



วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์

THE JOURNAL OF APPLIED SCIENCE

ISSN 1513-7805 [Print] ISSN 2586-9663 [Online]

ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 [2565] Vol.21, No.2 [2022]

THE JOURNAL IS COVERED BY:



Approved by TCI during
2020-2024



TJCI

ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย
Thai-Journal Citation Index Centre



ASEAN
CITATION
INDEX

Available online at <https://www.tci-thaijo.org/index.php/JASCI>

Consulting Editors

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

Associate Professor Dr. Surapun Yimman

Professor Dr. Saowanit Sukparungsee

Associate Professor Dr. Kitti Bodhipadma

Editor

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

Associate Professor Narumol Kreua-ongarjnukool

Co-Editor

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

Assistant Professor Dr. Peerapong Pornwongthong

Associate Professor Dr. Nonchanutt Chudpooti

Associate Editor

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

Professor Dr. Yupaporn Areepong

Associate Professor Dr. Nutsuda Sumonsiri

Associate Professor Dr. Sekson Sirisubtawee

Associate Professor Dr. Pianpool Kamoljitprapa

Associate Professor Dr. Walaiporn Prissanaroon Ouajai

Associate Professor Dr. Suvimol Phanyaem

Assistant Professor Dr. Anusara Srisrual

Assistant Professor Dr. Tanapat Anusas-amornkul

Assistant Professor Dr. Theerawut Phusantisampan

Assistant Professor Dr. Jintawat Tanamatayarat

Assistant Professor Dr. Sukanya Thepwatee

Editorial Advisory Board

Professor Dr. Paul Pigram

La Trobe University, Australia

Professor Dr. Melvin Pascall

The Ohio State University, USA

Professor Dr. Sergey Meleshko

Suranaree University of Technology, Thailand

Emeritus Professor Dr. Yongwimon Lenbury

Mahidol University, Thailand

Professor Dr. Sutthisak Phongthanapanich

King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Professor Dr. Anuvat Sirivat

Chulalongkorn University, Thailand

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

Editorial Advisory Board (cont.)

Associate Professor Dr. Wararit Panichkitkosolkul

Thammasat University, Thailand

Associate Professor Dr. Montip Tiensuwan

Mahidol University, Thailand

Associate Professor Dr. Piyapatr Busababodhin

Mahasarakham University, Thailand

Associate Professor Dr. Wantida Chaiyana

Chiang Mai University, Thailand

Assistant Professor Dr. Kwan Arayathanitkul

Mahidol University, Thailand

Assistant Professor Dr. Narumon Emarat

Mahidol University, Thailand

Assistant Professor Dr. Kitiporn Plaimas

Chulalongkorn University, Thailand

Assistant Professor Dr. Chatchai Khunboa

Khon Kaen University, Thailand

Assistant Professor Dr. Julaluk Khemacheewakul

Chiang Mai University, Thailand

Assistant Professor Dr. Jutarat Iewkittayakorn

Prince of Songkla University, Thailand

Assistant Professor Dr. Yanisa Laoong-u-thai

Burapha University, Thailand

Assistant Professor Dr. Sararat Mahasaranon

Naresuan University, Thailand

Dr. Worawut Srisukkhham

Chiang Mai University, Thailand

Coordinator and Manager

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

Mr. Phirom Pabu

Mr. Piyawat Sutha

Miss.Wilaporn Khunkaew

Miss.Wilawan Sae-jeng

Miss.Kitsiya Chuchuaysuwan

Contact info

Faculty of Applied Science

King Mongkut's University of Technology North Bangkok

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800 : Thailand

Phone: 02-555-2000#4211

Website

www.tci-thaijo.org/index.php/JASCI

JOURNAL POLICY

Focus and Scope

The Journal of Applied Science is an academic journal published biannually by the Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok. The Journal publishes original research and review papers either in Thai or English covering 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.

"The Journal of Applied Science does not have policy to collect publication fee"

"Each articles must be evaluated by two peers (double blinded) before accepted for publication"

"Article must be revised and sent back to the journal within 4 weeks after the return for revision unless the article will be rejected"

"The Journal of Applied Science published both as hard -copies [ISSN 1513-7805 (Print)] and electronic journal [ISSN 2586-9663 (Online)] available on ThaiJO system"

Scope of the Journal

To publish academic, research and review articles covering all area of both basic and applied sciences 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 sciences and materials science

Peer Review Process

Each article must be double blind peer reviewed by at least 2 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 committee 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

Twice a year (Biannual)

First Issue: January to June

Second Issue: July to December

Courtesy by the Faculty of Applied Science,

King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Remarks

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

TABLE OF CONTENT

Glycerol Monostearate and Distilled Cashew Nut Shell Liquid as Additives for Diesohol

Amaraporn Kaewchada, Thapanee Bangjang and Attasak Jaree.....247906

Incorporation of Natural Colourants into Thai Steamed Cupcakes

Pimonpan Suwan and Thitikorn Mahidsanan.....245412

The New Discrete Weighted Exponential Distribution and Application

Chadarat Tapan.....244452

The Technique of Infrared Imaging in Medicine

Witthaya Boonsuk and Phumin Hongma.....244792

A New Numerical Algorithm with Sixth Order of Convergence for Nonlinear Equations

Juthaporn Somprakhon, Wimon Siri Aryamueang and
Chalermwut Comemuang.....244708

Efficiency Comparison of DHWMA, TEWMA, and DMEWMA Control Charts for Gamma Distribution

Oranit Chumpuworn and Piyaphon Paichit.....247334

Meta-analysis of Association Between Exposure to Air Pollution and Cerebrovascular Disease

Piyachat Leelasilapasart and Suvimol Phanyaem.....247568

Reduction of Interference Ions in Spent Plating Solution for the Chromium Electroplating Process

Chanakarn Sangsum, Rungsima Yeetsorn and Chatchalida Boonpanaid.....250596

Science and Conservation and Rehabilitation of Material Science for The Restoration of Kriab Mirror in Thai Arts.

Ratchapon Tajaya.....244881

Temperature coefficient (Q₁₀) and kinetic reaction for the shelf life evaluation: case study of Homnil rice-cookies

Anantita Sangsuriyawong, Napassorn Peasura, Nichapa Kornsakya and
Pornrat Sinchaipanit.....244863

The Modeling Shape Parameter of The Generalized Extreme Value Distribution of Rainfall-Runoff with Satellite Images by Using Artificial Neural Network Approach

Tossapol Phoophiwfa, Teerawong Loasuwan and Piyapatr Busababodhin.....247108

TABLE OF CONTENT (cont.)

**The Water Monitor Lizard Survey in Prince of Songkla University,
Pattani Campus, Pattani Province**

Anwa Ibrahim, Supaporn Saengkaew, Nattawut Srichairat and Somsak Buatip.....245689

**Vision-based Deep Learning for Anomaly Detection from Video Cartoon
for Kids**

Tananop Janpakdee and Thitirat Siriborvornratanakul.....245319

Research Article

Glycerol Monostearate and Distilled Cashew Nut Shell Liquid as Additives for Diesohol

Amaraporn Kaewchada¹, Thapanee Bangjang², Attasak Jaree^{2*}

¹Department of Agro-industrial Technology, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 1518 Piboonsongkram Road, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand

²Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*E-mail: fengasj@ku.ac.th

Received: 15/03/2022; Revised: 14/12/2022; Accepted: 27/12/2022

Abstract

This research involved the phase stability and fuel properties of the mixture of diesel and ethanol with GMS (glycerol monostearate) and distilled Cashew Nut Shell Liquid (DT-CNSL). The viscosity, acid value, oxidation stability and cetane index were measured in order to compare with diesel standards. Diesel engine performance and exhaust emission were investigated in terms of brake power of diesel engine, brake specific fuel consumption and exhaust gas temperature. Phase stability of diesel and ethanol blend was observed that a minimum threshold limit of 1.2 wt.% of GMS provided a homogeneous mixture. The most promising fuel blend was 85% of diesel and 15% of ethanol with 1.2 wt.% GMS and 1 vol.% DT-CNSL (DE15G1.2DT-C1). The inductive period of the fuel blends decreased with increasing concentration of DT-CNSL due to its antioxidant characteristics. As for the performance of diesel engine, at the speed of 1,500 rpm, the fuel blend has higher brake specific fuel consumption than diesel. On the other hand, the properties of fuel blend have similar the brake power of engine and exhaust gas temperature to pure diesel.

Keywords: GMS, Ethanol, Diesohol, DT-CNSL, Engine performance

Introduction

In Thailand, alternative energy sources such as ethanol, biodiesel, solar energy are undergoing intense research to reduce the amount of imported oil and strive for energy independence. A mixture between diesel and ethanol, so-called diesohol, is the one of the alternative fuels used for public transportation in Australia, USA, Denmark, and Netherlands to reduce fossil fuel consumption and harmful emissions. Blends of ethanol and diesel exhibit phase instability due to the polarity difference. Therefore, an emulsifier is generally required to stabilize the mixture. Biodiesel has been used as an emulsifier for diesohol blend, amongst many emulsifiers such as alkanols, decaglycerol mono-oleate (MO750), and alkanolamides (Fernando and Hanna, 2004). Kwanchareon et al., (2007) reported that diesohol blends containing 80 vol.% diesel, 15 vol.% biodiesel, and 5 vol.% ethanol has similar properties to that of diesel fuel. Span80 and isopropanol have been used as emulsifying agents to resolve the incompatibility between diesel and ethanol (Can et al., 2004; Cheenkachorn and Fungtammasan, 2009). Diesel engine performance has been studied in order to verify the efficiency of the fuel blends. Ali et al., (2015) studied the engine performance for the fuel blend (30% of ethanol blend with diesel and 6% of ethyl ether). It was found that the use of diesohol could lead to a slightly lower engine efficiency (4-12%) compared to the case of pure diesel due to the low calorific value of fuel blend. Praptijanto et al., (2015) investigated the effect of ethanol percentage on the brake power of diesel engine, using span 80 as emulsifier. It was found that conventional diesel exhibited a higher brake power of the engine than that of fuel blend with 2.5%-10 % ethanol, at the speed faster than 1400 rpm. This is due to the fact that ethanol has low cetane number.

The disadvantage of commercial emulsifier is the high cost because the high-quality emulsifiers are required to import from other countries (Reyes, Y., et. al. 2019) A fuel blend of 10 vol.% biodiesel in 80 vol.% diesel and 10 vol.% ethanol was stable for at least 96 hours (Park et al., 2009). However, biodiesel

has a tendency to react with oxidation during storage. Oxidation degradation can lead to the formation of acids and insoluble sediments that deposit on fuel injectors (Pullen and Saeed, 2012). GMS has the glycerol head group (polar part) and the fatty acid chain (Non-polar part). Glycerol monostearate (GMS) is a non-toxic emulsifier. It has a broad range of applications such as emulsifier in food, pharmaceuticals, cosmetics, and detergents (Yu et al., 2003). GMS has a hydrophilic-lipophilic balance (HLB) of approximately 3.2, which is within the range of water-in-oil emulsions (Euston et al., 1996). GMS was used as emulsifier to prevent the separation between biodiesel and tert-butylhydroquinone (TBHQ) which is the antioxidant. It was observed that the acid value and the iodine value of biodiesel met the standard when mix 100 ppm of GMS with TBHQ (Sutanto, H. et.al. 2018). To alleviate the problem of the unsaturated hydrocarbons, a certain amount of antioxidant can be added to the blend. Common antioxidants are phenolic compounds containing highly labile hydrogen which delays the start of the lipid oxidation reaction (Yu et al., 2003). A natural antioxidant extractable from the cashew nut industry is cardanol (Euston et al., 1996). Cardanol is a phenolic lipid and can be obtained via chemical conversion of anacardic acid, the main constituent of the oil trapped inside the cashew nut shells (cashew nut shell liquid, CNSL) (Sanjeeva et al., 2014). When heated, anacardic acid is decarboxylated to produce DT-CNSL which contains cardanol as the main component. Kubo et al., (2006) found that when cardanol was added to linoleic acid the occurrence of free radicals was reduced by 30%. The molecular structure of cardanol has both non-polar (lipophilic) and polar (hydrophilic) ends; typical characteristics for an emulsifying agent. Therefore, it is plausible that cardanol can be used to blend with diesel and ethanol to inhibit oxidation. Amongst many different surfactants, GMS/DT-CNSL have never been applied as emulsifier for diesohol. Therefore, this work dealt with the investigation on phase stability and oxidation stability of the modified diesohol by using GMS/DT-CNSL as emulsifier. Measurements of the physical and chemical properties were compared with the standards of diesel. Moreover, the effect of fuel blend on diesel engine performance in terms of brake power of the engine and brake specific fuel consumption (BSFC) was investigated and compared with the literature data.

Materials and methods

1. Materials

The cashew nut shells and diesel used in the experiments were supplied by Methee Phuket Company Limited and Bangchak Petroleum Public Company Limited. The anhydrous ethanol (99.9% purity) was supplied from MERCK.

2. Extraction of DT-CNSL

Prior to extraction of oil, the cashew nut shells (CNSL) were washed with water and dried at 80 °C for 12 h. The shells were ground to small particles using a SK-1 model, cross-beater mill, and these were subsequently dissolved in ethanol with the ratio of 150 g CNSL: 1 L EtOH. This ratio of extraction was published in the previous research of Bangjang, et al. (2016). The solution mixture was continuously stirred at room temperature for 1 h. The mixture was then filtrated using a vacuum filter, and the filtrate containing the extracted compounds was subjected to vacuum evaporation at 180 °C for 2 h to remove the ethanol. The extracted compound obtained was distilled technical CNSL (DT-CNSL).

3. Fuel blending

The samples of mixed fuel obtained from the different blending formulas were categorized (coded) primarily by the content of diesel (D), ethanol (E), DT-CNSL (DT-C), and GMS (G). For instance, D70E30 describes the condition that the volume ratio between diesel and ethanol is 70:30. The concentration of GMS was added to diesohol blend as weight percent of the volume of the mixture. A certain amount of GMS was mixed with diesel and ethanol using a vortex mixer for 3 minutes at room temperature. Subsequently, DT-CNSL was added to the homogeneous mixture. The solution was agitated vigorously for 10 min by vortex mixer. The samples were collected and stored in the dark. Three samples were prepared from each blending formulae, as shown in Table 3.

4. Properties of the fuel blends

4.1 Viscosity and acid value

The viscosity and acid value were measured by Ostwald viscometer and the standard titration method according to ISO 3104.

4.2 Cetane Index

The density and mid-boiling point were used to estimate the cetane index according to ASTM D976.

4.3 Oxidation stability measurement

The oxidation stability of the fuel blends was studied according to the Rancimat method (EN 14112) for biodiesel and a modified Rancimat method (EN 15751) for the biodiesel blends. Three grams of sample was kept at a constant temperature of 110 °C, with an air flow rate of 10 L/h. The oxidation products were transferred into the distilled water in the measuring vessel by the flow of air bubbling through the sample. The conductivity of the distilled water was continuously monitored by a conductivity meter.

5. Engine performance test

The engine used in this study was a TF 90 DI-L YANMAR diesel generator. Specifications of the engine are shown in Table 1. Figure 1 represents the schematic view of diesel engine. All samples were performed at 800 rpm for 20 minutes in order to ensure the full warm-up. After that, the performance was evaluated in terms of brake power of the diesel engine, fuel consumption rate, and exhaust gas temperature at 10 rpm which provided the maximum torque (33.7 N.m). In this work, as a preliminary evaluation for the possibility of using our fuel blend, the standard engine test was performed at a fixed speed of 1,500 rpm. The load was measured by P-1.5 ANAKA-STYLE DYNAMOMETER. Different %loads were applied (25%, 50%, 75% and 100%) to the engine by using dynamometer. Once the stable load was observed, the mass of fuel consumed in 1 minute and the output torque were recorded in order to evaluate the brake power of engine and the fuel mass consumption. The exhaust gas temperature was measured by a type-K thermocouple.

Table 1 Specification of Diesel engine

Engine	TF 90 DI-L
Type	Four stroke engines
Combustion system	Direct injection
Bore x stroke	85 x 87
Cooling system	Horizontal liquid-cooled
Rate power	66 kW at 2,400 rpm
Compression ratio	16.6:1
No. of cylinders	1
Injection Pressure	200 kg/cm ³

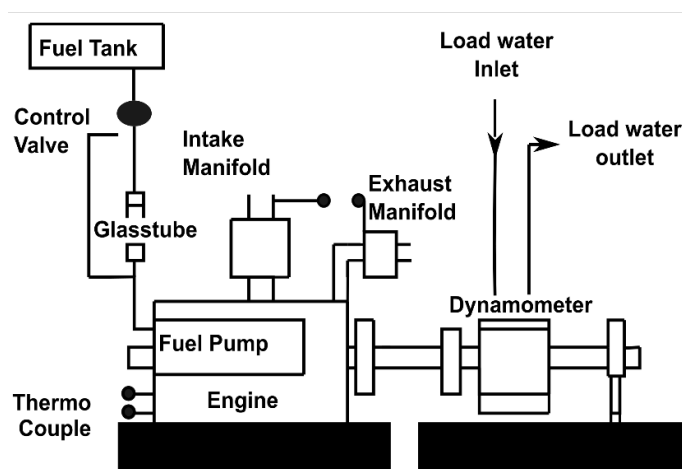


Figure 1 Schematic of diesel engine test

5.1 Brake Power and BSFC

The brake power of diesel engine calculated from equation (1) where P is brake power of engine, W is braking load of dynamometer, L is length of dynamometer (0.716 m), N is rotation speed of power shaft and a is conversion coefficient (100 in case of kW).

$$P = \frac{2\pi WLN}{60a} \quad (1)$$

BSFC was evaluated as the ratio of fuel consumption to the brake power as shown in equation (2) where $\dot{m}_f$ is the fuel consumption (kg/h).

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f \times 3600}{P} \quad (2)$$

Results and discussion

1. Phase stability of diesohol with GMS as additive

The physical and chemical properties of the fuel components were demonstrated in Table 2 according to the standard methods. The properties of diesel were within the ranges of diesel standard. Different states of chemical components required the screening for phase stability of fuel blends. Mixture with different compositions of GMS, diesel and ethanol were prepared and stored for over three months during which the phase separation of diesel/ethanol was visually observed. The time that each sample of the mixture became two phases was recorded. Figure 2 represents a triangle phase diagram of fuel blend. Grey circles represent the stable homogeneous blend, and black squares indicate that the separation occurred during 3 months of observation. As observed in Figure 2, in the case of D60E40 and D70E30, the diesohol was single phase for 4 wt.% and 3wt.% of GMS, respectively. When the concentration of GMS decreased to 3 wt.% and 2 wt.%, the phase separation of diesel and ethanol was observed. The required amount of GMS to obtain stable single phase was directly related to the ratio of ethanol and diesel in the mixture. For D85E15, the threshold limit of GMS content for a stable mixture was 1.2 wt.%. These results indicated that GMS can be used as emulsifying agent for diesohol. This was due to the fact that the HLB of GMS is approximately 3.8 suggesting the potential use as emulsifying agent for water-in-oil emulsion (Karbowski et al., 2007).

2. Physical and Chemical properties of diesohol

Viscosity and cetane index of fuel blends were investigated for diesohol with different amounts of GMS according to ASTM specifications. The basic fuel properties of the blends were summarized in Table 3. The viscosity of D60E40, D70E30, D80E20, and D85E15 was within the threshold limits for high-speed diesel fuel (1.4-4.1 cSt) for all concentration of GMS. Apparently, the viscosity of fuel blend was inversely related to the ethanol portion due to the fact that ethanol has low viscosity (1.19 cSt) amongst the three individual fuel compositions used in this work. For the case of GMS, the viscosity increased with increasing amount of GMS.

Table 2 Chemical properties of the constituents

Properties	Diesel	Ethanol	GMS	Standard Diesel	Method
Color	Yellow	Colorless	White Powder		-
Density (g/cm ³) @ 15 °C	0.835	0.789	0.97	0.81-0.87	ASTM D1298
Viscosity (cSt) @ 40 °C	3.04	1.19	-	1.8-4.1	ASTM D 445
Acid value (mg KOH/g)	0.11	0.11	-	0.8 (max)	ASTM D 664
Calorific value (MJ/kg)	45.53	30.00	-	45 (min)	ASTM D 240

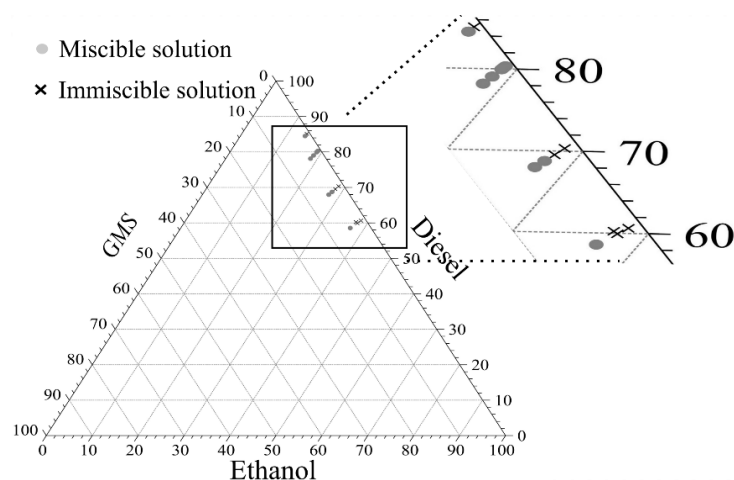


Figure 2 Phase stability of diesohol with GMS

Table 3 Properties of Diesohol

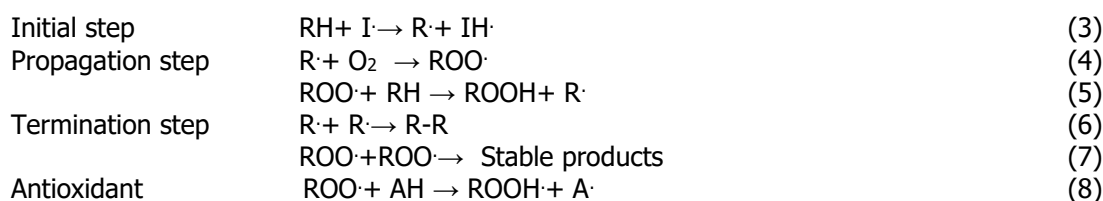
Diesel:Ethanol	%GMS	Viscosity (cSt)	Acid Value (mgKOH/g)	Cetane Index
85:15	1.2	2.62	0.11	52.21
80:20	0.6	2.40	0.11	48.85
80:20	0.8	2.49	0.11	48.82
80:20	1	2.54	0.11	48.82
80:20	2	2.60	0.11	48.85
80:20	3	2.65	0.11	48.81
70:30	3	2.38	0.11	42.69
70:30	4	2.45	0.11	42.74
60:40	4	2.02	0.11	38.75

The cetane index represents the effect of fuel on the engine start up, combustion control and engine performance (Chotwichien et al., 2009). The cetane index of both D60E40 and D70E30 did not meet the standard of diesel (minimum 45) due to the low cetane number of ethanol (Xing-Cai et al., 2004). However, the cetane index of D80E20 and D85E15 were approximately 48.8 and 52.2, which satisfied the industrial and the automotive diesel standard, respectively. The cetane index of fuel blends was in the range of 46-48; similar to those reported for diesel/biodiesel/ethanol (Kwanchareon et al., 2007). The cetane index of ethanol is lower than 8. (Hulwan, D.B. & Joshi, S.V., 2011) Increasing of amount ethanol in the mixture decrease the cetane index of the fuel blends (Chotwichien et al., 2009). In addition, the acid values of the fuel blends were studied to compare with standard values. The acid value indicates the content of fatty acids in oil, which may cause corrosion of engine and fuel tank (Shahabuddin et al., 2012). It was found that the acid values were stable at 0.11 mgKOH/g for all concentration of GMS, which meet the requirement of diesel ASTM D664 (maximum 0.5 mgKOH/g). This is due to the low acid value of GMS (less than 2 mgKOH/g) and the dilution effect of diesel/ethanol. D85E15 at 1.2 wt.% of GMS was considered to study the oxidation stability and engine performance because it was the minimum threshold of phase stability of the blend and the properties was within the diesel standard range.

3. Oxidation stability of diesohol

Oxidation stability represents the tendency of the fuel to react with oxygen. The oxidation stability of the fuel blends with GMS is shown in Figure 3. The conductivity of D85E15G1.2 increased to 67 $\mu\text{S}/\text{cm}$ after

24 hours. This conductivity value shows that the oxidation reaction happened in fuel blend. It was associated with the low bond energy (94 kcal/mol) of the hydroxyl group in GMS (Blanksby and Ellison, 2003). The free radicals formed reacted with oxygen to create the carboxylic component in the solution. Therefore, 0.5, 1, 1.5% of DT-CNSL was added to fuel blend in order to delay the oxidation reaction. When the concentration of DT-CNSL was increased, there was a decrease in the conductivity of the measuring cell due to the lower bond energy of the hydroxyl group in DT-CNSL (58 kcal/mol) compared to that of GMS (Blanksby and Ellison, 2003). DT-CNSL contains labile hydrogen, so-called chain-braking antioxidant (AH). It can immediately interact with peroxy radical ($\text{ROO}\cdot$) generated from the initial step of the oxidation reaction (equation 3) (Jain and Sharma, 2010). Free radicals ($\text{I}\cdot$) were formed via thermal dissociation of fatty acid substrate (RH) (Jain & Sharma, 2014). Oxygen molecules can react with carbon-based fatty acid radicals ($\text{R}\cdot$) to form acid peroxide radicals ($\text{ROO}\cdot$) [equations 4,5]. These radicals further react with the fatty acid chain (RH) of GMS yielding fatty acid. In the terminating step, $\text{R}\cdot$ combines with another radical to produce a stable product.



Note that 1 vol.% and 1.5 vol.% resulted in similar conductivity profile possibly due to the prolonged inductive period. The composition of DT-CNSL contains cardanol, which is antioxidant and it can react with oxygen and $\text{ROO}\cdot$ [equation 8] (Lopes et al., 2008). The fuel blend of D85E15G1.2 at 1 vol.% of DT-CNSL was used for the engine performance test.

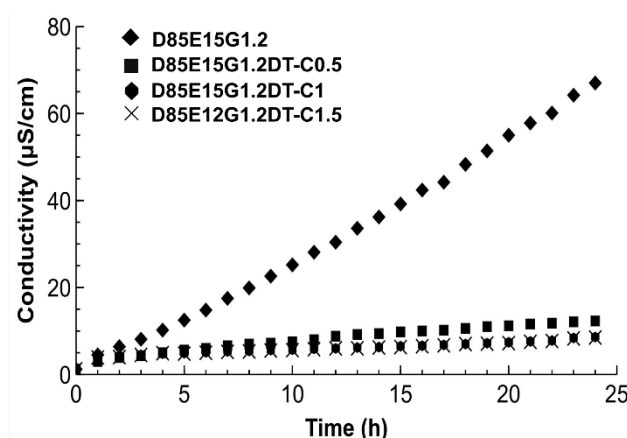


Figure 3 Oxidation stability of diesohol with GMS and DT-CNSL

4. Engine performance test

This work focuses on one speed (1500 rpm) because a relatively high torque of a similar mechanical diesel engine was obtained for diesel/ethanol blends at this speed (Freitas et al., 2022).

4.1 Brake Power of diesel engine

Figure 4 shows the brake power of engine and torque of the tested diesel engine using diesel and modified diesohol (D85E15G1.2DT-C1). For both types of fuel, the brake power of engine considerably rose with increasing percent load owing to the increased engine torque. High percent load was associated with high resistance of a crank shaft rotation motion and the engine developed the required torque as shown in Figure 4. It affects to power that engine producing. For D85E15G1.2DT-C1, it was observed that the brake power of engine at 50-100 % load was 9-14 % lower than diesel due to the lower heating value of diesel compared to diesel fuel (Karabektas and Hosoz, 2009). Our results were in line with the work by (Shahir et al., 2015), which the maximum power output of diesohol (diesel/ethanol/biodiesel) reduced approximately by 4.4-8.7% compare to pure diesel.

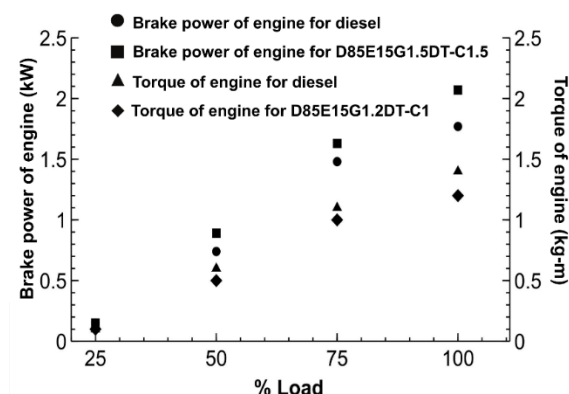


Figure 4 Brake power of engine and torque of fuel blend as a function of load

4.2 BSFC

BSFC is the rate of fuel consumed per unit brake power of engine (Shahir et al., 2015). The BSFC is shown in Figure 5(a) for the modified diesohol and diesel at 1500 rpm. BSFC of fuel blend decreased significantly with increasing percent load from 20 to 50. BSFC was relatively stable at 75-100% load. This was owing to the fact that brake power of the engine rises with an increase in the %load. In addition, BSFC was affected by fuel consumption rate as shown in Figure 5 (a). It was found that BSFC of diesel blend was higher than that of diesel by 24% and 16% at 75% and 100% load, respectively. This was also related to the low heating value of ethanol in the blend leading to higher fuel consumption of D85E15G1.2DT-C1 compared to diesel. These results were in line with the study by Subbaiah et al. (2010), which reported an increase in BSFC at high percent load for 75% of diesel, 10% of biodiesel, and 15% of ethanol. Note that the effect of ethanol on the energy content of the blends resulted in higher BSFC than that of diesel fuel for all percent load.

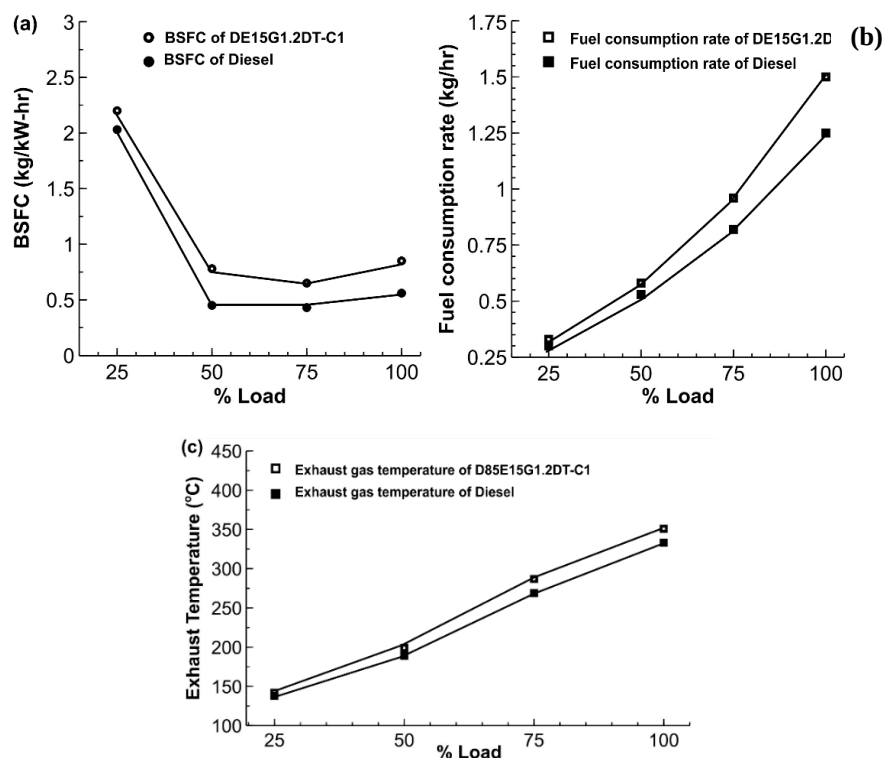


Figure 5 Effect of fuel blend on (a) Brake specific fuel consumption (BSFC), (b) fuel consumption rate of fuel blend, and (c) Exhaust gas temperature as a function of load at speed of 1,500 rpm

4.3 Exhaust gas temperature

Exhaust gas temperature is the exact temperature of the fuel after it combusted in the engine. It is generally required that exhaust gas temperature is not to be higher than 720°C due to the possible damages of engine (Zheng et al., 2004). Exhaust gas temperature for fuel blend and diesel are shown in Figure 5(b). The exhaust gas temperature increased with increasing percent load for fuel blend and diesel. Note that the exhaust gas temperature of fuel blend is slightly higher than that of diesel. The lower cetane index of D85E15G1.2DTC-1 caused longer ignition delay leading to faster combustion, shortened combustion duration, and accumulated heat in the engine (Yilmaz et al., 2014).

5. Fuel properties

Table 4 summarizes the fuel properties of D85E15G1.2DT-C1 and diesohol blends from the literature data (with different emulsifiers). For D85E15G1.2DT-C1, the mass fraction of diesel, ethanol, GMS and DT-CNSL were 83 wt%, 14 wt%, 1.4 wt% and 1.2 wt%, respectively. Li et al., (2017); Tan, et al. (2017) studied the properties of diesel/ethanol by using SPAN80 and biodiesel as emulsifier. In the case of SPAN80, the density of our blend was similar to this blend while the viscosities of diesohol using SPAN80 and biodiesel were higher than our blend. This was because of the different portion of emulsifier. The heating value of D85E15G1.2DT-C1 was slightly higher than that of diesohol/SPAN80 while the heating value of diesohol/biodiesel was significantly higher than the other two formulas. This was owing to the low heating value of ethanol and the proportion of ethanol used in each blend. Ethanol also influenced the cetane index of the blend. The lower amount of ethanol in our blend D85E15G1.2DT-C1 resulted in higher cetane index compared to that of diesohol/SPAN80. It was slightly higher than the cetane index of diesohol/biodiesel possibly because the presence of cardanol, which has the heating value of 39.42 MJ/kg (Bangjang, et al. 2014). The minimum amount of GMS required for our blend was 1.2 wt.% (1.16 g per 100 ml of fuel blend), which was lower than other emulsifiers used for diesohol. Together with the small amount of GMS required, the inexpensive price of GMS also contributed to lower cost of the fuel blend. Note that cost of GMS (1.20 USD/kg) was relatively lower compared to that of SPAN80 and n-butanol. Therefore, GMS can be used as a low-cost emulsifier for diesel and ethanol blend.

Table 4 Properties of the fuel blend.

Properties	D85E15G1.2DT-C1	Li et al. ^a	Tan et. al. ^b	Diesel Standard
Density (g/cm ³)	0.847	0.827	0.853	0.81 - 0.87
Viscosity (cSt)	2.62	3.62	3.715	1.8 - 4.1
Calorific value (MJ/kg)	39.96	38.5	44.1	36 (min)
Cetane index	52.21	42	51.2	45 (min)
Acid value (mgKOH/g)	0.11	-	-	0.8 (max)
Retail price ^c	1.36 USD/kg	1.38 USD/kg	1.38 USD/kg	-

^a80 ml of Diesel, 20 ml of ethanol, 0.33 g of n-butanol, 3.36 g of SPAN80

^b80 ml of Diesel, 10 ml of ethanol, 10 ml of biodiesel

^cBased on the price of diesel, ethanol, biodiesel, DT-CNSL, GMS, n-butanol, and SPAN80 of 1.19 USD/L, 0.81 USD/L, 1.01 USD/L, 0.64 USD/L, 1.20 USD/kg, 1.45 USD/kg, and 2.2 USD/kg, respectively.

Conclusions

GMS was applied as an emulsifier for diesel and ethanol. For phase stability of at least three months, the mixture required at least 1.2 % by weight of GMS. The properties of diesohol with GMS met the standards of diesohol fuel according to the Department of Energy Business, Ministry of Energy, and Thailand. For D85E15 with 1.2 wt.% GMS and 1 vol.% DT-CNSL of the mixture, the acid value, viscosity, and the cetane index were 0.11 mgKOH/g, 2.42 cSt, and 52.21, respectively. DT-CNSL was applied as an antioxidant to the diesohol in order to inhibit the oxidation of the hydrocarbon molecules in the fuel. From

the engine test at the speed of 1,500 rpm, the BSFC of the fuel blend was higher while the exhaust gas temperature and brake power of diesel engine were comparable to those of diesel. Therefore, GMS can be used as an emulsifier for promoting the use of biofuel (such as ethanol and CNSL) as a substitute for diesel fuel.

Acknowledgements

This research was funded by Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand contact no. 5944101.

References

- Ali, O. M., Mamat, R., Najafi, G., Yusaf, T., & Ardebili, S. M. S. (2015). Optimization of biodiesel-diesel blended fuel properties and engine performance with ether additive using statistical analysis and response surface methods. *Energies*, 8(12), 14136-14150.
- Bangjang, T., Saisangtong, R., Kaewchada, A., & Jaree, A. (2014). Modification of Diesohol Fuel Properties by Using Cashew Nut Shell Liquid and Biodiesel as Additives. *Energy Technology*, 2(9-10), 825-831.
- Bangjang, T., Kaewchada, A., & Jaree, A. (2016). Modified Diesohol Using Distilled Cashew Nut Shell Liquid and Biodiesel. *Energy & Fuels*, 30(10), 8252-8259.
- Blanksby, S. J., & Ellison, G. B. (2003). Bond dissociation energies of organic molecules. *Accounts of chemical research*, 36(4), 255-263.
- Can, O., Celikten, I., & Usta, N. (2004). Effects of ethanol addition on performance and emissions of a turbocharged indirect injection Diesel engine running at different injection pressures. *Energy conversion and Management*, 45(15-16), 2429-2440.
- Cheenkachorn, K., & Fungtammasan, B. (2009). Biodiesel as an Additive for Diesohol. *International Journal of Green Energy*, 6(1), 57-72.
- Chotwichien, A., Luengnaruemitchai, A., & Jai-In, S. (2009). Utilization of palm oil alkyl esters as an additive in ethanol-diesel and butanol-diesel blends. *Fuel*, 88(9), 1618-1624.
- Euston, S. E., Singh, H., Munro, P. A., & Dalgleish, D. G. (1996). Oil-in-water emulsions stabilized by sodium caseinate or whey protein isolate as influenced by glycerol monostearate. *Journal of food science*, 61(5), 916-920.
- Fernando, S., & Hanna, M. (2004). Development of a novel biofuel blend using ethanol- biodiesel- diesel microemulsions: EB-diesel. *Energy & Fuels*, 18(6), 1695-1703.
- Freitas, E., Guarieiro, L., da Silva, M., Amparo, K., Machado, B., Guerreiro, E., de Jesus, J., Torres, E. A., Ulgiati, S., Casazza, M., Lomas, P. L., Rakopoulos, C. D., Soares De Carvalho Freitas, E., Lefol, L., Guarieiro, N., Vinícius, M., da Silva, I., Katiane, K., Amparo, S., & Torres, E. A. (2022). Emission and Performance Evaluation of a Diesel Engine Using Addition of Ethanol to Diesel/Biodiesel Fuel Blend. *Energies*, 15(9), 2988.
- Hulwan, D. B., & Joshi, S. V. (2011). Performance, emission and combustion characteristic of a multicylinder DI diesel engine running on diesel-ethanol-biodiesel blends of high ethanol content. *Applied Energy*, 88(12), 5042-5055.
- Jain, S., & Sharma, M. P. (2010). Stability of biodiesel and its blends: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(2), 667-678.
- Jain, S., & Sharma, M. P. (2014). Effect of metal contents on oxidation stability of biodiesel/diesel blends. *Fuel*, 116, 14-18.
- Karabektas, M., & Hosoz, M. (2009). Performance and emission characteristics of a diesel engine using isobutanol-diesel fuel blends. *Renewable Energy*, 34(6), 1554-1559.
- Karbowiak, T., Debeaufort, F., & Voilley, A. (2007). Influence of thermal process on structure and functional properties of emulsion-based edible films. *Food Hydrocolloid*, 21(5-6), 879-888.
- Kubo, I., Masuoka, N., Ha, T. J., & Tsujimoto, K. (2006). Antioxidant activity of anacardic acids. *Food Chemistry*, 99(3), 555-562.
- Kwanchareon, P., Luengnaruemitchai, A., & Jai-In, S. (2007). Solubility of a diesel-biodiesel-ethanol blend, its fuel properties, and its emission characteristics from diesel engine. *Fuel*, 86(7-8), 1053-1061.
- Li, T., Zhang, X.-Q., Wang, B., Guo, T., Shi, Q., & Zheng, M. (2017). Characteristics of non-evaporating, evaporating and burning sprays of hydrous ethanol diesel emulsified fuels. *Fuel*, 191, 251-265.

- Lopes, A. A. S., Carneiro, E. A., Rios, M. A. S., Filho, J. J. H., Carioca, J. O. B., Barros, G. G., & Mazzetto, S. E. (2008). Study of antioxidant property of a thiophosphorated compound derived from cashew nut shell liquid in hydrogenated naphthenics oils. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 25(1), 119–127.
- Park, S. H., Kim, S. H., & Lee, C. S. (2009). Mixing stability and spray behavior characteristics of diesel–ethanol– methyl ester blended fuels in a common-rail diesel injection system. *Energy & Fuels*, 23(10), 5228–5235.
- Praptijanto, A., Muharam, A., Nur, A., & Putrasari, Y. (2015). Effect of ethanol percentage for diesel engine performance using virtual engine simulation tool. *Energy Procedia*, 68, 345–354.
- Pullen, J., & Saeed, K. (2012). An overview of biodiesel oxidation stability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5924–5950.
- Reyes, Y., Aranda, D. A. G., Santander, L. A. M., Cavado, A., & Belchior, C. R. P. (2009). Action principles of cosolvent additives in ethanol - Diesel blends: Stability studies. *Energy & Fuels*, 23(5), 2731–2735.
- Sanjeeva, S. K., Pinto, M. P., Narayanan, M. M., Kini, G. M., Nair, C. B., SubbaRao, P. V., & Barrow, C. J. (2014). Distilled technical cashew nut shell liquid (DT-CNSL) as an effective biofuel and additive to stabilize triglyceride biofuels in diesel. *Renewable energy*, 71, 81–88.
- Shahabuddin, M., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Bhuiya, M. M. K., & Mofijur, M. (2012). An experimental investigation into biodiesel stability by means of oxidation and property determination. *Energy*, 44(1), 616–622.
- Shahir, S. A., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Imran, A., & Ashraful, A. M. (2015). Performance and emission assessment of diesel-biodiesel-ethanol/bioethanol blend as a fuel in diesel engines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 62–78.
- Sutanto, H., Susanto, B., Nasikin, M., & Susanto, B. H. (2018). The effect of surfactant addition towards dispersion and antioxidant activity of tert-butylhydroquinone in biodiesel. *International Journal of Renewable Energy Research*, 8, 1974–1979.
- Subbaiah, G. V., Gopal, K. R., Hussain, S. A., Prasad, B. D., & Reddy, K. T. (2010). Rice bran oil biodiesel as an additive in diesel-ethanol blends for diesel engines. *International journal of research and reviews in Applied sciences*, 3(3), 334–342.
- Tan, Y. H., Abdullah, M. O., Nolasco-Hipolito, C., Zauzi, N. S. A., & Abdullah, G. W. (2017). Engine performance and emissions characteristics of a diesel engine fueled with diesel-biodiesel-bioethanol emulsions. *Energy Conversion and Management*, 132, 54–64.
- Xing-Cai, L., Jian-Guang, Y., Wu-Gao, Z., & Zhen, H. (2004). Effect of cetane number improver on heat release rate and emissions of high-speed diesel engine fueled with ethanol-diesel blend fuel. *Fuel*, 83, 2013–2020.
- Yilmaz, N., Vigil, F. M., Donaldson, A. B., & Darabseh, T. (2014). Investigation of CI engine emissions in biodiesel-ethanol-diesel blends as a function of ethanol concentration. *Fuel*, 115, 790–793.
- Yu, C. C., Lee, Y. S., Cheon, B. S., & Lee, S. H. (2003). Synthesis of glycerol monostearate with high purity. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 24(8), 1229–1231.
- Zheng, M., Reader, G. T., & Hawley, J. G. (2004). Diesel engine exhaust gas recirculation—a review on advanced and novel concepts. *Energy conversion and management*, 45(6), 883–900.

Research Article

Incorporation of Natural Colourants into Thai Steamed Cupcakes

Pimonpan Suwan and Thitikorn Mahidsanan*

Institute of Interdisciplinary Studies, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000 Thailand

*E-mail: thitikorn_mahi@hotmail.com, thitikorn.ma@rmuti.ac.th

Received: 08/09/2021; Revised: 29/08/2022; Accepted: 30/08/2022

Abstract

Thai steamed cupcake has a short shelf-life at room temperature. To resolve the problem, this research aimed to reveal the potential effects of powdered natural colourants, including turmeric, roselle and green tea-based ingredients for controlling the quality of Thai steamed cupcake product during storage at chilled temperature (4 °C). After production at 0 day, the sensory preferences in appearance and texture of all steamed cupcakes containing powdered natural colourants were not significantly different from the control treatment, which were moderately appreciated ($P>0.05$), but the odour, flavour, and overall acceptability of turmeric steamed cupcakes were lower than those of other treatments ($P<0.05$). This indicated that the sensory characteristics of turmeric steamed cupcakes should be further improved. The texture analysis and colour measurement of all steamed cupcakes treated with powdered natural colourants at the storage period of 0-2 days showed that the hardness and fracturability increased, while the colour values changed. Additionally, the microbiological parameters of all steamed cupcakes treated with powdered natural colourants met the standard of ready-to-eat bakery products based on the storage period of 2 days at 4 °C, whereas the control treatment had an unpleasant odour after 2 days. This investigation implies that the application of powdered turmeric, roselle and green tea could be used as a promising approach of natural colouring and preservative for controlling the quality of steamed cupcake product in Thailand.

Keywords: Thai steamed cupcake, Turmeric, Roselle, Green tea, Product quality

Introduction

Steamed cupcake product, called Khanom Pui Fai, is a traditional street dessert in Thailand. Its characteristics are fluffy and light due to expanding like cotton wool after steaming (Pakditawan, 2016). However, the problem of short shelf-life and food-borne pathogens remains, especially *Bacillus cereus*, *Escherichia coli*, and *Staphylococcus aureus*, which might be found during storage at ambient temperature because of intrinsic and extrinsic factors. To consider the risk hazard of each food pathogen, *B. cereus* spores can germinate and grow out rapidly after heat treatment and produce emetic and enteric toxins. Many strains of *S. aureus* produce staphylococcal enterotoxins, while certain strains of *E. coli* are used as a faecal contamination index of food sanitation (Angelidis et al., 2006; Dlubala et al., 2021; Olaimat et al., 2021).

For this reason, the microbiological quality must be taken into account based on the standard requirement of ready-to-eat food product. Artificial food colouring is generally used to improve the appearance of desserts, and it has raised concerns due to adverse effects on consumer health because certain chemicals are produced from highly toxic substances, and can cause human diseases and mutations, which should be limited in the food ingredients (Ahmed et al., 2021; Kobylewski and Jacobson, 2012). Currently, the application of plants for implementing various health care treatments and food additives have been adapted (Mulat et al., 2020). A part of plant could be applied for development of food products. For example, turmeric (*Curcuma longa*), roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.), and green tea (*Camellia sinensis*), were scientifically used as bioactive ingredients in foods due to antimicrobial activity and antioxidant capacity (Azeez and Lunghar, 2021; Lim et al., 2020; Rashidinejad et al., 2021). Even though the essential oil extracted from medicinal plants is generally used for controlling food-borne

pathogens, the extraction procedures have high value and are inconvenient. Previous publications revealed that juice extracted from plants could be applied for food and dessert products to improve the microbiological and physicochemical quality (Gattuso et al., 2006; Lertnirundon and Mahidsanan 2020). Boonkum and Mahidsanan (2021) demonstrated that turmeric and peppermint could be prepared as either food ingredients or natural colourants to control the microbiological safety of Flatbread Roti product. However, parts of turmeric, roselle and green tea have not been thoroughly investigated in steamed cupcake quality, while the cold temperature might be used as a promising hurdle effect during storage.

Thus, to extend the shelf-life of steamed cupcake product, the objective of this study was to investigate the potential effects of turmeric, roselle and green tea-based natural colourants for controlling the quality of Thai steamed cupcake product during storage at chilled temperature. Significant product qualities including water activity, colours, texture, and microbiological criteria were assessed to represent shelf-life for further development of steamed dessert products.

Materials and methods

Preparation of three powdered natural colourants and Thai steamed cupcakes

Three plant powders including turmeric, roselle and green tea, were obtained from Suranakhon market, Nakhon Ratchasima province, Thailand. The preparation steps were followed according to Boonkum and Mahidsanan (2021). Each powdered material (200 g) was dissolved in hot water (1000 g) and then filtered by sterile gauze. Afterward, each formulation of Thai steamed cupcake product was prepared (Table 1). Those treatments were steamed at 100 °C for 7 min and then cooled at ambient temperature for 10 min. Each sample was packed in polypropylene box and stored at chilled temperature (4 °C). Sensory evaluation was conducted at 0 day. Meanwhile, the parameters of product quality, including microbiological analysis and physicochemical characteristics were assessed at 0, 2, 4 and 6 days.

Table 1 Formulation of Thai steamed cupcake product with the different natural colourants

Ingredients (g)	Treatments			
	Control	Turmeric steamed cupcake	Roselle steamed cupcake	Green tea steamed cupcake
Cake flour	200	200	200	200
Sugar	175	175	175	175
Egg	100	100	100	100
Water	100	100	100	100
Lemon juice	5	5	5	5
Jasmine flavour	2.5	2.5	2.5	2.5
Pasteurised milk	51.5	51.5	51.5	51.5
Baking powder	2.5	2.5	2.5	2.5
Foaming agent & emulsifier (UFM SP)	10	10	10	10
Turmeric suspension	-	10	-	-
Roselle suspension	-	-	10	-
Green tea suspension	-	-	-	10
Water	10	-	-	-

Sensory evaluation

The hedonic test was performed to evaluate the degree of overall liking for each sample at 0 day. Untrained consumers were recruited from the undergraduate students at Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima. Thirty consumers received four samples and were asked to rate them according to degree of liking on a 9-point hedonic (strong dislike = 1 and strong like = 9). Samples were placed on plates and identified with random three-digit numbers. Panellists evaluated the samples in a testing area and were instructed to rinse their mouths with water between samples to decrease any residual effect.

Colour measurement

To analyse the colour values, the surface of each sample was evaluated using Chroma meter model CR-410 (Konica minolta, Japan). The parameters L^* (brightness), a^* (redness/greenness), and b^* (yellowness/blueness) were recorded.

Texture analysis

The samples were prepared to a size 5×5×5 cm. Textural properties (hardness, fracturability and stringiness) of samples were examined using a texture analyser model CT3 (BROOKFIELD, USA). The texture profile was set with the two-bite compression test using the following operation conditions: No. TA11/1000 25.4 mm dia.; maximum weight, 2 kg; distance, 33%; table speed, 1.00 mm/min; 2 bites.

Measurement of pH and water activity (a_w)

To measure the pH value of each sample, 10 g of sample was diluted with 90 mL of distilled water in a 250 mL beaker and homogenised for 1 min. The pH of the solution was measured after 15 min. The a_w was measured using a Lab Master- a_w neo machine (Novasina, Switzerland) at ambient temperature.

Microbiological detection

The microbial load, including total viable count, yeasts and moulds, *S. aureus*, *B. cereus*, *Salmonella* spp. and *E. coli*, were quantified according to FDA-BAM (2001).

Statistical analysis

For each analysis, triplicate experiments were performed. The results were expressed as the mean $\pm$ standard deviation (SD). IBM SPSS statistics 22 (Armonk, New York, U.S.A) was used to perform all statistical analysis. One-way analysis of variance (ANOVA) was performed, which was followed by Duncan's multiple range test (DMRT) with an overall significance level set at 0.05.

Results and discussion

Sensory characteristics of steamed cupcakes

The product appearances and sensory characteristics of steamed cupcakes with various treatments are presented in Table 2 and 3, respectively. On day 0, the sensory preference scores of each treatment depended on their powdered natural colourants characteristics. In respect to appearance and texture of all steamed cupcakes containing powdered natural colourants, they were not significantly different from the control treatment ($P>0.05$), and those features were moderately appreciated (6.30-7.33). By contrast, the odour, flavour, and overall acceptability of turmeric steamed cupcakes was classified as neither like nor dislike level, which were lower than other treatments ($P<0.05$). This abnormal score may be due to the pungent smell, especially ar-turmerone (2-methyl-6-(4-methylphenyl)-2-hepten-4-one) (Sharifi-Rad et al., 2020).

Physicochemical characteristics of steamed cupcakes during storage

pH and a_w are the major intrinsic factors in limiting or controlling the microbial growth of food products. Therefore, the microbial activity affects certain undesirable quality changes and alters food characteristics (Tapia et al., 2020). Considering all steamed cupcake products during storage for 4 days at 4 °C, the pH values of all treatments were approximately 6.93-7.53, while the a_w values were about 0.90-0.93 (data not shown). At the storage period of 0-2 days (Figure 1B and C), a decrease in the a^* of steamed cupcakes containing turmeric, roselle and green tea powder was observed ($P<0.05$), while the b^* of steamed cupcakes containing roselle and green tea powder decreased rapidly ($P<0.05$). This phenomenon might be interpreted that the colour quality of natural colourants-based food product was affected by light in a polypropylene box, while its percentage of light transmittance was approximately 85-90 (Omnexus SpecialChem, 2021). Thereby, World Health Organization (1998) suggests that natural colourants requiring protection from light should be preserved in a light resistant packaging. However, Figure 1A shows that the L^* of all steamed cupcakes containing powdered natural colourants was not significantly different during storage for 4 days ($P>0.05$). On day 6, all samples were not examined because they had physical spoilages, especially an unpleasant odour was observed. Meanwhile, texture profiles of each treatment were considered during storage. The hardness (Figure 2A) and fracturability (Figure 2B) of all steamed cupcakes containing powdered natural colourants increased due to an increase

in the storage time up to 2 days, whereas the stringiness (Figure 2C) of roselle and green tea steamed cupcake was not significantly different during storage for 0-4 days ($P>0.05$). According to other studies, these textural changes could be a result of the changes in product moisture (water loss) and the starch retrogradation, resulting in a rapid recrystallisation of amylose, which causes the hardness characteristic, slow recrystallization of amylopectin as well as staling process of cakes and bread (Culetu et al., 2018; Marchetti et al., 2021).

Table 2 Physical characteristic of all steamed cupcakes during storage at chilled temperature

Samples	Storage time (Days)			
	0	2	4	6
Control				
Turmeric steamed cupcake				
Roselle steamed cupcake				
Green tea steamed cupcake				

Table 3 Sensory evaluation of steamed cupcakes with various treatments

Sensory preferences	Control	Turmeric steamed cupcake	Roselle steamed cupcake	Green tea steamed cupcake
Appearance	7.20±1.83 ^a	6.63±2.11 ^a	6.30±1.91 ^a	6.57±2.05 ^a
Colour	7.20±1.60 ^a	6.67±1.92 ^{ab}	6.23±1.81 ^b	6.83±1.46 ^{ab}
Odour	6.60±1.50 ^a	5.57±2.01 ^b	6.57±1.63 ^a	6.13±1.74 ^{ab}
Flavour	7.10±1.30 ^a	4.97±2.13 ^b	6.67±1.69 ^a	6.66±1.54 ^a
Texture	7.33±1.24 ^a	6.57±1.74 ^a	7.30±1.32 ^a	7.33±1.32 ^a
Overall acceptability	7.50±1.11 ^a	5.87±1.94 ^b	6.90±1.21 ^a	7.20±1.03 ^a

Different letters in the same row indicate significant difference ($P < 0.05$).

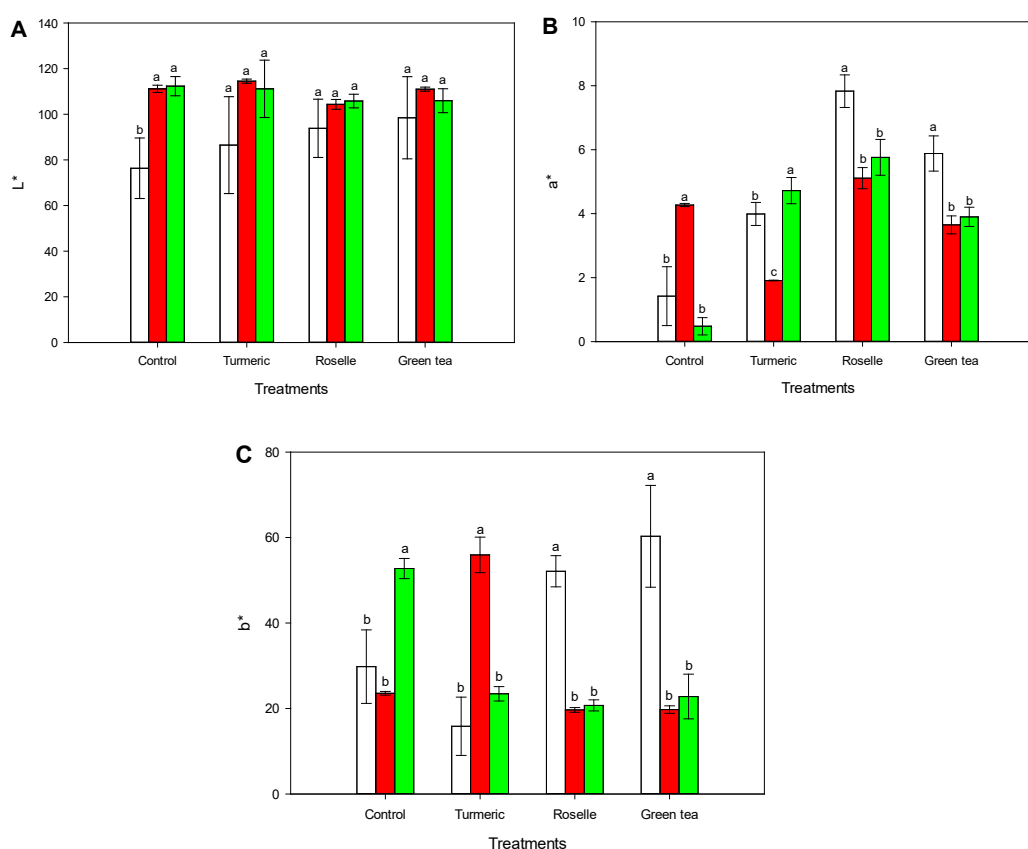


Figure 1 The colour values, (A) L*, (B) a* and (C) b* of steamed cupcake with various treatments during storage; white bar = day 0; red bar = day 2; and green bar = day 4. Different letters indicate different ($P < 0.05$) within the same natural colourant treatments during storage.

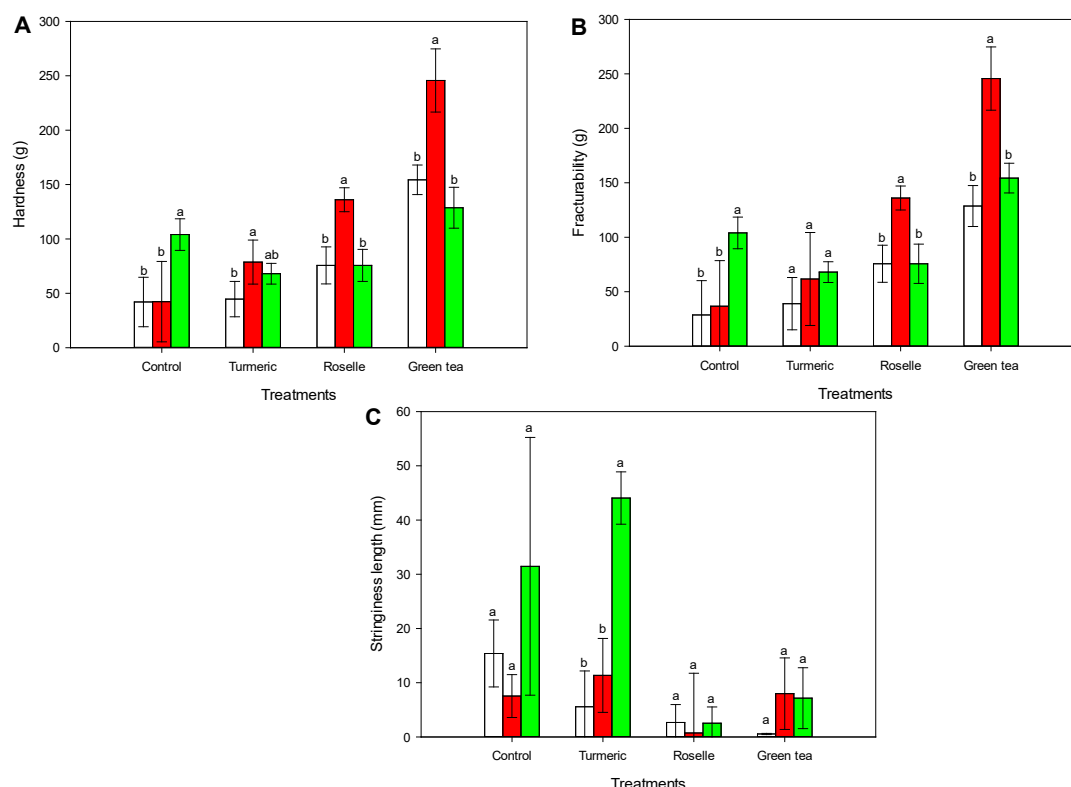


Figure 2 Texture profile analysis, (A) hardness, (B) fracturability and (C) stringiness of steamed cupcake with various treatments during storage; white bar = day 0; red bar = day 2; and green bar = day 4. Different letters indicate different ($P < 0.05$) within the same natural colourant treatments during storage.

Microbiological quality of steamed cupcakes during storage

As a matter of fact, steamed cupcakes had a short shelf-life because the water activity and pH were 0.90-0.93 and 6.93-7.53, respectively. These conditions cause the growth of microorganisms, especially a group of mesophiles and/or food-borne pathogens. Based on the standard of microbiological safety in ready-to-eat bakery products (Centre for Food Safety, 2014; Thai Community product standard, 2009), the microbial combination criteria, such as total viable count, yeasts and moulds, *S. aureus*, *B. cereus*, *E. coli*, and *Salmonella* spp., were considered during storage (Table 4). The *E. coli* and *Salmonella* spp. were not found in all samples. *S. aureus* was found to be <100 CFU/g in all steamed cupcakes containing natural colourant powder, which was relevant to standard of ready-to-eat bakery product. On day 2, the viable count of yeasts and moulds in the control treatment was 2.01×10^4 CFU/g which met an unsatisfactory level, while the number of *S. aureus* was about 2.50×10^2 CFU/g which met the limit level. In addition, an unpleasant odour was found in the control treatment after day 2. The total viable counts and *B. cereus* of turmeric, roselle and green tea steamed cupcakes were approximately $<10^4$ and $<10^3$ CFU/g, respectively, which satisfied the criteria of microbiological safety for 2 days, but the day 4 had an unsatisfactory level. However, all steamed cupcakes containing powdered natural colourants had physical spoilage at the storage period of 6 days. The consequence of steamed cupcakes treated with powdered natural colourants was achieved, resulting in controlling hazardous food-borne pathogens and extending the product shelf-life. Many studies have confirmed that the chemical composition of turmeric, roselle, and green tea is rich in bioactive compounds with antimicrobial properties. These medicinal plants could be applied as colouring agents and natural preservative in food production to enhance the preservative functions. Turmeric contains curcuminoids, which include mainly curcumin (diferuloyl methane), demethoxycurcumin, and bisdemethoxycurcumin. Green tea is a rich source of epicatechin, epigallocatechin, epicatechin gallate, epigallocatechin gallate, catechin, gallic acid, gallic acid gallate,

catechin gallate, and gallic catechin. Roselle consists of phenolics, flavonoids and anthocyanins in which generally possess antimicrobial activity (Lim et al., 2020; Naz et al., 2010; Radi et al., 2017; Siripatrawan and Noipha, 2012).

Table 4 Microbiological quality of steamed cupcake with various treatments during storage

Microbiological parameters	Storage time (Days)		
	0	2	4
Total viable count (CFU/g)			
control (untreated sample)	2.00×10^2	1.00×10^2	Not examined
Turmeric steamed cupcake	2.00×10^2	<100	<100
Roselle steamed cupcake	4.60×10^2	1.50×10^2	1.00×10^4
Green tea steamed cupcake	<100	3.40×10^2	4.80×10^6
Yeasts and Molds (CFU/g)			
control (untreated sample)	2.50×10^2	2.01×10^4	Not examined
Turmeric steamed cupcake	1.00×10^2	4.00×10^2	4.50×10^2
Roselle steamed cupcake	1.40×10^3	2.50×10^2	1.00×10^2
Green tea steamed cupcake	2.50×10^2	1.00×10^2	1.50×10^2
<i>S. aureus</i> (CFU/g)			
control (untreated sample)	2.00×10^2	2.50×10^2	Not examined
Turmeric steamed cupcake	<100	<100	<100
Roselle steamed cupcake	<100	<100	<100
Green tea steamed cupcake	<100	<100	<100
<i>B. cereus</i> (CFU/g)			
control (untreated sample)	<100	4.50×10^2	Not examined
Turmeric steamed cupcake	<100	<100	2.85×10^3
Roselle steamed cupcake	1.00×10^2	5.00×10^2	2.55×10^2
Green tea steamed cupcake	7.00×10^2	<100	1.00×10^7
<i>E. coli</i> (MPN/g)			
control (untreated sample)	<0.03	<0.03	Not examined
Turmeric steamed cupcake	<0.03	<0.03	<0.03
Roselle steamed cupcake	<0.03	<0.03	<0.03
Green tea steamed cupcake	<0.03	<0.03	<0.03
<i>Salmonella</i> spp.			
control (untreated sample)	Not detected	Not detected	Not examined
Turmeric steamed cupcake	Not detected	Not detected	Not detected
Roselle steamed cupcake	Not detected	Not detected	Not detected
Green tea steamed cupcake	Not detected	Not detected	Not detected

Not examined indicates that the sample was not examined because of spoilage.

Conclusion

The results of this study showed that the parameters of microbiological safety of all steamed cupcakes treated with powdered natural colourants met the standard of ready-to-eat of bakery product based on the storage period of 2 days at 4 °C, whereas a control treatment had a spoilage characteristic of unpleasant odour within 2 days. The present investigation demonstrated that the application of turmeric, roselle and green tea powder is a promising approach for controlling the physical and microbiological quality of steamed cupcakes. Part of these plants could be further applied as a natural colouring agent for substituting the use of artificial colouring for steamed cupcake product in Thailand. However, sensory characteristics of turmeric steamed cupcake should be improved, while antioxidant activity measurement should be evaluated in further study.

Acknowledgement

This work was supported by Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima. We would also like to thank Miss. Martha Eromine for English language editing of this manuscript.

References

- Ahmed, M. A., Al-Khalifa, A. S., Al-Nouri, D. M., & El-Din, M. F. S. (2021). Dietary intake of artificial food color additives containing food products by school-going children. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(1), 27-34.
- Angelidis, A. S., Chronis, E. N., Papageorgiou, D. K., Kazakis, I. I., Arsenoglou, K. C., & Stathopoulos, G. A. (2006). Non-lactic acid, contaminating microbial flora in ready-to-eat foods: A potential food-quality index. *Food microbiology*, 23(1), 95-100.
- Azeez, T. B., & Lunghar, J. (2021). Antiinflammatory effects of turmeric (*Curcuma longa*) and ginger (*Zingiber officinale*). *Inflammation and Natural Products*, 127-146.
- Boonkum, N., & Mahidsanan, T. (2021). Effect of turmeric juice and peppermint juice on the quality of Flatbread Roti. *Thai Science and Technology Journal*, Accepted manuscript. (in Thai)
- Centre for Food Safety. (2014). *Microbiological guidelines for food. For ready-to-eat food in general and specific food items*. https://www.cfs.gov.hk/english/food_leg/files/food_leg_Microbiological_Guidelines_for_Food_e.pdf
- Culetu, A., Duta, D. E., & Andlauer, W. (2018). Influence of black tea fractions addition on dough characteristics, textural properties and shelf life of wheat bread. *European Food research and technology*, 244(6), 1133-1145.
- Dlubala, A., Boguslawska-Was, E., & Daczowska-Kozon, E. (2021). Prevalence, virulence genes, and genetic diversity of *Bacillus cereus* isolated from convenience food. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 20(1).
- FDA-BAM. (2001). *In FDA's bacteriological analytical manual*. <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bacteriological-analytical-manual-bam>
- Gattuso, G., Caristi, C., Gargiulli, C., Bellocco, E., Toscano, G., & Leuzzi, U. (2006). Flavonoid glycosides in bergamot juice (*Citrus bergamia* Risso). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(11), 3929-3935.
- Kobylewski, S., & Jacobson, M. F. (2012). Toxicology of food dyes. *International journal of occupational and environmental health*, 18(3), 220-246.
- Lertnirundon, N., & Mahidsanan, T. (2020). Effectiveness of bergamot juice on the survival of *Bacillus cereus* and quality of Thai steamed pumpkin cake. *Food and Applied Bioscience Journal*, 8(1), 33-42.
- Lim, H. W., Seo, K. H., Chon, J. W., & Song, K. Y. (2020). Antimicrobial activity of *Hibiscus sabdariffa* L.(Roselle) powder against food-borne pathogens present in dairy products: Preliminary study. *Journal of Dairy Science and Biotechnology*, 38(1), 37-44.
- Marchetti, L., Acuña, M. S., & Andrés, S. C. (2021). Effect of pecan nut expeller meal on quality characteristics of gluten-free muffins. *LWT*, 146, 111426.
- Mulat, M., Khan, F., Muluneh, G., & Pandita, A. (2020). Phytochemical profile and antimicrobial effects of different medicinal plant: current knowledge and future perspectives. *Current Traditional Medicine*, 6(1), 24-42.
- Naz, S., Jabeen, S., Ilyas, S., Manzoor, F., Aslam, F., & Ali, A. (2010). Antibacterial activity of *Curcuma longa* varieties against different strains of bacteria. *Pak J Bot*, 42(1), 455-62.
- Olaimeat, A. N., Ghoush, M. A., Al-Holy, M., Hilal, H. A., Al-Nabulsi, A. A., Osaili, T. M., & Holley, R. A. (2021). Survival and growth of *Listeria monocytogenes* and *Staphylococcus aureus* in ready-to-eat Mediterranean vegetable salads: Impact of storage temperature and food matrix. *International Journal of Food Microbiology*, 109149.
- Omnexus SpecialChem. (2021). *Transparency*. Transmission of visible light. <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/transparency>
- Pakditawan, S. (2016). *Thai steamed cupcakes*. Khanom Pui Fai. <https://www.sirinyas-thailand.de/2016/01/04/thai-steamed-cupcakes-khanom-pui-fai/>
- Radi, M., Firouzi, E., Akhavan, H., & Amiri, S. (2017). Effect of gelatin-based edible coatings incorporated with Aloe vera and black and green tea extracts on the shelf life of fresh-cut oranges. *Journal of Food Quality*, 2017.
- Rashidinejad, A., Boostani, S., Babazadeh, A., Rehman, A., Rezaei, A., Akbari, S., & Jafari, S. M. (2021). Opportunities and challenges for the nanodelivery of green tea catechins in functional foods. *Food Research International*, 142, 110186.
- Sharifi-Rad, J., El Rayess, Y., Abi Rizk, A., Sadaka, C., Zgheib, R., Zam, W., & Martins, N. (2020). Turmeric and its major compound curcumin on health: bioactive effects and safety profiles for food, pharmaceutical, biotechnological and medicinal applications. *Frontiers in pharmacology*, 11.

- Siripatrawan, U., & Noipha, S. (2012). Active film from chitosan incorporating green tea extract for shelf life extension of pork sausages. *Food hydrocolloids*, 27(1), 102-108.
- Tapia, M. S., Alzamora, S. M., & Chirife, J. (2020). Effects of water activity (aw) on microbial stability as a hurdle in food preservation. *Water activity in foods: Fundamentals and applications*, 323-355.
- Thai Community product standard. (2009). *Thai desserts (No.1531/2552)*. https://tcps.tisi.go.th/pub/tcps1_52.pdf
- World Health Organizatio. (1998). *Quality control methods for medicinal plant materials*. World Health Organization. https://books.google.co.th/books?hl=en&lr=&id=ZjizDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT3&dq=Quality+control+methods+for+medicinal+plant+materials.+World+Health+Organization&ots=yRqYJedPFb&sig=C5rpQYtI92MhVEkVX_P8N3ogTmg&redir_esc=y#v=onepage&q=Quality%20control%20methods%20for%20medicinal%20plant%20materials.%20World%20Health%20Organization&f=false

Research Article

The New Discrete Weighted Exponential Distribution and Application

Chadarat Tapan^{1*}

¹Department of Mathematics, Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Phitsanulok 65000, Thailand

*E-mail: chadarat@psru.ac.th

Received: 15/05/2021; Revised: 26/04/2022; Accepted: 12/10/2022

Abstract

This paper presents a new discrete weighted exponential distribution using Chakraborty's discrete method (2015). The probability mass function, cumulative distribution function, survival function, and some mathematical properties are all discussed. The maximum likelihood estimation is used to estimate the parameters of the new discrete weighted exponential distribution. Furthermore, the new distribution was applied to two data sets. In summary, the new distribution can be a count data distribution alternative.

Keywords: discrete weighted exponential, probability mass function, discrete method

Introduction

Statistical distributions are widely used, whether as models for population occurrences or in certain situations. Many studies have shown this. For example, some statistical distributions have been proposed for lifetime models that exhibit a non-constant failure rate function (Alqasblaf et al., 2015). The lifetime model or survival function was studied using an exponential distribution of interesting random variables. It is a special case of the gamma distribution. The exponential distribution can be used to model the lifetime. If random variable X is exponential distribution, its probability density function (pdf) is given

by $f(x; \beta) = \frac{1}{\beta} e^{-x/\beta}$; $0 < x < \infty$. β is scale parameter (Casella & Berger, 2001). Gupta and Kundu

showed the exponential distribution of two parameters in 2009. They used Azzalini's (1985) concept to introduce a shape parameter of an exponential distribution, which they called a weighted exponential distribution, or WE distribution (Gupta & Kundu, 2009).

In 2011, Parriz, Iman, and Behzad showed how to estimate the parameters of a weighted exponential distribution using maximum likelihood estimation, which is an estimator that cannot be expressed explicitly (Parriz et al., 2011). In 2014, Fatemah, Ghitany, and Claudio used Monte Carlo simulation to assess the finite sample attributes of the weighted exponential distribution's difference parameter estimation approach, including maximum likelihood, moments, L-moment, ordinary least-squares, and weighted least-squares (Fatemah, Ghitany, & Claudio, 2014). In 2016, Shakila and Itrat developed a new weighted exponential distribution and applied it to data from 100 bank customers' waiting times (Shakila & Itrat, 2016). Oguntunde, Owoloko, and Balogun defined a new weighted exponential distribution based on Nasiru's content (2015) and the probability density function (pdf) of the weighted exponential distribution were $f(x; \lambda, \alpha) = (1 + \lambda)\alpha e^{-(1+\lambda)\alpha x}$; $x > 0$, $\alpha > 0$ and $\lambda > 0$ and applied it to four real data sets (Oguntunde et al., 2016). In 2018, Khongthip, Patummasut, and Bodhisuwan suggested a discrete weighted exponential distribution. A discrete distribution is derived from a matching continuous distribution using Roy's method of discretization. They demonstrated the probability mass function, survival function, probability generating function, and characteristic function (Khongthip et al., 2018). Mahdi, Omid, and Alireza developed and evaluated parameters for a discrete weighted exponential distribution (Mahdi et al., 2018).

There are several discrete methods for producing a discrete distribution. In 2015, Chakraborty described the various ways of constructing discrete probability distributions as analogues of continuous probability distributions. For instance, the method based on pdf, the survival function, and the hazard function (Chakraborty, 2015).

The aims of this study were to create a new discrete weighted exponential distribution and to apply it to two data sets. Some mathematical characteristics have explicit expressions. The remainder of the paper is structured as follows. In section 2, the methods consisted of a discrete method and weighted exponential distributions. The results are shown in section 3. It consists of a new discrete weighted exponential distribution, mathematical properties, and parameter estimation. In section 4, the application for two data sets. Finally, the discussion and conclusions are in the last section, respectively.

Methods

Discrete method

There are several methods for obtaining a discrete distribution from a continuous one. In 2013, Lai showed the construction of a discrete lifetime distribution from a continuous one in his paper on the building of a discrete lifetime distribution. Chakraborty (2015) showed many methods to generate a discrete distribution of a continuous probability distribution. Methods based on the survival function (sf), hazard rate function, cdf, pdf, and two-stage composite methods.

This paper used a method based on continuous survival function. Chakraborty (2015) consider the definition of the discrete survival function defined as $S_Y(y) = P(Y \geq y)$ when Y is a discrete random variable and accordingly the cdf $F_Y(y) = P(Y \leq y)$ is related to the survival function as $S_Y(y) = 1 - F_Y(y-1)$ (Chakraborty, 2015).

If a continuous random variable X has the survival function $S_X(x)$, then the random variable $Y = \lfloor X \rfloor$ is the largest integer less or equal to X . The pmf of Y is

$$\begin{aligned} p(y) &= P(Y = y) \\ &= P(y \leq X < y+1) \\ &= F_X(y+1) - F_X(y) \\ &= S_X(y) - S_X(y+1) \quad ; y = 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (1)$$

Since for continuous random variable X , $P(X = x) = 0$ and $F_X(y) = 1 - S_X(y)$. The pmf will be in a compact form if the continuous survival function is in compact form. This method preserves the survival function that is $S_Y(y) = S_X(y)$.

The weighted exponential distribution

In 2009, Gupta and Kundu introduced the shape parameter of the exponential distribution (Gupta & Kundu, 2009). They applied the Azzalini concept, which is a lifetime distribution (Azzalini, 1985). The weighted exponential distribution (WE distribution) was called following the two parameters of the exponential distribution developed by Gupta and Kundu.

Definition 1: The random variable X is said to have weighted exponential distribution, with the shape and scale parameter as $\alpha > 0$ and $\lambda > 0$ respectively, if the pdf of X is

$$f(x) = \left(\frac{\alpha + 1}{\alpha} \right) \lambda e^{-\lambda x} (1 - e^{-\alpha \lambda x}); \quad x > 0, \quad (2)$$

and 0 otherwise. We will denote it as weighted exponential (α, λ) .

Properties of the weighted exponential distribution are given in the following: when $\alpha \rightarrow \infty$, the weighted exponential distribution converges to the weighted exponential with scale parameter 1 ($\lambda = 1$). As $\alpha \rightarrow 0$, the weighted exponential distribution converges to gamma distribution with shape parameter 2. When $\alpha = 1$, the weighted exponential distribution coincides with the generalized exponential distribution with shape and scale parameter 2 and λ respectively.

The cdf of the weighted exponential distribution can be written as

$$F(x) = \frac{\alpha + 1}{\alpha} \left[1 - e^{-x} - \left(\frac{1}{1 + \alpha} \right) (1 - e^{-(1+\alpha)x}) \right]; \quad x > 0, \alpha > 0 \quad (3)$$

(Gupta and Kundu, 2009).

In 2016, Oguntunde, Owoloko, and Balogun presented a weighted exponential distribution based on Nasiru's content (2015). The weighted family of distribution is given by

$$f(x) = Kg(x)\bar{G}(\lambda x),$$

where $g(x)$ is a pdf, $\bar{G}$ is the corresponding (or reliability) function, and K is a normalizing constant (Oguntunde et al., 2016).

The pdf of the weighted exponential distribution is given by

$$f(x) = (1 + \alpha)\lambda e^{-(1+\alpha)\lambda x}; \quad x > 0, \lambda > 0. \quad (4)$$

The cdf of the weighted exponential distribution is given by

$$F(x) = 1 - e^{-(\lambda x + \alpha \lambda x)}; \quad x > 0, \lambda > 0, \quad (5)$$

where λ is scale parameter and α is shape parameter (Oguntunde et al., 2016).

The pdf of the weighted exponential distribution in Equation (4) is simpler and easier to handle as compared to the weighted exponential pdf in Equation (2).

Results

The new discrete weighted exponential distribution

The probability mass function, cumulative distribution function, survival function, some mathematical characteristics, and parameter estimates are all given in this section of the study.

Theorem 1: If Y be random variable of the new discrete weighted exponential distribution where parameter α and λ are scale parameter and shape parameter respectively. The pmf of Y is

$$p(y) = e^{-y(\lambda + \alpha\lambda)} \left[1 - e^{-(\lambda + \alpha\lambda)} \right], \quad (6)$$

where $y = 0, 1, 2, \dots$ and $\alpha > 0, \lambda > 0$.

