

ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 [2566] Vol.22, No.2 [2023]

พฤษภาคม – สิงหาคม 2566

ISSN 2822-1451 [Print]

ISSN 2822-1508 [Online]



Approved by TCI during
2020-2024



ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย
Thai-Journal Citation Index Centre

Advisory Board

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

Professor Dr. Saowanit Sukparungsee

Professor Dr. Vilai Rungsardthong

Associate Professor Dr. Surapun Yimman

Associate Professor Dr. Pianpool Kamoljitprapa

Associate Professor Dr. Kitti Bodhipadma

Editor-in-Chief

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

Associate Professor Narumol Kreua-ongarjnukool

Editor

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

Associate Professor Dr. Nonchanutt Chudpooti

Associate Professor Dr. Sekson Sirisubtawee

Co-Editor

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

Professor Dr. Yupaporn Areepong

Associate Professor Dr. Anuchit Jitpattanakul

Assistant Professor Dr. Chatchawan Singhapol

Dr. Wannarak Nopcharoenkul

Editorial Team

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

Associate Professor Dr. Orathai Polsen

Associate Professor Dr. Suvimol Phanyaem

Associate Professor Dr. Walaiporn Prissanaroon Ouajai

Associate Professor Dr. Tanapat Anusas-amornkul

Assistant Professor Dr. Anusara Srisrual

Assistant Professor Dr. Theerawut Phusantisampan

Assistant Professor Dr. Jintawat Tanamatayarat

Assistant Professor Dr. Sukanya Thepwatee

Assistant Professor Dr. Thidarat Wangkham

Assistant Professor Dr. Saowapa Thumsing Niyomthai

Editorial Board

Professor Dr. Paul Pigram

La Trobe University, Australia

Professor Dr. Melvin Pascall

The Ohio State University, USA

Prof. Dr. Andrea De Gaetano

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

Assoc.Prof. Dr. Nutapong Somjit

University of Leeds, United Kingdom

Dr. Nutsuda Sumonsiri

Teesside University, United Kingdom

Professor Dr. Sergey Meleshko

Suranaree University of Technology, Thailand

Editorial Board (cont.)

Emeritus Professor Dr. Yongwimon Lenbury

Mahidol University, Thailand

Professor Dr. Sutthisak Phongthanapanich

King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Professor Dr. Anuvat Sirivat

Chulalongkorn University, Thailand

Prof. Dr. Supa Hannongbua

Kasetsart University, Thailand

Associate Professor Dr. Yaowadee Temtanapat

Thammasat University, Thailand

Associate Professor Dr. Khongsak Srikaeo

Pibulsongkram Rajabhat University, Thailand

Associate Professor Dr. Weeradej Meeinkuirt

Mahidol University, Thailand

Associate Professor Dr. Wararit Panichkitkosolkul

Thammasat University, Thailand

Associate Professor Dr. Montip Tiensuwan

Mahidol University, Thailand

Associate Professor Dr. Piyapatr Busababodhin

Maharakham University, Thailand

Associate Professor Dr. Wantida Chaiyana

Chiang Mai University, Thailand

Assoc.Prof. Dr. Pranee Phinyocheep

Mahidol University, Thailand

Assistant Professor Dr. Kwan Arayathanitkul

Mahidol University, Thailand

Assistant Professor Dr. Narumon Emarat

Mahidol University, Thailand

Assistant Professor Dr. Kitiporn Plaimas

Chulalongkorn University, Thailand

Assistant Professor Dr. Chatchai Khunboa

Khon Kaen University, Thailand

Assistant Professor Dr. Julaluk Khemacheewakul

Chiang Mai University, Thailand

Assistant Professor Dr. Jutarat Iewkittayakorn

Prince of Songkla University, Thailand

Assistant Professor Dr. Yanisa Laoong-u-thai

Burapha University, Thailand

Assistant Professor Dr. Sararat Mahasaranon

Naresuan University, Thailand

Dr. Worawut Srisukkhram

Chiang Mai University, Thailand

Management Staff

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

Miss Wilawan Sae-jeng

Miss Kitsiya Chuchuaysuan

JOURNAL POLICY

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

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

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

Scope of the Journal

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

Peer Review Process

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

Human and Animal Ethics in Research

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

Language

Both Thai and English

Publication Frequency

Once every four months (Triannual)

First Issue: January to April

Second Issue: May to August

Third Issue: September to December

Remarks

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

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

Contact: jaset@sci.kmutnb.ac.th

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

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

TABLE OF CONTENT

Research Articles

Effect of Hydrothermal Processing on Carotenoids, Tocopherol, Fatty Acids and Oxidative Parameters of Palm

(Elaeis guineensis Jacq) Oil

Israel O. Otemuyiwa, Emmanuel T. Eyinla, Damilola Adewoye and Olumuyiwa S. Falade.....e249640

Incorporation of Bacteriocin Produced by *Bacillus velezensis* BUU004, Plant Extracts and Their Combination for

Controlling Food Spoilage Bacteria in Dried Squid Snack Product

Pornpimon Soodsawaeng, Traimat Boonthai, Verapong Vuthiphandchai and Subuntith Nimrat.....e246628

Gamification Pedagogy Trigger Design for Creative Experiences in Metaverse Class Room

Wilawan Inchamnan.....e251539

A Comparison of Models for Count Data with an Application to Over-Dispersion Data

Chadarat Tapan, Anamai Na-udom and Jaratsri Rungrattanaubo.....e250803

Statistical Models for Studying the Incidence Rate of Deaths Among People Infected with COVID-19 in

Southeast Asian (ASEAN) Countries

ตัวแบบทางสถิติสำหรับศึกษาอัตราการเกิดการเสียชีวิตของผู้ติดเชื้อ COVID-19

ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN)

Somporn Thepchim, Siriporn Samutwachirawong, Suphawadee Suwithamma and Jularat Chumnaul.....e249163

A Comparison of the Efficiency of the HEWMA THWMA and DMEWMA Control Chart for 3 Parameter Gamma Distribution

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุม HEWMA THWMA และ DMEWMA สำหรับข้อมูลที่มีการแจกแจง

แกมมาสามพารามิเตอร์

Piyaphon Paichit and Kanistha Kongkaew.....e248025

Efficiency Comparison of Parametric and Non-Parametric Tests for Testing the Difference Between Central Values of

More Than Two Independent Populations Using Counting Data

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการทดสอบอิงพารามิเตอร์และไม่อิงพารามิเตอร์สำหรับทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลาง

ของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกันเมื่อข้อมูลเป็นจำนวนนับ

Suphawadee Suwithamma, Jularat Chumnaul, Siriporn Samutwachirawong and Somporn Thepchim.....e249712

Development of Prototype NMU-AQI Device for Real-Time Monitoring of Indoor Air Quality

การพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์ NMU-AQI สำหรับตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในอาคารแบบเวลาจริง

Pongsathorn Chomdee.....e246935

Generative Adversarial Network for DOTA2 Character Generation

Generative Adversarial Network สำหรับการสร้างตัวละคร DOTA2

Saranchai Angkawiniwong, Pongsarat Chootai, Krittipat Chuenphitthayavut, Theethut Narksenee and

Thitirat Siriborvornratanakul.....e249246

In vitro Propagation of *Curcuma lithophila* ŠkorniČk. & Soonthornk., an Endemic Species of

Thailand with High Potential to be used as Ornamental Plant

การขยายพันธุ์ในหลอดทดลองของต้นมณีกาญจน์ (*Curcuma lithophila* ŠkorniČk. & Soonthornk.) พืชเฉพาะถิ่นของประเทศไทย

ซึ่งมีศักยภาพสูงต่อการใช้เป็นไม้ประดับ

Sirusthon Nakdang, Rodjanacorn Chuengpanya, Patcharawan Sornyotha, Atchara Muangkroot,

Thaya Jenjittikul and Ngarmnij Chuenboonngarm.....e248222

Effect of Hydrothermal Processing on Carotenoids, Tocopherol, Fatty Acids and Oxidative Parameters of Palm (*Elaeis guinensis* Jacq) Oil

Israel O. Otemuyiwa^{1*}, Emmanuel T. Eyinla², Damilola Adewoye³ and Olumuyiwa S. Falade⁴

^{1,3,4} Department of Chemistry, Obafemi Awolowo University, Ile-Ife, Nigeria

² Department of Human Nutrition and dietetics, University of Ibadan, Nigeria

ABSTRACT

The study investigated the impact of hydrothermal processing on carotenoids, total tocopherol, fatty acids and oxidative changes in palm (*Elaeis guinensis*) oil. The palm oil sample was subjected to 100 min hydrothermal treatments: boiling (oil with water), stir-frying (frying oil alone) and batch food frying (frying plantain in oil) as done in home cooking and in each of the operation, sample of oil were withdrawn at interval of 20 min and kept for analysis. The oil sample obtained from each operation was analysed for chemical parameters using standard methods, fatty acid profile by gas chromatography, carotenoids and tocopherol by spectrophotometric and colorimetric method, respectively. The results showed that β -carotene and tocopherol decreased by 55 % and 20 %, respectively within 2 min and then decrease became gradual as frying and boiling time is increased. The peroxide values recorded in stir-frying and boiling increased from 6.8 to 95.2 and 8.5 to 118 meq/kg, and thiobarbituric acid values from 9.5 to 18.9 and 2.2 to 5.4 TBA value/kg, respectively. In batch frying, free fatty acid, acid value and peroxide value decreased from 0.93 to 1.42, 1.85 to 2.82 and 9.48 to 33.2 meq/kg, correspondingly. Tocopherol and carotenoid decrease from 2.7 to 1.15 mg/g and 6.6 to 1.8 μ g/g respectively. The saturated and monosaturated fatty acid contents increased with reduction of polyunsaturated fatty acids while trans fatty acid was found to be formed as frying time increased. The study revealed that hydrothermal treatment of palm oil could lead to loss of lipophilic vitamins and essential fatty acids with formation of trans fatty acid and oxidative products that could lead to deterioration of the oil. Hence, repeatedly used vegetable oil should be constantly analysed as it may be detrimental to nutrition and health of consumers.

KEYWORDS: Hydrothermal, carotenoids, tocopherols, fatty acids, peroxide value

*Corresponding Author: otemuyisegun@oauife.edu.ng.

Received: 24/08/2022; Revised: 22/02/2023; Accepted: 14/06/2023

1. INTRODUCTION

Palm (*Elaeis guinensis* Jack) oil is one of the major edible plant oils used for culinary purposes in the tropical countries especially West and Central Africa (Wattanapeupaiboon and Wahlqvist, 2003). In Nigeria, it is traditionally produced in high quantity and at affordable price; it is used for seasoning foods and also in deep frying. Palm oil has been reported to be free from trans- fatty acids because its production does not involve industrial processes such as hydrogenation (Wiege, et al., 2020)). Red palm oil has been identified as the richest source of β -carotene – a precursor of vitamin A, in addition to its high content of phytonutrients which exhibit unique antioxidant

properties. Therefore, there is the possibility that palm oil could offer some health advantages by reducing oxidative stress and free radical induce diseases, cognitive impairment and Alzheimer's disease (van-Rooyen et al., 2008).

During food preparation, palm oil is subjected to either boiling or stir-frying processes otherwise known as hydrothermal processes. During the process of frying, the oil is repeatedly used and as a consequence of reheating of the oil, hence, a variety of chemical reactions occur which led to a spectrum of chemical changes. The oil undergoes various physical reactions such as formation of foam, increased viscosity, darkening of colour and deterioration of flavour. These changes may affect the organoleptic qualities such as

the odour and taste, and also the nutritional value of the fried foods (Xin-Fang et al., 2012). Also, processed oil undergoes three deleterious chemical reactions: such as hydrolysis caused by water, oxidation and thermal alteration caused by oxygen and heat (Aladedunye et al., 2017). Decomposition products are also formed as a result of reactions between food ingredients and oil affecting products' taste, flavour and shelf life (Dobarganes et al., 2000).

The presence of natural antioxidants such as α - tocopherol, tocotrienol and β -carotene in palm oil could prevent lipid peroxidation by acting as peroxy radical scavengers that terminate the chain reactions. These antioxidants could have their concentrations affected by hydrothermal processing during food preparation; in fact, many scientific evidences have shown that these natural antioxidants are preferentially destroyed during frying (Dauqan et al, 2011)

Apart from home cooked fries, it is a common scene on the highway and street roads to see people hawking assorted fried foods like bean cake (akara), plantain chips, yam and potato chips, fried fish and meat, buns, doughnut etc. The oil employed in the preparation of these food items is often used repeatedly, and on many occasions, more oil is added to the cooking vessel when the level is going down in order to increase the volume and probably to maintain the colour of the oil so as not to affect the sensory properties of the food.

Few research reports exist on the chemical and nutritive value of fried foods, however not much was reported on lipophilic vitamins and quality of the oil especially during repeated usage. Therefore, the objectives of this study were to simulate hydrothermal processes in food preparation using palm oil and evaluate the effects of the process on the fatty acid, total tocopherol and carotenoids, as well as chemical composition of repeatedly used palm oil.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Sample and sample preparation

Freshly processed palm oil sample was collected in a sterilized five litres plastic container from local Palm

oil processing plant and of ripe plantain was obtained from local market in Osu, Osun State, Nigeria.

2.2 Hydrothermal Treatment of Palm Oil

No treatment: The fresh palm oil sample was taken for analysis without thermal processing

Stir – frying treatment: The sample of oil (500 g) was poured into the stainless-steel frying pan and placed on hot plate and heated to 100 oC to mimic the frying process. When the temperature of both systems reached 100 oC, 5.0 g portions of the oil were withdrawn at intervals (0 to 100 min) while stir-frying continues

Boiling Treatment: The sample of oil (500 g) was poured into 1.0 L stainless steel saucepan and distilled water (10 ml) was added and then boiled to 100 oC. This mimics the traditional cooking process. 5.0 g portions of the oil were withdrawn at intervals (0 to 100 min) while the boiling continues.

Batch frying treatment:

Frying oil without plantain: The portion of oil sample (500 g) was placed in frying pan placed on an electric stove; the oil was heated for 10 min at 170 oC without plantain and 20 g of the oil was withdrawn for analysis.

Batch Frying of plantain in palm oil: Sliced plantain (400 g batch) was introduced into the hot oil maintained at 170 oC and fried within 5 min, fried plantain was removed and 5.0g oil was withdrawn from frying pan. The oil was allowed to cool to 100 oC and then heated to 170 oC, the frying of plantain was repeated until 12th batch frying, sample of oil were withdrawn at 4th, 8th and 12th batch frying.

The samples of oil withdrawn during the processes was added 1% butylated hydroxyanisole (BHA) and kept for further analysis.

2.3 Analytical procedures

Determination of Pro Vitamin A Carotenoids

Carotenoid content of the oil was determined by open column chromatography / visible absorption Spectrophotometric method of AOAC, method 970.64 (AOAC 2000). To the sample, 20 mL of cold acetone was added with constant shaking in a separating funnel

then 20 mL of petroleum ether (boiling point 60–68 °C) was added to extract the carotenoids in the acetone layer. The ether extract was collected, and the process was repeated until the acetone layer was devoid of colour. The ether extract was pooled together and washed with distilled water to remove excess acetone and dried over anhydrous sodium sulphate. The dried ether extract was concentrated in a rotary evaporator under vacuum at 30 °C, transferred in to 25 ml standard flask and made to the mark with petroleum ether (Pet ether). Ether extract (5.0 ml) was chromatographed on a magnesium oxide: Hyflo Supercel (1:2) column (15mm i.d x 15cm long). The following fractions were eluted from the column using 10 ml each of the eluting solvents: α – carotene was eluted with 1.0 % acetone in Pet ether, β – carotene with 5.0 % acetone in pet ether and cryptoxanthin with 10 % acetone in pet ether. Each of the fractions collected above was placed in to 25 ml standard flask and diluted to volume with Pet ether. Absorbance of each fraction was scanned between 350 and 530 nm using Pye Unicam Spectrophotometer (Pye Unicam Ltd, UK).

The concentrations of the carotenoids were calculated using following extinction co-efficient: α -carotene (2640), β -carotene (2480) and cryptoxanthin (2460) as described by Klein and Perry (1982). The pro-vitamin carotenoids were converted to international unit (retinol equivalent) by taken 1.0 I.U. as equivalent to 0.6 μg β -carotene or 1.2 μg of both α -carotene and cryptoxanthin (NAS-NRC, 1980).

$$\text{Total carotenoid } (\mu\text{g} / \text{g}) = \frac{A_{\text{total}} \times \text{volume (ml)} \times 10}{E^{1\%}_{1\text{cm}} \times \text{sample weight}} \quad (1)$$

Determination of Tocopherol

The total tocopherol was determined using Colorimetric Method (AOAC, 2000) method 971.30. To 5.0 g of oil sample was added 20 mL ethanol and the mixture was placed in water bath at 85 °C for 30 min. Tocopherol was extracted from the mixture with 10 mL petroleum ether. The ether extract was kept for analysis. The standard curve was prepared by taking 5 – 50 μg tocopherol through the procedure outlined for the sample. To the sample extract, the standard and the blank was added 1.00 mL of bathophenanthroline

solution, 0.5 mL FeCl_3 and 0.5 mL H_3PO_4 and the absorbance measured at 534 nm. Total tocopherol content was extrapolated from the standard curve and I.U potency was calculated using conversion method that 10 I.U = 4.5 mg α -tocopherol.

Chemical characteristic of the oil

The acid value, free fatty acid, peroxide value and thiobarbituric acid value were determined by AOAC (2000) while fatty acid profile was analyzed using Gas Chromatography (GC-FID).

Determination of Acid Value and Free Fatty Acid

The acid value and free fatty acid content were determined by AOAC, (2000) method 940.28. The oil sample (0.2 g) was dissolved in 10 mL ethanol and titrated with 0.1M NaOH solution using phenolphthalein indicator until pink colour disappeared. The acid value and the percentage fatty acid were calculated from the expression below:

$$\text{Acid Value} = \frac{56 \times \text{molarity of NaOH} \times \text{titre value}}{\text{weight of oil}} \quad (2)$$

$$\% \text{ Free Fatty Acid as Oleic acid} = 0.503 \times \text{Acid Value}$$

Determination of Peroxide Value (PV)

The oil sample (5.0 g) was weighed into a 250 mL conical flask, dissolved with 30 mL solvent mixture containing 12 mL chloroform and 18 mL glacial acetic acid. Saturated aqueous potassium iodide solution (0.5 mL) was added; the flask was stoppered and allowed to stand for one min. Thereafter, 30 mL of distilled water was added and the solution was titrated against 0.1 M sodium thiosulphate solution until the yellow colour had almost disappeared. At this point, starch solution (0.5 mL) was added and the titration continued until the blue-black colour disappeared. The same procedure was carried out for a 'blank' determination, where the oil sample was excluded. The peroxide value was calculated from the expression below:

$$\text{Peroxide value (meq/kg)} = \frac{M \times (S - B) \times 1000}{\text{Weight of oil (g)}} \quad (3)$$

where; meq/kg = milliequivalent peroxide/kg sample; S = Titre value (mL) of sodium thiosulphate for sample; B = Titre value (mL) of sodium thiosulphate for blank; and M = Molarity of sodium thiosulphate solution

Determination of thiobarbituric acid value

The heat-treated oil samples (200 mg) were weighed separately in triplicate into 25 mL standard

flask. Little butanol was added to dissolve the oil sample; the solution was then made up to the mark with butanol. The solution (2.5 mL) was then pipetted into a test tube with stopper. To the pipetted solution was added 2.5 mL of thiobarbituric acid reagent and the solution was mixed thoroughly. The test tube with its content was then placed in a boiling water bath for 2 h. After boiling, the solution was allowed to cool down and its absorbance taken along with blank (2.5 mL each of butanol and thiobarbituric acid mixed together and boiled for 2 h) at 530 nm using distilled water to zero the UV spectrophotometer.

The TBA value was calculated using the equation given below:

$$\text{TBA value} = \frac{50 \times (A-B)}{m} \quad (4)$$

A= absorbance of the test solution; B= absorbance of the blank; and m = mass in mg of the sample.

Statistical Analysis

Statistical analysis was carried out by the use of Microsoft Excel Statistical Packages (Microsoft Corporations, USA) and Graph-Pad Instat -3 Packages (Graph Pad software Inc, USA). Analysis of variance was used to compared the values. The results were presented as mean and standard deviation. P-value < 0.05 was considered not significant.

3. RESULTS

3.1 Stir-frying /boiling processes

The effects of hydrothermal processing on the carotenoid content of palm oil were presented in Figures 1 and 2. The stir – frying process (without addition of water) was found to cause a drastic reduction in the level of carotenoids within 2 min of frying. The percentage reduction (Figure 1) of α -carotene, β -carotene and cryptoxanthin were 40, 80 and 89 %, respectively. The boiling process (with water) showed a lesser extent of carotenoids degradation compared to stir frying process.

The effect of the heat treatments (boiling and stir-frying) was monitored on the levels of β -carotene alone over a period of 100 min and the results were presented in Table 1. The observed drastic reduction of

β -carotene within 2 min of heating at 100 oC was confirmed. The percent reduction of β –carotene was 25 % nder stir-frying process and 18 % in boiling process. This showed that β – carotene was more stable

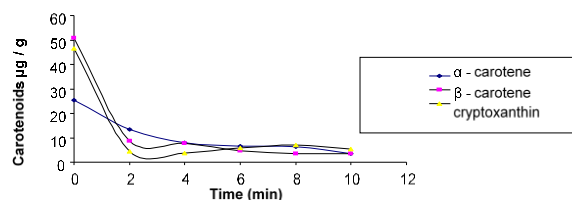


Figure 1 Effect of stir-frying the Carotenoids content of palm oil.

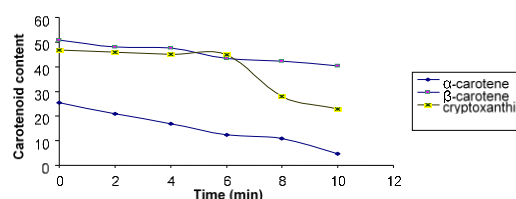


Figure 2 Effect of boiling on the Carotenoids content of palm oil

when palm oil was cooked with water as against its rapid degradation when palm oil fried. The vitamin activity measured as retinol equivalent is also more affected by heating of the oil in absence of water.

The effect of hydrothermal treatment on tocopherol (Table 1) showed the same trend of rapid deterioration as observed for carotenoids, the percentage reduction in the tocopherol content due to stir frying and boiling processes were 51 % and 36 %, respectively within 2 min of treatment. Heating caused reduction in the tocopherol content of the oil, this is seen from the fresh oil which has a value of 11.87 mg/g but decreased to 2.06 mg/g at 100 min for the stir-frying process, and from 12.36 mg/g to 2.66 mg/g at 100 min for the boiling process.

The thiobarbituric acid value and peroxide value which are measure of chemical deterioration of the oil were presented in Table 2. The TBA value increased from 9.49 to 18.94/kg for time zero and 100 min in the stir-frying process, whereas for the boiling process, the value increased from 2.23 to 7.54 TBA value/kg within 20 min of boiling and then decreased thereafter up to 60 mins, at the end of the heat processing, the TBA value was 5.04 TBA value /kg. The peroxide.

Table 1 Variation of β -carotene of Palm oil due to hydrothermal processing

Time(min)	β - Carotene ($\mu\text{g/g}$)		Retinol ($\mu\text{g/g}$)		Total tocopherol (mg/g)	
	Stir-fry ¹	Boiling ¹	Stir-fry ²	Boiling ²	Stir-fry ³	Boiling ³
0	60.4 $\pm$ 0.06 ^a	60.8 $\pm$ 0.12 ^a	100 $\pm$ 0.11 ^a	100 $\pm$ 0.05 ^a	11.87 $\pm$ 0.13 ^b	12.36 $\pm$ 0.15 ^a
0.5	55.3 $\pm$ 0.03 ^b	60.1 $\pm$ 0.13 ^a	92.1 $\pm$ 0.04 ^b	100 $\pm$ 0.2 ^a	6.97 $\pm$ 0.14 ^b	7.96 $\pm$ 0.08 ^a
1.0	52.8 $\pm$ 0.18 ^b	55.3 $\pm$ 0.05 ^a	88.2 $\pm$ 0.30 ^b	92.2 $\pm$ 0.08 ^a	6.40 $\pm$ 0.10 ^b	7.24 $\pm$ 0.02 ^a
1.5	50.6 $\pm$ 0.04 ^b	53.5 $\pm$ 0.13 ^a	84.4 $\pm$ 0.05 ^b	89.2 $\pm$ 0.2 ^a	5.84 $\pm$ 0.05 ^b	6.75 $\pm$ 0.04 ^a
2.0	45.4 $\pm$ 0.4 ^b	49.7 $\pm$ 0.07 ^a	75.7 $\pm$ 0.6 ^b	82.8 $\pm$ 0.1 ^a	5.38 $\pm$ 0.10 ^b	6.32 $\pm$ 0.15 ^a
20	44.2 $\pm$ 0.03 ^b	46.6 $\pm$ 0.20 ^a	73.6 $\pm$ 0.06 ^b	77.6 $\pm$ 0.3 ^a	4.98 $\pm$ 0.11 ^b	5.51 $\pm$ 0.16 ^a
40	40.8 $\pm$ 0.2 ^b	44.1 $\pm$ 0.07 ^a	68.1 $\pm$ 0.3 ^b	73.5 $\pm$ 0.1 ^a	4.36 $\pm$ 0.01 ^b	4.86 $\pm$ 0.06 ^a
60	37.4 $\pm$ 0.03 ^b	39.9 $\pm$ 0.05 ^b	62.4 $\pm$ 0.06 ^b	66.6 $\pm$ 0.08 ^a	3.51 $\pm$ 0.07 ^b	3.93 $\pm$ 0.07 ^a
80	35.1 $\pm$ 0.04 ^b	36.7 $\pm$ 0.2 ^a	58.5 $\pm$ 0.05 ^b	61.1 $\pm$ 0.3 ^a	3.04 $\pm$ 0.09 ^b	3.41 $\pm$ 0.19 ^a
100	32.4 $\pm$ 0.1 ^b	34.0 $\pm$ 0.05 ^a	53.9 $\pm$ 0.3 ^b	56.7 $\pm$ 0.08 ^a	2.06 $\pm$ 0.08 ^b	2.66 $\pm$ 0.16 ^a

Values are mean $\pm$ SD of triplicate analysis.

1, 2, 3 values across the table with the same superscripts were not significantly different at $P \leq 0.05$.

Table 2 Variation of Peroxide value and thiobabutaric acid value in hydrothermal processed palm oil

Time (mins)	Peroxide (meq /kg)		TBA g / kg	
	Stir-frying ¹	Boiling ¹	Stir frying ²	Boiling ²
0	6.8 $\pm$ 0.9 ^b	8.5 $\pm$ 0.00 ^a	9.5 $\pm$ 0.31 ^a	2.20 $\pm$ 0.7 ^b
0.5	13.5 $\pm$ 0.0 ^b	23.2 $\pm$ 2.8 ^a	10.9 $\pm$ 0.2 ^a	4.52 $\pm$ 0.3 ^b
1.0	16.8 $\pm$ 2.8 ^b	30.2 $\pm$ 2.8 ^a	11.7 $\pm$ 0.3 ^a	5.60 $\pm$ 0.4 ^b
1.5	23.5 $\pm$ 0.0 ^b	33.5 $\pm$ 0.0 ^a	12.3 $\pm$ 0.3 ^a	6.94 $\pm$ 0.4 ^b
2.0	28.5 $\pm$ 0.0 ^b	45.2 $\pm$ 2.8 ^a	12.8 $\pm$ 0.2 ^a	7.23 $\pm$ 0.4 ^b
20	40.2 $\pm$ 2.8 ^b	60.2 $\pm$ 2.8 ^a	13.6 $\pm$ 0.16 ^a	7.54 $\pm$ 0.9 ^b
40	51.8 $\pm$ 0.7 ^b	76.8 $\pm$ 2.8 ^a	14.3 $\pm$ 0.2 ^a	6.05 $\pm$ 0.7 ^b
60	65.2 $\pm$ 5.7 ^b	88.5 $\pm$ 0.0 ^a	16.9 $\pm$ 0.4 ^a	5.64 $\pm$ 0.7 ^b
80	78.5 $\pm$ 0.00 ^b	105.2 $\pm$ 2.8 ^a	18.2 $\pm$ 0.4 ^a	7.59 $\pm$ 0.8 ^b
100	95.2 $\pm$ 5.7 ^b	118.5 $\pm$ 0.0 ^a	18.9 $\pm$ 0.3 ^a	5.04 $\pm$ 0.2 ^b

Values are mean $\pm$ SD of triplicate analysis.

1, 2 values across the table with the same superscripts were not significantly different at $P \leq 0.05$.

Table 3 Variation of carotenoids, tocopherol, retinol activity and chemical parameters in batch fried oil

Processing Time	0 min	10 min	40 min	70 min	100 min	Heating without food
		Heating	(4 th batch)	(8 th batch)	(12 th batch)	
Acid value	1.85 $\pm$ 0.01 ^c	1.90 $\pm$ 0.01 ^c	2.16 $\pm$ 0.02 ^d	2.40 $\pm$ 0.01 ^c	2.82 $\pm$ 0.02 ^b	2.96 $\pm$ 0.02 ^a
Free fatty acid	0.93 $\pm$ 0.01 ^c	0.96 $\pm$ 0.01 ^c	1.1 $\pm$ 0.02 ^d	1.21 $\pm$ 0.02 ^c	1.42 $\pm$ 0.02 ^b	1.49 $\pm$ 0.02 ^a
PV (meq/kg)	9.48 $\pm$ 0.06 ^c	9.5 $\pm$ 0.02 ^c	11.8 $\pm$ 0.02 ^d	14.2 $\pm$ 0.07 ^c	33.2 $\pm$ 0.08 ^b	42.7 $\pm$ 0.06 ^a
Tocopherol (mg/g)	2.7 $\pm$ 0.0 ^a	2.5 $\pm$ 0.03 ^b	1.7 $\pm$ 0.01 ^c	1.6 $\pm$ 0.02 ^d	1.15 $\pm$ 0.08 ^c	0.9 $\pm$ 0.01 ^f
Carotenoid ($\mu\text{g/g}$)	6.6 $\pm$ 0.1 ^a	6.0 $\pm$ 0.1 ^b	5.5 $\pm$ 0.1 ^c	2.3 $\pm$ 0.09 ^d	1.8 $\pm$ 0.03 ^c	1.3 $\pm$ 0.07 ^f
RAE ($\mu\text{g/g}$)	11.0 $\pm$ 0.1 ^a	10.1 $\pm$ 0.2 ^b	9.3 $\pm$ 0.08 ^c	3.7 $\pm$ 0.02 ^d	3.05 $\pm$ 0.01 ^c	2.2 $\pm$ 0.04 ^f

value also increased from 6.83 to 95.17 meq /kg and 8.5 to 118 meq / kg in stir-frying and boiling processes, respectively, boiling process recorded significantly higher value.

3.2 Effect of batch frying

As observed for stir-fried and boiled oil, batch frying impact negatively on the content of both tocopherol and carotenoids. From Table 3, the tocopherol content of palm oil was 2.72 mg/g, batch frying (12th cycle) decreased the content to 1.15 mg/g (42 % loss). Also,

carotenoid decreased from 6.62 to 1.83 $\mu\text{g/g}$ (72.4 % loss) after 12th cycle. Acid value, free fatty acid and peroxide value increased from 1.85 to 2.82 mg KOH/g (152 %), 0.93 to 1.42 (132 %) and 9.48 to 33.21 meq / kg (350 %), respectively, after 12th cycle of batch frying, Fatty acid profile (Table 4), the percentage saturated fatty acid (SFA), mono unsaturated fatty acid (MUFA) and poly unsaturated fatty acid (PUFA) were 16.36 %, 27.35 %, and 52.82 % , respectively in fresh oil, trans fatty acids

(TFA), respectively in fresh oil, trans fatty acids (TFA) were absent. Of the total saturated fatty acids, linoleic acid accounted for 10.64 % whereas linolenic acid (48.48 %) was the most abundant PUFA. Heating of oil within 10 min caused formation of linoeladic acid (C18:2 trans) (0.14 %), though the level decreased when plantain is fried in the oil.

4. DISCUSSION

Hydrothermal treatments of vegetable oils have been reported to adversely affect the chemical compositions as well as the nutritive values of the food. The content of carotenoid (a precursor of vitamin A) was found to be markedly reduced by heat treatments; similar trend of destruction was reported for lycopene when tomato is subjected to heat treatment (Norizzah, et al., 2014). Carotenoids due to its high conjugated double bonds, are prone to oxidation and geometric isomerization when exposed to heat and oxygen (Cervantes-Paz, et al., 2014; Flores et al., 2021). The polyene chain is the cause of instability of carotenoids including their susceptibility to oxidation and geometric isomerization. Heat, light and acids promote isomerization of trans-carotenoids to the cis-form (Amorim-Carrilho et al., 2014).

Apart from the effect of conjugation of bonds in carotenoids, lipids are well known to be susceptible to oxidation reaction and as a result, natural antioxidant such as β -carotene will deteriorate in the process of defending palm oil. Sun et al., (2002) reported decrease in the lipid oxidation with increase in water activity and (Tannenbaum et al., 1985) observed that the stability of carotenoids was parallel to that of unsaturated fatty acids in a given food. The degradation of β -carotene is of high health concern due to their dual purpose of protecting human systems against oxidative stress related diseases (Cilla et al., 2012), and useful pro-vitamin A activity (Harrison, 2012). When the β -carotene was converted in to retinol equivalent, stir-fried / boiled palm oil showed a progressive reduction in retinol content with time, an indication that methods

employed in food processing could significantly affect the content of vitamin A content of plant foods

Vitamin A is necessary for normal vision, chronic shortage of dietary vitamin A results in vitamin A deficiency disease (VAD), the most specific clinical effect of which is xerophthalmia and its various stages, including night blindness. Though recent health policies have mandated the compulsory fortification of vegetable oils with vitamin A.

Vitamin E is a strong antioxidant. All its isomers (tocopherol and tocotrienols) possess good antioxidant properties in vitro with tocotrienols being more potent (Falade et al., 2017). The observed loss of total tocopherol due to hydrothermal treatment of oil is in agreement with the study of Holownia et al., (2001). It has been observed that the decrease in total tocopherol may not necessarily be as a result of degradation but could result from it being used up while acting as antioxidant in protecting the oil (Puah et al, 2007). However, preferential oxidation of tocopherol has a protective (antioxidant) effect which is particularly important, since the majority of the frying oils are of vegetable origin, showing great amount of unsaturated, rapidly oxidized fats. This essential lipophilic nutrient is well known for its role as a chain-breaking antioxidant during lipid peroxidation, it protects polyunsaturated fatty acids from oxidation (Vollhardt and Schore, 2004) and are capable of inhibiting cholesterol synthesis (Odia et al 2015).

The level of oxidative deterioration of the oil monitored by the use of peroxide value (PV) and thiobarbituric acid (TBA) value (Table 2) indicated that both values increased but was more pronounced in stir frying than in boiling. The only explanation for this is that water could have prevented contact between oxygen and the oil sample thereby reducing the extent of lipid oxidation, hence lower level of oxidative products like malondialdehyde. Vitrac et al., (2000) had earlier observed that steam acted as blanket over oil and prevented oxygen – oil contact. The added water could also play a role as a physical agent for “steaming out” the volatile oxidative products such as malondialdehyde from the oil and enhancing their

Table 4 Effect of frying on Fatty acid profile of vegetable oil (as % of the total fatty acids)

FATTY ACID	Fresh oil	Frying Point	4 TH batch	8 TH batch	12 TH batch
		10mins	40min	70min	100min
Saturated fatty acid					
C8:0	ND	ND	0.03	0.03	0.05
C12:0	0.18	0.16	0.20	0.20	0.19
C14:0	0.16	0.18	0.20	0.20	0.16
C15:0	ND	0.01	ND	ND	ND
C16:0	10.64	10.50	10.83	10.83	11.03
C17:0	0.06	0.08	0.12	0.12	0.09
C18:0	4.07	4.02	4.10	4.10	4.18
C20:0	0.47	0.46	0.45	0.45	0.49
C22:0	0.53	0.55	0.55	0.55	0.54
C24:0	0.25	0.29	0.23	0.23	0.28
Total SFA	16.36	16.24	16.8	16.8	17.01
Mono-unsaturated fatty acids					
C16:1, cis	0.11	0.10	0.12	0.12	0.11
C17:1, cis	0.02	0.09	0.11	0.11	0.10
C18:1, cis	27.50	27.31	27.27	27.27	27.87
C20:1, cis	0.32	0.33	0.31	0.31	0.32
Total MUFA	27.95	27.83	16.81	16.81	17.01
Poly-unsaturated fatty acids					
C18:2, cis	48.48	48.55	48.11	48.11	45.47
C18:3, cis	4.15	4.85	5.03	5.03	4.87
C20:2, cis	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20
Total cis PUFA	52.82	53.59	53.33	53.33	50.54
C18:2, trans	ND	0.14	0.05	0.05	0.10
P/S ratio	0.31	0.30	0.31	0.31	0.32

SFA: saturated fattyacids, MUFA: monosaturated fatty acids; PUFA: Polyunsaturated fatty acids, P/S: ratio of polyunsaturated to saturated fatty acid

evaporation thereby making it unavailable for reaction with TBA. Also, the intermittent heating and cooling of oils have been reported to cause higher deterioration of oils than continuous heating due to increase in oxygen solubility in the oil when the oil cools down after frying (Chaves et al., 2012). Peroxide value (PV) increases with frying time, the PV values markedly increased beyond 8th frying batch (33.21 meq / Kg), which indicated that substantial lipid oxidation had occurred at this point. Suleiman et al., (2006) reported increase in the peroxide value of cottonseed oil, sunflower oil and palm olein heated at 180°C for 8 h. It is well known that peroxide value is useful as an indicator of oxidation at the initial stages. However, during frying the changes in PV were not related to duration of frying but were dependent on rate of formation and breakdown of oxidation products. Another problem is that the peroxides may increase after the sample is taken from the fryer before analysis. Butylated hydroxyl anisole (BHA) an antioxidant was added to the oil immediately

after sampling. Siddique et al., (2010) mentioned that a good quality vegetable oil should have a peroxide value of lower than 2.0 meq / kg, though oil with peroxide value less than 10 meq/kg is still regarded as fresh oil whereas values between 20 and 40 meq/kg result to rancid taste and offensive odour. The result of acid value and free fatty acids indicated that the fresh palm oil has an acid value (1.85 mg KOH/g) which is within the value proposed for fresh vegetable oils (Dorbaganes and Marquiz-Ruiz, 2015). There was a significant increase (2.82 mg KOH / g) at 12th batch frying, this indicated that as the frying time is increased so also the acid value. This increase can be expected due to increased rate of hydrolysis since water is introduced into the frying system by the raw plantain. However, the increase though noticeable still falls within the range of healthy edible oil, thus indicating a substantial resistance to hydrolysis and other chemical mechanisms which breakdown glycerides during frying. The acid value and % free fatty acids provide

information on the status of the vegetable oils, as they show the extent of hydrolysis of triglyceride chains (FAO/WHO, 1998). Acid value and % free fatty acids are useful as chemical indicators for edibility of oil.

Fatty acid profiles (Table 4) indicated a progressive decrease in the content of unsaturated fatty acids and formation of trans fatty acids. For instance, the content of linolenic acid (C18:2) progressively decreased from 48.48 % to 45.47 % (6.28 %) at 12th batch frying, at this point percentage reduction of PUFA was 4.32 % whereas SFA was increased by 4.0 % with increase of 4.95 and 2.70 % in both stearic and palmitic, respectively. However, there could be migration and exchange of fatty acid between the oil and foods during frying.

Formation of volatile compounds such as aldehydes, ketones, dienes and acids during degradation of oils induced by heating has been a major concern. Thermally oxidized oil does not only create unpleasant flavor it may also cause health challenges. Several articles have established that thermoxidized oil produce adverse effect such as mild enlargement of liver, spleen and adrenals, induce oxidative stress and impaired digestibility (Dorbarganes and Marquiz-Ruiz, 2015). Since frying oil is absorbed by food, the findings of this study would help us to recognize the point at which the repeatedly frying oil should be discarded to maintain optimum product quality and health of the consumers because the quality of food products is directly correlated to the quality of the frying medium (Wiege, et al., 2020).

5. CONCLUSION

The findings of this study revealed among other things that palm oil though rich in polyunsaturated fatty acids (PUFAs), carotenoids and total tocopherol, however, hydrothermal processing could lead to destruction of these fat-soluble vitamins and formation of deleterious compounds that could expose consumers to risk of cardiovascular, chronic respiratory, neural and degenerative diseases and certain cancer. Therefore, to enhance adequate intake of the lipophilic vitamins and

essential fatty acids from palm oil, thermal treatment of oil should be monitored.

ACKNOWLEDGEMENTS

There is no grant or aid obtained for this research, the authors were grateful to the Department of Chemistry, Obafemi Awolowo University for making room for use of available facilities for the analyses.

CONFLICT OF INTEREST

There is no conflict of interest

REFERENCES

- AOAC. (2000). Official methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, V A
- Aladedunye, F.; Przybylski, R.; Matthäus, B. (2017) Performance of antioxidative compounds under frying conditions. Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 57, 1539–1561
- Amorim-Carrilho KT, Cepeda A, Fente C, Regal P. (2014). Review of methods for analysis of carotenoids. Trends Anal Chem. 56:49–73
- Cervantes-Paz, B., Yahia E.M., DeJesus Omelaz-Paz, Victoria-Campos C.L., Ibarra-Junquera, V et al, (2014). Antioxidant activity and content of chlorophyll and carotenoids in raw and heat processed Jalapeno peppers at intermediate stages of ripening. Food Chemistry, 1(146):188–198.
- Chaves, M. H., Araújo, F. D. S., Moura, C. V. R., Tozetto, J, S. -Pimentel, A., Caruso, M. S. F (2012). Chemical Characterization and Stability of the Bombacopsis glabra Nut Oil. Food and Public Health, 2012, 2(4): 104–109
- Cilla, A, Alegria A, de Ancos B, Sanchez-Moreno C, Cano MP, Plaza L, Clemente G, Lagarda, M.J, Barbera, R. (2012). Bioaccessibility of tocopherols, carotenoids, and ascorbic acid from milk- and soy-based fruit beverages: influence of food matrix and processing. J Agric Food Chem. 60:7282–90.
- Dauqan, M. A., Abdullah, A. and Sani, H. A. (2011). Natural Antioxidants, Lipid Profile, Lipid Peroxidation, Antioxidant Enzymes of Different Vegetable Oils Advance Journal of Food Science and Technology 3, (4), 308–316.
- Dorbarganes, M. C., Velasco, J. and Dieffenbacher, A. (2000). Determination of Polar Compounds, Polymerized and Oxidized Triacylglycerols and Diacylglycerols in Oils and Fats. Pure and Applied Chemistry, 72, (8), 1563–1575.
DOI:10.135/pac200072981563.
- Dorbarganes, M.C and Maquis-ruitz, G. (2015). Possible adverse effects of frying with vegetable oils. British Journal of Nutrition, 113, (52), 549–557.
- FAO/WHO (1988) Dietary Fats and Oils in Human Nutrition. FAO Food and Nutrition Series No. 20, pp.1–44. Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations.
- Harrison E.H. (2012). Mechanisms involved in the intestinal absorption of dietary vitamin A and provitamin A carotenoids. Biochim Biophys Acta 1821:70–7.
- Holownia, M. C., Erickson, M. S. and Eitenmiller, R. R. (2001). Tocopherol losses in peanut oil during pressure frying of marinated chicken with

- strips coated with edible fibre. Food Research International, 34, 77 – 80. doi:10.1016/S0963-9969(00)00134.4.
- Falade, A. O, Oboh, G, and Okoh, A. I, (2017). Potential Health Implications of the Consumption of Thermally-Oxidized Cooking Oils – a Review Pol. J. Food Nutr. Sci., 67, (2), 95–105. DOI: 10.1515/pjfn-2016-0028.
- Klein, B. P and Perry, A. (1982). Ascorbic Acid and Vitamin A Activity in Selected Vegetables from Different Geographical Areas of the United States Journal of Food Science, 47, 741– 945.
- Norizzah, A. R., Norsyamimi, M., Zaliha, O., Nur-Azimah, K. and Hazirah, M. F. (2014). Physicochemical properties of palm oil and palm kernel oil blend fractions after interesterification. International Food Research Journal 22(4): 1390–1395
- Flores, M., Avendano, V., Bravo, J., valdes, C., Forero-Doria, O., Quintral, V., Vilcanqui Y and Ortiz-viedma, J. (2021). Edible oil parameters during deterioration processes. Int. J. of Food Sciences, 2021; 1–16
- Odia, O.J., Ofori, O. and Maduka O. (2015). Palm oil and the heart: A review. World Journal of Cardiology, 7 (3), 144–149.
- Puah, C. W., Choo, Y. M, Ma A. N and Chuah C. H. (2007). The Effect of Physical Refining on Palm Vitamin E (Tocopherol, Tocotrienol and Tocomonoenol) American Journal of Applied Sciences 4 (6): 374–377.
- Siddique, B. M., Ahmad, A., Ibrahim, M. H., Hena, S., Rafatullah M. and Omar M. (2010). Physico-chemical properties of blends of palm olein with other vegetable oils grasas y aceites, 61 (4), 423–429 doi: 10.3989/gya.010710
- Suleiman, A. M., Attyr E. and Mohammed, F. R. (2006). Anti-radical performance and physiochemical characteristics of vegetable oils. Electronic Journal of. Environmental, Agricultural and Food Chemistry, 5, 1429 – 144.
- Sun, Q., Sonegal, A., Chinachoti, P. and Faustman, C. (2002). Effect of water activity on lipid oxidation and protein solubility in freeze- dried beef during storage. Journal of Food Science, 67, 2512 – 2516.
- Tannenbaum, S. R., Young, V. R. and Archer, M. C. (1985). Vitamins and Minerals. In Food Chemistry, (O.R. Fennema, Ed) pp. 513 – 517, Marcel and Dekkar Inc., New York.
- Van-Rooyen, J. V., Adrian, J. E., Engelbrecht, A. M., Eugene, F. T. (2008). Health benefit of a natural carotenoid rich oil: a proposed mechanism of protection against Ischemia / reperfusion Injury Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition 17, 316–319.
- Vitrac, O., Trysram, A. L., Raoult-Wack, P. (2000). Deep-fat frying of food: heat and mass transfer, transformations and reactions inside frying medium. Eur. J. Lipid Sci. Technol., 102, 529–538
- Vollhardt, K. P. and Schore, N. E. (2004). Organic Chemistry: structure and function. Fourth Edition. New York: W.H. Freeman and Company.
- Wattanapenpaiboon, N. and Wahlqvist, M. L (2003). Phytonutrient deficiency: the place of palm fruit Asia Pacific J Clin Nutr 12, (3), 363–368
- Wiege, B., Fehling, E., Matthäus, B. and Schmidt M. (2020). Changes in Physical and Chemical Properties of Thermally and Oxidatively Degraded Sunflower Oil and Palm Fat. Foods, 9, 1273; doi:10.3390/foods9091273
- Xin-Fang, L., Jumat, S., Mohd, R. M. and Kamsiah, J. (2012). Effects of repeatedly heated palm olein on blood pressure – regulating enzyme activities and lipid peroxidation in rats. Malaysia Journal of Medical Sciences, 19, (1), 20 – 29

Incorporation of Bacteriocin Produced by *Bacillus velezensis* BUU004, Plant Extracts and Their Combination for Controlling Food Spoilage Bacteria in Dried Squid Snack Product

Pornpimon Soodsawaeng¹, Traimat Boonthai¹, Verapong Vuthiphandchai² and Subuntith Nimrat^{3*}

¹Biological Science Program, ²Department of Aquatic Science and

³Department of Microbiology Faculty of Science, Burapha University

ABSTRACT

Traditional seafood-based product is one of popular cuisines in Thailand and easily susceptible to contamination of pathogenic and spoilage bacteria, thereby representing a serious risk of foodborne infection. A novel effective alternative technology is required for enhancing biosafety quality along with shelf-life extension of seafood products. This study aimed to evaluate preservative potential of naturally occurring compounds on spoilage bacteria in dried squid snack. The squids were divided into 4 treatments including supplementation of 1) sterile distilled water (control), 2) a semi-purified solution containing bacteriocin from *B. velezensis* BUU004 (SPS-BV; 800 AU/mL), 3) a mixture of lemongrass and hot pepper extracts (MLH; 160 mg/mL) and 4) a combination of the SPS-BV (800 AU/mL) and MLH (160 mg/mL), and then stored in a refrigerated condition for 28 days. Strategies of the tested-additive administration included a single addition at beginning of trial and addition of the additives every 14-day of storage. A single addition of the three tested additives was shown to be unlikely to decrease total viable count (TVC) in dried squid snack. In contrast, the antibacterial activity was more evident in dried squids supplemented with the SPS-BV or the novel combination with every 14-day addition observed by 21.8% and 14.1% TVC decrement, respectively. Our results indicate that the SPS-BV and the novel combination have a preservative potential for controlling the growth of spoilage bacteria in dried squid snack. However, due to their degenerative antibacterial activity in dried squids during storage, a development of intelligent active and controlled release packaging technologies that can deliver the antimicrobials into the seafood systems over prolonged periods is required to improve safety of seafood products in Thailand.

KEYWORDS: *Bacillus velezensis*, Food safety, Food-spoilage bacteria, Seafood, Chon Buri

*Corresponding Author: subunti@buu.ac.th

Received: 12/11/2021; Revised: 13/03/2023; Accepted: 10/04/2023

1. INTRODUCTION

Traditional seafood-based product is one of popular Thai cuisines widely distributed in tourist attraction areas and retail stores in coastal provinces in eastern and southern Thailand. Annual consumption has clearly increased because of its unique tastes, flavors and textures, and abundance of essential nutrients. It has occupied nearly 7% of the total seafood production of Thailand equivalent to approximately 1,781,100 tons in 2017 (Fisheries Statistics of Thailand, 2019). It is mostly produced in small commercial processing factories and household traditional plants located along

the Gulf of Thailand and shores of the Andaman Sea, especially in Chon Buri province with 88 factories and traditional plants (Fisheries Statistics of Thailand, 2019). Most of the traditional seafood products (ca. 80%) are produced for domestic consumption. It is generally known that traditional seafood-based product is vulnerable to spoilage due to contamination of pathogenic and spoilage microorganisms, e.g. *Staphylococcus* spp., *Bacillus* spp., *Pantoea* spp., *Micrococcus* spp., *Bacillus cereus*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* and *Salmonella* (Thungkao & Muangharm, 2008; Butkhot et al., 2019a; Nimrat et

al., 2019). In general, contamination of food-borne pathogenic and spoilage bacteria in food products can easily occur at any point of a farm to table cycle, including primary production (in the farm/sea where animals are raised or caught), food processing, storage, and distribution (Bintsis, 2018). In Chon Buri province, a public health issue of traditional processed squid products is alarming due to 86.5% samples compiled between 2002 and 2019, containing viable bacterial count over the acceptable limits imposed by Thailand and international food administration agencies (Nimrat et al., 2021). Such a phenomenon represents a serious risk of food-borne infection, like diarrhea, gastritis, and food poisoning illnesses, and results in shortening of the shelf-life and economic loss as well as prompts development of an effective alternative technology for controlling undesirable bacteria.

Synthetic preservatives and chemical additives have legally permitted as an antimicrobial agent in food products for extending the shelf life and securing the microbiological quality. However, some chemicals are suspected to cause intoxications, allergies, cancers, hepatotoxicity, teratogenicity, and other degenerative syndromes, when long-term ingestion of the excessive dose (Zhao et al., 2019). In recent years, consumers demand for convenient, safe, and lightly preserved foods with free of chemical additives that permit shelf-life extension and secure biosafety of seafood-based products. As a consequence, biopreservative-based technology of naturally occurring substances, e.g. plant extracts and bacterial-derived compounds have become a topic of interest to control the growth food spoilage and pathogens in food systems. Bacteriocin, a ribosomally synthesized peptide with antibacterial activity against closely-related and non-related bacteria through bactericidal mechanisms, has much received attention as natural preservatives in food products. Recently, we observed that a novel bacteriocin produced by *Bacillus velezensis* BUU004 (800 AU/mL) had a great potential use as biopreservative due to its distinct inhibitory activity against foodborne Gram-positive and Gram-negative bacteria in *in vitro* environment and dried seafood model (Butkhot et al.,

2019a, b). Similarly, extracts from lemongrass (*Cymbopogon citratus* (DC) Stapf.) and hot pepper (*Capsicum frutescens* L.) have been also used for food preservation with antibacterial activity (Soodsawaeng et al., 2021). In addition, several reports have revealed that combination of the antibacterial agents exhibits stronger efficient potency towards food spoilage and pathogenic microorganisms together with prolonging the shelf life of seafood products (Grande et al., 2007; Field et al., 2015; Zhao et al., 2019). Therefore, the objective of this study was to ascertain biopreservative potential of bacteriocin produced by *B. velezensis* BUU004, lemongrass and hot pepper extracts (MLH), and their combination for controlling food spoilage bacteria in dried, seasoned and crushed squids, simply called dried squid snack during storage.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Preparation of herb extracts

Lemongrass (stems) and hot pepper (fruits) were supplied from a local botanical garden in Chon Buri Province. The extraction was conducted according to the procedure explained by Soodsawaeng et al. (2021). The herb material was dried and ground into a powder using a blender (Fig. 1a, 2a). Ethanol (95%) was added to each powder sample at a ratio of 1:10 of material to extractant. The solvent mixture was filtered after a constant agitation at 30°C, 120 rpm, for 72 h (Fig. 1b, 2b). Then, the filtrate was concentrated at 40°C using a rotary evaporator (Buchi R-215, Flawil, Switzerland; Fig. 1c, 2c). A stock solution (160 mg/mL) was prepared by dissolving the crude ethanolic extract in 35% ethanol and stored in an amber bottle until use.

2.2 Bacteriocin production from *B. velezensis* BUU004

A probiotic strain of *B. velezensis* BUU004 has been confirmed as a non-pathogen with a potential safe use as a source of biopreservative in seafood products (Butkhot et al., 2019b, 2020). The stock culture of *B. velezensis* BUU004 was maintained at -80 °C in Trypticase Soy Broth (TSB; Becton BD, Sparks,

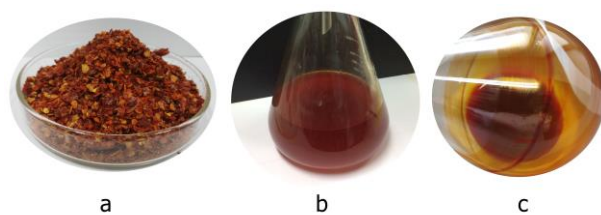


Figure 1 Hot pepper (*Capsicum frutescens* L.): a) ground hot pepper, b) ethanolic extract, and c) evaporated hot pepper extract

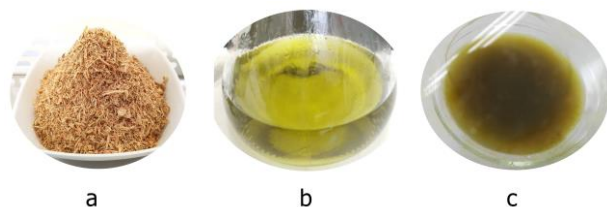


Figure 2 Lemongrass (*Cymbopogon citratus* (DC) Stapf.): a) ground lemongrass, b) ethanolic extract, and c) evaporated lemongrass extract

Maryland, USA) with 15% glycerol addition. The strain was subcultured twice on Trypticase Soy Agar (TSA; Becton BD, Sparks, Maryland, USA) to produce working culture. *B. velezensis* BUU004 was grown in TSB in a shaking incubator at 30 °C, 200 rpm for 18 h. The cells were removed by centrifugation at 8,000 g and 4°C for 10 min. Bacteriocin from the culture supernatant was precipitated using simple purification procedure (Butkhot et al., 2019b). Briefly, ammonium sulphate was added into the supernatant at 80% saturation and allowed to settle overnight at 4°C. The precipitated protein was harvested by centrifugation at 10,000 g, 4°C for 30 min, and then dissolved in 50 mM sodium phosphate buffer (pH 7.0). Thereafter, the bacteriocin-containing suspension was dialysed against a dialysis membrane (1 kDa cutoff, Spectrum Laboratory, Los Angeles, CA, USA) at 4°C overnight. Evaluation of bacteriocin activity of the semi-purified solution containing bacteriocin from *B. velezensis* BUU004 (SPS-BV) was performed using a well diffusion method against *B. cereus* TISTR 687 used as indicator (Butkhot et al., 2019b). Bacteriocin activity was calculated as arbitrary units (AU) per mL and the SPS-BV solution was stored at -80°C until use.

2.3 Effect of the SPS-BV, the MLH and their combination on food-spoilage bacteria in dried squid snack

Biopreservative potential of the tested additives was evaluated following Butkhot et al. (2019a) method. Dried squid snack products were purchased from a retail store at Nong Mon Market, Chon Buri province after which they were produced in a small household facility located in a fishing village following a preparation method described by Soodsawaeng et al. (2023). The squid samples were prepared by cutting into a small piece of 2 × 2 cm. The samples were divided into 4 treatments as follows: addition of 1) sterile distilled water (control), 2) the SPS-BV (800 AU/mL), 3) the MLH (160 mg/mL) and 4) a combination of the SPS-BV (800 AU/mL) and the MLH (160 mg/mL), and then air-dried for 15 min in a biosafety cabinet at room temperature (approximately 25°C). For each treatment, the tested additives (0.1 mL) were slowly supplemented onto the entire surface of a piece of the squid samples. The squid samples with tested additives were kept in a sterile plastic bag under refrigerated condition (2–4°C) for 28 days. At day 14 and 28 of storage, half of the samples from each treatment were re-introduced with their respective additives. Bacterial evaluation was conducted at 15 min and 1, 7, 14, 21 and 28 day post-inoculation.

2.4 Enumeration of total viable count (TVC) and bacterial identification

TVC in the squid samples was enumerated based on a spread plate method (US FDA, 1998) with some modifications. The squid sample (5 g) was mixed with 0.1% (w/v) peptone water (45 mL) and homogenized using a stomacher. Then, the homogenate was 10-fold diluted and an aliquot (0.1 mL) from each dilution was spread-plated onto Plate Count Agar (Becton BD, Sparks, Maryland, USA). All petri dishes were incubated at 35±2°C for 24 h. All bacterial colonies were enumerated and calculated as colony forming unit (CFU) per g of sample. All measurements were carried out in triplicate.

Isolated bacteria with distinct colony morphology were identified based on biological characteristics and 16S rRNA gene sequencing analysis. The genomic DNA used as template for PCR amplification was extracted from a freshly grown bacterial culture using

an InstaGene Matrix (Bio-rad Laboratories, Inc., USA) following manufacturer's instruction. The primer pair used in this study was 27F 5' (AGA GTT TGA TCM TGG CTC AG) 3' and 1492R 5' (TAC GGY TAC CTT GTTACG ACT T) 3' (Kaur et al., 2017). The PCR reaction mixture contained genomic DNA (20 ng) in a 30 µl reaction mixture using an EF-TaqDNA Polymerase (SolGent, Yuseong-gu, Daejeon, Korea). The PCR reaction was performed using a DNA Engine Tetrad 2 Peltier Thermal Cycler (Bio-Rad Laboratories, Inc., PTC-0240, Foster City, California, USA). The following PCR program was employed including initial activation at 95 °C for 2 min, and 35 cycles of denaturation at 95 °C for 1 min, annealing at 55 °C for 45 s, and extension at 72 °C for 1 min with a final cycle of 72 °C for 10 min. The PCR products were purified using a multiscreen filter plate (Millipore Corp., Bedford, MA, USA). Sequencing reaction was conducted using a PRISM BigDye Terminator v3.1 Cycle sequencing Kit. All nucleotides sequences were blasted against the sequences within the EzTaxon-e server (<https://www.ezbiocloud.net/>; Kim et al., 2012). The sequences are deposited in GenBank (Accession no. MZ298612 – MZ298619).

2.5 Data analysis

Data are expressed as mean±standard deviation. Bacterial counts were transferred to log values after normal distribution and homoscedasticity were tested. Data were analyzed using a two-way analysis of variance (ANOVA), and followed by the post-hoc Tukey's test to identify any difference between the control and treatments. Significance was defined at a level of $p < 0.05$. The statistical analyses were conducted using Minitab version 18.1.0.

3. RESULTS

3.1 TVC in dried squid snack with/without the tested additives

TVC of the pre-treated squid samples was $9.1 \pm 0.6 \times 10^3$ CFU/g. At 15-min post-exposure, TVC in squids with addition of the MLH, the SPS-BV, and a combination of MLH and SPS-BV were

$5.7 \pm 0.8 \times 10^3$, $4.4 \pm 0.2 \times 10^3$, and $7.2 \pm 0.7 \times 10^3$ CFU/g, respectively, which were significantly ($p < 0.05$) lower than that of the control ($9.1 \pm 1.5 \times 10^3$ CFU/g). However, TVC in the SPS-BV-treated and the combination-treated squids comparatively increased at 28-day storage supported by 16.3% and 11.2% increment, respectively. When the supplements were added every 14-day, the most effective strategy against TVC in the squid samples was SPS-BV administration with 21.8% decrement, and followed by supplementation of a combination of MLH and SPS-BV due to 14.1% decrement at the end of refrigerated storage (Table 1).

3.2 TVC in dried squid snack with/without the tested additives

Heterotrophic bacteria isolated from untreated squids throughout 28-day refrigerated storage were composed of 7 Gram-positive strains: *Staphylococcus saprophyticus* subsp. *saprophyticus*, *Bacillus velezensis* strain 1, *B. tequilensis*, *B. licheniformis*, *B. velezensis* strain 2, *B. subtilis* subsp. *inaquosorum* and *B. safensis* subsp. *safensis* while *B. subtilis* subsp. *stercoris* was recovered in untreated squids until day 1 of storage. *S. saprophyticus* subsp. *saprophyticus* was eliminated at day 14, 28 and 21 of storage in the squids treated with the MLH, SPS-BV, and their combination, respectively. *B. subtilis* subsp. *stercoris* was absent in the MLH-treated, the SPS-BV-treated, and the combination-treated squids at 15-min, 1-day, and 1-day post exposure, respectively. When the three additives were added every 14 days, similar results were observed due to the absence of *S. saprophyticus* subsp. *saprophyticus* and *B. subtilis* subsp. *stercoris* during storage (Table 2).

4. DISCUSSION

In the recent years, special attentions on food preservation have been paid to naturally derived substances as a novel biopreservative in food products. Bacteriocins produced by lactic acid bacteria have been long used in fresh and processed foods without degenerative health problems and deleterious effects on

Table 1 TVC (CFU/g) in dried squid snack with/without the MLH, the SPS–BV, and their combination during 28–day refrigerated storage

Storage duration (days)	Distilled water	MLH	SPS–BV	MLH + SPS–BV	MLH (every 2–w addition)
15–min	9.1±1.5×10 ³ a,B	5.7±0.8×10 ³ bc,C	4.4±0.2×10 ³ c,C	7.2±0.7×10 ³ b,BC	4.2±0.3×10 ³ c,C
1	9.6±0.3×10 ³ a,B	6.8±0.7×10 ³ b,BC	8.8±0.7×10 ³ a,B	7.8±1.6×10 ³ ab,AB	8.3±0.6×10 ³ ab,A
7	9.6±0.6×10 ³ a,B	9.1±1.2×10 ³ a,A	1.1±0.1×10 ⁴ a,A	9.5±0.9×10 ³ a,A	4.3±0.2×10 ³ b,C
14	1.1±0.1×10 ⁴ a,A	8.7±0.5×10 ³ c,AB	1.0±0.1×10 ⁴ ab,A	6.3±0.8×10 ³ d,BC	8.9±0.6×10 ³ bc,A
21	8.1±0.3×10 ³ a,B	9.3±0.9×10 ³ a,A	8.1±0.9×10 ³ a,B	5.7±0.3×10 ³ b,C	6.4±0.7×10 ³ b,B
28	9.1±0.3×10 ³ a,B	5.6±1.3×10 ³ b,C	5.2±0.2×10 ³ bc,C	7.9±0.7×10 ³ a,AB	4.4±0.4×10 ³ bc,C
Change (%)	–0.3	–2.3	16.3	11.2	2.8

Means with superscript lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$) among treatments. Means with superscript uppercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$) over time.

organoleptic properties of foods. Likewise, bacteriocins from *Bacillus* species have also currently increasing importance in food industry because of their wide spectrum of antibacterial activity, distinct structural diversity, low cytotoxicity, and stability under hostile environments, thereby remaining their activity during thermal processing cycle of foods (Abriouel et al., 2011; Butkhot et al., 2019b). In the present study, a single addition of the SPS–BV was unlikely to decrease TVC in dried squids during 28–day refrigerated storage. It is widely known that bacteriocins are easily degraded by indigenous and/or microbial proteolytic enzymes, and inactivated by their binding to the food components, like proteins, carbohydrates and fats in food products (Aasen et al., 2003; Stergiou et al., 2006). These reasons may be explained why the SPS–BV was inactive towards TVC in the dried squids in the present study. Antibacterial activity against TVC of the SPS–BV supplemented every 14–day was more evident than a single addition in the squids, especially inhibition of *S. saprophyticus* subsp. *saprophyticus* and *B. subtilis* subsp. *stercoris*. The lower antagonistic potency in dried squids when a single administration was applied is possibly associated with a reduced concentration of bacteriocins during storage to a level at which no inhibitory activity can be produced (Ghalfi et al., 2007). As a consequence, we suggested administration of the SPS–BV in dried seafood products every 14–day during storage. Our results were accordant with several previous reports. Liu et al. (2017) demonstrated that bacteriocins, namely amylolysin and amylocyclicin

produced by *B. velezensis* LS69 was shown to strongly inhibit Gram–positive and Gram–negative pathogenic bacteria, e.g. *B. cereus*, *B. thuringiensis*, *S. aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Clostridium perfringens*, *E. coli* DH5 α , and *Pseudomonas putida*. Similarly, in our recent study, the SPS–BV was effectively active against food–spoilage and foodborne pathogens including *S. aureus*, *B. cereus*, *B. coagulans*, *L. monocytogenes*, *Micrococcus luteus*, *E. coli*, *E. coli* O157:H7 and *Salmonella* Typhimurium in *in vitro* experiment (Butkhot et al., 2019b). The inhibition of bacterial growth observed in this study is probably a consequence of cell lysis, pore formation, and severe cell membrane deconstructions induced by the SPS–BV (Butkhot et al., 2019a; Soodsawaeng et al., 2023). In general, bacterial cell mortality caused by bacteriocins produced by *Bacillus* genera is produced through destabilization of the cellular structure, destroy membrane integrity, efflux of cytoplasmic fluids, and disruption of cellular activities, e.g., energy production and membrane transport (Abriouel et al., 2011).

The MLH produced undesirable results indicated by unchanged TVC number in dried squids during storage. Similarly, the MLH was shown to have low inhibitory activity against food spoilage bacteria in food system trial (Soodsawaeng et al., 2022). It is widely known that a cocktail of mixed terpenes and terpenoids, e.g., citral, neral, isoneral, geranial, isogeranial, geraniol, geranyl acetate, citronellal, citronellol, germacrene–D, and elemol, are present predominantly in lemongrass extract/essential oil (Mukarram et al., 2022) while the

Table 2 Bacterial composition of dried squid snack with/without the tested additives during 28-day refrigerated storage

Treatments	Storage duration (days)	<i>S.</i> <i>saprophyti</i>	<i>B.</i> <i>velezensis</i>	<i>B.</i> <i>tequilensis</i>	<i>B.</i> <i>lichenifor</i>	<i>B. subtilis</i> ssp.	<i>B.</i> <i>velezensis</i>	<i>B. subtilis</i> ssp.	<i>B.</i> <i>safensis</i>
Distilled water	15 min	+	+	+	+	+	+	+	+
	1	+	+	+	+	+	+	+	+
	7	+	+	+	+	-	+	+	+
	14	+	+	+	+	-	+	+	+
	21	+	+	+	+	-	+	+	+
	28	+	+	+	+	-	+	+	+
MLH	15 min	+	+	+	+	-	+	+	+
	1	+	+	+	+	-	+	+	+
	7	+	+	+	+	-	+	+	+
	14	-	+	+	+	-	+	+	+
	21	-	+	+	+	-	+	+	+
	28	-	+	+	+	-	+	+	+
SPS-BV	15 min	+	+	+	+	+	+	+	+
	1	+	+	+	+	-	+	+	+
	7	+	+	+	+	-	+	+	+
	14	+	+	+	+	-	+	+	+
	21	+	+	+	+	-	+	+	+
	28	-	+	+	+	-	+	+	+
MLH + SPS-BV	15 min	+	+	+	+	+	+	+	+
	1	+	+	+	+	-	+	+	+
	7	+	+	+	+	-	+	+	+
	14	+	+	+	+	-	+	+	+
	21	-	+	+	+	-	+	+	+
	28	-	+	+	+	-	+	+	+
MLH (every 14-day addition)	15 min	+	+	+	+	-	+	+	+
	1	+	+	+	+	-	+	+	+
	7	+	+	+	+	-	+	+	+
	14	-	+	+	+	-	+	+	+
	21	-	+	+	+	-	+	+	+
	28	-	+	+	+	-	+	+	+
SPS-BV (every 14-day addition)	15 min	+	+	+	+	+	+	+	+
	1	+	+	+	+	-	+	+	+
	7	-	+	+	+	-	+	+	+
	14	-	+	+	+	-	+	+	+
	21	-	+	+	+	-	+	+	+
	28	-	+	+	+	-	+	+	+
MLH + SPS-BV (every 14-day addition)	15 min	+	+	+	+	+	+	+	+
	1	+	+	+	+	-	+	+	+
	7	-	+	+	+	-	+	+	+
	14	-	+	+	+	-	+	+	+
	21	-	+	+	+	-	+	+	+
	28	-	+	+	+	-	+	+	+

+: found, -: not detectable

major compositions of ethanolic chili extract include phenolic compounds and capsaicinoids, particularly capsaicin, dihydrocapsaicin, protocatechuic acid, p-coumaric acid, cinnamic acid, and ferulic acid

(Menezes et al., 2022). In general, mode of action of active components in herb extracts against bacterial cells includes sequential inhibition of biochemical reactions, the intervention of various protective

enzymes, destabilization of the bacterial membrane structure by causing a change in the permeability of the cytoplasmic membrane, and leakage of a variety of molecules and ions (Cava-Roda et al. 2021). However, low antibacterial efficacy of the herb extracts in the present study is likely to involve in the volatile properties of herb extracts and the reduced concentrations of active ingredients in the herb extracts during 28-day storage (Abdollahzadeh et al., 2014). Inhibitory spectrum of plant-based substances can be potentiated with the presence of bacteriocins in food systems. However, no synergistic activity against bacterial growth was produced in the present study observed by a combination of the SPS-BV and the MLH having antibacterial potential behind the SPS-BV in the chilled-stored dried squids. The results were in contrast to previous report by Shahbazi et al. (2016). A combined addition of a commercial nisin with essential oil (0.1–0.2%) from *Ziziphora clinopodioides* caused an obvious reduction in *E. coli* O157:H7 numbers in raw beef patties during 9-day refrigerated storage. A bioengineered derivative nisin V in combination with low concentration of either carvacrol or trans-cinnamaldehyde also acted synergistically to reduce viable cells of *L. monocytogenes* in laboratory media, chocolate milk drink and chicken noodle soup (Field et al., 2015). The volatile properties of herb extracts and the reduced concentrations of active compounds in the herb extracts during storage may account for compromised biopreservative potential of the novel combination, resulting in no synergy observed in the present study. However, a decreased antibacterial efficacy of the combined additives may not be originated from only one factor. Intrinsic factors of the seafood, interaction among active compounds, and environmental parameters may influence bacterial sensitivity to the additives. Reduced number of spoilage bacteria caused by addition of the SPS-BV would help to extend shelf-life and maintain food quality at a desired level so that maximal benefits and nutrition values can be achieved. However, additional study related to biochemical assessment and texture profile analysis should be

established in order to confirm its compatibility in food products.

