



วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์

THE JOURNAL OF APPLIED SCIENCE

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

ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 [2564] Vol.20, No.1 [2021]

THE JOURNAL IS COVERED BY:



Approved by TCI during
2020-2024



TCI

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

Assoc.Prof.Dr. Surapun Yimman

Assoc.Prof.Dr. Saowanit Sukparungsee

Assoc.Prof.Dr. Kitti Bodhipadma

Editor

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

Assoc.Prof. Narumol Kreua-ongarjnukool

Co-Editor

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

Asst.Prof.Dr. Peerapong Pornwongthong

Asst.Prof.Dr. Nonchanutt Chudpooti

Associate Editor

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

Assoc.Prof.Dr. Yupaporn Areepong

Assoc.Prof.Dr. Nutsuda Sumonsiri

Assoc.Prof.Dr. Sekson Sirisubtawee

Asst.Prof.Dr. Pianpool Kamoljitprapa

Asst.Prof.Dr. Anusara Srisrual

Asst.Prof.Dr. Walaiporn Prissanaroon Ouajai

Asst.Prof.Dr. Tanapat Anusas-amornkul

Asst.Prof.Dr. Suvimol Phanyaem

Asst.Prof.Dr. Theerawut Phusantisampan

Asst.Prof.Dr. Jintawat Tanamatayarat

Asst.Prof.Dr. Sukanya Thepwatee

Editorial Advisory Board

Prof.Dr. Paul Pigram

La Trobe University, Australia

Prof.Dr. Melvin Pascall

The Ohio State University, USA

Prof.Dr. Sergey Meleshko

Suranaree University of Technology, Thailand

Emeritus Prof.Dr. Yongwimon Lenbury

Mahidol University, Thailand

Prof.Dr. Sutthisak Phongthanapanich

King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

Prof.Dr. Anuvat Sirivat

Chulalongkorn University, Thailand

Assoc.Prof.Dr. Yaowadee Temtanapat

Thammasat University, Thailand

Assoc.Prof.Dr. Khongsak

Srikeno Pibulsongkram Rajabhat University, Thailand

Assoc.Prof.Dr. Weeradej Meeinkuirt

Mahidol University, Thailand

Editorial Advisory Board (cont.)

Assoc.Prof.Dr. Wararit Panichkitkosolkul
Thammasat University, Thailand

Assoc.Prof.Dr. Montip Tiensuwan
Mahidol University, Thailand

Assoc.Prof.Dr. Piyapatr Busababodhin
Mahasarakham University, Thailand

Assoc.Prof.Dr. Wantida Chaiyana
Chiang Mai University, Thailand

Asst.Prof.Dr. Kwan Arayathanitkul
Mahidol University, Thailand

Asst.Prof.Dr. Narumon Emarat
Mahidol University, Thailand

Asst.Prof.Dr. Kitiporn Plaimas
Chulalongkorn University, Thailand

Asst.Prof.Dr. Chatchai Khunboa
Khon Kaen University, Thailand

Asst.Prof.Dr. Julaluk Khemacheewakul
Chiang Mai University, Thailand

Asst.Prof.Dr. Jutarat Iewkittayakorn
Prince of Songkla University, Thailand

Asst.Prof.Dr. Yanisa Laoong-u-thai
Burapha University, Thailand

Asst.Prof.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.Wilaiporn 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.

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

Growth and root formation in the microshoots of three basilis cultured in vitro on different types and patterns of electrospun nanofibre mats

Kitti Bodhipadma, Sompoch Noichinda, Pussadee Chalermwanitkul, Noppavan Chanunpanich and David W.M. Leung.....1

Parameter estimation methods for the Marshall-Olkin Power Lomax distribution and its applications

Areeya Sudsuk and Darika Yamruboon.....10

Extreme Value Modeling of Daily Maximum Temperature with the r-Largest Order Statistics

Piyapatr Busababodhin, Monchaya Chiangpradit, Nipada papukdee, Jiraphon ruechairam, Kettida suanthaisong and Pannarat Guayjarernpanishk.....28

Sustainable mortar and concrete made from palm oil boiler clinker aggregate comprising rice husk ash and calcium bentonite: Compressive strength and durability assessment

Kamolchanok Kueaket and Danupon Tonnayopas.....39

Electricity Consumption Behavior Analysis: A case study Provincial Electricity Authority, Region 2, (Central Thailand) Chon Buri Province

Sittipong Dantrakul, Chanidda Nailoed and Natcha Jongjaihan.....56

An analysis of the effectiveness of the government policy program for assisting farmers in non-performing loan from participation in the moratorium project on rice in the year 2016/17

Supachok Jantima, Kulisara Toedprisan, Teerapataravee Suppasinsiriwattana and Wikanda Phaphan.....66

Comparison of the structural properties of a-C:H films prepared by pulsed and continuous RF

Wanwisa Butcharee, Artit Chingsungnoen, Ukit Rittihong and Sarayut Tunmee.....88

Comparison of general cyanoacrylate and Sirchie cyanoacrylate for latent fingerprint on non-porous surfaces by cyanosafe fuming chamber with Airsafe controller

Pratthana Phanthong, Pairoa Praihirunkit, Suchada Jirasirisuk and Sunisa Aobaom.....104

Effect of vacuum and relaxation times on the quality of rice fortified with herbal plant extracts by vacuum impregnation technique

Hathaitip Rongkom, Katekan Dajanta, Utaiwan Chattong and Songpan Sungsub.....118

TABLE OF CONTENT (cont.)

Effect of soybean preparation methods on physicochemical and sensory properties of soy milk and effect of drying temperatures and maltodextrin concentrations on quality of spray-dried soy milk powder

Suthida Akkarachaneeyakorn, Sirikul Nititanatorn and Sirikorn Likhitwanichakul.....137

Monthly rainfall amount forecasting of Buriram province by transfer function method.

Jenjira Mongkolmuang, Sasithon Pitsapol and Chalermwut Comemuang.....154

Research Article

Growth and root formation in the microshoots of three basils cultured in vitro on different types and patterns of electrospun nanofibre mats

Kitti Bodhipadma^{1*}, Sompoch Noichinda¹, Pussadee Chalermwanitkul¹,
Noppavan Chanunpanich² and David W.M. Leung³

¹Division of Bio-Industrial Technology, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 1518 Piboonsongkram Road, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand

²Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 1518 Piboonsongkram Road, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand

³School of Biological Sciences, University of Canterbury, Private Bag 4800, Christchurch 8140, New Zealand

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

Received: 08/10/2020; Revised: 18/01/2021; Accepted: 14/02/2021

Abstract

Nanofibre mats have been mainly used in relation to human health sciences. The application of this material in plant tissue culture was still rare. In this research, using different types and patterns of nanofibre mats, the microshoots (size 2-3 mm) of three basils were cultured in vitro. There were 3 types of materials for fabrication of a nanofibre mat in this study: cellulose (C), polyvinylidene fluoride (F) and polylactic acid (L) and 2 patterns of nanofibre mats: nonwoven (called pattern 1) and a mixture of nonwoven and aligned nanofibres (called pattern 4). Microshoot explants were obtained from aseptic grown holy basil, lemon basil and sweet basil seedlings. These explants were cultured on nanofibre mats that were floated on liquid basal MS medium. The results revealed that holy basil microshoots exhibited the greatest shoot height and number of root formed when cultured on the nonwoven cellulose-based nanofibre mat (C1). The nonwoven nanofibre mats electrospun from polylactic acid (L1), however, supported the greatest shoot height of both lemon basil and sweet basil microshoot explants. In addition, both lemon basil and sweet basil microshoots formed the greatest number of roots when cultured on the nonwoven nanofibre mats electrospun from polyvinylidene fluoride (F1). Thus, the basil microshoot cultures exhibited various responses when cultured on the different types and patterns of nanofibre mats. This innovation of culturing basil microshoots on electrospun nanofibre mats only requires 0.5 ml liquid medium and should also assist plant tissue culturists to save on using the relative expensive agar.

Keywords: holy basil, lemon basil, sweet basil, Murashige and Skoog medium, plant tissue culture

Introduction

An electrospun nanofibre mat is a physical support matrix containing tens to hundreds of nanometer or sub-nanometer fibres which were electrospun and conventionally fabricated into mats with the fibre in random, aligned or patterned arrangements (Bodhipadma et al., 2016; Mahjour et al., 2016; Jian et al., 2018; Kozior et al., 2019). These electrospun ultrafine fibres could be produced from inorganic or organic compounds, for example, polylactic acid,

polyvinylidene fluoride (Bodhipadma et al., 2011), polycaprolactone (Chanunpanich & Suwanboon, 2014), fish skin gelatin (Songchotikunpan et al., 2008) and lignin (Hong et al., 2019). So far, there were various applications of electrospun nanofibre mats, including filtrations, affinity membranes and recovery of metal ions, tissue engineering scaffolds, wound healing, drug delivery, composites and templates, catalyst and enzyme carriers, sensors and energy storage (Jian et al., 2008; Wang & Ryan, 2011). All these were primarily used for human care.

Among about 65 species in Lamiaceae (Labiatae) family, three well known basils in Thailand, holy basil (*Ocimum tenuiflorum* L., formerly known as *O. sanctum* L.), lemon basil (*Ocimum × citriodorum* Vis.) and sweet basil (*Ocimum basilicum* L.), are just not only the culinary herbs but also the rich sources of natural antioxidants, essential oils and nutraceuticals (Bodhipadma et al., 2012; Wongsen et al., 2015; Lupton et al., 2016; Tangpao et al., 2018). Thus, using these 3 basils for food ingredients in Thai cooking would provide delicious tastes, fragrances and good health for the consumer.

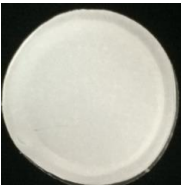
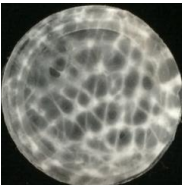
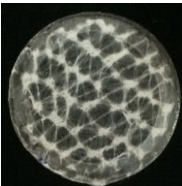
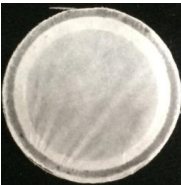
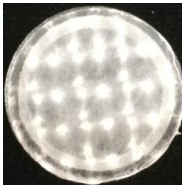
In plant tissue culture, electrospun nanofibre mats have recently been applied in a few experiments, for instance, as a scaffold for callus induction and culture of aromatic chilli and bilimbi (Bodhipadma et al., 2011) and a physical support substrate for germination of the *Artabotrys hexapetalus* pollen (Bodhipadma et al., 2016). A microshoot is an explant comprising the apical meristem with a minimal amount of other shoot tissues. This tiny explant has been used in various applications, including in vitro grafting, in vitro propagation, in vitro selection, and virus eradication (Sarai et al., 2014). It is not known if electrospun nanofibre mats would be suitable for microshoot culture. In this research, we aimed to investigate the growth of microshoots and root production when the microshoot explants of holy basil, lemon basil and sweet basil were cultured on different types and patterns of electrospun nanofibre mats.

Materials and methods

Dry seeds of holy basil, lemon basil and sweet basil were purchased from Chia Tai Seed Co., LTD., Bangkok, Thailand. The seeds of these three basils were first immersed separately in clean tap water for 3 hours. Surface sterilization of the seeds was initiated by transferring the seeds to 10% (v/v) St. Andrews Vegetable and Fruit Washing Liquid [Lion company (Thailand) Ltd., Thailand] for 10 minutes, followed by rinsing them with clean tap water for 10 minutes. The seeds were then soaked in 15% (v/v) Clorox (5.25%, w/w, sodium hypochlorite) and 3-4 drops of Tween 20 for 15 minutes before 3 rinses of 1 minute each in sterile distilled water. For seed germination under axenic conditions, five of the seeds were placed on the surface of basal MS medium (Murashige and Skoog, 1962) gelled with 0.8% (w/v) agar in a jar.

Following seed germination, microshoot explants (size 2-3 mm) of these three basil seedlings were excised and cultured on the surface of different types and patterns of electrospun nanofibre mats: cellulose (C), polyvinylidene fluoride (F) and polylactic acid (L) that were nonwoven (pattern 1) and a mixture of nonwoven and aligned arrangement (pattern 4) (Table 1), floated on 0.5 ml of liquid basal MS medium (Figure 1) placed in polypropylene tubes (size: 100 mm height and 16 mm diameter) with low-density polyethylene screw cap (Daigger Scientific, Inc., USA). For seed germination under axenic conditions and microshoot cultures, all the cultures were kept in a growth room under daylight fluorescent lamps (19.39 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) for 16 hours and 8 hours of darkness at 25 ± 2 °C for 3 and 4 weeks, respectively. All the media used in this study were adjusted to pH 5.7, and autoclaved at 121 °C and 15 psi for 20 minutes. Shoot length and number of root formed were determined and analysed statistically including ANOVA and means comparison by Duncan's Multiple Range Test at a confidence level of 0.05.

Table 1 Three types and two patterns of electrospun nanofibre mats used in this experiment. Each nanofibre mat was 13 mm diameter.

Type	Pattern 1	Code	Pattern 4	Code
Cellulose (C)		C1		C4
Polyvinylidene fluoride (F)		F1		F4
Polyacetic acid (L)		L1		L4

Note: pattern 1 = nonwoven and pattern 4 = a mixture of nonwoven and aligned nanofibres

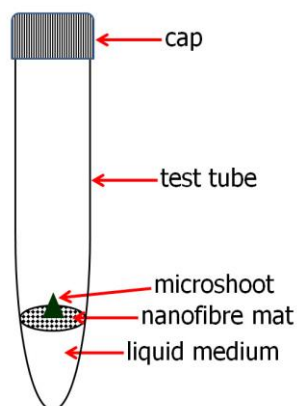


Figure 1 Diagram showing the set-up of an experiment for culturing a microshoot explant on a nanofibre mat floated on the surface of liquid medium in a test tube.

Results and discussion

Generally, microshoot explants could be cultured in vitro on semi-solid medium as well as in liquid medium. For liquid culture, the explants were able to grow when floated in liquid medium under agitation or placed on a filter paper bridge in contact with liquid medium (Grigoriadou et al., 2005). In this research, electrospun nanofibre mats with different chemical compounds and the fibres in different arrangements were used as support materials for culture of holy basil, lemon basil and sweet basil microshoot explants floated on the surface of liquid medium.

After microshoot explants (2-3 mm) of three basils were cultured on various types and patterns of electrospun nanofibre mats floated on liquid basal MS medium for 4 weeks, it was found that among all the electrospun nanomats used as support materials, the microshoots of holy basil grew particularly well on the C1 nanofibre mats. The microshoots exhibited the highest and lowest shoot heights at 12.75 mm and 6.75 mm when cultured on C1 and F4 nanofibre mats, respectively (Figure 2). There was no significant difference between the shoot heights of the microshoots of three basils cultured on the C1 and L1 nanofibre mats (Figures 2-4). The lemon basil and sweet basil microshoots exhibited greater shoot heights (33.83 mm and 30.9 mm, respectively) than the holy basil microshoots when cultured on L1 nanofibre mats (Figures 2-4). Moreover, the microshoots of these three basils exhibited the lowest shoot heights when cultured on the F4 nanofibre mats (Figures 2-4).

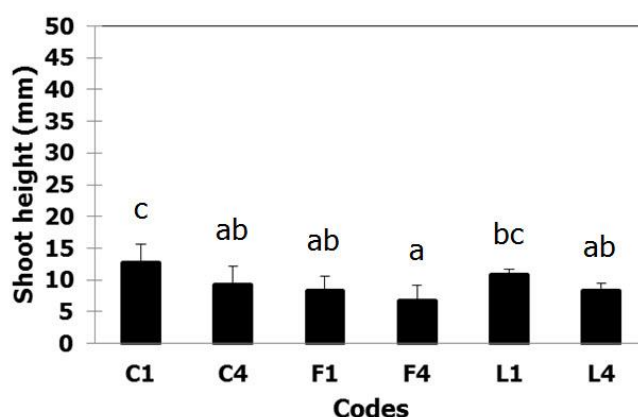


Figure 2 Shoot heights of holy basil microshoots after culturing on the different types and patterns of electrospun nanofibre mats floated on liquid basal MS medium for 4 weeks.

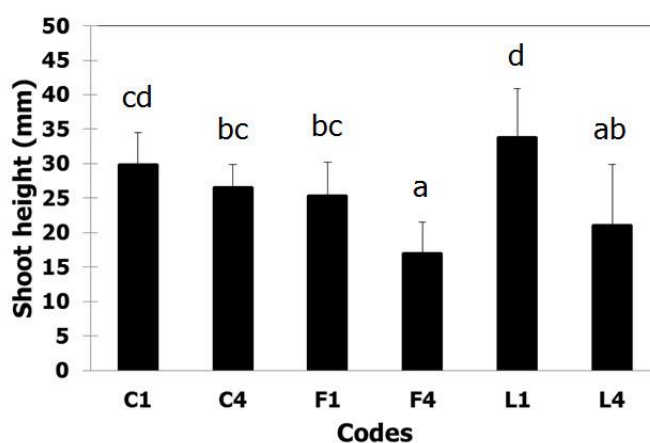


Figure 3 Shoot heights of lemon basil microshoots after culturing on the different types and patterns of electrospun nanofibre mats floated on liquid basal MS medium for 4 weeks.

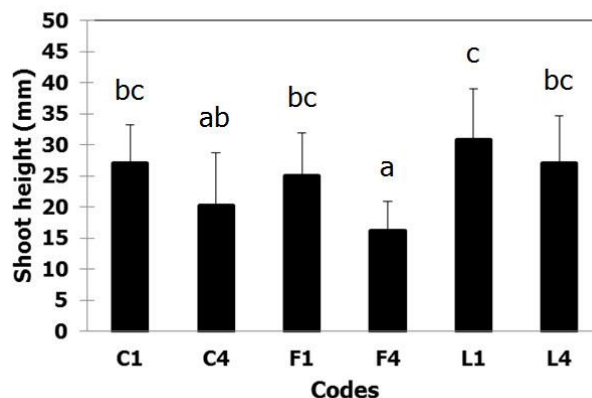


Figure 4 Shoot heights of sweet basil microshoots after culturing on the different types and patterns of electrospun nanofibre mats floated on liquid basal MS medium for 4 weeks.

The holy basil microshoots formed the highest number of roots (3.5) when cultured on the C1 nanofibre mats compared to those on the other nanofiber mats (Figure 5). In contrast, lemon basil and sweet basil microshoots both formed the highest number of roots (12.67) when cultured on the F1 nanofibre mats (Figures 6 and 7). There was no significant difference in the number of roots formed by the microshoots of both basil when cultured on the C1, C4, F1 and L1 nanofibre mats (Figures 6 and 7). Overall, the holy basil microshoots formed fewer roots than the lemon basil and sweet basil microshoots across all the different nanofiber mats used.

From the results obtained, among the different types and patterns of electrospun nanofibre mats used on liquid basal MS medium, differences were found in the shoot growth and root initiation in these three basil microshoots. One of the main reasons of these various responses might be related to the difference in medium adsorption efficiency of each of the nanofibre mats used. Our preliminary results suggested that cellulose (C) nanofibre mats had the highest percentage of medium adsorption, while polyvinylidene fluoride (F) nanofibre mats had the lowest one (data not shown).

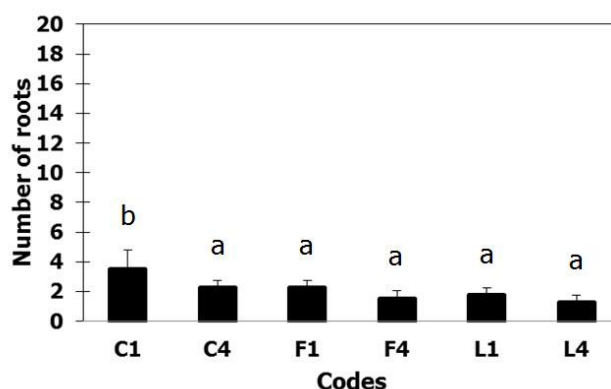


Figure 5 Number of roots formed per holy basil microshoot after culturing on the different types and patterns of electrospun nanofibre mats floated on liquid basal MS medium for 4 weeks.

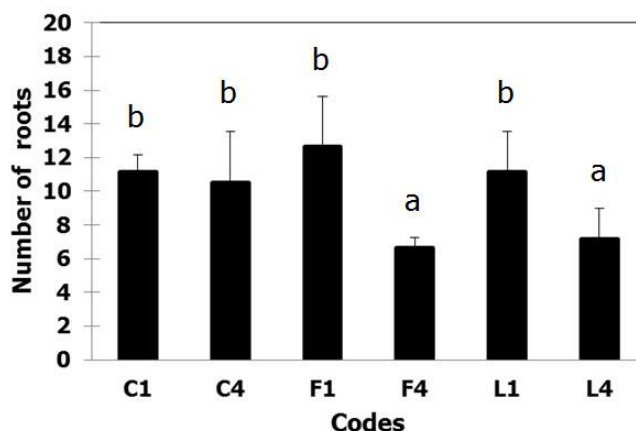


Figure 6 Number of roots formed per lemon basil microshoot after culturing on the different types and patterns of electrospun nanofibre mats floated on liquid basal MS medium for 4 weeks.

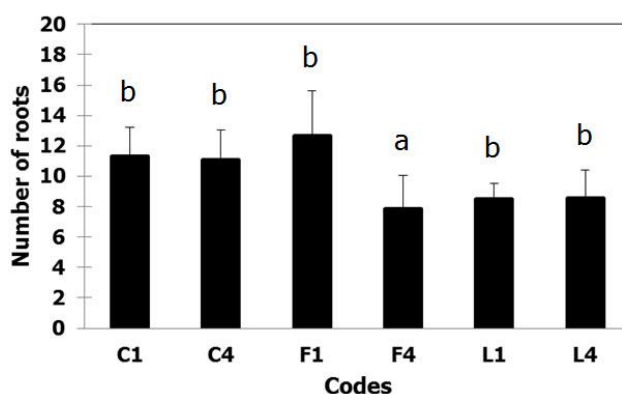


Figure 7 Number of roots formed per sweet basil microshoot after culturing on the different types and patterns of electrospun nanofibre mats floated on liquid basal MS medium for 4 weeks.

It is possible that there might be some influence from the plant source of the microshoot explants on the response of the explants to the different nanofiber mats used. In this study, the growth rate of holy basil microshoots and root formation was about 2.4 and 3.6 times, respectively, lesser than those in the lemon basil and sweet basil microshoots cultured on the nanofiber mats.

The microshoots of these three basil formed the least number of roots when cultured on F4 nanofibre mats. This was probably related to that a mixture of nonwoven and aligned (pattern 4) had inferior medium adsorption percentage than the nonwoven (pattern 1) (data not shown). The precise cause of lower root formation on the F4 nanofibre mats warrants further investigations.

Electrospun nanofibre mats were first used in plant tissue culture for callus induction and subculture (Bodhipadma et al., 2011) and later for pollen germination (Bodhipadma et al., 2016). In both studies, there were also different growth responses on the diverse types and patterns of nanofibre mats as found in the present research. Similar to culture on a nanofibre mat, explants, for example, potato meristem, could be placed on a filter paper bridge as a supporting material standing on liquid medium in a test tube comprising liquid MS medium (Khatun et al., 2015; Blidar et al., 2016). The volume of liquid medium required in the paper bridge support system might apparently be greater than that in the nanofiber mat system. It would be interesting to compare if there are any other differences in these two physical support systems for plant tissue culture.

The liquid culture system has obvious advantages over the semi-solid culture system based on agar. To solidify or form a gel of the medium, agar generally uses as a gelling agent that costs 10-20% of the cultured medium expenditure (Vyas et al., 2008; AlKhateeb & Alturki 2014). Nevertheless, for shoot and root development in vitro, the polarity is an important factor which a semi-solid medium could better provide than liquid medium. Using electrospun nanofibre mats would combine the benefits of both types of medium systems. With this innovation of using nanofiber mats, there is no need to use the more expensive agar and less liquid medium is required. For example, for culturing these three basil microshoots, as little as 0.5 ml of medium was found to be sufficient. Moreover, since the growth of unspecialised cells in callus, haploid pollen cells and tiny organs like microshoots during culture in vitro is likely to depend on the types and patterns of nanofibre mats, it would be possible to select the right types and patterns of electrospun nanofibre mats to use.

Conclusion

Holy basil, lemon basil and sweet basil microshoot explants responded differently on the various types and patterns of electrospun nanofibre mats. In this research, the electrospun nanofibre mats were found to be useful physical support matrices for the growth of the microshoots and root formation in these three basil. The use of nanofiber mats also minimised the volume of liquid medium required for microshoot culture and save on using the relatively expensive agar for the common semi-solidified plant tissue culture medium system.

Acknowledgements

We would like to thank Miss Pisarat Kaewko and Miss Wanchanok Sudlapa, students from Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, for their help on some data collection.