The corresponding cdf of new discrete weighted exponential distribution is given by

$$F(y) = 1 - \left[\frac{e^{-(\lambda + \alpha\lambda)(1+y)} - e^{-y(\lambda + \alpha\lambda)}}{1 - e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}} \right]; \quad y = 0, 1, 2, \dots, \alpha > 0, \lambda > 0. \quad (7)$$

Proof: When X is random variable, the pdf of the weighted exponential distribution follows in Equation (4). The survival function is

$$\begin{aligned} S(x) &= 1 - F(x) \\ &= e^{-(\lambda x + \alpha \lambda x)}, \end{aligned} \quad (8)$$

and

$$\begin{aligned} S(x+1) &= e^{-(\lambda(x+1) + \alpha \lambda(x+1))} \\ &= e^{-(\lambda x + \lambda + \alpha \lambda x + \alpha \lambda)}. \end{aligned} \quad (9)$$

From Equation (1), $Y = \lfloor X \rfloor$ is the largest integer less or equal to X then Equations (8) and (9) are plugged into Equation (1). We will obtain

$$\begin{aligned} p(y) &= P(Y = y) \\ &= S(y) - S(y+1) \\ &= e^{-(\lambda y + \alpha \lambda y)} - e^{-(\lambda y + \lambda + \alpha \lambda y + \alpha \lambda)} \\ &= e^{-y(\lambda + \alpha \lambda)} \left[1 - e^{-(\lambda + \alpha \lambda)} \right]. \end{aligned}$$

The properties of probability function are $p(y) \geq 0$ for all y and $\sum_{\forall y} p(y) = 1$. The following is a proof for the properties of a probability function.

Proof. We can see that $p(y) \geq 0$ for all y when $y = 0, 1, 2, \dots$ from the pmf of Y and we prove the properties of the probability function, $\sum_{\forall y} p(y) = 1$, that following;

$$\begin{aligned} \sum_{\forall y} p(y) &= \sum_{\forall y} p(Y = y) \\ &= \sum_{y=0}^{\infty} e^{-y(\lambda + \alpha \lambda)} \left[1 - e^{-(\lambda + \alpha \lambda)} \right] \\ &= \left[1 - e^{-(\lambda + \alpha \lambda)} \right] \left[\frac{1}{1 - e^{-(\lambda + \alpha \lambda)}} \right] \\ &= 1. \end{aligned}$$

Since $\sum_{y=0}^{\infty} e^{-y(\lambda + \alpha \lambda)}$ is the geometric series. So, we have the pmf of the new discrete weighted exponential distribution, which is shown in Equation (6). We can say that $p(y)$ is pmf. The pmf has the properties of a probability function.

Proof. The following is a proof of the cdf of a new discrete weighted exponential distribution.

$$\begin{aligned} F_Y(t) &= P(Y \leq y) \\ &= \sum_{t=0}^y p(t) \\ &= \sum_{t=0}^y e^{-t(\lambda + \alpha \lambda)} \left[1 - e^{-(\lambda + \alpha \lambda)} \right] \\ &= 1 - \left[\frac{e^{-(\lambda + \alpha \lambda)(1+y)} - e^{-y(\lambda + \alpha \lambda)}}{1 - e^{-(\lambda + \alpha \lambda)}} \right]. \end{aligned}$$

So, the cdf of the new discrete weighted exponential distribution is shown in Equation (7).

Theorem 2: If Y is a random variable of the new discrete weighted exponential, then its survival function is

$$S(y) = \frac{e^{-(\lambda+\alpha\lambda)(1+y)} - e^{-y(\lambda+\alpha\lambda)}}{1 - e^{-(\lambda+\alpha\lambda)}}, \quad (10)$$

where $y = 0, 1, 2, \dots$ and parameter $\alpha, \lambda > 0$.

Proof. That Y is a random variable of the new discrete weighted exponential with cdf in Equation (7) and $S(y)$ is defined as the survival function of the new discrete weighted exponential. Thus,

$$\begin{aligned} S(y) &= 1 - F(y) \\ &= 1 - \left[1 - \left(\frac{e^{-(\lambda+\alpha\lambda)(1+y)} - e^{-y(\lambda+\alpha\lambda)}}{1 - e^{-(\lambda+\alpha\lambda)}} \right) \right] \\ &= \frac{e^{-(\lambda+\alpha\lambda)(1+y)} - e^{-y(\lambda+\alpha\lambda)}}{1 - e^{-(\lambda+\alpha\lambda)}}. \end{aligned}$$

Figures 1 and 2 show some possible plots for the new discrete weighted exponential distribution's pmf and cdf. Figure 1 presents the pmf plots of Equation (6) for different the values of α and λ and the distribution is skewed to the right. Evidently, the scale parameter α changes according to the shape parameter λ . The pmf decreases as shape parameter λ increases.

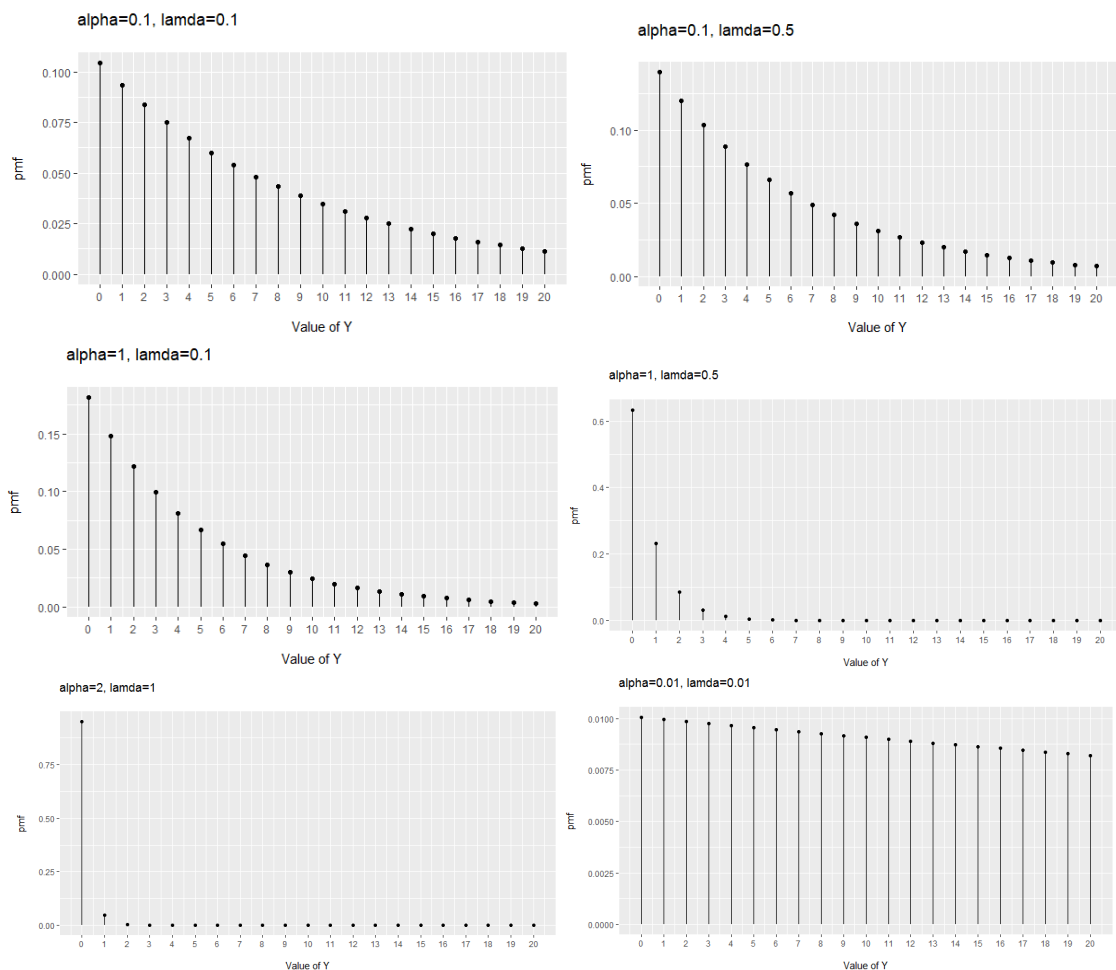


Figure 1 The pmf plots of the new discrete weighted exponential distribution

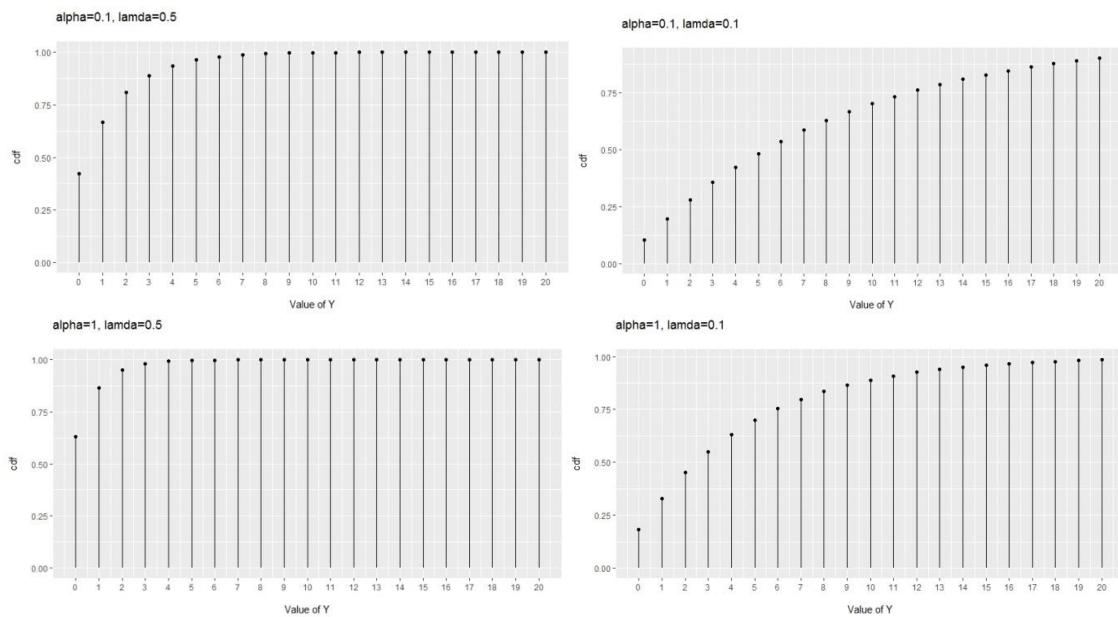


Figure 2 The cdf plots of the new discrete weighted exponential distribution

Figure 3 provides some possible plots for the survival function of the new discrete weighted exponential distribution.

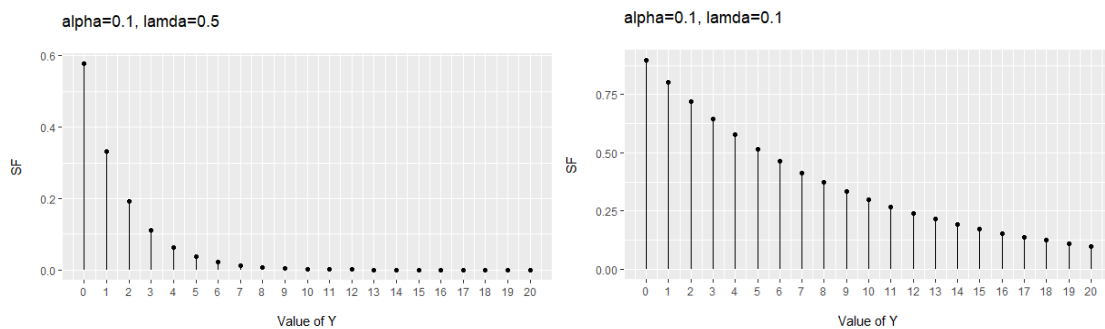


Figure 3 The survival function of the new discrete weighted exponential distribution

Mathematical properties

This section presented some mathematical properties, such as the probability generating function (pgf), expectation, variance, and moment generating function (mgf).

Probability generating function

The probability generating function is an essential component in statistical theory. The probability generating function of a discrete random variable is a power series representation of the random variable's probability mass function. A random variable's expectation and variance can also be obtained using this method.

Definition 2: Let Y be a random variable whose possible values are restricted to the non-negative integers, and $p(y) = P[Y = y]$, for $y = 0, 1, 2, \dots$. The probability generating function is then defined as

$$G(z) = E(z^y) = \sum_{y=0}^{\infty} p(y) z^y, \quad (11)$$

where $p(y)$ is the probability mass function of Y and $0 \leq z \leq 1$. (Whittaker & Henderson, 2006)

Theorem 3: Let Y be a random variable with the new discrete weighted exponential distribution, then the pgf is given by

$$G(z) = \frac{1 - e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}}{1 - z \cdot e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}}, \quad (12)$$

where $y = 0, 1, 2, \dots$, $0 \leq z \leq 1$ and $\alpha, \lambda > 0$.

Proof: The pmf of the new discrete weighted exponential distribution is replaced in Equation (11) and then the pgf is

$$\begin{aligned} G(z) &= \sum_{y=0}^{\infty} p(y) z^y \\ &= \sum_{y=0}^{\infty} e^{-y(\lambda + \alpha\lambda)} \left[1 - e^{-(\lambda + \alpha\lambda)} \right] z^y \\ &= \left[1 - e^{-(\lambda + \alpha\lambda)} \right] \sum_{y=0}^{\infty} e^{-y(\lambda + \alpha\lambda)} z^y \\ &= \frac{1 - e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}}{1 - z \cdot e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}}. \end{aligned}$$

Expectation, Variance and Moment generating function

Theorem 4: Let Y be a discrete random variable with probability generating function $G(z)$. Then

$$E(Y) = G'(1),$$

$$\text{and } E\{(Y)(Y-1)(Y-2)\dots(X-k+1)\} = G^k(1) = \frac{d^k}{dz^k} G(z) \Big|_{z=1}$$

(Joel C. Miller, 2018).

The probability generating function can be used to determine the expectation and variance using Theorems 3 and 4.

The expectation of Y is

$$E(Y) = \frac{e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}}{1 - e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}}, \quad (13)$$

and the variance of Y is

$$\text{Var}(Y) = \frac{e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}}{(1 - e^{-(\lambda + \alpha\lambda)})^2}. \quad (14)$$

Proof:

$$\begin{aligned} G'(z) &= \frac{d}{dz} \left(\frac{1 - e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}}{1 - z \cdot e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}} \right) \\ &= \frac{(1 - e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}) \cdot e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}}{(1 - z \cdot e^{-(\lambda + \alpha\lambda)})^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

From Equation (15), setting $z = 1$ following Theorem 4. we obtain

$$G'(1) = \frac{e^{-(\lambda+\alpha\lambda)}}{1-e^{-(\lambda+\alpha\lambda)}}. \quad (16)$$

$$\text{So, } E(Y) = \frac{e^{-(\lambda+\alpha\lambda)}}{1-e^{-(\lambda+\alpha\lambda)}}.$$

Similarly, to the expectation, the second derivative of $G(z)$ is

$$\begin{aligned} G''(z) &= \frac{d}{dz} \left(\frac{d}{dz} G(z) \right) \\ &= \frac{d}{dz} \left(\frac{(1-e^{-(\lambda+\alpha\lambda)}) \cdot e^{-(\lambda+\alpha\lambda)}}{(1-z \cdot e^{-(\lambda+\alpha\lambda)})^2} \right) \\ &= \frac{2(1-e^{-(\lambda+\alpha\lambda)}) e^{-2(\lambda+\alpha\lambda)}}{(1-z \cdot e^{-(\lambda+\alpha\lambda)})^3}. \end{aligned} \quad (17)$$

From Equation (17), setting $z = 1$ we obtain

$$G''(1) = \frac{2e^{-2(\lambda+\alpha\lambda)}}{(1-e^{-(\lambda+\alpha\lambda)})^2}. \quad (18)$$

Variance of Y can be derived from Theorem 4, Equation (16) and Equation (18). We obtain

$$\begin{aligned} \text{Var}(Y) &= G''(1) + G'(1) - (G'(1))^2 \\ &= \frac{2e^{-2(\lambda+\alpha\lambda)}}{(1-e^{-(\lambda+\alpha\lambda)})^2} + \frac{e^{-(\lambda+\alpha\lambda)}}{1-e^{-(\lambda+\alpha\lambda)}} - \frac{e^{-2(\lambda+\alpha\lambda)}}{(1-e^{-(\lambda+\alpha\lambda)})^2} \\ &= \frac{e^{-(\lambda+\alpha\lambda)}}{(1-e^{-(\lambda+\alpha\lambda)})^2}. \end{aligned} \quad (19)$$

From Equation (19), we obtain variance of Y .

Definition 3: The moment generating function of the random variable Y is given by $E(e^{ty})$ and is denoted by $M_Y t$, Hence

$$M_Y t = \sum_{\forall y} e^{ty} p(y),$$

if Y is discrete (Walpole et al., 2007).

From Definitions 2 and 3, set $z = e^t$ and We'll have the moment generating function.

$$\begin{aligned} G(e^t) &= E(e^{ty}) = M_Y t, \\ M_Y(t) &= \frac{1-e^{-(\lambda+\alpha\lambda)}}{1-e^{t-\lambda-\alpha\lambda}}. \end{aligned} \quad (20)$$

Parameter Estimation

The maximum likelihood estimation (MLE) method will be used to explain the parameter estimation method in this paper.

Let $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ be random samples drawn from the new discrete weighted exponential distribution with parameter α and λ as defined in Theorem 1. The likelihood function $L(y; \alpha, \lambda)$ is given by:

$$\begin{aligned} L(y; \alpha, \lambda) &= \prod_{i=1}^n p(y_i) \\ \ln L(y; \alpha, \lambda) &= \ln \prod_{i=1}^n p(y_i) \\ &= \sum_{i=1}^n \ln \left\{ e^{-y_i(\lambda + \alpha\lambda)} \left[1 - e^{-(\lambda + \alpha\lambda)} \right] \right\} \\ &= (\lambda + \alpha\lambda) \sum_{i=1}^n \{-y_i\} + n \ln \left[1 - e^{-(\lambda + \alpha\lambda)} \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

By taking partial derivative Equation (21) with respected to parameter α and λ , we obtain

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \alpha} \ln L(y; \alpha, \lambda) &= \frac{\partial}{\partial \alpha} \left\{ (\lambda + \alpha\lambda) \sum_{i=1}^n \{-y_i\} + n \ln \left[1 - e^{-(\lambda + \alpha\lambda)} \right] \right\} \\ &= -\lambda \sum_{i=1}^n \{y_i\} + \frac{n\lambda e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}}{1 - e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}}. \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \lambda} \ln L(y; \alpha, \lambda) &= \frac{\partial}{\partial \lambda} \left\{ (\lambda + \alpha\lambda) \sum_{i=1}^n \{-y_i\} + n \ln \left[1 - e^{-(\lambda + \alpha\lambda)} \right] \right\} \\ &= -(1 + \alpha) \sum_{i=1}^n \{y_i\} + \frac{n(1 + \alpha)e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}}{1 - e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}}. \end{aligned} \quad (23)$$

Then Equations (22) and (23) are set to zero respectively.

$$-\lambda \sum_{i=1}^n \{y_i\} + \frac{n\lambda e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}}{1 - e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}} = 0 \quad (24)$$

$$-(1 + \alpha) \sum_{i=1}^n \{y_i\} + \frac{n(1 + \alpha)e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}}{1 - e^{-(\lambda + \alpha\lambda)}} = 0 \quad (25)$$

From Equations (24) and (25), we cannot obtain explicit expression of estimations, then numerical analysis such as the Newton-Raphson algorithm employs gives the maximum likelihood estimates of parameter α and λ .

Applications

This section considers two data sets to fit with the new discrete weighted exponential distribution and other discrete weighted exponential distributions, such as the discrete weighted exponential distribution demonstrated by Panpharisa et al. in 2018, which we will refer to as dWEP to make this paper easier to present, and the discrete weighted exponential distribution introduced by Mahdi et al. in 2018, which we will refer to as dWEM. R software was used to do the analysis for this study.

The Akaike information criterion (AIC), Bayesian information criterion (BIC), and Akaike information criterion corrected (AICc) are used to compare models. The AIC is the most often used fit

statistic. Let L be the model likelihood, p is the number of parameters (predictors) in the model. The AIC is

$$AIC = -2\ln(L) + 2p.$$

The formulate of BIC is

$$BIC = -2\ln(L) + p\ln(n),$$

with p is number of parameters and n the number of observations in the model.

The formula for AICc depends on AIC. the formula for AICc is as follows;

$$AIC_c = AIC + \frac{2p(p+1)}{n-p-1},$$

where n denotes the number of observations and p denotes the number of parameters. (Mark J. Brewer et al., 2016)

Tables 1 and 3 provide the estimates of the parameters AIC, BIC, and AICc for two data sets. *Data set 1*: The number of patients infected with influenza A/H1 2009 in Thailand between the first and fifteenth weeks of 2020. The data is accessible on the Thai National Influenza Center's website. The numbers are as follows: 15, 15, 19, 24, 24, 15, 12, 19, 19, 10, 15, 3, 0, 1, 3.

Table 1 shows the comparison of three models of discrete weighted exponential distribution. The result is that the value of AIC, BIC, and AICc of dWEM is the smallest in data set 1.

Table 1 Estimated parameters by maximum likelihood method for number of Influenza patient type A/H1 2009 in Thailand

Distribution	Parameter estimation	Criterion	Model function
1.New discrete weighted exponential	$\hat{\alpha} = 10.0360$ $\hat{\lambda} = 0.0067$	$LL = -53.963$ $AIC = 111.926$ $BIC = 118.758$ $AIC_c = 112.926$	$p(y) = e^{-y(\lambda+\alpha\lambda)} [1 - e^{-(\lambda+\alpha\lambda)}]$ $y = 0, 1, 2, 3, \dots$ and $\alpha, \lambda > 0$
2. dWEP	$\hat{\alpha} = 0.0010$ $\hat{\lambda} = 0.1487$	$LL = -171.999$ $AIC = 347.999$ $BIC = 354.831$ $AIC_c = 348.999$	$p(y) = \frac{1 - e^{(\alpha+1)\lambda} + (\alpha+1)(e^\lambda - 1)e^{(y+1)\alpha\lambda}}{\alpha e^{(\alpha+1)(y+1)\lambda}}$ $y = 0, 1, 2, 3, \dots$ and $\alpha, \lambda > 0$
3. dWEM	$\hat{\alpha} = 0.1292$ $\hat{\lambda} = 0.3578$	$LL = -52.858^*$ $AIC = 109.716^*$ $BIC = 116.548^*$ $AIC_c = 110.716^*$	$p(y) = \frac{\{(\alpha + \lambda + \alpha\lambda y)(1 - e^{-\alpha}) - \alpha\lambda e^{-\alpha}\} e^{-\alpha\lambda}}{\alpha + \lambda}$ $y = 0, 1, 2, 3, \dots$ and $\alpha > 0, \lambda \geq 0$

Data set 2: The number of European red mites on apple leaves (Mahdi Rasekhi et al., 2018).

Table 2 The number of European redmites on apple leaves.

Count	0	1	2	3	4	5	6	7	≥ 8
Observed	70	38	17	10	9	3	2	1	0

As shown in Table 3, the AIC, BIC, and AICc of the new discrete weighted exponential distribution are lower than those of the other distributions.

Table 3 Estimated parameters by maximum likelihood method for number of European red mites on apple leaves.

Distribution	Parameter estimation	Criterion	Model function
1. New discrete weighted exponential	$\hat{\alpha} = 3.8434$ $\hat{\lambda} = 0.0120$	$LL = -34.585^*$ $AIC = 73.170^*$ $BIC = 77.959^*$ $AIC_c = 75.170^*$	$p(y) = e^{-y(\lambda+\alpha\lambda)} [1 - e^{-(\lambda+\alpha\lambda)}]$ $y = 0, 1, 2, 3, \dots$ and $\alpha, \lambda > 0$
2. dWEP	$\hat{\alpha} = 0.0022$ $\hat{\lambda} = 1.1003$	$LL = -151.084$ $AIC = 306.168$ $BIC = 310.957$ $AIC_c = 308.618$	$p(y) = \frac{1 - e^{(\alpha+1)\lambda} + (\alpha+1)(e^\lambda - 1)e^{(y+1)\alpha\lambda}}{\alpha e^{(\alpha+1)(y+1)\lambda}}$ $y = 0, 1, 2, 3, \dots$ and $\alpha, \lambda > 0$
3. dWEM	$\hat{\alpha} = 0.7356$ $\hat{\lambda} = 0.1554$	$LL = -222.382$ $AIC = 448.765$ $BIC = 463.186$ $AIC_c = 450.765$	$p(y) = \frac{\{(\alpha + \lambda + \alpha\lambda y)(1 - e^{-\alpha}) - \alpha\lambda e^{-\alpha}\} e^{-\alpha\lambda}}{\alpha + \lambda}$ $y = 0, 1, 2, 3, \dots$ and $\alpha > 0, \lambda \geq 0$

Discussion

According to what has been published in other articles, the best model is the one with the lowest AIC, BIC, and AICc. As an outcome, it is worth highlighting that dWEM had the least AIC, BIC, and AICc values in the data set 1. Based on the applications offered in the first data set, dWEM is more extensible than the new discrete weighted exponential distribution and dWEP. However, with the second data set, the new discrete weighted exponential distribution clearly had the lowest AIC, BIC, and AICc values. Meanwhile, the suggested new discrete weighted exponential distribution is more tractable since it is easier to build. This result is similar to that of Oguntunde et al. (2016), who discovered that the weighted exponential distribution, which was expected to be more tractable than the weighted exponential distribution proposed by Gupta and Kundu (2009), did not outperform the weighted exponential distribution when applied to data on the remission time of blood cancer patients. Furthermore, the finding is similar to that of Adepoju et al. (2014), who discovered that the Kumaraswamy Nakagami distribution, which was supposed to be more tractable than the Beta Nakagami distribution, was not tractable.

Conclusion

A continuous weighted exponential distribution is used in this paper to develop the new weighted exponential distribution, which is created using the discrete method. The new weighted exponential distribution is shaped like a reversed J. In addition, this paper discusses the pmf, cdf, basic mathematical properties, and parameter estimation. The new weighted exponential distribution was applied to two data sets and compared to other discrete weighted exponential distributions, which discovered that the discrete weighted exponential distribution proposed by Mahdi et al. in 2018 is better for some data sets, but the new discrete weighted exponential distribution is more tractable because it is easier to construct.

References

- Adepoju, K. A., Chukwu, A. U., & Shittu, O. I. (2014). Statistical Properties of The Exponentiated Nakagami Distribution. *Journal of Mathematics and System Science*, 4, 180-185.
- Azzalini, A. (1985). A class of distributions which includes the normal ones. *Scand. J. Stat*, 12, 171-178.
- Alqasllaf, F., Ghitany, M. E., & Agostinelli, C. (2015). Weighted exponential distribution: Different method of estimations. *Applied Math. Inform. Sci.*, 9, 1167-1173.

- Casella, G., & Berger, R. L. (2001). *Statistical Inference*. California, USA: Duxbury Press.
- Chakraborty, S. (2015). Generating discrete analogues of continuous probability distribution-A survey of methods and constructions. *Journal of Statistical Distributions and Applications*, 2(6), 1-30.
- Fatemah, A., Ghitany, M. E., & Claudio, A. (2014). Weighted exponential distribution: different methods of estimations. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 9(3), 1167-1173.
- Gupta, R. D., & Kundu, D. (2009). A new class of weighted exponential distribution. *Statistics: J. Theor. Applied Stat.*, 43, 621-634.
- Joel, C. M. (2018). A primer on the use of probability generating function in infections disease modeling. *NCBI*, 3, 192-248.
- Mahdi, R., Omid, C., & Alireza, D. (2018). Discrete Weighted Exponential Distribution: Properties and Applications. *Faculty of Sciences and Mathematics, University of Nis, Serbia*. 32(8), 3043-3056.
- Mark, J. B., Adam, B., & Susan, C. C. (2016). The relative performance of AIC, AICC and BIC in the presence of unobserved heterogeneity. *Method in Ecology and Evolution*, 7, 679-692.
- Panpharisa, K., Mena, P., & Winai, B. (2018). The discrete weighted exponential distribution and its applications. *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 40(5), 1105-1114.
- Parriz, N., Iman, M., & Behzad, Y. (2011). Estimation parameters of the weighted exponential distribution. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(9), 2007-2014.
- Oguntunde, O., & Balogun, O. S. (2016). On a new weighted exponential distribution: Theory and application. *Asian Journal of Applied Science*, 9(1), 1-12.
- Rameshwar, D. G., & Debasis, K. (2009). A new class of weighted exponential distributions. *Taylor & Francis*, 43(6), 621-634.
- Shakila, B., & Itrat, B. N. (2016). A new weight exponential distribution and its application on waiting time data. *International Journal of Scientific and Research Publication*, 6(7), 698-702.
- Thai National Influenza Center. <http://www.thainihnic.org/influenza/main.php>
- Walpole, R. E., Myers, H. R., Myers, L. S., & Ye, K. (2007). *Probability & statistics for engineers & scientists*, Person Education.
- Whittaker, R. J., & Henderson, S. (2006). *Generating Function*. <http://www.onlinelibrary.wiley.com>

Research Article

The Technique of Infrared Imaging in Medicine

Witthaya Boonsuk¹, Phumin Hongma²

^{1,2}Department of Information Technology, Nakhon Phanom University, Nakhon Phanom, 48000, Thailand

*E-mail: ¹witthaya5773@gmail.com; ²phumin_h@npu.ac.th

Received: 22/07/2021; Revised: 02/12/2022; Accepted: 27/12/2022

Abstract

The purpose of the study was to develop an algorithm for High-Temperature Patients Using thermal images. This process used spectral intensity analysis to determine the range of spectral intensity. The averaging intensity level of the spectrum of colors emphasized two colors, including red and green. They were applied to analyze the temperature analysis of a thermal camera. The results of the software proficiency gathered from 9 test groups consisted of 5 images per group. The results demonstrated that testing samples of group 1, at 60 °C; group 2, at 55 °C; test group 3, at 50 °C; test group 4, at 45 °C; test group 5, at 40 °C; test group 6, at 35 °C; test group 7, at 30 °C; and test group 8, at 25 °C, can produce an output with an accuracy of 80%. In conclusion, the novelty of this research is to determine the chromaticity of the value retrieved from the image pixel level.

The overview of the developing system proficiency was at a good level. It indicated that the comparison of the spectrum color group was at a considerably precise level. The system was appropriate for further application in the analyzing works.

Keywords: Fever, Infrared, Thermal camera, Spectrum Color, Radiation

Introduction

Nowadays, information technology has the increase of usage in numerous organizations. Infrared thermal imaging has been used in medicine since the early 1960s. In the 1970s computer image processing of thermograms became available, with increased possibilities for quantitation and archiving of images (Ring, 1975). especially, an infrared camera. Initially, it was used for specific users and later used for military purposes. In the late 20th century (Rogalski, 2011). the infrared camera has been used in the medical field to scan thermal images with an average speed of 16 frames per second with low spatial resolution. (Ring, 1984). Moreover, the use of infrared cameras increases for both industrial and medical purposes. This resulted in an increased awareness of the need for standardization of techniques. Two publications were initiated by working groups within the European Thermographic Association (now European Association of Thermology) to address this question. The first, 'Standardisation of thermography in locomotor diseases—recommended procedure' (Chan, 2004). in the field of medicine Research and development of a screening system for SARS has been widely developed. It assists in remote screening by means of infrared thermometers (IRT) and is widely used in airports for screening cross-border travelers (England, 1979) for medical treatment. Thermography shows the difference in body temperature caused by the heat in the blood flow. which can distinguish the color of the spectrum depending on the body temperature transferred through the camera It is useful for evaluation and analysis in surgery (Okada, 2007). Based on this technique, the researchers used this technique to develop and research a software system that measures patient temperature and automatically alerts.

Because the body has received foreign substances. such as viruses such as colds, influenza Dengue fever, measles, avian influenza, chickenpox, hand-foot-mouth disease Herpes zoster etc. Bacteria such as typhoid fever, jaundice, leptospirosis, whooping cough, cystitis Appendicitis, etc. Inflammation of tissues or various illnesses, the body, etc. or a body temperature greater than 37.5°C

Fever or pyrexia is a condition where the core temperature or deep-body temperature is defined as the temperature of the central organs of the body such as the heart, lungs, abdomen, etc. The temperature

in this area is the actual temperature of the body. body, but in the presence of fever in this area, the temperature is higher than normal. The body temperature is higher than normal or fever occurs. From the benefits mentioned earlier, the researcher studied and designed the spectral conversion system. It converted spectrum values from thermal images to temperature figures. The spectrum of color analysis of infrared camera images could be beneficial for numerous system applications. Recently developed techniques have focused on averaging the sum of the intensity levels and processing them on a single constant. Instead, a newly developed technique divides the intensity level into intensity ranges and then compares the average measured intensity with the range specified in the measuring template.

Materials and methods

Exploring and analyzing the problem

Recently, auditing and maintaining play an important role in helping business sections and society; they reduce the costs and issues and increase job security. Besides, it helps elevate the production proficiency. The best technology that serves this kind of business is infrared camera technology. The principles of the infrared camera are to detect infrared radiation from objects. It assists the detection of the unusual phenomenon of the objects as each object has different heat transfer. The infrared wavelength range is between (0.75-1 micrometer) low wavelength (0.78-3 micrometer), medium wavelength (3-6 micrometer), high wavelength (6-15 micrometer). Most infrared cameras have a scanning rate of 30 times per second and capture the heat from -20 to 1,500 °C (Meola,2004). As mentioned earlier, an infrared camera functioned with a face detection system. In organizations and industrial sectors, the face recognition system and face detector detect the unique features of the distinct areas of a human's face. The systems can easily spot the heat on the basic features and unchangeable positions (Yang, 2002). Using this technology shortens the time of the process.

Infrared imagers

An infrared thermogram is an image of temperature distribution of the target. Although the second generation of infrared detectors was in use for military applications in the latter half of the 20th century (Rogalski,2011). (figures 1, 2). Smaller camera units and the use of microbolometers lead to higher mobility and imaging of objects in the perpendicular view i.e. with the camera mounted in the vertical position, which can now be used with modern uncooled equipment. However for very high sensitivity detectors such as the quantum well infrared photodetector, cooling is still necessary.

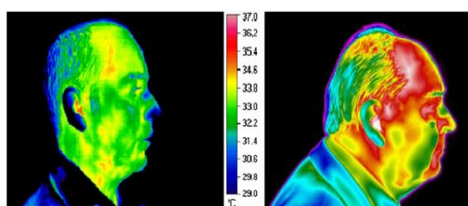


Figure 1 Zoom in Zoom Out Reset image size

Figure 1 (Left) Thermogram of lateral face recorded in 1995 with 320 × 240 pixels; (right) thermogram recorded in 2011 with a new 640 × 480 pixel infrared camera.

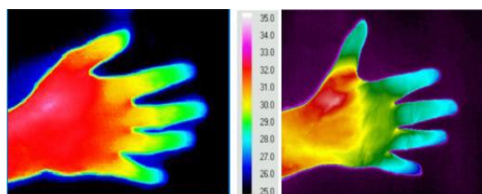


Figure 2 Zoom in Zoom Out Reset image size

Figure 2 Thermograms of dorsal hand (left) recorded in 1990 with 240 × 320 pixels and right recorded in 2011 with modern focal plane array camera with 640 × 480 pixels.

Devices and Instruments

The camera was a Testo 890 made by the German company, with a measuring range of -20 to 350 °C (high temperature measuring of 1200 °C) accuracy of ± 2 °C or $\pm 2\%$ of market value, resolution of 640 x 480 pixels, an overview of the thermal image of 42° x 32°, and heart reaction speed performed better at 0.05 °C at 30°C, as shown in Figure 1. The program used in the development and design was Visual studio c#. A detecting system of infrared technology detects the heat emission portion and converts it into an electronic signal. There are two types of detectors composed of thermal and infrared photon. The energy from the infrared radiation raises the device's temperature, so the infrared portion is detected. The infrared photon devices that use Cadmium Mercury Telluride (CMT), Anhydride indium, Platinum silicide, and quantum diesel device perform faster than thermal detectors (Willimas,2009), (Alderson,1985).

Research framework

1) Indicate the temperature range: the temperature conversion of the spectrum of colors. In this process, temperature range indication using the analysis of the color intensity of thermal images. The temperature used in this analysis was between 20-60 °C (Kaiser,2016).

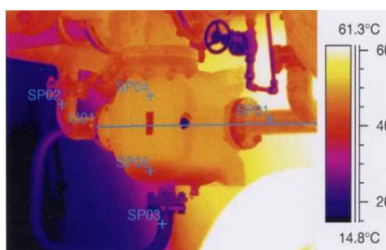


Figure 3 Thermal range used in the experiment

2) Experimental group consisted of 45 samples. The experiment was divided into nine test groups, using five samples in each stage. The samples were tested with the software model to find the precision of the developing software.

Database for the prototype testing using 45 samples Prototype 1

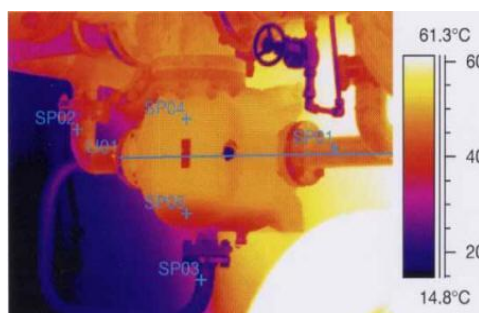


Figure 4 Thermal image of the prototype 1

Prototype 2

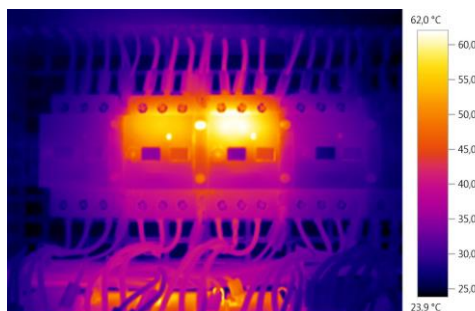


Figure 5 Thermal image of prototype 2

Prototype 3

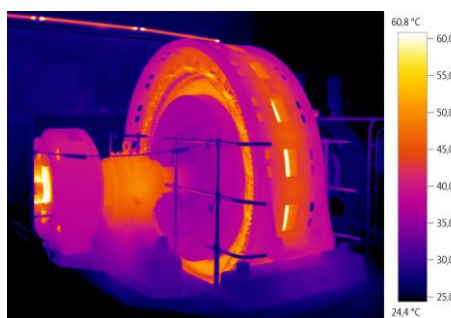
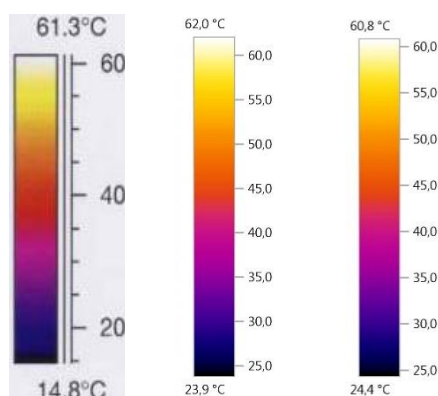


Figure 6 Thermal image of the prototype 3

The spectrum of colors of images was different depending on the manufacturers. There were three model images used in the comparison and analysis. The pictures are shown in Picture 4,5,and 6.

Analyzing the median of the 3 prototypes

1) Graph of thermal range of the 3 prototypes



Prototype 1 Prototype 2 Prototype 3

Figure 7 Thermal graphs of the 3 prototypes and spectral colors

2) Calculation and analysis of the intensity of the spectrum of colors of each scale demonstrating in Figure 5. The camera showed the value level of thermal images. The data were presented in the temperature range only. Color strips had numbers (Alderson ,1995), (Simpson,2008), (Liebel,2012).for the user to use in the analysis. Graph numbers showed the status of the color strips. The temperature range and the spectrum of colors were both analyzed to find the color intensity level. At each level of the graph, presented the temperature of three prototypes covering nine scales, as seen in Tables 1, 2, and 3.

Table 1 The average intensity level of the prototype 1

(thermal image)	temperature °C	Color intensity (Pixel)		
		Red	green	blue
	60	230	232	223
	55	232	222	65
	50	210	158	47
	45	205	93	45
	40	192	47	30
	35	180	30	78
	30	160	25	130
	25	88	17	119
	20	29	16	108

Table 2 The average intensity level of the prototype 2

(thermal image)	temperature °C	Color intensity (Pixel)		
		Red	green	blue
	60	254	245	170
	55	253	200	0
	50	247	133	0
	45	229	72	21
	40	199	15	137
	35	144	0	157
	30	58	0	146
	25	0	0	67
	20	0	0	2

Table 3 The average intensity level of the prototype 3

(thermal image)	temperature °C	Color intensity (Pixel)		
		Red	green	blue
	60	254	250	212
	55	253	212	10
	50	246	141	0
	45	234	80	10
	40	201	18	132
	35	148	0	156
	30	59	0	146
	25	2	0	50
	20	1	0	6

For accurate and precision results, the temperature range was at 20-60 °C. The scope was in nine scales, 5 degrees Celsius each.

3) Color intensity arithmetic mean analysis, from 3 prototypes shown in Table 1,2, and 3, were analyzed to discover the change rate affected the portion of the intensity of spectrum as shown in Table 4. The analysis used graphs to reveal the average changing rate of all three prototypes. Following, selecting steady spectral colors to use as a prototype in the comparison analysis (Alderson,1995), (Simpson,2008), (Liebel,2012).

Table 4 The average intensity level of the 3 prototypes

Tempera ture °C	The average intensity level of the 3 prototypes (Pixel)		
	Red	green	blue
60	246	242	201
55	246	211	25
50	234	144	16
45	223	82	25
40	197	27	100
35	157	10	130
30	92	8	141
25	30	6	79
20	10	5	39

4) Analysis of a steady trend of color, the color intensity of spectrum on the changing temperature of the 3 prototypes. It acted as a primary model to use in the comparison (Metz,1978).

Graph prototype 1

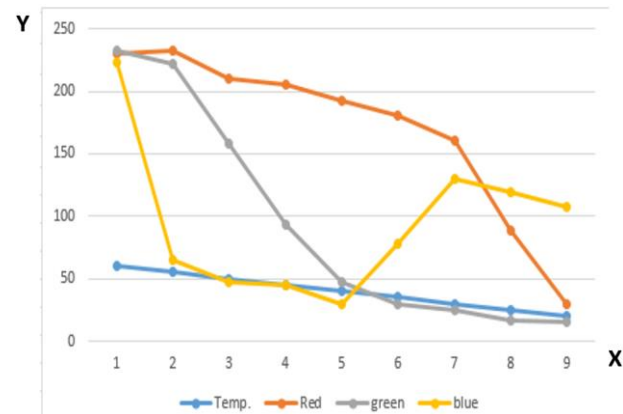


Figure 8 Graph of the color intensity at increasing temperature of the prototype 1

Graph prototype 2

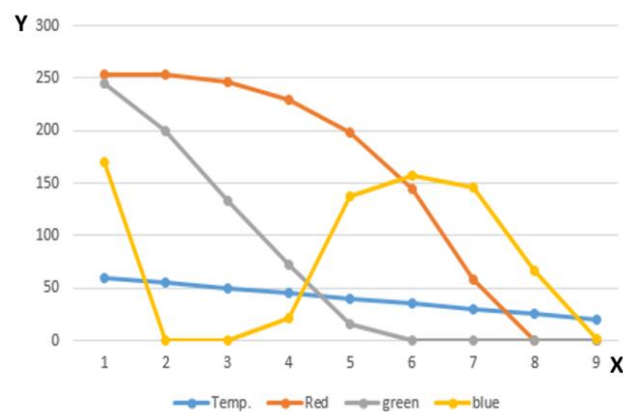


Figure 9 Graph of the color intensity at increasing temperature of the prototype 2

Graph prototype 3

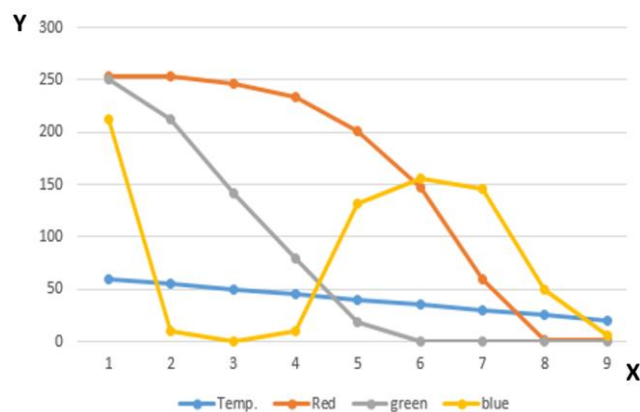


Figure 10 Graph of the color intensity at increasing temperature of the prototype 3

The average graph of the 3 prototypes

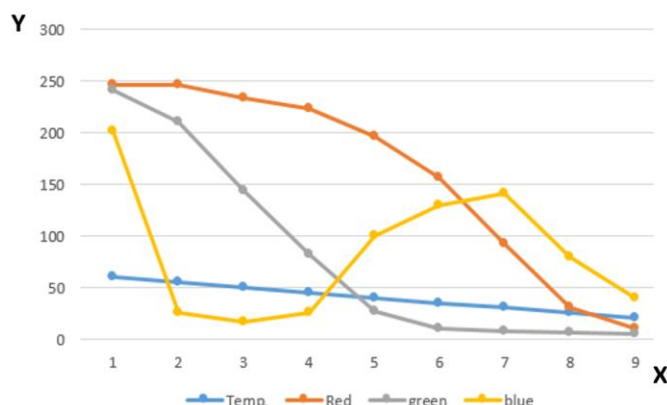


Figure 11 Graph of the color intensity at increasing temperature of the 3 prototypes

The graphs in Figures 9-11 showed the primary colors included red, green, and blue. When the temperature increased from 20 °C to 60 °C, the red and green graphs were at a noticeably steady level. As can be seen that the green and red figures had a stable trend, which these two graphs would be as primary data for the comparison.

Table 5 The average color intensity level of each temperature range. From the analysis, red and green were appropriate for the application, as shown in the table.

Temperature °C	Color intensity (Pixel)	
	Red	green
60	246	242
55	246	211
50	234	144
45	223	82
40	197	27
35	157	10
30	92	8
25	30	6
20	10	5

Finding the temperature range prototype

The intensity level of spectral colors was the average of the three prototypes, and the steady graphs included green and red. The system reevaluated the graph values for a more precise rate. It increased the scope of the temperature range, as shown in Figure 12.

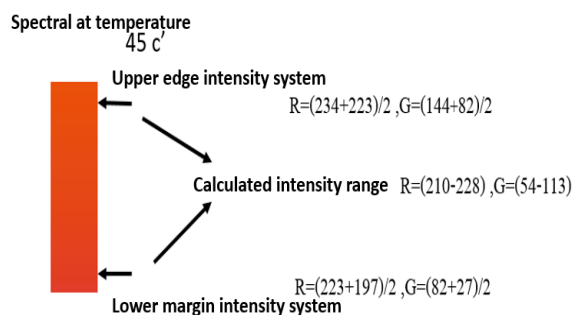


Figure 12 Analysis principle of the upper edge and lower margin color intensity of spectral heat

Table 6 The level of spectral color intensity implemented in the primary database, used in the upper edge and lower margin analysis

Temperature °C	Color intensity	
	Red	Green
60	246-255	226-255
55	240-246	177-226
50	228-240	113-177
45	210-228	54-113
40	177-210	18-54
35	124-177	9-18
30	61-124	7-9
25	20-61	5-7
20	1-10	1-5

As presented in Table 6, the data used as the primary data of comparison for the analysis. The data yielded the averaging temperature in each range of the color intensity of the thermal images. Besides, there were only two colors implemented; the spectrums of red and green.

System design

Context Diagram of the system

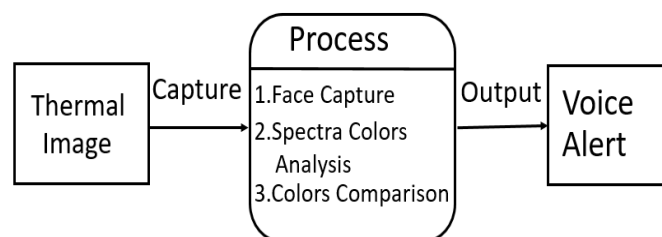


Figure 13 Overview of context diagram of the system

System components

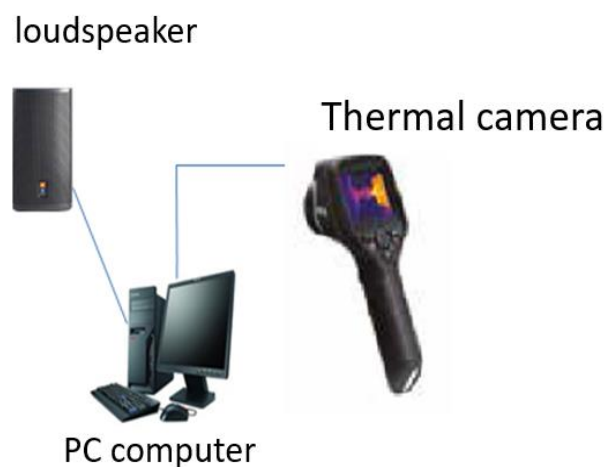


Figure 14 System components

System process

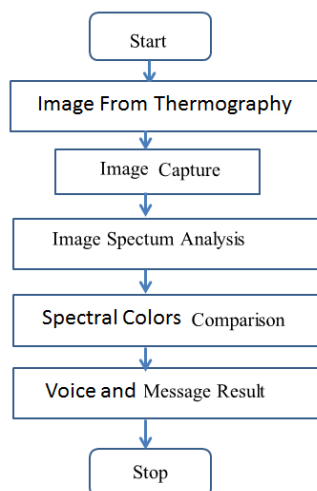


Figure 15 System process

Color intensity spectroscopy system used to measure fever

Temperature °C	Color intensity	
	Red	Green
60	246-255	226-255
55	240-246	177-226
50	228-240	113-177
45	210-228	54-113
40	177-210	18-54
35	124-177	9-18
30	61-124	7-9
25	20-61	5-7
20	1-10	1-5

Figure 16 The level of spectral color intensity

Which controls heat to maintain body temperature at about 36-37 degrees Celsius or 98.6 Fahrenheit (Fahrenheit) because the average body temperature is approximately 36.8 ± 0.4 °C (98.2 ± 0.7 °F), or a body temperature greater than 37.5 °C in the morning and greater than 37.7 °C in the evening. If the body has a higher temperature than that, it means "fever" This is where we focus on processing temperatures above 37.5°C. The temperature range 35-40 is the red spectrum $(177 + 124) / 2 = 150$ and the green spectrum $(9 + 18) / 2 = 14$.

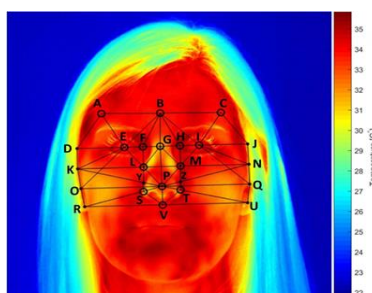


Figure 17 Thermal screening of a woman's face. University of Nottingham 2018. Courtesy university of Nottingham

Algorithm System

```
imgCapture.Image = imgVideo.Image;
Bitmap bmap = new Bitmap(imgCapture.Image);
Color c;
for (int i = 0; i < bmap.Width; i++)
{
    for (int j = 0; j < bmap.Height; j++)
    {
        c = bmap.GetPixel(i, j);
        byte chk_R = (byte)(c.R);
        byte chk_G = (byte)(c.G);
        if ((chk_R >= 246) && (chk_G >= 226))
        {
            Celcias=60;
            text1 = "The temperature is 60";
        }
        Else if ((chk_R >= 240) && (chk_G >= 177))
        {
            Celcias=55;
            text1 = " The temperature is 55";
        }
        Else if ((chk_R >= 228) && (chk_G >= 133))
        {
            Celcias=50;
            text1 = " The temperature is 50";
        }
        Else if ((chk_R >= 210) && (chk_G >= 54))
        {
            Celcias=45;
            text1 = " The temperature is 45";
        }
        Else if ((chk_R >= 177) && (chk_G >= 18))
        {
            Celcias=40;
            text1 = " The temperature is 40";
        }
        Else if ((chk_R >= 150) && (chk_G >= 14))
        {
            Celcias=37.5;
            text1 = "You are fever and temperature is Very high";
        } (Northam, 2014), ( US Army Natick Soldier RD&E Center, 2007).
        Else if ((chk_R >= 124) && (chk_G >= 9))
        {
            Celcias=35;
            text1 = " The temperature is 35";
        }
        Else if ((chk_R >= 61) && (chk_G >= 7))
        {
            Celcias=30;
            text1 = " The temperature is 30l ";
        }
        Else if ((chk_R >= 20) && (chk_G >= 5))
        {
            Celcias=25;
            text1 = " The temperature is 25 ";
        }
    }
}
```

```

Else if ((chk_R > =1) && (chk_G > =1))
{
    Celcias=20;
    text1 = " The temperature is 20; ";
}
}

SpeechSynthesizer synthesizer = new
SpeechSynthesizer();
synthesizer.Volume = 100;
synthesizer.Rate = 0;
synthesizer.Speak(text1);

```

System design and system development

This study developed the prototype system to convert the temperature of any object from an infrared camera. Visual C# program was as a tool to design the prototype and the user interface. A webcam was a receiving device for capturing images from a camera as the data for the analysis.

GUI system design

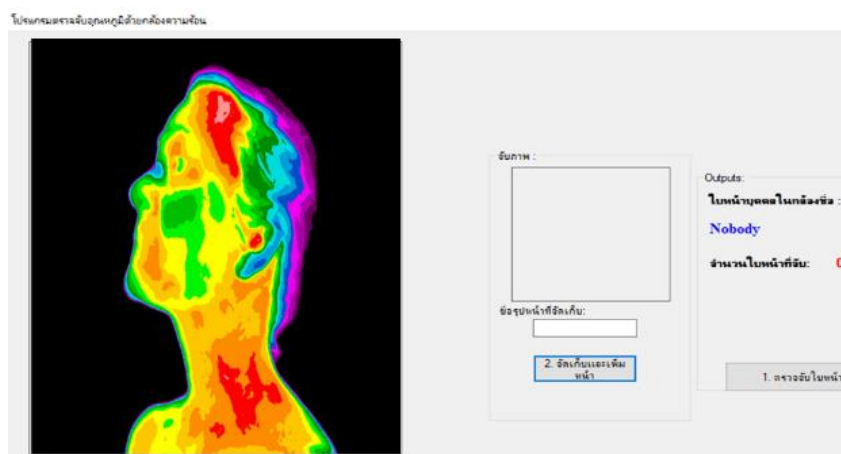


Figure 18 Overview of GUI system

As seen in Figure 13, the context diagram of the system acted as a system overview. It received images from an infrared camera and converted the heating value. Then, informed the user of the temperature value by a voice message.

System testing

Assessment of the accuracy and precision: using accuracy assessment. This method is a means to evaluate the accuracy of the imaging analysis in the database. The system considered the number of the sample images that were accurate compared with the primary pictures in the database, as shown in the equation (Bonnett,2006), (Sefton,2010), (Holey,2011).

$$\%Accuracy = 100 - \%Error$$

$$Relative\ error = \left| \frac{x_{mea} - x_t}{x_t} \right|$$

$$\%Error = Relative\ error \times 100$$

When x_{mea} equals measure value

x_t equals true value ISO Definition (ISO 5725)

Results

System development

Graphic User Interface)

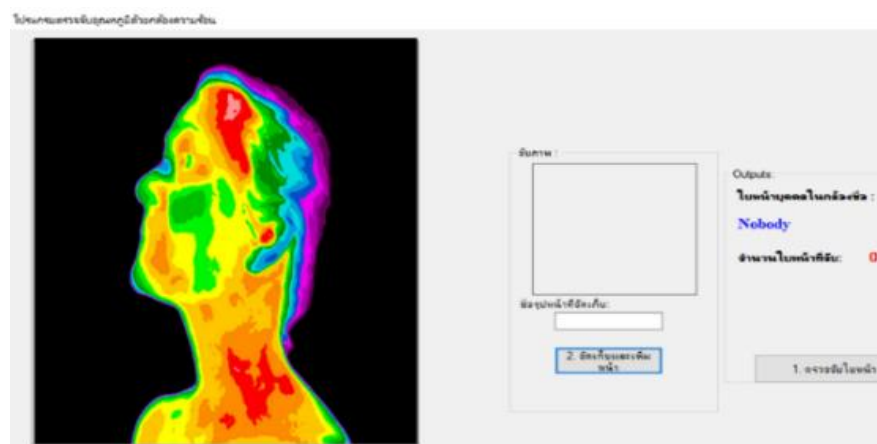


Figure 19 User interface

Other applications have shown that monitoring stent insertion sites and peripheral circulation with thermal imaging is an efficient means of assessing the need for revision of the arterio-venous fistula. Thermal imaging is now increasingly used for imaging different physiological reactions induced by non-drug treatments such as massage [21]. (Wu, 2009). or manual therapy (Mori H, 2004). Temperature distribution of the skin during and after physical exercise has been reported (Zontak A ,1998), (Ferreira,2008), (Merla A,2010)

System proficiency testing:

for temperature measurement of the software using images from the infrared camera. Pictures from the test groups showed in quantitative and qualitative means. Data retrieved from 9 test groups, 5 per group, 45 images in total. The following step: the software analysis to find the precision proficiency and acceptance test by the user.

The assessment system evaluates the proficiency of information technology systems and software. There are four parts of the system as follows:

1. Function Requirement Test
2. Function Test
3. Usability Test
4. Security Test

In this experiment, the process focused on the system or software proficiency, so only a function test was used. Thermal images were applied in the preparation stage, retrieving from the Thermoscan camera in *.jpg consisting of 45 thermal images. The pictures were divided into 9 test groups, containing five images per group, as presented in Figure 20.

- Test group 1: 5 thermal images at 60 °C
- Test group 2: 5 thermal images at 55 °C
- Test group 3: 5 thermal images at 50 °C
- Test group 4: 5 thermal images at 45 °C
- Test group 5: 5 thermal images at 40 °C
- Test group 6: 5 thermal images at 35 °C
- Test group 7: 5 thermal images at 30 °C
- Test group 8: 5 thermal images at 25 °C
- Test group 9: 5 thermal images at 20 °C



Figure 20 Group tests of the thermal spectrum

Implementing and assessing the system

Table 7 The precision comparison of 45 images of the test groups

Test group	Amount of data	Accurate readable information	Relative Error	% Error	%Accuracy
1.Thermal image at 60 degrees Celsius	5	4	1	20%	80%
2.Thermal image at 55 degrees Celsius	5	4	1	20%	80%
3.Thermal image at 50 degrees Celsius	5	4	1	20%	80%
4.Thermal image at 45 degrees Celsius	5	4	1	20%	80%
5.Thermal image at 40 degrees Celsius	5	4	1	20%	80%
6.Thermal image at 35 degrees Celsius	5	4	1	20%	80%
7.Thermal image at 30 degrees Celsius	5	4	1	20%	80%
8.Thermal image at 25 degrees Celsius	5	4	1	20%	80%
9.Thermal image at 20 degrees Celsius	5	4	1	20%	80%
Total	45	40	9	20%	80%

From Table 7, the proficiency assessment using to test the precision of the analysis of temperature of thermal image spectrum. The samples consisted of 9 test groups, five images each, 45 images in total. The results are as follows:

- Test group 1 had the precision of 80%
- Test group 2 had the precision of 80%
- Test group 3 had the precision of 80%
- Test group 4 had the precision of 80%
- Test group 5 had the precision of 80%
- Test group 6 had the precision of 80%
- Test group 7 had the precision of 80%
- Test group 8 had the precision of 80%
- Test group 9 had the precision of 80%

The average precision of the system was 80%, considered as an excellent level. As seen in Table 7, the precision evaluation using the thermal images of 9 test groups, 5 per group, 45 in total. The finding revealed that the precision was 80%, considered excellent. The suggestions for more precise results include the proximity should be less than three meters between the thermal detectors and the objects; the room should be entirely closed without airflow because it will cool off the object's heat. Moreover, the refrigerating rooms are not suitable for the system analysis because the heat radiation will be inaccurate. Lastly, a camera should be of high quality for accurate results.

Discussion

The findings of the research consisted of the results from two sources of data. The first source was from a system precision assessment using the thermal spectrum of the developing software. The other source was thermal images of 9 test groups. The results show that the averaging precision was 80%, considered a good level. Recently developed techniques have focused on averaging the sum of the intensity levels and processing them on a single constant. Instead, a newly developed technique divides the intensity level into intensity ranges and then compares the average measured intensity with the range specified in the measuring template.

Conclusion

The developing software was preferably precise at 80%; however, the temperature range illustrated in each scale was not. Temperature data presented in 5 degrees instead of 1 degree, considered as not precise. In the future, the development of an algorithm to show the data in the one-degree is a must. Prospectively, there should be a comparison with other systems or related research; to reach the desired precision. Later on, the system can be valuable in analyzing systems and temperature screening works. In conclusion, the novelty of this research is to determine the chromaticity of the value retrieved from the image pixel level.

Acknowledgement

The researcher would like to express gratitude to the Faculty of Management and Information Technology for support. The support includes the place, equipment, time, and budget for this research.

References

- Alderson, J. K. A., & Ring, E. F. J. (1995). Sprite high resolution thermal imaging system. *Thermology*, 1, 110-114.
- Bonnett, P., Hare, D. B., Jones, C. D., Ring, E. F., & Hare, C. J. (2006). Some preliminary observations of the effects of sports massage on heat distribution of lower limb muscles during a graded exercise test. *Thermol. Int*, 16, 143-149.
- Chan, L. S., Cheung, G. T., Lauder, I. J., & Kumana, C. R. (2004). Screening for fever by remote-sensing infrared thermographic camera. *Journal of travel medicine*, 11(5), 273-279.
- Engel, J. M. (1979). Thermography in Locomotor Diseases-Recommended Procedure. *European Journal of Rheumatology*, 2, 299-306.
- Ferreira, J. J., Mendonça, L. C., Nunes, L. A., Andrade Filho, A. C., Rebelatto, J. R., & Salvini, T. F. (2008). Exercise-associated thermographic changes in young and elderly subjects. *Annals of Biomedical Engineering*, 36, 1420-1427.
- Holey, L. A., Dixon, J., & Selfe, J. (2011). An exploratory thermographic investigation of the effects of connective tissue massage on autonomic function. *Journal of manipulative and physiological therapeutics*, 34(7), 457-462.
- Kaiser, P. K. (2016 January). *The joy of visual perception*. <http://www.yorku.ca/%20eye/spectru.htm>
- Liebel, F., Kaur, S., Ruvolo, E., Kollias, N., & Southall, M. D. (2012). Irradiation of skin with visible light induces reactive oxygen species and matrix-degrading enzymes. *Journal of Investigative Dermatology*, 132(7), 1901-1907.
- Merla, A., Mattei, P. A., Di Donato, L., & Romani, G. L. (2010). Thermal imaging of cutaneous temperature modifications in runners during graded exercise. *Annals of biomedical engineering*, 38, 158-163.
- Meola, C., & Carlomagno, G. M. (2004). Recent advances in the use of infrared thermography. *Measurement science and technology*, 15(9), R27.
- Mori, H., Ohsawa, H., Tanaka, T. H., Taniwaki, E., Leisman, G., & Nishijo, K. (2004). Effect of massage on blood flow and muscle fatigue following isometric lumbar exercise. *Medical Science Monitor*, 10(5), 178.
- Okada, Y., Kawamata, T., Kawashima, A., & Hori, T. (2007). Intraoperative application of thermography in extracranial-intracranial bypass surgery. *Operative Neurosurgery*, 60(4), 362-365.
- Simpson, R. C., McEvoy, Machin, G., Howell, H., Naeem, M., Plassmann, P., Ring, F. Campbell, Song, C., Tavener, J., & Ridley, I. (2008). In-field-of-view thermal image calibration system for medical thermography applications. *International Journal of Thermophysics*, 29, 1123-1130.

- Metz, C. E. (1978). Basic principles of ROC analysis. *Seminars in nuclear medicine*, 8(4), 283-298.
- Roy, R. A., Boucher, J. P., & Comtois, A. S. (2010). Paraspinal cutaneous temperature modification after spinal manipulation at L5. *Journal of manipulative and physiological therapeutics*, 33(4), 308-314.
- Ring, E. F. (1975). Thermography and rheumatic diseases. *Bibliotheca radiologica*, (6), 97-106.
- Rogalski, A. (2011). Recent progress in infrared detector technologies. *Infrared Physics & Technology*, 54(3), 136-154.
- Ring, E. F. J. (1984). *Quality control in infrared thermography*. Recent advances in medical thermology. Boston, MA: Springer New York.
- Rogalski, A. (2011). Recent progress in infrared detector technologies. *Infrared Physics & Technology*, 54(3), 136-154.
- Sefton, J. M., Yazar, C., Berry, J. W., & Pascoe, D. D. (2010). Therapeutic massage of the neck and shoulders produces changes in peripheral blood flow when assessed with dynamic infrared thermography. *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 16(7), 723-732.
- Willimas, T. L. (2009). Thermal imaging cameras and their component parts. *Thermal Imaging Cameras: Characteristics and Performance*, 7-33.
- Wu, C. L., Yu, K. L., Chuang, H. Y., Huang, M. H., Chen, T. W., & Chen, C. H. (2009). The application of infrared thermography in the assessment of patients with coccygodynia before and after manual therapy combined with diathermy. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, 32(4), 287-293.
- Yang, M. H., Kriegman, D. J., & Ahuja, N. (2002). Detecting faces in images: A survey. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 24(1), 34-58.
- Zontak, A., Sideman, S., Verbitsky, O., & Beyar, R. (1998). Dynamic thermography: analysis of hand temperature during exercise. *Annals of Biomedical Engineering*, 26, 988-993.

Research Article

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขใหม่ที่มีลำดับการลู่เข้าอันดับที่หก สำหรับสมการไม่เชิงเส้น

A New Numerical Algorithm with Sixth Order of Convergence for Nonlinear Equations

จุฑาภรณ์ สอมประโคน¹, วิมนศิริ อาญาเมือง¹ และ เฉลิมวุฒิ คำเมือง^{1*}

Juthaporn Somprakhon¹, Wimonsiri Aryamueang¹ and Chalermwut Comemuang^{1*}

¹วิชาสาขาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ประเทศไทย

¹Department of Mathematics, Faculty of Science, Buriram Rajabhat University, Thailand

*E-mail: comemuang.cm@bru.ac.th

Received: 22/06/2021; Revised: 31/03/2022; Accepted: 17/08/2022

บทคัดย่อ

ในบทความนี้จะกล่าวถึงระเบียบวิธีการทำซ้ำ 2 วิธี ในการแก้สมการไม่เชิงเส้น ที่ได้พัฒนาแนวคิดของ Gobabay-Javidi, วิธีของ Obama-Chebichev และ Taylor series สำหรับการวิเคราะห์ลำดับลู่เข้าของระเบียบวิธีการทำซ้ำใหม่ 3 ขั้นตอน และนำเสนอตัวอย่างเชิงตัวเลข เพื่อแสดงว่าระเบียบวิธีที่เรานำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีการทำซ้ำอื่น ๆ ในประเภทเดียวกัน

คำสำคัญ: สมการไม่เชิงเส้น นิวตัน ลำดับการลู่เข้า

Abstract

In this article, we will discuss two iterative methods for solving nonlinear equations. that developed the concept of Gobabay-Javidi, Obama-Chebichev Method and Taylor series Sequence analysis for convergence of a methodological Repeat 3 steps and present numerical example. To show that the methodology we offer is the better efficient. Compared to other iteration methods in the same

Keywords: nonlinear equations, Newton's methods, order of convergence

บทนำ

การแก้สมการไม่เชิงเส้นเป็นสิ่งที่สำคัญในคณิตศาสตร์ประยุกต์ และวิทยาศาสตร์วิศวกรรมศาสตร์ และในบทความนี้ เราจะพิจารณาระเบียบวิธีการทำซ้ำเพื่อหารากของสมการไม่เชิงเส้น โดยพิจารณาสมการไม่เชิงเส้นที่กำหนด

$$f(x) = 0 \quad (1)$$

ถ้า $f'(x_0) \neq 0$ เราสามารถหาค่านิพจน์ข้างต้นได้จาก Taylor series ได้ดังนี้

$$f(x_0) + (x - x_0)f'(x_0) = 0 \quad (2)$$

หารากของสมการไม่เชิงเส้น โดยกำหนด x_{k+1} มีรูปแบบดังนี้

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (3)$$

โดยเรียกสมการที่ (3) ว่า วิธีของ Newton's ในการหารากของสมการไม่เชิงเส้น ซึ่งมีลำดับการลู่เข้าอันดับที่สอง จาก Taylor series เราสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$x_{k+1} = x_k - \frac{2f(x_k)f'(x_k)}{2(f'(x_k))^2 - f(x_k)f''(x_k)} \quad (4)$$

โดยเรียกสมการที่ (4) ว่า วิธีของ Halley Noor et al. (2007) ในการคำนวณหารากของสมการไม่เชิงเส้น ซึ่งมีลำดับการลู่เข้าอันดับที่สาม ทำให้สมการที่ (2) ให้ง่ายขึ้น โดยใช้วิธีการทำซ้ำอีกหนึ่งวิธีดังนี้

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} - \frac{f^2(x_k)f''(x_k)}{2(f'(x_k))^3} \quad (5)$$

โดยเรียกสมการที่ (5) ว่าวิธี Householder He (1999) ในการคำนวณหารากของสมการไม่เชิงเส้น ซึ่งมีลำดับการลู่เข้าอันดับที่สาม

วิธีการของ Newton's มีลำดับการลู่เข้าอันดับที่ 2 และใช้วิธีการย่อยสลายของ Adomian ,Basto คิดโดย Basto et al (2006) จากการใช้วิธีการทำซ้ำ จะได้รูปแบบใหม่ดังนี้

$$x_{n+1} = z_n - \frac{f(z_n)}{f'(z_n)} - \frac{(f(z_n))^2 f''(z_n)}{2(f'(z_n))^3} \quad (6)$$

โดยเรียกสมการที่ (6) ว่าวิธีของ Obadah–Chebyshev คิดโดย Butsakorn & Kong-ied (2021) ในการคำนวณหารากของสมการไม่เชิงเส้น ซึ่งมีลำดับการลู่เข้าอันดับที่หก

ในช่วงที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขขึ้น เช่น การลดรูปอนุพันธ์อันดับที่สอง, การแก้ไขการลู่เข้า และได้มีการพัฒนาระเบียบวิธีขึ้นมาใหม่ 2 ระบบวิธี ดังนั้นระเบียบวิธีที่มีมาและความสำคัญดังนี้

ในศตวรรษที่ 20 Ostrowski คิดโดย Ostrowski (1966) ได้ใช้ระเบียบวิธีของ Newton's เป็นตัวอย่างของวิธีการทำซ้ำ 2 ขั้นตอน ซึ่งมีลำดับการลู่เข้าอันดับที่สี่ จากนั้น Traub คิดโดย Traub (1982) ได้นำเสนอรูปแบบของระเบียบวิธีการทำซ้ำ ซึ่งใช้วิธีของ Newton's เป็นตัวอย่างขั้นตอนการแก้ไขและพิสูจน์ ซึ่งวิธีที่นำเสนอมีลำดับการลู่เข้าอันดับที่สี่ และต่อมาในศตวรรษที่

21 Noor และ Noor คิดโดย Noor et al. (2012) ได้พัฒนาระเบียบวิธีของ Halley คิดโดย Noor et al. (2007) โดยใช้ระเบียบวิธีของ Newton's เป็นตัวอย่าง และได้นำขั้นตอนของ Halley มาแก้ไข แล้วพิสูจน์ว่าระเบียบวิธีที่พัฒนาขึ้นมีลำดับการลู่เข้าอันดับที่หก หลังจากนั้นนำระเบียบวิธีที่ได้มาลบอนุพันธ์อันดับที่สอง จากนั้นสร้างระเบียบวิธีใหม่ที่มีลำดับการลู่เข้าอันดับที่ห้า และจากนั้นวิธีการของ Obadah –Chebyshev คิดโดย Imran & Deswita (2016) โดยมีการทำซ้ำซึ่งมีลำดับการลู่เข้าอันดับที่สาม และเป็นระเบียบวิธีที่สร้างใหม่ถูกสร้างขึ้นโดยมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับวิธีการของ Newton's และขอบเขตการเข้าถึงเดียวกัน

ในบทความนี้ เราได้พัฒนาเกี่ยวกับการวิเคราะห์การลู่เข้าของระเบียบวิธีการทำซ้ำ 3 ขั้นตอนขึ้นมาใหม่ ได้แก่ ระเบียบวิธีที่ 1 และระเบียบวิธีที่ 2 ซึ่งใช้ระเบียบวิธีของ Newton's เป็นตัวอย่าง จากนั้นพิสูจน์ว่าระเบียบวิธีที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นั้นมีลำดับการลู่เข้าและมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า เมื่อเทียบกับระเบียบวิธีอื่น ๆ ในประเภทเดียวกัน ระเบียบวิธีที่นำเสนอขึ้นถูกประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาคำนวณเชิงตัวเลขบางตัวอย่างของการทดสอบ เพื่อความถูกต้องและแม่นยำ

ระเบียบวิธีการที่นำเสนอ

ให้ $f : X \rightarrow R, X \subseteq R$ เป็นฟังก์ชันสเกลาร์ โดยแก้ไขแนวคิดมาจากวิธีการทำซ้ำของ Homotopy โดยที่ Golbabai และ javidi คิดโดย Golbabai & Javidi (2007) จะได้สมการดังนี้

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} + \frac{hf^2(x_n)f''(x_n)}{2(f'(x_n))^3}, h = -1 \quad (7)$$

จะได้

$$x = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} - \frac{f^2(x_0)f''(x_0)}{2[(f'(x_0))^3 - f(x_0)f'(x_0)f''(x_0)]} \quad (8)$$

เขียนให้อยู่ในรูปแบบการทำซ้ำ

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} - \frac{f^2(x_n)f''(x_n)}{2[(f'(x_n))^3 - f(x_n)f'(x_n)f''(x_n)]} \quad (9)$$

โดยเรียกสมการที่ (9) ว่าวิธี Golbabai และ Javidi คิดโดย Golbabai & Javidi (2007) ในการคำนวณหารากของสมการไม่เชิงเส้น และมีลำดับการลู่เข้าอันดับที่สาม

จากสมการที่ (2) จะได้

$$x = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} - \frac{(x-x_0)^2 f''(x_0)}{2 f'(x_0)} \quad (10)$$

จากรูปแบบการทำซ้ำของ Golbabai และ Javidi ในสมการที่ (8)

$$x = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} - \frac{f^2(x_0)f''(x_0)}{2[(f'(x_0))^3 - f(x_0)f'(x_0)f''(x_0)]} \quad (11)$$

จากสมการที่ (10) และ (11) จะได้

$$x_{n+1} = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} - \frac{f^2(x_0)f''(x_0)[2(f'(x_0))^2 - f(x_0)f''(x_0)]^2}{8(f'(x_0))^3[(f'(x_0))^2 - f(x_0)f''(x_0)]^2} \quad (12)$$

เขียนสมการข้างต้นใหม่ด้วยวิธีของ Newton's ได้ระเบียบวิธีใหม่ดังนี้

ระเบียบวิธีที่ 1 สำหรับ x_0 ที่กำหนด โดยคำนวณหาค่าประมาณของผลเฉลย x_{n+1} ตามรูปแบบการทำซ้ำดังนี้

$$y_n = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}, n = 0, 1, 2, \dots, \quad (13)$$

$$z_n = y_n - \frac{f(y_n)}{f'(y_n)} - \frac{f^2(y_n)f''(y_n)[2(f'(y_n))^2 - f(y_n)f''(y_n)]^2}{8(f'(y_n))^3[(f'(y_n))^2 - f(y_n)f''(y_n)]^2} \quad (14)$$

$$x_{n+1} = z_n - \frac{f(z_n)}{f'(z_n)} \quad (15)$$

ระเบียบวิธีที่ 1 เป็นระเบียบวิธีการทำซ้ำ 3 ขั้นตอนใหม่ ซึ่งมีลำดับการลู่เข้าอันดับที่หก ที่ได้รับการปรับปรุงแก้ไขจากวิธีของ Golbabai และ Javidi คิดโดย Golbabai & Javidi (2007) โดยใช้วิธีของ Newton's เป็นการคาดการณ์หาคำตอบของสมการไม่เชิงเส้นที่กำหนด

ในระเบียบวิธีที่ 2 เขียนสมการข้างต้นใหม่ ด้วยวิธีของ Newton's โดยนำวิธีของ Obadah-Chebyshev คิดโดย Naseem et al. (2020) และจะได้ระเบียบวิธีใหม่ดังนี้

ระเบียบวิธีที่ 2 สำหรับ x_0 ที่กำหนด โดยคำนวณหาค่าประมาณของผลเฉลย x_{n+1} ตามรูปแบบการทำซ้ำดังนี้

$$y_n = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}, n = 0, 1, 2, \dots, \quad (16)$$

$$z_n = y_n - \frac{f(y_n)}{f'(y_n)} - \frac{f^2(y_n)f''(y_n)[2(f'(y_n))^2 - f(y_n)f''(y_n)]^2}{8(f'(y_n))^3[(f'(y_n))^2 - f(y_n)f''(y_n)]^2} \quad (17)$$

$$x_{n+1} = z_n - \frac{f(z_n)}{f'(z_n)} - \frac{(f(z_n))^2 f''(z_n)}{2(f'(z_n))^3} \quad (18)$$

ระเบียบวิธีที่ 2 เป็นระเบียบวิธีการทำซ้ำ 3 ขั้นตอนใหม่ ซึ่งมีลำดับการลู่เข้าอันดับที่หก ที่ได้รับการดัดแปลงแก้ไขจากวิธีของ Golbabai และ Javidi คิดโดย Golbabai & Javidi (2007) โดยใช้วิธีของ Obadah-Chebyshev เป็นการคาดการณ์และหาคำตอบของสมการไม่เชิงเส้นที่กำหนด

การวิเคราะห์การลู่เข้า

ในส่วนนี้ เราจะพูดถึงการวิเคราะห์การลู่เข้าของระเบียบวิธีที่ 1 และระเบียบวิธีที่ 2 ตามลำดับ

ทฤษฎีบท 1 สมมติว่า α เป็นตัวอย่างศูนย์อย่างง่ายของฟังก์ชัน $f : I \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ สำหรับช่วงเปิด I ถ้า x_0 อยู่ใกล้กับ α ลำดับของการลู่เข้าของระเบียบวิธีที่ 1 คือ หก

พิสูจน์ ในการวิเคราะห์การลู่เข้าของระเบียบวิธีที่ 1

ให้ α เป็นตัวอย่างศูนย์กลางอย่างง่ายของ f โดยการขยาย $f(x_n)$ และ $f'(x_n)$ โดยใช้การกระจายของ Taylor series จะได้ว่า

$$f(x_n) = f'(\alpha)e_n + \frac{1}{2}f''(\alpha)e_n^2 + \frac{1}{3!}f'''(\alpha)e_n^3 + \frac{1}{4!}f^{(iv)}(\alpha)e_n^4 + \frac{1}{5!}f^{(v)}(\alpha)e_n^5 + \frac{1}{6!}f^{(vi)}(\alpha)e_n^6 + O(e_n^7),$$

$$f(x_n) = f'(\alpha)[e_n + c_2e_n^2 + c_3e_n^3 + c_4e_n^4 + c_5e_n^5 + c_6e_n^6 + O(e_n^7)] \quad (19)$$

$$f'(x_n) = f'(\alpha)[1 + 2c_2e_n + 3c_3e_n^2 + 4c_4e_n^3 + 5c_5e_n^4 + 6c_6e_n^5 + 7c_7e_n^6 + O(e_n^7)], \quad (20)$$

$$\text{เมื่อ } c_n = \frac{f^{(n)}(\alpha)}{n!f'(\alpha)}$$

จากสมการที่ (19) และ (20) จะได้

$$\frac{f(x_n)}{f'(x_n)} = e_n + c_2e_n^2 + 2(c_3 - c_2^2)e_n^3 + (3c_4 - 7c_3c_2 + 4c_2^3)e_n^4$$

$$+ (-6c_3^3 + 20c_3c_2^2 - 10c_2c_4 + 4c_5 - 8c_2^4)e_n^5$$

$$+ (-17c_3c_4 + 28c_4c_2^2 - 13c_2c_5 + 5c_6 + 33c_2c_3^3 - 52c_3c_2^3 + 16c_2^5)e_n^6 + O(e_n^7), \quad (21)$$

$$y_n = \alpha + c_2e_n^2 + 2(c_3 - c_2^2)e_n^3 + (3c_4 - 7c_3c_2 + 4c_2^3)e_n^4$$

$$+ (-6c_3^3 + 20c_3c_2^2 - 10c_2c_4 + 4c_5 - 8c_2^4)e_n^5$$

$$+ (-17c_3c_4 + 28c_4c_2^2 - 13c_2c_5 + 5c_6 + 33c_2c_3^3 - 52c_3c_2^3 + 16c_2^5)e_n^6 + O(e_n^7), \quad (22)$$

$$f(y_n) = f'(\alpha)[c_2e_n^2 + 2(c_3 - c_2^2)e_n^3 + (3c_4 - 7c_3c_2 + 5c_2^3)e_n^4$$

$$+ (24c_3c_2^2 - 12c_2^4 - 10c_2c_4 + 4c_5 - 6c_3^2)e_n^5$$

$$+ (-73c_3c_2^3 + 34c_4c_2^2 + 28c_2^5 + 37c_2c_3^2 - 17c_4c_3 - 13c_2c_5 + 56c_6)e_n^6 + O(e_n^7)] \quad (23)$$

$$f'(y_n) = f'(\alpha)[1 + 2c_2^2e_n^2 + 4(c_3c_2 - c_2^3)e_n^3 + (6c_2c_4 - 11c_3c_2^2 + 8c_2^4)e_n^4$$

$$+ (28c_3c_2^3 - 20c_4c_2^2 + 8c_2c_5 - 16c_2^5)e_n^5$$

$$+ (-16c_3c_2c_4 + 12c_3^3 + 60c_2^3c_4 - 26c_5c_2^2 + 10c_2c_6 + 32c_2^6)e_n^6 + O(e_n^7)] \quad (24)$$

$$f''(y_n) = f'(\alpha)[2c_2 + 6c_3c_2e_n^2 + 12(c_3^2 - c_3c_2^2)e_n^3$$

$$+ (18c_3c_4 - 42c_3^2c_2 + 24c_3c_2^3 + 12c_4c_2^2)e_n^4$$

$$+ (-12c_2c_3c_4 + 24c_3c_5 - 36c_3^3 + 120c_3^2c_2^2 - 48c_3c_2^4 - 48c_4c_2^3)e_n^5$$

$$+ (-78c_2c_5c_3 + 30c_3c_6 - 54c_4c_3^2 - 96c_3c_4c_2^2 + 198c_2c_3^3 - 312c_2^2c_3^2$$

$$+ 96c_2^5c_3 + 72c_2c_4^2 + 144c_4c_2^4 + 20c_5c_2^3)e_n^6 + O(e_n^7)] \quad (25)$$