5. CONCLUSION

Our results suggest that the SPS-BV had stronger antibacterial potential for controlling the growth of food spoilage bacteria than the MLH, and the novel combination in dried squid snack during storage, in particular, when the additive was added every 14-day. Addition of the SPS-BV could eliminate some spoilage bacteria, e.g. *S. saprophyticus* subsp. *saprophyticus* and *B. subtilis* subsp. *stercoris* in dried squid snack during storage. However, its antibacterial activity was inactivated during chilled storage observed by low antagonistic potential in dried squids when a single administration was applied. As such, it is essential to develop an effective method with desirable physicochemical properties that can serve as carriers and provide a controlled release of antimicrobials over an extended period of time, such as edible films derived from natural products in order to create a food-compatible and natural preservative for technological applications in food industry and improve biosafety quality of traditional seafood-based products in Thailand.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was sponsored by the Royal Golden Jubilee Ph.D. Program (Grant No. PHD/0109/2556) to S. Nimrat and P. Soodsawaeng and the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant no. 44/2561). We thank Biological Science Program, and Department of Microbiology, Faculty of Science, Burapha University, Thailand for providing experimental equipment and facilities.

REFERENCES

- Aasen, I. M., Markussen, S., Moretro, T., Katla, T., Axelsson, L. & Naterstad, K. (2003). Interactions of the bacteriocins sakacin P and nisin with food constituents. International Journal of Food Microbiology, 87(1–2), 35–43. doi: 10.1016/s0168-1605(03)00047-3
- Abdollahzadeh, E., Rezaei, M. Hosseini, H. (2014). Antibacterial activity of plant essential oils and extracts: The role of thyme essential oil, nisin,

- and their combination to control *Listeria monocytogenes* inoculated in minced fish meat. Food Control, 35(1), 177–183. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.07.004>
- Abriouel, H., Franz, C. M., Ben Omar, N. & Gálvez, A. (2011). Diversity and applications of *Bacillus* bacteriocins. FEMS Microbiology Reviews, 35(1): 201–232. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2010.00244.x>
- Bintsis, T. (2018). Microbial pollution and food safety. AIMS Microbiology, 4(3), 377–396
- Butkhot, N., Soodsawaeng, P., Samutsan, S., Chotmongcol, K., Vuthiphanchai, V. & Nimrat, S. (2019a). New perspectives for surveying and improving Thai dried seafood qualities using antimicrobials produced by *Bacillus velezensis* BUU004 against foodborne pathogens. ScienceAsia, 45(2), 116–126. doi:10.2306/scienceasia1513-1874.2019.45.116
- Butkhot, N., Soodsawaeng, P., Vuthiphanchai, V. & Nimrat, S. (2019b). Characterisation and biosafety evaluation of a novel bacteriocin produced by *Bacillus velezensis* BUU004. International Food Research Journal, 26(5), 1617–1625.
- Butkhot, N., Soodsawaeng, P., Boonthai, T., Vuthiphanchai, V. & Nimrat, S. (2020). Properties and safety evaluation of *Bacillus velezensis* BUU004 as probiotic and biopreservative in seafood products. Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health, 51(2), 201–211.
- Cava-Roda, R., Taboada-Rodríguez, A., López-Gómez, A., Martínez-Hernández, G. B., & Marín-Iniesta, F. (2021). Synergistic antimicrobial activities of combinations of vanillin and essential oils of cinnamon bark, cinnamon leaves and cloves. Foods, 10, 1406. <https://doi.org/10.3390/foods10061406>
- Field, D., Daly, K., O'Connor, P. M., Cotter, P. D., Hill, C. & Ross, R. P. (2015). Efficacies of nisin A and nisin V semipurified preparations alone and in combination with plant essential oils for controlling *Listeria monocytogenes*. Applied and Environmental Microbiology, 81(8), 2762–2769. doi: 10.1128/AEM.00070-15
- Fisheries Statistics of Thailand. (2019). Fisheries statistics of Thailand 2017. Fisheries Statistics Analysis and Research Group, Fisheries Development Policy and Strategy Division, Department of Fisheries, Ministry of Agriculture and Cooperatives, No. 9/2019. Retrieved May 15, 2021, from https://www4.fisheries.go.th/local/file_document/20200714161650_1_file.pdf
- Ghali, H., Benkerroum, N., Doguiet, D. D. K., Bensaid, M. & Thonart, P. (2007). Effectiveness of cell-adsorbed bacteriocin produced by *Lactobacillus curvatus* CWBI-B28 and selected essential oils to control *Listeria monocytogenes* in pork meat during cold storage. Letters in Applied Microbiology, 44(3), 268–273. doi: 10.1111/j.1472-765X.2006.02077.x
- Grande, M. J., Lopez, R. L., Abriouel, H., Valdivia, E., Ben Omar, N., Maqueda, M. et al. (2007). Treatment of vegetable sauces with enterocin AS-48 alone or in combination with phenolic compounds to inhibit proliferation of *Staphylococcus aureus*. Journal of Food Protection, 70(2), 405–411. doi: 10.4315/0362-028x-70.2.405
- Kim, O. S., Cho, Y. J., Lee, K., Yoon, S. H., Kim, M., Na, H. et al. (2012). Introducing EzTaxon-e: a prokaryotic 16S rRNA gene sequence database with phylotypes that represent uncultured species. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 62(3), 716–721. doi: 10.1099/ijs.0.038075-0
- Liu, G., Kong, Y., Fan, Y., Geng, C., Peng, D., & Sun, M. (2017). Whole-genome sequencing of *Bacillus velezensis* LS69, a strain with a broad inhibitory spectrum against pathogenic bacteria. Journal of Biotechnology, 249, 20–24. doi: 10.1016/j.jbiotec.2017.03.018
- Menezes, R. D. P., Bessa, M. A. D. S., Siqueira, C. D. P., Teixeira, S. C., Ferro, E. A. V., Martins, M. M. et al. (2022). Antimicrobial, antivirulence, and antiparasitic potential of *Capsicum chinense* Jacq. extracts and their isolated compound capsaicin. Antibiotics, 11, 1154. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11091154>
- Mukarram, M., Choudhary, S., Khan, M. A., Poltronieri, P., Khan, M. M. A., Ali, J. et al. (2022). Lemongrass essential oil components with antimicrobial and anticancer activities. Antioxidants, 11, 20. <https://doi.org/10.3390/antiox11010020>
- Nimrat, S., Butkhot, N., Samutsan, S., Chotmongcol, K., Boonthai, T. & Vuthiphanchai, V. (2019). A survey in bacteriological quality of traditional dried seafood products distributed in Chon Buri, Thailand. Science & Technology Asia, 24(4), 102–114.
- Nimrat, S., Soodsawaeng, P., Rattanamangkalanon, N., Boonthai, T., & Vuthiphanchai, V. (2021). Biosafety, bacteriological quality and strategy of biopreservative administration for controlling spoilage bacteria in Thai traditional dried seafood products. African Journal of Microbiology Research, 15(10), 512–521.
- Shahbazi, Y., Shavisi, N., & Mohebi, E. (2016). Effects of Ziziphora clinopodioides essential oil and nisin, both separately and in combination, to extend shelf life and control *Escherichia coli* O157:H7 and *Staphylococcus aureus* in raw beef patty during refrigerated storage. Journal of Food Safety, 36(2), 227–236. <https://doi.org/10.1111/jfs.12235>
- Soodsawaeng, P., Butkhot, N., Boonthai, T., Vuthiphanchai, V., & Nimrat, S. (2021). Synergistic antibacterial effects of bacteriocin produced by *Bacillus velezensis* BUU004 and medicinal plant extracts against *Escherichia coli* and *Salmonella* Typhimurium in dried, crushed and seasoned squid. International Food Research Journal, 28(4), 654–663.
- Soodsawaeng, P., Rattanamangkalanon, N., Boonthai, T., Vuthiphanchai, V. & Nimrat, S. (2022). Preservative potential of Thai herb extracts combined with bacteriocin from *Bacillus velezensis* BUU004 for controlling food spoilage and pathogenic bacteria in dried crushed seasoned squids. Science and Technology Asia, 27(1), 74–88.
- Soodsawaeng, P., Rattanamangkalanon, N., Boonthai, T., Vuthiphanchai, V. & Nimrat, S. (2023). Bacteriocin from *Bacillus velezensis* BUU004 as a seafood preservative: antibacterial potential, and physical and chemical qualities of dried, seasoned, and crushed squids. Suan Sunandha Science and Technology Journal, 10(1), 105–119.
- Stergiou, V. A., Thomas, L. V. & Adams, M. R. (2006). Interactions of nisin with glutathione in a model protein system and meat. Journal of Food Protection, 69(4), 951–956. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-69.4.951>
- Thungkao, S. & Muangharm, S. (2008). Prevalence of *Bacillus* spp. and *Bacillus cereus* in dried seasoned squid products. pp. 138–146. In Proceedings of 46th Kasetsart University Annual Conference: Agro-industry, Kasetsart University, Bangkok.
- US Food Drug Administration. (1998). Bacteriological Analytical Manual (8th ed.). Maryland: Association of Official Analytical Chemists International.
- Zhao, S., Li, N., Li, Z., He, H., Zhao, Y., Zhu, M. et al. (2019). Shelf life of fresh chilled pork as affected by antimicrobial intervention with nisin, tea polyphenols, chitosan, and their combination. International Journal of Food Properties, 22(1), 1047–1063. <https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1625918>

Gamification Pedagogy Trigger Design for Creative Experiences in Metaverse Class Room

Wilawan Inchamnan

Creative Design & Entertainment Technology College, Dhurakij Pundit University

ABSTRACT

The aim of this study is to design a creative process for learners. The design focuses on a pedagogy for course activities based on principles from gamification research that foregrounds the relationship between instructional practices and game-based course design for learning. The research is divided into two phases: Trigger with learner psychology and the creative experiences during learning. The research aims to shape the relationship between gamification elements and pedagogical design. The design framework will inform the creative process in the Metaverse classroom. The framework identifies critical features of the creative process that emerge throughout the learning process. Creativity will be measured by examining domain-relevant and creativity-related skills and task motivation during learning in the Metaverse environment. The research approach applies survey and observation techniques to examine the extent to which people are engaged in creative processes during their participation in the Metaverse classroom. The pedagogical design background focuses on the approach that enhances the player's interaction with the interactive elements and provides useful insights into the learner's skills and engagement. Engagement can be improved through the use of triggering gamification elements. The results show how gamification pedagogy enhances the creative experience process in the Metaverse environment. These guidelines can be used in the pedagogical design process to better promote creative learning activities. An important contribution to the research is the ability to design instructional activities that promote creative thinking through engaging interactions with technology.

KEYWORDS: Gamification, Pedagogy, Trigger Design, Creative Experiences, Metaverse in Classroom, Creative process

*Corresponding Author: wilawan.inn@dpu.ac.th

Received: 01/02/2023; Revised: 18/06/2023; Accepted: 20/06/2023

1. INTRODUCTION

The aim of this study is to design a creative process for learners. The design focuses on a pedagogy for course activities based on principles from gamification research that foregrounds the relationship between instructional practices and game-based course design for learning. The research is divided into two phases: Trigger with learner psychology and the creative experiences during learning. The research aims to shape the relationship between gamification elements and pedagogical design. The design framework will inform the creative process in the Metaverse classroom. The framework identifies critical features of the creative process that emerge throughout the learning process. Creativity will be measured by examining domain-relevant and creativity-related skills and task motivation during learning in the Metaverse environment. The research

approach applies survey and observation techniques to examine the extent to which people are engaged in creative processes during their participation in the Metaverse classroom. The pedagogical design background focuses on the approach that enhances the player's interaction with the interactive elements and provides useful insights into the learner's skills and engagement. Engagement can be improved through the use of triggering gamification elements. The results show how gamification pedagogy enhances the creative experience process in the Metaverse environment. These guidelines can be used in the pedagogical design process to better promote creative learning activities. An important contribution to the research is the ability to design instructional activities that promote creative thinking through engaging interactions with technology.

2. BACKGROUND

The background of a study is the first section of the paper and establishes the Metaverse context. It contains the rationale, the main pedagogical context. The background forms the signifier of the gamification elements that impact through the learning outcome. The outcome focuses on the trigger in learning. The next section deals with the creative process through the learner's experience.

2.1 Metaverse

Metaverse is a combination of the prefix "meta", implying transcendence, and the word "universe", describing a parallel or virtual environment connected to the physical world [1]. Metaverse became a buzzword. Many educators and researchers have begun to create various future plans and implementation scenarios for their learning practices. The metaverse is still emerging, but many key components have already taken shape and are revolutionizing everything from e-commerce to media and entertainment to education. The notion is relatively new, however, and there is a need to explore the impact of the creative process on the metaverse, which is where this study comes in. Individuals with high digital literacy who must have technological expertise to manage and learn in the digital environment. One of the benefits of the Metaverse is that students can participate virtually in the classroom and receive elements that occur in the real classroom. Students in the Metaverse can interact with teachers and communicate with their classmates through their avatars [1]. This environment could create an immersive learning opportunity that promotes students' learning motivation and creative process.

The impact of the Metaverse in education

From a pedagogical perspective, the design of the Metaverse can provide students with compelling digital resources and allow them to interact with academic information and have interesting experiences [2]. The Metaverse will facilitate the integration of practices in virtual environments, where students and faculty can interact face-to-face as in a virtual classroom, into the educational experience. In the short term, however, the

Metaverse is: augmented reality should enhance – not replace – the human experience. Digital technology should not compete with physical reality because most people do not enjoy prolonged experiences in virtual worlds. The metaverse should enhance the human experience, not replace it [3]. Therefore, the metaverse can perform realistic and immersive experiments that can be realized with low effort and cost [4].

2.2 Pedagogy

Pedagogy Context

The term 'pedagogy' suggests that the term is derived from the ancient Greek word 'paidagogos,' meaning slave who leads children to school [5]. Others find that the common definition of pedagogy as 'the art or science of teaching' is at odds with their preferred emphasis on classroom learning [6]. Pedagogy, design is a term that bridges theory and practice. Design is a highly valued activity in the new information environment and a discipline that has come into its own in the digital age. The impact that the new information technologies have had on what is considered to be valuable knowledge.

Pedagogy Trigger Design

Pedagogy is the design of the processes of learning activities. The following is a comparative overview of the pedagogical focus [7]. In applying these ideas to curriculum practice over the past decade, the ideas have been somewhat condensed and translated into the immediately recognizable "knowledge processes": experiencing, understanding, analyzing, and applying [8].

- Experience is a process of learning through immersion in the real, everyday things of the world: personal experience and engagement. Experience is taken for granted in the lifeworld, and the resulting learning is usually unconscious, incidental, tacit, accidental, and deeply rooted in the lifeworld [8].

- Conceptualizing involves the development of abstract, generalizing concepts and the theoretical synthesis of those concepts. Learners use categorizing terms that reduce the ambiguities of natural language and assemble them into mental models typical of academic disciplines [8].

- Analyzing is a process that involves the study of cause and effect, structure and function, elements and their relationships. This activity requires logical thinking in the form of explanations and arguments [8].
- Apply is a knowledge process in which learners actively engage with the human and natural world and learn by applying experiential, conceptual, or critical knowledge by acting on what they know about the world in the case study and learning something new from the experience of doing it [8].

Accordingly, the study examined which game elements trigger which mechanisms (e.g., scoring, leveling, and ranking). In addition, the elements may influence the creative trigger in learning. The research background shows the concept of educational design and gamification concepts. This study explores the relationship between gamification elements and game-based engagement, which can stimulate learners to engage in creative process experiences in the metaverse classroom.

2.3 Gamification

Gamification Elements

Gamification is defined as the use of game elements and mechanisms in non-game contexts [9]. Gamification can also be used in other contexts, such as learning and educational activities [10]. Common techniques include rewards, leaderboards, likes and dislikes, transparency, and measurement [11]. As a behaviour-based reward system, gamification can encourage people to experience a creative process. Gamification can create a powerful experience that promotes both motivation and engagement. Gamification can be used to increase motivation through intrinsic rewards and feedback. The activity concept may require the implementation of gamification, suggesting an educational trigger design.

Gamification Pedagogy Trigger

Integrating gamification into the classroom can be a powerful experience that promotes both motivation and engagement. The recent trend of "gamification" applications relies on the complexity of a well-designed and balanced game reduced to its simplest components such as badges, levels, points, and leaderboards [12] to

develop both a technical toolkit and a set of best practices for implementing successful gamification experiences in an educational context [13]. Gamification can be used to increase motivation through intrinsic rewards and feedback lessons. Feedback activities can promote the experience of creative processes. The concept of activities may require the implementation of gamification, which is referred to as user-centered design. The use of game concepts to facilitate learning and development are the commonly outdated notions of accumulating knowledge in ideas that challenge the limits of learners' abilities and capacities. Gamification of learning and development can support learners on their path to mastery. With careful planning, gamification can help learners develop their skills, take risks, and fail in a safe context [14]. Examples of learning and training domains where gamification concepts have been used with great success include health and safety training and leadership development (e.g., Deloitte Leadership Academy) [14]. Game mechanics can trigger and reinforce competencies in situational awareness [15]. Pedagogy will shape the trigger in terms of learning. Gamification can be used in curriculum practice as a knowledge process: Experiencing, conceptualizing, analyzing, and applying through gamification elements. The pedagogical activity that attracts learners' experiences is promoted through goals, rewards, competition, and teamwork. In terms of conceptualizing, the study illustrates the influence of learners to categorize things and define those concepts through rules, rewards, and teamwork. Learners make generalizations using concepts and connect concepts in concept maps or theories, promoted by rules and challenges [16]. In addition, learners influence analysis of logical relationships, cause and effect, structure, and function through rules, challenges, and teamwork. Learners evaluate their own and others' perspectives, interests, and motivations through rules and challenges. In terms of appropriate learning, learners can apply what they have learned to real-world situations and test its validity through goals, rewards, challenges, and teamwork. Challenges can encourage learners to make

generalizations based on concepts and connect concepts in concept maps or theories. In addition, learners innovatively and creatively engage with the world or transfer what they have learned to a different context by participating in competitions and challenge mechanisms [16]. These concepts could be applied in the metaverse classroom. The creative process of the learners is fostered by the experiences.

2.4 Learner Experiences

User Experiences

User experience is not about the inner learning processes. User experience is about how it affects the outside, where a person comes into contact with it. Any user experience effort is aimed at improving efficiency. This is done primarily in two ways: helping people work faster and helping them make fewer mistakes [17]. The design of the learning experience will prepare these two main ways. This research is mainly concerned with tasks, with how streamlined the steps in a process are, and with how people think about doing them. Creating an information-rich user experience is about enabling people to find, absorb, and make sense of the information in the classroom [17].

Trigger and Experiences Learner Outcome

Experience is a process of learning through immersion in the real, everyday things of the world: personal experience and engagement. Experience is taken for granted in the lifeworld – and the resulting learning is usually unconscious, incidental, tacit, accidental, and deeply rooted in the lifeworld [18]. Conceptualizing involves the development of abstract, generalizing concepts and the theoretical synthesis of those concepts. Learners use categorizing terms that reduce the ambiguities of natural language and assemble them into mental models typical of academic disciplines [18]. Analyzing is a process that involves the study of cause and effect, structure and function, elements and their relationships. This activity requires logical thinking in the form of explanations and arguments [18]. Apply is a knowledge process in which learners actively engage with the human and natural world and learn by applying experiential, conceptual, or critical knowledge – by responding to what they know about the world in the

case study and learning something new from the experiences they have in the process [18]. The trigger of the experience will drive their engagement. Motivation and engagement represent passion and emotional involvement in learning activities. Engagement enables meaningful learning, which includes the quality of students' efforts, interaction with students, and their immersive experiences [19]. Classroom activities can enhance learners' experiences, which is referred to as immersive engagement. Engagement influences learner acceptance. Behavior use is about how often or for what purposes the behavior is used, while behavior adoption is about how extensively the behavior is used. The constructs of motivation are important for educators to determine the impact on student learning and outcomes [19].

2.5 Creativity in Virtual Classroom

This section analyzes how gamification elements can enhance students' creative abilities. The expectation of the application was to apply the pedagogical design in the virtual classroom.

Creative Process

The creative process is the result of a sustained and complex mental effort over an extended period of time [20]. The creative process consists of a step-by-step sequence of mental activities that play out like a game. It includes problem identification, goal setting, and the application of heuristic tasks [21,22] during classroom activities. Learners set goals and solve problems during tasks. Creative problem solving is constructed within a specific set of goals and pathways and considering the problem conditions [23]. In order to understand the creative process, the criteria related to the creative activities must be clearly formulated and easily translated into assessment. The developed method focuses on the component framework of creativity assessment, which includes three main components: domain-related skills, creativity-related skills, and task motivation [24]. This study focuses on the thinking processes involved in creative activities and is measured using these three main components. Based on the review, creative processes embody specific elements (e.g., goal setting, testing a response) that constitute

the components of creative output. A component framework [25] that considers these elements of the creative process can be summarized as follows:

- Motivation and sensitivity to problems.
- The process of seeking appropriate solutions, discrepancies, and knowledge gaps to drive the creative problem-solving process.
- The process of brainstorming (divergent thinking).
- The process of idea validation (convergent thinking)

Creativity is measured by examining domain-relevant and creativity-related skills and task motivation during virtual classroom learning. The research approach applies elicitation and observation techniques to examine the extent to which participants are engaged in creative processes while participating in the classroom. In summary, three components influence creative processes. Task motivation influences the quantity of ideas. Expertise plays an important role in developing an acceptable solution. Creativity-related skills influence the quality of ideas produced. The three components are critical characteristics of a creative process in relation to problem solving [26]. The purpose of this study was to determine whether the use of different factors influences creative outcomes and whether there are differential effects on the cognitive process in the metaverse classroom.

Creative Process in Virtual Environment

The factors that influence creativity are not only focused on the individual level, but also on team-related elements [27]. In class, a task can be prepared for teamwork and goal setting. While many factors can influence creative problem solving (e.g., leadership, personality traits, motivation, goals, etc.), cognitions have emerged as an important facet of both individual and team creativities in creative problem solving [28]. Core processes that occur before or after idea generation, such as problem identification and construction, and idea evaluation and selection, have received much less attention, especially at the team level [27]. In virtual classrooms, learners can take advantage of many opportunities through the use of

media to improve the quality of student learning. In addition, teaching in a virtual classroom provides a valuable opportunity to abstract those aspects of pedagogy that are necessary in any educational context. Comparing successful teaching practices in a virtual environment to those of virtual face-to-face classrooms. The environment allows teachers to see the difference between the important aspects of educational delivery and the contextual strategies used to implement those aspects [29].

3. METHODOLOGY

In this research, the method of creative measurement is divided into two parts. The first part aims to determine the relationship between students' competence and learning outcomes during classroom activities. Learning motivation is measured with a questionnaire that asks, among other things, how proud students are of themselves and how their community recognizes their outstanding achievements.

The next step focuses on the characteristics of the creative processes that can occur during an activity. Achieving this goal will require a comprehensive review of the literature on creativity and the assessment of creative processes, as well as the application of this knowledge in a virtual context. Adapting existing research in this new area allows for the measurement of creative activities in the metaverse classroom. This research includes an activity study in which players are assessed using established creativity criteria to determine the level of creative activity.

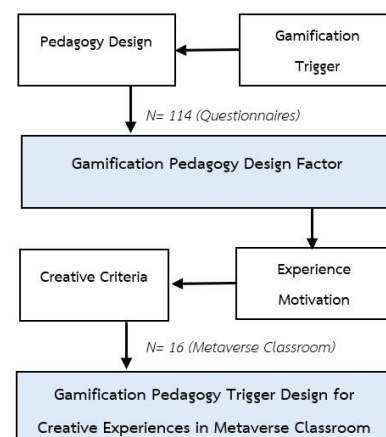


Figure 1 The Assessment method

3.1 Research question

Specifically, this study answers the following research questions (RQ):

- RQ1: What factors play a role in engaging learners in pedagogical processes during classroom activities?
- RQ2: How do specific instructional activities facilitate learner engagement in various components of the creative process during the learning experience?

3.2 Effect of batch frying

This study combines quantitative and qualitative synthesis approaches to review studies published in the literature on metaverse, gamification, and creative processes in education. In this study, a structured questionnaire was developed to be answered by learners for an empirical investigation of the factors that influence learning outcomes and pedagogical design. Individual items of the questionnaire related to motivation were rated 1 (not at all important) and 5 (extremely important) on a 5-point Likert scale in RQ1 and a 7-point Likert scale in RQ2. The research design assessed learners' knowledge processes. The experiential measurement was designed as a process based on learners' action experiences: Building on the learning resources of the everyday and familiar, prior knowledge, social background, personal interests and perspectives, and individual motivation. The questionnaire reflects the familiar [30,31].

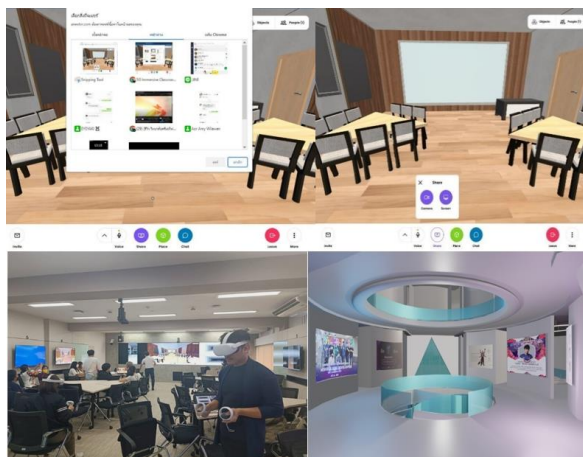


Figure 2 ANEXT: Metaverse Classroom

RQ1: What factors play a role in engaging learners in pedagogical processes during classroom activities? This question focuses on the extent to which the factors of the learning activities promote the learning outcome (GPA). Using the results obtained in answering the first research question, the types of motivation used in learning these activities are examined. The research will allow for an evaluation of the extent to which specific instructional experiences are enhanced through the use of gamification elements.

RQ2: How do specific instructional activities facilitate learner engagement in various components of the creative process during the learning experience? This question focuses on specific classroom tasks that broaden the range of creative activities experienced. This question aims to understand how specific elements of pedagogical design (e.g., challenges, goals, and rules) influence creative behaviour. The relationship between creative components, pedagogical elements, and learner experiences will be analysed in the context of the virtual classroom. To investigate the creative process, participants self-assessed the questionnaire during learning.

This coding scheme was implemented based on the criteria developed for the analysis of the creative process (task motivation, domain-relevant ability, and creativity-relevant ability) [32]. The results of RQ1 were used to determine the extent to which the games promoted creativity and how the components of creativity were involved. Coding was based on elements identified as significant to the creative process [33].

Participations RQ1

To develop the factor scale, data were collected from 114 undergraduate and graduate students enrolled at Dhurakij Pundit University in the 2022 semester. The average percentage of female students is 51.8%. The major subjects of the students are engineering, science, business and others, 45.6%, 43.9% and 8.8%, respectively. The participants self-assessed their performance at the end of the semester.

Participations RQ2

For the development of the creativity scale, data were collected from 16 undergraduate and graduate

students enrolled in the University of Creative Design and Entertainment Technology, Dhurakij Pundit University. Overall, 50% of first-year students, 25% of third-year students, and 12.5% of second- and fourth-year students completed the developed scale and participated in the classroom virtual learning environment as part of a course. Participants self-evaluated their performance at the end of the semester during class (Figure 2).

4. RESULTS

4.1 Pedagogy Factor Results

	Item-Total Statistics				
	Scale Mean if Item Deleted	Scale Variance if Item Deleted	Corrected Item-Total Correlation	Squared Multiple Correlation	Cronbach's Alpha if Item Deleted
Experiencing1	49.6754	63.849	.666	.565	.905
Experiencing2	49.6228	65.476	.621	.497	.906
Conceptualizing1	49.4298	65.769	.616	.587	.907
Conceptualizing2	49.4825	64.252	.721	.599	.903
Analyzing1	49.5439	64.038	.748	.679	.902
Analyzing2	49.5088	65.172	.639	.542	.906
Applying1	49.5789	64.016	.709	.651	.903
Applying2	49.6316	63.633	.670	.588	.904
Rule	49.1667	66.246	.589	.687	.907
Objective	49.3772	63.405	.692	.696	.903
Reward	49.9386	61.952	.653	.529	.905
Challenge	49.6667	63.127	.656	.537	.905
Leaderboard	50.7807	65.624	.328	.303	.923
FunActivity	49.7544	63.231	.652	.522	.905

Figure 3 Cronbach's Alpha by Removing Items

This figure shows all the elements that identify the processes of educational learning activities. The results illustrate the correlation of the factors by Cronbach's alpha. Cronbach's alpha is a measure of internal consistency, i.e., how closely a group of items is related. Cronbach's alpha can be written as a function of the number of test items and the average intercorrelation between items. The alpha (Figure 3) for the pedagogy factors is .92, indicating that 14 items have relatively high internal consistency. The results show that deleting Rule would result in a small improvement in Cronbach's alpha ($\alpha = .907$). All items have item-total correlation values greater than .2 (Figure 3). Analysis of the study data revealed acceptable reliability for the 14 pedagogy factors used in the study. All pedagogy factors are significantly associated with gamification elements. This is a factor used for the next area of learning outcomes.

Learning outcomes are influenced by the pedagogical factors shown in Figure 4. Learning outcomes can apply the gamification of these ideas to curriculum practice as a knowledge process: Experiencing, Conceptualizing, Analyzing, and Applying (factors in Figure 3) through gamification elements. The significant relationship shows (0.003) that GPA depends on how learners analyze the factor pedagogy during online instruction. The GPA target is also derived from the online teaching activities, gameplay, teamwork activities, analysis skills, rewards, and ranking activities.

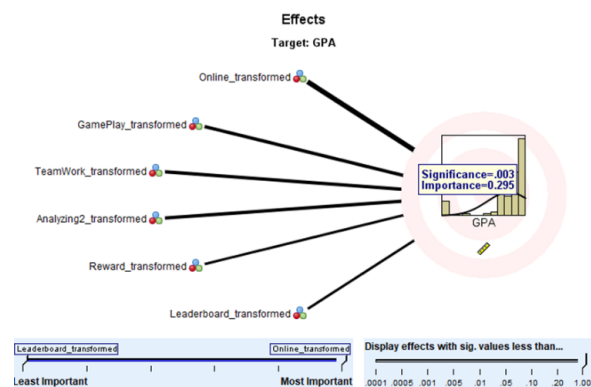


Figure 4 Pedagogy Factor and learning outcome

4.2 Creative Process Criteria Results

Mauchly's Test of Sphericity tests the null hypothesis that the variances of the differences are equal. The result shows that Mauchly's Test of Sphericity is statistically significant ($p > .05$) in task motivation and creativity-related skills between the on-site, hybrid, and online classrooms (Table 1.)

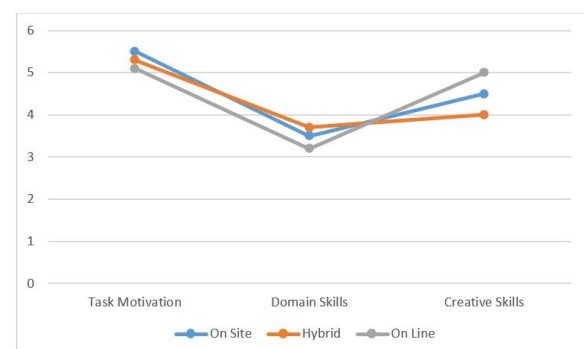


Figure 5 Creative Process

Table 1 Mauchly's Test of Sphericity

Within Subjects Effect	Measure	Mauchly's W	Approx. Chi-Square	df	Sig.	Epsilon ^b		
						Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt	Lower-bound
Class	Task	.291	17.262	2	.000	.585	.605	.500
	Domain	.830	2.607	2	.272	.855	.954	.500
	Creativity	.564	8.012	2	.018	.696	.745	.500

Table 2 Pearson Chi-Square between factors [Applied from 16,26,32]

Creative Relevant Skill	Factor	Pearson Chi-Square Value	df	Asymptotic Significance (2-sided)
C11 The current problem that needs to be solved in the class requires more than one step. [wide focus]	Task Motivation			
	Domain skill B41	31.302 ^a	20	.051
C12 The current problem in the class is future oriented. [wide focus]	Task Motivation	34.349 ^a	20	.024
	Domain skill B13	36.667 ^a	20	.013
C13 Participant restates the problem presented by the class. [wide focus]	Task Motivation	32.556 ^a	20	.038
	Domain skill B12, B41	33.200 ^a , 37.714 ^a	20, 25	.032, .049
C14 Participant is able to develop his/her own goals within the class. [wide focus]	Task Motivation			
	Domain skill B12, B16, B41	24.503 ^a , 25.829 ^a , 35.374 ^a	12, 15, 15	.017, .040, .002
C15 Participant is performing actions not related to tasks/goals. [wide focus]	Task Motivation	16.652 ^a	8	.034
	Domain skill B16, B17	22.044 ^a , 23.467 ^a	10, 10	.015, .009
C21 Participant transitions to a new topic area or action in the class. [Striving]	Task Motivation			
	Domain skill B16, B17, B31, B43	32.000 ^a , 33.010 ^a , 37.467 ^a , 21.973 ^a	20, 20, 16, 12	.043, .034, .002, .038
C22 Participant questioned how to complete tasks in the class. [Striving]	Task Motivation	29.667 ^a	16	.020
	Domain skill			
C23 Participant questions his/her current actions in the class. [Striving]	Task Motivation	31.600 ^a	20	.048
	Domain skill B11	34.178 ^a	20	.025
C25 Participant makes exclamations, as a positive or negative outburst. [Striving]	Task Motivation	44.413 ^a	24	.007
	Domain skill			
C32 Participant talks about the qualities of the materials, objects or attributes of the game world. [Concrete focus]	Task Motivation	33.244 ^a , 40.533 ^a	20, 20	.032, .004
	Domain skill B11, B13	31.289 ^a , 45.333 ^a	20, 25	.051, .008
C41 Participant describes action/tasks/goals in terms of analogies or metaphors. [Concept identification]	Task Motivation			
	Domain skill B12, B13, B31	32.427 ^a , 38.578 ^a , 37.511 ^a	20, 25, 20	.039, .041, .010
C42 Participant had eureka-type moments in the class. [Concept identification]	Task Motivation	34.693 ^a	20	.022
	Domain skill B43	30.560 ^a	15	.010

classroom. The on-site classroom may be more conducive to learner attention as a task motivator than other classrooms. However, the domain skills in creativity occur most frequently in the hybrid classroom. In the online classroom, the creativity-related skills are more prominent.

Table 2 illustrates the relationship between the creative criteria and the factors. Creative potential can be determined by examining the relationship between the skills required and the effect of intrinsic motivation within the activities. The factors relevant to creativity are the creative thinking component, including the ability to deviate from standard ideas, approaches, and solutions in problem solving. Individuals can gain experience in idea generation that can influence their own strategies for creative thinking processes [25]. Creativity-relevant skills are measured by the specific process factors of wide focus, concept identification, aspiration, and concrete focus [33]. This leads to the following questions, which will be answered in this study. The results show that task motivation influences the creative process in terms of broad focus, striving, concept identification, and concrete focus. Task motivation influences the number of ideas in the classroom. In addition, expertise plays an important role in developing an acceptable solution. Engaging in playful activities or imagination can have a positive effect that influences active engagement with creativity-related processes. The results show that domain knowledge enhances the process through wide focus, concept identification, striving, and concrete focus.

5. CONCLUSION

The conclusion is based on the research question. RQ1: What factors play a role in engaging learners in pedagogical processes during classroom activities? The results illustrate the immediately identifiable "knowledge processes": experiencing, understanding, analyzing, and applying that influence learner engagement. The pedagogy factors show that all items (14 items) have relatively high internal consistency between the pedagogy factors (Experiencing,

Understanding, Analyzing, and Applying) and the gamification elements by rule. Game Objective, Reward System, Challenge, Ranking, and Fun Factor. Question 2: How do specific instructional activities facilitate learner engagement in various components of the creative process during the learning experience? Results suggest that the effects of skill-based creative processes influence feelings of positive experiences. Results suggest that creative activities may influence learners' experiences of creative potential in the metaverse classroom. The effects of high task motivation and domain competence through instruction and gamification activities. However, task motivation influences the number of ideas in the traditional classroom. Results suggest that face-to-face activities stimulate learners more than online activities. In addition, the hybrid design for real-world experiences as a real-world affected.

6. DISCUSSION AND FUTURE RESEARCH

In class, a task can be prepared for teamwork and goal setting. While many factors can influence creative problem solving. Core processes that occur before or after idea generation, such as problem identification and construction and idea evaluation and selection, have received much less attention. The pedagogical approach focuses on analyzing the impact on learning outcomes. The pedagogical element promotes learning outcomes through reward and assessment activities. In this study, ideas for methods to measure learning outcomes are developed. The method should measure the pedagogical elements of experiencing, conceptualizing, analyzing, and applying. The inclusion of the gamification element can promote the learning outcome. The trigger can influence the creative process. The element and process are used to design the instructional activity.

This study will identify the triggering elements that influence creative skills during virtual classroom activities. The conceptual framework will help the educational system. The metaverse classroom can foster creative skills through a broad focus, identification of concepts, ambitions, and concrete tasks. Learners prefer

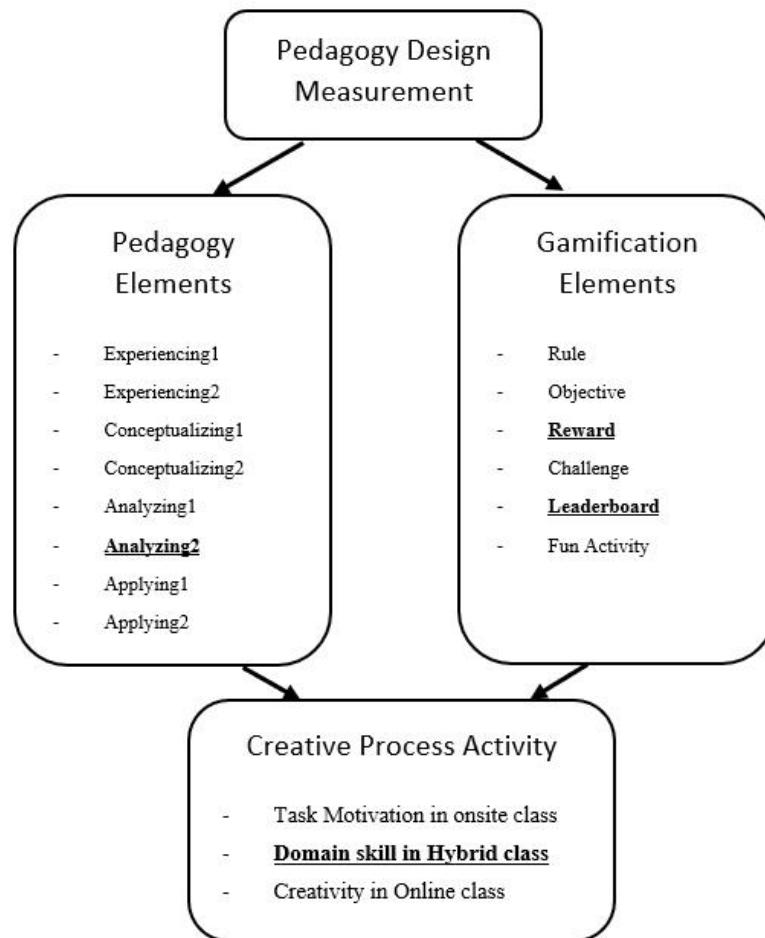


Figure 6 Gamification Pedagogy Trigger Design for Creative Experiences in Metaverse Classroom

and engage in the task by using gamification elements. The reward system will influence motivation. Figure 6 shows the conceptual framework for learners to design instructional activities. The framework aims to promote learning outcomes and design activities during instruction by using new technologies such as the hybrid (metaverse), online, and traditional classrooms. This study shows that analyzing can dominate the creative process. Future research will find other pedagogical triggers that promote creativity. Future work will examine creativity in virtual classrooms in other contexts, such as business or marketing courses. This will require a larger data set. Classroom activities will teach broad skills such as problem solving, reasoning, and other experiential skills. Deconstructing gamification elements will help educational designers foster creative thinking skills in people.

REFERENCES

- [1] Tilili, Ahmed & Huang, Ronghuai & Shehata, Boulus & Liu, Dejian & Zhao, Jialu & Metwally, Ahmed & Wang, Huanhuan & Denden, Mouna & Bozkurt, Aras & Lee, Lik-Hang & Beyoglu, Dogus & Altinay, Fahriye & Sharma, Ramesh & Altinay, Zehra & Li, Zhisheng & Jiahao, Liu & Ahmad, Faizan & Ying, Hu & Salha, Soheil & Burgos, Daniel. (2022). Is Metaverse in education a blessing or a curse: a combined content and bibliometric analysis. *Smart Learning Environments*. 9. 1–31. 10.1186/s40561-022-00205-x.
- [2] Díaz, J. E. M. (2020). Virtual world as a complement to hybrid and mobile learning. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)*, 15 (22), 267–274. <https://doi.org/10.3991/ijet.v15i22.14393>
- [3] Sanglier Contreras, Gastón & González, Aurora & Fernández, M^a & Cepa, Carmen & Zuñi Escobar, Juan Carlos. (2022). The Importance of the Application of the Metaverse in Education. *Modern Applied Science*. 16. 34. 10.5539/mas.v16n3p34.
- [4] Augenstein, Dominik & Morschheuser, Benedikt. (2022). Understanding human factors in the metaverse – an autonomous driving experiment.
- [5] Knowles, M.S. (1990) *The Adult Learner: A Neglected Species*, 4th edn, Houston, TX: Gulf Publishing.
- [6] Beetham, H., & Sharpe, R. (2007). An introduction to rethinking pedagogy for a digital age. In *Rethinking pedagogy for a digital age* (pp. 21–30). Routledge.

- [7] Luke, Allan, Courtney Cazden, A. Lin, and Peter Freebody. 2004. 'The Singapore Classroom Coding Scheme, Technical Report'. National Institute of Education, Center for Research on Pedagogy and Practice, Singapore.
- [8] Kalantzis, Mary and Bill Cope. 2010. 'The Teacher as Designer: Pedagogy in the New Media Age'. e- Learning and Digital Media 7: 200– 222.
- [9] Hamari, J., Koivisto, J., & Sarsa, H. (2014). Does Gamification Work?–A Literature Review of Empirical Studies on Gamification. Paper presented at the HICSS.
- [10] Dweck, C. S. (2009). "Mindsets: Developing talent through a growth mindset." *Olympic Coach* 21(1): 4–7.
- [11] Seaborn, K. and D. I. Fels (2015). "Gamification in theory and action: A survey." *International Journal of human-computer studies* 74: 14–31
- [12] Muntean, C. I. (2011). Raising engagement in e-learning through gamification. *Proc. 6th international conference on virtual learning ICVL*.
- [13] McGinnis, T., et al. (2008). Enhancing e-learning engagement using design patterns from computer games. *First International Conference on Advances in Computer-Human Interaction, IEEE*.
- [14] Simpson, P., & Jenkins, P. (2015). Gamification and Human Resources: an overview. Brighton: Brighton Business School, 1–6.
- [15] Kuindersma, E., et al. (2017). Building a game to build competencies. *International Conference on Games and Learning Alliance, Springer*.
- [16] Inchamnan, W. et al. (2022). The Pedagogy Gamification Design for Fun Engagement The 6th International Conference on Information Technology (InCIT2022)
- [17] Book experience
- [18] Cope, B., & Kalantzis, M. (2015). The things you do to know: An introduction to the pedagogy of multiliteracies. In *A pedagogy of multiliteracies* (pp. 1–36). Palgrave Macmillan, London.
- [19] Davis, F. (1989). Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319–340. doi:10.2307/249008. 10
- [20] Santanen, E. L., Briggs, R. O., & de Devreede, G.-J. (2002). Toward an understanding of creative solution generation. In *System Sciences, 2002. Bibliography 173 HICSS. Proceedings of the 35th Annual Hawaii International Conference on* (pp. 2899–2908): IEEE.
- [21] Campbell, D. T. (1960). Blind variation and selective retentions in creative thought as in other knowledge processes. *Psychological review*, 67(6), 380.
- [22] Getzels, J. W., & Csikszentmihalyi, M. (1976). *The creative vision: A longitudinal study of problem finding in art*: Wiley New York.
- [23] Wang, Y. (2008). On cognitive foundations of creativity and the cognitive process of creation. In (pp. 104–113): IEEE.
- [24] Amabile, T. M. (1983). The social psychology of creativity: A componential conceptualization. *Journal of personality and social psychology*, 45(2), 357.
- [25] Amabile, T. M. (Singer-songwriter). (1996). *Creativity in Context*. Boulder, Colorado. On: Westview Press Inc.
- [26] Inchamnan, W., Wyeth, P., Johnson, D. (2014). Design for Creative Activity: A Framework for Analyzing the Creative Potential of Computer Games. In: Pisan, Y., Sgouros, N.M., Marsh, T. (eds) *Entertainment Computing – ICEC 2014. ICEC 2014. Lecture Notes in Computer Science*, vol 8770. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45212-7_3
- [27] Reiter-Palmon, R. (2018). Creative cognition at the individual and team levels: What happens before and after idea generation. In: R.J. Sternberg & J.C. Kaufman (Eds.), *The Nature of Human Creativity* (pp. 184–202). Cambridge University Press
- [28] Bower, Matt. (2006). Virtual classroom pedagogy. *ACM Sigcse Bulletin*. 38. 148–152. 10.1145/1124706.1121390.
- [29] Reiter-Palmon, R, Herman, A.E., & Yammarino, F.J. (2008), Creativity and cognitive processes: Multi-level linkages between individual and team cognition. In: M.D. Mumford, S.T. Hunter, & K.E. Bedell-Avers (Eds.), *Multi-Level Issues in Creativity and Innovation: Research in Multi-Level Issues* (Vol. 7, pp. 203–267). Emerald Group Publishing Limited.
- [30] Cope, B., & Kalantzis, M. (2015). The things you do to know: An introduction to the pedagogy of multiliteracies. In *A pedagogy of multiliteracies* (pp. 1–36). Palgrave Macmillan, London.
- [31] Kalantzis, Mary and Bill Cope. 2010. 'The Teacher as Designer: Pedagogy in the New Media Age'. e- Learning and Digital Media 7: 200– 222.
- [32] Inchamnan, W., Wyeth, P., Johnson, D., Conroy, D. (2012). A Method for Measuring the Creative Potential of Computer Games. In: Herrlich, M., Malaka, R., Masuch, M. (eds) *Entertainment Computing – ICEC 2012. ICEC 2012. Lecture Notes in Computer Science*, vol 7522. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33542-6_23
- [33] Ruscio, J., Whitney, D. M. & Amabile, T. M. (1998). Looking inside the fishbowl of creativity: Verbal and behavioral predictors of creative performance. *Creativity Research Journal*, 11, 243–263

A Comparison of Models for Count Data with an Application to Over-Dispersion Data

Chadarat Tapan¹, Anamai Na-udom^{2*} and Jaratsri Rungrattanaubol³

^{1, 2} Department of Mathematics, Faculty of Science, Naresuan Universit

³ Department of Computer Science and Information Technology, Faculty of Science, Naresuan Universit

ABSTRACT

Count models have been widely used in various fields, such as medicine, biology, and public health. The most frequently used count models are Poisson regression, negative binomial regression, and discrete Weibull regression models. The objective of this study was to compare the performance of Poisson, negative binomial, and discrete Weibull regression models using two different sets of data with over-dispersion. The AIC, BIC, and log-likelihood fit statistics were used as the criteria to compare the count models. The results revealed that the negative binomial and discrete Weibull regression were the best fit models as they produced the smallest AIC, BIC, and log-likelihood fit statistics.

KEYWORDS: Count models, Over-dispersion data, Poisson regression, Negative regression, Discrete Weibull regression

*Corresponding Author: anamain@nu.ac.th

Received: 15/11/2022; Revised: 05/07/2023; Accepted: 14/07/2023

1. INTRODUCTION

Count data is a statistical data type which describes the frequency of events or items that are occurred within a fixed period of time. Count data can be found in a variety of fields, such as medicine, biological sciences, epidemiology, and public health. For example, the number of heart attacks, the number of students absent during a period of study, the number of men infected with human papillomavirus, the frequency of traffic accidents, the number of cigarettes smoked, and the number of people infected with COVID-19 on a daily basis (Hilbe J. M., 2014; J.-H Lee et al., 2012; Klakattawi H. et al., 2018). In order to extract a crucial information from the count data, a suitable approach such count data model is required for data analysis.

A regression model is the most frequently used as an analytical model. Its objective is to investigate the relationship between a response variable and predictor variables. There are two types of regression analysis: linear regression and non-linear regression. Linear regression is the most popular type of regression

analysis in which the line that best fits to the data according to a specified mathematical criterion is found (Kung-Yee Liang & Scott L. Zeger, 1993). When the response variable is count data, the classical regression model may not feasible to use. Thus, Poisson regression is the most popular model for modelling count data. The Poisson regression describes the relationship between predictor variables and the response variable. Poisson distribution, with the conditional mean of occurrence equal to the variance of the response, which is called equi-dispersion (Saputo D. et al., 2021; Wan Tang et al., 2012).

In most cases, the variance of the response variable is greater than its mean, which is known as over-dispersion. The extent of over-dispersion may be determined simply by comparing the sample mean with the variance of the response variable (Cameron A. C. & Trivedi P. K., 2013). In some situation, the over-dispersed data are caused by the fact that the data contains outliers. A negative binomial regression model or a gamma distribution mixture model is commonly considered the default choice for over-dispersed count

data since the variance of the response variable exceeds the mean (Hilbe J. M., 2014). Moreover, in the case of large sample sizes, the discrete Weibull regression model is an attractive alternative to the negative binomial regression model for over-dispersed count data (Klakattawi H. et al., 2018).

There have been a variety of researches conducted to deal with over-dispersion data for count data models. For instance, Ver Hoef and Boveng (2007) proposed a model for over-dispersed count data using quasi-Poisson and negative binomial regression. The data collection was based on aerial surveys of harbor seals. These counts were affected by date, time of day, and time relative to low tide. They provided results from a data set that showed a dramatic increase in harbor seal abundance when using quasi-Poisson versus negative binomial regression. Linden A. and Mantyniemi S. (2011) used negative binomial regression to investigate model over-dispersion in bird migration data sets. According to the findings, the negative binomial regression model could be a reasonable approximation for modeling marginal distributions of independent count data. J.-H. Lee, G. Han, W. J. Fulp, and A. R. Giuliano (2012) demonstrated Poisson, negative binomial, zero-inflated Poisson, and zero-inflated negative binomial models for over-dispersion count data. The data set contained the number of incidents involving human papillomavirus infection. The four models produced different statistical findings. Klakattawi H., Vinciotti V., and Yu K. (2018) presented a count data model based on a discrete Weibull regression and compared it to Poisson and negative binomial regression based on over-dispersion data. The result found that the discrete Weibull regression could be applied to over-dispersion data better than other models. Yinglin Xia et al. (2012) analyzed data from HIV preventive intervention studies and compared four popular statistical models: Poisson, negative binomial, zero-inflated Poisson, and zero-inflated negative binomial. They found that a zero-inflated negative binomial was better than other models under the likelihood ratio test, AIC, and BIC criteria.

Melliana A. et al. (2013) used data on the number of cervical cancer cases to compare generalized Poisson and negative binomial regression, which was an indicator of over-dispersion. The negative binomial regression model was the best model since it had the lowest AIC value. Avei E., Alturk S., and Soyly E. (2015) compared over-dispersed algal data count data models. The regression models of Poisson, quasi-Poisson, negative binomial, and COM-Poisson were considered. Because the log likelihood and AIC were the minimum, COM-Poisson regression was the best-fit model. Jasin M., Hussein M., and Hamodi H. (2017) compared models for the number of patients infected with pneumonia. The Geometric, hurdle, and zero inflated-Geometric regressions were compared. The results of log likelihood and AIC indicated the zero inflated-Geometric regression was the best fit. Alebachew A. (2019) collected data from lecturers' publications between November 2015 and 2016 and compared the performances of count data models such as Poisson, negative binomial, zero-inflated negative binomial (ZINB), zero-inflated Poisson, and Poisson hurdle. The ZINB regression model was chosen as the most appropriate and efficient regression model based on AIC value. Durmus B. and Guneri O. I. (2020) studied the generalized Poisson and Poisson regression models for over-dispersion data on the number of strikes between 1984 and 2017. The result found that the generalized Poisson was the best model.

In this paper, we compared count data models using simulation study and two different over-dispersion real data sets. Three models namely Poisson, negative binomial, and discrete Weibull regression were compared in this paper. The main difference between this paper and the other papers published so far is that we aimed to compare count data models for a small sample size using both of real data sets and simulation studies. In the next section, we present materials and methods which cover the details of models used in this study. The parameter estimation method and the details of data sets are also presented. The results and conclusions will be presented in the last section.

2. MATERIALS AND METHODS

In this section, we introduce models for count data namely Poisson, negative binomial, and discrete Weibull regression models, as well as methods of parameter estimation, criteria used to validate the model performance and simulation study, respectively. Further the details of data sets used in the study are also presented.

2.1 Poisson Regression

Poisson regression is a popular and fundamental model for modeling count data. In some situations, the response variable represents a count data of some rare event or a count of particulate matter. Hilbe J. M. (2014) introduced the Poisson model where the response variable is a count number, or the response terms must be nonnegative integers. The observations are independent of one another, while the mean and variance of the model are identical. The discrete random variable is Poisson distribution with parameter μ ; $\mu > 0$. The probability mass function (pmf) is

$$f(y; \mu) = \frac{e^{-\mu} \mu^y}{y!}, \quad y = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

where mean and variance are $E(Y) = \mu$ and $Var(Y) = \mu$, respectively (Nakagawa T. & Osaki S., 1975).

The maximum likelihood method was used to estimate the parameters in a Poisson distribution. Given a random sample from a Poisson distribution, the log-likelihood function (Cameron A. C. & Trivedi P. K., 2013) can be written as

$$\ln L(y_i; \mu) = -n\mu - \sum_{i=1}^n \ln(y_i!) + \ln \mu \sum_{i=1}^n (y_i) \quad (2)$$

Maximum likelihood estimator of μ is

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3)$$

The log-link function is used with the Poisson distribution and can be written as

$$\mu_i = e^{X_i' \beta}; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

where $X_i' = (X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{ik})$ is a vector of covariates and $\beta = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)'$ is an unknown vector of regression coefficients (Montgomery et al., 2012).

The Poisson regression is formulated as

$$Y_i = \exp(X_i' \beta) \quad (5)$$

where Y_i is a vector of response variable in the form of size of vector (Saputo D. et al., 2021).

Maximum likelihood estimation method has been widely used to estimate the parameters in Poisson regression. From Equation (2), log likelihood function can be expressed as follows

$$\ln L(y_i; \beta) = \sum_{i=1}^n \{y_i X_i' \beta - e^{(X_i' \beta)} - \ln(y_i!)\} \quad (6)$$

2.2 Negative Binomial Regression

From the previous section, the assumption of the Poisson regression model was the equality of mean and variance. In most situation, the variance will exceed the mean, $Var(Y) > E(Y)$, and the distribution allows for over-dispersion. Hence, the negative binomial regression would be suggested (Ismail N. & Jemain A., 2007). Hilbe J. M. (2014) summarized the negative binomial regression model's assumptions as follows: the response variable is a count of nonnegative integers.

The negative binomial distribution or the Poisson-gamma mixture distribution (Cameron A. C. & Trivedi P. K., 2013) has the probability distribution function as

$$f(y; \mu, \alpha) = \binom{y + \frac{1}{\alpha} - 1}{\frac{1}{\alpha} - 1} \left(\frac{1}{1 + \alpha \mu_i} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \left(\frac{\alpha \mu_i}{1 + \alpha \mu_i} \right)^{y_i} \quad (7)$$

or

$$f(y; \mu, \alpha) = \frac{\Gamma(y + \alpha^{-1})}{\Gamma(y + 1) \Gamma(\alpha^{-1})} \left(\frac{\alpha^{-1}}{\alpha^{-1} + \mu} \right)^{\alpha^{-1}} \left(\frac{\mu_i}{\alpha^{-1} + \mu} \right)^y$$

where $\alpha \geq 0$, $y = 0, 1, 2, \dots$. The function $\Gamma(\cdot)$ is the gamma function. The mean and variance of Y are $E(Y) = \mu$ and $Var(Y) = \mu + \mu^2\alpha = \mu(1 + \alpha\mu)$.

In order to fit the negative binomial distribution, the parameter must be estimated by using maximum likelihood method. For a given random sample $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ from the negative binomial distribution, the log-likelihood function can be presented in μ formats as follows

$$L(y; \mu, \alpha) = \sum_{i=1}^n y_i \ln \left(\frac{\alpha \mu_i}{1 + \alpha \mu_i} \right) - \frac{1}{\alpha} \ln(1 + \alpha \mu_i) + \ln \Gamma \left(y_i + \frac{1}{\alpha} \right) - \ln \Gamma(y_i + 1) - \ln \Gamma \left(\frac{1}{\alpha} \right). \quad (8)$$

The negative binomial regression model used the log-link function (Hilbe J. M., 2014) given by

$$\ln(\mu_i) = \ln(E(Y|\alpha, \beta)) = X_i' \beta; \quad 1 \leq i \leq n \quad (9)$$

or $\mu_i = \exp(X_i' \beta)$

when β is unknown vector of regression coefficients.

Maximum likelihood estimation was used to estimate the parameters of negative binomial regression. The log-likelihood function is given by

$$L(y; \beta, \alpha) = \sum_{i=1}^n y_i \ln \left(\frac{\alpha \exp(X_i' \beta)}{1 + \alpha \exp(X_i' \beta)} \right) - \frac{1}{\alpha} \ln(1 + \alpha \exp(X_i' \beta)) + \ln \Gamma \left(y_i + \frac{1}{\alpha} \right) - \ln \Gamma(y_i + 1) - \ln \Gamma \left(\frac{1}{\alpha} \right) \quad (10)$$

2.3 Discrete Weibull (DW) Regression

Klakattawi et. al. (2018) introduced the discrete Weibull regression model for count data for 3 types of dispersions: over-dispersion, under-dispersion, and covariate-specific dispersion. Most of the research applied the NB regression model to the over-dispersion count data. For this reason, in this study, we compare the DW regression models with the NB regression models. In addition, the DW regression model was compared with the Poisson model to obtain clear study results.

If a random variable Y follows the discrete Weibull distribution (type I) (Nakagawa T. & Osaki S., 1975), then the pmf is given by

$$f(y; q, \alpha) = q^{y^\alpha} - q^{(y+1)^\alpha}; \quad y = 0, 1, 2, \dots, \quad (11)$$

where the parameter $0 < q < 1$ and $\alpha > 0$.

The mean and variance for DW distribution are given by, respectively,

$$E(Y) = \mu = \sum_{y=1}^{\infty} q^{y^\alpha}$$

and

$$Var(Y) = \sigma^2 = 2 \sum_{y=1}^{\infty} y q^{y^\alpha} - \mu - \mu^2.$$

We can estimate the parameter for a DW distribution by using the maximum likelihood method. Given that $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ are a random sample from a DW distribution, the log-likelihood is given by

$$L(y; q, \alpha) = \sum_{i=1}^n \log \left(q^{y_i^\alpha} - q^{(y_i+1)^\alpha} \right). \quad (12)$$

Klakattawi et.al. (2018) introduced the model of the relationship between a count response variable and a set of covariates when the response Y_i has a DW conditional distribution $f(y_i, q(x_i), \alpha | x_i)$; $q(x_i)$ is the DW parameter related to the explanatory variables X_i through the link function:

$$\log(-\log(q_i)) = x_i' \beta, \quad x_i' \beta = \beta_0 + x_{i1} \beta_1 + \dots + x_{ik} \beta_k. \quad (13)$$

According to Equation (13), q_i can be illustrated as

$$q_i = e^{-e^{x_i' \beta}}, \quad (14)$$

from which the conditional probability mass function of the response variable Y_i given X_i is as below.

$$f(y_i | x_i) = \left(e^{-e^{x_i' \beta}} \right)^{y_i^\alpha} - \left(e^{-e^{x_i' \beta}} \right)^{(y_i+1)^\alpha} \quad (15)$$

Parameter estimation for unknown parameter β and α used method of maximum likelihood estimation. The log-likelihood is given by

$$L(y; \beta, \alpha) = \sum_{i=1}^n \log \left[\left(e^{-e^{x_i' \beta}} \right)^{y_i^\alpha} - \left(e^{-e^{x_i' \beta}} \right)^{(y_i+1)^\alpha} \right]. \quad (16)$$

2.4 Method of Parameter Estimation

The maximum likelihood estimation (MLE) method is the most widely used to estimate the unknown parameters of an assumed probability distribution. For a given observed data, MLE attempts to find the parameters with the highest joint probability by using an optimization method. In this case MLE method aims to find the maximum of the likelihood function $L(\theta; y)$. If the likelihood function is differentiable, the derivative methods can be directly applied to find the maxima. In most circumstances, numerical methods are necessary to find the maximum of the likelihood function. The computational methods used when the estimate of MLE is not in a closed explicit form are the Newton-Raphson iterative method, the method of scoring, the simplex method, and the EM algorithm (Cameron A. C. & Trivedi P. K., 2013; Garthwaite et al., 2002). In practice, it has been observed that maximization of log-likelihood function $\ln[L(\theta; y)]$ is much easier than direct maximization of $L(\theta; y)$. In this paper, we presented the log-likelihood function for estimating the parameters of count data models. We used the package in the R program to estimate the parameters or coefficients for count data models. The analysis was carried out in the R program by using the `glm()` function, `glm.nb()` function, and the package 'DWreg', respectively.

2.5 Criteria

This section presents the criteria for comparing count data models. For fitted models, most papers used the Akaike information criterion (AIC), Bayesian information criterion (BIC), and log-likelihood (LL). In 1973, Hirotugu Akaike proposed a model selection criterion based on the fitted log-likelihood function. The AIC is the most commonly used fit statistic. Let L be the model likelihood, p is the number of parameters (predictors) in the model. The AIC is $AIC = -2\ln(L) + 2p$ (Cameron A. C. & Trivedi P. K., 2013). In 1978, Gideon Schwarz proposed the modification to AIC include the Bayesian information criterion. The formula of BIC is $BIC = -2\ln(L) + p\ln(n)$ with p is number of

parameter and n the number of observations in the model (Hilbe J. M., 2014). When considering the maximum likelihood method, the log-likelihood (LL) test can be used for model comparisons. The LL test can be used to determine whether or not there is over-dispersion. Probability ratio statistics is calculated as; $LL = 2(\ln L_1 - \ln L_0)$. Where L_1 and L_0 are the log-likelihood under the respective hypothesis. When the AIC and BIC values are the least, or the LL value is the greatest, it is possible to conclude that a model is excellent (Montgomery et al., 2012).

2.6 Simulation studies

In order to implement the count data models, we simulate the data set and then apply the three count data models with the simulated data set. The details of conducting simulation studies are given as follows:

We set the simple regression model using equation (17)

$$\log \mu_i = \beta_0 + \beta_1 x_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (17)$$

We set up different sample sizes (n) as $n=20, 50, 100, 500$. All the results are based on the average of 1,000 repetitions through the following steps:

- 1) Simulation of random samples of sizes n to present the predictor variables from the normal distribution, $x \sim N(0,1)$.
- 2) Set up the parameters $\beta_0 = 1.5, \beta_1 = 1$.
- 3) Simulation of data from a Poisson inverse Gaussian distribution as the true model with a sample size n , $\mu = 1.5$ and $\sigma = 2$.
- 4) Estimation of parameters by MLEs method.
- 5) Repeat steps 1–4 for 1,000 times and then compute the average MLEs, bias, and MSEs.

2.7 Data Sets

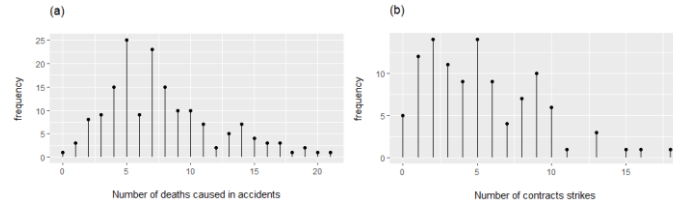
In this study, we also consider two over-dispersion data sets as an application of the count data models. These two data sets have been selected as they are similar in terms of sample sizes and the same over-dispersion. The two data sets consist of the number of deaths caused by accidents per day and the dataset in the `Ecdat` R package. The details of each data set are given below.

Table 1 The number of deaths caused in accidents per day from January to June of 2021.

Count	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frequency	1	3	8	9	15	25	9	23	15	10	10
Count	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	≥ 21
Frequency	7	2	5	7	4	3	3	1	2	1	1

Table 2 The number of contracts strikes in US manufacturing observed monthly from January 1968 to December 1976.

Count	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	15	16	18
Frequency	5	12	14	11	9	14	9	4	7	10	6	1	3	1	1	1

**Figure 1** (a) The distribution of the number of caused in accidents per day and (b) the distribution of the number of contracts strikes in US manufacturing.**Table 3** The coefficients of the Poisson, NB, and DW regression models and model comparison based on the simulation studies.

n	Model	parameter	Estimates Coefficient	AIC	BIC	LL
20	Poisson	β_0	0.64442	78.9700	80.9615	-37.4850
		β_1	-0.04653			
	NB	β_0	0.64457	78.2695	81.2566	-36.1347
		β_1	-0.04934			
	DW	β_0	-1.3582	78.1311	81.1183	-36.0656
		β_1	0.0854			
50	Poisson	β_0	0.2071	171.3467	175.1707	-83.67334
		β_1	-0.2931			
	NB	β_0	0.2145	163.3170	169.053	-78.65849
		β_1	-0.2678			
	DW	β_0	-0.6752	163.3486	169.0846	-78.67428
		β_1	0.2217			
100	Poisson	β_0	0.2095	305.2494	310.4598	-150.6247
		β_1	0.0362			
	NB	β_0	0.20959	302.5666	310.3822	-148.2833
		β_1	0.03696			
	DW	β_0	-0.87466	302.3092	310.1247	-148.1546
		β_1	-0.06101			
500	Poisson	β_0	0.33585	1820.7274	1829.1566	-908.3637
		β_1	0.03624			
	NB	β_0	0.3358	1634.8996	1647.5434	-814.4498
		β_1	0.0399			
	DW	β_0	-0.6565	1635.0194	1647.6632	-814.5097
		β_1	-0.0340			

Table 4 The coefficients of the Poisson, NB, and DW regression models and model comparison of the data set 1.

Coefficients/Criterion	Poisson		NB		DW	
	Estimates Coefficient	Standard Error	Estimates Coefficient	Standard Error	Estimates Coefficient	Standard Error
Intercept	1.52032	0.0433	1.51040	0.0608	-4.2382	0.2848
Number of accidents	0.00465	0.0002	0.00473	0.0004	-0.0112	0.0013
AIC	1003.381		969.162		970.768	
BIC	1009.778		972.384		980.363	
LL	-499.690		-481.581		-482.384	

Table 5 The coefficients of the Poisson, NB, and DW regression models and model comparison of the data set 2.

Coefficients/Criterion	Poisson		NB		DW	
	Estimates Coefficient	Standard Error	Estimates Coefficient	Standard Error	Estimates Coefficient	Standard Error
Intercept	1.6539	0.0422	1.6538	0.0686	-3.0704	0.2625
Economic activity	3.1342	0.8032	3.2250	1.2841	-5.2937	1.8958
AIC	627.969		566.597		564.157	
BIC	633.333		574.643		572.203	
LL	-311.985		-280.298		-279.079	

Data set 1: The number of deaths caused by accidents per day from January to June of 2021, which included 181 observations obtained from the website of government data in Thailand: <https://datagov.mot.go.th/>. The predictor variable is the number of accidents per day, and the response variable is the number of deaths caused by accidents per day. The sample mean and variance of the response variable are 8.3867 and 38.6829, respectively. This clearly indicates the existence of over-dispersion as the response variance is larger than the mean. The details of data set are shown in Table 1.

Data set 2: The StrikeNb dataset, which was retrieved from Ecdat R package at <http://CRAN.R-project.org/package=Ecdat>. The response variable is the number of contracts strikes in US manufacturing, observed monthly from January 1968 to December 1976, which includes a total of 108 observations. The predictor is the level of economic activity, defined as the cyclical deviation of aggregate production from its trend level. The sample mean and variance of the response variable are 5.2407 and 14.0723. It can be clearly seen that the response variance is larger than mean, indicating the existence of over-dispersion. Table 2 displays data from the second data set.

3. RESULTS

The modeling results of the Poisson regression, negative binomial (NB) regression, and discrete Weibull (DW) regression obtained from the simulation study and two data sets are presented in this section. Comparison results based on the AIC, BIC, and LL fit statistics are presented in Tables 3–5, respectively.

Table 3 presents the comparison of the three models obtained from the simulation studies. The results show that the DW regression provides the smallest AIC value at sample sizes of 20 and 100. It is however, when the sample sizes are 50 and 500, the NB regression shows a minimal AIC value.

Table 4 presents the comparison for the 3 models obtained from the first data set, including Poisson, NB, and DW regression models. The results show that the NB regression provides the smallest AIC value with slightly lower than that of DW regression model. When we consider the BIC value, it indicates that NB regression model fits this data set well. Further, NB regression yields the highest value of LL criterion. This indicates that NB regression is the best fit for data set 1 with the coefficients estimated about 1.51040 and 0.00473, respectively. The regression equation for the number of deaths caused by traffic accidents can be expressed as $y = \exp(1.5104 + 0.00473x)$.

Table 5 compares the three models using the second data set. The results illustrate that the DW regression provides the smallest AIC and BIC values and the largest LL value. It can be clearly seen that the differences between the LL values of NB regression and DW regression are very small, hence it could be concluded that DW regression is the best model for data set 2. The coefficients estimated of the DW regression are approximately -3.0704 and -5.2937 , respectively. The regression equation for the number of contract strikes is given as $y = \exp(-\exp(-3.0704 - 5.2937x))$.

According to the comparative results among three regression models for overdispersion data using the simulation studies and two data sets as presented in Tables 3–5. We have observed that either NB regression or DW regression models are superior over Poisson regression model with respect to AIC, BIC, and LL criteria. Hence, both of NB regression and DW regression models are recommended to be used for overdispersion data.

