปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อมให้แสงได้ทั่วถึง ซึ่งระบบโฟโตไบโอรีแอคเตอร์จะแบ่งได้หลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างและรูปทรงของระบบที่ทำขึ้น เช่น แบบแผ่นแบบทรงกระบอก และแบบท่อ เป็นต้น และระบบโฟโตไบโอรีแอคเตอร์เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ชิณพงศ์ ประทุม, 2558) รูปแบบของระบบโฟโตไบโอรีแอคเตอร์แบบท่อ (Tubular photobioreactor) ที่นำมาใช้ในการศึกษานี้เป็นระบบที่ความน่าสนใจในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย เนื่องจากเป็นระบบที่มีพื้นที่ยาว สามารถกระจายอากาศหรือคาร์บอนไดออกไซด์ให้กับสาหร่ายขนาดเล็กในระบบอย่างมีประสิทธิภาพ มีพื้นที่รับแสงมากให้ปริมาณชีวมวลที่สูง

สาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Monoraphidium* sp. ที่ทำการศึกษานี้เป็นสาหร่ายสีเขียว มีความสามารถในการตรึง CO₂ (CO₂ fixation) ผลิต Lipid เป็นสารตั้งต้นในการผลิตน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil production) และไบโอดีเซล (Biodiesel production)



รูปที่ 1 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสงที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของสาหร่ายขนาดเล็ก (Siddiki, et al., 2020)

(Namitha et al., 2021) ใช้เป็นอาหารในการเลี้ยงไรแดง สามารถทนต่อ COD ได้สูงถึง 2,000 mg/l (Boonma et al., 2015) มีการนำมาใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตนํ้ามัน และยังสามารถผลิตสารพฤกษเคมี (Phytochemicals) ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบเฉพาะในพืช ได้แก่ Chloroacetic acid และ 2, 4- di tert butylphenol มีฤทธิ์สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ก่อโรคในพืช (Phytopathogens) มีงานวิจัยการนำสารดังกล่าวไปผลิตสารกำจัดศัตรูพืชทางชีวภาพทดแทนสารกำจัดศัตรูพืชสังเคราะห์ ซึ่งสามารถยับยั้งเชื้อ *Xanthomonas oryzae* และ *Pantoea agglomerans* ที่ก่อโรคในข้าวได้ (Mohanty et al., 2023) นอกจากนี้มีรายงานว่าสาหร่ายสายพันธุ์ *Monoraphidium minutum* สามารถลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 90% (Brown, 1996) ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Monoraphidium* sp. ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการเลี้ยงสาหร่ายที่สภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโต การผลิตชีวมวล การผลิตกรดไขมัน และการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ

2. วัสดุและวิธีการ

2.1 ชนิดของสาหร่าย

สาหร่ายที่ใช้ในการศึกษาสายพันธุ์ *Monoraphidium* sp. ที่คัดแยกมาจากแหล่งธรรมชาติที่มีการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้รับการระบุว่าเป็นสายพันธุ์ดังกล่าวจากสถาบันวิจัยและเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) และเก็บรักษาสาหร่ายขนาดเล็กที่คัดแยกได้ไว้ที่ศูนย์ความเป็นเลิศด้านสาหร่ายของศูนย์ความหลากหลายทางชีวภาพของ วว.

2.2 การเตรียมหัวเชื้อสาหร่ายเริ่มต้น

การเพิ่มจำนวนเชื้อ (Accumulation) โดยนำหัวเชื้อสาหร่าย *Monoraphidium* sp. เพาะเลี้ยงในอาหารสูตร BG-11 ในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 ml เติมน้ำอาหารปริมาตร 100 ml นำไปวางบนเครื่องเขย่าความเร็ว 150 rpm โดยให้ความเข้มแสง $60 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ และช่วงเวลาได้รับแสง:ไม่ได้รับแสง (สว่างสลับมืด) คือ 12:12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 สัปดาห์ เมื่อได้ความหนาแน่นของเชื้อเพียงพอ ($\text{OD}_{660 \text{ nm}}$ 0.8-1.0) นำ

เชื้อไปเลี้ยงในชุด photo-bioreactor ขนาด 2.5 l ปริมาตรที่ใช้ทดลองมีปริมาตร 2 l เพื่อทำการทดลองเลี้ยงสาหร่ายโดยใช้แหล่งคาร์บอนจากก๊าซชีวภาพ

2.3 การเลี้ยงสาหร่าย

การเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Monoraphidium* sp. ที่สภาวะต่างๆ เพื่อศึกษาผลต่อการเจริญเติบโต การผลิตชีวมวล การผลิตสารสำคัญ และการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ โดยเลี้ยงในอาหารสูตร BG-11 พีเอช 7 ที่อุณหภูมิห้อง ความเข้มแสง $60 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ช่วงเวลาได้รับแสง:ไม่ได้รับแสง (สว่างสลับมืด) คือ 12:12 ชั่วโมง โดยการใช้ก๊าซชีวภาพอัตราส่วน มีเทนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไฮโดรเจนซัลไฟด์ ($\text{CH}_4:\text{CO}_2:\text{H}_2\text{S}$) 60-70%: 40-30%: 10-100 ppm ด้วยอัตราการอัดก๊าซชีวภาพเข้าระบบ 3 ml/min ในช่วง 12 ชั่วโมงพร้อมกับการให้แสงในทุกวัน และให้อากาศทั่วไปด้วยเครื่องปั๊มอากาศ (air pump)

2.4 รูปแบบชุด photo-bioreactor ที่ใช้ในการทดลอง

ชุดอุปกรณ์ photo-bioreactor ที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 2.5 l ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2

2.5 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการเลี้ยงสาหร่ายจากเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศ ยี่ห้อ COWTECH รุ่น CT100 ของ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) โดยก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์, ก๊าซออกซิเจนและอื่นๆ วัตถุประสงค์ประกอบของก๊าซชีวภาพโดยใช้เครื่องวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ (Geotech รุ่น BIOGAS 5000)

2.6 การศึกษาการเจริญเติบโต

การศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 660 nm ($\text{OD}_{660\text{nm}}$) หาปริมาณชีวมวลของสาหร่ายในรูปน้ำหนักแห้งโดยการวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) เพื่อนำมาหาอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย (ช่วง Log phase) แล้วนำไปคำนวณน้ำหนักเซลล์แห้งตามสมการที่ 2

คำนวณหาน้ำหนักเซลล์แห้งจากสูตร

$$\text{น้ำหนักเซลล์แห้ง (mg/l)} = \frac{(A - B) \times 10^6}{V} \quad \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ A คือน้ำหนักของกระดาศกรง+ตัวอย่าง (g)

B คือน้ำหนักกระดาศกรง (g)

V คือปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ (ml)

2.7 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

2.7.1 ค่าความเป็นกรดต่าง โดยใช้เครื่องวัดความเป็นกรด-ต่าง (EUTECH Instruments)

2.7.2 การวิเคราะห์เคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ของตัวอย่างสาหร่ายสายพันธุ์ *Monoraphidium* sp. ตามวิธีของ Sartory (1982)(Dere et al., 1998). โดยให้นำตัวอย่างสาหร่ายปริมาตร 10 ml หมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4,000 rpm เป็นเวลา 15 min เทส่วนใสที่นำตะกอนเซลล์สาหร่ายเติมตัวทำละลายอะซีโตน (Acetone) 90% ปริมาตร 10 ml บดตะกอนเซลล์ให้ละเอียดผสมให้เข้ากันแล้วนำไปทำให้เซลล์แตกด้วยเครื่องคลื่นเสียงความถี่สูงเป็น เวลา 30 min ที่อุณหภูมิ 40 °C จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,000 rpm เป็นเวลา 10 min แล้วแยกส่วนใสเก็บไว้ นำสารละลายใสวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 (E₆₆₄), 647 (E₆₄₇) nm สำหรับคลอโรฟิลล์และ 452 (E₄₅₂) นาโนเมตร สำหรับแคโรทีนอยด์และคำนวณตามสมการที่ 3, 4, 5 และ 6

คำนวณหาปริมาณคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์จากสูตร

$$\text{คลอโรฟิลล์ เอ (}\mu\text{g/ml)} = 11E_{664} - 1.93E_{647} \quad \text{สมการที่ 3}$$

$$\text{คลอโรฟิลล์ บี (}\mu\text{g/ml)} = 20.36E_{647} - 5.50E_{664} \quad \text{สมการที่ 4}$$

$$\text{คลอโรฟิลล์เอบี (}\mu\text{g/ml)} = \frac{C \times \text{ปริมาตรสารละลายที่สกัดได้ (ml)}}{\text{ปริมาตรของตัวอย่าง (ml)}}$$

เมื่อ C คือ คลอโรฟิลล์เอ + คลอโรฟิลล์บี

สมการที่ 5

$$\text{แคโรทีนอยด์ (}\mu\text{g/ml)} = \frac{E_{452} \times \text{ปริมาตรที่สกัดได้ (ml)} \times 10^4}{A^{1\%}_{1\text{cm}} \text{ ปริมาตรของตัวอย่าง (ml)}}$$

เมื่อ A^{1%}_{1cm} = 2592 (ประสิทธิภาพการดูดซับแคโรทีนอยด์)

สมการที่ 6

2.7.3 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทน ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของสาหร่าย *Monoraphidium* sp. โดยวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าถัง และหลังออกจากถังไปโอรีแอคเตอร์ โดยใช้เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซ (Geotech รุ่น BIOGAS 5000) แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของสาหร่าย *Monoraphidium* sp. คำนวณได้จากสมการที่ 7 และ 8 (สิริชัย คุณภาพดีเลิศ และคณะ, 2554)

$$\begin{aligned} \text{Efficiency of CO}_2 \text{ reduction (\%)} \\ = \frac{\text{Influent of CO}_2 - \text{Effluent of CO}_2}{\text{Influent of CO}_2} \times 100 \end{aligned}$$

สมการที่ 7

การคำนวณประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้นของ CH₄ (Efficiency of CH₄ enrichment)

$$\begin{aligned} \text{Efficiency of CH}_4 \text{ enrichment (\%)} \\ = \frac{\text{Effluent of CH}_4 - \text{Influent of CH}_4}{\text{Influent of CH}_4} \times 100 \end{aligned}$$

สมการที่ 8

3. ผลการศึกษา

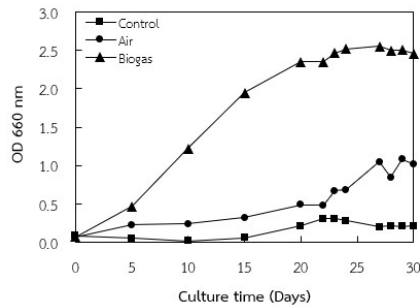
3.1 ผลการเจริญเติบโตของสาหร่าย

การเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Monoraphidium* sp. ในระบบปิดของ Photo-bioreactor เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการเจริญเติบโตระหว่างชุดควบคุม (Control), ชุดให้อากาศ (Air) และชุดอัดก๊าซชีวภาพ (Biogas) วัดอัตราการเจริญเติบโตด้วย Optical density 660 nm (OD 660) เป็นเวลา 30 วัน แสดงผลการเจริญเติบโตดังรูปที่ 3

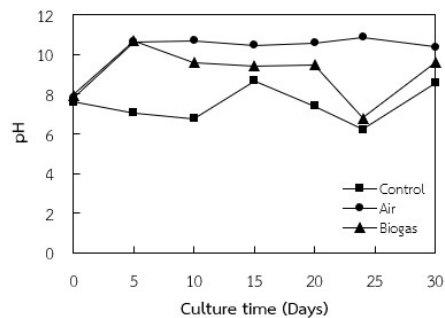
ผลการศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Monoraphidium* sp. ในชุดปฏิกรณ์ (photo-bioreactor) พบว่าสาหร่ายในชุดอัดก๊าซชีวภาพมีอัตราการเจริญเติบโตได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมและชุดให้อากาศโดยวัดปริมาณ OD 660 nm ได้สูงสุด 2.5

3.2 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) น้ำขณะสาหร่ายเจริญเติบโต

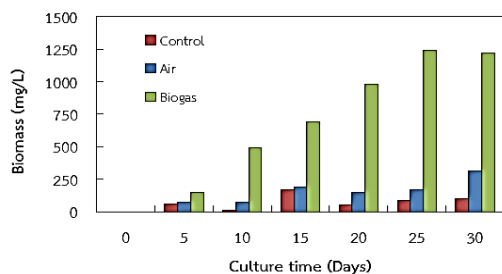
การศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำที่ในระบบ photo-bioreactor เปรียบเทียบระหว่าง 3 ชุดทดลอง



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงที่ 660 นาโนเมตร กับระยะเวลาในการเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์ *Monoraphidium sp.*



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับระยะเวลาในการเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์ *Monoraphidium sp.*



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพน้ำหนักรวมกับระยะเวลาในการเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์ *Monoraphidium sp.*

ได้แก่ ชุดควบคุม ชุดให้อากาศและชุดอัดก๊าซชีวภาพ ทำการวัดค่า pH ของน้ำทุกวัน ตลอดระยะเวลา 30 วันของการเจริญเติบโตของสาหร่าย แสดงดังกราฟในรูปที่ 4

ผลการติดตามการเปลี่ยนแปลงค่า pH ระหว่างการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Monoraphidium sp.* พบว่าค่า pH ในชุดให้อากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 8 ถึง 11 และมีค่าคงที่ ส่วนในชุดควบคุมและชุดอัดก๊าซชีวภาพค่า pH มีความผันผวน แต่โดยเฉลี่ยมีค่า pH อยู่ระหว่าง 6-10

3.3 ผลการหาปริมาณชีวมวลของสาหร่ายในรูปน้ำหนักรวม

การตรวจวัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Monoraphidium sp.* เพื่อศึกษาผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์ *Monoraphidium sp.* ทำการวัดมวลชีวภาพของสาหร่ายทุกวันตลอดระยะเวลาการเจริญเติบโต 30 วัน เปรียบเทียบกับชุดควบคุมและชุดให้อากาศ ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 5

ผลการวิเคราะห์การเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Monoraphidium sp.* พบว่าสาหร่ายที่เลี้ยงในชุดอัดก๊าซชีวภาพมีปริมาณมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องมีค่าชีวมวลสูงสุด 1250 mg/l และมีปริมาณสูงกว่าเมื่อเลี้ยงเปรียบเทียบกับชุดให้อากาศและชุดควบคุม

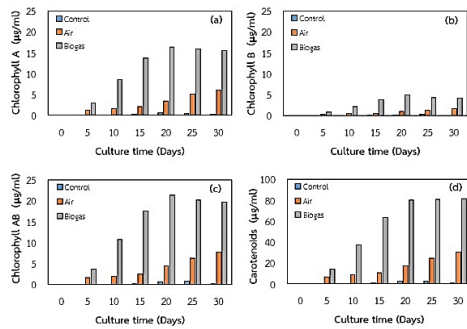
3.4 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณรงควัตถุ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุที่สำคัญได้แก่ ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ, บี, เอบี, และแคโรทีนอยด์ โดยศึกษาเปรียบเทียบทั้ง 3 ชุดปฏิกรณ์ พบว่าชุดอัดก๊าซชีวภาพตรวจวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุสำคัญในปริมาณที่สูงสุด มีค่าเท่ากับ 15.85, 4.84, 21.22 และ 81.48 $\mu\text{g/ml}$ ตามลำดับ

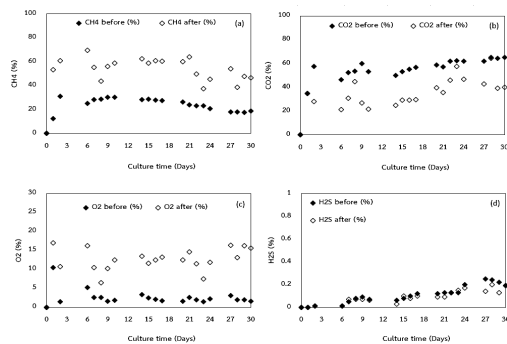
3.5 ผลการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ (โดยเปรียบเทียบชุดควบคุมกับชุดก๊าซชีวภาพ)

การวัดประสิทธิภาพการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยระบบ photo-bioreactor ทำการวัดเปรียบเทียบปริมาณสัดส่วนของก๊าซต่างๆในก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจนซิงไฟต์ ทั้งก่อนและหลังผ่านระบบ photo-bioreactor เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมและชุดอัดก๊าซชีวภาพแสดงผลดังรูปที่ 7 และ 8 รวมทั้งผลการคำนวณถึงประสิทธิภาพของระบบ photo-bioreactor ในการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพเพื่อเพิ่มศักยภาพก๊าซชีวภาพเป็นไบโอมิเทนดังแสดงผลตามกราฟในรูปที่ 9

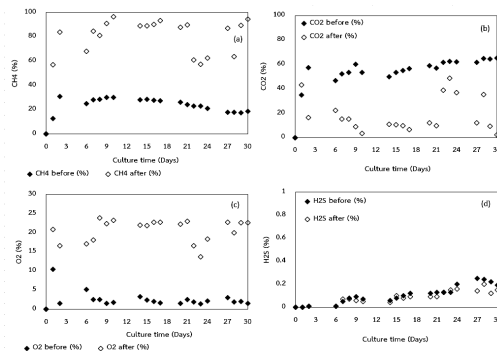
ผลการตรวจวัดสัดส่วนก๊าซต่าง ๆ ของก๊าซชีวภาพภายหลังการอัดก๊าซชีวภาพผ่านระบบ photo-bioreactor ในชุดควบคุม แสดงผลดังรูปที่ 7 พบว่าปริมาณก๊าซมีเทนมีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นภายหลังก๊าซชีวภาพผ่านระบบ photo-reactor เฉลี่ย 40% สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรงควัตถุกับระยะเวลาในการเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์ *Monoraphidium* sp. เมื่อ (a) คือปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (b) คือปริมาณคลอโรฟิลล์บี (c) คือปริมาณคลอโรฟิลล์เอบี และ (d) คือปริมาณแคโรทีนอยด์



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซชนิดต่างๆ ในก๊าซชีวภาพกับระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายของชุดควบคุมก่อนและหลังกระบวนการปรับปรุง



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซชนิดต่างๆ ในก๊าซชีวภาพกับระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายของชุดก๊าซชีวภาพก่อนและหลังกระบวนการ