แทนสมการที่ (19), (20), (22), (23), (24) และ (25) ลงในสมการที่ (14) จะได้

$$z_n = \alpha + c_2^3 e_n^4 + (-4c_2^4 + 4c_2^2 c_3) e_n^5 + (12c_2^5 - 22c_2^3 c_3 + 6c_2^2 c_4 + 4c_2 c_3^2) e_n^6 + O(e_n^7) \quad (26)$$

โดยใช้การขยายตัวของ Taylor series สำหรับ $f(z_n)$ และ $f'(z_n)$ ที่ $z_n = \alpha$ จากสมการที่ (26)

$$\begin{aligned} f(z_n) = f'(\alpha) [c_2 e_n^2 + (-2c_2^2 + 2c_3) e_n^3 + (4c_2^3 - 7c_2 c_3 + 3c_4) e_n^4 \\ + (-8c_2^4 + 20c_2^2 c_3 - 10c_2 c_4 - 6c_3^2 + 4c_5) e_n^5 \\ + (16c_2^5 - 52c_2^3 c_3 + 28c_2^2 c_4 + 33c_2 c_3^2 - 13c_2 c_5 - 17c_3 c_4 + 5c_6) e_n^6 + O(e_n^7)] \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} f'(z_n) = f'(\alpha) [1 + 2c_2^4 e_n^4 + (-8c_2^5 + 8c_2^3 c_3) e_n^5 \\ + (24c_2^6 - 44c_2^4 c_3 + 12c_2^3 c_4 + 8c_2^2 c_3^2) e_n^6 + O(e_n^7)] \end{aligned} \quad (28)$$

จากสมการที่ (27) และ (28) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{f(z_n)}{f'(z_n)} = (-2c_2) e_n^3 + (c_2^3 - c_2 c_3) e_n^4 + (-10c_2^4 + 13c_2^2 c_3 - 10c_2 c_4 + 6c_3^2) e_n^5 \\ + (-4c_2^5 - 15c_2^3 c_3 + 12c_2^2 c_4 - 2c_2 c_3^2 - 3c_2 c_5 + c_3 c_4) e_n^6 + O(e_n^7) \end{aligned} \quad (29)$$

นำสมการที่ (29) แทนในสมการที่ (15) จะได้

$$x_{n+1} = \alpha + (8c_2^5) e_n^6 + O(e_n^7) \quad (30)$$

ซึ่งหมายถึง

$$e_{n+1} = (8c_2^5) e_n^6 + O(e_n^7) \quad (31)$$

จากสมการที่ (31) แสดงให้เห็นว่าลำดับการลู่เข้าของระเบียบวิธีที่ 1 คือหก

ทฤษฎีบท 2 สมมติว่า α เป็นรากของสมการ $f(x) = 0$ ถ้า $f(x)$ อยู่ในช่วงใกล้เคียงของ α ลำดับการลู่เข้าของระเบียบวิธี 2 คือหก

โดยใช้การขยายตัวของ Taylor series สำหรับ $f''(z_n)$ ที่ $z_n = \alpha$ จากสมการที่ (26) จะได้

$$\begin{aligned} f''(z_n) = f''(\alpha) [2c_2 + 6c_2^3 c_3 e_n^4 + (-24c_2^4 c_3 + 24c_2^2 c_3^2) e_n^5 \\ + (72c_2^5 c_3 - 132c_2^3 c_3^2 + 36c_2^2 c_3 c_4 + 24c_2 c_3^3) e_n^6 + O(e_n^7)] \end{aligned} \quad (32)$$

แทนสมการที่ (26), (27), (28), (29) และ (32) ลงในสมการที่ (18) ดังนั้นจะได้

$$x_{n+1} = \alpha + (4c_2^5) e_n^6 + O(e_n^7) \quad (33)$$

ซึ่งหมายถึง

$$e_{n+1} = (4c_2^5) e_n^6 + O(e_n^7) \quad (34)$$

จากสมการที่ (34) แสดงให้เห็นว่าลำดับการลู่เข้าของระเบียบวิธีที่ 2 คือหก

ตัวอย่างเชิงตัวเลข

ในส่วนนี้เราจะเปรียบเทียบจำนวนการทำซ้ำ 3 ขั้นตอน เพื่อหาค่าโดยประมาณของระเบียบวิธีที่เราได้นำเสนอและวิธีของบุคคลอื่น ๆ ที่มีลำดับการลู่เข้าที่เท่าเทียมกัน โดยในระเบียบวิธีที่ 1 และระเบียบวิธีที่ 2 มีลำดับการลู่เข้าที่หก เปรียบเทียบกับวิธีของ Halley (MHM) คิดโดย Noor et al. (2007) Golbabai - Javidi (MGJM) คิดโดย Naseem et al. (2020) และ Changbum Chun - Beny Neta (CHUN) คิดโดย Chun & Neta (2012) โดยพิจารณาตัวอย่างเชิงตัวเลขดังนี้

$$f_1(x) = x^3 + 4x^2 - 10,$$

$$f_2(x) = e^x + \cos(\pi x),$$

$$f_3(x) = x^2 + \sin\left(\frac{x}{5}\right) - \frac{1}{4},$$

$$f_4(x) = xe^x - 1,$$

$$f_5(x) = x^3 - 10,$$

$$f_6(x) = \cos(x) - x,$$

$$f_7(x) = \tan^{-1}(x) + x.$$

ตัวอย่างทั้งหมดคำนวณโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Maple 2021 โดยการคำนวณอยู่ภายใต้เงื่อนไขการหยุดคำนวณเมื่อ $|x_{n+1} - x_n| < \varepsilon$ และ $|f(x_{n+1})| < \varepsilon$ โดยมี $\varepsilon = 10^{-15}$

ตารางที่ 1-7 แสดงการเปรียบเทียบของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข Halley (MHM) , Golbabai และ Javidi (MGJM1), Golbabai และ Javidi (MGJM2) และ Changbum Chun - Beny Neta (CHUN) โดยแทนจำนวนวิธีทำซ้ำของ N ในแนวนอน, ขนาด $|f(x_{n+1})|$, หาค่าประมาณรากของ x_{n+1} , และหาค่าประมาณผลต่างของ $|x_{n+1} - x_n|$

ตารางที่ 1 ตารางการเปรียบเทียบวิธีการทำซ้ำ

Method	N	$ f(x_{n+1}) $	x_{n+1}	$\sigma = x_{n+1} - x_n $
$f_1(x) = x^3 + 4x^2 - 10, x_0 = -0.4$				
MHM	23	$7.392887e^{-38}$	1.365230013414096	$4.595974e^{-08}$
MGJM 1	4	$3.518283e^{-46}$	1.365230013414096	$3.794720e^{-08}$
MGJM 2	4	$3.518283e^{-46}$	1.365230013414096	$3.794720e^{-08}$
CHUN	26	$2.708693e^{-44}$	1.365230013414096	$1.520320e^{-09}$
Algorithm 1	3	$6.332380e^{-41}$	1.365230013414096	$8.557424e^{-04}$
Algorithm 2	5	$4.403350e^{-45}$	1.365230013414096	$7.045542e^{-03}$

ตารางที่ 2 ตารางการเปรียบเทียบวิธีการทำซ้ำ

Method	N	$ f(x_{n+1}) $	x_{n+1}	$\sigma = x_{n+1} - x_n $
$f_2(x) = e^x + \cos(\pi x), x_0 = -1.9$				
MHM	9	$1.268356e^{-48}$	-0.522480772874125	$4.262132e^{-11}$
MGJM 1	8	$1.013204e^{-25}$	-0.522480772874215	$1.409549e^{-04}$
MGJM 2	3	$1.837741e^{-82}$	-0.522480772874215	$5.335861e^{-14}$
CHUN	5	$8.119440e^{-23}$	-0.522480772874215	$2.261390e^{-4}$
Algorithm 1	2	$3.731856e^{-66}$	-0.670829984276972	$3.311450e^{-06}$
Algorithm 2	2	$2.000000e^{-100}$	-0.670829984276972	$2.140892e^{-08}$

ตารางที่ 3 ตารางการเปรียบเทียบวิธีการทำซ้ำ

Method	N	$ f(x_{n+1}) $	x_{n+1}	$\sigma = x_{n+1} - x_n $
$f_3(x) = x^2 + \sin\left(\frac{x}{5}\right) - \frac{1}{4}, x_0 = 2$				
MHM	3	$4.499472e^{-42}$	0.409992017925641	$1.880726e^{-08}$
MGJM 1	3	$2.316711e^{-92}$	0.409992017925641	$1.627080e^{-15}$
MGJM 2	2	$1.670194e^{-15}$	0.409992017925641	$1.059787e^{-02}$
CHUN	4	$1.227119e^{-75}$	0.409992017925641	$7.995769e^{-16}$
Algorithm 1	2	$3.629875e^{-54}$	0.409992017925641	$1.076650e^{-04}$
Algorithm 2	2	$4.410590e^{-111}$	0.409992017925641	$2.178990e^{-06}$

ตารางที่ 4 ตารางการเปรียบเทียบวิธีการทำซ้ำ

Method	N	$ f(x_{n+1}) $	x_{n+1}	$\sigma = x_{n+1} - x_n $
$f_4(x) = xe^x - 1, x_0 = 1$				
MHM	3	$1.116440e^{-68}$	0.567143290433274	$2.540557e^{-14}$
MGJM 1	2	$5.068654e^{-20}$	0.567143290433274	$6.667718e^{-04}$
MGJM 2	2	$2.535508e^{-21}$	0.567143290433274	$4.396326e^{-04}$
CHUN	3	$2.500354e^{-51}$	0.567143290433274	$5.876548e^{-11}$
Algorithm 1	2	$5.375020e^{-79}$	0.567143290433274	$3.643107e^{-07}$
Algorithm 2	2	$3.844494e^{-174}$	0.567143290433274	$2.855810e^{-10}$

ตารางที่ 5 ตารางการเปรียบเทียบวิธีการทำซ้ำ

Method	N	$ f(x_{n+1}) $	x_{n+1}	$\sigma = x_{n+1} - x_n $
$f_5(x) = x^3 - 10, x_0 = 0.5$				
MHM	4	$4.922706e^{-19}$	2.1544346900318837	$2.732126e^{-04}$
MGJM 1	3	$2.129060e^{-18}$	2.1544346900318837	$1.663953e^{-03}$
MGJM 2	3	$2.129060e^{-18}$	2.1544346900318837	$1.663953e^{-03}$
CHUN	7	$8.359120e^{-29}$	2.1544346900318837	$2.078572e^{-06}$
Algorithm 1	3	$1.000000e^{-99}$	2.1544346900318837	$3.321123e^{-12}$
Algorithm 2	2	$5.585450e^{-23}$	2.1544346900318837	$1.254603e^{-01}$

ตารางที่ 6 ตารางการเปรียบเทียบวิธีการทำซ้ำ

Method	N	$ f(x_{n+1}) $	x_{n+1}	$\sigma = x_{n+1} - x_n $
$f_6(x) = \cos(x) - x, x_0 = 2.5$				
MHM	3	$1.154792e^{-54}$	0.739085133215160	$4.595974e^{-11}$
MGJM 1	2	$8.918884e^{-21}$	0.739085133215160	$3.794720e^{-03}$
MGJM 2	2	$1.374491e^{-18}$	0.739085133215160	$3.794720e^{-03}$
CHUN	3	$5.423640e^{-53}$	0.739085133215160	$7.261660e^{-11}$
Algorithm 1	2	$7.676020e^{-84}$	0.739085133215160	$4.298833e^{-07}$
Algorithm 2	2	$1.000000e^{-100}$	0.739085133215160	$4.469656e^{-10}$

ตารางที่ 7 ตารางการเปรียบเทียบวิธีการทำซ้ำ

Method	N	$ f(x_{n+1}) $	x_{n+1}	$\sigma = x_{n+1} - x_n $
$f_7(x) = \tan^{-1}(x) + x, x_0 = 2$				
MHM	3	$1.556811e^{-66}$	0.0000000000000000	$6.000887e^{-10}$
MGJM 1	2	$2.674407e^{-21}$	0.0000000000000000	$8.437184e^{-03}$
MGJM 2	2	$2.674410e^{-21}$	0.0000000000000000	$8.437184e^{-03}$
CHUN	3	$3.349411e^{-79}$	0.0000000000000000	$8.928067e^{-12}$
Algorithm 1	2	$2.160250e^{-188}$	0.0000000000000000	$2.001933e^{-07}$
Algorithm 2	2	$2.412406e^{-196}$	0.0000000000000000	$1.000938e^{-7}$

อภิปรายผล

การวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับลำดับการลู่เข้าอันดับที่หกของสมการไม่เชิงเส้น ซึ่งผู้วิจัยได้พัฒนาระเบียบวิธีเชิงตัวเลข 2 วิธี โดยแต่ละวิธีมีขั้นตอนการทำซ้ำ 3 ขั้นตอน ซึ่งได้พัฒนาระเบียบวิธีเชิงตัวเลข 2 วิธีมาจากวิธีของ Obadah -Chebyshev เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระเบียบวิธีที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ผู้วิจัยสรุปจากตารางที่ 1-7 จะได้ว่า ตาราง 1 มีระเบียบวิธีที่ 1 ที่มีจำนวนรอบการทำซ้ำที่ต่ำกว่าระเบียบวิธีที่ 2 และ ตารางที่ 2,3,4,5,6 และ 7 มีระเบียบวิธีที่ 1 และระเบียบวิธีที่ 2 ที่มีจำนวนรอบมากกว่าหรือเท่ากับระเบียบวิธีที่ 1 แต่ระเบียบวิธีที่ 2 มีขนาดที่เล็กกว่าจึงมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าระเบียบวิธีที่ 1 และเมื่อนำระเบียบวิธีที่ 1 และระเบียบวิธีที่ 2 มาเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีต่างๆของ Halley (MHM), Golbabai - Javidi (MGJM1), Golbabai - Javidi (MGJM2) และ Changbum Chun - Beny Neta (CHUN) จะเห็นได้ชัดเจนว่าจำนวนรอบการทำซ้ำของระเบียบวิธีที่เราพัฒนาขึ้นมาใหม่นั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า

สรุปผล

บทความนี้ได้นำเสนอระเบียบวิธีเชิงตัวเลข 2 วิธี โดยแต่ละระเบียบวิธี มีขั้นตอนการทำซ้ำ 3 ขั้นตอน ซึ่งได้พัฒนาแนวคิดมาจากวิธีการของ Obadah -Chebyshev สำหรับสมการไม่เชิงเส้น ที่มีลำดับการลู่เข้าอันดับที่หก ซึ่งได้ใช้ตัวอย่างเชิงตัวเลขในการทดสอบประสิทธิภาพของระเบียบวิธีที่เราได้นำเสนอให้กับบุคคลอื่นๆ ที่มีลำดับการลู่เข้าที่เท่ากัน และพบว่าระเบียบวิธีที่เราได้นำเสนอนั้น มีจำนวนรอบของการทำซ้ำที่น้อยกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระเบียบวิธีที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ทั้ง 2 วิธี ระเบียบวิธีใหม่ที่เราพัฒนานี้ถือได้ว่าเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีอื่นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีในประเภทเดียวกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ที่สนับสนุนด้านสิ่งอำนวยความสะดวก นอกจากนี้ขอขอบคุณ อาจารย์เฉลิมวุฒิ คำเมือง ที่คอยให้คำปรึกษา และให้ความรู้เกี่ยวกับงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Basto, M., Semiao, V., & Calheiros, F. L. (2006). A new iterative method to compute nonlinear equation. *Applied Mathematics and Computation*, 173(1), 468–483.
- Kong-ied, B. (2021). Two new eighth and twelfth order iterative methods for solving nonlinear equations. *International Journal of Mathematics and Computer Science*, 16(1), 333-344.
- Chun, C., & Neta, B. (2012). A new sixth-order scheme for nonlinear equations. *Applied Mathematics Letters*, 25(2), 185-189.
- Golbabai, A., & Javidi, M. (2007). A third-order Newton type method for nonlinear equations based on modified homotopy perturbation method. *Applied Mathematics and Computation*, 191(1), 199–205.
- He, J. H. (1999). Homotopy perturbation technique. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 178(4), 257–262.
- Imran, M., & Deswita, L. (2016). A sixth-order derivative-free iterative method for solving nonlinear equations. *Bulletin of Mathematics*, 8(1), 1–8.

- Naseem, A., Rehman, M. A., & Abdeljawad, T. (2020). Numerical algorithms for finding zeros of nonlinear equations and their dynamical aspects. *Journal of Mathematics*, 2020, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2020>
- Noor, M. A., Khan, W. A., & Hussain, A. (2007). A new modified Halley method without second derivatives for nonlinear equation Applied. *Mathematics and Computation*, 189(2), 1268–1273.
- Noor, M. A., Noor, K. I., & Aftab, K. (2012). Some New Iterative Methods for Solving Nonlinear Equations. *World Applied Sciences Journal*, 20(6), 870-874.
- Ostrowski, A. M. (1966). *Solution of Equations and Systems of Equations* (2nd ed.). Academic Press. Cambridge, MA, USA.
- Traub, J. F. (1982). *Iterative Methods for the Solution of Equations*. Chelsea Publishing company. New York, NY, USA.

Research Article

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุม DHWMA, TEWMA, และ DMEWMA สำหรับข้อมูลที่มีการแจกแจงแกมมา

Efficiency Comparison of DHWMA, TEWMA, and DMEWMA Control Charts for Gamma Distribution

อรณิข ชุมภูวอร์¹ และ ปิยพล ไพจิตร^{1*}

Oranit Chumpuworn¹ and Piyaphon Paichit^{1*}

¹ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ประเทศไทย

¹Department of statistics, Faculty of Science, Silpakorn University, Sanamchandra Palace Campus, Thailand

*E-mail: paichit_p@silpakorn.edu

Received: 31/12/2021; Revised: 13/09/2022; Accepted: 12/10/2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมในการตรวจจับขนาดการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปร่าง (shape parameter : α) ของกระบวนการที่ข้อมูลมีการแจกแจงแบบแกมมา ได้แก่ แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสามชั้น (TEWMA) แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักเหมือนกันซ้ำสองครั้ง (DHWMA) และแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังปรับปรุงซ้ำสองครั้ง (DMEWMA) ดำเนินการโดยการจำลองข้อมูลด้วยวิธีมอนติคาร์โลที่ทำซ้ำ 20,000 รอบ กำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงแบบแกมมา โดยพารามิเตอร์รูปร่างและพารามิเตอร์บ่งขนาด เท่ากับ 1, 2, และ 8 และกำหนดค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบ (λ) ของแผนภูมิควบคุมทั้ง 3 ชนิดเท่ากับ 0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.3, 0.5 และขนาดการเปลี่ยนแปลงกระบวนการ (δ) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.5 เกณฑ์ที่ใช้วัดประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุม จะพิจารณาจากค่าความยาวรันเฉลี่ย (Average Run Length : ARL) ซึ่งแผนภูมิควบคุมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจะให้ค่าความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุม (ARL_1) น้อยที่สุด ผลการวิจัยพบว่าแผนภูมิควบคุมทั้ง 3 แผนภูมิมีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของกระบวนการที่ข้อมูลมีการแจกแจงแบบแกมมาใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักเหมือนกันซ้ำสองครั้ง, แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสามชั้น, แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังปรับปรุงซ้ำสองครั้ง, ความยาวรันเฉลี่ย

Abstract

The purpose of this research is to compare the efficiency detection of process parameter shift for gamma distribution Control Chart, Triple Exponentially Weighted Moving Average Control Chart (TEWMA), Double Homogeneously Weighted Moving Average Control Chart (DHWMA), and Double-Modified Exponentially Weighted Moving Average Control Chart (DMEWMA). The process of this research is imitated by using Monte Carlo Simulation Technique for 20,000 iterations. The data is defined by gamma distribution with scale and location parameter those are 1, 2, and 8. Smoothing parameter (λ) are 0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.3, 0.5 and process shift sizes (δ) are 0.01 - 0.5 respectively. The criterion is considered by out-of-control process (Average Run Length: ARL) which is the most efficiency control chart will show the least average run length (ARL_1). The result indicates that three control charts of efficiency control chart are not different for detecting the process parameter shift for gamma distribution

Keywords: DHWMA control chart, TEWMA control chart, DMEWMA control chart, Average run length

บทนำ

การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (SPC) โดยเฉพาะเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพกลายเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากขึ้นสำหรับการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ได้มาตรฐาน ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพซึ่งจัดเป็นปัจจัยพื้นฐานในการเลือกซื้อสินค้าและบริการของผู้บริโภค SPC จึงทำหน้าที่เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาเพื่อให้ได้มาซึ่งความมั่นคง (เสถียร) ของผลิตภัณฑ์และยังช่วยลดความผันแปรที่อาจมาจากเครื่องจักร วัตถุดิบ คน และสภาพแวดล้อม แผนภูมิควบคุมเป็นหนึ่งในเครื่องมือทางสถิติที่ได้รับความนิยมและสำคัญที่สุดสำหรับ SPC แผนภูมิควบคุมจะแสดงลำดับของค่าสังเกตและมีการแจ้งเตือนเมื่อกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงและจำเป็นต้องมีการแก้ไข อีกทั้งยังสามารถช่วยลดความผันแปรของตัวแปรซึ่งถูกใช้เป็นตัวแทนของคุณลักษณะของสินค้าและบริการอีกด้วย

แผนภูมิควบคุมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามรูปแบบโครงสร้างคือ แผนภูมิควบคุมประเภทแรกเป็นแผนภูมิควบคุมที่ไม่นำเอาค่าสถิติก่อนหน้ามาพิจารณา (memoryless) แต่จะใช้ค่าสถิติ ณ ปัจจุบันมาเท่านั้นมาพิจารณาว่ากระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุมหรือไม่ ตัวอย่างของแผนภูมิควบคุมนี้คือแผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ต (Shewhart control chart) ซึ่งจากลักษณะโครงสร้างของแผนภูมิควบคุมนี้ส่งผลให้ประสิทธิภาพการตรวจจับไม่ดีเมื่อกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์เพียงเล็กน้อย แต่แผนภูมิควบคุมประเภทที่สองจะนำเอาค่าสถิติในอดีตมาร่วมพิจารณาด้วย (memory) ตัวอย่างของแผนภูมิควบคุมที่เป็นที่รู้จักคือ แผนภูมิควบคุมผลรวมสะสม (CUSUM) พัฒนาโดย Page (1961) และแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลัง (EWMA) ถูกสร้างโดย Roberts (1959) โดยลักษณะ โครงสร้างที่ถูกออกแบบมาเพื่อนำเอาค่าสถิติทั้งในอดีตและปัจจุบันมาใช้ส่งผลให้แผนภูมิควบคุมเหล่านี้สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เพียงเล็กน้อยได้ดีกว่าแผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ต

แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังเป็นแผนภูมิควบคุมที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กของพารามิเตอร์ได้ดี อีกทั้งยังมีคุณสมบัติโรบัสต์จึงทำให้สามารถดำเนินการได้ดีแม้ข้อมูลที่ได้อาจไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ (Montgomery, 2012) การแจกแจงแบบแกมมาบ่อยครั้งที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลที่มีลักษณะเบ้ และถูกใช้เพื่อเป็นตัวแทนของเวลารอคอยจนกระทั่งเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ อีกทั้งการแจกแจงแบบแกมมายังมีพารามิเตอร์ถึง 2 ค่าที่ใช้กำหนดรูปร่าง (shape) และขนาด (scale) ทำให้สามารถ fit model ได้หลายหลาย มีผู้วิจัยหลายท่านได้นำแผนภูมิ

ควบคุมไปใช้กับข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบแกมมา เช่น Gonzalez & Viles (2001) ได้ออกแบบแผนภูมิควบคุมพิสัยสำหรับข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบแกมมา และ Sheu & Lin (2003) ได้สร้างแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักทั่วไป (GWMA) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังเมื่อกำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงแบบแกมมา ปี ค.ศ. 2020 Abid et al. (2020) ได้นำเสนอแผนภูมิควบคุมใหม่โดยนำแนวคิดของแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสองชั้น (Double Exponentially Weighted Moving Average : DEWMA) มาใช้กับแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักเหมือนกัน (Homogeneously Weighted Moving Average : HWMA) ทำให้แผนภูมิควบคุมนี้มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กและปานกลางได้ดีกว่าแผนภูมิควบคุม HWMA และให้ข้อแผนภูมิควบคุมนี้ว่าแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักเหมือนกันซ้ำสองครั้ง (Double Homogeneously Weighted Moving Average : DHWMA) อีกทั้งยังได้นำแผนภูมิควบคุมนี้ไปทำการเปรียบเทียบกับแผนภูมิควบคุม EWMA CUSUM และ HWMA เมื่อกำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงแบบแกมมา และ การแจกแจงแบบที โดยพิจารณาจากค่าความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการอยู่นอกการควบคุม (ARL_1) พบว่าแผนภูมิควบคุม DHWMA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับดีที่สุด ต่อมาในปี ค.ศ. 2020 Alevizakos et al. (2020) ได้นำเสนอแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสามชั้น (Triple Exponentially Weighted Moving Average : TEWMA) ซึ่งแผนภูมิควบคุมนี้มีการเพิ่มสถิติ EWMA 2 ตัว ลงในโครงสร้างของแผนภูมิควบคุม EWMA ทำให้แผนภูมิควบคุมนี้สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กถึงปานกลางได้ดีกว่าแผนภูมิควบคุม EWMA และแผนภูมิควบคุม DEWMA Alevizakos et al. (2020) ได้นำแผนภูมิควบคุมนี้ไปเปรียบเทียบกับแผนภูมิควบคุม GWMA แผนภูมิควบคุม DEWMA และแผนภูมิควบคุม EWMA เมื่อข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ที่ ลาปลาซ และแกมมาโดยพิจารณาจากค่า ARL_1 พบว่าแผนภูมิควบคุม TEWMA ให้ประสิทธิภาพดีกว่า แผนภูมิควบคุม EWMA และ DEWMA แต่ให้ประสิทธิภาพดีกว่าแผนภูมิควบคุม GWMA เล็กน้อยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแผนภูมิควบคุม GWMA

ในปี ค.ศ. 2021 Alevizakos et al. (2021) ได้นำเสนอแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังปรับปรุงซ้ำสองครั้ง (Double –Modified EWMA: DMEWMA) โดยแผนภูมิควบคุมนี้ได้นำแนวคิดของการปรับให้เรียบมาใช้กับแผนภูมิควบคุม Modified EWMA ทำให้แผนภูมิควบคุมที่ได้สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กได้ดีกว่าเดิม อีกทั้งยังได้นำแผนภูมิควบคุมนี้ไปการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับแผนภูมิควบคุม Modified EWMA เมื่อกำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ โดยพิจารณาจากค่า ARL_1 พบว่า แผนภูมิควบคุม DMEWMA ที่กำหนดค่า k กรณี $k = -\lambda / 2$ และ $k = -\lambda / 4$ มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กของพารามิเตอร์ได้ดี จากการศึกษาด้านแผนภูมิควบคุมข้างต้นจะเห็นได้ว่าแผนภูมิควบคุม DMEWMA TEWMA และ DHWMA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กของพารามิเตอร์ได้ดีใกล้เคียงกันอีกทั้งยังมีคุณสมบัติโรบัสต์ ผู้วิจัยจึงต้องการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุม TEWMA DHWMA และ DMEWMA (สำหรับแผนภูมิควบคุม DMEWMA กำหนดค่า k เป็น 2 กรณีคือ $k = -\lambda / 2$ และ $k = -\lambda / 4$ (Alevizakos, 2021)) โดยพิจารณาจากค่า ARL_1 ภายใต้ $ARL_0 = 370$ เมื่อกำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงแบบแกมมา

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. การแจกแจงแบบแกมมา

เมื่อพิจารณาการแจกแจงแบบปัวซองโดยที่ λ แทนค่าเฉลี่ยของการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจในช่วงเวลา และการแจกแจงแบบเลขชี้กำลังจะสนใจระยะเวลารอคอยจนกระทั่งเกิดเหตุการณ์ที่สนใจเป็นครั้งแรกโดยมี β แทนระยะเวลาเฉลี่ยในการรอคอย ส่วนการแจกแจงแบบแกมมาจะกำหนดให้ตัวแปรสุ่มแทนช่วงเวลารอคอยจนกระทั่งเกิดเหตุการณ์ที่สนใจครบ α ครั้ง

กำหนดให้ X เป็นตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่องที่มีการแจกแจงแบบแกมมา โดยมี α และ β เป็นพารามิเตอร์รูปร่าง (Shape) และพารามิเตอร์ปรงขนาด (Scale) ตามลำดับ โดยที่ $\alpha, \beta > 0$ ซึ่ง $f(x)$ เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็น ของ X ดังนี้

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} & ; x > 0 \\ 0 & ; x \text{ Otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของ x แทนด้วย $E(x) = \alpha\beta$ และ $Var(x) = \alpha\beta^2$ ตามลำดับ

2. แผนภูมิควบคุมที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักเหมือนกันซ้ำสองครั้ง (Double Homogeneously Weighted Moving Average: DHWMA)

Abid et.al (2020) นำเสนอแผนภูมิควบคุม DHWMA โดยรวมแนวคิดของสองแผนภูมิควบคุมคือ DEWMA และ HWMA ทำให้แผนภูมิควบคุมที่ได้มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กและปานกลางดีกว่าทั้งแผนภูมิควบคุม DEWMA และ HWMA สถิติสำหรับแผนภูมิควบคุม DHWMA กำหนดโดย

$$DH_t = \lambda HM_t + (1-\lambda)\bar{X}_{t-1} \quad (2)$$

$$HM_t = \lambda X_t + (1-\lambda)\bar{X}_{t-1}$$

โดยที่ $\bar{X}_{t-1} = \sum_{j=1}^{t-1} \frac{X_j}{t-1}$; $t = 2, 3, \dots$ DH_t คือ ตัวสถิติ DHWMA ณ เวลา t

X_t คือ ค่าสังเกต ณ เวลา t ใดๆ : $t = 2, 3, \dots$

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

กำหนดตัวสถิติเริ่มต้น $\bar{X}_{t-1} = \theta_0$ = ค่าเฉลี่ยของกระบวนการ เมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม

ค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของ DH_t คือ $E(DH_t) = \theta_0$ และ กรณี $t = 1$; $Var(DH_t) = \lambda^4 \sigma^2$

$$\text{กรณี } t > 1 ; Var(DH_t) = \left[\lambda^4 + \frac{(1-\lambda)^2 (1+\lambda)^2}{t-1} \right] \sigma^2$$

ดังนั้นขีดจำกัดควบคุมบน (UCL) และล่าง (LCL) ของแผนภูมิควบคุม DHWMA คือ

$$\text{ขีดจำกัดควบคุมบนและล่าง} \quad UCL / LCL = \theta_0 \pm L_1 \sqrt{Var(DH_t)} \quad (3)$$

$$\text{เส้นกลาง} \quad CL = \theta_0$$

โดยที่ θ_0 คือ ค่าเฉลี่ยของกระบวนการ

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

σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการ

L_1 คือ ความกว้างของขีดจำกัดควบคุมที่สอดคล้องกับ $ARL_0 = 370$

2.2 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสามชั้น (Triple Exponentially Weighted Moving Average: TEWMA)

Alevizakos et al. (2020) นำเสนอแผนภูมิควบคุม TEWMA มีการเพิ่มสถิติ EWMA 2 ตัว ลงใน โครงสร้างของแผนภูมิควบคุม EWMA ทำให้แผนภูมิควบคุมนี้สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กถึงปานกลางได้ดีกว่าแผนภูมิควบคุม EWMA โดยสถิติของแผนภูมิควบคุม TEWMA คือ

$$\begin{aligned} Y_t &= \lambda X_t + (1-\lambda)Y_{t-1} \\ Z_t &= \lambda Y_t + (1-\lambda)Z_{t-1} \\ W_t &= \lambda Z_t + (1-\lambda)W_{t-1} \end{aligned} \quad (4)$$

โดยที่ W_t คือ ตัวสถิติ TEWMA ลำดับที่ t ณ เวลา t

X_t คือ ค่าสังเกตของกระบวนการ ณ เวลา t

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

Y_t และ Z_t คือ ตัวสถิติ EWMA ลำดับที่ 1 และ 2 ณ เวลา t ตามลำดับ

กำหนดตัวสถิติเริ่มต้น $Y_0 = Z_0 = W_0 = \theta_0$ คือค่าเฉลี่ยของกระบวนการ

เมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม ค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของ W_t คือ $E(W_t) = \theta_0$

$$\text{และ } Var(W_t) = \left[\frac{6(1-\lambda)^6 \lambda}{(2-\lambda)^5} + \frac{12(1-\lambda)^4 \lambda^2}{(2-\lambda)^4} + \frac{7(1-\lambda)^2 \lambda^3}{(2-\lambda)^3} + \frac{\lambda^4}{(2-\lambda)^2} \right] \sigma^2$$

ดังนั้นขีดจำกัดควบคุมบน (UCL) และล่าง (LCL) ของแผนภูมิควบคุม TEWMA คือ

$$\text{ขีดจำกัดควบคุมบนและล่าง} \quad UCL / LCL = \theta_0 \pm L_2 \sqrt{Var(W_t)} \quad (5)$$

$$\text{เส้นกลาง (Central line: CL)} \quad CL = \theta_0$$

โดยที่ θ_0 คือ ค่าเฉลี่ยของกระบวนการ

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

σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการ

L_2 คือ ความกว้างของขีดจำกัดควบคุมที่สอดคล้องกับ $ARL_0 = 370$

2.3 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังปรับปรุงซ้ำสองครั้ง (Double-Modified Exponentially Weighted Moving Average: DMEWMA)

Alevizakos et al. (2021) ได้นำเสนอแผนภูมิควบคุม DMEWMA โดยแผนภูมิควบคุมนี้ได้นำแนวคิดของการปรับให้เรียบมาใช้กับแผนภูมิควบคุม Modified EWMA ทำให้แผนภูมิควบคุมที่ได้สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กได้ดีกว่าเดิมและเมื่อกำหนด และ $k = -\lambda/2$ และ $k = -\lambda/4$ ทำให้แผนภูมิควบคุมมีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยสถิติของแผนภูมิควบคุม DMEWMA คือ

$$\begin{aligned} M_t &= \lambda X_t + (1-\lambda)M_{t-1} + k(X_t - M_{t-1}) \\ DM_t &= \lambda X_t + (1-\lambda)DM_{t-1} + k(M_t - DM_{t-1}) \end{aligned} \quad (6)$$

งานวิจัยนี้กำหนดค่า k เป็น 2 กรณี คือ $k = -\lambda/2$ เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ DMEWMA และ $k = -\lambda/4$ เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ DMEWMA2

โดยที่ X_t คือ ค่าสังเกตของกระบวนการ ณ เวลา t

DM_t คือ ตัวสถิติ DMEWMA ณ เวลา t

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

ตัวสถิติเริ่มต้น $X_0 = M_0 = DM_0 = \theta_0$ คือค่าเฉลี่ยของกระบวนการ

เมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม ค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของ DM_t คือ $E(DM_t) = \theta_0$

และความแปรปรวน DM_t คือ

$$Var(DM_t) = \left[(k+\lambda)^4 + 4\lambda^2(k+\lambda)^2(k+\lambda-1)^2 + \frac{4\lambda^2(k+\lambda-1)^2(k+\lambda)^2(1-\lambda)^2}{1-\theta} - \frac{4\lambda^3(k+\lambda-1)^3(k+\lambda)(1-\lambda)}{(1-\theta)^2} + \lambda^4(k+\lambda-1)^4 \frac{1+\theta}{(1-\theta)^3} \right] \sigma^2$$

ดังนั้นขีดจำกัดควบคุมบน (UCL) และล่าง (LCL) ของแผนภูมิควบคุม DMEWMA คือ

$$\text{ขีดจำกัดควบคุมบนและล่าง} \quad UCL / LCL = \theta_0 \pm L_3 \sqrt{Var(DM_t)} \quad (7)$$

$$\text{เส้นกลาง (Central line: CL)} \quad CL = \theta_0$$

โดยที่ θ_0 คือ ค่าเฉลี่ยของค่าสถิติของกระบวนการ

σ คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสถิติของกระบวนการ

L_3 คือ ความกว้างของขีดจำกัดควบคุมหรือค่าสัมประสิทธิ์ขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุม DMEWMA ที่สอดคล้องกับค่า $ARL_0 = 370$

3. ความยาวรันเฉลี่ย (Average Run Length: ARL)

ค่าความยาวรันเฉลี่ย (Average Run Length: ARL) คือ จำนวนตัวอย่างเฉลี่ยที่ตกอยู่ในขีดจำกัดควบคุมก่อนที่กระบวนการส่งสัญญาณออกนอกขีดจำกัดควบคุมเป็นครั้งแรกโดยค่า ARL แบ่งออกเป็น 2 สถานะคือ

3.1 เมื่อกระบวนการอยู่ในการควบคุม (in-control process) ค่าความยาวรันเฉลี่ยเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $ARL_0 = 1/\alpha$ เมื่อ α คือ ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดประเภทที่ 1 หมายถึงค่าความน่าจะเป็นที่พบว่ากระบวนการออกนอกขีดจำกัดควบคุม เมื่อกระบวนการไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

3.2 เมื่อกระบวนการอยู่นอกการควบคุม (out-of-control process) ค่าความยาวรันเฉลี่ยเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $ARL_1 = 1/(1-\beta)$ เมื่อ β คือ ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดประเภทที่ 2 หมายถึง ความน่าจะเป็นที่กระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม เมื่อกระบวนการเกิดการเปลี่ยนแปลง $1-\beta$ คือความน่าจะเป็นที่พบว่ากระบวนการออกนอกการควบคุม เมื่อกระบวนการเกิดการเปลี่ยนแปลง ค่า ARL_1 ควรจะมีค่าต่ำๆ หรือกล่าวได้ว่าเมื่อกระบวนการอยู่นอกการควบคุม แผนภูมิควบคุมส่งสัญญาณแจ้งเตือนบ่อยมากขึ้น

ในการวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) ในการคำนวณค่า ARL เป็นวิธีการศึกษาทดลอง โดยทำการทดลองซ้ำๆ หลายครั้ง ซึ่งสามารถคำนวณค่า ARL ได้ดังนี้

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

โดยที่ M คือ จำนวนรอบการทำซ้ำ

RL_t คือ ค่าความยาวรัน เป็นจำนวนหน่วยตัวอย่างที่ถูกตรวจสอบจนกระทั่งพบว่ากระบวนการออกนอกขีดจำกัดควบคุมเป็นครั้งแรก ในการทำซ้ำครั้งที่ $t; t = 1, 2, \dots, 20,000$

วิธีการวิจัย

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักเหมือนกันซ้ำสองครั้ง (DHWMA) แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังปรับปรุงซ้ำสองครั้ง (DMEWMA) และแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสามชั้น (TEWMA) เมื่อกำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา การศึกษาวิจัยนี้ใช้เกณฑ์วัดประสิทธิภาพจากค่าความยาวรันเฉลี่ย (Average Run Length: ARL) เมื่อกระบวนการอยู่นอกการควบคุม (out-of-control process : ARL_1) ถ้าแผนภูมิควบคุมใดที่ให้ค่า ARL_1 ต่ำสุด จะเป็นแผนภูมิที่มีประสิทธิภาพในการ

ตรวจจับขนาดการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปร่าง (Shape parameter: α) ดีที่สุดเมื่อกำหนด $ARL_0 = 370$ งานวิจัยครั้งนี้จำลองข้อมูลด้วยวิธีมอนติคาร์โล ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. กำหนดค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบ (λ) สำหรับแผนภูมิควบคุม DHWMA, TEWMA, และ DMEWMA เป็น 0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.3, และ 0.5 เมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุมกำหนดพารามิเตอร์รูปทรง (α_0) เป็น 1, 2, และ 8 พารามิเตอร์ขนาด (β_0) เป็น 1, 2, และ 8

2. จำลองข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ

2.1 เมื่อกระบวนการอยู่ในการควบคุม ($ARL_0 = 370$) กำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงแกมมาดังนี้

$G(\alpha_0 = 1, \beta_0 = 1)$, $G(\alpha_0 = 1, \beta_0 = 2)$, $G(\alpha_0 = 2, \beta_0 = 1)$, $G(\alpha_0 = 2, \beta_0 = 2)$, $G(\alpha_0 = 1, \beta_0 = 8)$, และ $G(\alpha_0 = 8, \beta_0 = 1)$

โดยขนาดตัวอย่าง (n) เท่ากับ 500 กำหนดจำนวนรอบในการทำซ้ำ (M) เท่ากับ 20,000

2.2 เมื่อกระบวนการอยู่นอกการควบคุมกำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงแกมมาเป็น $G(\alpha_1, \beta_0)$ กำหนดขนาดการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ $\alpha_1 = \alpha_0 + \delta$ เมื่อ δ เท่ากับ 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, และ 0.5 โดยขนาดตัวอย่าง (n) เท่ากับ 500 และกำหนดจำนวนรอบในการทำซ้ำ (M) เท่ากับ 20,000

3. นำข้อมูลที่ได้อาจจากการจำลองในข้อ 2 มาคำนวณค่าสถิติ DH_t , W_t และ DM_t ตามสมการที่ (2.2), (2.4) และ (2.6) ตามลำดับ

4. คำนวณขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุม DHWMA, TEWMA, และ DEWMA คือ UCL และ LCL ตามสมการที่ (2.3), (2.5), และ (2.7)

5. นำค่าสถิติที่คำนวณได้ของทั้ง 3 แผนภูมิในข้อ 3 มาเปรียบเทียบกับขีดจำกัดควบคุมของแต่ละแผนภูมิที่ได้ในข้อ 4 เพื่อหาจำนวนหน่วยตัวอย่างที่อยู่ภายใต้การควบคุมจนกระทั่งพบว่า กระบวนการออกนอกขีดจำกัดควบคุมเป็นครั้งแรกซึ่งเรียกว่า ค่าความยาวรัน (RL_t)

6. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 5 จนกว่าจะครบ 20,000 รอบในแต่ละสถานการณ์ คือ $RL_1, RL_2, \dots, RL_{20,000}$

7. คำนวณค่า ARL แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่กระบวนการอยู่ในการควบคุม (in-control process)

7.1 นำค่า RL_t ที่ได้จากข้อที่ 6 มาหาค่า ARL_0 ดังนี้ $ARL_0 = (\sum_{t=1}^M RL_t) / 20,000$

โดยที่ RL_t คือ ค่าความยาวรันเป็นจำนวนหน่วยตัวอย่างที่อยู่ภายใต้การควบคุมจนกระทั่งพบว่ากระบวนการออกนอกขีดจำกัดควบคุมเป็นครั้งแรกในการจำลองข้อมูลครั้งที่ t ; $t = 1, 2, \dots, 20,000$ หากได้ค่า ARL_0 มีค่าเท่ากับ 370 จะทำการเก็บค่า L และคำนวณค่า UCL มาใช้ในการหาค่า ARL_1

กรณีที่กระบวนการอยู่นอกการควบคุม (out-control process)

7.2 นำค่า RL_t ที่ได้จากข้อที่ 6 มาหาค่า ARL_1 (โดยข้อ 5 จะนำค่าสถิติที่ได้มาเปรียบเทียบกับ UCL ที่ได้จาก ARL_0 มีค่าเท่ากับ 370) ดังนี้ $ARL_1 = (\sum_{t=1}^M RL_t) / 20,000$

โดยที่ RL_t คือ ค่าความยาวรันเป็นจำนวนหน่วยตัวอย่างที่อยู่ภายใต้การควบคุมจนกระทั่งพบว่า กระบวนการออกนอกขีดจำกัดควบคุมเป็นครั้งแรกในการจำลองข้อมูลครั้งที่ t ; $t = 1, 2, \dots, 20,000$

8. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมจากค่าความยาวรันเฉลี่ยที่หามาได้ในข้อ 7.2 กรณีเมื่อกระบวนการผลิตอยู่นอกการควบคุม โดยแผนภูมิที่ให้ค่า ARL_1 ต่ำที่สุดจะเป็นแผนภูมิที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

ผลการวิจัย

1. กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 1, \beta_0 = 1)$

1.1 จากตารางที่ 1 และรูปที่ 1 กรณี $\lambda = 0.03, 0.05$ พบว่าเมื่อ $0.01 < \delta < 0.1$ แผนภูมิควบคุม TEWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 มีประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีกว่าแผนภูมิควบคุม DHWMA

1.2 จากตารางที่ 1 และรูปที่ 1 กรณี $\lambda = 0.03, 0.05$ พบว่าเมื่อ $0.2 < \delta < 0.5$ แผนภูมิควบคุม DHWMA มีแนวโน้มมีประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดีที่สุด

1.3 จากตารางที่ 1 และรูปที่ 1 กรณี $\lambda = 0.3, 0.5$ พบว่าเมื่อ $0.2 < \delta < 0.5$ แผนภูมิควบคุม TEWMA มีแนวโน้มมีประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดีที่สุด

1.4 จากตารางที่ 1 และรูปที่ 1 กรณี $\lambda = 0.07$ และ 0.1 พบว่าแผนภูมิควบคุม DHWMA มีแนวโน้มมีประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดีที่สุดในทุกระดับ δ

2. กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 1, \beta_0 = 2)$

2.1 จากตารางที่ 2 และรูปที่ 2 กรณี $\lambda = 0.03, 0.05$ พบว่าเมื่อ $0.01 < \delta < 0.08$ แผนภูมิควบคุม TEWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีกว่าแผนภูมิควบคุม DHWMA

2.2 จากตารางที่ 2 และรูปที่ 2 กรณี $\lambda = 0.07$ และ 0.1 พบว่าแผนภูมิควบคุม DHWMA มีแนวโน้มมีประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดีที่สุดในทุกระดับ δ

2.3 จากตารางที่ 2 และรูปที่ 2 กรณี $\lambda = 0.3$ และ 0.5 พบว่าเมื่อ $0.03 < \delta < 0.5$ แผนภูมิควบคุม TEWMA มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดีที่สุด

3. กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 2, \beta_0 = 1)$

3.1 จากตารางที่ 3 และรูปที่ 3 กรณี $\lambda = 0.03$ พบว่าเมื่อ $0.01 < \delta < 0.04$ แผนภูมิควบคุม DMEWMA2 มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดีกว่าแผนภูมิอื่น

3.2 จากตารางที่ 3 และรูปที่ 3 กรณี $\lambda = 0.05$ และ 0.07 พบว่าเมื่อ $0.01 < \delta < 0.09$ แผนภูมิควบคุม DMEWMA2 มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของกระบวนการดีกว่าแผนภูมิอื่น แต่เมื่อ $0.1 < \delta < 0.5$ แผนภูมิควบคุม DHWMA มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดีที่สุด

3.3 จากตารางที่ 3 และรูปที่ 3 กรณี $\lambda = 0.5$ พบว่าเมื่อ $0.01 < \delta < 0.5$ แผนภูมิควบคุม TEWMA มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดีที่สุด

4. กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 2, \beta_0 = 2)$

4.1 จากตารางที่ 4 และรูปที่ 4 กรณี $\lambda = 0.03, 0.3$, และ 0.5 พบว่า แผนภูมิควบคุม DHWMA มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดีกว่าแผนภูมิอื่น ในทุกระดับ δ

4.2 จากตารางที่ 4 และรูปที่ 4 กรณี $\lambda = 0.05$ และ 0.07 พบว่าเมื่อ $0.01 < \delta < 0.1$ แผนภูมิควบคุม TEWMA มีแนวโน้มมีประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของกระบวนการดีกว่าแผนภูมิอื่น แต่เมื่อ $0.2 < \delta < 0.5$ แผนภูมิควบคุม DHWMA มีแนวโน้มมีประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดีที่สุด

4.3 จากตารางที่ 4 และรูปที่ 4 กรณี $\lambda = 0.1$ พบว่าเมื่อ $0.02 < \delta < 0.04$ แผนภูมิควบคุม TEWMA และ DMEWMA2 มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของกระบวนการได้ดีกว่าแผนภูมิควบคุม DHWMA แต่เมื่อ $0.06 < \delta < 0.5$ แผนภูมิควบคุม DHWMA มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดีที่สุด

5. กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 1, \beta_0 = 8)$

5.1 จากตารางที่ 5 และรูปที่ 5 กรณี $\lambda = 0.03, 0.07$, และ 0.3 พบว่าเมื่อ $0.01 < \delta < 0.03$ แผนภูมิควบคุม DMEWMA มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีกว่าแผนภูมิควบคุมอื่น แต่เมื่อ $0.04 < \delta < 0.5$ แผนภูมิควบคุม DHWMA มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดีกว่า

5.2 จากตารางที่ 5 และรูปที่ 5 กรณี $\lambda = 0.05, 0.1$ พบว่าแผนภูมิควบคุม DHWMA มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดีที่สุดในทุกระดับ δ

5.3 จากตารางที่ 5 และรูปที่ 5 กรณี กรณี $\lambda = 0.5$ พบว่าแผนภูมิควบคุมทั้ง 4 แผนภูมิมีแนวโน้มประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการใกล้เคียงกัน

6. กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 8, \beta_0 = 1)$

6.1 จากตารางที่ 6 และรูปที่ 6 กรณี $\lambda = 0.05, 0.07, 0.1$ และ 0.3 พบว่าเมื่อ $0.01 < \delta < 0.5$ แผนภูมิควบคุม DHWMA มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ดีกว่าแผนภูมิควบคุมอื่น

6.2 จากตารางที่ 6 และรูปที่ 6 กรณี $\lambda = 0.3$ พบว่าเมื่อ $0.01 < \delta < 0.03$ แผนภูมิควบคุม DMEWMA2 มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดีกว่าแผนภูมิอื่น แต่เมื่อ $0.05 < \delta < 0.5$ แผนภูมิควบคุม DHWMA มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดีกว่า

6.3 จากตารางที่ 6 และรูปที่ 6 กรณี $\lambda = 0.5$ พบว่าเมื่อ $0.01 < \delta < 0.1$ แผนภูมิควบคุม DMEWMA, DHWMA มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดีกว่าแผนภูมิอื่น แต่เมื่อ $0.2 < \delta < 0.5$ แผนภูมิควบคุม DHWMA มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดีกว่า

7. จากตารางที่ 7 เป็นการแสดงค่าความกว้างของขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 โดยข้อมูลมีการแจกแจงแบบแกมมาเมื่อกระบวนการอยู่ในการควบคุม ($ARL_0 = 370$)

ตารางที่ 1 ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA และ DMEWMA2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 1, \beta_0 = 1)$

ความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
λ	δ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA 2
0.03	0.01	359.170	364.956	357.614	346.494
	0.02	346.346	357.156	333.206	339.032
	0.03	314.260	330.690	325.422	318.904
	0.04	305.248	326.06	304.610	299.828
	0.05	286.052	318.994	287.102	288.93
	0.06	282.072	303.180	277.464	273.610
	0.07	268.504	257.782	262.428	265.248
	0.08	255.882	251.482	235.888	240.806
	0.09	242.228	236.064	227.424	230.018
	0.1	228.856	218.190	213.652	226.546
	0.2	174.572	93.116	150.364	146.338
	0.3	145.812	47.300	114.200	116.870
	0.4	129.610	28.410	98.066	98.488
	0.5	119.758	17.622	88.644	88.166
0.05	0.01	353.468	366.658	349.976	349.164
	0.02	338.920	330.688	330.538	336.112
	0.03	319.332	327.292	320.486	326.814
	0.04	292.884	302.564	296.688	297.434
	0.05	283.230	295.37	286.714	281.504
	0.06	266.532	281.838	272.056	268.102
	0.07	258.484	257.314	250.958	261.734
	0.08	247.728	231.528	237.776	241.890
	0.09	220.690	214.276	225.294	220.378
	0.1	216.022	209.174	221.916	217.26
	0.2	135.166	81.626	127.168	128.748
	0.3	104.312	43.262	91.444	89.994
	0.4	88.768	26.808	72.466	72.980
	0.5	78.936	19.020	61.812	61.852

ตารางที่ 1 (ต่อ) ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA และ DMEWMA2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 1, \beta_0 = 1)$

ความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
λ	δ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA 2
0.07	0.01	359.736	362.410	352.066	353.382
	0.02	342.732	336.762	347.724	332.136
	0.03	339.566	319.486	319.66	322.546
	0.04	326.666	298.792	315.522	300.698
	0.05	306.176	285.430	288.200	291.758
	0.06	296.412	283.726	285.690	269.152
	0.07	266.794	244.174	254.928	263.040
	0.08	251.838	240.272	251.634	236.744
	0.09	238.346	205.266	220.104	223.408
	0.1	214.43	185.172	217.866	219.196
	0.2	127.906	75.634	126.556	126.222
	0.3	91.800	43.432	80.538	80.148
	0.4	71.598	25.148	60.908	63.020
	0.5	62.770	18.726	52.220	50.522
0.1	0.01	360.828	343.074	365.438	347.260
	0.02	336.638	336.284	332.334	340.986
	0.03	319.562	305.930	327.222	333.006
	0.04	297.366	304.958	316.612	296.600
	0.05	284.364	284.776	294.140	289.324
	0.06	275.450	254.148	283.172	263.736
	0.07	266.806	252.356	277.374	267.652
	0.08	255.612	237.378	257.360	244.792
	0.09	228.090	228.600	234.932	241.934
	0.1	218.506	192.204	224.466	227.024
	0.2	124.898	87.722	131.580	125.716
	0.3	79.074	44.926	76.444	78.192
	0.4	60.052	28.192	56.874	53.906
	0.5	50.454	21.138	44.604	43.354

ตารางที่ 1 (ต่อ) ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA และ DMEWMA2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 1, \beta_0 = 1)$

ความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
λ	δ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA 2
0.3	0.01	356.368	362.760	362.560	357.120
	0.02	349.586	352.336	358.078	355.788
	0.03	326.526	330.510	347.522	339.426
	0.04	322.578	328.310	338.222	338.274
	0.05	316.732	314.070	314.032	330.238
	0.06	302.602	303.966	312.290	315.984
	0.07	301.376	292.380	309.838	310.616
	0.08	294.488	272.394	295.260	298.772
	0.09	278.162	255.994	291.216	293.196
	0.1	272.046	253.934	289.228	286.452
	0.2	165.638	167.004	196.080	197.702
	0.3	108.796	102.038	122.604	125.006
	0.4	71.338	72.780	89.114	81.284
	0.5	49.826	55.234	59.940	51.148
0.5	0.01	366.978	362.590	369.966	360.356
	0.02	360.632	351.620	360.028	352.006
	0.03	345.522	343.944	354.638	346.432
	0.04	344.440	336.774	353.256	343.700
	0.05	332.530	332.272	352.536	330.316
	0.06	328.100	322.168	338.546	321.048
	0.07	319.526	317.442	334.330	320.114
	0.08	318.708	309.034	305.940	317.446
	0.09	311.118	300.652	301.800	305.100
	0.1	304.23	297.562	296.436	303.892
	0.2	221.574	232.850	232.878	239.430
	0.3	143.452	174.286	165.030	161.120
	0.4	107.808	124.506	126.122	126.254
	0.5	76.184	82.594	86.682	85.190

ตารางที่ 2 ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา

ความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
λ	δ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA 2
0.03	0.01	346.600	368.318	349.464	356.490
	0.02	337.192	355.308	337.076	344.784
	0.03	322.270	328.974	319.020	318.860
	0.04	309.912	322.168	316.326	303.582
	0.05	287.210	288.556	292.510	290.698
	0.06	270.194	277.902	262.032	270.448
	0.07	267.734	267.488	260.480	261.006
	0.08	250.406	255.226	235.676	243.568
	0.09	244.908	217.098	231.716	231.906
	0.1	231.748	199.612	229.480	212.760
	0.2	170.592	90.440	148.024	146.030
	0.3	144.036	45.150	116.554	115.212
	0.4	130.466	28.068	99.580	98.926
	0.5	118.610	19.058	87.450	88.454
0.05	0.01	353.882	364.868	357.476	353.700
	0.02	331.246	346.854	336.566	344.524
	0.03	315.370	332.138	331.744	324.596
	0.04	297.678	296.084	297.018	312.822
	0.05	283.784	292.664	288.218	296.126
	0.06	263.682	276.360	264.796	276.890
	0.07	254.356	242.262	263.442	274.258
	0.08	253.200	237.706	243.798	241.926
	0.09	214.580	213.866	216.208	230.900
	0.1	211.676	192.982	207.930	211.786
	0.2	139.486	83.490	126.814	124.682
	0.3	103.828	42.112	91.462	91.796
	0.4	88.826	26.504	73.482	74.008
	0.5	78.774	19.998	61.916	63.204

ตารางที่ 2 (ต่อ) ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา

ความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
λ	δ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA 2
0.07	0.01	357.466	355.784	365.806	348.250
	0.02	349.896	345.148	348.976	327.742
	0.03	330.402	342.832	336.448	323.998
	0.04	314.668	304.584	319.296	315.426
	0.05	297.722	297.552	313.896	294.454
	0.06	267.298	262.810	289.584	279.560
	0.07	264.136	244.454	288.110	260.530
	0.08	238.960	232.258	274.516	244.436
	0.09	229.100	221.018	254.598	229.260
	0.1	222.310	204.732	249.688	216.210
	0.2	124.650	92.456	132.740	123.886
	0.3	89.190	41.264	82.938	79.094
	0.4	71.056	27.294	63.266	62.558
	0.5	62.058	20.712	52.718	50.652
0.1	0.01	354.114	353.644	363.550	349.376
	0.02	348.574	321.744	356.234	342.846
	0.03	319.764	312.478	348.940	328.360
	0.04	316.302	305.546	328.082	327.884
	0.05	301.234	279.834	323.118	303.834
	0.06	290.314	264.766	304.486	297.810
	0.07	269.992	235.042	299.104	289.184
	0.08	253.590	217.390	276.566	268.736
	0.09	249.304	197.992	253.798	258.738
	0.1	233.358	174.536	258.220	240.596
	0.2	124.254	85.362	139.996	128.616
	0.3	83.190	43.514	89.336	84.688
	0.4	61.042	30.228	60.634	58.568
	0.5	50.316	20.450	45.636	45.620

ตารางที่ 2 (ต่อ) ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา

ความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
λ	δ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA 2
0.3	0.01	366.270	360.130	368.016	355.156
	0.02	362.420	349.528	366.114	353.128
	0.03	352.194	338.166	351.306	351.846
	0.04	346.914	328.932	349.890	331.938
	0.05	341.552	319.904	349.098	317.992
	0.06	312.074	305.444	346.502	311.926
	0.07	307.500	290.006	339.422	309.786
	0.08	291.970	271.734	319.814	297.988
	0.09	276.972	269.234	318.562	293.780
	0.1	263.954	266.220	294.854	292.096
	0.2	182.726	161.804	196.108	184.944
	0.3	108.760	110.810	139.082	127.982
	0.4	73.356	75.326	91.958	80.242
	0.5	53.088	57.638	60.426	59.978
0.5	0.01	359.254	364.314	357.526	361.056
	0.02	352.192	359.118	348.706	357.548
	0.03	332.018	341.036	338.496	356.376
	0.04	327.290	331.764	333.496	344.536
	0.05	322.708	332.728	332.380	343.742
	0.06	309.576	328.868	327.086	338.188
	0.07	308.464	322.960	317.274	324.034
	0.08	305.214	303.544	313.838	311.378
	0.09	299.802	302.670	299.600	310.942
	0.1	283.342	282.604	297.300	305.050
	0.2	223.810	229.992	236.220	242.598
	0.3	135.626	173.844	175.778	193.858
	0.4	102.702	125.924	121.848	123.102
	0.5	65.868	92.188	78.392	87.350

ตารางที่ 3 ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 2, \beta_0 = 1)$

ความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
λ	δ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA 2
0.03	0.01	356.480	366.762	366.426	353.542
	0.02	347.154	355.300	359.778	334.186
	0.03	343.926	337.138	336.662	331.868
	0.04	326.094	320.154	328.540	307.432
	0.05	320.468	305.174	319.772	301.840
	0.06	308.470	282.424	306.786	298.460
	0.07	304.716	277.948	292.748	283.110
	0.08	289.308	263.908	287.868	272.912
	0.09	276.934	259.268	283.674	271.424
	0.1	267.646	247.760	270.158	253.416
	0.2	211.144	145.874	194.816	181.158
	0.3	180.464	70.528	152.656	150.798
	0.4	160.480	42.948	130.966	125.456
	0.5	149.230	30.928	116.522	114.188
0.05	0.01	359.718	362.666	364.180	365.948
	0.02	352.556	347.458	352.336	345.732
	0.03	332.462	329.742	331.038	339.306
	0.04	328.062	326.024	327.336	327.294
	0.05	312.884	324.398	324.160	311.390
	0.06	304.972	296.690	310.312	300.48
	0.07	302.856	277.248	290.824	283.542
	0.08	284.462	276.83	280.346	270.688
	0.09	268.830	267.974	267.384	266.054
	0.1	250.018	246.162	255.692	252.808
	0.2	175.344	148.446	172.284	171.358
	0.3	133.018	72.058	124.996	118.976
	0.4	114.948	46.218	98.622	99.664
	0.5	102.142	33.078	85.448	83.992

ตารางที่ 3 (ต่อ) ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 2, \beta_0 = 1)$

ความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
λ	δ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA 2
0.07	0.01	368.502	352.538	360.444	357.668
	0.02	358.254	345.278	358.522	337.098
	0.03	342.362	344.796	346.268	330.300
	0.04	339.550	334.532	339.326	325.744
	0.05	325.620	300.896	322.206	317.000
	0.06	302.230	299.466	319.686	295.526
	0.07	295.924	290.312	307.450	293.986
	0.08	291.014	282.872	295.506	270.476
	0.09	280.162	252.456	280.242	266.630
	0.1	257.596	248.464	274.486	263.178
	0.2	174.674	154.164	176.594	163.778
	0.3	123.140	73.494	119.402	121.476
	0.4	95.550	45.408	90.434	84.770
	0.5	82.126	31.200	71.670	72.380
0.1	0.01	353.134	359.894	356.348	365.768
	0.02	345.698	344.170	345.788	361.034
	0.03	340.860	341.184	338.240	347.146
	0.04	331.548	321.772	328.440	333.958
	0.05	322.434	304.840	316.870	332.058
	0.06	302.836	303.35	302.032	312.998
	0.07	287.234	273.502	295.786	310.002
	0.08	277.530	270.970	289.702	306.962
	0.09	275.814	257.154	271.658	278.586
	0.1	271.138	234.176	268.234	274.790
	0.2	175.354	142.666	187.556	189.136
	0.3	116.094	78.392	109.292	127.892
	0.4	86.458	78.392	84.462	88.870
	0.5	68.546	34.158	66.480	66.304

ตารางที่ 3 (ต่อ) ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 2, \beta_0 = 1)$

ความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
λ	δ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA 2
0.3	0.01	352.094	360.380	366.838	368.830
	0.02	345.706	358.732	351.934	350.780
	0.03	344.192	345.944	346.346	349.448
	0.04	339.344	340.550	348.284	348.514
	0.05	322.250	338.342	335.216	343.256
	0.06	320.266	324.962	322.614	337.190
	0.07	318.068	317.694	321.114	328.716
	0.08	311.718	301.63	316.866	323.252
	0.09	310.396	299.100	309.416	307.330
	0.1	306.280	278.06	302.372	300.894
	0.2	211.618	197.232	239.668	253.170
	0.3	160.358	141.716	166.870	180.982
	0.4	102.630	108.506	124.842	124.860
	0.5	80.422	74.372	92.320	94.976
0.5	0.01	367.758	365.400	366.502	365.376
	0.02	351.858	360.394	356.722	359.332
	0.03	342.176	351.072	350.786	354.220
	0.04	340.726	342.624	338.948	349.104
	0.05	333.748	341.440	337.148	341.590
	0.06	330.010	339.706	334.064	331.106
	0.07	329.022	333.150	328.334	329.736
	0.08	327.072	331.522	325.124	328.956
	0.09	307.834	328.768	319.120	325.464
	0.1	300.688	323.150	315.322	313.644
	0.2	250.886	310.440	266.132	261.618
	0.3	190.440	209.420	210.358	228.426
	0.4	148.410	165.506	157.856	169.834
	0.5	110.260	122.232	121.482	143.882

ตารางที่ 4 ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 2, \beta_0 = 2)$

ความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
λ	δ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA 2
0.03	0.01	354.064	348.534	361.748	348.044
	0.02	348.816	332.600	348.864	341.216
	0.03	344.298	327.376	344.994	332.802
	0.04	329.132	318.090	329.02	318.998
	0.05	317.864	312.230	319.514	315.410
	0.06	305.120	305.764	301.088	298.814
	0.07	302.864	283.784	296.262	294.004
	0.08	288.842	279.606	293.114	282.166
	0.09	272.050	264.096	278.294	267.934
	0.1	269.034	258.556	267.458	259.230
	0.2	205.986	139.598	196.848	181.234
	0.3	176.486	68.286	154.540	148.846
	0.4	159.324	44.254	130.894	129.400
	0.5	149.662	29.818	116.146	114.43
0.05	0.01	359.546	367.548	362.530	361.992
	0.02	353.824	350.042	348.360	356.744
	0.03	335.018	343.146	343.340	334.068
	0.04	322.478	328.660	329.526	323.168
	0.05	304.154	310.452	316.864	319.44
	0.06	301.902	311.058	293.196	301.074
	0.07	275.356	291.706	290.454	287.436
	0.08	271.968	287.100	277.312	284.862
	0.09	261.776	270.384	271.296	267.292
	0.1	243.474	264.844	248.952	266.522
	0.2	174.952	143.200	178.772	167.886
	0.3	133.140	76.092	125.576	127.456
	0.4	112.642	46.100	100.588	98.638
	0.5	101.760	32.556	86.048	85.760

ตารางที่ 4 (ต่อ) ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 2, \beta_0 = 2)$

ความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
λ	δ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA 2
0.07	0.01	366.174	360.282	361.284	362.550
	0.02	342.974	351.742	348.060	346.990
	0.03	320.726	339.506	342.486	331.724
	0.04	308.430	335.436	331.668	328.172
	0.05	305.956	309.672	320.528	309.570
	0.06	287.644	302.306	318.854	303.758
	0.07	286.116	282.406	297.620	291.360
	0.08	282.060	270.044	295.950	283.624
	0.09	276.188	264.536	292.576	277.790
	0.1	252.974	259.826	275.790	261.054
	0.2	164.328	132.812	175.756	175.128
	0.3	120.806	74.558	120.072	116.672
	0.4	94.626	40.430	90.816	87.788
	0.5	81.458	32.226	73.296	72.048
0.1	0.01	366.368	354.406	359.236	356.494
	0.02	340.312	341.032	349.170	350.724
	0.03	338.024	339.374	337.974	337.418
	0.04	337.798	335.678	336.464	331.056
	0.05	326.726	322.262	319.814	323.100
	0.06	309.894	292.956	308.482	314.122
	0.07	302.206	290.962	291.548	310.798
	0.08	297.772	264.308	277.452	306.934
	0.09	287.904	257.278	270.852	278.310
	0.1	272.224	240.686	256.574	277.820
	0.2	172.452	127.588	178.540	166.542
	0.3	123.956	77.804	121.530	121.776
	0.4	87.772	48.308	81.596	87.548
	0.5	71.620	33.994	69.190	66.452

ตารางที่ 4 (ต่อ) ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 2, \beta_0 = 2)$

ความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
λ	δ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA 2
0.3	0.01	363.678	352.648	364.472	367.260
	0.02	357.004	349.544	359.090	364.074
	0.03	340.038	343.590	350.614	354.328
	0.04	333.248	324.252	344.800	343.008
	0.05	326.872	312.078	342.964	341.162
	0.06	317.790	308.098	340.048	333.056
	0.07	316.082	297.994	332.524	326.048
	0.08	304.436	295.206	309.544	313.858
	0.09	298.588	276.132	316.124	314.048
	0.1	292.588	274.250	297.534	305.136
	0.2	201.284	195.100	248.258	241.348
	0.3	144.972	137.166	175.028	175.856
	0.4	113.520	97.818	120.456	129.034
	0.5	76.168	72.518	91.454	87.710
0.5	0.01	362.322	362.724	360.914	368.534
	0.02	357.548	352.736	349.524	360.430
	0.03	352.092	347.214	346.802	356.636
	0.04	349.954	339.480	341.304	354.120
	0.05	345.652	336.472	339.408	347.740
	0.06	338.486	317.798	334.130	342.536
	0.07	334.318	317.832	333.804	332.138
	0.08	333.184	315.234	330.376	329.676
	0.09	320.380	314.234	325.870	322.996
	0.1	316.042	311.272	317.470	318.192
	0.2	260.228	252.708	270.972	275.936
	0.3	206.320	195.236	217.142	214.524
	0.4	139.116	159.756	169.664	171.826
	0.5	114.200	122.126	133.120	132.314

ตารางที่ 5 ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 1, \beta_0 = 8)$

ความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
λ	δ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA 2
0.03	0.01	355.482	355.948	353.526	355.434
	0.02	335.322	355.948	342.130	335.214
	0.03	330.204	314.250	323.044	318.484
	0.04	316.824	295.456	308.264	305.652
	0.05	304.650	276.852	288.334	292.574
	0.06	281.204	265.066	270.304	281.874
	0.07	279.376	254.270	259.744	260.848
	0.08	256.628	219.866	244.478	244.570
	0.09	244.648	217.352	236.618	230.934
	0.1	237.104	193.804	213.236	216.904
	0.2	171.586	79.478	148.052	146.194
	0.3	145.946	42.258	116.504	115.518
	0.4	131.354	26.026	99.736	99.458
	0.5	120.840	16.574	88.400	88.926
0.05	0.01	353.484	348.322	354.536	351.804
	0.02	344.892	319.188	349.746	349.330
	0.03	331.098	304.438	316.044	319.960
	0.04	309.724	294.072	306.306	302.458
	0.05	282.038	282.398	304.104	295.568
	0.06	276.496	260.382	284.868	278.592
	0.07	253.590	227.910	257.490	261.938
	0.08	246.776	222.984	250.106	245.134
	0.09	227.692	213.614	232.206	227.742
	0.1	216.508	209.614	215.150	212.188
	0.2	131.548	83.136	122.672	123.898
	0.3	102.630	41.150	88.704	89.492
	0.4	89.218	23.256	71.528	72.540
	0.5	78.838	16.766	62.000	61.944

ตารางที่ 5 (ต่อ) ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 1, \beta_0 = 8)$

ความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
λ	δ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA 2
0.07	0.01	351.804	369.052	339.006	361.736
	0.02	349.330	334.880	321.542	336.816
	0.03	319.960	328.234	314.952	317.188
	0.04	302.458	315.656	298.074	306.290
	0.05	295.568	277.128	296.234	302.318
	0.06	278.592	264.314	275.764	268.956
	0.07	261.938	242.202	254.000	264.680
	0.08	245.134	217.110	249.672	245.452
	0.09	227.742	207.388	230.108	224.798
	0.1	212.188	197.422	214.880	212.884
	0.2	123.898	79.168	117.148	124.316
	0.3	89.492	41.882	78.562	80.612
	0.4	72.540	25.830	62.868	61.120
	0.5	61.944	18.568	50.440	51.274
0.1	0.01	358.276	351.884	359.360	362.596
	0.02	334.824	343.290	356.034	340.476
	0.03	327.162	310.514	330.824	323.890
	0.04	313.970	290.222	317.160	315.128
	0.05	296.962	272.966	305.530	298.350
	0.06	278.314	269.516	300.078	287.890
	0.07	275.920	232.020	275.282	261.596
	0.08	244.630	217.648	272.324	259.312
	0.09	242.524	203.676	250.614	255.720
	0.1	227.464	192.084	233.176	223.954
	0.2	125.606	87.920	137.952	135.038
	0.3	82.490	45.824	82.176	82.138
	0.4	59.874	26.534	57.684	57.656
	0.5	50.220	20.330	44.768	43.892

ตารางที่ 5 (ต่อ) ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 1, \beta_0 = 8)$

ความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
λ	δ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA 2
0.3	0.01	366.972	357.050	352.078	359.042
	0.02	362.374	352.564	345.858	356.892
	0.03	343.874	340.376	337.346	354.736
	0.04	323.904	322.340	328.974	346.786
	0.05	319.910	320.176	325.418	338.978
	0.06	317.686	304.454	313.194	326.534
	0.07	300.642	296.536	307.164	309.118
	0.08	294.466	289.110	302.206	297.822
	0.09	290.728	268.12	287.888	292.618
	0.1	288.708	267.522	287.400	284.300
	0.2	173.888	160.952	198.678	188.294
	0.3	108.936	110.748	121.444	123.842
	0.4	70.520	78.342	81.532	84.918
	0.5	51.920	55.598	56.500	55.714
0.5	0.01	358.832	365.006	367.400	356.876
	0.02	356.072	356.648	362.976	353.430
	0.03	349.816	346.464	354.072	351.202
	0.04	345.722	345.798	352.908	346.312
	0.05	341.542	338.608	340.372	334.942
	0.06	330.924	330.656	330.308	330.136
	0.07	329.656	329.142	329.016	319.400
	0.08	323.334	323.074	313.986	318.710
	0.09	315.672	315.294	312.024	302.394
	0.1	295.258	308.990	308.276	295.622
	0.2	236.946	239.384	228.998	235.002
	0.3	146.412	178.552	161.536	164.676
	0.4	104.620	117.330	120.508	114.996
	0.5	76.878	88.760	76.060	79.116

ตารางที่ 6 ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 8, \beta_0 = 1)$

ความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
λ	δ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA 2
0.03	0.01	369.364	360.542	368.626	355.234
	0.02	359.252	357.970	366.502	354.400
	0.03	357.386	354.832	364.270	352.242
	0.04	356.264	329.994	357.020	351.820
	0.05	345.710	327.790	347.510	346.308
	0.06	341.658	326.402	346.788	337.046
	0.07	335.408	323.756	340.844	329.760
	0.08	330.574	303.400	338.988	328.874
	0.09	328.208	298.816	334.840	318.526
	0.1	321.092	293.290	316.216	312.712
	0.2	283.244	232.764	286.272	266.550
	0.3	249.242	189.996	238.380	230.768
	0.4	233.020	121.592	208.904	207.378
	0.5	216.298	94.016	187.438	186.354
0.05	0.01	363.882	361.152	368.270	363.924
	0.02	360.652	356.748	365.846	358.760
	0.03	354.806	351.264	363.178	356.932
	0.04	345.722	348.930	352.894	343.002
	0.05	340.398	336.466	337.808	340.982
	0.06	338.228	326.366	335.418	339.390
	0.07	330.712	325.358	326.120	337.752
	0.08	329.190	323.196	324.788	331.646
	0.09	321.994	319.620	322.722	317.494
	0.1	313.222	318.636	315.302	305.406
	0.2	256.980	233.920	259.132	261.110
	0.3	209.204	176.786	218.192	211.786
	0.4	186.164	138.744	173.252	177.590
	0.5	162.582	91.420	151.702	155.128

ตารางที่ 6 (ต่อ) ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 8, \beta_0 = 1)$

ความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
λ	δ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA 2
0.07	0.01	369.688	365.158	367.688	367.292
	0.02	361.866	363.014	356.560	363.188
	0.03	353.248	347.734	355.516	359.604
	0.04	349.288	337.770	350.756	348.512
	0.05	346.826	336.620	340.838	343.598
	0.06	338.014	328.980	333.518	339.542
	0.07	335.250	327.072	324.968	338.206
	0.08	332.798	324.322	323.156	329.404
	0.09	329.230	309.324	322.540	321.904
	0.1	311.312	301.194	309.634	319.912
	0.2	272.080	237.514	269.072	260.476
	0.3	212.322	176.480	204.086	212.840
	0.4	177.712	127.702	180.564	174.718
	0.5	150.366	99.588	147.324	145.366
0.1	0.01	361.954	353.492	368.950	367.830
	0.02	355.044	351.334	361.736	360.842
	0.03	351.144	349.602	356.912	356.298
	0.04	349.586	346.794	355.188	348.420
	0.05	341.824	339.466	342.066	342.484
	0.06	334.572	334.546	340.638	338.744
	0.07	327.556	325.832	333.270	329.040
	0.08	322.540	309.112	331.508	328.054
	0.09	319.540	307.504	328.910	324.732
	0.1	315.890	305.434	315.784	320.170
	0.2	268.110	228.352	267.606	272.784
	0.3	220.500	176.874	224.632	224.414
	0.4	173.560	117.952	181.882	178.262
	0.5	138.676	94.894	143.020	157.196

ตารางที่ 6 (ต่อ) ความยาวรันเฉลี่ยเมื่อกระบวนการออกนอกการควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 8, \beta_0 = 1)$