4. CONCLUSION

This paper presents a comparative study of count data models for over-dispersion data. The count models included in this study are Poisson regression, NB regression, and DW regression, respectively. We study base on the simple regression models by the simulation studies. The data sets used are the number of deaths caused by traffic accidents per day and the strikeNb data set from the Ecdat R package. The criteria for comparing regression models are AIC, BIC, and LL values. The results show that the NB regression and DW regression are the best fit models for over-dispersion data under study. In order to extend the conclusion, more data sets or other models such as Poisson-weighted exponential regression could be further investigated.

REFERENCES

- Alebachew A. (2019). A Comparison of count regression models on modeling of instructors publication factors: application of Ethiopian public universities. *American Journal of Theoretical and Applied Statistics*, 8(5): 169–178.
- Avei E., Alturk S. & Soyulu E. (2015). Comparison count regression models for overdispersed alga data. *IJRRAS*, 251(1).
- Cameron A. C. & Trivedi P. K. (2013). *Regression Analysis of Count Data*. Cambridge, New York: The United States of America.
- Cupal M., Deev O. & Linnertova D. (2015). The Poisson regression analysis for occurrence of floods. *Procedia Economics and Finance*, 23: 1499–1502.
- Davide Chicco, Matthijs J. Warrens & Giuseppe Jurman. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 18: 1–24. doi: 10.7717/peerj-cs.623.
- Durmus B. & Guneri O. I. (2020). An application of the generalized Poisson model for over dispersion data on the number of strikes between 1984 and 2017. *Alphanumeric journal*, 8(2): 249–260.
- Emrah Altun. (2019). A new model for over-dispersed count data: Poisson quasi-Lindley regression model. *Mathematical Science*, 13, 241–247.
- Garthwaite P. H., Jolliffe I. T. & Jones B. (2002). *Statistical Inference*. Oxford University Press Inc., New York.
- Gençtürk Y. & Yigiter A. (2016). Modelling claim number using a new mixture model: negative binomial gamma distribution. *Journal of statistical computation and simulation*, 86(10), 1829–1839.
- Grine R. & Zeghdoudi H. (2017). On Poisson quasi-Lindley distribution and its application. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 16(2): 403–417.
- Harris T., Yang Z. & Hardin J. W. (2012). Modeling underdispersed count data with generalized Poisson regression. *The Stata Journal*, 12(4): 736–747.
- Hilbe J. M. (2014). *Modeling count data*. Cambridge University: www.cambridge.org/9781107611252.
- Husain M. and Bagmar S. H. (2015). Modeling under-dispersed count data using generalized Poisson regression approach. *Global Journal of Quantitative Science*, 2(4): 22–29.
- Ismail N. & Jemain A. (2007). Handling overdispersion with negative binomial and generalized poisson regression model. *Casualty Actuarial Society Forum*, 103–158.
- Jasin M., Hussein M. & Hamodi H. (2017). Comparison count regression models for the number of infected of Pneumonia. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 13: 5359–5366.
- J.-H Lee, G. Han, W. J. Fulp & A. R. Giuliano. (2012). Analysis of overdispersed count data: application to the Human papillomavirus infection in men (HIM) study. *Epidemiol infect*, 140(6), 1087–1094.
- Klakattawi H., Vinciotti V. & Yu K. (2018). A simple and adaptive dispersion regression model for count data. *Entropy*, 20(142).
- Kung-Yee Liang & Scott L. Zeger. (1993). Regression Analysis for Correlated Data. *Annu. Rev. Pub. Health*. 14:43–68.
- Linden A. & Mantyniemi S. (2011). Using the negative binomial distribution to model overdispersion in ecological count data. *Ecology*, 92(7), 1414–1421.
- Loomis D., Richardson D. B. & Elliott L. (2005). Poisson regression analysis of ungrouped data. *Occup Environ Med*, 62: 325–329.
- Melliana A. et. al. (2013). The comparison of generalized Poisson regression and negative binomial regression method in overcoming overdispersion. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2; 255–258.

- Montgomery D. C., Peck E. & Vining G.G. (2012). Introduction linear regression analysis. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey.
- Nakagawa T. & Osaki S. (1975). The discrete Weibull distribution. IEEE Trans. Reliab, 24: 300-301.
- Saputo D., Susanti A. & Pratiwi N. (2021). The handling of overdispersion on Poisson regression model with the generalized poisson regression model. AIP Conference Proceedings 2326, 020026, (1-8).
- Ver Hoef, J. M. & Boveng, Peter L. (2007). Quasi-Poisson vs. negative binomial regression: How should we model overdispersed count data. Publication, Agencies and Staff of the U.S. Department of Commerce, 142.
- Wan Tang, Hua He & Xin M. Tu. (2012). Applied Categorical and Count Data Analysis. Taylor & Francis Group: London New York.
- Yinglin Xia & et. al. (2012). Modeling count outcomes from HIV risk reduction interventions: A comparison of competing statistical models for count responses. AIDS Research and Treatment, 2012: 593569.

ตัวแบบทางสถิติสำหรับศึกษาอัตราการเกิดการเสียชีวิตของผู้ติดเชื้อ COVID-19 ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN)

Statistical Models for Studying the Incidence Rate of Deaths Among People Infected with COVID-19 in Southeast Asian (ASEAN) Countries

สมพร เทพนิม¹ ศิริพร สมุทรวิชรวงษ์^{2*} สุภาวดี สุวิธรรมา³ และ จุฬารัตน์ ชุมนวล^{4,5}

Somporn Thepchim¹, Siriporn Samutwachirawong^{2*}, Suphawadee Suwithamma³ and Jularat Chumnaul^{4,5}

¹สาขาวิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

²สาขาวิชาสถิติและการจัดการสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

³สาขาวิชาสถิติประยุกต์และวิทยาการข้อมูล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

⁴สาขาวิทยาศาสตร์การคำนวณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

⁵หน่วยวิจัยสถิติและการประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

¹Program of Applied Statistics, Faculty of Science, Ubon Ratchathani Rajabhat University

²Section of Statistics and Information Management, Faculty of Science, Maejo University

³Program of Applied Statistics and Data Science, Faculty of Science and Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University

⁴Division of Computational Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University

⁵Statistics and Applications Research Unit, Faculty of Science, Prince of Songkla University

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างตัวแบบทางสถิติสำหรับศึกษาอัตราการเกิดการเสียชีวิตของผู้ติดเชื้อ COVID-19 ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN) โดยตัวแปรอิสระที่นำมาศึกษา คือ ประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จำนวนผู้ป่วยยืนยัน (confirmed case) รวม อัตราแพร่เชื้อ (reproduction rate) และดัชนีมาตรการควบคุมการระบาด (stringency index) โดยในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลทุติยภูมิและใช้การวิเคราะห์การถดถอยพัวซงและการวิเคราะห์การถดถอยทวินามลบในการสร้างตัวแบบ ผลการศึกษพบว่า ตัวแบบการถดถอยพัวซงไม่เหมาะสมกับข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาเนื่องจากข้อมูลมีความแปรปรวนสูงกว่าค่าเฉลี่ยเป็นอย่างมากหรือเกิดปัญหาการกระจายเกินเกณฑ์ (overdispersion) โดยมีค่า $AIC = 39590.932$ ส่วนตัวแบบที่เหมาะสมกับข้อมูลสำหรับศึกษาอัตราการเกิดการเสียชีวิตของผู้ติดเชื้อ COVID-19 ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN) คือ ตัวแบบการถดถอยทวินามลบ (deviance = 1347.708, Pearson chi-square = 1230.049, และ $AIC = 8608.771$) โดยพบว่า ประเทศไทยมีอัตราหรือความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตจาก COVID-19 สูงกว่าประเทศอื่น ๆ ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN) โดยประเทศกัมพูชา ประเทศอินโดนีเซีย ประเทศลาว ประเทศมาเลเซีย ประเทศฟิลิปปินส์ ประเทศสิงคโปร์ และประเทศเวียดนาม มีอัตราหรือความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตจาก COVID-19 น้อยกว่าประเทศไทย 97.4%, 81.9%, 94.4%, 40.3%, 99.7%, 73.2%, 72.5%, และ 61.8% ตามลำดับ

คำสำคัญ: ตัวแบบการถดถอยพัวซง, ตัวแบบการถดถอยทวินามลบ, อัตราอุบัติการณ์, อัตราแพร่เชื้อ, ดัชนีมาตรการควบคุมการระบาด

ABSTRACT

The objective of this research is to find a suitable statistical model to study the incidence rate of deaths among people infected with COVID-19 in Southeast Asian (ASEAN) countries. The independent variables considered in this study are countries in Southeast Asia, the total confirmed cases of COVID-19, the reproduction rate, the stringency index, and the new deaths attributed to COVID-19. The online secondary data is used in this study, and the models considered are the Poisson regression model and the negative-binomial regression model. The results show that the Poisson regression model is unsuitable for the data used in this study because the variance of this data is significantly higher than its mean; this is called the overdispersion problem. On the other hand, the negative-binomial regression model is the most suitable model for studying the incidence rate of deaths among people infected with COVID-19 in Southeast Asian countries. Moreover, Thailand has been found to have

a higher incidence rate of death from COVID-19 than other Southeast Asian countries; the incidence rate of death from COVID-19 in Cambodia, Indonesia, Laos, Malaysia, Philippines, Singapore, and Vietnam is lower than in Thailand by 99.5%, 99.4%, 28.1%, 99.4%, 72.0%, 99.7%, 56.0%, 97.9%, and 45.4%, respectively.

KEYWORDS: Poisson regression model, negative-binomial regression model, incidence rate, reproduction rate, stringency index

*Corresponding Author: siriporn_sm@mju.ac.th

Received: 25/07/2022; Revised: 21/02/2023; Accepted: 14/06/2023

1. บทนำ

ในช่วงต้นปี พ.ศ. 2563 ประชาคมโลกประสบกับวิกฤตการระบาดของไวรัส COVID-19 ซึ่งเป็นโรคติดต่ออุบัติใหม่ที่ระบาดไปทั่วโลกอย่างรวดเร็ว โดยโรคติดต่อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) เกิดจากการติดเชื้อไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ 2019 (Zhu et al., 2020) หรือเชื้อไวรัส COVID-19 คำว่า COVID-19 ย่อมาจาก Coronavirus disease 2019 ซึ่งถูกตั้งชื่อโดยองค์การอนามัยโลก (world health organization : WHO) เมื่อวันที่ 11 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563 ต่อมาคณะกรรมการระหว่างประเทศ ว่าด้วยอนุกรมวิธานของไวรัส (international committee on taxonomy of viruses: ICTV) ได้ประกาศชื่อที่เป็นทางการของเชื้อที่เป็นสาเหตุของ COVID-19 ว่าเป็น “เชื้อไวรัสโคโรนาโรคทางเดินหายใจเฉียบพลันรุนแรงชนิดที่สอง” (severe acute respiratory syndrome coronavirus 2) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า “เชื้อไวรัส SARS-CoV-2” (Guo et al., 2020) เชื้อไวรัส SARS-CoV-2 พบรายงานการระบาดครั้งแรกในเดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2562 ในนครอู่ฮั่น เมืองหลวงของมณฑลหูเป่ย์ สาธารณรัฐประชาชนจีน และในวันที่ 30 มกราคม พ.ศ. 2563 องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้ประกาศให้การระบาดนี้เป็นภาวะฉุกเฉินทางสาธารณสุขระหว่างประเทศ (public health emergency of international concern – PHEIC) ต่อมาพบว่าเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ได้มีการแพร่ระบาดไปมากกว่า 200 ประเทศทั่วโลก องค์การอนามัยโลก (WHO) จึงได้ประกาศยกระดับให้เป็นภาวะการระบาดใหญ่ทั่วโลก (pandemic) ในวันที่ 11 มีนาคม พ.ศ. 2563 จากภาวะดังกล่าวไม่เพียงแต่จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของทุกคนเท่านั้น หากแต่ยังส่งผลกระทบต่อภาพรวมของเศรษฐกิจโลกและส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

สมาคมประชาชาติแห่งเอเชียตะวันออกเฉียงใต้หรืออาเซียน (Association of Southeast Asian Nations:

ASEAN) เป็นความร่วมมือระหว่างประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ 10 ประเทศ ก่อตั้งขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2510 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตของประชากรในภูมิภาคด้วยการสร้างความเติบโตทางเศรษฐกิจ พัฒนาสังคม และวัฒนธรรม ตลอดจนส่งเสริมและดำรงไว้ซึ่งสันติภาพ และเสถียรภาพในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ การระบาดของโรคติดต่อนำมาซึ่งการชะลอตัวของการเติบโตทางเศรษฐกิจทั้งในระดับชาติ และภาพรวมเศรษฐกิจ ภูมิภาคอันเนื่องมาจากการท่องเที่ยว การค้า และการผลิตที่ลดลงในขณะเดียวกันก็ได้ส่งผลต่อสภาพจิตใจของผู้คน การระบาดที่ขยายตัวทั้งในเชิงพื้นที่ และอัตราผู้ติดเชื้อและเสียชีวิตที่เพิ่มขึ้นสร้างความรู้สึกหวาดกลัว และตื่นตระหนกต่อสถานการณ์ รวมถึงเปลี่ยนแปลงวิถีชีวิตประจำวันของผู้คนให้มีความระมัดระวังและตระหนักในเรื่องสุขอนามัยมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การระบาดของโรคยังสร้างผลกระทบต่อสังคมระหว่างประเทศจากการใช้นโยบาย และมาตรการในการป้องกัน และควบคุมการระบาดของโรคเพื่อรักษาผลประโยชน์แห่งชาติของตน ซึ่งอาจนำมาซึ่งความขัดแย้ง และสร้างความตึงเครียดให้กับสังคมระหว่างประเทศได้จากมาตรการเพื่อสกัดกั้นการลุกลามของเชื้อไวรัสโควิด-19 โดยตลอดช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาประชากร ทั่วโลกเพื่อควบคุม และยับยั้งการแพร่ระบาด ๑ รวมทั้งกลุ่มประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยจำนวนประชากรในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้คิดเป็นประมาณร้อยละ 9 ของประชากรโลก พบว่ามีจำนวนผู้ติดเชื้อ COVID-19 ประมาณร้อยละ 1.5 ของผู้ติดเชื้อทั้งหมดในโลก และมีอัตราการเสียชีวิตประมาณร้อยละ 0.8 ซึ่งเป็นข้อมูลในวงกว้างแสดงภาพรวมทั้งหมดของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ลัทธิกา เนตรทัศน์, 2563) สำหรับภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้พบผู้ติดเชื้อรายแรกในประเทศไทยเมื่อวันที่ 13 มกราคม พ.ศ. 2563 โดยเป็นผู้ป่วยชายจีน เพศหญิง อายุ 74 ปี ซึ่งเป็นผู้ป่วยรายแรกที่พบนอกประเทศจีน และเป็นรายแรกของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ตามที่มียางานอย่างเป็นทางการ ต่อมาจึงเริ่มมีการยืนยัน

การพบผู้ติดเชื้อ COVID-19 ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยประเทศเวียดนามและสิงคโปร์ รายงานการพบผู้ติดเชื้อรายแรกเมื่อวันที่ 23 มกราคม พ.ศ. 2563 ตามด้วยประเทศมาเลเซียที่รายงาน การพบผู้ติดเชื้อในวันที่ 25 มกราคม พ.ศ. 2563 ประเทศกัมพูชา และฟิลิปปินส์รายงานเมื่อวันที่ 27 และ 30 มกราคม พ.ศ. 2563 ตามลำดับ และมีการรายงานการพบผู้ติดเชื้อรายแรกของประเทศอินโดนีเซีย บรูไน เมียนมา และลาว ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2563 ซึ่งนับตั้งแต่พบผู้ติดเชื้อรายแรกจนถึงวันที่ 30 สิงหาคม พ.ศ. 2564 ไวรัสดังกล่าวได้แพร่ระบาดในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยพบผู้ติดเชื้อ 34,968 ราย และเสียชีวิต 620 ราย ทั้งทั้งภูมิภาคสืบเนื่องจากจำนวนผู้เสียชีวิตจาก COVID-19 ที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN) ทำให้ในช่วง 3 ปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยหลายงาน ที่ทำการศึกษากำหนดหรืออัตราการเสียชีวิตของผู้ติดเชื้อ COVID-19 โดย Thao และคณะ (2020) ได้ทำการศึกษาระบาดใหญ่ของ COVID-19 และรายงานการแพร่ระบาดของ COVID-19 ช่วงเริ่มต้นในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยพบว่า ข้อมูล ณ วันที่ 13 เมษายน พ.ศ. 2563 มีผู้ติดเชื้อ COVID-19 จำนวน 19,547 ราย และเสียชีวิตจาก COVID-19 จำนวน 817 ราย ประเทศไทยเป็นประเทศแรกในภูมิภาคที่รายงานจำนวนผู้ติดเชื้อ COVID-19 ในขณะที่ประเทศลาวเป็นประเทศสุดท้ายที่รายงานจำนวนผู้ป่วยยืนยัน (Thao et al., 2020) George R Puno (2021) ได้ทำการศึกษาอัตราการเสียชีวิตของผู้ติดเชื้อ COVID-19 (case fatality rate; CFR) ในช่วงเริ่มต้นของการระบาด (ต้นเดือนมีนาคม - เดือนพฤษภาคม 2563) ของประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้โดยใช้ตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย ผลการศึกษาโดยใช้ข้อมูล ณ วันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2563 พบว่า ประเทศสิงคโปร์ อินโดนีเซีย และฟิลิปปินส์ มีจำนวนผู้ติดเชื้อ COVID-19 สูงสุด ประเทศบรูไนมีผู้เสียชีวิตจาก COVID-19 1 ราย และประเทศกัมพูชา ลาว สาธารณรัฐประชาธิปไตยติมอร์-เลสเต และเวียดนาม ไม่มีผู้เสียชีวิตจาก COVID-19 นอกจากนี้ ผลการศึกษายังพบว่า ประเทศอินโดนีเซียและฟิลิปปินส์มี CFR สูงสุด คือ 6.66% และ 6.59% ตามลำดับ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 97.95% และ 99.43% ตามลำดับ ส่วนประเทศสิงคโปร์มี CFR ต่ำสุด (0.068%) (George, 2021)

นอกจากนี้ Rampal และคณะได้ศึกษาการระบาดวิทยาของ COVID-19 ใน 10 ประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียง

ใต้ ผลการศึกษาพบว่า ตลอดระยะเวลาการศึกษามีรายงานผู้ป่วยทั้งหมด 12,720,661 ราย และเสียชีวิต 271,475 รายในภูมิภาคอาเซียน แนวโน้มจำนวนผู้ติดเชื้อต่อหัวรายวันอยู่ในระดับสูงสุดระหว่างเดือนกรกฎาคม-กันยายน พ.ศ. 2564 สำหรับภูมิภาคอาเซียน อัตราการเสียชีวิตสะสม (CFR) ในประเทศบรูไน กัมพูชา อินโดนีเซีย ลาว มาเลเซีย พม่า ฟิลิปปินส์ สิงคโปร์ ไทย และเวียดนาม อยู่ที่ 0.9% (N=68), 2.2% (N=2,610), 3.5% (N=142,889), 0.1% (N=36), 1.2% (N=27,700), 4.0% (N=18,297), 1.6% (N=40,424), 0.1% (N=215), 1.7% (N=18,123) และ 2.6% (N=21,043) ตามลำดับ CFR สูงที่สุดอย่างต่อเนื่องระหว่างเดือนมกราคม-มิถุนายน พ.ศ. 2563 อัตราการตายสะสม (MR) อยู่ที่ 9.5, 13.7, 51.4, 0.2, 80.3, 32.4, 34.5, 1.6, 23.9 และ 19.7 ต่อประชากร 100,000 คน ตามลำดับ อัตราการทดสอบเชิงบวกสะสม (TPR) คือ 8.4%, 16.9%, 4.6%, 7.5%, 11.1%, 12.9%, 0.5%, 11.7% และ 3.6% โดยมีอัตราการทดสอบสะสม (TR) ที่ 25.0, 90.1, 27.4, 917.7, 75.8, 177.8, 3303.3, 195.2 และ 224.9 ต่อประชากร 1,000 คนในกัมพูชา อินโดนีเซีย ลาว มาเลเซีย พม่า ฟิลิปปินส์ สิงคโปร์ ไทย และเวียดนาม ตามลำดับ สัดส่วน ของประชากรที่ฉีดวัคซีนครบ (VR) คือ 44.5%, 65.3%, 18.5%, 28.2%, 61.8%, 6.8%, 19.2%, 76.8%, 22.7% และ 10% ในบรูไน กัมพูชา อินโดนีเซีย ลาว มาเลเซีย พม่า ฟิลิปปินส์ สิงคโปร์ ไทย และเวียดนาม ตามลำดับ (Rampal et al., 2021) ในทางสถิติสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลที่เป็นจำนวนนับ (count data) นั้น ตัวแบบทางสถิติที่เหมาะสมและนิยมใช้มากที่สุด คือ ตัวแบบการถดถอยปัวซอง (Poisson regression model) โดยตัวแปรตาม (Y) มีการแจกแจงปัวซอง และมีข้อสมมุติฐานเบื้องต้นว่า ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนต้องมีค่าเท่ากัน เรียกว่า อีควิดิสเพนชัน (equidispersion) แต่ในความเป็นจริงแล้วบ่อยครั้งที่เรามักจะพบว่า ความแปรปรวนของตัวแปรสุ่มมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ย เรียกว่า ปัญหาการกระจายเกินเกณฑ์ (overdispersion) หรือความแปรปรวนของตัวแปรสุ่มมีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ย (underdispersion) (Burcu H, Cengiz, 2004) และนอกจากปัญหาที่กล่าวมาแล้วนั้น อาจพบว่า ตัวแปรตามมีค่าเป็นศูนย์จำนวนมาก (zero-inflated) (Charatiam, 2010) ซึ่งตัวแบบที่เหมาะสมสำหรับนำมาวิเคราะห์ข้อมูลที่เกิดปัญหาค่าความแปรปรวนมากกว่าค่าเฉลี่ยและปัญหาที่ตัวแปรตามมีค่าเป็นศูนย์จำนวนมาก

คือ ตัวแบบทวินามลบ (Moghimbeigi et al., 2008; Hu et al., 2011; Batra et al., 2016; Yusuf et al., 2017)

เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้เป็นข้อมูลจำนวนนับ ในช่วงเวลาหรือขอบเขตที่สนใจศึกษา ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีปัญหาการกระจายเกินเกณฑ์ (overdispersion) และค่าความแปรปรวนของตัวแปรสุ่มน้อยกว่าค่าเฉลี่ย (underdispersion) รวมถึงตัวแปรตามมีค่าเป็นศูนย์เป็นจำนวนมาก (zero-inflated) ดังนั้นนักวิจัยจึงได้ประยุกต์ใช้การแจกแจงทวินามลบ (negative-binomial distribution) เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งจะทำให้นำไปสู่ข้อสรุปและการตัดสินใจที่ถูกต้อง งานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาเกี่ยวกับตัวแบบทางสถิติสำหรับศึกษาอัตราการอุบัติการณ์การเสียชีวิตของผู้ติดเชื้อ COVID-19 ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN) เพื่อเป็นแนวทางในการหามาตรการป้องกันการระบาดของ COVID-19 และลดจำนวนผู้ติดเชื้อ COVID-19 ที่เสียชีวิตในอนาคต

ตัวแบบการถดถอยปัวซอง (Poisson regression model) และตัวแบบการถดถอยทวินามลบ (negative-binomial regression model)

ในการศึกษาครั้งนี้พิจารณาตัวแบบทางสถิติสำหรับศึกษาอัตราการอุบัติการณ์การเสียชีวิตของผู้ติดเชื้อ COVID-19 ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN) 2 ตัวแบบด้วยกัน คือ ตัวแบบการถดถอยปัวซอง (Poisson regression model) และตัวแบบการถดถอยทวินามลบ (negative-binomial regression model) ซึ่งเป็นตัวแบบเชิงเส้นนัยทั่วไป (generalized linear model) โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตัวแบบการถดถอยปัวซอง (Poisson regression model)

ตัวแบบการถดถอยปัวซองเป็นตัวแบบการถดถอยที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามกรณีที่ตัวแปรตามเป็นจำนวนนับ เช่น จำนวนผู้เสียชีวิตจากโรค SARS จำนวนครั้งที่ระบบคอมพิวเตอร์ล่มในแต่ละภาคการศึกษา จำนวนครั้งการไปซื้อสินค้าในห้างสรรพสินค้าแห่งหนึ่ง เป็นต้น โดยข้อสมมติเบื้องต้นที่สำคัญของตัวแบบการถดถอยปัวซอง คือ ตัวแปรตามต้องมีการแจกแจงแบบปัวซอง (ค่าเฉลี่ยเท่ากับค่าความแปรปรวน) และตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรต่อเนื่องหรือเป็นตัวแปรเชิงกลุ่มที่ไม่มีความสัมพันธ์กันสูง

สำหรับตัวแบบการถดถอยปัวซองโดยประมาณ (fitted Poisson regression model) มีรูปแบบดังนี้

$$\ln \hat{\mu} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \dots + \hat{\beta}_p X_p \quad (1)$$

หรือ

$$\hat{\mu} = \exp(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \dots + \hat{\beta}_p X_p) \quad (2)$$

เมื่อ $\hat{\mu}$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตาม (Y)

$\hat{\beta}_0$ คือ ค่าประมาณค่าคงที่ของตัวแบบการถดถอย

$\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_p$ คือ ค่าประมาณสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแบบ

$X_1, X_2, \dots, X_p$ คือ ตัวแปรอิสระ

(John et al., 1966) และตัวแบบการถดถอยปัวซองโดยประมาณสำหรับอัตราการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ (fitted Poisson regression model for rate) มีรูปแบบดังนี้

$$\ln \left(\frac{\hat{\mu}}{t} \right) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \dots + \hat{\beta}_p X_p \quad (3)$$

โดยที่ตัวแปร t คือ ขนาดประชากรของแต่ละประเทศ และ $\ln t$ เรียกว่า offset (McCullagh & Nelder, 1989) ซึ่งเป็นค่าที่ปรับแต่ละค่าเมื่อค่า t เป็นค่าที่เปลี่ยนแปลง

ตัวแบบการถดถอยทวินามลบ (Negative-binomial regression model)

ตัวแบบการถดถอยทวินามลบเป็นตัวแบบที่ได้รับการพัฒนาจากข้อด้อยของตัวแบบการถดถอยปัวซองที่ไม่เหมาะสมกับข้อมูล กล่าวคือ ตัวแบบการถดถอยทวินามลบจะนิยมนำมาใช้แทนตัวแบบการถดถอยปัวซองในกรณีที่ตัวแปรตามมีค่าความแปรปรวนสูงกว่าค่าเฉลี่ยหรือเรียกว่า ปัญหาการกระจายเกินเกณฑ์ (overdispersion) โดย ตัวแบบการถดถอยทวินามลบยังคงยึดรูปแบบโครงสร้างของตัวแบบเช่นเดียวกับตัวแบบการถดถอยปัวซอง (John et al., 1966) คือ

$$\ln \hat{\mu} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \dots + \hat{\beta}_p X_p \quad (4)$$

เมื่อ $\hat{\mu}$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตาม (Y)

$\hat{\beta}_0$ คือ ค่าประมาณค่าคงที่ของตัวแบบการถดถอย

$\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_p$ คือ ค่าประมาณสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแบบ

$X_1, X_2, \dots, X_p$ คือ ตัวแปรอิสระ

การตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยใช้การทดสอบภาวะสารถูปดี (goodness-of-fit test) ในการตรวจสอบว่าตัวแบบที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ โดยมีสมมติฐานของการทดสอบ คือ

H_0 : ตัวแบบมีความเหมาะสมกับข้อมูล

H_1 : ตัวแบบไม่มีความเหมาะสมกับข้อมูล

นอกจากนี้ สำหรับตัวแบบการถดถอยปัวซอง ผู้วิจัยได้ใช้การทดสอบการเกิดปัญหาการกระจายเกินเกณฑ์ (overdispersion) ร่วมด้วย เพื่อทดสอบว่าความแปรปรวนของข้อมูลสูงกว่าค่าที่พึงเป็นตามทฤษฎีหรือตัวแบบหรือไม่ โดยข้อมูลที่สุ่มมาจากประชากรที่มีการแจกแจงปัวซองมีคุณสมบัติที่สำคัญคือความแปรปรวนและค่าเฉลี่ยต้องมีค่าเท่ากัน ดังนั้น การทดสอบการเกิดปัญหาการกระจายเกินเกณฑ์สำหรับตัวแบบการถดถอยปัวซองจึงเป็นการทดสอบว่าความแปรปรวนของข้อมูลสูงกว่าค่าเฉลี่ยหรือไม่ โดยมีสมมติฐานของการทดสอบคือ

H_0 : ข้อมูลไม่เกิดปัญหาการกระจายเกินเกณฑ์

H_1 : ข้อมูลเกิดปัญหาการกระจายเกินเกณฑ์

เกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยใช้เกณฑ์สารสนเทศของอะไกเกะ (Akaike's information criterion; AIC) หรือค่า AIC ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบ โดยตัวแบบที่มีความเหมาะสมกับข้อมูล (จากการทดสอบ ภาวะสารูปดี (goodness-of-fit test)) และให้ค่า AIC ต่ำกว่า จะถือว่าเป็นตัวแบบที่มีประสิทธิภาพมากกว่า ในกรณีที่พารามิเตอร์ของตัวแบบถูกประมาณด้วยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด (maximum likelihood method) ค่า AIC จะคำนวณได้จาก

$$AIC = -2 \ln \hat{L} + 2p \quad (5)$$

และในกรณีที่พารามิเตอร์ของตัวแบบถูกประมาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) ค่า AIC จะคำนวณได้จาก

$$AIC = n \ln \left(\frac{SSE}{n} \right) + 2p \quad (6)$$

เมื่อ n คือ จำนวนข้อมูล

p คือ จำนวนพารามิเตอร์ในตัวแบบ

SSE คือ ผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อน

$\hat{L}$ คือ ค่าสูงสุดของฟังก์ชันภาวะน่าจะเป็น

(สำนักงานราชบัณฑิตยสภา, 2561)

2. วิธีการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีและขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นข้อมูลทุติยภูมิจากคลังข้อมูล COVID-19 ของ Our World in Data

(OWID) ซึ่งเผยแพร่ออนไลน์ทางเว็บไซต์ <https://github.com/owid/covid-19-data/tree/master/public/data> โดยขอบเขตของข้อมูลที่น่าสนใจคือ ข้อมูลรายวันตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม - 3 มิถุนายน พ.ศ. 2565

ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย

ตัวแปรตาม คือ จำนวนผู้ติดเชื้อ COVID-19 ที่เสียชีวิตรายวัน

ตัวแปรอิสระ ได้แก่ ประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จำนวนผู้ป่วยยืนยัน (confirmed case) รวม อัตราแพร่เชื้อ (reproduction rate) และดัชนีมาตรการควบคุมการระบาด (stringency index)

สำหรับตัวแปรประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ ผู้วิจัยได้ทำการเปลี่ยนเป็นตัวแปรหุ่น (dummy variable) เพื่อใช้ในการสร้างตัวแบบ โดยให้รหัส ดังนี้

3. วิธีดำเนินการวิจัย

ประเทศ	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	X_{19}
บรูไน	1	0	0	0	0	0	0	0	0
กัมพูชา	0	1	0	0	0	0	0	0	0
อินโดนีเซีย	0	0	1	0	0	0	0	0	0
ลาว	0	0	0	1	0	0	0	0	0
มาเลเซีย	0	0	0	0	1	0	0	0	0
เมียนมา	0	0	0	0	0	1	0	0	0
ฟิลิปปินส์	0	0	0	0	0	0	1	0	0
สิงคโปร์	0	0	0	0	0	0	0	1	0
เวียดนาม	0	0	0	0	0	0	0	0	1
ไทย*	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หมายเหตุ *ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยกำหนดให้ประเทศไทยเป็นกลุ่มอ้างอิง (reference group)

1. ตรวจสอบความสัมพันธ์ (multicollinearity) ระหว่างตัวแปรอิสระ (ประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จำนวนผู้ป่วยยืนยันรวม อัตราแพร่เชื้อ และดัชนีมาตรการควบคุมการระบาด) โดยพิจารณาจากค่า variance inflation factor (VIF) และทำการตัดตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กันสูง ($VIF > 5$) (Vittinghoff et al., 2011) ออกจากการพิจารณา

2. สร้างตัวแบบการถดถอยปัวซอง (Poisson regression model) จากตัวแปรอิสระที่ไม่มีความสัมพันธ์กันสูง

3. ตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบที่ได้ในข้อ 2 ว่ามีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ โดยใช้การทดสอบภาวะสารูปดี (goodness-of-fit test) และการทดสอบการเกิดปัญหาการกระจายเกินเกณฑ์ (overdispersion)

4. หากตัวแบบการถดถอยปัวซองที่ได้ในข้อ 2 ไม่เหมาะสม ทำการสร้างตัวแบบการถดถอยทวินามลบ (negative-binomial regression model) และทำการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ

5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบ และเลือกตัวแบบที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดโดยพิจารณาจากเกณฑ์สารสนเทศของอะกะอิเกะ (Akaike's information criterion; AIC)

6. โปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูล คือ โปรแกรม SAS (SAS® OnDemand for Academics)

4. ผลการวิจัย

ผลการศึกษาเรื่องตัวแบบทางสถิติสำหรับศึกษาอัตราการอุบัติการณ์การเสียชีวิตของผู้ติดเชื้อ COVID-19 ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN) ได้แก่ ไทย เวียดนาม มีดังต่อไปนี้

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไป

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 พบว่า ประเทศฟิลิปปินส์มีจำนวนผู้ติดเชื้อ COVID-19 ที่เสียชีวิตเฉลี่ยสูงสุดคือ 84 คนต่อวัน และประเทศกัมพูชาไม่มีจำนวนผู้ติดเชื้อ COVID-19 ที่เสียชีวิต ประเทศเวียดนามมีจำนวนผู้ป่วยยืนยันรวมเฉลี่ยสูงสุดคือ 6,608,672 คน และประเทศบรูไนมีจำนวนผู้ป่วยยืนยันรวมเฉลี่ยต่ำสุดคือ 84,635 คนแต่มีอัตราแพร่เชื้อเฉลี่ยสูงสุดคือ 1.18 ส่วนประเทศลาวมีอัตราแพร่เชื้อเฉลี่ยต่ำสุดคือ 0.87

ผลการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (Multicollinearity)

จากตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ พบว่า ตัวแปรอิสระทุกตัวที่ศึกษา (ประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จำนวนผู้ป่วยยืนยันรวม อัตราแพร่เชื้อ และดัชนีมาตรการควบคุมการระบาด) มีค่า VIF (variance inflation factor) น้อยกว่า 5 ดังนั้น ตัวแปรอิสระทั้ง 4 ตัวไม่มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง จึงนำตัวแปรอิสระทั้ง 4 ตัว ไปทำการสร้างตัวแบบสำหรับศึกษาอัตราการอุบัติการณ์การเสียชีวิตของผู้ติดเชื้อ COVID-19 ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN) ที่เหมาะสมต่อไป

ตัวแบบการถดถอยปัวซอง (Poisson regression model)

เนื่องจากตัวแปรตามที่ใช้ในการศึกษาคือจำนวนผู้ติดเชื้อ COVID-19 ที่เสียชีวิตรายวัน ซึ่งเป็นข้อมูลแจกแจงนับ (count data) และมีการแจกแจงแบบเบ้ขวา ดังรูปภาพที่ 2 ดังนั้น ในการศึกษานี้จะเริ่มจากการพิจารณาตัวแบบการถดถอยปัวซองสำหรับศึกษาอัตราการอุบัติการณ์การเสียชีวิตของผู้ติดเชื้อ COVID-19 ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN)

ผลการวิเคราะห์ตัวแบบการถดถอยปัวซองแสดงดังตารางที่ 3-5

จากตารางที่ 3 จะได้ตัวแบบการถดถอยปัวซองสำหรับศึกษาอัตราการอุบัติการณ์การเสียชีวิตของผู้ติดเชื้อ COVID-19 ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN) คือ

$$\ln\left(\frac{\hat{\mu}}{t}\right) = -15.108 + 0.136X_{11} - 3.537X_{12} - 1.422X_{13} - 2.562X_{14} - 0.433X_{15} - 5.323X_{16} - 1.219X_{17} - 0.894X_{18} - 0.509X_{19} + 0.000X_2 - 0.606X_3 + 0.046X_4 \quad (7)$$

เมื่อ $\frac{\hat{\mu}}{t}$ คือ อัตราผู้ติดเชื้อ COVID-19 ที่เสียชีวิตรายวันเฉลี่ย

จากตารางที่ 4 พบว่า ค่าสถิติทดสอบไคกำลังสอง (chi-square) เท่ากับ 5375.449 และค่าพี (p-value) น้อยกว่า 0.000 จึงสรุปได้ว่า ข้อมูลที่นำมาศึกษาเกิดปัญหาการกระจายเกินเกณฑ์ บ่งชี้ว่าตัวแบบการถดถอยปัวซองไม่เหมาะสมกับข้อมูล

จากตารางที่ 5 ผลการทดสอบภาวะสาธูปดี (goodness-of-fit test) สำหรับตัวแบบการถดถอยปัวซอง พบว่า ค่าสถิติทดสอบไคกำลังสอง (chi-square) เท่ากับ 41096.05 และค่าพี (p-value) น้อยกว่า 0.000 จึงสรุปได้ว่า ตัวแบบการถดถอยปัวซองข้างต้นไม่เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบปัญหาการกระจายเกินเกณฑ์ ดังนั้น ในการศึกษานี้จะพิจารณาตัวแบบการถดถอยทวินามลบเป็นลำดับต่อไป

ตัวแบบการถดถอยทวินามลบ (negative-binomial regression model)

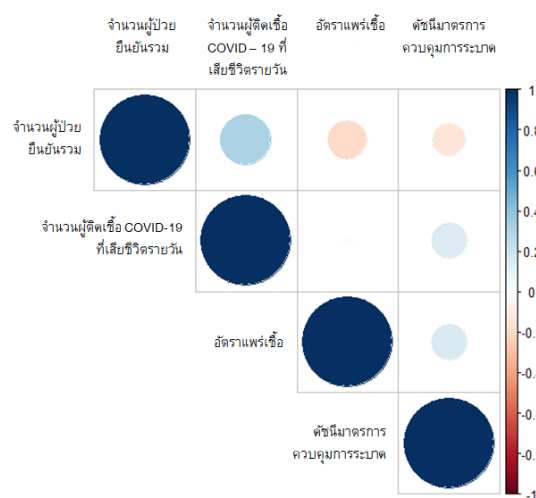
ผลการวิเคราะห์ตัวแบบการถดถอยทวินามลบแสดงดังตารางที่ 6-8

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไป

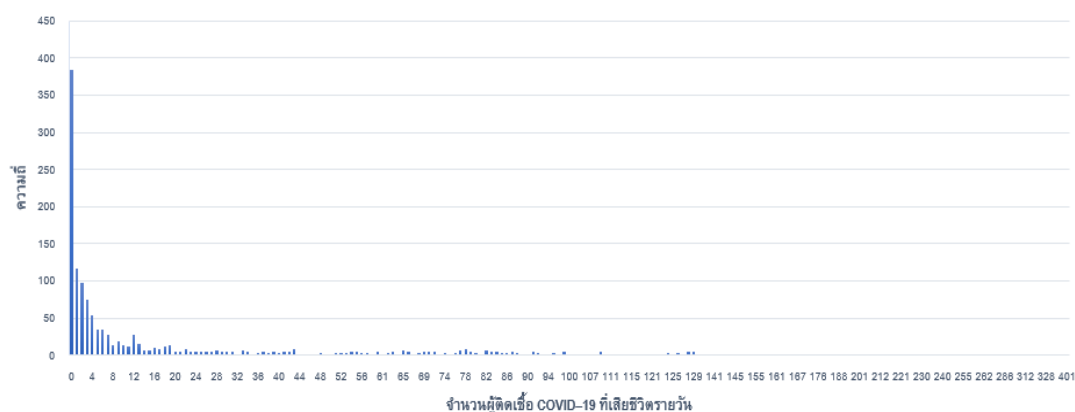
ประเทศ	ขนาดประชากร (1,000 คน)	จำนวนผู้ติดเชื้อ COVID-19 ที่เสียชีวิต รายวันเฉลี่ย	จำนวนผู้ป่วยยืนยัน (Confirmed case) รวมเฉลี่ย	อัตราแพร่เชื้อ (Reproduction rate) เฉลี่ย	ดัชนีมาตรการควบคุมการระบาด (Stringency index) เฉลี่ย
บรูไน	441.532	1	84,635	1.18	55.05
กัมพูชา	16,946.446	0	129,991	0.90	29.72
อินโดนีเซีย	276,361.788	82	5,449,238	1.05	60.96
ลาว	7,379.358	3	164,342	0.87	71.03
มาเลเซีย	32,776.195	27	3,744,753	0.98	55.78
สาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมา	54,806.014	1	582,155	0.90	70.28
ฟิลิปปินส์	111,046.91	84	3,458,525	1.08	68.68
สิงคโปร์	5,453.6	4	823,099	1.15	55.07
เวียดนาม	98,168.829	72	6,608,672	0.91	54.46
ไทย	69,950.844	57	3,267,087	1.05	46.32

ตารางที่ 2 การตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ

ตัวแปรอิสระ	VIF
ประเทศ (X_1)	1.177
จำนวนผู้ป่วยยืนยันรวม (X_2)	1.231
อัตราแพร่เชื้อ (X_3)	1.061
ดัชนีมาตรการควบคุมการระบาด (X_4)	1.051



รูปที่ 1 แผนภาพสหสัมพันธ์ (Correlogram) แสดงภาพเมทริกซ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรเชิงปริมาณที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 2 แผนภูมิแท่งแสดงจำนวนผู้ติดเชื้อ COVID-19 ที่เสียชีวิตรายวันของประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2565 - พฤษภาคม พ.ศ. 2565

ตารางที่ 3 ค่าประมาณพารามิเตอร์ ($\hat{\beta}$) ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ขีดจำกัดความเชื่อมั่น 95% ของวัลด์ (Wald 95% confidence limits) ค่าสถิติทดสอบไคกำลังสองของวัลด์ (Wald χ^2) และค่าพี (p-value) สำหรับตัวแบบการถดถอยบัวซง

Parameter	$\hat{\beta}$	Standard error	Wald 95% confidence limits		Wald χ^2	p-value
ค่าคงที่	-15.108	0.054	-15.214	-15.002	77929.10	<.0001*
ประเทศบรูไน (X_{11})	0.136	0.091	-0.044	0.315	2.20	0.1380
ประเทศกัมพูชา (X_{12})	-3.537	0.153	-3.837	-3.237	533.63	<.0001*
ประเทศอินโดนีเซีย (X_{13})	-1.422	0.025	-1.471	-1.372	3176.84	<.0001*
ประเทศลาว (X_{14})	-2.562	0.058	-2.675	-2.449	1979.60	<.0001*
ประเทศมาเลเซีย (X_{15})	-0.433	0.023	-0.477	-0.388	366.10	<.0001*
ประเทศพม่า (X_{16})	-5.323	0.082	-5.484	-5.161	4173.11	<.0001*
ประเทศฟิลิปปินส์ (X_{17})	-1.219	0.030	-1.277	-1.160	1650.11	<.0001*
ประเทศสิงคโปร์ (X_{18})	-0.894	0.045	-0.982	-0.806	395.19	<.0001*
ประเทศเวียดนาม (X_{19})	-0.509	0.024	-0.555	-0.463	462.99	<.0001*
จำนวนผู้ป่วยยืนยันรวม (X_2)	0.000	0.000	0.000	0.000	1207.56	<.0001*
อัตราแพร่เชื้อ (X_3)	-0.606	0.013	-0.632	-0.581	2114.96	<.0001*
ดัชนีมาตรการควบคุมการระบาด (X_4)	0.046	0.001	0.044	0.048	2229.64	<.0001*
Deviance = 35113.894, Pearson chi-square = 41096.050, AIC = 39590.932						

หมายเหตุ * มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 4 การทดสอบการเกิดปัญหาการกระจายเกินเกณฑ์ (overdispersion) ของการถดถอยบัวซง

Lagrange multiplier statistics		
Parameter	Chi-square	p-value
Dispersion	5375.449	<.0001*

หมายเหตุ * มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 5 การทดสอบภาวะสารูปดี (goodness-of-Fit Test) สำหรับตัวแบบการถดถอยบัวซง

goodness-of-fit test		
Parameter	Chi-square	p-value
goodness-of-Fit	41096.05	<0.000*

ทุกตัวน้อยกวาระดับนัยสำคัญ 0.05 ยกเว้นตัวแปร X_{11} ดังนั้น ในขั้นตอนต่อไปจะทำการตัดตัวแปร X_{11} ออกจากตัวแบบเพื่อดูว่าจะทำให้ค่า AIC ลดลงหรือไม่ ผลการวิเคราะห์ตัวแบบทวินามลบตัวใหม่แสดงดังตารางที่ 7 จากตารางที่ 7 จะเห็นว่าเมื่อทำการตัดตัวแปร ออกจากตัวแบบ ทำให้ค่า deviance ค่าพี Pearson chi-square และค่า AIC ลดลง (deviance = 1347.708, Pearson chi-square = 1230.049, และ AIC = 8608.771) โดยจะได้ตัวแบบการถดถอยทวินามลบสำหรับศึกษาอัตราอุบัติการณ์การเสียชีวิตของผู้ติดเชื้อ

COVID-19 ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN) ตัวใหม่ คือ

$$\ln\left(\frac{\hat{\mu}}{t}\right) = -15.462 - 3.655X_{12} - 1.708X_{13} - 2.879X_{14} - 0.517X_{15} - 5.686X_{16} - 1.316X_{17} - 1.293X_{18} - 0.961X_{19} + 0.000X_2 - 0.312X_3 + 0.054X_4 \quad (8)$$

เมื่อ $\frac{\hat{\mu}}{t}$ คือ อัตราผู้ติดเชื้อ COVID-19 ที่เสียชีวิตรายวันเฉลี่ย

เมื่อทำการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบที่ 2 โดยใช้การทดสอบภาวะสารูปดี (goodness-of-fit test) พบว่า ได้ค่าสถิติทดสอบไคกำลังสอง (chi-square)

ตารางที่ 6 ตัวแบบที่ 1 ค่าประมาณพารามิเตอร์ () ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ค่าสถิติทดสอบไคกำลังสองของว็อลด์ (Wald) ค่าพี (p-value) และอัตราส่วนอัตราอุบัติการณ์การเสียชีวิตของผู้ติดเชื้อ COVID-19 (Incidence Rate Ratio; IRR) ของตัวแบบการถดถอยทวินามลบ

Parameter	$\hat{\beta}$	Standard Error	Wald 95 % Confidence Limits		Wald χ^2	p-value	IRR
ค่าคงที่	-15.379	0.340	-16.045	-14.713	2047.55	<.0001*	-
ประเทศบรูไน (X_{11})	-0.278	0.179	-0.630	0.073	2.41	0.1208	0.757
ประเทศกัมพูชา (X_{12})	-3.680	0.251	-4.173	-3.188	214.44	<.0001*	0.025
ประเทศอินโดนีเซีย (X_{13})	-1.704	0.185	-2.065	-1.342	85.31	<.0001*	0.182
ประเทศลาว (X_{14})	-2.904	0.190	-3.277	-2.531	232.62	<.0001*	0.055
ประเทศมาเลเซีย (X_{15})	-0.513	0.138	-0.783	-0.243	13.88	0.0002*	0.599
ประเทศพม่า (X_{16})	-5.704	0.206	-6.108	-5.300	765.07	<.0001*	0.003
ประเทศฟิลิปปินส์ (X_{17})	-1.283	0.203	-1.681	-0.885	39.90	<.0001*	0.277
ประเทศสิงคโปร์ (X_{18})	-1.303	0.153	-1.604	-1.003	72.22	<.0001*	0.272
ประเทศเวียดนาม (X_{19})	-0.945	0.183	-1.303	-0.587	26.78	<.0001*	0.389
จำนวนผู้ป่วยยืนยันรวม (X_2)	0.000	0.000	0.000	0.000	38.14	<.0001*	1.000
อัตราแพร่เชื้อ (X_3)	-0.370	0.076	-0.518	-0.221	23.73	<.0001*	0.691
ดัชนีมาตรการควบคุมการระบาด (X_4)	0.054	0.006	0.043	0.065	90.31	<.0001*	1.055
Dispersion	1.112	0.052	1.015	1.219			
Deviance = 1488.320, Pearson Chi-Square = 1458.784, AIC = 8964.952							

หมายเหตุ * มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 7 ตัวแบบที่ 2 ค่าประมาณพารามิเตอร์ () ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ค่าสถิติทดสอบไคกำลังสองของว็อลด์ (Wald) ค่าพี (p-value) และอัตราส่วนอัตราอุบัติการณ์การเสียชีวิตของผู้ติดเชื้อ COVID - 19 (incidence rate ratio; IRR) ของตัวแบบการถดถอยทวินามลบ

Parameter	$\hat{\beta}$	Standard error	Wald 95 % confidence limits		Wald χ^2	p-value	IRR
ค่าคงที่	-15.462	0.339	-16.126	-14.798	2083.26	<.0001*	-
ประเทศกัมพูชา (X_{12})	-3.655	0.249	-4.143	-3.166	215.02	<.0001*	0.026
ประเทศอินโดนีเซีย (X_{13})	-1.708	0.182	-2.065	-1.352	88.17	<.0001*	0.181
ประเทศลาว (X_{14})	-2.879	0.188	-3.248	-2.511	234.9	<.0001*	0.056
ประเทศมาเลเซีย (X_{15})	-0.517	0.136	-0.783	-0.251	14.48	0.0001*	0.597
ประเทศพม่า (X_{16})	-5.686	0.204	-6.085	-5.287	778.72	<.0001*	0.003
ประเทศฟิลิปปินส์ (X_{17})	-1.316	0.201	-1.710	-0.923	43.06	<.0001*	0.268
ประเทศสิงคโปร์ (X_{18})	-1.293	0.151	-1.589	-0.997	73.25	<.0001*	0.275
ประเทศเวียดนาม (X_{19})	-0.961	0.180	-1.314	-0.609	28.52	<.0001*	0.382
จำนวนผู้ป่วยยืนยันรวม (X_2)	0.000	0.000	0.000	0.000	36.23	<.0001*	1.000
อัตราแพร่เชื้อ (X_3)	-0.312	0.078	-0.465	-0.159	15.91	<.0001*	0.732
ดัชนีมาตรการควบคุมการระบาด (X_4)	0.054	0.006	0.043	0.065	92.26	<.0001*	1.055
Dispersion	1.076	0.050	0.981	1.179			
Deviance = 1347.708, Pearson Chi-Square = 1230.049, AIC = 8608.771							

หมายเหตุ * มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 8 การทดสอบภาวะสารูปดี (goodness-of-fit test) สำหรับตัวแบบการถดถอยทวินามลบ

goodness-of-fit test		
Parameter	Chi-square	p-value
goodness-of-fit	1230.049	0.558

จึงสรุปได้ว่า ตัวแบบการถดถอยทวินามลบข้างต้นเหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังตารางที่ 8 จากตัวแบบการถดถอยทวินามลบที่ได้จากตารางที่ 7 เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนอุบัติการณ์การเสียชีวิตจาก COVID-19 ของประเทศอื่น ๆ ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN) เทียบกับประเทศไทยพบว่า ประเทศไทยมีอัตราหรือความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตจาก COVID-19 สูงกว่าประเทศอื่น ๆ ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN) โดยประเทศกัมพูชา ประเทศอินโดนีเซีย ประเทศลาว ประเทศมาเลเซีย ประเทศฟิลิปปินส์ ประเทศสิงคโปร์ และประเทศเวียดนาม มีอัตราหรือความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตจาก COVID-19 น้อยกว่าประเทศไทย 97.4%, 81.9%, 94.4%, 40.3%, 99.7%, 73.2%, 72.5%, และ 61.8% ตามลำดับ (IRR = 0.026, 0.181, 0.056, 0.597, 0.003, 0.268, 0.275, และ 0.382 ตามลำดับ)

นอกจากนี้ยังพบว่า ถ้าจำนวนผู้ป่วยยืนยันรวมเพิ่มขึ้น 1 คน อัตราหรือความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตจาก COVID-19 ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN) จะลดลงเล็กน้อย (IRR เข้าใกล้ 1) ถ้าอัตราการแพร่เชื้อเพิ่มขึ้น 1 หน่วย อัตราหรือความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตจาก COVID-19 จะลดลง 26.8% (IRR = 0.732) และถ้าดัชนีมาตรการควบคุมการระบาดเพิ่มขึ้น 1 หน่วย อัตราหรือความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตจาก COVID-19 จะเพิ่มขึ้น 5.5% (IRR = 1.055)

5. สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างตัวแบบทางสถิติสำหรับศึกษาอัตราอุบัติการณ์การเสียชีวิตของผู้ติดเชื้อ COVID-19 ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN) โดยตัวแปรอิสระที่นำมาศึกษา คือ ประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จำนวนผู้ป่วยยืนยัน (confirmed case) รวม อัตราแพร่เชื้อ (reproduction rate) และดัชนีมาตรการควบคุมการระบาด (stringency index) โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยปัวซอง (Poisson regression) และการวิเคราะห์การถดถอยทวินามลบ (negative-binomial regression model)

ผลการศึกษาพบว่า ตัวแบบการถดถอยปัวซองไม่เหมาะสมกับข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาเนื่องจากข้อมูลมีความแปรปรวนสูงกว่าค่าเฉลี่ยเป็นอย่างมากหรือเกิดปัญหาการกระจายเกินเกณฑ์ (overdispersion) โดยจะเห็นได้จากผลการทดสอบภาวะสารูปดี (goodness-of-fit test) และการทดสอบปัญหาการกระจายเกินเกณฑ์ (p-value น้อยกว่า 0.05) รวมทั้งค่า AIC ของตัวแบบที่ค่อนข้างสูง (AIC = 39590.932) ส่วนตัวแบบการถดถอยทวินามลบมีความเหมาะสมสำหรับศึกษาอัตราอุบัติการณ์การเสียชีวิตของผู้ติดเชื้อ COVID-19 ในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ASEAN) มากกว่าตัวแบบการถดถอยปัวซอง โดยมีสมการของตัวแบบการถดถอยทวินามลบ คือ

$$\ln\left(\frac{\mu}{t}\right) = -15.462 - 3.655X_{12} - 1.708X_{13} - 2.879X_{14} - 0.517X_{15} - 5.686X_{16} - 1.316X_{17} - 1.293X_{18} - 0.961X_{19} + 0.000X_2 - 0.312X_3 + 0.054X_4 \quad (9)$$

และมีค่า AIC ที่น้อยกว่าตัวแบบการถดถอยปัวซองค่อนข้างมาก (AIC = 8964.952)

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของอดิเทพ ไชยวรรณ และคณะ (2013) Molla และ Muniswamy (2012) Byers (2003) และ Yesilova (2007) ที่พบว่า ตัวแบบการถดถอยทวินามลบมีความเหมาะสมกว่าตัวแบบการถดถอยปัวซอง เมื่อข้อมูลเป็นจำนวนนับที่มีปัญหาการกระจายเกินเกณฑ์ (overdispersion) นอกจากนี้ ผลการศึกษาที่ได้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Volato และคณะ (2021) ที่พบว่า ดัชนีมาตรการควบคุมการระบาด (stringency index) มีผลอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นของจำนวนผู้ติดเชื้อ COVID-19 และอัตราการเสียชีวิต

เอกสารอ้างอิง

- รัฐภา เนตรทัศน์. (2563). ถอดบทเรียนการรับมือโควิด - 19 ของประเทศสมาชิกอาเซียน. [เว็บไซต์]. สืบค้นจาก https://lawforasean.krisdika.go.th/File/files/article_2_May_AMS_covid19.pdf
- สำนักงานราชบัณฑิตยสภา. (2561). พจนานุกรมศัพท์สถิติศาสตร์ ฉบับราชบัณฑิตยสภา. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานราชบัณฑิตยสภา.
- อดิเทพ ไชยวรรณ, วสันต์ บุญไธ้, พิษณุ ทองขาว. (2013). การวิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงของการผลิตสินค้าเกษตรในโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์โดยใช้ตัวแบบเชิงเส้นน้อยทั่วไป (GLM). การประชุมวิชาการแห่งชาติมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, อำเภอกำแพงแสนจังหวัดนครปฐม
- Batra, M., Shah, A.F., Rajput, P., & Shah, I.A. (2016). Comparison of linear and zero-inflated negative binomial regression models for appraisal of risk factors associated with dental caries. Journal of Indian Society of Pedodontics and Preventive Dentistry, 34(1), 71-75.
- Burcu, H., Cengiz. (2004). LATENT PROCESS IN A POISSON REGRESSION MODEL. Journal of Science and Technology, 5(2), 259-267.

- Byers, A.L., Allore, H., Gill, T.M. & Peduzzi, P.N. (2003). Application of Negative Binomial Modeling for Discrete Outcomes: A Case Study in Aging Research. *Journal of Clinical Epidemiology*, 56, 559–564.
- Chaiwan, A., Boonho, W. & Tongkhaw, P. (2013). Risk Factors for Defective Products in Autoparts Factory Using Generalized Linear Model (GLM). pp. 238–246. In *The 10th National Kasetsart University Kamphaeng Saen Conference*, 6–7 December 2013, Education Administration Division (Kamphaeng Saen), Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom.
- Charatiam, N. (2010). Comparative Test Statistics for Zero-Inflated Generalized Poisson Regression Model against Generalized Poisson Regression Model in the Presence of Covariate Outliers. Master of Science Thesis, Thammasat University. (in Thai)
- Guo, Y.R., Cao, Q.D., Hong, Z.S., Tan, Y.Y., Chen, S.D., Jin, H.J., et al. (2020). The origin, transmission and clinical therapies on coronavirus disease 2019 (COV-ID-19) outbreak – an update on the status. *Military Medical Research*, 7(1), 11.
- Hu, M.C., Pavlicova, M., & Nunes, E.V. (2011). Zero-inflated and Hurdle Models of Count Data with Extra Zeros: Examples form an HIV – Risk Reduction Intervention Trial. *Journal of Drug Alcohol Abuse*, 37(5), 367 –375.
- McCullagh, P. & Nelder, J. (1989). *Generalized Linear Models* (2nd ed.). Boca Raton: Chapman and Hall/CRC.
- Moghimbeigi, A., Eshraghian, M.R., Mohammad, K. & Mcardle, B. (2008). Multilevel zeroinflated negative binomial regression modeling for over-dispersed count data with extra zeros'. *Journal of Applied Statistics*, 35(10), 1193–1202.
- Molla, D.T. & Muniswamy, B. (2012). Power of Tests for Overdispersion Parameter in Negative Binomial Regression Model. *Journal of Mathematics*, 1(4), 29–36.
- Neter, J., Kutner, M.H., Nachtsheim, C.J. & Wasserman, W. (1996). *Applied linear statistical models* (Book 1) (4th ed.). Chicago, USA : Irwin.
- Puno, G.R. (2021). COVID-19 case fatality rates across Southeast Asian countries (SEA): a preliminary estimate using a simple linear regression model. *Journal of Health Research*, 35(3), 286–294.
- Rampal, S. et al. (2021). The epidemiology of COVID-19 in ten Southeast Asian countries. *Med J Malaysia*, 76(6), 783–791.
- Tran, T.T.P., Khuong, L.Q., Dao, A.T.M., Nguyen, H.V., Djalante, R. & Tran, H.T.T. (2020). The COVID-19 pandemic in the ASEAN: A preliminary report on the spread, burden and medical capacities. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 13(6), 247–251.
- Vittinghoff, E., Glidden, D.V., Shiboski, S.C. & McCulloch, C.E. (2011). *Regression Methods in Biostatistics: Linear, Logistic, Survival, and Repeated Measures Models*. New York, NY: Springer.
- Violato, C., Violato, E.M. & Violato, E.M. (2021). Impact of the stringency of lockdown measures on covid-19: A theoretical model of a pandemic. *PLOS ONE*, 16(10): e0258205.
- Yesilova, A., Yilmaz, A. (2007). The Application of Overdispersion and Generalized Estimating Equations in Repeated Catagorical Data Related to the Sexual Behaviour Traits of Farm Animals. *Journal of Applied Sciences*, 7(12), 1762–1767.
- Yusuf, O.B., Bello, T., & Gureje, O. (2017). Zero Inflated Poisson and Zero Inflated Negative Binomial Models with Application to Number of Falls in the Elderly. *Biostatistics and Biometrics Open Access Journal*, 1(4), 1–7.
- Zhu, N., Zhang, D., Wang, W., Li, X., Yang, B., Song, J., et al. (2020) A novel coronavirus from patients with pneumonia in China, 2019. *The New England Journal of Medicine*, 382, 727–33.

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุม HEWMA THWMA และ DMEWMA สำหรับข้อมูลที่มีการแจกแจงแกมมาสามพารามิเตอร์

A Comparison of the Efficiency of the HEWMA THWMA and DMEWMA Control Chart for 3 Parameter Gamma Distribution

ปิยพล ไพจิตร* และ กนิษฐา คงแก้ว

Piyaphon Paichit* and Kanistha Kongkaew

ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

Department of Statistics, Faculty of Science, Silpakorn University

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังไฮบริด (Hybrid Exponentially Weighted Moving Average: HEWMA) แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักเหมือนกันซ้ำสามครั้ง (Triple Homogeneously Weighted Moving Average: THWMA) และ แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังปรับปรุงสองชั้น (Double-modified Exponentially Weighted Moving Average: DMEWMA) โดยตรวจจับขนาดการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปร่าง (shape parameter : α) ของกระบวนการที่ข้อมูลมีการแจกแจงแบบแกมมา 3 พารามิเตอร์ โดยจำลองข้อมูลที่ศึกษาด้วยวิธีมอนติคาร์โล ซึ่งในแต่ละสถานการณ์ทดลองซ้ำ 10,000 รอบ โดยกำหนด พารามิเตอร์รูปร่าง พารามิเตอร์บ่งขนาด และพารามิเตอร์บ่งตำแหน่ง เท่ากับ 1,1,1 2,1,1 1,2,1 1,2,2 และ 2,1,2 ตามลำดับ กำหนดค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบของแผนภูมิควบคุม HEWMA เท่ากับ 0.05, 0.08 และ 0.10, 0.30, 0.05 แผนภูมิควบคุม THWMA เท่ากับ 0.03, 0.07, 0.09, 0.10, 0.20, 0.50 และแผนภูมิควบคุม DMEWMA เท่ากับ 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.20, 0.50 ขนาดการเปลี่ยนแปลงกระบวนการ (δ) เท่ากับ 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.10, 0.30, 0.50, 0.70, 1.50, 2.00 และ 2.50 เกณฑ์ที่ใช้วัดประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมจะพิจารณาจากค่าความยาวรันเฉลี่ย (Average run length: ARL) ซึ่งแผนภูมิควบคุมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจะให้ค่าความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุม น้อยที่สุด ผลการวิจัยพบว่า แผนภูมิควบคุม THWMA ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ขนาดเล็กได้ดีที่สุด และเมื่อขนาดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นแผนภูมิควบคุม THWMA จะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับแผนภูมิควบคุม DMEWMA $\left(-\frac{\lambda}{2}\right)$ และ DMEWMA $\left(-\frac{\lambda}{4}\right)$ หากมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ขนาดใหญ่ แผนภูมิควบคุม HEWMA จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

คำสำคัญ: แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังไฮบริด แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักเหมือนกันซ้ำสาม แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังปรับปรุงสองชั้น ความยาวรันเฉลี่ย

ABSTRACT

The purpose of this research was to compare the performance of the three control chart types: The Hybrid Exponentially Weighted Moving Average Control Chart (HEWMA), Triple Homogeneously Weighted Average Control Chart (THWMA) and Double Exponential Weighted Average Control Chart (DMEWMA) by detecting shift in size of the shape parameter of the process in which the data has a 3-parameter gamma distribution. simulating the data studied by the Monte Carlo Method in which each situation was repeated 10,000 cycles by specifying the shape parameter, scale parameter, location parameter and the smoothing parameters of the HEWMA control chart ($\lambda_{1H}, \lambda_{2H}$) were set to 0.05, 0.08 and 0.10, 0.30, 0.50 THWMA control chart (λ) is 0.03, 0.07, 0.09, 0.10, 0.20, 0.50 and DMEWMA control chart (λ) is 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.20, 0.50. Process variation shift size (δ) is 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.10, 0.30, 0.50, 0.70, 1.50, 2.00 and 2.50. The criteria for the control chart's performance is determined by its average run length (ARL), where the most efficient control chart gave the least average run length when the process was out of control (ARL_1). THWMA control charts the best monitor shift of parameter and as the size increases the THWMA control

chart performs similarly to the DMEWMA $\left(-\frac{\lambda}{2}\right)$ and DMEWMA $\left(-\frac{\lambda}{4}\right)$ control charts if the shift is large. The HEWMA control chart will give you the best performance.