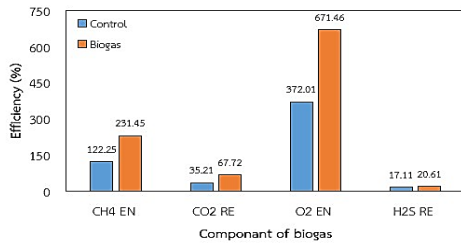
ลดลง 20% โดยเฉลี่ย และก๊าซของค์ประกอบอื่น ได้แก่ ก๊าซออกซิเจนซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 5-10% และสัดส่วนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีการเปลี่ยนแปลงลดลงน้อยกว่า 0.05% สำหรับการตรวจก๊าซของค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในชุดอัดก๊าซชีวภาพ แสดงผลดังรูปที่ 8 พบว่าปริมาณก๊าซมีเทนมีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นภายหลังก๊าซชีวภาพผ่านระบบ photo-reactor เฉลี่ย 60-70% ปริมาณสัดส่วนก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ลดลง 35-40% และสัดส่วนของก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีการเปลี่ยนแปลง 15-20% และน้อยกว่า 0.05% ตามลำดับ และเมื่อศึกษาเปรียบเทียบการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพระหว่างชุดควบคุมกับชุดอัดก๊าซชีวภาพ (ชุดอัดอากาศไม่ทำการอัดก๊าซชีวภาพ) แสดงผลดังรูปที่ 9 การทดสอบชี้แจงว่า ก๊าซชีวภาพเมื่อผ่านระบบ photo-bioreactor (ชุดอัดก๊าซชีวภาพ) แสดงประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้น/ลดลงของสัดส่วนของก๊าซต่างๆ ในก๊าซชีวภาพหลังกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ จากการทดลองพบว่าก๊าซมีเทน (CH_4) ของชุดควบคุมและชุดอัดก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยเป็น 122.25 (จาก 23.21 เป็น 51.59%) และ 231.45% (จาก 23.21 เป็น 76.94%) ตามลำดับ และพบว่ามีค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ย 89.33% เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงสุด 69.59% ในชุดควบคุมและ 96.41% ในชุดอัดก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงว่าประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยชุดอัดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น 92% ในส่วนของสัดส่วนก๊าซออกซิเจนพบว่า ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนเพิ่มขึ้นทั้ง 2 ชุดการทดลอง ในขณะที่สัดส่วนของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีปริมาณความเข้มข้นลดลงทั้งชุดควบคุมและชุดอัดก๊าซชีวภาพ

4. การอภิปรายผลการศึกษา

CO_2 เป็นแหล่งคาร์บอนที่จำเป็นในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง จึงส่งผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโต ปริมาณไขมันและองค์ประกอบของกรดไขมันของสาหร่ายประสิทธิภาพในการลดปริมาณ CO_2 และการสะสมปริมาณไขมันของสาหร่ายจะต้องอยู่ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ต้องมีองค์ประกอบต่างๆ กัน เช่น สายพันธุ์สาหร่าย ความเข้มข้นของ CO_2 ที่ใช้ อุณหภูมิ ความเข้มแสง รวมไปถึงองค์ประกอบของถังไบโอรีแอคเตอร์ (ผกาดี และคณะ, 2553)

ค่า pH เป็นตัวแปรสำหรับใช้ตรวจวัดสภาพแวดล้อมของสาหร่าย การให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แก่น้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนจะละลายเป็น HCO_3^- ซึ่ง



รูปที่ 9 แสดงประสิทธิภาพการลดลง/เพิ่มขึ้นขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพของชุดควบคุมและชุดก๊าซชีวภาพ หลังจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ (EN = ENRICHMENT และ RE = REDUCUTION)

สาหร่ายจะมีกลไกในการป้องกัน สภาวะเป็นกรดโดยการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสารประกอบอนินทรีย์ของคาร์บอน (Krebs and Roughton, 1948) ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชขณะเติบโต ดังแสดงตามรูปที่ 4 ค่าพีเอชเริ่มต้นของการทดลองมีค่า pH อยู่ที่ประมาณ 7 ค่าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงอยู่ในช่วง 6-10 (รูปที่ 4) เป็นผลมาจากการละลายของ CO₂ ความสามารถในการละลายของ CO₂ จะเพิ่มขึ้นที่ค่า pH เพิ่มขึ้น (7.9-9.4) (Bahr et al., 2014; Ruiz-Ruiz et al., 2020) และการดูดซึม CO₂ โดยค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาการให้แสงเนื่องจากมีการใช้คาร์บอนอนินทรีย์ (inorganic carbon) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Brindhadevi และคณะ (2021) ที่พบว่าค่า pH เริ่มเป็นด่าง (alkalinity) เมื่อผ่านไปประมาณ 8 วัน นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า ค่าพีเอชที่สูงเกินไปอาจไปขัดขวางการใช้ CO₂ ของสาหร่ายขนาดเล็กได้ รวมถึงส่งผลทำให้ $NH_4^+ - N$ ระเหยทำให้สาหร่ายเติบโตได้ช้า (Brindhadevi et al., 2021) แต่อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่าสาหร่ายสายพันธุ์ *Monoraphidium sp.* สามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงพีเอช 6-12 เนื่องจากสาหร่ายขนาดเล็กส่วนใหญ่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH อย่างมากในระหว่างการเลี้ยงเนื่องจากลักษณะทางพันธุกรรม (Zhang et al., 2020)

ผลของปริมาณน้ำหนักรูทเซลล์แห้ง (รูปที่ 5) พบว่าสาหร่ายในชุดก๊าซชีวภาพยังสามารถเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่อง ปริมาณน้ำหนักรูทเซลล์แห้งยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับผลการเจริญเติบโตของสาหร่าย (รูปที่ 3) ทั้งนี้เนื่องจากสาหร่ายยังมีแหล่งคาร์บอนที่สามารถใช้ในการเจริญเติบโตได้ จากการให้ได้รับ CO₂ จากก๊าซชีวภาพอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดให้อากาศมีการ

เจริญเติบโตที่ต่ำจึงทำให้ปริมาณน้ำหนักรูทเซลล์แห้งมีปริมาณที่ต่ำไปด้วย

สารสีจากสาหร่ายขนาดเล็กประกอบไปด้วย 3 กลุ่มหลักคือคลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ และไฟโคบิลิน คลอโรฟิลล์มีความสำคัญที่สุดในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเนื่องจากสามารถนำพลังงานแสงที่ได้รับไปใช้ได้โดยตรง แต่รงควัตถุอื่นๆ ไม่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรงต้องถ่ายทอดให้กับคลอโรฟิลล์เออีกทอดหนึ่งจึงสามารถนำไปใช้ได้ คลอโรฟิลล์เอไม่ใช่รงควัตถุชนิดเดียวที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง แต่คลอโรฟิลล์เอเท่านั้นที่เกี่ยวข้องโดยตรงในปฏิกิริยาสังเคราะห์แบบใช้แสง ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมีและมีการรงควัตถุชนิดอื่นๆ ที่สามารถดูดพลังงานแสงและส่งต่อให้คลอโรฟิลล์เอ ได้แก่ คลอโรฟิลล์บีและแคโรทีนอยด์ เป็นต้น ผลของปริมาณรงควัตถุที่วิเคราะห์ทั้ง 3 ชุดการทดลอง พบว่าในชุดอัดก๊าซชีวภาพมีการผลิตรงควัตถุที่สูงที่สุด รองลงมาคือชุดให้อากาศ และชุดควบคุมตามลำดับ โดยชุดควบคุมมีการผลิตคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์เออี และแคโรทีนอยด์ ในปริมาณที่สูงที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.51, 0.23, 0.70 และ 2.97 µg/ml ตามลำดับ ชุดให้อากาศมีการผลิตคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์เออี และแคโรทีนอยด์ ในปริมาณที่สูงที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.11, 1.52, 7.63 และ 30.67 µg/ml ตามลำดับ และในส่วนของการผลิตคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์เออี และแคโรทีนอยด์ ในปริมาณที่สูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 15.85, 4.84, 21.22 และ 81.48 µg/ml ตามลำดับ (รูปที่ 6) โดยการลดลงของคลอโรฟิลล์อาจเป็นไปได้ว่าสาหร่ายอาจเปลี่ยนไปสร้างสารสีในกลุ่มแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้น

ในส่วนของการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพผลการทดสอบพบว่าความเข้มข้นของ CH₄ หลังกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 69.59 (ชุดควบคุม) และ 96.41% (ชุดอัดก๊าซชีวภาพ) นอกจากนี้ยังพบว่า CH₄ สามารถสูญเสียในระหว่างกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพได้ประมาณ 1% ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจาก CH₄ มีความสามารถในการละลายน้ำได้ ซึ่งความสามารถในการละลายน้ำของ CH₄ เท่ากับ 3.3 ml/100ml ที่อุณหภูมิ 20°C (ICSI, 2000) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มีความเข้มข้น

ที่ลดลง ประสิทธิภาพการลดลงของ CO_2 หลังจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของชุดควบคุมและชุดอัดก๊าซชีวภาพลดลงเฉลี่ย 35.21 (จาก 53.88 เป็น 34.91%) และ 67.72% (จาก 53.88 เป็น 17.39%) ตามลำดับ ความเข้มข้นของ CO_2 หลังกระบวนการปรับปรุงคุณภาพลดลงสูงสุดถึง 59.49 (ชุดควบคุม) และ 96.78% (ชุดอัดก๊าซชีวภาพ) ซึ่งความเข้มข้นของ CO_2 ที่ลดลงนั้น เนื่องจาก 1) สาหร่ายขนาดเล็กมีความสามารถนำ CO_2 ที่มีความเข้มข้นสูงมาใช้ในการเจริญเติบโตได้ และ 2) CO_2 สามารถในการละลายน้ำ ซึ่งจะละลายน้ำกลายเป็นกรดคาร์บอนิกซึ่งจะเปลี่ยนรูปเป็นไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตในภายหลัง ในขณะที่ก๊าซออกซิเจน (O_2) มีความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นในทั้ง 2 ชุดการทดลองเช่นกัน ความเข้มข้นของ O_2 ของชุดควบคุมและชุดอัดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเฉลี่ยเป็น 372.01 (จาก 2.68 เป็น 12.65%) และ 671.46% (จาก 2.68 เป็น 20.68%) ตามลำดับ ความเข้มข้นของ O_2 หลังกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 12.65 (ชุดควบคุม) และ 20.68% (ชุดอัดก๊าซชีวภาพ) ทั้งนี้เนื่องจาก 1) ในกระบวนการใช้ CO_2 สาหร่ายจะมีการสังเคราะห์แสงและกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายทำให้ความเข้มข้นของ DO ในอาหารเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ O_2 เพิ่มขึ้นด้วย (Zhao et al., 2011) และ 2) จากการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (klaCO_2 และ klaO_2) ที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของการถ่ายโอนมวลของ CO_2/O_2 ทำให้การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 reduction) และความเข้มข้นของออกซิเจนในก๊าซชีวภาพหลังจากกระบวนการปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น (Serejo et al., 2015) ค่า kLaCO_2 สำหรับการขนส่งทางอากาศขนาดเล็ก (small airlift) เท่ากับ 0.0069 s^{-1} และสำหรับการขนส่งทางอากาศขนาดใหญ่ (small airlift) เท่ากับ 0.0049 s^{-1} (Ndiaye et al., 2018) นอกจากนี้การนำก๊าซชีวภาพมาเพาะเลี้ยงสาหร่ายนั้น ยังสามารถกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (H_2S) ได้อีกด้วย ทั้งนี้อาจเพราะในก๊าซชีวภาพมีองค์ประกอบของ H_2S ในปริมาณที่น้อย (น้อยกว่า 100 ppm) และ H_2S ยังมีความสามารถในการละลายน้ำได้ (H_2S มีความสามารถในการละลายน้ำ 3.980 g/L (ที่ 20°C)) จึงทำให้ปริมาณ H_2S หลังกระบวนการปรับปรุงคุณภาพมีปริมาณที่ลดลงนั่นเอง

ผลการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วย ระบบ photo-bioreactor ในชุดอัดก๊าซชีวภาพ พบว่า ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ย 89.33% เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงสุด 69.59% ในชุดควบคุมและ 96.41% ในชุดอัดก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงว่าประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยชุดอัดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น 92% ในส่วนของสัดส่วนก๊าซออกซิเจนพบว่า ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนเพิ่มขึ้นทั้ง 2 ชุดการทดลอง ในขณะที่สัดส่วนของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีปริมาณความเข้มข้นลดลงทั้งชุดควบคุมและชุดอัดก๊าซชีวภาพ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศด้วยระบบ photo-bioreactor ด้วยสาหร่ายขนาดเล็กหลายสายพันธุ์ร่วมกัน ได้แก่ *Chlorella sp.*, *Tetradismus obliquus*, *Lindavia sp.* และ *Synechococcus sp.* รายงานว่าสามารถเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซมีเทนได้ 85-87% และลดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 88-90% (Méndez et al., 2022).

5. บทสรุป

จากผลการวิจัยระบุได้ว่า สาหร่ายสายพันธุ์ *Monoraphidium sp.* ที่เลี้ยงในระบบ photo-bioreactor มี ประสิทธิภาพในการลด CO_2 ได้ถึง 35.21 (ชุดควบคุม) และ 67.72% (ชุดอัดก๊าซชีวภาพ) การเพิ่มขึ้นของ CH_4 สูงสุดถึง 69.59 (ชุดควบคุม) และ 96.41% (ชุดอัดก๊าซชีวภาพ) ซึ่งเป็นปริมาณน้ำหนักเซลล์แห้งสูงสุดเท่ากับ 1.42 (ชุดให้อากาศ) และ 3.10 (ชุดอัดก๊าซชีวภาพ) กรัมต่อลิตร ปริมาณรงควัตถุซึ่งได้แก่ คลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์เอซี และแคโรทีนอยด์สูงสุดในชุดอากาศ เท่ากับ 6.11, 1.52, 7.63, 30.67 $\mu\text{g/ml}$ ตามลำดับ และในชุดอัดก๊าซชีวภาพ เท่ากับ 15.85, 4.84, 21.22, 81.48 ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับ CO_2 ทำให้ก๊าซชีวภาพที่ออกจากระบบมีความเข้มข้นของ CH_4 ที่สูงขึ้นซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการดูดซับด้วยน้ำและส่งผลต่อให้สาหร่ายขนาดเล็กใช้

ประโยชน์ด้วยกระบวนการทางชีวภาพซึ่งจะการเปลี่ยนก๊าซชีวภาพเป็นไบโอมีเทน

นอกจากนี้การนำสาหร่ายขนาดเล็กมาศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นการเลี้ยงแบบขั้นตอนเดียว (ขั้นตอนการเลี้ยง+การดูดซับ) เป็นแนวทางที่สามารถนำไปใช้เป็นประโยชน์ในการดักจับ CO₂ เพื่อแก้ปัญหาปริมาณ CO₂ ที่ถูกปลดปล่อยจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เป็นสาเหตุหลักในการเกิดก๊าซเรือนกระจก นับเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญในระดับโลกต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่ช่วยเหลือและสนับสนุนโครงการวิจัย ขอขอบคุณฟาร์มสุกรคุณบรรพต อเนกสุวรรณกุล และองค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี ที่อนุเคราะห์ให้เข้าพื้นที่และเก็บตัวอย่างมาทำการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Bahr, M., Diaz, I., Dominguez, A., Gonzalez Sanchez, A., & Muñoz, R. (2014). Microalgal-biotechnology as a platform for an integral biogas upgrading and nutrient removal from anaerobic effluents. *Environmental science & technology*, 48(1), 573-581.
- Boonma, S., Chaiklangmuang, S., Chaiwongsar, S., Pekkoh, J., Pumas, C., Ungsethaphand, T., & Peerapornpisal, Y. (2015). Enhanced carbon dioxide fixation and bio-oil production of a microalgal consortium. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 43(5), 761-766.
- Brindhadevi, K., Mathimani, T., Rene, E. R., Shanmugam, S., Chi, N. T. L., & Pugazhendhi, A. (2021). Impact of cultivation conditions on the biomass and lipid in microalgae with an emphasis on biodiesel. *Fuel*, 284, 119058.
- Brown, L. M. (1996). Uptake of carbon dioxide from flue gas by microalgae. *Energy Conversion and Management*, 37(6-8), 1363 - 1367.
- Dere, Ş., GÜNEŞ, T., & Sivaci, R. (1998). Spectrophotometric determination of chlorophyll-a, B and totalcarotenoid contents of some algae species using different solvents. *Turkish journal of Botany*, 22(1), 13-18.
- International Chemical Safety Cards: ICSCs, ICSC: 0291, EC Number: 200-812-7. (n.d.). Retrieved June 3, 2024, from https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=th&p_card_id=0291&pversion=2
- Kaewkannetra, P., Thanonkeo, P. & Yuwaamonpitak, T. (2010). Research report on the cultivation of microalgae in closed/open systems as an alternative raw material for sustainable biodiesel production. Faculty of Technology, Khon Kaen University. (in Thai)
- Koonaphapdeelert, S., Pholchan, P., Kantha, U., & Rerkkriangkrai, P. (2011). Biogas Upgrading Using Pressurized Water Scrubbing. *Journal of Engineering and Innovation*, 4(1), 42-49. (in Thai)
- Krebs, H. A., & Roughton, F. J. W. (1948). Carbonic anhydrase as a tool in studying the mechanism of reactions involving H₂CO₃, CO₂ or HCO₃⁻. *Biochemical Journal*, 43(4), 550.
- Mohanty, S. S., & Mohanty, K. (2023). Production of a wide spectrum biopesticide from *Monoraphidium* sp. KMC4 grown in simulated dairy wastewater. *Bioresource Technology*, 374, 128815.
- Méndez, L., Garcia, D., Perez, E., Blanco, S., & Muñoz, R. (2022). Photosynthetic upgrading of biogas from anaerobic digestion of mixed sludge in an outdoors algal-bacterial photobioreactor at pilot scale. *Journal of Water Process Engineering*, 48, 102891.
- Namitha, B., Sathish, A., Kumar, P. S., Nithya, K., & Sundar, S. (2021). Micro algal biodiesel synthesized from *Monoraphidium* sp., and *Chlorella sorokiniana*: Feasibility and emission parameter studies. *Fuel*, 301, 121063.
- Ndiaye, M., Gadoin, E., & Gentric, C. (2018). CO₂ gas-liquid mass transfer and kLa estimation: Numerical investigation in the context of airlift photobioreactor scale-up. *Chemical Engineering research and design*, 133, 90-102.
- Pratum, C. (2011). The possibility of reducing carbon dioxide emissions with biological wastewater treatment systems from industrial plants. *Journal of Environmental Management*, 11(2), 108-133. (in Thai)
- Ruiz-Ruiz, P., Estrada, A., & Morales, M. (2020). Carbon dioxide capture and utilization using microalgae. In *Handbook of microalgae-based processes and products*. pp. 185-206. Academic Press.
- Salih, F. M. 2011. Microalgae tolerance to high concentrations of carbon dioxide: a review. *Journal of Environmental Protection*, 2(05), 648.
- Sartory, D. P. (1982). Spectrophotometric analysis of chlorophyll a in freshwater phytoplankton. *Technical Report TR 115 January 1982*. 163 p, 14 fig, 26 tab, 100 ref.
- Serejo, M. L., Posadas, E., Boncz, M. A., Blanco, S., García-Encina, P., & Muñoz, R. (2015). Influence of biogas flow rate on biomass composition during the optimization of biogas upgrading in microalgal-bacterial processes. *Environmental science & technology*, 49(5), 3228-3236.
- Siddiki, S. Y. A., Mofijur, M., Kumar, P. S., Ahmed, S. F., Inayat, A., Kusumo, F., & Mahlia, T. M. I. (2022). Microalgae biomass as a sustainable source for biofuel, biochemical and biobased value-added products: An integrated biorefinery concept. *Fuel*, 307, 121782.
- Vecchi, V., Barera, S., Bassi, R., & Dall'Osto, L. 2020. Potential and challenges of improving photosynthesis in algae. *Plants*, 9(1), 67.
- Zhang, W., Zhao, C., Cao, W., Sun, S., Hu, C., Liu, J., & Zhao, Y. (2020). Removal of pollutants from biogas slurry and CO₂ capture in biogas by microalgae-based technology: a systematic

review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 28749-28767.