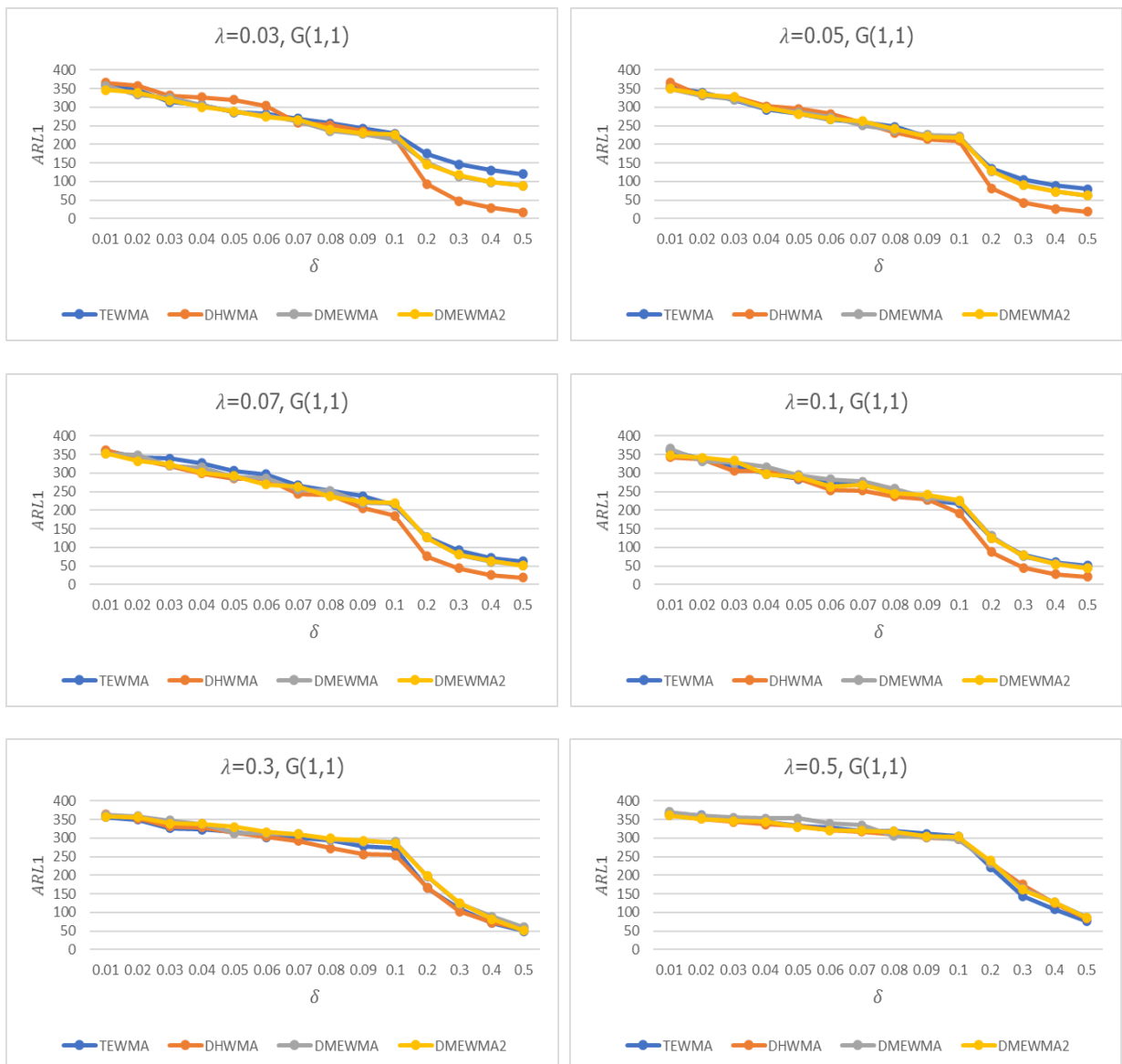
ความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุม					
λ	δ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA 2
0.3	0.01	368.186	353.678	368.024	361.684
	0.02	364.376	350.000	362.878	357.568
	0.03	361.766	349.476	358.142	355.360
	0.04	359.804	342.990	349.932	353.554
	0.05	353.876	348.236	348.446	352.690
	0.06	349.626	340.570	345.106	350.484
	0.07	345.934	336.560	344.380	347.902
	0.08	344.494	325.182	341.108	340.982
	0.09	341.998	315.022	339.820	336.070
	0.1	327.308	301.012	333.364	326.646
	0.2	281.346	252.978	297.746	302.350
	0.3	262.732	200.956	269.414	265.106
	0.4	234.260	173.968	226.074	246.076
	0.5	180.786	130.018	198.916	187.544
0.5	0.01	367.740	364.958	368.602	369.632
	0.02	363.634	357.964	354.806	367.544
	0.03	362.242	354.08	353.096	365.124
	0.04	359.172	353.258	350.274	362.756
	0.05	351.516	349.002	348.576	350.958
	0.06	347.074	344.778	345.782	347.248
	0.07	345.800	340.120	342.832	345.234
	0.08	344.154	338.960	336.886	343.692
	0.09	343.358	337.888	335.826	338.56
	0.1	338.060	336.058	334.544	326.866
	0.2	312.648	310.384	316.418	312.784
	0.3	280.774	276.010	288.988	281.326
	0.4	240.046	228.250	265.348	260.304
	0.5	230.760	203.472	221.726	216.850

ตารางที่ 7 ความกว้างของขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 เมื่อกระบวนการอยู่ในการควบคุม ($ARL_0 = 370$)

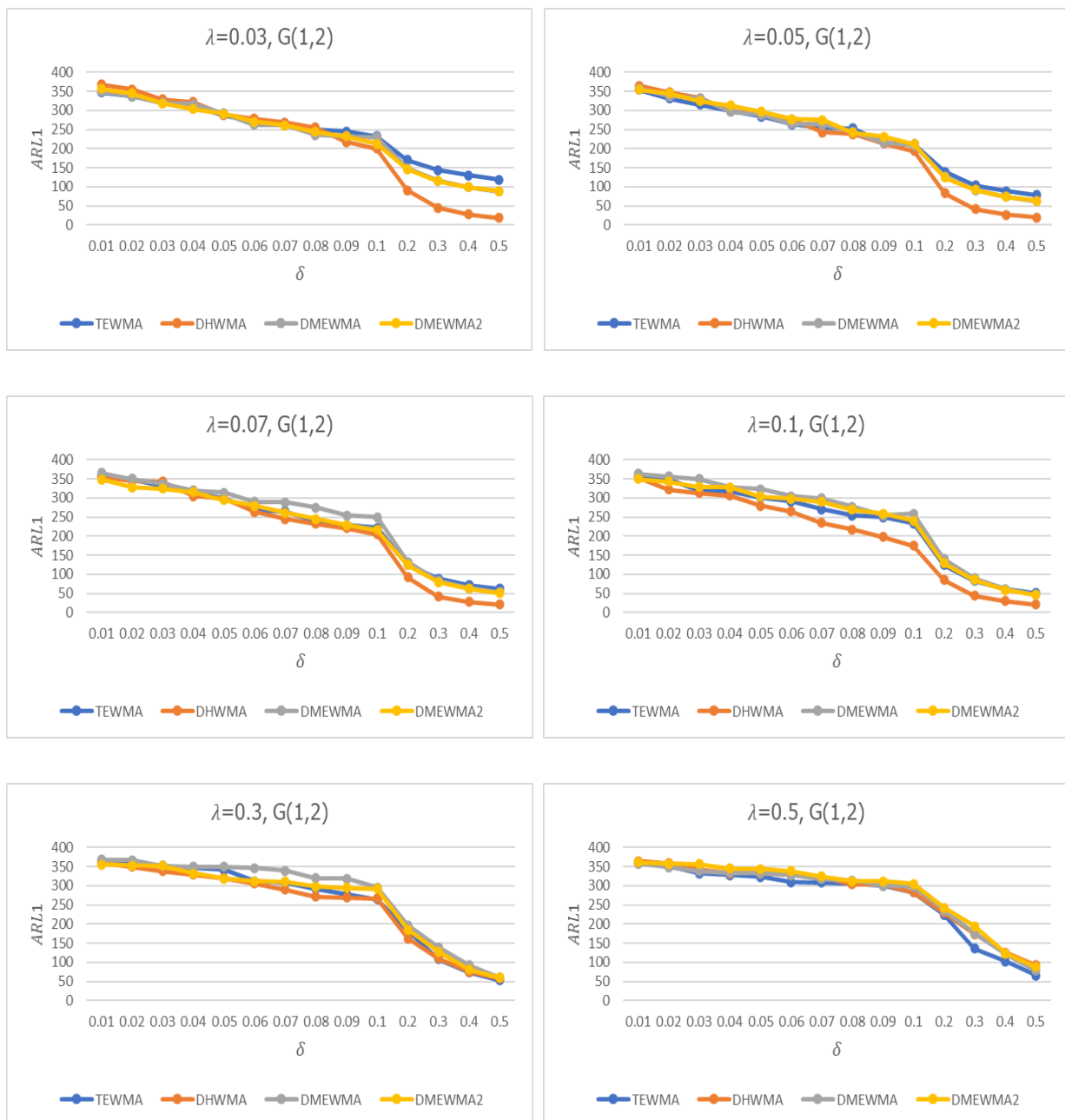
การแจกแจงแบบแกมมา	λ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA2
$G(\alpha_0 = 1, \beta_0 = 1)$	0.03	0.629	1.210	1.110	1.110
	0.05	1.351	1.130	1.680	1.700
	0.07	1.750	1.191	1.990	1.990
	0.1	1.999	1.415	2.300	2.270
	0.3	3.023	4.310	3.330	3.323
	0.5	3.700	5.310	3.902	3.900
$G(\alpha_0 = 1, \beta_0 = 2)$	0.03	1.200	2.245	1.100	1.110
	0.05	2.700	2.274	1.700	1.722
	0.07	3.410	2.451	2.110	1.998
	0.1	4.100	2.710	2.400	2.341
	0.3	6.090	8.720	3.400	3.325
	0.5	7.310	10.600	3.900	3.954
$G(\alpha_0 = 2, \beta_0 = 1)$	0.03	0.770	1.456	1.110	1.002
	0.05	1.856	1.560	1.660	1.670
	0.07	2.360	1.632	1.990	1.950
	0.1	2.782	1.870	2.230	2.280
	0.3	4.060	5.520	3.100	3.150
	0.5	4.790	6.620	3.550	3.621
$G(\alpha_0 = 2, \beta_0 = 2)$	0.03	1.550	2.890	1.110	1.020
	0.05	3.640	5.310	1.670	1.650
	0.07	4.610	3.234	1.990	1.955
	0.1	5.630	3.843	2.220	2.263
	0.3	8.010	10.762	3.100	3.124
	0.5	9.700	13.100	3.570	3.585
$G(\alpha_0 = 1, \beta_0 = 8)$	0.03	5.200	8.400	1.110	1.125
	0.05	10.850	8.401	1.710	1.691
	0.07	13.410	9.300	1.980	1.998
	0.1	16.200	11.020	2.330	2.321
	0.3	24.344	35.200	3.300	3.332
	0.5	29.600	42.630	3.900	3.900

ตารางที่ 7 (ต่อ) ความกว้างของขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุม TEWMA, DHWMA, DMEWMA, และ DMEWMA2 เมื่อกระบวนการอยู่ในการควบคุม ($ARL_0 = 370$)

การแจกแจงแบบแกมมา	λ	TEWMA	DHWMA	DMEWMA	DMEWMA2
$G(\alpha_0 = 8, \beta_0 = 1)$	0.03	1.071	2.540	0.980	0.910
	0.05	3.460	2.540	1.590	1.590
	0.07	4.600	2.800	1.880	1.900
	0.1	5.329	3.220	2.170	2.170
	0.3	7.623	8.780	2.890	2.890
	0.5	8.791	10.712	3.200	3.214



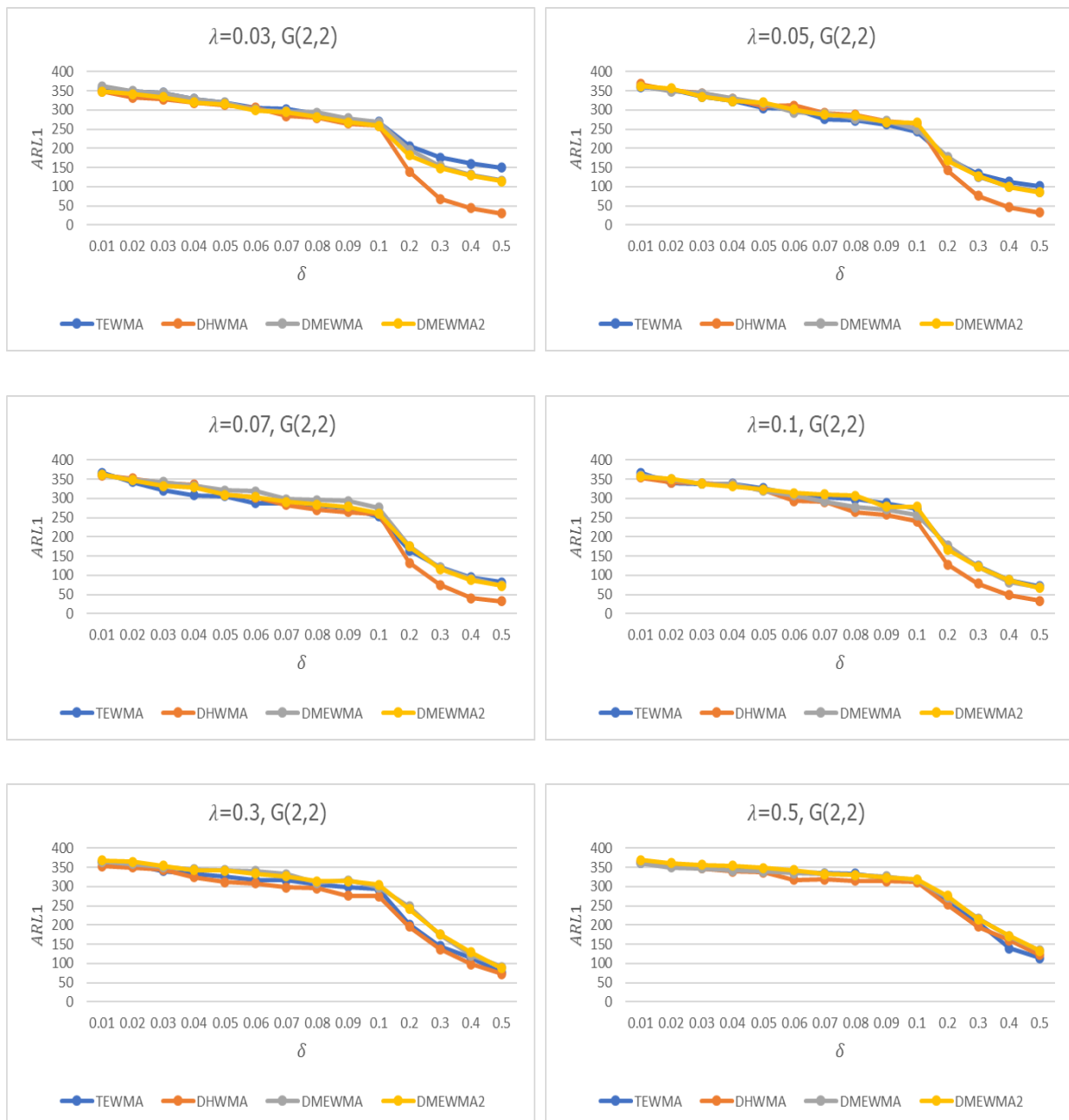
รูปที่ 1 แสดงค่า ARL_1 ของแผนภูมิควบคุม กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 1, \beta_0 = 1)$



รูปที่ 2 แสดงค่า ARL_1 ของแผนภูมิควบคุม กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0=1, \beta_0=2)$



รูปที่ 3 แสดงค่า ARL_1 ของแผนภูมิควบคุม กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 2, \beta_0 = 1)$



รูปที่ 4 แสดงค่า ARL_1 ของแผนภูมิควบคุม กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 2, \beta_0 = 2)$



รูปที่ 5 แสดงค่า ARL_1 ของแผนภูมิควบคุม กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0=1, \beta_0=8)$



รูปที่ 6 แสดงค่า ARL_1 ของแผนภูมิควบคุม กรณีสข้อมูลมีการแจกแจงแกมมา $G(\alpha_0 = 8, \beta_0 = 1)$

สรุปผลการวิจัย

ค่าความยาวรันเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักเหมือนกันซ้ำสองครั้ง (DHWMA) แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสามชั้น (TEWMA) แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังปรับปรุงซ้ำสองครั้ง (DMEWMA) เมื่อข้อมูลมีการแจกแจงแบบแกมมาซึ่งกำหนดพารามิเตอร์รูปร่าง และพารามิเตอร์บ่งขนาด เท่ากับ 1, 2, 8 และกำหนดค่าพารามิเตอร์ปรับเรียบ (λ) ของแผนภูมิควบคุมทั้ง 3 ชนิด เท่ากับ 0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.3, 0.5 พบว่าเมื่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ขนาด 0.01 ถึง 0.06 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักเหมือนกันซ้ำสองครั้ง (DHWMA), แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังสามชั้น (TEWMA), แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเลขชี้กำลังปรับปรุงซ้ำสองครั้ง (DMEWMA) ทั้ง 3 ชนิด มีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ขนาด 0.07-0.5 แผนภูมิควบคุม DHWMA มีแนวโน้มมีประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้ดีที่สุด

ภายใต้สถานการณ์ที่ข้อมูลมีการแจกแจงแบบแกมมา $G(2,2)$ กรณี $\lambda = 0.05$ ที่ $0.07 < \delta < 0.1$ และกรณี $\lambda = 0.07$ ที่ $0.02 < \delta < 0.06$ และเมื่อข้อมูลมีการแจกแจงแบบแกมมา $G(2,1)$ กรณี $\lambda = 0.5$ ที่ $0.07 < \delta < 0.1$ และ $0.1 < \delta < 0.5$ แผนภูมิควบคุม TEWMA มีแนวโน้มมีประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดีกว่าแผนภูมิควบคุมอื่น

แต่กรณีข้อมูลมีการแจกแจงแบบแกมมา $G(8,1)$ แผนภูมิควบคุมทั้ง 3 ชนิดมีประสิทธิภาพในการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการน้อยกว่ากรณีข้อมูลที่มีการแจกแจงอื่น

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุม เมื่อกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ (Out of control) โดยพิจารณาจากค่า ARL_1 ภายใต้ $ARL_0 = 370$ เท่านั้น แต่จะไม่นำ ARL_0 มาเปรียบเทียบด้วย เพราะถือว่ากระบวนการยังคงทำงานเป็นปกติ หรือยังอยู่ภายใต้การควบคุม (In control)

การประยุกต์กับข้อมูลจริง

ข้อมูลที่น่ามาใช้ในการวิจัยเป็นข้อมูลอายุการใช้งานของตลับลูกปืน 23 ชิ้นและมีการแจกแจงแกมมาโดยมีพารามิเตอร์รูปร่างและพารามิเตอร์บ่งขนาดเป็น 5.16 และ 0.81 ตามลำดับ (Shanker et.al, 2016) เมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม กำหนดให้พารามิเตอร์รูปร่างและพารามิเตอร์บ่งขนาดเป็น 5 และ 0.81

ตารางที่ 7 ข้อมูลจริงและค่าสถิติของแผนภูมิควบคุม TEWMA DHWMA และ DMEWMA

ลำดับที่	อายุการใช้งาน	ค่าสถิติของแผนภูมิควบคุม				
		$L=0.12,$ $UCL=4.08$	$L=0.73$	$L=0.72,$ $UCL=4.2646$	$L=0.72,$ $UCL=4.2644$	
i	X_i	W_i	DH_i	UCL	DM_i	DM_i
1	7.100	4.182*	4.209*	4.063	4.187	4.181
2	9.633	4.193	7.125	5.378	4.231	4.204
3	7.100	4.211	8.353	4.989	4.306*	4.264
4	5.880	4.237	7.923	4.817	4.389	4.344*
5	5.840	4.268	7.412	4.714	4.471	4.428
6	5.700	4.305	6.667	4.644	4.551	4.5098
7	5.480	4.345	6.861	4.592	4.626	4.587
8	5.173	4.388	6.661	4.552	4.693	4.658
9	4.673	4.431	6.006	4.519	4.750	4.721
10	3.826	4.474	6.262	4.493	4.791	4.771
11	3.813	4.513	6.018	4.470	4.815	4.803
12	3.802	4.549	5.354	4.450	4.825	4.820
13	3.766	4.581	5.649	4.433	4.822	4.823
14	3.086	4.606	5.497	4.4187	4.805	4.813
15	3.006	4.625	5.324	4.405	4.774	4.790
16	2.886	4.637	5.169	4.393	4.731	4.753
17	2.880	4.642	4.605	4.382	4.678	4.704
18	2.711	4.640	4.898	4.372	4.616	4.647
19	2.533	4.630	4.775	4.363	4.545	4.580
20	2.340	4.613	4.655	4.355	4.467	4.506
21	2.306	4.589	4.539	4.347	4.383	4.425
22	1.833	4.557	4.047	4.340	4.291	4.337
23	1.800	4.518	4.309	4.333	4.192	4.241

เมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุมกำหนดให้พารามิเตอร์รูปร่างและพารามิเตอร์บ่งขนาดเป็น 5 และ 0.81 จากตารางพบว่าแผนภูมิควบคุม TEWMA และ DHWMA สามารถตรวจจับพบค่าออกนอกการควบคุม ได้ครั้งแรกในลำดับที่ $i=1$ ส่วนแผนภูมิควบคุม DMEWMA เมื่อกำหนดค่า $k = -\lambda/2$ ตรวจจับพบค่าออกนอกการควบคุม ได้ครั้งแรกในลำดับที่ $i=3$ และแผนภูมิควบคุม DMEWMA เมื่อกำหนดค่า $k = -\lambda/4$ ตรวจจับพบค่าออกนอกการควบคุม ได้ครั้งแรกในลำดับที่ $i=4$

จากการประยุกต์ใช้งานข้อมูลจริง พบว่าแผนภูมิควบคุม TEWMA และ DHWMA สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้รวดเร็วกว่าแผนภูมิ DMEWMA เมื่อกำหนดค่า $k = -\lambda / 2$ และ $k = -\lambda / 4$

เอกสารอ้างอิง

- 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 International*, 36(5), 1513-1527. <http://doi.org/10.1002/qre.2641>
- Alevizakos, V., Chatterjee, K., & Koukouvinos, C. (2022). Modified EWMA and DEWMA control charts for process monitoring. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 51(21), 7390-7412. <https://doi.org/10.1080/03610926.2021.1872642>
- Alevizakos, V., Chatterjee, K., & Koukouvinos, C. (2021). The triple exponentially weighted moving average control chart. *Quality Technology & Quantitative Management*, 18(3), 326-354. <http://dx.doi.org/10.1080/16843703.2020.1809063>
- Gonzalez, I. M., & Viles, E. (2001). Design of R control chart assuming a gamma distribution. *Economic Quality Control*, 16(2), 199-204. <http://doi.org/10.1515/EQC.2001.199>
- Montgomery, D. C. (2012). *Introduction to statistical quality control* (7th ed.). Wiley, New York.
- Page, E. S. (1961). Cumulative Sum Control Chart. *Technometrics*, 3, 1-9.
- Roberts, S. W. (1959). Control chart tests based on geometric moving averages. *Technometrics*, 1(3), 239-250.
- Shanker, R., Shukla, K. K., Shanker, R., & Leonida, T. A. (2016). On modeling of lifetime data using two-parameter Gamma and Weibull distributions. *Biometrics & biostatistics International journal*, 4(5), 1-6. <https://doi.org/10.15406/bbij.2016.04.00107>
- Sheu, S-H., & Lin, T-C. (2006). The generally weighted moving average control chart for detecting small shifts in the process mean. *Quality Engineering*, 16(2), 209-231. <https://doi.org/10.1081/QEN-120024009>

Research Article

การวิเคราะห์อภิมานความสัมพันธ์ระหว่างการสัมผัสมลพิษทางอากาศ และโรคหลอดเลือดสมอง

Meta-analysis of Association Between Exposure to Air Pollution and Cerebrovascular Disease

ปิยะฉัตร เล่าสิลาปาสาร์ และ สุวิมล พันธุ์แย้ม*

Piyachat Leelasilapasart and Suvimol Phanyaem*

ภาควิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประเทศไทย

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

*E-mail: suvimol.p@sci.kmutnb.ac.th

Received: 08/02/2022; Revised: 16/10/2022; Accepted: 27/10/2022

บทคัดย่อ

โรคหลอดเลือดสมองเป็นปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นทั่วโลก โดยปัจจุบันมีผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองเกิดใหม่ราว 15 ล้านรายต่อปี จากการศึกษาพบว่า 90% ของการเกิดโรคหลอดเลือดสมอง เป็นผลมาจากปัจจัยเสี่ยงที่สามารถปรับเปลี่ยนหรือควบคุมพฤติกรรมได้ ในขณะที่มลพิษทางอากาศเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดภาวะโรคหลอดเลือดสมอง ยังมีการสัมผัสมลพิษทางอากาศเป็นระยะเวลานานยิ่งเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหลอดเลือดสมอง จากปัญหาที่กล่าวในข้างต้น ผู้วิจัยเล็งเห็นความสำคัญของสังเคราะห์งานวิจัยเพื่อหาดัชนีมาตรฐานวัดความสัมพันธ์ระหว่างการสัมผัสมลพิษทางอากาศและการเกิดโรคหลอดเลือดสมอง นำมาสู่การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโรคหลอดเลือดสมองที่เกิดจากการสัมผัสกับมลพิษทางอากาศ มาสังเคราะห์เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือ และดึงข้อสรุปสำคัญจากงานวิจัยมาวิเคราะห์โดยวิธีการวิเคราะห์อภิมาน (Meta-Analysis) ซึ่งเป็นวิธีการสังเคราะห์งานวิจัยเชิงปริมาณที่ใช้วิธีการทางสถิติมาสังเคราะห์งานวิจัยหลาย ๆ เรื่องที่ศึกษาปัญหางานวิจัยเดียวกัน เพื่อนำผลวิจัยแต่ละเรื่องมาบูรณาการเพื่อให้เกิดความรู้เกี่ยวกับการเกิดโรคหลอดเลือดสมองที่มาจากปัญหาการสัมผัสมลพิษทางอากาศ ผลการวิจัยพบว่า ค่าอัตราส่วนออดส์รวมของการศึกษา (Pooled Odds Ratio) ของความสัมพันธ์ระหว่างการสัมผัสมลพิษทางอากาศและโรคหลอดเลือดสมอง เท่ากับ 1.034 ค่าความเชื่อมั่น 95% ของค่าประมาณผลรวมของการวิจัยอยู่ระหว่าง 1.001 ถึง 1.068 สรุปได้ว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดโรคหลอดเลือดสมองกับการสัมผัสมลพิษทางอากาศ โดยผู้ที่สัมผัสมลพิษทางอากาศมีโอกาสในการเกิดโรคหลอดเลือดในสมองมากกว่าคนที่ไม่ได้สัมผัสมลพิษทางอากาศเท่ากับ 1.034 เท่า

คำสำคัญ: การวิเคราะห์อภิมาน โรคหลอดเลือดสมอง มลพิษทางอากาศ

Abstract

Cerebrovascular or stroke disease is a severe problem that affects people worldwide. Approximately 15 million new stroke cases occur each year, and studies reveal that 90% of strokes occur. It is caused by risk factors that can change or control behavior. While air pollution is another major cause of strokes, the longer one is exposed to it, the higher the risk of stroke, the higher the risk of death from the problems mentioned above. The researchers realized how important it was to synthesize research to develop a standardized index to measure the relationship between air pollution exposure and stroke incidence. As a result, the research investigations into cerebrovascular caused by air pollution have been conducted to synthesize for credibility. A meta-analysis was used to collect and analyze the research's main conclusions. A Meta-Analysis is a quantitative research synthesis method that synthesizes a large amount of data using statistical methods. The subject looked at the same research issue to combine the findings of each study to have a better understanding of strokes induced by air pollution exposure issues. According to the results, the pooled odds ratio for the association between air pollution exposure and cerebrovascular disease was 1.034. The 95 percent confidence interval for the pooled odds ratio is 1.001 to 1.068. It was concluded that there was an association between the incidence of cerebrovascular disease and exposure to air pollution. Those exposed to air pollution were 1.034 times more likely to have the cerebrovascular disease than those not exposed to air pollution.

Keywords: Meta-analysis, Cerebrovascular Disease, Air Pollution

บทนำ

โรคหลอดเลือดสมองเป็นปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นทั่วโลก ปัจจุบันมีผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองเกิดใหม่ราว 15 ล้านรายต่อปี ซึ่งประมาณ 2 ใน 3 ของผู้ป่วยทั้งหมดเกิดขึ้นในประเทศกำลังพัฒนาหรือด้อยพัฒนา รวมถึงประเทศไทย (ศูนย์หลอดเลือดสมอง (2565)) ปัจจุบันโรคหลอดเลือดสมองเป็นสาเหตุการเสียชีวิตอันดับหนึ่งในเพศหญิง รองจากการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุ และโรคมะเร็ง และจากการศึกษาคุณภาพการรักษาโรคดังกล่าวในประเทศไทย พบว่า ผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองตีบหรืออุดตันเฉียบพลัน 100 รายที่เข้ารับการรักษาตัวในโรงพยาบาล ณ วันที่ออกจากโรงพยาบาล จะมีกลุ่มผู้ป่วยที่เสียชีวิตประมาณร้อยละ 5 กลุ่มผู้ป่วยที่หายจากอาการป่วยใกล้เคียงปกติ ร้อยละ 25 และกลุ่มผู้ป่วยที่พิการ ร้อยละ 70 โดยอัตราความพิการจะน้อยลงตามลำดับเมื่อเวลาผ่านไป นอกจากความพิการทางร่างกาย ยังมีผลต่อความคิด การวางแผน ความจำ ทำให้เกิดความจำเสื่อมในระยะต่อมา ซึ่งมักถูกมองข้ามไปในผู้ป่วยส่วนใหญ่ ดังนั้นจะเห็นว่าโรคหลอดเลือดสมองเป็นปัญหาสำคัญของประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศทั่วโลกกำลังเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุในปัจจุบัน ส่งผลให้พบโรคนี้น่ามากขึ้น หากประชาชนไม่ได้รับการป้องกันอย่างถูกวิธี

สำนักนโยบายและยุทธศาสตร์ สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข รายงานข้อมูลจำนวนผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองตั้งแต่ปี พ.ศ. 2557 – 2561 ว่ามีแนวโน้มสูงขึ้น โดยพบผู้ป่วยจำนวน 326,946 และ 337,441 ราย ในปี พ.ศ. 2560 และ พ.ศ. 2561 ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2560 พบว่ามีผู้เสียชีวิตจากโรคหลอดเลือดสมอง จำนวน 31,172 ราย คิดเป็นร้อยละ 9.53 จากสถิติดังกล่าวจะเห็นว่าในปี พ.ศ. 2560 – 2561 จำนวนผู้ป่วยเพิ่มขึ้นถึง 41,667 ราย แสดงให้เห็นว่าโรคหลอดเลือดสมองเป็นสาเหตุการเสียชีวิตอันดับต้น ๆ ของประเทศไทย นอกจากนี้มีรายงานของประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าโรคหลอดเลือดสมองเป็นสาเหตุสำคัญของการเจ็บป่วยและเสียชีวิต และจากงานวิจัยที่ศึกษาก่อนหน้านี้ได้ใช้ฐานข้อมูลการเข้ารักษาในโรงพยาบาลที่มีการจำแนกประเภท และระยะเวลาของเหตุการณ์เกิดโรคหลอดเลือดสมอง ทั้งนี้การศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ระหว่างการสัมผัส

มลพิษทางอากาศ (PM) ระยะสั้น และโรคหลอดเลือดสมองยังมีความไม่ชัดเจน (Fisher et al. (2019)) ด้วยเหตุนี้จึงมีผู้วิจัยศึกษาปัจจัยเสี่ยงที่ส่งผลให้เกิดโรคหลอดเลือดสมอง เช่น การสูบบุหรี่ การขาดสารอาหาร การออกกำลังกาย และมลพิษทางอากาศ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า 90% ของการเกิดโรคหลอดเลือดสมอง มีผลมาจากปัจจัยเสี่ยงที่สามารถปรับเปลี่ยนหรือควบคุมพฤติกรรมได้ ปัจจัยเสี่ยงต่อเมตาบอลิซึมสามารถป้องกันภาวะโรคหลอดเลือดสมองได้มากกว่า 3 ใน 4 ของการเกิดโรคดังกล่าว ในขณะที่มลพิษทางอากาศเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดภาวะโรคหลอดเลือดสมอง ยังมีการสัมผัสมลพิษทางอากาศเป็นระยะเวลานาน ซึ่งเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหลอดเลือดสมอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่มีรายได้ต่ำและรายได้ปานกลาง ดังนั้นการลดการสัมผัสกับมลพิษทางอากาศจึงเป็นสิ่งที่สำคัญอันดับแรกในการลดภาวะโรคหลอดเลือดสมองในประเทศเหล่านี้ (Feigin et al (2016)) ทั้งนี้มีงานวิจัยโดย Andersen et al (2010) Wellenius et al (2012) Rodopoulou et al (2015) Lee et al (2016) และ Sun et al (2019) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมลพิษทางอากาศต่อการป่วยและการตายจากโรคหลอดเลือดสมอง

มลพิษทางอากาศ (Air Pollution) ได้แก่ ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM_{10}) ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide: CO) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide: SO_2) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (Nitrogen Dioxide: NO_2) ตะกั่ว (Lead: Pb) และโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: PAHs) มลพิษทางอากาศเหล่านี้มาจากยานพาหนะและการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากโรงงานอุตสาหกรรม การสัมผัสกับมลพิษทางอากาศ หมายถึง การสัมผัสภาวะอากาศที่มีสารเจือปนในปริมาณสูงกว่าระดับปกติเป็นระยะเวลานานพอที่จะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ ดังนั้นการสัมผัสโดยตรงกับคุณภาพอากาศที่ไม่ดีทั้งระยะสั้นและระยะยาวมีผลกระทบทางพิษวิทยาที่แตกต่างกันต่อมนุษย์ไม่ว่าจะเป็นโรกระบบทางเดินหายใจและหลอดเลือดหัวใจภาวะแทรกซ้อนทางระบบประสาท การระคายเคืองดวงตา โรคผิวหนัง โรคเรื้อรังระยะยาว เช่น มะเร็ง (Li et al. (2017) และ World Health Organization (2018)) นอกจากนี้มีการศึกษาอุบัติการณ์ของโรคขาดเลือดในสมอง โรคหลอดเลือดสมองตีบในผู้สูงอายุที่ได้รับผลกระทบจากการสัมผัสมลพิษที่มีอนุภาคนาขนาดเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) เป็นระยะเวลานาน (Huang et al (2019) และ Liang et al. (2020))

Fisher et al. (2019) ศึกษาและออกแบบการวิจัยแบบ case - crossover โดยใช้ตัวแบบการถดถอยโลจิสติกส์ (Logistic Regression) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการสัมผัส PM_{10} และ $PM_{2.5}$ ในระยะสั้นและความเสี่ยงของการเกิดเลือดออกในสมองของผู้ชายที่ลงทะเบียนเพื่อติดตามด้านสุขภาพ นอกจากนี้ยังใช้ตัวแบบการถดถอยโลจิสติกส์ แบบมีเงื่อนไข (Conditional Logistic Regression Model) ประเมินค่าอัตราส่วนโอกาส (Odds Ratio) และช่วงความเชื่อมั่น 95% ของพิสัยควอไทล์ (Interquartile Range: IQR) ที่เพิ่มขึ้นใน $PM_{2.5}$ หรือ PM_{10} ซึ่งระยะเวลาที่เป็นช่วงเวลาที่ซ้ำกว่ากันของการศึกษาสูงสุด 3 วันก่อนการเกิดโรคหลอดเลือดสมอง และใช้ตัวแบบจำลองแบบแบ่งชั้นตรวจสอบการปรับเปลี่ยนผลกระทบตามลักษณะผู้ป่วย

Andersen et al. (2010) ออกแบบการวิจัยแบบ Case - crossover เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสัมผัสระยะสั้นกับมลพิษทางอากาศอนุภาคละเอียดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $< 0.1 \mu m$ มลพิษทางอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $< 10 \mu m$ (PM_{10}) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และการเข้าโรงพยาบาลเพื่อรักษาโรคหลอดเลือดสมองในเมืองโคเปนเฮเกน ประเทศเดนมาร์ก (ระหว่างปี ค.ศ. 2003 - 2006) จากอาสาสมัครผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง 7,485 ราย ผลการวิจัยพบว่า มีความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างการสัมผัสมลพิษทางอากาศที่มีอนุภาคละเอียด NO_2 และ CO และการเกิดโรคหลอดเลือดสมอง

Wellenius et al. (2012) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของระดับมลพิษทางอากาศ $PM_{2.5}$ และการเกิดโรคหัวใจและโรคหลอดเลือด โดยศึกษาประวัติทางการแพทย์จากโรงพยาบาลในเมืองบอสตัน ประเทศสหรัฐอเมริกา จำนวน 1,705 โรงพยาบาล ที่มีผู้ป่วยเข้ารับการรักษาด้วยโรคหลอดเลือดสมองตีบและออกแบบการศึกษาแบบ Case - crossover แบบ

แบ่งชั้นตามเวลา เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดโรคหลอดเลือดสมองตีบและระดับมลพิษทางอากาศ PM_{2.5} ผลการวิจัยพบว่า การสัมผัสกับมลพิษทางอากาศ PM_{2.5} เพิ่มความเสี่ยงการเกิดโรคหลอดเลือดสมองตีบในระยะเวลาไม่กี่ชั่วโมงหลังจากสัมผัสมลพิษทางอากาศ

การวิเคราะห์ห่อภิมาณ (Meta - Analysis) เป็นเทคนิคการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (Systematic Review) โดยใช้วิธีการทางสถิติในการวิเคราะห์ผลที่ได้จากงานวิจัยที่ศึกษาในเรื่องเดียวกันหลาย ๆ เรื่องเข้าด้วยกันเพื่อหาข้อสรุปเหล่านั้นให้มีแก่นสาร น่าเชื่อถือ และให้ได้ข้อค้นพบใหม่ที่ทำให้ผู้ใช้ผลการวิจัยมีความมั่นใจยิ่งขึ้นกว่าการใช้ผลการวิจัยจากงานเพียงบางเรื่องเท่านั้น โดยประเภทของการสังเคราะห์งานวิจัย จำแนกเป็น 2 ประเภท คือ การสังเคราะห์งานวิจัยเชิงคุณลักษณะ (Qualitative Synthesis) และการสังเคราะห์งานวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Synthesis) การสังเคราะห์งานวิจัยเชิงคุณลักษณะเป็นการวิเคราะห์งานวิจัยจากการอ่านรายงานวิจัยแล้วนำผลการวิจัยมาสรุปผลเข้าด้วยกัน สำหรับการสังเคราะห์งานวิจัยเชิงปริมาณ เป็นการวิเคราะห์จากค่าสถิติที่ปรากฏในงานวิจัยหลาย ๆ งาน จึงกล่าวได้ว่าเป็นการวิเคราะห์เชิงผสมผสาน (Integrative Analysis) หรือเรียกว่าเป็นการวิจัยงานวิจัย (Research of Research) โดยใช้วิธีการทางสถิติมาวิเคราะห์เพื่อหาข้อสรุปอย่างมีระบบจากงานวิจัยหลาย ๆ เรื่องที่ศึกษาปัญหาวิจัยเดียวกัน เพื่อคำนวณผลการวิจัยออกมาให้เห็นได้อย่างชัดเจน จึงเป็นวิธีการที่ทำให้ผลการวิเคราะห์น่าเชื่อถือได้มากกว่าการสรุปงานวิจัยเชิงบรรยายหรือเชิงคุณลักษณะเท่านั้น (อุทุมพร (2531))

การวิเคราะห์ห่อภิมาณเชิงปริมาณเป็นการประมาณค่าขนาดอิทธิพลของประชากรจากงานวิจัยเชิงทดลอง แต่เนื่องจากผลการวิจัยที่นำมาสังเคราะห์มีแบบแผนการวิจัยที่ต่างกัน การวิเคราะห์ค่าสถิติด้วยวิธีการต่างกัน จึงทำให้ค่าสถิติที่ได้จากงานวิจัยแต่ละเรื่องแตกต่างกัน ทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้ จำเป็นต้องนำค่าสถิติเหล่านั้นมาปรับให้เป็นหน่วยมาตรฐานเดียวกัน นั่นคือการสร้างค่าดัชนีมาตรฐาน ซึ่งจำแนกตามประเภทของงานวิจัยได้เป็น 2 ประเภท คือ ขนาดอิทธิพล (Effect Size) เป็นดัชนีมาตรฐานสำหรับงานวิจัยเชิงทดลอง และดัชนีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) เป็นดัชนีมาตรฐานสำหรับงานวิจัยเชิงสหสัมพันธ์ (Glass (1976)) สำหรับการวิจัยนี้มุ่งศึกษากรณีของการหาดัชนีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient)

จากปัญหาที่กล่าวในข้างต้น ผู้วิจัยเล็งเห็นความสำคัญของสังเคราะห์งานวิจัยเพื่อหาดัชนีมาตรฐานวัดความสัมพันธ์ระหว่างการสัมผัสมลพิษทางอากาศและการเกิดโรคหลอดเลือดสมอง นำมาสู่การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโรคหลอดเลือดสมองที่เกิดจากการสัมผัสกับมลพิษทางอากาศ มาสังเคราะห์เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือ และดึงข้อสรุปสำคัญจากงานวิจัยมาวิเคราะห์โดยวิธีการวิเคราะห์ห่อภิมาณ (Meta - Analysis) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้วิธีทางสถิติมาสังเคราะห์งานวิจัยหลาย ๆ เรื่องที่ศึกษาปัญหางานวิจัยเดียวกัน โดยงานวิจัยแต่ละเรื่องจะถูกปรับให้เป็นมาตรฐานหน่วยเดียวกัน

การวิเคราะห์ห่อภิมาณ

Glass (1976) ให้ความหมายของการวิเคราะห์ห่อภิมาณ ว่าเป็นการสังเคราะห์งานวิจัยเชิงปริมาณที่มีการรวบรวมงานวิจัยหลายเรื่องที่ศึกษาปัญหาวิจัยเดียวกันด้วยวิธีทางสถิติเพื่อให้ได้ข้อสรุปของการวิจัยที่ถูกต้อง และน่าเชื่อถือ ซึ่งในปัจจุบันการวิเคราะห์ห่อภิมาณงานวิจัยถูกใช้อย่างแพร่หลายในวงการที่ศึกษาเรื่องพฤติกรรมทางสังคมและการแพทย์ โดยดัชนีชี้วัดในการวิเคราะห์ห่อภิมาณจะถูกวัดได้ในรูปของขนาดอิทธิพล

งานวิจัยแต่ละเรื่องจะถูกใช้เป็นหน่วยตัวอย่างของการวิเคราะห์ห่อภิมาณ โดยแปลงให้เป็นหน่วยมาตรฐานเดียวกันเพื่อสรุปผลรวมเข้าด้วยกันได้ ค่าดัชนีมาตรฐานการวิเคราะห์ห่อภิมาณที่สำคัญ คือ ค่าขนาดอิทธิพล (Effect size) ซึ่งเป็นค่าสถิติที่ใช้สำหรับงานวิจัยเชิงทดลอง Cohen (1992) นิยามความหมายของค่าขนาดอิทธิพล คือ ค่าดัชนีที่ใช้วัดความแตกต่างระหว่างอิทธิพลที่เกิดจากกลุ่มควบคุม (Control) และกลุ่มทดลอง (Case) ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยมีการวัดค่าเป็นสองทาง (Dichotomous

Outcome) คือ การทดลองสำเร็จและไม่สำเร็จ การเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุมสามารถคำนวณหาค่าขนาดอิทธิพลในรูปของค่าอัตราส่วนออกดส์ การคำนวณค่าขนาดอิทธิพลโดยใช้ค่าอัตราส่วนออกดส์นั้นจะทำการแปลงค่าให้อยู่ในรูปของลอการิทึมของค่าอัตราส่วนออกดส์ เพื่อให้เกิดสมดุลในการวิเคราะห์ และในการสรุปผลจะทำการแปลงค่ากลับตามเดิม

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์ห่อภิมานงานสำหรับวิจัยนี้ ซึ่งเป็นการสังเคราะห์องค์ความรู้ที่เกิดจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมลพิษทางอากาศและการเกิดโรคหลอดเลือดสมอง โดยใช้หลักการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบและสังเคราะห์งานวิจัยด้วยวิธีการวิเคราะห์ห่อภิมาน มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมลพิษทางอากาศและการเกิดโรคหลอดเลือดสมอง ซึ่งมีรายละเอียดการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

1. ประชากรและตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

ประชากร คือ งานวิจัยประเภทวารสารที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติหรือนานาชาติที่ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างมลพิษทางอากาศและการเกิดโรคหลอดเลือดสมอง ระหว่างปี พ.ศ. 2543 – 2563

ตัวอย่าง คือ งานวิจัยที่ผ่านการคัดเลือกจากประชากร โดยพิจารณาตามเกณฑ์ที่ผู้วิจัยกำหนดเป็นงานวิจัยเชิงทดลอง สหสัมพันธ์ มีการรายงานสถิติที่เพียงพอต่อการนำไปคำนวณค่าขนาดอิทธิพลและผ่านเกณฑ์การประเมินคุณภาพมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้

2. แหล่งข้อมูลและการสืบค้นข้อมูล

ค้นหางานวิจัยที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมลพิษทางอากาศและการเกิดโรคหลอดเลือดสมอง ที่ตีพิมพ์ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543 ถึง พ.ศ. 2563 หรือ ปี ค.ศ. 2000 ถึง ค.ศ. 2020 ใช้การสืบค้นออนไลน์ในฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศและต่างประเทศ กำหนดคำสำคัญที่ใช้ในการสืบค้นว่า มลพิษทางอากาศกับการเกิดโรคหลอดเลือดสมอง

3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยนี้แบ่งตามขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้ 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การคัดเลือกงานวิจัย ขั้นตอนที่ 2 การประเมินความถูกต้องและคุณภาพงานวิจัย และขั้นตอนที่ 3 การสกัดข้อมูลงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การคัดเลือกงานวิจัย

คัดเลือกเอกสารงานวิจัยที่ผ่านการสืบค้นจากแหล่งข้อมูลที่กำหนด โดยใช้เกณฑ์การคัดเลือกเข้าและเกณฑ์คัดเลือกรอก ดังนี้

3.1.1 เกณฑ์คัดเลือกเข้า

- เป็นงานวิจัยที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมลพิษทางอากาศและการเกิดโรคหลอดเลือดสมอง
- เป็นงานวิจัยที่ตีพิมพ์และสามารถค้นหาได้ในฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์
- เป็นงานวิจัยที่ตีพิมพ์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543 – 2563 หรือปี ค.ศ. 2000 – 2020
- เป็นงานวิจัยเชิงปริมาณ หรืองานวิจัยเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ
- เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเฉพาะงานวิจัยเชิงสำรวจที่มีการรายงานค่าสถิติเพียงพอจะนำไปใช้คำนวณขนาดอิทธิพล

3.1.2 เกณฑ์การคัดเลือกออก

- เป็นงานวิจัยที่มีเฉพาะบทคัดย่อ
- เป็นงานวิจัยที่ตีพิมพ์ก่อนปี พ.ศ. 2543 หรือปี ค.ศ. 2000 และตีพิมพ์หลังปี พ.ศ. 2563 หรือปี ค.ศ. 2020
- เป็นงานวิจัยที่มีลักษณะเป็นข่าว จดหมาย หรือโปสเตอร์
- เป็นงานวิจัยเชิงคุณภาพ

งานวิจัยที่ได้รับการคัดเลือกเข้าจะต้องเป็นงานวิจัยที่มีคุณสมบัติตามเกณฑ์การคัดเลือกเข้าทุกข้อและไม่มีคุณสมบัติตามเกณฑ์การคัดเลือกออก

3.2 การประเมินความถูกต้องและคุณภาพงานวิจัย

นำงานวิจัยที่ได้จากการสืบค้นและผ่านการพิจารณาคัดเลือกงานวิจัยตามเกณฑ์การคัดเลือกเข้ามาประเมินคุณภาพงานวิจัย ดำเนินการประเมินคุณภาพตามแบบฟอร์มการประเมินคุณภาพงานวิจัย โดยมีเกณฑ์ประเมิน ดังนี้

3.2.1 งานวิจัยผ่านเกณฑ์การประเมิน คือ งานวิจัยที่ตอบ “ใช่” ในทุกข้อการประเมิน

3.2.2 งานวิจัยที่ไม่ผ่านเกณฑ์การประเมิน คือ งานวิจัยที่ตอบ “ไม่ใช่” ในทุกข้อการประเมิน หรือตอบ “ไม่ใช่” เพียงข้อเดียว

3.3 การสกัดข้อมูลงานวิจัย

สร้างแบบฟอร์มการสกัดข้อมูลงานวิจัย เพื่อบันทึกลักษณะงานวิจัย รวมถึงรายละเอียดต่าง ๆ ที่จำเป็น เช่น ชื่อผู้วิจัย ชื่องานวิจัย ปีที่ตีพิมพ์ รูปแบบการวิจัย ขนาดตัวอย่าง ประชากรศึกษา วิธีการเลือกตัวอย่าง เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ เนื้อหาของการศึกษาว่าศึกษาปัจจัยด้านใด เป็นต้น

4. การทดสอบเครื่องมือ

นำแบบฟอร์มการคัดเลือกงานวิจัย แบบฟอร์มการประเมินคุณภาพงานวิจัย และแบบฟอร์มการสกัดข้อมูลงานวิจัยที่สร้างขึ้น เสนอผู้เชี่ยวชาญเพื่อพิจารณาความเหมาะสม และนำข้อเสนอแนะที่ได้มาปรับปรุงแก้ไขแบบฟอร์มให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

5. การวิเคราะห์ข้อมูล

สถิติที่ใช้ประเมินความแตกต่างของผลงานวิจัยที่นำเข้าสู่ศึกษา (Heterogeneity assessment) คือ ตัวสถิติ Cochran's Q test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หากผลวิจัยของแต่ละบทความแตกต่างกัน จะประมาณค่าอัตราส่วนออกสักรวมของการศึกษา โดยใช้ตัวแบบอิทธิพลสุ่ม (Random effect: RE model) แต่หากผลการวิจัยของแต่ละบทความไม่แตกต่างกัน จะประมาณค่าอัตราส่วนออกสักรวมของการศึกษาด้วยตัวแบบอิทธิพลตรึง (Fixed effect: FE model) และประเมินอคติจากการตีพิมพ์ (Publication bias) จากกราฟ Funnel เพื่อแสดงว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่รวบรวมได้ในการศึกษาครั้งนี้มีความเหมาะสม โดยวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Medcalc

ผลการดำเนินงานวิจัย

ในส่วนนี้จะแสดงผลการวิเคราะห์ห่อภิมานงานวิจัยเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสัมผัสมลพิษทางอากาศและโรคหลอดเลือดสมอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 1 รายละเอียดงานวิจัยที่ได้รับการคัดเลือกตามเกณฑ์การคัดเลือกของการวิเคราะห์ห่อภิณ

งานวิจัย	ผู้แต่งคนแรก	ชื่อเรื่อง	ประเภทงานวิจัย	ปีที่พิมพ์	สถานที่ศึกษา	ระยะเวลา
1	Andersen et al. (2010)	Association Between Short-Term Exposure to Ultrafine Particles and Hospital Admission for Stroke in Copenhagen, Denmark	Time-Stratified Case-Crossover Study	2010	ประเทศ เดนมาร์ก	2003 - 2006
2	Mc Clure et al. (2017)	Fine Particulate Matter (PM _{2.5}) and the Risk of Stroke in the REGARDS Cohort	Prospective Cohort Study	2017	ประเทศ สหรัฐอเมริกา	2003 - 2011
3	Qiu et al. (2017)	Fine Particulate Matter Exposure and Incidence of Stroke: a Cohort Study in Hong Kong	Cohort Study	2017	ประเทศจีน	2010
4	Guan et al. (2018)	Differential Susceptibility in Ambient Particle- Related Risk of First- Ever Stroke: Findings From a National Case-	Case-Crossover Study	2018	ประเทศจีน	2013 - 2015
5	Zhao et al. (2020)	Short-Term Exposure to Ambient fine Particulate Matter and Out-of- Hospital Cardiac Arrest: A Nationwide Case-Crossover Study in Japan	Case-Crossover Study	2020	ประเทศญี่ปุ่น	2014 - 2015

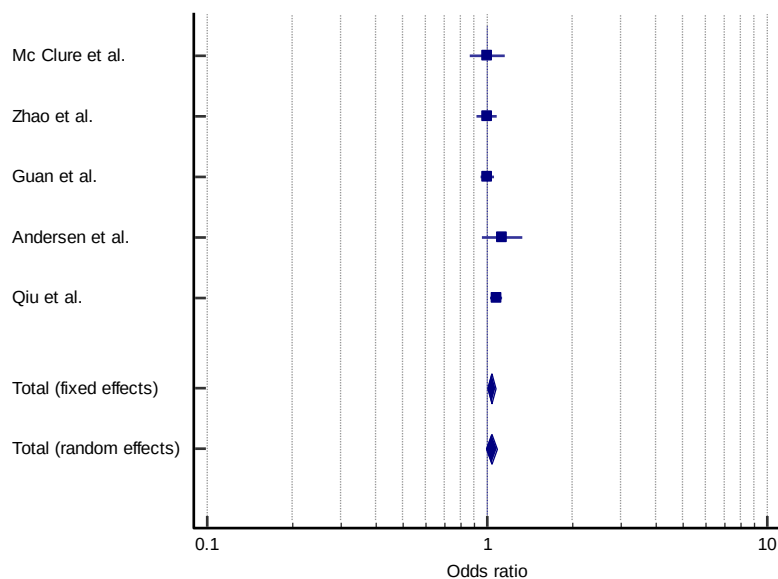
ตารางที่ 2 จำนวนผู้สัมผัสมลพิษ และอุบัติการณ์การเกิดโรคหลอดเลือดสมอง

งานวิจัย	จำนวนผู้สัมผัสมลพิษ		จำนวนผู้ไม่สัมผัสมลพิษ		Weight (%)	
	ไม่เกิดโรค	เกิดโรค	ไม่เกิดโรค	เกิดโรค	Fixed	Random
Mc Clure et al. (2017)	13,910	343	16,329	403	4.94	7.82
Zhao et al. (2020)	229,233	7,380	20,139	650	15.80	19.77
Guan et al. (2018)	56,202	1,356	1,235,808	29,832	34.57	31.75
Andersen et al. (2010)	624	5,784	208	1,701	3.81	6.20
Qiu et al. (2017)	27,155	3,464	27,559	3,269	40.88	34.46

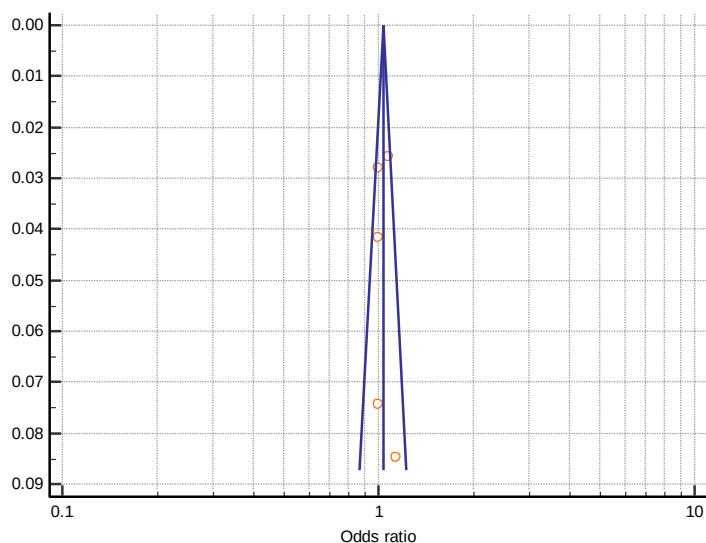
ตารางที่ 3 ค่าขนาดอิทธิพลจากค่าอัตราส่วนออกซ์ของความสัมพันธ์ระหว่างการสัมผัสมลพิษทางอากาศและโรคหลอดเลือดสมองของแต่ละงานวิจัย และค่าประมาณผลรวมของการวิจัยของงานวิจัยที่ศึกษาทั้งหมด

งานวิจัย	จำนวนอุบัติการณ์	ค่าอัตราส่วนออกซ์	(95% CI)	I ² (%)	P-value
Mc Clure et al. (2017)	343	0.999	(0.864, 1.156)	32.27%	0.2063
Zhao et al. (2020)	7,380	0.997	(0.919, 1.082)		
Guan et al. (2018)	1,356	0.999	(0.946, 1.056)		
Andersen et al. (2010)	5,784	1.133	(0.960, 1.338)		
Qiu et al. (2017)	3,464	1.075	(1.022, 1.131)		
Total (Fixed Effects)	18,327	1.034	(1.001, 1.068)		
Total (Random Effects)	18,327	1.033	(0.989, 1.078)		

จากการวิเคราะห์ห่อหุ้มพบว่า ค่าอัตราส่วนออกซ์รวมของการศึกษาที่ได้จากอิทธิพลตรึง (Fixed effects: FE) มีค่าเท่ากับ 1.034 และอิทธิพลสุ่ม (Random effects: RE) มีค่าเท่ากับ 1.033 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากค่า Variance between studies ภายใต้ RE model มีค่าเท่ากับ 0.0038 ซึ่งมีค่าน้อยมาก สรุปได้ว่าข้อมูลมีความถูกต้องในการเป็นตัวแทนของประชากร สำหรับผลลัพธ์การประเมินความแตกต่างของผลงานวิจัยที่นำเข้าสู่ศึกษาด้วยตัวสถิติ Cochran's Q ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าค่าสถิติ Q เท่ากับ 5.9061 (ค่า p-value = 0.2063) และค่า I² เท่ากับ 32.27% จึงสรุปได้ว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างงานวิจัยที่นำมาวิเคราะห์ห่อหุ้ม จึงทำการประมาณค่าอัตราส่วนออกซ์รวมของการศึกษาด้วยตัวแบบอิทธิพลตรึงและประเมินอคติจากการตีพิมพ์โดยสร้างกราฟ Funnel เพื่อแสดงว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่รวบรวมได้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีความเหมาะสมและไม่มียอคติจากการตีพิมพ์



รูปที่ 1 กราฟ Forest แสดงค่าอัตราส่วน Odds ของความสัมพันธ์ระหว่างการสัมผัสมลพิษทางอากาศและโรคหลอดเลือดสมองของแต่ละงานวิจัย และค่าอัตราส่วน Odds รวมของการศึกษาของงานวิจัยที่ศึกษาทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1.034



รูปที่ 2 กราฟ Funnel แสดงการตรวจสอบอคติจากการตีพิมพ์

จากการคำนวณหาอัตราส่วน Odds รวมของการศึกษาโดยนำอัตราส่วน Odds (OR) ของแต่ละการศึกษามาพลอตบนกราฟ Forest ดังรูปที่ 1 และใช้สัญลักษณ์รูปข้าวหลามตัดแทนค่าอัตราส่วน Odds รวมของการศึกษา จากรูปพบว่า เส้นเชื่อมข้าวหลามตัดไม่มีส่วนใดส่วนหนึ่งตัดเส้นแสดง $OR = 1$ และเส้นเชื่อมข้าวหลามตัดเอียงไปทางขวาของเส้นของการไม่เกิดอิทธิพล (Line of no effect) กล่าวคือค่า $OR > 1$ และพบว่าค่าอัตราส่วน Odds รวมของการศึกษาเท่ากับ 1.034 ค่าความเชื่อมั่น 95% ของค่าอัตราส่วน Odds รวมของการศึกษาอยู่ระหว่าง 1.001 ถึง 1.068 และมีค่าสถิติทดสอบ $Z = 2.048$ ($p\text{-value} = 0.041$) จึงสรุปได้ว่า ผู้ที่สัมผัสมลพิษทางอากาศมีโอกาสในการเกิดโรคหลอดเลือดในสมองมากกว่าคนที่ไม่ได้สัมผัสมลพิษทางอากาศเท่ากับ 1.034 เท่า

การตรวจสอบอคติจากการตีพิมพ์ (Publication bias) จะพิจารณาจากรูปที่ 2 กราฟ Funnel พบว่ามีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมสมมาตร จึงสรุปผลได้ว่าไม่มีอคติจากการตีพิมพ์ และเมื่อพิจารณาค่าสถิติทดสอบของ Egger เท่ากับ 0.01840 ($p\text{-value} = 0.9912$) และ ค่าสถิติทดสอบของ Begg มีค่า Kendall's Tau เท่ากับ 0.2000 ($p\text{-value} = 0.6242$) พบว่า ค่า $p\text{-value}$ ของทั้ง 2 การทดสอบที่ได้มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าไม่มีอคติจากการตีพิมพ์

สรุปผลงานวิจัย

การวิเคราะห์ห่อถักงานสำหรับวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์องค์ความรู้ที่เกิดจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมลพิษทางอากาศและการเกิดโรคหลอดเลือดสมอง โดยใช้หลักการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบและสังเคราะห์งานวิจัยด้วยวิธีการวิเคราะห์ห่อถักงาน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมลพิษทางอากาศและการเกิดโรคหลอดเลือดสมอง ผลการวิจัยพบว่า ค่าอัตราส่วนออดส์รวมของการศึกษาของความสัมพันธ์ระหว่างการสัมผัสมลพิษทางอากาศและโรคหลอดเลือดสมอง เท่ากับ 1.034 ค่าความเชื่อมั่น 95% ของค่าอัตราส่วนออดส์รวมของการศึกษาอยู่ระหว่าง 1.001 ถึง 1.068 แสดงว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดโรคหลอดเลือดสมองกับการสัมผัสมลพิษทางอากาศ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนโครงการทุนวิจัยทั่วไป จากคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สัญญาทุนเลขที่ 642078 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- Andersen, Z. J., Tom, S. O., Klaus, K. A., Steffen, L., Matthais, K., & Ole, R. N. (2010). Association Between Short-Term Exposure to Ultrafine Particles and Hospital Admissions for Stroke in Copenhagen, Denmark. *European Heart Journal*, 31(16), 2034–2040.
- Cohen, J. (1992). Statistical Power Analysis. *Current Directions in Psychological Science*, 3(1), 98-101.
- Feigin, V. L., Gregory A. R., Mohsen, N., Priya, P., Rita K., & Sumeet, C. (2016). Global Burden of Stroke and Risk Factors in 188 Countries, During 1990–2013: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *The Lancet Neurology*, 15(9), 913–924.
- Fisher, J. A., Puett, R. C., Laden, F., Wellenius, G. A., Sapkota, A., Liao, D., Yanosky, J. D., Pokras, O. C., He, X., & Hart, J. E. (2019). Case-crossover Analysis of Short-Term Particulate Matter Exposures and Stroke in the Health Professionals Follow-up Study. *Environment International*, 124, 153–160.
- Glass, G. V. (1976). Primary secondary and meta-analysis of research. *Educational Researcher*, 5(10), 3-8.
- Guan, T., Xue, T., Liu, Y., Zheng Y., Fan, S., He, K., & Zhang, Q. (2018). Differential Susceptibility in Ambient Particle-Related Risk of First-Ever Stroke: Findings From a National Case-Crossover Study. *American Journal of Epidemiology*, 187(5), 1001-1009.
- Huang, K., Liang, F., Yang, X., Liu, F., Li, J., Xiao, Q., Chen J., Liu, X., Cao, J., Shen, C., Yu, L., Lu, F., Wu, X., Zhao, L., Wu, X., Li, Y., Hu, D., Huang, J., Liu, Y., Lu, X., & Gu, D. (2019). Long Term Exposure to Ambient Fine Particulate Matter and Incidence of Stroke: Prospective Cohort Study from the China-PAR Project. *BMJ Clinical Research*, 367. <https://doi.org/10.1136/bmj.16720>.

- Lee, M., Koutrakis, P., Coull, B., Kloog, I. & Schwartz J. (2016). Acute Effect of Fine Particulate Matter on Mortality in Three Southeastern States from 2007-2011. *Journal of Exposure Science Environment Epidemiology*, 26(2), 173–179.
- Li, Y., Tang, Y., Fan, Z., Zhou, H., & Yang, Z. (2017). Assessment and Comparison of Three Different Air Quality Indices in China. *Environmental Engineering Research*, 23(1), 21-27.
- Liang, Z., Xu, C., Fan, Y., Liang Z. Q., Kan, H. D., Chen, R. J., Yao, C. Y., Liu, X. L., Lang, H. B., Lei, J., Zhao, Y. S., Li, Y. F., Ling, A., & Cai, T. J. (2020). Association Between Air Pollution and Menstrual Disorder Outpatient Visits: A Time-series Analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110283>
- McClure, L. A., Loop, M. S., Crosson, W., Kleindorfer, D., Kissela, B., & Al-Hamdan, M. (2017). Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) and the Risk of Stroke in the REGARDS Cohort. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 26(8), 1739-1744.
- Qiu, H., Sun, S., Tsang, H., Wong C. M., Lee, R. S., Schooling, C. M., & Tian, L. (2017). Fine Particulate Matter Exposure and Incidence of Stroke: A Cohort Study in Hong Kong. *Neurology*, 88(18), 1709-1717.
- Rodopoulou, S., Samoli, E., Chalbot, M. G., & Kavouras, R. G. (2015). Air Pollution and Cardiovascular and Respiratory Emergency Visits in Central Arkansas: A Time-series Analysis. *The Science of the Total Environment*, 536, 872–879.
- Sun, S., Stewart, J.D., Eliot, M. N., Yanosky, J. D., Liao D., Tinker, L. F., Eaton, C. B., Whitsel, E. A., & Wellenius, G. A. (2019). Short-term exposure to air pollution and incidence of stroke in the Women's Health Initiative. *Environment International*, 132,1-7.
- Wellenius, G. A., Burger, M. R., Coull, B. A., Schwartz, J., Suh, H. H., Koutrakis, P., Schlaug, G., Gold D. R., & Mittleman, M. A. (2012). Ambient Air Pollution and the Risk of Acute Ischemic Stroke. *Archives Internal Medicine*, 172(3), 229-234.
- World Health Organization. (n.d.). *9 Out of 10 People Worldwide Breathe Polluted Air, But More Countries Are Taking Action*. <https://www.who.int/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-morecountries-are-taking-action>
- Zhao, B., Johson, F. H., Salimi, F., Kurabayashi, M., & Negishi, K. (2020). Short-term Exposure to Ambient Fine Particulate Matter and Out-of-Hospital Cardiac Arrest: A Nationwide Case-Crossover Study in Japan. *The Lancet Planetary Health*, 4(1), e15-e23.
- Siriraj Stroke Center. (n.d.). Current situation of cerebrovascular disease. https://www.si.mahidol.ac.th/sidoctor/sirirajonline2021/Article_files/1256_1.pdf (in thai)

Research Article

การลดไอออนที่รบกวนในน้ำยาชุบสำหรับกระบวนการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า

Reduction of Interference Ions in Spent Plating Solution for the Chromium Electroplating Process

ชนากานต์ แสงสุ้ม² รังสิมา หญิตสอน³ และชัชลิษา บุญพะเนียด^{1*}

Chanakarn Sangsum² Rungsima Yeetsorn³ and Chatchalida Boonpanaid^{1*}

¹ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800 ประเทศไทย

² ภาควิชาเคมีและศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ถนนพระราม 6 ราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400 ประเทศไทย

³ สาขาวิศวกรรมวัสดุและการผลิต บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตรนานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800 ประเทศไทย

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

² Department of Chemistry and Center of Excellence for Innovation in Chemistry, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand

³ Material and Production Engineering, The Sirindhorn International Thai-German Graduate School of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok 10800, Thailand

*E-mail: chatchalida.b@sci.kmutnb.ac.th

Received: 24/10/2021; Revised: 06/12/2022; Accepted: 08/12/2022

บทคัดย่อ

กระบวนการชุบเคลือบโครเมียมด้วยไฟฟ้าแบบฮาร์ดโครมมักจะเกิดปัญหาเหล็ก (III) ไอออนและโครเมียม (III) ไอออนปนเปื้อน สารละลายสำหรับชุบกําหนดให้มีไอออนที่รบกวนรวมกันไม่เกิน 15 กรัมต่อลิตร งานวิจัยนี้ได้จำลองกระบวนการชุบเคลือบให้มีสภาวะใกล้เคียงกับสภาวะประกอบการ ศึกษาปริมาณไอออนของเหล็กที่หลุดออกกับปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในสารละลายหลังกระบวนการชุบเคลือบ ในการทดลองใช้ขั้วแอโนดเป็นแท่งโลหะตะกั่วผสมดีบุก ขั้วแคโทดเป็นวัสดุชุบเหล็กอ่อนขนาด 1 ตารางนิ้ว ค่ากระแส 3.0 แอมแปร์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ได้รับความหนาของผิวชุบ 10 ± 3 ไมโครเมตร จากการติดตามกระบวนการชุบเคลือบตั้งแต่ 1 - 20 ครั้ง พบว่าปริมาณเหล็กไอออนและตะกอนมีปริมาณเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับจำนวนครั้งของการชุบเคลือบที่เพิ่มขึ้น การแก้ไขเบื้องต้นได้ทำการแยกชุดสารละลายในขั้นตอนการทำความสะอาดผิววัสดุกับขั้นตอนการชุบเคลือบ ส่วนการลดปริมาณโครเมียม (III) ไอออนทำโดยใช้สารละลายเปอร์ซัลเฟตไอออนร่วมกับการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อออกซิไดซ์โครเมียม (III) ไอออน การเปลี่ยนของโครเมียม (III) ไอออนเป็นไดโครเมตจากสีเขียวเป็นสีส้ม และเปอร์ซัลเฟตที่เหลืออยู่จะสลายตัวเป็นไฮโดรเจนซัลเฟต ซึ่งไม่รบกวนกระบวนการชุบเพราะในน้ำยาชุบมีไฮโดรเจนซัลเฟตอยู่แล้ว

คำสำคัญ: ชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า, ฮาร์ดโครม, เหล็ก(III) ไอออน

Abstract

Hard chrome electroplating processes usually have problem caused by iron(III) ions and chromium(III) ion contamination. The plating solution is required to contain no more than 15 g/L of interfering ions. The electroplating process with conditions as the industrial establishments were studied in this research. The topics investigated are iron ion leaching rate and sludge occurring in solution. The anode was an alloy of Sn and Pb and the cathode was a 1 inch² mild steel specimen with applied current of 3.0 A at 50 °C for thickness of 10±3 µm. After monitoring electroplating process 1-20 times, it was found that the amount of iron ion contents and sludge increasing correlated with the number of electroplating times. Primary troubleshooting was the separation of plating bath for the surface cleaning process from the electroplating process. In addition, the reduction of chromium(III) ion contamination was accomplished through the oxidation of chromium(III) ion to dichromate ion by adding the excess of persulphate ion along with applying heat. Chromium (III) ions converted to dichromate were obviously noticeable with the change of green to orange color. The remaining persulphate ion after the oxidation was eventually transformed to hydrogen sulphate ion, and would not interfere the system because it was the ion already constituted in the plating solution.