KEYWORDS: Hybrid exponentially weighted moving average, Triple homogeneously weighted moving average, Double-modified exponentially weighted moving average and Average run length

*Corresponding Author: paichit_p@silpakorn.edu

Received: 27/03/2022; Revised: 14/05/2023; Accepted: 14/06/2023

1. บทนำ

การแข่งขันสำหรับตลาดสินค้ายังคงเติบโตในทุกอุตสาหกรรม หนึ่งในกลยุทธ์ในการบรรลุความได้เปรียบการแข่งขันคือการทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสูงและมูลค่าเพิ่ม การสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง บริษัทจะต้องกำหนดเป้าหมายสำหรับอัตราความบกพร่องและเรียนรู้ที่จะควบคุมกระบวนการผลิต วิธีการควบคุมกระบวนการทางสถิติ(Statistical Process Control: SPC) ถูกนำมาใช้ในการควบคุมคุณภาพทางอุตสาหกรรม อีกทั้งยังเป็นวิธีการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์และผลผลิตมานานกว่าหลายทศวรรษ การควบคุมกระบวนการทางสถิติเป็นการใช้เทคนิคทางสถิติเพื่อตรวจจับพฤติกรรมที่ผิดปกติของกระบวนการและค้นหาสาเหตุของการเกิดพฤติกรรมที่ผิดปกติขึ้นในกระบวนการ เครื่องมือที่สำคัญในการควบคุมกระบวนการทางสถิติมีดังนี้ ใบตรวจสอบ แผนภาพการกระจาย แผนภูมิพาริตี ผังแสดงเหตุและผล กราฟ ฮิสโตแกรม และแผนภูมิควบคุม อย่างไรก็ตามเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพที่สุดและมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องนั้นคือ แผนภูมิควบคุม (control chart) แผนภูมิควบคุมจะแสดงให้เห็นกระบวนการข้อมูลในลำดับเวลาและใช้วิธีการทางสถิติเพื่อกำหนดค่าขีดจำกัดที่ยอมรับได้บนแผนภูมิควบคุมสารสนเทศที่ได้จากการวิเคราะห์ของแผนภูมิควบคุมจะถูกนำไปใช้เพื่อตัดสินใจเกี่ยวกับเงื่อนไขของกระบวนการ เช่น หากระดับของกระบวนการผลิตมีค่าเบี่ยงเบนจากค่าที่ต้องการมากอาจจำเป็นต้องปรับปรุงแก้ไขเพื่อให้กระบวนการผลิตยังสามารถผลิตสินค้าที่มีคุณภาพสำหรับผู้บริโภคได้ แผนภูมิควบคุมที่เป็นที่รู้จักในปัจจุบัน ดังเช่น แผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ต คิดค้นโดย Shewhart (Shewhart, 1931) แผนภูมิควบคุมผลรวมสะสม (Cumulative SUM control chart: CUSUM) นำเสนอโดย Page (Page, 1954) และแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลัง (Exponentially Weighted Moving Average:

EWMA) นำเสนอโดย Robert (Robert, 1959) โดยทั้งแผนภูมิควบคุมผลรวมสะสมและแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่มีความสามารถในการตรวจจับเมื่อกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กและขนาดปานกลางได้ดี อีกทั้งแผนภูมิควบคุม EWMA ยังสามารถทำงานได้ดีแม้ข้อมูลมีการแจกแจงแบบเบ้ (Montgomery, 2012; Alkahtani, 2013) และในปี 2013 Nazir et al. (2013) ได้มีการศึกษาประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมCUSUM พบว่าแผนภูมินี้สามารถทำงานได้ดีถึงแม้ข้อมูลจะการแจกแจงแบบเบ้ ในงานวิจัยนี้ใช้การแจกแจงแบบแกมมา 3 พารามิเตอร์เป็นตัวแทนการแจกแจงแบบเบ้เนื่องจากการแจกแจงแบบแกมมา 3 พารามิเตอร์สามารถแสดงรูปร่าง (shape) ได้หลากหลายตั้งแต่ความเบ้เล็กน้อยไปจนถึงความเบ้มากทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์รูปร่าง (shape parameter) ที่เหมาะสม อีกทั้งการแจกแจงนี้ยังสามารถระบุตำแหน่งของการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มได้โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ตำแหน่ง (location parameter) และการแจกแจงนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริงเช่น ข้อมูลทางอุทกวิทยา การเงิน และวิศวกรรม เป็นต้น (Aksoy, 2000; Lakshmi & Vaidyanathan, 2016) การแจกแจงแกมมา 3 พารามิเตอร์มีความเกี่ยวข้องกับการแจกแจงอีกหลายชนิด เช่น การแจกแจงแบบเลขชี้กำลัง การแจกแจงแบบโคก้าสอง การแจกแจงแบบไวบูล เป็นต้น (Bhaumik & Gibbons, 2006) และแผนภูมิควบคุมส่วนใหญ่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการตรวจจับข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบแกมมา (Khan et al., 2017; Saeed & Kamal, 2016)

ในปี ค.ศ. 2013 Haq (Haq, 2013) นำเสนอแผนภูมิผสมที่เกิดจากการนำแผนภูมิควบคุม EWMA มาผสมกับแผนภูมิควบคุม EWMA และให้ชื่อใหม่ว่า แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังไฮบริดจ์ (Hybrid Exponentially Weighted Moving Average: HEWMA) ซึ่งทั้งแผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ตและแผนภูมิควบคุม EWMA จัดเป็นกรณีเฉพาะของแผนภูมิควบคุม HEWMA ต่อมาในปี ค.ศ. 2017

Haq(Haq,2017) ได้ทำการปรับปรุงค่าความแปรปรวนสำหรับแผนภูมิควบคุม HEWMA ทำให้แผนภูมิควบคุมสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้ดีขึ้น อีกทั้งยังนำแผนภูมิควบคุม HEWMA ไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับ แผนภูมิควบคุม EWMA และ แผนภูมิควบคุม EWMA-CUSUM โดยพิจารณาจากค่าความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุม (ARL_1) เมื่อกำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงปกติ พบว่าแผนภูมิควบคุม HEWMA มีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กถึงปานกลาง ในปี คศ. 2018 Abbas(Abbas, 2018) นำเสนอแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักเหมือนกัน (Homogeneously Weighted Moving Average: HWMA) แผนภูมิควบคุมนี้จะให้น้ำหนักกับข้อมูลในอดีตเท่ากันจะแตกต่างกัน แผนภูมิควบคุม EWMA ที่ให้น้ำหนักกับข้อมูลในอดีตแบบลดหลั่น อีกทั้งยังนำแผนภูมิควบคุม HWMA ไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับแผนภูมิควบคุม CUSUM EWMA และ แผนภูมิควบคุมผสม EWMA-CUSUM โดยพิจารณาจากค่า ARL_1 เมื่อกำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงแบบแกมมา และพบว่าแผนภูมิควบคุม HWMA มีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กถึงปานกลาง ในปี คศ. 2020 Abid et al.(2020) ได้เสนอแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักเหมือนกันซ้ำสองครั้ง (Double HWMA: DHWMA) และล่าสุด Riaz et al.(2021) พัฒนาแผนภูมิควบคุม HWMA โดยมีการซ้ำสามครั้งและให้ชื่อว่าแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักเหมือนกันซ้ำสามครั้ง(Triple HWMA: THWMA) การซ้ำสองและสามครั้งของแผนภูมิควบคุมจะช่วยให้แผนภูมิควบคุมมีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กถึงปานกลางได้ดี Riaz et al.(2021) ได้นำแผนภูมิควบคุม THWMA ไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับแผนภูมิควบคุม HWMA, DHWMA, EWMA และ Double EWMA โดยพิจารณาจากค่า ARL_1 เมื่อกำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงแบบแกมมา การแจกแจงแบบปกติ และการแจกแจงโลจิสติก พบว่าแผนภูมิควบคุม THWMA มีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กถึงปานกลาง และในปี คศ. 2021 Alevizakos et al.(2021) นำเสนอแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังปรับปรุงซ้ำสองครั้ง (Double Modified EWMA: DMEWMA) โดยแผนภูมิควบคุมนี้ถูกพัฒนามากจากแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังปรับปรุง (Modified EWMA:

MEWMA) แผนภูมิควบคุม MEWMA มีความสามารถในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการขนาดเล็กถึงปานกลางได้ตามความสามารถของแผนภูมิควบคุม EWMA อีกทั้งยังสามารถตรวจจับหากกระบวนการเกิดอัตตสัมพันธ์ในตัวเองได้ดีกว่าแผนภูมิควบคุม EWMA และเมื่อนำแผนภูมิควบคุม MEWMA ไปทำซ้ำสองครั้งจะยิ่งทำให้แผนภูมิควบคุมสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กถึงปานกลางได้ดียิ่งขึ้น Alevizakos et al.(2021) ได้นำแผนภูมิควบคุม DMEWMA ไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับแผนภูมิควบคุม MEWMA โดยพิจารณาจากค่า ARL_1 เมื่อกำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ พบว่าแผนภูมิควบคุม DMEWMA มีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กถึงปานกลาง

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นพบว่าแผนภูมิควบคุม HEWMA, THWMA และ แผนภูมิควบคุม DMEWMA สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กถึงปานกลางได้ดี อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงแม้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบเบ้ ดังนั้นผู้วิจัยสนใจที่จะนำแผนภูมิควบคุมทั้ง 3 แผนภูมิ มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพโดยกำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงแบบแกมมา 3 พารามิเตอร์ เกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพจะใช้ค่า ARL_1 เมื่อกำหนดให้ค่าความยาวรันเฉลี่ย เมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุมเท่ากับ 370 ($ARL_0 = 370$) โดยแผนภูมิที่ให้ค่า ARL_1 น้อยที่สุดคือแผนภูมิที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. แผนภูมิควบคุม (Control chart)

1.1 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังไฮบริดจ์ (HEWMA) Haq (2013) ได้นำเสนอแผนภูมิควบคุม HEWMA โดยพัฒนามาจากการถ่วงน้ำหนักของค่าสถิติของแผนภูมิควบคุม EWMA ซ้ำ 2 ครั้งและในปี ค.ศ. 2017 Haq ได้แก้ไขความแปรปรวนของแผนภูมิควบคุม HEWMA ให้ถูกต้องจากเดิมทำให้ได้ขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิใหม่ โดยสถิติของแผนภูมิ HEWMA

$$HE_i = \lambda_{1H} E_i + (1 - \lambda_{1H}) HE_{i-1} \quad (1)$$

$$E_i = \lambda_{2H} X_i + (1 - \lambda_{2H}) E_{i-1}; i = 1, 2, \dots$$

เมื่อ HE_i คือ ตัวสถิติ HEWMA ลำดับที่ i

E_i คือ ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลัง ลำดับที่ i

X_i คือ ค่าสังเกตของกระบวนการลำดับที่ i

$\lambda_{1H}, \lambda_{2H}: 0 < \lambda_{1H}, \lambda_{2H} \leq 1$ คือ ค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบสำหรับคำนวณสถิติของแผนภูมิควบคุม

HEWMA

โดยที่ $\lambda_{1H} \neq \lambda_{2H}$ กำหนดค่าสถิติเริ่มต้น $HE_0 = E_0 = \mu_0$ เป็นค่าเฉลี่ยของค่าสถิติของกระบวนการเมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม ค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของ HE_i คือ $E(HE_i) = \mu_0$ และ

$$Var(HE_i) = \left(\frac{\lambda_{1H}\lambda_{2H}}{\lambda_{1H} - \lambda_{2H}} \right)^2 \left[\frac{(1-\lambda_{2H})^2(1-(1-\lambda_{2H})^{2i})}{1-(1-\lambda_{2H})^2} + \frac{(1-\lambda_{1H})^2(1-(1-\lambda_{1H})^{2i})}{1-(1-\lambda_{1H})^2} - \frac{2(1-\lambda_{1H})(1-\lambda_{2H})(1-(1-\lambda_{1H})^i)(1-\lambda_{2H})^i}{1-(1-\lambda_{1H})(1-\lambda_{2H})} \right] \sigma^2 \quad (2)$$

ดังนั้น ขีดจำกัดควบคุมบน และ ล่าง ของแผนภูมิควบคุม HEWMA คือ

$$\text{ขีดจำกัดควบคุมบนและล่าง } UCL/LCL = \mu_0 \pm L_1 \sqrt{Var(HE_i)}$$

เส้นกลาง (Central line: CL) $CL = \mu_0$

โดยที่ μ_0 คือ ค่าเฉลี่ยของค่าสถิติของกระบวนการ $\lambda_{1H}, \lambda_{2H}$ คือ ค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบ ($0 < \lambda_{1H}, \lambda_{2H} \leq 1$) σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการ L_1 คือ ความกว้างของขีดจำกัดควบคุมที่สอดคล้องกับ $ARL_0 = 370$

1.2 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักเหมือนกันซ้ำสามครั้ง (Triple Homogeneously Weighted Moving Average: THWMA)

Riaz et al. (2021) ได้นำเสนอแผนภูมิควบคุม THWMA พัฒนามาจากแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักเหมือนกันซ้ำสองครั้ง (DHWMA) โดยเพิ่มการทำซ้ำ เพิ่มขึ้นอีก 1 ครั้งทำให้สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงกระบวนการขนาดเล็กได้เร็วยิ่งขึ้น สถิติของแผนภูมิควบคุม THWMA คือ

$$TH_i = \lambda^3 X_i + \lambda(1-\lambda^2) \bar{X}_{i-1} + (1-\lambda) \bar{X}_{i-1} \quad (3)$$

เมื่อ TH_i คือ ตัวสถิติ THWMA ลำดับที่ i

X_i คือ ค่าสังเกตลำดับที่ i $\bar{X}_{i-1} = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{X_j}{i-1}; i=1, 2, 3, \dots$

λ คือ ค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบ ($0 < \lambda \leq 1$)

กำหนดตัวสถิติเริ่มต้น $\bar{X}_{i-1} = \mu_0 =$ ค่าเฉลี่ยของค่าสถิติกระบวนการ เมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม ค่าเฉลี่ย และค่าความแปรปรวนของ TH_i คือ $E(TH_i) = \mu_0$ และ

$$Var(TH_i) = \left[\lambda^6 + \frac{(1-\lambda^3)^2}{(i-1)} \right] \sigma^2$$

ดังนั้น ขีดจำกัดควบคุมบน (UCL) และ ล่าง (LCL) ของแผนภูมิควบคุม THWMA คือ

$$i=1, \quad UCL/LCL = \mu_0 \pm L_2 \sigma \lambda^3 \quad (4)$$

$$i>1, \quad UCL/LCL = \mu_0 \pm L_2 \sqrt{Var(TH_i)}$$

เส้นกลาง (Central line: CL) $CL = \mu_0$

โดยที่ μ_0 คือ ค่าเฉลี่ยของค่าสถิติของกระบวนการ σ คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสถิติของกระบวนการ L_2 คือ ความกว้างของขีดจำกัดควบคุมหรือค่าสัมประสิทธิ์ขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุม THWMA ที่สอดคล้องกับค่า ARL_0 เท่ากับ 370

1.3 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลัง ปรับปรุงสองชั้น (Double-modified Exponentially Weighted Moving Average: DMEWMA) Alevizakos et al. (2021) ได้นำเสนอแผนภูมิควบคุม Double-modified EWMA โดยแผนภูมินี้ได้นำแนวคิดของการปรับให้เรียบมาใช้กับแผนภูมิควบคุม Modified EWMA ทำให้แผนภูมิควบคุมที่ได้สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กได้ดีกว่าเดิมและเมื่อกำหนด $k = -\frac{\lambda}{2}$ และ $k = -\frac{\lambda}{4}$ จะทำให้แผนภูมิควบคุมมีประสิทธิภาพ โดยสถิติของแผนภูมิ DMEWMA คือ

$$DM_i = \lambda X_i + (1-\lambda) DM_{i-1} + k(M_i - M_{i-1}) \quad (5)$$

$$M_i = \lambda X_i + (1-\lambda) M_{i-1} + k(X_i - X_{i-1})$$

งานวิจัยนี้กำหนดค่า k เป็น 2 กรณี คือ $k = -\frac{\lambda}{2}$

เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ DMEWMA1 และ $k = -\frac{\lambda}{4}$

เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ DMEWMA2

เมื่อ DM_i คือ ตัวสถิติ DMEWMA ลำดับที่ i

X_i คือ ค่าสังเกตของกระบวนการ ลำดับที่ i

λ คือ ค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบ ($0 < \lambda \leq 1$)

ตัวสถิติเริ่มต้น $X_0 = M_0 = DM_0 = \mu_0 =$ ค่าเฉลี่ยของค่าสถิติของกระบวนการ

เมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม ค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของ DM_i คือ $E(DM_i) = \mu_0$ และ

$$Var(DM_i) = \left[(k+\lambda)^4 + 4k^2(k+\lambda)^2(k+\lambda-1)^2 + \frac{4k^2(k+\lambda-1)^2(k+\lambda)^2(1-\lambda)^2}{1-\theta} - \frac{4k^2(k+\lambda-1)^2(k+\lambda)(1-\lambda)}{(1-\theta)^2} + \lambda^4(k+\lambda-1)^4 \frac{1+\theta}{(1-\theta)^2} \right] \sigma^2$$

ดังนั้น ขีดจำกัดควบคุมบน และ ล่าง ของแผนภูมิ

ควบคุม MDEWMA คือ

$$\text{ขีดจำกัดควบคุมบนและล่าง } UCL/LCL = \mu_0 \pm L_3 \sqrt{Var(DM_t)}$$

เส้นกลาง (Central line: CL) $CL = \mu_0$ (6)

โดยที่ μ_0 คือ ค่าเฉลี่ยของค่าสถิติของกระบวนการ σ คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสถิติของกระบวนการ $\theta = (1-\lambda)^2 < 1$ L_3 คือ ความกว้างของขีดจำกัดควบคุมหรือค่าสัมประสิทธิ์ขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุม DMEWMA ที่สอดคล้องกับค่า ARL_0 เท่ากับ 370

2. การแจกแจงแบบแกมมาทั่วไปสามพารามิเตอร์

การแจกแจงแบบแกมมา 3 พารามิเตอร์สามารถนำไปใช้แทนข้อมูลที่มีความเบ้ได้หลากหลายและการแจกแจงนี้ยังมีความเกี่ยวข้องกับการกับแจกแจงแบบต่อเนื่องอีกหลายการแจกแจง ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นค่าเฉลี่ย และความแปรปรวนของการแจกแจงแบบแกมมา 3 พารามิเตอร์ (Lakshmi & Vaidyanathan, 2016) คือ

$$f(x; \alpha, \beta, \gamma) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} (x-\gamma)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)}; \alpha, \beta > 0; x > \gamma$$

$$E(X) = \gamma + \alpha\beta$$

$$Var(X) = \alpha\beta^2$$

เมื่อ α คือ พารามิเตอร์รูปร่าง β คือ พารามิเตอร์ขนาด และ γ คือ พารามิเตอร์ตำแหน่ง ใช้สัญลักษณ์ $\Gamma(\alpha, \beta, \gamma)$

3. เกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุม

ค่าความยาวรันเฉลี่ย (average run length: ARL) คือ จำนวนตัวอย่างเฉลี่ยที่ตกอยู่ในขีดจำกัดควบคุมก่อนที่กระบวนการส่งสัญญาณออกนอกขีดจำกัดควบคุมเป็นครั้งแรกโดยค่า ARL แบ่งออกเป็น 2 สถานะคือ

3.1 เมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม (in-control process) ค่าความยาวรันเฉลี่ยเขียนสัญลักษณ์แทนด้วย ARL_0

$$ARL_0 = \frac{1}{\theta}$$

เมื่อ θ คือ ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดประเภทที่ 1 หมายถึง ค่าความน่าจะเป็นที่พบว่า

กระบวนการออกนอกขีดจำกัดควบคุม เมื่อกระบวนการไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ARL_0 ควรมีค่ามาก ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ $ARL_0 = 370$

3.2 เมื่อกระบวนการไม่อยู่ในการควบคุม (out-of-control process) ค่าความยาวรันเฉลี่ยเขียนสัญลักษณ์แทนด้วย ARL_1

$$ARL_1 = \frac{1}{1-\omega}$$

เมื่อ ω คือค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดประเภทที่ 2 หมายถึงค่าความน่าจะเป็นที่พบว่ากระบวนการอยู่ในขีดจำกัดควบคุมเมื่อกระบวนการเกิดการเปลี่ยนแปลง ค่า ARL_1 ควรจะมีค่าน้อยเมื่อกระบวนการออกนอกขีดจำกัดควบคุม หรือกล่าวได้ว่าแผนภูมิควบคุมจะส่งสัญญาณเตือนบ่อยครั้งเมื่อกระบวนการออกนอกขีดจำกัดควบคุม

3.3 สำหรับการหาค่า ARL โดยวิธีการจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) สามารถหาได้ดังนี้

$$ARL = \frac{\sum_{t=1}^M RL_t}{M}$$

โดยที่ M คือ จำนวนรอบของการทำซ้ำของการจำลอง

RL_t คือ ค่าความยาววิ่ง เป็นจำนวนหน่วยตัวอย่างที่ถูกตรวจสอบก่อนที่จะพบว่ากระบวนการออกนอกการควบคุมในการจำลองครั้งที่ t

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ผู้วิจัยทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมสำหรับตรวจจับขนาดการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปร่าง (shape parameter : α) ของกระบวนการ ระหว่างแผนภูมิควบคุม HEWMA แผนภูมิควบคุม THWMA และแผนภูมิควบคุม DMEWMA ภายใต้การแจกแจงแกมมาสามพารามิเตอร์ ซึ่งผู้วิจัยจะใช้เกณฑ์วัดประสิทธิภาพของการเปรียบเทียบแผนภูมิควบคุมครั้งนี้ คือค่าความยาวรันเฉลี่ย (ARL) เมื่อกระบวนการอยู่นอกการควบคุม (ARL_1) ซึ่งถ้าแผนภูมิควบคุมใดที่ให้ค่า ARL_1 ต่ำที่สุดจะมีประสิทธิภาพมากกว่าแผนภูมิควบคุมอื่นๆ ภายใต้ ARL_0 มีค่าเท่ากับ 370 โดยวิจัยครั้งนี้จำลองข้อมูลด้วยวิธีมอนติคาร์โล ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

3.1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ของแผนภูมิควบคุมทั้ง 4 ชนิด

3.1.1 ค่าพารามิเตอร์ในการทำให้เรียบสำหรับแผนภูมิควบคุม HEWMA(λ_H) เท่ากับ 0.05 และ 0.08 ค่าพารามิเตอร์ในการทำให้เรียบสำหรับแผนภูมิควบคุม HEWMA(λ_H) เท่ากับ 0.10, 0.30 และ 0.50

3.1.2 ค่าพารามิเตอร์ในการทำให้เรียบสำหรับแผนภูมิควบคุม THWMA(λ) เท่ากับ 0.03, 0.07, 0.09, 0.10, 0.20 และ 0.50

3.1.3 ค่าพารามิเตอร์ในการทำให้เรียบสำหรับแผนภูมิควบคุม DMEWMA(λ) เท่ากับ 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.20 และ 0.50

3.2 กำหนดค่าพารามิเตอร์ของแผนภูมิควบคุมทั้ง 4 ชนิด

3.2.1 กรณีกระบวนการอยู่ในการควบคุมจะสร้างข้อมูลให้มีการแจกแจงแกมมาในงานวิจัยนี้จะใช้สัญลักษณ์ $G(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$ โดยมีการกำหนดพารามิเตอร์ α_0, β_0 และ γ_0 ดังนี้ $G(1,1,1)$, $G(2,1,1)$, $G(1,2,1)$, $G(1,2,2)$, และ $G(2,1,2)$ กำหนดจำนวนรอบทำซ้ำเท่ากับ 10,000 ภายใต้มีค่าเท่ากับ 370

3.2.2 กรณีที่กระบวนการอยู่นอกการควบคุมสร้างข้อมูลให้มีการแจกแจง $G(\alpha_1, \beta_0, \gamma_0)$ เมื่อ กำหนดขนาดการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ $\alpha_1 = \alpha_0 + \delta$ เมื่อ δ เท่ากับ 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.10, 0.30, 0.50, 0.70, 1.50, 2.00 และ 2.50 จำนวนรอบทำซ้ำ (M) เท่ากับ 10,000 ภายใต้มีค่าเท่ากับ 370

3.3 นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองในข้อ 2 มาคำนวณค่าสถิติของแผนภูมิควบคุม HEWMA THWMA และ DMEWMA ดังนี้

3.3.1 คำนวณค่าสถิติ HE_i และ E_i ของแผนภูมิควบคุม HEWMA ดังสมการที่ (1) โดยใช้ค่า λ_H และ λ_{2H} ที่กำหนดไว้ในข้อ 3.1.1

3.3.2 คำนวณค่าสถิติ TH_i ของแผนภูมิควบคุม THWMA ดังสมการที่ (3) โดยใช้ค่า λ ที่กำหนดไว้ในข้อ 3.1.2

3.3.3 คำนวณค่าสถิติ DM_i ของแผนภูมิควบคุม DMEWMA ดังสมการที่ (5) โดยใช้ค่า λ ที่กำหนดไว้ในข้อ 3.1.3

3.4 คำนวณขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุม HEWMA THWMA และ DMEWMA ดังสมการที่ (2), (4) และ (6) ตามลำดับ

3.5 นำค่าสถิติที่คำนวณได้ของทั้ง 3 แผนภูมิในข้อ 3 มาเปรียบเทียบกับขีดจำกัดควบคุมของแต่ละแผนภูมิที่ได้ในข้อ 4

เพื่อหาจำนวนหน่วยตัวอย่างที่อยู่ภายใต้การควบคุมจนกระทั่งพบว่า กระบวนการออกนอกขีดจำกัดควบคุมเป็นครั้งแรกซึ่งเรียกว่า ค่าความยาววิ่ง (RL_t)

3.6 ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 5 จนครบ 10,000 รอบ

3.7 คำนวณค่า ARL แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

3.7.1 กรณีที่กระบวนการผลิตอยู่ในการควบคุม (in-control process)

3.7.1.1 นำค่า RL_t ที่ได้จากข้อที่ 6 มาหาค่า ARL_0 ดังนี้

$$ARL_0 = \frac{\sum_{t=1}^M RL_t}{10,000}$$

โดยที่ RL_t คือ ค่าความยาววิ่งเป็นจำนวนหน่วยตัวอย่างที่อยู่ภายใต้การควบคุมจนกระทั่งพบว่า กระบวนการออกนอกขีดจำกัดควบคุมเป็นครั้งแรกในการจำลองข้อมูลครั้งที่ t ; $t=1,2,\dots,10,000$ หากได้ค่า ARL_0 มีค่าเท่ากับ 370 จะทำการเก็บค่า L และคำนวณขีดจำกัดควบคุม

3.7.2 เมื่อกระบวนการผลิตอยู่นอกการควบคุม (out-control process)

3.7.2.1 นำค่า RL_t ที่ได้จากข้อที่ 6 มาหาค่า ARL_1 (โดยข้อ 5 จะนำค่าสถิติที่ได้มาเปรียบเทียบกับขีดจำกัดควบคุม ที่ได้จาก ARL_0 มีค่าเท่ากับ 370)

$$ARL_1 = \frac{\sum_{t=1}^M RL_t}{10,000}$$

โดยที่ RL_t คือ ค่าความยาววิ่งเป็นจำนวนหน่วยตัวอย่างที่อยู่ภายใต้การควบคุมจนกระทั่งพบว่า กระบวนการออกนอกขีดจำกัดควบคุมเป็นครั้งแรกในการจำลองข้อมูลครั้งที่ t ; $t=1,2,\dots,10,000$

3.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมจากค่าความยาววิ่งเฉลี่ยที่หามาได้ในข้อ 3.7.2 กรณีเมื่อกระบวนการผลิตอยู่นอกการควบคุม โดยแผนภูมิที่ให้ค่า ARL_1 ต่ำที่สุดจะเป็นแผนภูมิที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

ตารางที่ 1 ค่าความยาวคลื่นเฉลี่ยของแผนภูมิควมคม HEWMA

Distribution	Lampda1	Lampda2	L	Shift (δ)											
				0.01	0.03	0.05	0.07	0.09	0.10	0.30	0.50	0.70	1.50	2.00	2.50
G(1,1,1)	0.05	0.10	5.10	366.014	342.138	335.311	298.701	277.794	255.879	108.029	59.574	41.458	19.51	15.003	12.376
		0.30	11.70	363.047	350.5073	343.318	336.464	316.673	319.562	189.910	98.566	55.523	15.644	10.902	8.135
		0.50	17.90	368.796	354.600	353.504	339.170	329.524	323.590	233.836	142.808	93.008	23.400	13.000	9.542
	0.08	0.10	4.22	359.031	342.630	317.672	294.685	269.810	268.596	108.221	57.713	41.118	18.988	14.534	11.938
		0.30	9.20	362.122	352.5064	347.018	321.351	306.657	308.348	174.594	95.668	56.490	15.188	10.483	8.148
		0.50	13.85	363.202	359.072	350.106	344.664	343.844	333.452	225.422	140.890	88.596	22.5050	13.078	8.920
G(1,2,1)	0.05	0.10	5.01	361.388	325.194	316.300	292.781	262.136	262.717	106.886	62.733	45.714	22.678	34.763	14.444
		0.30	11.65	363.596	351.880	338.493	332.294	312.640	305.505	189.958	100.949	58.138	16.662	74.146	8.838
		0.50	17.91	365.506	353.768	349.260	340.7092	338.950	323.106	237.560	154.022	92.074	22.220	18.261	9.416
	0.08	0.10	4.20	362.606	341.321	315.745	308.744	278.498	257.839	112.898	63.946	45.365	22.398	34.147	14.431
		0.30	9.20	368.453	357.112	341.736	331.458	316.639	312.987	191.857	99.261	56.529	15.996	71.183	8.873
		0.50	14.13	364.838	361.844	353.336	352.964	338.550	244.676	152.250	99.532	23.458	20.1034	12.854	8.888
G(1,2,2)	0.05	0.10	8.90	366.083	345.234	322.5085	294.120	287.501	272.034	119.928	68.360	49.265	25.784	20.2050	16.626
		0.30	14.95	369.168	366.771	344.503	332.250	311.841	311.868	184.664	99.706	56.280	17.612	12.246	9.596
		0.50	17.80	368.168	362.190	352.5068	332.484	330.936	314.998	228.702	147.024	93.352	22.194	13.018	9.622
	0.08	0.10	7.43	358.414	337.943	323.979	300.7054	278.367	263.229	109.877	66.696	49.079	25.170	19.926	16.537
		0.30	11.85	369.326	350.074	331.854	333.195	312.5075	316.104	183.448	100.912	57.035	16.649	11.906	9.113
		0.50	14.07	366.186	362.498	358.420	357.892	345.380	343.206	242.968	168.074	101.146	21.706	13.278	9.462
G(2,1,1)	0.05	0.10	3.30	366.482	350.2019	326.131	306.531	300.393	281.661	159.106	91.102	65.323	33.569	26.425	22.424
		0.30	7.36	360.909	356.712	352.058	337.541	333.602	321.674	222.728	141.668	90.951	25.142	17.127	12.884
		0.50	15.60	365.980	358.448	355.508	348.218	339.452	335.534	255.526	181.5064	131.152	36.164	19.572	13.258
	0.08	0.10	2.70	361.754	341.262	318.706	304.801	284.230	278.975	149.796	86.117	63.210	32.845	26.145	21.803
		0.30	5.80	369.430	360.913	349.988	344.817	330.101	329.392	225.087	137.921	24.685	16.213	12.478	8.082
		0.50	12.30	369.894	364.244	360.488	355.764	347.694	344.156	267.376	186.874	147.192	34.572	20.2094	13.032
G(2,1,2)	0.05	0.10	3.31	366.809	352.060	335.852	328.913	307.287	294.638	161.135	96.994	41.428	37.203	30.070	25.426
		0.30	7.30	360.351	347.573	344.008	335.183	325.558	319.821	218.176	133.810	27.681	26.298	18.080	13.696
		0.50	15.63	365.740	361.882	351.978	348.392	339.480	337.308	280.976	179.812	135.856	36.754	20.7038	13.948
	0.08	0.10	2.73	369.397	352.430	336.923	322.332	297.693	285.564	154.944	92.314	66.358	36.648	29.469	24.741
		0.30	5.78	369.849	362.737	346.482	342.219	323.706	321.133	223.893	142.765	28.863	25.618	17.398	13.446
		0.50	12.20	369.422	365.698	362.390	359.352	337.666	330.1084	284.540	191.954	122.5076	34.892	19.934	13.502

ตารางที่ 2 ค่าความยาวคลื่นเฉลี่ยของแผนภูมิควมคม THWMA

Distribution	Lampda	L	Shift (δ)											
			0.01	0.03	0.05	0.07	0.09	0.10	0.30	0.50	0.70	1.50	2.00	2.50
G(1,1,1)	0.03	2.16	366.502	337.130	310.652	259.298	214.854	210.1058	37.646	18.330	9.676	3.602	2.712	2.326
	0.07	2.41	359.636	336.318	300.628	245.982	214.936	203.986	36.772	16.838	9.430	3.590	2.692	2.346
	0.09	2.503	360.5094	312.080	278.628	255.160	214.748	205.970	36.054	15.590	9.774	3.276	2.640	2.350
	0.10	2.509	358.736	340.312	280.2078	260.2034	201.5040	185.820	39.982	15.632	9.172	3.556	2.624	2.278
	0.20	3.76	362.110	332.334	297.804	251.5030	212.188	190.890	35.442	17.164	9.500	3.476	2.5076	2.346
	0.50	6.45	365.054	362.794	352.938	336.908	298.520	293.610	124.238	38.790	15.302	3.070	2.342	2.118
G(1,2,1)	0.03	2.11	354.168	332.412	296.956	261.5022	218.266	77.792	39.070	14.504	9.676	3.538	2.634	2.254
	0.07	2.43	352.118	334.668	294.020	260.1022	223.454	86.268	38.420	15.368	9.872	3.578	2.770	2.366
	0.09	2.504	366.410	332.206	282.772	257.130	211.084	189.592	38.594	15.988	9.660	3.436	4.838	2.308
	0.10	2.61	359.690	323.698	289.760	253.382	212.142	180.106	41.212	16.942	9.846	3.672	4.904	2.316
	0.20	3.70	356.076	311.816	283.604	231.670	205.418	78.370	35.668	15.908	9.036	3.488	2.634	2.252
	0.50	6.40	360.450	341.954	326.114	323.648	292.338	215.116	105.162	32.948	15.196	3.326	2.420	2.140
G(1,2,2)	0.03	2.10	356.790	344.414	294.752	239.510	212.782	77.812	38.876	16.152	9.224	5.542	2.708	2.318
	0.07	2.48	355.754	349.480	305.172	268.594	228.198	79.664	37.572	17.466	10.102	6.038	2.672	2.332
	0.09	2.506	367.138	323.204	312.934	256.784	228.638	213.256	35.822	15.996	9.160	3.342	2.5084	2.312
	0.10	2.506	368.474	328.190	286.610	266.174	222.288	193.712	34.912	16.326	8.842	3.352	2.646	2.278
	0.20	3.74	350.670	332.014	288.634	232.690	207.246	80.394	42.102	17.050	9.248	6.020	2.702	2.296
	0.50	6.30	365.486	349.796	334.626	303.328	295.720	184.582	99.212	32.674	14.710	3.246	2.316	2.090
G(2,1,1)	0.03	1.99	354.550	327.846	310.006	278.452	259.234	248.292	60.2044	26.700	13.386	4.868	3.434	2.670
	0.07	2.33	355.560	349.672	309.466	302.710	282.462	248.394	63.994	25.914	15.442	4.732	3.496	2.746
	0.09	2.502	362.426	354.416	317.964	287.024	266.872	254.124	66.464	28.570	15.186	5.022	3.648	2.772
	0.10	2.60	348.052	339.642	322.422	288.596	276.418	242.170	62.898	28.810	15.482	4.978	3.382	2.748
	0.20	3.68	364.554	342.338	306.966	305.154	258.878	239.828	60.830	28.492	17.034	4.714	3.564	2.814
	0.50	5.75	368.008	359.932	352.154	346.784	340.5062	326.042	154.554	61.080	26.190	4.454	2.944	2.374
G(2,1,2)	0.03	2.10	352.930	348.606	319.442	288.834	272.192	252.404	66.308	27.730	16.018	5.376	3.518	2.900
	0.07	2.35	361.030	344.362	319.378	303.912	261.002	256.960	62.5084	27.544	14.348	5.080	3.562	2.840
	0.09	2.504	362.730	344.926	324.794	297.876	276.740	254.462	64.712	26.406	16.126	4.694	3.474	2.838
	0.10	2.60	365.494	339.818	326.924	293.290	269.086	266.130	69.892	27.086	16.008	4.886	3.568	2.670
	0.20	3.69	362.016	351.022	311.626	306.794	267.610	241.106	68.316	28.062	13.968	4.978	3.562	2.918
	0.50	5.70	367.990	359.234	346.970	320.488	316.978	314.628	145.516	59.924	24.072	4.830	2.924	2.432

ตารางที่ 3 ค่าความยาววันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม DMEWMA1

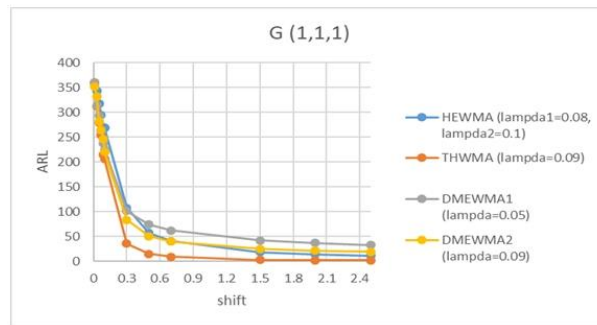
Distribution	Lampda	L	Shift (δ)											
			0.01	0.03	0.05	0.07	0.09	0.10	0.30	0.50	0.70	1.50	2.00	2.50
G(1,1,1)	0.03	0.99	338.774	333.474	296.966	269.698	243.624	233.346	137.942	108.652	94.106	67.592	58.770	52.646
	0.05	10.48	359.156	313.798	292.642	263.060	237.214	225.036	101.5060	74.792	62.5038	42.802	37.130	33.156
	0.07	2.01	369.356	331.5096	305.108	273.390	239.628	226.956	89.990	59.678	48.484	32.102	27.702	24.648
	0.09	2.19	353.522	314.920	306.124	274.750	243.478	231.5030	86.244	52.5032	41.162	25.840	22.480	19.814
	0.20	7.2	367.902	353.894	307.248	293.856	276.766	264.120	104.876	51.758	31.468	14.416	11.904	10.614
	0.50	3.93	365.206	351.064	337.496	313.268	309.516	308.864	169.358	86.450	48.046	11.828	8.050	6.196
G(1,2,1)	0.03	1.05	362.106	317.108	284.316	260.708	241.068	227.310	127.272	100.610	85.978	72.716	59.644	46.488
	0.05	1.71	345.088	320.970	308.896	259.202	237.134	231.446	98.164	68.736	57.222	38.592	32.950	29.670
	0.07	2.00	349.508	324.898	284.282	265.898	241.380	230.628	87.606	56.810	44.378	35.390	29.034	22.330
	0.09	2.25	359.110	344.750	306.412	276.208	264.462	238.046	81.622	50.7094	38.224	23.848	29.282	17.994
	0.20	2.93	355.078	329.448	326.042	301.722	279.496	269.164	103.814	47.014	30.2010	13.752	11.016	9.742
	0.50	3.93	364.332	349.002	337.712	329.336	313.256	300.5042	177.572	88.760	46.516	11.418	7.646	6.156
G(1,2,2)	0.03	0.98	350.942	316.382	293.892	269.922	240.1018	235.204	135.514	109.566	93.904	67.672	59.024	52.638
	0.05	1.66	345.118	331.690	297.202	268.144	244.908	222.148	102.120	74.038	62.152	42.756	37.188	33.324
	0.07	2.00	359.210	318.660	306.724	276.626	252.144	225.340	92.930	59.850	47.978	32.064	27.876	24.638
	0.09	2.20	352.128	328.878	290.090	285.748	252.5066	223.322	85.504	53.326	41.148	20.954	22.278	19.972
	0.20	2.93	351.624	343.620	305.440	297.374	273.818	266.954	106.166	49.964	30.992	14.610	11.902	10.5054
	0.50	3.95	368.398	356.220	333.126	332.972	328.752	317.248	176.110	92.804	48.134	12.834	7.964	6.342
G(2,1,1)	0.03	0.97	359.998	331.854	319.690	294.556	271.452	264.342	160.322	128.040	111.878	80.688	71.056	63.760
	0.05	1.63	355.996	335.030	311.044	285.842	268.712	265.222	130.400	92.304	74.768	51.292	44.890	40.428
	0.07	1.99	366.424	339.668	318.390	293.094	287.278	271.090	123.466	81.358	61.310	38.840	33.566	30.2010
	0.09	2.14	358.168	339.154	318.016	293.586	273.486	263.914	121.008	68.796	52.658	31.024	27.134	24.056
	0.20	2.75	354.346	344.152	326.414	310.2094	309.762	276.830	140.7024	75.110	43.134	18.656	14.646	12.874
	0.50	3.65	368.262	360.1024	355.832	346.480	344.478	335.292	220.468	135.106	83.634	19.552	12.020	8.620
G(2,1,2)	0.03	0.96	362.806	345.314	327.896	303.726	288.208	267.410	175.188	139.274	120.898	90.058	79.690	71.782
	0.05	1.63	351.946	334.804	334.094	292.5976	264.322	261.164	139.124	96.496	81.318	56.834	45.338	32.434
	0.07	1.96	352.168	344.252	326.234	303.796	279.624	268.962	127.230	81.678	63.960	42.5092	37.084	33.458
	0.09	2.18	364.802	346.056	326.200	312.708	277.138	263.602	127.970	75.238	56.934	34.600	30.022	26.798
	0.20	2.80	356.438	346.176	337.762	314.848	300.1074	291.328	152.000	80.610	48.694	20.066	13.932	9.728
	0.50	3.62	367.846	362.330	358.010	344.362	322.474	317.344	212.462	138.648	80.912	11.760	8.686	5.082

ตารางที่ 4 ค่าความยาววันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม DMEWMA2

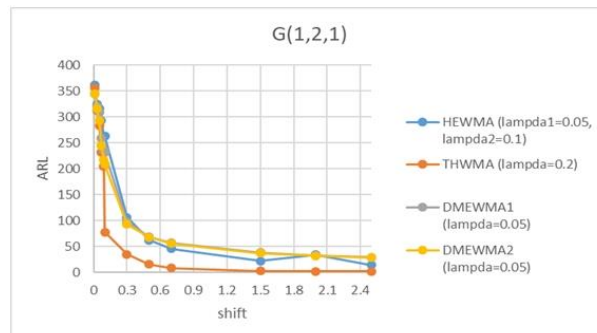
Distribution	Lampda	L	Shift (δ)											
			0.01	0.03	0.05	0.07	0.09	0.10	0.30	0.50	0.70	1.50	2.00	2.50
G(1,1,1)	0.03	0.97	352.456	321.002	296.824	259.404	235.640	228.430	135.670	108.510	94.318	66.580	58.424	52.158
	0.05	1.64	344.080	327.990	295.376	265.188	235.618	221.602	100.472	74.414	61.5010	42.040	36.932	32.826
	0.07	2.01	367.142	337.902	296.194	268.974	246.826	222.090	91.152	59.170	47.180	31.5050	27.450	24.184
	0.09	2.2	352.016	332.102	282.168	264.180	246.668	220.2078	83.518	51.358	39.974	25.572	21.782	19.456
	0.20	3.01	351.974	338.960	322.946	299.78	274.798	252.792	108.514	49.216	31.502	14.250	11.5012	10.1074
	0.50	4.723	368.316	355.566	341.870	333.742	324.534	320.1052	216.336	120.5018	71.018	17.458	10.486	7.664
G(1,1,2)	0.03	0.98	346.528	316.648	273.086	261.664	228.944	223.186	126.958	99.016	84.834	71.5090	59.076	45.936
	0.05	1.61	344.936	315.832	292.924	245.062	217.914	208.930	93.136	68.212	55.990	37.596	32.5070	28.966
	0.07	2.02	363.526	319.492	302.758	261.026	239.976	223.082	85.606	56.792	43.876	35.256	28.188	21.5038
	0.09	2.25	350.060	327.586	313.576	268.586	233.948	223.028	82.5020	50.022	37.922	23.184	29.054	17.342
	0.20	2.98	350.050	344.428	306.414	291.044	268.538	249.658	96.924	45.984	38.690	13.330	10.7046	9.302
	0.50	4.80	366.348	360.686	350.1046	349.986	348.496	335.898	220.928	130.412	76.888	17.992	11.046	7.686
G(1,2,1)	0.03	0.98	360.472	318.224	295.296	272.432	244.458	229.500	135.560	108.906	93.862	67.448	58.182	52.198
	0.05	1.65	350.2040	316.660	292.696	259.580	226.508	222.602	104.472	74.106	61.708	42.348	36.718	32.668
	0.07	2.00	353.634	310.804	302.138	274.062	239.560	229.152	92.5070	59.778	47.322	31.786	27.058	24.264
	0.09	2.22	346.206	330.5056	305.384	272.498	244.288	231.432	86.338	53.028	40.456	25.802	21.962	19.594
	0.20	2.98	359.840	327.626	312.864	294.000	274.282	261.762	97.404	50.086	30.2092	14.162	11.692	10.1020
	0.50	4.78	361.252	353.224	352.160	347.858	343.540	330.364	211.366	136.158	81.222	17.430	10.702	7.592
G(1,2,2)	0.03	1.01	366.018	334.450	318.082	305.388	279.136	267.548	161.938	129.370	110.454	80.1092	70.620	63.356
	0.05	1.65	356.274	348.038	323.922	306.992	271.644	268.590	128.594	92.054	75.362	50.890	44.398	39.810
	0.07	2.01	355.984	346.782	327.824	299.874	283.334	257.946	124.640	79.256	60.5096	38.408	33.114	29.570
	0.09	2.20	357.562	333.292	327.728	317.236	277.682	271.076	123.498	71.5098	53.424	31.234	26.772	23.884
	0.20	2.90	365.662	340.802	340.5078	312.826	309.294	306.198	150.986	76.626	47.038	18.720	14.752	12.480
	0.50	4.20	363.510	351.434	347.930	346.602	331.190	322.936	240.808	170.468	107.120	26.112	15.888	11.068
G(2,1,1)	0.03	0.94	357.536	340.902	320.006	301.122	283.934	270.686	170.7062	136.270	121.242	89.444	79.022	71.754
	0.05	1.63	357.432	331.728	318.020	291.054	279.502	266.708	135.146	96.444	80.1038	56.200	44.706	32.016
	0.07	1.94	351.976	337.396	316.780	290.338	271.220	260.972	126.524	83.816	64.368	42.184	36.386	32.768
	0.09	2.19	367.128	344.840	334.924	299.812	292.800	275.338	127.300	74.608	55.538	34.006	29.186	26.330
	0.20	2.87	347.800	339.154	321.5014	291.740	280.206	272.836	139.210	73.198	46.698	19.702	13.610	11.610
	0.50	4.25	369.222	364.230	361.5024	354.712	352.064	336.224	249.524	178.918	113.656	26.498	16.346	10.944

จากตารางที่ 1 แสดงค่าความยาววันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม HEWMA เมื่อพิจารณาการแจกแจง G(1,1,1) พบว่าภายใต้การเปลี่ยนแปลง(δ)ขนาด 0.01 ถึง 0.09 ค่า ARL_1 มีค่าน้อยที่สุดเมื่อกำหนด λ_{1H} เท่ากับ 0.05 และ 0.08 ส่วน λ_{2H} เท่ากับ 0.10 และ 0.30 ภายใต้การเปลี่ยนแปลง(δ)ขนาด 0.10 ถึง 0.70 ค่า ARL_1 มีค่าน้อยที่สุด เมื่อกำหนด λ_{1H} เท่ากับ 0.05 และ 0.08 ส่วน λ_{2H} เท่ากับ 0.10 ภายใต้การเปลี่ยนแปลง(δ)ขนาด 1.50 ถึง 2.50 ค่า ARL_1 มีค่าน้อยที่สุดเมื่อกำหนด λ_{1H} เท่ากับ 0.05 และ 0.08 ส่วน λ_{2H} เท่ากับ 0.30 พิจารณาการแจกแจง G(1,2,1) พบว่าภายใต้การ

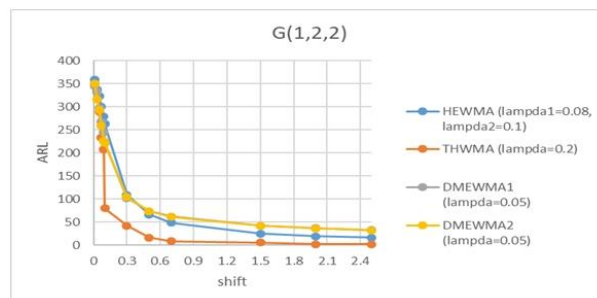
เปลี่ยนแปลง(δ)ขนาด 0.01 ถึง 0.09 ค่า ARL_1 มีค่าน้อยที่สุดเมื่อกำหนด λ_{1H} เท่ากับ 0.05 และ 0.08 ส่วน λ_{2H} เท่ากับ 0.10 ภายใต้การเปลี่ยนแปลง(δ)ขนาด 0.10 ถึง 0.70 ค่า ARL_1 มีค่าน้อยที่สุดเมื่อกำหนด λ_{1H} เท่ากับ 0.05 และ 0.08 ส่วน λ_{2H} เท่ากับ 0.10 และ 0.50, ภายใต้การเปลี่ยนแปลง(δ)ขนาด 1.50 ถึง 2.50 ค่า ARL_1 มีค่าน้อยที่สุดเมื่อกำหนด λ_{1H} เท่ากับ 0.05 และ 0.08 ส่วน λ_{2H} เท่ากับ 0.30 และ 0.50 พิจารณาการแจกแจง G(1,2,2) พบว่าภายใต้การเปลี่ยนแปลง(δ)ขนาด 0.01 ถึง 0.09 ค่า ARL_1 มีค่าน้อยที่สุดเมื่อกำหนด λ_{1H} เท่ากับ 0.05 และ 0.08 ส่วน λ_{2H} เท่ากับ 0.10,



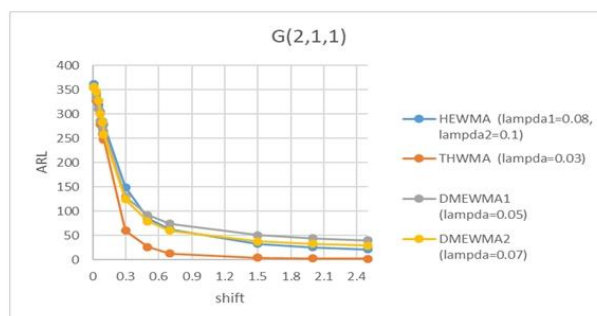
รูปที่ 1 ค่าความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม HEWMA THWMA DMEWMA1 และ DMEWMA2 สำหรับ $G(1,1,1)$



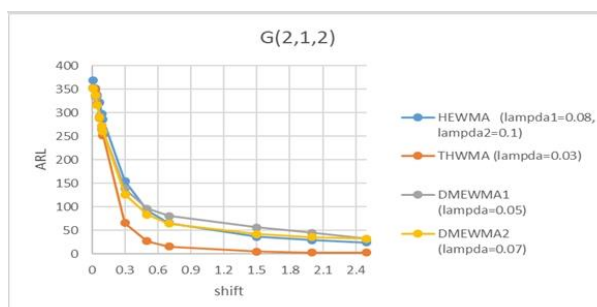
รูปที่ 2 ค่าความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม HEWMA THWMA DMEWMA1 และ DMEWMA2 สำหรับ $G(1,2,1)$



รูปที่ 3 ค่าความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม HEWMA THWMA DMEWMA1 และ DMEWMA2 สำหรับ $G(1,2,2)$



รูปที่ 4 ค่าความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม HEWMA THWMA DMEWMA1 และ DMEWMA2 สำหรับ $G(2,1,1)$



รูปที่ 5 ค่าความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม HEWMA THWMA DMEWMA1 และ DMEWMA2 สำหรับ $G(2,1,2)$

แผนภูมิควบคุม DMEWMA1 ($\lambda = 0.05$) และ DMEWMA2 ($\lambda = 0.07$) ส่วนแผนภูมิควบคุม HEWMA ($\lambda_{1H} = 0.08, \lambda_{2H} = 0.10$) จะมีประสิทธิภาพดีกว่า DMEWMA1 ($\lambda = 0.05$) และ DMEWMA2 ($\lambda = 0.09$) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง (δ) ตั้งแต่ 1.50 ขึ้นไป และจากรูปที่ 5. พิจารณาการแจกแจง $G(2,1,2)$ เมื่อนำแผนภูมิควบคุมที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลง (δ) พารามิเตอร์ขนาดเล็ก ($0.01 \leq \delta \leq 0.09$) ที่ดีที่สุดของแต่ละแผนภูมิมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพพบว่า แผนภูมิควบคุม THWMA ($\lambda = 0.03$) มีประสิทธิภาพสูงสุดรองลงมาคือ แผนภูมิควบคุม DMEWMA1 ($\lambda = 0.05$) และ DMEWMA2 ($\lambda = 0.07$) ส่วนแผนภูมิควบคุม HEWMA ($\lambda_{1H} = 0.08, \lambda_{2H} = 0.10$) จะมีประสิทธิภาพดีกว่า DMEWMA1 ($\lambda = 0.05$) และ DMEWMA2 ($\lambda = 0.07$) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง (δ) ตั้งแต่ 1.50 ขึ้นไป

4. สรุปผลการวิจัย

แผนภูมิควบคุม THWMA ที่กำหนดค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบระหว่าง 0.07 ถึง 0.20 ($0.07 \leq \lambda \leq 0.20$) จะมีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ขนาดเล็กถึงปานกลาง ($0.01 \leq \delta \leq 0.70$) สำหรับข้อมูลที่มีการแจกแจงแกมมา 3 พารามิเตอร์ได้ดี แม้ว่าจะมีการกำหนดค่าความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุมโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ 1 พารามิเตอร์ (พารามิเตอร์บ่งรูปร่างหรือพารามิเตอร์บ่งขนาด) และ 2 พารามิเตอร์ (พารามิเตอร์บ่งขนาดและพารามิเตอร์บ่งตำแหน่ง และ พารามิเตอร์บ่งรูปร่างและพารามิเตอร์บ่งตำแหน่ง)

แผนภูมิควบคุม DMEWMA1 และ DMEWMA2 ที่กำหนดค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบระหว่าง 0.05 ถึง 0.20 ($0.05 \leq \lambda \leq 0.20$) จะมีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ขนาดเล็กถึงปานกลาง ($0.01 \leq \delta \leq 0.70$) สำหรับข้อมูลที่มีการแจกแจงแกมมา 3 พารามิเตอร์ได้ดี แม้ว่าจะมีการกำหนดค่าความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุมโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ 1 พารามิเตอร์ (พารามิเตอร์บ่งรูปร่างหรือพารามิเตอร์บ่งขนาด) และ 2 พารามิเตอร์ (พารามิเตอร์บ่งขนาดและพารามิเตอร์บ่งตำแหน่ง และพารามิเตอร์บ่งรูปร่างและพารามิเตอร์บ่งตำแหน่ง)

แผนภูมิควบคุม THWMA DMEWMA1 DMEWMA2 และแผนภูมิควบคุม HEWMA เป็นแผนภูมิที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ขนาดเล็กถึงปานกลาง ($0.01 \leq \delta \leq 0.70$) ได้ดีถึงแม้ข้อมูลที่ใช้จะมีการแจกแจงที่ไม่ใช่การแจกแจงแบบปกติ ในงานวิจัยนี้ใช้การแจกแจงแบบแกมมา 3 พารามิเตอร์โดยที่จะมีการกำหนดค่าความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุมโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ 1 พารามิเตอร์ (พารามิเตอร์บ่งรูปร่างหรือพารามิเตอร์บ่งขนาด) และ 2 พารามิเตอร์ (พารามิเตอร์บ่งขนาดและพารามิเตอร์บ่งตำแหน่ง และ พารามิเตอร์บ่งรูปร่างและพารามิเตอร์บ่งตำแหน่ง) และจากการนำแผนภูมิควบคุมที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ขนาดเล็ก ($0.01 \leq \delta \leq 0.09$) ทั้งสี่แผนภูมิมาเปรียบเทียบกันพบว่าแผนภูมิควบคุม THWMA มีการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ขนาดเล็ก ($0.01 \leq \delta \leq 0.09$) ได้ดีที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแผนภูมินี้มีการปรับให้เรียบถึง 3 ครั้ง อีกทั้งการให้น้ำหนักกับข้อมูลในอดีตที่เท่ากันจะช่วยทำให้การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ขนาดเล็กเร็วยิ่งขึ้น และเมื่อขนาดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น แผนภูมิควบคุม THWMA จะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับแผนภูมิควบคุม DMEWMA1 และ DMEWMA2 อย่างไรก็ตามหากมีการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ($\delta \geq 1.50$) แผนภูมิควบคุม HEWMA จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

5. การประยุกต์กับข้อมูลจริง

การประยุกต์ข้อมูลอายุความล้มของลูกปืน (Lakshmi & Vaidyanathan, 2016) มีหน่วยเป็น ชั่วโมงโดยนำมาทดสอบด้วยสถิติแอนเดอร์สันพบว่า มีการแจกแจงแบบแกมมา 3 พารามิเตอร์ โดยมีค่าพารามิเตอร์บ่งรูปร่างเป็น 2.50 พารามิเตอร์บ่งขนาดเป็น 0.09 และพารามิเตอร์บ่งตำแหน่งเป็น 0.50 จะทำให้ได้ค่า L ของค่าสถิติแผนภูมิควบคุม HEWMA ($\lambda_{1H} = 0.05, \lambda_{2H} = 0.10$) เท่ากับ 5.25, THWMA ($\lambda = 0.50$) เท่ากับ 2.35, DMEWMA1 ($\lambda = 0.20$) เท่ากับ 2.71 และ DMEWMA2 ($\lambda = 0.20$) เท่ากับ 2.77 ซึ่งจะกำหนดให้เป็นค่าพารามิเตอร์เมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม ส่วนเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมจะกำหนดพารามิเตอร์บ่งรูปร่างเป็น 2.50 พารามิเตอร์บ่งขนาดเป็น 0.11 และพารามิเตอร์บ่งตำแหน่งเป็น 0.51

ตารางที่ 5 ค่าสถิติและขีดจำกัดควบคุมบนของแผนภูมิควบคุม HEWMA THWMA DMEWMA1 และDMEWMA2

i	X_i	HE_i $L = 5.25$	UCL (HE_i)	$DM_i(k = -\frac{\lambda}{4})$ $L = 2.71$ $UCL = 1.073$	$DM_i(k = -\frac{\lambda}{2})$ $L = 2.77$ $UCL = 1.072$	TH_i $L = 2.34$	UCL (TH_i)
1	0.449	1.007	1.007	1.049	1.047	1.244549763**	1.045
2	0.379	1.008	1.009	1.057	1.053	1.113	1.732
3	0.315	1.010	1.011	1.062	1.059	1.026	1.5031
4	0.613	1.015**	1.013	1.086**	1.073**	2.003	1.442
5	0.402	1.020	1.015	1.107	1.096	0.7024	1.389
6	0.2069	1.022	1.017	1.110	1.110	0.818	1.352
7	0.654	1.023	1.019	1.103	1.107	0.915	1.326
8	0.338	1.024	1.021	1.088	1.096	0.821	1.305
9	0.392	1.023	1.022	1.071	1.080	0.970	1.288
10	0.484	1.007	1.007	1.053	1.062	0.815	1.274

จากตารางที่ 5 สำหรับแผนภูมิ HEWMA THWMA และ DMEWMA ตามลำดับ ใช้ข้อมูลอายุความล้าของลูกปืน (X_i) คำนวณค่าตัวสถิติลำดับที่ i ของแผนภูมิควบคุม ด้วยสมการที่ (1), (3) และ(5) ตามลำดับ และนำค่าตัวสถิติที่ได้ และค่า L ของแต่ละแผนภูมิมาคำนวณหาค่า UCL ด้วยสมการที่ (2), (4) และ(6) ตามลำดับ นำค่าตัวสถิติที่ได้ของแต่ละแผนภูมิควบคุมมาเทียบกับค่า UCL ของแต่ละแผนภูมิควบคุม พบว่าค่าตัวสถิติแผนภูมิควบคุม HEWMA ออกนอกขีดจำกัดควบคุมครั้งแรกที่ $i=4$, แผนภูมิควบคุม DMEWMA1 ออกนอกขีดจำกัดควบคุมครั้งแรกที่ $i=4$, แผนภูมิควบคุม DMEWMA2 ออกนอกขีดจำกัดควบคุมครั้งแรกที่ $i=4$ และแผนภูมิควบคุม THWMA ออกนอกขีดจำกัดควบคุมครั้งแรกที่ $i=1$ ซึ่งจากการเปรียบเทียบพบว่าแผนภูมิควบคุมทั้ง 3 แผนภูมิให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

เอกสารอ้างอิง

- Abbas, N. (2018). Homogeneously weighted moving average control chart with an application in substrate manufacturing process. *Computers & Industrial Engineering*, 120, 460–470. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.05.009>.
- Abid, M., Shabbir, A., Nazir, H.Z., Sherwani, R.A.K., & Riaz, M. (2020). A double homogeneously weighted moving average control chart for monitoring of the process mean. *Quality and Reliability Engineering*, 36(178), 1513–1527. <https://doi.org/10.1002/qre.2641>.
- Alevizakos, V., Chatterjee, K. & Koukouvinos, C. (2021). Modified EWMA and DEWMA control charts for process monitoring. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 1–25, <https://doi.org/10.1080/03610926.2021.1872642>.
- Alkahtani, S.S. (2013). Robustness of DEWMA versus EWMA Control Charts to Non-Normal Processes. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 12(1), 148–163.
- Aksoy, H. (2000). Use of gamma distribution in hydrological analysis. *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, 24, 419–428.
- Bhaumik, D.K. & Gibbons, R.D. (2006). One-sided approximate prediction intervals for at least p of m observations from a gamma population at each of r locations. *Technometrics*, 48(1), 112–119. <https://doi.org/10.10198/004017005000000355>.
- Haq, A. (2013). A new hybrid exponentially weighted moving average control chart for monitoring process mean. *Quality and Reliability Engineering International*, 29(7), 1015–1025. <http://dx.doi.org/10.1002/qre.1453>.
- Haq, A. (2017). A new hybrid exponentially weighted moving average control chart for monitoring process mean: discussion. *Quality and Reliability Engineering International*, 33(7), 1629–1631. <https://doi.org/10.1002/qre.2092>.
- Khan, N., Aslam, M., Ahmad, L., & Jun, C.-H. (2017). A Control Chart for Gamma Distributed Variables Using Repetitive Sampling Scheme. *Pakistan Journal of Statistics and Operation Research*, 13(1), 47–61. <http://dx.doi.org/10.108187/pjsor.v13i1.1390>.
- Lakshmi, R.V. & Vaidyanathan, V.S. (2016). Three-Parameter Gamma Distribution: Estimation Using Likelihood, Spacings and Least Squares Approach. *Journal of Statistics and Management Systems*, 19(1), 37–53. <https://doi.org/10.1080/09720510.2014.986927>.
- Montgomery, D. C. (2012). *Introduction to statistical quality control* (7th ed.), New York, NY: Wiley.
- Nazir, H.Z., Riaz, M., Does, R.J.M.M. & Abbas, N. (2013). Robust CUSUM control charting. *Quality Engineering*, 25(3), 211–224. <https://doi.org/10.1080/08982112.2013.769057>.
- Page, E. S. (1954). Continuous inspection schemes. *Biometrika*, 41(1), 100–115.
- Riaz, M., Abbas, Z., Nazir, H.Z., & Abid, M. (2021). On the Development of Triple Homogeneously Weighted Moving Average Control Chart. *Symmetry*, 13(2), 1–21. <https://doi.org/10.3390/sym13020360>.
- Robert, S. W. (1959). Control Chart Test Based on Geometric Moving Averages. *Technometrics*, 1, 239–250.
- Saeed, N., & Kamal, S. (2016). The EWMA control chart based on robust scale estimators. *Pakistan Journal of Statistics and Operation Research*, 12(4), 659–672. <https://doi.org/10.108187/pjsor.v12i4.1475>.
- Shewhart, W.A.(1931). *Economic Control of Quality of Manufacturing Product*. New York, USA: Van Nostrand.

**การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการทดสอบอิงพารามิเตอร์และ
ไม่อิงพารามิเตอร์สำหรับทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของประชากร
มากกว่า 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกันเมื่อข้อมูลเป็นจำนวนนับ**
**Efficiency Comparison of Parametric and Non-Parametric Tests for Testing
the Difference Between Central Values of More Than Two Independent
Populations Using Counting Data**

สุภาวดี สุวิธรรมา¹, จุฬารัตน์ ชุมนวล^{2,3*}, ศิริพร สมุทรวชิรวงษ์⁴ และ สมพร เทพฉิม⁵

Suphawadee Suwithamma¹, Jularat Chumnuat^{2,3*}, Siriporn Samutwachirawong⁴ and Somporn Thepchim⁵

¹สาขาวิชาสถิติประยุกต์และวิทยาการข้อมูล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

²สาขาวิทยาศาสตร์การคำนวณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

³หน่วยวิจัยสถิติและการประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

⁴สาขาวิชาสถิติและการจัดการสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

⁵สาขาวิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

¹ Program of Applied Statistics and Data Science, Faculty of Science and Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University

² Division of Computational Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University

³ Statistics and Applications Research Unit, Faculty of Science, Prince of Songkla University

⁴ Section of Statistics and Information Management, Faculty of Science, Maejo University

⁵ Program of Applied Statistics, Faculty of Science, Ubon Ratchathani Rajabhat University

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการทดสอบอิงพารามิเตอร์และไม่อิงพารามิเตอร์ 5 วิธี ได้แก่ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) การทดสอบของเวลช์ (Welch's test) การทดสอบครัสคัล-วัลลิส (Kruskal-Wallis test) การทดสอบแวน เดอ แวร์เดน (Van der Waerden test) และการทดสอบมัธยฐาน (median test) สำหรับทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกันเมื่อข้อมูลเป็นจำนวนนับที่มีการแจกแจงทวินามและการแจกแจงปัวซอง โดยเกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการทดสอบ คือ ความสามารถในการควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 และกำลังการทดสอบ ผลการศึกษาพบว่า กรณีที่ข้อมูลมีการแจกแจงทวินาม การทดสอบทั้ง 5 วิธีสามารถควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้เกือบทุกสถานการณ์ ยกเว้นกรณีที่ขนาดตัวอย่างแต่ละกลุ่มเท่ากับ 10 และความแปรปรวนของข้อมูลแต่ละกลุ่มน้อยกว่า 4 และกรณีที่ขนาดตัวอย่างแต่ละกลุ่มเท่ากับ 15 และ (n, p) เท่ากับ $(10, 0.1)$ และ $(10, 0.7)$ สำหรับกรณีที่ข้อมูลมีการแจกแจงปัวซอง การทดสอบทั้ง 5 วิธีสามารถควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้เกือบทุกสถานการณ์ ยกเว้นการทดสอบของเวลช์ การทดสอบแวน เดอ แวร์เดน และการทดสอบมัธยฐาน ที่ไม่สามารถควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้ในกรณีที่ขนาดตัวอย่างแต่ละกลุ่มเท่ากับ 10 และ $\lambda = 30$ และเมื่อพิจารณาการกำลังการทดสอบพบว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวนให้กำลังการทดสอบสูงกว่าวิธีอื่น ๆ เกือบทุกสถานการณ์ ทั้งนี้ ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นแนวทางให้กับผู้วิเคราะห์ข้อมูลในการเลือกใช้สถิติทดสอบสำหรับการทดสอบสมมุติฐานความแตกต่างระหว่างค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกันในกรณีที่ข้อมูลเป็นจำนวนนับได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: การทดสอบครัสคัล-วัลลิส, การทดสอบแวน เดอ แวร์เดน, การทดสอบของเวลช์, กำลังการทดสอบ, ความผิดพลาดแบบที่ 1

ABSTRACT

This research aimed to compare the performance of the one-way analysis of variance (F test), Welch's test, Kruskal-Wallis test, Van der Waerden test, and Median test for testing the difference between central values of more than two independent populations using counting data with binomial and Poisson distributions. The criteria used to evaluate and compare the efficiency of the proposed tests are the ability to control the probability of type I error and power. The results showed that for the binomial distribution data, all

tests could control the probability of type I error for most situations, except when the sample size of each group was 10, and the variance of each group was less than 4, and when the sample size of each group was 15 and (n, p) were $(10, 0.1)$ and $(10, 0.7)$. For the Poisson distribution data, all tests could also control the probability of type I error in almost situations. However, except for the Welch's Test, the Van der Waerden Test, and the Median Test, the probability of type 1 error could not be controlled in cases when the sample size of each group was ten and $\lambda = 30$. When considering the power, it was found that the analysis of variance provided the highest power than other tests in almost situations. The results of this study will guide data analysts in choosing an appropriate statistic for testing the difference between central values of more than two independent populations when data is count data.