References

- AlKhateeb, A. A., & Alturki, S. M. (2014). A comparison of liquid and semi-solid cultures on shoot multiplication and rooting of three date palm cultivars (*Phoenix dactylifera* L.) in vitro. *Advances in Environmental Biology*, 8(16), 263-269.
- Blidar, C. F., Ilea, C., & Tripon, I. M. (2016). The use of filter paper bridges for initiating in vitro culture of *Viola wittrockiana* F1 Matrix 'Blue Blotch'. *Romanian Biotechnological Letters*, 22(6), 12088-12096.
- Bodhipadma, K., Noichinda, S., Chanunpanich, N., Sukthavornthum, W., & Leung, D. W. M. (2016). The utility of electrospun nanofibre mats for in vitro germination of *Artabotrys hexapetalus* pollen. *ScienceAsia* 42(3), 178-183. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2016.42.178>

- Bodhipadma, K., Noichinda, S., Chanunpanich, N., Thongmeethip, P., Chalermwanitkul, P., & Leung, D. W. M. (2011). Differential response of callus initiation and growth of aromatic chilli and bilimbi to two different electrospun nanofibre mats. *ScienceAsia*, 37(4), 303-307. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2011.37.303>
- Bodhipadma, K., Noichinda, S., Phromthara, T., Rutatip, S., & Nathalang, K. (2012). Determination of antioxidants from lemon basil callus during induction. *The Journal of Applied Science*, 11(2), 1-8.
- Chanunpanich, N., & Suwanboon, C. (2014). Polycaprolactone nanofiber sheet. *The Journal of KMUTNB*, 24(1), 189-197. (in Thai)
- Grigoriadou, K., Vasilakakis, M., Tzoulis, T., & Eleftheriou, E. P. (2005). *Experimental use of a novel temporary immersion system for liquid culture of olive microshoots*. In A. K. Hvostlef-Eide & W. Preil (Eds.) *Liquid Culture Systems for in vitro Plant Propagation*. Dordrecht: Springer.
- Hong, J. H., An, S., Song, K. Y., Kim, Y. I., Yarin, A. L., Kim, J. J., & Yoon, S. S. (2019). Eco-friendly lignin nanofiber mat for protection of wood against attacks by environmentally hazardous fungi. *Polymer Testing*, 74, 113-118. <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2018.12.023>
- Jian, F., HaiTao, N., Tong, L., & XunGai, W. (2008). Applications of electrospun nanofibers. *Chinese Science Bulletin*, 53(15), 2265-2286.
- Jian, S., Zhu, J., Jiang, S., Chen, S., Fang, H., Song, Y., Song, Y., Duan, G., Zhang, Y., & Hou, H. (2018). Nanofibers with diameter below one nanometer from electrospinning. *RSC advances*, 8(9), 4794-4802.
- Khatun, M., Hossain, M. S., Khalekuzzan, M., & Rownaq, A. (2016). Comparative study on meristem culture of three potato cultivars diamant, cardinal and granula and their shoot formation. *Asian Journal of Medical and Biological Research*, 1(3), 537-544. <https://doi.org/10.3329/ajmbr.v1i3.26477>
- Kozior, T., Trabelsi, M., Mamun, A., Sabantina, L., & Ehrmann, A. (2019). Stabilization of electrospun nanofiber mats used for filters by 3D printing. *Polymers*, 11(10), 1618. <https://doi.org/10.3390/polym11101618>
- Lupton, D., Khan, M. M., Al-Yahyai, R. A., & Hanif, M. A. (2016). *Basil*. In D. C. P. Ambrose, A., Manickavasagan & R. Naik (Eds.), *Leafy Medicinal Herbs: Botany, Chemistry, Postharvest Technology and Uses*. UK: CAB International.
- Mahjour, S. B., Sefat, F., Polunin, Y., Wang, L., & Wang, H. (2016). Improved cell infiltration of electrospun nanofiber mats for layered tissue constructs. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 104(6), 1479-1488. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.35676>
- Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia plantarum*, 15(3), 473-497.
- Sarai, N., Bodhipadma, K., Noichinda, S., Luangsriumporn, P., & Leung, D. W. M. (2017). Microshoot culture of Persian violet: Plant regeneration and in vitro flowering. *Annals of Agricultural Sciences*, 62(1), 105-111.
- Songchotikunpan, P., Tattiyakul, J., & Supaphol, P. (2008). Extraction and electrospinning of gelatin from fish skin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 42(3), 247-255. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2007.11.005>
- Tangpao, T., Chung, H. H., & Sommano, S. R. (2018). Aromatic profiles of essential oils from five commonly used Thai basil. *Foods*, 7(11), 175. <https://doi.org/10.3390/foods7110175>

- Vyas, S., Rao, M. S., Suthar, R. K., & Purohit, S. D. (2008). Liquid culture system stimulates in vitro growth and shoot multiplication in four medicinally important plants. *Medicinal and Aromatic Plant Science and Biotechnology*, 2(2), 96-100.
- Wang, L., & Ryan, A. J. (2011). *Introduction to electrospinning*. In L. Bosworth & S. Downes (Eds.), *Electrospinning for Tissue Regeneration* (1st ed.). UK: Woodhead Publishing Ltd.
- Wongsen, W., Bodhipadma, K., Noichinda, S., & Leung, D. W. M. (2015). Influence of different 2,4-D concentrations on antioxidant contents and activities in sweet basil leaf-derived callus during proliferation. *International Food Research Journal*, 22(2), 638-643.

Research Article

Parameter estimation methods for the Marshall-Olkin Power Lomax distribution and its applications

Areeya Sudsuk¹ and Darika Yamrubboon^{1*}

¹Department of Mathematics, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok, 65000, Thailand

*E-mail: darikay@nu.ac.th

Received: 30/07/2020; Revised: 28/11/2020; Accepted: 07/12/2020

Abstract

The Marshall-Olkin Power Lomax (MOPLx) distribution, being extended the Power Lomax distribution, is obtained by using Marshall-Olkin (MO) scheme. This distribution can be applied for skewed data set and used as an alternative to Gamma or Weibull distributions. The main objective of this paper is to compare common method, maximum likelihood estimator (MLE) with the minimum Anderson-Darling estimator (MADE), for the shape and scale parameters of the MOPLx distribution. The efficiency of both estimators for MOPLx distribution is examined via a simulation study with different sample sizes and its specified parameters by using bias, standard deviation and root mean square error as the criteria for the comparison between MLE and MADE. Furthermore, for application of the MOPLx distribution, four life time data sets are exemplified to evaluate the performances of these estimators in both small and large samples.

Keywords: maximum likelihood estimator, minimum Anderson-Darling estimator, the Marshall-Olkin Power Lomax, simulation study

Introduction

Lifetime distributions play a central role in parametric inferences for modeling the univariate data in order to explain or predict a lifetime phenomenon. It involves the following two essential steps, determining the best fitting distribution and selecting its parameter estimation, because different distributions or parameter estimations have an effect on the result of the data analysis.

In terms of distributions, the fact that each distribution has different characteristics, so most well-known traditional distributions may not fit well on some data. As a result, the new distributions that are extended forms of traditional distributions have been proposed using several techniques in the last few years. Moreover, it was found that they are more flexible to model various real world data in a wide variety of areas such as lifetime analysis, economics, engineering, finance, insurance, biological and medical science (Akhter et al., 2020; Khaleel et al., 2020).

Recently, the Marshall-Olkin Power Lomax (MOPLx) distribution with four parameters; three shape and one scale parameters was proposed by Haq et al. (2020a). The MOPLx distribution is extended form of the Power Lomax distribution based on the Marshall-Olkin (MO) family by adding a new parameter, called tilt parameter (Cordeiro, 2014). In their work, the proposed distribution was focused on the shape characteristic of the probability density function

(pdf), as well as hazards function, explicit forms of moments, order statistics, Rényi entropy, probability weighted moments, a parameter estimation, and its application. Additionally, the MOPLx distribution can be considered in skewed data set, and it has been used to model the wind speed (Haq et al., 2020b), lifetime and reliability (Haq et al., 2020a) data sets.

In case of parameter estimation, there are lots of methods to estimate the unknown parameters such as method of moments, least squares method, probability plotting, the expectation-maximization algorithm, Bayes estimator, or the maximum likelihood estimator (MLE). Nevertheless, the MLE is the most widely used as baseline method in the framework of various proposed distributions, including the MOPLx distribution. In addition, some newly works on distributions using MLE are illustrated: the Marshall-Olkin Gumbel-Lomax distribution (Nwezza & Ugwuowo, 2020), the Marshall-Olkin Exponential Gompertz distribution (Khaleel et al., 2020) and Type II Topp Leone Power Lomax Distribution (Aryuyuen & Bodhisuwan, 2020).

In this paper, we would like to apply the minimum Anderson-Darling estimator (MADE) in MOPLx distribution and compare with MLE. The MADE has a high performance in the case of many location scale distributions and offers a better solution than MLE in special estimation problems which can occur in modelling complex phenomena (Raschke, 2017). Additionally, the MADE was used in some recent researches by Dey et al. (2017; 2019) and ZeinEldin (2019a; 2019b).

The rest of this paper is organized as following, firstly, background of the MOPLx distribution including its pdf, the cumulative distribution function (cdf), some essential mathematical properties and parameter estimation using MLE are studied. Secondly, MADE for the MOPLx distribution is discussed and its Anderson-Darling distance function is also derived. Thirdly, the efficiency of its estimators are compared by simulation study. After that, MLE and MADE are applied to the real data sets. Finally, main results of this study are summarized.

Materials and Methods

1. The MOPLx Distribution

The MOPLx distribution with three scale parameters α, λ, γ and the shape parameter β was introduced by Haq et al. (2020a). The pdf, cdf and some plots of this distribution are described as follows.

Definition 1. Let X be a random variable of the MOPLx distribution with parameter α, β, λ , and γ . It will be denoted as $X \sim \text{MOPLx}(\alpha, \beta, \lambda, \gamma)$.

Theorem 1. Let $X \sim \text{MOPLx}(\alpha, \beta, \lambda, \gamma)$, then its pdf is

$$f(x) = \frac{\gamma\alpha\beta\lambda^\alpha x^{\beta-1} (\lambda + x^\beta)^{-\alpha-1}}{\left(1 - (1-\gamma)\left(\lambda^\alpha (\lambda + x^\beta)^{-\alpha}\right)\right)^2}, \quad x \geq 0, \quad (1)$$

and the corresponding cdf is

$$F(x) = \frac{1 - \lambda^\alpha (\lambda + x^\beta)^{-\alpha}}{1 - (1-\gamma)\left(\lambda^\alpha (\lambda + x^\beta)^{-\alpha}\right)}, \quad x \geq 0, \quad (2)$$

where $\alpha > 0, \beta > 0, \lambda > 0$, and $\gamma > 0$.

Some plots of the MOPLx pdf and associated cdf with various values of its parameters are shown in Figure 1. It can be seen that the pdf can be categorized into two characteristics according to the shape parameter, β ;

- 1) When $\beta \leq 1$, the pdf is decreasing.
- 2) When $\beta > 1$, the pdf is unimodal with right-skewed.

For the MOPLx pdf with unimodal, if the parameter α is increasing and others are fixed, the shapes get more extremely right skewed, as shown in Figure 1(c). On the other hand, the shape parameter becomes more and more flat with right skewed when either λ or γ is increasing, as displayed in Figure 1(e).

2. The mathematical properties

In this section, some essential mathematical properties of the MOPLx distribution for this study including quantile function and the r th moment about origin (Haq et al., 2020a) are presented.

The quantile function

The quantile function, the reverse of its cdf, is beneficial towards both statistical inference and application in probability. In this section, the MOPLx quantile function is shown.

Theorem 2. The quantile function of the MOPLx distribution is

$$Q(u; \alpha, \beta, \lambda, \gamma) = \left(\lambda \left(\left(\frac{1-u}{1-(1-\gamma)u} \right)^{\frac{-1}{\alpha}} - 1 \right) \right)^{\frac{1}{\beta}}, \quad (3)$$

where u is random variable from uniform distribution bounded on $(0,1)$. Moreover, the median of X is given by $Q(1/2; \alpha, \beta, \lambda, \gamma)$.

The r th moments

The various moments are a vital class of expectation describing the important shapes or features of any distribution (e.g., mean, variance, skewness and kurtosis).

Theorem 3. Suppose $X \sim \text{MOPLx}(\alpha, \beta, \lambda, \gamma)$ then the r th moment of X is given by

$$\mu_r' = \alpha \gamma \sum_{k=0}^{\infty} (k+1)(1-\gamma)^k \lambda^{\frac{r}{\beta}} B \left[\frac{r}{\beta} + 1, \left(\alpha(k+1) - \frac{r}{\beta} \right) \right], \quad (4)$$

where $B(.,.)$ is beta function.

3. Methods of parameter estimations for the MOPLx distribution

The parameter estimation is used to estimate unknown parameters so as to describe behavior of data. In this part, the fundamental aspect of two methods of parameter estimation are described as follows.

The maximum likelihood estimator

The maximum likelihood estimation (MLE) has been known as one of the most well-known method to estimate parameters of a distribution by maximising the log-likelihood function of parameters, ℓ .

Theorem 4. Let $X_1, X_2, \dots, X_n$ be an independent and identically distributed (iid) random variable corresponding to $x_1, x_2, \dots, x_n$ which is a random sample of size n from a population with pdf in equation (1) and let $\Theta = (\alpha, \beta, \lambda, \gamma)^T$ be the vectors of the parameters. Then, its log-likelihood function (Haq et al., 2020a) can be expressed as

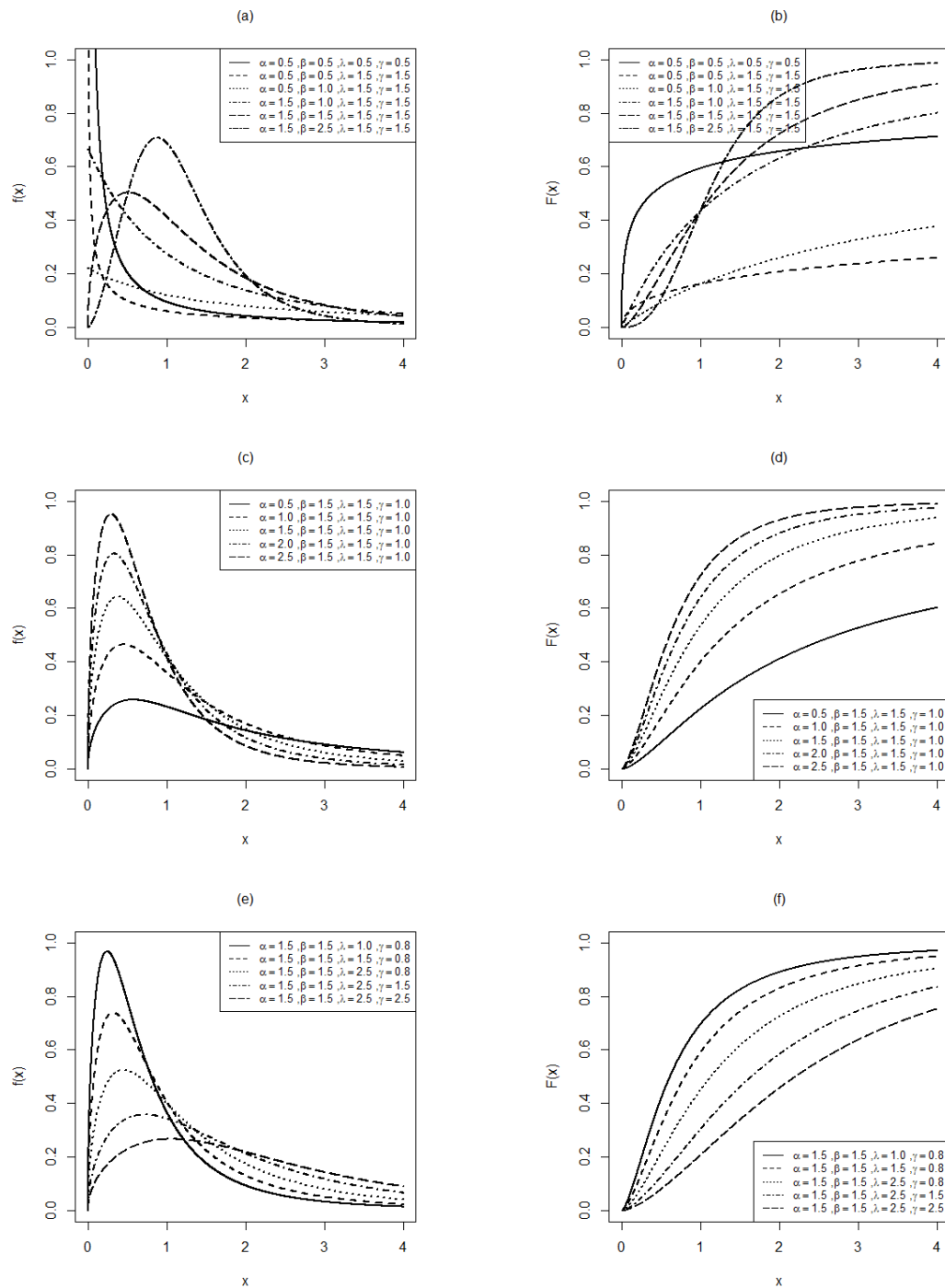


Figure 1 Some MOPLx pdf and cdf plots with its specified parameters: α , β , λ , and γ .

$$\begin{aligned}\ell(\Theta) &= n \log(\gamma \alpha \beta \lambda^\alpha) + (\beta - 1) \sum_{i=1}^n \log[x_i] - (\alpha + 1) \sum_{i=1}^n \log[\lambda + x_i^\beta] \\ &\quad - 2 \sum_{i=1}^n \log\left[1 - (1 - \gamma) \lambda^\alpha [\lambda + x_i^\beta]^{-\alpha}\right].\end{aligned}\quad (5)$$

From equation (5), the associated score functions are

$$\begin{aligned}\frac{\partial \ell(\Theta)}{\partial \alpha} &= \frac{n}{\alpha} + n \log(\lambda) - \sum_{i=1}^n \log[\lambda + x_i^\beta] \\ &\quad - 2 \sum_{i=1}^n \frac{-(1 - \gamma) \lambda^\alpha \log[\lambda] [\lambda + x_i^\beta]^{-\alpha} + (1 - \gamma) \lambda^\alpha \log[\lambda + x_i^\beta] [\lambda + x_i^\beta]^{-\alpha}}{1 - (1 - \gamma) \lambda^\alpha [\lambda + x_i^\beta]^{-\alpha}}, \\ \frac{\partial \ell(\Theta)}{\partial \beta} &= \frac{n}{\beta} + \sum_{i=1}^n \log[x_i] - (\alpha + 1) \sum_{i=1}^n \frac{\log[x_i] x_i^\beta}{\lambda + x_i^\beta} - 2 \sum_{i=1}^n \frac{\alpha (1 - \gamma) \lambda^\alpha \log[x_i] x_i^\beta [\lambda + x_i^\beta]^{-1-\alpha}}{1 - (1 - \gamma) \lambda^\alpha [\lambda + x_i^\beta]^{-\alpha}}, \\ \frac{\partial \ell(\Theta)}{\partial \lambda} &= \frac{n\alpha}{\lambda} - (\alpha + 1) \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda + x_i^\beta} - 2 \sum_{i=1}^n \frac{\alpha (1 - \gamma) \lambda^\alpha [\lambda + x_i^\beta]^{-1-\alpha} - \alpha (1 - \gamma) \lambda^{-1+\alpha} [\lambda + x_i^\beta]^{-\alpha}}{1 - (1 - \gamma) \lambda^\alpha [\lambda + x_i^\beta]^{-\alpha}}, \\ \frac{\partial \ell(\Theta)}{\partial \gamma} &= \frac{n}{\gamma} - 2 \sum_{i=1}^n \frac{\lambda^\alpha [\lambda + x_i^\beta]^{-\alpha}}{1 - (1 - \gamma) \lambda^\alpha [\lambda + x_i^\beta]^{-\alpha}}.\end{aligned}$$

The maximum likelihood estimators of MOPLx distribution, $\hat{\Theta}_{MLE} = (\hat{\alpha}_{MLE}, \hat{\beta}_{MLE}, \hat{\lambda}_{MLE}, \hat{\gamma}_{MLE})^T$, do not have an explicit form. Thus, maximum likelihood estimates can be solved by numerical technique using R language (R Core Team, 2020).

The minimum Anderson-Darling estimator

The MADE is one of the minimum distance estimators based on an Anderson-Darling statistics. This class of estimators is based on minimizing any estimates of the cdf with the empirical distribution function (Dey et al., 2019). The Anderson-Darling distance function (ADF) is written as

$$A(\Theta) = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1) \left\{ \log(F(X_{i:n} | \Theta)) + \log(\bar{F}(X_{n+1-i:n} | \Theta)) \right\},$$

where Θ is the vector of parameters in the cdf and $\bar{F}$ is $1 - F$. The point estimation of MADE (Rodrigues, 2016) is defined as

$$A(\hat{\Theta}) = \min_{\Theta} A(\Theta).$$

Theorem 5. Let $X_1, X_2, \dots, X_n$ be an ordered iid random sample of size n from the MOPLx population with cdf shown in equation (2) and let $\Theta = (\alpha, \beta, \lambda, \gamma)^T$ be the vector of the parameters. Then, the ADF of MOPLx distribution is

$$A(\Theta) = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) \left\{ \log \left(\frac{1 - \lambda^\alpha (\lambda + x_{(i)}^\beta)^{-\alpha}}{1 - (1-\gamma) (\lambda^\alpha (\lambda + x_{(i)}^\beta)^{-\alpha})} \right) \right. \\ \left. + \log \left(1 - \frac{1 - \lambda^\alpha (\lambda + x_{(n+1-i)}^\beta)^{-\alpha}}{1 - (1-\gamma) (\lambda^\alpha (\lambda + x_{(n+1-i)}^\beta)^{-\alpha})} \right) \right\}.$$

According to *Theorem 5*, its associated nonlinear equations are

$$\frac{\partial A(\Theta)}{\partial \alpha} = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) \left\{ \frac{\Theta_\alpha(X_{(i)} | \Theta)}{F(X_{(i)} | \Theta)} - \frac{\Theta_\alpha(X_{(n+1-i)} | \Theta)}{\bar{F}(X_{(n+1-i)} | \Theta)} \right\} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial A(\Theta)}{\partial \beta} = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) \left\{ \frac{\Theta_\beta(X_{(i)} | \Theta)}{F(X_{(i)} | \Theta)} - \frac{\Theta_\beta(X_{(n+1-i)} | \Theta)}{\bar{F}(X_{(n+1-i)} | \Theta)} \right\} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial A(\Theta)}{\partial \lambda} = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) \left\{ \frac{\Theta_\lambda(X_{(i)} | \Theta)}{F(X_{(i)} | \Theta)} - \frac{\Theta_\lambda(X_{(n+1-i)} | \Theta)}{\bar{F}(X_{(n+1-i)} | \Theta)} \right\} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial A(\Theta)}{\partial \gamma} = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) \left\{ \frac{\Theta_\gamma(X_{(i)} | \Theta)}{F(X_{(i)} | \Theta)} - \frac{\Theta_\gamma(X_{(n+1-i)} | \Theta)}{\bar{F}(X_{(n+1-i)} | \Theta)} \right\} = 0, \quad (9)$$

where $\Theta_\alpha(X_{(i)} | \Theta) = \frac{\gamma \lambda^\alpha (\lambda + x^\beta)^{-\alpha} [\ln(\lambda + x^\beta) - \ln \lambda]}{\left[1 - (1-\gamma) (\lambda^\alpha (\lambda + x^\beta)^{-\alpha}) \right]^2},$

$$\Theta_\beta(X_{(i)} | \Theta) = \frac{\alpha \gamma \lambda^\alpha x^\beta (\ln x) (\lambda + x^\beta)^{-\alpha-1}}{\left[1 - (1-\gamma) (\lambda^\alpha (\lambda + x^\beta)^{-\alpha}) \right]^2},$$

$$\Theta_\lambda(X_{(i)} | \Theta) = \frac{-\alpha \gamma x^\beta \lambda^{2\alpha-1} (\lambda + x^\beta)^{-2\alpha-1}}{\left[1 - (1-\gamma) (\lambda^\alpha (\lambda + x^\beta)^{-\alpha}) \right]^2},$$

$$\Theta_\gamma(X_{(i)} | \Theta) = \frac{\lambda^\alpha (\lambda + x^\beta)^{-\alpha} (\lambda^\alpha (\lambda + x^\beta)^{-\alpha} - 1)}{\left[1 - (1-\gamma) (\lambda^\alpha (\lambda + x^\beta)^{-\alpha}) \right]^2}.$$

Thus, $\hat{\Theta}_{MADE} = (\hat{\alpha}_{MADE}, \hat{\beta}_{MADE}, \hat{\lambda}_{MADE}, \hat{\gamma}_{MADE})^T$, the Anderson-Darling estimated parameter vector, can be solved by equations (6)-(9). These equations can be obtained by numerically solving the system of non-linear equations through the R language (R Core Team, 2020).

Results and discussion

1. Simulation study

In this part, the Monte Carlo simulation is applied to illustrate the comparison of the parameter estimation methods, MLE and MADE. All cases are selected based on the shape of the MOPLx distribution, unimodal and decreasing shapes, presented in Table 1. Each of the cases is constructed from MOPLx distribution with the sample sizes of 15, 30, 50, 100, 300, 500, 1000. The simulation is repeated 1,000 times and the parameter estimates for both methods are obtained by using Nelder-Mead algorithm, with *optim* function in *stats* package of R language (R Core Team, 2020). This function provides basic optimization capabilities, most widely used functions in R language (Nash, 2014). Moreover, the criteria for comparing the performance of MLE and MADE are bias, standard deviation (SD) and root mean square error (RMSE). Suppose $\hat{\Theta}$ is the estimated parameter vector and Θ is the true parameter vector.

Then, the bias, SD and RMSE are computed by the formulas: $\hat{\Theta} = \sum_{i=1}^{1000} \hat{\Theta}_i / 1000$, $\text{Bias}(\hat{\Theta}) = \hat{\Theta} - \Theta$,

$\text{SD}(\hat{\Theta}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{1000} (\hat{\Theta}_i - \hat{\Theta})^2 / 999}$, and $\text{RMSE}(\hat{\Theta}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{1000} (\hat{\Theta}_i - \Theta)^2 / 1000}$, respectively.