Zhao, B., Zhang, Y., Xiong, K., Zhang, Z., Hao, X., & Liu, T. (2011). Effect of cultivation mode on microalgal growth and CO₂ fixation. *Chemical engineering research and design*, 89(9), 1758-1762.

ตัวแบบพยากรณ์ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุไทย พ.ศ. 2564

เขมิกา อูระวงศ์^{1*} วริศรา เหมอารัญ¹ วาสนี เขาสมบุรณ์¹ และ วิลาวัลย์ จันทร์ดั่ง¹

¹สาขาวิทยาศาสตร์การคำนวณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90110 ประเทศไทย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล: jantra.s@psu.ac.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.01.008

รับเมื่อ 1 ธันวาคม 2567 แก้ไขเมื่อ 17 มกราคม 2568 ตอรับเมื่อ 18 มกราคม 2568

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อค้นหาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับความต้องการทำงานของผู้สูงอายุและสร้างตัวแบบพยากรณ์ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ ข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ ข้อมูลผู้สูงอายุไทยที่มีอายุตั้งแต่ 55 ปีขึ้นไป รวม 11,988 คน ครอบคลุม 5 ภูมิภาค (1. กรุงเทพมหานคร 2. ภาคกลาง - ตะวันออก - ตะวันตก 3. ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 4. ภาคเหนือ 5.ภาคใต้) จากโครงการสำรวจประชากรผู้สูงอายุในประเทศไทย พ.ศ. 2564 โดยสำนักงานสถิติแห่งชาติ สถิติวิเคราะห์ได้แก่ การทดสอบไคกำลังสอง (Chi-squared test) การวิเคราะห์การถดถอยลอจิสติก (Logistic regression analysis) ผลการวิจัยพบว่า ผู้สูงอายุมีความต้องการทำงาน 5,232 คน (ร้อยละ 43.6) โดยผู้สูงอายุวัยก่อนเกษียณอายุมีความต้องการทำงาน (ร้อยละ 73.5) มากกว่าผู้สูงอายุวัยหลังเกษียณอายุ (ร้อยละ 32.7) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ ได้แก่ ภูมิภาค จังหวัด เขตที่อยู่อาศัย จำนวนสมาชิกในครัวเรือน สถานภาพการอยู่อาศัยในครัวเรือน เพศ อายุ สถานภาพสมรส จำนวนบุตร บุคคลที่เป็นเจ้าของที่อยู่อาศัย ชั้นปีการศึกษาสูงสุดที่จบ การอ่านออกและเขียนได้ อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา แหล่งรายได้ที่สำคัญที่สุดในการดำรงชีวิต รายได้จากทุกแหล่งเฉลี่ยต่อปี ความเพียงพอของรายได้ การออม ภาวะหนี้สิน สุขภาพร่างกายในระหว่าง 7 วันที่ผ่านมา ความหลากหลายทางเศรษฐกิจ ตัวแบบพยากรณ์ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ ซึ่งสามารถทำนายได้ถูกต้องร้อยละ 92.3 คือ

$$P(\text{ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ}) = \frac{1}{1+e^{-z}} \text{ เมื่อ } z = -4.808 + 6.587 (\text{อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา})$$

คำสำคัญ: ผู้สูงอายุ, ความต้องการทำงาน, การวิเคราะห์การถดถอยลอจิสติก

A Predictive Model for the Work Needs of the Elderly in Thailand in 2021

Khemika Urawong^{1*}, Warisara Hem-aran¹, Wasinee Khaosomboon¹, and Wilawan Janduang¹

¹Division of Computational Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkhla,
90110 Thailand

* Corresponding Author, E-mail: jantra.s@psu.ac.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.01.008

Received 1 December 2024; Revised 17 January 2025; Accepted 18 January 2025

ABSTRACT

The purpose of this research is to identify the factors associated with the work needs of the elderly and to develop a predictive model for the work needs of the elderly. The sample data included in the study is data on Thai elderly aged 55 years and older, totaling 11,988 people, covering five regions (1. Bangkok, 2. Central-East-West Region, 3. Northeastern Region, 4. Northern Region, 5. Southern Region) from the 2021 according to the National Statistical Office's 2021 Elderly Population Survey Project in Thailand. Statistical analyses used include the Chi-squared test and logistic regression analysis. The research findings indicate that 5,232 elderly people (43.6%) expressed a desire for employment. Pre-retirement elderly individuals have a significantly higher desire for employment (73.5%) compared to post-retirement elderly individuals (32.7%). Factors significantly associated with the work needs of the elderly include region, province, residential area, household size, household living status, gender, age, marital status, number of children, homeownership, highest level of education completed, literacy, occupation during the past 12 months, main source of income, average annual income from all sources, income adequacy, savings, debt status, physical health over the past 7 days, and economic diversity. The predictive model for the work needs of the elderly, with an accuracy of 92.3%, is as follows:

$$P(\text{Work needs of the elderly}) = \frac{1}{1+e^{-z}} \text{ When } z = -4.808 + 6.587(\text{occupation during the last 12 months}).$$

KEYWORDS: Elderly, Work needs, Logistic regression analysis

Please cite this article as: K. Urawong, W. Hem-aran, W. Khaosomboon and W. Janduang, "A Predictive Model for the Work Needs of the Elderly in Thailand in 2021," *Journal of Applied Science and Emerging Technology*, vol 24, no 1, pp. 1-15, ID. 259928, April 2025 (in Thai).

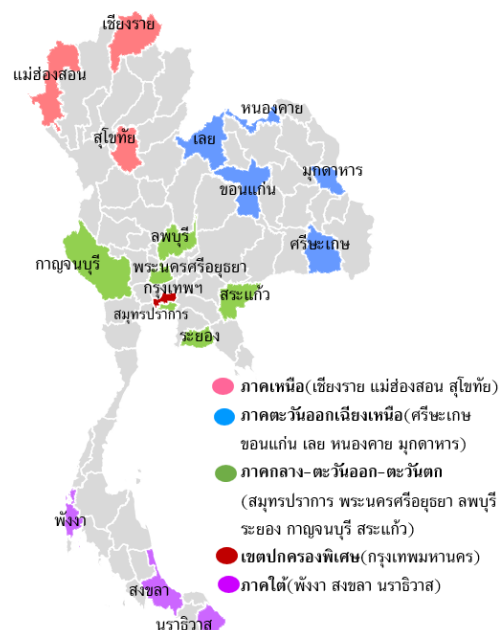
1. บทนำ

โครงสร้างของประชากรไทย มีการเปลี่ยนแปลงเคลื่อนเข้าสู่ “สังคมสูงวัย อย่างสมบูรณ์ (Completely Aged Society)” มีประชากรที่มีอายุเกิน 60 ปีคิดเป็นประมาณร้อยละ 20 และในอีก 10 ปีคือ ปี พ.ศ.2574 คาดการณ์ว่า จะเป็น “สังคมสูงวัยระดับสุดยอด (Super Aged Society)” คือ มีประชากรอายุ 60 ปีขึ้นไป มากกว่าร้อยละ 28 (National Statistical Office, 2021)

การเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุไทย นำไปสู่ปัญหาทั้งตัวผู้สูงอายุเอง และด้านเศรษฐกิจและสังคมในประเทศ ผู้สูงอายุไทยหลังเกษียณมีรายได้ลดลง โดยประมาณ 1 ใน 3 ของผู้สูงอายุมีรายได้น้อยกว่าเส้นความยากจน 3,043 บาท/คน/เดือน (หรือน้อยกว่า 102 บาท/วัน) (National Statistical Office, 2024) ผู้สูงอายุบางส่วนยังคงต้องการทำงานหลังเกษียณอายุเพื่อมีรายได้เพียงพอต่อการเลี้ยงดูตนเอง ดูแลครอบครัว และบางส่วนมีปัญหาภาระหนี้สิน ผู้สูงอายุที่ยังคงทำงานอยู่มีเหตุผล เนื่องจากสุขภาพแข็งแรง/ยังมีแรงทำงาน (ร้อยละ 47.3) และต้องการรายได้เลี้ยงครอบครัว/ตนเอง (ร้อยละ 44.6) (National Statistical Office, 2022) ในช่วงปี 2547 - 2562 อัตรากำลังแรงงานมีแนวโน้มลดลงในทุกช่วงอายุ การทำงานในภาคเกษตรลดลง ขณะที่การทำงานภาคบริการและการค้าเพิ่มสูงขึ้น (Chaemchan & Charasit, 2020) การเตรียมพร้อมเข้าสู่สังคมสูงวัยไทยตามแผนผู้สูงอายุแห่งชาติ ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2545-2564) (Ministry of Social Development and Human Security, 2009) เพื่อรองรับสัดส่วนคนทำงานลดลงซึ่งส่งผลต่อผลผลิตโดยรวมและรายได้ของประเทศลดลง จึงเป็นภารกิจของสังคมที่ต้องจัดสวัสดิการให้เหมาะสมและเพียงพอต่อสภาพร่างกาย จิตใจ และเศรษฐกิจของผู้สูงอายุ การได้รับการถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ การส่งเสริมให้มีโอกาสได้ทำงานที่เหมาะสมกับวัยตามความสมัครใจ เป็นที่ยอมรับ โดยได้รับค่าตอบแทนที่เป็นธรรมและการสนับสนุนด้านการออม เป็นทรัพยากรบุคคลที่มีความสำคัญในโลกของการทำงาน (Phromphak, 2013) สอดคล้องกับพระราชบัญญัติผู้สูงอายุ พ.ศ. 2546 มาตรา 11 ที่ว่าด้วยเรื่องสิทธิที่ผู้สูงอายุพึงได้รับ และปัญญาผู้สูงอายุไทยข้อ 4 (Chuanthom et al., 2018) (Ministry of Social Development and Human Security, 2010)

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจทำงานความสามารถในการทำงาน และการปรับตัวหลังเกษียณของผู้สูงอายุ มีผู้ทำการศึกษาไว้ อาทิ (Urawong et al., 2024) (Phenphong, 2019) (Phokapunt et al., 2018) (Poungchieng, 2012) พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลและใช้ในการพยากรณ์ความตั้งใจทำงานภายหลังเกษียณอายุ ได้แก่ สถานภาพการมีงานทำใน 12 เดือนที่ผ่านมา อายุ ความพึงพอใจในบทบาทปัจจุบัน การเป็นสมาชิกชมรม/องค์กร/ชุมชน ภาระของครอบครัว สุขภาพจิต (Yingrattanasuk et al., 2015) พบว่าปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการทำงาน ได้แก่ อายุ จำนวนโรคที่เป็น ชั่วโมงการทำงาน รายได้ (Tunlayanisaka, 2009) พบว่าปัจจัยสำคัญที่สัมพันธ์กับการปรับตัวหลังเกษียณอายุ ได้แก่ ทักษะต่อการเกษียณอายุ สุขภาพ การเข้าร่วมกิจกรรมทางสังคม

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วยปัจจัย 4 ด้าน ได้แก่ ปัจจัยด้านประชากรและสังคม ปัจจัยด้านการศึกษา ปัจจัยด้านเศรษฐกิจและการทำงาน และปัจจัยด้านสุขภาพ โดยการศึกษาความต้องการทำงานของผู้สูงอายุไทยที่มีอายุตั้งแต่ 55 ปีขึ้นไป ในช่วงอายุที่ต่างกันระหว่างวัยก่อนเกษียณอายุ (อายุ 55-59 ปี) และวัยหลังเกษียณอายุ (อายุตั้งแต่ 60 ปีขึ้นไป) มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษา (1) ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ (2) ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ และ (3) เพื่อสร้างตัวแบบการพยากรณ์ความต้องการทำงานของ



รูปที่ 1 ตัวอย่างผู้สูงอายุ 18 จังหวัด การกระจาย ครอบคลุม 5 ภูมิภาค

ตารางที่ 1 จำนวนและร้อยละ ของประชากรไทย ผู้สูงอายุ และตัวอย่างผู้สูงอายุ จำแนกตามภูมิภาค

ภูมิภาค	จำนวน ประชากรไทย (ร้อยละ)	จำนวน ผู้สูงอายุ (ร้อยละ)	จำนวน ผู้สูงอายุตัวอย่าง (ร้อยละ)
กรุงเทพมหานคร	8,879,148 (13.0)	1,342,826 (10.1)	1,116 (9.3)
ภาคกลาง- ตะวันออก-ตะวันตก	20,421,106 (29.9)	3,518,228 (26.3)	3,326 (27.8)
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	18,340,569 (26.9)	4,120,579 (30.9)	3,777 (31.5)
ภาคเหนือ	11,174,736 (16.4)	2,810,618 (21.0)	2,326 (19.4)
ภาคใต้	9,447,468 (13.8)	1,566,500 (11.7)	1,443 (12.0)
รวม	68,263,027 (100)	13,358,751 (100)	11,988 (100)

Source: (National Statistical Office, 2021)

ตารางที่ 2 ความหลากหลายทางเศรษฐกิจ 4 ระดับ พิจารณา 3 ด้าน (การคมนาคมขนส่ง รายได้ การศึกษา) ของจังหวัดตัวอย่าง

ภูมิภาค/จังหวัด	ด้านการคมนาคมขนส่ง ^a	ด้าน รายได้ ^b	ด้านการศึกษา ^c	สรุปความหลากหลายทางเศรษฐกิจ ^d
1.กรุงเทพมหานคร	1	1	1	3
ภาคกลาง-ตะวันออก-ตะวันตก				
2.สมุทรปราการ	1	1	0	2
3.พระนครศรีอยุธยา	0	1	0	1
4.ลพบุรี	0	1	0	1
5.ระยอง	0	1	0	1
6.กาญจนบุรี	0	1	0	1
7.สระแก้ว	0	0	0	0
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ				
8.ศรีสะเกษ	0	0	0	0
9.ขอนแก่น	1	0	1	2
10.เลย	0	0	0	0
11.หนองคาย	0	0	0	0
12.มุกดาหาร	0	0	0	0
ภาคเหนือ				
13.เชียงราย	1	0	1	2
14.แม่ฮ่องสอน	0	0	0	0
15.สุโขทัย	0	0	0	0
ภาคใต้				
16.พังงา	0	0	0	0
17.สงขลา	1	0	1	2
18.นราธิวาส	0	0	0	0

หมายเหตุ

a การคมนาคมขนส่ง

(0 = ไม่มีสนามบินเชิงพาณิชย์, 1 = มีสนามบินเชิงพาณิชย์)

b รายได้ (0 = มีฐานรายได้อาศัย < 19,165, 1 = มีฐานรายได้อาศัย > 19,165)

Source: (Economic Statistics Analysis and Forecasting Group, 2021)

c การศึกษา (0 = ไม่มีมหาวิทยาลัยชั้นนำ, 1 = มีมหาวิทยาลัยชั้นนำ)

d ความหลากหลายทางเศรษฐกิจ

(0 = น้อยที่สุด, 1 = น้อย, 2 = ปานกลาง, 3 = มาก)

ผู้สูงอายุ ผลการศึกษาจะมีประโยชน์ต่อการวางแผนและส่งเสริมการทำงานของผู้สูงอายุ ให้ได้มีโอกาสทำงานตามความถนัด ตามศักยภาพ และมีความพร้อมในการทำงาน ส่งผลให้ผู้สูงอายุเพิ่มรายได้ ยกระดับคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุให้สามารถพึ่งพาตนเองได้อย่างมีศักดิ์ศรี

2. วัสดุและวิธีการ

2.1 ข้อมูลและแหล่งข้อมูล

ข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ ข้อมูลผู้สูงอายุไทยที่มีอายุตั้งแต่ 55 ปีขึ้นไป จากโครงการสำรวจประชากรผู้สูงอายุในประเทศไทย พ.ศ. 2564 โดยสำนักงานสถิติแห่งชาติ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมข้อมูลสถานการณ์ผู้สูงอายุ ผู้วิจัยสุ่มตัวอย่างข้อมูลผู้สูงอายุ จำนวน 11,988 คน ที่มีข้อมูลสมบูรณ์ ใน 18 จังหวัดที่ถูกสุ่มแบบเจาะจง (Purposive sampling) จากทั้งหมด 77 จังหวัด เพื่อเห็นอิทธิพลของจังหวัด (ดังรูปที่ 1) โดยพิจารณา (1) 18 จังหวัดตัวอย่างมีการกระจายครอบคลุม 5 ภูมิภาคทั่วประเทศ เพื่อความหลากหลายด้านประชากรและสังคม จำนวนตัวอย่างผู้สูงอายุกระจายใกล้เคียงสัดส่วนประชากรผู้สูงอายุในแต่ละภูมิภาค ดังตารางที่ 1 และ (2) 18 จังหวัดตัวอย่างมีความหลากหลายทางเศรษฐกิจ (4 ระดับ: 0 = น้อยที่สุด 1 = น้อย 2 = ปานกลาง 3 = มาก) โดยพิจารณา 3 ด้าน ได้แก่ ด้านการคมนาคมขนส่ง รายได้ การศึกษา รายละเอียดความหลากหลายทางเศรษฐกิจของ 18 จังหวัดตัวอย่างจำแนกตาม 5 ภูมิภาค ดังตารางที่ 2

2.2 ตัวแปรในการศึกษา

ประกอบด้วยตัวแปรตาม คือ ความต้องการทำงาน (ต้องการ/ไม่ต้องการ) และตัวแปรอิสระ 20 ตัวแปร ซึ่งอยู่ภายใต้ 4 ปัจจัย ได้แก่ (1) ปัจจัยด้านประชากรและสังคม ประกอบด้วย 10 ตัวแปร คือ ภูมิภาค จังหวัด เขตที่อยู่อาศัย จำนวนสมาชิกในครัวเรือน สถานภาพการอยู่อาศัยในครัวเรือน เพศ อายุ สถานภาพสมรส จำนวนบุตร บุคคลที่เป็นเจ้าของที่อยู่อาศัย (2) ปัจจัยด้านการศึกษา ประกอบด้วย 2 ตัวแปร คือ ชั้นปีการศึกษาสูงสุดที่จบ การอ่านออกและเขียนได้ (3) ปัจจัยด้านเศรษฐกิจและการทำงาน ประกอบด้วย 7 ตัวแปร คือ อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา แหล่งรายได้ที่สำคัญที่สุดในการดำรงชีพ รายได้จากทุกแหล่งเฉลี่ยต่อปี ความเพียงพอของรายได้ การออม ภาวะหนี้สิน ความหลากหลายทางเศรษฐกิจ (4) ปัจจัยด้านสุขภาพ

ประกอบด้วย 1 ตัวแปร คือ สุขภาพร่างกายในระหว่าง 7 วันที่ผ่านมา

ทั้งนี้ ขนาดตัวอย่างผู้สูงอายุ 11,988 คน มากกว่า 30 เท่าของจำนวนตัวแปรพยากรณ์เพียงพอในการวิเคราะห์การถดถอยลอจิสติก (Wanichbancha, 2008)

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

(1) การใช้สถิติพรรณนา ได้แก่ ความถี่ ร้อยละ ในการสรุปข้อมูล ด้านประชากรและสังคม ด้านการศึกษา ด้านเศรษฐกิจและการทำงาน ด้านสุขภาพ รวมทั้งข้อมูลความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ

(2) การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ต่อความต้องการทำงานใช้การทดสอบไคกำลังสอง (Chi-squared Test) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