KEYWORDS: Kruskal–Wallis test, Van der Waerden test, Welch's test, power of a test, type I error

*Corresponding Author: pongsathorn.cho@nmu.ac.th

Received: 28/08/2022; Revised: 29/06/2023; Accepted: 14/07/2023

1. บทนำ

ในการทดสอบสมมติฐานทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่ม สถิติที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance หรือ ANOVA) (Moder, 2007) ซึ่งเป็นการทดสอบอิงพารามิเตอร์ (parametric test) โดยตัวสถิติทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนคือ ตัวสถิติทดสอบเอฟ (F test statistic) ซึ่งการทดสอบสมมติฐานด้วยสถิติดังกล่าวมีข้อตกลงเบื้องต้น คือ ประชากรแต่ละกลุ่มมีการแจกแจงปกติ (normal distribution) ความแปรปรวนของประชากรแต่ละกลุ่มไม่แตกต่างกัน (homoscedastic) และตัวอย่างแต่ละหน่วยเป็นอิสระกัน แต่ในทางปฏิบัติ ข้อมูลที่เก็บรวบรวมมาอาจไม่เป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้น กล่าวคือ ข้อมูลอาจไม่ได้มีการแจกแจงปกติเสมอไปโดยเฉพาะข้อมูลในงานวิจัยเชิงประยุกต์ (Urawong et al., 2022) เช่น จำนวนผู้ป่วยโควิดที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาล จำนวนผู้ใช้บริการของหน่วยงานราชการ จำนวนอุบัติเหตุรายวัน เป็นต้น การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนอาจส่งผลให้ข้อสรุปไม่ถูกต้อง หรือผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ไม่น่าเชื่อถือและไม่สามารถนำไปอ้างอิงหรือไปอธิบายสิ่งที่ต้องการศึกษาได้ โดย Scheffe (1959) ได้อธิบายไว้ว่า ถ้าลักษณะการแจกแจงของประชากรไม่เป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้นจะส่งผลให้การประมาณค่าหรือการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความแปรปรวนของประชากรเกิดความผิดพลาดได้ และจะส่งผลกระทบอย่างมากต่อการสรุปผลที่ได้จากการใช้ตัวสถิติทดสอบเอฟของการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยเฉพาะเมื่อขนาดตัวอย่างแต่ละกลุ่มไม่เท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Glass, Peckham & Sander (1972) ที่พบว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะมีความแข็งแกร่ง (robustness) เมื่ออยู่ภายใต้

เงื่อนไขที่ประชากรมีการแจกแจงปกติ ดังนั้น เมื่อข้อมูลไม่เป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้น การทดสอบไม่อิงพารามิเตอร์ (non-parametric test) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้แทนการทดสอบอิงพารามิเตอร์

ในอดีตที่ผ่านมา มีงานวิจัยหลายงานที่ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของการทดสอบแบบอิงพารามิเตอร์และไม่อิงพารามิเตอร์สำหรับทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกันในกรณีที่ข้อมูลไม่มีการแจกแจงปกติ ยกตัวอย่างเช่น Hecke (2012) ได้ศึกษากำลังการทดสอบของการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบครัสคัล-วัลลิส ผลการศึกษาพบว่า เมื่อประชากรมีการแจกแจงที่ไม่สมมาตร การทดสอบครัสคัล-วัลลิสจะให้กำลังการทดสอบที่สูงกว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวน ต่อมา Bowarnkitiwong & Areekul (2017) ได้ศึกษาความแข็งแกร่งของสถิติทดสอบเอฟเมื่อความแปรปรวนของประชากรไม่เท่ากันและพบว่าสถิติทดสอบเอฟมีความแข็งแกร่งทั้งในกรณีที่ตัวอย่างมีขนาดเท่ากันและไม่เท่ากัน ในขณะที่ Khomduean & Araveeporn (2017) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของสถิติทดสอบที่ใช้ทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากร 3 กลุ่มกรณีที่มีความแปรปรวนของประชากรทั้ง 3 กลุ่มเท่ากันและไม่เท่ากัน ผลการศึกษาพบว่า ในกรณีที่ประชากรทั้ง 3 กลุ่มมีการแจกแจงปกติและมีความแปรปรวนเท่ากัน สถิติทดสอบเอฟของการวิเคราะห์ความแปรปรวน สถิติทดสอบของ Brown–Forsythe และสถิติทดสอบของ Brown–Forsythe ที่ปรับแล้ว สามารถควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้และให้กำลังการทดสอบสูงในเกือบทุกสถานการณ์ และในกรณีที่ประชากรทั้ง 3 กลุ่มมีการแจกแจงปกติแต่มีความแปรปรวนแตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า สถิติทดสอบของเวลช์และสถิติทดสอบของ Marascuilo สามารถควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้ และมีกำลังการ

ทดสอบสูงที่สุดในทุกกรณี ส่วน Lüpsen (2017) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของสถิติไม่อิงพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนและพบว่า การทดสอบแวน เดอ แวร์เดน มีประสิทธิภาพดีที่สุดเกือบทุกกรณี ส่วนการทดสอบของ Puri & Sen และการทดสอบของ Akritas & Brunners ATS ให้กำลังการทดสอบที่ค่อนข้างต่ำและไม่สามารถควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้ในหลายๆ สถานการณ์เช่นเดียวกับการทดสอบอื่นๆ โดยเฉพาะในกรณีที่ประชากรมีการแจกแจงล็อกนอร์มัล (log-normal distribution) อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าจะมีงานวิจัยหลาย ๆ งานที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของการทดสอบแบบอิงพารามิเตอร์และไม่อิงพารามิเตอร์สำหรับทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกันในการที่ข้อมูลไม่มีการแจกแจงปกติ แต่งานวิจัยส่วนใหญ่ทำการศึกษาเฉพาะกรณีข้อมูลเชิงปริมาณแบบต่อเนื่องเท่านั้น สำหรับกรณีข้อมูลเชิงปริมาณไม่ต่อเนื่องยังมีการศึกษาค่อนข้างน้อย ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Sangthong (2018) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของสถิติอิงพารามิเตอร์และสถิติไม่อิงพารามิเตอร์ในการทดสอบค่ากลางระหว่างประชากรหลายกลุ่มเมื่อข้อมูลเป็นแบบลิเคิร์ท 5 ระดับ ผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการทดสอบที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในเกือบทุกสถานการณ์ ยกเว้นกรณีที่ประชากรมีการแจกแจงเบ้เชิงบวกและความโค้งสูงกว่าปกติ การทดสอบครัสคัล-วัลลิส เป็นการทดสอบที่มีประสิทธิภาพสูงสุดกรณีที่ประชากรมีความแปรปรวนเท่ากันและตัวอย่างมีขนาดกลาง และการทดสอบแวน เดอ แวร์เดน เป็นการทดสอบที่มีประสิทธิภาพสูงสุดกรณีที่ประชากรมีความแปรปรวนไม่เท่ากันและตัวอย่างมีขนาดกลางและขนาดใหญ่ ส่วนกรณีที่ประชากรมีการแจกแจงเบ้เชิงลบและมีความโค้งสูงกว่าปกติ ผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวน การทดสอบครัสคัล-วัลลิส การทดสอบแวน เดอ แวร์เดน และการทดสอบมัธยฐานไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงต้องการศึกษาประสิทธิภาพของการทดสอบอิงพารามิเตอร์และไม่อิงพารามิเตอร์ 5 วิธี ได้แก่ การวิเคราะห์ความแปรปรวน การทดสอบของเวลช์ การทดสอบครัสคัล-วัลลิส การทดสอบแวน เดอ แวร์เดน และการทดสอบมัธยฐาน สำหรับทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกัน ในกรณีที่ข้อมูลเป็นข้อมูลเชิงปริมาณไม่ต่อเนื่อง โดยการแจกแจงที่ศึกษาคือ การแจกแจงทวินาม (Binomial distribution) และ การแจกแจงปัวซอง (Poisson

distribution) ซึ่งการแจกแจงทั้งสองการแจกแจงเป็นการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มแบบไม่ต่อเนื่องที่สำคัญที่มีค่าของตัวแปรสุ่มเป็นจำนวนนับและเป็นการแจกแจงที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยเชิงประยุกต์ ทั้งนี้ ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นแนวทางให้กับผู้วิเคราะห์ข้อมูลในการเลือกใช้สถิติทดสอบสำหรับการทดสอบสมมติฐานความแตกต่างระหว่างค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกันในการที่ข้อมูลเป็นจำนวนนับได้อย่างเหมาะสม สำหรับเนื้อหาในบทความมีการจัดเรียงตามลำดับดังนี้ ส่วนที่ 2 นำเสนอแนวคิดและรายละเอียดวิธีการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกัน 5 วิธี ส่วนที่ 3 นำเสนอวิธีการวิจัย ซึ่งประกอบด้วยขอบเขตการวิจัย (จำนวนประชากร ขนาดตัวอย่าง การแจกแจงที่ศึกษา การกำหนดค่าพารามิเตอร์ และเกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการทดสอบ) และขั้นตอนการดำเนินการวิจัย และส่วนที่ 4 และ 5 นำเสนอผลการวิจัยและสรุปและวิจารณ์ผลการวิจัยตามลำดับ

2. การทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกัน

2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) เป็นสถิติที่ใช้ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกัน โดยมีข้อสมมติเบื้องต้นที่สำคัญ คือ ข้อมูลแต่ละกลุ่มที่นำมาวิเคราะห์ต้องมาจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติและมีความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน หลักการสำคัญในการวิเคราะห์ความแปรปรวนคือ การแบ่งความแปรปรวนของข้อมูลทั้งหมดออกตามสาเหตุที่ทำให้ข้อมูลแตกต่างกัน โดยที่ ความแปรปรวนรวม = ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม + ความแปรปรวนภายในกลุ่ม และการคำนวณค่าสถิติทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถทำได้ดังนี้

2.1.1 คำนวณผลบวกกำลังสอง (sum of squares)

คำนวณผลบวกกำลังสอง หรือเรียกย่อ ๆ ว่า SS แยกตามแหล่งความแปรปรวน (source of variation) ดังนี้

คำนวณผลบวกกำลังสองของค่าสังเกตทั้งหมด (total sum of squares) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า SST โดยที่

$$SST = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$$

$$F = \frac{MSTr}{MSE} \quad (7)$$

$$= \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} y_{ij}^2 - \frac{\left(\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} y_{ij} \right)^2}{n} \quad (1)$$

$$= \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{n}$$

และองศาเสรี (degree of freedom) ของค่าสังเกตทั้งหมด เท่ากับ

คำนวณผลบวกกำลังสองระหว่างทรีตเมนต์ (between treatment sum of squares) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า SSTr โดยที่

$$SSTr = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..})^2 = \sum_{j=1}^k \left(\frac{y_{.j}^2}{n_j} \right) - \frac{y_{..}^2}{n} \quad (2)$$

และองศาเสรีของทรีตเมนต์เท่ากับ $k-1$

คำนวณผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (error sum of squares) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า SSE โดยที่

$$SSE = \sum_{j=1}^k \left[\sum_{i=1}^{n_j} y_{ij}^2 - \frac{y_{.j}^2}{n_j} \right] \quad (3)$$

หรือ

$$SSE = SST - SSTr \quad (4)$$

และองศาเสรีของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ

2.1.2 คำนวณกำลังสองเฉลี่ย (mean square) คำนวณกำลังสองเฉลี่ยหรือเรียกย่อ ๆ ว่า MS ดังนี้

คำนวณทรีตเมนต์กำลังสองเฉลี่ย (mean square treatment) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า MSTr โดยที่

$$MSTr = \frac{SSTr}{k-1} \quad (5)$$

คำนวณค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (mean square error) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า MSE โดยที่

$$MSE = \frac{SSE}{n-k} \quad (6)$$

2.1.3 คำนวณค่าสถิติทดสอบ

สำหรับสถิติทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว คือ สถิติทดสอบที่มีการแจกแจงเอฟ (F distribution) องศาเสรี และ โดยค่าสถิติทดสอบคำนวณได้จาก

การสรุปผล เราจะปฏิเสธสมมุติฐานว่าง (H_0) เมื่อ $F \geq f_{\alpha, [(k-1), (n-k)]}$ โดย $f_{\alpha, [(k-1), (n-k)]}$ คือ ค่าวิกฤติที่ได้จากตารางการแจกแจงเอฟ (Sinsomboonthong, 2017)

2.2 การทดสอบของเวลช์ (Welch's test)

Welch (1951) ได้พัฒนาการทดสอบวิธีนี้ขึ้นมาจากการปรับปรุงการทดสอบของ Cochran เดิมโดยถ่วงน้ำหนักค่าสถิติทดสอบสำหรับทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของประชากร k กลุ่ม โดยแนวคิดในการถ่วงน้ำหนักดังกล่าวก็เพื่อลดอิทธิพลของความต่างทั้งในรูปแบบการแจกแจงความแปรปรวน หรือพารามิเตอร์ต่าง ๆ (heterogeneity) สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้น ภาวะความต่างจะเกิดขึ้นเมื่อความแปรปรวนของประชากรแต่ละกลุ่มแตกต่างกัน โดยค่าสถิติทดสอบของเวลช์สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F_w = \frac{\sum_{j=1}^k \left[\frac{W_j (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{w..})^2}{(k-1)} \right]}{1 + \frac{2(k-2)}{(k^2-1)} \sum_{j=1}^k \left[\frac{\left(\frac{1-W_j}{u} \right)}{(n_j-1)} \right]} \quad (8)$$

เมื่อ $W_i = \frac{n_i}{S_i^2}$, $\bar{y}_{w..} = \sum_{j=1}^k \left(\frac{W_j \bar{y}_{.j}}{u} \right)$, และ $u = \sum_{j=1}^k W_j$

โดยที่

F_w คือ สถิติทดสอบของเวลช์ที่มีการแจกแจงเอฟ (F distribution) มีองศาเสรี $k-1$ และ ν โดยที่

$$\nu = \left[\frac{3}{k^2-1} \sum_{j=1}^k \left(\frac{(1-(W_i/u))^2}{(n_j-1)} \right) \right]^{-1} \quad (9)$$

$\bar{y}_{.j}$ คือ ค่าเฉลี่ยตัวอย่างกลุ่มที่ j

n_j คือ ขนาดตัวอย่างกลุ่มที่ j

S_i^2 คือ ความแปรปรวนตัวอย่างกลุ่มที่ j

การสรุปผล เราจะปฏิเสธสมมุติฐานว่าง (H_0) เมื่อ $F_w \geq f_{\alpha, [(k-1), \nu]}$ โดย $f_{\alpha, [(k-1), \nu]}$ คือ ค่าวิกฤติที่ได้จากตารางการแจกแจงเอฟ

2.3 การทดสอบครัสคัล-วัลลิส (Kruskal-Wallis test)

การทดสอบครัสคัล-วัลลิสเป็นการทดสอบไม่อิงพารามิเตอร์ ถูกพัฒนาขึ้นโดย Kruskal และ Wallis ในปี ค.ศ. 1952 (Kruskal & Wallis, 1952) โดยมีแนวคิดใน

การใช้ลำดับที่ของข้อมูลมาคำนวณค่าสถิติทดสอบแทนข้อมูลเดิมเพื่อลดอิทธิพลของการแจกแจงไม่ปกติของข้อมูล (McDonald, 2014)

สำหรับสถิติทดสอบครัสคัล-วัลลิสมีการแจกแจงไคกำลังสอง (Chi-squared distribution) โดยประมาณและสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$H = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{j=1}^k \left(\frac{(\sum_{j=1}^k R_j)^2}{n_j} \right) - 3(n+1) \quad (10)$$

เมื่อ

H คือ สถิติทดสอบครัสคัล-วัลลิส

R_j คือ อันดับของค่าสังเกตของกลุ่มที่ j

k คือ จำนวนกลุ่ม

n คือ ขนาดตัวอย่างทั้งหมด

การสรุปผล เราจะปฏิเสธสมมุติฐานว่าง (H_0) เมื่อ $H \geq \chi^2_{\alpha, k-1}$ โดย $\chi^2_{\alpha, k-1}$ ค่าวิกฤติที่ได้จากตารางการแจกแจงไคกำลังสอง (Sinsomboonthong, 2020; Sheskin, 2000)

2.4 การทดสอบแวน เดอ แวร์เดน (Van der Waerden test)

การทดสอบแวน เดอ แวร์เดน หรือการทดสอบแวน เดอ แวร์เดน นอร์มอล สกอร์ (Van der Waerden normal-scores test) เป็นการทดสอบไม่อิงพารามิเตอร์ เช่นเดียวกับการทดสอบครัสคัล-วัลลิส ถูกพัฒนาขึ้นโดยแวน เดอ แวร์เดน ในปี ค.ศ. 1953 (Van der Waerden, 1952; Van der Waerden, 1953) โดยมีแนวคิดในการใช้ค่าลำดับที่จากวิธีของครัสคัล-วัลลิสมาแปลงเป็นควอนไทล์ของการแจกแจงปกติมาตรฐาน (standard normal distribution) เรียกว่า inverse-normal scores ($Z(i)$) จากนั้นนำมาใช้ในการคำนวณค่าสถิติทดสอบแทนค่าสังเกตเดิม โดยข้อดีของการทดสอบแวน เดอ แวร์เดน คือ ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการทดสอบเอฟของการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อข้อมูลมีการแจกแจงปกติและให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการทดสอบครัสคัล-วัลลิสเมื่อข้อมูลไม่มีการแจกแจงปกติ สำหรับสถิติทดสอบของแวน เดอ แวร์เดนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V - W = \frac{\sum_{j=1}^k n_j (\bar{Z}_j)^2}{\tilde{S}^2} \quad (11)$$

เมื่อ

$V - W$ คือ สถิติทดสอบแวน เดอ แวร์เดนที่มีการแจกแจงไคกำลังสองโดยประมาณ

$\bar{Z}_j$ คือ คะแนนมาตรฐานเฉลี่ยของกลุ่มที่ j

$\tilde{S}^2$ คือ ความแปรปรวนตัวอย่าง

การสรุปผล เราจะปฏิเสธสมมุติฐานว่าง (H_0) เมื่อ $V - W \geq \chi^2_{\alpha, k-1}$ โดย $\chi^2_{\alpha, k-1}$ ค่าวิกฤติที่ได้จากตารางการแจกแจงไคกำลังสอง (Sangthong, 2018; Sheskin, 2000)

2.5 การทดสอบมัธยฐาน (Median test)

การทดสอบมัธยฐานเป็นการทดสอบไม่อิงพารามิเตอร์ที่ใช้ทดสอบค่ากลางของประชากรตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป โดยใช้จำนวนค่าสังเกตที่มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่ามัธยฐานของตัวอย่างทั้งหมดเป็นตัวสถิติทดสอบและสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$M = \frac{n^2}{ab} \sum_{j=1}^k \frac{\left(O_{1j} - \frac{n_j a}{n} \right)^2}{n_j} \quad (12)$$

เมื่อ

M คือ สถิติทดสอบมัธยฐาน มีการแจกแจงไคกำลังสองโดยประมาณ

a คือ ผลรวมของจำนวนค่าสังเกตที่มีค่ามากกว่ามัธยฐานร่วม

b คือ ผลรวมของจำนวนค่าสังเกตที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับมัธยฐานร่วม

O_{1j} คือ จำนวนค่าสังเกตที่มีค่ามากกว่ามัธยฐานร่วมของกลุ่มที่ j

การสรุปผล เราจะปฏิเสธสมมุติฐานว่าง (H_0) เมื่อ $M \geq \chi^2_{\alpha, k-1}$ โดย $\chi^2_{\alpha, k-1}$ ค่าวิกฤติที่ได้จากตารางการแจกแจงไคกำลังสอง (Sangthong, 2018)

3. วิธีการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ใช้การจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo simulation) (Harrison, 2010) ในการจำลองข้อมูลเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของการทดสอบอิงพารามิเตอร์และไม่อิงพารามิเตอร์สำหรับทดสอบค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกันเมื่อข้อมูลเป็นจำนวนนับ โดยผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตและขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 ขอบเขตการวิจัย

1. กำหนดจำนวนประชากรที่ทำการศึกษา คือ 3 กลุ่ม

2. ขนาดตัวอย่างที่ศึกษา ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะกรณีขนาดตัวอย่างแต่ละกลุ่มเท่ากัน คือ

$$(n_1, n_2, n_3) = (10, 10, 10), (15, 15, 15), (20, 20, 20), (25, 25, 25), (30, 30, 30)$$

3. การแจกแจงที่ศึกษา คือ การแจกแจงทวินาม (Binomial distribution) และการแจกแจงปัวซอง (Poisson distribution) กำหนดพารามิเตอร์ของการแจกแจงทั้ง 2 การแจกแจงให้ครอบคลุมทั้งกรณีการแจกแจงเบ้และการแจกแจงสมมาตร (ดังรูปที่ 1-2) โดยมีรายละเอียดดังนี้

ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 (Probability of type I error)

สำหรับการแจกแจงทวินาม กำหนดพารามิเตอร์ของข้อมูลทั้ง 3 กลุ่ม ดังนี้

$$[(n, p_1), (n, p_2), (n, p_3)] = [(10, 0.1), (10, 0.1), (10, 0.1)], [(10, 0.5), (10, 0.5), (10, 0.5)], [(10, 0.7), (10, 0.7), (10, 0.7)], [(30, 0.1), (30, 0.1), (30, 0.1)], [(30, 0.5), (30, 0.5), (30, 0.5)], [(30, 0.7), (30, 0.7), (30, 0.7)], [(50, 0.1), (50, 0.1), (50, 0.1)], [(50, 0.5), (50, 0.5), (50, 0.5)], [(50, 0.7), (50, 0.7), (50, 0.7)]$$

สำหรับการแจกแจงปัวซอง กำหนดพารามิเตอร์ของข้อมูลทั้ง 3 กลุ่ม ดังนี้

$$[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3] = [5, 5, 5], [10, 10, 10], [15, 15, 15], [20, 20, 20], [25, 25, 25], [30, 30, 30]$$

กำลังการทดสอบ (Power of a test)

สำหรับการแจกแจงทวินาม กำหนดพารามิเตอร์ของข้อมูลทั้ง 3 กลุ่ม ดังนี้

$$[(n, p_1), (n, p_2), (n, p_3)] = [(10, 0.1), (10, 0.125), (10, 0.1)], [(10, 0.1), (10, 0.125), (10, 0.15)], [(10, 0.5), (10, 0.525), (10, 0.5)], [(10, 0.7), (10, 0.8), (10, 0.7)], [(30, 0.1), (30, 0.125), (30, 0.1)], [(30, 0.1), (30, 0.125), (30, 0.15)], [(30, 0.5), (30, 0.525), (30, 0.5)], [(30, 0.7), (30, 0.8), (30, 0.7)], [(50, 0.1), (50, 0.125), (50, 0.1)], [(50, 0.1), (50, 0.125), (50, 0.15)], [(50, 0.5), (50, 0.525), (50, 0.5)], [(50, 0.7), (50, 0.8), (50, 0.7)]$$

สำหรับการแจกแจงปัวซอง กำหนดพารามิเตอร์ของข้อมูลทั้ง 3 กลุ่ม ดังนี้

$$[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3] = [5, 6, 5], [5, 6, 7], [5, 6, 8], [20, 22, 20], [20, 22, 24], [20, 22, 26], [30, 35, 30], [30, 35, 40], [30, 35, 45]$$

4. กำหนดระดับนัยสำคัญในการศึกษา $\alpha = 0.05$

5. ประสิทธิภาพของการทดสอบพิจารณาจากความสามารถในการควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 (type I error) และกำลังการทดสอบ (power of a test)

6. ทำการทดลองซ้ำ 10,000 ครั้งในแต่ละสถานการณ์ที่กำหนด

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2.1 การศึกษาความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1

การจำลองข้อมูลเพื่อศึกษาความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 แสดงดังรูปภาพ 3 โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดสมมติฐานการทดสอบสำหรับทดสอบค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่ม

H_0 : ประชากรทั้ง 3 กลุ่มมีค่ากลาง (ค่าเฉลี่ย/มัธยฐาน) ไม่แตกต่างกัน

H_1 : มีประชากรอย่างน้อย 1 กลุ่มที่มีค่ากลาง (ค่าเฉลี่ย/มัธยฐาน) แตกต่างจากกลุ่มอื่น

2. สร้างข้อมูลตามสถานการณ์ต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ในขอบเขตการวิจัยภายใต้สมมติฐานว่าง (null hypothesis, H_0)

3. คำนวณค่าสถิติทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน การทดสอบของเวลช์ การทดสอบครัสคัล-วาลิส การทดสอบแวน เดอ แวร์เดน และการทดสอบมัธยฐาน

4. เปรียบเทียบค่าสถิติทดสอบที่ได้ในข้อ 2 กับค่าวิกฤต (critical values) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ จากนั้นทำการสรุปผลการทดสอบตามสมมติฐานที่กำหนดไว้ในข้อ 1 ว่าปฏิเสธหรือยอมรับสมมติฐานว่าง (H_0)

5. ดำเนินการตามข้อ 1-3 ซ้ำ จำนวน 10,000 ครั้งในแต่ละสถานการณ์

6. นับจำนวนครั้งในการปฏิเสธสมมติฐานว่าง

7. คำนวณค่าประมาณความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 (empirical type 1 error, $\hat{\alpha}$) โดยที่

$$\hat{\alpha} = \frac{\text{จำนวนครั้งในการปฏิเสธ } H_0 \text{ เมื่อ } H_0 \text{ เป็นจริง}}{\text{จำนวนครั้งในการทำซ้ำ}}$$

8. เปรียบเทียบค่าประมาณความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ของการทดสอบทั้ง 5 วิธีกับเกณฑ์ของ Cochran (Cochran, 1947) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ถ้า

ค่าประมาณความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ตกอยู่ในช่วง $[0.04, 0.06]$ จะสรุปว่า การทดสอบนั้นสามารถควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้ และเป็นสถิติทดสอบที่มีสมบัติความแข็งแกร่ง (robustness)

3.2.2 การศึกษากำลังการทดสอบ

การจำลองข้อมูลเพื่อศึกษากำลังการทดสอบแสดงดังรูปภาพ 4 โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดสมมติฐานการทดสอบสำหรับทดสอบค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่ม (เช่นเดียวกับการศึกษาความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1)
2. สร้างข้อมูลตามสถานการณ์ต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ในขอบเขตการวิจัยภายใต้สมมติฐานทางเลือก (alternative hypothesis, H_1)
3. คำนวณค่าสถิติทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน การทดสอบของเวลช์ การทดสอบครัสคัล-วัลลิส การทดสอบแวน เดอ แวร์เดน และการทดสอบมัธยฐาน
4. เปรียบเทียบค่าสถิติทดสอบที่ได้ในข้อ 2 กับค่าวิกฤต (critical value) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ จากนั้นทำการสรุปผลการทดสอบตามสมมติฐานที่กำหนดไว้ในข้อ 1 ว่าปฏิเสธหรือยอมรับสมมติฐานว่าง (H_0)
5. ดำเนินการตามข้อ 1-3 ซ้ำ จำนวน 10,000 ครั้งในแต่ละสถานการณ์
6. นับจำนวนครั้งในการปฏิเสธสมมติฐานว่าง
7. คำนวณค่าประมาณกำลังการทดสอบ (empirical power, $1 - \hat{\beta}$) ของการทดสอบทั้ง 5 วิธี โดยที่

$$1 - \hat{\beta} = \frac{\text{จำนวนครั้งในการปฏิเสธ } H_0 \text{ เมื่อ } H_1 \text{ เป็นจริง}}{\text{จำนวนครั้งในการทำซ้ำ}}$$

8. เปรียบเทียบกำลังการทดสอบของการทดสอบทั้ง 5 วิธี ถ้าวิธีใดสามารถควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้ และให้กำลังการทดสอบที่มากกว่าจะสรุปว่า การทดสอบนั้นมีประสิทธิภาพมากกว่า

4. ผลการวิจัย

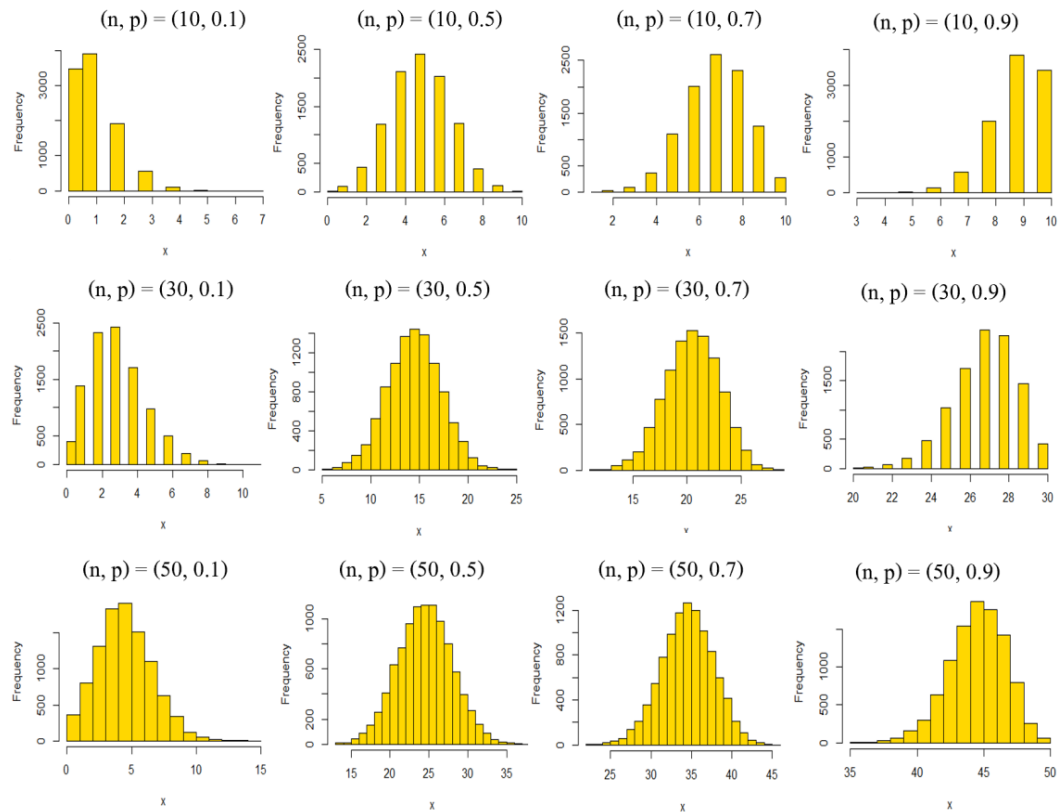
ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ความแปรปรวน การทดสอบของเวลช์ การทดสอบครัสคัล-วัลลิส การทดสอบแวน เดอ แวร์เดน และการทดสอบมัธยฐานสำหรับทดสอบค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกันเมื่อข้อมูลเป็นจำนวนนับ แสดงดังตารางที่ 1-4 โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการศึกษาความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1

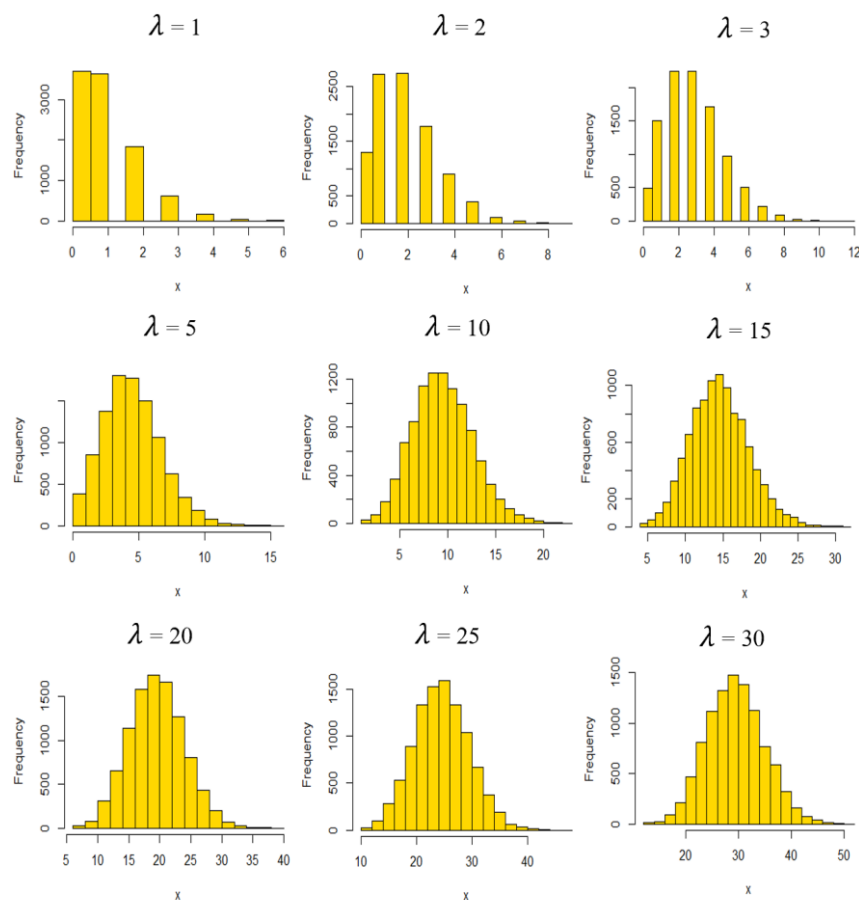
กรณีที่ข้อมูลมีการแจกแจงทวินาม การทดสอบทั้ง 5 วิธีสามารถควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้เกือบทุกสถานการณ์ ยกเว้นกรณีที่ขนาดตัวอย่างแต่ละกลุ่มเท่ากับ 10 และความแปรปรวน ($np(1-p)$) ของข้อมูลแต่ละกลุ่มน้อยกว่า 4 และกรณีที่ขนาดตัวอย่างแต่ละกลุ่มเท่ากับ 15 และ (n, p) เท่ากับ $(10, 0.1)$ และ $(10, 0.7)$ นอกจากนี้ ในกรณีที่ขนาดตัวอย่างแต่ละกลุ่มเท่ากับ 10 และความแปรปรวนของข้อมูลแต่ละกลุ่มมากกว่า 10 การทดสอบมัธยฐานเป็นเพียงการทดสอบเดียวที่ไม่สามารถควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้อย่างไรก็ตาม เมื่อขนาดตัวอย่างแต่ละกลุ่มเพิ่มขึ้น การทดสอบทั้ง 5 วิธีจะสามารถควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้ดีขึ้นโดยจะเห็นได้จากค่าประมาณความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ที่ใกล้เคียงกับระดับนัยสำคัญที่กำหนด 0.05 (ตารางที่ 1) สำหรับกรณีที่ข้อมูลมีการแจกแจงปัวซอง การทดสอบทั้ง 5 วิธีสามารถควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้เกือบทุกสถานการณ์ ยกเว้นการทดสอบของเวลช์ การทดสอบแวน เดอ แวร์เดน และการทดสอบมัธยฐานที่ไม่สามารถควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้ในกรณีที่ขนาดตัวอย่างแต่ละกลุ่มเท่ากับ 10 และ $\lambda = 30$ (ตารางที่ 2) ทั้งนี้ สาเหตุที่สถิติทดสอบไม่สามารถควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้อาจเนื่องมาจากตัวอย่ที่มีขนาดเล็ก ทำให้การแจกแจงของตัวสถิติทดสอบไม่เป็นไปตามทฤษฎี

4.2 ผลการศึกษากำลังการทดสอบ

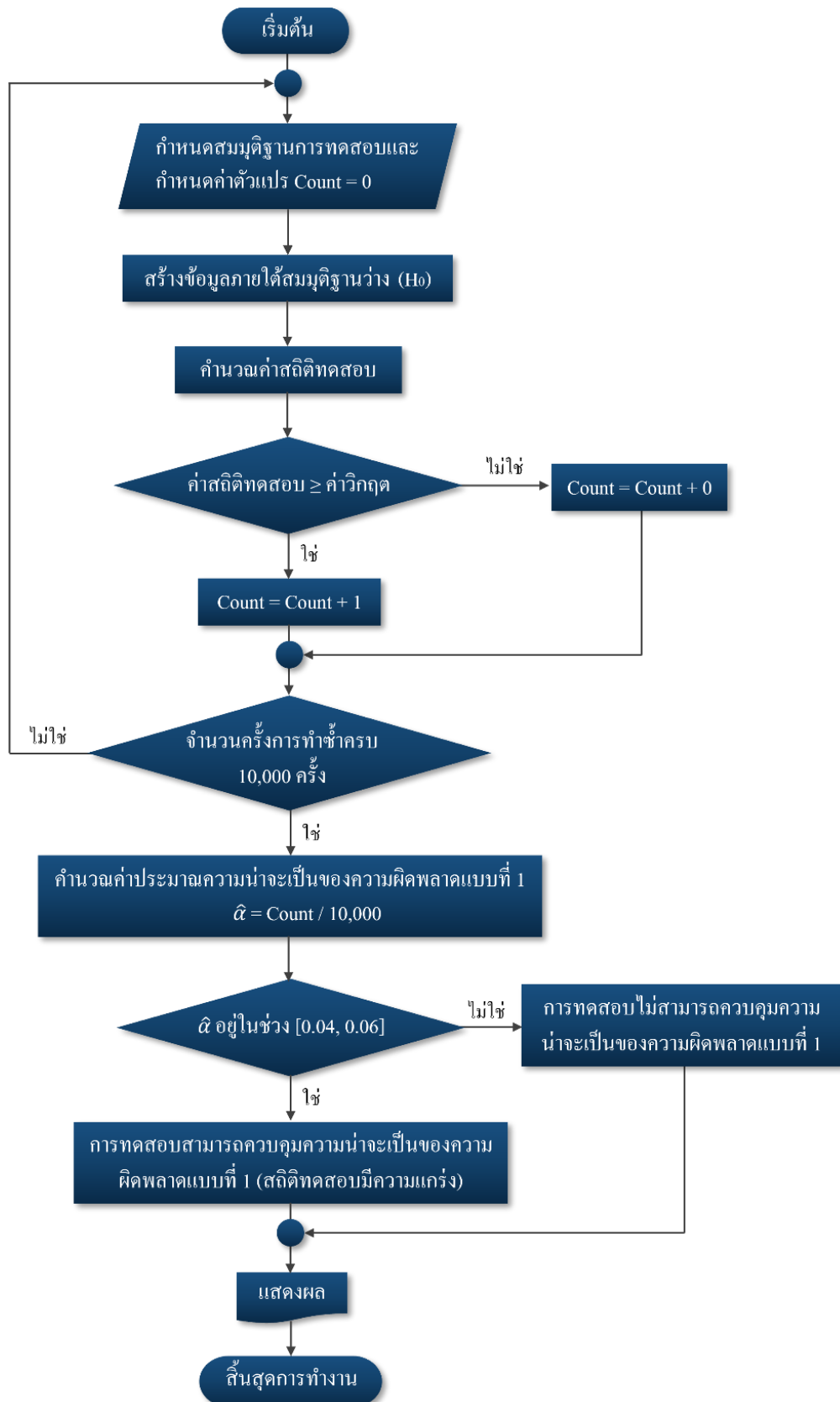
จากตารางที่ 3 และตารางที่ 4 พบว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวนให้กำลังการทดสอบสูงกว่าการทดสอบของเวลช์ การทดสอบครัสคัล-วัลลิส การทดสอบแวน เดอ แวร์เดน และการทดสอบมัธยฐานเกือบทุกกรณีที่ศึกษา และมีบางกรณีที่การทดสอบของเวลช์ให้กำลังการทดสอบสูงกว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนเล็กน้อย ทั้งนี้ สาเหตุอาจเนื่องมาจากข้อมูลที่ทำการศึกษาในหลายๆ สถานการณ์ยังมีการแจกแจงที่ค่อนข้างสมมาตร (ดังรูปที่ 1-2) หรือมีความเบ้ไม่มากนัก ส่งผลให้การแจกแจงของตัวสถิติทดสอบของการวิเคราะห์ความแปรปรวนยังสามารถประมาณได้ด้วยการแจกแจงเอพ เมื่อพิจารณาเฉพาะการทดสอบไม่อิงพารามิเตอร์สำหรับทดสอบค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกันเมื่อข้อมูลเป็นจำนวนนับ พบว่า การทดสอบครัสคัล-วัลลิส และการทดสอบแวน เดอ แวร์เดน มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า



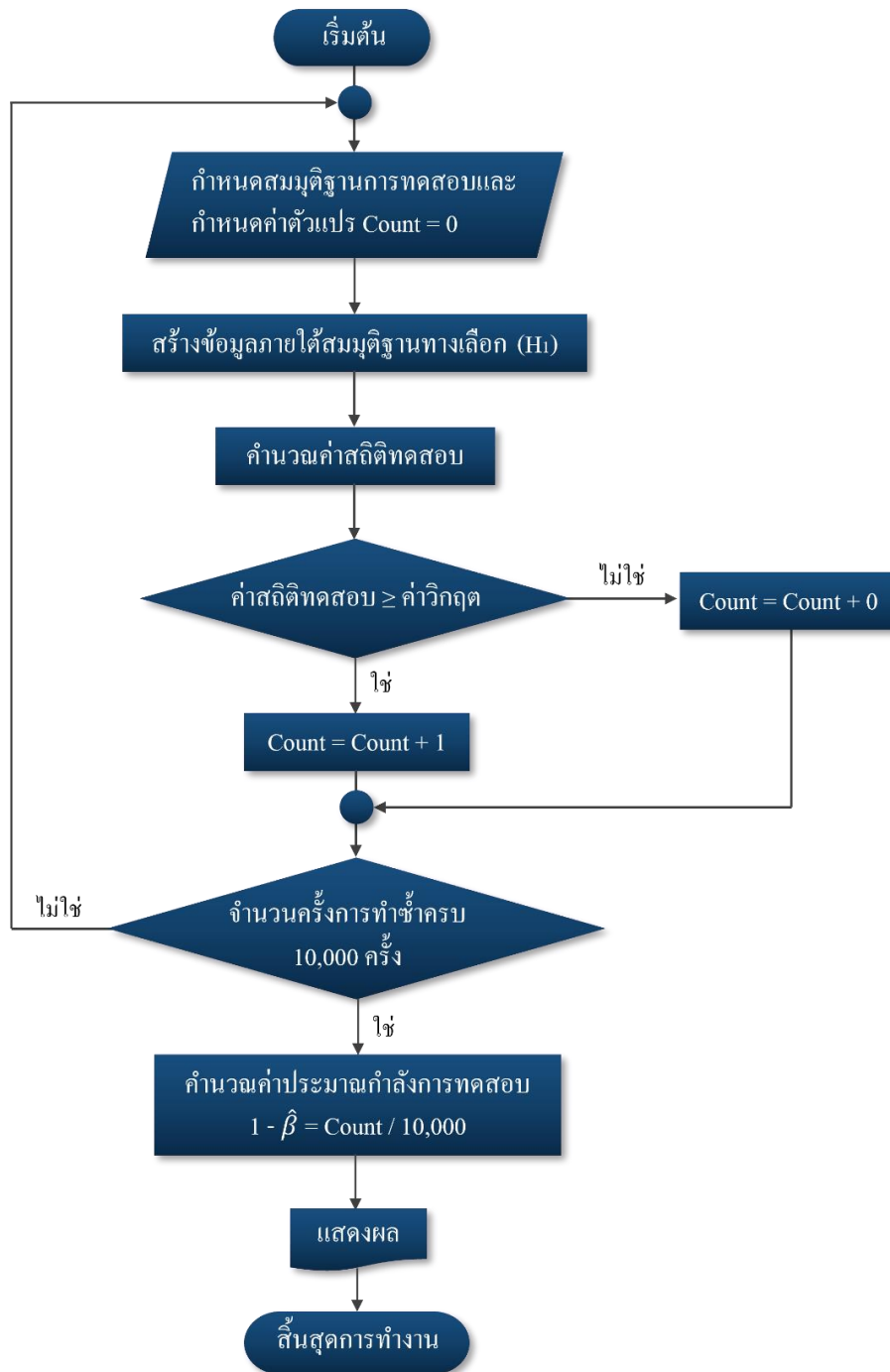
รูปที่ 1 ฮิสโทแกรมแสดงลักษณะข้อมูลที่มีการแจกแจงทวินามภายใต้พารามิเตอร์ค่าต่าง ๆ



รูปที่ 2 ฮิสโทแกรมแสดงลักษณะข้อมูลที่มีการแจกแจงปัวซองภายใต้พารามิเตอร์ค่าต่าง ๆ



รูปที่ 3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาค่าประมาณความน่าจะเป็นของผิดพลาดแบบที่ 1



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาค่าประมาณค่าสังเกตการทดสอบ

ตารางที่ 2 ค่าประมาณความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 สำหรับทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มที่มีการแจกแจงวิซง

พารามิเตอร์			การทดสอบ (Test)	ขนาดตัวอย่าง (n_1, n_2, n_3)				
λ_1	λ_2	λ_3		(10, 10, 10)	(15, 15, 15)	(20, 20, 20)	(25, 25, 25)	(30, 30, 30)
5	5	5	F (ANOVA)	0.0533	0.0483	0.0548	0.0470	0.0495
			Welch	0.0533	0.0498	0.0560	0.0466	0.0479
			Kruskal-Wallis	0.0498	0.0476	0.0525	0.0474	0.0496
			Van der Waerden	0.0478	0.0468	0.0523	0.0454	0.0469
			Median	0.0430	0.0491	0.051	0.0472	0.0483
10	10	10	F (ANOVA)	0.0490	0.0475	0.0470	0.0508	0.0484
			Welch	0.0467	0.0468	0.0466	0.0516	0.0493
			Kruskal-Wallis	0.0435	0.0434	0.0485	0.0492	0.0494
			Van der Waerden	0.0424	0.0458	0.0457	0.0477	0.0492
			Median	0.0405	0.0475	0.0511	0.0541	0.0496
15	15	15	F (ANOVA)	0.0538	0.0514	0.0524	0.0528	0.0487
			Welch	0.0542	0.0502	0.0542	0.0516	0.0480
			Kruskal-Wallis	0.0498	0.0484	0.0509	0.0501	0.0457
			Van der Waerden	0.0495	0.0471	0.0490	0.0488	0.0451
			Median	0.0416	0.0462	0.0494	0.0515	0.0515
20	20	20	F (ANOVA)	0.0501	0.0512	0.0475	0.0485	0.0495
			Welch	0.0485	0.0519	0.0486	0.0474	0.0493
			Kruskal-Wallis	0.0454	0.0493	0.0458	0.0473	0.0464
			Van der Waerden	0.0447	0.0461	0.0446	0.0469	0.0477
			Median	0.0404	0.0515	0.0456	0.0503	0.0450
25	25	25	F (ANOVA)	0.0494	0.0479	0.0488	0.0473	0.0501
			Welch	0.0507	0.0467	0.0481	0.0481	0.0506
			Kruskal-Wallis	0.0451	0.0460	0.0460	0.0467	0.0492
			Van der Waerden	0.0455	0.0450	0.0459	0.0460	0.0474
			Median	0.0427	0.0478	0.0482	0.0513	0.0476
30	30	30	F (ANOVA)	0.0426	0.0457	0.0535	0.0468	0.0503
			Welch	0.0394*	0.0465	0.0522	0.0489	0.0510
			Kruskal-Wallis	0.0408	0.0443	0.0480	0.0450	0.0481
			Van der Waerden	0.0398*	0.0428	0.0492	0.0440	0.0477
			Median	0.0358*	0.0518	0.0481	0.0539	0.0471

หมายเหตุ * หมายถึง การทดสอบไม่สามารถควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้

ตารางที่ 3 ค่าประมาณกำลังการทดสอบ สำหรับทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มที่มีการแจกแจงทวินาม

พารามิเตอร์			การทดสอบ (Test)	ขนาดตัวอย่าง (n_1, n_2, n_3)				
(n, p_1)	(n, p_2)	(n, p_3)		(10, 10, 10)	(15, 15, 15)	(20, 20, 20)	(25, 25, 25)	(30, 30, 30)
(10, 0.1)	(10, 0.125)	(10, 0.1)	F (ANOVA)	0.0018	0.0827	0.1121	0.1368	0.1605
			Welch	0.0018	0.0785	0.1098	0.1295	0.1566
			Kruskal-Wallis	0.0017	0.0760	0.1083	0.1273	0.1479
			Van der Waerden	0.0017	0.0786	0.1109	0.1325	0.1581
			Median	0.0016	0.0741	0.0958	0.1114	0.1310
(10, 0.1)	(10, 0.125)	(10, 0.15)	F (ANOVA)	0.0099	0.1878	0.2385	0.3035	0.3496
			Welch	0.0107	0.1877	0.2377	0.3035	0.3484
			Kruskal-Wallis	0.0097	0.1783	0.2282	0.2923	0.3323
			Van der Waerden	0.0096	0.1807	0.2350	0.3027	0.3467
			Median	0.0083	0.1491	0.1821	0.2281	0.2691

ตารางที่ 3 (ต่อ)

พารามิเตอร์			การทดสอบ (Test)	ขนาดตัวอย่าง (n_1, n_2, n_3)				
(n, p_1)	(n, p_2)	(n, p_3)		(10, 10, 10)	(15, 15, 15)	(20, 20, 20)	(25, 25, 25)	(30, 30, 30)
(10, 0.5)	(10, 0.525)	(10, 0.5)	F (ANOVA)	0.0253	0.0672	0.0720	0.0796	0.0870
			Welch	0.0250	0.0690	0.0741	0.0793	0.0864
			Kruskal-Wallis	0.0236	0.0652	0.0699	0.0741	0.0862
			Van der Waerden	0.0225	0.0629	0.0693	0.0760	0.0852
			Median	0.0224	0.0651	0.0671	0.0687	0.0763
(10, 0.7)	(10, 0.8)	(10, 0.7)	F (ANOVA)	0.0879	0.4920	0.6293	0.7445	0.8315
			Welch	0.0887	0.5003	0.6408	0.7545	0.8397
			Kruskal-Wallis	0.0842	0.4782	0.6225	0.7336	0.8195
			Van der Waerden	0.0833	0.4814	0.6235	0.7399	0.8274
			Median	0.0603	0.3527	0.4673	0.5524	0.6357
(30, 0.1)	(30, 0.125)	(30, 0.1)	F (ANOVA)	0.0645	0.2095	0.2717	0.3331	0.3893
			Welch	0.0604	0.1895	0.2539	0.3135	0.3696
			Kruskal-Wallis	0.0594	0.1874	0.2482	0.3098	0.3624
			Van der Waerden	0.0589	0.1915	0.2565	0.3189	0.3758
			Median	0.0441	0.1541	0.1908	0.2308	0.2752
(30, 0.1)	(30, 0.125)	(30, 0.15)	F (ANOVA)	0.3211	0.4865	0.6318	0.7271	0.8070
			Welch	0.3076	0.4711	0.6202	0.7190	0.8006
			Kruskal-Wallis	0.3002	0.4617	0.6012	0.7035	0.7840
			Van der Waerden	0.3034	0.4690	0.6172	0.7176	0.7978
			Median	0.2039	0.3417	0.4388	0.5283	0.6074
(30, 0.5)	(30, 0.525)	(30, 0.5)	F (ANOVA)	0.0793	0.1113	0.1294	0.1571	0.1736
			Welch	0.0789	0.1088	0.1264	0.1524	0.1722
			Kruskal-Wallis	0.0736	0.1030	0.1210	0.1465	0.1649
			Van der Waerden	0.0726	0.1029	0.1204	0.1480	0.1678
			Median	0.0618	0.0851	0.1015	0.1158	0.1240
(30, 0.7)	(30, 0.8)	(30, 0.7)	F (ANOVA)	0.7894	0.9470	0.9856	0.9975	0.9991
			Welch	0.7814	0.9433	0.9854	0.9971	0.9992
			Kruskal-Wallis	0.7674	0.9360	0.9811	0.9957	0.9990
			Van der Waerden	0.7709	0.9404	0.9835	0.9970	0.9992
			Median	0.5887	0.8207	0.916	0.9665	0.9856
(50, 0.1)	(50, 0.125)	(50, 0.1)	F (ANOVA)	0.2204	0.3205	0.4163	0.5163	0.5856
			Welch	0.2011	0.2968	0.3881	0.4920	0.5598
			Kruskal-Wallis	0.1991	0.2925	0.3807	0.4822	0.5522
			Van der Waerden	0.2031	0.2998	0.3954	0.4964	0.5681
			Median	0.1395	0.2266	0.2888	0.3620	0.4054
(50, 0.1)	(50, 0.125)	(50, 0.15)	F (ANOVA)	0.5125	0.7180	0.8513	0.9279	0.9619
			Welch	0.4862	0.7001	0.8393	0.9235	0.9601
			Kruskal-Wallis	0.4794	0.6908	0.8293	0.9130	0.9533
			Van der Waerden	0.4882	0.7007	0.8426	0.9194	0.9584
			Median	0.3194	0.5156	0.6502	0.7681	0.8373
(50, 0.5)	(50, 0.525)	(50, 0.5)	F (ANOVA)	0.1108	0.1471	0.1899	0.2263	0.2676
			Welch	0.1083	0.1437	0.1840	0.2199	0.2630
			Kruskal-Wallis	0.1026	0.1370	0.1806	0.2143	0.2497
			Van der Waerden	0.1036	0.1377	0.1820	0.2185	0.2608
			Median	0.0805	0.1124	0.1389	0.1635	0.1807

ตารางที่ 3 (ต่อ)

พารามิเตอร์			การทดสอบ (Test)	ขนาดตัวอย่าง (n_1, n_2, n_3)				
(n, p_1)	(n, p_2)	(n, p_3)		(10, 10, 10)	(15, 15, 15)	(20, 20, 20)	(25, 25, 25)	(30, 30, 30)
(50, 0.7)	(50, 0.8)	(50, 0.7)	F (ANOVA)	0.9560	0.9972	0.9998	1.0000	1.0000
			Welch	0.9494	0.9962	0.9998	1.0000	1.0000
			Kruskal-Wallis	0.9446	0.9959	0.9997	1.0000	1.0000
			Van der Waerden	0.9493	0.9961	0.9997	1.0000	1.0000
			Median	0.8084	0.9569	0.9916	0.9980	1.0000

หมายเหตุ ตัวเลขตัวหนา หมายถึง การทดสอบที่ให้ค่าหลังการทดสอบสูงสุด

ตารางที่ 4 ค่าประมาณกำลังการทดสอบสำหรับทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มที่มีการแจกแจงปัวซอง

พารามิเตอร์			การทดสอบ (Test)	ขนาดตัวอย่าง (n_1, n_2, n_3)				
λ_1	λ_2	λ_3		(10, 10, 10)	(15, 15, 15)	(20, 20, 20)	(25, 25, 25)	(30, 30, 30)
5	6	5	F (ANOVA)	0.1468	0.2029	0.2671	0.3277	0.3732
			Welch	0.1296	0.1871	0.2507	0.3107	0.3553
			Kruskal-Wallis	0.1325	0.1822	0.2465	0.3024	0.3476
			Van der Waerden	0.1307	0.1864	0.2521	0.3134	0.3600
			Median	0.0967	0.1451	0.1839	0.2282	0.2565
5	6	7	F (ANOVA)	0.3266	0.4751	0.5996	0.7221	0.8083
			Welch	0.3040	0.4636	0.5878	0.7126	0.8003
			Kruskal-Wallis	0.3019	0.4482	0.5734	0.6970	0.7857
			Van der Waerden	0.3018	0.4567	0.5832	0.7086	0.7982
			Median	0.1970	0.3221	0.4270	0.5250	0.6023
5	6	8	F (ANOVA)	0.6201	0.8194	0.9277	0.9691	0.9876
			Welch	0.5745	0.7924	0.9132	0.9622	0.9865
			Kruskal-Wallis	0.5794	0.7875	0.9076	0.9580	0.9835
			Van der Waerden	0.5848	0.7979	0.9151	0.9631	0.9863
			Median	0.4109	0.6246	0.7728	0.8585	0.9145
20	22	20	F (ANOVA)	0.1450	0.2022	0.2685	0.3260	0.3820
			Welch	0.1316	0.1938	0.2593	0.3115	0.3722
			Kruskal-Wallis	0.1287	0.1881	0.2510	0.3057	0.3642
			Van der Waerden	0.1289	0.1896	0.2557	0.3167	0.3696
			Median	0.0924	0.1512	0.1888	0.2288	0.2571
20	22	24	F (ANOVA)	0.3520	0.5085	0.6457	0.7593	0.8354
			Welch	0.3330	0.4937	0.6337	0.7491	0.8305
			Kruskal-Wallis	0.3270	0.4804	0.6145	0.7323	0.8185
			Van der Waerden	0.3287	0.4888	0.6307	0.7474	0.8269
			Median	0.2224	0.3539	0.4545	0.5600	0.6323
20	22	26	F (ANOVA)	0.6799	0.8643	0.9529	0.9830	0.9932
			Welch	0.6401	0.8427	0.9440	0.9816	0.9924
			Kruskal-Wallis	0.6367	0.8344	0.9384	0.9781	0.9909
			Van der Waerden	0.6432	0.8447	0.9467	0.9819	0.9928
			Median	0.4416	0.6732	0.8054	0.8920	0.9364
30	35	30	F (ANOVA)	0.4837	0.6656	0.8074	0.8857	0.9431
			Welch	0.4460	0.6326	0.7880	0.8720	0.9328
			Kruskal-Wallis	0.4427	0.6289	0.7789	0.8647	0.9258
			Van der Waerden	0.4464	0.6394	0.7931	0.8758	0.9351
			Median	0.3073	0.4675	0.6007	0.7140	0.7877

ตารางที่ 4 (ต่อ)

พารามิเตอร์			การทดสอบ (Test)	ขนาดตัวอย่าง (n_1, n_2, n_3)				
λ_1	λ_2	λ_3		(10, 10, 10)	(15, 15, 15)	(20, 20, 20)	(25, 25, 25)	(30, 30, 30)
30	35	40	F (ANOVA)	0.9001	0.9852	0.9986	0.9996	1.0000
			Welch	0.8808	0.9827	0.9983	0.9995	1.0000
			Kruskal-Wallis	0.8774	0.9789	0.9974	0.9993	1.0000
			Van der Waerden	0.8820	0.9823	0.9983	0.9995	1.0000
			Median	0.6822	0.9033	0.9666	0.9898	0.9974
30	35	45	F (ANOVA)	0.9984	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			Welch	0.9967	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			Kruskal-Wallis	0.9968	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			Van der Waerden	0.9975	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
			Median	0.9557	0.9981	0.9997	1.0000	1.0000

หมายเหตุ ตัวเลขตัวหนา หมายถึง การทดสอบที่ให้กำลังการทดสอบสูงสุด

กำลังการทดสอบของการทดสอบทั้ง 5 วิธีมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

5. สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ความแปรปรวน การทดสอบของเวลช์ การทดสอบครัสคัล-วัลลิส การทดสอบแวน เดอ แวร์เดน และการทดสอบมัธยฐานสำหรับการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกันเมื่อข้อมูลเป็นจำนวนนับที่มีการแจกแจงทวินามและการแจกแจงปัวซอง โดยเกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการทดสอบ คือความสามารถในการควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 และกำลังการทดสอบ และกำหนดระดับนัยสำคัญของการศึกษาที่ 0.05

สำหรับผลการศึกษาความสามารถในการควบคุมความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดแบบที่ 1 ของการทดสอบทั้ง 5 วิธีพบว่า กรณีที่ข้อมูลมีการแจกแจงทวินาม การทดสอบทั้ง 5 วิธีสามารถควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้เกือบทุกสถานการณ์ ยกเว้นกรณีที่ขนาดตัวอย่างแต่ละกลุ่มเท่ากับ 10 และความแปรปรวน ($np(1 - p)$) ของข้อมูลแต่ละกลุ่มน้อยกว่า 4 และกรณีที่ขนาดตัวอย่างแต่ละกลุ่มเท่ากับ 15 และ (n, p) เท่ากับ (10, 0.1) และ (10, 0.7) และกรณีที่ข้อมูลมีการแจกแจงปัวซอง การทดสอบทั้ง 5 วิธีสามารถควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้เกือบทุกสถานการณ์ ยกเว้นการทดสอบของเวลช์ การทดสอบแวน เดอ แวร์เดน และการทดสอบมัธยฐานที่ไม่สามารถควบคุมความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้ในกรณีที่ขนาดตัวอย่างแต่ละกลุ่มเท่ากับ 10 และ $\lambda = 30$ เมื่อพิจารณากำลังการทดสอบพบว่า การวิเคราะห์ความ

แปรปรวนให้กำลังการทดสอบสูงกว่าการทดสอบของเวลช์ การทดสอบครัสคัล-วัลลิส การทดสอบแวน เดอ แวร์เดน และการทดสอบมัธยฐาน เกือบทุกกรณีที่ศึกษา และมีบางกรณีที่การทดสอบของเวลช์ ให้กำลังการทดสอบสูงกว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนเล็กน้อย

จากผลการวิจัยในครั้งนี้จะเห็นได้ว่า สำหรับข้อมูลจำนวนนับที่มีการแจกแจงทวินามและการแจกแจงปัวซอง การทดสอบเอฟของการวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกันที่มีประสิทธิภาพดีกว่าการทดสอบของเวลช์ การทดสอบครัสคัล-วัลลิส การทดสอบแวน เดอ แวร์เดน และการทดสอบมัธยฐานในหลาย ๆ สถานการณ์ เนื่องจากสามารถควบคุมความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้ และมีกำลังการทดสอบที่สูงกว่าถึงแม้ว่าข้อมูลจะไม่เป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้นของการวิเคราะห์ความแปรปรวน กล่าวคือ ข้อมูลไม่ได้มาจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติ ความแปรปรวนของประชากรไม่เท่ากัน และข้อมูลไม่ได้มีมาตรการวัดอยู่ในมาตราช่วงเป็นอย่างน้อย ทั้งนี้ สาเหตุอาจเนื่องมาจากสถิติทดสอบเอฟเป็นสถิติทดสอบที่มีความแข็งแกร่งต่อการละเมิดข้อตกลงเบื้องต้น ซึ่งผลการวิจัยที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยบางส่วนของ Blanca et al. (2017) และ Klubnual (2018) ที่ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้สถิติทดสอบเอฟสำหรับทดสอบค่าเฉลี่ยประชากรมากกว่า 2 กลุ่มเมื่อข้อมูลไม่มีการแจกแจงปกติ โดยผลการวิจัยพบว่า สถิติทดสอบเอฟเป็นสถิติทดสอบที่มีความแข็งแกร่งและให้กำลังทดสอบสูงถึงแม้ว่าข้อมูลจะไม่ผ่านข้อตกลงเบื้องต้นของการแจกแจงปกติ นอกจากนี้ยังพบว่า ความไม่เท่ากันของความแปรปรวนส่งผลต่อความแข็งแกร่งของสถิติทดสอบเอฟมากกว่าการแจกแจงไม่ปกติของข้อมูล

ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยหลาย ๆ งาน (Alexander & Govern, 1994; Büning, 1997; Gamage & Weerahandi, 1998; Harwell et al., 1992; Lee & Ahn, 2003; Lix et al., 1996; Moder, 2010; Patrick, 2007; Yiğit & Gökpınar, 2010; Zijlstra, 2004) อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยครั้งนี้บางส่วนไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hecke (2012) ที่ได้ทำการศึกษาการทดสอบของการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบครัสคัล-วัลลิสและพบว่า การทดสอบครัสคัล-วัลลิส มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อข้อมูลมีการแจกแจงที่ไม่สมมาตร (เช่น การแจกแจงล็อกนอร์มัล) ทั้งนี้สาเหตุอาจเนื่องมาจากในงานวิจัยของ Hecke (2012) พิจารณาเฉพาะกรณีข้อมูลมีการแจกแจงแบบต่อเนื่อง ซึ่งอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการทดสอบ

นอกจากนี้ จากผลการวิจัยจะเห็นได้ว่าการทดสอบจะแปรผันตรงกับขนาดตัวอย่างและอัตราส่วนค่าเฉลี่ยของประชากรทั้ง 3 กลุ่ม กล่าวคือ เมื่อขนาดตัวอย่างหรืออัตราส่วนค่าเฉลี่ยของประชากรทั้ง 3 กลุ่มเพิ่มขึ้น กำลังการทดสอบของการทดสอบทั้ง 5 วิธี จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Everitt, 2002) ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติของกำลังการทดสอบ สำหรับข้อมูลที่มีการแจกแจงปัวซอง เมื่อค่าพารามิเตอร์ λ เพิ่มขึ้น การทดสอบทั้ง 5 วิธีมีแนวโน้มให้กำลังการทดสอบสูงขึ้น ทั้งนี้ สาเหตุอาจเนื่องมาจากเมื่อค่าพารามิเตอร์ λ เพิ่มขึ้นข้อมูลจะมีลักษณะที่สมมาตรมากขึ้นจนใกล้เคียงการแจกแจงปกติ หรือสามารถประมาณได้ด้วยการแจกแจงปกติ ส่งผลให้การแจกแจงของตัวสถิติทดสอบทั้ง 5 วิธีเข้าใกล้การแจกแจงตามทฤษฎีมากขึ้น ในทำนองเดียวกัน สำหรับข้อมูลที่มีการแจกแจงทวินาม เมื่อค่า $p = 0.5$ หรือ np และ $n(1-p)$ มากกว่า 5 การทดสอบทั้ง 5 วิธีมีแนวโน้มที่จะให้ประสิทธิภาพที่ดีเนื่องจากข้อมูลมีลักษณะที่สมมาตรมากขึ้น (Lesch & Jeske, 2009)

ในทางปฏิบัติ สำหรับการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของประชากร 3 กลุ่มที่เป็นอิสระกันเมื่อข้อมูลเป็นจำนวนนับที่มีการแจกแจงทวินามและขนาดตัวอย่างแต่ละกลุ่มเท่ากันและมากกว่าหรือเท่ากับ 20 ผู้วิจัยหรือผู้วิเคราะห์ข้อมูลสามารถเลือกใช้สถิติทดสอบเอฟของการวิเคราะห์ความแปรปรวนแทนการใช้สถิติทดสอบไม่อิงพารามิเตอร์ เนื่องจากผลการวิจัยในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสถิติทดสอบเอฟสามารถควบคุมความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้ในทุกสถานการณ์และให้กำลังการทดสอบสูงกว่าการทดสอบครัสคัล-วัลลิส การทดสอบแวน เดอ แวร์เดน

และการทดสอบมัธยฐาน และสำหรับการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่ากลางของประชากร 3 กลุ่มที่เป็นอิสระกันเมื่อข้อมูลเป็นจำนวนนับที่มีการแจกแจงปัวซอง ผู้วิจัยหรือผู้วิเคราะห์ข้อมูลสามารถใช้สถิติทดสอบเอฟของการวิเคราะห์ความแปรปรวนแทนการใช้สถิติทดสอบไม่อิงพารามิเตอร์ได้เช่นเดียวกัน เนื่องจากผลการวิจัยในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสถิติทดสอบเอฟเป็นสถิติทดสอบที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าสถิติทดสอบอื่น ๆ ในทุกสถานการณ์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ได้กรุณาสละเวลาในการอ่านและพิจารณาบทความ ให้ข้อคิดเห็นและคำชี้แนะที่เป็นประโยชน์และทำให้บทความนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Alexander, R. A., & Govern, D. M. (1994). A new and simpler approximation for ANOVA under variance heterogeneity. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 19, 91-101.
- Blanca, M. J., Alarcón, R., Arnau, J., Bono, R., & Bendayan, R. (2017). Non-normal data: Is ANOVA still a valid option? *Psicothema*, 29(4), 552-557.
- Bowarnkitiwong, S. & Areekul, K. (2017). Robustness of f-test for heterogeneity of population variances. *SDU Research Journal*, 13(1), 1-16.
- Büning, H. (1997). Robust analysis of variance. *Journal of Applied Statistics*, 24, 319-332.
- Cochran, W.G. (1947). Some consequences when the assumptions for the analysis of variance are not satisfied. *Biometrics*, 3, 22-38.
- Everitt, B. S. (2002). *The Cambridge Dictionary of Statistics*. Cambridge University Press.
- Gamage, J., & Weerahandi, S. (1998). Size performance of some tests in one-way ANOVA. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 27, 625-640.
- Glass, G., Peckham, P., & Sanders, J.R. (1972). Consequences of failure to meet assumptions underlying the fixed effects analysis of variance and covariance. *Review of Educational Research*, 42, 237-288.
- Harrison, R. L. (2010). *Introduction To Monte Carlo Simulation*. AIP Conf Proc, 1204, 17-21.
- Harwell, M. R., Rubinstein, E. N., Hayes, W. S., & Olds, C. C. (1992). Summarizing Monte Carlo results in methodological research: The one- and two-factor fixed effects ANOVA cases. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 17, 315-339.
- Hecke, T.V. (2012). Power Study of ANOVA Versus Kruskal-Wallis Test. *Journal of Statistics and Management Systems*, 15(2-3), 241-247.
- Khomduman, J. & Araveeporn, A. (2017). Efficiency Comparison of Statistic for Testing Three Population Means in Case of Homogeneity and Heterogeneity of Variance. *Journal of Applied Statistics and Information Technology*, 2(2), 61-77.
- Khomduman, J. & Araveeporn, A. (2017). Efficiency Comparison of Statistic for Testing Three Population Means in Case of Heterogeneity of Variance. *Thai Science and Technology Journal*, 25(6), 918-928.

- Klubnual, P. (2018). The efficiency of parametric and non-parametric statistics on location testing with multiple population groups. *RMUTSB Academic Journal*, 6(1), 84–100.
- Kruskal, W. H. & Wallis, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association* 47(260), 583–621.
- Lee, S., & Ahn, C. H. (2003). Modified ANOVA for unequal variances. *Communications in Statistics – Simulation and Computation*, 32, 987–1004.
- Lesch, S. M. & Jeske, D. R. (2009). Some Suggestions for Teaching About Normal Approximations to Poisson and Binomial Distribution Functions. *The American Statistician*, 63(3), 274–277.
- Lix, L. M., Keselman, J. C., & Keselman, H. J. (1996). Consequences of assumption violations revisited: A quantitative review of alternatives to the one-way analysis of variance F test. *Review of Educational Research*, 66, 579–619.
- Lüpsen, H. (2017). Comparison of nonparametric analysis of variance methods – A Vote for van der Waerden. *Communications in Statistics – Simulation and Computation*, 30, 1–30.
- McDonald, J.H. (2014). *Handbook of Biological Statistics*, 3rd ed. Sparky House Publishing, Baltimore, Maryland, 157–164.
- Moder, K. (2007). How to keep the Type I Error Rate in ANOVA if Variances are Heteroscedastic. *Austrian Journal of Statistics*, 36(3), 179–188.
- Moder, K. (2010). Alternatives to F-test in one way ANOVA in case of heterogeneity of variances (a simulation study). *Psychological Test and Assessment Modeling*, 52, 343–353.
- Patrick, J. D. (2007). Simulations to analyze Type I error and power in the ANOVA F test and nonparametric alternatives (Master's thesis, University of West Florida). Retrieved from http://etd.fcla.edu/WF/WFE0000158/Patrick_Joshua_Daniel_200905_MS.pdf.
- Sangthong, M. (2018). Efficiency Comparison of Parametric and Nonparametric Statistics on Central Testing Between Population Groups When Using Five-level Likert-type Scales. *Thai Science and Technology Journal* 28(3), 403–418.
- Scheffe, H. (1959). *The analysis of variance* (6th ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Sheskin, D.J. (2000). *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures*, 2nd Ed. Boca Raton, FL: Chapman and Hall/ CRC.
- Sinsomboonthong, S. (2017). *Experimental Designs in Agriculture*. Bangkok, Thailand: Chamchuree Products Co., LTD.
- Sinsomboonthong, S. (2020). *Nonparametric Statistics*. Bangkok, Thailand: Chamchuree Products Co., LTD.
- Urawong, K., Chumnaul, J., Phaochamrun, C., & Singhabumrung, A. (2022). A comparing on performance of t-test and Wilcoxon rank sum test for two independent populations using counting data. *The Journal of Applied Science*, 21(1), 1–17.
- Van der Waerden, B.L. (1952). Order tests for the two-sample problem and their power, *Indagationes Mathematicae*, 14, 453–458.
- Van der Waerden, B.L. (1953). Order tests for the two-sample problem. II, III, *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, Serie A*, 564, 303–310, 311–316.
- Welch, B.L. (1951). On the comparison of several mean values: an alternative approach. *Biometrika*, 38(1), 330–336.
- Yiğit, E., & Gökpınar, F. (2010). A Simulation study on tests for one-way ANOVA under the unequal variance assumption. *Communications Faculty of Sciences University of Ankara, Series A1*, 59, 15–34.
- Zijlstra, W. (2004). Comparing the Student's t and the ANOVA contrast procedure with five alternative procedures (Master's thesis, Rijksuniversiteit Groningen). Retrieved from <http://www.ppsw.rug.nl/~kiers/ReportZijlstra.pdf>.

การพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์ NMU-AQI สำหรับตรวจวัดคุณภาพอากาศ ภายในอาคารแบบเวลาจริง

Development of Prototype NMU-AQI Device for Real-Time Monitoring of Indoor Air Quality

พงศธร ชมดี

Pongsathorn Chomdee

ภาควิชาเทคโนโลยี วิทยาลัยพัฒนาชุมชนเมือง มหาวิทยาลัยนวมินทราธิราช

Department of Technology, Urban Community Development College, Navamindradhiraj University

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้นำเสนอการใช้เทคโนโลยีไอโอทีมาใช้ในการพัฒนาระบบวัดคุณภาพอากาศภายในอาคารด้วยอุปกรณ์ต้นแบบมีชื่อว่า NMU-AQI โดยประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์ราคาประหยัดสำหรับใช้ในการตรวจสอบคุณภาพอากาศภายในอาคารที่เป็นไปตามมาตรฐานโดยประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์ในการวัดทั้งหมด 7 ตัว เนื่องจากในปัจจุบันส่วนมากอุปกรณ์เซ็นเซอร์วัดคุณภาพอากาศจะเป็นการเก็บเพียงค่าฝุ่นละอองในอากาศไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายนอกอาคาร และเก็บเพียงค่าเดียว แต่ในงานวิจัยนี้ได้เก็บค่าพารามิเตอร์วัดคุณภาพอากาศซึ่งเป็นไปตามประกาศ ค่าเฝ้าระวังคุณภาพอากาศภายในอาคารสาธารณะ พ.ศ. 2565 ของกรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ฝุ่นละอองในอากาศไม่เกิน 2.5 ไมครอน หรือ PM 2.5 ก๊าซโอโซน และสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด หรือ TVOC โดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ในการอ่านค่าจากเซ็นเซอร์โดยอาศัยการทำงานแบบระบบปฏิบัติการเวลาจริง (RTOS) เพื่อช่วยในการประมวลผลการรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์หลากหลายชนิด พร้อมทั้งส่งข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์ผ่านอุปกรณ์เอ็นบีไอโอที (NB-IoT) ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Server) เพื่อเก็บข้อมูลลงฐานข้อมูลและประมวลผลข้อมูล สำหรับการนำไปแสดงค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์ผ่านเว็บแอปพลิเคชันที่ได้พัฒนาขึ้น โดยสามารถรองรับการเชื่อมต่อ NMU-AQI และการแสดงผลอุปกรณ์ต้นแบบได้หลายตัวพร้อมกัน ในกรณีที่ติดตั้งในหลากหลายสถานที่ ซึ่งสามารถนำค่าของเซ็นเซอร์ของแต่ละ NMU-AQI มาแสดงเปรียบเทียบกันในค่าต่าง ๆ ได้ตามความต้องการโดยสามารถเลือกสถานที่ที่ติดตั้งไว้ได้ ผลการทดลองเบื้องต้นพบว่า สามารถตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในอาคารได้ทั้ง 7 ตัว โดยค่าที่ได้นั้นมีความสอดคล้องและไม่เกินความผิดปกติไปกับมาตรฐานคุณภาพอากาศภายในอาคาร โดยระบบที่นำเสนอสามารถประยุกต์ใช้งานในการบันทึก วิเคราะห์ข้อมูลและดูแลแนวโน้มคุณภาพอากาศภายในอาคารได้

คำสำคัญ: คุณภาพอากาศภายในอาคาร, เอ็นบีไอโอที, อุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์, ฝุ่นละอองในอากาศไม่เกิน 2.5 ไมครอน, ก๊าซโอโซน, สารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด, เว็บแอปพลิเคชัน, วิเคราะห์ข้อมูล

ABSTRACT

This research presents the use of IoT technology in the development of a prototype indoor air quality measurement system called NMU-AQI. To the standard, it consists of a total of 7 sensors to measure, Because at present, most of the air quality sensor devices will only collect particulate matter in the air no more than 2.5 microns outside the building. and store only one value But in this research, the air quality parameters were collected according to the announcement. Surveillance of indoor air quality in public buildings B.E. 2565 of the Department of Health, Ministry of Public Health Thailand. including temperature, relative humidity. Carbon dioxide concentration Carbon Monoxide Concentration Airborne particulate matter less than 2.5 microns or PM 2.5, ozone gas and Total Volatile Organic Compounds (TVOC) with a microcontroller to take readings from the sensor based on the Real Time Operating System (RTOS) to aid in processing. Result of receiving data from various sensors As well as transmitting the data obtained from the sensor through the NB-IoT to the server to store the data in the database and process the data. For displaying the sensor values through a developed web application. It can support NMU-AQI connection and display of multiple prototype devices simultaneously. In the case of installation in a variety of locations which can bring the sensor values of each NMU-AQI to be displayed and compared in different values according to the need by selecting the installed location The preliminary results found that Able to measure indoor air quality for all 7 units, the values obtained are consistent and do not exceed the abnormality with indoor air quality standards. The proposed system can be used in recording applications. Analyze data and view trends in indoor air quality.