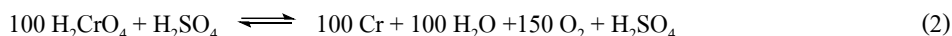
Keywords: chromium electroplating, hard chrome plating, iron(III) ion

บทนำ

การชุบเคลือบโครเมียมด้วยไฟฟ้า (chromium electroplating) เป็นวิธีการหนึ่งที่มีความนิยมในกระบวนการชุบระดับอุตสาหกรรม สำหรับการเพิ่มอายุการใช้งานของอุปกรณ์เครื่องจักร และช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ทนความร้อนได้ดี ค่าความแข็งสูงขึ้น ด้านทานการสึกกร่อนได้ดี ด้านทานการกัดกร่อนจากสารเคมีได้ดี และมีสัมประสิทธิ์การเสียดทานต่ำ เทคนิคการชุบเคลือบโครเมียมนี้สามารถทำได้กับวัสดุเกือบทุกชนิด วัสดุที่นิยมนำมาชุบเคลือบส่วนมากจะเป็นเหล็กกล้า [1] ตัวอย่างเช่น แม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะ แม่พิมพ์ปั๊มชิ้นส่วนเครื่องมือ อุปกรณ์ในเครื่องจักร และลูกกลิ้งในอุตสาหกรรมเหล็กแผ่น เป็นต้น

หลักการของกระบวนการการชุบเคลือบโครเมียมด้วยเทคนิคทางไฟฟ้า นั้น การเคลือบจะเกิดขึ้นที่แคโทดของเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยมีการให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่เซลล์ไฟฟ้า โครเมียม(VI)ไอออน (Cr^{6+}) ในสารละลายที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ (จากส่วนผสมของกรดโครมิก (chromic acid, H_2CrO_4) และกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid, H_2SO_4) โดยที่กรดซัลฟิวริกจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา) จะถูกรีดิวซ์ เป็นโลหะโครเมียม (Cr^0) ที่แคโทด โดยขั้วแอโนดมักใช้เป็นวัสดุเฉื่อย [2] ทำหน้าที่ในการนำไฟฟ้าและทำให้ไฟฟ้าครบวงจร ดังสมการที่ 1 และ 2 [3; 4] ประสิทธิภาพการชุบเคลือบหาได้จากอัตราส่วนของน้ำหนักของโลหะที่เกาะกับน้ำหนักที่ควรจะได้ เมื่อผ่านประจุทั้งหมดเข้าไป และเพื่อความสม่ำเสมอในความหนาที่ชุบได้จำเป็นต้องพิจารณารูปร่าง ขนาดพื้นที่ผิวของวัสดุที่นำมาชุบเคลือบ ขนาดของบ่อชุบและระยะห่างของขั้วไฟฟ้าทั้งสอง





การชุบโครเมียมมีหลายวิธีโดยจะขึ้นกับวัตถุประสงค์ในการนำชิ้นงานนั้นไปใช้งาน สำหรับงานวิจัยนี้สนใจการชุบโครเมียมแบบฮาร์ดโครม (hard chromium deposition) ซึ่งมีลักษณะการชุบเคลือบที่หนามากกว่า 0.8 ไมโครเมตร และไม่มี การชุบรองพื้นด้วยทองแดงหรือนิกเกิลเหมือนกับการชุบแบบ Bright Chromium ที่เป็นการชุบเพื่อให้เกิดความเงา [1] ขั้นตอนของการชุบเคลือบแบบฮาร์ดโครมจะใช้เวลาชุบที่อุณหภูมิสูง 10 – 80 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร ใช้ตะกั่วผสมดีบุกเป็นแอโนด (+) ส่วนวัสดุชุบเป็นแคโทด (-) ก่อนเริ่มการชุบมีการกลับขั้วเพื่อทำความสะอาด หรือเป็นการกัดผิวชิ้นงานทำให้โครเมียมไอออนมีการยึดเกาะกับผิวของวัสดุได้ดีและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในกรณีที่ชิ้นงานเป็นเหล็กแบบต่างๆ ต้องใช้ เวลาการกลับขั้วที่แตกต่างกันและขึ้นกับความหนาของผิวการชุบที่ต้องการ [5]

เทคนิคการชุบเคลือบที่มีการดำเนินงานภายในระบบอุตสาหกรรมจะมีการใช้บ่อชุบขนาดใหญ่ที่บรรจุสารเคมีความเข้มข้นสูงในปริมาณมาก และเมื่อกระบวนการชุบเคลือบดำเนินไประยะหนึ่ง พบว่ามีเหล็ก (III) ไอออนหลุดออกมาจากวัสดุที่นำมาชุบ มีโครเมียม (III) ไอออนเกิดเพิ่มขึ้นตลอดจนไอออนของโลหะที่ทำหน้าที่ช่วยนำไฟฟ้าถูกกัดกร่อน เกิดปนเปื้อนในสารละลายแล้วรบกวนกระบวนการชุบเคลือบ ได้มีการกำหนดปริมาณมาตรฐานปริมาณการปนเปื้อนของเหล็ก (III) ไอออน และโครเมียม (III) ไอออนในสารละลายรวมกันไม่เกิน 15 กรัมต่อลิตร การปนเปื้อนของไอออนดังกล่าวส่งผลให้ประสิทธิภาพ กระแสลดลง และประสิทธิภาพผิวเคลือบลดลง โดยหากมีการชุบเคลือบชิ้นงานที่ความหนาจะเกิดรูพรุน (pin hole) หรือเกิด dent บนผิวของชิ้นงาน ดังนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพของผิวเคลือบได้ตรงตามมาตรฐานที่กำหนดจะต้องเปลี่ยนสารละลาย ที่ใช้ในการชุบ ส่งผลให้เกิดต้นทุนเพิ่มจากการเตรียมสารละลายใหม่ จำเป็นต้องมีการจัดพื้นที่สำหรับจัดเก็บน้ำทิ้งที่เกิดขึ้นใน กระบวนการและมีค่าใช้จ่ายสูง ตลอดจนการส่งไปบำบัดหรือกำจัด เนื่องจากสารละลายมีความเป็นกรดสูงและความเข้มข้นของ โลหะสูงมากด้วย

งานวิจัยที่ผ่านมาเคยมีการเสนอวิธีแก้ไขปัญหการปนเปื้อนของไอออนในน้ำยาชุบเคลือบมีหลากหลายวิธี เช่น การ แยกด้วยไฟฟ้า (electrolytic separation) [6; 7; 8; 9; 10; 11] การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (electrocoagulation) [12] การสกัด (extraction) [13] และการดูดซับ (adsorption) [14; 15; 16; 17] รวมทั้งวิธีการเปลี่ยนโครเมียม (III) ไอออนให้เป็นโครเมียม (VI) ไอออนสำหรับลดการรบกวนที่เกิดจากโครเมียม (III) ไอออน [18; 19; 20] โดยเทคนิคการแยกด้วยไฟฟ้าเป็นเทคนิคที่ถูก นำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นเทคนิคที่สามารถแยกไอออนที่ปนเปื้อนในน้ำยาชุบเคลือบได้หลายชนิดในเวลาเดียวกัน และมีประสิทธิภาพสูง การแยกไอออนด้วยเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน ตัวอย่างเช่น Nafion 117 membrane, ceramic membrane เป็นต้น แต่ขนาดบ่อชุบเคลือบในอุตสาหกรรมนั้นมีขนาดใหญ่มาก การใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนในการช่วย แก้ปัญหาไอออนปนเปื้อนในน้ำยาชุบในบ่อจึงมีราคาสูงส่งผลให้ผู้ประกอบการต้องรับภาระต้นทุนที่สูงขึ้นมาก

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาวิธีการลดการปนเปื้อนของเหล็ก (III) ไอออนและโครเมียม (III) ไอออนในน้ำยาชุบเคลือบของกระบวนการชุบเคลือบโครเมียมด้วยไฟฟ้าแบบฮาร์ดโครม เริ่มจากศึกษาการแยกขั้นตอนในกระบวนการชุบเคลือบ ระหว่างการทำความสะอาดผิวหน้าวัสดุกับการชุบเคลือบสำหรับลดปริมาณเหล็ก (III) ไอออน ส่วนการลดปริมาณโครเมียม (III) ไอออน ได้ศึกษาการใช้เปอร์ซัลเฟตไอออนเพื่อออกซิไดซ์โครเมียม (III) ไอออนเป็นโครเมียม (VI) ไอออน การศึกษานี้ ต้องการแก้ปัญหาเบื้องต้นของโรงงานชุบ หาวีลดการปนเปื้อนของเหล็กไอออนและโครเมียม (III) ไอออน ซึ่งมีผลต่อ ประสิทธิภาพการชุบ รวมทั้งช่วยยืดอายุการใช้งานของน้ำยาชุบเคลือบ เพื่อลดการเกิดน้ำทิ้งที่มีความเป็นกรดและมีความเข้มข้น ของโครเมียมสูงมาก ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า (DC Power supply รุ่น GPR-3510HD ประเทศมาเลเซีย เครื่องให้ความร้อน (Hot plate รุ่น C-MAG SH7) ประเทศเยอรมนี แท่งโลหะตะกั่วผสมดีบุก (95:5) เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.50 มิลลิเมตร จากบริษัท สยามฮาร์ดโครม จำกัด และแผ่นเหล็กตัวอย่างขนาดพื้นที่ผิวขรุขระ 1.0 ตารางนิ้ว

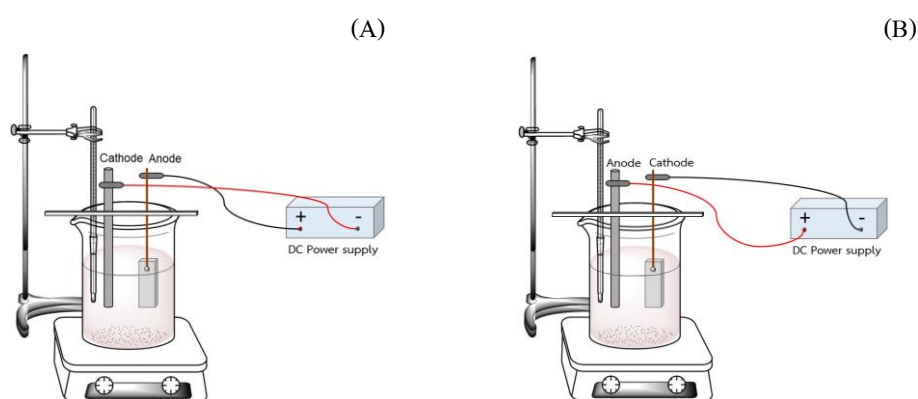
ตัวอย่างสารละลายน้ำยาชุบเคลือบโครเมียมด้วยไฟฟ้าได้รับจากบริษัท สยามฮาร์ดโครม จำกัด (จังหวัดสมุทรสาคร, ประเทศไทย) ความเข้มข้นเฉลี่ยของกรดโครมิก กรดซัลฟูริก โครเมียม (III) ไอออน และเหล็ก (III) ไอออน เท่ากับ 279.73, 2.40, 1.60, และ 8.90 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และ Hebat Chrom CHC-10 (ทางการค้า) เข้มข้น 24.78 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีเตรียมผิวชิ้นงาน

ขัดพื้นผิววัสดุชุบจำลองขนาด กว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร หนา 0.2 เซนติเมตร ด้วยเครื่องขัดแบบจานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 และ 220 ให้ทั่วพื้นที่ที่จะทำการชุบ (ให้แท่งวัสดุจุ่มในน้ำยาชุบเพียง 2.5 เซนติเมตร เพื่อให้ได้พื้นที่ 1 ตารางนิ้ว) นำไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3.0% (w/v) เป็นเวลา 1 นาที สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5.0% (v/v) เป็นเวลา 1 นาทีตามลำดับ [21] จากนั้นนำไปติดตั้งกระบวนการชุบเคลือบดังรูปที่ 1A ควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าด้วยเครื่อง DC Power supply ซึ่งในขั้นแรกเป็นการทำความสะอาดพื้นผิววัสดุในอ่างชุบอีกครั้ง จึงต้องสลับวงจรเพื่อกลับขั้ว ให้แท่งโลหะตะกั่วผสมดีบุกเป็นขั้วแคโทด (-) และวัสดุที่ต้องการชุบเป็นขั้วแอโนด (+) ให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงเริ่มกระบวนการชุบในบ่อชุบเดิม

วิธีการทดลองชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า

หลังจากทำความสะอาดผิวหน้าวัสดุชุบแล้วทำการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าในบ่อชุบเดิม สลับวงจรโดยให้แท่งโลหะตะกั่วผสมดีบุกเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด (+) และวัสดุชุบเป็นขั้วแคโทด (-) ควบคุมสภาวะเช่นเดียวกันกับการเตรียมผิวชิ้นงาน และกำหนดเวลาในการชุบโครเมียมเป็นเวลา 15 นาที ซึ่งเป็นสภาวะเหมือนกับสภาวะของการชุบในโรงอุตสาหกรรม ดังรูปที่ 1B



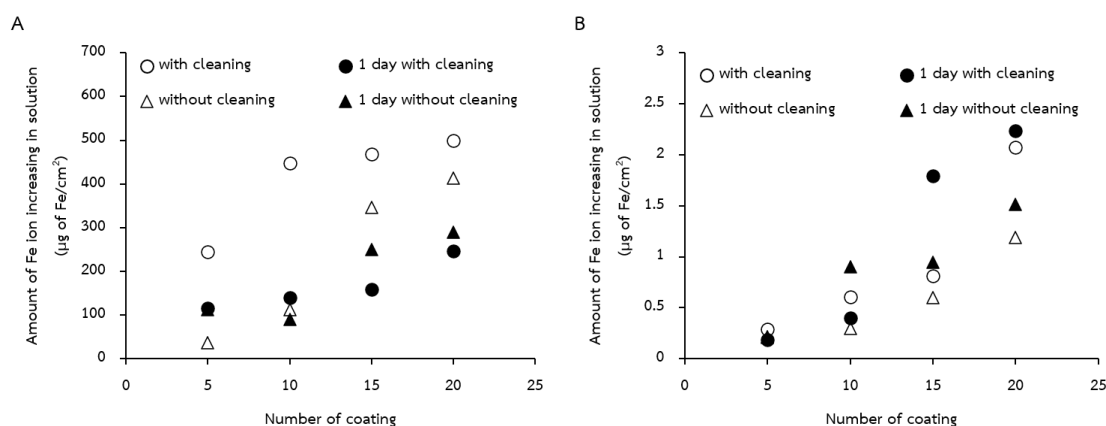
รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์จำลองกระบวนการชุบเคลือบโครเมียมด้วยไฟฟ้าแบบฮาร์ดโครม (A) ขั้นตอนการทำความสะอาด (B) ขั้นตอนการชุบเคลือบ

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้จำลองกระบวนการชุบเคลือบโครเมียมด้วยไฟฟ้าแบบฮาร์ดโครมของโรงงาน ซึ่งเป็นบ่อกลมในแนวดิ่ง เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.40 เมตรและลึก 5.0 เมตร กำหนดสภาวะที่ใช้ในการทดลองให้เหมือนกับสภาวะจริงที่ใช้ในโรงงาน โดย น้ำยาชุบเคลือบที่ใช้ได้รับจากโรงงานประกอบด้วยกรดโครมิก กรดซัลฟุริกเข้มข้น 2.40 กรัมต่อลิตร และเติมสารอื่นๆ ที่ช่วยเพิ่มคุณภาพการชุบที่ใช้ในอุตสาหกรรมทางการค้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 – 30 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร ที่อุณหภูมิ 50 ± 3 องศาเซลเซียส เวลาในการกลับขั้วเพื่อทำความสะอาด 5 นาที ต่อด้วยการชุบ 15 นาที และจะได้ความหนาของผิวชุบ 10 ± 3 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นความหนาของผิวชุบการชุบเคลือบมีความหนาตามที่กำหนดที่โรงงานต้องการและยอมรับได้

ศึกษาการเพิ่มขึ้นของปริมาณเหล็กไอออนในสารละลาย

เก็บสารละลายในอ่างชุบจำลองเพื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กไอออนที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการชุบเคลือบเสร็จสิ้น ทุกๆ 5 ครั้ง เมื่อทำการเก็บสารละลายแล้วจะนำสารละลายไปวิเคราะห์ปริมาณเหล็กไอออนทันทีโดยเปรียบเทียบกับสารละลายที่พักหลังกระบวนการชุบเคลือบแล้ว 1 วัน มีการติดตามกระบวนการชุบเคลือบทั้งหมด 20 ครั้ง วิเคราะห์ปริมาณเหล็กไอออนด้วยเทคนิค Flame Atomic Absorption Spectroscopy (FAAS) เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของการเพิ่มจำนวนครั้งในการชุบเคลือบกับปริมาณเหล็กที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2 ขั้นตอนการทำความสะอาดพื้นผิววัสดุ (Cleaning) ที่นำมาชุบด้วยการกลับขั้วไฟฟ้าจะทำให้มีไอออนของเหล็กหลุดออกจากวัสดุมากกว่าขั้นตอนการชุบเคลือบ (Coating) ร้อยละ 10.87 และปริมาณไอออนของเหล็กที่อยู่ในสารละลายที่ถูกเก็บไว้ 1 วันหลังเสร็จสิ้นกระบวนการแล้วมีปริมาณเหล็กในสารละลายน้อยกว่า สารละลายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการทันทีอาจเป็นเพราะมีการเกิดตะกอนของไอออนต่างๆ ในสารละลายจึงทำให้ปริมาณไอออนของเหล็กในสารละลายลดลง และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณของเหล็กไอออนที่เกิดขึ้นในสารละลายแบบมีฟลูออไรด์ (รูป 2A) กับสารละลายแบบไม่มีฟลูออไรด์ (รูป 2B) พบว่าปริมาณเหล็กไอออนในสารละลายแบบมีฟลูออไรด์เกิดขึ้นมากกว่า สารละลายแบบไม่มีฟลูออไรด์เกือบ 200 เท่า เนื่องจากฟลูออไรด์มีคุณสมบัติของการกัดกร่อนได้ดี จึงทำให้ฟลูออไรด์ที่เป็นส่วนประกอบในสารละลายกัดกร่อนพื้นผิวของเหล็กที่นำมาชุบเคลือบส่งผลให้มีไอออนของเหล็กหลุดออกมาปนเปื้อนในน้ำยาชุบเคลือบปริมาณมากขึ้น และสามารถดักตะกอนได้ดีมากกว่าการละลายกลับไปในสารละลายด้วย



รูปที่ 2. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเหล็กไอออนหลังการชุบเคลือบ (A) น้ำยาชุบเคลือบแบบมีฟลูออไรด์ และ (B) น้ำยาชุบเคลือบแบบไม่มีฟลูออไรด์ (ปริมาณเหล็กคิดเป็นของน้ำหนักเหล็กต่อพื้นที่วัสดุที่นำมาชุบ)

การแก้ไขปัญหาของกระบวนการชุบเคลือบ

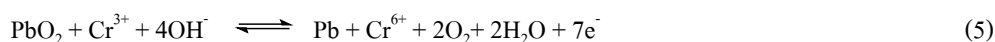
ปัญหาของกระบวนการชุบเคลือบแบบฮาร์ดโครมกับอุปกรณ์ชิ้นส่วนเครื่องขนาดใหญ่นี้จะเกิดการละลายของเหล็ก ตะกั่ว ดีบุก และโครเมียม ได้ จากสมการที่ 3 ถึง สมการที่ 9 และผลการวิเคราะห์โลหะไอออนในตะกอนด้วยเทคนิค FAAS พบว่า ในน้ำหนักตะกอน 1.000 กรัม มี ตะกั่ว มากที่สุดคือ 6.53 มิลลิกรัม โครเมียม 5.66 มิลลิกรัม เหล็ก 0.76 มิลลิกรัม ดีบุก 0.11 มิลลิกรัม และทองแดง 0.02 มิลลิกรัม ซึ่งตะกอนของทองแดงจะเกิดจากโลหะทองแดงที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าในบ่อชุบถูกกัดกร่อนด้วยไฮดรอกไซด์เข้มข้นเป็นเวลานาน

ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน)

- 1) เกิดออกซิเจน



- 2) ผิวขั้วไฟฟ้าเกิดเป็นตะกั่วออกไซด์



ตะกั่วออกไซด์เกิดปฏิกิริยารีดักชันทำให้ Cr^{3+} เปลี่ยนเป็น Cr^{6+} ซึ่ง ปฏิกิริยานี้เกิดได้ไม่ด้นักเนื่องจากน้ำยาสำหรับชุบมีสถานะเป็นกรด

ขั้วลบ(Cathode) เกิดปฏิกิริยา Reduction

- 1) การแตกตัวของกรดโครมิก



- 2) Cr^{3+} เกิดปฏิกิริยารีดักชันทำให้เกิดผิวเคลือบโครเมียม



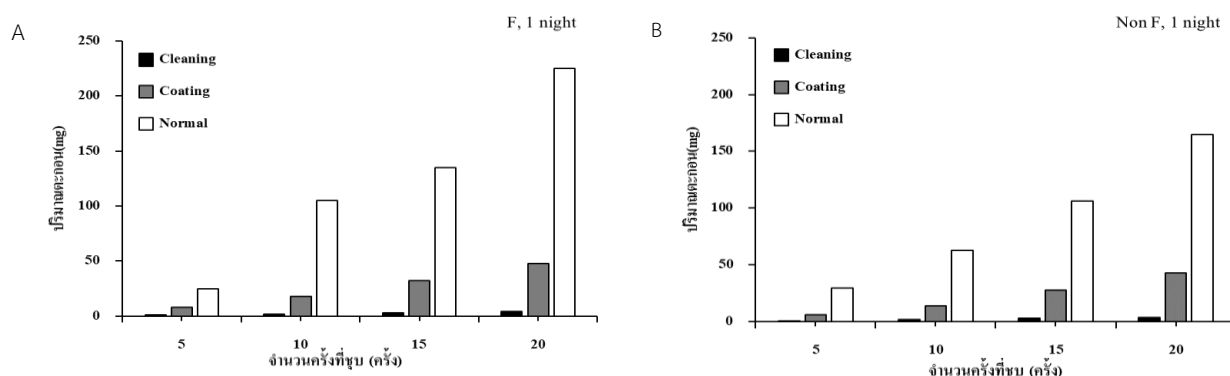
จากสมการข้างต้นจะพบว่าในน้ำยาชุบจำเป็นต้องมีทั้ง Cr^{6+} และ Cr^{3+} ไอออน อยู่ในสภาวะกรด แต่เมื่อเริ่มต้นโครเมียมจะต้องเป็น Cr^{6+} (ในรูปของกรดโครมิก) และต้องควบคุมปริมาณ Cr^{3+} ไอออนไม่ให้สูงเกินกว่าที่กำหนด เพราะจะมีผลต่อความหนาและความมันเงาของพื้นผิวที่ชุบได้

การลดปริมาณไอออนของเหล็ก

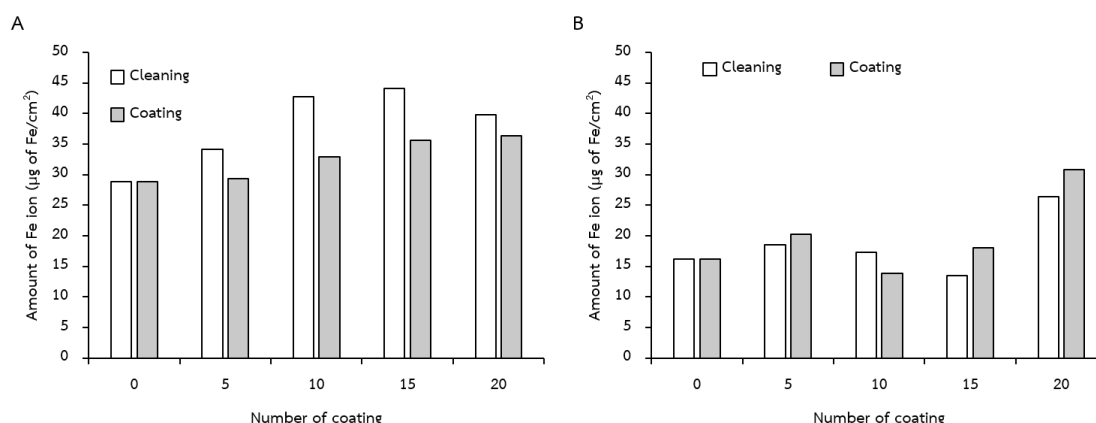
ปริมาณของเหล็กที่ละลายออกมานั้นจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งของการชุบ โดยเฉพาะขั้นตอนการล้างผิววัสดุในน้ำยา ซึ่งมีความเป็นกรดสูง ซึ่งถ้ามีเหล็กไอออนเกิดขึ้นมากจะมีผลต่อการเกิดตะกอนในน้ำยาชุบและถ้ามีปริมาณเหล็กมากเกินไป 5-10 กรัมต่อลิตรจะทำให้ความเงาของชิ้นงานลดลงและเกิดรูพรุนบนผิวชิ้นงานได้ จากการติดตามปริมาณเหล็กไอออนและตะกอนที่เพิ่มขึ้นในการชุบ 1-20 ครั้ง ดังรูปที่ 3 (ปริมาณของตะกอนในสารละลายปริมาตร 500 มิลลิลิตร) พบว่ามีปริมาณตะกอนเพิ่มขึ้นในชุดธรรมดา (normal) ที่มีการทำความสะอาดและชุบในบ่อเดียวกันสูงมาก โดยเฉพาะระบบสารละลายที่มี

ฟลูออไรด์ (รูปที่ 3A) การชุบในน้ำยาชุบแบบฟลูออโรซิลิเกต (sodium fluorosilicate) จะมีประสิทธิภาพในการชุบได้ดี คือช่วยทำให้ผิวเป็นเงา ชุบได้หนาในเวลาที่สูงกว่าน้ำยาชุบแบบธรรมดา ในการแก้ปัญหาคาปนเปื้อนของเหล็กในน้ำยาชุบทั้งสอง

แบบนี้ ในเบื้องต้นได้ทดลองแยกอุปกรณ์สำหรับชุดทำความสะอาดเตรียมพื้นผิวกับชุดชุบเคลือบ ทั้งกระบวนการที่ไม่มีฟลูออไรด์ในสารละลายและมีฟลูออไรด์ในสารละลาย พบว่า ถ้าสามารถแยกการล้างในสภาวะที่ปราศจากฟลูออไรด์จะมีปริมาณเหล็กไอออนเกิดขึ้นมากกว่าในสารละลายที่มีฟลูออไรด์ถึง 0.012 กรัมต่อพื้นผิวชิ้นงาน 1 ตารางนิ้ว และการทำความสะอาดในสารละลายที่ปราศจากฟลูออไรด์แล้วไปทำการชุบด้วยสารละลายที่มีฟลูออไรด์จะพบว่าวัสดุที่เคลือบนั้นยังมีความมันวาวและความหนาของผิวที่ชุบ ไม่แตกต่างจากกระบวนการชุบแบบอ่างชุบอันเดียว ซึ่งสำหรับน้ำยาชุบที่มีฟลูออไรด์สามารถช่วยลดการเกิดตะกอนได้มากกว่าเดิมประมาณ 10 เท่า เพราะความเข้มข้นของน้ำยาชุบที่มีฟลูออไรด์จะมีความเข้มข้นและความเป็นกรดสูงกว่าน้ำยาชุบธรรมดา จึงมีผลต่อการตกตะกอนที่ช้ากว่าและการละลายของเหล็กออกมาน้อยกว่า (ค่า ionic strength ของสารสูงทำให้เหล็กละลายออกมาได้ลดลง) ดังรูปที่ 4 สำหรับการปฏิบัติจริงภายในโรงงานจะมีชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่และการเคลื่อนย้ายชิ้นงานจากบ่อที่ทำความสะอาดมายังบ่อชุบอาจทำให้ผิวชิ้นงานสัมผัสอากาศหรือเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นจากการกำหนดมาตรฐานน้ำยาชุบเคลือบที่ต้องมีปริมาณรวมของเหล็ก (III) ไอออน และโครเมียม (III) ไอออนน้อยกว่า 15 กรัมต่อลิตร จึงมีการศึกษาวิธีการลดปริมาณโครเมียม (III) ไอออน ในขั้นตอนต่อไป



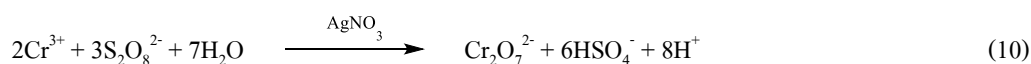
รูปที่ 3 ปริมาณของตะกอนหลังการชุบเคลือบ 1 คืนเมื่อแยกกระบวนการล้างและชุบเคลือบเปรียบเทียบกับกระบวนการปกติ (A) น้ำยาชุบเคลือบแบบมีฟลูออไรด์ และ (B) น้ำยาชุบเคลือบแบบไม่มีฟลูออไรด์ (ปริมาณของตะกอนในสารละลายปริมาตร 500 มิลลิลิตร)



รูปที่ 4 ปริมาณของเหล็กไอออนที่หลุดออกมาในสารละลายเมื่อทำการแยกชุดทำความสะอาดและชุดชุบเคลือบ (A) น้ำยาชุบเคลือบแบบมีฟลูออไรด์ และ (B) น้ำยาชุบเคลือบแบบไม่มีฟลูออไรด์

การลดปริมาณไอออนของโครเมียม

จากงานวิจัยในปี ศ.ศ. 2006 Huijian Jiang และคณะ [19] ได้เสนองานวิจัยเกี่ยวกับการออกซิไดซ์โครเมียม(III) ไอออนเป็นโครเมียม(VI) โดยใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaOCl) ในสภาวะเบส แต่ในกระบวนการชุบเคลือบเป็นสารละลายที่มีสภาวะความเป็นกรดสูงมาก (pH<1) ในงานวิจัยนี้สนใจวิธีออกซิไดซ์ด้วยสารละลายโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$) และมีซิลเวอร์ในเตรทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [22]



การเติมซิลเวอร์ในเตรทหรือการใช้แท่งโลหะเงินเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันในอุปกรณ์ชุบเคลือบนี้อาจจะทำให้มีซิลเวอร์(I) ไอออนละลายปนเปื้อนในสารละลาย ซึ่งอาจจะมีผลต่อการชุบเคลือบชิ้นงานในอุตสาหกรรมได้ ในการทดลองจึงศึกษาอิทธิพลของการให้ความร้อนและช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยาโดยจำลองเตรียมสารละลายโครเมียม(III) ไอออนที่ความเข้มข้น 0.015 โมลาร์ซึ่งมีปริมาณเป็นครึ่งหนึ่งของโครเมียม (III) ไอออนที่เกิดขึ้นในบ่อชุบของโรงงาน เดิมแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) ศึกษาปฏิกิริยาช่วงอุณหภูมิ 50-90 องศาเซลเซียส สังเกตการเปลี่ยนสีของโครเมียม(III) ไอออนในสารละลายจากสีเขียวเป็นสีส้มของไดโครเมตไอออน ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การออกซิเดชันโครเมียม(III) ไอออนที่สถานะต่างๆ (ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง)

สารละลาย	สภาวะการทำปฏิกิริยา		ร้อยละการเปลี่ยน $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Cr}^{6+}$	หมายเหตุ
	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (นาที)		
Std Cr^{3+}	อุณหภูมิห้อง	120	-	สารละลายสีเขียว
	85-90	120	99.71±0.53	
Std $\text{Cr}^{3+} + \text{Fe}^{3+}$	85-90	120	109.65±3.50	
Std $\text{Cr}^{3+} + \text{Cu}^{2+}$	85-90	120	98.85±2.16	
Std $\text{Cr}^{3+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Cu}^{2+}$	อุณหภูมิห้อง	360	-	สารละลายสีเขียว
	50-55	360	-	สารละลายสีเขียว
	50-55*	360	-	สารละลายสีเขียวอ่อน
	60-65	360	-	สารละลายสีเขียวอ่อน
	60-65*	360	-	สารละลายสีเหลือง
	70-75	240	103.87±2.67	
	70-75*	240	101.98±1.10	
	85-90	120	108.10±2.50	
	85-90	60	104.12±2.50	
	85-90*	60	100.11±0.08	
	85-90	30	93.39±2.88	

สารละลาย	สภาวะการทำปฏิกิริยา		ร้อยละการเปลี่ยน $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Cr}^{6+}$	หมายเหตุ
	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ระยะเวลา (นาท.)		
	85-90*	30	106.75 $\pm$ 2.35	

*เก็บสารละลายไว้ 2 วันหลังจากให้ความร้อน

จากผลการทดลองในตารางที่ 1 การออกซิไดซ์โครเมียม(III) ไอออนด้วยเปอร์ซัลเฟตไอออนในสภาวะที่ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาให้เป็นโครเมียม (VI) ไอออน การทดลองได้เปรียบเทียบสารละลายโครเมียม(III) ไอออนกับสารละลายโครเมียม (III) ไอออนที่มีเหล็ก(III) ไอออน และทองแดง(II) ไอออน ที่อุณหภูมิห้อง และเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 50-90 องศาเซลเซียส พบว่าปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้นมีส่วนช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีมากขึ้นด้วยสังเกตจากการเปลี่ยนสีของโครเมียม(III) ไอออนสีเขียวถูกเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและสีส้มในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 70 องศาเซลเซียส โดยให้ความร้อนเป็นเวลา 240 นาที และเมื่อให้ความร้อนแล้วทำการเก็บสารละลายไว้เป็นเวลา 2 วันจึงทำการไทเทรตแบบไอโอโดเมตริหาปริมาณการเปลี่ยนแปลงของโครเมียมแล้วพบว่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของโครเมียมนั้นยังคงเดิม ดังนั้นโครเมียม(VI) ไอออนหรือไดโครเมตไอออนที่เกิดขึ้นมีความเสถียร ไม่พบปริมาณโครเมียม(III) ไอออนเพิ่มขึ้น แสดงว่าไม่เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ เมื่อเปลี่ยนสภาวะเป็นการให้ความร้อนในช่วง 85-90 องศาเซลเซียส พบว่าสารละลายเปลี่ยนเป็นสีส้มได้ภายในเวลา 30 นาที เหล็ก(III) ไอออน และทองแดง(II) ไอออนไม่รบกวนการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของเปอร์ซัลเฟตไอออนแต่อาจจะรบกวนปฏิกิริยาการไทเทรตเช่น ทองแดง(II) ไอออนไปออกซิไดซ์ไอโอดีนไดด์ (I^-) เกิดเป็น ไอโอดีน(I_2) ทำให้การคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของโครเมียมที่ทำปฏิกิริยากับไอโอดีนมีค่ามากกว่า 100 และเมื่อทำการกรองตะกอนที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการชูบนี้แล้ว พบว่า ทุกระบบที่มีการเติมแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตมีปริมาณของตะกอนเกิดขึ้นหลังกระบวนการชูบลดลง แสดงว่าปริมาณเหล็กไอออนที่หลุดออกมาปนเปื้อนนั่นน้อยลงไปด้วย

การเติมแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตเพื่อลดปริมาณของโครเมียม(III) ไอออนอาจไม่จำเป็นต้องเติมให้มากเกินไปกับปฏิกิริยาเพราะป้องกันการรบกวนกระบวนการชูบวัสดุ ในการทดลองนี้ได้เติมแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.03 โมลาร์ในชุดเคลื่อนที่อย่างช้าๆซึ่งมีน้ำยาชูบที่ใช้แล้วทั้งแบบที่มีฟลูออไรด์และไม่มีฟลูออไรด์ เมื่อทำการเคลื่อนที่อย่างช้าๆแล้วพบว่าความหนาของผิวเคลือบยังคงเดิม ลักษณะความมันวาวไม่แตกต่างจากเดิมแสดงว่าเปอร์ซัลเฟตไอออนที่อาจจะเหลืออยู่ไม่รบกวนกระบวนการชูบเคลื่อนที่ เพราะเปอร์ซัลเฟตไอออนเกิดปฏิกิริยาเป็นไฮโดรเจนซัลเฟตและกรดซัลฟูริก จึงไม่รบกวนปฏิกิริยา ดังนั้นในระบบอุตสาหกรรมสามารถเติมแอมโมเนียมซัลเฟตในระดับความเข้มข้น 0.03 โมลาร์ประกอบกับให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แล้วเก็บสารละลายไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก็สามารถเริ่มกระบวนการชูบได้

สรุปผลการทดลอง

ในบ่อชูบแบบฮาร์ดโครมในอุตสาหกรรมจะพบเหล็กไอออนหลุดออกมาในช่วงของการทำความสะอาดพื้นผิวก่อนการชูบเคลื่อนที่หรือไอออนอื่นที่หลุดจากขั้วโลหะตัวนำไฟฟ้าในบ่อชูบ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำยาชูบได้ ซึ่งในโรงงานไม่สามารถแยกกระบวนการล้างผิวของวัสดุที่จะชูบกับกระบวนการชูบเป็นคนละบ่อกันได้ จากผลการทดลองพบว่าการเติมแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตลงในน้ำยาชูบสามารถช่วยลดปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในบ่อชูบ และให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโครเมียม(III) ไอออน เป็นโครเมียม (VI) ไอออนในรูปไดโครเมตไอออน ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการชูบและคุณภาพในการชูบ วิธีนี้สามารถช่วยยืดอายุการใช้งานน้ำยาชูบ ลดการทิ้งสารโลหะหนักที่มีความเป็นกรดสูง วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายไม่สูงนักสามารถช่วยลดต้นทุนโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กได้

งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ ทนสนับสนุนทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บริษัทสยามฮาร์ดโครม จำกัด ที่อนุเคราะห์สารเคมีและสารตัวอย่าง

รศ.ดร. ณรงค์ ผังวิวัฒน์ สำหรับคำแนะนำที่เป็นประโยชน์และอนุเคราะห์อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ดร. จารุวรรณ ตาพวัฒน์ สำหรับคำแนะนำต่างๆ และนาย นราวุฒิ สุวรรณวัฒน์ ผู้ร่วมศึกษาวิจัยตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

- Tanthadiloke, S., Kittisupakorn, P., & Mujtaba, I. M. (2014). *Modelling and Design a Controller for Improving the Plating Performance of a Hard Chromium Electroplating Process 24th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, 805-810.
- Pungwiwat, N. (2547). *Corrosion and material selection*. Bangkok: Jirarat Publisher. (in Thai)
- Snyder, D. L. (2012). Decorative Chromium Plating Basics. *Metal Finishing*, 110(2), 14-21.
- Thongmon, A. (2532). *Chrome plated – gold plated*. Bangkok: Mechanical and Metallurgical Industry Development Institute. (in Thai)
- Kanittabut, V. (2543). *Industrial chrome plating (hard chrome)*. Bangkok: Mechanical and Metallurgical Industry Development Institute. (in Thai)
- Huang, K.-L., Holsen, T. M., Chou, T.-C., & Selman, J. R. (2003). Comparing Nafion and Ceramic Separators Used in Electrochemical Purification of Spent Chromium Plating Solutions: Cationic Impurity Removal and Transport. *Environmental Science & Technology*, 37(9), 1992-1998.
- Frenzel, I., Holdik, H., Stamatialis, D., Pourcelly, G., & Wessling, M. (2005). Chromic acid recovery by electro-electrodialysisI. Evaluation of anion-exchange membrane. *Journal of Membrane Science*, 261(1-2), 49-57.
- Frenzel, I., Holdik, H., Stamatialis, D. F., Pourcelly, G., & Wessling, M. (2005). Chromic acid recovery by electro-electrodialysis. *Separation and Purification Technology*, 47(1-2), 27-35.
- Jegadeesan, G., Mondal, K., & Lalvani, S. B. (2005). Iron Removal and Simultaneous Regeneration of Hexavalent Chromium in Spent Plating Solutions. *Journal of The Electrochemical Society*, 152(2).
- Ahmed, M. E. I., Huang, K.-L., & Holsen, T. M. (2009). Nafion-117 Behavior during Cation Separation from Spent Chromium Plating Solutions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(14), 6805-6810.
- Zhao, J., Cui, G., & Liu, H. (2011). Investigation Into Rejuvenation of Spent Chromium Plating Solutions by Bipolar Membrane Electrodialysis. *Journal of The Electrochemical Society*, 158(9).
- Ghosh, D., Solanki, H., & Purkait, M. K. (2008). Removal of Fe(II) from tap water by electrocoagulation technique. *Journal of Hazardous Materials*, 155(1-2), 135-143.
- El-Nadi, Y. A., & El-Hefny, N. E. (2010). Removal of iron from Cr-electroplating solution by extraction with di(2-ethylhexyl)phosphoric acid in kerosene. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(2), 159-164.

- Al-Anber, M. A. (2010). Removal of high-level Fe^{3+} from aqueous solution using natural inorganic materials: Bentonite (NB) and quartz (NQ). *Desalination*, 250(3), 885-891.
- Sheibani, A., Shishehbor, M. R., & Alaei, H. (2012). Removal of Fe(III) ions from aqueous solution by hazelnut hull as an adsorbent. *International Journal of Industrial Chemistry*, 3(1), 4.
- Rubcumintara, T. (2014). Chromium and Iron Removal for Hard Chrome Bath Recycling using Eggshell Sorbent. *Journal of Clean Energy Technologies*, 158-162.
- Zhang, Y., Liu, Q., & Li, L. (2016). Removal of iron from sythetic copper leach solution using a hydroxy-oxime chelating resin. *Hydrometallurgy*, 164, 154-158. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.06.004>
- Apte, A. D., Tare, V., & Bose, P. (2006). Extent of oxidation of Cr(III) to Cr(VI) under various conditions pertaining to natural environment. *Journal of Hazardous Materials*, 128(2-3), 164-174. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.057>
- Jiang, H., Rao, L., Zhang, Z., & Rai, D. (2006). Characterization and oxidation of chromium(III) by sodium hypochlorite in alkaline solutions. *Inorganica Chimica Acta*, 359(10), 3237-3242. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2006.03.035>
- Rodman, D. L., Carrington, N. A., & Xue, Z.-L. (2006). Conversion of chromium(III) propionate to chromium(VI) by the Advanced Oxidation ProcessPretreatment of a biomimetic complex for metal analysis. *Talanta*, 70(3), 668-675. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2006.05.092>
- Sheu, H.-H., Lu, C.-E., Hou, K.-H., Kuo, M.-L., & Ger, M.-D. (2015). Effects of alumina addition and heat treatment on the behavior of Cr coatings electroplated from a trivalent chromium bath. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 48, 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2014.10.017>
- Jeffery, G. H., Basset, J., Mendham, J., & Denny, R. C. (1989). *Vogel's textbook of Quantitative Chemical Analysis* (5th ed.). John Wiley and Sons Inc, New York.

Research Article

วิทยาศาสตร์กับการอนุรักษ์ และการฟื้นฟูวัสดุศาสตร์เพื่องานบูรณะ กระจกเงาในศิลปกรรมไทย

Science and Conservation and Rehabilitation of Material Science for The Restoration of Kriab Mirror in Thai Arts.

รัชพล เต๊ะยะยา^{1*}

Ratchapon Tajaya^{1*}

¹ภาควิชาประวัติศาสตร์ศิลปะ คณะโบราณคดี มหาวิทยาลัยศิลปากร พระนคร กรุงเทพฯ 10200 ประเทศไทย

¹Department of Art History, Faculty of Archaeology, Silpakorn University, Phra Nakhon, Bangkok 10200, Thailand

*E-mail: tajaya_r@su.ac.th

Received: 30/07/2021; Revised: 31/03/2022; Accepted: 18/08/2022

บทคัดย่อ

การอนุรักษ์ศิลปวัตถุของไทยในยุคโลกาภิวัตน์ ปัจจุบันได้มีการใช้กระบวนการวิทยาศาสตร์ วิทยาการสมัยใหม่ เพื่อการบูรณะและอนุรักษ์อย่างยั่งยืน ดังนั้น แนวทางการในการบูรณะศิลปวัตถุที่ประดับตกแต่งด้วยกระจกเงา จึงมุ่งเน้น การศึกษาสุนทรียศาสตร์และเชิงช่าง โดยบูรณาการกระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพิ่มขึ้นอีกมิติ เพื่อเชื่อมโยงความสัมพันธ์ จากหลักฐานร่องรอยศิลปกรรมที่มีอยู่ แนวทางการบูรณะจึงใช้การศึกษาด้วยกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ เพื่อเชื่อมโยง ความสัมพันธ์ จากหลักฐานร่องรอยกระจกเงาที่สร้างขึ้นในอดีต ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ระบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer, EDXRF) ที่สามารถตรวจวิเคราะห์เชิงคุณภาพได้ในเวลาอันรวดเร็ว และตรวจได้คราวละหลาย ๆ ชาติพร้อมกัน โดยไม่ทำลายหรือทำให้วัตถุสูญเสียสภาพเดิม ใช้ในการตรวจสอบองค์ประกอบ ชาติของพื้นผิว จากการส่งตัวอย่างกระจกเงาโบราณ ในการตรวจสอบธาตุองค์ประกอบ พบว่า เนื้อแก้วของกระจกเงา จะมีองค์ประกอบของตะกั่วเป็นหลัก ร้อยละ 66.23-66.93 โดยน้ำหนัก สอดคล้องกับสูตรการผลิตกระจกเงาของสาย สกุลเต๊ะยะยา (Tajaya) ที่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบหลัก เมื่อนำไปทดสอบความแข็งตามระบบของโมห์ (Mohr's scale of hardness) เท่ากับ 2 - 5 และมีความเปราะสูง การฟื้นฟูวัสดุศาสตร์ในครั้งนี้ กระจกเงาที่ประดิษฐ์ขึ้นตามสูตรอย่างโบราณ ที่ ได้สืบทอดมาของตระกูลเต๊ะยะยา โดยการใช้ประยุกต์ใช้วิธีทางวิทยาศาสตร์ ร่วมกับองค์ความรู้ทางประวัติศาสตร์เชิงช่าง ทำให้สามารถซ่อมแซมบูรณะงานศิลปกรรมไทย เช่น กรณีสืบหากรอบภาพโบราณได้อย่างกลมกลืน และคงคุณค่าทางจิตใจ ด้านวัสดุศาสตร์โดยใช้กระจกเงาในการบูรณะที่มีความใกล้เคียง ตรงกับของเดิมมากที่สุด

คำสำคัญ : กระจกเงา, การฟื้นฟูวัสดุศาสตร์, การบูรณะด้วยกระบวนการทางวิทยาศาสตร์

Abstract

Conservation of Thai artifacts in the era of globalization Nowadays, modern scientific and scientific processes are used for sustainable restoration and conservation. Therefore, the guidelines for the restoration of art objects decorated with people. The glass is therefore focused on aesthetics and craftsmanship studies. by integrating more scientific processes into another dimension to connect relationships From the evidence of traces of art that exist. The restoration approach uses scientific studies to correlate the correlation with the evidence of Kriab mirror (Ancient Thai Mirror) traces built in the past. With X-ray techniques, Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDXRF) can perform qualitative analysis in a short time and can detect many elements at once without damaging or causing material loss. original condition Used to determine the elemental composition of surfaces from the submission of the antique Kriab mirror samples. In the examination of the elements, it was found that The glass texture of the Kriab mirror is mainly composed of lead 66.23 - 66.93 % by weight, consistent with the Kriab mirror Ingredients Formula. Of the Tajaya family (The Tajaya Clan' Kriab mirror Formula) with lead as the main component When tested for hardness according to the Mohr's scale of hardness equal to 2-5 and high brittleness. This revival of materials science A slitted mirror made according to the ancient formula inherited from the Tajaya family. by the application of scientific methods combined with technical historical knowledge. This makes it possible to restore and restore Thai works of art such as a case study of ancient picture frames in harmony and maintain spiritual values. Materials science by using a glass scraper in the restoration that is closest to the original one.

Keywords : kriab mirror, rehabilitation of materials, conservation by scientific process

บทนำ

การอนุรักษ์ ตามพจนานุกรม ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2546 หมายถึง การรักษาให้คงเดิม สำหรับการอนุรักษ์ศิลปวัตถุของไทยในยุคโลกาภิวัตน์ ปัจจุบันได้มีการใช้กระบวนการวิทยาศาสตร์ วิทยาการสมัยใหม่ เพื่อการบูรณะและอนุรักษ์อย่างยั่งยืน

กระแสพระราชดำรัสพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช เกี่ยวกับวิทยาการสงวนรักษาโบราณวัตถุเป็นอย่างดี และกรมศิลปากรได้น้อมเกล้าน้อมกระหม่อมรับกระแสพระราชดำรินั้น อันเป็นจุดเริ่มต้นของการอนุรักษ์ศิลปะโบราณวัตถุโดยวิทยาศาสตร์ในประเทศไทย ซึ่งเป็นการประยุกต์วิชาการทางวิทยาศาสตร์เข้ากับการอนุรักษ์สมบัติวัฒนธรรม และได้ดำเนินสืบต่อกันมาตราบเท่าทุกวันนี้ โดยการนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์สาขาต่าง ๆ ไปใช้ประโยชน์ในด้านการป้องกันรักษาและซ่อมแซมสงวนรักษาสิลปะโบราณวัตถุเหล่านั้นให้คงสภาพเดิมให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยไม่ทำให้เกิดการชำรุดขึ้นบนวัตถุนั้น ๆ หากมีการชำรุดเกิดขึ้นมาก่อนก็จะต้องแก้ไขให้อยู่ในสภาพที่แข็งแรง ปลอดภัย ด้วยการเสริมความมั่นคงแข็งแรง โดยวิธีการใดก็ตาม แต่จะต้องพยายามรักษาสภาพเดิมให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ (Dhanit, 1987)

ศึกษาหลักฐานทางประวัติศาสตร์ของ พบว่า กระจกกระยิบ หรือกระจกหุง เป็นกระจกชนิดหนึ่งซึ่งทำขึ้นโดยใช้แร่ดิบเป็นพื้นรองรับและเคลือบด้วยตัวยาโบราณ เป็นต้นว่า ดินประสิ่ว ปากกลิ้ง กาก แป้ง เป็นต้น มีเจ้านายชั้นผู้ใหญ่หลายพระองค์ทรงสนพระทัยและได้มีการทำแกวกันอย่างเป็นล่ำเป็นสัน ซึ่งปรากฏในหลักฐานที่หอสมุดแห่งชาติว่า ในรัชกาลที่ 4 มีการจัดตั้งหน่วยราชการระดับกรมสำหรับการผลิตแก้วโดยเฉพาะเรียกว่า กรมช่างหุงกระจก โดยมี กรมขุนวรจักรธรานุภาพ ซึ่งเป็นพระราชโอรส ในรัชกาลที่ 2 ทรงเป็นผู้ควบคุมการทำแก้ว และในอดีต ช่างไทยใช้กระจกสีเหล่านี้ประดับ และตกแต่ง

ในงานศิลปกรรมไทย ปรากฏเอกสารรุ่นเก่าสมัยสมเด็จพระบรมไตรโลกนาถ มีพระราชกำหนดกฎหมายเกี่ยวกับ
กระจกสี อีกทั้งมีการประดับกระจกติดกับผ้า โบราณเรียกว่า เปื้อ (Pisutti, 1999)

การวิจัยตามแนวพระราชดำริของสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ซึ่งคณะวิจัยได้วิเคราะห์
องค์ประกอบทางเคมี โดยใช้แสงซินโครตรอนตรวจสอบด้วยเทคนิคการเรืองแสงในย่านพลังงานรังสีเอ็กซ์ และศึกษา
โครงสร้างอะตอมของกระจกตัวอย่าง (Vandana, 2012) จุดมุ่งหมายสูงสุดของงานวิจัยชิ้นนี้ เพื่อจะทำกระจกเกรียบขึ้นมาใหม่
ที่มีคุณสมบัติเหมือนของเดิม สำหรับใช้ในการบูรณปฏิสังขรณ์ในอนาคต

กระจกเกรียบ หรือ กระจกจีน (Patcharee, 1980) คือ กระจกสีชนิดหนึ่งที่ดาดบนแผ่นดินบุกและเคลือบผิวด้วยน้ำยาที่
ประกอบด้วยตัวยาคาโรโบราณเพื่อให้ผิวเป็นมันวาว ส่วนที่เป็นสีต่าง ๆ บนผิวกระจกชนิดนี้ใช้ตัวยาที่ได้จากแร่ต่าง ๆ
มีลักษณะเหมือนเคลือบโลหะ (metal ornaments) ที่นิยมทำกันในเอเชียกลางและยุโรป (Nelson, 1984)

ดังนั้น แนวทางการในการบูรณะศิลปวัตถุที่ประดับตกแต่งด้วยกระจกเกรียบ ในงานวิจัยนี้ จึงเน้นการศึกษา
สุนทรียศาสตร์และงานช่างประดับกระจกเกรียบ โดยบูรณาการกระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพิ่มขึ้นอีกมิติ เพื่อเชื่อมโยง
ความสัมพันธ์ จากหลักฐานร่องรอยศิลปกรรมที่มีอยู่ เป็นการบูรณาการระหว่างวิทยาศาสตร์และศิลปกรรมศาสตร์ เริ่มต้น
ด้วยวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกระจกเกรียบด้วยกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ เพื่อหาส่วนประกอบของกระจก
เกรียบสำหรับเป็นต้นแบบในการประดิษฐ์ การศึกษาวัสดุศาสตร์ การประดิษฐ์กระจกเกรียบขึ้นมาใหม่เป็นวัสดุทดแทนใน
การบูรณะโดยใช้กระบวนการผลิตแบบโบราณดั้งเดิม และการนำไปใช้บูรณะอนุรักษ์งานศิลปกรรมประดับกระจกเกรียบจริง
ในกรณีศึกษา

วิธีการทดลอง

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกระจกเกรียบตัวอย่าง

ศึกษางานช่างการประดับกระจกเกรียบในสถาปัตยกรรม และหาล่องประกอบทางเคมีของกระจกเกรียบตัวอย่าง
พระอารามที่สร้างขึ้นร่วมยุคสมัยเดียวกัน โดยใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ระบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X- Ray
Fluorescence Spectrometer, EDXRF) ที่สามารถตรวจวิเคราะห์เชิงคุณภาพได้ในเวลาอันรวดเร็วและตรวจได้คราวละหลาย ๆ
ธาตุพร้อมกัน โดยไม่ทำลายหรือทำให้วัตถุสูญเสียสภาพเดิม ใช้ในการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุของพื้นผิว ซึ่งสามารถใช้
วิเคราะห์วัตถุในศิลปะวัตถุ เช่น ผิวเคลือบหรือน้ำเคลือบ (Glaze) ของภาชนะดินเผา เศษภาชนะแก้วแบบโปร่งใส
ภาชนะแก้วเขียนสี และภาชนะแก้วลายขูดขีด (Wanwisa, 2012) โดยศึกษาตัวอย่างกระจกเกรียบโบราณ จากวัดพระเชตุพน
วิมลมังคลารามราชวรมหาวิหาร จำนวน 2 ตัวอย่าง และ ตัวกระจกเกรียบโบราณ จากวัดสุทัศนเทพวรารามราชวรมหาวิหาร
จำนวน 1 ตัวอย่าง และหาความสัมพันธ์เชิงช่วงหุ้กระจกเกรียบที่ใช้ประดับในสถาปัตยกรรม สมัยรัตนโกสินทร์ตอนต้น
จากองค์ประกอบทางเคมีของกระจกเกรียบ เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างกัน ในเชิงประวัติศาสตร์และศิลปกรรม

2. วัสดุศาสตร์และการประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับสูตรหุ้กระจกเกรียบ

คิดประดิษฐ์กระจกเกรียบขึ้นมาใหม่ โดยใช้สัดส่วนสารในการผลิตจากกระจกเกรียบโบราณตัวอย่าง และใช้นิรณเร
ธาตุตามสูตรของตระกูลเตี๊ยะยา ประกอบด้วย

- | | |
|---|---------------------------|
| - ตะกั่ว (Lead) | ร้อยละ 60 - 70 โดยน้ำหนัก |
| - วัสดุธาตุให้เนื้อแก้ว (สารประกอบซิลิกา) | ร้อยละ 30 - 40 โดยน้ำหนัก |
| - วัสดุธาตุให้สี (แร่ธาตุ รงค์วัตถุ) | ร้อยละ 1 - 10 โดยน้ำหนัก |

วัตถุดิบให้สี (แร่ธาตุ รังควัตถุ) เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการหุงยาสี โดยจะใช้ วัตถุดิบพื้นถิ่น ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงแร่ธาตุรงควัตถุให้สีตามสูตรกระจกเกรียบของตระกูลเต๋จ๊ะยา

สูตรที่	แร่ธาตุ	แหล่งแร่ธาตุ
1	ดินแร่เหล็ก – แมงกานีส ด่างทับทิม (Potassium permanganate)	อำเภอยางชุมน้อย จังหวัดศรีสะเกษ
2	CoCl ₂ และโลหะสำริด	
3	ผงสีเขียนลายคราม (CoO และ Al ₂ O ₃)	
4	คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) แร่มาลาไคต์ (Malachite) คอปเปอร์คาร์บอเนต (CuCO ₃)	
5	แร่เหล็กน้ำพี้ แร่เหล็กเมืองทอง	บ่อแร่เหล็ก อำเภอนามน จังหวัดอุตรดิตถ์ บ่อเหล็กเมืองทอง อำเภอทอง จังหวัดแพร่
6	แร่ไพไรต์ (Pyrite) และโลหะทองแดง	แหล่งอำเภอดง จังหวัดลำปาง
7	เป็นเนื้อแก้วใส ดังนั้นเข้าหลอมต้องสะอาด ปราศจากไอออนของ โลหะที่จะทำให้เกิดสี	

จากสัดส่วนสารในกระบวนการผลิตจากกระจกเกรียบโบราณตัวอย่าง และใช้ชนิดแร่ธาตุตามสูตรของตระกูลเต๋จ๊ะยา พบว่า มีความใกล้เคียงกับกระจกเกรียบแบบโบราณในเรื่องการใช้ส่วนผสม โดยสูตรกระจกเกรียบที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้ จะเน้นการใช้แร่ธาตุจากธรรมชาติ โดยมีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก และจากตารางแสดงแร่ธาตุรงควัตถุให้สีตามสูตรกระจกเกรียบของตระกูลเต๋จ๊ะยา พบว่า สีในเนื้อแก้วกระจกเกรียบเกิดจากโลหะออกไซด์ในแร่ธาตุรงควัตถุ เช่น โคบอลต์ออกไซด์ให้สีน้ำเงิน เหล็กออกไซด์ให้สีส้ม-แดง และคอปเปอร์ออกไซด์ให้สีเขียว สอดคล้องกับการเจือสารประกอบออกไซด์ของธาตุ transition ในกระบวนการหลอมแก้ว เมื่อได้รับความร้อนเกิดเป็นไอออนโลหะทำให้เกิดสีในแก้ว (Tregouet et al., 2014)

3. ขั้นตอนกระบวนการเตรียมกระจกเกรียบ

ในการผลิตกระจกเกรียบเทคนิควิธีนี้ เป็นการนำวัตถุดิบตามสูตรไปบด ร่อนด้วยตะแกรงจนเป็นผง แล้วใส่เข้าหลอม ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 - 1,000 องศาเซลเซียส เพื่อให้แร่ธาตุทำปฏิกิริยากับตะกั่ว เป็นเวลา 30 -45 นาที หรือให้ความร้อนจนวัตถุดิบสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นเนื้อแก้วใส โดยสมบูรณ์ จากนั้นนำน้ำแก้วเหลวร้อน มาผัดเทลงบนโลหะแผ่นเรียบ แล้วนำไป ที่อุณหภูมิ 300 – 450 องศาเซลเซียส เพื่อให้ น้ำแก้วเหลว ไหลได้ดิบบนแผ่นโลหะนั้น ใช้แท่งทองเหลืองกด เพื่อกำหนดความหนาบางของแผ่นแก้ว ซึ่งอาจจะใช้ หินหยก หินโมรา (Agate) หรือ หินนาคระสวย ตัดเป็นแผ่นบางทดแทนแผ่นโลหะ และขั้นตอนสุดท้าย เทตะกั่วบริสุทธิ์ หรือตะกั่วผสม ที่หลอมเหลวทับแผ่นแก้วบาง

4. แนวทางการบูรณะและอนุรักษ์กระจกระเบียงในงานศิลปกรรมไทย

การวิจัยนี้เป็นกรณีศึกษาช่างประดับกระจกระเบียง เพื่อการบูรณะซ่อมแซมกรอบภาพจำหลักไม้ลายเทศในโครงการอนุรักษ์ภาพพิมพ์หิน โบราณและภาพเขียนอย่างตะวันตกพร้อมกรอบลายจำหลักของวัดสุทัศนเทพวราราม เพื่อจัดแสดงในพิพิธภัณฑ์สมเด็จพระสังฆราช (แพ) การบูรณะในครั้งนี้ได้ใช้องค์ความรู้ประวัติศาสตร์ศิลปะ ข้อย่อยเชิงช่างในอดีตสู่การใช้วิทยาศาสตร์เพื่อการอนุรักษ์ โดยกรอบภาพจำหลักไม้ลายอย่างเทศประดับกระจกระเบียง เหนือเสาพระวิหารหลวง วัดสุทัศนเทพวรารามราชวรมหาวิหาร ตามโครงการอนุรักษ์ภาพพิมพ์หิน โบราณ และภาพเขียนอย่างตะวันตกพร้อมกรอบลายจำหลักไม้ ที่นำมาบูรณปฏิสังขรณ์ในครั้งนี้ เป็นงานจำหลักไม้แกะสลักปิดทองประดับกระจกระเบียง ลายพรรณพฤกษาคอกพุดตานประกอบกับใบไม้ฝรั่งแบบใบอะแคนตัส จึงเป็นไปได้ว่าเป็นฝีมือของช่างไทยหรือช่างจีน (Sakchai, 2008) ในช่วงรัชกาลที่ 3-4 แห่งกรุงรัตนโกสินทร์ ที่มีรสนิยมอย่างศิลปะแบบพระราชานิยมในรัชกาลที่ 3 โดยกรอบเช่นนี้แตกต่างจากงานประดับกรอบซุ้มหรือกรอบภาพตามแบบแผนประเพณีเดิม ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กรอบภาพจำหลักไม้แกะสลักปิดทองประดับกระจกระเบียงลายพรรณพฤกษาคอกพุดตานประกอบกับใบไม้ฝรั่งแบบใบอะแคนตัส

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกระจกระเบียงตัวอย่าง

จากการส่งตัวอย่างกระจกระเบียงไปทำการตรวจสอบธาตุองค์ประกอบโดยใช้เทคนิควิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์ แบบ EDS (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer, EDXRF) ได้ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างกระจกระเบียงโบราณ (สีเหลือง) จากวัดพระเชตุพนวิมลมังคลารามราชวรมหาวิหาร ดังตารางที่ 2, ตัวอย่างกระจกระเบียงโบราณ (สีแดง) จากวัดสุทัศนเทพวรารามราชวรมหาวิหาร ดังตารางที่ 3 และตัวอย่างกระจกระเบียงโบราณ (สีเขียว) ประดับพระพุทธรูปไสยาสน์ วัดพระเชตุพนวิมลมังคลารามราชวรมหาวิหาร ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 2 ตารางบันทึกผลการตรวจสอบธาตุองค์ประกอบของกระจกเกรียบโบราณสีเหลือง (Yellow)

ธาตุ / Element	ร้อยละ / Percent	หมายเหตุ / Remark
Al ₂ O ₃	1.02	
SiO ₂	30.48	
K ₂ O	2.81	การวิเคราะห์สารสถานะของแข็ง
Fe ₂ O ₃	3.26	
CuO	0.10	
PbO ₂	62.33	

ตารางที่ 3 ตารางบันทึกผลการตรวจสอบธาตุองค์ประกอบของกระจกเกรียบโบราณสีแดง (Orangy red)

ธาตุ / Element	ร้อยละ / Percent	หมายเหตุ / Remark
SiO ₂	28.12	
K ₂ O	2.55	
CaO	1.87	
Fe ₂ O ₃	0.53	การวิเคราะห์สารสถานะของแข็ง
CuO	0.35	
ZnO	0.35	
PbO ₂	66.23	

ตารางที่ 4 ตารางบันทึกผลการตรวจสอบธาตุองค์ประกอบของกระจกเกรียบโบราณสีเขียว (Green)

ธาตุ / Element	ร้อยละ / Percent	หมายเหตุ / Remark
SiO ₂	27.25	
Al ₂ O ₃	0.66	
CaO	1.00	
Fe ₂ O ₃	1.59	การวิเคราะห์สารสถานะของแข็ง
CuO	1.99	
ZnO	0.58	
PbO ₂	66.93	

จากตารางที่ 2 - 4 ตัวอย่างกระจกเกรียบโบราณ ทั้ง 3 แหล่ง พบว่า เนื้อแก้วของกระจกเกรียบจะมีองค์ประกอบของตะกั่วเป็นหลักร้อยละโดยน้ำหนัก คือ 66.23, 66.23, 66.93 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า กระจกเกรียบ เป็นยาสีโบราณชนิดหนึ่ง หรือ สารจำพวกน้ำเคลือบเซรามิก เพราะมีส่วนประกอบของโลหะอยู่มากกว่าแก้ว ซึ่ง กระจก หรือ แก้ว ทางวิทยาศาสตร์จะมีซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก

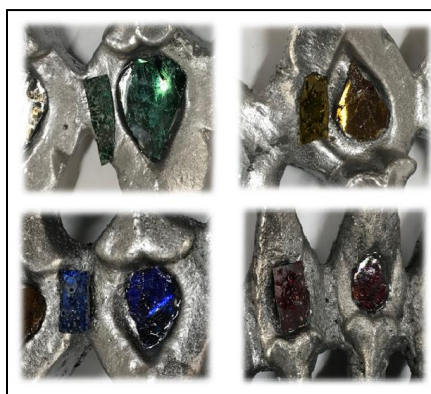
สอดคล้องกับหลักฐานทางประวัติศาสตร์ พบว่า กระจกเกรียบ หรือกระจกหุง เป็นกระจกสีชนิดหนึ่งซึ่งทำขึ้นโดยใช้แร่ดิบเป็นพื้นรองรับและเคลือบด้วยตัวยาโบราณ (Pisutti, 1999)

ทั้งนี้ส่วนประกอบวัตถุดิบของตัวอย่างกระจกเกรียบจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDXRF ยังสอดคล้องกับสูตรการผลิตยาสีที่ผู้วิจัยได้รับการถ่ายทอดมา โดยมีตะกั่วเป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตที่มีปริมาณร้อยละ 60 - 70 โดยน้ำหนัก

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากองค์ประกอบวัตถุดิบด้วยกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ของกระจกเกรียบทั้ง 3 แหล่ง จึงเป็นไปได้ว่า กระจกเกรียบในการประดับฐานพระศรีศากยมุณี ในพระวิหารหลวง กระจกเกรียบจากหอไตรวัดพระเชตุพนวิมลมังคลารามราชวรมหาวิหาร และกระจกเกรียบประดับพระพุทธรูปไสยาสน์ วัดพระเชตุพนวิมลมังคลารามราชวรมหาวิหาร เป็นชนิดเดียวกัน ทั้งนี้จากการศึกษาข้อมูลได้ว่า งานช่างประดับกระจกเกรียบยุคสมัยเดียวกัน ในสมัยรัชกาลที่ 3 ทั้งศิลปวัตถุ และสถาปัตยกรรม ในวัดสุทัศนเทพวรารามราชวรมหาวิหาร ช่างได้ใช้กระจกเกรียบจากแหล่งผลิตเดียวกันในการประดับตกแต่งงานศิลปกรรม

2. ลักษณะสมบัติของกระจกเกรียบที่ประดิษฐ์ขึ้นใหม่

กระจกเกรียบ ตามสูตรเต็จะยาที่ประดิษฐ์ขึ้น จะมีลักษณะสมบัติ ด้านสี ที่กลมกลืน ใกล้เคียงกับตัวอย่างกระจกเกรียบโบราณ จากวัดสุทัศนเทพวรารามราชวรมหาวิหาร โดยการเปรียบเทียบชิ้นแรก เป็นกระจกเกรียบโบราณ วัดสุทัศนเทพวรารามราชวรมหาวิหาร และชิ้นหลังเป็นกระจกเกรียบประดิษฐ์ใหม่ ตามสูตรหุงกระจกเกรียบตระกูลเต็จะยา (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบสี ตัวอย่างกระจกเกรียบโบราณ ฐานพระศรีศากยมุณี ในพระวิหารหลวง
วัดสุทัศนเทพวรารามราชวรมหาวิหาร

เมื่อนำไปทดสอบความแข็งตามระบบของโมห์ (Mohr's scale of hardness) เท่ากับ 2 - 5 มีความเปราะสูง สามารถตัดได้โดยใช้เหล็กจาร (แบบโบราณ), เพชรตัดกระจกชนิดเขียวหรือเหล็กขีดหัวคาร์ไบด์ และสามารถใช้กรรไกรขนาดเล็ก

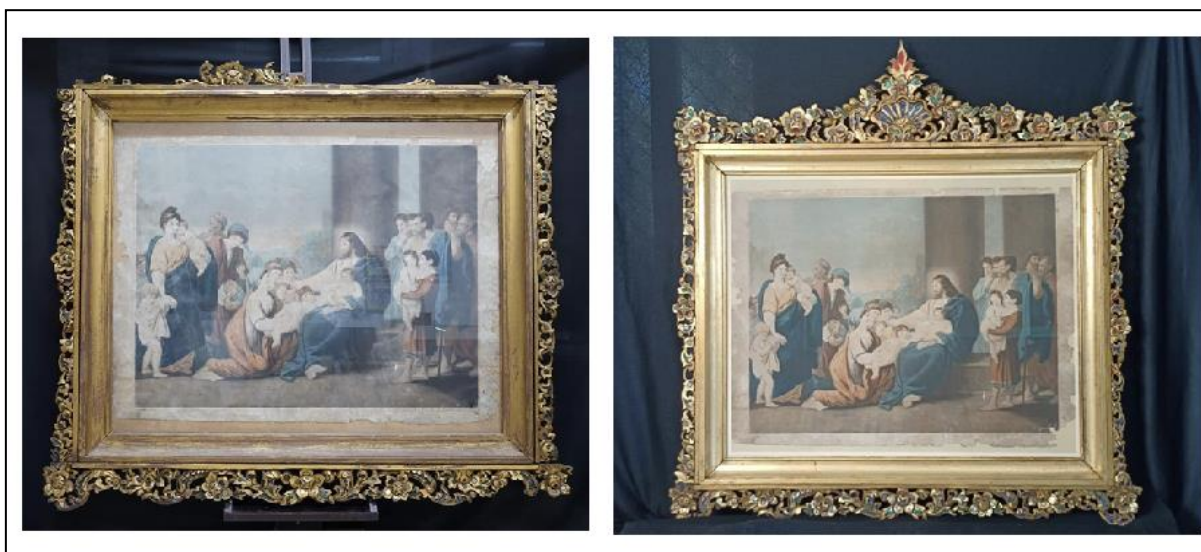
ตัดแต่งขอบเพื่อให้ได้ความโค้ง รูปทรงกลม หรือทรงหยดน้ำได้ดี เพื่อนำไปบูรณะซ่อมแซมกรอบภาพจำหลักไม้ต่อไป (รูปที่ 3)



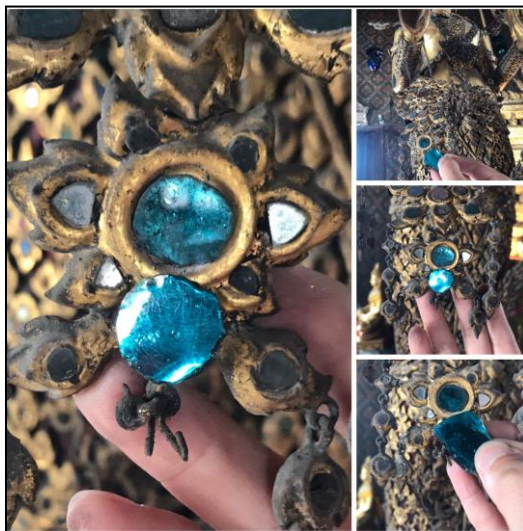
รูปที่ 3 การเปรียบเทียบสีกระจกเกรียบที่ประดิษฐ์ขึ้นใหม่กับกระจกเกรียบของเก่ากรอบภาพจำหลักไม้ลายอย่างเทศ

3. การนำกระจกเกรียบที่ประดิษฐ์ขึ้นไปบูรณะงานศิลปกรรมไทย

การฟื้นฟูวัสดุศาสตร์ในครั้งนี้ กระจกเกรียบที่ประดิษฐ์ขึ้นตามสูตรอย่างโบราณที่ได้สืบทอดมาของตระกูลเต๋จ๊ะยา โดยการใช้ประยุคใช้วิธีทางวิทยาศาสตร์ ร่วมกับองค์ความรู้ทางประวัติศาสตร์เชิงช่าง ทำให้สามารถซ่อมแซมบูรณะกรอบภาพโบราณได้อย่างกลมกลืน ดังรูปที่ 4 และคงคุณค่าทางจิตใจ ด้านวัสดุศาสตร์โดยใช้กระจกเกรียบในการบูรณะที่มีความใกล้เคียงตรงกับของเดิมมากที่สุด นอกจากนี้ยังมีการนำกระจกเกรียบที่ผลิตขึ้นมาใหม่จากฟื้นฟูวัสดุศาสตร์ในการวิจัยนี้เป็นแนวทางในการบูรณะซ่อมแซมกระจกเกรียบศิลปะวัตถุสำคัญของชาติต่อไป (รูปที่ 5)



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบก่อนและหลังการบูรณะอนุรักษ



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบกระจกเกรียบที่ผลิตขึ้นมาใหม่ กับกระจกเกรียบของเก่าสมัยต้นกรุงรัตนโกสินทร์ เพื่อเป็นแนวทางในการบูรณะและอนุรักษ์

สรุปผลการทดลอง

ศึกษางานกระจกเกรียบในประเทศไทย มีความน่าสนใจและสามารถพัฒนาปรับให้เหมาะสมกับการสร้างในปัจจุบันได้ จากการศึกษาตามหลักฐานทางประวัติศาสตร์ งานประดับกระจกในประเทศไทยมีมาตั้งแต่สมัยสุโขทัย ซึ่งเป็นการใช้กระจกประดับบนลวดลายแกะสลักไม้ตามอาคารและสิ่งของเครื่องใช้ทางศาสนา รวมถึงสิ่งของเครื่องใช้ที่เกี่ยวข้องกับสถาบันพระมหากษัตริย์ (Suwanporn, 2002) เป็นวัสดุที่มีความสำคัญในงานศิลปกรรมไทยเป็นอย่างมาก ที่หลายหน่วยงานพยายามฟื้นฟู โดยการประยุกต์กระบวนการทางวิทยาศาสตร์เข้ากับการอนุรักษ์ ในการผลิตกระจกเกรียบขึ้นมาใหม่ที่มีคุณสมบัติเหมือนของเดิมสำหรับการบูรณปฏิสังขรณ์งานศิลปกรรมกระจกเกรียบของไทย

การฟื้นฟูวัสดุศาสตร์ในครั้งนี้ กระจกเกรียบที่ประดิษฐ์ขึ้นตามสูตรอย่างโบราณนี้ ได้สืบทอดกระบวนการผลิตแบบโบราณดั้งเดิมมาจากบรรพบุรุษตระกูลเตชะยา โดยการใช้ประยุกต์ใช้วิธีทางวิทยาศาสตร์ในการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุสำหรับเป็นต้นแบบในการประดิษฐ์ รวมกับองค์ความรู้ทางประวัติศาสตร์ เพื่อให้คงรูปแบบเดิม ทำให้สามารถซ่อมแซมบูรณะงานศิลปกรรมได้อย่างกลมกลืน และคงคุณค่าทางจิตใจด้านวัสดุศาสตร์ โดยใช้กระจกเกรียบในการบูรณะที่มีความใกล้เคียงตรงกับของเดิมมากที่สุด จึงนับว่าเป็นประโยชน์ ด้านงานบูรณะกระจกเกรียบในศิลปกรรมไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งโบราณสถาน โบราณวัตถุสำคัญของชาติ สามารถพัฒนาเป็นวัสดุทดแทนกระจกเกรียบในการบูรณะและอนุรักษ์งานศิลปกรรมกระจกเกรียบที่สร้างร่วมยุคสมัยเดียวกันได้ ทั้งนี้ การศึกษาดังกล่าวยังเป็นกระบวนการใช้ประวัติศาสตร์ศิลปะย้อนรอยแนวความคิด อธิบายความสัมพันธ์จากอดีต มาสร้างสรรค์เพื่อการอนุรักษ์อย่างยั่งยืนต่อไปในอนาคต ที่ภาครัฐควรให้การสนับสนุน (Ratchapon, 2020)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ศักดิ์ชัย สายสิงห์ ผู้ให้ความรู้ด้านประวัติศาสตร์ศิลปะ และวางกรอบแนวคิดการบูรณาการข้ามศาสตร์

งานวิจัยชิ้นนี้ดำเนินการจนสำเร็จในขณะที่ผู้วิจัยกำลังศึกษาหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาประวัติศาสตร์ศิลปะ คณะโบราณคดี มหาวิทยาลัยศิลปากร เป็นส่วนหนึ่งในโครงการ “กรุงเทพมหานครศูนย์กลางงานช่างของแผ่นดิน : ศิลปกรรมกับการอนุรักษ์และพัฒนาเพื่อเพิ่มคุณค่ามรดกทางวัฒนธรรมของชาติ” (กลุ่มเมธีวิจัยอาวุโส) ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ 2563 จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

เอกสารอ้างอิง

- Yupho, D. (1987). *“Your Majesty the King.” Thai art and culture dissemination document*. Bangkok, Thailand: Fine Arts Department.
- Nelson, G. C. (1984). *Ceramics: A Potter's Handbook*. New York: Holt Rinehart and Winston.
- Sarikaputra, P. (1980). *Ancient Technology*. Silpakorn University Bangkok, Thailand.
- Darutana, P. (1999). *Project of study and experiment on making Kriab mirror of the Royal Household*. Bureau of Royal Household; BRH, Bangkok, Thailand.
- Tajaya, R. (2020). *Kriab mirror: cultural innovations based on ancient production for the restoration of Thai art*. National Research Office, Bangkok, Thailand.
- Saising, S. (2008). *Craftsman work in the Phra Nang Klao* (2nd ed.). Bangkok, Thailand, Matichon Publisher.
- Manichot, S. (2002). *General knowledge in Thai art*. Fine Arts Department, Bangkok, Thailand.
- Trégouët, H., Caurant, D., Majéus, O., Charpentier, T., Cormier, L., & Pytalev, D. (2014). Spectroscopic investigation and crystallization study of rare earth metaborate glasses. *Procedia Materials Science*, 7, 131-137.
- Klaisuban, V. (2012). *Study of Thai cracked glass with synchrotron light*. Synchrotron, Nakhon Ratchasima, Thailand Light Research Institute (Public Organization).
- Dharmānanda, W. (2012). *Araheological evidence in Thailand reflecting western Asian' s trade prior to the eleventh century C.E.* [Unpublished doctoral thesis]. Silpakorn University. (in Thai)

Research Article

การใช้สมการคิเวนและปฏิกิริยาจลนศาสตร์ในการประเมินอายุการเก็บผลิตภัณฑ์: กรณีศึกษาในคุกกี้ข้าวกล้องหอมนิล

Temperature coefficient (Q_{10}) and kinetic reaction for the shelf life evaluation: case study of Homnil rice-cookies

อนันทิตา แสงสุริยวงษ์ นภัสสร เพียสุระ นิชาภา กรศักยา และพรรัตน์ สินชัยพานิช*

Anantita Sangsuriyawong, Napassorn Peasura, Nichapa Kornsakya and Pornrat Sinchaipanit*

สถาบันโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล ประเทศไทย

Institute of Nutrition, Mahidol University, Thailand

*E-mail: pornrat.sin@mahidol.ac.th

Received: 28/08/2021; Revised: 12/04/2022; Accepted: 18/08/2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอายุการเก็บของคุกกี้ข้าวกล้องหอมนิล ภายใต้สภาวะเร่งอุณหภูมิและความควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 75% โดยใช้สมการคิเวน (Q_{10}) และปฏิกิริยาจลนศาสตร์ (kinetic reaction) และทำการสุ่มตัวอย่างทุกสัปดาห์นาน 7 สัปดาห์ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพเคมีของคุกกี้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ได้แก่ ค่าความแข็ง (1.4-1.9 kg) ค่าความหืน (TBARs) (2.0-7.5 mg malonaldehyde/kg) ค่าน้ำอิสระ (0.63-0.65) และความชื้น (7.1-8.8 % dry basis) ยกเว้นค่า $L^* a^* b^*$ มีค่าลดลง โดยเฉพาะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 50°C พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าที่ 40°C และ 30°C สอดคล้องกับการลดลงของคะแนนความชอบด้านประสาทสัมผัส ขณะที่จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (1×10^4 cfu/g) โคลิฟอร์ม (<3 MPN/g) และอีโคไล (<3 MPN/g) มีความปลอดภัยสำหรับการบริโภคตลอดอายุการเก็บนาน 7 สัปดาห์ การศึกษานี้ใช้ดัชนีการเสื่อมเสียคุณภาพการหืนของคะแนนการยอมรับด้านประสาทสัมผัส และค่า TBARs เพื่อใช้คำนวณอายุการเก็บคุกกี้ข้าวกล้องหอมนิล พบว่าที่อุณหภูมิ 25°C เมื่อใช้สมการ Q_{10} ที่สภาวะเร่งอุณหภูมิ 30°C และ 40°C จะมีอายุการเก็บ 60 วัน ขณะที่สภาวะเร่งอุณหภูมิ 40°C และ 50°C จะมีอายุการเก็บ 38 วัน และการใช้ปฏิกิริยาจลนศาสตร์จะมีอายุการเก็บ 22 วัน

คำสำคัญ : การทดสอบอายุเก็บภายใต้สภาวะเร่งอุณหภูมิ, คุกกี้ข้าวกล้องหอมนิล, สมการ Q_{10} , ปฏิกิริยาจลนศาสตร์

Abstract

This study aimed to determine the shelf life of Homnil rice-cookies under accelerated temperatures and humidity control 75% by using Q_{10} and kinetic reaction. The cookies were random sampling every 1 wk for 7 wks. Changes in physicochemical quality of cookies sample was significantly increased ($p < 0.05$) when increasing storage time; hardness

(1.4-1.9 kg), rancidity (TBARs) (2.0-7.5 mg malonaldehyde/kg), water activity (0.63-0.65) and moisture (7.1-8.8 % dry basis) except for color value L^* a^* b^* was declined. These results were clearly found in high accelerated temperature at 50°C than 40°C and 30°C. Approving to the reduction scores of sensory evaluation was obtained. Whereas the total plate count (1×10^4 cfu/g), Coliform (<3 MPN/g) and *E.coli* (<3 MPN/g) were lower and safety for consumption over storage period for 7 wks. In this study, the rancidity index by using sensory score and TBARs value were chosen for quality deterioration to calculate the shelf-life of Homnil-rice cookies. At storage temperature 25°C, the shelf-life of Homnil-rice cookies was around 60 days and 38 days when calculated by Q_{10} at accelerated temperature at 30°C and 40°C; and 40°C and 50°C, respectively. A shelf-life of cookies was about 22 days when evaluated by kinetic reaction.