Table 1 provides all cases including mean and variance of the specified distributions. The characteristics of MOPLx shape in all cases are also illustrated in Figure 2 which has unimodal and decreasing shapes.

Table 1 All cases of the MOPLx parameters for simulation study and corresponding mean and variance

cases	Parameter				Mean	Variance
	α	β	λ	γ		
1	4.5	1.0	1.5	1.5	0.5353	0.4339
2	5.5	1.0	2.5	2.5	0.8925	0.8464
3	1.5	1.5	1.5	1.5	1.8658	15.2071
4	3.5	1.5	2.5	1.5	1.0217	0.6993
5	3.5	1.5	3.5	3.5	1.7718	1.6086

Random variate generation in the MOPLx distribution

The inversion method is utilized to generate a random variable for the MOPLx distribution by setting $x_i = F^{-1}(u_i)$, where u_i is a random variable of the uniform distribution on (0,1), which is denoted as $U(0,1)$.

Let $X \sim \text{MOPLx}(\alpha, \beta, \lambda, \gamma)$, the random variate generation of the MOPLx distribution can be constructed as following steps.

- 1) Denoting the true parameter values $(\alpha, \beta, \lambda, \gamma)$ and sample sizes (n)
- 2) Generating u_i from $U(0,1)$, when $i=1, 2, 3, \dots, n$
- 3) Generating x_i from the equation (3)

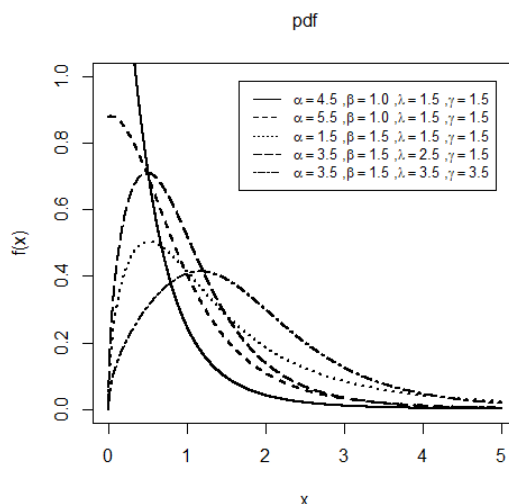


Figure 2 Plots of MOPLx distribution used in simulation study

Simulation study result

The results in simulation study based on various combination of parameter values and sample sizes are presented in Tables 2. Performance of these estimators is evaluated through their biases, SDs and RMSEs for both parameter estimation methods. It is shown that in most cases the MADE can produce lower bias, SD and RMSE values for the parameters α , β and λ when $n \leq 50$. In case 3, MADE shows lower bias for all parameters when $n \leq 50$. Almost all cases, the results indicate that SD and RMSE values of MADE are larger than those of MLE when $n \geq 100$. When considering the parameter β of two estimation methods, the estimated values of β are closer the true value than other parameters in all situations. Besides, in most cases, the bias, SD and RMSE values of the parameter γ using MADE seem to be higher than those using the MLE. This can be seen more clearly when $n \geq 500$. Furthermore, the results show that SD and RMSE values for MLE and MADE tend to decrease as the sample size increases in most situations. In addition, the values of the estimated parameters tend to be closer to the true parameters when n is large, except for the parameter λ with MADE in case 5. On overall result, we observe that the MLE performs quite well when n is large. However, MADE performs slightly better than MLE when n is small.

Table 2 The estimates, Bias, SD and RMSE of the estimated parameters using MLE and MADE methods

Case 1: True parameters: ($\alpha = 4.5$, $\beta = 1.0$, $\lambda = 1.5$, $\gamma = 1.5$)

n		MLE				MADE			
		Estimate	Bias	SD	RMSE	Estimate	Bias	SD	RMSE
15	$\hat{\alpha}$	7.5944	3.0944	8.8426	9.3642	4.7193	0.2193	6.7944	6.7946
	$\hat{\beta}$	1.3177	0.3177	0.5238	0.6124	1.2180	0.2180	0.5539	0.5950
	$\hat{\lambda}$	6.7224	5.2224	9.0465	10.4418	1.9610	0.4610	3.0413	3.0746
	$\hat{\gamma}$	3.2406	1.7406	6.1328	6.3721	5.2051	3.7051	7.8878	8.7111
30	$\hat{\alpha}$	6.8482	2.3482	6.3254	6.7442	5.3211	0.8211	6.3656	6.4152
	$\hat{\beta}$	1.1474	0.1474	0.3538	0.3831	1.0807	0.0807	0.3977	0.4056
	$\hat{\lambda}$	4.8988	3.3988	6.3390	7.1899	1.8933	0.3933	2.4388	2.4691
	$\hat{\gamma}$	3.4493	1.9493	5.2029	5.5536	5.0377	3.5377	7.1726	7.9944
50	$\hat{\alpha}$	5.4098	0.9098	3.9864	4.0871	5.4985	0.9985	5.5545	5.6408
	$\hat{\beta}$	1.0958	0.0958	0.2820	0.2977	1.0259	0.0259	0.3234	0.3243
	$\hat{\lambda}$	2.5899	1.0899	2.4875	2.7147	1.8717	0.3717	2.3763	2.4040
	$\hat{\gamma}$	2.4802	0.9802	2.5300	2.7121	4.1478	2.6478	5.6217	6.2115
100	$\hat{\alpha}$	5.1307	0.6307	2.9617	3.0266	4.8309	0.3309	3.6947	3.7076
	$\hat{\beta}$	1.0442	0.0442	0.1975	0.2023	1.0065	0.0065	0.2278	0.2278
	$\hat{\lambda}$	2.2344	0.7344	2.0737	2.1989	1.6157	0.1157	1.7732	1.7761
	$\hat{\gamma}$	2.3617	0.8617	2.2116	2.3726	3.0764	1.5764	3.6924	4.0132
300	$\hat{\alpha}$	4.8328	0.3328	1.7940	1.8237	4.6434	0.1434	2.4906	2.4934
	$\hat{\beta}$	1.0109	0.0109	0.1219	0.1224	0.9872	-0.0128	0.1436	0.1441
	$\hat{\lambda}$	1.7533	0.2533	1.0543	1.0838	1.5354	0.0354	1.4130	1.4127
	$\hat{\gamma}$	1.8955	0.3955	1.1366	1.2029	2.3435	0.8435	1.7840	1.9726
500	$\hat{\alpha}$	4.5422	0.0422	1.3003	1.3003	4.4128	-0.0872	1.7926	1.7938
	$\hat{\beta}$	1.0204	0.0204	0.0895	0.0918	0.9918	-0.0082	0.1124	0.1126
	$\hat{\lambda}$	1.5868	0.0868	0.6404	0.6460	1.4098	-0.0902	0.8853	0.8894
	$\hat{\gamma}$	1.5935	0.0935	0.6435	0.6500	2.1190	0.6190	1.3390	1.4746
1000	$\hat{\alpha}$	4.4890	-0.0110	0.8999	0.8995	4.3176	-0.1824	1.7224	1.7312
	$\hat{\beta}$	1.0129	0.0129	0.0689	0.0701	0.9956	-0.0044	0.0793	0.0794
	$\hat{\lambda}$	1.5724	0.0724	0.5706	0.5749	1.4071	-0.0929	1.0033	1.0071
	$\hat{\gamma}$	1.5777	0.0777	0.5949	0.5997	1.9066	0.4066	0.9131	0.9991

Table 2 (Continued)

Case 2: True parameters: ($\alpha = 5.5$, $\beta = 1.0$, $\lambda = 2.5$, $\gamma = 2.5$)

n		MLE				MADE			
		Estimate	Bias	SD	RMSE	Estimate	Bias	SD	RMSE
15	$\hat{\alpha}$	7.2916	1.7916	9.6804	9.8400	4.9582	-0.5418	7.4263	7.4423
	$\hat{\beta}$	1.5414	0.5414	0.7140	0.8957	1.4164	0.4164	0.6961	0.8108
	$\hat{\lambda}$	8.9950	6.495	12.7946	14.343	2.6025	0.1025	3.3924	3.3923
	$\hat{\gamma}$	3.8857	1.3857	7.4788	7.6024	5.8012	3.3012	8.5442	9.1558
30	$\hat{\alpha}$	7.0873	1.5873	7.3887	7.5536	5.8664	0.3664	7.0570	7.0630
	$\hat{\beta}$	1.2623	0.2623	0.4183	0.4936	1.1765	0.1765	0.4581	0.4907
	$\hat{\lambda}$	6.9371	4.4371	8.7655	9.8207	2.6416	0.1416	3.0915	3.0932
	$\hat{\gamma}$	4.2408	1.7408	6.4256	6.6541	5.9664	3.4664	7.8661	8.5924
50	$\hat{\alpha}$	7.0178	1.5178	6.0017	6.1877	6.5706	1.0706	6.9308	7.0095
	$\hat{\beta}$	1.1480	0.1480	0.3340	0.3652	1.0905	0.0905	0.3739	0.3845
	$\hat{\lambda}$	5.6067	3.1067	6.5691	7.2637	2.8021	0.3021	2.7958	2.8107
	$\hat{\gamma}$	4.5224	2.0224	5.8237	6.1621	5.8637	3.3637	7.4293	8.1520
100	$\hat{\alpha}$	6.2213	0.7213	3.8802	3.9448	6.2977	0.7977	5.7084	5.7611
	$\hat{\beta}$	1.0747	0.0747	0.2347	0.2462	1.0263	0.0263	0.2659	0.2670
	$\hat{\lambda}$	3.8638	1.3638	3.8040	4.0392	2.6973	0.1973	2.6605	2.6665
	$\hat{\gamma}$	3.8990	1.3990	4.0738	4.3054	5.0381	2.5381	5.8604	6.3837
300	$\hat{\alpha}$	6.2229	0.7229	2.7033	2.7970	6.1187	0.6187	4.0644	4.1092
	$\hat{\beta}$	1.0218	0.0218	0.1493	0.1508	0.9852	-0.0148	0.1721	0.1727
	$\hat{\lambda}$	3.2502	0.7502	2.0966	2.2258	2.6344	0.1344	2.1800	2.1830
	$\hat{\gamma}$	3.1250	0.6250	2.1749	2.2619	4.0783	1.5783	3.5080	3.8451
500	$\hat{\alpha}$	5.5618	0.0618	1.7673	1.7675	5.7079	0.2079	3.0642	3.0697
	$\hat{\beta}$	1.0275	0.0275	0.1078	0.1112	0.9874	-0.0126	0.1365	0.1370
	$\hat{\lambda}$	2.6777	0.1777	1.0744	1.0885	2.4458	-0.0542	1.6693	1.6693
	$\hat{\gamma}$	2.6178	0.1178	1.0782	1.0841	3.5367	1.0367	2.1785	2.4116
1000	$\hat{\alpha}$	5.5304	0.0304	1.2787	1.2784	5.2640	-0.2360	1.8118	1.8262
	$\hat{\beta}$	1.0196	0.0196	0.0801	0.0824	0.9844	-0.0156	0.1028	0.1040
	$\hat{\lambda}$	2.6520	0.1520	0.8465	0.8596	2.2350	-0.2650	1.2279	1.2555
	$\hat{\gamma}$	2.5124	0.0124	0.8508	0.8505	3.3942	0.8942	1.8499	2.0538

Table 2 (Continued)

Case 3: True parameters: ($\alpha = 1.5$, $\beta = 1.5$, $\lambda = 1.5$, $\gamma = 1.5$)

n		MLE				MADE			
		Estimate	Bias	SD	RMSE	Estimate	Bias	SD	RMSE
15	$\hat{\alpha}$	2.2996	0.7996	2.9252	3.0311	2.0899	0.5899	2.9654	3.0221
	$\hat{\beta}$	2.1176	0.6176	1.2179	1.3650	1.8937	0.3937	0.9826	1.0581
	$\hat{\lambda}$	2.7815	1.2815	3.3474	3.5828	2.2776	0.7776	2.8247	2.9284
	$\hat{\gamma}$	2.8544	1.3544	3.1850	3.4596	2.4373	0.9373	3.3655	3.4919
30	$\hat{\alpha}$	2.0326	0.5326	1.8543	1.9284	1.9557	0.4557	1.9049	1.9578
	$\hat{\beta}$	1.7862	0.2862	0.7666	0.8179	1.6659	0.1659	0.6345	0.6555
	$\hat{\lambda}$	2.6640	1.1640	2.7645	2.9983	2.0624	0.5624	2.2332	2.3019
	$\hat{\gamma}$	2.4603	0.9603	2.3859	2.5708	2.3684	0.8684	2.5291	2.6728
50	$\hat{\alpha}$	1.8921	0.3921	1.3103	1.3670	1.8612	0.3612	1.6847	1.7222
	$\hat{\beta}$	1.6356	0.1356	0.5272	0.5441	1.5936	0.0936	0.4811	0.4899
	$\hat{\lambda}$	2.4747	0.9747	2.2718	2.4710	1.9865	0.4865	2.0086	2.0657
	$\hat{\gamma}$	2.2961	0.7961	2.2269	2.3638	2.2257	0.7257	2.1296	2.2488
100	$\hat{\alpha}$	1.6463	0.1463	0.8204	0.8330	1.7097	0.2097	1.0869	1.1064
	$\hat{\beta}$	1.5737	0.0737	0.2990	0.3078	1.5329	0.0329	0.3004	0.3021
	$\hat{\lambda}$	1.9163	0.4163	1.3892	1.4495	1.9414	0.4414	1.8593	1.9101
	$\hat{\gamma}$	1.9016	0.4016	1.3257	1.3846	2.1258	0.6258	2.0421	2.1348
300	$\hat{\alpha}$	1.5657	0.0657	0.4015	0.4066	1.6093	0.1093	0.5197	0.5308
	$\hat{\beta}$	1.5209	0.0209	0.1536	0.1549	1.5052	0.0052	0.1731	0.1731
	$\hat{\lambda}$	1.8725	0.3725	1.0695	1.1320	1.8464	0.3464	1.4864	1.5255
	$\hat{\gamma}$	1.7020	0.2020	1.0635	1.0820	1.9023	0.4023	1.4949	1.5473
500	$\hat{\alpha}$	1.5454	0.0454	0.3112	0.3143	1.5581	0.0581	0.3505	0.3551
	$\hat{\beta}$	1.5080	0.0080	0.1238	0.1240	1.5035	0.0035	0.1343	0.1343
	$\hat{\lambda}$	1.7987	0.2987	1.0090	1.0518	1.7825	0.2825	1.1767	1.2096
	$\hat{\gamma}$	1.7237	0.2237	1.0177	1.0416	1.7569	0.2569	1.1594	1.1869
1000	$\hat{\alpha}$	1.5257	0.0257	0.2123	0.2137	1.5266	0.0266	0.2371	0.2385
	$\hat{\beta}$	1.5047	0.0047	0.0852	0.0853	1.5025	0.0025	0.0916	0.0915
	$\hat{\lambda}$	1.6834	0.1834	0.6602	0.6849	1.6922	0.1922	0.8577	0.8786
	$\hat{\gamma}$	1.5775	0.0775	0.6529	0.6571	1.6430	0.1430	0.8700	0.8812

Table 2 (Continued)

Case 4: True parameters: ($\alpha = 3.5$, $\beta = 1.5$, $\lambda = 2.5$, $\gamma = 1.5$)

n		MLE				MADE			
		Estimate	Bias	SD	RMSE	Estimate	Bias	SD	RMSE
15	$\hat{\alpha}$	4.0397	0.5397	5.8038	5.8259	3.1707	-0.3293	5.4185	5.4258
	$\hat{\beta}$	2.2772	0.7772	1.1371	1.3769	2.0776	0.5776	0.9631	1.1226
	$\hat{\lambda}$	5.688	3.1880	8.4165	8.9961	2.0365	-0.4635	2.1994	2.2466
	$\hat{\gamma}$	3.5916	2.0916	6.3567	6.6889	4.4852	2.9852	7.3746	7.9525
30	$\hat{\alpha}$	4.3408	0.8408	4.1230	4.2063	4.5873	1.0873	6.3846	6.4734
	$\hat{\beta}$	1.7572	0.2572	0.5900	0.6434	1.6487	0.1487	0.6284	0.6454
	$\hat{\lambda}$	5.1532	2.6532	5.9619	6.5236	2.4527	-0.0473	2.5674	2.5666
	$\hat{\gamma}$	3.5434	2.0434	5.0724	5.4667	5.2100	3.7100	7.3954	8.2706
50	$\hat{\alpha}$	3.9360	0.4360	2.8054	2.8376	4.2011	0.7011	4.4836	4.5359
	$\hat{\beta}$	1.6466	0.1466	0.4575	0.4802	1.548	0.0480	0.5087	0.5107
	$\hat{\lambda}$	4.0575	1.5575	3.9521	4.2461	2.3704	-0.1296	2.1762	2.1790
	$\hat{\gamma}$	2.9433	1.4433	3.4037	3.6955	4.6024	3.1024	6.3377	7.0535
100	$\hat{\alpha}$	3.8484	0.3484	1.9935	2.0227	4.1412	0.6412	3.7529	3.8054
	$\hat{\beta}$	1.5431	0.0431	0.2930	0.2960	1.4830	-0.0170	0.3380	0.3382
	$\hat{\lambda}$	3.4319	0.9319	2.9586	3.1005	2.5535	0.0535	2.4970	2.4963
	$\hat{\gamma}$	2.6822	1.1822	2.6190	2.8723	3.3881	1.8881	4.0302	4.4487
300	$\hat{\alpha}$	3.7484	0.2484	1.3284	1.3508	3.8532	0.3532	2.1359	2.1639
	$\hat{\beta}$	1.4954	-0.0046	0.1821	0.1821	1.4534	-0.0466	0.2083	0.2134
	$\hat{\lambda}$	2.7548	0.2548	1.5019	1.5226	2.4769	-0.0231	1.9653	1.9644
	$\hat{\gamma}$	2.0616	0.5616	1.2737	1.3914	2.5187	1.0187	1.8723	2.1307
500	$\hat{\alpha}$	3.5808	0.0808	0.9539	0.9568	3.5939	0.0939	1.3700	1.3725
	$\hat{\beta}$	1.5254	0.0254	0.1322	0.1346	1.4781	-0.0219	0.1649	0.1663
	$\hat{\lambda}$	2.7558	0.2558	1.0874	1.1166	2.4406	-0.0594	1.4444	1.4449
	$\hat{\gamma}$	1.5795	0.0795	0.6451	0.6497	2.0793	0.5793	1.2468	1.3742
1000	$\hat{\alpha}$	3.5214	0.0214	0.6247	0.6248	3.417	-0.0830	0.7067	0.7112
	$\hat{\beta}$	1.5159	0.0159	0.0981	0.0993	1.4854	-0.0146	0.1154	0.1163
	$\hat{\lambda}$	2.6958	0.1958	0.9645	0.9837	2.3354	-0.1646	1.0068	1.0196
	$\hat{\gamma}$	1.5650	0.0650	0.5888	0.5921	1.8937	0.3937	0.8637	0.9488

Table 2 (Continued)

Case 4: True parameters: ($\alpha = 3.5$, $\beta = 1.5$, $\lambda = 2.5$, $\gamma = 1.5$)

n		MLE				MADE			
		Estimate	Bias	SD	RMSE	Estimate	Bias	SD	RMSE
15	$\hat{\alpha}$	3.8433	0.3433	6.4688	6.4747	3.3691	-0.1309	5.3215	5.3205
	$\hat{\beta}$	3.5819	2.0819	4.7186	5.1553	2.5687	1.0687	2.1115	2.3656
	$\hat{\lambda}$	7.3439	3.8439	9.9849	10.6946	3.4776	-0.0224	4.1414	4.1394
	$\hat{\gamma}$	5.6286	2.1286	7.9100	8.1876	5.7790	2.2790	7.2747	7.6199
30	$\hat{\alpha}$	3.4760	-0.0240	3.4186	3.4170	3.5918	0.0918	4.4057	4.4044
	$\hat{\beta}$	2.1437	0.6437	1.2488	1.4044	1.9661	0.4661	0.9659	1.0721
	$\hat{\lambda}$	6.4061	2.9061	6.8385	7.4272	3.5120	0.0120	3.7118	3.7099
	$\hat{\gamma}$	5.1620	1.6620	6.3467	6.5577	5.4061	1.9061	5.8363	6.1369
50	$\hat{\alpha}$	3.6702	0.1702	2.8448	2.8485	4.0017	0.5017	4.2944	4.3214
	$\hat{\beta}$	1.8232	0.3232	0.6993	0.7701	1.7407	0.2407	0.5744	0.6225
	$\hat{\lambda}$	5.6645	2.1645	4.7163	5.1871	3.8991	0.3991	3.6530	3.6729
	$\hat{\gamma}$	4.4323	0.9323	4.4795	4.5734	5.1143	1.6143	5.2156	5.4572
100	$\hat{\alpha}$	3.5492	0.0492	1.9031	1.9028	4.1110	0.6110	3.1583	3.2153
	$\hat{\beta}$	1.6570	0.1570	0.3428	0.3769	1.6083	0.1083	0.3909	0.4054
	$\hat{\lambda}$	4.3993	0.8993	2.4269	2.5870	4.4074	0.9074	3.6409	3.7505
	$\hat{\gamma}$	3.6554	0.1554	2.3673	2.3712	4.5631	1.0631	4.1448	4.2770
300	$\hat{\alpha}$	3.6060	0.1060	1.1898	1.1939	3.9563	0.4563	2.1618	2.2084
	$\hat{\beta}$	1.5546	0.0546	0.1999	0.2071	1.5421	0.0421	0.2261	0.2298
	$\hat{\lambda}$	4.0568	0.5568	1.7041	1.7920	4.5201	1.0201	3.4479	3.5940
	$\hat{\gamma}$	3.6593	0.1593	1.7986	1.8047	3.9176	0.4176	2.7284	2.7588
500	$\hat{\alpha}$	3.4305	-0.0695	0.8323	0.8348	3.7246	0.2246	1.5108	1.5267
	$\hat{\beta}$	1.5533	0.0533	0.1544	0.1633	1.5300	0.0300	0.1896	0.1918
	$\hat{\lambda}$	3.7450	0.2450	1.1397	1.1651	4.1986	0.6986	2.8203	2.9041
	$\hat{\gamma}$	3.4301	-0.0699	1.2353	1.2366	3.9309	0.4309	2.5186	2.5540
1000	$\hat{\alpha}$	3.4964	-0.0036	0.6532	0.6529	3.6609	0.1609	0.9736	0.9863
	$\hat{\beta}$	1.5235	0.0235	0.1178	0.1201	1.5188	0.0188	0.1455	0.1467
	$\hat{\lambda}$	3.6809	0.1809	0.9917	1.0076	4.1661	0.6661	2.4035	2.4929
	$\hat{\gamma}$	3.5142	0.0142	1.0645	1.0641	3.8216	0.3216	2.4397	2.4597

Note: Bold values denote the smaller RMSE of the estimated parameters between MLE and MADE methods.

2. Applications

For applications, we implement the parameter estimation methods on four real data sets. The data sets are considered to fit with MOPLx distribution and their parameter estimations are carried out using MLE and MADE. Then, the fitted models are compared using goodness - of - fit tests based on Komogorov Smirnov (K-S) and Anderson-Darling (A-D), reported in Table 3. The lower values of these statistics and higher p -values of K-S and A-D indicate good fits. In addition, the histograms of all data sets and plots of the estimated pdf and cdf of the MOPLx distribution are illustrated in Figure 3.

The first data is corresponding to the tensile strength of 100 carbon fibers in GPa (Data I). The data has been obtained from Nichols & Padgett (2006). The values of mean ($\bar{x}$), SD, skewness, and kurtosis of the tensile strength of carbon fibers are 2.6014, 1.0209, 0.3590, and 3.1262, respectively. The data set is given as follows: 3.70, 3.11, 4.42, 3.28, 3.75, 2.96, 3.39, 3.31, 3.15, 2.81, 1.41, 2.76, 3.19, 1.59, 2.17, 3.51, 0.84, 1.61, 1.57, 1.89, 2.74, 3.27, 2.41, 3.09, 2.43, 2.53, 2.81, 3.31, 2.35, 2.77, 2.68, 4.91, 1.57, 2.00, 1.17, 2.17, 0.39, 2.79, 1.08, 2.88, 2.73, 2.87, 3.19, 1.87, 2.95, 2.67, 4.20, 2.85, 2.55, 2.17, 2.97, 3.68, 0.81, 1.22, 5.08, 1.69, 3.68, 4.70, 2.03, 2.82, 2.50, 1.47, 3.22, 3.15, 2.97, 2.93, 3.33, 2.56, 2.59, 2.83, 1.36, 1.84, 5.56, 1.12, 2.48, 1.25, 2.48, 2.03, 1.61, 2.05, 3.60, 3.11, 1.69, 4.90, 3.39, 3.22, 2.55, 3.56, 2.38, 1.92, 0.98, 1.59, 1.73, 1.71, 1.18, 4.38, 0.85, 1.80, 2.12, 3.65.

The second data is based on the waiting times between 65 consecutive eruptions in seconds of the Kiama Blowhole in Australia (Data II). The times occurred from 1340 hours on 12 July 1998 were observed using a digital watch (Pinho et al., 2015). The summary statistics for this data set are $\bar{x} = 39.8281$, $SD = 33.7505$, skewness = 1.5464, and kurtosis = 5.7711. The data set is reported as follows: 83, 51, 87, 60, 28, 95, 8, 27, 15, 10, 18, 16, 29, 54, 91, 8, 17, 55, 10, 35, 47, 77, 36, 17, 21, 36, 18, 40, 10, 7, 34, 27, 28, 56, 8, 25, 68, 146, 89, 18, 73, 69, 9, 37, 10, 82, 29, 8, 60, 61, 61, 18, 169, 25, 8, 26, 11, 83, 11, 42, 17, 14, 9, 12.