KEYWORDS: Indoor Air Quality, NB-IoT, Temperature, Humidity, CO₂, CO, PM 2.5, Ozone, TVOC, Web Application, Data Analytic

*Corresponding Author: pongsathorn.cho@nmu.ac.th

Received: 02/12/2021; Revised: 08/07/2023; Accepted: 19/07/2023

1. บทนำ

มลพิษทางอากาศ (Air Pollution) หมายถึง ภาวะของอากาศที่มีสารพิษเจือปนอยู่ในปริมาณมากและเป็นระยะเวลานาน ที่จะทำให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ สัตว์ พืช และวัสดุต่าง ๆ สารมลพิษดังกล่าวอาจเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือเกิดจากการกระทำของมนุษย์ อาจอยู่ในรูปของก๊าซ หยตของเหลว หรืออนุภาคของแข็งก็ได้ สารมลพิษทางอากาศที่สำคัญและมีผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย ได้แก่ ฝุ่นละออง สารตะกั่ว ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซออกไซด์ ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน ก๊าซโอโซน และสารอินทรีย์ระเหยง่าย เป็นต้น (สำนักงานจัดการคุณภาพอากาศและเสียง, 2554)

ในอดีตอาคารส่วนใหญ่ จะการออกแบบให้อากาศไหลผ่านได้อย่างสะดวก เพื่อให้อากาศมีการถ่ายเทและลดความร้อนภายในตัวอาคาร แต่อาคารในปัจจุบันมักมีการออกแบบที่แตกต่างออกไปจากอดีต เนื่องจากมีเทคโนโลยีหลากหลายอย่างได้พัฒนาขึ้น โดยออกแบบให้เป็นอาคารปิด และใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ในการควบคุมสภาพอากาศภายในอาคาร เช่น การใช้เครื่องปรับอากาศ ในการออกแบบในลักษณะนี้สามารถควบคุมสภาพอากาศภายในอาคารได้เป็นอย่างดี และสามารถป้องกันความร้อนตลอดจนมลพิษทางอากาศจากภายนอกอาคารได้ จากการเปลี่ยนแปลงการใช้พื้นที่ต่าง ๆ และกิจกรรมมากมายที่เกิดขึ้นภายในเมือง ส่งผลให้อากาศภายในเมืองมีสภาพที่ร้อนขึ้น เป็นแหล่งสะสมของมลพิษทางอากาศมากมายหลากหลายชนิด เช่นคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide; CO), ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide; SO₂), โอโซน (Ozone; O₃), และ สารอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds; VOCs) เป็นต้น สารมลพิษทางอากาศภายนอกเหล่านี้สามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอย่างมากแก่ผู้ที่ได้สัมผัส ดังนั้น ประชากรส่วนใหญ่ที่อาศัยอยู่ในเมือง มักหลีกเลี่ยงการสัมผัสความร้อน และสารมลพิษทางอากาศดังกล่าว โดยการใช้ชีวิตอยู่ในอาคารที่สามารถควบคุมสภาพอากาศได้ จากการศึกษาการใช้เวลาภายในอาคารปัดนั้นพบว่า

ประชากรส่วนใหญ่ที่อาศัยอยู่ในเมือง ใช้ชีวิตอยู่ภายในอาคารสูงถึงมากกว่า 89% ของเวลาทั้งหมดในแต่ละวัน

จากการศึกษาขององค์การอนามัยโลก (WHO, 2010) เปิดเผยว่า ร้อยละ 30 ของอาคารทั่วโลก พบว่ามีปัญหาด้านคุณภาพอากาศ และอาจมีปริมาณสารมลพิษสูงกว่าภายนอกอาคารถึง 100 เท่า ในบางสถานที่ มลพิษดังกล่าวอาจเกิดได้จากหลากหลายแหล่งกำเนิดด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นจากอากาศภายนอกที่มีการ รั่วไหลเข้าสู่อาคาร หรือเกิดจากกิจกรรมของผู้ใช้อาคารเอง เช่น การใช้สารต่าง ๆ ที่ใช้ในที่พักอาศัย ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการผสมอาหาร สารอินทรีย์ระเหยที่เกิดจากการใช้สารเคมีภายในอาคาร เชื้อราและเชื้อแบคทีเรีย หรือ แม้กระทั่งฝุ่นที่เกิดจากการสะสมในบริเวณต่าง ๆ ของอาคาร ซึ่งหากมีการระบายอากาศไม่ดี สารมลพิษทาง อากาศดังกล่าวอาจเกิดการสะสมอยู่ในตัวอาคาร และอาจมีปริมาณสูงขึ้น หากอาคารดังกล่าวเป็นอาคารที่มี ผู้ใช้งานเป็นจำนวนมาก อาทิ สถานที่ทำงาน ห้างสรรพสินค้า โรงแรม และโรงพยาบาล เป็นต้น มลพิษทางอากาศ ภายในอาคารสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ใหญ่ ๆ ได้แก่ (1) มลพิษทางอากาศอนินทรีย์ (Inorganic air pollutions) เช่น อนุภาคขนาดเล็ก ก๊าซจากควันทบหรี่ ก๊าซโอโซน และ ก๊าซเรดอน เป็นต้น (2) มลพิษทาง อากาศอินทรีย์ (Organic Air Pollutions) เช่น สารอินทรีย์ระเหย สารอินทรีย์กึ่งระเหย หรือยาฆ่าแมลง เป็นต้น และ (3) อนุภาคทางชีวภาพ (Biogenic Particles) เช่น ไรฝุ่น รา แบคทีเรีย เป็นต้น (มณีรัตน์ องค์วรรณคดี, 2556)

สาเหตุของมลพิษทางอากาศภายในอาคารมีหลายสาเหตุ โดยอาจมาจากการเคลื่อนที่ของมลพิษทางอากาศภายนอกเข้าสู่ภายในอาคาร และจากแหล่งกำเนิดภายในอาคารเอง ทั้งนี้การเคลื่อนที่ของมลพิษทางอากาศภายนอกนั้น อาจเกิดได้จากการเดินทางของอากาศผ่านรอยรั่วต่าง ๆ ของอาคาร เช่น ขอบประตูขอบหน้าต่าง และอื่น ๆ การเคลื่อนที่เข้าสู่อาคารนั้นจะมีมากขึ้นหากช่องเปิดมีขนาดกว้างขึ้น มลพิษภายนอกที่เดินทางเข้าสู่ในอาคารนั้น อาจเกิดการสะสมภายในอาคาร หรือในห้องที่ขาดการระบายอากาศ และอาจส่งผลให้มลพิษภายในอาคารมีค่าสูงกว่าค่าที่ตรวจพบภายนอกอาคารได้ การสะสมนี้มักพบมากในอาคารที่อยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศ

เช่น ถนนที่มีการจราจรหนาแน่น โรงงาน และอื่นๆ ในขณะที่แหล่งกำเนิดของมลพิษทางอากาศภายในอาคารเป็นส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพเช่นกัน แหล่งกำเนิดในอาคารที่พบมาก ประกอบด้วย เครื่องใช้ภายในสำนักงาน เช่น เครื่องถ่ายเอกสาร ที่มีการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยและก๊าซโอโซน เป็นต้น สารเคลือบเงาต่างๆ ที่มีการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหย การทำอาหารภายในบ้านโดยใช้เชื้อเพลิงแข็ง ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และ การใช้พรม ก่อให้เกิดการสะสมของฝุ่นและอาจลอยขึ้นมาหากมีการขยับตัว

ในระหว่างปี พ.ศ. 2542-2543 สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย ได้ตรวจสอบการระบาดของเชื้อลีสต์โอเนลลาภายในอาคารโรงแรมในเขตกรุงเทพฯ จำนวน 28 แห่ง ต่างจังหวัด 3 แห่ง รวม 31 แห่งโดยการวิเคราะห์หาเชื้อจากหอหล่อเย็น บ่อ หรือถังพักน้ำ ถาดรองรับน้ำจากเครื่องปรับอากาศ ก๊อกน้ำ และฝักบัวจากแหล่งต่างๆ เชื้อลีสต์โอเนลลาเป็นเชื้อที่ชอบอาศัยอยู่ในน้ำนิ่ง เช่น น้ำในหอหล่อเย็นของเครื่องปรับอากาศตามอาคารใหญ่ๆ ไม่ว่าจะเป็นโรงแรม ศูนย์การค้า และโรงพยาบาล รวมไปถึงอ่างอาบน้ำ น้ำแร่ เครื่องทำน้ำร้อน และฝักบัวอาบน้ำที่ไม่มีการดูแลรักษาความสะอาดอย่างถูกต้อง และผลจากการสำรวจแผนการจัดทำมาตรการป้องกันการระบาดของเชื้อลีสต์โอเนลลา จากโรงแรม 24 แห่ง พบว่า โรงแรมส่วนใหญ่มีมาตรการในการควบคุมเชื้อลีสต์โอเนลลา โดยการใช้สารเคมีในการควบคุม และมีการขัดล้างทำความสะอาด นอกจากนี้ นักวิทยาศาสตร์การแพทย์ได้ตรวจพบเชื้อในอาคารสำนักงาน 1 แห่งจาก 14 แห่ง ดังนั้นจึงมีการเสนอให้มีการแก้ไขและจัดทำมาตรการป้องกันการเกิดเชื้อลีสต์โอเนลลาต่อไป (จักรกฤษณ์ คิวเดชาเทพ, 2558)

ปี พ.ศ. 2544 กองอาชีวอนามัย กรมอนามัย ได้เริ่มดำเนินการตรวจวัดปริมาณก๊าซและไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ในโรงพยาบาล ได้แก่ Waste Anesthetic Gas (WAGs) ซึ่งเกิดจากก๊าซที่ใช้ในการดมยาสลบเช่น Nitrous oxide และ Halothane โดยสถาบันอาชีวอนามัยและความปลอดภัยแห่งชาติ สหรัฐอเมริกา (NIOSH) กำหนดค่าความเข้มข้นเฉลี่ย 8 ชั่วโมง การทำงานของก๊าซ Nitrous oxide ไว้ว่าไม่ควรเกิน 25 ppm และ Halothane ไม่ควรเกิน 2 ppm หากรั่วไหลออกจากระบบจะเกิดการปนเปื้อนอยู่ในบรรยากาศภายในโรงพยาบาลรวมถึงสารเคมีอื่นๆ ที่ใช้ในการทำความสะอาดและฆ่าเชื้อโรคอุปกรณ์และเครื่องมือแพทย์เพื่อประเมินความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัยและความปลอดภัยในการทำงานในโรงพยาบาล จากผลการศึกษาพบว่า โรงพยาบาล 4 ใน 9 มีเพียงห้องผ่าตัดที่

มีระบบกำจัดก๊าซทั้งมีระดับค่า WAGs อยู่ในระดับที่ปลอดภัย (จิตรพรรณ และชมภูศักดิ์, 2547)

นอกจากการตรวจสอบคุณภาพอากาศภายในอาคารของหน่วยงานต่างๆ แล้ว ประเทศไทยยังมียานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพอากาศภายในอาคารอีกมากมาย ในที่นี้จะยกตัวอย่างในบางงานวิจัย รวมถึงบางผลการตรวจวัดที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพอากาศภายในอาคาร โดยจำแนกตามประเภทของอาคารซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ตรวจวัดจะส่งผลกระทบต่อมากขึ้นอยู่กับสุขภาพของผู้ใช้อาคาร ประกอบกับความตึงเครียดส่วนบุคคลของผู้ใช้อาคารนั้น ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ในการตรวจวัดที่เกินมาตรฐานนั้นอาจมีค่าที่แตกต่างกันไปตามประเภทของอาคาร และกิจกรรมภายในอาคาร โดยสรุปได้ว่า อาคารสำนักงานส่วนใหญ่ยังมีปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพอากาศภายในอาคาร โดยมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพและส่งผลกระทบต่อความพึงพอใจของผู้ใช้อาคาร ดังต่อไปนี้ 1. ฝุ่น (PM10, PM2.5) ที่เกิดขึ้นภายในสำนักงานอาจทำให้เกิดปัญหาต่อระบบทางเดินหายใจ 2. อุณหภูมิภายในสำนักงานควรอยู่ที่ประมาณ 24-26 องศาเซลเซียส ในกรณีที่อุณหภูมิภายในอาคารสำนักงานมีค่าสูงจนเกินไปอาจเป็นสาเหตุให้กลายเป็นแหล่งเพาะเชื้อโรค และส่งผลให้ผู้ที่ทำงานเกิดโรคเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจได้ 3. ความเข้มข้นของสารต่างๆ อาทิ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นต้น หากมีความเข้มข้นมากจนเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อร่างกายได้ เช่น เกิดอาการวิงเวียนศีรษะ เป็นต้น รวมถึงเกิดความไม่สบายกายของผู้ทำงานภายในอาคารได้ 4. การระบายอากาศ เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อความพึงพอใจของผู้ที่ทำงานภายในอาคาร สำนักงานเนื่องจากอาคารสำนักงานส่วนใหญ่เป็นอาคารที่ปิด การไหลของอากาศจากภายนอกอาคารเข้าสู่ภายในอาคารจึงมีความสำคัญค่อนข้างมาก 5. แบคทีเรียและจุลินทรีย์ต่างๆ ที่มีการสะสมอยู่ในอาคาร ไม่ว่าจะเป็นเกิดจากภายในอาคารหรือภายนอกอาคารก็ตาม หากมีปริมาณสะสมมากจนเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ที่ทำงานภายในอาคารสำนักงานได้

เทคโนโลยีการส่งข้อมูลแบบเอ็นบีไอโอที นั้นย่อมาจาก Narrowband IoT (NB-IoT) เป็นมาตรฐานระบบโครงข่ายที่ใช้พลังงานต่ำ (Low Power Wide Area Network (LPWAN) ที่ถูกพัฒนามาเพื่อให้อุปกรณ์ต่างๆ สามารถเชื่อมต่อเข้าหากันได้โดยผ่านโครงข่ายของสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนามาเพื่อให้อุปกรณ์ต่างๆ สามารถเชื่อมต่อเข้าหากันได้เป็นมาตรฐานระบบโครงข่ายที่ใช้พลังงานต่ำ NB-IoT จึง

ตารางที่ 1 รายการอุปกรณ์และคุณสมบัติของเซนเซอร์ราคาประหยัด

ลำดับ	รายการของเซนเซอร์	รุ่น	คุณสมบัติ	ราคา
1	เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (Temperature, Humidity)	DHT22	- วัดอุณหภูมิได้ในช่วง -40 to 80 °C (± 0.5 °C accuracy) - วัดความชื้นสัมพัทธ์ได้ในช่วง $0 - 100$ RH% ($2 - 5\%$ accuracy)	120 - 180 บาท
2	เซนเซอร์วัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide: CO ₂)	MH-Z14A	ย่านการวัด Co2 อยู่ที่ $0 - 5000$ PPM โดยมีความแม่นยำ ± 50 PPM	1,150 - 1,200 บาท
3	เซนเซอร์วัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide: CO)	MICS-4514	ย่านการวัดอยู่ในช่วง 1 ถึง 1000 ppm	430 - 755 บาท
4	เซนเซอร์วัดฝุ่นละอองในอากาศ (Particulate Matter with diameter)	PMS7003	ตรวจจับอนุภาคได้ตั้งแต่ 0 ถึง 500 µg/m ³ โดยขนาดอนุภาคที่ตรวจจับได้คือ PM 1.0, PM 2.5 และ PM 10 ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดที่ตรวจจับได้คือ 0.3 µm	600 - 750 บาท
5	เซนเซอร์วัดก๊าซโอโซน (Ozone: O ₃)	MQ-131	ย่านการวัด Ozone ได้ $10 - 1000$ ppm	585 - 750 บาท
6	เซนเซอร์วัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด (Total Volatile Organic Compounds: TVOC)	CCS811	ย่านการวัดอยู่ในช่วง 0 to 1187 ppb	810 - 990 บาท

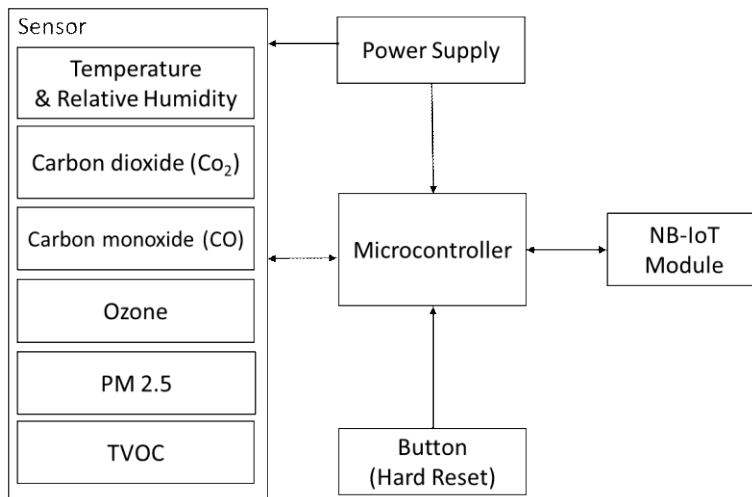
เหมาะสมกับอุปกรณ์ IoT ที่มีขนาดเล็ก ใช้พลังงานน้อย และไม่ต้องต้องการใช้อินเทอร์เน็ตที่แรงมาก โดยมีข้อดีใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ ส่งข้อมูล uplink ในขนาดที่เหมาะสม จึงช่วยให้อายุการใช้งานแบตเตอรี่ของอุปกรณ์ IoT อยู่ได้นาน รัศมีครอบคลุมของเครือข่ายต่อสถานีฐาน กระจายได้มากกว่า 10 ก.ม. รวมถึงในตัวอาคารก็ยังรับสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถพัฒนาเครือข่ายให้เปิดบริการ IoT ได้อย่างรวดเร็ว เพราะออกแบบอุปกรณ์ให้ใช้ร่วมกับ โครงข่าย 4G ในปัจจุบันได้ และสามารถใช้ได้ทั้งในอาคาร และ นอกอาคาร โดยมีตัวอย่างการนำไปใช้งานมีมากมาย เช่น อุปกรณ์วัดสภาพอากาศและสิ่งแวดล้อมในพื้นที่การเกษตรกับพื้นที่เมือง อุปกรณ์ Smart Parking ที่ตรวจสอบว่าช่องจอดรถแต่ละช่องว่างอยู่หรือไม่ รวมทั้งอุปกรณ์ sensor ในพื้นที่อุตสาหกรรม (ที่เรียกว่า IIoT – Industrial IoT) เพื่อตรวจวัดการใช้งานของอุปกรณ์เครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม และมีเตอร์วัดการใช้ไฟฟ้า (ปริชา และคณะ, 2560) โดยมีการนำมาใช้ร่วมกับอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) ที่นำมาใช้ในการประเมิน คุณภาพของอากาศ และสามารถเก็บข้อมูลและนำไปประมวลผลข้อมูลได้ เพื่อหาแนวโน้มของข้อมูลในแต่ละพื้นที่ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

วัสดุอุปกรณ์ของระบบการวัดคุณภาพอากาศภายในอาคาร NMU-AQI นั้นยืมมาจาก Navamindradhiraj University (NMU) หรือ มหาวิทยาลัยนวมินทราธิราช และ AQI ย่อ

มาจาก Air Quality Index หรือดัชนีคุณภาพอากาศ ประกอบไปด้วยอุปกรณ์เซนเซอร์ดังต่อไปนี้ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ เซนเซอร์วัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เซนเซอร์วัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เซนเซอร์ตรวจจับฝุ่นละอองในอากาศ หรือ PM 2.5 เซนเซอร์ตรวจจับก๊าซโอโซน เซนเซอร์ตรวจจับสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด หรือ TVOC โดยมีคุณสมบัติดังตารางที่ 1 โดยอุปกรณ์เซนเซอร์ใน NMU-AQI นั้นได้มีการสอบเทียบกับเครื่องวัดคุณภาพอากาศตามมาตรฐานของโรงพยาบาลแล้ว

อุปกรณ์สำหรับการประมวลผลและการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ดังกล่าว ประกอบไปด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และ อุปกรณ์การส่งข้อมูลแบบเอ็นบีไอโอทีสำหรับการส่งข้อมูลโดยมีไดอะแกรมของNMU-AQI ดังรูปที่ 1 (ก) โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการเชื่อมต่อกับเซนเซอร์ทั้ง 7 ตัว โดยอาศัยการทำงานแบบระบบปฏิบัติการเวลาจริง (RTOS) เพื่อทำการอ่านข้อมูลและทำการส่งไปยังเอ็นบีไอโอทีเพื่อทำการส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์แม่ข่ายเพื่อทำการเก็บข้อมูลและนำไปประมวลผลต่อไป โดยอุปกรณ์ดังกล่าวมีระบบจ่ายไฟแยกออกมาสำหรับจ่ายให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์และเซนเซอร์เพื่อความเสถียรของอุปกรณ์และมีปุ่มสำหรับการรีเซ็ตระบบในกรณีที่อุปกรณ์เกิดข้อผิดพลาดในการทำงาน และรูปที่ 2 (ข) ภาพอุปกรณ์จริงของ NMU-AQI

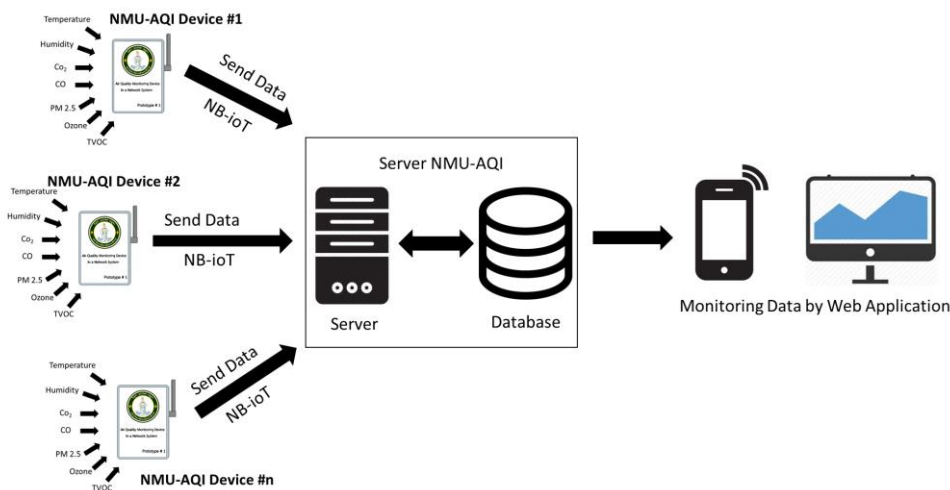


(ก)



(ข)

รูปที่ 1 อุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพอากาศภายใน NMU-AQI (ก) โครงสร้างอุปกรณ์ (ข) อุปกรณ์จริงของ NMU-AQI



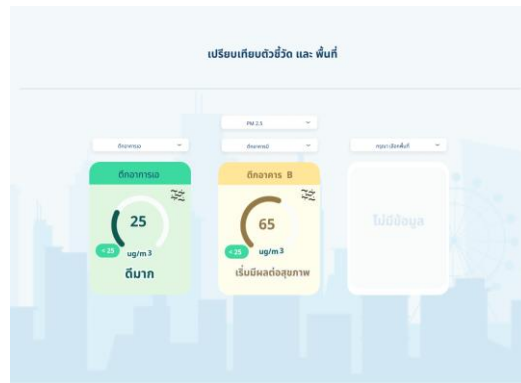
รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมระบบการวัดคุณภาพอากาศในอาคาร NMU-AQI

ส่วนของการออกแบบระบบนั้นเป็นไปดังรูปที่ 2 ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ NMU-AQI เครื่องแม่ข่ายของ NMU-AQI สำหรับการเก็บข้อมูลและประมวลผลข้อมูล และเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการแสดงผลข้อมูล โดยจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวไว้ในอาคารซึ่งตัวอุปกรณ์จะทำการเก็บและส่งข้อมูลทุก 1 ชั่วโมง โดยเป็นข้อมูลค่าจากเซนเซอร์ทั้ง 7 ค่าและส่งข้อมูลโดยผ่านเครือข่ายของเอ็นบีไอโอทีไปยังเครื่องแม่ข่ายเพื่อทำการเก็บข้อมูลลงในฐานข้อมูลที่ได้และนำไปประมวลผลเพื่ออัปเดตข้อมูลขึ้นเว็บแอปพลิเคชันเพื่อแสดงผลที่พัฒนาขึ้นเองดังรูปที่ 4 โดยได้ออกแบบไว้ให้รองรับการส่งข้อมูลจาก NMU-AQI ได้มากกว่า 100 ตัวซึ่งจะเป็นอ้างอิงกับสถานที่ในการติดตั้งอุปกรณ์นั้น ๆ โดยอุปกรณ์นั้นได้ทำการติดตั้งภายในบริเวณชั้น 1 อาคารที่ปังกรณ์รัศมีโชติ (ลูกศรีสีแดง) ดังแสดงในรูปที่ 5

รูปที่ 3 (ค) เป็นหน้าจอการแสดงผลหรือ Dash Board ที่ได้รับจากค่าเซนเซอร์โดยในการหน้าจอการแสดงผลนั้นจะแสดงข้อมูลเซ็นเซอร์ที่อ่านค่ามาได้พร้อมทั้งระบุเกณฑ์มาตรฐานของคุณภาพอากาศในอาคารของแต่ละตัวด้วย โดยสามารถเลือกจุดที่ติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวได้ โดยเกณฑ์คุณภาพอากาศนั้นเป็นไปตามตารางที่ 2 และตารางที่ 3 เป็นช่วงของคุณภาพอากาศในช่วงต่าง ๆ โดยเป็นมาตรฐานคุณภาพอากาศในอาคารของกรมอนามัย สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม และข้อมูลตัวที่ 8 ที่เป็น AQI เป็นการนำข้อมูลจากเว็บไซต์ Air4Thai ทุก 1 ชั่วโมงโดยสถานที่ในการดึงข้อมูลนั้นใกล้กับ NMU-AQI ที่ติดตั้งในอาคารนั้น ๆ โดยมีการทำงานดังรูปที่ 3 (ง) โดยเมื่อเข้าสู่หน้าเว็บแล้วจะแสดงข้อมูลของคุณภาพอากาศทั้งหมดและสามารถเลือกสถานที่ที่อุปกรณ์ติดตั้งเพื่อดูข้อมูลคุณภาพอากาศทั้งหมดได้ รูปที่ 3 (ก) เป็นรูปแสดงรายละเอียดเมื่อกดไปยังข้อมูลแต่ละตัวซึ่งจะมีกราฟในการแสดงผล



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3 เว็บแอปพลิเคชันสำหรับการมอนิเตอร์คุณภาพอากาศภายในอาคาร (ก) รายละเอียดในเซนเซอร์ (ข) ตัวเปรียบเทียบข้อมูล (ค) หน้าจอแสดงผล (Dash Board)

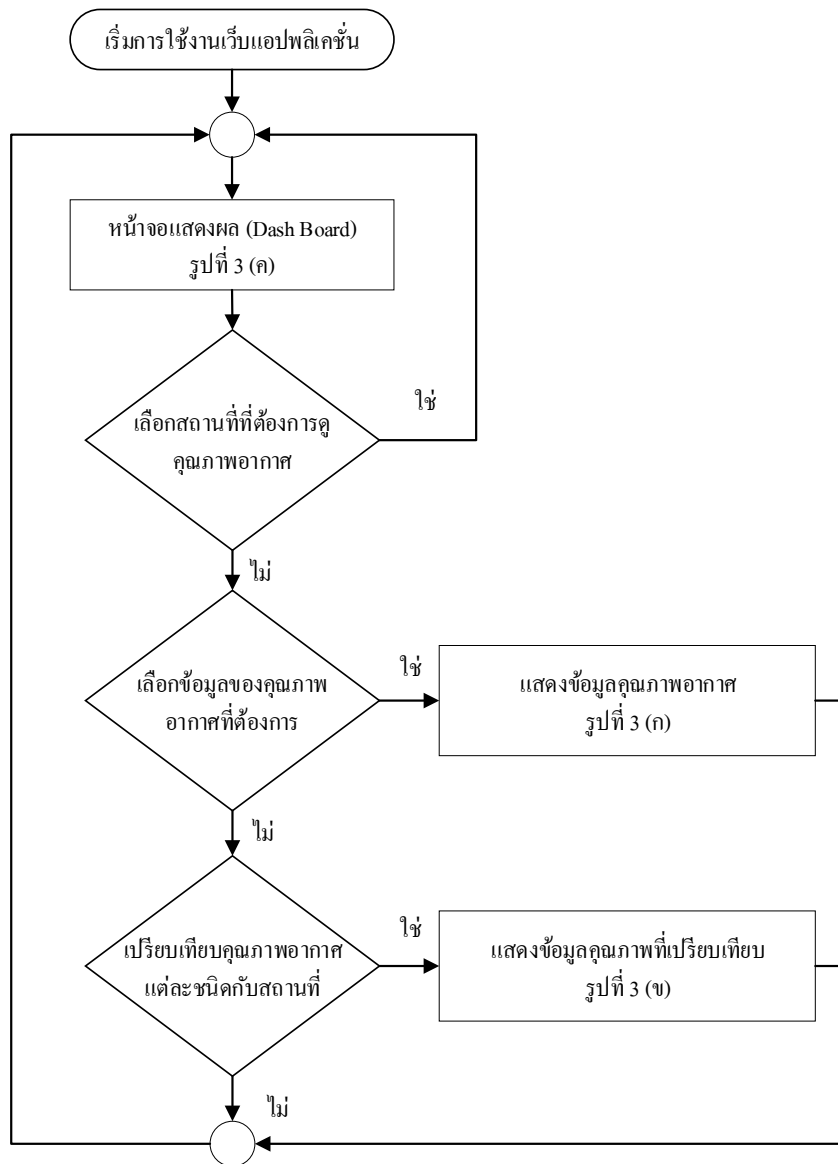
ข้อมูลย้อนหลัง 7 วันให้เห็น รูปที่ 3 (ข) เป็นการเปรียบเทียบข้อมูลในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบข้อมูลในส่วนของคุณค่าอากาศที่ต้องการกับสถานที่ที่ติดตั้ง NMU-AQI เช่น เลือกการเปรียบเทียบการวัด PM 2.5 และเลือกสถานที่ในการเปรียบเทียบได้มากที่สุดถึง 4 ข้อมูล

3. ผลการทดลอง

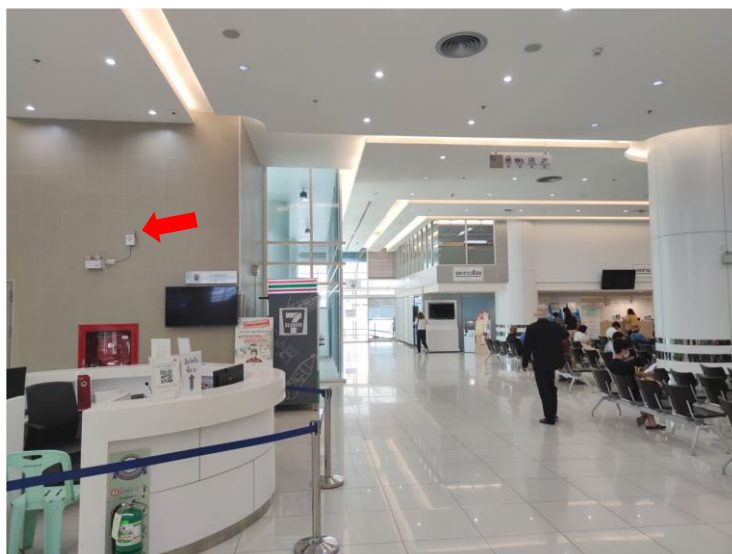
ผลการทดสอบทำการเปิดระบบตั้งแต่วันที่ 12 - 16 ตุลาคม 2564 เป็นเวลา 5 วัน บริเวณชั้น 1 อาคารที่ป็นกรณีศึกษาโดยพบว่าผลการทดลองทั้ง 7 ค่านั้นไม่เกินมาตรฐานตามที่มาตรฐานได้กำหนด โดยส่วนของอุณหภูมิ ความชื้น คาร์บอนไดออกไซด์ และฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) พบว่าผลการทดลองนั้นมีความสอดคล้องกับการใช้งานในบริเวณอาคารโดยในช่วงเวลา 8.00 น. จนถึง 16.00 น. เป็นช่วงเวลาที่การทำงานปกติ และจะมีในช่วงคลินิกนอกเวลานั้นตั้งแต่ 16.00 จนถึง 20.00 น. ดังรูปที่ 6 (ก) (ข) (ค) และ (ข) แต่ในส่วนของคุณค่าอื่น ๆ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ สารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด และโอโซน นั้นไม่มีความ

สอดคล้องกันระหว่างช่วงเวลา แต่ไม่เกินมาตรฐานคุณภาพอากาศภายในอาคาร ดังรูปที่ 6 (ง) (จ) และ (ฉ)

จากรูปที่ 7 เป็นการเปรียบเทียบค่าคุณภาพอากาศที่อ่านได้โดยจะแบ่งเป็น 3 ช่วง (Period) คือ ช่วงที่ 1 คือ 00.00 - 8.00 ช่วงที่ 2 คือ 8.00 - 16.00 และช่วงที่ 3 คือ 16.00 - 20.00 น. โดยมีช่วงละ 8 ชั่วโมง ตามค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ในตารางที่ 2 โดยในรูป (ก) และ (ข) เป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิ-ความชื้น และ PM2.5 - CO2 พบว่าในช่วงที่ 1 นั้นอุณหภูมิ ความชื้น PM2.5 และ CO2 นั้นมีค่าสูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามลักษณะภายในอาคารเนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวอาคารไม่มีการใช้งานทำให้การปิดเครื่องปรับอากาศ และในช่วงที่ 2 นั้นพบว่าค่าดังกล่าวลดลงจากช่วงที่ 1 เนื่องจากช่วงดังกล่าวเป็นเวลาก่อนดำเนินการเปิดโรงพยาบาลและทำให้ค่าดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน จนถึงช่วงที่ 3 นั้นพบว่าจะมีช่วงเวลาดังกล่าวตั้งแต่ 16.00 - 20.00 น. นั้นยังมีค่าเหมือนกันช่วงที่ 2 เนื่องจากเป็นการเปิดคลินิกพิเศษนอกเวลานั้นเอง และหลังจากนั้นก็จะมีค่าการปิดเครื่องปรับอากาศอย่างมีนัยยะสำคัญ ในรูป (ค) และ (ง) นั้นเป็นการเปรียบเทียบ



รูปที่ 4 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของเว็บแอปพลิเคชัน



รูปที่ 5 ภายในบริเวณชั้น 1 อาคารที่ปงกรณ์มิตรโฮเต็ล

ตารางที่ 2 ค่าแนะนำสำหรับการวัดคุณภาพอากาศในอาคาร

ลำดับ	ค่าพารามิเตอร์	ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ (8 ชั่วโมง)	หน่วย
1.	อุณหภูมิทำงาน (Operative temperature)	ระหว่าง 24 ถึง 26	°C
2.	ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)	น้อยกว่า 65 (สำหรับอาคารใหม่) น้อยกว่า 70 (สำหรับอาคารเก่า)	%
3.	คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide)	ไม่เกิน 1,000	ppm
4.	คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide)	ไม่เกิน 9	ppm
5.	สารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด (Total volatile organic compounds, TVOC)	ไม่เกิน 1,000	ppb
6.	ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5)	ไม่เกิน 25 (ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง)	ug/m ³
7.	โอโซน (Ozone)	ไม่เกิน 0.05	ppm

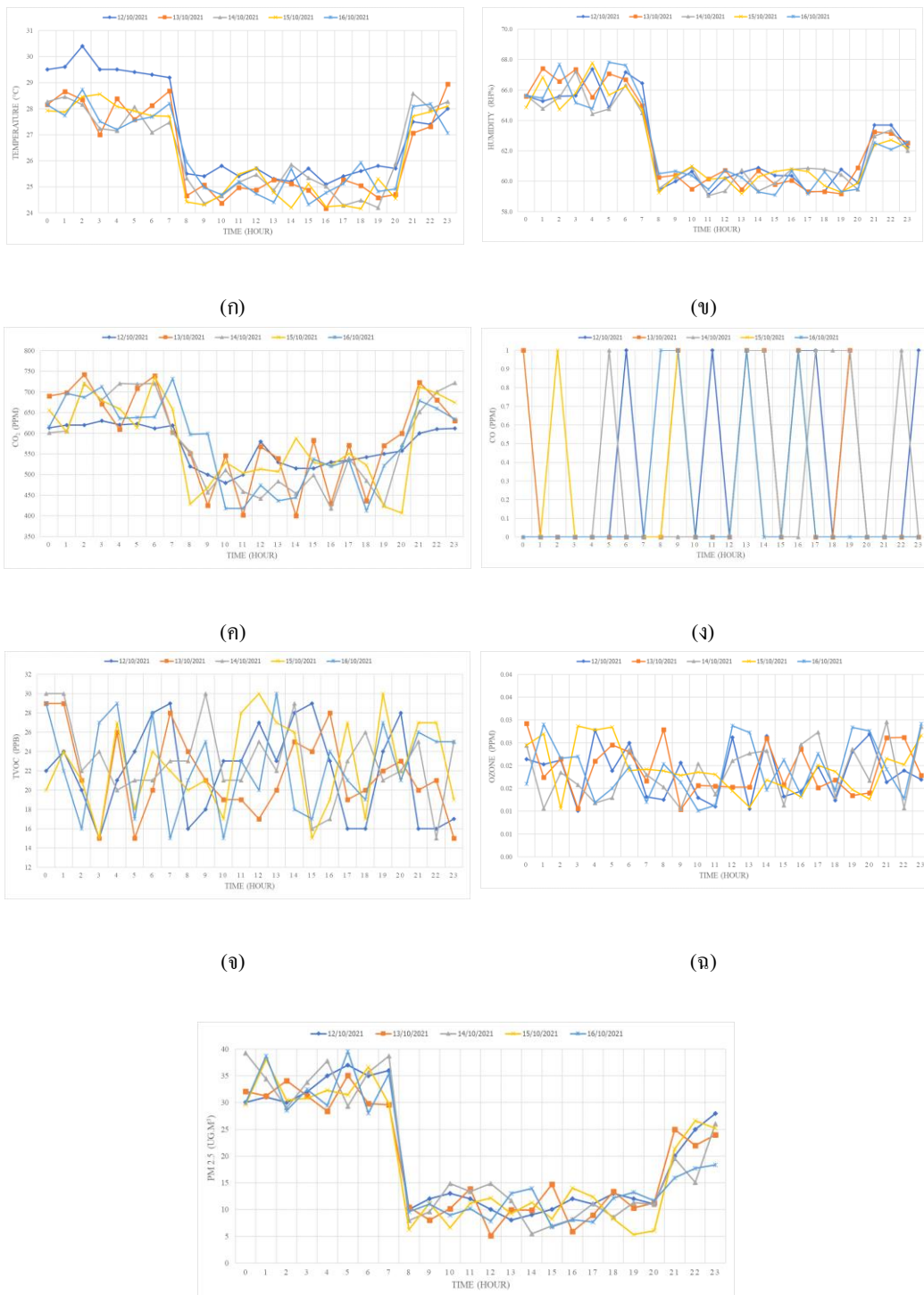
ตารางที่ 3 ช่วงคุณภาพอากาศในช่วงต่าง ๆ

ค่าพารามิเตอร์/ คุณภาพอากาศ	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	ผิดปกติ	อันตราย
คาร์บอนไดออกไซด์ (ppm)	400 – 700	701 – 900	901 – 1,100	1,101 – 1,600	> 1600
คาร์บอนมอนอกไซด์ (ppm) (เฉลี่ย 8 ชั่วโมงต่อเนื่อง)	0 – 4.4	4.5 – 6.4	6.5 – 9.0	9.1 – 30	> 30.1
สารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด (ppb)	0 – 220	221 – 660	661 – 1430	1431 – 2200	> 2201
ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (ug/m ³)	0 – 25	26 – 37	38 – 50	51 – 90	> 91
โอโซน (ppb) (เฉลี่ย 8 ชั่วโมงต่อเนื่อง)	0 – 35	36 – 50	51 – 70	71 – 120	> 121

TVOC-Ozone และ CO₂ นั้นหาความสัมพันธ์ในแต่ละช่วงไม่ได้แต่ค่าที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ไม่เกินค่ามาตรฐาน

จากรูปที่ 8 นั้นเป็นการแสดงค่าคุณภาพอากาศที่อ่านได้จากทั้ง 5 วันโดยมีการแสดงค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้น โดยพบว่าค่าสูงสุดคือ 30.4 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นวันที่ 1 และมีค่าต่ำสุดคือ 24.2 องศาเซลเซียส ในวันที่ 4 และค่าเฉลี่ยโดยประมาณคือ 26.44 องศาเซลเซียส ซึ่งในมาตรฐานที่ได้ระบุไว้นั้นตามตารางที่ 2 คืออุณหภูมิอยู่ระหว่าง 24 ถึง 26 องศา ซึ่งในกรณีนี้ในช่วงเวลาการดำเนินการของโรงพยาบาลนั้นพบว่าอุณหภูมิอยู่ระหว่างค่าดังกล่าวตามรูปที่ 6 (ก) ซึ่งในส่วนของค่าสูงสุดที่ได้พบนั้นพบที่เกิดจากกรณีกลางคืนที่ไม่มีผู้ใช้งานนั่นเอง ในทำนองเดียวกันในเรื่องของความชื้นนั้นพบว่ามีลักษณะที่คล้ายกันคือเมื่ออยู่ในช่วงนอกเวลาทำการนั้นทำให้ผลที่ได้เกินเกณฑ์มาตรฐานซึ่งต้องน้อยกว่า 65% ตามตารางที่ 2 แต่เมื่ออยู่ในช่วงเวลาทำงานนั้นก็เลยไม่เกินค่าที่กำหนดตามรูปที่ 6 (ข) โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 62.34% และค่าของ PM_{2.5} นั้นตามมาตรฐานต้องไม่เกิน 35 ug/m³ ตามตารางที่ 2 โดยพบว่าค่าเฉลี่ยนั้นอยู่ที่ 19.28 ug/m³ และค่าสูงสุดนั้นอยู่ที่ 40 ug/m³ ซึ่งเกินกว่ามาตรฐานเพียงเล็กน้อยแต่เนื่องจากค่าดังกล่าวที่เกิดขึ้นเกิดในช่วงที่ไม่ใช่เวลาเปิดดำเนินการของทางโรงพยาบาล แต่ถ้าในช่วง

ระยะเวลาของการดำเนินการของโรงพยาบาลนั้นค่าที่ได้นั้นจะเป็นค่าเฉลี่ยและลงไปถึงต่ำสุดจากรูปที่ 6 (ข) ในส่วนค่าของ CO₂ นั้นมาตรฐานต้องห้ามเกิน 1000 ppm จากตารางที่ 2 พบว่าค่าสูงสุดทั้ง 5 วันนั้นมากที่สุดค่าอยู่ที่ 742 ppm และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 576.6 ppm ค่า CO นั้นมาตรฐานต้องไม่เกิน 9 ppm จากตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าค่าสูงสุดนั้นอยู่ที่ 1 ppm และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.26 ppm ค่า TVOC ตามมาตรฐานต้องน้อยกว่า 3,000 ppb จากตารางที่ 2 นั้นก็พบว่าค่าสูงสุดคือ 30 ppb และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 22.34 ppb และค่า Ozone ตามมาตรฐานต้องไม่เกิน 0.05 ppm ซึ่งพบว่าค่าที่ได้ที่สูงสุดของทั้งหมดนั้นจะได้ 0.03 และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.02 ppm ซึ่งพบว่าในกรณีที่ เป็น CO₂ CO TVOC และ Ozone นั้น พบว่าค่าที่ได้สูงสุดของทั้ง 5 วันนั้นยังไม่เกินค่ามาตรฐานทั้งในช่วงเวลาดำเนินการเปิดโรงพยาบาลและหลังดำเนินการปิดโรงพยาบาล

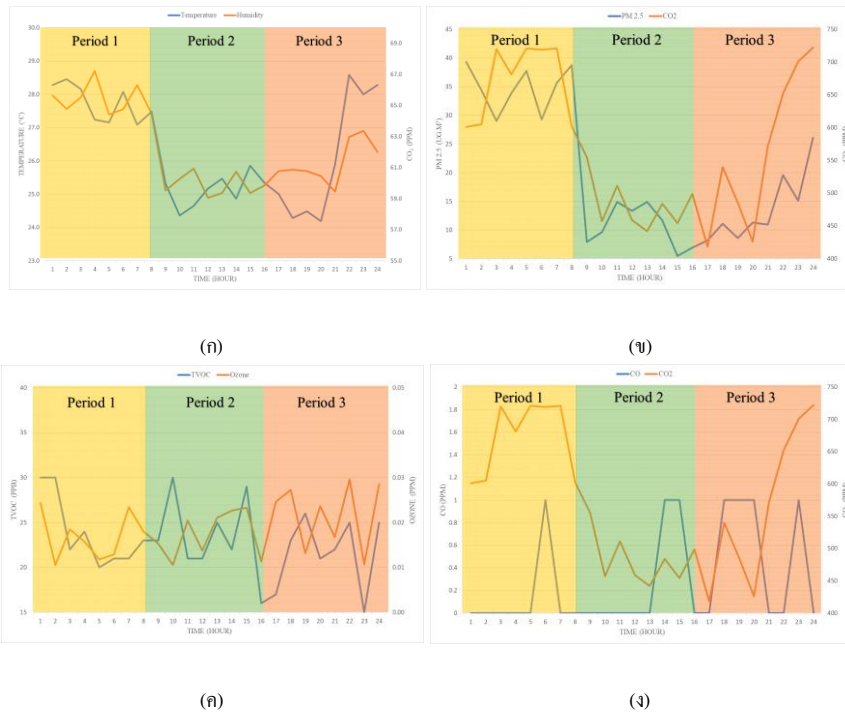


รูปที่ 6 ค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ 5 วัน (ก) อุณหภูมิ (ข) ความชื้น (ค) CO₂ (ง) CO (จ) TVOC (ฉ) Ozone (ช) PM 2.5

4. สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดลองพบว่าค่าของอุณหภูมิ ความชื้น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM_{2.5}) นั้นมีความสัมพันธ์กับการทำงานของอาคารนั้น ๆ และค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด (TVOC) และโอโซน (Ozone) นั้นไม่มีความสอดคล้องกันระหว่างช่วงเวลา แต่

ไม่เกินมาตรฐานคุณภาพอากาศภายในอาคาร และในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีการผลิตอุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพอากาศส่วนบุคคลอันเนื่องมาจากการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูล ในการศึกษาเป็นพัฒนาระบบตรวจวัดและติดตามคุณภาพอากาศส่วนบุคคลบน IoT การใช้เซ็นเซอร์วัดคุณภาพอากาศราคาประหยัด โดยเก็บข้อมูลทุก ๆ 1 ชั่วโมง และทำการมอนิเตอร์ข้อมูลของแต่อุปกรณ์ที่ได้



รูปที่ 7 ค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ของวันที่ 14 ตุลาคม 2564 โดยเปรียบเทียบข้อมูล 2 ชนิดและแบ่งเป็นช่วง (ก) อุณหภูมิ - ความชื้น (ข) PM2.5 - CO2 (ค) TVOC-Ozone (ง) CO-CO2



รูปที่ 8 ค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ 5 วัน (ก) อุณหภูมิ (ข) ความชื้น (ค) Co2 (ง) CO (จ) TVOC (ฉ) Ozone (ช) PM 2.5

ทำการติดตั้ง โดยสามารถดูข้อมูลย้อนหลังในแต่ละเซนเซอร์เป็นกราฟ และมีเลือกเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ทำให้สามารถตรวจสอบค่าที่สำคัญและจำเป็นต่อการตรวจสอบคุณภาพอากาศในอาคารได้ ซึ่งทำให้พบว่าสามารถตรวจวัดคุณภาพอากาศที่จำเป็นและมีความสอดคล้อง แต่ในส่วน ของ ค่าอื่น ๆ คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ สารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด และโอโซน ของเซนเซอร์นั้นยังไม่มีค่าสอดคล้องต้องอาศัยอุปกรณ์มาตรฐานในการทำการทดสอบ NMU-AQI ว่า เป็นไปตามการทดสอบหรือไม่ และควรสอบเทียบอุปกรณ์เซนเซอร์ดังกล่าวทุก ๆ 6 เดือน – 1 ปี หรือเมื่อมีค่าที่ได้จากเซนเซอร์ผิดปกติกว่าค่าปกติที่ควรจะเป็น แนวทางในการพัฒนานั้นสามารถทำเซนเซอร์ดังกล่าวติดตั้งตามโรงพยาบาล โรงเรียน สถานที่ราชการ และสถานที่อื่น ๆ ที่มีผู้คนสัญจรผ่านไปมา โดยสามารถมอนิเตอร์ข้อมูลแต่ละสถานที่ได้เพื่อเป็นประโยชน์ให้กับประชาชนในการทราบข้อมูลก่อนที่จะเดินทางเข้าไป และยังเป็นประโยชน์ในการพัฒนาปรับปรุง ดูแลรักษา สถานที่นั้น ๆ ด้วย ซึ่งเซนเซอร์ดังกล่าวสามารถพัฒนาไปติดตั้งยังสวนสาธารณะหรือบริเวณภายนอกได้ และระบบดังกล่าวสามารถรองรับการส่งข้อมูลเซนเซอร์ตรวจวัดคุณภาพอากาศตัวอื่นที่ไม่ใช่ของนักวิจัยได้ เพื่อเป็นประโยชน์ในการรวบรวมข้อมูลคุณภาพอากาศจากสถานที่ต่าง ๆ เพื่อนำมาแสดงผลให้เกิดประโยชน์สูงสุดแก่ประชาชนและภาครัฐในการที่จะกำหนดแนวทางการป้องกัน หรือประโยชน์อื่น ๆ ที่ได้จากข้อมูลดังกล่าว

กิตติกรรมประกาศ

ได้รับทุนสนับสนุนทุนวิจัยจาก “กองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยนวมินทราชิราช” และสถานที่ทดสอบโรงพยาบาลศิริพยาบาล คณะแพทยศาสตร์ศิริพยาบาล มหาวิทยาลัยนวมินทราชิราช

เอกสารอ้างอิง

- สำนักงานจัดการคุณภาพอากาศและเสียง. (2554). รู้เรื่องรอบทิศมลพิษทางอากาศ บทเรียน แนวคิด และการจัดการ. กรุงเทพฯ:กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- WHO, 1988, WHO Regional Publications European Series No. 31 Indoor air quality: biological contaminants
- WHO, 2005, WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide And sulfur dioxide, Globalupdate2005 Accessed 7 May, 2020, From: <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69477/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf>
- WHO, 2010, WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, Accessed 7 May, 2020, From :<http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf>

- สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย, 2557 รายงานกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศที่เหมาะสมสำหรับอาคารในประเทศไทย
- สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย, 2565 ค่าเผื่อรังสีคุณภาพอากาศภายในอาคารสาธารณะ
- มนิรัตน์ องครวรรตติ, 2552, การได้รับสารอินทรีย์ระเหยง่ายทางอากาศของบุคลากรที่ทำงานในอาคารสำนักงานในกรุงเทพมหานคร
- จักรกฤษณ์ ศิระเดชาเทพ, 2558, ปัญหาคุณภาพอากาศภายในอาคาร , เข้าถึงวันที่ 7 พฤษภาคม 2564 จาก <www.safety-stou.com/UserFiles/File/54113%20unit15.doc>
- จิตรพรรณ ภูษากิตติภพ และชมพูศักดิ์ พูลเกษม, 2547, การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพอากาศในอาคารและกลุ่มอาการเจ็บป่วยของพนักงานที่ทำงานในสำนักงานของโรงพยาบาลในจังหวัดชลบุรี, วารสารสาธารณสุขศาสตร์ ฉบับที่ 34, pp. 189-199
- ปรีชา กอเจริญ, เพชร นันทวัฒนา, เต็มพงษ์ ศรีเทศ และณรงค์ อยู่ถนอม. (2560). เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายสำหรับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง. วารสารวิชาการ กสทช, 2(2), 269-287
- Kattariya Kujaroentavon, Supaporn Kiattisin, Adisorn Leelasanthitham and Sotarath Thammaboosadee. (2015).“ Air quality classification in Thailand based on decision tree” . Accessed 7 May, 2020, From : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7017436>
- Hong, C.S.; Ghani, A.S.A.; Khairuddin, I.M. Development of an Electronic Kit for detecting asthma in Human Respiratory System. In Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Yogyakarta, Indonesia, 7–8 December 2017; IOP Publishing: Bristol, UK, 2018; Volume 319, p. 012040.
- Bimaridi, A.; Putra, K.D.; Djunaedy, E.; Kirom, M.R. Assasment of Outside Air Supply for Split AC system–Part A: Affordable Instrument. Procedia Eng. 2017, 170, 248–254.
- Suárez, J.I.; Arroyo, P.; Lozano, J.; Herrero, J.L.; Padilla, M. Bluetooth gas sensing module combined with smartphones for air quality monitoring. Chemosphere 2018, 205, 618–626.
- McKercher, G.R.; Vanos, J.K. Low-cost mobile air pollution monitoring in urban environments: A pilot study in Lubbock, Texas. Environ. Technol. 2018, 39, 1505–1514.
- Nguyen, T.N.T.; Ha, D.V.; Do, T.N.N.; Nguyen, V.H.; Ngo, X.T.; Phan, V.H.; Bui, Q.H. Air pollution monitoring network using low-cost sensors, a case study in Hanoi, Vietnam. In Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Pan Pacific Hanoi, Vietnam, 23–24 January 2019; IOP Publishing: Bristol, UK, 2019; Volume 266, p. 012017.
- Liu, H.Y.; Schneider, P.; Haugen, R.; Vogt, M. Performance assessment of a low-cost PM2.5 sensor for a near four-month period in Oslo, Norway. Atmosphere 2019, 10, 41.
- Budde, M.; El Masri, R.; Riedel, T.; Beigl, M. Enabling low-cost particulate matter measurement for participatory sensing scenarios. In Proceedings of the 12th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia, Lulea, Sweden, 2–5 December 2013; p. 19.

Generative Adversarial Network สำหรับการสร้างตัวละคร DOTA2

Generative Adversarial Network for DOTA2 Character Generation

สรลชัย อังควินิจวงศ์ พงศรัช ฐทัย กฤตติพัฒน์ ชื่นพิทยาวัฒน์ อธิษฐ์ นาคเสนีย์ และ จิตติรัตน์ ศิริบรรณรัตน์*

Saranchai Angkawinijwong, Pongsarat Chootai, Krittipat Chuenphitthayavut, Theethut Narksenee and

Thitirat Siriborvornratanakul*

คณะสถิติประยุกต์ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์

Graduate School of Applied Statistics, National Institute of Development Administration

บทคัดย่อ

เกม DOTA2 เป็นเกมในอุตสาหกรรมเกมอีสปอร์ต (E-Sport Game) ที่ได้รับความนิยมและมีมูลค่าทางการตลาดสูง โดยเฉพาะหากสามารถพัฒนาตัวละครในเกมให้มีความหลากหลายก็จะยิ่งเพิ่มรายได้ให้กับบริษัทและความพึงพอใจของผู้เล่นได้ จากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่าการประยุกต์ใช้เครือข่ายขัดแย้งกำเนิด (Generative Adversarial Networks) หรือที่เรียกชื่อย่อว่า GAN มาใช้ในการสร้างภาพการ์ตูนหรือสร้างภาพบุคคลขึ้นมาใหม่นั้นได้ประสิทธิผลที่ดี งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้ StyleGAN ในการสร้างและออกแบบตัวละคร DOTA2 ขึ้นมาใหม่ในลักษณะการใช้ภาพจำนวนน้อยในการฝึกสอนต่อยอดผ่านการโต้ตอบข้ามโดเมน (Few-shot Image Generation via Cross-domain Correspondence)

ในงานวิจัยนี้ข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน คือ รูปขนาดย่อของตัวละครฮีโร่เกม DOTA2 ขนาด 256x144 พิกเซล จำนวน 111 รูป โดยภาพจะถูกสร้างขึ้นมาจากโมเดลทดลอง 3 ตัว โดยผลการสังเกตโดยผู้วิจัยพบว่าโมเดลที่ประยุกต์มาจากโมเดล FFHQ สามารถดัดแปลงส่วนตาและจมูกของคนมาเป็นตาและจมูกของฮีโร่ได้อย่างถูกต้อง แต่ส่วนปากจะถูกลบหายไป ในขณะที่โมเดลอื่นๆ สามารถสร้างภาพได้เพียงครึ่งส่วนแต่ยังมีความสอดคล้องกับลักษณะตัวละครอยู่ ทั้งนี้รูปภาพที่สร้างออกมาจากโมเดลทั้ง 3 มีสีที่ค่อนข้างเข้มและสดเหมือนกับรูปภาพของฮีโร่เกม DOTA2 ในด้านผลลัพธ์เชิงคุณภาพผลการทดลองพบว่ากลุ่มตัวอย่างชื่นชอบ โมเดล FFHQ มากที่สุด ตามด้วยโมเดล Church และ โมเดล Horses ตามลำดับ โดยปัจจัยหลักที่กลุ่มตัวอย่างใช้ในการตัดสินใจเลือกโมเดลที่ชื่นชอบนั้นมาจากปัจจัยเรื่องกลิ่นไอของความเป็น DOTA2 ในภาพเป็นสำคัญ

คำสำคัญ: Generative Adversarial Networks, Deep Learning, DOTA2 , StyleGAN, Few-shot Image Generation

ABSTRACT

DOTA2 is a popular game in the E-sport game industry with a high market value. Developing a variety of in-game character traits can increase the company's revenue and player satisfaction. Many studies can demonstrate the effectiveness of Generative Adversarial Networks (GAN) applications to create cartoon images or recreate portraits. Thus, this research aims to study the effectiveness of the StyleGAN application to be used in recreating and redesigning DOTA2 characters. To create new characters using a small number of DOTA2 original character images, we use a few-shot Image Generation via Cross-domain Correspondence. The dataset used in training includes 111 thumbnail images of DOTA2 hero characters. Three models were trained and experimented with. Manual observation showed that models adapted from the FFHQ model correctly adapted a person's eyes and nose to the character's eyes and nose; however, the mouth part was erased. The other models could only create half the image but still correspond to the character traits. The images created by the three models were quite dark and fresh, which also looked like the images of a DOTA2 hero. As for the qualitative evaluation, it was found that users preferred the FFHQ model the most, followed by the Church model and the Horses model, respectively. The main consideration factors were how much the generated images are similar in style to DOTA2.

KEYWORDS: Generative Adversarial Networks, Deep Learning, DOTA2 , StyleGAN, Few-shot Image Generation

*Corresponding Author: thitirat@as.nida.ac.th

Received: 29/07/2022; Revised: 27/04/2023; Accepted: 14/06/2023

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมเกมและเกมอีสปอร์ตกำลังเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วทั่วทุกมุมโลก อันเนื่องมาจากจุดเด่นหลายประการ เช่น ความสนุกสนาน ความตื่นเต้นท้าทาย นอกจากนี้การมีกฎและกติกาที่ชัดเจน ยังทำให้เกมอีสปอร์ตเปรียบเสมือนกีฬาชนิดหนึ่งที่สามารถจัดการแข่งขันขั้นที่โด่งดังระดับโลก โดยในการทำรายงานวิเคราะห์ตลาดของ Grand View Research (2020) พบว่า ในปี พ.ศ. 2563 อุตสาหกรรมเกมและเกมอีสปอร์ตมีส่วนแบ่งการตลาดอยู่ที่ 1.48 พันล้านเหรียญสหรัฐ อีกทั้งมีแนวโน้มจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ คาดการณ์ว่าส่วนแบ่งการตลาดจะอยู่ที่ 6.81 พันล้านเหรียญสหรัฐ ในปี พ.ศ. 2570

หนึ่งในเกมอีสปอร์ตที่ได้รับความนิยมสูง ได้แก่ เกม DOTA2 ซึ่งบริษัทวาล์วคอร์ปอเรชัน (Valve) ได้พัฒนาขึ้น โดยมีผู้เล่นจำนวนมากกว่า 10 ล้านคนทั่วโลก (Clement, 2021) อีกทั้งมีการจัดการแข่งขันในระดับภูมิภาคและระดับโลกอย่างต่อเนื่อง ในเกม DOTA2 นี้ผู้เล่นสามารถเลือกใช้งานตัวละครได้มากถึง 121 ตัวละคร โดยตัวละครจะถูกจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ (1) ตัวละคร Strength ซึ่งมีภาพลักษณ์แข็งแรง ดุดัน น่าเกรงขาม มีพลังทางกายภาพสูง (2) ตัวละคร Agility ซึ่งมีภาพลักษณ์คล่องแคล่ว ว่องไว ปราดเปรียว และ (3) ตัวละคร Intelligence ซึ่งมีภาพลักษณ์ที่บอบบาง อ่อนแอ ทรงความรู้ เป็นผู้ใช้เวทมนตร์ เป็นต้น

จากการทบทวนวรรณกรรม ผู้วิจัยพบว่าการสร้างตัวละครใหม่เพิ่มเติมขึ้นมาในเกมนั้น นอกจากจะส่งผลให้ผู้เล่นมีทางเลือกในการเล่นมากขึ้นแล้ว หากตัวละครใหม่นั้นถูกออกแบบมาอย่างสวยงาม มีกลิ่นไอความเป็นตัวละครของ DOTA2 ตามประเภทของตัวละครที่กล่าวมาข้างต้นอย่างถูกต้อง ก็ยังส่งผลให้ผู้เล่นตัดสินใจจ่ายเงินซื้อตัวละครนั้นมาใช้กันมากขึ้น เนื่องจากเอกลักษณ์ของตัวละครมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความตั้งใจที่จะซื้ออุปกรณ์และสิ่งต่างๆ ในเกม (Park & Lee, 2011) ไม่เพียงเท่านั้นความคาดหวังที่ตัวละครจะสามารถเติบโตเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้นยังมีผลทางบวกต่อความภักดีของผู้เล่นเกมออนไลน์นั้นอีกด้วย (Alghifari & Halim, 2020) อย่างไรก็ตาม การสร้างตัวละครใหม่ขึ้นมานั้นมีค่าใช้จ่ายในการออกแบบที่ค่อนข้างสูง อีกทั้งมีความเสี่ยงว่าตัวละครใหม่ที่ลงทุนออกแบบมาอาจไม่เป็นที่ถูกใจผู้เล่นโดยรวม

ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ในปัจจุบัน ทำให้ผู้ออกแบบและพัฒนาตัวละครสามารถนำศิลปะปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence Artist หรือ AI artist) มาช่วยในการออกแบบตัวละครใหม่อย่างรวดเร็วได้ โดยศิลปะปัญญาประดิษฐ์ถือเป็นเจนเนอเรทีฟโมเดล (Generative Model) รูปแบบหนึ่งซึ่งมีสถาปัตยกรรมให้เลือกใช้ได้หลายแบบในปัจจุบัน สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ผู้วิจัยเลือกใช้สถาปัตยกรรมของเครือข่ายขัดแย้งกำเนิด (Generative Adversarial Network หรือ GAN) (Goodfellow et al., 2014) ซึ่งภายในประกอบด้วยโครงข่ายย่อยอีก 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของเจนเนอเรเตอร์ (Generator) และส่วนของดิสคริมิเนเตอร์ (Discriminator) โดยเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดนี้มีความสามารถในการสร้างภาพเหมือนและภาพการ์ตูนได้ดี (Krohn et al., 2020) อีกทั้งยังได้รับความนิยมอย่างสูงในงานการสร้างรูปภาพเหมือนจริง (Photorealistic image) ที่มีความละเอียดและความสมจริงสูงด้วย

ในบรรดาเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดที่ถูกนำเสนอขึ้นมา มากมายนั้น StyleGAN (Karras et al., 2021) ของบริษัท NVIDIA กล่าวได้ว่าเป็นเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดที่โดดเด่นมากที่สุด เนื่องจากสามารถสกัดคุณสมบัติระดับสูง เช่น ท่าโพส ท่าทาง สเกล ส่วนประกอบในภาพ ได้อย่างอัตโนมัติ อีกทั้งมีการปรับแต่งในส่วนของเจนเนอเรเตอร์ ทำให้สามารถสร้างภาพผลลัพธ์ที่คมชัดและมีสัดส่วนของภาพที่ถูกต้องกว่าการใช้เจนเนอเรเตอร์แบบดั้งเดิม นอกจากนี้ StyleGAN ยังสามารถปรับสไตล์ (Latent) เพื่อผสมและจับคู่สไตล์ของภาพสองภาพเข้าด้วยกันได้ด้วย เหล่านี้ทำให้ StyleGAN เป็นหนึ่งในเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดยอดนิยมที่นักพัฒนามานิยมนำไปต่อยอดเพื่อสร้างรูปภาพประเภทต่าง ๆ ด้วยเหตุนี้ คณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงความเป็นไปได้ของการนำ StyleGAN มาทำการทดลองเรียนรู้ และสร้างตัวละคร DOTA2 ใหม่โดยให้อ้างอิงกับเอกลักษณ์และสไตล์ของตัวละครที่มีอยู่ปัจจุบันในเกม DOTA2 ซึ่งหากทำได้สำเร็จก็น่าจะช่วยลดต้นทุนการสร้างตัวละครใหม่และส่งเสริมยอดขายโดยรวมของเกม DOTA2 ได้เป็นอย่างดี

2. ทบทวนวรรณกรรม

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยทำการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดไปใช้ในการสร้างภาพสองมิติ เพื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ จุดเด่น และจุดด้อย

ของเครือข่ายขัดแย้งกำเนิด ก่อนจะสรุปประเด็นที่น่าสนใจเกี่ยวกับเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดในบริบทของการนำไปสร้างภาพตัวละครใหม่ของเกม DOTA2 ในงานวิจัยนี้ต่อไป

หากพิจารณาเปรียบเทียบเอกลักษณ์เชิงภาพระหว่างภาพถ่ายและภาพการ์ตูนนั้น ภาพการ์ตูนจะมีเอกลักษณ์ในแง่ของลักษณะลายเส้นเสียมาก ในขณะที่จะมีความสมจริงและรายละเอียดของพื้นผิว (Texture) ในองค์ประกอบต่าง ๆ ของภาพน้อยกว่าภาพถ่าย ที่ผ่านมามีการศึกษามากมายที่ทดลองนำเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดมาใช้ในการสร้างภาพการ์ตูน เช่น Li et al. (2021) นำเสนอเฟรมเวิร์กใหม่ที่เรียกว่า AniGAN ซึ่งสามารถสังเคราะห์หน้าตาตัวละครอนิเมะคุณภาพสูงได้ ในรายละเอียดมีการใช้เจนเนอเรเตอร์ที่สามารถถ่ายโอนรูปแบบ สี พื้นผิว ให้กลายเป็นหน้าอนิเมะได้พร้อม ๆ กัน โดยสถาปัตยกรรมที่ใช้มีการใช้โครงข่ายส่วนการเข้ารหัส (Encoder) แยกระหว่างรูปภาพพื้นผิวหน้าคนกับภาพสไตล่อนิเมะ และใช้โครงข่ายส่วนการถอดรหัส (Decoder) แปลงภาพให้กลายเป็นรูปภาพสไตล่อนิเมะที่สะท้อนจากรูปภาพหน้าคน เนื่องด้วยใบหน้าของอนิเมะและหน้าของคนมีองค์ประกอบของรูปภาพที่คล้ายคลึงกัน ดังนั้นโครงข่ายดิสคริมิเนเตอร์ในที่นี้จึงมีหน้าที่ 2 อย่าง ได้แก่ (1) การแยกแยะภาพจริงและภาพไม่จริงของใบหน้าอนิเมะ และ (2) การแยกแยะภาพจริงและไม่จริงของใบหน้ามนุษย์ ชุดข้อมูลที่ใช้งานวิจัยนี้ได้แก่ Selfie2 anime และ Face2anime จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าวิธีที่นำเสนอได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการก่อนหน้านี้ Back (2021) เสนอวิธีการชื่อ Cartoon-StyleGAN ซึ่งใช้เทคนิคการฝึกสอนแบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised learning) ในงานการแปลภาพ (Image-to-Image translation หรือ I2I) โดยการทำให้ I2I แบบไม่มีผู้สอนนั้นใช้การถ่ายโอนการเรียนรู้จากโมเดล StyleGAN2 ที่ถูกฝึกสอนไว้ล่วงหน้า (Pre-trained StyleGAN2) และมีการใช้วิธีการใหม่เพื่อรักษาโครงสร้างของภาพต้นฉบับและสร้างภาพที่เหมือนจริงในโดเมนเป้าหมายด้วย ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการเหล่านี้มีประสิทธิภาพในการทำให้อารมณ์ภาพต้นฉบับและอารมณ์ภาพเป้าหมายมีความคล้ายคลึงกัน และช่วยให้สร้างภาพได้สมจริงยิ่งขึ้น

Vavilala & Forsyth (2022) อภิปรายว่าเนื่องจาก StyleGAN ถูกใช้อย่างหลากหลายในงานปรับแต่งรูปภาพต่าง ๆ รวมทั้งในการปรับแต่งการ์ดเกมด้วย ทว่าการปรับแต่งนี้ยังไม่สามารถทำให้เกิดความแตกต่างจากภาพต้นฉบับอย่างมีนัยสำคัญได้ ดังนั้นงานนี้จึงเสนอการ

ปรับแต่ง StyleGAN โดยใช้ชุดข้อมูลจาก The Yu-Gi-Oh Card Art Dataset ซึ่งมีข้อมูลอยู่ 11,000 ภาพ เริ่มจากการทำความสะอาดข้อมูลโดยใช้สายตาคัดแยกและคัดออกประมาณ 500 ภาพเนื่องจากไม่สามารถระบุการ์ดนั้นได้ จากนั้นทำการย่อขนาดภาพให้เป็นขนาด 256 พิกเซล และ 512 พิกเซล โดยงานนี้ได้ทำการฝึกสอนด้วยภาพขนาด 512 พิกเซลสำหรับการ์ดประเภทมอนสเตอร์โดยใช้เวลา 227 ชั่วโมงในการฝึกสอนสำหรับรูปภาพ 25 ล้านภาพ ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดได้ค่าตัวชี้วัด FID ที่ 10.73 และจากการทดลองสามารถสรุปผลได้ว่า Style-GAN2 สามารถสร้างการ์ดที่น่าดึงดูดและมีความแตกต่างจากภาพต้นฉบับที่ใช้ฝึกสอนอย่างมีนัยสำคัญได้

จากตัวอย่างงานวิจัยที่กล่าวไปข้างต้นจะเห็นว่าเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดสามารถถูกนำไปฝึกสอนให้สร้างรูปภาพลายเส้นแบบของการ์ตูนหรืออนิเมะได้ โดยเฉพาะเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดในกลุ่มของ StyleGAN ซึ่งเป็นที่นิยมในหมู่นักวิจัยสำหรับการนำมาทดลองฝึกสอนต่อยอดอย่างใดก็ตาม ปัญหาของการฝึกสอนเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดขนาดใหญ่เหล่านี้คือจำนวนของข้อมูลฝึกสอน โดยเฉพาะหากเป็นการฝึกสอนตั้งแต่ศูนย์ (Train from scratch) จะยังต้องการรูปภาพสำหรับฝึกสอนจำนวนมาก อีกทั้งต้องใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์สูงและใช้เวลาในการฝึกสอนนานตามไปด้วย จึงอาจไม่เหมาะสมสำหรับเป้าหมายของงานวิจัยนี้ที่ต้องการทำให้กระบวนการออกแบบตัวละครใหม่มีความรวดเร็วขึ้นกว่าปัจจุบัน ตัวอย่างปริมาณข้อมูลฝึกสอนที่ใช้ในการฝึกสอนเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดสำหรับสร้างภาพการ์ตูน เช่น งานของ Guruprasad et al. (2020) ทำการฝึกสอนโมเดลเพื่อสร้างใบหน้าคนในรูปแบบภาพการ์ตูนโดยใช้เครือข่ายขัดแย้งกำเนิดแบบพื้นฐานที่ฝึกสอนบนชุดข้อมูล CartoonSet100K ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่ประกอบด้วยใบหน้าคนในรูปแบบภาพการ์ตูนที่มีขนาดรูปภาพ 500x500 พิกเซล จำนวนหนึ่งแสนภาพ หรืองานของ Jin et al. (2017) ที่ใช้ DRAGAN (Deep Regret Analytic Generative Adversarial Networks) ร่วมกับการประยุกต์ใช้โครงสร้างโมเดล SRResNet เป็นส่วนประกอบในเจนเนอเรเตอร์และดิสคริมิเนเตอร์ในการสร้างเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดสำหรับเรียนรู้ที่จะสร้างหน้าตัวละครอนิเมะขึ้นมาใหม่ โดยข้อมูลรูปภาพส่วนใบหน้าตัวละครจากเกมตั้งแต่ปี 2005 ที่ได้จากเว็บไซต์จำนวน 31,255 รูปภาพ ผลลัพธ์ของการสร้างภาพพบว่าโมเดลสามารถสร้างรูปภาพได้ดีในอนิเมะที่มีผมสีบลอนด์และตาสีฟ้า แต่จะทำได้ไม่ดีนักในอนิเมะ