(3) การสร้างตัวแบบพยากรณ์ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุไทย ใช้การวิเคราะห์การถดถอยลอจิสติก (Logistic regression analysis) โดยตัวแปรตาม คือ ความต้องการทำงาน (ต้องการ/ไม่ต้องการ) มีขั้นตอน ดังนี้ (Urawong et al., 2024)

(3.1) การคัดเลือกตัวแปรอิสระ 20 ตัวเข้าตัวแบบด้วยการพิจารณาตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับความต้องการทำงาน (Chi-squared P-values < 0.05) และมีความสัมพันธ์กันระดับต่ำระหว่าง 2 ตัวแปรเชิงคุณภาพ (Cramer's V statistics < 0.50) เพื่อป้องกันปัญหาความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุ (Multicollinearity)

(3.2) การคัดเลือกตัวแปรเข้าและออกจากตัวแบบด้วยวิธี Forward stepwise: likelihood ratio โดยกำหนดระดับนัยสำคัญสำหรับการนำตัวแปรทำนายเข้าและออกจากตัวแบบเท่ากับ 0.05 และ 0.10 ตามลำดับ

(3.3) การทดสอบนัยสำคัญของตัวแปรทำนาย โดยใช้ Hosmer and Lemeshow Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

(3.4) ความสามารถในการอธิบายความผันแปรพิจารณาด้วย Cox&Snell R² ซึ่งจะต้องมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอและ Nagelkerke R² ซึ่งจะมีค่ามากกว่า Cox&Snell R² เสมอ นำไปคูณด้วย 100 เป็นค่า R² เทียม หรือเรียกว่า Pseudo R² ซึ่งเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ที่อธิบายความผันแปรในการวิเคราะห์การถดถอยลอจิสติก (Wanichbancha, 2008)

(3.5) การคัดเลือกตัวแบบที่ดีที่สุด พิจารณาจากความเหมาะสมของตัวแบบ (Hosmer and Lemeshow

P-values > 0.05) และค่าร้อยละของการทำนายถูกต้องสูงสุดภายใต้ตัวแบบที่มีความซับซ้อนน้อยสุด

3. ผลลัพธ์

3.1 ข้อมูลทั่วไปของตัวอย่างผู้สูงอายุ ดังตารางที่ 3

3.1.1 ข้อมูลด้านประชากรและสังคม

ผู้สูงอายุตัวอย่างกระจายใน 5 ภูมิภาค ดังนี้ กรุงเทพมหานคร (ร้อยละ 9.3) ภาคกลาง-ตะวันออก-ตะวันตก (ร้อยละ 27.8) ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ร้อยละ 31.5) ภาคเหนือ (ร้อยละ 19.4) ภาคใต้ (ร้อยละ 12.0) อาศัยอยู่ในเขตเทศบาล (ร้อยละ 55.4) มีจำนวนสมาชิกในครัวเรือน 2-3 คน (ร้อยละ 76.3) สถานภาพการอยู่อาศัยในครัวเรือน ผู้สูงอายุเป็นหัวหน้าครัวเรือน (ร้อยละ 60.6) เป็นเพศหญิง (ร้อยละ 55.7) เป็นผู้สูงอายุที่อายุตั้งแต่ 60 ปี ขึ้นไป (ร้อยละ 73.1) มีสถานภาพสมรสที่คู่สมรสอยู่ในครัวเรือน (ร้อยละ 63.0) ไม่มีบุตร (ร้อยละ 48.6) และไม่มีบุตรไม่เกิน 2 คน (ร้อยละ 48.5) การเป็นเจ้าของที่อยู่อาศัย เป็นตัวผู้สูงอายุหรือคู่สมรส (ร้อยละ 85.2)

3.1.2 ข้อมูลด้านการศึกษา

ผู้สูงอายุ ส่วนใหญ่จบการศึกษาสูงสุดระดับประถมศึกษาหรือต่ำกว่า (ร้อยละ 69.2) และสามารถอ่านออกและเขียนได้ (ร้อยละ 87.0)

3.1.3 ข้อมูลด้านเศรษฐกิจและการทำงาน

ผู้สูงอายุ ทำงานในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา (ร้อยละ 50.5) มีแหล่งรายได้ที่สำคัญที่สุดในการดำรงชีพ จากบำนาญ/บำนาญ กองทุนสำรองเลี้ยงชีพ กองทุนประกันสังคม บัตรสวัสดิการแห่งรัฐ (ร้อยละ 55.6) จากการทำงาน (ร้อยละ 44.3) รายได้จากการทำงานทุกแหล่งเฉลี่ยต่อปีมีเงินเฉลี่ยตั้งแต่ 50,000 บาทขึ้นไป (ร้อยละ 52.7) มีความเพียงพอของรายได้ (ร้อยละ 55.0) มีการออมเงิน (ร้อยละ 53.6) หนี้สินครัวเรือน ส่วนใหญ่เป็นครัวเรือนไม่มีหนี้ (ร้อยละ 52.3)

3.1.4 ข้อมูลด้านสุขภาพ

ภาวะสุขภาพร่างกาย 7 วันที่ผ่านมาอยู่ในระดับดี (ร้อยละ 52.5) และระดับไม่ดี-ปานกลาง (ร้อยละ 47.5)

3.2 ข้อมูลความต้องการทำงาน

ผู้สูงอายุตัวอย่าง 11,988 คน มีความต้องการทำงาน 5,232 คน (ร้อยละ 43.6) โดยผู้สูงอายุวัยก่อนเกษียณอายุ

มีความต้องการทำงาน (ร้อยละ 73.5) มากกว่าผู้สูงอายุวัยหลังเกษียณอายุ (ร้อยละ 32.7)

3.3 การหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยด้านประชากรและสังคม ด้านการศึกษา ด้านเศรษฐกิจและการทำงาน ด้านสุขภาพ ที่มีต่อความต้องการทำงาน

ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Chi-squared P-values < 0.05) กับความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ (ต้องการ/ไม่ต้องการ) ได้แก่ ปัจจัยด้านประชากรและสังคม (ภูมิภาค จังหวัด เขตที่อยู่อาศัย จำนวนสมาชิกในครัวเรือน สถานภาพการอยู่อาศัยในครัวเรือน เพศ อายุ สถานภาพสมรส จำนวนบุตร บุคคลที่เป็นเจ้าของที่อยู่อาศัย) ปัจจัยด้านการศึกษา (ชั้นปีการศึกษาสูงสุดที่จบ การอ่านออกและเขียนได้) ปัจจัยด้านเศรษฐกิจและการทำงาน (อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา แหล่งรายได้ที่สำคัญที่สุดในการดำรงชีพ รายได้จากทุกแหล่งเฉลี่ยต่อปี ความเพียงพอของรายได้ การออม ภาวะหนี้สินเศรษฐกิจ) ปัจจัยด้านสุขภาพ (สุขภาพร่างกายในระหว่าง 7 วันที่ผ่านมา) รวมทั้งหมด 20 ตัวแปรอิสระ ดังตารางที่ 3

3.4 ตัวแบบพยากรณ์ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ

ผลการสร้างตัวแบบพยากรณ์ความต้องการทำงาน (ต้องการ/ไม่ต้องการ) ของผู้สูงอายุ แสดงดังตารางที่ 4 โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยลอจิสติก ด้วยตัวแปรอิสระ 18 ตัว (ยกเว้นตัวแปร ภูมิภาค และความหลากหลายทางเศรษฐกิจ) ที่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับความต้องการทำงานและที่ไม่มีปัญหาความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุ (Multicollinearity) (Cramer's V statistics < 0.50) ตัวแบบมีความสามารถในการพยากรณ์ถูกต้อง ร้อยละ 92.3 ดังนี้

P (ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ)

$$= P(Y=1) = \frac{1}{1 + e^{-Z}} \text{ เมื่อ}$$

$$Z = -4.808 + 6.587 X_1$$

Y คือ ความต้องการทำงาน (0 = ไม่ต้องการ, 1 = ต้องการ)

X_1 คือ อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา (0 = ไม่ทำงาน, 1 = ทำงาน)

จากตารางที่ 4 ตัวแปรที่มีนัยสำคัญที่ใช้ในการพยากรณ์ความต้องการทำงาน (Y) ของผู้สูงอายุ คือ อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา

ตารางที่ 3 จำนวน (ร้อยละ) ของผู้สูงอายุ จำแนกตามข้อมูลทั่วไปของผู้สูงอายุ

ข้อมูลทั่วไป ของผู้สูงอายุ	ความต้องการทำงาน				รวม
	ไม่ต้องการ		ต้องการ		
10. บุคคลที่เป็นเจ้าของที่อยู่อาศัย					P-value = 0.000
ตัวผู้สูงอายุและหรือคู่สมรส	5,566	(54.5)	4,651	(45.5)	10,217(85.2)
บุตร	1,012	(79.2)	266	(20.8)	1,278(10.7)
ผู้เช่า	178	(36.1)	315	(63.9)	493(4.1)
11. ชั้นปีการศึกษาสูงสุดที่จบ					P-value = 0.000
ไม่ได้รับการศึกษา	753	(70.0)	323	(30.0)	1,076(9.0)
ประถมศึกษา หรือต่ำกว่า	4,544	(54.8)	3,750	(45.2)	8,294 (69.2)
มัธยมศึกษา หรือสูงกว่า	1,459	(55.7)	1,159	(44.3)	2,618(21.8)
12. การอ่านออกและเขียนได้					P-value = 0.000
ได้	5,613	(53.8)	4,818	(46.2)	10,431(87.0)
ไม่ได้	1,143	(73.4)	414	(26.6)	1,557(13.0)
13. อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา					P-value = 0.000
ไม่ทำงาน	5,881	(99.2)	48	(0.8)	5,929(49.5)
ทำงาน	875	(14.4)	5,184	(85.6)	6,059(50.5)
14. แหล่งรายได้ที่สำคัญที่สุดในการดำรงชีพ					P-value = 0.000
ไม่มีรายได้	4	(100)	0	(0.0)	4(0.03)
มีรายได้จากการทำงาน	602	(11.3)	4,710	(88.7)	5,312(44.31)
มีรายได้จากแหล่งอื่น ๆ (บำเหน็จ/บำนาญ กองทุนสำรองเลี้ยงชีพ/ ประกันสังคม บัตรสวัสดิการแห่งรัฐ)	6,150	(92.2)	522	(7.8)	6,672(55.66)
15. รายได้จากทุกแหล่งเฉลี่ยต่อปี					P-value = 0.000
ไม่มีรายได้	4	(100)	0	(0.0)	4(0.03)
ต่ำกว่า 10,000 บาท	758	(89.8)	86	(10.2)	844(7.04)
10,000 - 29,999 บาท	2,028	(79.5)	524	(20.5)	2,552(21.29)
30,000 - 49,999 บาท	1,439	(63.7)	820	(36.3)	2,259(18.85)
ตั้งแต่ 50,000 บาทขึ้นไป	2,527	(39.9)	3,802	(60.1)	6,329(52.79)
16. ความเพียงพอของรายได้					P-value = 0.000
มีเหลือเก็บ	318	(54.0)	271	(46.0)	589(4.9)
เพียงพอ	4,293	(65.2)	2,295	(34.8)	6,588(55.0)
เพียงพอบางครั้ง/ไม่เพียงพอ	2,145	(44.6)	2,666	(55.4)	4,811(40.1)
17. การออม					P-value = 0.000
ไม่มี	3,550	(63.8)	2,016	(36.2)	5,566(46.4)
มี	3,206	(49.9)	3,216	(50.1)	6,422(53.6)
18. ภาวะหนี้สิน					P-value = 0.000
ตนเองมีหนี้	466	(26.5)	1,291	(73.5)	1,757(14.7)
สมาชิกในครัวเรือนมีหนี้	1,792	(64.8)	972	(35.2)	2,764(23.0)
ตนเองและสมาชิกในครัวเรือนมีหนี้	412	(34.4)	786	(65.6)	1,198(10.0)
ครัวเรือนไม่มีหนี้	4,086	(65.2)	2,183	(34.8)	6,269(52.3)
19. สุขภาพร่างกาย 7 วันที่ผ่านมา					P-value = 0.000
ดี	2,821	(44.8)	3472	(55.2)	6,293(52.5)
ปานกลาง	2,940	(64.3)	1,630	(35.7)	4,570(38.1)
ไม่ดี	995	(88.4)	130	(11.6)	1,125(9.4)
20. ความหลากหลายทางเศรษฐกิจ					P-value = 0.000
น้อยที่สุด-น้อย	4,637	(55.2)	3,765	(44.8)	8,402 (70.1)
ปานกลาง-มาก	2,119	(59.1)	1,467	(40.9)	3,586(29.9)
รวมแต่ละข้อ	6,756	(56.4)	5,232	(43.6)	11,988(100)

จากตารางที่ 5 ตัวอย่างผู้สูงอายุมีจำนวน 11,988 คน พบว่า ผลการพยากรณ์ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุในไทย ข้อมูลจริงของผู้สูงอายุที่ไม่ต้องการทำงานมีจำนวน 6,756 คน แต่เมื่อใช้สมการจะสามารถพยากรณ์ได้ถูกต้อง 5,881 คน นั่นคือพยากรณ์ถูกต้องร้อยละ 87.0 ในขณะที่ผู้สูงอายุที่ต้องการทำงานมีจำนวน 5,232 คน แต่เมื่อใช้สมการจะพยากรณ์ได้ถูกต้อง 5,184 คน นั่นคือพยากรณ์ถูกต้องร้อยละ 99.1 สรุปโดยภาพรวมสมการพยากรณ์ได้ถูกต้องร้อยละ 92.3

เราสามารถเพิ่มความสามารถพยากรณ์ภาพรวมของตัวแบบได้เล็กน้อยจากร้อยละ 92.3 เป็นร้อยละ 93.0 ด้วยการเพิ่มตัวแปรทำนายที่มีนัยสำคัญในตัวแบบ 4 ตัวแปรดังนี้ ตัวแปรจังหวัด อายุ แหล่งรายได้ที่สำคัญที่สุดในการดำรงชีพ สุขภาพร่างกายระหว่าง 7 วันที่ผ่านมา อย่างไรก็ตามตัวแบบดังกล่าวจะมีความซับซ้อนขึ้นตามจำนวนตัวแปรที่เพิ่มขึ้น

สำหรับตัวแปรความหลากหลายทางเศรษฐกิจ และตัวแปรภูมิภาค เป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับความต้องการทำงานของผู้สูงอายุโดยระดับความสัมพันธ์น้อยกว่าตัวแปรจังหวัด และมีปัญหา ความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุ (Multicollinearity) กับตัวแปรจังหวัด จึงไม่นำมาพิจารณาในการวิเคราะห์การถดถอยลอจิสติก

3.5 ตัวแบบพยากรณ์ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ จำแนกตามอายุ (ก่อนเกษียณอายุ 55-59 ปี และหลังเกษียณอายุ 60 ปีขึ้นไป) โดยใช้การวิเคราะห์ลอจิสติก แสดงดังตารางที่ 6 - 9 ซึ่งตัวแปรทำนายที่มีนัยสำคัญคือ อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา

3.5.1 ตัวแบบพยากรณ์ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ ก่อนเกษียณอายุ (55-59 ปี) จำนวน 3,223 คน มีความสามารถในการพยากรณ์ ถูกต้องภาพรวม ร้อยละ 90.3 แสดงดังตารางที่ 6 และ 7 สมการดังนี้

P (ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุก่อนเกษียณอายุ 55-59 ปี)

$$= P(Y=1) = \frac{1}{1 + e^{-z_1}} \text{ เมื่อ}$$

$$z_1 = -3.383 + 5.458X_1$$

Y คือ ความต้องการทำงาน (0=ไม่ต้องการ ,1=ต้องการ)

X₁ คือ อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา (0=ไม่ทำงาน, 1=ทำงาน)

โดยในกลุ่มผู้สูงอายุ(55-59 ปี) ที่ไม่ต้องการทำงาน สามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องร้อยละ 65.5 (ถูกต้อง 560 คน ใน 855 คน) ในขณะที่กลุ่มผู้สูงอายุ (55-59 ปี) ที่ต้องการทำงาน สมการพยากรณ์ถูกต้องร้อยละ 99.2 (ถูกต้อง 2,349 คน ใน 2,368 คน) โดยภาพรวมสมการพยากรณ์กลุ่มผู้สูงอายุ (55-59 ปี) ได้ถูกต้องลดลงเป็นร้อยละ 90.3

3.5.2 ตัวแบบพยากรณ์ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ หลังเกษียณอายุ (ตั้งแต่ 60 ปีขึ้นไป) จำนวน 8,765 คน มีความสามารถในการพยากรณ์ถูกต้องภาพรวมร้อยละ 93.1 แสดงดังตารางที่ 8 และ 9 สมการดังนี้

P (ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุเกษียณอายุ 60 ปีขึ้นไป)

$$= P(Y=1) = \frac{1}{1 + e^{-z_2}} \text{ เมื่อ}$$

$$z_2 = -5.212 + 6.799 X_1$$

Y คือ ความต้องการทำงาน

(0 = ไม่ต้องการ, 1 = ต้องการ)

X₁ คือ อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา

(0=ไม่ทำงาน, 1=ทำงาน)

โดยในผู้สูงอายุ (≥ 60 ปี) ที่ไม่ต้องการทำงานสมการพยากรณ์ได้ถูกต้องร้อยละ 90.2 (ถูกต้อง 5,321 คน ใน 5,901 คน) ในขณะที่กลุ่มผู้สูงอายุ(≥ 60 ปี) ที่ต้องการทำงาน สมการพยากรณ์ถูกต้องร้อยละ 99.0 (ถูกต้อง 2,835 คน ใน 2,864 คน) โดยภาพรวมสมการพยากรณ์กลุ่มผู้สูงอายุ (≥ 60 ปี) ได้ถูกต้องเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 93.1

3.6 ตัวแบบพยากรณ์ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ จำแนกตามภูมิภาค (กรุงเทพมหานคร ภาคกลาง-ตะวันออก-ตะวันตก ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคเหนือ และภาคใต้) พบว่า อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา เป็นตัวแปรทำนายที่มีนัยสำคัญสูงสุดในตัวแบบ สามารถทำนายความต้องการทำงานได้ถูกต้องสูงสุด คือ ภาคเหนือ (ร้อยละ 99.7) รอง ๆ ลงมา ภาคกลาง - ตะวันออก - ตะวันตก (ร้อยละ 96.0) กรุงเทพมหานคร(ร้อยละ 95.7) ภาคใต้ (ร้อยละ 94.1) และต่ำสุดคือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ร้อยละ 87.8) ตามลำดับ รายละเอียดดังตารางที่ 10 - 11

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน สถิติทดสอบ และ $\text{Exp}(\beta)$ หรืออัตราส่วนออดส์ (Odds Ratio) สำหรับการพยากรณ์ทำนายโอกาสความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ

Variable	β	S.E.	P-value	$\text{Exp}(\beta)$
อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา				
ทำงาน	6.587	0.149	0.000	727.258
ไม่ทำงาน			reference	
Constant	-4.808	0.145	0.000	0.008