The third data set was considered by Bhaumik et al. (2009) for small sample size. The data set consists of 34 observations on the vinyl chloride data which is obtained from clean upgrading monitoring wells in mg/L (Data III). The data set is given as follows: 5.1, 1.2, 1.3, 0.6, 0.5, 2.4, 0.5, 1.1, 8.0, 0.8, 0.4, 0.6, 0.9, 0.4, 2.0, 0.5, 5.3, 3.2, 2.7, 2.9, 2.5, 2.3, 1.0, 0.2, 0.1, 0.1, 1.8, 0.9, 2.0, 4.0, 6.8, 1.2, 0.4, 0.2. The values of $\bar{x}$, SD, skewness, and kurtosis of the the vinyl chloride data are 1.8794, 1.9526, 1.6037, and 5.0054, respectively.

The fourth data set is obtained from Jamal et al. (2018) and it represents 30 successive values of March precipitation (inches) in Minneapolis/St Paul (Data IV). The data set is reported as follows: 0.77, 1.74, 0.81, 1.20, 1.95, 1.20, 0.47, 1.43, 3.37, 2.20, 3.00, 3.09, 1.51, 2.10, 0.52, 1.62, 1.31, 0.32, 0.59, 0.81, 2.81, 1.87, 1.18, 1.35, 4.75, 2.48, 0.96, 1.89, 0.90, 2.05. The summary statistics for the last data set are $\bar{x} = 1.6750$, $SD = 1.0006$, skewness = 1.0867, and kurtosis = 4.2069.

Table 3 shows the estimated values of parameters in the MOPLx distribution with K-S and A-D test statistic along with p -values on four real data sets. Based on the results in Table 3, the efficiency of MLE and MADE methods and fitting performance of the MOPLx distribution can be evaluate. First, the results show that the MOPLx distribution is appropriate in describing four real data sets in terms of both K-S test and A-D test. Second, the MLE method is likely to present greater p -values in the K-S test and A-D test for both Data I and Data II. The first and second data sets represent large and moderate sample size with $n = 100$ and $n = 65$, respectively.

Table 3 The parameter estimated values and goodness-of-fit statistics for four data sets via the MLE and MADE methods

Data	Method	Estimates				K-S (<i>p</i> -value)	A-D (<i>p</i> -value)
		$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}$	$\hat{\lambda}$	$\hat{\gamma}$		
I	MLE	5.3856	1.7254	5.9759	26.4715	0.0603 (0.8609)	0.4708 (0.7763)
	MADE	3.4227	2.0359	4.9574	17.9661	0.0611 (0.8499)	0.5124 (0.7338)
II	MLE	0.8057	2.3020	45.7421	21.8750	0.09355 (0.6297)	0.1372 (0.1795)
	MADE	0.8078	1.5281	41.1176	2.4918	0.8099 (0.4734)	1.8146 (0.1166)
III	MLE	5.6308	1.2140	15.4653	0.5578	0.0773 (0.9872)	0.2063 (0.9886)
	MADE	2.9301	1.2083	6.8841	0.6234	0.0735 (0.9930)	0.1849 (0.9941)
IV	MLE	2.5404	2.2670	7.7842	0.9921	0.0628 (9.9978×10^{-1})	0.1171 (9.9987×10^{-1})
	MADE	2.8032	2.1460	8.6366	0.9552	0.0590 (9.9994×10^{-1})	1.8146 (9.9998×10^{-1})

Furthermore, Figure 3 shows the appropriateness of the fitted model for these data sets on the basis of histogram and density plots. The plots also confirm that MLE provides better fit because its curve is relatively close to the empirical density curve. Third, the *p*-values based on goodness - of - fit tests support that MADE method is slightly better than MLE in Data III and Data IV that represents small sample sizes. The third and fourth data sets consist of 34 and 30 observations, respectively. Additionally, Figure 4 illustrates that the MOPLx under the MADE method is closely fitted to these data sets.

Conclusion

In this paper, two estimation techniques, including maximum likelihood estimator (MLE) and minimum Anderson-Darling estimator (MADE) for estimating the unknown parameters of the Marshall-Olkin Power Lomax (MOPLx) distribution are studied. The MADE method can be implemented based on approximated cumulative distribution function and the MLE method can be applied based on approximated probability density function, as discussed in Raschke (2017). We also compare the performance of these methods for MOPLx distribution through a simulation study and real data sets. In simulation study, the MADE method is derived and compared its performance to the MLE via bias, SD and RMSE. The simulated study indicates that MLE performs better than MADE as sample sizes are large. However, the MADE method performs slightly better for smaller sample sizes than MLE. In some cases of MADE method, the bias, SD, and RMSE values are not much larger than that of the MLE method but the RMSE can be even smaller in most cases of small sample size. Then, the applications for the MOPLx distribution with four real data sets are demonstrated, which parameters are estimated using MLE and MADE. In this work, the measurements, K-S test and A-D test, are considered for assessment and comparison of parameter estimation methods. The results show that MLE

method outperforms its competitor for estimating the parameter of the MOPLx in the first and second data sets, and MADE method seems to fit the third and fourth data sets slightly better than MLE method. Therefore, it is concluded from both simulated and real data sets that the two methods show identical performance for estimating the parameters of MOPLx distribution unless the sample size is small. However, the MADE performs slightly better for smaller sample sizes.

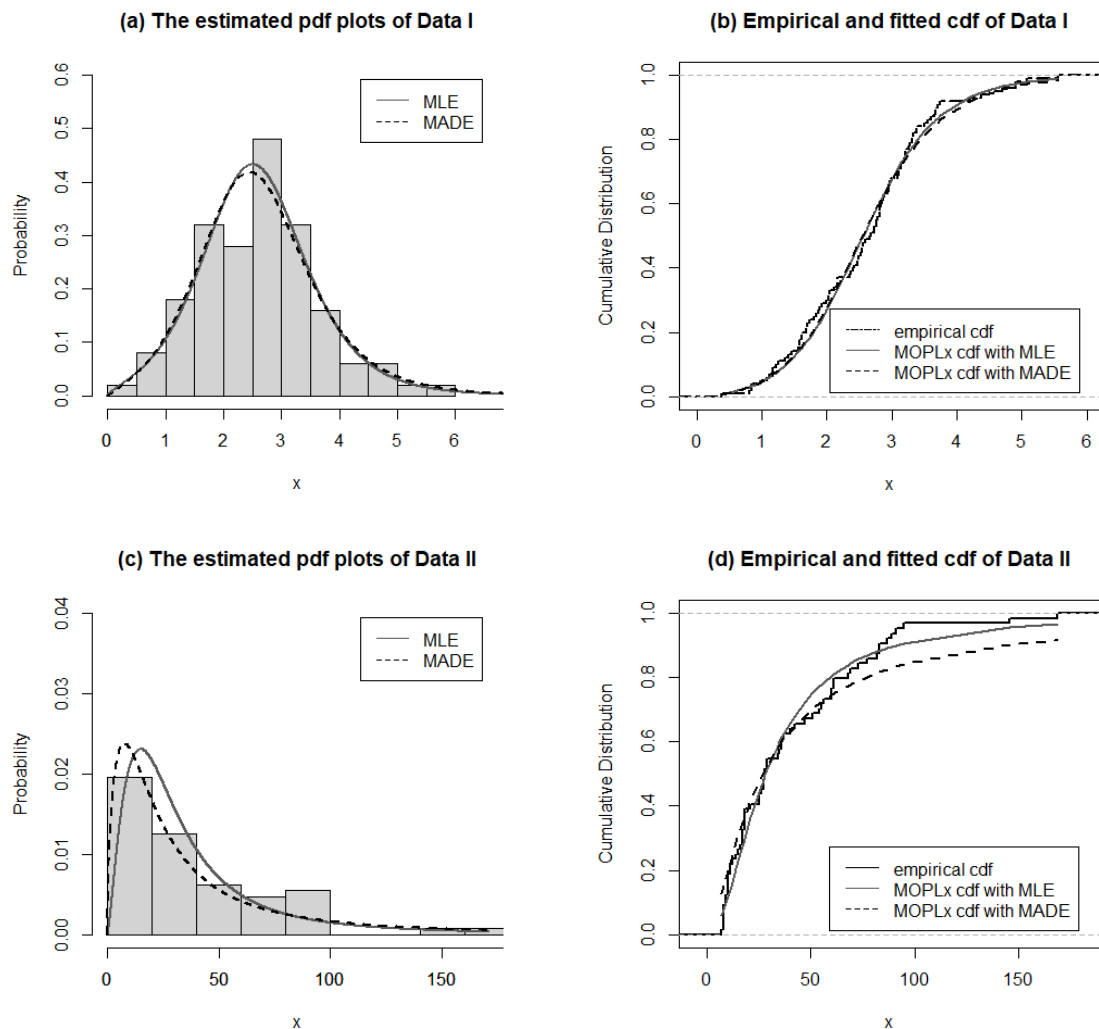


Figure 3 The histogram of data and estimated pdf, and the empirical and theoretical cdf plot of MOPLx distribution using MLE and MADE for Data I and Data II

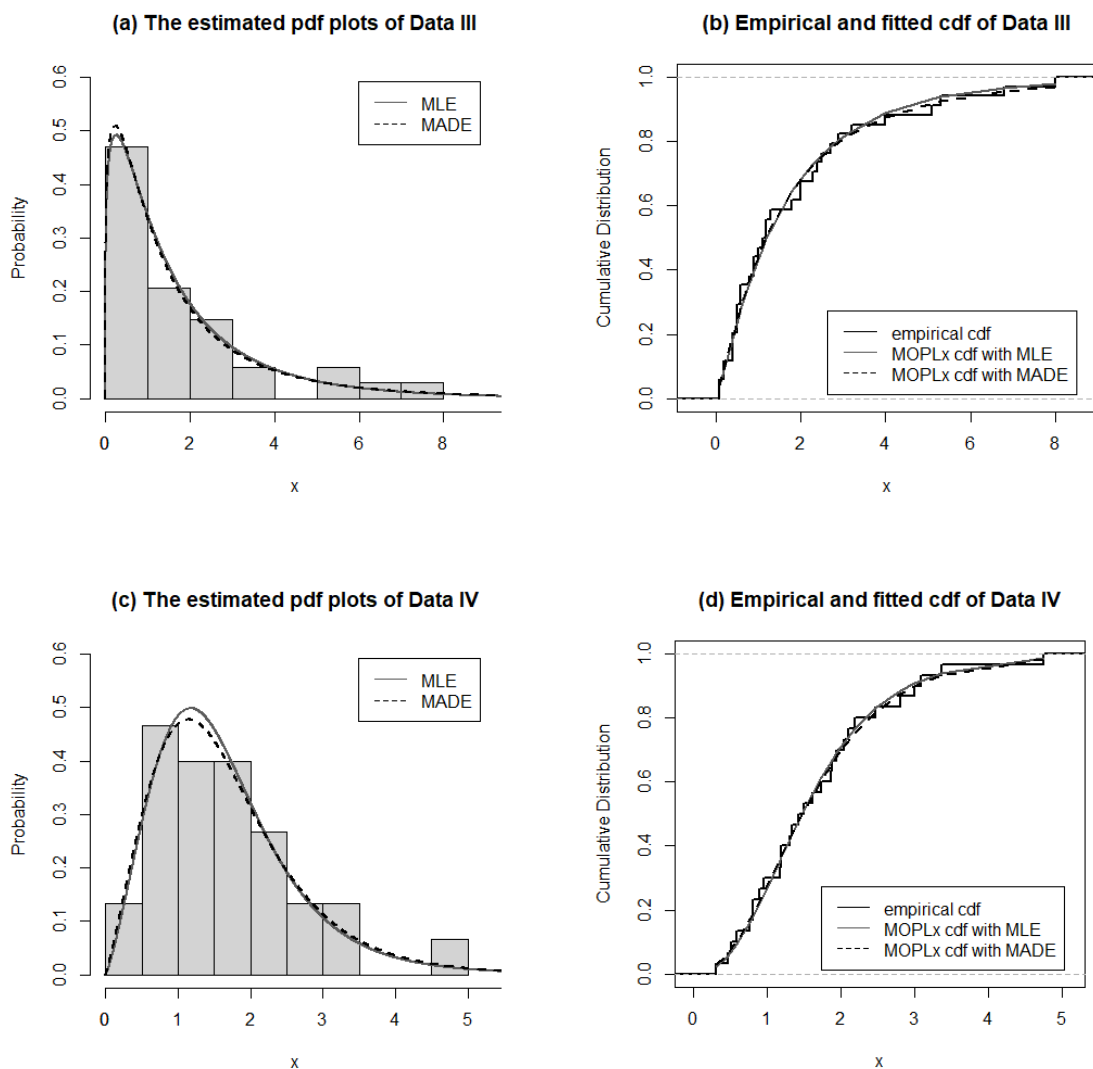


Figure 4 The histogram of data and estimated pdf, and the empirical and theoretical cdf plot of MOPLx distribution using MLE and MADE for Data III and Data IV

References

- Akhter, Z., Saran, J., Verma, K., & Pushkarna, N. (2020). Moments of order statistics from length-biased exponential distribution and associated inference. *Annals of Data Science*, <https://doi.org/10.1007/s40745-020-00245-5>
- Aryuyuen, S., & Bodhisuwan, W. (2020). The Type II Topp Leone-Power Lomax distribution with analysis in lifetime data. *Journal of Statistical Theory and Practice*, 14(2). <https://doi.org/10.1007/s42519-020-00091-x>

- Cordeiro, G. M., Lemonte, A. J., & Ortega, E. M. (2014). The Marshall-olkin family of distributions: Mathematical properties and new models. *Journal of Statistical Theory and Practice*, 8(2), 343-366. <https://doi.org/10.1080/15598608.2013.802659>
- Dey, S., Mazucheli, J., & Nadarajah, S. (2017). Kumaraswamy distribution: Different methods of estimation. *Computational and Applied Mathematics*, 37(2), 2094-2111. <https://doi.org/10.1007/s40314-017-0441-1>
- Dey, S., Alzaatreh, A., & Ghosh, I. (2019). Parameter estimation methods for the Weibull-Pareto distribution. *Computational and Mathematical Methods*. <https://doi.org/10.1002/cmm4.1053>
- Khaleel, M. A., Al-Noor, N. H., & Abdal-Hameed, M. K. (2020). Marshall Olkin exponential Gompertz distribution: properties and applications. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 8(1), 298-312. <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v8i1.1152>
- Haq, M. A., Hamedani, G. G., Elgarhy, M., & Ramos, P. L. (2020a). Marshall-Olkin Power Lomax distribution: properties and estimation based on complete and censored Samples. *International Journal of Statistics and Probability*, 9(1), 48-62. <https://doi.org/10.5539/ijsp.v9n1p48>
- Haq, M. A., Rao, G. S., Albassam, M., & Aslam, M. (2020). Marshall-Olkin Power Lomax distribution for modeling of wind speed data. *Energy Reports*, 6, 1118-1123.
- Jamal, F., Arslan Nasir, M., Ozel, G., Elgarhy, M., & Mamode Khan, N. (2019). Generalized inverted Kumaraswamy generated family of distributions: theory and applications. *Journal of Applied Statistics*, 46(16), 2927-2944.
- Nash, J. C. (2014). On best practice optimization methods in R. *Journal of Statistical Software*, 60(2), 1-14.
- Nichols, M. D., & Padgett, W. J. (2006). A bootstrap control chart for Weibull percentiles. *Quality and Reliability Engineering International*, 22(2), 141-151.
- Nwezza, E. E., & Ugwuowo, F. I. (2020). The Marshall-olkin Gumbel-Lomax distribution: Properties and applications. *Heliyon*, 6(3), e03569. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03569>
- Pinho, L. G. B., Cordeiro, G. M., & Nobre, J. S. (2015). The Harris extended exponential distribution. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 44(16), 3486-3502.
- Raschke, M. (2017). Opportunities of the minimum Anderson–Darling estimator as a variant of the maximum likelihood method. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 46(9), 6879-6888.
- R Core Team, R. (2020). R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rodrigues, G. C., Louzada, F., & Ramos, P. L. (2016). Poisson-exponential distribution: Different methods of estimation. *Journal of Applied Statistics*, 45(1), 128-144. <https://doi.org/10.1080/02664763.2016.1268571>
- ZeinEldin, R. A., Chesneau, C., Jamal, F., & Elgarhy, M. (2019). Different Estimation Methods for Type I Half-Logistic Topp-Leone Distribution. *Mathematics*, 7(10), 985. <https://doi.org/10.3390/math7100985>
- ZeinEldin, R. A., Chesneau, C., Jamal, F., & Elgarhy, M. (2019). Statistical properties and different methods of estimation for type I half logistic inverted Kumaraswamy distribution. *Mathematics*, 7(10), 1002. <https://doi.org/10.3390/math7101002>

Research Article

Extreme Value Modeling of Daily Maximum Temperature with the r -Largest Order Statistics

Piyapatr Busababodhin¹, Monchaya Chiangpradit¹, Nipada Papukdee¹,
Jiraphon Ruechairam¹, Kettida Ruanthaisong¹ and Pannarat Guayjarernpanishk^{2*}

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

²Faculty of Interdisciplinary Studies, Nong Khai Campus, Khon Kaen University, Nong Khai, 43000, Thailand

*E-mail: Panngu@kku.ac.th

Received: 03/08/2020; Revised: 27/11/2020; Accepted: 07/12/2020

Abstract

This study aimed to model the daily maximum temperature in Mae Hong Son, Nan, and Uttaradit which are the first-three highest temperature provinces in the north of Thailand. These data sets were collected during 1984–2018 by the Thai Meteorological Department. Many researchers usually analyzed extreme value data by using the generalized extreme value distribution and focused on the first order of maximum value. These interested the researcher to create a model with the generalized extreme value distribution for the r -largest order statistics with different orders such as $r = 2, 3, 4, \dots, n$ where n is the number of data and compare the model of the maximum value of any sequence with the deviance statistics. The researcher analyzed the data with the "EVA" package in R program. The results showed that Weibull distribution is the best model for the daily temperature data of Nan Meteorological and Nan Sorkorsor Meteorological station when $r = 4$, Mae Hong Son Meteorological and Uttaradit Meteorological station when $r = 3$, and Mae Sariang Meteorological when $r = 2$. Besides, Gumbel distribution is the best model for the daily maximum temperature data of Tha Wang Pha Meteorological station when $r = 4$, and Thung Chang Meteorological station when $r = 2$. Furthermore, based on the return levels of various return periods, the Mae Hong Son Meteorological station had the highest return level of maximum temperature for each return period. Therefore, to solve and prevent temperature problems, the Mae Hong Son Meteorological station should be the first considered

Keywords: generalized extreme value distribution, the r -largest order statistics, return level, deviance statistics

Introduction

Thailand is in a tropical zone with a general climate of torridity all year long. The average temperature throughout the year of Thailand is approximately 27-celsius degree. However, the temperature is different in each area and season. Areas in the mainland from the central region and upper eastern region up to the northern region have extremely different temperatures between in summer and in winter and between at day and at night. In summer, the highest temperature during the afternoon may reach 40-celsius degree or higher from March to May, especially April which is the month with the hottest weather in each year.

The climate of the northern region is tropical with seasonal rain which is influenced by monsoons from two directions including northeast monsoon during the middle of October to Mid-February or March in some years which brings coldness from China to Thailand to be winter with dry weather and southwest monsoon during Mid-May to the end of September which blows moisture from the equator in the rainy season. The average temperature in the northern region is 25-celsius degree, the highest temperature in April with approximately 42-celsius degree, and the lowest temperature in January with approximately 15-celsius degree. Chiang Rai has the lowest temperature. Uttaradit has the highest temperature. Meanwhile, the province with has the heaviest rain is Chiang Rai and Lampang has the lightest rain. Furthermore, Nan, Mae Hong Son, and Uttaradit were found to be the top three provinces with the highest temperature in Thailand (The Thai Meteorological Department, 2016)

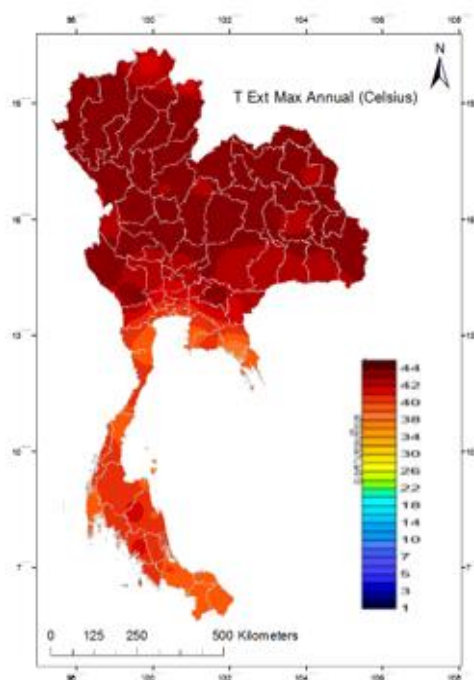


Figure 1 Areas with the highest temperature in Thailand

Source: Division of Meteorological Development (Hydrological Meteorological Division)

There were several research studies related to the application of extreme value theory with meteorological and hydrological data. Ying An, and M.D. Pandey (2007) studied the statistical estimation of the extreme wind speed using annually r-largest order statistics (r-LOS) extracted from the time series of wind data. The hourly wind speed data collected at 30 stations in Ontario, Canada, are analyzed in the paper. The result shows that the wind pressure data can be suitably model by the Gumbel distribution. Benjawan Charin (2014) studied a suitable model of the highest and the lowest temperature data of the middle northeastern region in Thailand by generalized extreme value distribution and generalized Pareto

distribution. Additionally, she investigated the return level of the highest and the lowest temperature in 2, 5, 10, 25, and 50 years. Data of the highest and the lowest temperature during 1977-2013 from the Thai Meteorological Department in 6 stations including Khon Kaen Meteorological station, Tha Phra Agrometeorological station, Kosum Phisai Hydrological station, Kamalasai Hydrological station, Roi-Et Meteorological station, and Roi-Et Agrometeorological station were analyzed by R program. The results revealed that the models of the highest and the lowest temperature in every station were Gamma distribution. The return level of the highest temperature, Khon Kaen Meteorological station was the highest rate of return, and the return level of the lowest temperature, Roi-Et Agrometeorological station was the highest rate of return. Prapawan Senapeng and Piyapatr Busababodhin (2017) created appropriate models of the highest temperature data in the northeastern region of Thailand with generalized extreme value distribution (GEV) and generalized Pareto distribution (GPD) and investigated the return level of the highest temperature. They employed the data from 1985-2015 in 25 stations from the Thai Meteorological Department. For GEV, the findings demonstrated that Weibull distribution and Gumbel distribution were suitable distribution for the highest temperature in 15 stations and 10 stations, respectively. For GPD, the appropriate distributions were Gamma distribution in 24 stations and exponential distribution in 1 station. When considering the return level in 5, 10, 25, 50, and 100 years of temperature in the northeastern region of Thailand, the researchers found that the return rate of every station rose when years of return increased. Also, Nong Khai Weather station was the highest return rate. Thus, relevant organizations should prevent or solve the temperature problems at Nong Khai Weather station more than others.

According to the research study, there is no literature that examines extreme value modeling for daily maximum temperature by the r-largest order statistics. Therefore, we are interested to study extreme value modeling with the r-largest order statistics (GEV-r) applying with of daily maximum temperature of northeast Thailand. We apply data of Mae Hong Son, Nan, and Uttaradit which were the top three provinces with the highest temperature in the north of Thailand. We investigate the most suitable model with the deviance statistics. Moreover, the return levels of the highest temperature in the return period of 2, 5, 10, 20, and 50 years were demonstrated. These would be the highest benefit for dealing with temperature problems in advance.

Preliminaries

Generalized extreme value distribution (GEV)

Let $X_1, X_2, \dots, X_n$ be a sequence of independent random variables having a common distribution function F and let $M_n = \max(X_1, X_2, \dots, X_n)$. The theory of extreme type identifies for sequences of constant $a_n > 0$ and b_n as follow)Coles, 2001(

$$\Pr \left\{ \left(\frac{M_n - b_n}{a_n} \right) \leq x \right\} = F^n(a_n x + b_n) \rightarrow G(x); n \rightarrow \infty, \quad (1)$$

for a non-degenerate distribution function G , the G is a member of the GEV family

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

defined on $\left\{x : 1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) > 0\right\}$, where $-\infty < \mu < \infty$ is location parameter, $\sigma > 0$ is scale parameter and $-\infty < \xi < \infty$ is shape parameter.

If $\xi \rightarrow 0$ then GEV is called the Gumbel distribution.

If $\xi > 0$ then GEV is called the Fréchet distribution.

If $\xi < 0$ then GEV is called the Weibull distribution.

The probability density function of GEV as shown in Figure 2.