Keywords : accelerated shelf-life testing, Homnil rice-cookies, Q_{10} equation, kinetic reaction

บทนำ

ขนมอบเป็นผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมบริโภคที่ได้รับความนิยมสูงในกลุ่มผู้บริโภคทุกวัย เนื่องจากมีรสชาติอร่อย มีความหลากหลายของชนิดผลิตภัณฑ์ และให้คุณค่าสารอาหารที่มีประโยชน์ ปัจจุบันมีการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ขนมอบด้วยการเติมธัญชาติ ผัก ผลไม้ และใยอาหาร เพื่อประโยชน์ต่อสุขภาพและตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพ รวมทั้งอาจมีการลดปริมาณน้ำตาล ไขมัน และกลูเตนในสูตร สำหรับกลุ่มผู้บริโภคที่เป็นโรคอ้วน โรคเบาหวาน โรคไขมันสูง และแพ้กลูเตน

แป้งข้าวกล้องหอมนิล เป็นแป้งข้าวที่ผลิตได้จากข้าวกล้องหอมนิลที่ผ่านการโม่แห้ง และทำให้เม็ดแป้งมีขนาดเล็กมากกว่า 100 mesh ทำให้แป้งข้าวกล้องหอมนิลมีคุณลักษณะคุณภาพและคุณค่าทางโภชนาการใกล้เคียงกับแป้งข้าวกล้องหอมนิล คือ มีสีม่วงเข้ม มีกลิ่นหอมข้าว ไม่มีโปรตีนกลูเตน มีใยอาหาร และสารต้านอนุมูลอิสระสูง เนื่องจากสารแอนโทไซยานิน (Kapcum et al., 2016) และยังมีวิตามินบี วิตามินอี แคลเซียม และแมกนีเซียมสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวขาว (Halee et al., 2020) นอกจากนี้ประโยชน์เชิงสุขภาพแล้วยังมีผลดีในเชิงป้องกันความเสี่ยงของกลุ่มโรคเมตาบอลิกด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้แป้งข้าวกล้องหอมนิลนิยมนำมาใช้แทนแป้งสาลีเพื่อเป็นสารเสริมสุขภาพในผลิตภัณฑ์อาหารหลากหลายชนิด รวมทั้งผลิตภัณฑ์ขนมอบ เช่น คุกกี้ ขนมปัง มัฟฟิน และเค้ก (Rodmui & Jitwaropas, 2007; Sangkaeo & Chomkhuntod, 2015) เป็นต้น

พระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ. 2522 ประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 237 เรื่อง การแสดงฉลากของอาหารพร้อมปรุงและอาหารสำเร็จรูปที่พร้อมบริโภคทันที (Ministry of public health, 2001) เพื่อให้ผู้บริโภคทราบว่าผลิตภัณฑ์นั้นๆ สามารถเก็บรักษาไว้ตามสภาวะที่กำหนดได้นานเท่าไร โดยยังมีคุณภาพและความปลอดภัยในการบริโภค จึงเป็นความรับผิดชอบของผู้ประกอบการหรือผู้ผลิตอาหารที่จำเป็นต้องระบุนอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์บนฉลากอาหาร ซึ่งทำได้โดยการศึกษาหรือการทดสอบบนพื้นฐานตามหลักการทางวิทยาศาสตร์

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออายุการเก็บของผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ ชนิดอาหาร ส่วนประกอบ กระบวนการแปรรูป ชนิดบรรจุภัณฑ์ และสภาพแวดล้อมการเก็บรักษา ทำให้ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดมีความจำเพาะของอายุเก็บที่อาจแตกต่างกัน เช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์คุกกี้ ความแตกต่างของส่วนประกอบวัตถุดิบ สุนัขลักษณะการผลิต อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ออบ และชนิดบรรจุภัณฑ์ อาจส่งผลให้คุกกี้แต่ละชนิดมีอายุการเก็บรักษาที่จำเพาะขึ้นกับผลิตภัณฑ์ ตลอดจนมีลักษณะการเสื่อมเสียหรือการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของคุกกี้ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่หรือมีการปรับปรุงสูตรใหม่ควรมีการทดสอบหาอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ที่ถูกต้อง

วิธีทดสอบอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารตามข้อเสนอแนะในการเก็บรักษาแบบปกติ มักมีข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาที่ค่อนข้างนานในการทดสอบ สถานที่หรือพื้นที่ที่ใช้เก็บตัวอย่าง อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ และเจ้าหน้าที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้โรงงานอุตสาหกรรมอาหารทั่วไปมักผลิตสินค้าหลากหลายชนิดและหลายรูปแบบ เพื่อเพิ่มส่วนแบ่งและมูลค่าทางการตลาด และด้วยข้อบังคับทางกฎหมายเรื่องการระบุอายุเก็บสินค้าบนฉลากผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการทดสอบอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในสภาวะเร่งอุณหภูมิจึงเป็นทางเลือกสำหรับผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมอาหาร ที่สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการทดสอบ นอกจากนี้ยังมีหน่วยงานที่ให้บริการทดสอบอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ทั้งภาคราชการและเอกชน เพื่อช่วยสนับสนุนภาครัฐและเป็นทางเลือกกรณีที่ผู้ผลิตไม่สามารถทดสอบอายุการเก็บผลิตภัณฑ์ได้

การใช้เทคนิค Q_{10} และหรือปฏิกิริยาจลนศาสตร์ (kinetic reaction) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการประเมินอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารภายใต้สภาวะเร่ง (accelerated shelf life testing) (Lu & Xu, 2009; Manzocco et al., 2020; Thamee et al., 2018) ซึ่งทั้ง 2 วิธีจะมีการประเมินผลและใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อหาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่ต่างกัน ปัจจัยสำคัญที่ต้องกำหนดในการทดสอบอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารภายใต้สภาวะเร่ง คือสภาพแวดล้อมในการเก็บรักษา ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และการสัมผัสแสง ซึ่งควรสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมจริงที่วางจำหน่ายหรือเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ตลอดจนช่วงระยะเวลาการสุ่มตัวอย่าง การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพเคมี คุณภาพด้านประสาทสัมผัส และการเสื่อมเสียคุณภาพด้านจุลินทรีย์ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีการเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์อาหาร ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จึงเป็นที่มาของวัตถุประสงค์การศึกษานี้ คือ การทดสอบอายุการเก็บรักษาคุกกี้ข้าวกล้องหอมนิลภายใต้สภาวะเร่งอุณหภูมิ โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้สมการ Q_{10} และปฏิกิริยาจลนศาสตร์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การผลิตคุกกี้และแผนการสุ่มตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างคุกกี้ข้าวกล้องหอมนิล ซึ่งมีส่วนประกอบแป้งข้าวกล้องหอมนิล 41.5 % เนย 25 % น้ำตาล 23 % ไข่ 10% ผงฟู 0.3% และเกลือ 0.2% คัดแปลงจากสูตรของ Gouveia et al. (2007) ขั้นตอนแรกให้ตีเนยและน้ำตาลให้ขึ้นฟู จากนั้นจึงเติมไข่และตีผสมต่อจนเข้ากัน แล้วจึงค่อยๆเติมแป้งข้าวกล้องหอมนิลที่ผสมกับผงฟูและเกลือป่น คนส่วนผสมเบาๆ ให้เข้ากัน ตักส่วนผสมคุกกี้หยอดบนถาดอลูมิเนียมให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-2.5 นิ้ว (น้ำหนัก 5 กรัมต่อชิ้น) นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 180°C นาน 25-30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ก่อนบรรจุในถุงพลาสติกชนิดพีพี (PP, polypropylene) 1 ชั้น/ถุง และปิดผนึก วิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน และใยอาหาร (AOAC 2019) รวมทั้งวิตามินเอ (Kangsadalampai & Sungpuag, 1984) วิตามินบี 1 และบี 2 แคลเซียม และเหล็ก (AOAC 2019)

นำตัวอย่างคุกกี้ข้าวกล้องหอมนิลที่บรรจุถุงพลาสติก มาเก็บรักษาไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 30°C 40°C และ 50°C และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 75% (constant climate chambers, Binder, KFB-S 270; German) สุ่มตัวอย่างทุกๆ 1 สัปดาห์ เป็นเวลานาน 7 สัปดาห์ หรือกระทั่งตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงหรือเสื่อมเสียไม่เป็นที่ยอมรับ นำตัวอย่างมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพเคมี ดัชนีคุณภาพด้านจุลินทรีย์ และคุณภาพทางประสาทสัมผัส

2. ดัชนีการเสื่อมเสียคุณภาพ

2.1 คุณภาพทางกายภาพเคมี ได้แก่ การวัดเนื้อสัมผัสโดยประเมินความแข็ง (Hardness) ด้วยเครื่อง Texturometer (TA.XT-Plus, Stable micro system, UK) คัดแปลงวิธีจาก Hamdani et al. (2020) โดยใช้หัววัด HDP/3PB ความเร็วในการกด 3 มิลลิเมตรต่อวินาที วัดซ้ำจำนวน 5 ตัวอย่าง การวัดค่าความหืน (TBARs, thiobarbituric acid reactive substances) โดยหั่น

ตัวอย่าง 1 กรัม แล้วสกัดด้วยสารละลาย TBA (2% thiobarbituric acid ในกรดแอสซิติคเข้มข้น 90%) แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 95°C นาน 10 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงโดยใช้ความเร็วรอบ 4000 g นาน 20 นาที แยกสารละลายส่วนใสไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร คำนวณค่า TBARs (mg malonaldehyde/kg) จากกราฟมาตรฐานมาลอนแอลดีไฮด์ (malonaldehyde) การวัดค่าสี CIE L* (lightness), a* (redness) และ b* (yellowness) ด้วยเครื่อง Color spectrophotometer (ColorFlex EZ, USA) ใช้แหล่งแสงมาตรฐาน D65/10° และแสดงค่าสี CIE L* a* b* ค่า L= 0 (สีดำ) L=100 (สีขาว) ค่า a เป็น + (สีแดง) a เป็น - (สีเขียว) และ b เป็น + (สีเหลือง) b เป็น - (สีน้ำเงิน) การวัดค่าน้ำอิสระ (water activity) โดยใช้เครื่อง Water activity meter (Novasina, model ms 1, Switzerland) ที่อุณหภูมิ 25°C และปริมาณความชื้น (AOAC, 2019) โดยการอบแห้ง ตัวอย่างด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C นาน 6-8 ชั่วโมง หรือกระทั่งน้ำหนักคงที่ ที่ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น (desiccator) ชั่ง และบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างก่อนและหลังอบ คำนวณหาความชื้นจากสมการที่ (1)

$$\text{ปริมาณความชื้น (\% dry basis)} = \frac{\text{น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง} - \text{น้ำหนักสุดท้ายของตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักสุดท้ายของตัวอย่าง}} \times 100 \quad (1)$$

2.2 คุณภาพด้านจุลินทรีย์ ได้แก่ จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (TPC, total plate count) โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ standard plate count agar (PCA) ด้วยวิธี pour plate และบ่มที่อุณหภูมิ 35°C นาน 48 ชั่วโมง รายงานผลเป็น cfu/g และตรวจเชื้อ Coliform และ *E.coli* ตามวิธีมาตรฐานของ FDA's Bacteriological Analytical Manual (Food and Drug Administration, 2020) รายงานผลเป็น MPN/g

2.3 คุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยผู้ทดสอบชิมที่มีความชำนาญทางการประเมินด้านประสาทสัมผัสและชอบรับประทานผลิตภัณฑ์กึ่งแข็ง (n=6) ด้วยวิธี 5-point hedonic scale คะแนน 5 = ชอบมาก 4=ชอบ 3=เฉยๆ 2=ไม่ชอบ และ 1=ไม่ชอบมาก ประเมินความชอบในด้านกลิ่นรส กลิ่นหืน เนื้อสัมผัส สี และความชอบรวม โดยคะแนนความชอบของลักษณะคุณภาพใดมีค่าต่ำกว่า 3 หมายถึงไม่ยอมรับ

3. การประเมินอายุเก็บของผลิตภัณฑ์ในสภาวะเร่งอุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพและตัวชี้วัดดัชนีการเสื่อมเสียที่เหมาะสมในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องจะ ถูกนำมาพิจารณาใช้ประเมินอายุการเก็บรักษาโดยใช้สมการ Q_{10} และปฏิกิริยาจลนศาสตร์

3.1 สมการ Q_{10}

ค่า Q_{10} หมายถึง อัตราส่วนของค่าคงที่ ณ อุณหภูมิที่มีความแตกต่างกัน 10°C ดังสมการที่ (2) (Mizrahi, 2004)

$$Q^{\Delta T} = \frac{\theta_{s(T)}}{\theta_{s(T+\Delta T)}} \quad (2)$$

โดยที่

$\theta_{s(T)}$ คือ อายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ T (°C)

$\theta_{s(T+10)}$ คือ อายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ T + 10 (°C)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่จะทำนายกับอุณหภูมิ T

3.2 ปฏิกิริยาจลนศาสตร์

ให้ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของข้อมูล การเปลี่ยนแปลงคุณภาพหรือดัชนีการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ ในระหว่างการเก็บรักษาแต่ละช่วงระยะเวลาที่มีการแปรรูปหรือการเก็บรักษา จากนั้นให้พิจารณาอันดับของปฏิกิริยา (reaction order) ดังสมการที่ (3) ถึง (5) จากความสัมพันธ์ของกราฟเส้นตรงร่วมกับความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนอง (R-Squared, R^2) แก่สมการจะได้ค่า k

$$\text{อันดับปฏิกิริยา } n=0; \quad dC_A/dt = k \quad (3)$$

$$\text{อันดับปฏิกิริยา } n=1; \quad dC_A/dt = -k C_A \quad (4)$$

$$\text{อันดับปฏิกิริยา } n=2; \quad 1/C_A = kt + 1/C_{A0} \quad (5)$$

โดยที่

C_{A0} = ความเข้มข้นของส่วนประกอบที่สนใจที่เวลาเริ่มต้น

C_A = ความเข้มข้นของส่วนประกอบที่สนใจที่เวลา t

t = เวลา

k = อัตราเร็วของปฏิกิริยา

พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln k$ ของทุกอุณหภูมิการเก็บรักษา (แกน y) กับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์เคลวิน ($1/T$) (แกน x) เพื่อหาค่า E_a จากความชันของกราฟ (slope = $-E_a/R$) แล้วนำค่าที่ได้มาหาคำนวณหาค่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ (k) โดยใช้สมการ Arrhenius ดังสมการที่ (6) ในการคำนวณอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิ (หน่วยเคลวิน) ที่สนใจ ให้แทนค่า k ในสมการของอันดับปฏิกิริยา (อันดับ 0, 1 หรือ 2) ที่เลือก และแก้สมการหาค่า t จะได้อายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ (Taoukis et al., 1997)

$$k = k_0 e^{-E_a/RT} \quad (6)$$

โดยที่

k = ค่าคงที่อัตรา (rate constant) ณ อุณหภูมิที่กำหนด

E_a = พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา (J/mol)

R = ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.314 J/mol K

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์เคลวิน (K)

4. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การศึกษานี้วางแผนการทดลองแบบ Completely randomized design (CRD) และวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) ส่วนการทดสอบทางประสาทสัมผัสใช้แผนการทดลองแบบ Randomized completely block design (RCBD) วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสิ่งทดลองโดยใช้วิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การพัฒนาคุกกี้แป้งข้าวกล้องหอมนิลมีจุดประสงค์เพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกสุขภาพ โดยเฉพาะผู้ที่แพ้งู๊ดเดนหรือโปรตีนแป้งสาลี และยังเพิ่มคุณประโยชน์ของใยอาหารรวมทั้งแร่ธาตุและวิตามินที่จำเป็นต่อร่างกายจากข้าวกล้องหอมนิล คุกกี้ข้าวกล้องหอมนิลมีลักษณะปรากฏทั่วไป คือ มีสีน้ำตาลเข้ม เนื้อสัมผัสนุ่มและเหนียว และมีกลิ่นหอมคล้ายข้าว คุกกี้ข้าวกล้องหอมนิล 100 กรัม มีคาร์โบไฮเดรต 54 กรัม ไขมัน 26 กรัม โปรตีน 8.5 กรัม และมีใยอาหารสูงถึง 9 กรัม ขณะที่คุกกี้แป้งสาลี (สูตรควบคุม) มีใยอาหาร 4 กรัม นอกจากนี้คุกกี้ข้าวกล้องหอมนิลยังมีวิตามินเอ 78 ไมโครกรัม วิตามินบี 1 เท่ากับ 0.11 มิลลิกรัม วิตามินบี 2 เท่ากับ 0.05 มิลลิกรัม แคลเซียม 74 มิลลิกรัม และเหล็ก 3.1 มิลลิกรัม ซึ่งมากกว่าตัวอย่างคุกกี้สูตรควบคุม 2-3 เท่า (ไม่ได้แสดงข้อมูล)

1. การเสื่อมเสียคุณภาพของคุกกี้ข้าวหอมนิลระหว่างการเก็บรักษา

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพเคมี

การวัดค่าความแข็ง (hardness) ของคุกกี้พบว่ามีความนุ่มเพิ่มขึ้นตามอายุการเก็บรักษาที่นานขึ้น และยังสัมพันธ์กับอุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ค่าความแข็งของคุกกี้วันที่ 0 มีค่าเท่ากับ 1.38 kg และเพิ่มขึ้นโดยมีค่าระหว่าง 1.8-1.9 kg เมื่อเก็บรักษาไว้เป็นเวลา 7 สัปดาห์ ในสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิ 30°C 40°C และ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ 75% (Table 1) ค่าความแข็งของคุกกี้ที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นผลมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช ซึ่งเกี่ยวข้องกับความเก่า (staling) ของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งเป็นผลจากการเกิดผลึกของสตาร์ช (crystallization) ทำให้ผลิตภัณฑ์สูญเสียความสามารถในการอุ้มน้ำ และส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเนื้อสัมผัสที่ด้อยลง (Cauvain & Young, 2010) อย่างไรก็ตามการเกิดรีโทรเกรเดชันอาจเป็นผลได้ในบางผลิตภัณฑ์ เช่น การลดความเหนียวของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยว และทำให้สตาร์ชทนต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ (resistance starch) การเกิดรีโทรเกรเดชันของผลิตภัณฑ์ขนมอบสามารถแก้ไขได้โดยนำผลิตภัณฑ์ไปอบให้ความร้อนใหม่ (re-heat) แต่ก็ต้องพิจารณาลักษณะคุณภาพอื่นของผลิตภัณฑ์ร่วมด้วย

ความหืนของไขมัน จากการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลง TBARs ของคุกกี้ข้าวกล้องหอมนิล พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่ออายุการเก็บรักษานานขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิการเก็บรักษาสูงขึ้น ตัวอย่างคุกกี้ข้าวหอมนิลมีค่า TBARs เริ่มต้นประมาณ 2 mg malonaldehyde/kg และเพิ่มขึ้นเป็น 6.85, 7.34 และ 7.49 mg malonaldehyde/kg เมื่อเก็บรักษาไว้นาน 7 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิ 30°C 40°C และ 50°C ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ตามลำดับ (Table 1) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Gupta et al. (2011) ได้ศึกษาความหืนของคุกกี้ข้าวบาร์เลย์ที่บรรจุในถุง PEP และถุง Met-polyester ด้วยการวัดค่า TBARs พบว่าค่า TBARs เพิ่มขึ้นเมื่ออายุการเก็บรักษานานขึ้น 6 เดือน โดยเฉพาะที่อุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงกว่า (26°C และ 37°C) การเพิ่มขึ้นของค่า TBARs เป็นผลจากปฏิกิริยาออกซิเดชันไขมันที่มากขึ้น ซึ่งสารมาลอนแอลดีไฮด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการแตกตัวของสารเปอร์ออกไซด์และแอลดีไฮด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน และเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดกลิ่นหืนในอาหาร (Gomes et al., 2003; Rattanapanone, 2014; Singh & Cadwallader, 2004) นอกจากนี้ปัจจัยของสภาวะการเก็บผลิตภัณฑ์ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และระยะเวลาการเก็บรักษา ยังเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (Márquez-Ruiz & Dobarganes, 2005) การหืนของไขมันในอาหารยังอาจเกิดขึ้นได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolytic rancidity) โดยมีเอนไซม์ไลเปส (lipase enzymes) และอุณหภูมิสูงเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยา ปกติการหืนในผลิตภัณฑ์อาหารมักมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับการปฏิเสธการยอมรับผลิตภัณฑ์ เนื่องจากกลิ่นที่ผิดปกติหรือแปลกปลอมและยังอนุมานได้ว่าผลิตภัณฑ์นั้นถูกเก็บรักษาไว้เป็นเวลานานจนไม่เหมาะสมที่จะนำมาบริโภค ตลอดจนความเสี่ยงอันตรายของสารที่อาจเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันที่มีผลต่อสุขภาพ (Kanner, 2007)

การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและค่าน้ำอิสระของคุกกี้ข้าวกล้องหอมนิล พบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออายุการเก็บรักษานานขึ้น รวมทั้งที่อุณหภูมิการเก็บรักษาสูงขึ้น โดยมีความชื้นเริ่มต้น 7.1% และเพิ่มขึ้นเป็น 8.8% 8.6% และ 8.7% เมื่อเก็บรักษาไว้นาน 7 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 30°C 40°C และ 50°C ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ตามลำดับ ส่วนค่าน้ำอิสระของตัวอย่างคุกกี้ข้าวกล้องหอมนิลที่อายุเก็บ 0 สัปดาห์มีค่าเท่ากับ 0.59 เมื่อเก็บไว้เป็นเวลานาน 7 สัปดาห์พบว่าแต่ละอุณหภูมิของการเก็บรักษาไม่มีความแตกต่างของค่าน้ำอิสระมากนัก โดยมีค่าน้ำอิสระระหว่าง 0.63-0.65 (Table 1) ความชื้นของคุกกี้ที่สูงขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลานานขึ้นอาจเป็นผลจากการที่ถุงพลาสติก PP มีคุณสมบัติยอมให้ความชื้นจากภายนอกแพร่ผ่านไปยังผลิตภัณฑ์ได้ (Galíć et al., 2009) โดยสัมพันธ์กับค่าน้ำอิสระที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความชื้นในผลิตภัณฑ์คุกกี้กลับมีผลตรงข้ามกับเนื้อสัมผัสของคุกกี้ที่มีความแข็งและร่วนมากขึ้น เมื่อเก็บรักษาไว้นานขึ้น อธิบายได้ว่าผลของการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช อาจเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเนื้อสัมผัสของคุกกี้ข้าวกล้องหอมนิลมากกว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น

การเก็บรักษาคุกกี้เป็นเวลานาน 7 สัปดาห์ ทุกอุณหภูมิการเก็บรักษา 30°C 40°C และ 50°C ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% พบว่าคุกกี้มีค่าความสว่าง L^* เริ่มต้น 31.8 และลดลงเป็น 29.6 ค่าสีแดง a^* เริ่มต้น 5.6 และลดลงเป็น 3.9 ส่วนค่าสีเหลือง b^* เริ่มต้น 11.6 และลดลงเป็น 9.1 (Table 1) เนื่องจากธรรมชาติของคุกกี้ข้าวกล้องหอมนิลมีสีน้ำตาลเข้ม เพราะเม็ดสีแอนโทไซยานินที่มีสีม่วงเข้มในแป้งข้าวหอมนิลที่ใช้เป็นส่วนประกอบวัตถุดิบในการเตรียมคุกกี้ แม้ว่าการเก็บรักษาเป็นเวลานานขึ้นจะส่งผลให้คุกกี้มีสีน้ำตาลเข้มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์และกรดอะมิโน โดยมีอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของค่าสี L^* a^* b^* (Table 1) แต่การเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นไม่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า

การติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพเคมีของคุกกี้ข้าวหอมนิล ตลอดอายุการเก็บรักษาที่กำหนดสภาวะควบคุมที่แตกต่างกัน พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าคุณภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตามแม้ผลิตภัณฑ์จะมีการเปลี่ยนแปลงและมีแนวโน้มการเสื่อมเสียคุณภาพมากขึ้นตามอายุการเก็บรักษาที่นานขึ้น โดยเฉพาะการเก็บที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่ก็ไม่มีเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพที่ใช้ชี้ถึงค่าคุณภาพดังกล่าวว่าอยู่ในเกณฑ์ยอมรับหรือไม่ยอมรับ ทำให้ยากต่อการระบุระยะเวลาเก็บสุดท้ายที่ผลิตภัณฑ์เสื่อมเสีย โดยเฉพาะคุกกี้ซึ่งเป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์กึ่งแห้งที่มีค่าความชื้นและค่าน้ำอิสระค่อนข้างต่ำ ทำให้มีการเสื่อมเสียได้ช้ากว่ากลุ่มอาหารที่มีค่าความชื้นและค่าน้ำอิสระสูงกว่า เนื่องจากสภาวะดังกล่าวสามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

สอดคล้องกับผลวิเคราะห์คุณภาพจุลินทรีย์ โดยใช้ดัชนีการเปลี่ยนแปลงจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (total plate count) โคลิฟอร์ม (coliform) และอีโคไล (*E. coli*) แสดงผลใน Table 2 พบว่าตลอดอายุการเก็บรักษาที่กำหนด 7 สัปดาห์ ในสภาวะควบคุมอุณหภูมิที่ต่างกัน คือ 30°C, 40°C และ 50°C ความชื้นสัมพัทธ์ 75% จุลินทรีย์ทั้งหมดมีจำนวน $< 1 \times 10^4$ cfu/g โคลิฟอร์มและอีโคไลมีจำนวน < 3 MPN/g ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยสำหรับการบริโภค ตามประกาศกระทรวงฉบับที่ 416 พ.ศ. 2563 (Ministry of public health, 2020)

เนื่องจากผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะของคุณภาพที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นกับปัจจัยสำคัญต่างๆ ได้แก่ วัตถุดิบ ขั้นตอนการผลิต และบรรจุภัณฑ์ ทำให้การพิจารณาการเสื่อมเสียคุณภาพหรืออายุการเก็บรักษาของแต่ละผลิตภัณฑ์จึงต้องเลือกดัชนีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพที่เหมาะสมกับแต่ละผลิตภัณฑ์ ซึ่งในการศึกษานี้ได้มีการทดสอบการยอมรับผลิตภัณฑ์ทางด้านประสาทสัมผัส ผลแสดงดัง Table 3 คุกกี้ข้าวกล้องหอมนิลที่อายุการเก็บ 0 วัน มีคะแนนความชอบในด้านกลิ่นรส เนื้อสัมผัส สี และความชอบโดยรวม อยู่ในระดับชอบถึงชอบมาก (คะแนน 4.67-5.00) โดยคุกกี้มีกลิ่นหอมคล้ายข้าว และมีกลิ่นเนยอ่อนๆ มีรสหวานและเค็มพอดี รวมทั้งไม่มีกลิ่นหืนหรือกลิ่นแปลกปลอม แต่ในระหว่างการเก็บรักษาตัวอย่าง

คูกี้เป็นเวลานานขึ้นพบว่าการเปลี่ยนแปลงคะแนนการยอมรับด้านคุณภาพกลิ่นรสลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ทุกสภาวะอุณหภูมิโดยเฉพาะที่อุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงกว่า เนื่องจากกลิ่นหอมคล้ายข้าวลดลงและไม่มีกลิ่นเนย จนกระทั่งไม่มีกลิ่นหอมและมีกลิ่นอับแฉะ ที่สำคัญคือการมีกลิ่นหืนหรือกลิ่นแปลกปลอมของคูกี้ที่ข้าวกล้องหอมนิล ส่วนเนื้อสัมผัสของคูกี้ก็เริ่มมีความร่วนมากขึ้นและการเกาะตัวลดลง ซึ่งถือเป็นอีกดัชนีคุณภาพที่มีผลต่อการไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังสังเกตว่าตัวอย่างคูกี้จะมีสีเข้มขึ้นเล็กน้อยที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 50°C ตามด้วยที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 40°C และ 30°C ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าสี $L^*a^*b^*$ (Table 1) เกณฑ์ภาพรวมของคะแนนความชอบทางด้านประสาทสัมผัส ($n=6$) โดยผู้ทดสอบที่เป็นนักวิจัยและเชี่ยวชาญในการทดสอบด้านประสาทสัมผัสและชอบรับประทานคูกี้ โดยพิจารณาจากคุณลักษณะคุณภาพสำคัญของคูกี้ ได้แก่ กลิ่นรส กลิ่นหืน เนื้อสัมผัส และสี ร่วมกับการใช้เกณฑ์คะแนนยอมรับ

ผลการศึกษาพบว่าเกิดการเกิดกลิ่นหืนของคูกี้ที่ข้าวกล้องหอมนิล มีความไวในการเสื่อมเสียมากกว่าคุณภาพด้านประสาทสัมผัสลักษณะอื่น และยังเป็นปัจจัยสำคัญต่อการลดลงของคะแนนการยอมรับรวม (Table 3) สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ค่าความหืน TBARs (Table 1) ที่แสดงไว้ข้างต้น โดยทุกสภาวะการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์มีจำนวนจุลินทรีย์ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ทำให้มั่นใจได้ว่าผลิตภัณฑ์มีความปลอดภัยในการบริโภค

Table 1 Physico-chemical quality of Homnil rice-cookie during storage at temperature 30, 40 and 50 °C and a relative humidity of 75% for 7 weeks

Qualities	Temp °C	Storage time, wk							
		0	1	2	3	4	5	6	7
Hardness (kg)	30	1.380±0.43 ^a	1.560±0.23 ^b	1.591±0.44 ^c	1.610±0.43 ^d	1.617±1.03 ^d	1.722±0.46 ^c	1.784±0.84 ^f	1.792±0.75 ^f
	40	1.380±0.43 ^a	1.564±1.49 ^b	1.589±0.53 ^c	1.623±0.23 ^d	1.618±0.57 ^d	1.732±0.56 ^c	1.791±0.62 ^f	1.890±0.54 ^g
	50	1.380±0.43 ^a	1.613±0.83 ^b	1.635±0.29 ^c	1.642±0.38 ^{cd}	1.653±0.56 ^d	1.759±0.31 ^c	1.804±0.73 ^f	1.870±0.62 ^g
TBARs (mg malonaldehyde/kg)	30	2.04±0.34 ^a	3.99±0.32 ^b	4.20±0.08 ^c	4.46±0.17 ^d	5.03±0.09 ^c	5.38±0.09 ^c	6.27±0.12 ^f	6.85±0.08 ^g
	40	2.04±0.34 ^a	4.83±0.42 ^b	5.90±0.28 ^c	6.32±0.24 ^d	6.69±0.47 ^c	6.92±0.26 ^f	7.12±0.32 ^g	7.34±0.21 ^h
	50	2.04±0.34 ^a	4.94±0.26 ^b	6.76±0.15 ^c	6.90±0.28 ^d	7.15±0.35 ^c	7.32±0.09 ^f	7.43±0.15 ^g	7.49±0.09 ^h
a _w	30	0.593±0.01 ^a	0.603±0.00 ^b	0.617±0.00 ^c	0.611±0.01 ^d	0.620±0.01 ^{ce}	0.623±0.00 ^c	0.631±0.00 ^f	0.643±0.01 ^g
	40	0.593±0.01 ^a	0.608±0.00 ^b	0.606±0.00 ^b	0.601±0.00 ^c	0.617±0.00 ^d	0.638±0.01 ^c	0.635±0.00 ^c	0.645±0.01 ^f
	50	0.593±0.01 ^a	0.618±0.01 ^b	0.613±0.00 ^c	0.624±0.00 ^d	0.630±0.00 ^c	0.642±0.00 ^f	0.647±0.00 ^g	0.651±0.00 ^h
Moisture (%)	30	7.11±0.72 ^a	7.60±0.02 ^b	7.36±0.18 ^c	7.83±0.12 ^d	8.38±0.12 ^c	8.29±0.17 ^f	8.81±0.25 ^g	8.87±0.18 ^h
	40	7.11±0.72 ^a	7.47±0.14 ^b	7.67±0.23 ^c	7.39±0.23 ^d	8.15±0.23 ^c	8.19±0.42 ^f	8.61±0.01 ^g	8.65±0.04 ^h
	50	7.11±0.72 ^a	7.64±0.57 ^b	7.77±0.10 ^c	7.66±0.21 ^b	8.20±0.08 ^d	8.32±0.39 ^c	8.73±0.16 ^f	8.78±0.08 ^g
L* value	30	31.81±0.15 ^a	31.62±0.25 ^b	31.42±0.50 ^c	31.35±0.85 ^d	30.94±0.83 ^c	30.27±0.53 ^f	30.08±0.16 ^g	29.92±0.45 ^h
	40	31.81±0.15 ^a	31.57±0.38 ^b	31.40±1.62 ^c	31.28±0.73 ^d	31.02±1.30 ^c	30.74±0.42 ^f	30.56±1.28 ^g	29.87±0.27 ^h
	50	31.81±0.15 ^a	31.48±0.17 ^b	31.25±0.39 ^c	31.02±0.33 ^d	30.48±1.39 ^c	30.45±0.45 ^c	29.56±1.04 ^f	29.41±0.16 ^g
a* value	30	5.60±0.02 ^a	5.13±0.27 ^b	5.02±0.35 ^c	4.56±0.19 ^d	4.27±0.40 ^c	4.09±0.35 ^f	3.94±0.34 ^g	3.86±0.27 ^h
	40	5.60±0.02 ^a	5.08±0.34 ^b	4.98±0.37 ^c	4.62±0.33 ^d	4.32±0.33 ^c	4.12±0.42 ^f	3.86±1.09 ^g	3.74±0.35 ^h
	50	5.60±0.02 ^a	5.02±0.20 ^b	4.87±0.19 ^c	4.61±0.35 ^d	4.24±0.36 ^c	4.18±0.13 ^f	3.90±0.41 ^g	3.81±0.27 ^h
b* value	30	11.69±0.74 ^a	10.63±0.43 ^b	10.14±0.66 ^c	9.83±0.34 ^d	9.64±0.57 ^c	9.27±0.37 ^f	9.15±0.60 ^g	9.08±0.43 ^h
	40	11.69±0.74 ^a	10.57±0.27 ^b	10.10±1.26 ^c	9.75±0.27 ^d	9.69±1.34 ^c	9.31±0.33 ^f	9.12±1.96 ^g	9.03±0.35 ^h
	50	11.69±0.74 ^a	10.47±0.17 ^b	10.07±0.11 ^c	9.80±0.18 ^d	9.62±0.78 ^c	9.30±0.17 ^f	9.08±1.06 ^g	8.89±0.29 ^h

The different alphabets in the same row mean a significant statistical difference (p<0.05).

Table 2 Microbiological quality of Homnil rice-cookie during storage at temperature 30, 40 and 50 °C and a relative humidity of 75% for 7 weeks

Microbiological	Temp °C	Storage time, wk							
		0	1	2	3	4	5	6	7
Total plate count (cfu/g)	30	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴
	40	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴
	50	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴
Coliform (MPN/g)	30	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
	40	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
	50	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
<i>E.coli</i> (MPN/g)	30	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
	40	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
	50	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3

Table 3 Sensory evaluation (n=6, 5-point hedonic scale) of Homnil rice-cookie during storage at temperature 30, 40 and 50 °C and a relative humidity of 75% for 7 weeks

Characteristics	Temp °C	Storage time, wk							
		0	1	2	3	4	5	6	7
Odor	30	5.00±0.00 ^d	4.83±0.41 ^d	4.67±0.52 ^d	4.33±0.82 ^{cd}	3.83±0.41 ^{bc}	3.33±0.52 ^{ab}	3.33±0.52 ^{ab}	2.83±0.75 ^a
	40	5.00±0.00 ^d	4.67±0.52 ^d	4.33±0.82 ^{cd}	3.83±0.41 ^{bc}	3.83±0.41 ^{bc}	3.17±0.75 ^{ab}	3.17±0.75 ^{ab}	2.67±0.82 ^a
	50	5.00±0.00 ^b	4.67±0.52 ^b	4.33±0.52 ^b	2.17±0.41 ^a	2.17±0.41 ^a	2.00±0.00 ^a	1.83±0.41 ^a	1.50±0.55 ^a
Rancid	30	5.00±0.00 ^c	5.00±0.00 ^c	4.67±0.52 ^c	3.83±0.41 ^b	3.83±0.41 ^b	3.83±0.41 ^b	3.33±0.52 ^{ab}	2.67±0.82 ^a
	40	5.00±0.00 ^d	5.00±0.00 ^d	4.33±0.52 ^d	3.50±0.63 ^c	2.83±0.41 ^b	2.67±0.82 ^{ab}	2.50±0.55 ^{ab}	2.00±0.63 ^a
	50	5.00±0.00 ^d	4.33±0.52 ^c	3.17±0.41 ^b	1.83±0.41 ^a	1.83±0.75 ^a	1.83±0.41 ^a	1.67±0.52 ^a	1.33±0.52 ^a
Texture	30	4.83±0.41 ^c	4.83±0.41 ^c	4.83±0.41 ^c	4.33±0.82 ^{bc}	3.83±0.41 ^{ab}	3.33±0.52 ^a	3.33±0.52 ^a	3.00±0.63 ^a
	40	4.83±0.41 ^c	4.83±0.41 ^c	4.83±0.41 ^c	4.33±0.82 ^{bc}	3.83±0.41 ^{bc}	3.33±0.52 ^{ab}	3.33±0.52 ^{ab}	3.00±0.89 ^a
	50	4.83±0.41 ^b	4.67±0.52 ^b	4.67±0.52 ^b	4.17±0.75 ^b	3.50±0.55 ^a	3.17±0.75 ^a	3.17±0.75 ^a	2.83±0.41 ^a
Color	30	4.83±0.41 ^c	4.83±0.41 ^c	4.83±0.41 ^c	4.33±0.82 ^{bc}	4.17±0.75 ^{bc}	3.67±0.52 ^{ab}	3.67±0.52 ^{ab}	3.17±0.75 ^a
	40	4.83±0.41 ^c	4.83±0.41 ^c	4.83±0.41 ^c	4.17±0.75 ^{bc}	4.17±0.75 ^{bc}	3.50±1.05 ^{ab}	3.50±1.05 ^{ab}	3.00±0.63 ^a
	50	4.83±0.41 ^d	4.83±0.41 ^d	4.83±0.41 ^d	4.17±0.75 ^{cd}	3.83±0.41 ^{bc}	3.33±0.82 ^{ab}	3.17±0.41 ^{ab}	3.00±0.63 ^a
Overall acceptability	30	4.67±0.52 ^d	4.67±0.52 ^d	4.33±0.52 ^d	4.17±0.75 ^{cd}	3.83±0.41 ^{cd}	3.33±0.52 ^{bc}	3.33±0.52 ^{bc}	2.17±0.75 ^a
	40	4.67±0.52 ^c	4.67±0.52 ^c	4.17±0.75 ^c	3.33±0.82 ^b	3.33±0.82 ^b	3.33±0.82 ^b	2.83±0.75 ^b	1.83±0.41 ^a
	50	4.67±0.52 ^d	4.67±0.52 ^d	3.00±0.63 ^c	2.00±0.63 ^b	1.83±0.41 ^{ab}	1.67±0.52 ^{ab}	1.67±0.52 ^{ab}	1.33±0.52 ^a

The different alphabets in the same row mean a significant statistical difference (p<0.05).

การทดสอบอายุการเก็บรักษาในสถานะเร่งอุณหภูมิ

1. การคำนวณโดยใช้สมการ Q_{10}

จากผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น (Table 1-3) สามารถสรุปได้ว่าการเกิดกลิ่นหืนในคูกี้ข้าวกลี้งหอมชนิดนี้เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค และสัมพันธ์กับการเสื่อมเสียคุณภาพที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับองค์ประกอบของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตคูกี้ ซึ่งสอดคล้องกับค่าการหืน TBARs ที่เพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ณ สภาพแวดล้อมการทดสอบที่อุณหภูมิ 30°C 40°C และ 50°C ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ในการศึกษาได้กำหนดคะแนนการยอมรับด้านกลิ่นหืนควรมากกว่าหรือเท่ากับ 3 หมายความว่าผลิตภัณฑ์เริ่มมีกลิ่นแปลกปลอมหรือกลิ่นหืน ร่วมกับการพิจารณา ค่า TBARs ดังนั้นระยะเวลาการเก็บคูกี้ข้าวกลี้งหอมชนิดที่เหมาะสม คือ 6 สัปดาห์ หรือ 42 วัน ที่อุณหภูมิ 30°C; 3 สัปดาห์ หรือ 21 วัน ที่อุณหภูมิ 40°C และ 2 สัปดาห์ หรือ 14 วัน ที่อุณหภูมิ 50°C ทำการคำนวณหา Q_{10} และอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิการเก็บที่ต้องการทราบ (สมการที่ 2) และแสดงตัวอย่างการคำนวณอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์คูกี้ข้าวกลี้งหอมชนิดที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 25°C

1.1 กรณีศึกษาเมื่อใช้อุณหภูมิการเก็บรักษาที่ 30°C และ 40°C

$$Q_{10(30^{\circ}\text{C},40^{\circ}\text{C})} = \frac{42}{21} = 2$$

$$Q_{10\left(\frac{30-25}{10}\right)(30^{\circ}\text{C},40^{\circ}\text{C})} = \frac{\text{time (prediction)}}{\text{time (accelerated condition at } 30^{\circ}\text{C)}}$$

$$\text{อายุการเก็บรักษาที่ } 25^{\circ}\text{C} = 2.0^{\left(\frac{5}{10}\right)} \times 42 \cong 60 \text{ วัน}$$

1.2 กรณีศึกษาเมื่อใช้อุณหภูมิการเก็บรักษาที่ 40°C และ 50°C

$$Q_{10(40^{\circ}\text{C},50^{\circ}\text{C})} = \frac{21}{14} = 1.5$$

$$Q_{10\left(\frac{40-25}{10}\right)(40^{\circ}\text{C},50^{\circ}\text{C})} = \frac{\text{time (prediction)}}{\text{time (accelerated condition at } 40^{\circ}\text{C)}}$$

$$\text{อายุการเก็บรักษาที่ } 25^{\circ}\text{C} = 1.5^{\left(\frac{15}{10}\right)} \times 21 \cong 38 \text{ วัน}$$

ผลการศึกษาพบว่าอายุการเก็บรักษาคูกี้ข้าวกลี้งหอมชนิดที่อุณหภูมิ 25°C จากการใช้สมการ Q_{10} จะมีค่าเท่ากับ 60 วัน (ทดสอบที่อุณหภูมิ 30°C และ 40°C) และ 38 วัน (ทดสอบที่อุณหภูมิ 40°C และ 50°C) แสดงให้เห็นว่าการเลือกสถานะเร่งของอุณหภูมิในการทดสอบมีผลต่ออายุเก็บของผลิตภัณฑ์ที่คำนวณได้ต่างกันเมื่อใช้สมการ Q_{10} ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าค่า Q_{10} ของปฏิกิริยาทางเคมีในสิ่งมีชีวิตหรือที่เกิดขึ้นในอาหารมีค่าไม่คงที่ หรือกล่าวได้ว่าค่า Q_{10} จะผันแปรตามอุณหภูมิ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาการเสื่อมเสียและอายุการเก็บรักษา (Hamelers, 2004; Taoukis et al., 1997; Wongcharoen, 2010)

ข้อเสนอแนะในการเลือกอุณหภูมิทดสอบควรพิจารณาถึงปฏิกิริยาการเสื่อมเสียของอาหาร ลักษณะและความจำเพาะ การเสื่อมเสียคุณภาพ และอุณหภูมิที่แนะนำในการเก็บรักษา โดยไม่ควรใช้อุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงเกินไปเนื่องจากอาจมีผล ต่อความคลาดเคลื่อนของอายุการเก็บที่คำนวณได้

2. การคำนวณโดยใช้ปฏิกิริยาจลนศาสตร์

พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเสื่อมเสียคุณภาพของคุกกี้ข้าวกลึงหอมนิลกับระยะเวลาการเก็บรักษา โดยมีตัวแปรของอุณหภูมิการเก็บรักษาที่ต่างกัน คือ 30°C 40°C และ 50°C และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 75% พบว่าค่าดัชนี การเสื่อมเสียหรือการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของคุกกี้ข้าวกลึงหอมนิลที่ทำการวิเคราะห์ในการศึกษานี้ แสดงความสัมพันธ์เป็นกราฟ เส้นตรงและมีค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนอง (R-Squared, R^2) มากกว่า 0.90 หรือใกล้เคียง 1 หมายความว่า มีความสัมพันธ์ จัดอยู่ในอันดับปฏิกิริยา $n=0$ เพื่อให้สอดคล้องกับดัชนีการเสื่อมเสียที่ใช้สมการ Q_{10} ในการคำนวณอายุการเก็บ และตรงกับ วัตถุประสงค์การศึกษาที่ต้องการเปรียบเทียบการประเมินอายุการเก็บระหว่างการใส่สมการ Q_{10} และปฏิกิริยาจลนศาสตร์ จึงใช้ กราฟความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่า TBARS พบว่าที่อุณหภูมิเก็บรักษา 30°C 40°C และ 50°C ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% มี ค่า R^2 เท่ากับ 0.9289 0.7498 และ 0.6565 ตามลำดับ (Figure 1 และ Table 4)

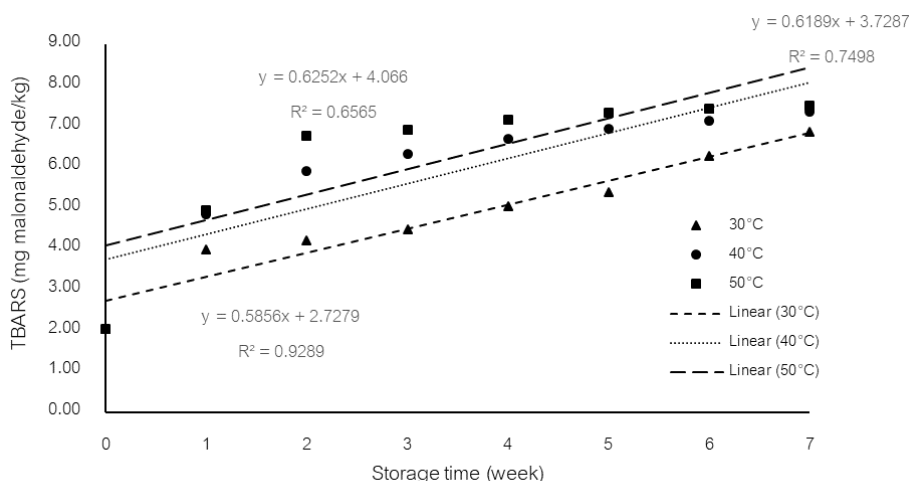


Figure 1 TBARS value of Homnil rice-cookie during storage at temperature 30, 40 and 50°C and a relative humidity of 75% for 7 weeks

Table 4 Reaction order and regression parameter of TBARS in Homnil rice-cookie during storage at temperature 30, 40 and 50 °C and a relative humidity of 75% for 7 weeks

Reaction order	Regression parameter, R^2		
	30°C	40°C	50°C
Zero-order	0.929	0.750	0.657
First-order	0.821	0.615	0.556
Second-order	0.667	0.498	0.465

จากกราฟความสัมพันธ์เส้นตรง (Figure 1) จะทราบค่า slope k_0 = ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาอันดับศูนย์หน่วยเป็น (เวลา⁻¹) จากนั้นให้พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ และ $1/T$ (อุณหภูมิเคลวิน) (Figure 2)

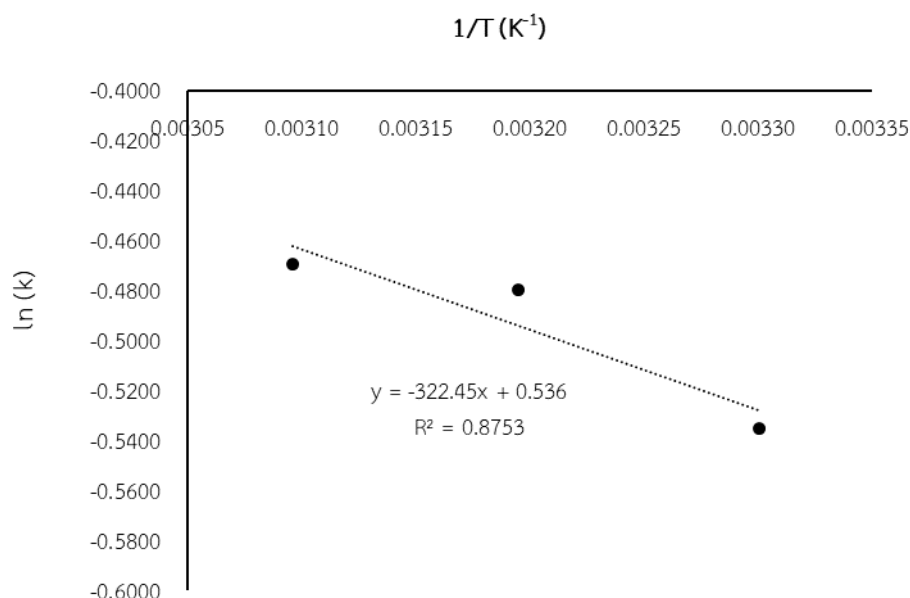


Figure 2 Reaction rate constants of TBARS in Homnil rice -cookie during storage at temperature 30, 40 and 50 °C and a relative humidity of 75% for 7 weeks

จากกราฟที่ 2 จะได้ค่าความชันเท่ากับ 322.45 ให้แก้สมการหา E_a ดังนี้

$$\frac{(\ln k)}{\left(\frac{1}{T}\right)} = \frac{E_a}{R} = 322.45 \quad (R = \text{gas constant} = 8.314 \text{ J/mol K})$$

$$E_a = 322.45 \times 8.314 = 2681 \text{ J/mol}$$

สำหรับค่า k_0 ให้ประมาณค่าโดยลากเส้นกราฟไปตัดแกน $\ln k$ จะได้ค่า k_0 เท่ากับ 0.635

การคำนวณอายุการเก็บรักษาคุกกี้ข้าวกล้องหอมนิลที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 25°C (หรือ 298 เคลวิน) ให้แทนค่า E_a และ k_0 ในสมการ Arrhenius (สมการที่ 6) เพื่อคำนวณหาเวลาที่ของอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยา แล้วจึงแทนค่า k ในสมการของอันดับปฏิกิริยาซึ่งในการศึกษานี้ คือ อันดับปฏิกิริยา $n=0$ (สมการที่ 3) แล้วแก้สมการหาอายุการเก็บรักษา (สมการที่ 7)

$$\begin{aligned} k &= k_0 e^{-E_a/RT} \\ k &= 0.635 e^{-(2681)/(8.314)(298)} = 0.216 \end{aligned} \quad (6)$$

$$t = (C_A - C_{A0})/k \quad (7)$$

$$t = (6.85-2.04)/0.216 = 22 \text{ วัน}$$

โดยที่

t = อายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ (วัน)

C_A = ความเข้มข้นของสารที่เป็นจุดยุติของการยอมรับ (mg malonaldehyde/kg)

C_{A0} = ความเข้มข้นของสารเริ่มต้น (mg malonaldehyde/kg)

การใช้สมการจลนศาสตร์ในการคำนวณอายุเก็บของคุกกี้ข้าวกลีงหอมชนิด เมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 25°C จะมีอายุเก็บเท่ากับ 22 วัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สมการ Q_{10} จะมีอายุการเก็บเท่ากับ 60 วัน (1.1) หรือ 38 วัน (1.2) แสดงให้เห็นว่าการพิจารณาเลือกรูปแบบการประเมินอายุเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะเร่งอุณหภูมิ อาจมีผลต่อความแตกต่างของอายุการเก็บผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิที่สนใจเก็บรักษาที่คำนวณได้ โดยเฉพาะการใช้สมการจลนศาสตร์สังเกตว่าจะได้ค่าอายุการเก็บรักษาคุกกี้ข้าวกลีงหอมชนิดสิ้นสุดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สมการ Q_{10} ซึ่งอาจเป็นข้อดีในการลดความเสี่ยงและมั่นใจได้ว่าตลอดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ยังคงมีคุณภาพดี(สูง) นอกจากนี้ยังมั่นใจได้ว่าผลิตภัณฑ์จะไม่เกิดการเสื่อมเสียก่อนหมดอายุเก็บ

ในการศึกษานี้ได้เลือกดัชนีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของการหืนทางด้านประสาทสัมผัส ซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของ TBARs โดยมีค่าเท่ากับ 6.85 mg malonaldehyde/kg ณ อายุเก็บที่ไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์ ซึ่งหากใช้ ค่า TBARs เป็นเกณฑ์คุณภาพการเสื่อมเสียของคุกกี้ข้าวกลีงหอมชนิดที่ใช้เป็นกรณีศึกษา อาจไม่เหมาะสมเนื่องจากค่า TBARs เป็นการวัดปริมาณมาลอนัลดีไฮด์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของการเกิดออกซิเดชันของไขมัน ทำให้เกิดกลิ่นแปลกปลอมในอาหารที่ผู้บริโภคสามารถรับรู้ได้ แต่เนื่องจากไม่มีมาตรฐานกำหนดค่า TBARs ที่ชัดเจนในผลิตภัณฑ์อาหาร จึงอ้างอิงการเปลี่ยนแปลงค่า TBARs เพื่อใช้เป็นดัชนีวัดคุณภาพของไขมันแทน โดยเกณฑ์ยอมรับคุณภาพการหืนสำหรับอาหารทั่วไปควรมีค่าต่ำกว่า 20 mg malonaldehyde/kg (Shamberger et al., 1977) จากการศึกษาของ Lohalaksanadech & Kachenpakdee (2011) และ Tanikawa (1985) พบว่าเมื่อค่า TBARs มากกว่า 7 mg malonaldehyde/kg สำหรับผลิตภัณฑ์เนื้อจะสังเกตเห็นว่าไขมันมีกลิ่นผิดปกติและมีกลิ่นเหม็นหืนมากซึ่งผู้บริโภคสามารถรับรู้ได้ นอกจากนี้ Sakac et al. (2016) ได้รายงานว่าการเก็บรักษาคุกกี้ปราศจากกลูเตนที่อุณหภูมิ 40±1°C เป็นเวลานาน จะทำให้มีปริมาณแอลดีไฮด์เพิ่มขึ้นและเกิดกลิ่นเหม็นหืนมากขึ้น โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนเมื่อเก็บรักษาคุกกี้ไว้นานมากกว่า 2 เดือน

สรุปผลการวิจัย

ในสภาวะการทดสอบภายใต้การเร่งอุณหภูมิการเก็บรักษาที่ 30°C 40°C และ 50°C ของคุกกี้ข้าวกลีง หอมนิล และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 โดยใช้ดัชนีคุณภาพการเสื่อมเสีย “กลิ่นหืน” เป็นเกณฑ์การยอมรับ โดยพิจารณาจากคะแนนการยอมรับด้านประสาทสัมผัสร่วมกับการเปลี่ยนแปลงของค่า TBARs ที่เพิ่มขึ้นตลอดอายุการเก็บรักษาที่นานขึ้น เมื่อคำนวณอายุการเก็บรักษาของคุกกี้ข้าวกลีงหอมนิลที่อุณหภูมิการเก็บ 25°C พบว่ามีค่าเท่ากับ 38-60 วัน เมื่อใช้สมการ Q_{10} และมีค่าเท่ากับ 22 วัน เมื่อใช้ปฏิกิริยาจลนศาสตร์ ความแตกต่างของอายุเก็บที่คำนวณได้อาจเป็นผลมาจากการกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ อุณหภูมิในการเก็บรักษา การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดัชนีการเสื่อมเสียคุณภาพ และมาตรฐานคุณภาพหรือเกณฑ์พิจารณาที่ใช้ในการไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์ ซึ่งควรกำหนดให้เหมาะสมกับชนิดผลิตภัณฑ์ที่ทำการทดสอบ และเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาคุกกี้ข้าวกลีงหอมนิลไว้ได้นานขึ้นหรือชะลอกลิ่นหืนให้เกิดช้าลง ควรเพิ่มของดูดออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ และไม่ควรเก็บไว้ที่อุณหภูมิสูง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบัน โฆษณาการ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่สนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือในการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. (2019). *Official Method of Analysis*. (21st ed.). Virginia, USA. The Association of Official Analysis Chemists.
- Cauvain, S. P., & Young, L.S. (2010). Chemical and physical deterioration of bakery products. In L.H. Skibsted, J. Risbo, & M. L. Andersen, (Eds.), *Chemical Deterioration and Physical Instability of Food and Beverages*. 381-412. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- E. Rotstein, & R.P. Singh, (Eds.), *Handbook of Food Engineering Practice*. 361-403. New York: CRC Press.
- Food and Drug Administration. (2020). *Bacteriological analytical manual online*. <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-4-enumeration-escherichia-coli-and-coliform-bacteria>
- Galić, K., Ćurić, D., & Gabrić, D. (2009). Shelf life of packaged bakery goods-A review. *Critical reviews in foodscience and nutrition*, 49(5), 405-426. <https://doi.org/10.1080/10408390802067878>
- Gomes, H. A., Silva, E. N., Nascimento, M. R. L., & Fukuma, H. T. (2003). Evaluation of the 2-thiobarbituric acid method for the measurement of lipid oxidation in mechanically deboned gamma irradiated chicken meat. *Food Chemistry*, 80, 433-437. https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/2002/ENAN/E08/E08_400.PDF
- Gouveia, L., Batista, A. P., Miranda, A., Empis, J., & Raymundo, A. (2007). Chlorella vulgaris biomass used as colouring source in traditional butter cookies. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 8(3), 433-436. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.03.026>
- Gupta, M., Bawa, A.S., & Abu-Ghannam, N. (2011). Effect of barley flour and freeze-thaw cycles on textural nutritional and functional properties of cookies. *Food and Bioproducts Processing*, 89(4), 520-27. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.07.005>

- Hamdani, A. M., Wani, I. A., & Bhat, N. A. (2020). Gluten free cookies from rice-chickpea composite flour using exudate gums from acacia, apricot and karaya. *Food Bioscience*, 35, 100541. [https://doi.org/ 10.1016/j.fbio.2020.100541](https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100541)
- Halee, A., Supavititpatana, P., Ruttarattanamongko, K., Jittrepotch, N., Rojsuntornkitti, K., & Kongbangkerd, T. (2020). Optimisation of the microwave-assisted extraction of natural antioxidants from defatted black rice bran of *oryza sativa* L. CV. Hom Nin. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 8(2), 765-769. <http://doi.org/10.15414/jmbfs.2020.9.6.1134-1140>
- Hamelers, H. V. M. (2004). Modeling composting kinetics: A review of approaches. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 3(4), 331-342. <http://doi.org/10.1007/s11157-004-2335-0>
- Kangsdalampai, K., & Sungpuang, P. (1984). *Laboratory manual for food analysis*. Bangkok: Institute of Nutrition, Mahidol University, Thailand. (in Thai)
- Kanner, J. (2007). Dietary advanced lipid oxidation endproducts are risk factors to human health. *Molecular Nutrition and Food Research*, 51, 1094-1101. <http://doi.org/10.1002/mnfr.200600303>
- Kapcum, N., Uriyapongson, J., & Alli, I. Phimphilai, S. (2016). Anthocyanins, phenolic compounds and antioxidant activities in colored corn cob and colored rice bran. *International Food Research Journal*, 23(6) , 2347-2356. [http://www.ifrj.upm.edu.my/23%20\(06\)%202016/\(6\).pdf](http://www.ifrj.upm.edu.my/23%20(06)%202016/(6).pdf)
- Lohalaksanadech, S., & Kachenpakdee, N. (2011) . Study on shelf life of fried soft shell crab. *Journal of Fisheries Technology Research*, 5(2), 105-110. (in Thai)
- Lu, L. X., & Xu, F. (2009). Effect of light-barrier property of packaging film on the photo-oxidation and shelf life of cookies based on accelerated tests. *Packaging Technology and Science*, 22(2), 107-113. <http://doi.org/10.1002/pts.838>
- Manzocco, L., Romano, G., Calligaris, S., & Nicoli, M. C. (2 0 2 0) . Modeling the effect of the oxidation status of the ingredient oil on stability and shelf life of low-moisture bakery products: The case study of crackers. *Foods*, 9(6), 749. <https://doi.org/10.3390/foods9060749>
- Márquez-Ruiz, G., & Dobarganes, M. C. (2005). *Analysis of non-volatile lipid oxidation compounds by high-performance size-exclusion chromatography*. In A. Kamal-Eldin, & J. Pokorny (Eds.), *Analysis of Lipid Oxidation*. 40–69. Illinois: American Oil Chemists Society Press.
- Ministry of public health. (2001). *Notification of the Ministry of Public Health (No. 237) B.E. 2544: Labelling of ready-to-cook foods and ready-to-eat foods*, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Ministry of public health. (2020). *Notification of the Ministry of Public Health (No. 416) B.E. 2563: Prescribing the quality or standard, principles, conditions and methods of analysis for pathogenic microorganisms in foods*, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Mizrahi, S. (2004). Accelerated shelf-life tests. In R. Steele (Ed.), *Understanding and measuring the shelf-life of food*. pp 317-339. Cambridge, Woodhead Publishing Limited.
- Rattanapanone, N. (2014). *Food Chemistry*. (4th ed.). Bangkok: Odeonstore. (in Thai)

- Rodmui, A., & Jitwaropas, O. (2007). Production of cookies using wheat flour partial substituted with Hom Nin rice flour. *Journal of Food Technology, Siam University*, 3(1), 37-43. (in Thai)
- Sakac, M., Pestoric M., Mandic, A., Misan, A., Nedeljkovic, N., Jambrec, D., Pavle, J., Vera, L., Lato, P., & Ivana, S. (2016). Shelf-life prediction of gluten-free rice-buckwheat cookies. *Journal of Cereal Science*, 69, 336-343. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.04.008>
- Sangkaeo, W., & Chomkhuntod, J. (2015). Substitution wheat flour with black jasmine rice flour in healthy muffin products. *Agricultural Science Journal*, 46(3) (Suppl.), 705-708. (in Thai)
- Shamberger, R. J., Shamberger, B. A., & Willis, C. E. (1977). Malonaldehyde content of food. *Journal of Nutrition*, 107(8), 1404-1409.
- Singh, T. K., & Cadwallader, K. R. (2004). *Ways of measuring shelf-life and spoilage. In R. Steele (Ed.), Understanding and measuring the shelf-life of food.* 165-183. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Tanikawa, E. (1985). *Marine Products in Japan* (2nd ed.). Tokyo: Kaseisha-Kasukaku Co.
- Taoukis, P. S., Labuza, T. P., & Saguy, I. S. (1997). Kinetics of food deterioration and shelf-life prediction. In K.J., Valentas, Thamee, T., Intipunya, P., & Buntam, D. (2018). Shelf life evaluation of mixed tea product from mulberry leaf and fruit using accelerated testing method. *Journal of Agriculture*, 34(1), 157-166. (in Thai)
- Wongcharoen, W. (2010). Shelf life study of food products. *Food*, 40(3), 199-204. (in Thai)

Research Article

การสร้างแบบจำลองพารามิเตอร์รูปร่างของการแจกแจงค่าสุดขีดน้อยทั่วไป น้ำฝน-น้ำท่า ร่วมกับ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม

The Modeling Shape Parameter of The Generalized Extreme Value Distribution of Rainfall-Runoff with Satellite Images by Using Artificial Neural Network Approach

ทศพล ภูผิฟ้า¹ ธีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ² ปิยภัทร บุชบาบดินทร์^{1*}

Tossapol Phoophiwa¹ Teerawong Loasuwan² Piyapatr Busababodhin^{1*}

¹ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150 ประเทศไทย

¹Department of Mathematics, Faculty of Science, Mahasarakham University, Mahasarakham 44150, Thailand

²ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150 ประเทศไทย

²Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University, Mahasarakham 44150, Thailand

*E-mail: piyapatr.b@msu.ac.th

Received: 14/12/2021; Revised: 06/05/2022; Accepted: 27/05/2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาตัวแปรที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์รูปร่าง (Shape parameter) ของการแจกแจงค่าสุดขีดน้อยทั่วไป (Generalized Extreme Value: GEV) โดยขั้นตอนแรกจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) และขั้นตอนต่อมาคือการสร้างแบบจำลองพารามิเตอร์รูปร่างภายใต้การแจกแจงค่าสุดขีดน้อยทั่วไป GEV พร้อมทั้งนำผลการศึกษาภาคการณพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยน้ำท่วมด้วยแผนที่ระดับการเกิดซ้ำ (Return level Map) ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลดาวเทียม ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลอุทกวิทยา ของลุ่มน้ำชี ประกอบด้วย ดัชนีผลต่างพืชพรรณแบบนอร์มัลไลซ์ (NDVI) ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ ปริมาณน้ำฝน และข้อมูลน้ำท่า เป็นต้น ทั้งหมด 11 ปีย้อนหลัง (พ.ศ. 2553 ถึง พ.ศ. 2564) จากกรมอุตุนิยมวิทยาและสถานีเกษตรจำนวน 92 สถานี ครอบคลุมพื้นที่ 14 จังหวัดในลุ่มน้ำชี ภายใต้กระบวนการสร้างแบบจำลองพารามิเตอร์ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบการประมาณค่าพารามิเตอร์ 2 กระบวนการ ได้แก่ แบบจำลองภายใต้กระบวนการคงที่ (Stationary process) ซึ่งจะใช้วิธีการประมาณค่าด้วยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum likelihood estimation: MLE) และแบบจำลองภายใต้กระบวนการไม่คงที่ (Non-stationary process) ซึ่งจะใช้วิธีการประมาณค่าด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network: ANN) ซึ่งได้สร้างแบบจำลองด้วยการแจกแจง GEV ภายใต้ทั้งสองกระบวนการ โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนสูงสุดรายเดือนเป็นข้อมูลตั้งต้น และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe Efficiency: NSE) จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองภายใต้กระบวนการไม่คงที่มีความเหมาะสม ทั้งหมด 59 สถานี แบ่งเป็น แบบจำลอง ANN-7 จำนวน 17 สถานี แบบจำลอง

ANN-10 จำนวน 27 สถานี และแบบจำลอง ANN-3 จำนวน 15 สถานี อย่างไรก็ตาม พบว่าแบบจำลองภายใต้กระบวนการคงที่มีความเหมาะสมทั้งหมด 33 สถานี เมื่อพิจารณาภาพรวมของค่าNSEเฉลี่ยของแต่ละแบบจำลอง พบว่ามีค่าNSE สูงกว่า 0.75 ทำให้สรุปได้ว่าแบบจำลองที่ได้ทั้ง 92 สถานี มีความแม่นยำสูง นอกจากนี้ยังพบว่าตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์เบรุตและปริงและปริงองค์ประกอบที่ทำให้แบบจำลอง ANN มีประสิทธิภาพสูงขึ้นคือ ค่าดัชนีผลต่างพืชพรรณแบบนอร์มัลไลซ์ (NDVI) และ ปริมาณน้ำท่าเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ ผู้วิจัยได้สร้างแผนที่ 2 มิติ ของระดับการเกิดซ้ำในรอบปีการเกิดซ้ำ (Return period) 2 5 10 20 50 และ 100 ปี ตามลำดับ

คำสำคัญ: การแจกแจงค่าสุดขั้วน้อยทั่วไป, โครงข่ายประสาทเทียม, ปริมาณน้ำท่า, ดัชนีผลต่างพืชพรรณแบบนอร์มัลไลซ์, ปริมาณน้ำฝน

Abstract

The objectives of this study are to: 1. determine the variables that affect the shape parameter of a generalized extreme value (GEV) distribution changes by considering the correlation coefficient; and 2. model the shape parameter of the GEV distribution to predict flood risk areas with a return level map. The data for this study was compiled from satellite and meteorological data from the Chi River Basin, including the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), climate data, Rainfall data, Runoff data, and so on. It was gathered from Meteorological Department (TMD) and 92 agricultural stations retrospectively (2010 to 2021). It covers an area of 14 provinces in the Chi River Basin. In this study, two parameter estimation processes were compared: stationary process (by maximum likelihood estimation : MLE) and non-stationary process (by artificial neural network : ANN), which were modeled with GEV distributions in both processes the monthly maximum rainfall data was used as the default data in both of them. In addition, Nash-Sutcliffe coefficient, or NSE, was used to compare the two models. The study revealed that the non-stationary model is suitable for 59 stations, categorized into the ANN-7 model of 17 stations, the ANN-10 model of 27 stations, and the ANN-3 model of 15 stations. However, the stationary model is suitable for only 33 stations. When considering the overall mean of the NSE values in each model, the NSE higher than 0.75. This could indicate that a total of 92 models were highly accurate. It was also found that the variables correlated with the shape parameters and made the ANN model more efficient were the NDVI and runoff. Therefore, the researcher created a 2D map of the recurrence levels in the return periods of 2, 5, 10, 20, 50 and 100 years, respectively, for further application.

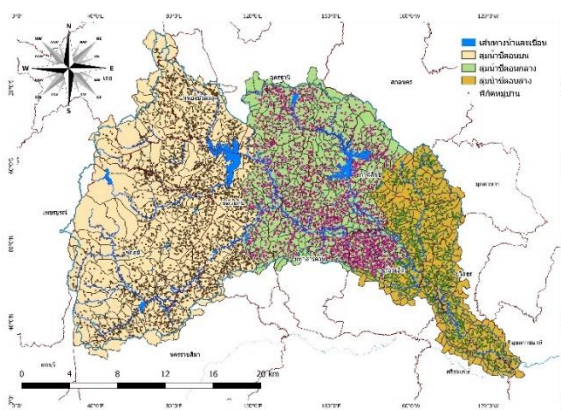
Keywords: Generalized Extreme Value, Artificial Neural Network, Runoff, Normalized Difference Vegetation Index, Rainfall

บทนำ

สภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้นในปัจจุบันส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของปริมาณน้ำฝน และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยในชั้นบรรยากาศ ความผันแปรทางสภาพภูมิอากาศ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางสภาพภูมิอากาศดังกล่าวล้วนแต่ส่งผลกระทบต่อการจัดการทรัพยากรน้ำและอุทกวิทยา ซึ่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเป็นพื้นที่ที่ได้รับความเสียหายอย่างมากจากการเกิดอุทกภัยและภัยแล้ง โดยสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดอุทกภัยส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่และ ความผันแปรของธรรมชาติ แต่ในบางพื้นที่ การกระทำของมนุษย์ก็มีส่วนสำคัญในการทำให้ภาวะการเกิด

อุทกภัยนั้นมีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นด้วย ในปัจจุบันปัญหา “น้ำท่วม” ในประเทศไทย ส่งผลกระทบต่อประชาชนในพื้นที่มากกว่า 4.5 ล้านคน พื้นที่เกษตรมากกว่า 7.5 ล้านไร่ ในรอบ 30 ปีที่ผ่านมา พบว่าโดยเฉลี่ยจะมีเหตุการณ์น้ำท่วมปีละ 9 ครั้ง ครอบคลุมพื้นที่ 63 จังหวัด (83% ของจังหวัดทั้งหมด) 532 อำเภอ (61% ของอำเภอทั้งหมด) 2,719 ตำบล (37% ของตำบลทั้งหมด) และ 17,867 หมู่บ้าน (24% ของหมู่บ้านทั้งหมด) โดยกระทบกับประชาชนเฉลี่ยปีละ 4.5 ล้านคน หรือประมาณ 7% ของประชากรทั้งหมดในทุกๆปี ขณะที่ในด้านความเสียหายด้านทรัพย์สินพบว่ามีบ้านเรือนเสียหายประมาณ 45,482 หลังต่อปี พื้นที่การเกษตรอีก 7.56 ล้านไร่ โดยตีเป็นมูลค่าความเสียหายทั้งหมด ปีละ 5,361 ล้านบาท ดังนั้น ความแม่นยำในการคาดการณ์การปริมาณน้ำฝนที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยและภัยแล้ง จึงมีความสำคัญและเป็นประโยชน์อย่างมาก ในการวางแผนแนวทางการจัดการน้ำ เพื่อเตรียมรับมือกับปัญหาด้านที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ข้อมูลจากสำนักข่าวออนไลน์ไทยพับลิก้า รวบรวมข้อมูลภัยพิบัติเพิ่มเติมจากศูนย์อำนวยการบริหารราชการแผ่นดิน กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย กระทรวงมหาดไทย ย้อนหลังไป 30 ปีตั้งแต่ปี 2532-2561 (Thaipublica, 2019) ซึ่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีพื้นที่การเกษตรมากกว่า 63 ล้านไร่ มีแม่น้ำสำคัญหลายสาย อาทิ แม่น้ำชี แม่น้ำมูล แม่น้ำสงคราม แม่น้ำพระเพลิง แต่ในปัจจุบันหลายพื้นที่ยังคงประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำ ปัญหาภัยแล้ง และน้ำท่วมซ้ำซาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ลุ่มแม่น้ำชีที่เกิดปัญหาน้ำท่วมซ้ำซาก จากรายงานของสำนักข่าวไทยพีบีเอส เมื่อวันที่ 30 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 ได้รายงานถึงสถานการณ์ระดับน้ำในแม่น้ำชีที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ไหลท่วมพื้นที่การเกษตรตลอดจนบ้านเรือนเสียหายจำนวนมาก ในหลายอำเภอที่ติดฝั่งแม่น้ำชี ได้แก่ จังหวัดชัยภูมิ ขอนแก่น กาฬสินธุ์ มหาสารคาม ร้อยเอ็ด นุรีรัมย์ ดังนั้น ความแม่นยำในการคาดการณ์การปริมาณน้ำฝนที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัย จึงมีความสำคัญและเป็นประโยชน์อย่างมาก ในการวางแผนแนวทางการรับมือกับอุทกภัย

การสร้างแบบจำลองเพื่ออธิบายลักษณะการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลปริมาณน้ำฝนเนื่องจากข้อมูลมีค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดเกิดขึ้น ข้อมูลลักษณะดังกล่าวเรียกว่า .ค่าสุดขีด (Extreme Value) ซึ่งมีจำนวนข้อมูลน้อยและอยู่ในส่วนของปลายหาง ดังนั้นข้อมูลในลักษณะนี้มักถูกตัดทิ้งไม่นำมาทำการวิเคราะห์หรือสร้างแบบจำลอง เนื่องจากมีความซับซ้อน (Busabodhin and Keawmun, 2015) โดยการวิเคราะห์ค่าสุดขีดถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เหตุการณ์ความรุนแรงของปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น อุณหภูมิสุดขีด ความเร็วลมสูงสุด-ต่ำสุดสำหรับการศึกษาแบบจำลองในการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนสูงสุด พบว่าการแจกแจงค่าสุดขีดวางนัยทั่วไป (Generalized extreme value distribution: GEVD) เป็นการแจกแจงที่เหมาะสม (Busabodhin, 2017) ซึ่งการแจกแจงนี้มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ พารามิเตอร์บ่งตำแหน่ง (Location Parameter) พารามิเตอร์บ่งขนาด (Scale Parameter) และพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง (Shape Parameter) โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ พารามิเตอร์บ่งรูปร่าง เนื่องจากพารามิเตอร์นี้จะบ่งบอกว่าแบบจำลองใดเหมาะสมกับข้อมูลที่ศึกษาอยู่



รูปที่ 1 แผนที่ลุ่มแม่น้ำชีแสดงพิสัยขอบเขตการปกครองและเส้นทางน้ำ

ดังนั้นจึงได้มีนักวิจัยหลายคนศึกษาวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง อาทิเช่น ในปี 2019 Hristos และคณะ ได้พยากรณ์พารามิเตอร์บ่งรูปร่าง จากข้อมูลขนาดใหญ่ของกลุ่มแม่น้ำในพื้นที่ของสหรัฐอเมริกาและพัฒนาแบบจำลองที่เหมาะสมกับพื้นที่แต่ละพื้นที่โดยใช้แบบจำลองเส้นตรง และ แบบจำลอง Random forest เทียบกับวิธีอย่างง่าย (Naive Method) ที่ทำการพยากรณ์ค่าพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์สรุปได้ว่ามีตัวแปรทางสภาพภูมิอากาศและข้อมูลเชิงพื้นที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง และแบบจำลองแบบใหม่ที่ได้เทียบกับแบบจำลองเดิมที่ค่าความแม่นยำสูงขึ้น 20% เมื่อใช้พารามิเตอร์บ่งที่ เกิดจากการพยากรณ์ด้วยแบบจำลอง Random forest (Hristos et al. 2019) ในปีเดียวกันนี้ Haniyeh และคณะ ได้สร้างแบบจำลอง น้ำฝน-น้ำท่า ด้วยดัชนีเชื่อมโยงทางอุทกวิทยา (Index of Connectivity : IC) เป็นดัชนีที่บ่งบอกปริมาณและเส้นทางการไหลของน้ำท่าและ ดัชนีผลต่างพืชพรรณแบบนอร์มัลไลซ์ (Normalized Difference Vegetation Index : NDVI) เป็นดัชนีที่บ่งบอกระดับความหนาแน่นและความอุดมสมบูรณ์ของพืชพรรณ โดยใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) พบว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพ 97% เมื่อใช้กับแม่น้ำ Houghton ในประเทศออสเตรเลีย (Haniyeh et al. 2019) และ (Tanutdech and Teerawong, 2019) ได้ศึกษาเกี่ยวกับ ดัชนี NDVI เพื่อความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝนที่ได้จากสถานีตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยา พบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 80-97 ในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย จากพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง (Shape parameter) ของการแจกแจงค่าสุดขีดชนิดทั่วไป (GEV) สามารถแบ่งประเภทของการแจกแจงได้ 3 ลักษณะคือ เมื่อพารามิเตอร์บ่งรูปร่างเข้าใกล้ 0 เรียกว่า การแจกแจงกัมเบล (Gumbel Distribution) เมื่อมากกว่า 0 เรียกว่า การแจกแจงฟรีเชท (Fréchet Distribution) และ น้อยกว่า 0 เรียกว่า การแจกแจงไวบูลล์ (Weibull Distribution) (Coles, 2001; Busababodhin, 2018) ดังนั้นจากงานวิจัยข้างต้นทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศจากข้อมูลสถานีตรวจวัดและภาพถ่ายดาวเทียมที่ส่งผลต่อพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง ของการแจกแจง GEV เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองพยากรณ์ค่าพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง ด้วยวิธี โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network : ANN) และหาค่าระดับการเกิดซ้ำ (Return level) ของแบบจำลองเพื่อคาดการณ์พื้นที่ที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัย

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยผู้วิจัยมีขั้นตอนทั้งหมด 7 ขั้นตอน รายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การเตรียมข้อมูลในการวิเคราะห์มี 2 แบบ ดังนี้

1.1 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมโดยจะใช้ข้อมูลดัชนี NDVI และ ปริมาณน้ำฝนซึ่งเป็นข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS จากผลิตภัณฑ์ MOD13Q1 Vegetation Indices (USGS, 2011)

1.2 ข้อมูลจากสถานีตรวจวัด กรมอุตุนิยมวิทยา ประกอบด้วยข้อมูล ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ ความเร็วลม ความชื้นสัมพัทธ์ และกรมชลประทาน ประกอบด้วยข้อมูล ปริมาณน้ำท่า ปริมาณน้ำในเขื่อน ปริมาณการไหลของกระแสน้ำ เป็นต้น

1.3 การจัดการกับข้อมูลสูญหาย (missing)

1.3.1 ใช้หลักการ Multivariate Imputation by Chained Equations (MICE) ในการจัดการกับข้อมูลสูญหาย ซึ่งทำได้โดย การนำข้อมูลที่มีค่าในวันที่ตรงกันกับข้อมูลที่สูญหายในทุกปีมารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ยนำมาแทนค่าใส่ในข้อมูลที่มี missing ในวันที่เดียวกันของแต่ละปี และใช้แพ็คเกจ “missForest” และ “mice” ในโปรแกรม R ในการวิเคราะห์

1.3.2 ใช้การประมาณค่า IDW (Inverse Distance Weight) ในแพ็คเกจ การประมาณค่าในช่วง (Interpolation) โดยใช้ Q-GIS ซึ่งเป็นการประมาณค่าโดยทำการสุ่มจุดตัวอย่างแต่ละจุดจากตำแหน่งที่สามารถส่งผลกระทบไปยังเซลล์ที่ติดกองประมาณค่าได้ ซึ่งจะมีผลกระทบ น้อยลงเรื่อย ๆ ตามระยะทางที่ไกลออกไปเหมาะกับตัวแปรที่อ้างอิงกับระยะทางในการคำนวณ ยิ่งใกล้ยิ่งมีอิทธิพลมาก

2. ประมาณพารามิเตอร์รูปร่างของการแจกแจง GEV ด้วยวิธี MLE จากข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายเดือน
3. หาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างพารามิเตอร์รูปร่าง (Shape parameter) กับข้อมูลตัวแปรอิสระเพื่อดูความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ
4. สร้างแบบจำลองเพื่อหาค่าประมาณพารามิเตอร์รูปร่างของการแจกแจง GEV จากตัวแปรอิสระที่มีค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) สูงกับพารามิเตอร์รูปร่าง ด้วย แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม
5. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยค่า MSE RMSE และ NSE โดยคำนวณจากค่าความผิดพลาดของแบบจำลอง
6. หาค่าระดับการเกิดซ้ำของแบบจำลองค่าสุดขีดและสร้างแผนที่ระดับการเกิดซ้ำ
7. สรุปผลและอภิปรายผล

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. การแจกแจงค่าสุดขีดยุคทั่วไป (Generalized Extreme Value Distribution: GEV)

การแจกแจง GEV ถูกพัฒนาขึ้นใน ค.ศ. 1955 โดย Jenkinson สามารถเขียนฟังก์ชันการแจกแจงค่าสุดขีดได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ การแจกแจงกัมเบล (Gumbel Distribution) การแจกแจงฟรีเชท (Fréchet Distribution) และการแจกแจงไวบูลล์ (Weibull Distribution) (Coles, 2001; Busabodhin, 2018)

กำหนดให้ X_i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n$ เป็นตัวแปรสุ่มที่อิสระต่อกันและมีฟังก์ชันการแจกแจงสะสม $F(x; \theta)$ แบบเดียวกัน ค่าสูงสุดของตัวแปรสุ่ม คือ $X_{(n)} = \text{Max}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ซึ่งจะประยุกต์ใช้ในรูปแบบของการแจกแจงค่าสุดขีดยุคทั่วไปที่มีพารามิเตอร์ 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ μ แทนพารามิเตอร์บอกตำแหน่ง (Location parameter) σ แทนพารามิเตอร์บอกขนาด (Scale parameter) และ ξ แทนพารามิเตอร์บอกรูปร่าง (Shape parameter) สามารถเขียนแทนด้วย $X \sim \text{GEV}(\mu, \sigma, \xi)$

2. แบบจำลองกระบวนการคงที่ (Stationary Process)

พิจารณาจากกระบวนการที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ ดังนั้นค่าประมาณพารามิเตอร์ที่ได้จะเป็นค่าคงที่สำหรับ GEV ที่ประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี MLE จะมีโครงสร้างฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Distribution Function: pdf) ดังนี้

$$f(x; \mu, \sigma, \xi) = \frac{1}{\sigma} \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{\left(\frac{-1}{\xi} \right) - 1} \exp \left\{ - \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{\frac{-1}{\xi}} \right\} \quad (1)$$

3. แบบจำลองกระบวนการไม่คงที่ (Non-stationary Process)

พิจารณาจากกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในรูปแบบเชิงเส้นตรง หรือ ไม่เชิงเส้นตรง ก็ได้ ดังนั้นค่าประมาณพารามิเตอร์ที่ได้จะอยู่ในรูปของฟังก์ชัน ในการศึกษาผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองนี้ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์รูปร่าง สามารถสร้างฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Distribution Function: pdf) ของ GEV ภายใต้กระบวนการไม่คงที่ (Non-stationary Process) ได้ดังนี้

$$f(x; \mu, \sigma, \xi(\text{ANN})) = \frac{1}{\sigma} \left[1 + \xi(\text{ANN}) \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{\left(\frac{-1}{\xi(\text{ANN})} \right) - 1} \exp \left\{ - \left(1 + \xi(\text{ANN}) \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right)^{\frac{-1}{\xi(\text{ANN})}} \right\} \quad (2)$$

โดยที่ $\xi(ANN)$ คือ พารามิเตอร์รูปร่างที่ได้จากการประมาณค่าด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม และสำหรับ $1 + \xi \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) > 0$ ทั้งนี้ไม่ว่าจะเป็นการประมาณค่าพารามิเตอร์จากกระบวนการใดก็ตาม สามารถเขียนฟังก์ชันการแจกแจงค่าสุดขีดน้อยทั่วไปได้ 3 ลักษณะจากการพิจารณาค่าประมาณพารามิเตอร์รูปร่างร่วมกับช่วงความเชื่อมั่นของพารามิเตอร์รูปร่างสรุปได้ว่า เมื่อช่วงความเชื่อมั่นของพารามิเตอร์รูปร่างครอบคลุม 0 จะเรียกว่าการแจกแจงกัมเบล (Gumbel Distribution) เมื่อช่วงความเชื่อมั่นครอบคลุมค่าบวก เรียกว่า การแจกแจงฟรีเชต (Fréchet Distribution) และเมื่อช่วงความเชื่อมั่นครอบคลุมช่วงลบ เรียกว่า การแจกแจงไวล์บูล (Weibull Distribution) (Coles, 2001; Busababodhin, 2018)

4. วิธีภาวน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation: MLE)

การประมาณค่าพารามิเตอร์จะใช้วิธีภาวน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation : MLE) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ (Coles, 2001; Busababodhin, 2018)

ขั้นตอนที่ 1 พิจารณาฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Density Function : PDF) จากสมการที่ 2

ขั้นตอนที่ 2 สร้างฟังก์ชันภาวน่าจะเป็น (Likelihood Function) ของฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Density Function : PDF) ของ GEV ได้

$$L(\mu, \sigma, \xi) = \frac{1}{\sigma^n} \prod_{i=1}^n \left(1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right)^{-1/\xi - 1} \exp \left(- \sum_{i=1}^n \left(1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right)^{-1/\xi} \right) \quad (3)$$

ขั้นตอนที่ 3 สร้างฟังก์ชันลอกลักษณะน่าจะเป็น (Log-likelihood Function) ของฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Density Function : PDF) ของ GEV ที่ได้จากขั้นตอน ได้ดังนี้

$$l(\mu, \sigma, \xi) = n \log \sigma - \left(1 - \frac{1}{\xi} \right) \sum_{i=1}^n \log \left(1 - \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right) - \sum_{i=1}^n \left(1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right)^{-1/\xi} \quad (4)$$

ขั้นตอนที่ 4 นำฟังก์ชันลอกลักษณะน่าจะเป็น ที่ได้ไปหา Partial Derivation เทียบกับพารามิเตอร์แต่ละตัว แล้วกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นแก้สมการเพื่อหาค่าประมาณพารามิเตอร์

5. ระดับการเกิดซ้ำ (Return Level)

สำหรับการคาดการณ์การเกิดปริมาณน้ำฝนสูงสุดซ้ำในรอบปีการเกิดซ้ำต่าง ๆ ด้วยทฤษฎีค่าสุดขีด คือการคำนวณระดับการเกิดซ้ำ (Z_p) ซึ่งหมายถึงการหาข้อมูล ณ ตำแหน่ง p นั่นเอง เมื่อ p คือ ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่ $Z > \hat{Z}_p$ ดังนั้น ระดับการเกิดซ้ำ คือ ค่าคาดหวังที่จะเกิดเหตุการณ์ $Z > \hat{Z}_p$ อย่างน้อย 1 ครั้ง ใน ทุก ๆ T ปี 1 เมื่อ T คือ รอบปีการเกิดซ้ำที่มีความสัมพันธ์กับความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ โดยที่ $T = 1/p$ สำหรับการแจกแจงค่าสุดขีดวงน้อยทั่วไป จะมีสมการระดับการเกิดซ้ำดังนี้ (Coles, 2001; Busababodhin, 2018)

$$\hat{Z}_T = \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left\{ 1 - \left[-\log \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]^{-\xi} \right\} \quad (5)$$

6. โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks - ANN)

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้การเรียนรู้จากประสบการณ์ด้วยข้อมูลในอดีต มาใช้สอนให้ระบบโครงข่ายเกิดการรู้จำ ซึ่งเป็นแนวคิดที่ถูกออกแบบให้ทำงานเช่นเดียวกับสมองมนุษย์ ที่ประกอบไปด้วย หน่วยประมวลผล (Processing Elements) ที่มีเซลล์หลายๆ ตัวที่ทำหน้าที่คล้ายกับเซลล์สมองของมนุษย์ โดยที่แต่ละเซลล์จะโยยติดต่อกันโดยส่งสัญญาณออกเป็นเอาต์พุต (Output) ของส่วนที่เรียกว่า เดนไดรต์ (Dendrites) และเมื่อผ่านกระบวนการประมวลผลจะได้เอาต์พุตออกมาในส่วนที่เรียกว่าแอกซอน (Axon) ในแต่ละเซลล์จะรับรู้ข้อมูลจากหลายทาง แล้วส่งต่อไปยังเซลล์อื่น ๆ โดยใช้หลักการ Synaptic Strength ของการเชื่อมโยงเซลล์สมอง ส่วนวิธีการประมวลผลภายใน โดยเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์จะมีจุดเชื่อมโยงระหว่างการทำงานเป็น 2 ลักษณะ คือ ลักษณะการกระตุ้น (Excitatory) เป็นการทำให้สัญญาณที่ส่งผ่านเข้ามามีความถี่ลดลง ซึ่งแบบจำลองของ ANN จะมีอัตราขยายหรือหดได้เมื่อกำหนดด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก (Weights) สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง เซลล์ประสาทกับเซลล์ประสาทเทียมสามารถเขียนสมการได้ดังนี้ (Royal Irrigation Department, 2017)

$$Output = \left[\left(\sum_{i=1}^n (w_i x_i) + B \right) v_i \right] \varphi \quad (6)$$

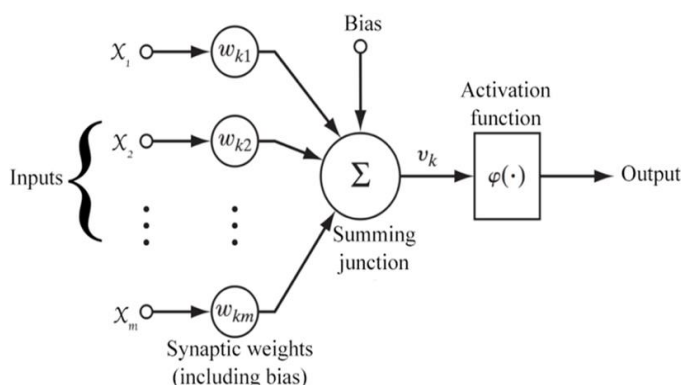
โดยที่ x_i คือ ข้อมูลนำเข้า (Inputs data)

w_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละโหนดของปลายประสาท

B คือ ค่าความลำเอียง (Bias)

v_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของ (Summing junction)

φ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function)



รูปที่ 2 โครงสร้างของระบบโครงข่ายประสาทเทียม

7. สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson product-moment correlation coefficient)

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน เป็นวิธีที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร หรือข้อมูล 2 ชุด โดยที่ ตัวแปร หรือข้อมูล 2 ชุดนั้นจะต้องอยู่ในรูปของข้อมูลในมาตราอันตรภาค (Interval scale) หรืออัตราส่วน (Ratio scale) และมีค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1 ดังสมการที่ (8) (Pearson, 1920).