ที่สวมแว่นหรือมีการม้วนผม เนื่องจากเป็นคุณลักษณะที่พบได้น้อยในชุดข้อมูลที่ใช้ฝึกสอน

ในส่วนของเทคนิคที่ถูกนำเสนอเพื่อแก้ปัญหาปริมาณข้อมูลฝึกสอนที่มีน้อยเกินไปสำหรับจะใช้ฝึกสอนเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดนั้นก็มีหลากหลาย เช่น Hagiwara & Tanaka (2020) ทดลองใช้เงื่อนไขในระดับคลาส (Class condition) กับชุดข้อมูลที่น่าไปฝึกสอนซึ่งมีจำนวนน้อยไม่เพียงพอต่อการฝึกสอนด้วยเทคนิคการฝึกสอนตามปกติ ดังนั้นจึงมีการใช้เทคนิคการแบ่งกลุ่มข้อมูล (Clustering) และการเพิ่มปริมาณข้อมูลรูปภาพฝึกสอน (Data Augmentation) มาช่วยทำให้สามารถเพิ่มปริมาณข้อมูลฝึกสอนขึ้นถึง 5 เท่า จากเดิมที่มีภาพขนาด 144 x 128 พิกเซลจำนวน 4,018 ภาพก็กลายเป็น 20,090 ภาพได้ จากนั้นมีการทดลองนำภาพเหล่านี้ไปผ่านการกระบวนการสกัดฟีเจอร์ (Feature Extraction) ด้วยวิธีการต่าง ๆ แล้วนำฟีเจอร์ทั้งหมดที่คำนวณได้ไปใช้ทดลองสร้างเจนเนอเรทีฟโมเดลอีกทีหนึ่ง

Tseng et al. (2021) นำเสนอวิธีการฝึกสอนมาตรฐานสำหรับเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดภายใต้ข้อมูลที่จำกัด ในการทดลองมีการใช้ชุดข้อมูล CIFAR 10/100 และ ImageNet และทำการทดลองสร้างภาพต่าง ๆ ด้วยเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดต่างชนิดกันเพื่อสาคัดประสิทธิภาพของเทคนิคการฝึกสอนที่นำเสนอไปดังกล่าวในประเด็นที่ว่า (1) สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดภายใต้ข้อจำกัดการตั้งค่าข้อมูล และ (2) สามารถนำไปใช้กับวิธีการเสริมข้อมูลหรือวิธีการเพิ่มปริมาณข้อมูลภาพฝึกสอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานต่อไป

Ojha et al. (2021) ได้ศึกษาการสร้างเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดในลักษณะการสร้างภาพข้อตจำนวนน้อยผ่านการโต้ตอบข้ามโดเมน (Few-shot Image Generation via Cross-domain Correspondence) งานนี้กล่าวถึงปัญหาของการฝึกสอนเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดในสถานการณ์ที่โดเมนเป้าหมายมีตัวอย่างข้อมูลสำหรับฝึกสอนจำกัด ทำให้เกิดปัญหาโอเวอร์ฟิต (Overfit) ตามมาได้ง่าย เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวงานนี้เลือกใช้ประโยชน์จากโดเมนต้นทางขนาดใหญ่สำหรับการเทรนล่วงหน้า (Pretraining) บนข้อมูลที่หลากหลายและมีจำนวนมาก จากนั้นจึงทำการถ่ายโอนความหลากหลายของข้อมูลดังกล่าวจากต้นทางมาสู่เป้าหมายในลักษณะที่สามารถรักษาความเหมือนและความแตกต่างที่สัมพันธ์กันระหว่างข้อมูลโดยใช้ระยะห่างของการสูญเสียคงที่ในโดเมนข้ามแบบใหม่ (Novel Cross-Domain Distance Consistency Loss) จากผลการทดลองทั้งเชิงคุณภาพและ

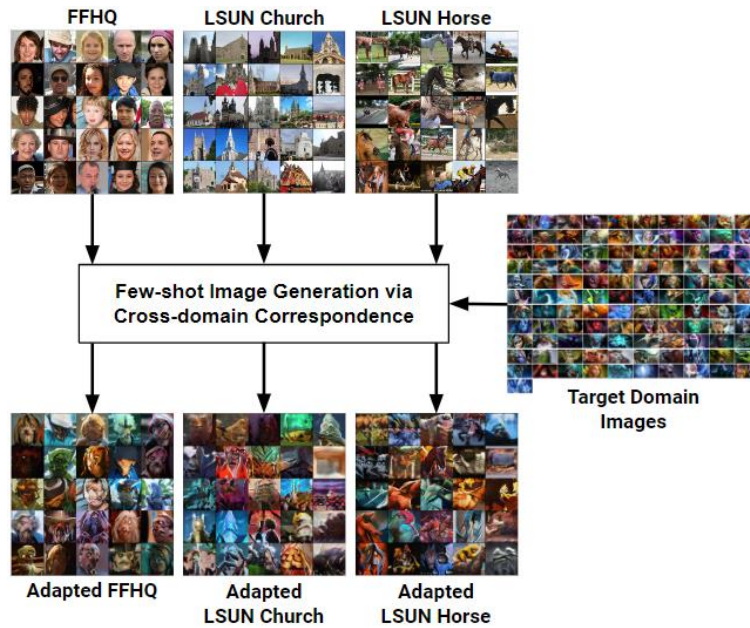
เชิงปริมาณ ผู้วิจัยได้สรุปว่าการสร้างภาพโมเดลข้อตจำนวนน้อยจะค้นหาคำตอบโดยอัตโนมัติระหว่างโดเมนต้นทางและปลายทาง และสร้างภาพที่มีความหลากหลายและสมจริงได้มากกว่าวิธีการในอดีต

จากการทบทวนวรรณกรรมที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดสามารถแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพ ประสิทธิผล และปัญหาด้านต่าง ๆ ของการประยุกต์ใช้เครือข่ายขัดแย้งกำเนิดได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังเป็นสิ่งที่สังเกตได้ว่านักวิจัยนิยมนำโมเดล StyleGAN มาใช้ในการสร้างภาพการ์ตูน ภาพมาสคอต หรือสร้างภาพบุคคลขึ้นใหม่อย่างแพร่หลาย คณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ StyleGAN ในการสร้างและออกแบบตัวละคร DOTA2 ขึ้นมาใหม่ โดยจะนำโมเดล StyleGAN ที่ถูกฝึกสอนล่วงหน้าไว้อย่างดีแล้วมาปรับปรุง และฝึกสอนเพิ่มเติมโดยใช้ภาพตัวละคร DOTA2 เพื่อปรับให้แบบจำลอง StyleGAN สามารถสร้างภาพตัวละครที่มีเอกลักษณ์ตรงตามแบบของเกม DOTA2 ได้ต่อไป ในงานวิจัยนี้เนื่องจากจำนวนภาพฝึกสอน DOTA2 ที่คณะผู้วิจัยสามารถรวบรวมมาได้มีจำนวนน้อย เพื่อป้องกันปัญหาโอเวอร์ฟิตที่อาจตามมาได้ภายหลัง ในงานวิจัยนี้จึงจะนำแนวทางแก้ปัญหาโอเวอร์ฟิตของ Ojha et al. (2021) สำหรับการสร้างภาพข้อตจำนวนน้อยผ่านการโต้ตอบข้ามโดเมน (Few-shot Image Generation via Cross-domain Correspondence) มาประยุกต์ใช้ด้วย

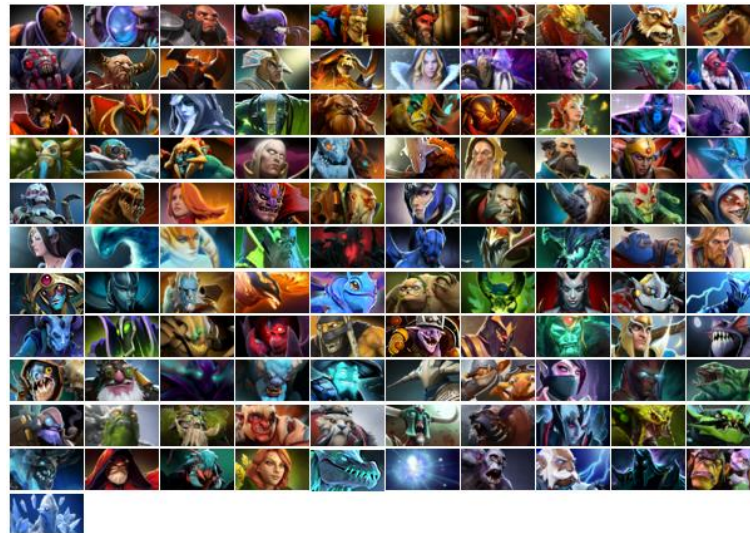
3. วิธีการทดลอง

เทคนิคการสร้างภาพจากข้อมูลฝึกสอนจำนวนน้อย (Few-shot Image Generation)

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้จากงานวิจัย (Ojha et al., 2021) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทำให้สามารถนำเจนเนอเรเตอร์ที่ถูกฝึกสอนไว้ล่วงหน้า (Pre-trained Generator) มาประยุกต์เพื่อสร้างภาพออกมาในรูปแบบที่ผู้ใช้งานต้องการได้ โดยจุดเด่นของวิธีนี้คือสามารถใช้รูปภาพฝึกสอนเพียงแค่ 1 ภาพก็สามารถสร้างผลลัพธ์ออกมาได้เป็นที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตามจำนวนรูปภาพฝึกสอนที่มากขึ้นก็จะช่วยให้ผลลัพธ์ดีขึ้นและมีความหลากหลายมากขึ้นด้วย เทคนิคที่งานวิจัยของ (Ojha et al., 2021) ใช้คือเทคนิค Cross-domain Correspondence ที่ทำให้โมเดลสามารถส่งผ่านความแตกต่างที่เกิดขึ้นในฟีเจอร์ของโดเมนต้นทาง (Source Domain) ไปยังโดเมนปลายทาง (Domain Destination) ได้ นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังพยายามทำให้การกระจายตัวของฟีเจอร์ของโดเมน



รูปที่ 1 ภาพรวมของการทดลองในงานวิจัยนี้



รูปที่ 2 รูปฮีโร่เกมส์ DOTA2 ที่ใช้ในการเรียนรู้ จำนวน 111 รูป (ที่มาของภาพจาก (AucT, 2013))

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการฝึกสอนต่อของโมเดล StyleGANv2

ที่ถูกฝึกสอนไว้ล่วงหน้า

Parameter	Value
Iteration	25000
Batch Size	4
Generated Image Size	256x256 pixel
Latent Dimension	512
Learning Rate	0.002
Augmentation	True

เป้าหมายมีลักษณะใกล้เคียงกับการกระจายตัวของพีเจอร์ของโดเมนต้นทางอีกด้วย

เทคนิคของ (Ojha et al., 2021) ต้องการอินพุต 2 อย่าง ได้แก่ (1) โมเดลที่ถูกฝึกสอนไว้ล่วงหน้า (Pre-trained Model) ซึ่งผู้วิจัยเลือกใช้เป็นโมเดล StyleGANv2 (Karras et al., 2020) และ (2) ภาพจากโดเมนเป้าหมายอย่างน้อย 1 ภาพ ซึ่งภาพโดเมนเป้าหมาย

จะเป็นภาพที่ต้องการให้โมเดลที่ถูกฝึกสอนไว้ล่วงหน้าทำการเรียนรู้และประยุกต์โมเดลไปสร้างภาพในรูปแบบของโดเมนเป้าหมายที่กำหนด หลังจากการฝึกสอนผลลัพธ์ที่ได้คือโครงข่ายส่วนของเจนเนอเรเตอร์ที่สามารถสร้างรูปภาพในลักษณะเดียวกันกับโมเดลที่ถูกฝึกสอนไว้ล่วงหน้า แต่มีการประยุกต์ในโดเมนเป้าหมายที่ต้องการให้เรียนรู้เพิ่มเข้าไปด้วย เช่น กำหนดโมเดลที่ถูกฝึกสอน

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์ที่ได้จาก Adapted Generator ของโมเดล FFHQ, LSUN Church และ LSUN Horse ตั้งแต่ Iteration ที่ 0 ถึง 10,000

Iteration	Model FFHQ	Model LSUN Church	Model LSUN Horse
0			
5000			
10000			

ไว้ล่วงหน้าเป็นโมเดลที่ถูกฝึกสอนไว้สำหรับสร้างภาพใบหน้าคน และกำหนดภาพโดเมนเป้าหมายคือรูปภาพใบหน้าคนในสไตล์ของศิลปิน A ผลลัพธ์ที่ได้จากการฝึกสอนโมเดล คือ โมเดลที่สามารถสร้างรูปภาพใบหน้าคนในรูปแบบและสไตล์การวาดของศิลปิน A ได้ โดยยังคงรักษาโครงสร้างใบหน้าที่สำคัญจากโมเดลที่ถูกฝึกสอนไว้ล่วงหน้าได้และไม่เกิดการโอเวอร์ฟิตกับภาพโดเมนเป้าหมายที่กำหนดให้เรียนรู้ แม้ว่าภาพที่ใช้ฝึกสอนจะมีรูปภาพเพียง 1 ภาพก็ตาม

เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านจำนวนรูปภาพของฮีโร่ในเกม Dota2 ที่มีจำนวนไม่มาก ในการศึกษาครั้งนี้คณะผู้วิจัยจึงนำเทคนิค Few-shot Image Generation via Cross-domain Correspondence (Ojha et al., 2021) มาใช้กับโมเดลที่ถูกฝึกสอนไว้ล่วงหน้าด้วย โดยงานวิจัยนี้จะทำการฝึกสอนและเปรียบเทียบผลลัพธ์การสร้างภาพฮีโร่ของเกม Dota2 จากผลลัพธ์ของโมเดลที่ถูกฝึกสอนไว้ล่วงหน้าเริ่มต้นที่แตกต่างกัน 3 โมเดลซึ่งทั้งหมดเป็น

โมเดลสถาปัตยกรรมของ StyleGANv2 ได้แก่ (1) โมเดล FFHQ (Flickr-Faces-HQ) ที่ใช้สำหรับสร้างภาพใบหน้าคน (2) โมเดล LSUN (Large-scale Scene Understanding) Church ที่ใช้สำหรับสร้างภาพโบสถ์ และ (3) โมเดล LSUN Horse ที่ใช้สำหรับสร้างภาพม้า โดยผู้วิจัยกำหนดให้โมเดลที่ถูกฝึกสอนล่วงหน้ามาบนชุดข้อมูลที่แตกต่างกันเหล่านี้ ถูกนำมาฝึกสอนต่อยอดโดยมีภาพโดเมนเป้าหมายร่วมกันคือรูปภาพฮีโร่ Dota2 จำนวน 111 ภาพ ทั้งนี้โมเดลทุกประเภทจะถูกกำหนดเงื่อนไขพารามิเตอร์ในการเรียนรู้ และรูปภาพโดเมนเป้าหมายที่เหมือนกันทุกประการ แตกต่างกันเพียงโมเดลที่ถูกฝึกสอนไว้ล่วงหน้าที่ไม่เหมือนกันเท่านั้น

รูปภาพที่ 1 สรุปภาพรวมของการทดลองในงานวิจัยนี้ เมื่อโมเดล FFHQ โมเดล LSUN Church และโมเดล LSUN Horse หมายถึงโมเดล StyleGANv2 เริ่มต้นที่ถูกฝึกสอนไว้ล่วงหน้าบนภาพถ่ายที่ไม่ใช่ภาพการ์ตูนและไม่เกี่ยวข้องกับตัวละคร Dota2 แต่อย่างใด ซึ่งโมเดลเริ่มต้น

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์ที่ได้จาก Adapted Generator ของโมเดล FFHQ, LSUN Church และ LSUN Horse ตั้งแต่ Iteration ที่ 15,000 ถึง 25,000 ต่อเนื่องจากตารางที่ 2

Iteration	Model FFHQ	Model LSUN Church	Model LSUN Horse
15000			
20000			
25000			

ทั้งสามนี้จะถูกงานวิจัยนี้นำมาฝึกสอนต่อด้วยรูปภาพฮีโร่ DOTA2 จำนวน 111 รูป (Target Domain Images) ด้วยวิธี Few-shot Image Generation via Cross-domain Correspondence ด้วยการกำหนดค่าและเงื่อนไขพารามิเตอร์ในการเรียนรู้ดังแสดงในตารางที่ 1 ทำให้ได้ผลลัพธ์ของการฝึกสอนเป็นโมเดลใหม่ 3 ตัวชื่อโมเดล Adapted FFHQ โมเดล Adapted LSUN Church และโมเดล Adapted LSUN Horse ที่ต่างก็สามารถสร้างภาพตัวละครฮีโร่ในเกม DOTA2 ออกมาได้

ชุดข้อมูล (Dataset)

ในงานวิจัยนี้รูปภาพใบหน้าตัวละครฮีโร่ของเกมส DOTA2 ขนาด 256x144 พิกเซล จำนวน 111 รูป (AucT, 2013) ดังตัวอย่างแสดงในภาพที่ 2 จะถูกกำหนดให้เป็นภาพโดเมนเป้าหมายสำหรับให้โมเดลทั้ง 3 โมเดลที่ถูกฝึกสอนไว้ล่วงหน้าใช้ในการเรียนรู้ โดยรูปภาพจำนวน 111 รูปถือว่าเป็นจำนวนที่มากพอสำหรับการประยุกต์ใช้ในการฝึกสอนต่อจากโมเดลที่ถูก

ฝึกสอนไว้ล่วงหน้าโดยใช้เทคนิค Cross-domain Correspondence อ้างอิงจากการทดลองในงานวิจัย (Ojha et al., 2021) ที่พบว่าจำนวนรูปภาพโดเมนเป้าหมายจำนวน 10 ภาพ ก็ให้ผลลัพธ์ที่น่าประทับใจแล้ว

การทดลองเชิงเปรียบเทียบ (Comparative Experiment)

เหตุผลที่ผู้วิจัยทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากโมเดลเริ่มต้น 3 ตัวซึ่งถูกฝึกสอนมาให้สร้างภาพต่างชนิดกันอย่างชัดเจน ได้แก่ โมเดล FFHQ ที่สร้างภาพใบหน้าคน โมเดล LSUN Church ที่สร้างภาพโบสถ์ และโมเดล LSUN Horse ที่สร้างภาพม้า นั้น เพราะต้องการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการประยุกต์โมเดลที่เป็นตัวแทนของส่วนประกอบหลักที่สำคัญในเกมที่ต่างกันว่า จะมีผลลัพธ์เป็นอย่างไร สามารถสร้างส่วนประกอบต่างประเภทในเกมได้ครบถ้วนหรือไม่ กล่าวคือ โมเดล FFHQ เป็นตัวแทนของคนหรือฮีโร่ในเกมส โมเดล LSUN Church เป็นตัวแทนของสิ่งก่อสร้างในเกมส เช่น บ้าน

ร้านค้า หรือป้อมปราการ และโมเดล LSUN Horse เป็นตัวแทนของสัตว์ในเกมส์ เช่น สัตว์ที่ใช้ส่งไอเทมหรือสัตว์ที่เป็นยานพาหนะของฮีโร่บางประเภท ทั้งนี้การทดลองในงานวิจัยนี้ถูกทำบนแพลตฟอร์ม Google Colab Pro ที่ใช้ฮาร์ดแวร์คือ CPU: Intel® Xeon® CPU@2.00GHz, GPU: Tesla P100, RAM: 13GB

4. ผลการทดลอง

ในการศึกษานี้จะแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างภาพโดยโครงข่ายส่วนของเจนเนอเรเตอร์ซึ่งอยู่ภายในโมเดลที่ผ่านการเรียนรู้ด้วยวิธี Few-shot Image Generation via Cross-domain Correspondence (Ojha et al., 2021) ตามโดเมนเป้าหมายซึ่งก็คือภาพฮีโร่ DOTA2 จำนวน 111 ภาพ โดยมีโมเดลต้นแบบคือ StyleGANv2 ที่ถูกฝึกสอนล่วงหน้าไว้บนชุดข้อมูลที่ต่างกัน 3 โมเดลตามที่ได้กล่าวไปในหัวข้อก่อนหน้านี้ โดยจะแสดงผลลัพธ์ทุก ๆ 5,000 รอบ (Iteration) ของการฝึกสอนเริ่มตั้งแต่รอบที่ 0 ที่โมเดลยังไม่มีการเรียนรู้ต่อยอดจากเดิม จนกระทั่งถึงรอบที่ 25,000 โดยผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 2 และ 3 ต่อเนื่องกัน

การเปรียบเทียบเชิงปริมาณ (Quantitative comparison)

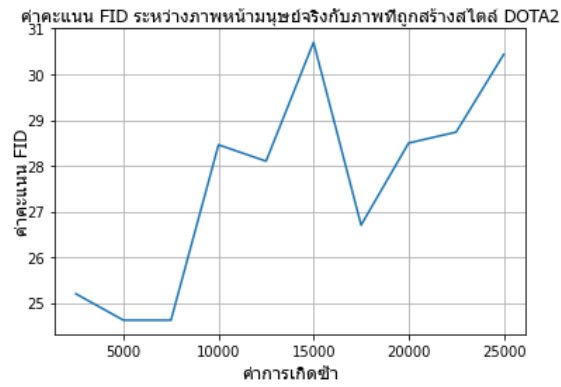
จากภาพผลการทดลองในตารางที่ 2 และ 3 พบว่าโมเดลที่ประยุกต์มาจากโมเดล FFHQ สามารถดัดแปลงส่วนตาและจมูกของคน มาเป็นตาและจมูกของฮีโร่ได้อย่างถูกต้อง แต่ส่วนปากจะถูกลบออกไป ในส่วนผลลัพธ์ที่ประยุกต์มาจากโมเดล LSUN Church แสดงให้เห็นว่าจำนวนภาพที่ถูกสร้างออกมาจะสามารถระบุร่างโบสถ์ไว้ได้เพียงครั้งหนึ่ง และยิ่งพบว่าโมเดลพยายามแทนที่หน้าต่างของโบสถ์ด้วยดวงตาของฮีโร่ และส่วนผลลัพธ์ที่ประยุกต์มาจากโมเดล LSUN Horse ก็มีผลลัพธ์ใกล้เคียงกันกับโมเดลจาก LSUN Church กล่าวคือภาพผลลัพธ์ที่ถูกสร้างออกมาจะสามารถระบุร่างม้าไว้ได้เพียงครั้งหนึ่ง ทั้งนี้รูปภาพที่โมเดลทั้งสามสร้างออกมาจะมีสีที่ค่อนข้างเข้มและสด ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันกับรูปภาพของฮีโร่เกมส์ DOTA2 ที่กำหนดให้โมเดลทำการเรียนรู้นั่นเอง กล่าวได้ว่า ผู้วิจัยสามารถประยุกต์เทคนิคการเรียนรู้ตามแนวทางของ Ojha et al. (2021) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทำให้เจนเนอเรเตอร์ที่ถูกฝึกสอนไว้ล่วงหน้าไม่เกิดโอเวอร์ฟิตมาสร้างภาพตัวละคร DOTA2 ได้เป็นผลสำเร็จ

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังทำการประเมินผลลัพธ์เชิงปริมาณด้วยเมตริก (Frechet Inception Distance (FID)(Heusel et al., 2017)) ซึ่งเป็นตัวเลขคะแนนที่นิยมใช้ในการประเมินคุณภาพของภาพสังเคราะห์ในงานสังเคราะห์ภาพ โดย FID จะคำนวณระยะห่างระหว่างฟีเจอร์เวกเตอร์ (Feature) ของภาพจริงเปรียบเทียบกับฟีเจอร์เวกเตอร์ของภาพที่ถูกสร้างหรือสังเคราะห์ขึ้น ค่า FID ยิ่งน้อยยิ่งบ่งบอกถึงคุณภาพของภาพที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาว่าสูงกว่าหรือเทียบเท่ากับคุณภาพของภาพจริง ภาพที่ 3 ถึง 5 แสดงผลลัพธ์ของ FID เปรียบเทียบระหว่างชุดข้อมูลที่ใช้ฝึกสอนโมเดลตั้งต้นกับชุดข้อมูลภาพสังเคราะห์สไตส์ DOTA2 ที่งานวิจัยนี้สร้างขึ้น มา จากภาพจะเห็นว่าค่าคะแนน FID ของแต่ละโมเดลนั้นมีช่วงค่า FID ต่ำสุดแตกต่างกันไป โดยโมเดล FFHQ มีค่า FID ต่ำสุดในช่วงการฝึกสอนรอบที่ 5,000 ในขณะที่โมเดล LSUN Church และโมเดล LSUN Horse มีค่า FID ต่ำสุดที่การฝึกสอนรอบที่ 12,500 และ 7,500 ตามลำดับ

การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพ (Qualitative comparison)

สำหรับการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพ ผู้วิจัยได้นำภาพที่ถูกสร้างขึ้นจากทั้ง 3 โมเดลไปให้ผู้เล่นเกม DOTA2 ประเทศไทยจำนวน 12 ท่านประเมิน โดยผู้เล่นทั้ง 12 ท่านนี้มีประสบการณ์การเล่น DOTA2 อย่างต่ำหนึ่งปีขึ้นไป และอยู่ในกลุ่ม Facebook ชื่อ DOTA2 Thailand ซึ่งเป็นกลุ่มที่รวบรวมผู้เล่นที่มีความชอบและสนใจในเกม DOTA2 ทั้งนี้ในการประเมินผู้เข้าร่วมการประเมินจะได้รับชมภาพจากแต่ละโมเดล โมเดลละ 25 ภาพ รวมทั้งหมด 75 ภาพ โดยไม่ทราบภาพนั้น ๆ ถูกสร้างขึ้นจากโมเดลใด จากนั้นจะมีคำถามทั้งหมด 6 คำถามเพื่อให้ผู้เข้าร่วมการประเมินตอบเพื่อพิจารณาภาพที่ถูกสร้างขึ้นในหัวข้อต่าง ๆ

โดยผลสรุปคะแนนเฉลี่ยในด้านความสวยงาม (ภาพที่ 6) พบว่าโมเดล LSUN Church ได้คะแนนเฉลี่ยสูงสุด 7.17 ตามด้วยโมเดล FFHQ ที่คะแนน 7.08 และ โมเดล LSUN Horse ที่คะแนน 6.67 คะแนนตามลำดับ ส่วนในด้านความคมชัด (ภาพที่ 7) พบว่าผลคะแนนเฉลี่ยเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ โมเดล LSUN Church ได้ 8.17 โมเดล FFHQ ได้ 8.08 และโมเดล LSUN Horse ได้ 7.83 สุดท้ายคะแนนเฉลี่ยด้านความมีกลิ่นไอ DOTA2 (ภาพที่ 8) พบว่า โมเดล FFHQ ได้คะแนนเฉลี่ยสูงสุด 8.33 ตามด้วยโมเดล LSUN Church ที่คะแนน 7.42 และ โมเดล LSUN Horse ที่คะแนน 7.33 ตามลำดับ



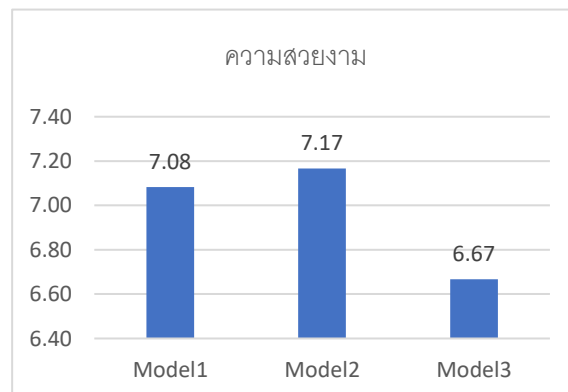
รูปที่ 3 ค่าคะแนน FID (แกนตั้ง) ที่การฝึกสอนรอบต่าง ๆ (แกนนอน) เปรียบเทียบระหว่างภาพหน้ามนุษย์จริงกับภาพที่อุกสร้างขึ้นในสไตส์ DOTA2



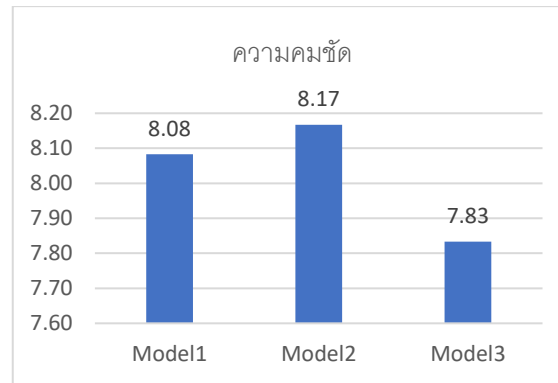
รูปที่ 4 ค่าคะแนน FID (แกนตั้ง) ที่การฝึกสอนรอบต่าง ๆ (แกนนอน) เปรียบเทียบระหว่างภาพโบสถ์จริงกับภาพที่อุกสร้างขึ้นในสไตส์ DOTA2



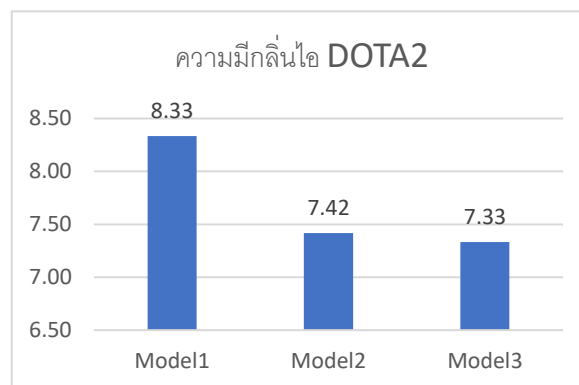
รูปที่ 5 ค่าคะแนน FID (แกนตั้ง) ที่การฝึกสอนรอบต่าง ๆ (แกนนอน) เปรียบเทียบระหว่างภาพม้าจริงกับภาพที่อุกสร้างขึ้นในสไตส์ DOTA2



รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ยคะแนนความสวยงาม (คะแนนเต็ม 10) ของภาพตัวละคร DOTA2 ที่สร้างขึ้นที่สร้างขึ้นโดยโมเดล FFHQ (Model1) โมเดล LSUN Church (Model2) และโมเดล LSUN Horse (Model3)



รูปที่ 7 ค่าเฉลี่ยคะแนนความคมชัด (คะแนนเต็ม 10) ของภาพตัวละคร DOTA2 ที่สร้างขึ้นที่สร้างขึ้นโดยโมเดล FFHQ (Model1) โมเดล LSUN Church (Model2) และโมเดล LSUN Horse (Model3)



รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยของคะแนนความมีกลิ่นไอ DOTA2 (คะแนนเต็ม 10) ของภาพตัวละคร DOTA2 ที่สร้างขึ้นที่สร้างขึ้นโดยโมเดล FFHQ (Model1) โมเดล LSUN Church (Model2) และโมเดล LSUN Horse (Model3)

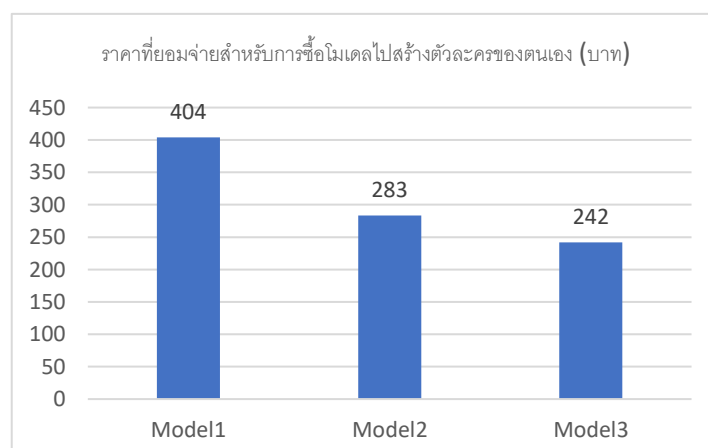


ตัวละครใหม่

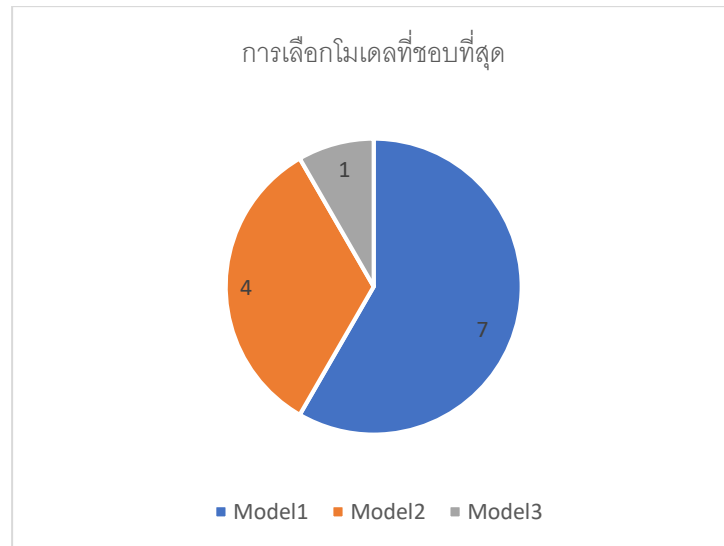
Grimstroke

Axe

รูปที่ 9 ตัวอย่างภาพตัวละครที่ถูกสร้างขึ้นใหม่จากโมเดล FFHQ ที่มีความใกล้เคียงกับตัวละคร Grimstroke และ Axe ที่มีอยู่แล้วในเกม DOTA2



รูปที่ 10 ราคาที่ยอมจ่ายสำหรับการซื้อโมเดลเพื่อไปใช้สร้างตัวละครของตนเอง สำหรับโมเดล FFHQ (Model1) โมเดล LSUN Church (Model2) และโมเดล LSUN Horse (Model3)



รูปที่ 11 การเลือกโมเดลที่ชอบที่สุดในภาพรวมระหว่างโมเดล FFHQ (Model1) โมเดล LSUN Church (Model2) และโมเดล LSUN Horse (Model3)

ทั้งนี้จากการสัมภาษณ์เพิ่มเติมพบว่าผู้เข้าร่วมการทดสอบส่วนใหญ่เห็นตรงกันว่าเมื่อได้เห็นภาพที่ถูกสร้างขึ้นจากโมเดล FFHQ สามารถรู้ได้ในทันทีว่าเป็นภาพจากเกม DOTA2 เช่น แม้จะเป็นภาพของตัวละครใหม่ที่ไม่เคยผ่านการทดลองไม่รู้จำมาก่อน อย่างตัวละครใหม่สีแดงที่ถูกสร้างขึ้นในภาพที่ 9 (ซ้าย) ผู้เข้าร่วมการทดสอบจำนวน 7 จาก 12 ท่านก็ยังให้ความเห็นระบุลงมาได้ว่าตัวละครใหม่นี้มีความใกล้เคียงกันกับตัวละครชื่อ Grimstroke และ Axe ซึ่งเป็นตัวละครที่มีอยู่แล้วในเกม DOTA2

ในส่วนขอราคาจากผู้เข้าร่วมการทดลองจะยอมจ่ายเพื่อซื้อโมเดลไปสร้างตัวละครของตนเองนั้น พบว่าโมเดล FFHQ มีราคาจากผู้เข้าร่วมการทดสอบยอมจ่ายเฉลี่ยสูงที่สุด 404 บาท ตามมาด้วยโมเดล LSUN Church ในราคา 283 บาท และโมเดล LSUN Horse ในราคา 242 บาท แสดงถึงภาพที่ 10 ทั้งนี้จากการสอบถามเหตุผลเพิ่มเติมจากผู้เข้าร่วมการทดลองแจ้งว่าต้องการนำโมเดลไปใช้สร้างภาพตัวละคร DOTA2 จากใบหน้าของตัวเอง หรือนำไปใช้สร้างภาพวาดจากผู้ชม (Fanart) เสียเป็นส่วนใหญ่

สุดท้ายในการประเมินโดยภาพรวมว่าภาพของโมเดลใดที่ผู้เข้าร่วมการทดลองชอบมากที่สุด พบว่าโมเดล FFHQ มีผู้เข้าร่วมการทดสอบชอบมากที่สุดทั้งหมด 7 คน ตามด้วยโมเดล LSUN Church จำนวน 4 คน และ โมเดล LSUN Horse จำนวน 1 คนตามลำดับ โดยปัจจัยหลักที่ตัดสินใจเลือกมาจากความมีกลิ่นไอของ DOTA2 เป็นสำคัญ ดังภาพที่ 11 ทั้งนี้ในการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยพบว่าผู้เข้าร่วมการทดลองมีความชื่นชอบและตื่นเต้นที่จะได้สร้างตัวละคร DOTA2 ขึ้นมาใหม่ด้วยตนเอง และมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมให้แก่ผู้วิจัย คือ การเพิ่มตัวเลือกใน

การระบุเพศและเผ่าพันธุ์ของตัวละครที่จะสร้างขึ้นได้ เช่น ตัวละครเพศหญิงเผ่าเอลฟ์ หรือ ตัวละครเพศชายเผ่าสัตว์ป่า เป็นต้น

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้นำเครือข่ายชดเชยกำเนิดชื่อ StyleGANv2 ที่ถูกฝึกสอนมาด้วยชุดข้อมูล 3 ชุดซึ่งแตกต่างกันมาทำการฝึกสอนต่อยอดบนชุดข้อมูลภาพฮีโร่ของเกม DOTA2 ด้วยเทคนิคการสร้างภาพชื่อจำนวนน้อยผ่านการโต้ตอบข้ามโดเมน ผลการเปรียบเทียบโมเดลทั้งสามที่ทำการทดลองพบว่าโมเดลทุกตัวสามารถสร้างภาพสีเข้มและสดที่เป็นสไตล์ของภาพตัวละครใน DOTA2 ได้ แต่ในแง่ความถูกต้องนั้นโมเดลที่ประยุกต์มาจากโมเดล FFHQ สามารถดัดแปลงส่วนตาและจมูกของคน มาเป็นตาและจมูกของฮีโร่ได้อย่างถูกต้องที่สุด แต่ส่วนปากจะถูกลบออกไป ผลการประเมินจากผู้เล่นเกม DOTA2 พบว่าโมเดลที่ต่อยอดจาก FFHQ เป็นโมเดลที่มีผู้เข้าร่วมการทดลองชื่นชอบและให้ราคาในการซื้อมากที่สุด โดยปัจจัยหลักที่ตัดสินใจเลือกมาจากความสามารถในการสร้างภาพที่มีกลิ่นไอของ DOTA2 เป็นสำคัญ อีกทั้งผู้เข้าร่วมการทดลองแสดงความสนใจในโมเดลลักษณะนี้ที่ทำให้ผู้เล่นเกมสามารถสร้างและออกแบบตัวละครในเกมได้เอง

สำหรับการทำวิจัยต่อยอดในอนาคตนั้น ผู้วิจัยคาดว่าจะทำการทดลองเพื่อหาจำนวนของรูปภาพฝึกสอนที่เหมาะสมที่สุด (Optimal number of training images) ว่าควรเป็นจำนวนเท่าไรจึงจะได้ผลลัพธ์ที่สมมูลที่สุดในปัจจัยประเมินด้านต่าง ๆ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังต้องการจะเพิ่มจำนวนของผู้เข้าร่วมการทดลองให้มากขึ้นเพื่อให้ผล

การประเมินเชิงคุณภาพสะท้อนความคิดเห็นที่แท้จริงของผู้เล่นเกม DOTA2 ส่วนใหญ่ในประเทศไทยได้ รวมถึงอาจมีการใช้เทคนิควิธีการวิจัยเชิงคุณภาพอื่นๆ เพิ่มเติม นอกจากนี้จากแบบสอบถามและการสัมภาษณ์ออนไลน์ เช่น การสัมภาษณ์เชิงลึก การอภิปรายกลุ่มย่อย เป็นต้น (Creswell & Creswell, 2018) สุดท้ายคือการทดลองใช้เงินเนอเรทิฟโมเดลตัวอื่นที่นอกเหนือจากเครือข่ายขัดแย้งกำเนิดเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง

กิตติกรรมประกาศ

กลุ่มผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้เข้าร่วมการทดลองจาก Facebook กลุ่ม DOTA2 THAILAND ทั้ง 12 ท่านเป็นอย่างสูงที่ได้สละเวลาเข้าร่วมทดสอบ แสดงความคิดเห็น และ ให้ข้อเสนอแนะที่มีคุณค่าเพื่อปรับปรุงผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้ให้ดียิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- Alghifari, I. & Halim, R. (2020). Factors that influence expectancy for character growth in online games and their influence on online gamer loyalty. *Journal of Economics, Business, & Accountancy Ventura*. 22. doi:10.14414/jebav.v22i3.1873.
- AucT. (2013). DOTA2 Hero Images. Retrieved May 15, 2022, from <https://aucT.eu/dota2-hero-images>
- Back, J. (2021). Fine-Tuning StyleGAN2 For Cartoon Face Generation. <https://arxiv.org/abs/2106.12445>
- Clement, J. (2021). Number of monthly active users (MAU) of DOTA 2 worldwide as of February 2021. Retrieved May 5, 2022, from <https://www.statista.com/statistics/607472/DOTA2-users-number>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. 5th ed. Los Angeles: SAGE.
- Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., & Bengio, Y. (2014). Generative Adversarial Nets. *Proceedings of the International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2014)*. 2672–2680.
- Grand View Research (2020). *Esports Market Size, Share & Trends Analysis Report By Revenue Source (Sponsorship, Advertising, Merchandise & Tickets, Media Rights), By Region, And Segment Forecasts, 2020 - 2027*. Retrieved May 5, 2022, from <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/esports-market#>
- Guruprasad, G., Gakhar, G., & Vanusha, D. (2020). Cartoon character generation using generative Adversarial Network. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 9 (1), 1 - 4. <https://doi.org/10.35940/ijrte.f7639.059120>
- Hagiwara, Y., & Tanaka, T. (2020). YuruGAN: Yuru-Chara Mascot Generator Using Generative Adversarial Networks With Clustering Small Dataset. <https://arxiv.org/abs/2004.08066>
- Heusel, M., Ramsauer, H., Unterthiner, T., & Nessler, B. (2017). GANs Trained by a Two Time-Scale Update Rule Converge to a Local Nash Equilibrium. *Proceedings of the International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2014)*. 6629–6640.
- Jin, Y., Zhang, J., Li, M., Tian, Y., Zhu, H., & Fang, Z. (2017). Towards the Automatic Anime Characters Creation with Generative Adversarial

- Networks. NIPS 2017 Workshop on Machine Learning for Creativity and Design. Retrieved May 1, 2022, from https://nips2017creativity.github.io/doc/High_Quality_Anime.pdf
- Karras, T., Laine, S., Aittala, M., Hellsten, J., Lehtinen, J., & Timo, A. (2020). Analyzing and Improving the Image Quality of StyleGAN. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2020*. <https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.00813>
- Karras, T., Laine, S., & Aila, T. (2021). A style-based generator architecture for Generative Adversarial Networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 43(12), 4217–4228. <https://doi.org/10.1109/tpami.2020.2970919>
- Krohn, J., Beyleveld, G., & Bassens, A. (2020). *Deep Learning Illustrated: A Visual, Interactive Guide to Artificial Intelligence*. Boston: Addison-Wesley.
- Tuomas Kynkäänniemi, Tero Karras, Miika Aittala, Timo Aila, Jaakko Lehtinen (2022). The Role of ImageNet Classes in Fréchet Inception Distance. *CoRR abs/2203.06026* (2022)
- Li, B., Zhu, Y., Wang, Y., Lin, C.-W., Ghanem, B., & Shen, L. (2021). Anigan: Style-guided generative adversarial networks for unsupervised anime face generation. *IEEE Transactions on Multimedia*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/tmm.2021.3113786>
- Ojha, U., Li, Y., Lu, J., Efros, A., Lee, J., Shechtman, E., & Zhang, R. (2021). Few-shot Image Generation via Cross-domain Correspondence. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 10743–10752.
- Park, Bong-Won & Lee, Kun Chang. (2011). Exploring the value of purchasing online game items. *Computers in Human Behavior*, 27(6). <https://doi.org/10.1016/j.chb.2011.06.013>.
- Tseng H., Jiang L., Liu C., Yang M., & Yang W. (2021) Regularizing Generative Adversarial Networks under Limited Data. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 7917–7927. doi: 10.1109/CVPR46437.2021.00783
- Vavilala, V., & Forsyth, D. (2022). Controlled GAN-based creature synthesis via a challenging game art dataset – addressing the noise-latent trade-off. 2022 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). <https://doi.org/10.1109/wacv51458.2022.00019>

การขยายพันธุ์ในหลอดทดลองของต้นมณีกาญจน์
(*Curcuma lithophila* ŠkorniČk. & Soonthornk.)
พืชเฉพาะถิ่นของประเทศไทยซึ่งมีศักยภาพสูงต่อการใช้เป็นไม้ประดับ
***In vitro* Propagation of *Curcuma lithophila* ŠkorniČk. & Soonthornk.,**
an Endemic Species of Thailand with High Potential to be used
as Ornamental Plant

ศิริสร นาคแดง โรจนกร เชิงปัญญา พชรวรรณ สอนโยธา อัจฉรา เมืองครุฑ ทยา เจนจิตติกุล
และ งามนิจ ชื่นบุญงาม*

Sirusthon Nakdang, Rodjanacorn Chuengpanya, Patcharawan Sornyotha, Atchara Muangkroot,

Thaya Jenjittikul and Ngarmnij Chuenboonngarm*

ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

Department of Plant Science, Faculty of Science, Mahidol University

บทคัดย่อ

ต้นมณีกาญจน์ (*Curcuma lithophila* ŠkorniČk. & Soonthornk.) เป็นพืชวงศ์ขิงเฉพาะถิ่นของประเทศไทยซึ่งพบในจังหวัดกาญจนบุรีเท่านั้น พืชชนิดนี้มีศักยภาพสูงต่อการนำมาใช้เป็นไม้ตัดดอกและไม้ประดับเศรษฐกิจชนิดใหม่เนื่องจากมีก้านชูดอกยาวและช่อดอกมีสีส้มสวยงาม เหตุนี้จึงทำให้ต้นมณีกาญจน์ถูกเก็บจากแหล่งที่อยู่อาศัยตามธรรมชาติเพื่อนำมาค้าขาย ประกอบกับพื้นที่กระจายพันธุ์บางส่วนของผู้ชนิดนี้กำลังถูกรบกวนจากกิจกรรมของมนุษย์ ส่งผลให้ต้นมณีกาญจน์เป็นชนิดพันธุ์ที่กำลังถูกคุกคามและอาจสูญพันธุ์ได้ในอนาคต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาวิธีการเพิ่มปริมาณต้นมณีกาญจน์โดยใช้เทคนิคการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชเพื่อเป็นการอนุรักษ์พันธุ์พืชชนิดนี้ เมล็ดของต้นมณีกาญจน์ถูกนำมาผ่านกระบวนการฟอกฆ่าเชื้อผิวก่อนนำไปเพาะบนอาหารสังเคราะห์สูตร Murashige และ Skoog (MS) เมื่อเมล็ดงอกจนได้ยอดอ่อนในหลอดทดลองที่มีความสูง 6 – 7 เซนติเมตร จึงนำยอดปลอดเชื้อดังกล่าวมาตัดให้เหลือส่วนโคนลำต้นสูง 1.5 เซนติเมตร ก่อนนำไปเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์สูตร MS ที่มีเบนซิลอะดีนีน (N^6 -benzyladenine: BA) หรือเมตาโทปอลิน (meta-Topolin) เข้มข้น 0 – 20 ไมโครโมลาร์ นาน 8 สัปดาห์ แล้วย้ายไปเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์สูตร MS ต่ออีก 4 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่าอาหารสังเคราะห์สูตร MS ที่มี BA เข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ สามารถชักนำให้ได้จำนวนยอดใหม่สูงสุด (6.90 ยอด/ชิ้นพืช) ต้นพืชที่เจริญจากอาหารสูตรนี้มีอัตราการรอดชีวิต 100% หลังจากนำออกปลูกนอกหลอดทดลองนาน 4 สัปดาห์ ผลที่ได้จากการศึกษานี้นอกจากจะสามารถนำไปใช้อนุรักษ์พืชถิ่นเดียวชนิดนี้แล้ว ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการเพาะปลูกเชิงเศรษฐกิจซึ่งจะช่วยลดการนำพืชชนิดนี้ออกมาจากป่าหรือนำไปใช้ปรับปรุงพันธุ์ อันจะเป็นการเพิ่มมูลค่าและส่งเสริมต้นมณีกาญจน์ต่อการเป็นไม้ประดับเศรษฐกิจชนิดใหม่ของประเทศไทยต่อไป

คำสำคัญ: พืชวงศ์ขิง, พืชถิ่นเดียว, พืชมีแนวโน้มใกล้สูญพันธุ์, การขยายพันธุ์ในหลอดทดลอง, ไซโทไคนิน

ABSTRACT

Curcuma lithophila ŠkorniČk. & Soonthornk. is an endemic Zingiberaceous plant of Thailand that is found only in Kanchanaburi Province. According to its long peduncles coupled with colorful inflorescences, this plant has a high potential for becoming a new economic cut-flower or ornamental plant. For these reasons, *C. lithophila* is collected from its natural habitat for trading. In addition, some distribution areas of this plant are being disrupted by human activities, making this plant become a threatened and potentially extinct species in the future. Therefore, this research aimed to establish the propagation method using plant tissue culture to conserve this plant. Seeds of *C. lithophila* were subjected to a surface sterilization process before inoculating onto Murashige & Skoog (MS) medium. After seed germination until *in vitro* young shoots with a height of 6 – 7 cm were obtained; these axenic shoots were excised to obtain 1.5 cm high leafy-shoot bases. Then, these explants were cultured onto MS medium supplemented with 0 – 20 μM N^6 -benzyladenine (BA) or meta-Topolin for 8 weeks and later transferred to MS medium for another 4 weeks. The results revealed that MS medium supplemented with 10 μM BA produced the highest new shoots (6.90 shoots/explant). Plants regenerated

from this medium exhibited a 100% of survival rate after planting *ex vitro* for 4 weeks. These presented outcomes are not only helpful for the preservation of this endemic species but also could be applied for commercial cultivation, which will reduce the removal of plants from the forest. Moreover, it could be used for *C. lithophila* breeding, increasing its value and supporting this plant to become a new economic ornamental plant in Thailand.

KEYWORDS: Zingiberaceae, endemic plant, vulnerable plant, *in vitro* propagation, cytokinin

*Corresponding Author: ngarmnij.chu@mahidol.edu

Received: 18/04/2022; Revised: 30/10/2022; Accepted: 30/12/2022

1. บทนำ

พืชสกุลขมิ้น (*Curcuma*) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวในวงศ์ขิง (Zingiberaceae) ที่พบทั่วโลกประมาณ 120 ชนิด (Leong-Skornicková *et al.*, 2020) พืชสกุลนี้มีเขตการกระจายพันธุ์ในภูมิภาคเขตร้อน (tropical) และกึ่งเขตร้อน (sub-tropical) นับตั้งแต่เอเชียใต้ เอเชียตะวันออก บางส่วนของประเทศออสเตรเลีย และบางส่วนของหมู่เกาะโอเชียเนีย สำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นศูนย์รวมของเขตพืชพรรณที่สำคัญ 3 เขต ได้แก่ เขตพืชพรรณอินโด - พม่า (Indo-Burmese elements) พืชพรรณอินโด - จีน (Indo-Chinese elements) และพืชพรรณมาเลเซีย (Malesian elements) (Saensouk, 2011) ได้ถูกจัดให้เป็นบริเวณที่มีความหลากหลายของพืชสกุลขมิ้นสูงอีกแห่งหนึ่งของโลก (Larsen & Larsen, 2006) ปัจจุบันมีการค้นพบพืชสกุลขมิ้นในประเทศไทยไม่ต่ำกว่า 50 ชนิด (Leong-Skornicková *et al.*, 2021) อีกทั้งการสำรวจพรรณไม้เพื่อจัดทำหนังสือพรรณพฤกษชาติของไทย (Flora of Thailand) ภายในช่วงปี 2020 - 2021 นักพฤกษศาสตร์ได้พบพืชสกุลขมิ้นชนิดใหม่ของโลกซึ่งเป็นพืชที่พบเฉพาะในประเทศไทยเท่านั้น (endemic plant) มากถึง 14 ชนิด (Leong-Skornicková *et al.*, 2020; 2021; Saensouk *et al.*, 2021; Soonthornkalump *et al.*, 2021) อีกทั้งยังมีแนวโน้มที่จะค้นพบพืชชนิดใหม่ในสกุลนี้ในประเทศไทยอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการยืนยันถึงความหลากหลายของพืชสกุลนี้ในประเทศไทย

จากการที่ประเทศไทยมีความหลากหลายของพืชสกุลขมิ้นสูง จึงทำให้พืชสกุลนี้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เป็นพืชประดับ เนื่องจากช่อดอกของพืชสกุลขมิ้นมีสีสันสดใสและมีลักษณะที่สวยงามแปลกตา ซึ่งดึงดูดความสนใจจากผู้พบเห็นได้เป็นอย่างดี เหตุนี้จึงทำให้พืชสกุลขมิ้นบางชนิดถูกนำไปใช้หรือพัฒนาเป็นพืชประดับเศรษฐกิจชนิดใหม่ของประเทศไทย โดยใช้เป็นไม้ตัดดอกหรือไม้กระถาง (Wannakrairoj, 2008) ซึ่งพุ่มมา (*C. alismatifolia*)

เป็นตัวอย่างของพืชสกุลขมิ้นที่พบในประเทศไทยซึ่งมีศักยภาพเชิงพาณิชย์สูงมากบนเวทีอุตสาหกรรมไม้ประดับโลก จนได้รับการขนานนามว่า “Siam Tulip” พุ่มมาสามารถสร้างมูลค่าเป็นจำนวนเงินถึง 30 - 40 ล้านบาท/ปี (Boonkorkaew *et al.*, 2013; Wannakrairoj, 2008) อย่างไรก็ตาม ตลาดพืชประดับทั้งในหรือต่างประเทศนั้นยังต้องการพืชสายพันธุ์ใหม่หรือพืชที่มีลักษณะน่าสนใจใหม่ ๆ อยู่ตลอดเวลา เพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขันและดึงดูดความสนใจจากผู้บริโภค ดังนั้นการนำพืชพื้นถิ่น/พืชพื้นเมืองที่ยังไม่เป็นที่รู้จักแต่มีลักษณะน่าสนใจมาใช้หรือพัฒนาให้เป็นพืชประดับเศรษฐกิจ จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มศักยภาพการแข่งขันของอุตสาหกรรมไม้ประดับไทยในระดับโลก (Wannakrairoj, 2008) ซึ่งต้นมณีกาญจน์ก็เป็นพืชสกุลขมิ้นอีกชนิดที่มีศักยภาพสูงต่อการนำมาใช้เป็นพืชประดับเศรษฐกิจชนิดใหม่ของประเทศไทยเช่นกัน

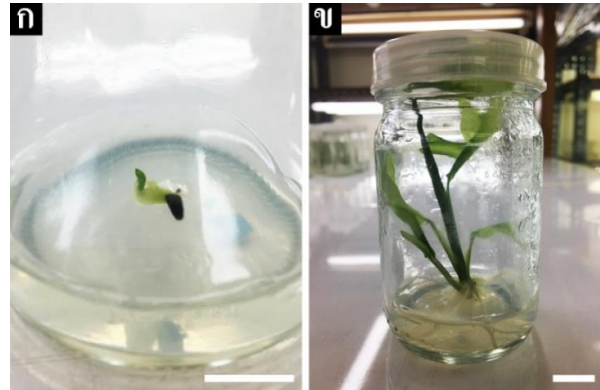
ต้นมณีกาญจน์หรือ *Curcuma lithophila* SkorniČk. & Soonthornk. นั้น มีการเก็บตัวอย่างครั้งแรกเมื่อ 90 ปีที่แล้ว โดยผู้เก็บได้เขียนระบุชื่อตัวอย่างพรรณไม้รักษาสภาพ (herbarium specimen) ไว้ว่า “กระเจียวหิน” เพื่ออิงตามลักษณะการเจริญของพืชชนิดนี้ที่พบในภูเขาหิน ต้นมณีกาญจน์มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ใกล้เคียงกันมากกับต้นบัวลาย (*Curcuma rhabdota* Sirirugsá & M.F.Newman) และต้นกระเจียวบัว (*Curcuma sparganiiifolia* Gagnep.) จึงทำให้ตัวอย่างพรรณไม้รักษาสภาพ ตลอดจนต้นพืชในธรรมชาติของต้นมณีกาญจน์ไม่ได้รับการระบุชื่อวิทยาศาสตร์ที่ถูกต้อง และกลับถูกระบุเป็นต้นบัวลายหรือต้นกระเจียวบัวมาเป็นเวลานาน อย่างไรก็ตาม แม้จะไม่ได้มีการระบุชนิดที่ถูกต้อง พืชชนิดนี้ก็ถูกนำไปใช้ในแวดวงพืชสวนและเรียกกันว่า “มณีกาญจน์” ในเวลาต่อมา โดยใช้เป็นต้นพันธุ์สำหรับปรับปรุงพันธุ์พืชหรือผลิตไม้ตัดดอกพันธุ์ผสม เนื่องจากพืชชนิดนี้มีช่อดอกที่สวยงาม (Soonthornkalump *et al.*, 2021; Wannakrairoj, 1996) จากการศึกษาเพิ่มเติม

ของ Soonthornkalump *et al.* (2021) ที่ได้ศึกษาทั้งจากพรรณไม้รักษาสภาพและต้นพืชในธรรมชาติ รวมถึงเปรียบเทียบเขตการกระจายพันธุ์ระหว่างต้นมณีกาญจน์ต้นบัวลาย และต้นกระเจียวบัว พบว่าต้นมณีกาญจน์มีลักษณะที่ต่างจากต้นบัวลายและต้นกระเจียวบัวหลายประการ โดยลักษณะที่ต่างไป คือ ช่อดอกของต้นมณีกาญจน์จะไม่มีใบประดับส่วนบน (coma bract) และใบประดับ (bracts) ปราศจากริ้วสีน้ำตาลแดง เกสรเพศผู้ที่มีลักษณะคล้ายกลีบดอกด้านข้าง (lateral staminodes) เป็นรูปไข่กว้าง (broadly ovate) ซึ่งมีความกว้างกว่ากลีบปาก (labellum) โดยทั้งสองส่วนนี้จะมีสีม่วงเหลืองปนแดง ต้นมณีกาญจน์มีเขตการกระจายพันธุ์แยกจากต้นบัวลายและต้นกระเจียวบัวอย่างชัดเจน โดยต้นมณีกาญจน์พบการกระจายพันธุ์เฉพาะในจังหวัดกาญจนบุรีเท่านั้น (ท่าเสา ลุ่มสุม วังกระเจา เขาน้อย และวังดง) คิดเป็นพื้นที่การกระจายพันธุ์ 387 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมบริเวณแนวเนินเขาหิน ป่าเบญจพรรณ ป่าไผ่ และป่าเหล่า (scrub forest) ที่ระดับความสูง 50 – 230 เมตร แต่ละแหล่งกระจายพันธุ์พบต้นมณีกาญจน์ประมาณ 40 – 320 ต้น พืชชนิดนี้ออกดอกในช่วงกรกฎาคม – ตุลาคม ติดเมล็ดในช่วงสิงหาคม และพักตัวในช่วงธันวาคม (Soonthornkalump *et al.*, 2021) ขณะที่ต้นบัวลายมีเขตการกระจายพันธุ์ในประเทศไทย (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) และลาว (Sirirugsa *et al.*, 2007) ส่วนต้นกระเจียวบัวมีเขตการกระจายพันธุ์ในประเทศไทย (บริเวณตะวันออกเฉียงเหนือ ตะวันออกและตะวันออกเฉียงใต้) ครอบคลุมถึงกัมพูชาและเวียดนาม (Sirirugsa *et al.*, 2007; Tran *et al.*, 2019) จากข้อมูลทั้งหมดข้างต้น ต้นมณีกาญจน์จึงสมควรถูกระบุเป็นพืชชนิดใหม่ โดยได้รับคำระบุชนิด (specific epithet) เป็น lithophila ซึ่งมาจากคำภาษากรีกสองคำ คือ litho อันแปลว่า “หิน” และ philus อันแปลว่า “ซึ่งรักใคร่” เพื่อสื่อถึงลักษณะการเจริญของพืชชนิดนี้ที่สามารถเจริญได้ในแนวเนินเขาหิน (Soonthornkalump *et al.*, 2021)

ต้นมณีกาญจน์มีศักยภาพสูงต่อการใช้เป็นไม้ประดับเศรษฐกิจชนิดใหม่ เนื่องจากมีสีสันและลักษณะของช่อดอกที่สวยงามชวนดึงดูด (ภาพที่ 1ก) จึงทำให้มีศักยภาพสูงต่อการใช้ปลูกประดับสถานที่หรือปลูกชมความสวยงามในรูปแบบของไม้กระถาง ต้นมณีกาญจน์ยังมีก้านชูช่อดอกที่ยาว (ภาพที่ 1ข) ซึ่งเหมาะต่อการใช้เป็นไม้ตัดดอกอีกด้วย อย่างไรก็ตาม พืชชนิดนี้มีจำนวนต้นในธรรมชาติที่จำกัด อีกทั้งปัจจุบันยังพบว่าต้นมณีกาญจน์กำลังถูกเก็บออกจากแหล่งที่อยู่อาศัยตามธรรมชาติเพื่อนำมาขาย



รูปที่ 1 ช่อดอก (ก) และก้านชูช่อดอก (ข, ลูกศร) ของต้นมณีกาญจน์



รูปที่ 2 การงอกของต้นมณีกาญจน์เมื่อเพาะเมล็ดบนอาหารสังเคราะห์สูตร MS เป็นเวลา 12 สัปดาห์ (ก) และ 24 สัปดาห์ (ข) (บาร์ = 1 เซนติเมตร)

ประกอบกับพื้นที่การกระจายพันธุ์บางแหล่งของต้นมณีกาญจน์ไม่ได้อยู่ในเขตรักษาพันธุ์พืช จึงทำให้ถูกรบกวนจากการทำการเกษตร การพัฒนาเมือง ส่งผลให้พืชชนิดนี้ควรได้รับการประเมินสถานะเป็น “พืชที่มีแนวโน้มใกล้สูญพันธุ์” (vulnerable plant) (Soonthornkalump *et al.*, 2021) อันเป็นข้อจำกัดอย่างยิ่งต่อการนำต้นมณีกาญจน์ไปใช้ในวงกว้างหรือในระดับอุตสาหกรรมที่ต้องการพืชปริมาณมากเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของตลาดหรือผู้บริโภค ทั้งนี้ต้นมณีกาญจน์อาจสูญพันธุ์ได้หากไม่มีแนวทางการอนุรักษ์พืชชนิดนี้ ดังนั้นการศึกษาวิธีการอนุรักษ์พันธุ์ควบคู่ไปกับศึกษาวิธีการขยายพันธุ์พืชชนิดนี้ให้ได้จำนวนมากเพื่อนำไปใช้ประโยชน์โดยไม่รบกวนต้นพืชที่มีอยู่ในธรรมชาติจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งวิธีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชสามารถตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ข้างต้นได้ เพราะวิธีการดังกล่าวสามารถเพิ่มปริมาณพืชต้นใหม่ได้เป็นจำนวนมากในระยะเวลาจำกัด (George *et al.*, 2008) อีกทั้งต้นพืชที่ได้มีลักษณะตรงตามพันธุ์และมีความสมบูรณ์แข็งแรงอีกด้วย (Das *et al.*, 2010)

จากประโยชน์ข้างต้นของวิธีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช จึงทำให้เทคนิคดังกล่าวถูกนำมาใช้ขยายพันธุ์พืชสกุลขมิ้นหลายชนิดที่มีศักยภาพสูงต่อการนำมาใช้เป็นไม้ประดับ เช่น *C. aeruginosa* (Khumaida *et al.*, 2019) *C. amada*

(Das et al., 2010) *C. angustifolia* (Shukla et al., 2007) *C. caesia* (Bharalee et al., 2005) *C. soloensis* (Zhang et al., 2011) *C. xanthorrhiza* (Kusumastuti et al., 2014) และ *C. zedoaria* (Bharalee et al., 2005) หรือใช้เป็นกรรมวิธีเพื่ออนุรักษ์พันธุ์พืชสกุลขมิ้นที่จัดเป็นพืชหายากหรือชนิดพันธุ์ถูกคุกคาม เช่น *C. candida* (Chuengpanya et al., 2019) *C. inodora* (Yusuf et al., 2007) *C. karnatakensis* (Shanthala et al., 2020) และ *C. malabarica* (Tyagi et al., 2004) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบรายงานการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อของต้นมณีกาญจน์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาแรกที่หาวิธีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อของพืชมีค่าชนิดนี้

สารควบคุมการเติบโตของพืช (plant growth regulator) เป็นองค์ประกอบของอาหารสังเคราะห์สำหรับการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชที่ถูกศึกษามากที่สุด เนื่องจากสารดังกล่าวมีผลควบคุมให้ต้นพืชมีการเจริญและพัฒนาไปในทิศทางที่ผู้เพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชต้องการ ไซโทไคนินเป็นกลุ่มสารที่ถูกนำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชสกุลขมิ้นอย่างแพร่หลาย เพราะ ไซโทไคนินสามารถกระตุ้นการแบ่งเซลล์ การชักนำให้เกิดยอดใหม่ ทำลายกระบวนการพักตัวของตา ช่วยสังเคราะห์โปรตีน RNA และคลอโรฟิลล์ กระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ต่าง ๆ และมีส่วนร่วมต่อการควบคุมและพัฒนาของอวัยวะใหม่ (George et al., 2008) ไซโทไคนินยังมีบทบาทส่งเสริมกระบวนการสังเคราะห์แสง (Catský et al., 1996; Fuadi et al., 2014) มีผลให้การแบ่งเซลล์สามารถเกิดได้นานขึ้น (Skalák et al., 2019) เบนซิลอะดีนีน (N^6 -benzyladenine: BA) เป็นไซโทไคนินที่ถูกนำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชสกุลขมิ้นอย่างแพร่หลาย (Chuengpanya et al., 2019; Khumaida et al., 2019; Kusumastuti et al., 2014; Sharmin et al., 2013; Shanthala et al., 2020; Shukla et al., 2007; Yusuf et al., 2007; Tyagi et al., 2004) เนื่องจากเมื่อต้นพืชดูดซึม BA เข้าไป จะส่งผลให้ต้นพืชเกิดการสะสมสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์ไซโทไคนินในปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้ปริมาณไซโทไคนินภายในต้นพืช (endogenous cytokinin) เพิ่มขึ้น โดยจะส่งผลต่อการเกิดยอดต่อไป (Auer et al., 1999) อีกทั้งยังมีรายงานว่าพืชไม่มีเนื้อไม้ (herbaceous plant) สามารถตอบสนองต่อ BA ได้ดี โดยสามารถเจริญให้ยอดและรากที่แข็งแรง (Debergh & Zimmerman, 1991) ซึ่งพืชสกุลขมิ้นก็จัดเป็นพืชไม่มีเนื้อไม้เช่นกัน และอาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ BA ถูกนำมาใช้ขยายพันธุ์พืชสกุลขมิ้นอย่างแพร่หลาย

เมตาโทพอลิน (meta-Topolin: mT) เป็นไซโทไคนินที่พบครั้งแรกจากใบของต้นปอปลาร์ (poplar tree) ซึ่งออกฤทธิ์ความเป็นไซโทไคนินได้สูง (Strnad et al., 1997) งานวิจัยการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชหลายรายงานพบว่า mT ทำให้ขึ้นพืช (explant) หรือเนื้อเยื่อพัฒนาเป็นยอดใหม่ได้ดีกว่าไซโทไคนินชนิดอื่น ๆ (Elayaraja et al., 2019; Erisen et al., 2020; Khanam et al., 2020; Kumari et al., 2017) ทั้งยังช่วยลดผลไม่พึงประสงค์ของไซโทไคนินต่อต้านพืชในหลอดทดลอง เช่น อาการจ้ำน้ำ (Abdouli et al., 2022) และการตายของเนื้อเยื่อปลายยอด (shoot tip necrosis) (Teixeira da Silva et al., 2020) เป็นต้น นอกจากนี้ รายงานการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชวงศ์ขิงบางชนิด เช่น ต้นมหาหงส์ (*Hedychium coronarium*) พบว่า การใช้ mT เป็นสารควบคุมการเติบโตส่งผลให้เกิดยอดใหม่ได้ดีกว่าการใช้ BA ทั้งยังช่วยลดผลกระทบของไซโทไคนินต่อการชักนำให้เกิดรากใหม่อีกด้วย (Behera et al., 2019) ดังนั้น ผลของ mT ต่อการขยายพันธุ์ต้นมณีกาญจน์ในหลอดทดลองจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจศึกษาอย่างยิ่ง

จากข้อมูลข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ และศึกษาผลของ BA และ mT ต่อการเจริญของพืช เพื่อพิจารณาใช้เป็นสูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการขยายพันธุ์ต้นมณีกาญจน์ ผลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นวิธีเพื่ออนุรักษ์พันธุ์ หรือนำไปใช้เพื่อสนับสนุนต้นมณีกาญจน์ให้เป็นพืชประดับเศรษฐกิจชนิดใหม่ด้วยการเพิ่มปริมาณต้นให้ได้จำนวนมาก หรือนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นเพื่อสนับสนุนการศึกษาด้านการปรับปรุงพันธุ์ อันจะเป็นการเพิ่มมูลค่าของพืชชนิดนี้ต่อไป

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 การฟอกฆ่าเชื้อผิวเมล็ด การเพิ่มปริมาณพืชทดลอง และสภาวะที่ใช้การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ

เมล็ดของต้นมณีกาญจน์จากจังหวัดกาญจนบุรี ถูกนำมาล้างให้สะอาดก่อนจุ่มลงในเอทานอลเข้มข้น 70% (ปริมาตร/ปริมาตร) นาน 1 นาที จากนั้นนำเมล็ดไปฟอกฆ่าเชื้อผิวด้วยน้ำกลั่นที่ผสมคลอรีน (Clorox®, USA) เข้มข้น 20% และ 15% (ปริมาตร/ปริมาตร) นานอย่างละ 15 นาที ตามลำดับ ก่อนนำเมล็ดไปล้างด้วยน้ำกลั่นจำนวน 3 ครั้ง นาน 5 นาที/ครั้ง เมล็ดที่ผ่านการฟอกฆ่าเชื้อผิวแล้วถูกเพาะลงบนอาหารสังเคราะห์สูตร Murashige และ Skoog

(Murashige & Skoog, 1962) บันทึกผลการปนเปื้อนจากเชื้อจุลินทรีย์เมื่อเพาะเมล็ดในสภาพปลอดเชื้อครบ 1 สัปดาห์

คลอรีนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสารออกฤทธิ์สำคัญ คือ โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (sodium hypochlorite) เข้มข้น 6% (ปริมาตร/ปริมาตร) อาหารสังเคราะห์สูตร MS ที่ใช้ตลอดการศึกษานี้มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 30 กรัม/ลิตร ผงวุ้น 7.3 กรัม/ลิตร มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ที่ 5.7 – 5.8 น้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการฟอกฆ่าเชื้อผิวเมล็ดและอุปกรณ์ที่ใช้ตลอดการศึกษานี้ทำให้ปลอดเชื้อด้วยหม้อนึ่งแรงดันสูง (autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว นาน 20 นาที ขณะที่อาหารสังเคราะห์ทำให้ปลอดเชื้อด้วยกระบวนการเดียวกันแต่ใช้เวลาหนึ่งชั่วโมง นาน 15 นาที

เนื่องจากยอดปลอดเชื้อที่ได้จากการเพาะเมล็ดมีจำนวนจำกัดซึ่งไม่เพียงพอต่อการดำเนินงานวิจัยการศึกษานี้จึงเพิ่มปริมาณพืชทดลองโดยนำยอดอ่อนที่มีขนาด 6 – 7 เซนติเมตร มาตัดให้เหลือเพียงส่วนโคนลำต้นสูง 1.5 เซนติเมตร แล้วนำไปเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์สูตร MS ที่มี BA (Sigma, USA) เข้มข้น 8 ไมโครโมลาร์ นาน 8 สัปดาห์ แล้วย้ายไปเลี้ยงต่อบนอาหารสังเคราะห์สูตร MS อีก 8 สัปดาห์ (ย้ายขึ้นพืชสู่อาหารใหม่ทุก 4 สัปดาห์) ทั้งนี้สูตรอาหารและวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการพื้นฐานของห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในการเพิ่มปริมาณพืชทดลองให้เพียงพอต่อการทำงานวิจัย

เมล็ดหรือส่วนโคนลำต้นของต้นมณีกาญจน์ถูกเพาะและเลี้ยงในขวดแก้วโดยใช้ 1 เมล็ด หรือ 1 ชิ้นพืช/ขวดแก้วที่ใช้เลี้ยงพืชทดลองมีขนาด 120 มิลลิลิตร และบรรจุอาหารสังเคราะห์ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ขณะที่การชักนำให้เกิดรากใหม่และปรับสภาพต้นพืชให้พร้อมต่อการนำออกปลูกนอกหลอดทดลอง ใช้ขวดแก้วขนาด 250 มิลลิลิตร และบรรจุอาหารสังเคราะห์ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ต้นมณีกาญจน์ถูกเพาะเลี้ยงภายใต้อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และได้รับแสงเข้มข้น 37 ไมโครโมล/ตารางเมตร/วินาที จากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์สีขาวโทนเย็น (ฟิลิปส์, ประเทศไทย) นาน 16 ชั่วโมง/วัน

2.2 การศึกษาสูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการเพิ่มปริมาณต้นมณีกาญจน์ในหลอดทดลอง

ยอดอ่อนปลอดเชื้อของต้นมณีกาญจน์ที่มีความสูง 6 – 7 เซนติเมตร ถูกตัดให้เหลือเพียงส่วนโคนลำต้นสูง 1.5 เซนติเมตร แล้วนำขึ้นพืชดังกล่าวไปเลี้ยงบนอาหาร

สังเคราะห์สูตร MS ที่เสริมด้วย BA หรือ mT (PhytoTech Labs, USA) ที่ระดับความเข้มข้น 0 (ชุดควบคุม), 2, 4, 6, 8, 10, 15 และ 20 ไมโครโมลาร์ เมื่อเลี้ยงส่วนโคนลำต้นบนอาหารที่เสริมด้วยไซโทไคนินจนครบ 8 สัปดาห์ (ย้ายขึ้นพืชสู่อาหารใหม่ทุก 4 สัปดาห์) จึงย้ายขึ้นพืชไปเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์สูตร MS ที่ไม่เติมสารควบคุมการเติบโตของพืชต่ออีก 4 สัปดาห์ รวมระยะเวลาเลี้ยงขึ้นพืช 12 สัปดาห์

2.3 การปรับสภาพและนำต้นมณีกาญจน์ออกปลูกนอกหลอดทดลอง

นำต้นมณีกาญจน์ที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้ามาล้างเศษวุ้นที่ติดบริเวณรากออกด้วยน้ำเปล่า จากนั้นจึงนำต้นพืชไปปลูกลงในถุงเพาะชำซึ่งบรรจุวัสดุปลูกที่เป็นส่วนผสมระหว่างดินปลูกสำเร็จรูปและกาบมะพร้าวสับในอัตราส่วน 3:1 คลุมถุงปลูกด้วยถุงพลาสติกใส จากนั้นนำชุดปลูกไปเก็บรักษาในบริเวณที่มีการพรางแสง 40% รดน้ำต้นพืชสัปดาห์ละ 1 ครั้ง เมื่อต้นพืชออกปลูกครบ 4 สัปดาห์ จึงถอดถุงพลาสติกใสออก และบันทึกอัตราการรอดชีวิต จากนั้นนำต้นพืชที่ผ่านการปรับสภาพนี้ไปเก็บรักษาในโรงเรือนปลูกต้นไม้ของภาควิชาพฤกษศาสตร์ฯ ต่อไป

2.4 การวางแผนการทดลอง มาตรฐานการวัดข้อมูล และการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การศึกษานี้วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design) โดยใช้ 10 ชิ้นพืช/ชุดทดลอง และทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (รวม 30 ชิ้นพืช/ชุดการทดลอง) ข้อมูลจำนวนยอดและรากนับจากยอดและรากใหม่ที่เกิดขึ้นทั้งหมดในแต่ละขวดทดลอง ขณะที่ความยาวของยอดและรากวัดจากยอดและรากใหม่ที่ยาวที่สุดของแต่ละขวดทดลอง ทั้งนี้ จากการที่ลำต้นเหนือดินของพืชวงศ์ชิงเป็นลำต้นเทียมซึ่งเรียกว่า leafy-shoot (Larsen & Larsen, 2006) ดังนั้นการวัดความยาวของยอดใหม่ในการศึกษานี้จึงวัดจากส่วนโคนลำต้นไปจนถึงปลายใบที่ยาวที่สุด ข้อมูลถูกนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (one-way analysis of variance) และหากการทดสอบเอฟ (F-test) พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงนำข้อมูลไปวิเคราะห์เปรียบเทียบด้วยวิธีการ Duncan's new multiple range test (DMRT) การศึกษานี้วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม PASW Statistics 18.0 ที่ระดับ $p < 0.05$ และแสดงข้อมูลในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation: S.D.)