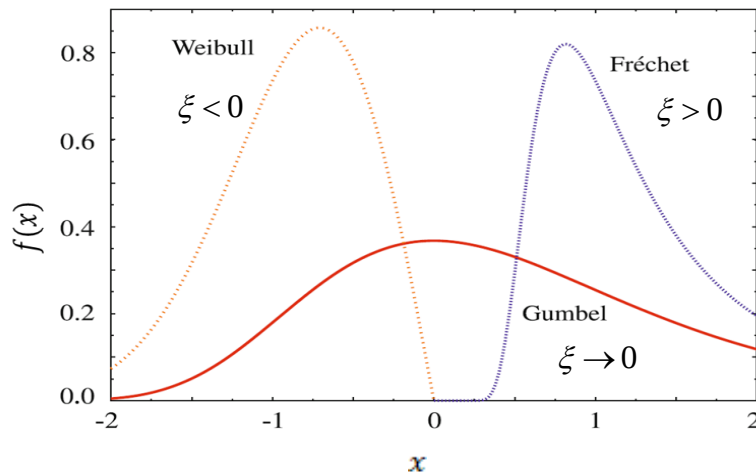


Figure 2 Probability density function of generalized extreme value distribution categorized by shape parameter

Return Level

We estimated situation rainfall from GEV with return level. The return level shows that event will appear at least one time in the next t years. Estimates of extreme quantiles of the GEV are then obtained by inverting (2):

$$x_p(G) = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left\{ 1 - [-\log(1-p)]^{-\xi} \right\}, & \xi \neq 0 \\ \mu - \sigma \log[-\log(1-p)], & \xi = 0 \end{cases} \quad (3)$$

where $G(x_p) = 1 - p$, $0 < p < 1$. In common terminology, $x_p(G)$ is the return level associated with the return period $t = \frac{1}{p}$ (Gumbel, 1958; Coles, 2001).

Generalized extreme value distribution for r-largest order statistics (GEV-r)

Let $X_1, X_2, \dots, X_n$ be a sequence of independent and identically distribution random variables, and $M_n^{(r)}$ = rth largest of $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ is extreme order statistics when fixed r , as $n \rightarrow \infty$.

From (1) (Coles, 2001) the limiting distribution as $n \rightarrow \infty$ for fixed r of

$$\tilde{M}_n^{(r)} = \left(\frac{M_n^{(1)} - b_n}{a_n}, \frac{M_n^{(2)} - b_n}{a_n}, \dots, \frac{M_n^{(r)} - b_n}{a_n} \right).$$

Falls within the family having joint probability density function

$$f(x^{(1)}, \dots, x^{(r)}) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x^{(r)} - \mu}{\sigma} \right) \right]^{\frac{1}{\xi}} \right\} \times \prod_{k=1}^r \frac{1}{\sigma} \left[1 + \xi \left(\frac{x^{(k)} - \mu}{\sigma} \right) \right]^{\frac{1}{\xi} - 1} \quad (4)$$

where $-\infty < \mu < \infty, \sigma > 0, -\infty < \xi < \infty, x^{(r)} \leq x^{(r-1)} \leq \dots \leq x^{(1)}$ and $x^{(k)} : 1 + \xi \left(\frac{x^{(k)} - \mu}{\sigma} \right) > 0$, for $k = 1, 2, \dots, r$.

Maximum Likelihood Estimation (MLE)

Under the assumption that $X_1, X_2, \dots, X_n$ are independent random having the GEV distribution, the log-likelihood for the GEV parameters (μ, σ, ξ) are follows:

In case of $\xi \neq 0$

$$l(\mu, \sigma, \xi) = -m \log \sigma - \left(1 + \frac{1}{\xi} \right) \sum_{i=1}^m \log \left[1 + \xi \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right] - \sum_{i=1}^m \log \left[1 + \xi \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right]^{\frac{1}{\xi}}, \quad (5)$$

provided that $1 + \xi \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) > 0$, for $i = 1, 2, \dots, m$.

In case of $\xi = 0$

$$l(\mu, \sigma) = -m \log \sigma - \sum_{i=1}^m \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) - \sum_{i=1}^m \exp \left[- \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right]. \quad (6)$$

Maximization of the pair of (5) and (6) with respect to the parameters (μ, σ, ξ) leads to the maximum likelihood estimate with respect to the entire GEV family $(\hat{\mu}, \hat{\sigma}, \hat{\xi})$.

The MLE of μ, σ, ξ $(\hat{\mu}, \hat{\sigma}, \hat{\xi})$ giving by $\frac{\partial l(\mu, \sigma, \xi)}{\partial \mu} = 0, \frac{\partial l(\mu, \sigma, \xi)}{\partial \sigma} = 0$ and $\frac{\partial l(\mu, \sigma, \xi)}{\partial \xi} = 0$, respectively (Coles, 2001).

Model Suitability Validation

We analyzed the suitable model with minimum deviance statistics and the deviance statistics ($\mathcal{D}$) is the goodness-of-fit test of the model by determining that r_j is improved model and r_i is the basic model (Murendeni M. Nemukula & Caston Sigauke, 2018), the hypothesis testing and test statistics are set as follows

H_0 : improved model is suitable

H_1 : improved model is not suitable

$$D(i, j) = 2 \ln \left(\frac{\lambda(r_i)}{\lambda(r_j)} \right)$$

$$= 2 \{ \ln \lambda(r_i) - \ln \lambda(r_j) \} \approx \chi_k^2 \quad (7)$$

where $i, j = 1, 2, \dots, 6$, $i \neq j$ and k is the difference of the number of parameters of both models. $\lambda(r_i)$ and $\lambda(r_j)$ are the highest probability function of r_i and r_j respectively. H_0 is rejected if $D(i, j) > C_\alpha$ (critical value) provided that C_α is critical value at position $(1 - \alpha)$ of distribution of χ_k^2 (Coles, 2001; Smith, 1989; Soares & Scotto, 2004).

Analysis result

We analyzed data with R program by using the package "Extreme Value Analysis (EVA)" of Bader and Yan in 2015. The model analysis could be summarized as follows.

Initial maximum temperature analysis

We clean daily data temperature in 7 stations of Mae Hong Son, Nan, and Uttaradit. There is Mae Hong Son Meteorological station (300201), Mae Sariang Meteorological station (300202), Nan Meteorological station (331201), Nan Agrometeorological station (331301), Tha Wang Pha Army Headquarter Meteorological station (331401), Thung Chang Army Headquarter Meteorological station (331402) and Uttaradit Meteorological station (351201). Data were analyzed by generalized extreme value distribution for the r -largest order statistics.

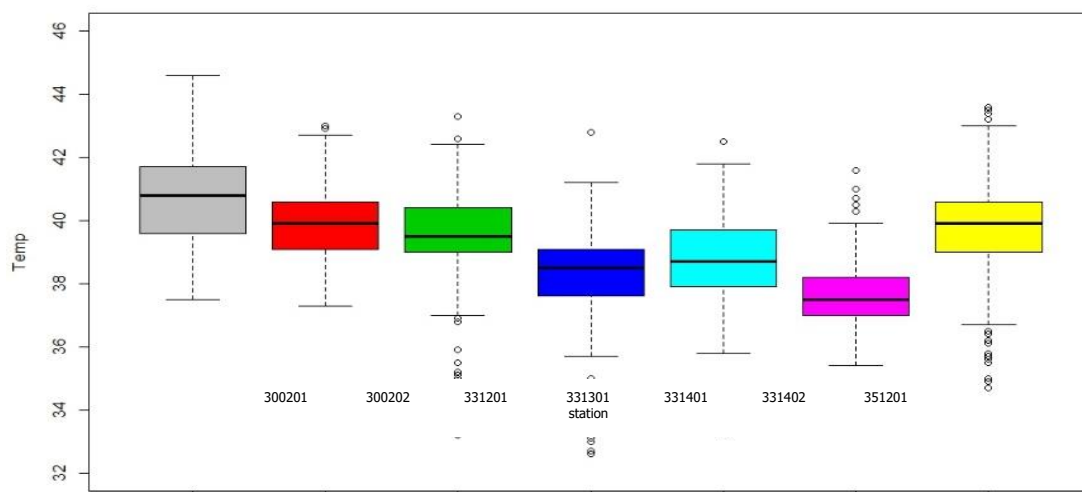


Figure 3 Boxplots of dialy maximum temperature

According to Figure 3, the daily maximum temperature of Mae Hong Son Meteorological station (300201) was the highest at 44.60-celsius degree, and Nan Agrometeorological station (331301) had the highest value at 37.50-celsius degree. We tested the appropriate model with deviance statistics, as shown in Table 1

Table 1 Deviance statistics test's results

Station	Deviance statistics test					Suitable r- largest order statistics
Mae Hong Son Meteorological (300201)	$D(1,2)$ -33.65	$D(2,3)$ -13.73	$D(3,4)$ 23.31	$D(3,5)$ 67.07	$D(3,6)$ -7.03	3
Mae Sariang Meteorological (300202)	$D(1,2)$ -30.42	$D(2,3)$ 12.60	$D(2,4)$ 21.74	$D(2,5)$ 54.65	$D(2,6)$ 110.39	2
Nan Meteorological (331201)	$D(1,2)$ -41.49	$D(2,3)$ -12.09	$D(3,4)$ 6.50	$D(4,5)$ 20.73	$D(4,6)$ 55.29	4
Nan Agrometeorological (331301)	$D(1,2)$ -45.52	$D(2,3)$ -23.75	$D(3,4)$ -0.16	$D(4,5)$ 24.56	$D(4,6)$ 60.87	4
Tha Wang Pha Army Headquarter Meteorological (331401)	$D(1,2)$ -53.45	$D(2,3)$ -11.74	$D(3,4)$ -11.31	$D(4,5)$ 28.75	$D(4,6)$ 57.74	4
Thung Chang Army Headquarter Meteorological (331402)	$D(1,2)$ -25.99	$D(2,3)$ 3.45	$D(3,4)$ 21.32	$D(3,5)$ 59.40	$D(3,6)$ 78.65	2
Uttaradit Meteorological (351201)	$D(1,2)$ -33.65	$D(2,3)$ 5.96	$D(3,4)$ -0.31	$D(3,5)$ 28.62	$D(3,6)$ 71.88	3

According to Table 1, for Mae Hong Son Meteorological station (300201), the deviance statistics test was performed to compare r_2 and r_1 e.g. $D(1, 2) = 2(-74.6214 - (-57.7967)) = -33.6494$. Since $D(1, 2)$, $D(2, 3)$, and $D(3, 6)$ had negative values, therefore they were not be considered because χ^2_1 can not be negative. Finally, considered $D(3, 4)$ and $D(3, 5)$ to select the best model with a significance level of 0.01 ($\chi^2_1 = 6.64$). In order to compare between r_4 and r_3 , $D(3, 4) > 6.64$ implied that r_3 is a suitable model. The model of r_5 was compared with r_3 , it was found that $D(3, 5) > 6.64$. Therefore, it reject the null hypothesis, so that r_3 was the suitable model. Thus, it could be concluded that $r = 3$ was the most suitable. Every station would consider the same way, and according to the deviance statistics test, the most suitable model for each station is shown in Table 2.

Best model of average daily temperature by using r-largest order statistic

The analysis could be used to summarize suitable model and distribution for annual maximum temperature categorized by stations as shown in Table 2

Table 2 Best model and suitable distribution of annual maximum temperature under GEV-r

Station	Best model	Parameter estimation			Suitable distribution	AIC
		$\hat{\mu}$ (se) (CI 95%)	$\hat{\sigma}$ (se) (CI 95%)	$\hat{\xi}$ (se) (CI 95%)		
Mae Hong Son Meteorological (300201)	r = 3	42.02 (0.16) (41.72, 42.33)	1.05 (0.07) (0.92, 1.18)	-0.35 (0.05) (-0.45, -0.24)	Weibull distribution	-156.9698
Mae Sariang Meteorological (300202)	r = 2	40.89 (0.151) (40.59, 41.18)	0.954 (0.08) (0.80, 1.10)	-0.34 (0.06) (-0.47, -0.22)	Weibull distribution	-125.8093
Nan Meteorological (331201)	r = 4	41.35 (0.11) (41.06, 41.63)	1.01 (0.05) (0.92, 1.10)	-0.50 (0.04) (-0.57, -0.42)	Weibull distribution	-169.5409
Nan Agrometeorological (331301)	r = 4	40.12 (0.16) (39.80, 40.45)	1.12 (0.06) (1.01, 1.23)	-0.39 (0.05) (-0.48, -0.30)	Weibull distribution	-173.5027
Tha Wang Pha Army Headquarter Meteorological (331401)	r = 4	40.50 (0.15) (40.20, 40.79)	1.06 (0.05) (0.96, 1.16)	-0.48 (0.04) (-0.56, 1.16)	Gumbel distribution	-189.0952
Thung Chang Army Headquarter Meteorological (331402)	r = 2	38.56 (0.20) (38.17, 38.94)	0.97 (0.11) (0.76, 1.19)	-0.18 (0.10) (-0.38, 0.01)	Gumbel distribution	-74.5829
Uttaradit Meteorological (351201)	r = 3	41.38 (0.15) (41.09, 41.67)	1.02 (0.05) (0.92, 1.12)	-0.39 (0.05) (-0.48, -0.30)	Weibull distribution	-157.7609

According to Table 2, we considered 95% confidence interval for ξ of Mae Sariang Meteorological station (300202) with order statistic $r = 2$, Mae Hong Son Meteorological station (300201) and Uttaradit Meteorological station (351201) with order statistic $r = 3$, Nan Meteorological station (331201) and Nan Agrometeorological station (331301) with order statistic $r = 4$. We found that Weibull distribution is a suitable model. Meanwhile, Tha Wang Pha Army Headquarter Meteorological station (331401) has order statistic $r = 4$, and Thung Chang Army Headquarter Meteorological station (331402) has order statistic $r = 2$ with Gumbel distribution.

Return level

Analysis of return level and effective return level in each return period was discovered. Annual maximum temperature data in 7 stations were suitable with parameters under a stable process. Therefore, the return level in each return period is shown in Figure 4

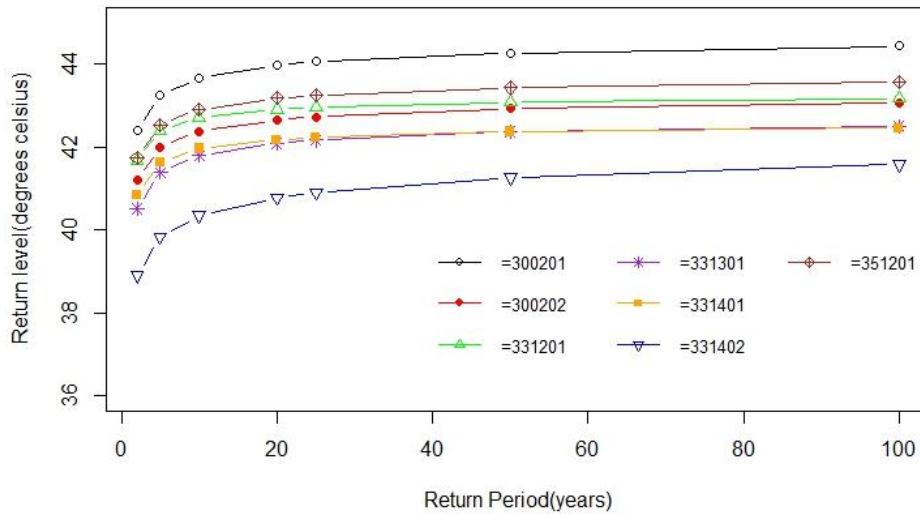


Figure 4 Return level in each return period by stations

According to Figure 4, the return level of annual maximum temperature at every station would increase when the return period rose. That is, the temperature in every area would be higher, especially Mae Hong Son Meteorological station (300201) followed by Uttaradit Meteorological station (351201), Nan Meteorological station (331201), Mae Sariang Meteorological station (300202), Nan Agrometeorological station (331301), Tha Wang Pha Army Headquarter Meteorological station (331401) and Thung Chang Army Headquarter Meteorological station (331402), respectively.

We applied the analysis result of the return period for 2, 10, 20, and 50 years in the geographic information system (GIS) program as shown in Figure 5 and Figure 6

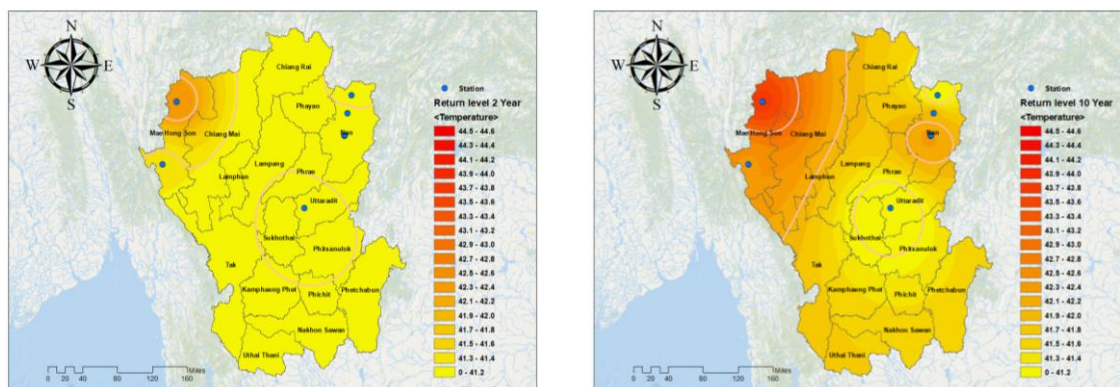


Figure 5 Return level of annual maximum temperature for return period at 2 and 10 years, respectively.

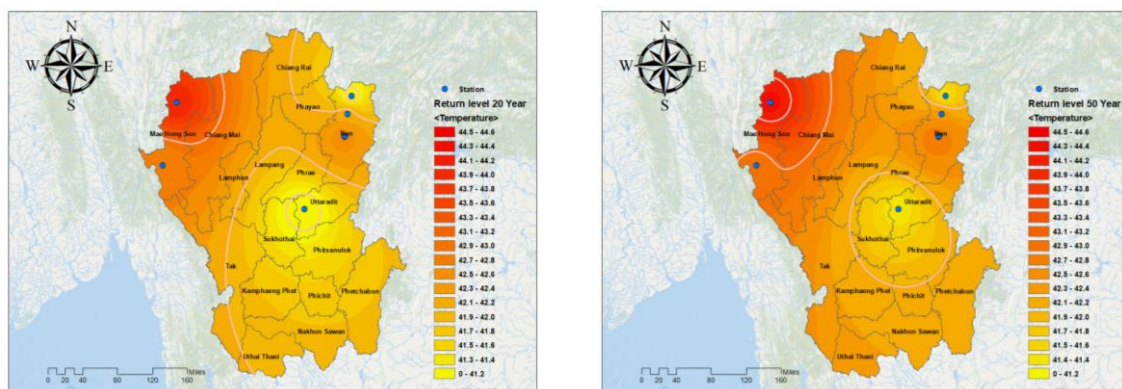


Figure 6 Return level of annual maximum temperature for return period at 20 and 50 years, respectively.

According to Figure 5 and Figure 6, return levels of 2, 10, 20, and 50 years of Mae Hong Son Thung Chang Army Headquarter Meteorological Station (300201) showed the highest temperature.

Conclusion and Discussion

The suitable model of daily maximum temperature by using r-largest order statistic with the theory of extreme value and finding return level of daily maximum temperature in annual with r-largest order statistic could be summarized and discussed as follows.

To consider the r-largest order statistic with extreme value theory, we found that $r = 2$ in Mae Sariang Meteorological station (300202) and Thung Chang Army Headquarter Meteorological station (331402), $r = 3$ in Mae Hong Son Thung Meteorological station (300201) and Uttaradit Meteorological station (351201) and $r = 4$ in Nan Meteorological station (331201), Nan Agrometeorological station (331301) and Tha Wang Pha Army Headquarter Meteorological station (331401). From the shape parameter of the suitable models, we could summarize that the distribution for daily maximum temperature in almost every station was Weibull distribution except Tung Chang Army Headquarter Meteorological station (331402) and Tha Wang Pha Army Headquarter Meteorological station (331401) that Gumbel distribution. It is corresponding with the study of Nemukula, M. M. and Sigauke, C. (2018) that the modeling of the highest average daily temperature with r-largest order statistics, based on data in South Africa, from 10 orders, was suitable when $r \leq 6$.

Considering the return level in different return periods, we found that the return level increased when the return period rose in every station especially Mae Hong Son Meteorological Station (300201), which has the highest return level. Therefore, if relevant sectors desire to prevent or solve temperature problems, they should emphasize Mae Hong Son Meteorological station rather than others. Additionally, according to the report of the Thai Meteorological Department in February 2019, a number of provinces had increasing temperatures such as Lampang, Tak, Sukhothai, Nakhonsawan and Kanchanaburi. Hence, further study should include these areas.

Acknowledgement

The authors would like to express sincere gratitude to the Thai Meteorological Department for the kind support of daily maximum temperature data and the Faculty of Science, Mahasarakham University, for providing a venue and financial support in this research.

References

- Bader, B., & Yan, J. (2016). eva: Extreme value analysis with goodness-of-fit testing. *R package version 0.2, 4*.
- Benjawan, C. (2014). *Extreme Value Model of Temperature in Mid-Northeastern Region of Thailand* [Unpublished master's thesis]. Khon Kaen University. (in Thai)
- Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., & Dorazio, P. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. London: Springer.
- Enrique, C., Ali, S. Hadi, N., Balakrishnan, J., & Sarabia, M. (2004). *Extreme Value and Related Models with Applications in Engineering and Science*. The United States of America: Wiley.
- Gumbel, E. J. (1958). *Statistics of extremes*. New York: Columbia University Press.
- Nemukula, M. M., & Sigauke, C. (2018). Modeling average maximum daily temperature using r largest order statistics: An application to South African data. *Jàmbá: Journal of Disaster Risk Studies*, 10(1), 1-11.
- Senapeng, P., & Busababodhin, P. (2017). Modeling of maximum temperature in Northeast Thailand. *Burapha Science Journal*, 92-107. (in Thai)
- Thai Meteorological Department. (2018). *Highest Temperature*. https://www.tmd.go.th/programs/uploads/tempstat/max_stat_latest.pdf
- An, Y., & Pandey, M. D. (2007). The r largest order statistics model for extreme wind speed estimation. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 95(3), 165-182.

Research Article

Sustainable mortar and concrete made from palm oil boiler clinker aggregate comprising rice husk ash and calcium bentonite: Compressive strength and durability assessment

Kamolchanok Kueaket¹ and Danupon Tonnayopas^{1*}

¹Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkhla University, Songkhla 90112, Thailand

*E-mail: danupon.t@psu.ac.th

Received: 04/12/2020; Revised: 25/01/2021; Accepted: 22/03/2021

Abstract

This research was conducted to assess the performances of mortars and concretes made from palm oil boiler clinker aggregate (POBC) blending with rice husk ash (RHA) and calcium bentonite (CB). These blends were used to substitute of ordinary Portland cement (OPC) in the combined proportions of 5wt%CB+5wt%RHA, 5wt%CB+15wt%RHA, 15wt%CB+5wt%RHA, 10wt%CB+20wt%RHA, and 20wt%B+10wt%RHA. The POBC mortars were examined for compressive strength, water absorption, sulfuric acid resistance, and microstructural characterization at the age of 7, 28, and 56 days. Subsequently, the POBC concretes were tested for rapid chloride ion permeability and capillary absorption at 28 and 56 days of curing ages. As a result, the 56-day POBC mortar with the optimum blending of 5% CB and 15% RHA provided the greatest compressive strength of 48 MPa as well as revealed denser microstructure observed under scanning electron microscope (SEM) and greater durability against sulfuric acid attack which surpassed those of the POBC mortar without CB and RHA. Proportionately, the incorporation of 5-10% CB with 15-20% RHA to POBC concrete cured up to 56 days possessed greater durability performances by reducing the chloride ion permeability from moderate to very low ranges as well as lessening capillary absorption. The practical implications of this study are that the POBC could be potentially used in the building sector as a substitute to the conventional aggregates. In addition, the use of CB and RHA could be possibly replaced cement in the optimum proportions without compromising the strength and durability to produce efficiently sustainable POBC mortar and concrete.

Keywords: palm oil boiler clinker, rice husk ash, calcium bentonite, compressive strength, sulfuric acid resistance, chloride ion permeability

Introduction

In 2021 to 2022, the prediction of construction aggregate demand in Asia-Pacific region would be reached to approximately 45,000 million of tonnes (Wiwattananukul et al., 2019). Specifically, the estimate construction aggregate demand in Thailand was 50 million of tonnes annually, and it was predicted to be increased by 20% of each year (Material resources management division, 2019). Conversely, the construction aggregate reserve was approximately 8,010 million of tonnes in Thailand (Innovation in Raw Materials and Primary Industries Division, 2020). Thus, it is apparent that the construction aggregate demand has been inversely

proportional to the nonrenewable aggregate reserve. Therefore, the alternative construction aggregate sources should be essentially studied and further brought to use. The demolition waste of construction and industrial waste have been widely applied in the sustainable construction material sectors.

Utilization of local waste materials in construction applications has a great impact on reducing the waste itself, land-fill used, environmental pollutions, and consumption of natural construction materials (Halahla et al., 2019). These impacts also promote sustainable construction towards waste manipulation. To reduce the consumption of the natural construction material and increase the exploitations of waste by-products, the natural aggregate and the cement can be efficiently replaced by the waste by-products such as copper slag (Siddique et al., 2020), granulated blast-furnace slag (Maghool et al., 2020), brick waste (Dang & Zhao, 2019), and fly ash (Chindaprasirt et al., 2020; Klimek et al., 2020; Shakir et al., 2020; Siddique et al., 2020).

Palm oil boiler clinker (POBC) was considered as a rigid solid waste which obtained from local crude palm oil plant. This waste was generated after the combustion of solid palm oil wastes inside boiler and caused the disposal area used and environmental pollutants (Hamada et al., 2020). In regard to the rigid properties and chemical compositions of POBC, the feasibility usages had been studied in term of sustainable construction application as a building material replacements (Shakir et al., 2019). According to Chai et al (2017), POBC can be potentially used as up to 50% of coarse aggregate substitution in size of 4.75-9 mm. Besides, at 100% of POBC coarse aggregate replacement for concrete with w/b ratio of 0.53, the 28-day compressive strength was up to 33 MPa which was only 30% lower than the reference mix made of granite aggregate (Abutaha et al., 2016). Moreover, natural sand can be completely substituted by POBC fine aggregate for eco-mortar production with a minor effect on compressive strength (Kanadasan et al., 2018). The percentage replacement of natural sand by POBC was recommended between 40 to 60% to maintain the mechanical properties (Babalgaihaith et al., 2020). Although, the studies of using POBC as an aggregate substitution in concrete, asphalt, and geopolymer productions and its mechanical properties have been reported by several researchers, the durability of those composites have not yet been clearly characterized in order to determine the suitability usage and application of POBC. Besides, the study of using 100% of POBC as coarse and fine aggregate with other type of waste as a binder and its durability characteristics have not been reported elsewhere.