Hosmer P-value = 1, Cox & Snell = 0.596, Nagelkerke = 0.799

ตารางที่ 5 ผลการทำนายความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ

Observed data of the elderly		Prediction		
		ความต้องการทำงาน		% of correct prediction
		ไม่ต้องการ	ต้องการ	
ความต้องการ	ไม่ต้องการ	5,881	875	87.0
การทำงาน	ต้องการ	48	5,184	99.1
Overall percentage of correct prediction				92.3

ตารางที่ 6 ค่าพารามิเตอร์และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน สถิติทดสอบ และ $\text{Exp}(\beta)$ หรืออัตราส่วนออดส์ (Odds Ratio) สำหรับการพยากรณ์โอกาสความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ จำแนกตามอายุ (ก่อนเกษียณอายุ 55-59 ปี)

Variable	β	S.E.	P-value	$\text{Exp}(\beta)$
อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา				
ทำงาน	5.458	0.241	0.000	234.690
ไม่ทำงาน			reference	
Constant	-3.383	0.233	0.000	0.034

Hosmer P-value = 1, Cox & Snell = 0.412, Nagelkerke = 0.601

ตารางที่ 7 ผลการทำนายความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ จำแนกตามอายุ (ก่อนเกษียณอายุ 55-59 ปี)

Observed data		Prediction		
of the elderly		ความต้องการทำงาน		% of correct prediction
		ไม่ต้องการ	ต้องการ	
ความต้องการ	ไม่ต้องการ	560	295	65.5
การทำงาน	ต้องการ	19	2,349	99.2
Overall percentage of correct prediction				90.3

ตารางที่ 8 ค่าพารามิเตอร์และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน สถิติทดสอบ และ $\text{Exp}(\beta)$ หรืออัตราส่วนออดส์ (Odds Ratio) สำหรับการพยากรณ์โอกาสความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ จำแนกตามอายุ (หลังเกษียณอายุ ตั้งแต่ 60 ปีขึ้นไป)

Variable	β	S.E.	P-value	$\text{Exp}(\beta)$
อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา				
ทำงาน	6.799	0.192	0.000	896.851
ไม่ทำงาน			reference	
Constant	-5.212	0.186	0.000	0.005

Hosmer P-value = 1, Cox & Snell = 0.580, Nagelkerke = 0.809

ตารางที่ 9 ผลการพยากรณ์ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ จำแนกตามอายุ (หลังเกษียณอายุ ตั้งแต่ 60 ปีขึ้นไป)

Observed data of the elderly		Prediction		
		ความต้องการทำงาน		% of correct prediction
		ไม่ต้องการ	ต้องการ	
ความต้องการ	ไม่ต้องการ	5,321	580	90.2
การทำงาน	ต้องการ	29	2,835	99.0
Overall percentage of correct prediction				93.1

ตารางที่ 10 ค่าพารามิเตอร์และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน สถิติทดสอบ และ $\text{Exp}(\beta)$ หรืออัตราส่วนออดส์ (Odds Ratio) สำหรับการพยากรณ์ทำนายโอกาสความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ จำแนกตามภูมิภาค

Model1 (กรุงเทพมหานคร)				
ตัวแปร:	β	S.E.	P-value	$\text{Exp}(\beta)$
อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา				
ทำงาน	6.255	0.310	<.001	520.550
ไม่ทำงาน			reference	
Constant	-3.763	0.253	<.001	0.023
Hosmer P-value=1, Cox & Snell=0.624, Nagelkerke=0.851				
Model2 (ภาคกลาง-ออก-ตก)				
อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา				
ทำงาน	7.408	0.294	<.001	1649.649+
ไม่ทำงาน			reference	
Constant	-4.932	0.278	<.001	0.007
Hosmer P-value=1, Cox & Snell=0.657, Nagelkerke=0.881				
Model3 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ)				
อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา				
ทำงาน	7.102+B7:E10	0.451	<.001	1,214.42
ไม่ทำงาน			reference	
Constant	-5.778	0.448	<.001	0.003
Hosmer P-value=1, Cox & Snell=0.537, Nagelkerke=0.718				
Model4 (ภาคเหนือ)				
อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา				
ทำงาน	6.502	0.344	<.001	666.243
ไม่ทำงาน			reference	
Constant	-4.846	0.335	<.001	0.008
Hosmer P-value=1, Cox & Snell=0.583, Nagelkerke=0.783				
Model5 (ภาคใต้)				
อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา				
ทำงาน	6.769	0.398	<.001	870.057
ไม่ทำงาน			reference	
Constant	-4.655	0.380	<.001	0.010
Hosmer P-value=1, Cox & Snell=0.625, Nagelkerke=0.836				

ตารางที่ 11 ผลการทำนายความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ จำแนกตามภูมิภาค

Model	Observed data of the elderly		Prediction		% of correct prediction
			ความต้องการทำงาน		
			ไม่ต้องการ	ต้องการ	
กรุงเทพ มหานคร	ความตอง	ไม่ตองการ	689	34	95.3
	การทำงาน	ตองการ	16	411	96.3
	Overall percentage of correct prediction				95.7
ภาคกลาง- ตะวันออก-ตะวันตก	ความตอง	ไม่ตองการ	1,803	123	93.6
	การทำงาน	ตองการ	13	1,463	99.1
	Overall percentage of correct prediction				96.0
ภาคตะวันออก เฉียงเหนือ	ความตอง	ไม่ตองการ	1,615	458	85.8
	การทำงาน	ตองการ	5	1,722	77.9
	Overall percentage of correct prediction				87.8
ภาคเหนือ	ความตอง	ไม่ตองการ	1,145	190	99.1
	การทำงาน	ตองการ	9	995	91.5
	Overall percentage of correct prediction				99.7
ภาคใต้	ความตอง	ไม่ตองการ	736	80	90.2
	การทำงาน	ตองการ	7	662	99.0
	Overall percentage of correct prediction				94.1

4. การอภิปรายและข้อเสนอแนะ

4.1 ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ

ผู้สูงอายุตัวอย่างจำนวน 11,988 คนถูกสุ่มจากผู้สูงอายุทั่วราชอาณาจักรไทยปี 2564 ที่มีอายุเต็มตั้งแต่ 55 ปี (National Statistical Office, 2024) (Department of Provincial Administration, 2024) กระจายครอบคลุมทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทยใน 18 จังหวัดตัวอย่างที่มีความหลากหลายทางเศรษฐกิจใน 3 ด้าน (การคมนาคมขนส่ง รายได้ และการศึกษา)

ผู้สูงอายุตัวอย่าง มีความต้องการทำงาน 5,232 คน (คิดเป็นร้อยละ 43.6) โดยผู้สูงอายุวัยก่อนเกษียณ (อายุเต็ม 55-59 ปี) มีความต้องการทำงาน (ร้อยละ 73.5) มากกว่าผู้สูงอายุวัยเกษียณอายุ (อายุเต็ม ≥ 60 ปี) (ร้อยละ 32.7) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Chi-squared P-value < 0.001) ผลการศึกษาดังกล่าวใกล้เคียงมากกับการศึกษาของ (Urawong et al., 2024) ซึ่งทำการศึกษาความต้องการทำงานของผู้สูงอายุใน 2 จังหวัดที่มีความหลากหลายทางเศรษฐกิจใกล้เคียงกัน คือจังหวัดสงขลาและจังหวัดขอนแก่น โดยสรุปไว้ว่าผู้สูงอายุในสองจังหวัดดังกล่าวมีความต้องการทำงาน (ร้อยละ 43.0) และผู้สูงอายุวัยก่อนเกษียณอายุมีความต้องการทำงานมากกว่าผู้สูงอายุวัยหลังเกษียณอายุอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับเหตุผลที่ทำให้ผู้สูงอายุต้องการทำงานหลังเกษียณ (Kasemsoet, 2019) อาทิ ผู้สูงอายุยังสามารถทำงาน/สุขภาพดี/ช่วยสังคมได้ ต้องการหารายได้หลังเกษียณอายุ ไม่ต้องการเป็นภาระของบุคคลอื่นในสังคม ในทางตรงข้ามผู้สูงอายุที่ไม่ต้องการทำงานต่อด้วยเหตุผล (Phenphong, 2019) (Phokapunt et al., 2018) อาทิ ปัจจัยด้านสุขภาพ ต้องการพักผ่อน มีฐานะทางเศรษฐกิจดีเพียงพอแล้ว ไม่สะดวกในการเดินทาง

พิจารณาใน 18 จังหวัดตัวอย่าง พบว่าผู้สูงอายุที่มีสัดส่วนความต้องการทำงานต่ำสุดอยู่ในจังหวัดสมุทรปราการ (ร้อยละ 32.9) และ กรุงเทพมหานคร (ร้อยละ 37.0) ตามลำดับ ซึ่ง 2 จังหวัดดังกล่าวอยู่ในกลุ่มจังหวัดที่มีความหลากหลายทางเศรษฐกิจระดับปานกลาง-มาก ในภาคกลางของประเทศไทย สอดคล้องในข้อสรุปของ (Chaemchan & Charasit, 2020) สำหรับจังหวัดที่มีสัดส่วนความต้องการทำงานสูงสุดอยู่ในจังหวัดมุกดาหาร (ร้อยละ 59.0) และ พังงา (ร้อยละ 51.0) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มจังหวัดที่มีความหลากหลายทางเศรษฐกิจระดับ

น้อยที่สุด - น้อย และอยู่ใน 2 ภูมิภาค (ตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้) ที่มีสัดส่วนความต้องการทำงานสูงกว่าภูมิภาคอื่น

4.2 ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ ดังนี้

ปัจจัยด้านประชากรและสังคม (ภูมิภาค จังหวัด เขตที่อยู่อาศัย จำนวนสมาชิกในครัวเรือน สถานภาพการอยู่อาศัย ในครัวเรือน เพศ อายุ สถานภาพสมรส จำนวนบุตร บุคคลที่เป็นเจ้าของที่อยู่อาศัย) ปัจจัยด้านการศึกษา (ชั้นปีการศึกษา สูงสุดที่จบ การอ่านออกและเขียนได้) ปัจจัยด้านเศรษฐกิจและการทำงาน (อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา แหล่งรายได้ที่สำคัญที่สุดในการดำรงชีพ รายได้จากทุกแหล่งเฉลี่ยต่อปี ความเพียงพอของรายได้ การออม ภาวะหนี้สิน เศรษฐกิจ) ปัจจัยด้านสุขภาพ (สุขภาพร่างกายในระหว่าง 7 วันที่ผ่านมา) รวม 20 ตัวแปรที่พิจารณา มีความสัมพันธ์กับความต้องการทำงาน (ต้องการ/ไม่ต้องการ) ของผู้สูงอายุไทย (Chi-squared P-values < 0.05) สอดคล้องใน (Urawong et al., 2024) และ (Chaemchan & Charasit, 2020)

นั่นคือเราสามารถกล่าวได้ว่า ผู้สูงอายุที่มีความต้องการทำงาน จะมีโอกาสพบสูงในกลุ่มที่ อาศัยนอกเขตเทศบาล มากกว่าในเขตเทศบาล มีจำนวนสมาชิกในครัวเรือน 2-3 หรือ 4 คนขึ้นไป เป็นบุตรในครัวเรือน เป็นเพศชายมากกว่า เพศหญิง อายุเต็ม 55-59 ปี มากกว่าในกลุ่มอายุ 60 ปีขึ้นไป สถานภาพสมรส จำนวนบุตร 3 คนขึ้นไป สถานที่อยู่อาศัย เป็นผู้เช่า ได้รับการศึกษา อ่านออกเขียนได้ มีอาชีพ/ทำงาน ใน 12 เดือนที่ผ่านมา มีรายได้จากการทำงาน รวมรายได้จากทุกแหล่งเฉลี่ยต่อปี 50,000 บาทขึ้นไป รายได้เพียงพอ บ้าง/ไม่เพียงพอบ้าง ออมเงินได้ มีหนี้ของตนเอง สุขภาพร่างกายดี

4.3 การอภิปรายสมการพยากรณ์

ปัจจัยที่ใช้ในการพยากรณ์ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ (ต้องการ/ไม่ต้องการ) เพียงปัจจัยเดียวคือ อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา (ทำงาน/ไม่ทำงาน) โดยทำนายความต้องการทำงานถูกต้องร้อยละ 92.3 อธิบายการแปรผันของความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ ได้ 0.596 (Cox & Snell) และ 0.799 (Nagelkerke) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับผลการศึกษาของ (Urawong et al., 2024) ที่ศึกษาปัจจัยในการทำนายความ

ต้องการทำงานของผู้สูงอายุ 55 ปีขึ้นไป พ.ศ.2564 จังหวัดสงขลาและจังหวัดขอนแก่น (ซึ่งทั้ง 2 จังหวัดมีความหลากหลายทางเศรษฐกิจอยู่ในระดับมาก-มากที่สุด) ได้ถูกต้องร้อยละ 86.4 ด้วยตัวแปรทำนายตัวเดียวเช่นกันคืออาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา นอกจากนี้ตัวแบบดังกล่าว สามารถอธิบายความผันแปรได้ดีกว่าตัวแบบของ (Poungchieng, 2012) ซึ่งใช้ 18 ปัจจัยในการทำนายความต้องการทำงานของผู้สูงอายุไทยปี 2550 ได้ร้อยละ 27.6 ($R^2 = 0.276$)

สำหรับตัวแปรทำนายที่มีนัยสำคัญต่อตัวแบบอีก 4 ตัวแปรที่อาจนำมาเพิ่มในตัวแบบ ซึ่งจะทำให้ตัวแบบมีความซับซ้อนมากขึ้นตามจำนวนตัวแปรที่เพิ่มขึ้น แต่ความสามารถพยากรณ์ภาพรวมเพิ่มมากขึ้น (เล็กน้อย) จากร้อยละ 92.3 เป็นร้อยละ 93.0 ได้แก่ ตัวแปรจังหวัดอายุ แหล่งรายได้ที่สำคัญที่สุดในการดำรงชีพ สุขภาพร่างกายระหว่าง 7 วันที่ผ่านมา เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ (Phenphong, 2019) ที่สรุปไว้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อการตัดสินใจทำงานหลังเกษียณอายุในหน่วยงานภาครัฐ ได้แก่ ตัวแปรด้านสุขภาพ รายได้ หนี้ และสอดคล้องกับผลการศึกษาของ (Poungchieng, 2012) ที่มีตัวแปรอายุเป็นตัวแปรที่สามารถอธิบายการแปรผันของความต้องการทำงานของผู้สูงอายุได้เป็นลำดับแรก ที่สำคัญรอง ๆ ลงมา ได้แก่ ภาวะหนี้สิน เพศ ภาคที่อยู่อาศัย ภาวะสุขภาพ

4.4 ข้อเสนอแนะ

การส่งเสริมการทำงานและสถานะการทำงานของผู้สูงอายุ การวางแผนอนาคต และการสร้าง/ติดตามนโยบายต่างๆ เกี่ยวกับการขยายอายุการทำงาน เพื่อประโยชน์ต่อผู้สูงอายุเอง และเพื่อเตรียมสังคมไทยให้พร้อมไปกับปัญหา “สังคมสูงวัยระดับสุดยอด (Super Aged Society)” ที่กำลังจะเกิดขึ้นในอนาคต รายละเอียดดังนี้

4.4.1 การสร้างแรงจูงใจในการทำงานหลังการเกษียณอายุ

จากสัดส่วนความต้องการทำงานของผู้สูงอายุในกลุ่มก่อนเกษียณ (อายุเต็ม 55- 59 ปี) ที่มีความต้องการทำงานสูง (ร้อยละ 73.5) และในกลุ่มผู้สูงอายุ ที่มีสุขภาพร่างกายแข็งแรงดี การเพิ่มแรงจูงใจในการทำงานของผู้สูงอายุหลังเกษียณ อันจะช่วยเพิ่มแรงงานในระดับประเทศ และสามารถลดภาระพึ่งพิงในสังคม ดังนี้

(1) การสร้างแรงจูงใจในการทำงานด้วยการสร้างความสัมพันธ์ในองค์กร ผู้บริหารในองค์กรที่ผู้สูงอายุทำงาน

อยู่หรือเคยทำงาน ควรให้ความสำคัญด้านการยอมรับนับถือและให้เกียรติ โดยส่งเสริมกิจกรรมที่สร้างขวัญกำลังใจและวัฒนธรรมที่จะก่อเกิดการเคารพ การให้เกียรติผู้สูงอายุ และการจัดการปัญหาด้านการปรับตัวหลังเกษียณอายุ ได้แก่ ทักษะคิดต่อการเกษียณอายุ สุขภาพ การเข้าร่วมกิจกรรมทางสังคม (Tunlayanisaka, 2009)

(2) การสร้างแรงจูงใจในการทำงานด้วยบทบาทหน้าที่ในองค์กร ผู้สูงอายุควรมีบทบาทในการทำงานมากขึ้น โดยเฉพาะกลุ่มอายุ 60 - 64 ปี ภายใต้การกำหนดสภาพการทำงาน ค่าตอบแทนและสวัสดิการที่เกิดความพึงพอใจทั้งกับนายจ้างและลูกจ้าง และการจัดหาอาชีพ ตำแหน่งงานที่เหมาะสมกับผู้สูงอายุ ขยายความครอบคลุมของระบบประกันสังคมและการให้ความคุ้มครองแรงงานผู้สูงอายุ 60 ปีขึ้นไปเพิ่มมากขึ้น จากที่ปัจจุบันมีแรงงานผู้สูงอายุประมาณร้อยละ 12 เท่านั้นที่เป็นแรงงานในระบบ (Chaemchan & Charasit, 2020)

4.4.2 การเตรียมตัวเข้าสู่วัยสูงอายุ

(1) การเตรียมตัวด้านเศรษฐกิจก่อนเกษียณที่สำคัญและน่าสนใจสำหรับผู้สูงอายุ คือ การวางแผนทางการเงิน ได้แก่ การวางแผนด้านการออมเงินหรือลงทุนกับสถาบันทางการเงินต่างๆ การวางแผนทรัพย์สิน การวางแผนรายรับ-รายจ่ายในอนาคต (Chuenwattana & Biadhok, 2011) (Wanitchakham, 2019)

(2) การเลือกงานที่เหมาะสมกับผู้สูงอายุ ผู้สูงอายุเหมาะที่จะทำงานทางด้านการบริหารงาน การประกอบอาชีพอิสระ งานช่วยเหลือสังคม งานใช้ฝีมือ/ประสบการณ์ งานที่ปรึกษา/ให้คำแนะนำ (Kasemsoet, 2019) หลีกเลี่ยงงานที่ต้องใช้กำลัง จดเว้นงานเสี่ยงที่ต้องใช้ประสาทสัมผัส ทักษะด้านความจำ งานที่มีความเครียดหรือความดันสูง (Chuanichom et. al, 2018)

4.4.3 ความร่วมมือระหว่างหน่วยงานภาครัฐและภาคเอกชน ในการผลักดัน การติดตาม และการประเมินผล ให้เกิดการจ้างงานผู้สูงอายุหลังเกษียณอายุ

ในระดับกระทรวง ควรมีนโยบายส่งเสริมการทำงานผู้สูงอายุ อาทิที่เกิดขึ้นแล้ว ได้แก่ ความร่วมมือระหว่างกระทรวงแรงงานและธุรกิจค้าปลีก เพื่อส่งเสริมการจ้างงานผู้สูงอายุตั้งแต่ 60 ปีขึ้นไปทั่วประเทศ ผู้สูงอายุสามารถเลือกทำงานที่สาขาใกล้บ้าน และมีตารางการทำงาน