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

โดยที่ ถ้า r มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่า มีความสัมพันธ์เชิงบวกและมีความสัมพันธ์มาก

ถ้า r มีค่าเข้าใกล้ -1 แสดงว่า มีความสัมพันธ์เชิงลบและมีความสัมพันธ์มาก

และถ้า เข้าใกล้ 0 แสดงว่าความสัมพันธ์กันน้อย

8. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง

การวิจัยครั้งนี้ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยสถิติ 3 ชนิด โดยที่แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (9) และ (10) น้อย ในขณะที่แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (10) เข้าใกล้ 1 รายละเอียดสถิติทั้ง 3 ชนิดเป็นดังนี้

8.1 ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Mean squared error : MSE)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (8)$$

8.2 รากที่สองค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Root mean squared error : RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (9)$$

8.3 การประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองด้วยสัมประสิทธิ์ Nash-Sutcliffe (NSE)

ในปี 1970 Nash และ Sutcliffe ประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองด้วย NSE ซึ่งเป็นการบอกความแม่นยำของแบบจำลอง (Model Accuracy) หรือประสิทธิภาพของแบบจำลอง (Model Performance) ซึ่งค่า NSE อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึงค่ามากที่สุด คือ 1 โดยจะเปรียบเทียบค่าข้อมูลกับค่าพยากรณ์โดยใช้ตำแหน่งควอนไทล์เดียวกัน (Nash and Sutcliffe, 1970)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{x=1}^X (Q_x - Q_x^{pred})^2}{\sum_x (Q_x - \bar{Q}_x)^2} \quad (10)$$

โดยที่ Q_x หมายถึง ข้อมูลจริงที่ตำแหน่งควอนไทล์

Q_x^{pred} หมายถึง ค่าพยากรณ์ที่ตำแหน่ง ควอนไทล์

$\bar{Q}_x$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจริง

X หมายถึง จำนวนข้อมูล

ผลการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยการสร้างตัวแบบจำลองเพื่อหาค่าประมาณพารามิเตอร์บ่งรูปร่างของการแจกแจง GEV จากตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง ด้วย แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมกับข้อมูลที่มีจำนวนมากอีกทั้งยังสามารถใช้ได้กับแบบจำลองเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้ข้อมูล จากสถานีตรวจอากาศ อุตุณิยมวิทยา กรมอุตุนิยมวิทยา ข้อมูลน้ำท่าจาก กรมชลประทาน และข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Terra-MODIS MOD13Q1 package (NDVI) ในระหว่างปี พ.ศ.2553 - 2564 โดยเลือกพื้นที่ลุ่มน้ำชีเป็นพื้นที่ศึกษา

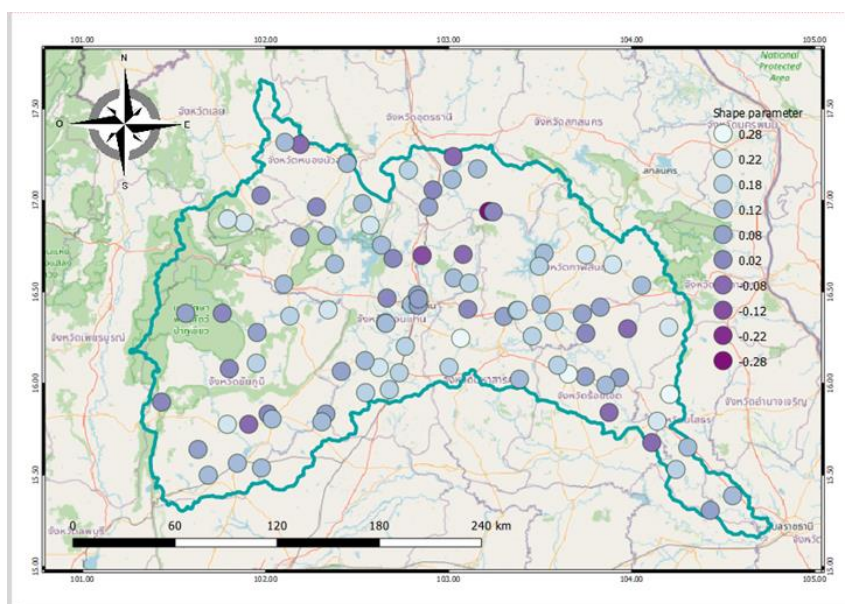
1. การเตรียมข้อมูล คัดกรองข้อมูลตัวแปร เพื่อทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 1 กำหนดชื่อตัวแปรและความหมายของตัวแปร ที่ใช้ในการวิเคราะห์

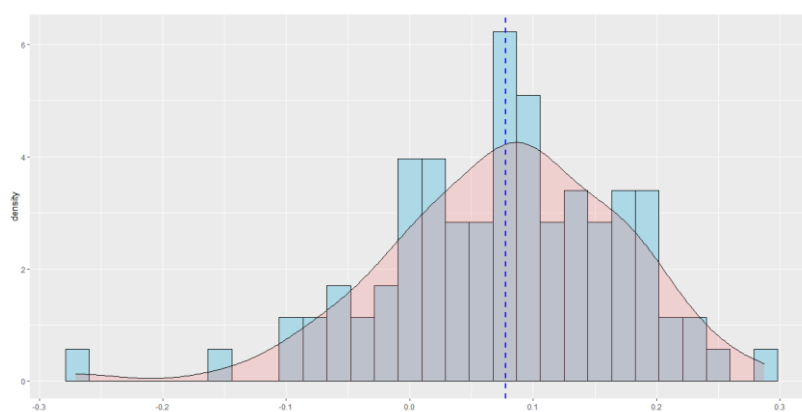
ตัวแปร	ความหมาย
LAT	พิกัดละติจูด (Latitude)
LONG	พิกัดลองจิจูด (Longitude)
xi	ค่าประมาณพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง (Shape parameter)
mu	ค่าประมาณพารามิเตอร์บ่งตำแหน่ง (Location parameter)
sigma	ค่าประมาณพารามิเตอร์บ่งขนาด (Scale parameter)
rain_max	ปริมาณน้ำฝนสูงสุด
rain_average	ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย
rain_sum	ปริมาณน้ำฝนสะสม
wind_max	ความเร็วลมสูงสุด
wind_average	ความเร็วลมเฉลี่ย
Temp_max	อุณหภูมิสูงสุด
Temp_min	อุณหภูมิต่ำสุด
Temp_average	อุณหภูมิเฉลี่ย
RH_average	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย
RH_max	ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด
NDVI	ดัชนีผลต่างพืชพรรณแบบนอนัลไลซ์เฉลี่ย (NDVI)
Runoff_max	ปริมาณน้ำท่าสูงสุด
Runoff_average	ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ย
Runoff_sum	ปริมาณน้ำท่าสะสม

2. การประมาณค่าพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง (Shape parameter)

สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงค่าสุดขีดน้อยทั่วไป (GEV) จากปริมาณน้ำฝนสูงสุดรายเดือน ด้วยวิธีที่น่าจะเป็นสูงสุด (MLE) จะเป็นการสร้างพารามิเตอร์ตั้งต้นที่จะนำไปคำนวณค่าประมาณค่าพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง (Shape parameter) ทั้งนี้ผู้วิจัยได้คำนวณค่าประมาณของพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง ตามสถานีตรวจวัดโดยอ้างอิงจากแหล่งที่มาของข้อมูลในลุ่มน้ำชี รายละเอียดดังรูปที่ 3 และ 4



รูปที่ 3 ค่าประมาณพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง (Shape parameter) รายสถานี จากข้อมูลปริมาณน้ำฝนสูงสุดรายเดือน

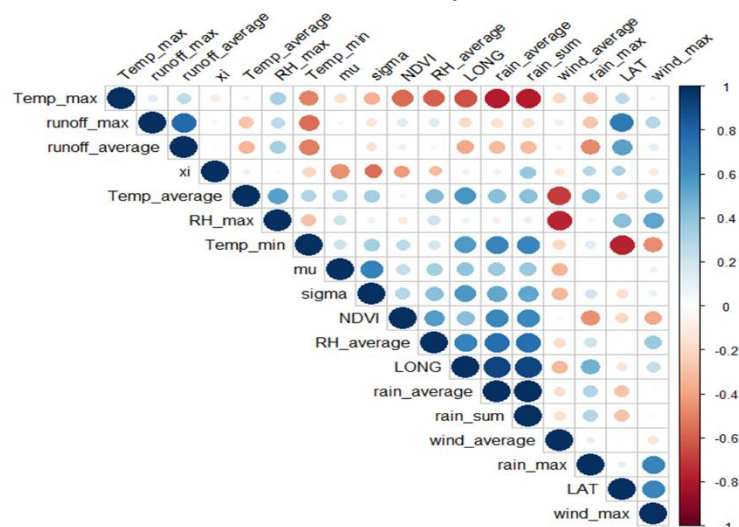


รูปที่ 4 กราฟฮิสโตแกรมค่าประมาณพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง (Shape parameter) ของทั้ง 92 สถานี

จากรูปที่ 3-4 พบว่าค่าประมาณพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง (Shape parameter) ของข้อมูลปริมาณน้ำฝนสูงสุดรายเดือนของทั้ง 92 สถานีในกลุ่มน้ำชี พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง -0.28 ถึง 0.28 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.077 และมีลักษณะเบ้ไปทางซ้ายซึ่งค่าเหล่านี้จะนำไปใช้เป็นพารามิเตอร์ตั้งต้นในการหาความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นๆ และนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

3. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรเพื่อหาตัวแปรที่ส่งผลต่อพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรโดยใช้การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson correlation coefficient) เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง กับทั้ง 18 ตัวแปรว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่ โดยผู้วิจัยได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้ผลดังรูปที่ 5

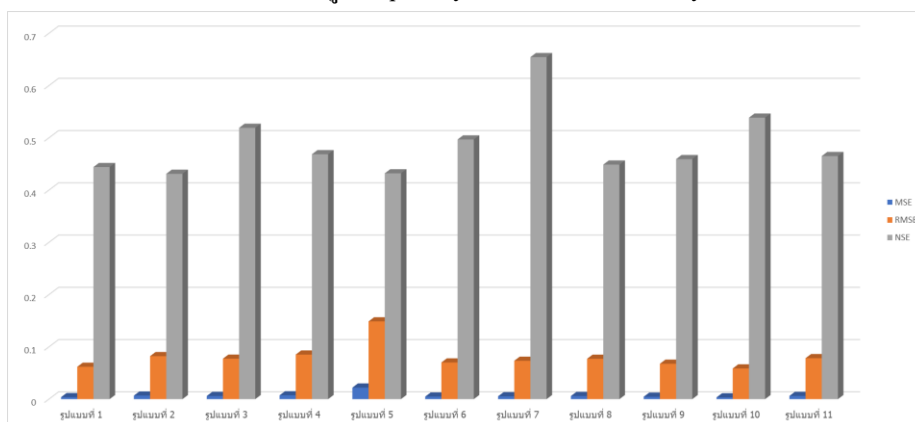


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ที่คำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของพารามิเตอร์บ่งรูปร่างกับตัวแปรอื่นๆ

จากรูปที่ 5 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันระหว่างค่าประมาณพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง กับตัวแปรอื่นๆ พบว่ามีตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับ xi มีดังนี้ mu, sigma, LAT, NDVI, RH_max, rain_max, Temp_min และ RH_average โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็น -0.46, -0.38, -0.43, 0.31, -0.31, 0.28, -0.23 และ 0.23 ตามลำดับ

4. แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN)

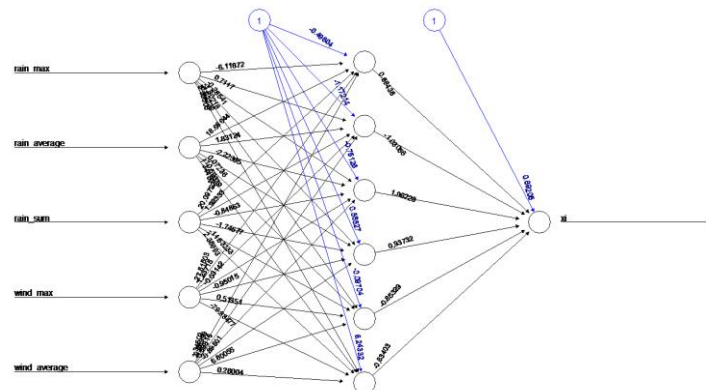
ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการประมาณพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง และได้ใช้สัดส่วนของการแบ่งข้อมูลในการ การสร้างแบบจำลอง (Train model) และทดสอบแบบจำลอง (Test model) เป็น 70% และ 30% โดยมีโครงสร้างของแบบจำลองประกอบด้วยชั้นรับข้อมูล (Input Layer) ชั้นแฝง (Hidden Layer) และชั้นแสดงผล (Output Layer)



รูปที่ 6 กราฟแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยใช้ MSE RMSE และ NSE

ผลการวิเคราะห์พบว่าโครงสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ จากชุดข้อมูลทั้งหมด 4 ข้อมูลคือ ข้อมูลเชิงพื้นที่ (พิกัด Lat, Long) ข้อมูลทางอุทกวิทยา ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา และ ข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม ได้ผลของการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมที่จะนำมาประมาณค่าพารามิเตอร์รูปร่าง (shape parameter) ทั้งหมด 11 แบบจำลองที่ดีที่สุดคือ ANN-7 ซึ่งมีค่า MSE เท่ากับ 0.0034 RMSE เท่ากับ 0.05831 และ NSE เท่ากับ 0.6545 และรองลงมาเป็นแบบจำลอง ANN-10 และ ANN-3 ตามลำดับ สามารถเขียนรูปแบบและสมการที่เหมาะสมในการสร้างแบบจำลองได้ดังนี้

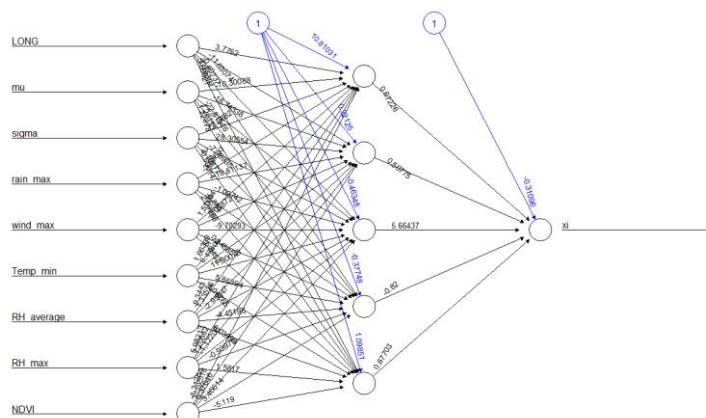
$$\text{แบบจำลอง ANN-3 (5-9-1) ได้ดังนี้ } \xi(ANN-3) = \sum_{j=1}^9 \left[\left(\sum_{i=1}^5 (w_j X_i) + B_j \right) v_j \right] \varphi$$



รูปที่ 7 โครงสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของแบบจำลอง ANN-3 (5-6-1)

จากรูปที่ 7 เป็นการแสดงโครงสร้างของแบบจำลอง ANN-3 และค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายแต่ละเส้นโดยประกอบด้วย ตัวแปรนำเข้าทั้งหมด 5 ตัวแปร ชั้น Hidden 6 เส้น และตัวแปรผลลัพธ์ 1 ตัวแปร

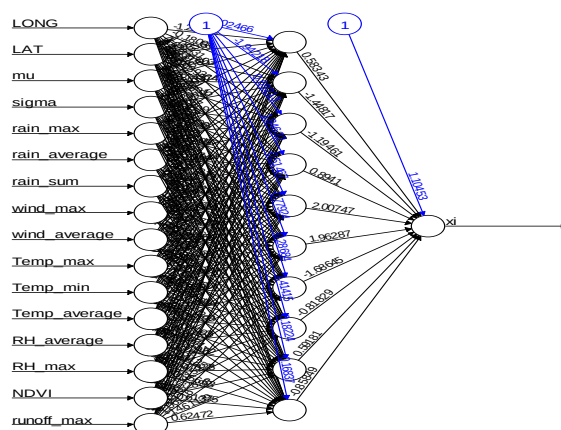
$$\text{แบบจำลอง ANN-7 (9-5-1) ได้ดังนี้ } \xi(ANN-7) = \sum_{j=1}^5 \left[\left(\sum_{i=1}^9 (w_j X_i) + B_j \right) v_j \right] \varphi$$



รูปที่ 8 โครงสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของแบบจำลอง ANN-7 (9-5-1)

จากรูปที่ 8 เป็นการแสดงโครงสร้างของแบบจำลอง ANN-7 และค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายแต่ละเส้นโดยประกอบด้วย ตัวแปรนำเข้าทั้งหมด 9 ตัวแปร ชั้น Hidden 5 เส้น และตัวแปรผลลัพธ์ 1 ตัวแปร

$$\text{แบบจำลอง ANN-10 (16-10-1) ได้ดังนี้ } \xi(ANN-10) = \sum_{j=1}^{10} \left[\left(\sum_{i=1}^{16} (w_j X_i) + B_j \right) v_j \right] \varphi$$

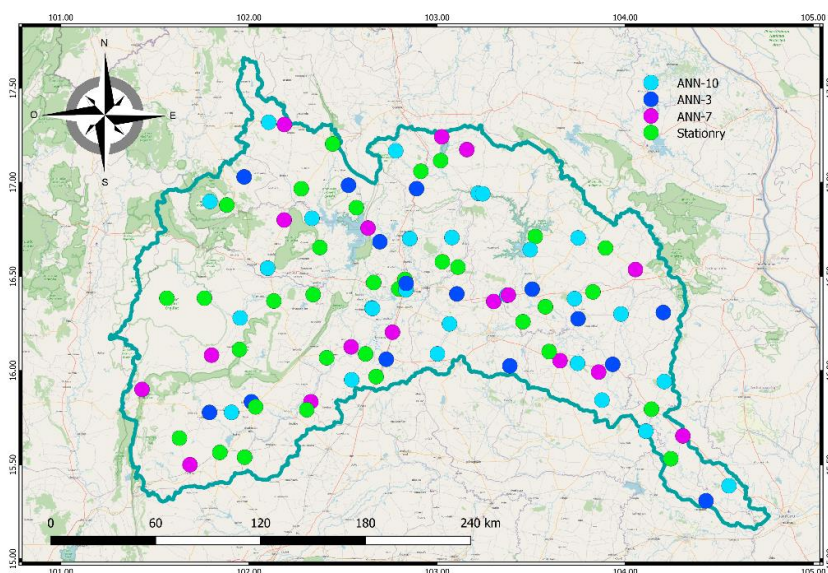


รูปที่ 9 โครงสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของแบบจำลอง ANN-10 (16-10-1)

จากรูปที่ 9 เป็นการแสดงโครงสร้างของแบบจำลอง ANN-10 และค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายแต่ละเส้นโดยประกอบด้วยตัวแปรนำเข้าทั้งหมด 16 ตัวแปร ชั้น Hidden 10 เส้น และตัวแปรผลลัพธ์ 1 ตัวแปร

5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง

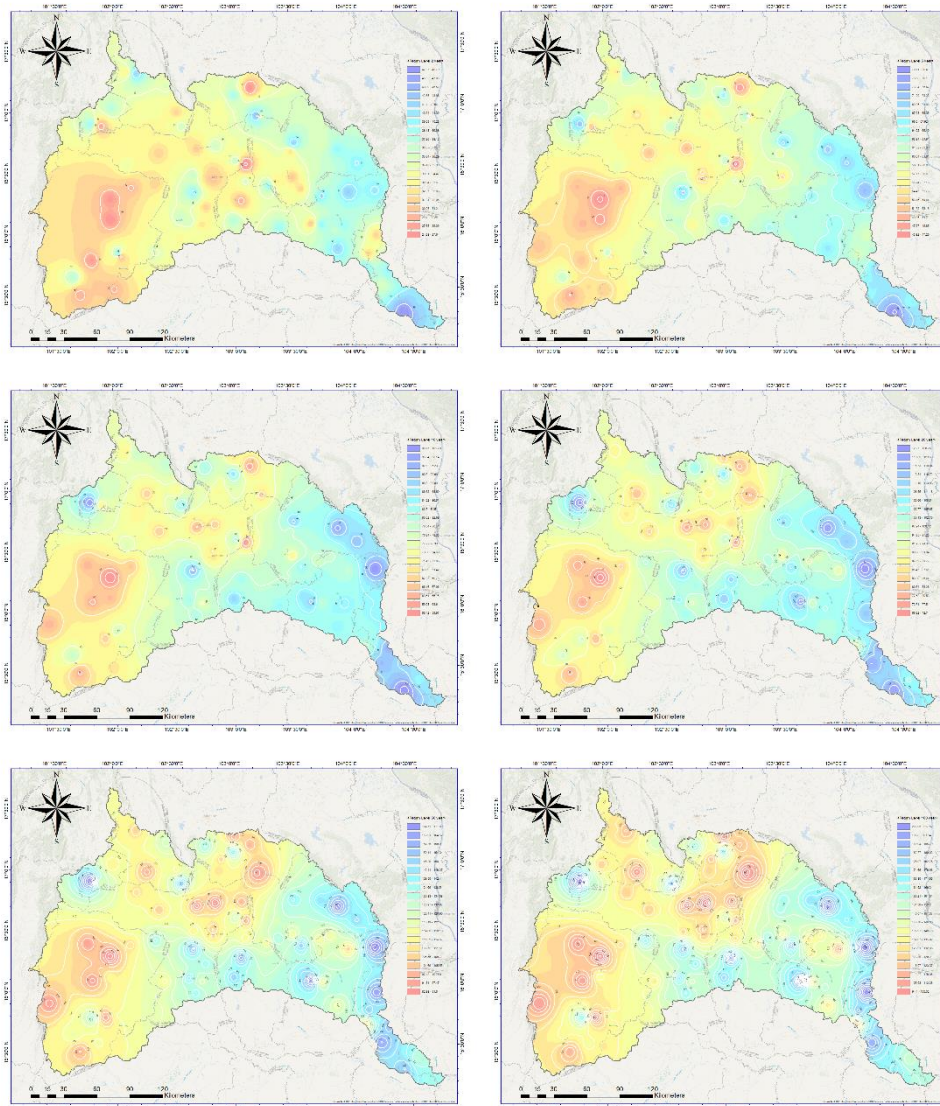
จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองภายใต้กระบวนการคงที่ และกระบวนการไม่คงที่ ด้วยการประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองด้วย NSE ผลการศึกษาแบบจำลองที่ประยุกต์ใช้กับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสูงสุดรายเดือนพบว่า แบบจำลองที่เหมาะสมกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสูงสุดรายเดือน ส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองภายใต้กระบวนการไม่คงที่ทั้งหมด 59 สถานี ได้แก่ แบบจำลอง ANN-7 17 สถานี แบบจำลอง ANN-10 27 สถานี และ แบบจำลอง ANN-3 15 สถานี และแบบจำลองภายใต้กระบวนการคงที่ที่เหมาะสมกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนสูงสุดรายเดือน มีทั้งหมด 33 สถานี แสดงภาพรวมแบบจำลองที่เหมาะสมรายละเอียดดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 แผนที่แสดงแบบจำลองที่เหมาะสมของแต่ละสถานีของทั้ง 92 สถานีในกลุ่มน้ำชี

6. ประมาณค่าระดับการเกิดซ้ำของแบบจำลองค่าสุดขีดและการสร้างแผนที่ระดับการเกิดซ้ำสำหรับรอบปีการเกิดซ้ำต่าง ๆ

ค่าระดับการเกิดซ้ำของปริมาณน้ำฝนสูงสุดรายเดือนจากแบบจำลองที่เหมาะสมของแต่ละสถานีในแต่ละรอบปีการเกิดซ้ำ 2 5 10 20 50 และ 100 ปี ดังรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่า จังหวัดที่มีปริมาณน้ำฝนสูงรายเดือนได้แก่ จังหวัดที่อยู่ชายขอบตอนล่างของกลุ่มน้ำชี และเมื่อนำมาสร้างเป็นแผนที่ระดับการเกิดซ้ำของปริมาณน้ำฝนสูงสุดรายเดือนของพื้นที่ที่ทำการศึกษพบว่า พื้นที่ที่มีแถบระดับสีสูงสุดจะเป็นพื้นที่ตอนล่างของกลุ่มน้ำชี ซึ่งประกอบด้วยจังหวัด ชัยภูมิ อุบลราชธานี ร้อยเอ็ด กาฬสินธุ์ และมหาสารคาม



รูปที่ 11 แผนที่ระดับการเกิดซ้ำของปริมาณน้ำฝนสูงสุดรายเดือนในรอบปีการเกิดซ้ำ 2 5 10 20 50 และ 100 ปี

สรุปผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

การศึกษการสร้างแบบจำลองพารามิเตอร์บ่งชี้รูปร่างของการแจกแจงค่าสุดขีดด้วยข้อมูลน้ำฝน-น้ำท่าและข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม โดยใช้วิธี โครงข่ายประสาทเทียม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hristos Tyralis และคณะ (2562) ที่พบว่าพารามิเตอร์บ่งชี้รูปร่างมีความสัมพันธ์กับ สภาพอากาศ และ ลักษณะของภูมิประเทศ อีกทั้งยังพบว่า ค่าดัชนี NDVI ก็เป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่ส่งผลต่อพารามิเตอร์บ่งชี้รูปร่าง นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Haniyeh Asadi และคณะ 2562 ที่พัฒนาแบบจำลองโครงข่ายในการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝน-น้ำท่า โดยใช้ดัชนีพืชพรรณ (NDVI) และปัจจัยด้านภูมิอากาศและอุทกวิทยา ปัจจัยการพัฒนาโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของแบบจำลอง ANN ดียิ่งขึ้น

จากผลการวิจัย พบว่า เมื่อเพิ่มตัวแปรด้านดัชนีพืชพรรณ (NDVI) ในการพัฒนาแบบจำลอง ตัวแปรนี้ทำให้ประสิทธิภาพของแบบจำลองดีขึ้นจากเดิมที่มีแต่ตัวแปรทางสภาพภูมิอากาศและตัวแปรเชิงพื้นที่ โดยเปรียบเทียบจากแบบจำลอง ANN-3 ที่ประกอบด้วย 5 ตัวแปรประกอบด้วย คือ ปริมาณน้ำฝนสูงสุด ปริมาณน้ำฝนสะสม ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย ความเร็วลมสูงสุด ความเร็วลมเฉลี่ย ซึ่งเป็นตัวแปรทางสภาพภูมิอากาศ และเมื่อเพิ่มตัวแปรด้านดัชนีพืชพรรณ (NDVI) ไปในแบบจำลอง ANN-7 ให้ทำให้ประสิทธิภาพของแบบจำลองเพิ่มขึ้น 26.06% เปรียบเทียบจากค่า NSE ของแต่ละแบบจำลอง นอกจากนั้นจากการศึกษาแบบจำลองทั้งสองรูปแบบ ได้แก่ ภายใต้กระบวนการคงที่ (Stationary Process) และภายใต้กระบวนการไม่คงที่ (Non-stationary Process) ของแบบจำลองค่าสุดขีดด้วยข้อมูลน้ำฝน พบว่า ข้อมูลส่วนใหญ่มีลักษณะเกิดขึ้นภายใต้กระบวนการไม่คงที่ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นจากปัจจัยธรรมชาติหลายอย่าง ทั้งนี้ปัจจัยหลักที่ส่งผลอย่างชัดเจน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงทางสภาพภูมิอากาศและลักษณะของภูมิประเทศ มีผลต่อการสร้างแบบจำลองภายใต้กระบวนการไม่คงที่ ซึ่งส่งผลต่อการสร้างแบบจำลองภายใต้กระบวนการคงที่มีประสิทธิภาพลดลงและขาดความแม่นยำของแบบจำลอง ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองภายใต้กระบวนการไม่คงที่จึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของโลกที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ช่วยประสิทธิ์ ประสาทความรู้ ข้อเสนอแนะ และคำสั่งสอนต่าง ๆ และขอขอบพระคุณโครงการวิจัยพัฒนานักศึกษาคณะศึกษาศาสตร์ของสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2564 ที่ได้สนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Busababodhin, P., & Keawmun, A. (2015). Extreme Values Statistics, *The Journal of KMUTNB*, 25(2), 55-65. (in Thai)
- Busababodhin, P. (2017). Modeling on Maximum Rainfall and Temperature based on Extreme Value Copula Analysis. *Abstract Proceeding of 10th Conference on Extreme Value Analysis (EVA2017), Delft, Netherlands, 26-30 June 2017*, 14.
- Busababodhin, P. (2018). *Extreme value analysis*. Maha Sarakham Rajabhat University Press, Maha Sarakham. (in Thai)
- Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., & Dorazio, P. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. London: Springer.
- Guarnieri, R. A., Pereira, E. B., & Chou, S. C. (2006). *Solar radiation forecast using artificial neural networks in South Brazil. Proceedings of the 8th ICSHMO*, 24-28.
- Asadi, H., Shahedi, K., Jarihani, B., & Sidle, R. C. (2019). Rainfall-runoff modelling using hydrological connectivity index and artificial neural network approach. *Water*, 11(2), 212. <https://doi/10.3390/w11020212>
- Tyralis, H., Papacharalampous, G., & Tantane, S. (2019). How to explain and predict the shape parameter of the generalized extreme value distribution of streamflow extremes using a big dataset. *Journal of Hydrology*, 574, 628-645. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.070>
- Lian, Y., Chan, I. C., Singh, J., Demissie, M., Knapp, V., & Xie, H. (2007). Coupling of hydrologic and hydraulic models for the Illinois River Basin. *Journal of hydrology*, 344(3-4), 210-222
- Royal Irrigation Department. (2017). *Use Artificial Neural Networks (ANN)*. Bureau of Water Management and Hydrology.
- Pearson, K. (1920). Notes on the history of correlation. *Biometrika*, 13(1), 25-45.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-694(70)90255-6)
- Meteorological Department of Thailand. (2020). <https://www.tmd.go.th> (in Thai)
- Thaipublica. (2019). *30 year Drought-Flood*. <https://thaipublica.org/2020/02/statistics-of-drought-flood-30-years/>
- USGS. (2011). *MOD13Q1*. https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mod13q1

Research Article

การสำรวจเหี้ยในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี จังหวัดปัตตานี

The Water Monitor Lizard Survey in Prince of Songkla University, Pattani Campus, Pattani Province

อันวาร์ อิบราฮิม¹ สุภาพร แสงแก้ว² นัฐวุฒิ ศรีไชยรัตน์² และ สมศักดิ์ บัวทิพย์^{2*}

Anwa Ibrahim¹ Supaporn Saengkaew² Nattawut Srichairat² and Somsak Buatip^{2*}

¹คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ประเทศไทย

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ประเทศไทย

¹Faculty of Education, Prince of Songkla University, Pattani Campus, Thailand

²Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani Campus, Thailand

*E-mail: somsak.bu@psu.ac.th

Received: 27/09/2021; Revised: 15/09/2022; Accepted: 06/10/2022

บทคัดย่อ

การสำรวจเหี้ยในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี จังหวัดปัตตานี ระหว่างเดือนกันยายน พ.ศ. 2562 - เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2563 ด้วยการนับจำนวนการปรากฏและบันทึกพฤติกรรมบางประการของเหี้ยที่ปรากฏในพื้นที่สำรวจ 5 เส้นทางสำรวจ เดือนละ 1 ครั้ง ในช่วงเวลา 07.00-17.00 น. ผลการศึกษาพบว่า การปรากฏของเหี้ยที่อาศัยอยู่ในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี เฉลี่ย 34.00 ± 8.14 ตัว/เดือน พบมากที่สุดในเส้นทางสำรวจ A เฉลี่ย 10.75 ± 4.66 ตัว/เดือน เดือนมกราคมพบการปรากฏของเหี้ยมากที่สุด 51 ตัว โดยพบการปรากฏของเหี้ยมากที่สุดในคลองและคูระบายน้ำ (95.82%) และบริเวณที่พบการปรากฏของเหี้ยมากที่สุดคือ คลองบริเวณเส้นทางสำรวจ A (หอพักนักศึกษา 1-10 19.41%) เหี้ยระยะวัยอ่อนเริ่มพิกออกจากไข่ในเดือนกันยายน โดยพบเหี้ยระยะวัยอ่อนมากตั้งแต่เดือนธันวาคม-มีนาคม หาอาหารตลอดทั้งวันโดยในช่วงเวลา 07.00-10.00 น. เป็นเวลาที่พบเหี้ยหาอาหารมากที่สุด ข้อมูลสำรวจในครั้งนี้จะมีประโยชน์สำหรับผู้บริหารเพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างต่างๆ ภายในวิทยาเขตปัตตานีในอนาคต

คำสำคัญ: ระบบนิเวศเมือง, สัตว์มีกระดูกสันหลังในน้ำ, พื้นที่ชายฝั่ง, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, เหี้ย

Abstract

The water monitor lizard survey in Prince of Songkla University, Pattani campus, Pattani province, was studied between September 2019-August 2020. The number and some behaviors of water monitor lizards were collected once a month, from 07.00 am-5.00 pm, from 5 line transects. The results showed that the water monitor lizard inhabited Prince of Songkla University, Pattani campus averaged 34.00 ± 8.14 individuals/month, and the most abundant was found in line transect A, averaging 10.75 ± 4.66 individuals/month. In January, the highest number of water monitor lizards, 51 individuals, was found in canals and drainage ditches (95.82%). The most abundant water monitor lizards observed in this study were located at canals at line transect A (near the student dormitory building 1-10; 19.41%). Water monitor lizards began to hatch in September, with the largest number of juveniles present from December to March. They foraged all day long. 7:00-10:00 am was the most common foraging period. The survey data will be useful for administrators to use as information for decision-making in the development and improvement of various structures within the Pattani campus in the future.

Keywords: urban ecosystem, semi-aquatic vertebrate, Coastal areas, PSU, *Varanus salvator*

บทนำ

เหี้ย (common water monitor lizard) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Varanus salvator* (Laurenti, 1768) ชนิดย่อย *V. s. macromaculatus* Deraniyagala, 1994 จัดอยู่ในชั้นสัตว์เลื้อยคลาน (Class Reptilia) อันดับกิ้งก่า (Order Squamata) วงศ์ตะกวด (Family Varanidae) มีชื่ออื่นๆ ที่เรียกกันในแต่ละท้องถิ่น คือ เหี้ยดอก มังกรดอก แลนดอกไม้ และตัวเงินตัวทอง เป็นกิ้งก่าขนาดใหญ่ที่มีความยาวประมาณ 1-3 เมตร น้ำหนักอาจมากถึง 50 กิโลกรัม นอกจากเหี้ยแล้วในประเทศไทยยังมีกิ้งก่าขนาดใหญ่ในวงศ์อีก 3 ชนิด คือ ตุ๊กตุ่น (*V. dumerilli*), เห่าช้าง (*V. rudicollis*) และตะกวด (*V. bengalensis*) สัตว์ในวงศ์นี้มีบทบาทเป็นผู้บริโภค (consumer) ที่เป็นผู้ล่า (predator) คอยควบคุมประชากรของสัตว์ชนิดอื่นไม่ให้มีมากเกินไปในระบบนิเวศ เช่น ควบคุมแมลงที่เป็นศัตรูพืชทางการเกษตร และเป็นผู้กินซากสัตว์ที่ตายแล้ว (scavenger) (Suekarnnurt, 2007; Fitzsimons & Thomas, 2016) เหี้ยเป็นสัตว์อยู่ในกลุ่มสถานภาพที่เป็นกังวลน้อยที่สุด (Least Concern; LC) (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 2020) การกระจายของเหี้ยส่วนมากพบในพื้นที่ทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ ประเทศไทย อินเดีย ศรีลังกา พม่า เวียดนาม ลาว มาเลเซีย สิงคโปร์ และอินโดนีเซีย (Chan-ard, 2015) ประเทศไทยพบมีการกระจายมากในภาคใต้ เนื่องจากภาคใต้มีระบบนิเวศที่เหมาะสมกับการอาศัยและการดำรงชีวิต คือ สภาพพื้นที่เป็นแหล่งน้ำทั้งน้ำเค็ม น้ำกร่อย และน้ำจืด เช่น ลำคลอง ป่าชายเลน พื้นที่ป่า หรือแม้กระทั่งในพื้นที่การทำเกษตร (Taylor, 1963; Lauprasert, 1999; Suekarnnurt, 2007; Chan-ard, 2015) และยังกระจายอยู่ในระบบนิเวศแบบเมืองซึ่งมีรายงานการศึกษาในหลายจังหวัด เช่น สมุทรปราการ นนทบุรี ฉะเชิงเทรา พระนครศรีอยุธยา นครปฐม และกรุงเทพฯ (Kulabong & Mahaprom, 2015)

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ตำบลสุตะมิเล อำเภอเมือง จังหวัดปัตตานี มีระบบนิเวศภายในและพื้นที่รอบนอกมหาวิทยาลัยเป็นระบบนิเวศเมือง ตั้งอยู่ทางด้านทิศเหนือของเขตเทศบาลเมืองปัตตานีในพื้นที่ชายฝั่งทะเลบริเวณด้านซ้ายของปากแม่น้ำปัตตานี ทิศเหนือติดต่อกับป่าชายเลนและหาดเลน ภายในมหาวิทยาลัยมีคลอง คู และท่อระบายน้ำกระจายอยู่ทั่วไปเพื่อรองรับน้ำจากอาคารต่างๆ และระบายน้ำในช่วงฤดูฝนออกสู่ทะเล เชื่อมต่อกับระบบน้ำขึ้นน้ำลง ซึ่งเหมาะสมกับเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยให้กับเหี้ยได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีแมลง กบ เขียด งู ส่วนใน คลอง คู และท่อระบายน้ำ มี กุ้ง ปู และปลาเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะปลานิล (*Oreochromis niloticus*) มีความชุกชุมอย่างมาก ซึ่งเป็นแหล่งอาหารชั้นดีและ

เพียงพอให้กับประชากรเหี้ยในมหาวิทยาลัย หากประชากรเหี้ยลดจำนวนลงหรือหายไปจากระบบนิเวศภายในพื้นที่มหาวิทยาลัย ก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในระบบนิเวศที่มีความสัมพันธ์เชื่อมโยงโดยตรงภายในสายใยอาหาร โดยในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรากฏ และพฤติกรรมบางประการของเหี้ยในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นทางวิชาการ สำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในการสร้างกระบวนการรับรู้และการเรียนรู้เกี่ยวกับระบบนิเวศภายในมหาวิทยาลัยให้กับทุกภาคส่วน รวมทั้งการศึกษาต่อของนักเรียน นักศึกษา และบุคลากรของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี และผู้สนใจ เพื่อเพิ่มเติมข้อมูลและองค์ความรู้ทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับเหี้ยให้ครบถ้วนสมบูรณ์ สำหรับวางแผนแนวทางการอนุรักษ์เหี้ยต่อไปในอนาคตเพื่อเป็นแบบอย่างให้กับพื้นที่อื่น ๆ ในการดูแลและจัดการกับความหลากหลายทางชีวภาพ เนื่องจากมหาวิทยาลัยเป็นพื้นที่แห่งการเรียนรู้สำหรับคนทุกเพศทุกวัย ไม่ว่าจะเป็นนักเรียน นักศึกษา บุคลากร และบุคคลภายนอก

วิธีการศึกษา

พื้นที่ศึกษา

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี เป็นมหาวิทยาลัยติดชายฝั่งทะเลอ่าวไทยทางด้านทิศเหนือ มีเนื้อที่ 960 ไร่ (1.53 ตารางกิโลเมตร) สภาพและลักษณะโดยทั่วไป ประกอบด้วย คลอง คู ท่อระบายน้ำ บ่อเลี้ยงกุ้ง-ปลา อาคาร สนามหญ้า/สวนหย่อม และป่าละเมาะที่มีต้นไม้ขึ้นกระจายอยู่ทั่วไป มีคลองและคูกันกระจายอยู่ทั่วไปในพื้นที่ต่างๆ ภายในมหาวิทยาลัย และเป็นแนวเขตแยกมหาวิทยาลัยกับชุมชน ในการสำรวจครั้งนี้กำหนดเส้นทางสำรวจ (Line transects) โดยใช้คลองและคูระบายน้ำเป็นเกณฑ์ ออกเป็น 5 เส้นทางสำรวจ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนที่เส้นทางสำรวจเหี้ย (*V. salvator*) ภายในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

โดยแต่ละเส้นทางสำรวจมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เส้นทางสำรวจ A : สำนักงานอธิการบดี อาคารเรียน 1-3 หอพักนักศึกษา 1-10 โรงอาหาร คณะศึกษาศาสตร์ โรงเรียนสาธิตฯ (ฝ่ายมัธยม) สนามกีฬากลาง และบ้านพักบุคลากร ระยะทาง 1,800 เมตร

เส้นทางสำรวจ B : คณะวิทยาการสื่อสาร คณะวิทยาการอิสลาม คณะรัฐศาสตร์ สถาบันวัฒนธรรมศึกษาวิทยาลัยนาฏศิลป์ หอพักนักศึกษา บ้านพักบุคลากร สนามกีฬา และบ่อเลี้ยงปลา ระยะทาง 1,900 เมตร

เส้นทางสำรวจ C : สำนักงานวิทยาเขตปัตตานี คณะศิลปกรรมศาสตร์ คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ หอสมุด JFK อาคารเรียนรวม โรงเรียนสาธิตฯ (ฝ่ายประถม) โรงเรียนสาธิตอิสลาม พิพิธภัณฑน์ มัสยิด บ้านพักบุคลากร และโรงอาหาร ระยะทาง 1,300 เมตร

เส้นทางสำรวจ D : คณะพยาบาลศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารฟิสิกส์คลินิก แปลงสาธิตเกษตร และบ่อเพาะเลี้ยงกุ้งปลา ระยะทาง 1,300 เมตร

เส้นทางสำรวจ E : แฟลตบุคลากร 3-17 บ้านพักบุคลากร และบ่อเลี้ยงกุ้งปลา ระยะทาง 1,800 เมตร

วิธีการสำรวจ

สำรวจและนับจำนวนเหี้ยที่ปรากฏในแต่ละเส้นทางสำรวจด้วยการเดินเท้าตลอดเส้นทางสำรวจครอบคลุมพื้นที่คลองคูระบายน้ำ และแหล่งอาศัยย่อยอื่นๆ ของเหี้ยในรัศมี 200 เมตร ของแต่ละเส้นทางสำรวจ นับเหี้ยทุกตัวที่ปรากฏ ระบุช่วงวัย (ประเมินด้วยสายตา) หากความยาวจากปลายจมูกถึงปลายหางน้อยกว่า 34 เซนติเมตร ส่วนหัวมีจุดหรือแถบสีเหลืองใต้ตา ลำตัวมีสีเหลืองค่อนข้างชัดเจน และหางมีลายจุดสีแดง จะถูกระบุเป็นเหี้ยระยะวัยอ่อน (Shine & Harlow, 1998; Rashid & Hoong, 2004; Suekamnurt, 2007; Mahaprom, 2016) เนื่องจากเหี้ยระยะวัยอ่อนมีขนาดและลักษณะที่แตกต่างจากเหี้ยตัวเต็มวัยอย่างชัดเจน และบันทึกพฤติกรรมบางประการในขณะที่พบ เช่น การหาอาหาร (เป็นการสังเกตพฤติกรรมต่อเนื่องของการหาเหยื่อและจับกินเหยื่อในแหล่งอาหาร เช่น กำลังว่ายนํ้า มุดค่านํ้า คลานบริเวณชายน้ำ-ริมตลิ่ง จับและกินเหยื่อ) นอนอาบแดด (นอนนิ่งบนพื้นหญ้า หรือที่โล่งมีแสงแดด หรือในร่มใต้เงาไม้ หรือบนต้นไม้) และต่อสู้อาหาร 1 ครั้ง/เส้นทางสำรวจ ตั้งแต่เวลา 07.00-17.00 น. (หมุนเวียนสลับแบบมีแบบแผนโดยเริ่มต้นจากเส้นทางสำรวจ A ไป E และในเดือนถัดไปจะเริ่มต้นจากเส้นทางสำรวจ E ไป A) ระหว่างเดือนกันยายน พ.ศ. 2562-เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2563

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างจำนวนการปรากฏของเหี้ยระหว่างเส้นทางสำรวจด้วย One-way ANOVA และการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (multiple comparisons: a post hoc test) โดยทดสอบด้วย Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยการปรากฏของเหี้ยระหว่างฤดูฝนและฤดูแล้ง โดยทดสอบด้วย independent samples t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ผลการศึกษา

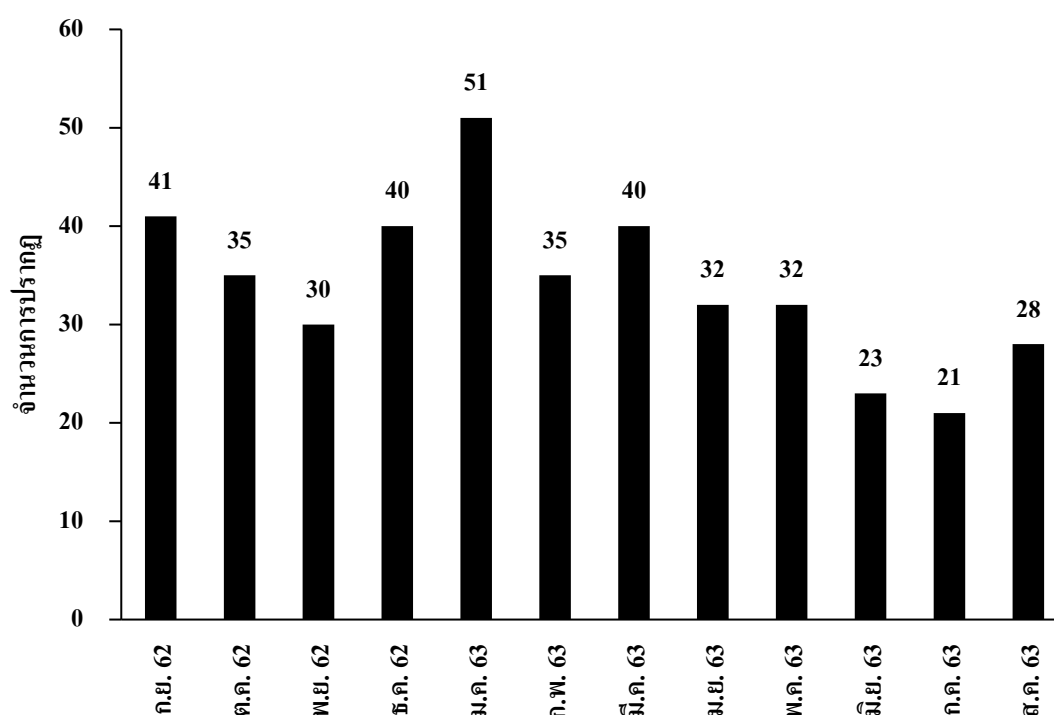
การปรากฏของเหี้ยในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

ตลอดระยะเวลา 1 ปี ที่ทำการศึกษาพบการปรากฏของเหี้ยในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี เฉลี่ย 34.00 ± 8.14 ตัว/เดือน มากที่สุดในเส้นทางสำรวจ A เฉลี่ย 10.75 ± 4.66 ตัว/เดือน รองลงมาคือ เส้นทางสำรวจ C เฉลี่ย 6.67 ± 2.78 ตัว/เดือน เส้นทางสำรวจ D เฉลี่ย 6.50 ± 3.69 ตัว/เดือน เส้นทางสำรวจ E เฉลี่ย 5.08 ± 2.10 ตัว/เดือน และเส้นทางสำรวจ B น้อยที่สุด เฉลี่ย 5.00 ± 3.56 ตัว/เดือน ตามลำดับ (ตารางที่ 1) โดยในเดือนมกราคมพบการปรากฏของเหี้ยมากที่สุด 51 ตัว รองลงมาคือ เดือนกันยายน (41 ตัว) เดือนมีนาคมและเดือนธันวาคม (40 ตัว เท่ากัน) ส่วนเดือนกรกฎาคมพบการปรากฏของเหี้ยน้อยที่สุด (21 ตัว) ตามลำดับ (รูปที่ 2)

ตารางที่ 1 จำนวนตัวและค่าเฉลี่ย $\pm$ SD การปรากฏของเหี้ย (*V. salvator*) ในแต่ละเส้นทางสำรวจภายในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ระหว่างเดือนกันยายน พ.ศ. 2562-เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2563

เส้นทางสำรวจ	A	B	C	D	E	Total
จำนวนตัว (น้อยสุด-มากที่สุด)	3-18	1-13	0-11	0-13	2-10	21-51
รวม (ตัว)	129	60	80	78	61	408
เฉลี่ย $\pm$ SD	10.75 ^a $\pm$ 4.66	5.00 ^b $\pm$ 3.56	6.67 ^{ab} $\pm$ 2.78	6.50 ^b $\pm$ 3.69	5.08 ^b $\pm$ 2.10	34.00 $\pm$ 8.14

หมายเหตุ ตัวอักษร a, b คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)



รูปที่ 2 จำนวนการปรากฏของเหี้ย (*V. salvator*) ในแต่ละเดือน ภายในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ระหว่างเดือนกันยายน พ.ศ. 2562-เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2563

โดยในแต่ละเส้นทางสำรวจมีการปรากฏของเหี้ยดังรูปที่ 3 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

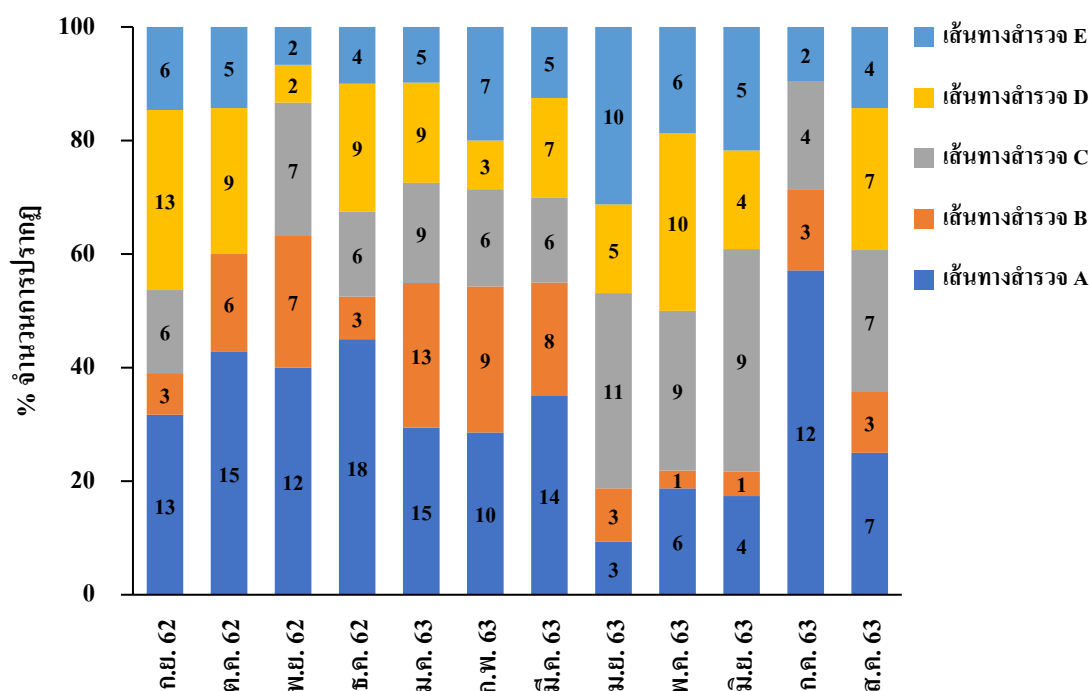
เส้นทางสำรวจ A พบการปรากฏของเหี้ยมากที่สุดในเดือนธันวาคม 18 ตัว รองลงมาคือ เดือนตุลาคมและมกราคม 15 ตัว เท่ากัน ส่วนเดือนที่มีการปรากฏน้อยที่สุดคือ เดือนเมษายน 3 ตัว

เส้นทางสำรวจ B พบการปรากฏของเหี้ยมากที่สุดในเดือนมกราคม 13 ตัว รองลงมาคือ เดือนกุมภาพันธ์ 9 ตัว เดือนมีนาคม 8 ตัว ส่วนเดือนที่มีการปรากฏน้อยที่สุดคือ เดือนพฤษภาคมและมิถุนายน 1 ตัว เท่ากัน

เส้นทางสำรวจ C พบการปรากฏของเหี้ยมากที่สุดในเดือนเมษายน 11 ตัว รองลงมาคือ เดือนมกราคม พฤษภาคม และมิถุนายน 9 ตัว เท่ากัน ส่วนเดือนที่มีการปรากฏน้อยที่สุดคือ เดือนกรกฎาคม 4 ตัว ในขณะที่เดือนตุลาคมไม่พบเหี้ยเลย

เส้นทางสำรวจ D พบการปรากฏของเหี้ยมากที่สุดในเดือนกันยายน 13 ตัว รองลงมาคือ เดือนพฤษภาคม 10 ตัว เดือนมกราคม ตุลาคม และธันวาคม 9 ตัว เท่ากัน ส่วนเดือนที่มีการปรากฏน้อยที่สุดคือ เดือนพฤศจิกายน 2 ตัว ในขณะที่เดือนกรกฎาคมไม่พบเหี้ยเลย

เส้นทางสำรวจ E พบการปรากฏของเหี้ยมากที่สุดในเดือนเมษายน 10 ตัว รองลงมาคือ เดือนกุมภาพันธ์ 7 ตัว เดือนพฤษภาคมและกันยายน 6 ตัว ส่วนเดือนที่มีการปรากฏน้อยที่สุดคือ เดือนพฤศจิกายนและกรกฎาคม 2 ตัวเท่ากัน



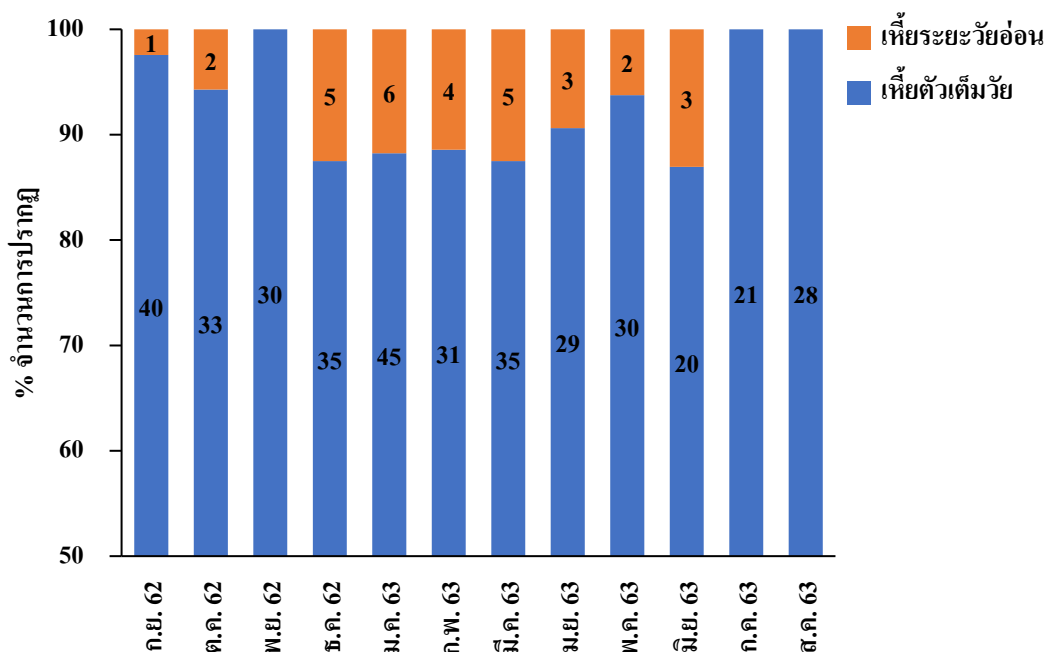
รูปที่ 3 เปอร์เซนต์จำนวนการปรากฏของเหี้ย (*V. salvator*) แต่ละเส้นทางสำรวจรายเดือน ภายในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ระหว่างเดือนกันยายน พ.ศ. 2562-เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2563

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนการปรากฏของเหี้ยระหว่างเส้นทางสำรวจ ตลอดระยะเวลาการศึกษา พบว่า จำนวนการปรากฏของเหี้ยโดยเฉลี่ยในเส้นทางสำรวจ A มีจำนวนการปรากฏมากกว่าในเส้นทางสำรวจ D, E และ B อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 1) และเมื่อเปรียบเทียบจำนวนการปรากฏระหว่างฤดูกาล พบว่า จำนวนการปรากฏในฤดูฝน (มิถุนายน-ธันวาคม) กับฤดูแล้ง (มกราคม-พฤษภาคม) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ภายในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี เป็นแหล่งอาศัยที่สำคัญที่เหมาะสมกับการเป็นที่อยู่และหาอาหารของเหี้ย โดยมีระบบนิเวศแบบคลอง-กระบายน้ำเป็นระบบนิเวศที่พบการปรากฏของเหี้ยสูงถึง 95.82% (คลอง 89.19%, กระบายน้ำ 6.63%) ระบบนิเวศแบบบ่อเลี้ยงกุ้งปลา 2.70% ระบบนิเวศแบบป่า (ป่าบก ป่าชายเลน) 2.46% และพื้นที่เปิดโล่งต่างๆ 0.49% ตามลำดับ โดยพื้นที่ที่พบการปรากฏของเหี้ยมากที่สุดคือ คลองบริเวณเส้นทางสำรวจ A (29.73%, 151 ตัว) รองลงมาคือ คลองบริเวณเส้นทางสำรวจ C (24.08%, 98 ตัว) คลองบริเวณเส้นทางสำรวจ E (13.27%, 54 ตัว) คลองบริเวณเส้นทางสำรวจ B (10.32%, 42 ตัว) คลองบริเวณเส้นทางสำรวจ D (7.37%, 30 ตัว) บ่อเพาะเลี้ยงกุ้งปลาบริเวณเส้นทางสำรวจ D (4.42%, 18 ตัว) และบ่อเลี้ยงปลาบริเวณเส้นทางสำรวจ B (1.97%, 8 ตัว) ตามลำดับ

โครงสร้างประชากรตามช่วงอายุ

ตลอดระยะเวลา 1 ปี ที่สำรวจพบการปรากฏของเหี้ยระยะวัยอ่อน ตั้งแต่เดือนกันยายน-มิถุนายน ทั้งหมด 31 ตัว โดยเดือนที่พบเหี้ยระยะวัยอ่อนมากอยู่ในช่วงระหว่างเดือนธันวาคม-มีนาคม (รูปที่ 4) ซึ่งในเดือนมิถุนายนมีสัดส่วนระหว่างเหี้ยระยะวัยอ่อนต่อเหี้ยตัวเต็มวัยสูงที่สุด เท่ากับ 0.15 รองลงมาคือ เดือนธันวาคมและมกราคม (0.14 เท่ากันทั้ง 2 เดือน) มกราคมและกุมภาพันธ์ (0.13 เท่ากันทั้งสองเดือน) เมษายน (0.1) พฤษภาคม (0.07) ตุลาคม (0.06) และกันยายน (0.03) ตามลำดับ เดือนที่ไม่พบเหี้ยระยะวัยอ่อนคือ เดือนพฤศจิกายน กรกฎาคม และสิงหาคม ในขณะที่เส้นทางสำรวจ C มีสัดส่วนระหว่างเหี้ยระยะวัยอ่อนกับเหี้ยตัวเต็มวัยตลอดทั้งปีสูงที่สุด เท่ากับ 0.14 รองลงมาคือ เส้นทางสำรวจ D (0.10) เส้นทางสำรวจ B (0.07) เส้นทางสำรวจ A (0.06) และเส้นทางสำรวจ E (0.05) ตามลำดับ

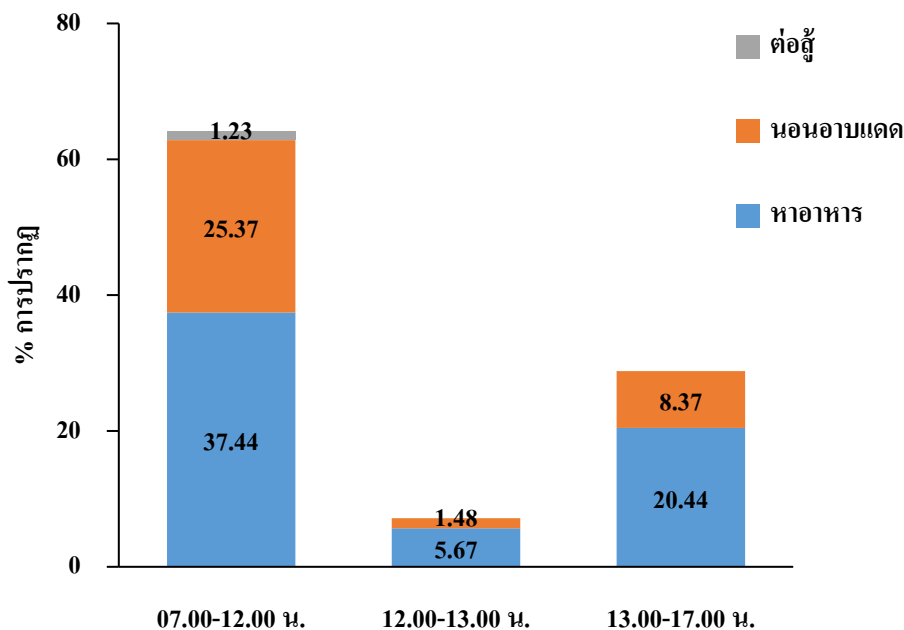


รูปที่ 4 เปอร์เซนต์จำนวนการปรากฏของเหี้ยระยะวัยอ่อนและตัวเต็มวัย (*V. salvator*) ในแต่ละเดือน ภายในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ระหว่างเดือนกันยายน พ.ศ. 2562-เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2563

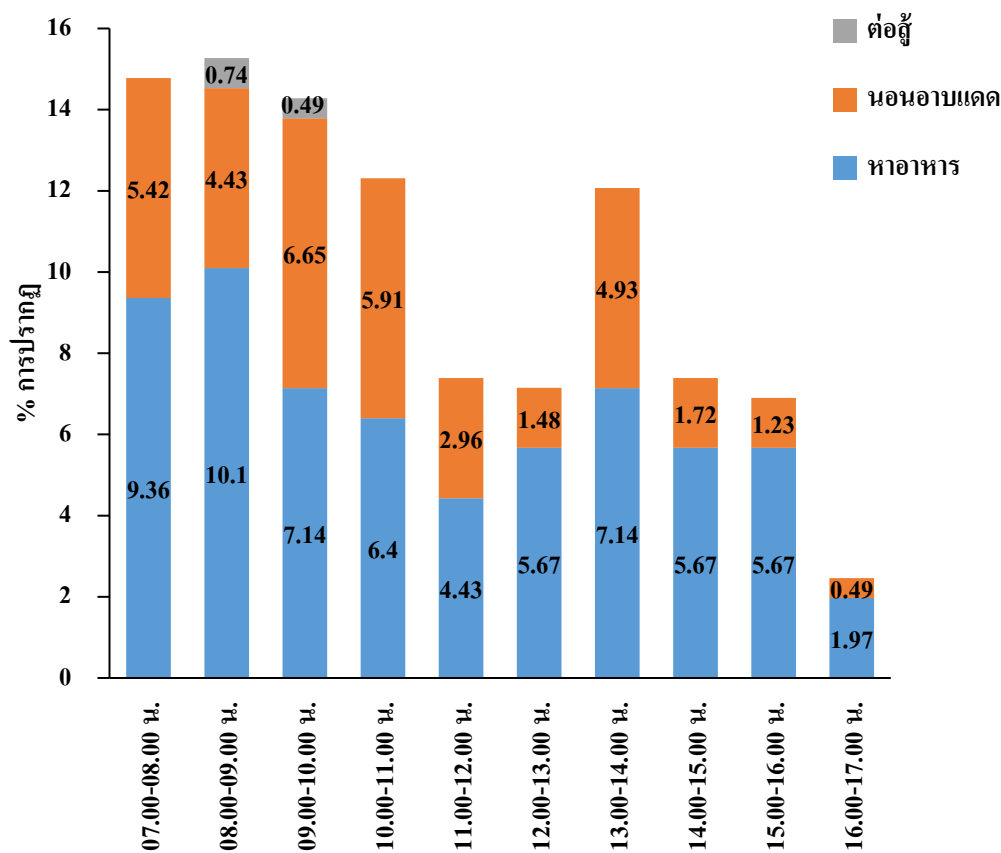
พฤติกรรมบางประการของเหี้ยตัวเต็มวัยที่ปรากฏระหว่างการสำรวจ

เนื่องจากเหี้ยใช้พื้นที่ภายในมหาวิทยาลัยเป็นทั้งพื้นที่หากินและพักผ่อน ตลอดระยะเวลาที่สำรวจพบพฤติกรรมของเหี้ยตัวเต็มวัยทั้งหมด 377 ครั้ง โดยพบพฤติกรรมหาอาหารมากที่สุด 63.55% ตั้งแต่ 07.00-17.00 น. รองลงมาคือ นอนอาบแดด 35.22% และการต่อสู้บ่อยที่สุดเพียง 1.23% ตามลำดับ พฤติกรรมหาอาหารและนอนอาบแดดส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงเวลา 07.00-12.00 น. (หาอาหาร 37.44%, นอนอาบแดด 25.37%) รองลงมาคือ ช่วงเวลา 13.00-17.00 น. ส่วนช่วงเวลา 12.00-13.00 น. พบพฤติกรรมหาอาหารและนอนอาบแดดน้อยที่สุด (รูปที่ 5)

ในเวลา 7.00-10.00 น. เป็นช่วงเวลาที่พบเหี้ยตัวเต็มวัยมีพฤติกรรมหาอาหารมากที่สุด หลังจากนั้นจะลดลงและค่อนข้างคงที่จนถึงเวลา 16.00 น. และพบได้น้อยลงอย่างชัดเจนหลังจาก 16.00 น. ส่วนเวลาที่พบพฤติกรรมนอนอาบแดดมากที่สุด คือ 09.00-10.00 น. หลังจากนั้นจะลดลงและสูงขึ้นอีกครั้งในเวลา 13.00-14.00 น. แต่หลังจากนั้นจะพบได้น้อยลงอย่างมาก ส่วนพฤติกรรมการต่อสู้พบได้เฉพาะช่วงเช้าเท่านั้น (รูปที่ 6)



รูปที่ 5 เปอร์เซนต์ของพฤติกรรมอาหาร นอนอาบแดด และต่อสู ของเหี้ยตัวเต็มวัย (*V. salvator*) ที่ปรากฏใน 3 ช่วงเวลา (เช้า-เที่ยง, เที่ยง, บ่าย-เย็น) ภายในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ระหว่างเดือนกันยายน พ.ศ. 2562-เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2563



รูปที่ 6 เปอร์เซนต์ของพฤติกรรมการหาอาหาร นอนอาบแดด และต่อสู ของเหี้ยตัวเต็มวัย (*V. salvator*) ที่ปรากฏในรอบวัน ภายในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ระหว่างเดือนกันยายน พ.ศ. 2562-เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2563 (ระหว่างเวลา 07.00-17.00 น.)

วิจารณ์ผลการศึกษา

การปรากฏของเหี้ยในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

ในระหว่างการศึกษาพบรังและโพรงนอนของเหี้ยให้เห็นตามเส้นทางสำรวจต่างๆ ดังนั้นมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี จึงเป็นพื้นที่ที่เหมาะสมกับเป็นแหล่งอาศัย ทำรัง เลี้ยงตัวอ่อน และหาอาหารของเหี้ย เนื่องจากตั้งอยู่บนพื้นที่ชายฝั่งทะเล ทิศเหนือติดกับป่าชายเลน ภายในมหาวิทยาลัยมีคลองระบายน้ำหลักเชื่อมต่อกับทะเล 3 สาย โดยทั้ง 3 สายเชื่อมต่อกันหมดกับคลอง คู และท่อระบายน้ำต่างๆ ภายในมหาวิทยาลัย และยังได้รับอิทธิพลจากระดับน้ำขึ้นน้ำลง รวมทั้งน้ำทิ้งจากอาคารต่างๆ แพลตบดกลาง บ้านพักบุคลากร และหอพักนักศึกษา ทำให้คลองและคูต่างๆ (เส้นทางสำรวจ A, B, C, D และ E) มีน้ำตลอดทั้งปี นอกจากนั้นยังมีบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและบ่อเลี้ยงกุ้งปลาที่ยังใช้ประโยชน์และทิ้งร้าง (เส้นทางสำรวจ B และ D) บริเวณอาคารต่างๆ มีสนามหญ้าและสวนหย่อม (เส้นทางสำรวจ A, B, C และ D) ส่วนบริเวณแพลตฟอร์มและบ้านพักบุคลากรบางพื้นที่ที่รกร้างเป็นป่าละเมาะ บางพื้นที่มีการปลูกผักสวนครัวและผลไม้ และเลี้ยงไก่ เป็นต้น (เส้นทางสำรวจ A และ E) ด้วยลักษณะทางภูมิศาสตร์ดังกล่าวส่งผลให้คลองและคูสายต่างๆ มีสัตว์น้ำตามธรรมชาติหลายชนิด โดยเฉพาะปลานิลมากพอสำหรับเป็นอาหารกับประชากรเหี้ยที่อาศัยอยู่ในมหาวิทยาลัย ซึ่งสภาพพื้นที่ดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานการศึกษาเหี้ยในหลายพื้นที่ เช่น โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเพชรบุรี (Suekamnurt, 2007) บางกะเจ้า จังหวัดสมุทรปราการ (Mahaprom, 2016) สวนสัตว์ดุสิต สวนลุมพินีและมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร และพื้นที่ใกล้เคียง ได้แก่ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา นครปฐม ปทุมธานี และประจวบคีรีขันธ์ (Trivalairat, 2016) เป็นต้น ในขณะที่โดยรอบมหาวิทยาลัยบางพื้นที่ยังคงมีสภาพเป็นป่าพรุ คลองธรรมชาติ บางพื้นที่เป็นชุมชน (คลองผ่านกลางชุมชน) พื้นที่เกษตรกรรม และป่าชายเลน เป็นต้น (Lauprasert, 1999; Suekamnurt, 2007; Taylor, 1963; Chan-ard, 2015) เชื่อมต่อกับมหาวิทยาลัยด้วยคูระบายน้ำ และถนน ซึ่งเหี้ยสามารถเคลื่อนย้ายไปมาได้ แหล่งอาศัยที่พบเหี้ยปรากฏมากที่สุด คือ คลอง คู และท่อระบายน้ำ มากถึง 95.82% ในขณะที่บ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและบ่อเลี้ยงกุ้งปลาพบเหี้ยเพียง 2.70% ป่าชายเลน 2.46% และอื่นๆ 0.49% ตามลำดับ

โดยเฉพาะเส้นทางสำรวจ A ซึ่งเป็นพื้นที่สำรวจที่พบการปรากฏของเหี้ยมากที่สุด และมากกว่าเส้นทางสำรวจอื่นๆ ตั้งแต่เดือนกรกฎาคมซึ่งเป็นเดือนที่ฝนเริ่มตกชุก ยาวนานจนถึงเดือนมีนาคม รวม 9 เดือน เส้นทางสำรวจ A มีพื้นที่ 193.75 ไร่ เล็กกว่าเส้นทางสำรวจ B (250 ไร่) เพียงเส้นทางสำรวจเดียวเท่านั้น ปัจจัยสำคัญที่คาดว่าทำให้พบการปรากฏของเหี้ย (ทั้งเหี้ยตัวเต็มวัยและระยะวัยอ่อน) มากกว่าเส้นทางสำรวจอื่นๆ เกือบตลอดทั้งปี (9 เดือน) นั่นคือ มีคลองระบายน้ำพาดผ่านตลอดแนวเขตแดนของมหาวิทยาลัย โดยมีคูระบายน้ำจำนวน 5 สาย เชื่อมต่อ ทำให้มีสัตว์น้ำชุมชุมโดยเฉพาะปลานิล บางพื้นที่มีบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ บริเวณคันคลองและคูเป็นป่าละเมาะแคบๆ ขนานกับสายคลองสลับกับแนวคันสนและคันพิกุล บริเวณบ้านพักและแพลตฟอร์มร่มรื่นด้วยไม้ใหญ่ มีการทำเกษตร เช่น เลี้ยงไก่ ปลูกผักสวนครัว กว๊าน มะพร้าว มะขาม รวมทั้งไม้ใช้สอยและไม้สวยงาม และขอบถนนมีต้นมะขามตลอดทั้งสองข้างทาง เป็นต้น มีสุนัขไม่มาก (เฉพาะบริเวณหอพักนักศึกษาและโรงอาหาร) รวมทั้งรถมอเตอร์ไซด์และรถยนต์ ไม่พลุกพล่านค่อนข้างเงียบสงบ โดยการปรากฏของเหี้ยจะสัมพันธ์กับคลองและคูระบายน้ำ บริเวณหอพักนักศึกษาและบ้านพักบุคลากร นอกจากนั้นในเส้นทางสำรวจนี้เหี้ยอาจได้รับเศษอาหารจากหอพักนักศึกษา บ้านพักบุคลากร และโรงอาหารหลักของมหาวิทยาลัย (Kulablong & Mahaprom, 2015)

รองลงมาคือ เส้นทางสำรวจ C เป็นพื้นที่สำรวจที่อยู่ใจกลางมหาวิทยาลัย มีเนื้อที่เพียง 118.75 ไร่ เล็กที่สุด แต่ถูกล้อมรอบด้วยคลอง 3 ด้าน และคูระบายน้ำ อีก 1 ด้าน เชื่อมต่อกับท่อระบายน้ำจากอาคารต่างๆ อีกหลายสาย รอบอาคารเป็นสนามหญ้าและสวนหย่อม บางอาคารมีสวนผัก บริเวณบ้านพักบุคลากรร่มรื่นด้วยต้นไม้ใหญ่ เช่น มะพร้าว มะม่วง สุนทะเล บางบริเวณเป็นป่าละเมาะ มีถนนขนานกับคลองและคูระบายน้ำทั้ง 4 ด้าน ริมถนนมีต้นไม้ใหญ่ เช่น ตาลโตด นมโหฬาง

กระรอก จามจุรี มะขาม พะยอม ตะเคียน และพิทูล เป็นต้น และริมกระบายน้ำบางบริเวณเต็มไปด้วยต้นกระดินและตาคุ่มทะเล แต่มีสุนัขค่อนข้างมาก (ประจำอยู่ทุกอาคาร) รถมอเตอร์ไซด์และรถยนต์วิ่งพลุกพล่าน โดยการปรากฏของเหี้ยจะสัมพันธ์กับ คลองและกระบายน้ำเหมือนกับเส้นทางสำรวจ A นอกจากนั้นยังพบว่า การปรากฏของเหี้ยในช่วงเดือนเมษายน-มิถุนายน มีจำนวนสูงกว่าในเส้นทางสำรวจ A อาจเนื่องมาจากเป็นช่วงฤดูร้อน น้ำทะเลจากอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงเข้าไปไม่ถึงเส้นทางสำรวจ A ทำให้ระดับน้ำในคลองของเส้นทางสำรวจ A ลดระดับลง น้ำเน่าเสีย ส่งผลให้สัตว์น้ำลดลง ในขณะที่เส้นทางสำรวจ C ยังได้รับอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลงอยู่ ประกอบกับพื้นที่อื่นๆ ที่เหี้ยเคยใช้ประโยชน์ เช่น กระบายน้ำและสระน้ำแห้ง พื้นที่บก และป่าละเมาะแห้งแล้ง อาหารจึงไม่เพียงพอ อาจส่งผลให้เกิดการเคลื่อนย้ายของเหี้ยบางส่วนจากเส้นทางสำรวจ A ไปยังเส้นทางสำรวจอื่นๆ ภายในมหาวิทยาลัยหรือออกไปใช้พื้นที่อื่นข้างนอก และไม่พบเหี้ยในเดือนตุลาคมเพียงเดือนเดียวเท่านั้น

ในขณะที่เส้นทางสำรวจ D เป็นพื้นที่สำรวจทางทิศเหนือของมหาวิทยาลัย เนื้อที่ 125 ไร่ ติดกับป่าชายเลนตลอด แนวทางด้านทิศเหนือ ในช่วงที่สำรวจพบว่า บริเวณขอบบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นป่าละเมาะค่อนข้างรกทึบมีต้นกระดิน ตาคุ่มทะเล และโพธิ์ทะเล เป็นหลัก มีคลองและกระบายน้ำเชื่อมต่อกับคลองในเส้นทางสำรวจ C มีสุนัขค่อนข้างมากประจำอยู่ทุกอาคาร รถมอเตอร์ไซด์และรถยนต์พลุกพล่าน โดยในเส้นทางสำรวจนี้การปรากฏของเหี้ยจะสัมพันธ์กับคลองและกระบายน้ำเช่นกัน นอกจากนั้นยังพบว่า ใต้อาคารหลายอาคารมีน้ำขังและมักพบเหี้ยใช้เป็นที่อยู่อาศัย และไม่พบเหี้ยในเดือนกรกฎาคมเพียงเดือนเดียว

ส่วนเส้นทางสำรวจ B เป็นพื้นที่สำรวจทางทิศตะวันออก เนื้อที่ 250 ไร่ ด้วยเป็นแนวเส้นทางสำรวจที่มีอาคารบริหาร 3 คณะ และ 1 หน่วยงาน หอพักนักศึกษา ที่พักคนงาน และสนามกีฬา เป็นเส้นทางสำรวจที่ค่อนข้างเปิดโล่ง มีสุนัขค่อนข้างมาก รถวิ่งพลุกพล่าน ส่วนบริเวณที่เป็นบ่อเลี้ยงปลา (ขนาดพื้นที่ 75 ไร่ มีเจ้าของดูแลและเลี้ยงสุนัข) คั่นคลอง-กระบายน้ำส่วนใหญ่เป็นป่ารกทึบ ยกในการสังเกตเห็นตัวเหี้ย และเส้นทางสำรวจ E เป็นพื้นที่สำรวจทางทิศตะวันตก เนื้อที่ 164.75 ไร่ เป็นเส้นทางสำรวจที่เป็นบ้านพักและแปลงของบุคลากร มีคลองและกระบายน้ำหลายสาย แต่สภาพคันตลิ่งและบริเวณใกล้เคียงเป็นป่ารกทึบ ยกในการสังเกตเห็นตัวเหี้ย ปรากฏให้เห็นเฉพาะร่องรอยเช่นเดียวกับเส้นทางสำรวจ B โดยทั้ง 2 เส้นทางสำรวจนี้พบการปรากฏของเหี้ยทุกเดือน