Additionally, rice husk ash (RHA) is one of the most useful materials in cement industry. Several important roles of RHA as a pozzolan in cementitious material had been revealed, it could reduce the capillary pore and promote long term compressive strength of concrete, especially, for the low carbon RHA (Kang et al., 2019; Sandhu & Siddique, 2017). The pozzolanic activity was promoted by the addition of RHA which resulted in the micro-filler effect that filled up the capillary pore of cement matrix by the production of calcium silicate hydrate gels (C-S-H gels) (Gill & Siddique, 2018). Besides, the efficiency of using RHA as a cement replacement on acid resistance was also found that concrete incorporating RHA performed the superior resistance due to the pozzolanic activity consumed calcium hydroxide (CH) content and strengthened the bond between different phases in microstructure by producing more C-S-H (Koushkbaghi et al., 2019). Conversely, the large amount of RHA replacement in concrete can be decreased the compressive strength (Umasabor & Okovido, 2018).

Furthermore, calcium bentonite (CB) was addressed for a natural pozzolan (Memon et al., 2012). The Pakistani bentonite or CB was partially replaced by weight of cement and found that the compressive strength of 56-day mortar containing 12-15% CB as a cement replacement can reach approximately 30 MPa, which was significantly 2.7% higher than that of without adding

CB. The pore filling effect of using up to 10% CB replaced by weight of cement was achieved in mortar cured up to 28 days. This effect established the particle packing improvement and a decrease in water absorption due to the very-fine grain particles of CB (Ahmad et al., 2011).

This research aims to utilize the local waste by-products and evaluate the performances of mortars and concretes containing POBC aggregate with the combination of RHA and CB as a cement replacements. The compressive strength, water absorption, and sulfuric acid (H_2SO_4) resistance of POBC mortars were carried out at the age of 7, 28, and 56 days. In addition, the POBC concretes cured at 28 and 56 days were determined for rapid chloride ion permeability and 72-hour capillary absorption. Accordingly, the microstructures of POBC mortar containing CB and RHA blends were characterized via scanning electron microscope (SEM).

Materials and methods

Ordinary Portland cement (OPC) as per ASTM C150 was used in this study. POBC was collected from disposal area of oil palm plant at Surat Thani province, as received POBC was displayed in Figure 1a. The POBC was washed, dried, and crushed with jaw crusher to achieve the POBC coarse aggregate (POBCCA) and gyratory crusher to achieve the POBC fine aggregate (POBCFA), as depicted in Figure 1b-c. The enlargement of the POBC mortar's cross-section obtained from stereo microscope is shown in Figure 1d. The mineralogical characteristics of POBC were characterized via X-ray diffraction (XRD) analysis, as shown in Figure 2. The mineral compositions of POBC consisted of whitlockite, diopside, and three polymorphs of SiO_2 , which were quartz, tridymite, and cristobalite. The green color of POBC can be accounted for the mineral composition of diopside. The properties of POBC aggregates were listed in Table 1. Conforming to ASTM C131 (2020) and BS 182-112 (1990), the POBCCA is not recommended for using in road surfacing, structural works, or heavy duty constructions due to the lower resistance to crushing and abrasion. In addition, CB was purchased from supplier (product of Thailand), as seen in Figure 1b.

RHA was obtained after the open air burning of using rice husk as a biomass fuel in Phatthalung province. Then, it was calcined with an electrical furnace at 700 °C for 1 hour (HR: 5 °C/min) in order to reduce the contaminated organic matters or unburned carbon. After calcining process, RHA was ground with jar mill at rotation speed of 65 revolution per minute for 12 hours to meet the requirement of ASTM C618 (2019). The chemical compositions and particle size of CB and RHA were analyzed via wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrophotometer (WDXRF) and laser particle size analyzer (LPSA), as tabulated in Table 2. The XRD pattern of RHA is depicted in Figure 3. The RHA composed of few crystalline phase of cristobalite and quartz, mostly contained amorphous silica, which confirmed by the broad hump peak between 2θ of 15° to 25° and other wide range of low intensity peaks, as presented in the dashed line circle. The particle size distributions of the binders and aggregates used are shown in Figure 4.

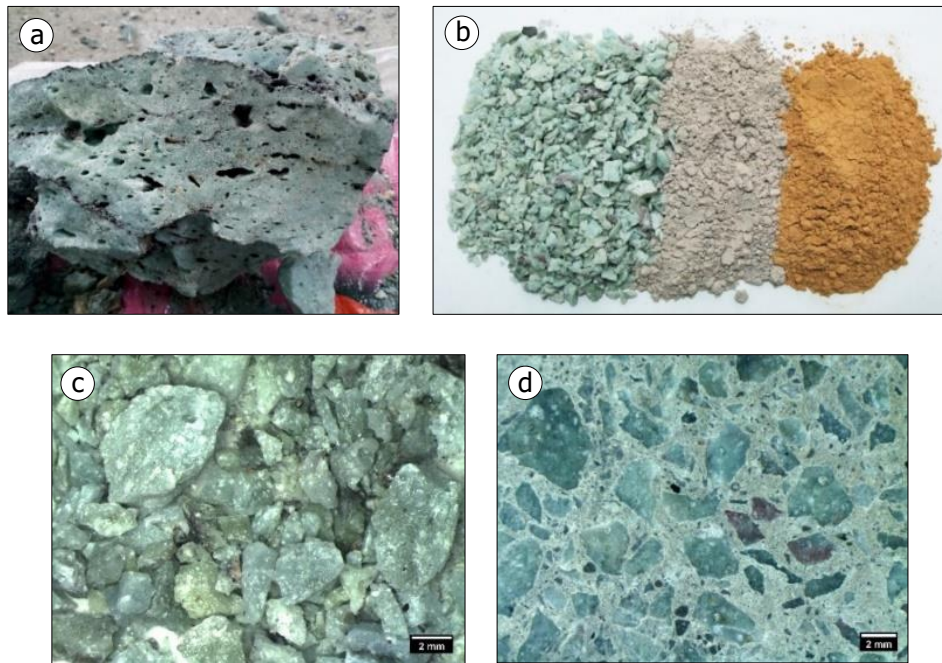


Figure 1 As received POBC (a), from left to right: crushed POBC as a fine aggregate, rice husk ash, and calcium bentonite (b), enlargement of POBC fine aggregate (c), and cross-section of mortar made of POBC fine aggregate (d)

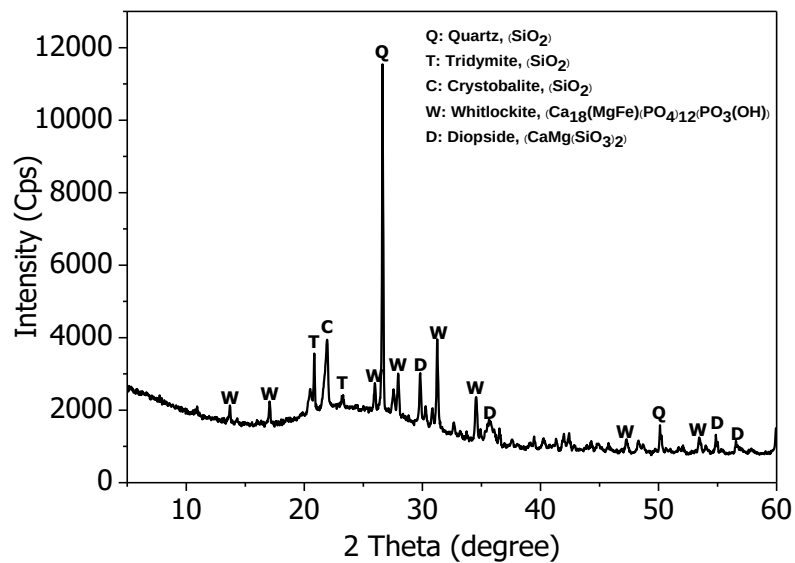


Figure 2 XRD pattern and phase compositions of POBC

Table 1 The physical properties of POBC aggregates

Properties	POBCCA	POBCFA
Organic impurity (ASTM C40, 2020)	None	
24-hour water absorption (%)	2.80	3.10
Specific gravity	2.28	2.40
Unit weight (kg/m ³)	1,182	1,350
Fineness modulus	5.30	3.70
Aggregate impact value (%)	36	-
Los Angles abrasion (%)	38	-

Table 2. The chemical and physical properties of CB and RHA

	CB	RHA
Chemical compositions		
SiO ₂ (%)	56.62	93.93
Fe ₂ O ₃ (%)	0.02	0.36
Al ₂ O ₃ (%)	19.81	0.33
SO ₃ (%)	0.69	0.21
SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ (%)	76.45	94.62
Loss on ignition (%)	10.12	0.67
Physical properties		
D ₁₀ (μm)	0.6	2.3
D ₅₀ (μm)	2.3	12.5
D ₉₀ (μm)	14.2	38.6
D[4,3] (μm)	5.5	16.5

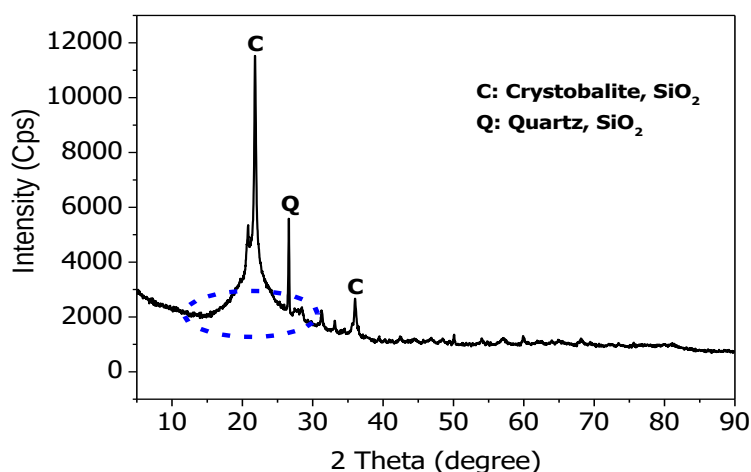


Figure 3 XRD pattern and phase compositions of RHA

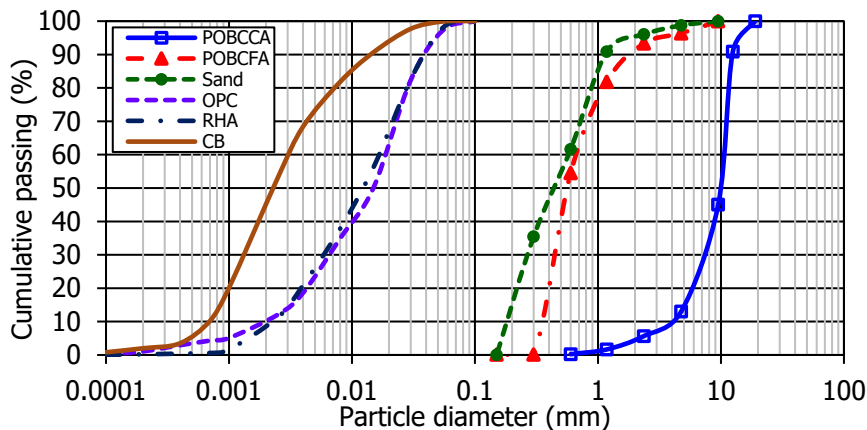


Figure 4 Particle size distribution of POBC aggregates and binders

Mix designation

Mix designations of POBC mortar and concrete were done complying with ASTM C109 (2016), ASTM C192 (2019), and ACI 211.1 (1991). For both of POBC mortar and concrete, the blending of RHA and CB partially replaced by weight of OPC, as followed in Table 3. For example, the mix designation B5R5 was the combination between 5% CB and 5% RHA replaced by weight of OPC. The POBC mortar specimen was taken for determine the compressive strength, water absorption, and resistance to sulfuric acid (H_2SO_4) attack. The POBC concrete specimen was taken for determine the rapid chloride permeability and capillary absorption. For the POBC mortar mix designations, 50-mm cube specimens were casted with the binder to aggregate ratio of 1:2.75 and water to binder ratio of 0.48. The percentage flow of fresh mortar was determined as per ASTM C1437 (2015). Then, the hardened mortar specimens were cured in saturated lime water at ambient temperature ($25 \pm 5^\circ C$) with 80-85% relative humidity for 7, 28, and 56 days. For the POBC concrete mix designations, 100 mm diameter with 50 mm length concrete discs were prepared by using natural sand (F.M 3.15), POBCCA with maximum size of 10 mm (F.M. 5.31), and taken water to binder ratio of 0.48. The concrete specimens were cured in the same condition of POBC mortar for 28 and 56 days.

Table 3 The mix designations of POBC mortar for various combination ratios of RHA and CB

Mix designations	Mix proportions									
	POBC mortar					POBC concrete				
	Binder (kg/m ³)			POBCFA (kg/m ³)	Flow (%)	Binder (kg/m ³)			Sand (kg/m ³)	POBCCA (kg/m ³)
	OPC	CB	RHA			OPC	CB	RHA		
Control	500	0	0	1,375	121	500	0	0	1,175	765
B5R5	450	25	25	1,375	119	450	25	25	1,175	765
B5R15	400	25	75	1,375	108	400	25	75	1,175	765
B15R5	400	75	25	1,375	112	400	75	25	1,175	765
B10R20	350	50	100	1,375	101	350	50	100	1,175	765
B20R10	350	100	50	1,375	103	350	100	50	1,175	765

Test procedures

The compressive strength and water absorption of POBC mortar were prepared and tested in accordance with ASTM C109 (2019) and ASTM C373 (2014). The strength activity index was determined according to ASTM C618 (2019). Resistance to 0.005 M sulfuric acid attack (pH=2.5) was measured by the comparison between the weight and compressive strength of POBC mortars before exposure and after exposure to sulfuric acid solution at particular curing ages. The sulfuric acid was renewed every week in order to maintain the pH value of the solution. The sulfuric acid resistance test was conducted for 6 weeks. The rapid chloride permeability test and capillary absorption test of POBC concretes were performed conforming to ASTM C1202 (2019) and ASTM C1585 (2020). The tests set up of the rapid chloride ion permeability and the capillary absorption are presented in Figure 5. For the microstructural characterization, the POBC mortars cured at 56 days were investigated using scanning electron microscope (SEM) at the accelerate voltage of 20 kV.

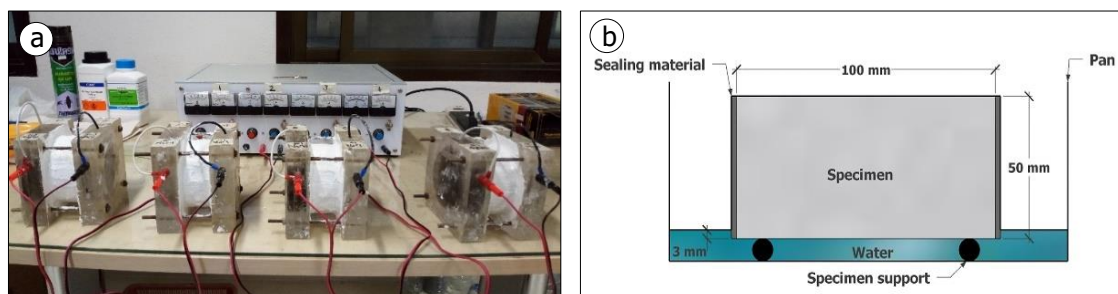


Figure 5 Schematics of rapid chloride permeability (a) and capillary absorption test (b) configurations

Results and discussion

1. Compressive strength

The compressive strength of mortar specimens cured in saturated lime water for a period of 7, 28, and 56 days are shown in Figure 6. Overall, the compressive strength of all mix designations was increased with curing ages. It can be observed that the compressive strength of mix designations B10R20 and B5R15 were equivalent to or higher than that of the control mix at the age of 28 and 56 days. Particularly, the highest 56-day compressive strength of 48 MPa was found in the mix B5R15, which was greater than that of the control mix by 7%. However, a reduction in 56-day compressive strength was found in the mix B5R5, B15R5, and B20R10. Which was lesser than that of the control mix by 11%, 16%, and 15%, respectively. According to these results, it can be seen that the mix designations containing more RHA/CB ratios (B5R15 and B10R20) and taken up to 28-day curing ages could be maintained and provided the development of the compressive strength in comparison to the control mix, B5R5, B15R5, and B20R10. These compressive strength results comply with those of (Joshaghani & Moeini, 2018). Who reported that the compressive strength of 90-day mortar containing 15% RHA was 6% greater than that of the mixture without RHA. Additionally, the compressive strength of 28-day mortar specimen containing 6% bentonite was higher than that of the control specimen by 3% (Memon et al., 2012). However, the effects of hybrid mixes between RHA and CB have not been studied and reported elsewhere. Therefore, according to the compressive strength results of this study, the mix designation B5R15 and B10R20 can be recommended as the optimum CB/RHA ratios for using as an OPC replacement without detrimental to the compressive strength.

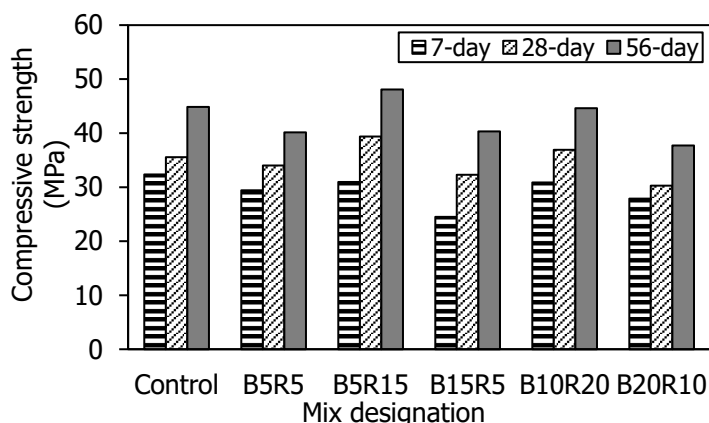


Figure 6 Compressive strengths of POBC mortars with different mix designations at the age of 7, 28, 56 days

2. Strength activity index

The strength activity index (SAI) of all mix designations is demonstrated in Figure 7. The determination of SAI is to indicate that the SCMs or any tested materials have the pozzolanic properties. According to ASTM C618 (2019), the requirement of SAI is considered as more than 75%. For the mixture containing the hybrid mixes of RHA and CB, the SAI values of those mix designations were in the range of 76-111%. In addition, the SAI of those mixes were meet the standard requirement and significantly increased with ages. In addition, the highest SAI was found in the mix B5R15 at the age of 28 days. This finding is in line with Man et al. (2019) and Rehman et al. (2020). The development of SAI and compressive strength could be due to the chemical compositions of RHA and CB. Which mainly consisted of silica (SiO_2). Moreover, the amount of $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ contents were more than 70%. Thus, the active silica could be reacted with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and promote and pozzolanic reaction's products caused the improvement in compressive strength (Man et al., 2019; Rehman et al., 2020).

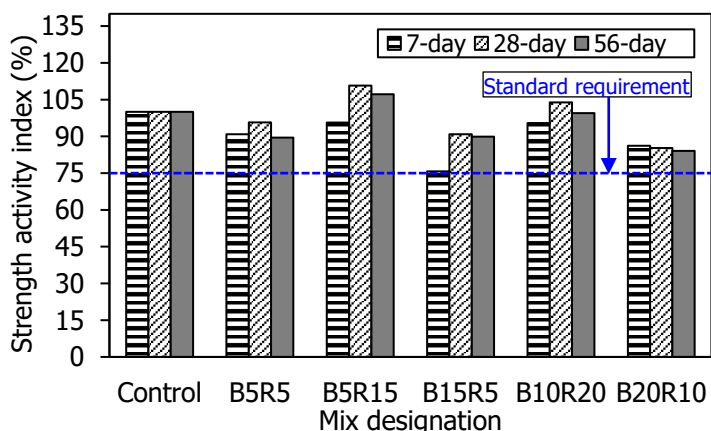


Figure 7 Strength activity index of POBC mortars with different mix designations at the age of 7, 28, 56 days

3. Water absorption

The water absorption of different mix designations at the ages of 7, 28, and 56 days is shown in Figure 8. The water absorption of all mix designations was decreased with prolonged curing ages. Meanwhile, at the early age of curing, the water absorption of the hybrid mix designations was similar to the control mix. At the age of 28 and 56 days, the percentage of water absorption was decreased by 15 to 26% for the mix B5R5, B5R15, and B10R20, when compared to that of the control mix. The lowest percentage of water absorption was found in the mix B5R15 at the age of 28 and 56 days, which was 26% lesser than the control mix. Jamil et al. (2016) pointed out that the filler effect and secondary C-S-H products from pozzolanic reaction of RHA filled up the pore space in the cement matrix and caused the reduction in the water absorption. Furthermore, the reduction in the water absorption was also found in the specimen containing up to 10% bentonite. This is due to the micro-filling effect of very fine-grain bentonite that can improve the particle packing of binder and reduce the water to binder ratio (Ahmad et al., 2011; Mesboua et al., 2018). However, an adverse effect of more bentonite contents could be attributed to the unreacted bentonite particles within the cement matrix absorbed more water, thus the water absorption of specimen containing more bentonite increased (Ahmad et al., 2011).

Although, the control mix revealed the highest 56-day water absorption while provided the greater compressive strength than the mix designation B5R5, B15R5, and B20R10. This could be due to the complex mechanism between RHA and CB, which contributed greatly to both of the pozzolanic reaction and filler effect. For the mechanism of RHA, the very-fine grain particle substantially improved pore size, reduced water absorption, and was ineffective to the strength development due to the pozzolanic reaction takes place in prolonged curing period. Moreover, this mechanism was confirmed by Bheel et al. (2020) that an increase in dosage of RHA replacement decreased the water absorption, whereas only the optimized 5% of RHA increased the compressive strength at the age of 28 days. Correspondingly, the significance mechanism of CB is pore refinement and improving the impermeability of cement matrix (Masood et al., 2020; Rehman et al., 2019). Liu et al. (2020) also concluded that the incorporating 10% CB developed the durability by filling effect and only the C-S-H gel formed on the surface of the specimen, whereas the strength development index need to be included (i) the forming of ettringite and (ii) the overlapping of hydration product on the specimen's surface.

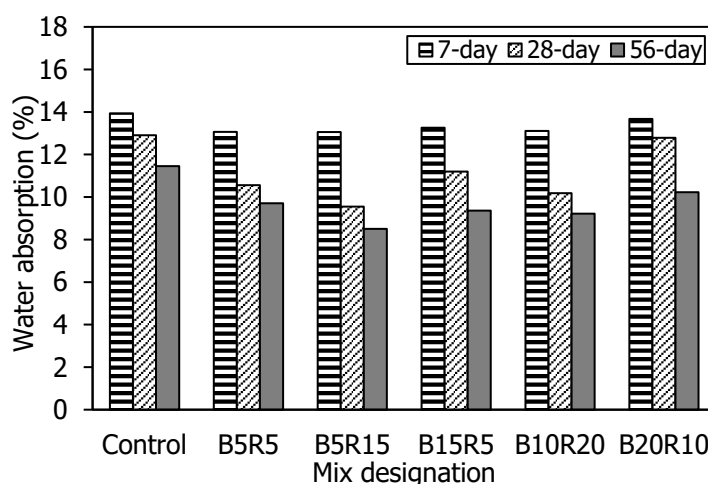


Figure 8 Water absorption of POBC mortars with different mix designations at the age of 7, 28, 56 days

4. Resistance to sulfuric acid attack

Weight loss

The weight loss of mortars at different curing ages exposed to 0.005 M sulfuric acid solution for 42 days is shown in Figure 9. It can be observed that the weight loss of all mix designations was decreased with curing age before exposure to sulfuric acid solution. At the later age, 56 days of curing, the ranges of weight loss for all hybrid mix designations were lesser than the control mix. Which were in the range of 1 to 44%. Especially, for the mix containing more combination ratio of RHA/CB (B10R20 and B5R15), the weight loss was up to 41 and 44% lower than that of the control mix. This is mainly attributed to (i) the less water absorption and (ii) the pozzolanic activity from the silica compositions of RHA (94% SiO₂) was greater than CB (57% SiO₂) which contributed to an increase in C-S-H forming and resulted in more impermeable matrix. Thus, the more durability was obtained in the mix containing more RHA contents (Ahmad et al., 2011). Correspondingly, the mix designation B5R15 showed a lesser surface erosion than that of the control mix, as shown in Figure 10. Min & Song (2018) also reported that the crucial corrosion can be indicated in the yellow color area that appeared on the exposed surface of the cement composite to sulfuric acid solution.

Compressive strength loss

The compressive strength loss of mortars exposed to 0.005 M sulfuric acid solution is shown in Figure 11. After 42 days of exposure, the compressive strength loss is seen in all mix designations. In accordance with the weight loss results, a similar trend was observed in the compressive strength loss. An increase in curing ages before sulfuric acid attack and the more RHA/CB ratios decreased the loss in compressive strength. The lowest compressive strength loss was found in the mix B5R15 at the age of 56 days. Which was 18 % lower than that of the control mix. This finding suggests that up to 20% of OPC can be replaced by the combination blend of CB and RHA at the optimum CB/RHA ratio as in the mix designation B5R15, which produced the development both in the compressive strength and durability.