ที่ยืดหยุ่นตามความสะดวก เพื่อช่วยให้กลุ่มผู้สูงอายุวัยมีรายได้ มีคุณภาพชีวิตที่ดี

ในระดับจังหวัด ควรมีการพัฒนาโครงการฝึกอบรมและ/หรือการศึกษาตามงานด้านการพัฒนาคุณภาพชีวิต สุขภาพร่างกาย และสุขภาพใจ ของผู้สูงอายุ (Ministry of Social Development and Human Security, 2018)

ในภาคเอกชน ควรสร้างความร่วมมือกับภาครัฐเพื่อพิจารณาแนวทางการแก้ไขปัญหที่เกิดจากการจ้างงานแรงงานผู้สูงอายุของสถานประกอบการเอกชนในประเทศไทย สรุปไว้ดังนี้ (Jensantikul, 2021)

- ปัญหาแรงงานผู้สูงอายุในระบบ ได้แก่ ปัญหาการได้รับค่าตอบแทนน้อย (ร้อยละ 59.4) เป็นงานที่ทำแล้วไม่ได้รับการจ้างต่อเนื่อง (ร้อยละ 14.5) การทำงานหนัก (ร้อยละ 14.0) ไม่มีสวัสดิการ (ร้อยละ 4.2)

- ปัญหาแรงงานผู้สูงอายุนอกระบบ ได้แก่ ปัญหาการได้รับค่าตอบแทนน้อย (ร้อยละ 48.5) การทำงานหนัก (ร้อยละ 24.1) งานที่ไม่ได้รับการจ้างที่ต่อเนื่อง (ร้อยละ 13.8) ไม่มีสวัสดิการ (ร้อยละ 6.0) ไม่มีวันหยุด (ร้อยละ 4.9) และทำงานไม่ตรงตามเวลาปกติ (ร้อยละ 1.7)

ดังนั้น กระทรวงการพัฒนาสังคมและความมั่นคงของมนุษย์ ควรมีการติดตามและประเมินผลการเปลี่ยนแปลงของสภาพการทำงานของผู้สูงอายุอย่างต่อเนื่องที่กล่าวมา

4.5 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป

(1) ข้อเสนอแนะสำหรับสำนักงานสถิติแห่งชาติ

ข้อมูลทุติยภูมิที่ใช้ศึกษา มาจากแบบสำรวจประชากรสูงอายุในประเทศไทย พ.ศ. 2564 จัดทำโดยสำนักงานสถิติแห่งชาติ ยังมีบางตัวแปรที่ควรพิจารณาปรับแก้ไข อาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำนายความต้องการทำงานของผู้สูงอายุให้สูงขึ้น นั่นคือ “ตัวแปรสุขภาพร่างกายในระหว่าง 7 วันที่ผ่านมา” ควรปรับแก้ตัวแปรดังกล่าวให้มีระยะเวลาที่ยาวนานขึ้นเป็น 1 เดือน หรือ 1 ปี เพื่อตัวแบบสามารถมองเห็นอิทธิพลด้านสุขภาพร่างกายซึ่งน่าจะส่งผลแบบผกผันต่อความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ ตามผลการวิจัยของ (Phenphong, 2019)

(2) การค้นหาปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจมีนัยสำคัญและใช้ทำนายความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ แต่ยังไม่มีการพิจารณาในบทความนี้ พิจารณาจากตัวแบบพยากรณ์ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุวัยก่อนเกษียณอายุ (อายุเต็ม 55 - 59 ปี) แม้ภาพรวมตัวแบบจะทำนายได้มีความถูกต้อง

สูงร้อยละ 90.3 (Cox & Snell 0.412 Nagelkerke 0.601) อย่างไรก็ตามในกลุ่มผู้สูงอายุ(อายุเต็ม 55 - 59 ปี) ที่ไม่ต้องการทำงาน ตัวแบบสามารถพยากรณ์ได้ค่อนข้างต่ำเพียงร้อยละ 65.5 (ดังตารางที่ 7) ทั้งนี้อาจมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีนัยสำคัญแต่ยังไม่มี การพิจารณาในบทความนี้อาทิ (Phokapunt et al., 2018) ปัจจัยด้านจิตวิทยา (ได้แก่ ด้านแรงจูงใจไม่สัมพันธ์จากลักษณะงาน ความเชื่อในความสามารถของตนเอง ความต้องการทำประโยชน์ต่อสังคม) และปัจจัยส่วนบุคคล (ได้แก่ ผู้สูงอายุสามารถทำงานได้ ผู้สูงอายุใช้เวลาว่างให้เกิดประโยชน์) (Kasemsoet, 2019) ปัจจัยด้านเศรษฐกิจ (ได้แก่ รายจ่ายภาระที่ต้องรับผิดชอบ) ปัจจัยด้านการได้รับคำแนะนำชักจูง (ได้แก่ การได้รับคำเชิญให้ทำงานต่อจากหน่วยงาน การได้รับการสนับสนุนจากบุคคลในครอบครัวให้ทำงานต่อ) ปัจจัยด้านสถานการณ์ในที่ทำงาน (ได้แก่ ความสะดวกสบายในสถานที่ทำงาน ความสะดวกในการเดินทางมาทำงาน ความอิสระในการทำงาน การมีผู้ร่วมงานที่ดี) (Keawsai, 2020) ปัจจัยด้านสุขภาพและการเกื้อหนุน (ได้แก่ ความต้องการมีเพื่อน ความภาคภูมิใจในตนเอง)

(3) เทคนิคการสุ่มตัวอย่างเพื่อการประมาณค่าสัดส่วนความต้องการทำงานของผู้สูงอายุไทย จากการศึกษาพบว่าตัวแปรจังหวัด มีความสัมพันธ์กับความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ (Chi-squared P-value < 0.05) และมีความสัมพันธ์ระดับสูงกว่า 0.5 (Cramer's V Statistics > 0.5) กับตัวแปรภูมิภาค และตัวแปรความหลากหลายทางเศรษฐกิจ ดังนั้นการสุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมกับข้อมูลทุติยภูมิชุดนี้อาจใช้การสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งชั้นภูมิ (Stratified sampling) ตามจังหวัดหรือภูมิภาค เพื่อให้ได้ตัวอย่างผู้สูงอายุที่กระจายดีทั่วประเทศและมีความแม่นยำขึ้นในการประมาณค่าสัดส่วนความต้องการทำงานของผู้สูงอายุไทย

5. บทสรุป

(1) ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ

ผู้สูงอายุตัวอย่างจำนวน 11,988 คน มีความต้องการทำงาน 5,232 คน (ร้อยละ 43.6) ทั้งนี้ ผู้สูงอายุวัยก่อนเกษียณ (อายุเต็ม 55-59 ปี) มีความต้องการทำงาน (ร้อยละ 73.5) มากกว่าผู้สูงอายุวัยเกษียณอายุ (อายุเต็ม ≥ 60 ปี)

(ร้อยละ 32.7) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Chi-squared P-value < 0.001)

(2) ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ

ตัวแปรทุกตัวในทุกด้านที่ศึกษา มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ (Chi-squared P-values < 0.001) ได้แก่ ภูมิภาค จังหวัด เขตที่อยู่อาศัย จำนวนสมาชิกในครัวเรือน สถานภาพการอยู่อาศัยในครัวเรือน เพศ อายุ สถานภาพสมรส จำนวนบุตร บุคคลที่เป็นเจ้าของที่อยู่อาศัย ชั้นปีการศึกษาสูงสุดที่จบ การอ่านออกและเขียนได้ อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา แหล่งรายได้ที่สำคัญที่สุดในการดำรงชีวิต รายได้จากทุกแหล่งเฉลี่ยต่อปี ความเพียงพอของรายได้ การออม ภาวะหนี้สิน สุขภาพร่างกายในระหว่าง 7 วันที่ผ่านมา ความหลากหลายทางเศรษฐกิจ

(3) ตัวแบบการพยากรณ์ความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ

ตัวแบบการถดถอยลอจิสติกที่ใช้ในการพยากรณ์ความต้องการทำงาน (ต้องการ/ไม่ต้องการ) ของผู้สูงอายุ สามารถทำนายได้ถูกต้องภาพรวมร้อยละ 92.3 ด้วยตัวแปรทำนายคือ อาชีพในระหว่าง 12 เดือนที่ผ่านมา (ทำงาน/ไม่ทำงาน) ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบผันตรงกับความต้องการทำงาน ทำให้ตัวแบบนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่ายด้วยตัวแปรทำนายเพียงตัวเดียว สามารถ อธิบายการแปรผันของความต้องการทำงานของผู้สูงอายุ ได้ 0.596 (Cox & Snell) และ 0.799 (Nagelkerke)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ คุณสุกัญญา ห้วยหงษ์ทอง กลุ่มบริการ และเผยแพร่ข้อมูล สำนักงานสถิติแห่งชาติ ซึ่งเป็นผู้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลจากโครงการสำรวจประชากรผู้สูงอายุในประเทศไทยปี พ.ศ. 2564

เอกสารอ้างอิง

- Chaemchan, C., & Charasit, S. (2020). *Situations and trend of Thai Older Persons' Labour Force Participation: Analyses from Nationally Representative Household Surveys*. Institute for Population and Social Research, Mahidol University.
- Chuanchorn, P., Chanthuek, Teerawat, & Siri Wong, P. (2018). Job Characteristics Suitable for Elderly Workers. *Journal of Humanities and Social Sciences Valaya Alongkorn*, 13(1), 107-116.

- Chuenwattana, W., & Biadnok, C. (2011). *The Awareness and Preparation for Entering Old Age among the Pre-Elderly Population in Thailand. Project to develop a center of excellence based on the distinctive identity of Bansomdejchaopraya Rajabhat University*. Retrieved March 1, 2024, from <https://identity.bsru.ac.th/archives/2800> (in Thai)
- Department of Provincial Administration. (2024). *Statistical data and key indicators. Retrieved from Population from registration, male, female and household, classified by region and province 2021-2023*: https://www.nso.go.th/nsoweb/downloadFile/stat_impt/gG/file_xls_th
- Economic Statistics Analysis and Forecasting Group. (2021). *Household income and income distribution 2021, provincial level. Statistics Forecasting Division, National Statistical Office, Ministry of Digital Economy and Society*. Retrieved March 1, 2024, from https://www.nso.go.th/public/e-book/Analytical-Reports/Income_2564/225/ (in Thai)
- Jensantikul, N. (2021). Problems and Models of Hiring Elderly Workers of the Private Establishments in Thailand. *School of Administrative Studies Academic Journal*, 4(1), 50-66.
- Kasemsoet, S. (2019). *Factors that promote continued employment after retirement* [Master's Degree]. University of the Thai Chamber of Commerce. (in Thai)
- Keawsai, W. (2020). *Factors affecting demand for working extension after retirement of senior civil servants* [Master's thesis, Silpakorn University], Silpakorn University. <http://ithesis-ir.su.ac.th/dspace/bitstream/123456789/3070/1/61602349.pdf> (in Thai)
- Ministry of Social Development and Human Security. (2009). *National Elderly Plan No. 2 (2002-2021), First Revision 2009*. Retrieved March 1, 2024, from https://www.dop.go.th/download/laws/law_th_20152309144546_1.pdf (in Thai)
- Ministry of Social Development and Human Security. (2010). *Senior Citizens Act B.E. 2003 (Amended B.E. 2010)*. Retrieved March 1, 2024, from https://www.dop.go.th/download/laws/regulation_th_20152509163042_1.pdf (in Thai)
- Ministry of Social Development and Human Security. (2018). *National Elderly Plan No. 2 (2002-2021), second Revision 2018*. Retrieved March 1, 2024, from https://www.dop.go.th/download/laws/th1573721522-816_0.pdf (in Thai)
- National Statistical Office. (2021). *Survey of Elderly in Thailand 2021*. Retrieved March 1, 2024, from <https://nsodw.nso.go.th/dwportal/Item.aspx?p=+gsaDgQv4TQFrLJCEbyvEQ==> (in Thai)
- National Statistical Office. (2021). *Survey of the Elderly Population in Thailand 2021, Statistical Tables by Province. National Statistical Office*. Retrieved November 11, 2024, from https://www.nso.go.th/nsoweb/storage/survey_detail/2023/20230731135832_28841.pdf (in Thai)
- National Statistical Office. (2022). *The 2021 Survey of The Older Persons in Thailand. National Statistical Office, Ministry of Digital Economy and Society*. Retrieved March 1, 2024, from https://www.dop.go.th/download/knowledge/th1687612748-2406_0.pdf (in Thai)
- National Statistical Office. (2024). *Statistical data and key indicators. Number, percentage and rate of elderly population classified by*

- gender, province and region 2021. Retrieved August 20, 2024, from https://www.nso.go.th/nsoweb/downloadFile/stat_impt/IM/file_xls_th
- National Statistical Office. (2024). *Statistical Data and Key Indicators: Poverty Line (Expenditure) Classified by Region and Province 2012 - 2023*. Retrieved November 11, 2024, from https://www.nso.go.th/nsoweb/nso/statistics_and_indicators?impt_branch=309
- Phenphong, S. (2019). Labor Supply in Government Sector After Retirement. *Journal of Management Science, Chiang Rai Rajabhat University*, 14(2), 42-63.
- Phokapunt, K., Sangrugs, N., & Thamma-apipon, S. (2018). Factors Impact on the Intention of Working After Retirement of Bangkok Metropolitan Administrations Officials. *Veridian E-Journal Silpakorn University*, 11(1). <https://he02.tci-thaijo.org/index.php/Veridian-E-Journal/article/view/118390>
- Phromphak, C. (2013). Aging society in Thailand. Research and Information Group. *Academic Office, Office of the Senate Secretariat*, 3(16), 1-23. https://library.senate.go.th/document/Ext6078/6078440_0002.PDF (in Thai)
- Poungchieng, T. (2012). *Working Needs of Thai Elderly in 2007* [Master's Thesis]. Chulalongkorn University.
- Tunlayanisaka, C. (2009). *Factors Affecting Post-Retirement Adaptation of the Elderly in Phattalung Province*. [Master's Degree]. Prince of Songkla University. <https://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2010/5822/1/307872.pdf> (in Thai)
- Urawong, K., Ruangmuang, Y., Sukanan, W., Kunsri, N., & Pholpha, K. (2024). A predictive model for the work needs of the elderly in Songkhla and Khon Kaen, 2017. *Journal of Science and Technology, Mahasarakham University*, 43(2), 131-140.
- Wanichbancha, K. (2008). *Advanced Statistical Analysis with SPSS for Windows*. 6th ed., Chulalongkorn University. (in Thai)
- Wanitchakham, A. (2019). Preparation for Aging Society: A Case Study of Sai Mai District, Bangkok. *Journal of Social science and humanities Association of Private Higher Education Institutions of Thailand*, 25(1), 164-179.
- Yingrattanasuk, P., Chetkiatkul, P., Teskatuk, A., & Kosayawat, S. (2015). Factors related to the work ability of the elderly in Saen Suk Municipality Chonburi Province. *Journal of Public Health*, 45(2), 184-196.

ตัวแบบพยากรณ์มูลค่าการส่งออกพลาสติกหรือแช่เย็นของประเทศไทย

วรางคณา เรียนสุทธิ^{1*}

¹สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง 93210 ประเทศไทย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล: warang27@gmail.com DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.01.009

รับเมื่อ 7 พฤศจิกายน 2566 แก้ไขเมื่อ 31 ธันวาคม 2567 ตอรับเมื่อ 21 มกราคม 2568

บทคัดย่อ

การศึกษารังนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างตัวแบบพยากรณ์มูลค่าการส่งออกพลาสติกหรือแช่เย็นของประเทศไทยด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้ข้อมูลค่าเฉลี่ยรายเดือนจากเว็บไซต์ของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ตั้งแต่เดือนมกราคม 2554 ถึงเดือนธันวาคม 2564 จำนวน 132 เดือน ผู้วิจัยได้แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2554 ถึงเดือนธันวาคม 2563 จำนวน 120 เดือน สำหรับการสร้างตัวแบบพยากรณ์ ด้วยวิธีการทางสถิติทั้งหมด 7 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแฉก วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ ข้อมูลชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม 2564 จำนวน 12 เดือน นำมาใช้ในการเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ด้วยเกณฑ์ร้อยละค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยและเกณฑ์รากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด ผลการศึกษาพบว่า วิธีที่มีความแม่นยำมากที่สุด คือ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแฉก

คำสำคัญ: พลา, การส่งออก, การพยากรณ์, บ็อกซ์-เจนกินส์, การทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลัง

Model for Forecasting the Value of Fresh or Chilled Fish Exports in Thailand

Warangkhan Riansut^{1*}

¹Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science, Thaksin University, Pa Phayom, Phatthalung, 93210 Thailand

* Corresponding Author, E-mail: warang27@gmail.com DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2025.01.009

Received 7 November 2023; Revised 31 December 2024; Accepted 21 January 2025

ABSTRACT

This study aims to construct the appropriate forecasting model for the export values of fresh or chilled fish in Thailand via statistical methods. The monthly average data gathered from the Office of Agricultural Economics website from January 2011 to December 2021, 132 months, were divided into 2 datasets. The first dataset, which consisted of 120 months from January 2011 to December 2020, was used for constructing the forecasting models via the use of 7 statistical methods, namely, Box-Jenkins method, Holt's exponential smoothing method, Brown's exponential smoothing method, damped trend exponential smoothing method, simple seasonal exponential smoothing method, Winters' additive exponential smoothing method, and Winters' multiplicative exponential smoothing method. The second dataset, which consisted of 12 months from January to December 2021, was used to compare the accuracy of the forecasting model via the lowest mean absolute percentage error and root mean square error. The results indicated the most accurate method was the damped trend exponential smoothing method.