ตารางที่ 1 การเจริญของยอดใหม่หลังจากเลี้ยงส่วนโคนลำต้นของต้นมณีกาญจน์บนอาหารสังเคราะห์สูตร MS ที่มี BA และ mT เข้มข้นต่างกันนาน 8 สัปดาห์ ตามด้วยย้ายขึ้นพีชไปเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์สูตร MS ต่ออีก 4 สัปดาห์

ชุดการทดลอง (ไมโครโมลาร์)	จำนวนยอดใหม่/ขึ้นพีช		ความสูงของยอดใหม่ (เซนติเมตร)	
	สัปดาห์ที่ 8	สัปดาห์ที่ 12	สัปดาห์ที่ 8	สัปดาห์ที่ 12
O (ชุดควบคุม)	1.20 ± 0.42 ^F	2.20 ± 1.03 ^{D-E}	4.79 ± 1.10 ^H	11.36 ± 0.73 ^{D-E}
BA 2	2.30 ± 0.48 ^{D-E}	2.50 ± 0.53 ^{D-E}	7.82 ± 1.20 ^{B-D}	14.42 ± 0.70 ^{A-B}
BA 4	2.80 ± 0.79 ^{B-D}	3.10 ± 0.74 ^D	8.06 ± 0.39 ^{B-C}	15.20 ± 1.06 ^A
BA 6	3.10 ± 0.88 ^{B-C}	4.70 ± 1.57 ^{B-C}	8.19 ± 0.65 ^B	14.75 ± 0.95 ^{A-B}
BA 8	3.40 ± 0.52 ^B	4.50 ± 0.85 ^{B-C}	8.43 ± 0.78 ^B	12.68 ± 1.27 ^C
BA 10	4.00 ± 0.94 ^A	6.90 ± 1.45 ^A	9.37 ± 0.85 ^A	12.50 ± 0.62 ^C
BA 15	3.00 ± 0.47 ^{B-D}	5.10 ± 1.37 ^B	8.32 ± 0.51 ^B	11.46 ± 1.11 ^D
BA 20	2.70 ± 0.48 ^{C-E}	3.00 ± 0.67 ^D	7.35 ± 0.71 ^{C-E}	10.46 ± 0.52 ^E
mT 2	1.40 ± 0.52 ^F	2.00 ± 0.47 ^E	5.99 ± 0.59 ^G	14.40 ± 0.80 ^{A-B}
mT 4	1.50 ± 0.53 ^F	2.20 ± 0.42 ^{D-E}	6.52 ± 0.99 ^{E-G}	13.97 ± 0.86 ^B
mT 6	2.10 ± 0.32 ^E	2.50 ± 0.53 ^{D-E}	6.81 ± 0.79 ^{E-F}	12.95 ± 0.99 ^C
mT 8	2.30 ± 0.67 ^{D-E}	2.70 ± 0.48 ^{D-E}	7.25 ± 0.47 ^{D-E}	12.43 ± 1.52 ^C
mT 10	2.50 ± 0.53 ^{C-E}	3.00 ± 0.94 ^D	8.15 ± 1.17 ^{B-C}	11.30 ± 1.01 ^{D-E}
mT 15	2.90 ± 0.74 ^{B-C}	4.20 ± 0.79 ^C	7.98 ± 1.05 ^{B-D}	11.24 ± 0.65 ^{D-E}
mT 20	2.60 ± 0.84 ^{C-E}	2.80 ± 0.63 ^{D-E}	6.90 ± 0.32 ^{E-F}	9.11 ± 0.73 ^F
F-Test	*	*	*	*

หมายเหตุ: * แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจาก F-test ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันตามตารางแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยวิธีการ DMRT ($p < 0.05$)

ตารางที่ 2 การเจริญของรากใหม่หลังจากเลี้ยงส่วนโคนลำต้นของต้นมณีกาญจน์บนอาหารสังเคราะห์สูตร MS ที่มี BA และ mT เข้มข้นต่างกันนาน 8 สัปดาห์ ตามด้วยย้ายขึ้นพีชไปเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์สูตร MS ต่ออีก 4 สัปดาห์

ชุดการทดลอง (ไมโครโมลาร์)	จำนวนรากใหม่/ขึ้นพีช		ความยาวของรากใหม่ (เซนติเมตร)	
	สัปดาห์ที่ 8	สัปดาห์ที่ 12	สัปดาห์ที่ 8	สัปดาห์ที่ 12
O (ชุดควบคุม)	6.70 ± 1.06 ^E	12.60 ± 2.17 ^D	5.60 ± 0.39 ^C	7.47 ± 0.56 ^{D-F}
BA 2	7.80 ± 0.79 ^{B-D}	14.30 ± 1.16 ^{B-C}	6.45 ± 0.55 ^{A-B}	9.10 ± 0.46 ^A
BA 4	9.50 ± 0.53 ^A	16.30 ± 0.95 ^A	6.60 ± 0.77 ^A	8.79 ± 0.55 ^{A-B}
BA 6	10.20 ± 1.23 ^A	16.70 ± 2.75 ^A	6.25 ± 0.49 ^{A-B}	8.50 ± 0.46 ^{B-C}
BA 8	8.30 ± 0.82 ^{C-E}	14.80 ± 1.81 ^B	6.15 ± 0.41 ^{A-C}	7.80 ± 0.26 ^D
BA 10	8.00 ± 0.82 ^{B-C}	14.40 ± 2.07 ^B	5.92 ± 0.23 ^{B-C}	7.65 ± 0.41 ^{D-E}
BA 15	7.40 ± 0.97 ^{C-E}	13.40 ± 1.90 ^{B-D}	4.94 ± 0.72 ^D	7.45 ± 0.50 ^{D-F}
BA 20	7.00 ± 0.67 ^{D-E}	12.70 ± 1.34 ^{C-D}	4.19 ± 0.33 ^E	7.38 ± 0.60 ^{D-F}
mT 2	7.50 ± 0.85 ^{B-E}	14.30 ± 1.16 ^{B-C}	6.40 ± 0.66 ^{A-B}	8.65 ± 0.59 ^{B-C}
mT 4	6.70 ± 1.06 ^E	13.90 ± 2.56 ^{B-D}	5.98 ± 0.83 ^{A-C}	8.26 ± 0.58 ^C
mT 6	4.00 ± 0.82 ^{F-G}	10.80 ± 1.40 ^E	5.55 ± 1.12 ^C	8.22 ± 0.34 ^C
mT 8	3.50 ± 1.08 ^{F-G}	10.10 ± 1.20 ^{E-F}	4.91 ± 0.73 ^D	7.26 ± 0.30 ^{E-G}
mT 10	3.20 ± 0.63 ^{F-G}	9.80 ± 0.92 ^{E-F}	4.25 ± 0.79 ^E	7.08 ± 0.23 ^{F-G}
mT 15	2.70 ± 0.67 ^H	8.90 ± 0.74 ^F	3.15 ± 0.63 ^F	6.89 ± 0.31 ^G
mT 20	2.30 ± 0.82 ^{G-H}	8.60 ± 1.07 ^F	2.77 ± 0.51 ^F	5.42 ± 0.38 ^H
F-Test	*	*	*	*

หมายเหตุ: * แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจาก F-test ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันตามตารางแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยวิธีการ DMRT ($p < 0.05$)

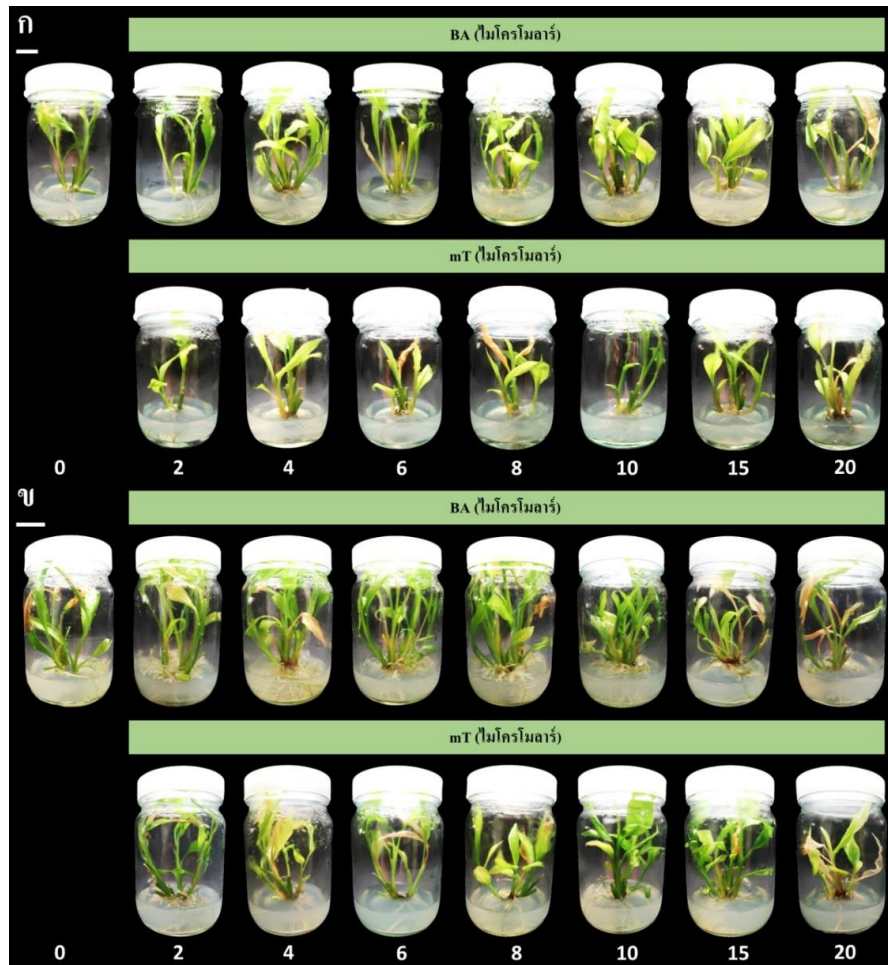
3. ผลการทดลอง

3.1 การฟอกฆ่าเชื้อผิวเมล็ด และการชักนำให้เกิดยอดอ่อนปลอดเชื้อจากเมล็ดต้นมณีกาญจน์ในหลอดทดลอง
เมื่อนำเมล็ดที่ผ่านกระบวนการฟอกฆ่าเชื้อผิวมาเพาะในสภาพปลอดเชื้อครบ 1 สัปดาห์ ไม่พบการปนเปื้อนจากเชื้อจุลินทรีย์ เมล็ดเริ่มงอกเป็นต้นกล้าขนาดเล็กเมื่อเพาะครบ 12 สัปดาห์ (รูปที่ 2ก) และพัฒนาเป็นต้นกล้าที่มีความสูง 6 – 7 เซนติเมตร เมื่อเพาะครบ 24 สัปดาห์ (รูปที่ 2ข) ซึ่งต้นกล้างัดงอมีความสมบูรณ์แข็งแรง

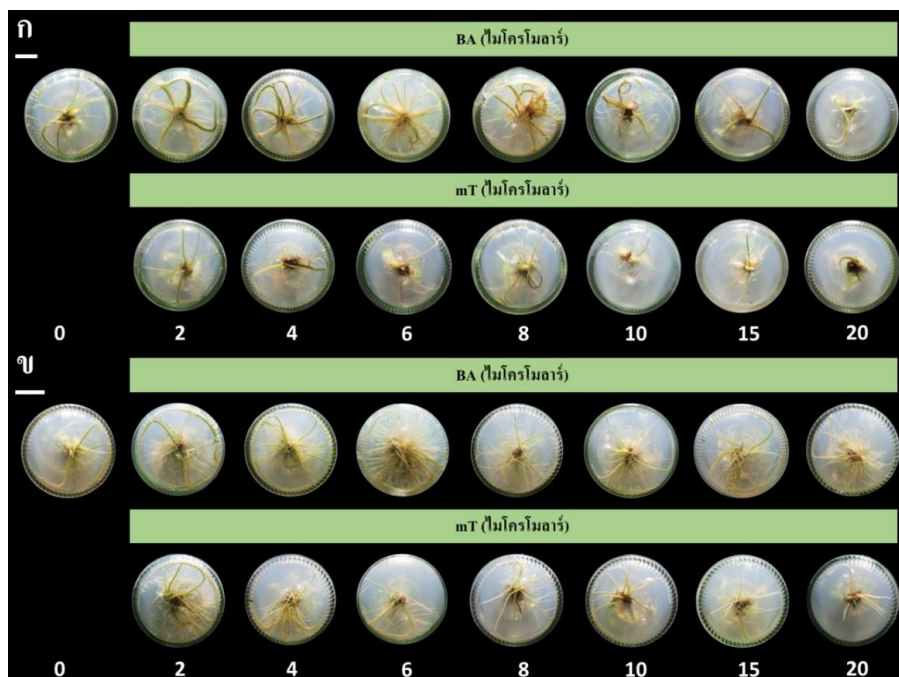
เหมาะสมต่อการนำไปใช้เพิ่มปริมาณพืชทดลองต่อไป ทั้งนี้ ในเวลา 24 สัปดาห์เมล็ดมีอัตราการงอกเพียง 30%

3.2 ผลของ BA และ mT ต่อการชักนำให้เกิดยอดใหม่ในหลอดทดลองของต้นมณีกาญจน์

หลังจากเลี้ยงขึ้นพีชนาน 8 สัปดาห์ พบว่าทุกสูตรอาหารสามารถชักนำให้เกิดยอดใหม่ได้ด้วยจำนวนและความสูงที่แตกต่างกัน ขึ้นพีชบนสูตรอาหารชุดควบคุมให้จำนวน (1.20 ยอด/ขึ้นพีช) และความสูงของยอดใหม่ (4.79 เซนติเมตร) น้อยที่สุดและมีความแตกต่างทางสถิติจากชุดการทดลองอื่น อาหารที่มี BA เข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์



รูปที่ 3 การเจริญของยอดใหม่หลังจากนำส่วนโคนลำต้นของต้นมณีกาญจน์ไปเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์สูตร MS ที่มี BA หรือ mT เข้มข้นต่างกัน นาน 8 สัปดาห์ (ก) แล้วย้ายขึ้นพืชไปเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์สูตร MS ต่ออีก 4 สัปดาห์ (ข) (บาร์ = 1 เซนติเมตร ในภาพ ก และ 2 เซนติเมตร ในภาพ ข)



รูปที่ 4 การเจริญของรากใหม่หลังจากนำส่วนโคนลำต้นของต้นมณีกาญจน์ไปเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์สูตร MS ที่มี BA หรือ mT เข้มข้นต่างกัน นาน 8 สัปดาห์ (ก) แล้วย้ายขึ้นพืชไปเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์สูตร MS ต่ออีก 4 สัปดาห์ (ข) (บาร์ = 1 เซนติเมตรในภาพ ก และ 2 เซนติเมตรในภาพ ข)

ให้การเจริญของยอดใหม่ดีที่สุดในกลุ่มอาหารที่เติม BA (จำนวนยอดใหม่ 4.00 ยอด/ชิ้นพืช, ความสูงยอดใหม่ 9.37 เซนติเมตร) สำหรับกลุ่มอาหารที่เติม mT พบว่า mT ที่ความเข้มข้น 15 และ 10 ไมโครโมลาร์ พบจำนวน (2.90 ยอด/ชิ้นพืช) และความสูงของยอดใหม่ (8.15 เซนติเมตร) มากที่สุดตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการใช้ BA และ mT ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน พบว่า BA ให้จำนวนและความสูงของยอดใหม่มากกว่า mT ในทุกความเข้มข้น (ตารางที่ 1, รูปที่ 3ก) ผลการทดลองในภาพรวมยังพบว่า BA มีค่าเฉลี่ยโดยรวมของจำนวนและความสูงยอดใหม่อยู่ที่ 3.04 ยอด/ชิ้นพืช และ 8.22 เซนติเมตร ขณะที่ mT มีค่าเฉลี่ยโดยรวมของจำนวนยอดใหม่ 2.19 ยอด/ชิ้นพืช และความสูงยอดใหม่ 7.09 เซนติเมตร

เมื่อย้ายชิ้นพืชมาเลี้ยงต่อบนอาหารสังเคราะห์สูตร MS ที่ปราศจากการเติมสารควบคุมการเติบโตนาน 4 สัปดาห์ แต่ละสูตรอาหารพบการเจริญของยอดใหม่ทั้งในด้านจำนวนและความสูงที่เพิ่มขึ้นจากสัปดาห์ที่ 8 โดยชุดควบคุมพบจำนวนยอดใหม่ 2.20 ยอด/ชิ้นพืช และยอดใหม่มีความสูง 11.36 เซนติเมตร ผลการทดลองบางส่วนยังมีความคล้ายคลึงกับในสัปดาห์ที่ 8 กล่าวคือ ผลการทดลองในกลุ่มอาหารที่เติม BA พบว่าชิ้นพืชที่เคยถูกเลี้ยงบน BA ที่ระดับความเข้มข้น 10 และ 4 ไมโครโมลาร์ ให้จำนวน (6.90 ยอด/ชิ้นพืช) และความสูง (15.20 เซนติเมตร) ของยอดใหม่สูงสุดในสูตรอาหารกลุ่มนี้ตามลำดับ ขณะที่ชิ้นพืชซึ่งเคยถูกเลี้ยงบนอาหารที่เติม mT พบว่า mT ที่ความเข้มข้น 15 และ 2 ไมโครโมลาร์ ให้จำนวนยอดใหม่ 4.20 ยอด/ชิ้นพืช และความสูงของยอดใหม่ 14.40 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งสูงสุดในอาหารกลุ่มนี้ ผลการทดลองยังพบว่า BA ยังคงแสดงผลการชักนำให้ชิ้นพืชเจริญให้ยอดใหม่ที่สูงกว่า mT ทั้งในระดับความเข้มข้นเดียวกันและในภาพรวม (ตารางที่ 1, รูปที่ 3ข) โดยชิ้นพืชที่เคยถูกเลี้ยงบนอาหารที่เสริมด้วย BA มีค่าเฉลี่ยรวมของจำนวนและความสูงของยอดใหม่อยู่ที่ 4.26 ยอด/ชิ้นพืช และ 13.07 เซนติเมตร ขณะที่ชุดทดลอง mT มีค่าเฉลี่ยรวมของจำนวนยอดใหม่ 2.77 ยอด/ชิ้นพืช และความสูงของยอดใหม่ 12.20 เซนติเมตร

3.3 ผลของ BA และ mT ต่อการเกิดรากใหม่ในหลอดทดลองของต้นมณีกาญจน์

ผลการทดลองที่ 8 สัปดาห์ พบว่าชิ้นพืชสามารถเจริญให้รากใหม่ได้เอง โดยชุดควบคุมมีจำนวนและความยาวของรากใหม่ที่ 6.70 ราก/ชิ้นพืช และ 5.60 เซนติเมตร สำหรับกลุ่มอาหารที่เติม BA พบว่าอาหารที่มี BA เข้มข้น

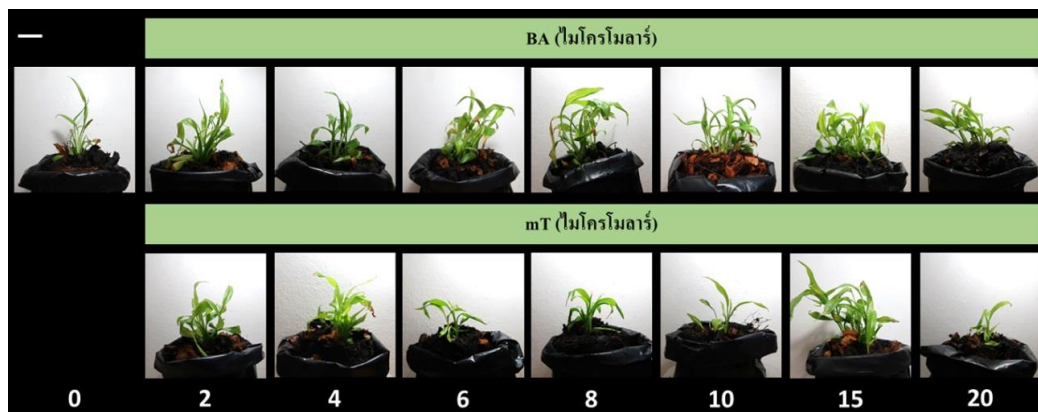
6 ไมโครโมลาร์ พบจำนวนรากใหม่สูงสุด (10.20 ราก/ชิ้นพืช) ขณะที่ความยาวรากใหม่สูงสุด (6.60 เซนติเมตร) พบจากยอดที่เลี้ยงบนอาหารที่มี BA เข้มข้น 4 ไมโครโมลาร์ ผลการทดลองในกลุ่มอาหารที่เติม mT พบว่าอาหารที่มี mT เข้มข้น 2 ไมโครโมลาร์ ให้การเจริญของรากที่ดีที่สุด (จำนวนรากใหม่ 7.50 ราก/ชิ้นพืช, ความยาวรากใหม่ 6.40 เซนติเมตร) ผลการทดลองยังพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกันนั้น ยอดที่เลี้ยงบนอาหารร่วมกับ BA พบการเจริญของรากใหม่ที่สูงกว่า mT ในทุกความเข้มข้น (ตารางที่ 2, รูปที่ 4ก) นอกจากนี้ BA ยังมีค่าเฉลี่ยโดยรวมของจำนวนรากใหม่ (BA = 8.31 ราก/ชิ้นพืช mT = 4.27 ราก/ชิ้นพืช) และความยาวรากใหม่ (BA = 5.76 เซนติเมตร mT = 4.72 เซนติเมตร) ที่มากกว่า mT อีกด้วย

หลังจากย้ายชิ้นพืชมาเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์สูตร MS ต่ออีก 4 สัปดาห์ ชิ้นพืชมีการเจริญให้จำนวนและความยาวของรากใหม่เพิ่มสูงขึ้นจากสัปดาห์ที่ 8 ชุดควบคุมมีจำนวนรากใหม่ 12.60 ราก/ชิ้นพืช และรากใหม่มีความยาว 7.47 เซนติเมตร ในกลุ่มสูตรอาหารที่เสริมด้วย BA นั้น จำนวนรากใหม่ (16.70 ราก/ชิ้นพืช) และความยาวรากใหม่ (9.10 เซนติเมตร) สูงสุดพบจากชิ้นพืชที่เคยเลี้ยงบนอาหารที่มี BA เข้มข้น 6 และ 2 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ ขณะที่ชิ้นพืชซึ่งเคยถูกเลี้ยงบนอาหารที่มีการเติม mT ร่วมด้วย พบว่า mT เข้มข้น 2 ไมโครโมลาร์ เป็นสูตรอาหารที่มีผลกระทบต่อ การเจริญของรากใหม่น้อยที่สุดในอาหารกลุ่มนี้ เนื่องจากสามารถให้จำนวนและความยาวของรากใหม่ที่ 14.30 ยอด/ชิ้นพืช และ 8.65 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นการเจริญของรากใหม่ที่สูงที่สุดในกลุ่มอาหารที่เติม mT ผลการทดลองในสัปดาห์ที่ 12 ยังมีความคล้ายคลึงกับสัปดาห์ที่ 8 กล่าวคือ BA มีการเจริญของรากใหม่ที่ดีกว่า mT ในทุกความเข้มข้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน (ตารางที่ 2, รูปที่ 4ข) อีกทั้ง BA ยังให้ค่าเฉลี่ยโดยรวมของจำนวนรากใหม่ (14.66 ราก/ชิ้นพืช) และความยาวรากใหม่ (8.10 เซนติเมตร) ที่สูงกว่าชุดการทดลองที่ใช้ mT (จำนวนรากใหม่ 10.91 ราก/ชิ้นพืช, ความยาวรากใหม่ 7.40 เซนติเมตร)

ตารางที่ 3 การรอดชีวิตของต้นมณีกาญจน์จากอาหารแต่ละสูตรหลังนำออกปลูกลงนอกหลอดทดลองนาน 4 สัปดาห์

ชุดการทดลอง (ไมโครโมลาร์)	ร้อยละการรอดชีวิต
0 (ชุดควบคุม)	66.67 ± 15.28 ^B
BA 2	83.33 ± 28.87 ^{AB}
BA 4	93.33 ± 11.55 ^A
BA 6	100.00 ^A
BA 8	96.67 ± 5.77 ^A
BA 10	100.00 ^A
BA 15	96.67 ± 5.77 ^A
BA 20	100.00 ^A
mT 2	93.33 ± 5.77 ^A
mT 4	96.67 ± 5.77 ^A
mT 6	100.00 ^A
mT 8	100.00 ^A
mT 10	93.33 ± 5.77 ^A
mT 15	90.00 ± 10.00 ^A
mT 20	93.33 ± 5.77 ^A
F-test	*

หมายเหตุ: * แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจาก F-test ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามตารางแนวดิ่งแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยวิธีการ DMRT ($p < 0.05$)



รูปที่ 5 การนำต้นมณีกาญจน์ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อซึ่งเจริญบนอาหารสังเคราะห์แต่ละสูตร มาออกปลูกลงนอกหลอดทดลอง (บาร์ = 3 เซนติเมตร)

3.4 การนำต้นพืชออกปลูกลงนอกหลอดทดลอง

เมื่อนำต้นพืชที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อมาอนุบาลออกปลูกลงนอกหลอดทดลองครบ 4 สัปดาห์ ผลการศึกษาพบว่า ต้นพืชจากแต่ละสูตรอาหารมีอัตราการรอดชีวิตอยู่ที่ 66.67 – 100% โดยชุดควบคุมพบอัตราการรอดชีวิตของต้นพืชเมื่อนำออกปลูกต่ำที่สุด (66.67%) อาหารที่เติม BA หรือ mT ร่วมด้วยพบว่าส่วนมากให้อัตราการรอดชีวิตของต้นพืชอยู่ที่ 90% แต่มีเพียงต้นพืชซึ่งผ่านการเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์สูตร MS ที่มี BA เข้มข้น 2 ไมโครโมลาร์เท่านั้น ที่พบอัตราการรอดชีวิตของต้นพืชที่ 83.33% ทั้งนี้มีเพียงอาหารจำนวน 5 สูตรเท่านั้นที่สามารถทำให้ต้นพืชทุกต้นสามารถมีชีวิตรอดทั้งหมด (100%) เมื่อนำออกปลูกลงนอกหลอดทดลอง (ตารางที่ 3, รูปที่ 5) ผลการทดลองโดยรวมยังพบว่าต้นพืชที่ผ่านการเลี้ยงจากอาหารที่เสริมด้วย BA (95.71%) มีอัตราการรอดชีวิตที่สูงกว่าชุดการทดลอง mT เล็กน้อย (95.24%)

เมื่อพิจารณาจากข้อมูลทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่า BA เหมาะสมต่อการนำมาใช้ขยายพันธุ์ต้นมณีกาญจน์ในหลอดทดลองมากกว่า mT เนื่องจากสามารถชักนำให้เกิดยอดใหม่ได้ดีกว่าและมีผลกระทบต่ออาการการเกิดรากน้อยกว่า ทั้งนี้อาหารสังเคราะห์สูตร MS ที่มี BA เข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ เป็นสูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการขยายพันธุ์ต้นมณีกาญจน์ในหลอดทดลอง เนื่องจากสูตรอาหารดังกล่าวสามารถชักนำให้ได้จำนวนยอดใหม่สูงที่สุดจากทุกชุดการทดลอง คือ 6.90 ยอด/ชิ้นพืช โดยยอดใหม่มีความสูง 12.50 เซนติเมตร ได้รากใหม่จำนวน 14.40 ราก/ชิ้นพืช และรากใหม่มีความยาว 7.65 เซนติเมตร อีกทั้งยังพบว่าต้นพืชที่เจริญจากอาหารสูตรนี้มีอัตราการรอดชีวิต 100% หลังจากนำออกปลูกลงนอกหลอดทดลองนาน 4 สัปดาห์

4. วิจารณ์ผลการทดลอง

เมื่อนำเมล็ดของต้นมณีกาญจน์ที่ผ่านกระบวนการฟอกฆ่าเชื้อผิวไปเลี้ยงในสภาพปลอดเชื้อนาน 1 สัปดาห์ ไม่พบการปนเปื้อนจากเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งสอดคล้องกับการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชวงศ์ขิงบางชนิดที่พบผลการทดลองในลักษณะเดียวกัน (Behera *et al.*, 2019; Chuengpanya *et al.*, 2020; 2022) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าต้นมณีกาญจน์มีก้านชูช่อดอกที่ยาว ทำให้ฝักและเมล็ดมีโอกาสสัมผัสกับดินที่ต่ำ อีกทั้งเมล็ดยังมีเปลือกหุ้มเมล็ดที่หนาและแข็ง จึงทำให้สามารถใช้สารเคมีความเข้มข้นสูงร่วมกับเวลานานระหว่างขั้นตอนการฟอกฆ่าเชื้อผิวได้ ถึงแม้เมล็ดของต้นมณีกาญจน์จะเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นชิ้นพืชเริ่มต้นเนื่องจากไม่พบการปนเปื้อนจากเชื้อจุลินทรีย์ภายหลังขั้นตอนการฟอกฆ่าเชื้อ แต่เมล็ดมีอัตราการงอกเพียง 30% หลังจากเพาะในสภาพปลอดเชื้อนาน 24 สัปดาห์ โดยอาจเป็นผลจากการที่งานวิจัยนี้อาจใช้สารฟอกฆ่าเชื้อที่ความเข้มข้นสูงหรือใช้ระยะเวลาการฟอกเมล็ดที่นานเกินไป (คลอโรกซ์เข้มข้น 20% ตามด้วย 15% ปริมาตร/ปริมาตร นานครั้งละ 15 นาที) ทั้งนี้ Vargas และ Flota (2005) ได้บ่งชี้ว่ากรรมวิธีการฟอกฆ่าเชื้อผิวสามารถส่งผลกระทบต่อเจริญของเนื้อเยื่อหรือชิ้นพืชภายหลังการฟอกฆ่าเชื้อผิวได้ ดังนั้นหากไม่มีข้อจำกัดในการได้มาซึ่งตัวอย่างเมล็ด ควรมีการศึกษาความเข้มข้นและระยะเวลาการใช้สารฟอกฆ่าเชื้อผิวเมล็ดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้มาซึ่งการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ที่ต่ำและการงอกของเมล็ดต้นมณีกาญจน์ที่สูงภายหลังการฟอกฆ่าเชื้อผิวเมล็ด นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการงอกของเมล็ดต้นมณีกาญจน์ภายใต้สภาวะปลอดเชื้อเพิ่มเติมต่อไป ซึ่งการศึกษาในพืชวงศ์ขิงบางชนิด เช่น การเพาะเมล็ดของต้นมหาหงส์ในหลอดทดลองพบว่าการเติมสารควบคุมการเติบโตกรดจิบเบอเรลลิน (GA_3) ลงในอาหารสังเคราะห์สามารถกระตุ้นให้เมล็ดมีอัตราการงอกเพิ่มสูงขึ้น (Behera *et al.*, 2019) แม้การใช้เมล็ดเป็นชิ้นพืชเริ่มต้นนี้จะอาศัยระยะเวลาในการงอก แต่ก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการผลิตต้นพืชในระดับอุตสาหกรรมได้ดังที่พบในการขยายพันธุ์พืชวงศ์ขิงบางชนิด (Behera *et al.*, 2019; Chuengpanya *et al.*, 2022)

การศึกษานี้เลือกใช้ส่วนโคนลำต้นเป็นชิ้นพืชทดลอง เพราะสามารถตัดได้ง่าย รวดเร็ว ซึ่งตลอดการศึกษานี้พบว่ายอดใหม่เจริญจากบริเวณส่วนโคนของชิ้นพืชทดลองโดยตรงผ่านกระบวนการ direct organogenesis ซึ่งคล้ายคลึงกับการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อต้น *C. candida*

(Chuengpanya *et al.*, 2019) และพืชวงศ์ขิงบางชนิด (Chuengpanya *et al.*, 2020; 2022) เนื่องจากส่วนโคนของลำต้นเหนือดินของพืชวงศ์ขิงจะมีเนื้อเยื่อเจริญและตาข้างอยู่ จึงสามารถเจริญเป็นยอดใหม่ได้ (Larsen & Larsen, 2006) โดยข้อดีของการเกิดพืชผ่านกระบวนการนี้คือ ได้ต้นพืชที่ตรงตามพันธุ์ (Das *et al.*, 2010) ขณะที่ Mohanty *et al.* (2008) พบว่าการเกิดยอดใหม่ของต้น *C. aromatica* ที่เจริญผ่านกลุ่มเซลล์แคลลัสพบความแปรปรวนทางพันธุกรรม (somaclonal variation) โดยยอดใหม่บางส่วนมีระดับพลอยดีที่ต่างไปจากต้นแม่ซึ่งเป็นพืช 2X เมื่อนำส่วนโคนลำต้นของต้นมณีกาญจน์ไปเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์สูตร MS ชุดควบคุม หรือเสริมด้วย BA และ mT นาน 8 สัปดาห์ ทุกสูตรอาหารชักนำให้เกิดยอดใหม่ในจำนวนและความสูงที่ต่างกันไป ซึ่งการพบยอดใหม่เจริญขึ้นจากชิ้นพืชที่เลี้ยงบนสูตรอาหารชุดควบคุมนี้ อาจเป็นเพราะชิ้นพืชมีการสะสมของสารต่าง ๆ รวมถึงสารควบคุมการเติบโตที่เพียงพอต่อการทำให้เกิดยอดใหม่ได้ (Chuengpanya *et al.*, 2022) ซึ่งต่างไปจากการทดลองในต้น *C. karnatakensis* ที่ไม่พบการเจริญของยอดใหม่เมื่อเลี้ยงชิ้นพืชบนอาหารที่ไม่มีการเติมสารควบคุมการเติบโต (Shanthala *et al.*, 2020) ผลการทดลองยังพบว่าจำนวนและความสูงของยอดใหม่ในสูตรอาหารที่เติม BA และ mT มีการเจริญของยอดใหม่ที่สูงกว่าชุดควบคุม ทั้งนี้เป็นเพราะสารทั้งสองชนิดเป็นสารควบคุมการเติบโตของพืชในกลุ่มไซโทไคนิน จึงออกฤทธิ์โดยตรงต่อการส่งเสริมให้เกิดยอดใหม่ผ่านกระบวนการกระตุ้นการแบ่งเซลล์ การทำลายการพักตัวของตาข้าง การทำลายอิทธิพลการข่มของตายอดสู่ตาข้าง (George *et al.*, 2008) และเพิ่มปริมาณการสังเคราะห์ด้วยแสง (Fuadi *et al.*, 2014; Skalák *et al.*, 2019) หรือส่งเสริมให้เกิดการยืดยาวของยอดผ่านกระบวนการควบคุมและขยายขนาดของเซลล์หรือเนื้อเยื่อเจริญ (Skalák *et al.*, 2019) ถึงแม้ไซโทไคนินจะส่งเสริมการเจริญของยอดใหม่แต่ต้องใช้ในความเข้มข้นที่เหมาะสม เพราะ การเพิ่มความเข้มข้นของ BA เกินกว่า 10 และ 4 ไมโครโมลาร์ หรือใช้ความเข้มข้นของ mT เกินกว่า 6 และ 2 ไมโครโมลาร์ ส่งผลให้จำนวนและความสูงของยอดใหม่ของต้นมณีกาญจน์ลดลงตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้หลายรายงานทั้งในกรณีของ BA (Bharalee *et al.*, 2005; Chuengpanya *et al.*, 2019; 2020; 2022; Das *et al.*, 2010; Khumaida *et al.*, 2019; Shanthala *et al.*, 2020; Sharmin *et al.*, 2013; Shukla *et al.*, 2007; Tyagi *et al.*, 2004; Yusuf *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2011)

หรือ mT (Behera *et al.*, 2019; Elayaraja *et al.*, 2019; Erisen *et al.*, 2020; Khanam *et al.*, 2020) การใช้ความเข้มข้นของไซโทไคนินสูงเกินกว่าระดับที่เหมาะสม นอกจากจะทำให้ต้นพืชอยู่ในสภาวะเครียดแล้ว ยังยับยั้งการแบ่งเซลล์ได้ (Carimi *et al.*, 2003) เหตุเหล่านี้จึงทำให้ไซโทไคนินที่ความเข้มข้นสูงมีฤทธิ์ยับยั้งหรือชะลอการชักนำให้เกิดยอดใหม่ (George *et al.*, 2008) ขณะเดียวกันไซโทไคนินมีฤทธิ์ทำให้ต้นพืชเกิดการสร้างก๊าซเอทิลีนขึ้นในหลอดทดลอง (Lledo *et al.*, 1995) ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของไซโทไคนินในอาหารเลี้ยงส่งผลให้มีปริมาณก๊าซเอทิลีนในหลอดทดลองเพิ่มสูงขึ้น ซึ่ง Brar *et al.* (1999) พบว่าการเติมสารยับยั้งการสร้างก๊าซเอทิลีนลงในอาหารสังเคราะห์ระหว่างการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อต้น *Vigna unguiculata* ทำให้ต้นพืชมีความสูงที่มากกว่าชุดการทดลองที่ไม่ได้ใส่ ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่าการเกิดก๊าซเอทิลีนในหลอดทดลองส่งผลกระทบต่อความสูงและการยืดยาวของต้นพืชได้

โดยปกติแล้วไซโทไคนินมีฤทธิ์ยับยั้งการเกิดรากเนื่องจากเป็นสารที่ออกฤทธิ์ตรงข้ามกับออกซินซึ่งเป็นสารควบคุมการเติบโตของพืชที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการเกิดราก (George *et al.*, 2008) แต่ผลการทดลองที่สัปดาห์ที่ 8 พบว่าต้นพืชสามารถเกิดรากได้เอง จึงอาจเป็นไปได้ว่าความเข้มข้นของไซโทไคนินที่ใช้ในการศึกษานี้ไม่ยับยั้งการเจริญของราก ทั้งนี้พืชวงศ์ชิงหลายชนิดก็พบผลการทดลองในลักษณะนี้เช่นกัน (Behera *et al.*, 2019; Chuengpanya *et al.*, 2019; 2020; 2022; Bharalee *et al.*, 2005; Das *et al.*, 2010; Kusumastuti *et al.*, 2014; Shanthala *et al.*, 2020; Yusuf *et al.*, 2007) อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้พบว่าหากเพิ่มความเข้มข้นของ BA เกินกว่า 6 และ 4 ไมโครโมลาร์ หรือใช้ความเข้มข้นของ mT เกินกว่า 2 ไมโครโมลาร์ ส่งผลทำให้จำนวนและความยาวของรากใหม่มลดลง ซึ่งคล้ายคลึงกับการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชวงศ์ชิงหลายรายงาน (Behera *et al.*, 2019; Chuengpanya *et al.*, 2019; 2020; 2022; Kusumastuti *et al.*, 2014; Shanthala *et al.*, 2020; Shukla *et al.*, 2007) เป็นเพราะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไซโทไคนินมีผลต่อการพัฒนาของเนื้อเยื่อเจริญที่เกี่ยวข้องกับการชักนำให้เกิดรากได้ (Bianco *et al.*, 2013) และยังสามารถเป็นไปได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของไซโทไคนินในอาหารสังเคราะห์ส่งผลต่อสมดุลความเข้มข้นของสารควบคุมการเติบโตภายในต้นพืชให้มีระดับของไซโทไคนินที่สูงกว่าออกซิน จึงเป็นผลให้รากใหม่เจริญลดลง (George *et al.*, 2008)

จากการที่ต้นมณีกาญจน์สามารถเกิดรากได้เองแม้ถูกเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์ที่เสริมด้วยไซโทไคนิน ดังนั้นอาหารสังเคราะห์สูตร MS ที่ปราศจากการเติมสารควบคุมการเติบโตของพืช จึงถูกนำมาใช้เพื่อให้รากมีการพัฒนามากยิ่งขึ้น และเป็นการปรับสภาพต้นพืชให้พร้อมต่อการนำออกปลูกนอกหลอดทดลอง โดย George *et al.* (2008) ได้กล่าวว่าการใช้อาหารที่ปราศจากสารควบคุมการเติบโตของพืชเป็นการช่วยปรับสมดุลของสารควบคุมการเติบโตภายในต้นพืช และช่วยลดผลกระทบจากสารควบคุมการเติบโตที่ต้นพืชได้รับจากขั้นตอนก่อนหน้า ซึ่งการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชวงศ์ชิงหลายชนิดก็ได้ใช้วิธีการเช่นเดียวกันนี้ในการชักนำรากใหม่ระหว่างการขยายพันธุ์ต้นพืชในหลอดทดลอง (Chuengpanya *et al.*, 2019; 2022; Lo-Apirukkul *et al.*, 2012) ผลการศึกษาเมื่อเลี้ยงขึ้นพืชบนอาหารสังเคราะห์สูตร MS ที่ไม่เติมสารควบคุมการเติบโตครบ 4 สัปดาห์ พบว่าอาหารสังเคราะห์แต่ละสูตรให้ผลการเจริญของยอดและรากใหม่เพิ่มมากขึ้น หากแต่มีจำนวนหรือความยาวของยอดหรือรากใหม่ที่แตกต่างกันไปในอาหารแต่ละสูตร โดยจำนวนยอดใหม่ ความสูงยอดใหม่ จำนวนรากใหม่ และความยาวรากใหม่ที่สูงที่สุดในทั้ง 15 ชุดการทดลอง พบจากอาหารสังเคราะห์สูตร MS ที่มี BA เข้มข้น 10, 4, 6 และ 2 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ ทั้งยังพบว่าการเจริญของยอดและรากใหม่มลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ BA ไปจากระดับข้างต้น หรือเปลี่ยนไปใช้ mT ผลการทดลองนี้เป็นข้อบ่งชี้ว่าไซโทไคนินสามารถส่งผลกระทบต่อผลการเจริญของต้นพืชได้เป็นระยะเวลาหนึ่งภายหลังเลิกใช้ ซึ่งสอดคล้องกับการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชวงศ์ชิงบางชนิดที่พบผลการทดลองในทำนองเดียวกัน (Chuengpanya *et al.*, 2019; 2022) ดังนั้นการพิจารณาเลือกใช้ชนิดและความเข้มข้นของไซโทไคนินให้เหมาะสมระหว่างการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง

ผลการทดลองตลอดทั้ง 12 สัปดาห์ พบว่า BA ส่งผลให้เกิดการเจริญของยอดและรากใหม่ของต้นมณีกาญจน์ดีกว่า mT ทั้งในระดับความเข้มข้นเดียวกันหรือที่ระดับภาพรวม ซึ่งต่างไปจากรายงานการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชหลายชนิดที่พบว่า mT ช่วยปรับปรุงการเกิดยอดและรากใหม่ได้ (Behera *et al.*, 2019; Elayaraja *et al.*, 2019; Erisen *et al.*, 2020; Khanam *et al.*, 2020; Kumari *et al.*, 2017) โดยทั่วไปแล้ว เมื่อ mT ถูกย่อยสลายจะสามารถให้ไซโทไคนินที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (free base cytokinin) ในปริมาณที่สูงกว่า BA (Abdouli *et al.*, 2022) อีกทั้งผลิตภัณฑ์หลักหลังถูกย่อยสลายของ mT

คือ *O*-glucosides ซึ่งถูกเปลี่ยนเป็นไซโทไคนินที่ออกฤทธิ์ได้ดีกว่า 9-glucosides ที่เป็นผลิตภัณฑ์หลักหลังถูกย่อยสลายของ BA (Bairu *et al.*, 2011; Werbrouck *et al.*, 1996) นอกจากนี้ mT ยังมีส่วนช่วยทำให้ปริมาณของคลอโรฟิลล์ (Aremu *et al.*, 2012) และอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้น (Catský *et al.*, 1996) ด้วยเหตุเหล่านี้ จึงทำให้ mT มีคุณสมบัติต่อการชักนำให้เกิดยอดใหม่ได้ดีกว่า BA ทั้งนี้ การที่ mT ช่วยลดหรือป้องกันลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ระหว่างการขยายพันธุ์พืชได้ดีกว่า BA อันประกอบด้วย การปรับปรุงการออกรากใหม่ (Behera *et al.*, 2019) ลดการตายของเนื้อเยื่อปลายยอด (Teixeira da Silva *et al.*, 2020) และลดการฉ่ำน้ำ (Abdouli *et al.*, 2022) อาจเป็นเพราะ mT เมื่อถูกย่อยสลายแล้วจะมีปริมาณของไซโทไคนินในต้นพืชโดยรวม (whole plant total cytokinin pool) และไซโทไคนินที่ไม่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (inactive cytokinin) จำพวก N-glucosides เช่น 7- หรือ 9-glucosides ที่ต่ำกว่า BA มาก (Abdouli *et al.*, 2022; Bairu *et al.*, 2011) ทำให้มีไซโทไคนินตกค้างในเนื้อเยื่อของต้นพืชไม่มากจนเกินไป ต้นพืชจึงไม่มีสภาวะเครียดและสามารถเจริญได้ตามปกติ อย่างไรก็ตาม พืชแต่ละชนิดมีลักษณะทางพันธุกรรมและมีความสามารถในการทนต่อฤทธิ์ของไซโทไคนินที่แตกต่างกัน การที่ mT จัดเป็นไซโทไคนินที่ออกฤทธิ์แรง และสามารถเพิ่มปริมาณไซโทไคนินที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพภายในต้นพืชได้สูงกว่า BA นั้น อาจทำให้พืชบางชนิดรวมถึงต้นมณีกาญจน์ไม่สามารถทนต่อสภาวะดังกล่าวได้ ซึ่งความเข้มข้นของไซโทไคนินในเนื้อเยื่อพืชที่สูงเกินไปจะมีผลยับยั้งหรือชะลอการเกิดอวัยวะใหม่ (George *et al.*, 2008) และมีผลเป็นพิษต่อเซลล์พืชได้ (Carimi *et al.*, 2003) ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชหลายชนิดที่พบว่า การใช้ BA สามารถชักนำให้เกิดอวัยวะใหม่ได้ดีกว่าการใช้ไซโทไคนินฤทธิ์แรง เช่น 2iP (Sharmin *et al.*, 2013) หรือ TDZ (Chuengpanya *et al.*, 2022)

จากการที่ปากใบของต้นพืชในหลอดทดลองมีการทำงานและรูปร่างที่ผิดปกติไปจากสภาวะธรรมชาติ เนื่องจากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชเป็นสภาวะที่มีความชื้นสูง ประกอบกับความเข้มแสงที่ใช้ระหว่างการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อเป็นความเข้มที่ต่ำกว่าแสงจากดวงอาทิตย์ ดังนั้น การปรับสภาพต้นพืชเพื่อให้สามารถรอดชีวิตได้หลังจากนำมาออกปลูกลงในหลอดทดลองจึงเป็นสิ่งสำคัญ (Chandra *et al.*, 2010) การศึกษานี้จึงคลุมถุงเพาะชำที่ปลูกลงต้นมณีกาญจน์ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อด้วย

ถุงพลาสติกใสเพื่อปรับสภาพการทำงานของปากใบให้กลับมาเป็นปกติ ควบคู่ไปกับการเก็บชุดปลูกในโรงเรือนที่มีการพร่างแสง 40% เพื่อให้ต้นพืชมีการปรับสภาพและสามารถใช้ความเข้มแสงที่สูงขึ้นในการดำรงชีวิตต่อไปได้ หลังจากนำต้นมณีกาญจน์ไปออกปลูกลงในดินปลูกสำเร็จรูปที่ผสมก้ามมะพร้าวสับเพื่อเสริมความร่วนซุยและช่วยในการระบายของน้ำและอากาศนาน 4 สัปดาห์ พบว่าต้นพืชที่เจริญมาจากแต่ละสูตรอาหารมีอัตราการรอดชีวิตที่แตกต่างกัน โดยมีเพียงอาหารจำนวน 5 สูตรเท่านั้นที่ทำให้ต้นพืชมีอัตราการรอดชีวิต 100% ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการออกปลูกในต้น *C. candida* ที่พบว่าต้นพืชจากแต่ละสูตรอาหารให้อัตราการรอดชีวิตหลังนำออกปลูกที่แตกต่างกัน (Chuengpanya *et al.*, 2019) โดยอาจเป็นเพราะสารควบคุมการเติบโตของพืชสามารถส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและการพัฒนาของเนื้อเยื่อลำเลียง (vascular tissue) และการเชื่อมต่อกันของเนื้อเยื่อลำเลียงระหว่างส่วนยอดและรากได้ (Roberts *et al.*, 1998) ดังนั้นการเลือกใช้ชนิดตลอดจนความเข้มข้นของสารควบคุมการเติบโตระหว่างการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชที่แตกต่างกันสามารถส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของเนื้อเยื่อลำเลียงหรือการเชื่อมติดกันของเนื้อเยื่อลำเลียงระหว่างส่วนยอดและรากได้ จึงทำให้ต้นพืชจากแต่ละสูตรอาหารมีอัตราการรอดชีวิตที่ต่างกันเมื่อออกปลูกลงนอกหลอดทดลอง

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการขยายพันธุ์ต้นมณีกาญจน์ในหลอดทดลอง ซึ่งใช้ระยะเวลา 40 สัปดาห์ (การเพาะต้นกล้าจากเมล็ดปลอดเชื้อ 24 สัปดาห์ การขยายพันธุ์ต้นพืชในหลอดทดลอง 12 สัปดาห์ และการนำออกปลูกลงในหลอดทดลอง 4 สัปดาห์) ผลการศึกษาพบว่าอาหารสังเคราะห์สูตร MS ที่มี BA เข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ เป็นสูตรอาหารที่เหมาะสมในการขยายพันธุ์พืชชนิดนี้ เนื่องจากสามารถชักนำให้ต้นมณีกาญจน์เกิดยอดใหม่จำนวนมากที่สุด (6.90 ยอด/ชิ้นพืช) โดยมีผลกระทบเล็กน้อยถึงปานกลางต่อความสูงของยอดใหม่และการเจริญของรากใหม่ อีกทั้งต้นพืชที่ได้จากอาหารสูตรนี้ยังมีอัตราการรอดชีวิต 100% เมื่อนำออกปลูกลงในหลอดทดลอง ผลการศึกษายังบ่งชี้ว่า BA สามารถชักนำให้ต้นมณีกาญจน์เกิดยอดและรากใหม่ได้มากกว่า ทั้งยังมีผลกระทบต่อการทำงานของต้นพืชที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ mT ดังนั้นวิธีการขยายพันธุ์ต้นมณี

กาณจน์ให้ได้จำนวนมากจากการศึกษานี้จึงเป็นวิธีที่ใช้ต้นทุนการผลิตพืชไม่สูง เพราะ BA เป็นสารควบคุมการเติบโตของพืชที่สามารถหาได้ง่ายและมีราคาไม่แพง วิธีที่ได้จากการศึกษานี้นอกจากจะใช้เป็นเครื่องมือเพื่ออนุรักษ์พันธุ์ต้นมณีกาญจน์แล้ว ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อขยายพันธุ์พืชชนิดนี้ให้ได้จำนวนมากเพื่อส่งเสริมต่อการผลักดันให้เป็นไม้ประดับเศรษฐกิจชนิดใหม่ของประเทศไทย หรือประยุกต์ใช้ในการศึกษาด้านปรับปรุงพันธุ์อันจะเป็นการเพิ่มคุณค่าของพืชชนิดนี้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยมหิดล และทุนสนับสนุนบางส่วนจากโครงการพัฒนากำลังคนด้านวิทยาศาสตร์ (ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย)

เอกสารอ้างอิง

- Abdouli, D., Placková, L., Doležal, K., Bettaieb, T. & Werbrouck, S. P. (2022). Topolin cytokinins enhanced shoot proliferation, reduced hyperhydricity and altered cytokinin metabolism in *Pistacia vera* L. seedling explants. *Plant Science*, 322, Article ID 111360, 7 pp. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111360>
- Aremu, A.O., Bairu, M.W., Szűcová, L., Doležal, K., Finnie, J.F. & Van Staden, J. (2012). Assessment of the role of meta-topolins on *in vitro* produced phenolics and acclimatization competence of micropropagated 'Williams' banana. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34, 2265–2273
- Auer, C.A., Motyka, V., Brezinová, A. & Kamínek, M. (1999). Endogenous cytokinin accumulation and cytokinin oxidase activity during shoot organogenesis of *Petunia hybrida*. *Physiologia Plantarum*, 105(1), 141–147.
- Bairu, M.W., Novák, O., Doležal, K. & Van Staden, J. (2011). Changes in endogenous cytokinin profiles in micropropagated *Harpagophytum procumbens* in relation to shoot-tip necrosis and cytokinin treatments. *Plant Growth Regulation*, 63(2), 105–114.
- Behera, S., Kar, S.K., Rout, K.K., Barik, D.P., Panda, P.C. & Naik, S.K. (2019). Assessment of genetic and biochemical fidelity of field-established *Hedychium coronarium* J. Koenig regenerated from axenic cotyledonary node on meta-topolin supplemented medium. *Industrial Crops and Products*, 134, 206–215.
- Bharalee, R., Das, A. & Kalita, M.C. (2005). *In vitro* clonal propagation of *Curcuma caesia* Roxb and *Curcuma zedoaria* Rosc from rhizome bud explants. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, 14(1), 61–63.
- Bianco, D.M., Giustini, L. & Sabatini, S. (2013). Spatiotemporal changes in the role of cytokinin during root development. *New Phytologist*, 199(2), 324–328.
- Boonkorkaew, P., Suksathan, P. & Yangkhamman, P. (2013). Development of *Globba* for Commercial Purpose and Agricultural Technology. Bangkok, Thailand: National Research Council of Thailand. (in Thai)
- Brar, M.S., Moore, M.J., Al-Khayri, J.M., Morelock, T.E. & Anderson, E.J. (1999). Ethylene inhibitors promote *in vitro* regeneration of cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *In Vitro Cellular & Developmental Biology–Plant*, 35(3), 222–225.
- Carimi, F., Zottini, M., Formentin, E., Terzi, M. & Schiavo, F. L. (2003). Cytokinins: new apoptotic inducers in plants. *Planta*, 216(3), 413–421.
- Catský, J., Pospíšilová, J., Kamínek, M., Gaudinová, A., Pulkrábek, J. & Zahradníček, J. (1996). Seasonal changes in sugar beet photosynthesis as affected by exogenous cytokinin N⁶-(m-hydroxybenzyl) adenosine. *Biologia plantarum*, 38(4), 511–518.
- Chandra, S., Bandopadhyay, R., Kumar, V. & Chandra, R. (2010). Acclimatization of tissue cultured plantlets: from laboratory to land. *Biotechnology Letters*, 32(9), 1199–1205.
- Chuangpanya, R., Chuenboonngarm, N., Kongtook, N., Longsaward, R., Nopporncharoenkul, N., Muangkroot, A., Jenjittikul, T. & Soonthornchainaksaeng, P. (2019). *In vitro* propagation of *Curcuma candida* (Wall.) Techapr. & Škorníček, a vulnerable plant of Thailand. *Srinakharinwirot Science Journal*, 35(2), 31–50. (in Thai)
- Chuangpanya, R., Karoojee, S., Lekbamroong, M., Muangkroot, A. & Chuenboonngarm, N. (2020). Effect of N⁶-benzyladenine on *in vitro* propagation of *Hedychium coccineum* Buch.-Ham. ex Sm. and *Hedychium ellipticum* Buch.-Ham. ex Sm. *Srinakharinwirot Science Journal*, 36(2), 91–107. (in Thai)
- Chuangpanya, R., Muangkroot, A., Jenjittikul, T., Thammasiri, K., Umpunjun, P., Viboonjun, U. & Chuenboonngarm, N. (2022). *In vitro* propagation and genetic fidelity assessment of *Hedychium longicomutum* Griff. ex Baker, a vulnerable Zingiberaceous plant of Thailand. *Current Applied Science and Technology*, 22(6), 21 pp. <https://dx.doi.org/10.55003/cast.2022.06.22.012>
- Das, A., Kesari, V. & Rangan, L. (2010). Plant regeneration in *Curcuma* species and assessment of genetic stability of regenerated plants. *Biologia Plantarum*, 54(3), 423–429.
- Debergh, P.C. & Zimmerman, R.H. (1991). Commercial micropropagation in Asia. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Elayaraja, D., Subramanyam, K., Vasudevan, V., Sathish, S., Kasthurirengan, S., Ganapathi, A. & Manickavasagam, M. (2019). Meta-Topolin (mT) enhances the *in vitro* regeneration frequency of *Sesamum indicum* (L.). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 21, Article ID 101320, 10 pp. <https://dx.doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101320>
- Erisen, S., Kurt-Gür, G. & Servi, H. (2020). *In vitro* propagation of *Salvia sclarea* L. by meta-Topolin, and assessment of genetic stability and secondary metabolite profiling of micropropagated plants. *Industrial Crops and Products*, 157, Article ID 112892, 8 pp. <https://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112892>
- Fuadi, M., Mohamed, M.T.M., Salleh, N.S., Anwar, M.P., Awang, Y. & Fauzi, R.M. (2014). Effect of different concentrations of benzyladenine and frequency of watering on growth and quality of *Dracaena sanderiana* and *Codiaeum variegatum*. *Journal of Environmental Biology*, 35(6), 1047–1052.
- George, E.F., Hall, M.A. & Klerk, G.D. (2008). *Plant Propagation by Tissue Culture – Volume 1 The Background* (3rd ed). Dordrecht, Netherlands: Springer.
- Khanam, M.N., Javed, S.B., Anis, M. & Alatar, A.A. (2020). Meta-Topolin induced *in vitro* regeneration and metabolic profiling in *Allamanda cathartica* L. *Industrial Crops and Products*, 145, Article ID 111944, 9 pp. <https://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111944>
- Khumaida, N., Ardie, S.W., Setiadi, A. & Artiningsih, L.N. (2019). *In vitro* multiplication and acclimatization of black galingale (*Curcuma aeruginosa* Roxb.). *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 9(4), 110–116.

- Kumari, A., Baskaran, P. & Van Staden, J. (2017). *In vitro* regeneration of *Begonia homonyma* – a threatened plant. South African Journal of Botany, 109, 174–177.
- Kusumastuti, M.Y., Bhatt, A., Indrayanto, G. & Keng, C.L. (2014). Effect of sucrose, benzylaminopurine and culture condition on *in vitro* propagation of *Curcuma xanthorrhiza roxb.* and *Zingiber aromaticum* val. Pakistan Journal of Botany, 46(1), 280–289.
- Larsen, K., & Larsen, S. (2006). Ginger of Thailand. Chaing Mai, Thailand: Queen Sirikit Botanic Garden, The Botanical Garden Organization.
- Leong-Škornicková, J., Soonthornkalump, S. & Suksathan, P. (2020). *Curcuma cinnabarina* and *C. eburnea* (Zingiberaceae: Zingiberoideae), two new species from Thailand. Edinburgh Journal of Botany, 77(3), 391–402.
- Leong-Škornicková, J., Soonthornkalump, S. & Thongbai, W. (2021). Four new *Curcuma* species (Zingiberaceae) from Thailand. Blumea, 65, 244–253.
- Lledo, M.D., Crespo, M.B. & Amo-Marco, J.B. (1995). The role of cytokinins and ethylene inhibitors on lenticel hypertrophy generation and ethylene production in *in vitro* cultures of *Populus euphratica* Olivier. Israel Journal of Plant Sciences, 43(4), 339–345.
- Lo-Apirukkul, S., Jenjittikul, T., Saralamp, P. & Prathanurag, S. (2012). Micropropagation of a Thai medicinal plant for women's health, *Curcuma comosa* Roxb., via shoot and microrhizome inductions. Journal of Natural Medicines, 66(2), 265–270.
- Mohanty, S., Panda, M.K., Subudhi, E. & Nayak, S. (2008). Plant regeneration from callus culture of *Curcuma aromatica* and *in vitro* detection of somaclonal variation through cytophotometric analysis. Biologia Plantarum, 52, 783–786.
- Murashige, T. & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. Physiologia plantarum, 15(3), 473–497.
- Roberts, L.W., Gahan, P.B. & Aloni, R. (1988). Vascular Differentiation and Plant Growth Regulators. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Saensouk, S. (2011). Endemic and rare plants of ginger family in Thailand. KKU Research Journal. 16(3), 306–329. (in Thai)
- Saensouk, S., Boonma, T. & Saensouk, P. (2021). Six new species and a new record of *Curcuma* L. (Zingiberaceae) from Thailand. Biodiversitas, 22, 1658–1685.
- Shanthala, A.A., Dilkhal, A. & Umesh, T.G. (2020). An efficient *in vitro* approach for direct and callus mediated regeneration of *Curcuma karnatakensis* – an endemic plant of Karnataka. Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants, 3, 229–241.
- Sharmin, S.A., Alam, M.J., Sheikh, M.M.I., Zaman, R., Khalekuzzaman, M., Mondal, S.C., Haque, M.A., Alam, M.F. & Alam, I. (2013). Micropropagation and antimicrobial activity of *Curcuma aromatica* Salisb., a threatened aromatic medicinal plant. Turkish Journal of Biology, 37(6), 698–708.
- Shukla, S.K., Shukla, S., Koche, V. & Mishra, S.K. (2007). *In vitro* propagation of tikur (*Curcuma angustifolia* Roxb.): a starch yielding plant. Indian Journal of Biotechnology, 6, 274–276.
- Siriruga, P., Larsen, K. & Maknoi, C. (2007). The genus *Curcuma* L. (Zingiberaceae): distribution and classification with reference to species diversity in Thailand. Gardens' Bulletin Singapore, 59, 203–220.
- Skalák, J., Vercruyssen, L., Claeys, H., Hradilová, J., Cerný, M., Novák, O., Placková, L., Saiz-Fernández, I., Skaláková, P., Coppens, F. & Dhondt, S. (2019). Multifaceted activity of cytokinin in leaf development shapes its size and structure in *Arabidopsis*. The Plant Journal, 97(5), 805–824.
- Soonthornkalump, S., Puangpairote, T., Niwesrat, S. & Leong-Škornicková, J. (2021). *Curcuma lithophila* and *C. rufostriata* (Zingiberaceae), two new species from Thailand, and additional notes on *C. papilionacea*. Thai Forest Bulletin (Botany), 49(1), 32–43.
- Strnad, M., Hanuš, J., Vanek, T., Kamínek, M., Ballantine, J.A., Fussell, B. & Hanke, D.E. (1997). Meta-topolin, a highly active aromatic cytokinin from poplar leaves (*Populus × canadensis* Moench., cv. Robusta). Phytochemistry, 45(2), 213–218.
- Teixeira da Silva, J.A., Nezami-Alanagh, E., Barreal, M.E., Kher, M.M., Wicaksono, A., Gulyás, A., Hidvégi, N., Magyar-Tábori, K., Mendler-Drienyovszki, N., Márton, L. & Landín, M. (2020). Shoot tip necrosis of *in vitro* plant cultures: a reappraisal of possible causes and solutions. Planta, 252, Article ID 47, 36 pp. <https://dx.doi.org/10.1007/s00425-020-03449-4>
- Tran, T.L., Cao, N.G., Tran, M.N., Nguyen, M.K., Ha, V.L. & Ly, N.S. (2019). First record of *Curcuma sparganiifolia* Gagnep. (Zingiberaceae) from Vietnam. Bioscience Discovery, 10(1), 10–15.
- Tyagi, R.K., Yusuf, A., Dua, P., & Agrawal, A. (2004). *In vitro* plant regeneration and genotype conservation of eight wild species of *Curcuma*. Biologia Plantarum, 48(1), 129–132.
- Vargas, V.M. & Flota, F.V. (2005). Plant Cell Culture Protocols. New York, USA: Humana Press.
- Wannakrairoj, S. (1996). *Curcuma*: Ornamentals. Bangkok, Thailand: Amarin Printing & Publishing Public Co. (in Thai).
- Wannakrairoj, S. (2008). Status of ornamental plants in Thailand. Acta Horticulturae, 788, 29–36.
- Werbrouck, S.P.O., Strnad, M., Van Onckelen, H.A. & Debergh, P.C. (1996). Meta-topolin, an alternative to benzyladenine in tissue culture. Physiologia Plantarum, 98, 291–297.
- Yusuf, N.A., Khalid, N. & Ibrahim, H. (2007). Establishment of tissue culture for selected medicinal *Curcuma* spp. Malaysian Journal of Science, 26(1), 85–91.
- Zhang, S., Liu, N., Sheng, A., Ma, G. & Wu, G. (2011). Direct and callus-mediated regeneration of *Curcuma soloensis* Valetton (Zingiberaceae) and *ex vitro* performance of regenerated plants. Scientia Horticulturae, 130(4), 899–905.