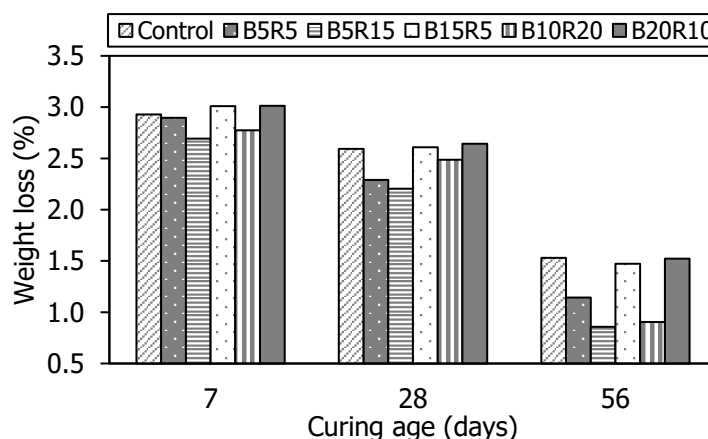


Figure 9 Weight loss of POBC mortars with different mix designations cured at 7, 28, and 56 days exposed to 0.005 M sulfuric acid solution for 42 days

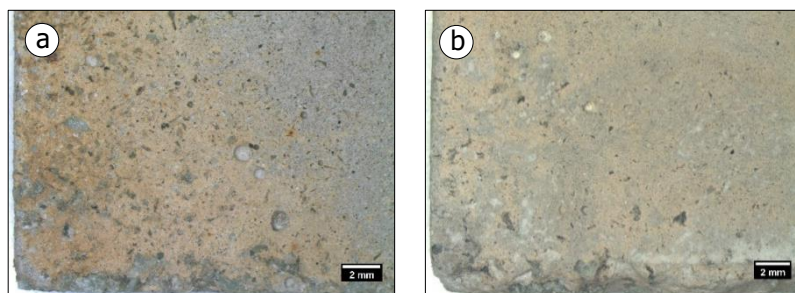


Figure 10 Enlargement of the surface of 56-day mortars: control mix (a) and mix designation B5R15 (b) after exposed to 0.005 M sulfuric acid solution for 42 days

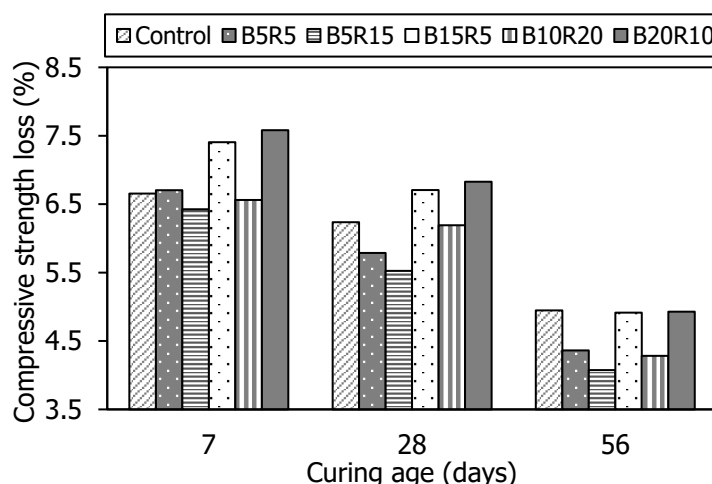


Figure 11 Compressive strength loss of POBC mortars with different mix designations cured at 7, 28, and 56 days exposed to 0.005 M sulfuric acid solution for 42 days

5. Rapid chloride permeability and capillary absorption

The total charge passed and capillary absorption of different mix designations and curing ages are given in Figure 12. According to ASTM C1202 (2019), the qualitative indication of chloride ion permeability of any concrete specimen was determined as followed: the total charges passed of concrete specimens that fall in the range of (i) >4,000 coulombs, (ii) 2,000-4,000 coulombs, (iii) 1,000-2,000 coulombs, and (iv) 100-1,000 coulombs were considered as high permeability, moderate permeability, low permeability, and very low permeability, respectively. A decrease in chloride ion permeability was observed in all hybrid mixes with prolonged curing ages. As compared to the control mix, the decrease was in the range of 4-77% and 30-78% at the age of 28 and 56 days, respectively. At the age of 56 days, the chloride ion permeability of the mix designations B5R15 and B10R20 was in very low ranges. For the mix designations B5R5, B15R5, and B20R10 cured at 56 days, the chloride ion permeability was in the low range, whereas the chloride ion permeability of the control mix was in the moderate range. Consequently, the capillary absorption results corresponded to the chloride ion permeability. An increase in curing ages decrease capillary absorption. The significant reduction in the 72-hour capillary absorption

was found in the mix designations B5R15 and B10R20 at the age of 56 days, which were lower than the control mix by 44% and 56%, respectively. It can be seen that the chloride permeability and the capillary absorption decreased with an increase in curing ages and RHA/CB ratios, as was found in mixture designations B5R15 and B10R20. Ganesan et al. (2008) also found that the chloride permeability and rate of capillary absorption had a good relationship due to the reduction of permeable voids in matrix by the pozzolanic activity of RHA as an additive and the prolonged curing ages. This finding also in agreement with those of Huang et al. (2017), Laidani et al. (2020), and Zareei et al. (2017) that the capillary absorption and chloride ion penetration of concrete specimen containing RHA were reduced by an increase in the RHA content, while only adding up to 10% bentonite could reduce the capillary absorption. Moreover, an increase in RHA content up to 20% reduced the 72-hour capillary absorption by 15%, compared to the specimen without RHA (Zahedi et al., 2015).

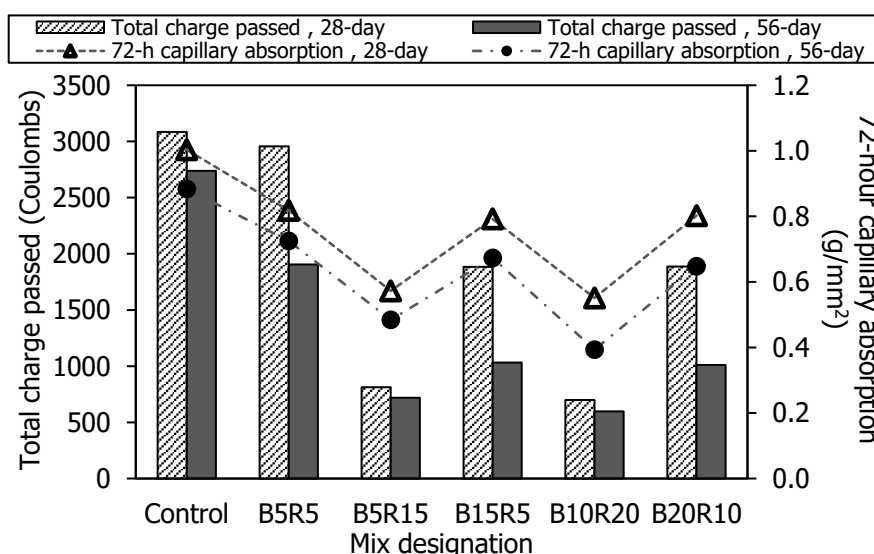


Figure 12 The chloride ion permeability and 72-hour capillary absorption of POBC concrete with different mix designations at the age of 28 and 56 days

6. Microstructural characterization

The SEM images are demonstrated the comparison between OPC particles and combination blends of OPC, RHA, and CB particles of the mix designation B5R15 as shown in Figure 13a-b. It can be seen that the different in particle sizes among OPC, RHA, and CB played the important role in increasing the particle packing of the binder. An increase in particle packing was observed in the binder of the mix designation B5R15 in comparison to the pure OPC particles. Accordingly, the very fine micro-particles of CB and rounded agglomerate RHA particles also contributed to the reduction in water content of the binder due to RHA and CB absorbed more water (Ahmad et al., 2011; Mesboua et al., 2018). The SEM images of the hardened pastes of the control mix and mix designation B5R15 are illustrated in Figure 13c-d. It can be clearly seen that the hydration's products were found in both mix designations. Particularly, the mix designation B5R15 manifested denser matrix and lower micro-pore spaces when compared to the control mix. The dense flocs-like C-S-H was obviously found in the groundmass of the mix

designation B5R15 and the micro-pore spaces were reduced by the spreading of the dense C-S-H framework. For the matrix of the control mix, the loosely fibrous-like and flocs-like C-S-H were found. The more C-S-H embedded in the mix containing RHA and CB could be due to the pozzolanic activity that consumed free $\text{Ca}(\text{OH})_2$ from both of hydration and pozzolanic reaction's products, then produced more C-S-H (Chopra et al., 2015; Masood et al., 2020). Besides, the denser microstructure could be attributed to the development in compressive strength, the reduction in water absorption, and the durability improvement of the mix designation B5R15 in comparison to the control mix. The morphology of C-S-H observed from SEM images of this study was characterized and compared to the flocs-like C-S-H found by Yu et al. (1999), Cizer et al. (2007), and the fibrous-like C-S-H found by El-gama et al. (2018). However, the characteristics of C-S-H can be shown in various forms depended on the curing condition, additive used, water to binder ratios, and designation of mixture (Cizer et al., 2007; Shen et al., 2019).

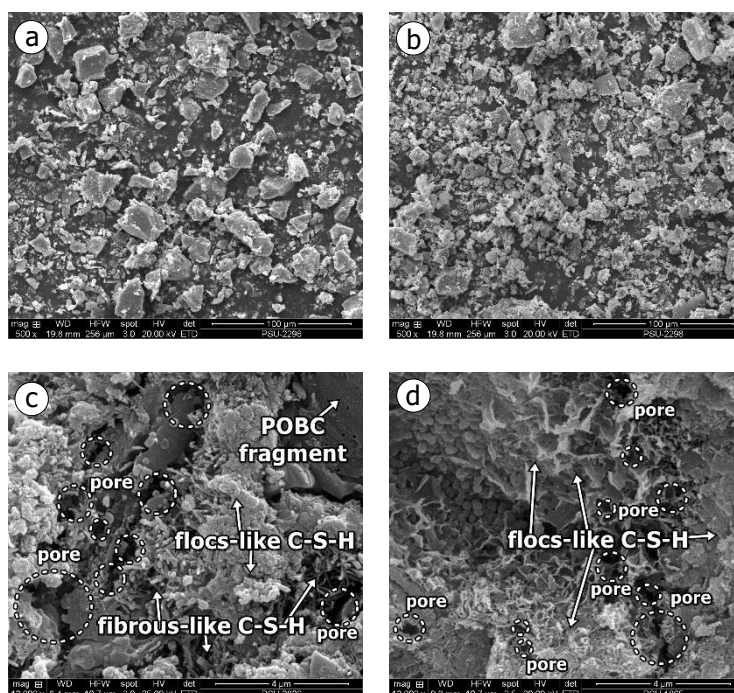


Figure 13 SEM images of OPC particles (a), blends consisted of OPC, CB, and RHA particles of mix designation B5R15 (b), the hardened paste cured at 56 days of the control mix (c), and the mix designation B5R15 (d)

Conclusion

Based on this study results, the conclusions can be provided as following:

(1) The POBC mortar with the optimum combination of 5% of CB and 15% of RHA replaced by weight of OPC (mix designation B5R15) developed the superior performance at the curing age up to 56 days when compared to the control and the others mix designations. Moreover, the mix designation B5R15 provided the highest compressive strength, the lowest water absorption, and the lowest weight and compressive strength loss due to sulfuric acid attack.

(2) The chloride ion permeability and capillary absorption decreased with an increase in RHA combination ratios and curing ages. The very low range of chloride ion permeability belonged

to the mix designation B5R15 and B10R20 cured at 56 days. However, the chloride ion permeability of the others mix designations were fallen into the low range except for the control mix that was continually fallen in the moderate range when the curing ages increased. The optimum combination of 5-10% of CB and 15-20% of RHA replaced by weight of OPC would be recommended for the chloride ion permeability resistance of the POBC concrete.

(3) According to the microstructure characterization using SEM images, the denser matrix occupied by C-S-H framework and lower pore spaces of the mix designation B5R15 in comparison to the control mix contributed to the compressive strength and durability improvement.

(4) Regarding to this investigation, the POBC can be used as an aggregate substitution for producing conventional mortars and concretes in non-structural construction work. The optimum combinations of CB and RHA for POBC mortars and concretes could help diminishing the cement used and promoting the durability performance.

Acknowledgements

The authors expressed the deepest gratitude to PSU Graduate School and Faculty of Engineering, Prince of Songkla University for the partially financial supports and Graduate Engineering Scholarship.

References

- Abutaha, F., Abdul Razak, H., & Kanadasan, J. (2016). Effect of palm oil clinker (POC) aggregates on fresh and hardened properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 416-423. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.172>
- Ahmad, S., Barbhuiya, S. A., Elahi, A., & Iqbal, J. (2011). Effect of Pakistani bentonite on properties of mortar and concrete. *Clay Minerals*, 46(1), 85-92. <https://doi.org/10.1180/claymin.2011.046.1.85>
- Standard, A. C. I. (1996). Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. *ACI Man. Concr. Pract.*, 1-38.
- ASTM. (2014). *Standard test method for water absorption, bulk density, apparent porosity, and apparent specific gravity of fired whiteware products, ceramic tiles, and glass tiles* (ASTM C373-14). US: ASTM International. <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC037314%7CenUS&proxycl=https%3A%2F%2Fsecure.astm.org&fromLogin=true>
- ASTM. (2020). *Standard test method for flow of hydraulic cement mortar* (ASTM C1437-15). US: ASTM International. <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC1437-15%7CenUS&proxycl=https%3A%2F%2Fsecure.astm.org&fromLogin=true>
- ASTM. (2016). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)* (ASTM C109/C109M-16a). https://www.astm.org/c0109_c0109m-16.html
- ASTM. (2019). *Standard Specification for Portland Cement* (ASTM C150/C150M-19a). US: ASTM International. https://www.astm.org/c0150_c0150m-22.html
- ASTM. (2012). *Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory* (ASTM C192/C192M-19). US: ASTM International. https://www.astm.org/c0192_c0192m-07.html
- ASTM. (2012). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete* (ASTM Standard C618). US: ASTM International. https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=ASTM%20C618&item_s_key=0014875

- ASTM. (1997). 1202: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. *Annual book of ASTM standards*, 4(2), 639-644. <https://www.astm.org/c1437-20.html>
- ASTM. (2020). *Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete* (ASTM C40/C40M-20). US: ASTM International. <https://www.astm.org/c1437-20.html>
- ASTM. (2020). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes* (ASTM C1585-20). US: ASTM International. <https://www.astm.org/c1585-20.html>
- ASTM. (2020). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine* (ASTM C131/C131M-20). US: ASTM International. <https://www.astm.org/c1437-20.html>
- Babalghaith, A. M., Koting, S., Sulong, N. H. R., Karim, M. R., & AlMashjary, B. M. (2020). Performance evaluation of stone mastic asphalt (SMA) mixtures with palm oil clinker (POC) as fine aggregate replacement. *Construction and Building Materials*, 262, 11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120546>
- Bheel, N., Keerio, M. A., Kumar, A., Shahzaib, J., Ali, Z., Ali, M., & Sohu, S. (2020). An investigation on fresh and hardened properties of concrete blended with rice husk ash as cementitious ingredient and coal bottom ash as sand replacement material. *Silicon*, 12. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00906-3>
- British Standards Institute. (1990). *BS 812-112: Methods for determination of aggregate impact value (AIV)*. <https://www.en-standard.eu/search/?q=BS812-112>
- Chai, L. J., Shafigh, P., Mahmud, H., & Aslam, M. (2017). Effect of substitution of normal weight coarse aggregate with oil-palm-boiler clinker on properties of concrete. *Sains Malaysiana*, 46(4), 645-653. <https://doi.org/10.17576/jsm-2017-4604-18>
- Chindaprasirt, P., Kasemsiri, P., Leekongbub, S., & Posi, P. (2020). Durability of concrete containing recycled asphaltic concrete aggregate and high calcium fly ash. *International Journal of Geomate*, 19(74), 8-14. <https://doi.org/10.21660/2020.74.5541>
- Chopra, D., Siddique, R., & Kunal. (2015). Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash. *Biosystems Engineering*, 130, 72-80. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.12.005>
- Cizer, O., Van Balen, K., Van Gemert, D., & Elsen, J. (2007). *Carbonation and hydration of mortars with calcium hydroxide and calcium silicate binders* [Paper presentation]. International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies.
- Dang, J. T., & Zhao, J. (2019). Influence of waste clay bricks as fine aggregate on the mechanical and microstructural properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 228, 9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116757>
- El-Gamal, S. M. A., Abo-El-Enein, S. A., El-Hosiny, F. I., Amin, M. S., & Ramadan, M. (2018). Thermal resistance, microstructure and mechanical properties of type I Portland cement pastes containing low-cost nanoparticles. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(2), 949-968. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6629-1>
- Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2008). Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1675-1683. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.011>
- Gill, A. S., & Siddique, R. (2018). Durability properties of self-compacting concrete incorporating metakaolin and rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 176, 323-332. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.054>

- Halahla, A. M., Akhtar, M., & Almasri, A. H. (2019). Utilization of Demolished Waste as Coarse Aggregate in Concrete. *Civil Engineering Journal-Tehran*, 5(3), 540-551. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091266>
- Hamada, H. M., Jokhio, G. A., Al-Attar, A. A., Yahaya, F. M., Muthusamy, K., Humada, A. M., & Gul, Y. (2020). The use of palm oil clinker as a sustainable construction material: A review. *Cement & Concrete Composites*, 106, 19. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103447>
- Huang, H., Gao, X., Wang, H., & Ye, H. (2017). Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 149, 621-628. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.155>
- Innovation in Raw Materials and Primary Industries Division. (2020). *Construction aggregate reserve in Thailand*. <http://www.dpim.go.th/qry-stones/quarry3.php>
- Jamil, M., Khan, M. N. N., Karim, M. R., Kaish, A. B. M. A., & Zain, M. F. M. (2016). Physical and chemical contributions of rice husk ash on the properties of mortar. *Construction and Building Materials*, 128, 185-198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.029>
- Joshaghani, A., & Moeini, M. A. (2018). Evaluating the effects of sugarcane-bagasse ash and rice-husk ash on the mechanical and durability properties of mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(7), 14. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002317](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002317)
- Kanadasan, J., Razak, H. A., & Subramaniam, V. (2018). Properties of high flowable mortar containing high volume palm oil clinker (POC) fine for eco-friendly construction. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1244-1259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.068>
- Kang, S.-H., Hong, S.-G., & Moon, J. (2019). The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 115, 389-400. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.09.004>
- Koushkbaghi, M., Kazemi, M. J., Mosavi, H., & Mohseni, E. (2019). Acid resistance and durability properties of steel fiber-reinforced concrete incorporating rice husk ash and recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 202, 266-275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.224>
- Laidani, Z. E., Benabed, B., Abousnina, R., Gueddouda, M. K., & Khatib, M. J. (2020). Potential pozzolanicity of Algerian calcined bentonite used as cement replacement: optimisation of calcination temperature and effect on strength of self-compacting mortars. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1713898>
- Liu, M. L., Hu, Y., Lai, Z. Y., Yan, T., He, X., Wu, J., Lv, & S. Z. (2020). Influence of various bentonites on the mechanical properties and impermeability of cement mortars. *Construction and Building Materials*, 241, 12. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118015>
- Maghool, F., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., & Mohajerani, A. (2020). Engineering and leachate characteristics of granulated blast-furnace slag as a construction material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(7), 10. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003212](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003212)
- Man, X. Y., Haque, M. A., & Chen, B. (2019). Engineering properties and microstructure analysis of magnesium phosphate cement mortar containing bentonite clay. *Construction and Building Materials*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.037>

- Masood, B., Elahi, A., Barbhuiya, S., & Ali, B. (2020). Mechanical and durability performance of recycled aggregate concrete incorporating low calcium bentonite. *Construction and Building Materials*, 237, 117760. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117760>
- Material resources management division. (2019). *100 million of tonnes construction aggregate for EEC construction project (5 years)*. <https://www.bangkokbiznews.com/news/detail/844687>
- Memon, S. A., Arsalan, R., Khan, S., & Lo, T. Y. (2012). Utilization of Pakistani bentonite as partial replacement of cement in concrete. *Construction and Building Materials*, 30, 237-242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.021>
- Mesboua, N., Benyounes, K., & Benmounah, A. (2018). Study of the impact of bentonite on the physico-mechanical and flow properties of cement grout. *Cogent Engineering*, 5(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1446252>
- Min, H. G., & Song, Z. G. (2018). Investigation on the sulfuric acid corrosion mechanism for concrete in soaking environment. *Advances in Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2018/3258123>
- Rehman, S. U., Kiani, U. A., Yaqub, M., & Ali, T. (2020). Controlling natural resources depletion through Montmorillonite replacement for cement-low cost construction. *Construction and Building Materials*, 232, 9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117188>
- Rehman, S. U., Yaqub, M., Noman, M., Ali, B., Khan, M. N. A., Fahad, M., & Gul, A. (2019). The influence of thermo-mechanical activation of bentonite on the mechanical and durability performance of concrete. *Applied Sciences-Basel*, 9(24). <https://doi.org/10.3390/app9245549>
- Sandhu, R. K., & Siddique, R. (2017). Influence of rice husk ash (RHA) on the properties of self-compacting concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 153, 751-764. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.165>
- Shakir, A. A., Ibrahim, M. H. W., Othman, N. H., & Shahidan, S. (2019). The Effect of palm oil clinker and oil palm shell on the compressive strength of concrete. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering*, 43, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s40996-018-0176-2>
- Shen, W. G., Zhang, W. S., Wang, J., Han, C. Z., Zhang, B. L., Li, J. W., & Xu, G. L. (2019). The microstructure formation of C-S-H in the HPC paste from nano-scale feature. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 8(4), 199-213. <https://doi.org/10.1080/21650373.2018.1564397>
- Siddique, R., Singh, M., & Jain, M. (2020). Recycling copper slag in steel fibre concrete for sustainable construction. *Journal of Cleaner Production*, 271, 10. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122559>
- Umasabor, R. I., & Okovido, J. O. (2018). Fire resistance evaluation of rice husk ash concrete. *Heliyon*, 4(12), e01035. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e01035>
- Wiwattananukul, J., Sontamino, P., Masniyom, M., Rachpech, V., & Pantaweesak, P. (2019). *The Influence of the Population on the Use of Construction Aggregate in Songkhla Lake Basin* [Paper presentation]. In the 13th International Conference on Mining, Materials and Petroleum Engineering (CMMP2019), Krabi, Thailand.
- Yu, Q., Sawayama, K., Sugita, S., Shoya, M., & Isojima, Y. (1999). The reaction between rice husk ash and Ca(OH)₂ solution and the nature of its product. *Cement and Concrete Research*, 29(1), 37-43. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00172-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00172-0)
- Zahedi, M., Ramezani pour, A. A., & Ramezani pour, A. M. (2015). Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice

- husk ash under chloride ion penetration. *Construction and Building Materials*, 78, 354-361. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.045>
- Zareei, S. A., Ameri, F., Dorostkar, F., & Ahmadi, M. (2017). Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical properties. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.05.001>

Research Article

การวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้ไฟฟ้า กรณีศึกษาการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 2 (ภาคกลาง) จังหวัดชลบุรี

Electricity Consumption Behavior Analysis: A case study Provincial Electricity Authority, Region 2, (Central Thailand) Chon Buri Province

สิทธิพงษ์ ด่านตระกูล^{1*}, ชนิดดา นัยเลิศ¹ และ ณัฐชา จงใจหาญ¹

Sittipong Dantrakul^{1*}, Chanidda Nailoed¹ and Natcha Jongjaihan¹

¹คณะวิทยาศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตศรีราชา อำเภอศรีราชา จังหวัด ชลบุรี 20230 ประเทศไทย

¹Faculty of Science at Sriracha, Kasetsart University, Sriracha Campus, Sriracha, Chonburi 20230, Thailand

*E-mail: sittipong.da@ku.th

Received: 30/07/2020; Revised: 31/10/2020; Accepted: 06/12/2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของกลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้ามากกว่า 150 หน่วยต่อเดือน และบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่า 150 หน่วยต่อเดือน ในเขตพื้นที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 2 (ภาคกลาง) จังหวัดชลบุรี ข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้าจะบันทึกและเฉลี่ยทุก ๆ 15 นาที จนครบ 24 ชั่วโมงของแต่ละวัน โดยข้อมูลการใช้ไฟฟ้าที่นำมาวิเคราะห์ประกอบด้วย ลักษณะการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยของวันทำงาน และลักษณะการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยของวันอาทิตย์ ข้อมูลดังกล่าวได้ผ่านการทำความสะอาดและแบ่งกลุ่มแบบวิธีเคมีนส์ ในงานวิจัยได้ศึกษาข้อมูลการใช้ไฟฟ้า ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2555 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 ผลการวิจัยพบว่ากลุ่มข้อมูลบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้ามากกว่า 150 หน่วยต่อเดือน ทั้งวันทำงานและวันอาทิตย์มีช่วงเวลาที่ใช้ไฟฟ้าสูงสุดคือ 20.45 น.-22.45 และมีค่าเซนทรอยด์ในช่วงเวลาดังกล่าวคือ 454,384.59 (kWh) ในวันทำงาน และ 499,098.19 (kWh) ในวันอาทิตย์ สำหรับกลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่า 150 หน่วยต่อเดือนนั้น ช่วงเวลาที่ใช้ไฟฟ้าสูงสุดคือช่วงเวลา 18.45 น.-22.30 น. ในวันทำงาน และ 18.45 น.-21.45 น. ในวันอาทิตย์ โดยมีค่าเซนทรอยด์คือ 65,395.48 (kWh) ในวันทำงาน และ 69,653.51 (kWh) ในวันอาทิตย์

คำสำคัญ: การแบ่งกลุ่มแบบเคมีน, ลักษณะการใช้ไฟฟ้า, ปริมาณการใช้ไฟฟ้า

Abstract

The objective of this research is to study the electrical behavior of using residential that used electricity over 150 units per month and less than 150 units per month in Region 2, (Central Thailand) Chon Buri Province. In each day, the electrical data are recorded every 15 minutes until 24 hours. The electrical data consist of the average electricity usage on workday and Sunday. The data are clean and analyzed by using k means algorithm. This research studies the electrical data from January 2012 to December 2019. The result shows that on the workday and Sunday, the residential that used electricity more than 150 units per month has the highest of using electricity consumption in the period of 08.45 p.m. to 10.45 p.m. The centroid in the period is 454,384.59 (kWh) on workday and 499,098.19 (kWh) on Sunday. For the residential that used electricity less than 150 units per month has the highest of using electricity consumption in the period of 06.45 p.m. – 10.30 p.m. on the workday and 06.45 p.m. – 09.45 p.m. on the Sunday. The centroid in the period is 65,395.48 (kWh) on workday and 69,653.51 (kWh) on Sunday.