KEYWORDS: Fish, Export, Forecast, Box-jenkins, Exponential smoothing

1. บทนำ

สถานการณ์การค้ำระหว่างประเทศภายใต้สถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา -19 ในปี 2564 พบว่า ท่ามกลางวิกฤตการณ์แพร่ระบาดดังกล่าว แม้ว่าจะมีผลกระทบต่อเศรษฐกิจโลก แต่สถิติภาพรวมการส่งออกสินค้าเกษตรของไทยไปยังประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก ในช่วง 11 เดือนของปี 2564 (มกราคม – พฤศจิกายน 2564) ยังคงแข็งแกร่ง โดยภาพรวมการค้าไทยกับทั่วโลก คิดเป็นมูลค่า 1,273,761 ล้านบาท เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับช่วงเดียวกันของปี 2563 ที่มีมูลค่า 1,098,475 ล้านบาท หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 15.96 (Office of Agricultural Economics, 2022a) อย่างไรก็ตาม มูลค่าการส่งออกยังคงมีความผันผวนเนื่องจากความผันแปรตามฤดูกาล จึงนำมาสู่วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อสร้างตัวแบบสำหรับการพยากรณ์มูลค่าการส่งออกปลาสดหรือแช่เย็นของประเทศไทยในอนาคตว่าเป็นอย่างไร ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่ามีการศึกษาพยากรณ์เกี่ยวกับมูลค่าการส่งออก เช่น Rodbang (2006) ได้ศึกษาการพยากรณ์มูลค่าการส่งออกปลาหมึกกระป๋องโดยวิธีอาร์มา (autoregressive integrated moving average: ARIMA) Keerativibool (2015) ได้ศึกษาการพยากรณ์มูลค่าการส่งออกกุ้งสดแช่แข็งของประเทศไทย และ Riansut (2020) ได้ศึกษาการพยากรณ์มูลค่าการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ แต่ยังไม่เคยมีการศึกษาการพยากรณ์มูลค่าการส่งออกปลาสดหรือแช่เย็นในประเทศไทย ดังนั้น การศึกษานี้ ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะสร้างตัวแบบพยากรณ์มูลค่าการส่งออกปลาสดหรือแช่เย็นด้วยวิธีการทางสถิติ โดยผลการวิจัยที่ได้จะทำให้ทราบการเคลื่อนไหวแนวโน้ม และฤดูกาลของมูลค่าการส่งออกปลาสดหรือแช่เย็น รวมทั้งนำตัวแบบพยากรณ์ที่ได้ไปพยากรณ์มูลค่าการส่งออกในอนาคต เพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจวางแผนการผลิตและการส่งออกสำหรับกลุ่มผู้ผลิตและส่งออกปลาสดหรือแช่เย็นให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทั้งยังนำข้อมูลไปเป็นแนวทางในการกำหนดนโยบายในการส่งเสริมการลงทุน และการตลาดของปลาสดหรือแช่เย็นของภาครัฐได้อีกด้วย

2. วัสดุและวิธีการ

2.1 การรวบรวมข้อมูล

รวบรวมข้อมูลมูลค่าการส่งออกปลาสดหรือแช่เย็นของประเทศไทย (บาท) โดยใช้ค่าเฉลี่ยต่อเดือนจากเว็บไซต์ของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (Office of Agricultural Economics, 2022b) ตั้งแต่เดือนมกราคม 2554 ถึงเดือนธันวาคม 2564 จำนวน 132 เดือน หลังจากนั้นแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 คือ ข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม 2554 ถึงเดือนธันวาคม 2563 จำนวน 120 เดือน สำหรับการสร้างตัวแบบพยากรณ์ ชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม 2564 จำนวน 12 เดือน สำหรับการเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ด้วยเกณฑ์ร้อยละ ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (mean absolute percentage error: MAPE) และเกณฑ์รากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square error: RMSE) ที่ต่ำที่สุด

2.2 การตรวจสอบแนวโน้ม การตรวจสอบอิทธิพลของฤดูกาล และการสร้างตัวแบบพยากรณ์

ตรวจสอบแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาลของอนุกรมเวลามูลค่าการส่งออกปลาสดหรือแช่เย็นชุดที่ 1 ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวโดยลำดับที่ของครัสคัล-วอลลิส (Kruskal-Wallis's one-way analysis of variance by rank) โดยการตรวจสอบแนวโน้มจะเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวจำแนกข้อมูลเป็นรายปี เพื่อพิจารณาว่าอนุกรมเวลาแต่ละปีมีค่ามัธยฐานแตกต่างกันหรือไม่ ถ้าพบความแตกต่างจะสรุปว่าอนุกรมเวลามีแนวโน้ม แต่ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าเป็นแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลง ต้องพิจารณาเพิ่มเติมจากกราฟของอนุกรมเวลาเทียบกับเวลา ขณะที่การตรวจสอบอิทธิพลของฤดูกาลจะเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวจำแนกข้อมูลเป็นรายเดือน (ข้อมูลหลังจากกำจัดแนวโน้มออกแล้ว) เพื่อพิจารณาว่าอนุกรมเวลาแต่ละเดือนมีค่ามัธยฐานแตกต่างกันหรือไม่ ถ้าพบความแตกต่างจะสรุปว่าอนุกรมเวลามีอิทธิพลของฤดูกาล ถ้าผลการตรวจสอบพบว่า อนุกรมเวลามีเฉพาะแนวโน้ม วิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสม ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ที่มีตัวแบบอาร์มา วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบตามอนุกรมเวลามีเฉพาะอิทธิพลของฤดูกาล วิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสม ได้แก่ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย และอนุกรมเวลามีทั้งแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล วิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสม ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจน

ตารางที่ 1 ตัวแบบพยากรณ์

วิธีที่	วิธีพยากรณ์	ตัวแบบพยากรณ์	ลักษณะอนุกรมเวลา
1	บ็อกซ์-เจนกินส์	SARIMA(p, d, q)(P, D, Q) _s : $\hat{\phi}_p(B)\hat{\phi}_p(B^s)(1-B)^d(1-B^s)^D\hat{Y}_t = \hat{\delta} + \hat{\theta}_q(B)\hat{\theta}_q(B^s)\epsilon_t$	มีแนวโน้มและฤดูกาล
2	โฮลต์	$\hat{Y}_{t+m} = a_t + b_t(m)$ โดยที่ $a_t = \alpha Y_t + (1-\alpha)(a_{t-1} + b_{t-1})$, $b_t = \gamma(a_t - a_{t-1}) + (1-\gamma)b_{t-1}$	มีเพียงแนวโน้ม
3	บราวน์	$\hat{Y}_{t+m} = a_t + b_t\left[(m-1) + \frac{1}{\alpha}\right]$ โดยที่ $a_t = \alpha Y_t + (1-\alpha)a_{t-1}$, $b_t = \alpha(a_t - a_{t-1}) + (1-\alpha)b_{t-1}$	มีเพียงแนวโน้ม
4	แดม	$\hat{Y}_{t+m} = a_t + b_t \sum_{i=1}^m \phi^i$ โดยที่ $a_t = \alpha Y_t + (1-\alpha)(a_{t-1} + \phi b_{t-1})$, $b_t = \gamma(a_t - a_{t-1}) + (1-\gamma)\phi b_{t-1}$	มีเพียงแนวโน้ม
5	ฤดูกาลอย่างง่าย	$\hat{Y}_t = a_t + \hat{S}_t$ โดยที่ $a_t = \alpha(Y_t - \hat{S}_{t-s}) + (1-\alpha)a_{t-1}$, $\hat{S}_t = \delta(Y_t - a_t) + (1-\delta)\hat{S}_{t-s}$	มีเพียงฤดูกาล
6	วินเทอร์แบบบวก	$\hat{Y}_{t+m} = (a_t + b_t m) + \hat{S}_t$ โดยที่ $a_t = \alpha(Y_t - \hat{S}_{t-s}) + (1-\alpha)(a_{t-1} + b_{t-1})$ $, b_t = \gamma(a_t - a_{t-1}) + (1-\gamma)b_{t-1}$, $\hat{S}_t = \delta(Y_t - a_t) + (1-\delta)\hat{S}_{t-s}$	มีแนวโน้มและฤดูกาล
7	วินเทอร์แบบคูณ	$\hat{Y}_{t+m} = (a_t + b_t m)\hat{S}_t$ โดยที่ $a_t = \alpha \frac{Y_t}{\hat{S}_{t-s}} + (1-\alpha)(a_{t-1} + b_{t-1})$, $b_t = \gamma(a_t - a_{t-1}) + (1-\gamma)b_{t-1}$, $\hat{S}_t = \delta \frac{Y_t}{a_t} + (1-\delta)\hat{S}_{t-s}$	มีแนวโน้มและฤดูกาล

กินส์ ที่มีตัวแบบซาร์มา (seasonal autoregressive integrated moving average: SARIMA) วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ (Box et al., 1994; Ket-iam, 2005; Manmin, 2006) จากผลการตรวจสอบแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาลในผลการวิจัยแสดงว่ามูลค่าการส่งออกพลาสติกหรือแช่เย็นมีทั้งแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาวิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีการพยากรณ์ทางสถิติที่มีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาทุกรูปแบบ เพื่อให้ครอบคลุมตัวแบบพยากรณ์ที่ดีที่สุด (ตารางที่ 1) โดยพิจารณาค่า MAPE และ RMSE ของข้อมูลชุดที่ 1 ในการคัดเลือกวิธีที่จะนำมาพยากรณ์ และพิจารณาค่า MAPE และ RMSE ของข้อมูลชุดที่ 2 ในการเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ ซึ่งเกณฑ์ MAPE และ RMSE จะพิจารณาความแตกต่างระหว่างข้อมูลจริงและค่าพยากรณ์ ผู้วิจัยเชื่อว่าจะมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการตรวจสอบแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล เนื่องจากการตรวจสอบแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาลจะพิจารณาข้อมูลทั้งหมด โดยบางช่วงเวลาข้อมูลอาจมีแนวโน้มหรือมีอิทธิพล

ของฤดูกาล แต่เมื่อตรวจสอบข้อมูลทั้งหมดอาจตรวจไม่พบแนวโน้ม/อิทธิพลของฤดูกาลได้

ตารางที่ 1 มีความหมายของสัญลักษณ์ต่าง ๆ ดังนี้ $\hat{Y}_t$ และ $\hat{Y}_{t+m}$ แทนค่าพยากรณ์ ณ เวลา t และเวลา t + m ตามลำดับ โดยที่ m แทนจำนวนช่วงเวลาที่ต้องการพยากรณ์ไปข้างหน้า

$\hat{\delta} = \hat{\mu}\hat{\phi}_p(B)\hat{\phi}_p(B^s)$ แทนค่าคงตัว (constant) โดยที่แทนค่าเฉลี่ยของอนุกรมเวลาที่คงที่ (stationary)

$\hat{\phi}_p(B) = 1 - \hat{\phi}_1 B - \hat{\phi}_2 B^2 - \dots - \hat{\phi}_p B^p$ แทนตัวดำเนินการถดถอยในตัวอันดับที่ p กรณีไม่มีฤดูกาล (non-seasonal autoregressive operator of order p: AR(p))

$\hat{\Phi}_p(B^s) = 1 - \hat{\phi}_1 B^s - \hat{\phi}_2 B^{2s} - \dots - \hat{\phi}_p B^{ps}$ แทนตัวดำเนินการถดถอยในตัวอันดับที่ p กรณีมีฤดูกาล (seasonal autoregressive operator of order P: SAR(P))

$\hat{\theta}_q(B) = 1 - \hat{\theta}_1 B - \hat{\theta}_2 B^2 - \dots - \hat{\theta}_q B^q$ แทนตัวดำเนินการเฉลี่ยเคลื่อนที่อันดับที่ q กรณีไม่มีฤดูกาล (non-seasonal moving average operator of order q: MA(q))

$\hat{\Theta}_Q(B^s) = 1 - \hat{\theta}_1 B^s - \hat{\theta}_2 B^{2s} - \dots - \hat{\theta}_Q B^{Qs}$ แทนตัวดำเนินการเฉลี่ยเคลื่อนที่อันดับที่ Q กรณีมีฤดูกาล (seasonal moving average operator of order Q: SMA(Q))

t แทนช่วงเวลา ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n_1 โดยที่ n_1 แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาชุดที่ 1 ($n_1 = 120$)

s แทนจำนวนฤดูกาล ซึ่งอนุกรมเวลามูลค่าการส่งออกพลาสติกหรือแช่เย็นเป็นข้อมูลรายเดือน ดังนั้น $s = 12$

d และ D แทนลำดับที่ของการหาผลต่างและผลต่างฤดูกาล ตามลำดับ

B แทนตัวดำเนินการถอยหลัง (backward operator) โดยที่

a_t และ b_t แทนค่าประมาณระยะตัดแกน Y และความชันของแนวโน้ม ณ เวลา t ตามลำดับ

α , γ , ϕ และ δ แทนค่าคงตัวการทำให้เรียบ โดยที่ $0 < \alpha < 1$, $0 < \gamma < 1$, $0 < \phi < 1$ และ $0 < \delta < 1$

2.3 การตรวจสอบข้อสมมุติ

ตรวจสอบข้อสมมุติ (assumption) ของตัวแบบพยากรณ์ คือ อนุกรมเวลาของค่าคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์มีการแจกแจงปกติ ตรวจสอบโดยใช้การทดสอบคอลโมโกรอฟ-สมิรโนฟ (Kolmogorov-Smirnov test: KS test) มีการเคลื่อนไหวเป็นอิสระกัน ตรวจสอบโดยใช้การทดสอบรันส์ (runs test) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ตรวจสอบโดยใช้การทดสอบที (t-test) และมีความแปรปรวนเท่ากันทุกช่วงเวลา ตรวจสอบโดยใช้การทดสอบของเลวีเนียนใต้การใช้มัธยฐาน (Levene's test based on median) หากพบว่าข้อสมมุติข้อใดข้อหนึ่งไม่เป็นจริงจะสรุปว่าตัวแบบพยากรณ์ไม่เหมาะสม และไม่สมควรนำไปใช้ในการพยากรณ์ต่อไป

2.4 การเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์

เปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ โดยการเปรียบเทียบมูลค่าการส่งออกพลาสติกหรือแช่เย็นของข้อมูลชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม 2564 จำนวน 12 เดือน ($n_2 = 12$) กับค่าพยากรณ์ เพื่อคำนวณค่า MAPE และ RMSE โดยตัวแบบพยากรณ์ที่ให้ค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด จัดเป็นตัวแบบที่มีความแม่นยำมากที่สุด เนื่องจากให้ค่าพยากรณ์ที่มีความแตกต่างกับข้อมูลจริงน้อยที่สุด สูตร MAPE และ RMSE แสดงดังนี้ (Ket-iam, 2005)

$$MAPE = \frac{100}{n_2} \sum_{i=1}^n \left| \frac{e_i}{Y_i} \right| \quad \text{และ} \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^n e_i^2}$$

เมื่อ $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$ แทนค่าคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ ณ เวลา t

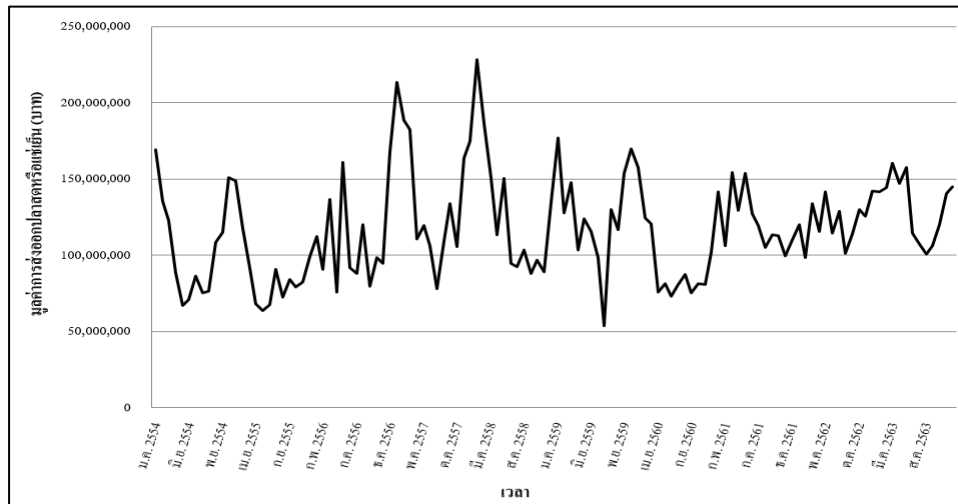
Y_i และ $\hat{Y}_i$ แทนอนุกรมเวลาและค่าพยากรณ์ ณ เวลา t ตามลำดับ

3. ผลลัพธ์

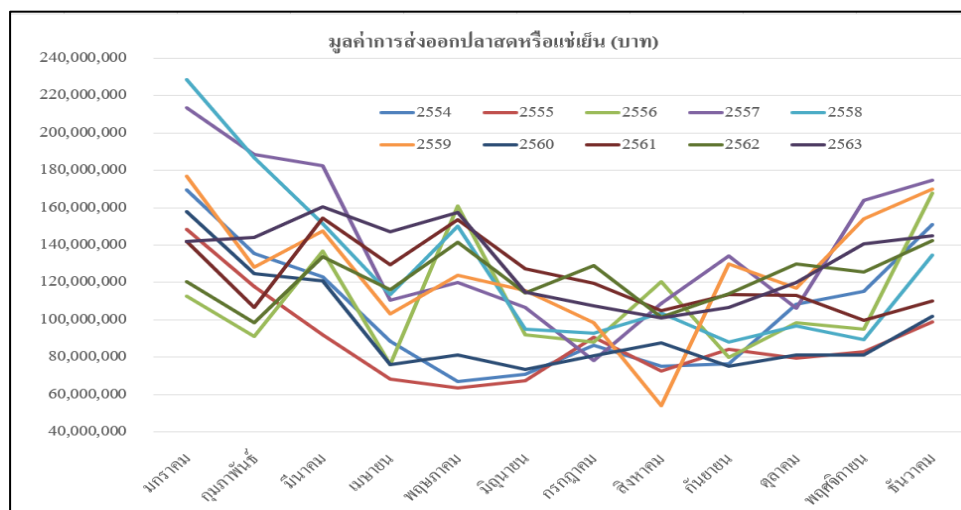
3.1 ผลการตรวจสอบข้อมูลและการสร้างตัวแบบพยากรณ์

ผลการพิจารณาลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลามูลค่าการส่งออกพลาสติกหรือแช่เย็นชุดที่ 1 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2554 ถึงเดือนธันวาคม 2563 จำนวน 120 เดือน พบว่า มูลค่าการส่งออกพลาสติกหรือแช่เย็นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและมีอิทธิพลของฤดูกาล (รูปที่ 1) โดยมูลค่าการส่งออกจะสูงในช่วงต้นและปลายปี ขณะที่กลางปีจะมีมูลค่าการส่งออกต่ำ (รูปที่ 2) ผลการทดสอบสมมุติฐานเพื่อตรวจสอบแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล พบว่า มูลค่าการส่งออกมีค่ามัธยฐานในแต่ละปีแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($t = 29.974$, $p\text{-value} = 0.0004$) นั่นคือ อนุกรมเวลามีแนวโน้ม และมูลค่าการส่งออกหลังจากกำจัดแนวโน้มมีค่ามัธยฐานในแต่ละเดือนแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($t = 47.066$, $p\text{-value} < 0.0001$) นั่นคือ อนุกรมเวลามีอิทธิพลของฤดูกาล ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ใช้วิธีการกำจัดแนวโน้มออกด้วยการหารเนื่องจากอนุกรมเวลามีการเคลื่อนไหวหรือมีการแกว่งตัวไม่คงที่เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ ในช่วงปี 2561 – 2563 มูลค่าการส่งออกมีการแกว่งตัวต่ำกว่าช่วงปี 2554 – 2560 (รูปที่ 1)

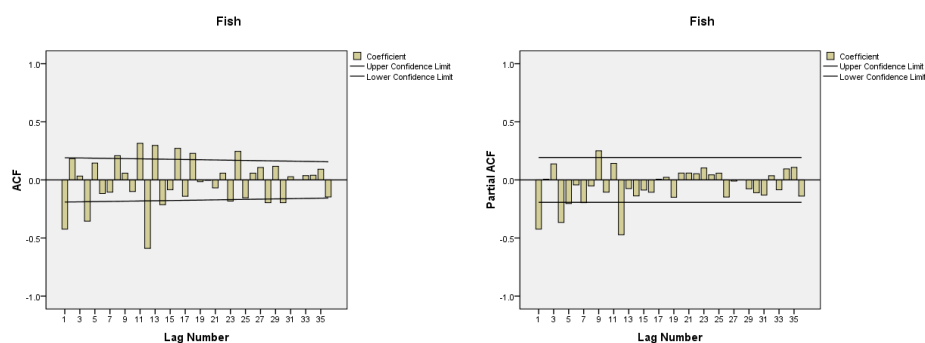
ผลการพิจารณาลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลามูลค่าการส่งออกพลาสติกหรือแช่เย็นที่พบว่า อนุกรมเวลามีทั้งแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล ดังนั้นวิธีการพยากรณ์ที่มีความเหมาะสม คือ วิธีบีโอกซ์-เจนกินส์ที่มีตัวแบบ SARIMA(p, d, q)(P, D, Q), วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่า MAPE และ RMSE ของข้อมูลชุดที่ 1 พบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย ซึ่งเหมาะสมกับอนุกรมเวลามีเฉพาะอิทธิพลของฤดูกาล มีค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด (MAPE = 14.9950, RMSE = 20,897,637) (ตารางที่ 2) ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาวิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาทุกรูปแบบ เพื่อให้ครอบคลุมตัวแบบพยากรณ์ที่ดีที่สุด