เหี้ยระยะวัยอ่อน เหี้ยผสมพันธุ์และวางไข่ในฤดูฝน ประมาณเดือนสิงหาคม-กันยายน โดยสร้างรังบริเวณที่แสงส่องถึง เช่น ใต้ต้นไม้ กอไม้ จอมปลวก วางไข่ครั้งละ 6-17 ฟอง ระยะเวลาฟักประมาณ 60-70 วัน แต่แต่ละปีสามารถวางไข่ได้ 2-3 ครั้ง หรือมากกว่านั้น (Suekarnurt, 2007) ซึ่งจากการศึกษาในครั้งนี้คณะผู้วิจัยไม่ได้เก็บข้อมูลการทำรังวางไข่ แต่ประเมินฤดูผสมพันธุ์จากเหี้ยระยะวัยอ่อนที่ปรากฏในเดือนต่างๆ ตลอดระยะเวลา 1 ปี พอสรุปได้ว่าในพื้นที่มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี เป็นพื้นที่ทำรังวางไข่ของเหี้ยด้วยเช่นกัน โดยเหี้ยจะเริ่มผสมพันธุ์ในเดือนกรกฎาคม-สิงหาคม และเหี้ยระยะวัยอ่อนรุ่นแรกจะปรากฏให้เห็นภายในเดือนกันยายนยาวต่อเนื่องถึงเดือนมิถุนายน เมื่อเปรียบเทียบกับในพื้นที่อื่นๆ พบว่า เหี้ยเริ่มฤดูผสมพันธุ์ช้ากว่าในพื้นที่จังหวัดอยุธยา กรุงเทพฯ นครปฐม ปทุมธานี และประจวบคีรีขันธ์ อย่างน้อย 2 เดือน โดยในพื้นที่เหล่านี้เหี้ยเริ่มทำรังตั้งแต่เดือนพฤษภาคม (Trivalairat, 2016) เนื่องจากในพื้นที่ดังกล่าวเข้าสู่ฤดูฝนก่อนจังหวัดในพื้นที่ภาคใต้ ทำให้มีแหล่งหาอาหารเพิ่มมากขึ้นและมีปริมาณอาหารเพียงพอต่อการเลี้ยงกลุ่มประชากรที่เป็นพ่อแม่และประชากรลูกที่จะเกิดมาใหม่ และจากการศึกษาของ Trivalairat (2016) พบว่า พื้นที่ทำรังวางไข่ของเหี้ยมักจะอยู่ใกล้แหล่งน้ำ แสงส่องถึง และสัมพันธ์กับกิจกรรมของมนุษย์ เช่น ใกล้บ้านเรือน พื้นที่ทำการเกษตร ไร่สวน ใต้ต้นไม้ริมสระน้ำและริมคลอง ป่าละเมาะ หุ่นหญ้า บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำกรังมีต้นไม้ขึ้นปกคลุม ริมกำแพงที่มีกระบายน้ำเสีย สถานที่ทิ้งขยะ และสิ่งปลูกสร้างกรัง หรือแม้แต่ในสถานที่ที่มีคนพลุกพล่าน เช่น ในสวนสัตว์ดุสิตพบโพรงอยู่ด้านหลังสวนนกและไต้น้ำพุ ในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์พบโพรงอยู่ในสวนหย่อมกลางสนามหญ้า และในสวนลุมพินีพบโพรงอยู่ในสวนหย่อมและริมฟุตบอล เป็นต้น

พฤติกรรมการหาอาหาร ตลอดระยะเวลาที่สำรวจพบว่า เขี้ยหาอาหารทั้งวันโดยช่วงเวลาที่พบเขี้ยหาอาหารมากที่สุด คือ ตั้งแต่เวลา 7.00-10.00 น. ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในแหล่งน้ำ หลังจากนั้นจะลดลงและค่อนข้างคงที่จนถึงเวลา 17.00 น. สอดคล้องกับการศึกษาที่โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ พบว่า เขี้ยมีพฤติกรรมหาอาหารทั้งวันตั้งแต่เริ่มมีแสงจนสิ้นแสงในแต่ละวัน โดยในช่วงเวลา 06.00-10.00 น. เป็นเวลาที่พบเขี้ยหาอาหารมากที่สุด เขี้ยจับเหยื่อกินได้ทั้งแมลงขนาดเล็ก กบ เขียด หนู กูขนาดเล็ก และปลา (Suekamnurt, 2007) และในจังหวัดสมุทรปราการ นนทบุรี จะเขี้ยเทรา พระนครอยุธยา นครปฐม และกรุงเทพฯ พบเขี้ยจับปลา ปูแสม เต่านา กบนา ไก่ เป็ด นกกก นกเอี้ยง หนู แมว และหมาเป็นเหยื่อ นอกจากนั้นเขี้ยสามารถกินเศษอาหารจากครัวเรือน ร้านอาหารและถังขยะ รวมทั้งซากสัตว์ได้อีกด้วย (Kulabthong & Mahaprom, 2015) ซึ่งสัตว์และประเภทอาหารเหล่านี้ก็พบได้ทั่วไปในพื้นที่ศึกษาเช่นกัน

ภัยคุกคาม ในกลุ่มสัตว์เลื้อยคลานโดยทั่วไปจะมีอัตราการให้ลูกจำนวนมาก ในระยะวัยอ่อนมีอัตราการตายที่สูงมาก แต่กลับมีอัตราการรอดหลังจากผ่านระยะวัยอ่อนค่อนข้างสูง เนื่องจากธรรมชาติของสัตว์กลุ่มนี้ส่วนใหญ่พ่อแม่จะไม่มีพฤติกรรมดูแลและปกป้องลูก วางไข่แล้วทิ้ง ปล่อยให้ไข่ฟักเองตามธรรมชาติ เมื่อลูกออกจากไข่แล้วจะหากินและเจริญเติบโตเอง (Pianka, 1997; Suekamnurt, 2007, Pike et al., 2008) ยกเว้นจระเข้ (Uller et al., 2005; Norris & Carr, 2006) จากพฤติกรรมดังกล่าวส่งผลให้ในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ตลอดระยะเวลาที่สำรวจจึงพบเห็นเขี้ยระยะวัยอ่อน เพียง 31 ตัว เท่านั้น ซึ่งอาจเกิดจากผู้ล่าที่พบได้ทั่วไปตามธรรมชาติในพื้นที่ เช่น คือ งูเห่า (*Naja kaouthia*) งูเขียวพระอินทร์ (*Chrysopelea ornata*) งูเหลือม (*Python reticulatus*) นกกระเต็นใหญ่ธรรมดา (*Pelargopsis capensis*) เขี้ยขาวแดง (*Haliastur indus*) และไก่เลี้ยงจิกกินไข่ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย (Green world foundation, 2016; Mahaprom, 2016; Trivalairat, 2016) และประเทศศรีลังกา (Karunarathna et al., 2008) นอกจากนั้นยังพบว่าทั้งเขี้ยตัวเต็มวัยและระยะวัยอ่อนตายจากการถูกสุนัขกัดอยู่บ่อยครั้ง สอดคล้องกับการศึกษาที่บางกะเจ้า (Mahaprom, 2016) และในประเทศเนปาล (Ghimire & Shah, 2013) รวมทั้งถูกเหยียบตายบนถนน โดยรถจักรยานยนต์และรถยนต์ สอดคล้องกับการศึกษาที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ (Duengkhae & Chuaynkern, 2009) และประเทศศรีลังกา (Karunarathna et al., 2012) เนื่องจากเขี้ยกับมนุษย์ใช้พื้นที่ร่วมกันหรือพื้นที่เดียวกันในการดำรงชีวิต (Suekamnurt, 2007) และยังพบว่าถูกจับโดยแรงงานก่อสร้างเพื่อนำมาประกอบอาหารอีกด้วย

ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจเขี้ยในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ระหว่างเดือนกันยายน พ.ศ. 2562 - เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2563 จึงเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญและมีประโยชน์อย่างมากสำหรับการศึกษาต่อของของกลุ่มผู้สนใจ รวมถึงคณะผู้บริหารวิทยาเขตปัตตานีเพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้าง สาธารณูปโภคพื้นฐาน ภูมิทัศน์ และการสร้างอาคารต่างๆ ภายในวิทยาเขตปัตตานี ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและไม่เพิ่มภัยคุกคาม โดยคำนึงถึงสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆ เช่น ปลา สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก สัตว์เลื้อยคลาน นก และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ที่ร่วมใช้พื้นที่ในการดำรงชีวิตทั้งในปัจจุบันและอนาคต และควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในประเด็นขนาดโครงสร้างประชากร รวมทั้งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะภูมิทัศน์ การจราจร และภัยคุกคามอื่น ๆ ที่มีผลต่อประชากรของเขี้ยในพื้นที่ด้วย

สรุปผลการศึกษา

การสำรวจเขี้ยในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ตลอดระยะเวลา 1 ปี ที่ทำการศึกษพบการปรากฏของเขี้ย มากที่สุดในเส้นทางสำรวจ A เฉลี่ย 10.75 ± 4.66 ตัว/เดือน ส่วนในเส้นทางสำรวจ B พบการปรากฏน้อยที่สุด เฉลี่ย 5.00 ± 3.56 ตัว/เดือน โดยในเดือนมกราคมพบการปรากฏของเขี้ยมากที่สุด และเดือนกรกฎาคมพบการปรากฏของเขี้ยน้อยที่สุด ซึ่งในเส้นทางสำรวจ A พบการปรากฏของเขี้ยมากที่สุดในเดือนธันวาคม เส้นทางสำรวจ B พบการปรากฏของเขี้ยมากที่สุดในเดือนมกราคม เส้นทางสำรวจ C พบการปรากฏของเขี้ยมากที่สุดในเดือนเมษายน เส้นทางสำรวจ D พบการปรากฏของเขี้ยมาก

ที่สุดในเดือนกันยายน และเส้นทางสำรวจ E พบการปรากฏของเหี้ยมากที่สุดในเดือนเมษายน ระบบนิเวศที่สำคัญเหมาะสมกับเป็นที่อยู่และหาอาหารของเหี้ยมากที่สุดคือ คลอง-กระบายน้ำ โดยพบการปรากฏของเหี้ยสูงถึง 95.82% รองลงมาคือ บ่อเลี้ยงกุ้งปลา 2.70% ซึ่งบริเวณที่พบการปรากฏของเหี้ยมากที่สุดคือ เส้นทางสำรวจ A (คลองบริเวณหอพักนักศึกษา 1-10) สูงถึง 19.41% รองลงมาคือ เส้นทางสำรวจ E (คลองบริเวณแฟลต 3-17 และบ้านพักบุคลากร) 13.27%

ช่วงเวลาที่ยกเหี้ยระยะวัยอ่อน คือ ตั้งแต่เดือนกันยายน-มิถุนายน โดยเดือนธันวาคม-มีนาคม พบเหี้ยระยะวัยอ่อนมากกว่าช่วงอื่นๆ

เหี้ยมีพฤติกรรมหาอาหารตลอดทั้งวัน โดยในช่วงเวลาตั้งแต่ 7.00-10.00 น. พบเห็นจำนวนเหี้ยกำลังหาอาหารมากที่สุด และในช่วงเวลา 09.00-10.00 น. เป็นช่วงที่พบเห็นจำนวนเหี้ยนอนอาบแดดมากที่สุดเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

- Chan-ard, T., Parr, J. W. K., & Nabhitabhata, J. (2015). *A Field Guide to the Reptile of Thailand*. Oxford University Press.
- Duengkae, P., & Chuaynkern, Y. (2009). A road-killed Water monitor *Varanus salvator macromaculatus*: negative impact from the forest route in Khao Yai National Park, Thailand. *Biawak*, 3(1), 23-25.
- Fitzsimons, J., & Thomas, J. (2016). Feeding Behavior of an Asian Water Monitor *Varanus salvator macromaculatus* on a Bornean Bearded Pig *Sus barbatus barbatus* Carcass. *Biawak*, 10(2), 48-50.
- Ghimire, H. R., & Shah, K. B. (2013). Status and habitat ecology of the Yellow monitor, *Varanus flavescens*, in the Southeastern part of Kanchanpur District, Nepal. *Herpetological Conservation and Biology*, 9(2), 387-393.
- Green world foundation. (2016). *Map "Bangkok Dragon"*. https://greenworld.or.th/wild_watch/%E0%B9%81%E0%B8%9C%E0%B8%99%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B8%A1%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%B8%E0%B8%87%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%9E/ (in thai)
- International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. (2020). *The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2020-1*. <https://www.iucnredlist.org/>
- Karunarathna, S. D. M. S., Amarasinghe, A. A. T., & Vos, A. D. (2008). Preliminary note on the Monitor lizards (Family: Varanidae) within the Nationnal Zoological Gardens (NZG) Dehiwala, Colombo District, Sri Lanka. *Biawak*, 2(3), 109-118.
- Kulabong, S., & Mahaprom, R. (2015). Observation (sic) on food items of Asian water monitor, *Varanus salvator* (Laurenti, 1768)(Squamata Varanidae), in urban ecosystem, Central Thailand. *Biodiversity Journal*, 6, 695-698.
- Lauprasert, K. (1999). *Species diversity, distribution and morphological differences of monitor lizards (Family Varanidae) in southern Thailand*. Chulalongkorn University.
- Mahaprom, R. (2016). *Population Density and Morphometry Analysis for Sex Determination in Varanus salvator from Bangkachao*. Kasetsart University. (in thai)
- Mahaprom, R., Duengkae, P., & Chaynkern, Y. (2015). Population density and morphometry analysis for sex determination in *Varanus salvator* from Bangkachao, Samutprakran Province. *Thai Journal of Forestry*, 34(3), 109-123.

- Norris, D. O., & Carr, J. A. (2006). *Endocrine Disruptors: Biological Basis for Health Effects in Wildlife and Humans*. Oxford University Press.
- Pianka, E. R. (1997). Australia's thorny devil. *Reptiles*, 5(11), 14-23.
- Pike, D. A., Pizzatto, L., Pike, B. A., & Shine, R. (2008). Estimating survival rates of uncatchable animals: the myth of high juvenile mortality in reptiles. *Ecology*, 89(3), 607-611.
- Rashid, S. M. A., & Hoong, D. C. (2004). *Population ecology and management of Water Monitors, Varanus salvator (Laurenti 1768) at Sungei Buloh Wetland Reserve, Singapore. Digital repository*. <https://hdl.handle.net/10497/1663>.
- Shine, R., & Harlow, P. S. (1998). Ecological traits of commercially harvested Water monitors, *Varanus salvator*, in northern Sumatra. *Wildlife Res*, 25, 437-447.
- Suekamnurt, W. (2007). *Ecological studies of water monitor (varanus salvator) and impact of utilization in the laem phak bia environmental study, research and development project under royal initiatives*. Silpakorn University. (in thai)
- Taylor, E. H. (1963). The lizards fauna of Thailand. *University of Kansas Science Bulletin*, 44(14), 687-1077.
- Trivalairat, T. (2016). *External influence factors and clutch size of the water monitor lizard (Varanus salvator) nest-site selection in Thailand*. Kasetsart University.
- Uller, T., Meylan, S., Fraipont, D. M., & Clobert, J. (2005). Is sexual dimorphism affected by the combined action of prenatal stress and sexratio?. *Journal of Experimental Zoology Part A Comparative Experimental Biology*, 303(12), 1110-1114.

Research Article

การเรียนรู้เชิงลึกสำหรับตรวจจับความผิดปกติจากภาพในวิดีโอการ์ตูนสำหรับเด็ก

Vision-based Deep Learning for Anomaly Detection from Video Cartoon for Kids

ชนานพ จันภักดี¹ และ จุติรัตน์ ศรีบริวรรตกุล^{2*}

Tananop Janpakdee¹ and Thitirat Siriborvornratanakul^{2*}

^{1,2} คณะสถิติประยุกต์ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ 148 หมู่ 3 ถนนเสรีไทย คลองจั่น บางกะปิ กรุงเทพฯ 10240 ประเทศไทย

^{1,2} Graduate School of Applied Statistics, National Institute of Development Administration, 148 Serithai Road, Klong-Chan, Bangkok, 10240, Thailand

*E-mail: thitirat@as.nida.ac.th

Received: 01/09/2021; Revised: 29/06/2022; Accepted: 23/08/2022

บทคัดย่อ

จากผลสำรวจในปี พ.ศ. 2563 พบว่า เด็กไทย Generation Z มีการใช้งานสื่อโซเชียลมีเดียประเภท Youtube มากเป็นอันดับหนึ่ง ซึ่งปัญหาที่ตามมาคือวิดีโอสำหรับเด็กจำนวนหนึ่งบนแพลตฟอร์ม Youtube นั้นถูกสอดแทรกไว้ด้วยเนื้อหาที่ไม่เหมาะสมกับเด็ก ทำให้เด็กที่เกิดอาการตื่นตกใจ หวาดกลัว หรือเกิดพฤติกรรมเลียนแบบที่ไม่พึงประสงค์ได้ อย่างไรก็ตาม การที่ผู้ปกครองจะมาสอดส่องภาพทุกภาพในวิดีโอเพื่อหาสิ่งผิดปกติซึ่งอาจมีสอดแทรกอยู่เพียงเล็กน้อยในวิดีโอหนึ่ง ๆ นั้นเป็นเรื่องที่กินเวลามาก และแทบจะเป็นไปไม่ได้สำหรับจำนวนวิดีโอที่มีอยู่มากมายมหาศาลบน Youtube ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดจะนำเทคนิคการวิเคราะห์ภาพด้วยการเรียนรู้เชิงลึกมาช่วยในการตรวจจับภาพเนื้อหาที่ไม่เหมาะสมในวิดีโอการ์ตูนสำหรับเด็กโดยอัตโนมัติ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อตรวจหาเฟรมภาพที่ผิดปกติจากวิดีโอการ์ตูนของเด็กโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก ซึ่งความผิดปกติที่เป็นเป้าหมายของงานนี้ได้แก่ ภาพที่เป็นฉากเลือด และ ภาพที่มีอาวุธ (ปืนหรือมีด) ปรากฏอยู่ในภาพ โดยในส่วนของ การตรวจจับฉากเลือดนั้นผู้วิจัยใช้เทคนิคถ่ายโอนความรู้จากโมเดลต้นแบบ ResNet50, VGG16 และ VGG19 เพื่อจำแนกภาพแต่ละภาพว่าเป็นหรือไม่เป็นฉากเลือด ผลการทดลองพบว่าโมเดลต้นแบบ VGG16 ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด คือ ความแม่นยำเท่ากับ 0.84 และพื้นที่ใต้กราฟ ROC เท่ากับ 0.92 และในส่วนของ การตรวจจับอาวุธผู้วิจัยใช้เทคนิคถ่ายโอนความรู้กับโมเดลต้นแบบสำหรับตรวจจับวัตถุ 2 ตัว ได้แก่ YOLOv3 และ YOLOv4 ผลการทดลองพบว่า YOLOv4 ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในการตรวจจับอาวุธมีดและปืนบนภาพการ์ตูน

คำสำคัญ: การเรียนรู้เชิงลึก การวิเคราะห์วิดีโอ การตรวจจับความผิดปกติ การจำแนกภาพ การถ่ายโอนการเรียนรู้

Abstract

According to the survey in 2020, Youtube is the most popular social media platform for Thai children in generation Z. Due to the overwhelming number of kid videos on Youtube, it is impossible for parents to check every single video and thoroughly look at every single image frame for any possible frame with inappropriate contents. To help ease this problem, this paper proposes using vision-based deep learning techniques to automatically detect frames with inappropriate visual content for children. In this work, our focus is on analyzing cartoon videos and the inappropriate content refers to blood scenes and weapons (gun and knife). To detect blood scenes, we use transfer learning and finetuning techniques with three pre-trained image classification backbone models—ResNet50, VGG16, and VGG19. Our experimental results show that VGG16 is the best that gives the highest accuracy of 0.84 and the highest area under ROC of 0.92. As for the part of weapon detection, we do transfer learning on two pre-trained object detection models, YOLOv3 and YOLOv4. Our results reveal that YOLOv4 is better at detecting guns and knives in cartoon videos.

Keywords: Deep Learning, Video analytics, Anomaly Detection, Image Classification, Transfer Learning

บทนำ

อ้างอิงจากผลสำรวจพฤติกรรมผู้ใช้อินเทอร์เน็ตในประเทศไทย ปี 2563 (ETDA, 2020) ของกลุ่มคน Generation Z (ผู้ที่มีอายุต่ำกว่า 20 ปี) พบว่าคนวัยนี้มีการใช้อินเทอร์เน็ตเฉลี่ย 12 ชั่วโมง 8 นาทีต่อวัน โดยกิจกรรมยอดฮิต 3 อันดับแรกได้แก่ โซเชียลมีเดีย (92.9%) ดูโทรทัศน์/ดูคลิป/ฟังเพลงออนไลน์ (85.7%) และ ค้นหาข้อมูลทางออนไลน์ (77.1%) โซเชียลมีเดียยอดฮิตที่คนวัยนี้ชื่นชอบ ได้แก่ Youtube (98.6%), Facebook (97.3%) และ LINE (93.4%) ตามลำดับ ในบริบทของเด็กและเยาวชน การที่ผู้ปกครองปล่อยให้เด็กเข้าถึงสื่อออนไลน์อย่างอิสระ สามารถก่อให้เกิดผลเสียกับเด็กได้หลายประการ เช่น จากการศึกษาอิทธิพลของสื่อที่ส่งผลต่อพฤติกรรมความรุนแรงของเด็กและเยาวชน จังหวัดเชียงใหม่ (Ratchathatharat & Wongcharoen, 2021) พบว่า ปัจจัยแวดล้อมด้านภาพและเนื้อหาของสื่อจะส่งผลต่อพฤติกรรมความรุนแรงของเด็กและเยาวชนสูงที่สุด และตัวแปรด้านสื่อ ด้านสิ่งเร้าของสื่อ ด้านการรับรู้ และด้านการเรียนรู้ล้วนมีอิทธิพลทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อพฤติกรรมความรุนแรงของเด็กและเยาวชน นอกจากนี้ในผลการศึกษาของ (Tobbi, 2018) ก็พบว่าโซเชียลมีเดียสามารถส่งผลต่อสุขภาพจิตของเด็กได้ เช่น ภาวะซึมเศร้า ความวิตกกังวล และการนอนหลับไม่ดี อย่างไรก็ตาม ด้วยปริมาณและความหลากหลายอันมหาศาลของข้อมูลบนโซเชียลมีเดียทำให้เจ้าของแพลตฟอร์มโซเชียลมีเดียต่าง ๆ ไม่สามารถจะคัดกรองหรือรับรองความถูกต้องของข้อมูลได้ทั้งหมด จึงเป็นหน้าที่ของผู้รับสื่อเองที่ต้องอาศัยประสบการณ์และความสามารถในการคิดวิเคราะห์ของคนเพื่อเลือกรับเฉพาะข้อมูลที่ถูกต้องและมีประโยชน์ แต่ในบริบทของเด็กนั้นการพินิจวิเคราะห์เหล่านี้ยังจำเป็นต้องมีผู้ปกครองคอยช่วยชี้แนะอยู่ข้าง ๆ ไม่เช่นนั้นเด็กอาจเกิดการเรียนรู้และเลียนแบบพฤติกรรมไม่เหมาะสมซึ่งถูกสอดแทรกเข้ามาในเนื้อหาของสื่อโซเชียลมีเดียได้

อ้างอิงจากประกาศของสำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกากระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) เรื่องหลักเกณฑ์การจัดทำผังรายการสำหรับการให้บริการกระจายเสียงหรือโทรทัศน์ พ.ศ. 2556 ได้กำหนดความเหมาะสมของเนื้อหาสำหรับผู้ชมในวัยอายุ 6-12 ปีไว้ว่าไม่ควรมียุทธศาสตร์ที่มีความรุนแรง และเรื่องทางเพศ โดยความรุนแรงประกอบไปด้วย (1) การแสดงพฤติกรรมที่ไม่เหมาะสมที่ก่อให้เกิดความรุนแรงต่อจิตใจของผู้ชม (2) การใช้ความรุนแรงต่อตนเอง บุคคลอื่น สิ่งมีชีวิต และวัตถุ (3) การใช้อาวุธ ยาเสพติด การแสดงภาพที่กระทำความผิดในรูปแบบต่างๆ ที่ขัดต่อศีลธรรม

(4) การนำเสนอที่ก่อให้เกิดการอคติ การเลือกปฏิบัติที่นำมาซึ่งการต่อต้านหรือล่วงละเมิดบุคคล รวมถึงการส่งเสริม การสร้างทัศนคติที่ทำให้เกิดการต่อต้าน การดูหมิ่นเหยียดหยาม นอกจากนี้หากอ้างอิงจากงานของ (Government Gazette, 2013) ยังมีการนิยามความรุนแรงที่รวมถึงพฤติกรรมที่นำไปสู่อันตราย เช่น การพยายามทำร้ายตัวเองและผู้อื่น การฆ่าตัวตาย การเลียนแบบกิฬาที่เป็นการต่อสู้ เป็นต้น

ในบริบทของสื่อสำหรับเด็กและเยาวชน การตรวจสอบความรุนแรงที่ถูกสอดแทรกอยู่ในข้อมูลบนโซเชียลมีเดียจะยิ่งทวีความยุ่งยากมากขึ้น เมื่อข้อมูลดังกล่าวอยู่ในรูปของวิดีโอซึ่งมีจำนวนเฟรมของภาพในวิดีโอมากมาย หากที่ผู้ปกครองจะช่วยตรวจสอบภาพได้ครบหมดทุกเฟรม เป็นเหตุให้มีความล่าช้าอยู่เนือง ๆ ถึงเหตุการณ์ที่มีวิดีโอการ์ตูนสำหรับเด็กถูกผู้ไม่ประสงค์ดีสอดใส่เนื้อหาที่ไม่เหมาะสมเข้ามา จากปัญหาที่กล่าวมานี้ผู้วิจัยจึงต้องการนำปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ในแขนงของการวิเคราะห์ภาพ (Image Analytics) มาพัฒนาเป็นระบบอัตโนมัติสำหรับช่วยตรวจหาเฟรมภาพที่ผิดปกติ (Anomaly Detection) ในวิดีโอการ์ตูนสำหรับเด็กอายุ 6-12 ปี โดยระบบต้นแบบปัจจุบันจะมุ่งเน้นไปที่การใช้เทคนิคการจำแนกภาพ (Image Classification) สำหรับช่วยตรวจจับฉากเคลื่อนไหวในเฟรมภาพ และเทคนิคการตรวจจับวัตถุ (Object Detection) สำหรับช่วยตรวจจับอาวุธ อันได้แก่ มีดและปืน

ปัจจุบันเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ภาพอย่างแพร่หลาย เช่น งานวิจัยของ (Nikita et al., 2021) ทำการรวบรวมภาพมาทั้งหมด 8,000 ภาพจากการ์ตูนเรื่อง Tom and Jerry และใช้เทคนิคถ่ายโอนความรู้ (Transfer Learning) บนโมเดลต้นแบบ ResNet50, MobileNetV2, InceptionV3 และ VGG16 เพื่อแยกแยะภาพแต่ละภาพว่าเป็นอารมณ์อะไร ผลการศึกษาพบว่า VGG16 ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด หรือในงานวิจัยของ (Mohan, 2020) ที่ศึกษาการจำแนกภาพออกเป็น 2 กลุ่มระหว่าง Normal และ Pneumonia โดยใช้ข้อมูลภาพสำหรับฝึกอบรม 5,856 ภาพ และใช้โมเดลต้นแบบ VGG16, VGG19, ResNet50, InceptionV3, Xception และ DenseNet ในการจำแนก ผลการศึกษาพบว่า Xception และ VGG16 ให้ประสิทธิภาพในการทำงานที่ ไม่เพียงเท่านั้นยังมีงานวิจัยของ (Noreen et al., 2019) ที่จำแนกจากผิดปกติของการ์ตูนโดยใช้ MobileNet และแบ่งความผิดปกติออกเป็น Fight, Gunshot, Screaming, Blood, Fire และ Explosion ทำการทดลองด้วยข้อมูลภาพประเภทละ 500 ภาพ ในส่วนของงานวิจัย (Rashid et al., 2019) ได้ทดลองจำแนกวิดีโอการ์ตูนออกเป็น Original Video, Fake Explicit และ Fake Violence โดยใช้โมเดล ResNet, VGG16, VGG19 และ Google LeNet ผลการศึกษาพบว่า VGG19 ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ในส่วนของการตรวจจับอาวุธนั้นอ้างอิงจากงานวิจัย (Sanam et al., 2021) ที่ใช้โมเดล YOLOv2 และ YOLOv3 ในการตรวจจับอาวุธ พบว่าประสิทธิภาพของ YOLOv3 ให้ผลดีที่สุด ส่วนงานวิจัยของ (Lamoonmorn & Sucontphunt, 2019) ที่ศึกษาการตรวจจับหมวกนิรภัยและการใช้อาวุธปืนเพื่อเตือนภัยเหตุโจรกรรม โดยใช้โมเดล YOLOv3 และ YOLOv4 ก็พบว่าโมเดล YOLOv4 ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดในการตรวจจับ

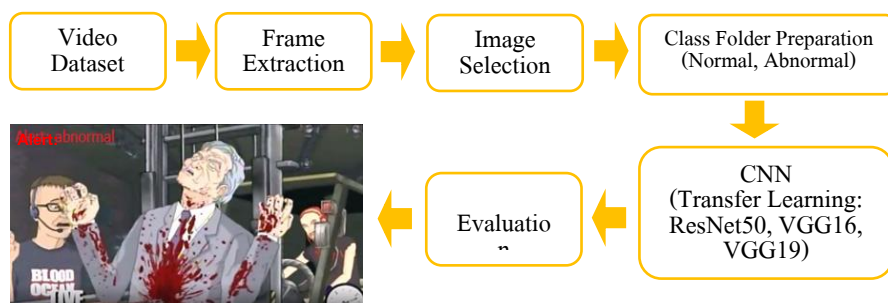
วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานผู้วิจัยใช้ภาษาไพธอนและใช้แพลตฟอร์ม Google Colab โดยมีไลบรารีและโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนา ได้แก่ Tensorflow 2.5.0 (Keras API), OpenCV 4.1.2 สำหรับเขียนโครงสร้างในการจำแนกภาพ, Youtube-dl 2021.01.24.1 สำหรับดาวน์โหลดวิดีโอจาก Youtube, Windows Movie Maker 2012 สำหรับตัดต่อวิดีโอเพื่อทำข้อมูลวิดีโอทดสอบ และ FastImageResizer 0.98 สำหรับลดขนาดของภาพ

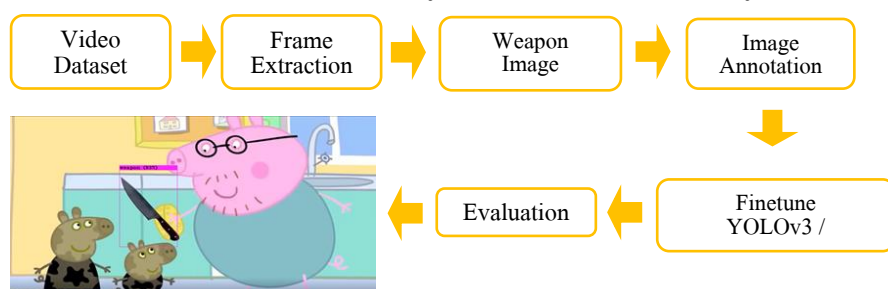
1. ภาพรวมของระบบ (System Overview)

ขั้นตอนของการทำงานเพื่อจำแนกเฟรมภาพว่าเป็นฉากเคลื่อนไหวหรือไม่นั้นแสดงในรูปแบบที่ 1 โดยผู้วิจัยทำการรวบรวมวิดีโอการ์ตูน สกัดเฟรมภาพออกจากวิดีโอ จากนั้นจึงแยกเฟรมภาพที่เหมาะสม (ไม่มีเลือด) และไม่เหมาะสม (มีเลือด) ไว้คนละ

โพลเดอร์ เมื่อเตรียมข้อมูลเสร็จแล้วผู้วิจัยก็นำภาพทั้งหมดไปฝึกสอนโมเดล ResNet50, VGG16 และ VGG19 ทำการประเมินโมเดล และนำโมเดลที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุดมาทำการทดสอบกับวิดีโอการ์ตูนที่เตรียมไว้อีกหนึ่งชุดหนึ่ง ในส่วนของขั้นตอนดำเนินงานเพื่อตรวจจับอาวุธจากวิดีโอการ์ตูนนั้นแสดงดังรูปที่ 2 กล่าวคือ ผู้วิจัยนำเฟรมภาพที่สกัดจากวิดีโอการ์ตูนมาเลือกเฉพาะภาพที่มีอาวุธแยกออกมา จากนั้นก็ทำ Image Annotation และนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ฝึกสอนโมเดล YOLOv3 และ YOLOv4 สุดท้ายก็เลือกโมเดลที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุดมาทำการทดสอบกับวิดีโอการ์ตูนที่เตรียมไว้อีกหนึ่งชุดหนึ่ง



รูปที่ 1 แผนภาพการดำเนินงานของการจำแนกภาพการ์ตูนจากที่มีเลือด (เครดิตภาพการ์ตูนระบุในหัวข้อ Data Collection)



รูปที่ 2 แผนภาพการดำเนินงานของการตรวจจับอาวุธจากวิดีโอการ์ตูน (เครดิตภาพการ์ตูนระบุในหัวข้อ Data Collection)

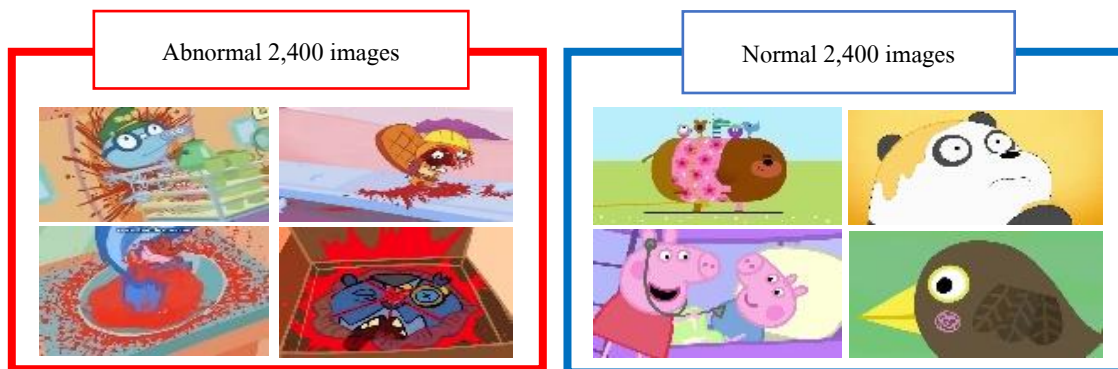
2. การเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection)

ในงานนี้ผู้วิจัยทำการรวบรวมวิดีโอการ์ตูนจาก Youtube เป็นจำนวนทั้งหมด 80 วิดีโอ ได้แก่ Peppa Pig, Little Princess, HEY DUGGEE, Granny's Fairy Tales, Simon, Carl's Car Wash, Kid e Cats, Ben and Holly's Little Kingdom, Family Guy, Looney Tunes, Happy Tree Friends, OGGY, We Bare Bears, Tom & Jerry เป็นต้น เวลาของวิดีโอรวมทั้งหมดคือ 9 ชั่วโมง 11 นาที 58 วินาที นอกจากนี้ในส่วนของภาพอาวุธปืนและมีดผู้วิจัยมีการใช้ข้อมูลภาพจาก ARI-DaSCI (<https://github.com/ari-dasci/OD-WeaponDetection>) มาเสริมเพิ่มเติม

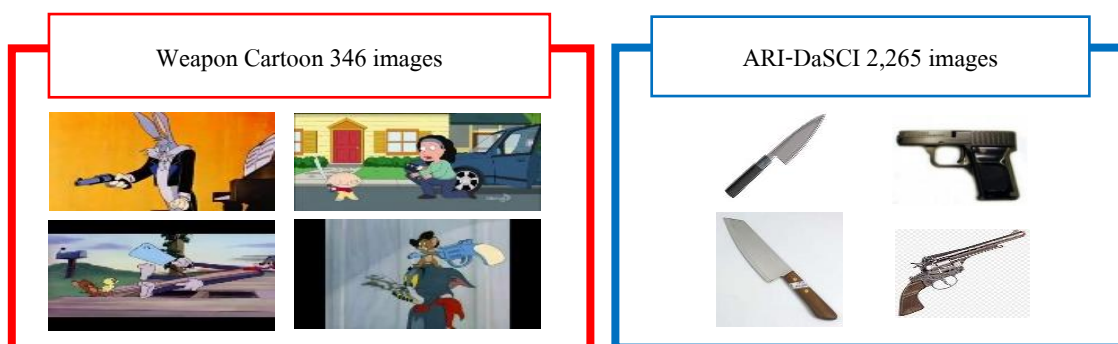
3. การจัดเตรียมข้อมูล (Data Preparation)

สำหรับการจำแนกภาพ (Image Classification) ออกเป็นเหมาะสม (Normal: ไม่มีเลือด) และไม่เหมาะสม (Abnormal: ปรากฏเลือด) ดังตัวอย่างภาพการ์ตูนในรูปที่ 3 นั้น ผู้วิจัยทำการสกัดเฟรมภาพจากวิดีโอที่รวบรวมมาโดยสกัดออกมาทุกๆ 0.5 วินาทีได้ภาพมาทั้งหมด 66,437 ภาพ จากนั้นก็นำภาพที่ได้มาแยกออกเป็นเฟรมภาพการ์ตูนที่เหมาะสมและไม่เหมาะสมได้จำนวน 64,037 ภาพ (96.39%) และ 2,400 ภาพ (3.61%) ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณข้อมูลภาพการ์ตูนจากเหมาะสมมีจำนวนมากกว่าจากไม่เหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญ ผู้วิจัยจึงทำการลดปริมาณข้อมูล (Undersampling) ภาพการ์ตูนจากเหมาะสมให้เหลือเท่ากับปริมาณข้อมูลจากไม่เหมาะสม อีกทั้งยังทำการลดขนาด (Resize) ภาพทั้งหมดเพื่อประหยัดเวลาในการอัปโหลดข้อมูลภาพไปใช้ใน Google Colab ด้วย ข้อมูลภาพทั้งหมดนี้ถูกนำมาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลสำหรับฝึกอบรม (Train Set) จำนวน 1,920 ภาพ (80%) และข้อมูลสำหรับทดสอบ (Test Set) จำนวน 480 ภาพ (20%)

ในส่วนของการตรวจจับอาวุธ (Weapon Detection) นั้น ผู้วิจัยทำการแยกเฉพาะภาพการ์ตูนที่มีอาวุธออกมาและนำมา รวมกับข้อมูลภาพอาวุธประเภทปืนและมีดจากชุดข้อมูลภาพ ARI-DaSCI ดังตัวอย่างในรูปที่ 4 ซึ่งจำนวนของภาพอาวุธที่ได้จาก วิดีโอการ์ตูนและจาก ARI-DaSCI คือ 346 ภาพ (13.25%) และ 2,265 ภาพ (86.75%) ตามลำดับ โดยภาพการ์ตูนที่มีอาวุธ 346 ภาพนั้นผู้วิจัยได้คัดเลือกออกมาจากเฟรมภาพในวิดีโอทั้ง 66,437 ภาพด้วยตนเอง เมื่อรวมทั้งหมดแล้วจะได้ภาพที่ใช้ในงานส่วน นี้ทั้งหมด 2,611 ภาพ ประกอบด้วยภาพปืน 1,910 ภาพ และภาพมีด 701 ภาพ ซึ่งผู้วิจัยทำการแบ่งข้อมูลทั้งหมดนี้ออกเป็นข้อมูล สำหรับฝึกอบรม 80% (ปืน 1,528 ภาพ และมีด 561 ภาพ) และข้อมูลสำหรับทดสอบ 20% (ปืน 382 ภาพ และมีด 140 ภาพ)



รูปที่ 3 ตัวอย่างภาพการ์ตูนที่ไม่เหมาะสม (Abnormal) และเหมาะสม (Normal) สำหรับใช้ในงานการจำแนกภาพ (เครดิตภาพ การ์ตูนระบุในหัวข้อ Data Collection)



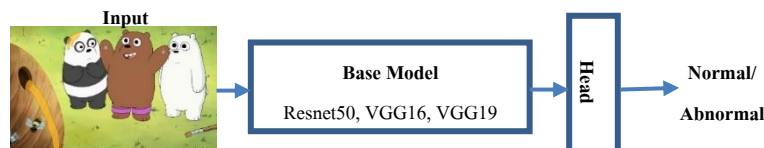
รูปที่ 4 ตัวอย่างข้อมูลภาพสำหรับใช้ในงานการตรวจจับอาวุธปืนและมีด (เครดิตภาพระบุในหัวข้อ Data Collection)

4. การจำแนกภาพ (Image Classification)

เนื่องจากข้อมูลภาพที่เหมาะสม (Normal: ไม่มีเลือด) และไม่เหมาะสม (Abnormal: มีเลือด) ทั้ง 2 ประเภทนั้นมีอยู่เพียง ประเภทละ 2,400 ภาพเท่านั้น ซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการฝึกอบรมโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกและอาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของ โมเดล ดังนั้นสำหรับข้อมูลชุดฝึกอบรมผู้วิจัยจึงใช้เทคนิค Data Augmentation เสริมเข้ามา โดยเทคนิคนี้นอกจากจะช่วยเพิ่ม จำนวนข้อมูลฝึกอบรมให้มากขึ้นแล้วยังช่วยป้องกันปัญหา Overfit ของโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกได้ด้วย ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัย เลือกใช้เทคนิค Data Augmentation ได้แก่ การหมุนภาพ (Rotation) การปรับความสว่างของภาพ (Brightness) การพลิกภาพตาม แนวนอน (Horizontal) การพลิกภาพตามแนวตั้ง (Vertical) โดยมีการกำหนดค่าที่ใช้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การตั้งค่าของพารามิเตอร์ในไลบรารี Keras สำหรับทำ Data Augmentation ในงานวิจัยนี้

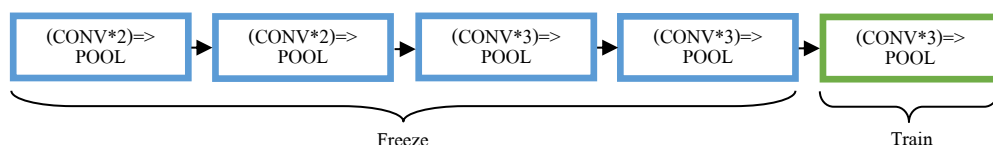
Type of Augmentation	Values
Rotation	45°
Brightness	0.2 to 1
Horizontal	Yes
Vertical	Yes



รูปที่ 5 โครงสร้างทั่วไปของโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกที่ใช้เทคนิค Transfer Learning สำหรับจำแนกภาพออกเป็นลักษณะเหมาะสม (Normal) และ ไม่เหมาะสม (Abnormal) (แนวคิดภาพการ์ตูนระบุในหัวข้อ Data Collection)

สำหรับการฝึกสอนโมเดลนั้นผู้วิจัยนำโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก (Base Model) ได้แก่ ResNet50, VGG16 และ VGG19 ที่เคยถูกฝึกสอนไว้แล้วกับชุดข้อมูลภาพ ImageNet มาดัดแปลงทำการทดลอง Transfer Learning และ Finetuning หลาย ๆ แบบ โดยจะมีการเพิ่มโมเดลส่วนต่อยอด (Head Model) เข้าไป และนำภาพการ์ตูนที่ผู้วิจัยเตรียมไว้มาทำการฝึกสอน เพื่อให้โมเดลเหล่านี้สามารถนำความรู้เดิมจากชุดข้อมูล ImageNet มาดัดแปลงและปรับใช้ให้เข้ากับชุดข้อมูลภาพการ์ตูนในงานวิจัยนี้ได้ รูปที่ 5 แสดงแนวคิดของการทำ Transfer Learning ในงานวิจัยนี้

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองหลายแบบเพื่อหาส่วนผสมของการฝึกสอนโมเดลที่จะได้ผลการจำแนกภาพที่ดีที่สุด เนื่องจากแต่ละ transfer learning ที่นำมาทำการทดลอง มีเลเยอร์ภายในไม่เท่ากัน เพื่อให้เกิดความเท่าเทียมในการเปรียบเทียบ ผู้วิจัยจึงใช้ classifier head และ setting ต่าง ๆ เหมือนกันทุกการทดลองเพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพ แต่สิ่งที่เปลี่ยนคือมีการทดลองทั้งการ freeze ทุกเลเยอร์ในส่วน Base Model และการ freeze แค่บางเลเยอร์ในส่วน Base Model ได้แก่ ในการทดลองที่ 1-3 ผู้วิจัยทำการ freeze ทุกเลเยอร์ในส่วนของ Base Model (ResNet50, VGG16 และ VGG19) เอาไว้และทำการฝึกสอนปรับปรุงเฉพาะน้ำหนักของส่วน Head Model (classifier head) เท่านั้น ในการทดลองที่ 4-5 ผู้วิจัยทำการ freeze ทุกเลเยอร์ของ VGG16 และ VGG19 ยกเว้นเพียง 4 เลเยอร์สุดท้าย (ดังแสดงในรูปที่ 6) โดยการปรับแต่งอ้างอิงจากงานวิจัย (Burugupalli, 2020) ในการทดลองที่ 6 ผู้วิจัยทำการ freeze เฉพาะ 10 เลเยอร์แรกของ ResNet50 และต่อมาในการทดลองที่ 7-8 ผู้วิจัยได้ทดลองกำหนดส่วนของ Head Model เป็น 2 รูปแบบสรุปดังตารางที่ 2 ทั้งนี้ ในส่วนของการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการฝึกสอนนั้น ผู้วิจัยเลือกใช้ Binary Cross Entropy Loss และการทดลองที่ 9-10 ผู้วิจัยก็ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบผลระหว่างการใช้อง Optimizer ในการฝึกสอนสองแบบได้แก่ Stochastic Gradient Descent (SGD) และ Adaptive Moment Estimation (Adam) โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับ Optimizer สรุปดังตารางที่ 3 ซึ่งการ finetuning ตัวแปร Dense ด้วยค่า 512 และตัวแปร Optimizer ด้วยค่า 0.0001 ปรับแต่งอ้างอิงจากงานวิจัย (Tahir et al., 2019)



รูปที่ 6 ตัวอย่างการ freeze เฉพาะ 4 เลเยอร์สุดท้ายของ VGG16 ในการทดลองที่ 4 ของงานส่วนการจำแนกภาพ

ตารางที่ 2 รายละเอียดของ Head Model สองรูปแบบสำหรับการทดลองที่ 7-8 ของงานการจำแนกภาพ

Type of Layers	Head Model	
	(1)	(2)
AveragePooling2D	✓	✓
Flatten Layer	✓	✓
Dense	512	64
Activation	Relu	Relu
Dropout	0.50	0.25
Dense	512	64
Activation	Relu	Relu
Dense	2	2
Activation	SoftMax	SoftMax

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนของ Optimizer สองแบบ สำหรับการทดลองที่ 9-10 ของงานการจำแนกภาพ

Type of Parameter	Optimizer	
	SGD	Adam
Learning Rate	0.0001	0.0001
Momentum	0.9	-
Decay	0.0001/300	0.0001/300

5. การตรวจจับอาวุธ (Weapon Detection)

ผู้วิจัยนำข้อมูลภาพที่เตรียมไว้ทุกภาพมาทำการลดขนาด (Resize) และนำภาพดังกล่าวมาทำการตีกรอบสี่เหลี่ยม (bounding box) เพื่อระบุตำแหน่งของอาวุธที่สนใจในภาพโดยใช้โปรแกรม labelImg (<https://github.com/tzutalin/labelImg>) ดังตัวอย่างของการลากกรอบสี่เหลี่ยมในรูปที่ 7 นอกจากนี้เพื่อให้การฝึกอบรมไม่ใช้เวลาประมวลผลนานเกินไป ผู้วิจัยจึงเลือกใช้เทคนิค Transfer Learning และ Finetuning อีกครั้งโดยนำโมเดล YOLOv3 และ YOLOv4 ที่เคยถูกฝึกอบรมไว้แล้วบนชุดข้อมูลอื่น มาทำการฝึกสอนต่อด้วยชุดข้อมูลภาพที่ผู้วิจัยได้รวบรวมมาเอง ทั้งนี้พารามิเตอร์ที่ตั้งไว้สำหรับ YOLOv3 และ YOLOv4 นั้นคล้ายคลึงกัน คือ batch = 64, subdivisions = 32, max_batches = 4000, steps = 3200 และ 3600, filters = 21, random = 0 ในส่วนของพารามิเตอร์อื่น ๆ จะใช้ค่าตั้งต้นจากตัวต้นแบบในเฟรมเวิร์ก darknet YOLOv3 และ darknet YOLOv4



รูปที่ 7 ตัวอย่างการตีกรอบสี่เหลี่ยมเพื่อกำหนดตำแหน่งวัตถุที่สนใจด้วยโปรแกรม labelImg (เครดิตภาพการ์ตูนระบุในหัวข้อ Data Collection)

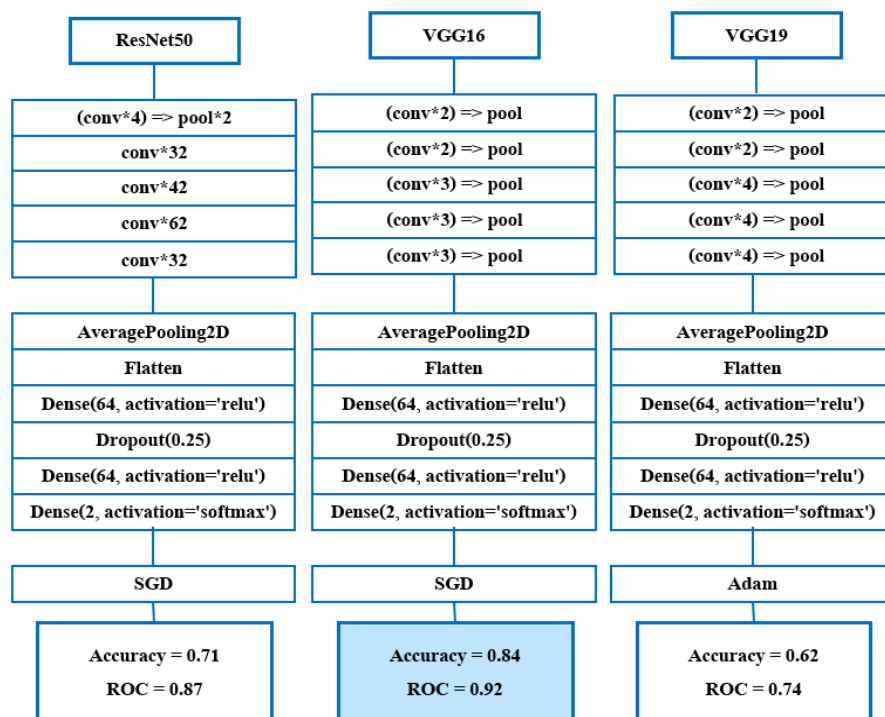
ผลการทดลอง

1. ผลลัพธ์ของการฝึกอบรม: การจำแนกภาพการ์ตูน

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยทำการประเมินโมเดลจำแนกภาพการ์ตูนที่ถูกฝึกอบรมเสร็จแล้วด้วยการพิจารณาจากค่า Accuracy และค่าพื้นที่ใต้กราฟของ Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve เพื่อเลือกโมเดลที่ดีที่สุดออกมา ทั้งนี้ในการพิจารณา Classification Report ผู้วิจัยจะให้น้ำหนักความสำคัญในส่วน Recall มากกว่า เนื่องจากถ้ามีฉากไม่เหมาะสมหลุดรอดให้เด็ก รับชมจะทำให้เกิดผลเสียมากกว่า ทั้งนี้ทรัพยากรที่ผู้วิจัยใช้ในการฝึกอบรมระบบส่วนจำแนกภาพคือ Google Colab Pro (High-RAM และ GPU: Tesla P100) ใช้ข้อมูลชุดฝึกอบรม (Train Set) ในการฝึกอบรมแต่ละโมเดลนานประมาณ 3 ชั่วโมงต่อหนึ่งโมเดล อบรมแต่ละโมเดลเป็นจำนวน 300 epochs

รูปที่ 8 แสดงผลลัพธ์ที่ดีที่สุดที่ได้จากการประเมิน Base Model ทั้งสามแบบ (ResNet50, VGG16, VGG19) บนข้อมูลชุดทดสอบ (Test Set) จากรูปจะเห็นว่าโมเดล ResNet50 ที่ดีที่สุด (จากผลการทดลองที่ 6+8+9) ให้ Accuracy เท่ากับ 0.71 และ ROC เท่ากับ 0.87 ส่วนโมเดล VGG16 ที่ดีที่สุด (จากผลการทดลองที่ 4+8+9) ให้ Accuracy เท่ากับ 0.84 และ ROC เท่ากับ 0.92 และสุดท้ายโมเดล VGG19 ที่ดีที่สุด (จากผลการทดลองที่ 5+8+10) ให้ Accuracy เท่ากับ 0.62 และ ROC เท่ากับ 0.74 จากผลการทดลองนี้สรุปได้ว่า VGG16 คือโมเดลที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการจำแนกระหว่างภาพการ์ตูนที่เหมาะสม (Normal: ไม่มีเลือด) และไม่เหมาะสม (Abnormal: มีเลือด)

การทดลองที่ 1–3 ซึ่งผู้วิจัยทำการ freeze ทุกเลเยอร์ในส่วนของ Base Model นั้น ให้ผลลัพธ์ไม่ดีเท่ากับการเลือก freeze เพียงบางเลเยอร์ เช่น โมเดล ResNet50 (จากผลการทดลองที่ 1 และ 8 และ 9) ให้ Accuracy เท่ากับ 0.60 และ ROC เท่ากับ 0.68 ส่วนโมเดล VGG16 (จากผลการทดลองที่ 2 และ 7 และ 9) ให้ Accuracy เท่ากับ 0.49 และ ROC เท่ากับ 0.13 และสุดท้ายโมเดล VGG19 (จากผลการทดลองที่ 3 และ 7 และ 9) ให้ Accuracy เท่ากับ 0.48 และ ROC เท่ากับ 0.49

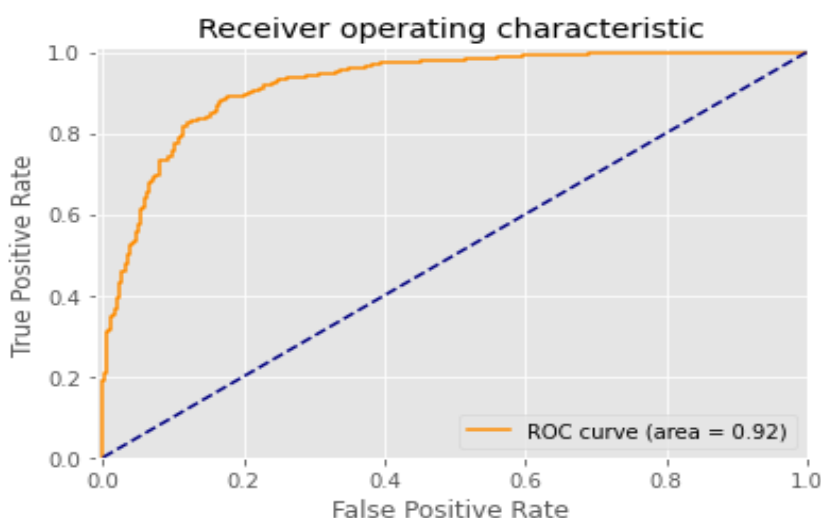


รูปที่ 8 สรุปผลลัพธ์การประเมินบนข้อมูลชุดทดสอบที่ดีที่สุด สำหรับ Base Model แต่ละแบบที่ใช้ในงานนี้

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังนำโมเดล VGG16 ตัวที่ดีที่สุด (ดังข้อสรุปจากย่อหน้าก่อน) มาทำการประเมินประสิทธิภาพโดยละเอียดเพิ่มเติมอีกดังแสดงในรูปที่ 9 และตารางที่ 4 โดยผลการประเมินได้พื้นที่ใต้กราฟ ROC เท่ากับ 0.92 และได้รายงานการจำแนก (Classification Report) คือ Precision (abnormal) เท่ากับ 0.89, Precision (normal) เท่ากับ 0.80, Recall (abnormal) เท่ากับ 0.78 และ Recall (normal) เท่ากับ 0.91, F1-Score (abnormal) เท่ากับ 0.83, F1-Score (normal) เท่ากับ 0.85 เมื่อ Support คือจำนวนข้อมูลภาพที่นำมาใช้ในการทดสอบนั้น ๆ

ตารางที่ 4 Classification Report ของโมเดล VGG16 ที่ดีที่สุด ทำการประเมินบนชุดข้อมูลภาพทดสอบ (Test Set)

	Precision	Recall	F1-Score	Support
Abnormal	0.89	0.78	0.83	480
Normal	0.80	0.91	0.85	480
Accuracy			0.84	960



รูปที่ 9 ROC Curve ของโมเดล VGG16 ที่ดีที่สุด แกน X คือ False Positive Rate และแกน Y คือ True Positive Rate

2. ผลลัพธ์ของการฝึกอบรม: การตรวจจับอาวุธ

สำหรับการตรวจจับอาวุธจากภาพในวิดีโอการ์ตูนสำหรับเด็ก ผู้วิจัยทำการฝึกอบรมชุดข้อมูลภาพที่เตรียมไว้บน Google Colab ซึ่งใช้ GPU: Tesla K80 โดยทำการฝึกอบรมวนซ้ำ 3 รอบ การฝึกอบรมซ้ำจำนวนหลายรอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อเฉลี่ยประสิทธิภาพส่วนหนึ่งของแบบจำลองที่ถูกตั้งต้นด้วยค่าน้ำหนักสุ่มที่แตกต่างกัน ซึ่งน้ำหนักสุ่มดังกล่าวนี้มีความแตกต่างที่เป็นไปได้ระดับอนันต์ ไม่ทราบจำนวนที่แน่นอน ในทางปฏิบัติจริงจึงไม่ค่อยพบการฝึกอบรมซ้ำมาก ๆ รอบเพื่อให้ได้จำนวนรอบฝึกซ้ำที่มากจนสามารถสรุปผลลัพธ์ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value) นอกจากนี้เนื่องด้วยลักษณะเฉพาะของการฝึกอบรมแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกที่ใช้ทรัพยากรการคำนวณมาก ทำให้การฝึกอบรมแบบจำลองหนึ่งครั้งสามารถกินเวลาฝึกอบรมนานหลายวัน หลายสัปดาห์ หรือหลายเดือนขึ้นกับทรัพยากรการคำนวณที่มี ความยากของปัญหา และปริมาณของข้อมูลฝึกอบรมอีกด้วย

ผลลัพธ์เมื่อสิ้นสุดการฝึกอบรมจำนวน 4,000 epochs คือ YOLOv3 ได้ Average Loss เท่ากับ 0.0947 ใช้เวลาในการฝึกอบรมเฉลี่ย 5 ชั่วโมง ส่วน YOLOv4 ได้ผลของ Average Loss เท่ากับ 0.7250 ใช้เวลาในการฝึกอบรมเฉลี่ย 14 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามในการพิจารณาเลือกกระหว่าง YOLOv3 และ YOLOv4 นั้นผู้วิจัยไม่ได้นำค่า Average Loss จากทั้งสองโมเดลดังกล่าวมาเป็นตัวชี้วัดในการเลือก เนื่องจาก Average Loss นั้นเป็นค่าที่ถูกเลือกมาให้เหมาะสมกับอัลกอริทึม Gradient Descent ที่ใช้ในการเรียนรู้เชิงลึก แต่ในกรณีของโมเดลตรวจจับวัตถุนี้ค่า Average Loss เป็นการบวกรวมกันของค่าความผิดพลาดหลายส่วนซึ่งไม่เหมาะสมจะนำมาใช้สะท้อนประสิทธิภาพและความคุ้มค่าในการใช้งานของโมเดลประเภทนี้ นอกจากนี้สถาปัตยกรรมและการคำนวณภายในของ YOLOv3 และ YOLOv4 ก็มีความแตกต่างกัน จึงไม่สามารถนำค่า Average loss จากทั้งสองโมเดลมาเปรียบเทียบข้ามกันได้

สำหรับตัวชี้วัดประสิทธิภาพในโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกประเภทตรวจจับวัตถุ นั้นสามารถสรุปจากงานวิจัยในอดีตได้ดังตารางที่ 5 โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพจำนวน 5 ได้แก่ Average Precision (AP) สำหรับวัดความแม่นยำในการตรวจจับวัตถุ, F1-score สำหรับวัดความสามารถของโมเดล โดยเฉลี่ยค่า Precision และ Recall, mAP สำหรับวัดค่าเฉลี่ยของ Average Precision ของวัตถุทั้งหมด, Frame Per Seconds (FPS) สำหรับวัดประสิทธิภาพความเร็ว (Xiaowei et al., 2021) และ Average IoU สำหรับวัดประสิทธิภาพของโมเดล โดยหาจำนวนเปอร์เซ็นต์ที่ทับซ้อนกันระหว่างผลเฉลย และผลจากการทำนาย (Rattanachot, 2019) ทั้งนี้ตัวชี้วัดทั้งหมดที่กล่าวมายังมีค่ามาก ยิ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพการทำงานที่ดีของโมเดล

ประเภทตรวจจับวัตถุ ในส่วนของค่า Precision และ Recall นั้นผู้วิจัยไม่ได้นำมาใช้เพราะการใช้ F1-Score เป็นค่าที่เฉลี่ย Precision และ Recall มาอยู่แล้ว นอกจากนี้งานวิจัยนี้ไม่มีการใช้ค่า False Positive Rate และ False Negative Rate ในการประเมินโมเดล เนื่องจากสำหรับโมเดลตรวจจับวัตถุที่กรอบภาพ (Bounding Box) ที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่ไม่ใช่ False Negative (FN), False Positive (FP) และ True Positive (TP) ก็คือ True Negative (TN) ทำให้จำนวนของ TN มีมากและละเอียดเกินไป ค่า TN จึงไม่ถูกนำมาใช้วัดประสิทธิภาพ ส่งผลให้ไม่มีการนำค่า False Positive Rate และ False Negative Rate ซึ่งมีสูตรการคำนวณ ขึ้นอยู่กับ TN มาใช้ในการเปรียบเทียบโมเดลตรวจจับวัตถุในที่นี้

ตารางที่ 5 ตัวชี้วัดประสิทธิภาพโมเดลประเภทตรวจจับวัตถุ (Object Detection) จากงานที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	ตัวชี้วัดประสิทธิภาพโมเดล Object Detection						
	Precision	Recall	F1-Score	mAP	AP	Average IoU	FPS
Small Object Detection in Traffic Scenes Based on YOLO-MXANet (Xiaowei et al., 2021)	✓	✓	✓	✓			
Fire-YOLO: A Small Target Object Detection Method for Fire Inspection (Lei et al., 2022)	✓	✓	✓	✓			
Comparing YOLOv3 , YOLOv4 and YOLOv5 for Autonomous Landing Spot Detection in Faulty UAVs (Upesh & Hossein, 2022)	✓	✓	✓	✓			
You Only Look Once (YOLOv3): Object Detection and Recognition for Indoor Environment (Hassan et al., 2021)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
YOLO-GD: A Deep Learning-Based Object Detection Algorithm for Empty-Dish Recycling Robots (Xuebin et al., 2022)	✓	✓	✓		✓		✓

ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ YOLOv3 และ YOLOv4 บนตัวชี้วัดประสิทธิภาพ 5 ตัวที่กล่าวสรุปไปข้างต้น พิจารณาจากค่าในตารางจะเห็นว่าเมื่อโมเดลถูกนำมาประเมินกับข้อมูลชุดทดสอบโดยภาพรวม YOLOv4 ให้ผลลัพธ์การตรวจจับอาวุธในภาพการ์ตูนได้ดีกว่า YOLOv3

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ YOLOv3 และ YOLOv4 ในการตรวจจับอาวุธบนข้อมูลชุดทดสอบ ตัวเลขที่เป็นตัวหนาและขีดเส้นใต้คือผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของค่า Mean และ SD ในแถวหนึ่ง ๆ

Performance on Testing Dataset	YOLOv3		YOLOv4	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Average Precision (AP): Gun	91.88%	0.009	<u>95.79%</u>	<u>0.004</u>
Average Precision (AP): Knife	52.97	0.109	<u>59.39%</u>	<u>0.031</u>
F1-score	0.80	0.05	<u>0.84</u>	<u>0.005</u>
Average IoU	65.71%	0.039	<u>68.99%</u>	<u>0.024</u>
mAP@0.50	72.43%	0.059	<u>77.59%</u>	<u>0.014</u>
Average FPS (Tesla K80)	<u>30.73</u>	1.418	18.63	<u>0.777</u>

3. การประเมินผลกับวิดีโอการดู

3.1 ประเมินผลการจำแนกภาพ

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยนำเอาโมเดลจำแนกภาพที่ดีที่สุดในงานนี้คือ VGG16 มาทำการทดสอบประสิทธิภาพเพิ่มอีก โดยเป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบว่าประสิทธิภาพในการจำแนกภาพของ VGG16 ตัวนี้จะเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่อย่างไรเมื่อถูกนำไปใช้กับภาพในวิดีโอการดูที่โมเดลไม่เคยเห็นมาก่อน (Unseen) ซึ่งภาพเหล่านี้หมายถึงภาพที่ไม่มีปรากฏอยู่ในข้อมูลฝึกอบรม (Train Set) และข้อมูลทดสอบ (Test Set) นั่นเอง สำหรับการเตรียมข้อมูลเพื่อการทดลองนี้ในส่วน of วิดีโอการดูที่เคยเห็นมาก่อน (Seen) ผู้วิจัยนำเอาวิดีโอการดูความยาว 4 นาที 59 วินาทีมาทำการสกัดได้เฟรมภาพสำหรับใช้ทดลองจำนวน 3,007 ภาพ และในส่วน of วิดีโอการดูที่ไม่เคยเห็นมาก่อน (Unseen) ผู้วิจัยนำเอาวิดีโอการดูความยาว 5 นาทีมาสกัดได้เฟรมภาพสำหรับทดลองทั้งหมด 3,012 ภาพ เพื่อหาความถูกต้อง (Accuracy) ในการจำแนกภาพโดย VGG16 ทำการแยกภาพ ทำเป็น Confusion Matrix

ตัวอย่างผลการจำแนกภาพโดย VGG16 ของการทดลองนี้แสดงในรูปที่ 10 และค่า Confusion Matrix ของการจำแนกภาพเปรียบเทียบระหว่างวิดีโอการดูที่เคยเห็นและไม่เคยเห็นแสดงในรูปที่ 11 เมื่อคำนวณจากรูปที่ 11 จะพบว่าค่า Accuracy ของการจำแนกภาพโดย VGG16 นั้นมีค่าเป็น 88.16% และ 90.20% สำหรับวิดีโอที่เคยเห็นและไม่เคยเห็นตามลำดับ กล่าวคือในการทดลองนี้ VGG16 สามารถจำแนกภาพบนวิดีโอการดูที่ไม่เคยเห็นได้ดีกว่าซึ่งถือเป็นพฤติกรรมที่ผิดวิสัยของระบบการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) ใด ๆ สาเหตุของพฤติกรรมที่ไม่ปกตินี้ ผู้วิจัยคาดว่าเกิดจากสัดส่วนจำนวนของภาพที่เหมาะสม (Normal) และไม่เหมาะสม (Abnormal) ที่แตกต่างกันในวิดีโอทั้งสอง โดยในวิดีโอที่เคยเห็นนั้นมีภาพเหมาะสมและไม่เหมาะสมอยู่ 2,239 ภาพ (74.46%) และ 768 ภาพ (25.54%) ตามลำดับ ในขณะที่วิดีโอที่ไม่เคยเห็นนั้นมีภาพเหมาะสมและไม่เหมาะสมอยู่ 2,628 ภาพ (87.25%) และ 384 ภาพ (12.75%) ตามลำดับ กล่าวคือ เนื่องจาก VGG16 สามารถจำแนกภาพเหมาะสม (Normal) ได้ดีกว่า ทำให้ประสิทธิภาพ Accuracy โดยรวมบนวิดีโอที่ไม่เคยเห็นซึ่งมีภาพเหมาะสมอยู่ถึง 87.25% ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิดีโอที่เคยเห็นซึ่งมีภาพเหมาะสมอยู่เพียง 74.46%



รูปที่ 10 ตัวอย่างผลลัพธ์สำหรับการประเมินผลการจำแนกภาพในวิดีโอการ์ตูน (เครดิตภาพการ์ตูนระบุในหัวข้อ Data Collection)

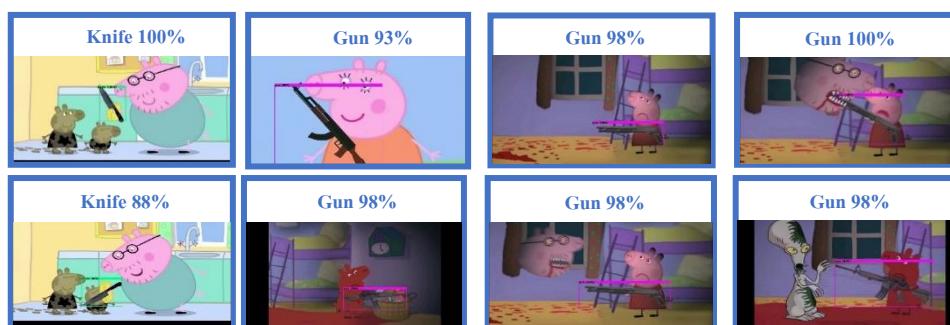
		Seen Video				Unseen Video	
True Label	Abnormal	534	234	True Label	Abnormal	204	180
	Normal	122	2,117		Normal	115	2,513
		Abnormal	Normal			Abnormal	Normal
		Predicted Label				Predicted Label	

รูปที่ 11 Confusion Matrix ผลการจำแนกภาพโดย VGG16 บนวิดีโอการ์ตูนที่เคยเห็น (ซ้าย) และไม่เคยเห็น (ขวา)

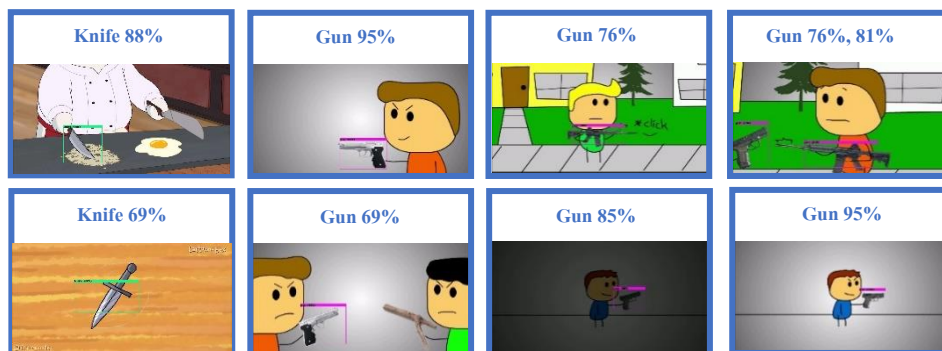
3.2 ประเมินผลการตรวจจับอาวุธ

ในส่วนนี้ผู้วิจัยนำโมเดล YOLOv4 ที่ถูกฝึกอบรมไว้แล้วจากหัวข้อก่อนหน้านี้มาทำการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพบนวิดีโอการ์ตูนที่เคยเห็น (วิดีโอจาก Train Set) และไม่เคยเห็น (วิดีโอการ์ตูนที่ไม่อยู่ใน Train Set) ซึ่งมีความยาว 5 นาทีเท่ากัน ผลการทดลองบนวิดีโอที่เคยเห็น (ตัวอย่างในรูปที่ 12) พบว่าโมเดล YOLOv4 ใช้เวลาในการประมวลผลวิดีโอทั้งหมดนาน 19 นาที (1,140 วินาที) มีความเร็ว 8.0 fps (frame per second) และมีค่า Average Precision (AP) ของปืนและมีดเท่ากับ 91.44% และ 87.39% ตามลำดับ ส่วนค่า Mean Average Precision (mAP) โดยรวมนั้นอยู่ที่ 89.41% ในส่วนของผลบนวิดีโอการ์ตูนที่ไม่เคยเห็นนั้น (ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 13) โมเดลใช้เวลาประมวลผลวิดีโอ 21 นาที (1,260 วินาที) มีความเร็ว 8.0 fps และมีค่า AP ของปืนและมีดคือ 68.8% และ 59.18% ตามลำดับ ในส่วนของค่า mAP นั้นอยู่ที่ 63.99%

กล่าวโดยสรุปคือความสามารถในการตรวจจับอาวุธของ YOLOv4 นั้นแยกลงเมื่อถูกนำไปใช้กับวิดีโอการ์ตูนที่ไม่เคยเห็นมาก่อน วิธีการแก้ปัญหาแบบตรงไปตรงมาคือการเพิ่มจำนวนข้อมูลฝึกสอนให้ครอบคลุมความเป็นไปได้ของภาพการ์ตูนต่าง ๆ มากขึ้น



รูปที่ 12 การประเมินผลการตรวจจับอาวุธจากวิดีโอที่เคยเห็น (เครดิตภาพการ์ตูนระบุในหัวข้อ Data Collection)



รูปที่ 13 การประเมินผลการตรวจจับอาวุธจากวิดีโอที่ไม่เคยเห็น (เครดิตภาพการ์ตูนจาก Brewstew - Airsoft Guns [Video file], <https://www.youtube.com/watch?v=ViNnMcOqDCA&t=60s>)

วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

ในส่วนของการจำแนกภาพ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองตั้งค่าโมเดลหลากหลายรูปแบบ โดยมีการนำเทคนิค Transfer Learning และ Finetuning ของการเรียนรู้เชิงลึกมาใช้กับ โมเดล ResNet50, VGG16 และ VGG19 ซึ่งผลการทดลองพบว่าโมเดลที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดกับชุดข้อมูลภาพการ์ตูนที่เตรียมไว้คือ VGG16 โดยเมื่อนำมาทดสอบซ้ำกับวิดีโอการ์ตูนที่เคยเห็นและไม่เคยเห็นก็พบว่าได้ความสามารถในการจำแนกภาพอยู่ที่ Accuracy 88.16% และ 90.20% ตามลำดับ ซึ่งผลลัพธ์ของวิดีโอไม่เคยเห็นที่ดีกว่านั้นเป็นผลพวงมาจากการที่ข้อมูลภาพในวิดีโอดังกล่าวมีจำนวนของข้อมูลภาพเหมาะสม (Normal) ที่โมเดลถนัดในการจำแนกมากกว่านั่นเอง หากต้องการที่จะปรับการทดลองให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมากขึ้นอีก ผู้วิจัยมีความเห็นว่าควรต้องรวบรวมภาพสำหรับใช้ในการทดลองให้มากขึ้น รวมถึงอาจเพิ่มเทคนิคการทำ Data Augmentation ให้มากและหลากหลายยิ่งขึ้นอีก ทั้งนี้ อีกเหตุผลหนึ่งที่ผู้วิจัยคาดว่าเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลลัพธ์การจำแนกภาพของบางโมเดลออกมาไม่ค่อยดีนั้น เป็นเพราะ โมเดล ResNet50, VGG16 และ VGG19 ที่ผู้วิจัยหยิบมาใช้ต่างก็ถูกฝึกสอนมาก่อนแล้ว (pre-trained) ด้วยชุดข้อมูล ImageNet ซึ่งข้อมูลฝึกสอนกว่าหนึ่งล้านรูปใน ImageNet นั้นเป็นภาพถ่ายในชีวิตประจำวันที่ถูกโพสต์ลงบนโซเชียลมีเดีย ไม่ใช่ภาพถ่ายการ์ตูนอย่างภาพการ์ตูนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ด้วยลักษณะของภาพถ่ายและภาพการ์ตูนที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญนี้เอง จึงอาจเป็นเหตุให้การ Transfer Learning และ Finetuning ให้ผลในบางโมเดลไม่ดีเท่าที่ควร

ในส่วนของการตรวจจับอาวุธในวิดีโอการ์ตูนด้วยโมเดล YOLOv3 และ YOLOv4 นั้น ผู้วิจัยพบว่าผลลัพธ์ค่า Average Precision ของมิดในทั้งสองโมเดลมีค่าต่ำ คาดว่าเป็นเหตุมาจากจำนวนภาพมิดที่ผู้วิจัยเก็บรวบรวมมาได้น้อยเกินไป หากสามารถเพิ่มภาพมิดในข้อมูลฝึกอบรมให้มากขึ้น น่าจะได้ค่า Average Precision ของมิดที่สูงขึ้นเทียบเท่ากับปืน และในการทดลองใช้ YOLOv4 ซึ่งเป็นตัวที่ให้ผลลัพธ์ดีกว่ากับวิดีโอที่เคยเห็นเปรียบเทียบกับวิดีโอที่ไม่เคยเห็นนั้น พบว่า YOLOv4 สามารถตรวจจับอาวุธบนวิดีโอที่เคยเห็นได้ค่อนข้างแม่นยำที่ Mean Average Precision เท่ากับ 89.41% แต่เมื่อมาทดสอบกับวิดีโอที่ไม่เคยเห็นค่าก็ตกไปเหลือ 69.33% โดยเมื่อโมเดลเจอภาพการ์ตูนที่มีรูปทรงของอาวุธไม่เหมือนกับปืนจริงหรือปืนที่เป็นภาพวาด โมเดลจะไม่สามารถตรวจจับปืนการ์ตูนนั้นได้ รวมถึงหากปืนหรือมิดอยู่ไกลมากหรือมีขนาดเล็กมากก็ทำให้โมเดลไม่สามารถตรวจจับได้เช่นกัน การแก้ปัญหาทั้งสองนี้นอกจากจะเพิ่มการฝึกอบรมด้วยภาพปืนและมิดแบบต่าง ๆ ให้ครอบคลุมมากขึ้นแล้ว ยังรวมถึงการพิจารณาและทดลองใช้สถาปัตยกรรมโมเดลแบบอื่น ๆ ที่มีความสามารถตรวจจับวัตถุขนาดเล็กในภาพได้ดี

สภาพหน้าของการศึกษาเพื่อต่อยอด ผู้วิจัยจะเพิ่มข้อมูลโดยการนำภาพหลายเส้นจากเกมคอมพิวเตอร์มาเสริมให้มีข้อมูลในการฝึกสอนมากขึ้น และนำงานวิจัยนี้ไปทดสอบวิเคราะห์ความเหมาะสมของสื่อวิดีโอการ์ตูนสำหรับเด็กในประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

- Burugupalli, M. (2020). *Image classification using transfer learning and convolution neural networks* [Unpublished master's thesis]. North Dakota State University.
- Dyer, T. (2018). The Effects of Social Media on Children. *Dalhousie Journal of Interdisciplinary Management*, 2018(14), 1-16.
- Electronic Transactions Development Agency. (2020). *Thailand internet user behavior 2020*. <https://www.etda.or.th/th/newsevents/pr-news/ETDA-released-IUB-2020.aspx>, Cited 19 July 2021
- Hassan, S., Hassan, J., & Salma, H. (2021). You Only Look Once (YOLOv3): Object Detection and recognition for indoor environment. *Multicultural Education*, 7(6), 171–181. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4906284>
- He, X., Cheng, R., Zheng, Z., & Wang, Z. (2021). Small object detection in traffic scenes based on YOLO-MXANet. *Sensors*, 21(21), 7422. <https://doi.org/10.3390/s21217422>
- Jain, N., Gupta, V., Shubham, S., Madan, A., Chaudhary, A., & Santosh, K. C. (2021). Understanding cartoon emotion using integrated deep neural network on large dataset. *Neural Computing and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06003-9>
- Khan, N. F., Hussain, A., Khan, A., & Din, I. U. (2019). *Categorized Violent Contents detection in cartoon movies using Deep Learning Model: Mobile Net*. In *The 5th International Conference on Next Generation Computing 2019, 20 - 21 December 2019, University of Petroleum & Energy Studies, India*.
- Lamas, A. C., Pérez, F., & Gondim, J. (2021). *OD-WeaponDetection*. <https://github.com/ari-dasci/OD-WeaponDetection>
- Lamoonmorn, Y., & Sucontphunt, T. (2019). *Full helmet and gun detection for robbery alarming from CCTV data in real time*. Bangkok: National Institute of Development Administration. (in Thai)
- Narejo, S., Pandey, B., Esenarro Vargas, D., Rodriguez, C., & Anjum, M. R. (2021). Weapon detection using YOLO V3 for smart surveillance system. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/9975700>
- Nepal, U., & Eslamiat, H. (2022). Comparing YOLOv3, YOLOv4 and YOLOv5 for autonomous landing spot detection in faulty UAVs. *Sensors*, 22(2), 464. <https://doi.org/10.3390/s22020464>
- Ratchatathanarat, T., & Wongcharoen, N. (2021). Influence of media on violent behavior of child and youth in Chiangmai province. *Journal of Health Science*, 30(2), 199-210. (in Thai)

Rattanachot, P. (2019). *Automated plant disease detection using drones and deep leaning* [Unpublished master's thesis].

Dhurakij Pundit University. (in Thai)

Royal Thai Government Gazette, Vol. 130, Pt 147 Gnor, 29th October B.E. 2556 (A.D.2013), 21.

Tahir, R., Ahmed, F., Saeed, H., Ali, S., Zaffar, F., & Wilson, C. (2019). *Bringing the Kid back into YouTube Kids: Detecting Inappropriate Content on Video Streaming Platforms. 2019 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining (ASONAM)*, (pp. 464-469). <https://doi.org/10.1145/3341161.3342913>

Yue, X., Li, H., Shimizu, M., Kawamura, S., & Meng, L. (2022). YOLO-GD: a deep learning-based object detection algorithm for empty-dish recycling robots. *Machines*, 10(5), 294. <https://doi.org/10.3390/machines10050294>

Zhao, L., Zhi, L., Zhao, C., & Zheng, W. (2022). Fire-YOLO: a small target object detection method for fire inspection. *Sustainability*, 14(9), 4930. <https://doi.org/10.3390/su14094930>