รูปที่ 1 การเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลามูลค่าการส่งออกพลาสติกหรือแะย่นตั้งแต่เดือนมกราคม 2554 ถึงเดือนธันวาคม 2563



รูปที่ 2 การเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลามูลค่าการส่งออกพลาสติกหรือแะย่นปี 2554 – 2563 เปรียบเทียบรายเดือน



รูปที่ 3 ACF และ PACF ของอนุกรมเวลาที่แปลงข้อมูลด้วย $d = 1$ และ $D = 1$

ผลการตรวจสอบที่พบว่า อนุกรมเวลามูลค่าการส่งออกพลาสติกหรือแะย่นมีทั้งแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล จึงแปลงข้อมูลด้วยการหาผลต่างลำดับที่ 1 ($d = 1$) เพื่อกำจัดแนวโน้ม และหาผลต่างฤดูกาลลำดับที่ 1 ($D = 1$) เพื่อกำจัดอิทธิพลของฤดูกาล แล้วสร้างกราฟฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัวเอง (autocorrelation function: ACF) และกราฟฟังก์ชัน

สหสัมพันธ์ในตัวเองบางส่วน (partial auto-correlation function: PACF) เพื่อสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ พบว่า อนุกรมเวลาหลังจากการแปลงข้อมูลมีลักษณะคงที่ (รูปที่ 3) จึงกำหนดตัวแบบพยากรณ์ที่เป็นไปได้เริ่มต้น คือ ตัวแบบ SARIMA(2, 1, 2)(1, 1, 2)₁₂ ผลการคัดเลือกตัวแบบให้เหลือเฉพาะพารามิเตอร์ที่มี

ตารางที่ 2 MAPE และ RMSE ของข้อมูลชุดที่ 1

วิธีพยากรณ์	MAPE	RMSE
บ็อกซ์-เจนกินส์	15.2154	23,848,983
โฮลต์	19.3544	28,141,401
บราวน	21.4162	31,283,613
แดม	19.2017	28,001,718
ฤดูกาลอย่างง่าย	14.9950	20,897,637
วินเทอร์แบบบวก	15.0305	20,903,638
วินเทอร์แบบคูณ	15.7558	22,868,660

ตัวหนา หมายถึง ค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด

ตารางที่ 3 ผลการสร้างตัวแบบพยากรณ์

วิธีที่	วิธีพยากรณ์	ตัวแบบพยากรณ์
1	บ็อกซ์-เจนกินส์	$\hat{Y}_t = 0.68697(Y_{t-1} - Y_{t-13}) + 0.31303(Y_{t-2} - Y_{t-14}) + Y_{t-12} - 0.83508e_{t-12}$ โดยที่ Y_{t-j} แทนอนุกรมเวลา ณ เวลา $t-j$ และ e_{t-12} แทนค่าคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ ณ เวลา $t-12$
2	โฮลต์	$\hat{Y}_{t+m} = 143,166,070.72835 + 174,750.13313(m)$
3	บราวน	$\hat{Y}_{t+m} = 135,218,956.63088 + 6,751,883.31270 \left[(m-1) + \frac{1}{0.46822} \right]$
4	แดม	$\hat{Y}_{t+m} = 141,418,959.50412 + 10,476,480.90980 \sum_{i=1}^m (0.30040)^i$
5	ฤดูกาลอย่างง่าย	$\hat{Y}_t = 127,471,782.79413 + \hat{S}_t$
6	วินเทอร์แบบบวก	$\hat{Y}_{t+m} = (128,586,498.69519 + 202,622.60464m) + \hat{S}_t$
7	วินเทอร์แบบคูณ	$\hat{Y}_{t+m} = (134,957,897.44357 + 197,504.98813m)\hat{S}_t$

โดยที่ $m = 1$ แทนเดือนมกราคม 2564 และ $\hat{S}_t$ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ดัชนีฤดูกาลจากวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ

เดือน	$\hat{S}_t$ ของวิธีฤดูกาลอย่างง่าย	$\hat{S}_t$ ของวิธีวินเทอร์แบบบวก	$\hat{S}_t$ ของวิธีวินเทอร์แบบคูณ
มกราคม	44,011,308.07	45,125,728.07	1.37032
กุมภาพันธ์	15,027,549.62	15,939,662.85	1.13450
มีนาคม	23,110,371.19	23,819,879.89	1.20509
เมษายน	-14,257,743.82	-13,750,929.48	0.84064
พฤษภาคม	4,847,630.38	5,151,723.45	0.92019
มิถุนายน	-19,388,637.26	-19,287,272.99	0.73615
กรกฎาคม	-20,074,720.72	-20,176,087.22	0.74315
สิงหาคม	-24,217,559.92	-24,521,657.02	0.71556
กันยายน	-16,969,796.55	-17,476,622.97	0.79601
ตุลาคม	-12,078,879.02	-12,788,430.05	0.85666
พฤศจิกายน	-2,454,504.79	-3,366,762.35	0.92729
ธันวาคม	22,444,849.91	21,329,947.55	1.14687

ตัวหนา หมายถึง มูลค่าการส่งออกพลาสติกหรือแช่เย็นสูงกว่าช่วงเดือนอื่น ๆ

นัยสำคัญที่ระดับ 0.05 พบว่า ตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมคือ ตัวแบบ SARIMA(1, 1, 0)(0, 1, 1)₁₂ ไม่มีพจน์ค่าคงตัว เมื่อแทนค่าประมาณพารามิเตอร์จากโปรแกรม SPSS จะได้ตัวแบบพยากรณ์ของแต่ละวิธีการพยากรณ์ (ตารางที่ 3) และค่าดัชนีฤดูกาล (ตารางที่ 4) ซึ่งสามารถอธิบายความหมายของค่าดัชนีฤดูกาลได้ดังนี้ จากวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายและวิธีการทำให้เรียบ

ด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก พบว่า มูลค่าการส่งออกพลาสติกหรือแช่เย็นจะสูงในช่วงเดือนมกราคมถึงมีนาคม พฤษภาคม และธันวาคม เนื่องจากมีค่าดัชนีฤดูกาลมากกว่า 0 และจากวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ พบว่า มูลค่าการส่งออกพลาสติกหรือแช่เย็นจะสูงในช่วงเดือนมกราคมถึงมีนาคม และธันวาคม เนื่องจากมีค่าดัชนีฤดูกาลมากกว่า 1

ตารางที่ 5 ผลการตรวจสอบข้อสมมุติของตัวแบบพยากรณ์

วิธีที่	วิธีพยากรณ์	KS test	p-value	Runs test	p-value	t-test	p-value	Levene statistic	p-value
1	บ็อกซ์-เจนกินส์	0.728	0.664	-0.485	0.628	0.275	0.784	0.714	0.723
2	โพลต์	0.548	0.925	0.733	0.463	-0.159	0.874	1.115	0.358
3	บรวาน	0.665	0.768	0.000	1.000	0.331	0.741	1.089	0.379
4	แดม	0.621	0.835	0.733	0.463	-0.052	0.959	1.194	0.302
5	ฤดูกาลอย่างง่าย	0.793	0.556	-1.283	0.199	0.035	0.972	1.272	0.252
6	วินเทอร์แบบบวก	0.788	0.564	-1.283	0.199	-0.101	0.920	1.272	0.252
7	วินเทอร์แบบคูณ	0.917	0.370	-3.117	0.002*	-0.129	0.898	1.272	0.252

* หมายถึง มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำในการพยากรณ์ข้อมูลชุดที่ 2

เวลา	มูลค่าการส่งออก	บ็อกซ์-เจนกินส์	โพลต์	บรวาน	แดม	ฤดูกาลอย่างง่าย	วินเทอร์แบบบวก
ม.ค. 2564	154,471,058	170,379,290	143,340,821	149,639,267	144,566,130	171,483,091	173,914,849
ก.พ. 2564	148,740,462	142,199,999	143,515,571	156,391,150	145,511,550	142,499,332	144,931,407
มี.ค. 2564	168,051,375	155,641,310	143,690,321	163,143,033	145,795,557	150,582,154	153,014,246
เม.ย. 2564	155,767,574	122,185,939	143,865,071	169,894,917	145,880,874	113,214,039	115,646,060
พ.ค. 2564	129,316,938	141,254,630	144,039,821	176,646,800	145,906,504	132,319,413	134,751,335
มิ.ย. 2564	159,799,646	115,071,716	144,214,572	183,398,683	145,914,203	108,083,146	110,514,961
ก.ค. 2564	146,347,024	113,995,525	144,389,322	190,150,567	145,916,516	107,397,062	109,828,770
ส.ค. 2564	178,131,457	107,014,566	144,564,072	196,902,450	145,917,211	103,254,223	105,685,823
ก.ย. 2564	142,926,431	115,393,026	144,738,822	203,654,333	145,917,419	110,501,986	112,933,479
ต.ค. 2564	147,824,776	121,107,983	144,913,572	210,406,216	145,917,482	115,392,904	117,824,295
พ.ย. 2564	153,973,629	129,809,917	145,088,322	217,158,100	145,917,501	125,017,278	127,448,585
ธ.ค. 2564	168,096,191	150,756,407	145,263,072	223,909,983	145,917,506	149,916,633	152,347,917
MAPE		17.1864	<u>8.0639</u>	22.5968	7.4899	19.2087	18.1996
RMSE		31,860,819	<u>16,043,254</u>	40,911,954	15,212,229	35,967,331	34,180,987

ตัวหนา หมายถึง ค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด

ขีดเส้นใต้ หมายถึง ค่า MAPE และ RMSE ต่ำเป็นอันดับที่ 2

3.2 ผลการตรวจสอบข้อสมมุติ

ผลการตรวจสอบข้อสมมุติของตัวแบบพยากรณ์ พบว่าตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้น 6 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโพลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบรวาน วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดม วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก มีข้อสมมุติเป็นจริงทุกข้อที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กล่าวคือ อนุกรมเวลาของค่าตลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์มีการแจกแจงปกติ เคลื่อนไหวเป็นอิสระกัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนเท่ากันทุกช่วงเวลา ขณะที่วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ มีการเคลื่อนไหวไม่เป็นอิสระกัน ($p\text{-value} = 0.002$) นั่นคือตัวแบบพยากรณ์ของวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณไม่เหมาะสมและไม่ควรนำไปใช้ในการพยากรณ์ (ตารางที่ 5) ดังนั้นการศึกษาค้างนี้จะไม่นำวิธีการ

ทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณไปเปรียบเทียบความแม่นยำในการพยากรณ์ข้อมูลชุดที่ 2

3.3 ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์

เมื่อใช้ตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้น (ตารางที่ 3) พยากรณ์มูลค่าการส่งออกพลาสติกหรือแ่งเย็นชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม 2564 เพื่อเปรียบเทียบกับค่าจริงโดยการคำนวณค่า MAPE และ RMSE พบว่า วิธีที่มีความแม่นยำมากที่สุด คือ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดม ($\text{MAPE} = 7.4899$, $\text{RMSE} = 15,212,229$) รองลงมา คือ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโพลต์ ($\text{MAPE} = 8.0639$, $\text{RMSE} = 16,043,254$) (ตารางที่ 6)

4. การอภิปราย

จากผลการตรวจสอบแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาลของอนุกรมเวลามูลค่าการส่งออกพลาสติกหรือแ่งเย็นชุดที่ 1 ที่พบว่า อนุกรมเวลาชุดนี้มีทั้งแนวโน้มและอิทธิพลของ

ฤดูกาล ดังนั้นวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมควรจะเป็น วิธี บ็อกซ์-เจนกินส์ที่มีตัวแบบ SARIMA วิธีการทำให้เรียบด้วย เลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการทำให้เรียบด้วย เลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ (Ket-iam, 2005; Manmin, 2006) ขัดแย้งกับผลการศึกษารั้วนี้ที่พบว่า วิธีการทำให้ เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแฉ่มมีความเหมาะสม มากที่สุด เนื่องจากมีค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด รองลงมา คือ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮล์ต ซึ่ง ทั้ง 2 วิธีการพยากรณ์นี้มีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาที่มี เพียงแนวโน้มเท่านั้น ขณะที่กลุ่มของวิธีการพยากรณ์ที่ เหมาะสมกับอนุกรมเวลาที่มีทั้งแนวโน้มและอิทธิพลของ ฤดูกาล เช่น วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ที่มีตัวแบบ SARIMA และ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวกมีค่า MAPE และ RMSE สูงกว่า (MAPE = 17.1864, RMSE = 31,860,819 และ MAPE = 18.1996, RMSE = 34,180,987 ตามลำดับ) (ตารางที่ 6) ดังนั้น การศึกษาเกี่ยวกับการพยากรณ์ทุกครั้งควรพิจารณาวิธีการ พยากรณ์ที่หลากหลาย เพื่อให้ครอบคลุมตัวแบบพยากรณ์ที่ เหมาะสม ผลการศึกษารั้วนี้ไม่สอดคล้องกับการศึกษาที่ ผ่านมา เช่น Rodbang (2006) พบว่า ตัวแบบที่เหมาะสม กับการพยากรณ์มูลค่าการส่งออกปลาทุ่นำระบ่ง คือ ตัวแบบอาร์มา AR(1) AR(2) SAR(12) SMA(12) Keerativibool (2015) พบว่า ตัวแบบที่เหมาะสมกับการ พยากรณ์มูลค่าการส่งออกกุ้งสดแช่แข็งของประเทศไทย คือ ตัวแบบจากวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์ แบบคูณ และ Riansut (2020) พบว่า ตัวแบบที่เหมาะสม กับการพยากรณ์มูลค่าการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ คือ ตัวแบบจากวิธีการพยากรณ์รวมที่รวมค่าพยากรณ์ของ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของ วินเทอร์แบบบวก และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของ วินเทอร์แบบคูณ อาจเนื่องมาจากเป็นการศึกษาข้อมูลต่าง ประเภทกับการศึกษารั้วนี้

เมื่อใช้วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบ แฉ่มในการพยากรณ์มูลค่าการส่งออกปลาสดหรือแช่เย็น ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม 2565 พบว่า มูลค่า การส่งออกมีแนวโน้มคงที่ มีค่าพยากรณ์มูลค่าการส่งออก ปลาสดหรือแช่เย็นเป็นค่าเดียว เท่ากับ 145,917,509 บาท (รูปที่ 4) เนื่องจาก

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \phi^i = \lim_{i \rightarrow \infty} (0.30040)^i = 0$$

จะได้

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^m \phi^i = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^m (0.30040)^i = 0.4293951$$

ดังนั้น เมื่อแทนค่านี้ในสมการพยากรณ์ของวิธีการทำให้เรียบ ด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแฉ่ม จึงได้ค่าพยากรณ์เป็น ค่าเดียว เท่ากับ

$$\hat{Y}_{t+m} = 141,418,959.50412 + 10,476,480.90980(0.4293951) = 145,917,509$$

อย่างไรก็ตาม การศึกษารั้วนี้ได้พิจารณาเพียงปัจจัย เวลาเท่านั้นในการสร้างตัวแบบพยากรณ์ ซึ่งมูลค่า การส่งออกปลาสดหรือแช่เย็นมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ และการเปลี่ยนแปลงอาจเกิดจากปัจจัยอื่น ๆ นอกเหนือจาก ปัจจัยเวลา ดังนั้นเมื่อมีปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของมูลค่าการส่งออกหรือมีข้อมูลที่เป็นปัจจุบัน มากขึ้น ในการศึกษาครั้งต่อไป ผู้วิจัยควรนำมาปรับปรุงตัว แบบเพื่อให้ได้ตัวแบบพยากรณ์ที่มีความแม่นยำมากขึ้น สำหรับ ใช้ในการพยากรณ์มูลค่าการส่งออกปลาสดหรือแช่เย็น ในอนาคตต่อไป รวมถึงควรพิจารณาวิธีการพยากรณ์อื่น ๆ เช่น การพยากรณ์รวมที่เกิดจากการรวมวิธีการพยากรณ์ เดียวเข้าด้วยกันและหาค่าน้ำหนักถ่วงให้วิธีการพยากรณ์ เดียวแต่ละวิธี ซึ่งอาจทำให้ได้วิธีการพยากรณ์ใหม่ที่มีค่า คลาดเคลื่อนลดลงและมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

5. บทสรุป

การศึกษารั้วนี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างและคัดเลือกตัว แบบพยากรณ์ที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลามูลค่าการส่งออก ปลาสดหรือแช่เย็นของประเทศไทยด้วยวิธีการทางสถิติ 7 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลัง ของโฮล์ต วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแฉ่ม วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย วิธีการ ทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการ ทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ ผลการศึกษา พบว่า วิธีที่มีความแม่นยำมากที่สุด คือ วิธีการทำให้เรียบด้วย เลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแฉ่ม โดยมีตัวแบบพยากรณ์ ดังนี้

$$\hat{Y}_{t+m} = 141,418,959.50412 + 10,476,480.90980 \sum_{i=1}^m (0.30040)^i$$

เมื่อ $m = 1$ แทนเดือนมกราคม 2564

เอกสารอ้างอิง

- Box, G. E. P., Jenkins, G. M. & Reinsel, G. C. (1994). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 3rd ed., New Jersey: Prentice Hall.
- Keerativibool, W. (2015). Forecasting Model for the Export Values for Fresh Frozen Shrimp of Thailand. *KKU Science Journal*, 43(1), 148-162.
- Ket-iam, S. (2005). *Forecasting Technique*, 2nd ed., Songkhla: Thaksin University.
- Manmin, M. (2006). *Time Series and Forecasting*. Bangkok: Foreprinting.
- Office of Agricultural Economics. (2022a). *Thai Agricultural Products are Still Strong in the Global Market. Office of Agricultural Economics reveals that in 2021, exports are still growing, both FTA and ASEAN trading partners*. Retrieved February, 21, 2022, from <https://www.oae.go.th/view/1/รายละเอียดข่าว/ข่าว%20สศก./38149/TH-TH>.
- Office of Agricultural Economics. (2022b). *Export Statistics of Fresh or Chilled Fish, Excluding Fillets and Other Fillets, from 2011 to 2021*. Retrieved February, 19, 2022, from <https://impexpth.oae.go.th/>.
- Riansut, W. (2020). Forecasting Model for Export Value of Squid and Products. *RMUTSV Research Journal*, 12(3), 537-551.
- Rodbang, P. (2006). *Canned Tuna Export Value Forecasting by ARIMA Method* [Master's thesis]. Chiangmai University.