Keywords: k-means clustering, load profile, electricity utilization

Introduction

การใช้พลังงานไฟฟ้าถือเป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำรงชีวิตประจำวัน มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจ เป็นโครงสร้างพื้นฐานในการบริหารประเทศและมีแนวโน้มการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นในแต่ละปี อย่างไรก็ตามประเทศไทยมีปริมาณกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้าที่จำกัดรวมทั้งประเทศไทยได้ใช้พลังงานที่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นหลัก โดยในปี พ.ศ. 2562 ได้ใช้พลังงานจากฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานสำหรับผลิตไฟฟ้าถึง 74.20% โดยพลังงานดังกล่าวได้มีการนำเข้าจากต่างประเทศเป็นหลัก นอกจากนี้พลังงานจากฟอสซิลจะมีการปล่อยก๊าซ CO₂ ออกมา ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้พลังงานทดแทนเป็นอีกหนึ่งทางเลือกเพื่อลดการปล่อยก๊าซดังกล่าว แต่เนื่องจากพลังงานทดแทนเป็นพลังงานที่อาศัยปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม สภาพภูมิอากาศ ภูมิประเทศ ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานทดแทนจึงไม่สามารถควบคุมได้ในแต่ละช่วงเวลา ทำให้พลังงานมีความแปรปรวนมากด้านปริมาณการผลิตไฟฟ้า ตัวอย่างปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมในแต่ละวันและแต่ละช่วงเวลาจะมีปริมาณที่ไม่เท่ากัน (Naruwit และ Kriengkrai, 2017), (Byungik และ Ken, 2019), (Shahid และคณะ, 2019) แต่หากมีการวางแผนการผลิตและใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาให้เหมาะสมก็จะสามารถใช้พลังงานจากพลังงานทดแทนได้อย่างเต็มรูปแบบดังตัวอย่างที่ ตำบลบ้านแปะ อำเภอจอมทอง จังหวัดเชียงใหม่ ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานจากการไหลของน้ำในการผลิตพลังงานไฟฟ้า (Tirapong และคณะ 2017)

การวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้ไฟฟ้า ได้ถูกศึกษาอย่างแพร่หลายในหลายลักษณะ อาทิเช่น การศึกษาพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าในอาคารเรียนในวันช่วงเวลาทำงานและช่วงเวลาปิดทำการ (Mohamed และคณะ, 2016) การศึกษาพฤติกรรมการใช้พลังงานและการประหยัดพลังงานของ 17 โรงเรียนขนาดใหญ่ในเมือง เทียนจิน ประเทศจีน (Hongting และคณะ, 2019) การวิเคราะห์รูปแบบการใช้ไฟฟ้ารายวันของอาคารและความสัมพันธ์กับปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมทำให้สามารถตรวจสอบและประเมินความต้องการไฟฟ้า (Antonio และคณะ, 2018) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการพัฒนามนุษย์และการใช้พลังงานไฟฟ้า (Reza และ Koji, 2018) การศึกษาพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของบ้านที่อยู่อาศัยที่มีรายได้ในครัวเรือนที่แตกต่างกัน

ในประเทศอิสราเอล (Yuval และ Meidad, (2018)) จะเห็นว่ามีการศึกษาพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้ามากมายหลายลักษณะแต่ทุกการศึกษามีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและหาแนวทางในการใช้ไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพ

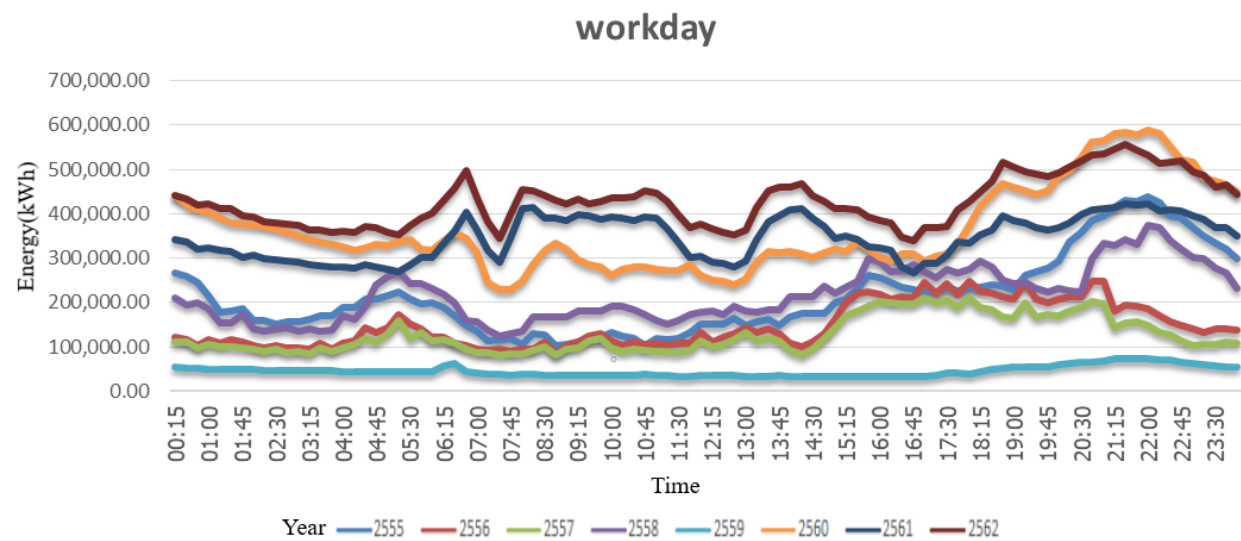
กลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยเป็นกลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้ากลุ่มสำคัญในประเทศไทย ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาของกลุ่มบ้านที่อยู่อาศัย เพื่อหาแนวทางกำหนดมาตรการประหยัดพลังงานไฟฟ้า งานวิจัยฉบับนี้จึงศึกษาพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของกลุ่มผู้ใช้ที่ศึกษาปริมาณการใช้ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา โดยใช้การแบ่งกลุ่มแบบวิธีเคมีนส์ เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 2 (ภาคกลาง) จังหวัดชลบุรี ประกอบด้วย 5 จังหวัดได้แก่ จังหวัดชลบุรี จังหวัดระยอง จังหวัดฉะเชิงเทรา จังหวัดชลบุรี จังหวัดตราด และจังหวัดฉะเชิงเทรา โดยกลุ่มเป้าหมายของการศึกษามี 2 กลุ่มคือ บ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้ามากกว่า 150 หน่วยต่อเดือน และบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่า 150 หน่วยต่อเดือน ว่ามีพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาใดมากที่สุด และเวลาใดมีการใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุด โดยแต่ละกลุ่มจะใช้ข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้า (Load profile) ในวันทำงาน (Workday) และวันอาทิตย์ (Sunday)

ระเบียบวิธีวิจัย

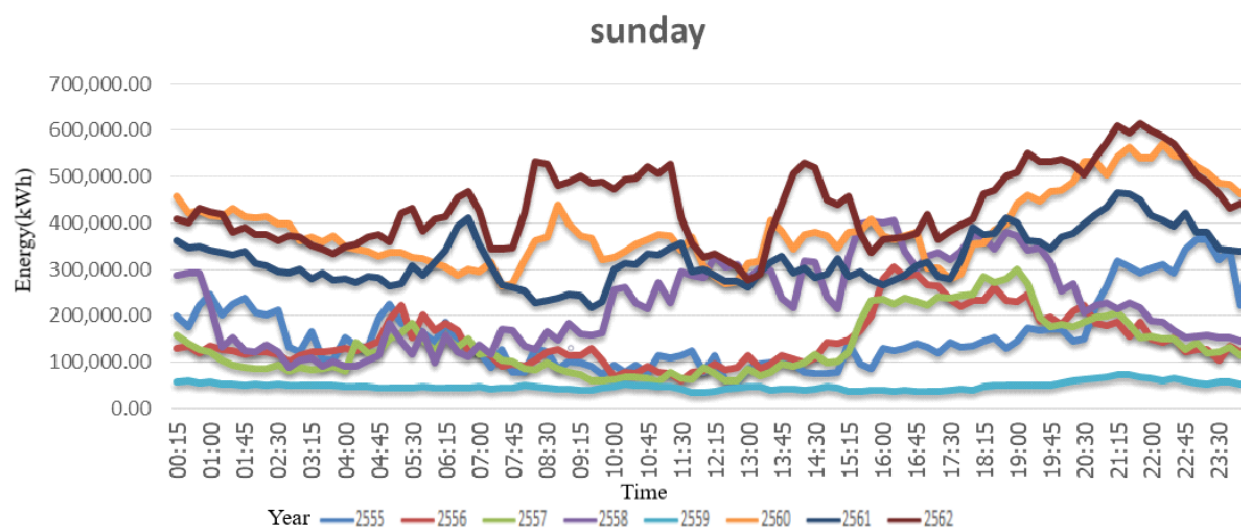
งานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้ไฟฟ้า โดยใช้การจัดกลุ่มแบบเคมีนส์ การแบ่งกลุ่มวิธีเคมีนส์ ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยนี้คือข้อมูลพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้ามากกว่า 150 หน่วยต่อเดือน และบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่า 150 หน่วยต่อเดือน ที่อยู่ในเขตพื้นที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 2 (ภาคกลาง) จังหวัดชลบุรี ประกอบด้วย 5 จังหวัดได้แก่ จังหวัดชลบุรี จังหวัดระยอง จังหวัดฉะเชิงเทรา จังหวัดชลบุรี จังหวัดตราด และจังหวัดฉะเชิงเทรา โดยจะบันทึกเป็นค่ากำลังไฟฟ้ากิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh) โดยค่าจะถูกบันทึกและเฉลี่ยทุก ๆ 15 นาที การบันทึกจะเริ่มตั้งแต่วันที่ 00.00 น. และค่าแรกของแต่ละวันคือ กำลังไฟฟ้ารวมเฉลี่ยในช่วงเวลา 00.00 ถึง 00.15 ของแต่ละวัน โดยข้อมูลพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าที่นำมาวิเคราะห์ประกอบด้วย ข้อมูลพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยของวันทำงานและวันอาทิตย์ ตัวอย่างข้อมูลพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงปี พ.ศ. 2555 - 2562 ของกลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยดังแสดงในรูปที่ 1 ถึง 4 โดยในรูปที่ 1 และ 2 แสดงพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้ามากกว่า 150 หน่วยต่อเดือนในวันทำงานและวันอาทิตย์ตามลำดับ สำหรับรูปที่ 3 และ 4 แสดงพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานและพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าในวันอาทิตย์ของบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่า 150 หน่วยต่อเดือนตามลำดับ โดยแกน x แสดงช่วงเวลาในการใช้ไฟฟ้า สำหรับแกน y แสดงพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยหน่วยเป็นกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh) จากรูปที่ 1 ถึง 4 จะเห็นว่าหากต้องการวิเคราะห์ว่ากลุ่มตัวอย่างมีพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้ามากที่สุดในช่วงเวลาใด หรือน้อยที่สุดในช่วงเวลาใดนั้นทำได้ยากมาก ดังนั้นเพื่อการวิเคราะห์ที่ถูกต้องจึงใช้เทคนิคในการจัดกลุ่มข้อมูลด้วยวิธีเคมีนส์ (K-means) เพื่อช่วยในการหาช่วงเวลาที่กลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยมีพฤติกรรมใช้ไฟฟ้ามากที่สุด พฤติกรรมใช้ไฟฟ้ามาก พฤติกรรมใช้ไฟฟ้าปานกลาง พฤติกรรมใช้ไฟฟ้าน้อย และพฤติกรรมใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุด อยู่ในช่วงเวลาใด

เริ่มต้นผู้วิจัยได้ทำการทำความสะอาดข้อมูล หลังจากนั้นได้ทำการการบรรทัดฐานข้อมูลโดยใช้การแปลงซี (z transform) ขั้นตอนต่อไปได้ทำการจัดกลุ่มข้อมูลด้วยวิธีเคมีนส์ (K-means) ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

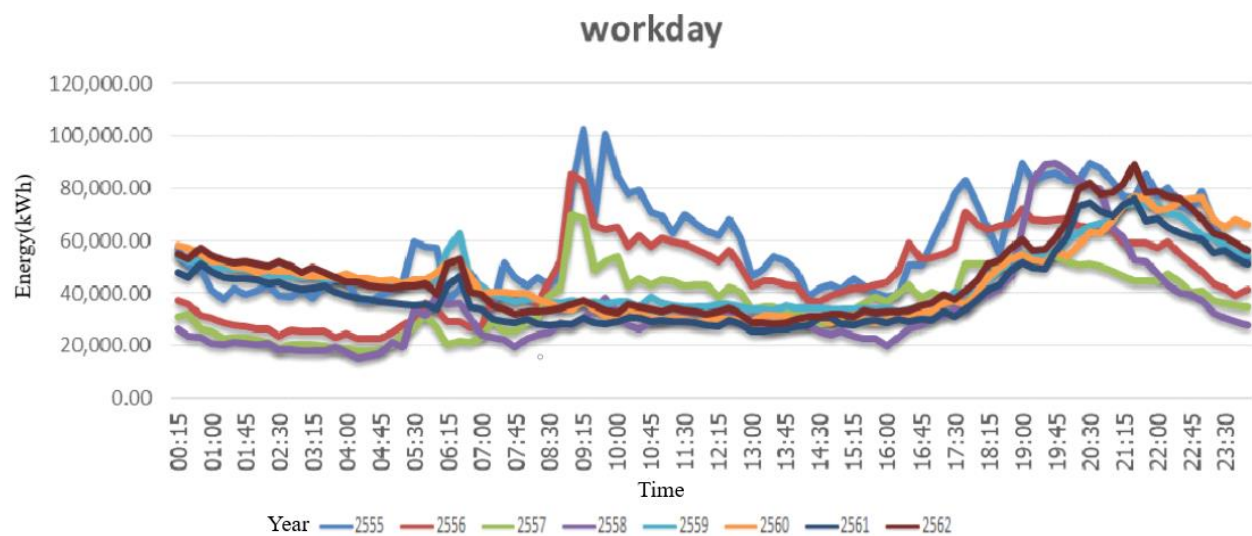
1. กำหนดจำนวนกลุ่มที่ต้องการ โดยกำหนดให้ k เท่ากับจำนวนกลุ่มที่ต้องการจัดกลุ่ม เนื่องจากผู้วิจัยต้องการทราบพฤติกรรมลักษณะการใช้ไฟฟ้าใน 5 ลักษณะคือ พฤติกรรมใช้ไฟฟ้ามากที่สุด พฤติกรรมใช้ไฟฟ้ามาก พฤติกรรมใช้ไฟฟ้าปานกลาง พฤติกรรมใช้ไฟฟ้าน้อย พฤติกรรมใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 5 กลุ่ม ($k=5$)
2. คำนวณค่าเซนทรอยด์ (Centroid) ในแต่ละกลุ่ม ในงานวิจัยนี้ทำการคำนวณค่าเซนทรอยด์จากค่าเฉลี่ยของสมาชิกในกลุ่ม



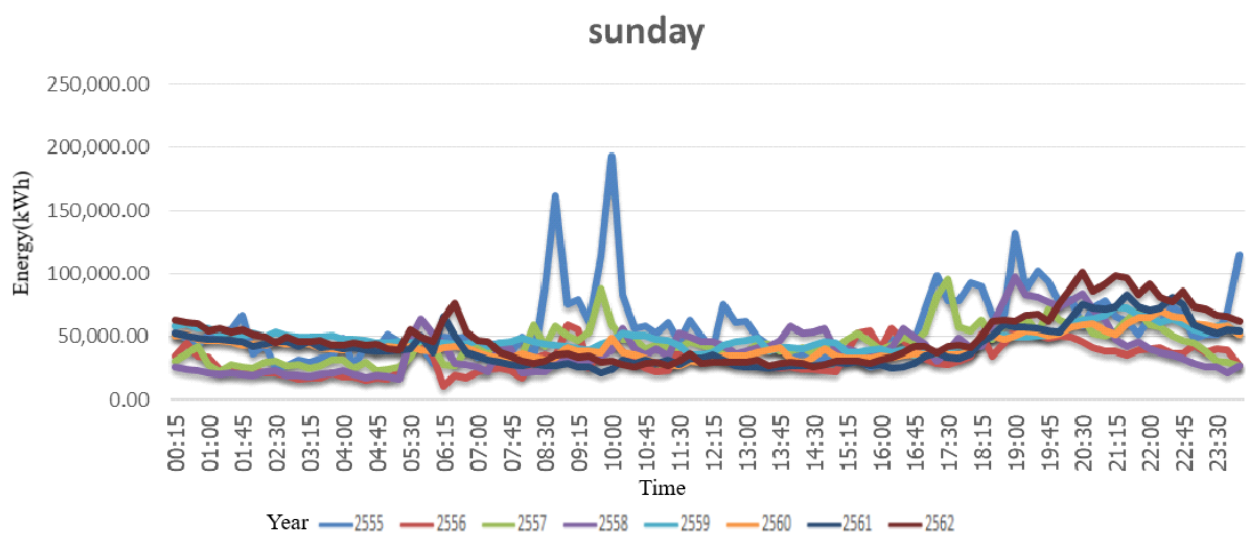
รูปที่ 1 พฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยในวันทำงานช่วงปี พ.ศ. 2555 - 2562 ของกลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้ามากกว่า 150 หน่วยต่อเดือน



รูปที่ 2 พฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยในวันอาทิตย์ช่วงปี พ.ศ. 2555 - 2562 ของกลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้ามากกว่า 150 หน่วยต่อเดือน



รูปที่ 3 พฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยในวันทำงานช่วงปี พ.ศ. 2555 - 2562 ของกลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่า 150 หน่วยต่อเดือน



รูปที่ 4 พฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยในวันอาทิตย์ช่วงปี พ.ศ. 2555 - 2562 ของกลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่า 150 หน่วยต่อเดือน

3. จัดกลุ่มข้อมูลใหม่โดยพิจารณาจากค่าความใกล้ชิดหรือระยะห่างของข้อมูลในกลุ่มกับตัวแทนของกลุ่มต่าง ๆ ว่าข้อมูลนั้นสมควรที่จะอยู่กลุ่มใด โดยใช้มาตรวัดระยะห่างแบบยูคลิด (Euclidean Distance)

มาตรวัดระยะห่างแบบยูคลิด (Euclidean Distance) เป็นการคำนวณระยะห่างระหว่างสองจุดใด ๆ จากปริภูมิ $R^n \rightarrow R$ เมื่อกำหนดให้

$$X \text{ แทน ข้อมูลชุดที่ 1 โดยที่ } X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_m]$$

$$Y \text{ แทน ข้อมูลชุดที่ 2 โดยที่ } Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_m]$$

$d_{X,Y}$ แทน ระยะห่างระหว่างข้อมูล X และ Y

$$\text{จะได้สมการคำนวณระยะห่างแบบยูคลิด ดังนี้ } d_{X,Y} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - y_i)^2}$$

4. ทำการปรับปรุงการจัดกลุ่มโดยย้อนกลับไปทำข้อ 2 และจะหยุดเมื่อข้อมูลสมาชิกในกลุ่มแต่ละกลุ่มนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงแล้ว

ในงานวิจัยนี้จะทำการจัดกลุ่มของข้อมูลทั้งหมด 4 ชุดข้อมูลเพื่อทำการวิเคราะห์คือ

1. พิจารณากลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้ามากกว่า 150 หน่วยต่อเดือนในชุดข้อมูลพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าในวันทำงาน

2. พิจารณากลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้ามากกว่า 150 หน่วยต่อเดือนในชุดข้อมูลพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าในวันอาทิตย์

3. พิจารณากลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่า 150 หน่วยต่อเดือนในชุดข้อมูลพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าในวันทำงาน

4. พิจารณากลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่า 150 หน่วยต่อเดือนในชุดข้อมูลพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าในวันอาทิตย์

ผลการจัดกลุ่มข้อมูล

จากการจัดกลุ่มข้อมูลพบว่า กลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้ามากกว่า 150 หน่วยต่อเดือน ในวันทำงานนั้นจะมีการใช้ไฟฟ้ามากที่สุด ในช่วงเวลา 20.45 น. - 22.45 น. ใช้ไฟฟ้ามากในช่วงเวลา 18.30 น. - 20.30 น. และ 23.00 น. - 00.15 น. ใช้ไฟฟ้าปานกลางในช่วงเวลา 06.30 น. - 06.45 น. และ 13.15 น. - 14.45 น. และ 08.15 น. - 11.30 น. ใช้ไฟฟ้าน้อย 00.30 น. - 06.15 น. และ 15.00 น. - 18.15 น. ใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุดในช่วงเวลา 07.00 น. - 08.00 น. และ 11.45 น. - 13.00 น. ดังแสดงในตารางที่ 1 และมีค่าเซนทรอยด์ของแต่ละกลุ่มคือ 454,384.59 kWh, 356,579.23 kWh, 301,181.52 kWh, 241,383.73 kWh และ 192,649.05 kWh ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 สำหรับวันอาทิตย์ มีการใช้ไฟฟ้ามากที่สุดในช่วงเวลา 20.45 น. - 22.45 น. ใช้ไฟฟ้ามากในช่วงเวลา 10.00 น. - 11.15 น. และ 13.45 น. - 15.15 น. และ 18.15 น. - 20.30 น. และ 23.00 น. - 00.00 น. ใช้ไฟฟ้าปานกลางในช่วงเวลา 08.00 น. - 09.45 น. และ 11.30 น. - 13.30 น. ใช้ไฟฟ้าน้อยในช่วงเวลา 05.00 น. - 07.45 น. และ 15.30 น. - 18.00 น. ใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุดในช่วงเวลา 00.15 น. - 04.45 น. ดังแสดงใน ตารางที่ 1 และมีค่าเซนทรอยด์ของแต่ละกลุ่มคือ 499,098.19 kWh, 356,489.29 kWh, 304,355.16 kWh, 240,301.94 kWh และ 181,824.40 kWh ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ช่วงเวลาการใช้ไฟฟ้าจำแนกตามพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าสำหรับกลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้ามากกว่า 150 หน่วยต่อเดือน

พฤติกรรมการใช้ไฟฟ้า	ช่วงเวลาสำหรับวันทำงาน	ช่วงเวลาสำหรับวันอาทิตย์
ใช้ไฟฟ้ามากที่สุด	20.45 น. - 22.45 น.	20.45 น. - 22.45 น.
ใช้ไฟฟ้ามาก	18.30 น. - 20.30 น. และ 23.00 น. - 00.15 น.	10.00 น. - 11.15 น. และ 13.45 น. - 15.15 น. และ 18.15 น. - 20.30 น. และ 23.00 น. - 00.00 น.
ใช้ไฟฟ้าปานกลาง	06.30 น. - 06.45 น. และ 13.15 น. - 14.45 น. และ 08.15 น. - 11.30 น.	08.00 น. - 09.45 น. และ 11.30 น. - 13.30 น.
ใช้ไฟฟ้าน้อย	00.30 น. - 06.15 น. และ 15.00 น. - 18.15 น.	05.00 น. - 07.45 น. และ 15.30 น. - 18.00 น.
ใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุด	07.00 น. - 08.00 น. และ 11.45 น. - 13.00 น.	00.15 น. - 04.45 น.

ตารางที่ 2 ค่าเซนทรอยด์จำแนกตามพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าสำหรับกลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้ามากกว่า 150 หน่วยต่อเดือน

พฤติกรรมการใช้ไฟฟ้า	ค่าเซนทรอยด์สำหรับวันทำงาน (kWh)	ค่าเซนทรอยด์สำหรับวันอาทิตย์(kWh)
ใช้ไฟฟ้ามากที่สุด	454,384.59	499,098.19
ใช้ไฟฟ้ามาก	356,579.23	356,489.29
ใช้ไฟฟ้าปานกลาง	301,181.52	304,355.16
ใช้ไฟฟ้าน้อย	241,383.73	240,301.94
ใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุด	192,649.05	181,824.40

สำหรับกลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่า 150 หน่วยต่อเดือน ในวันทำงานนั้นจะมีการใช้ไฟฟ้ามากที่สุดในช่วงเวลา 18.45 น. – 22.30 น. ใช้ไฟฟ้ามากในช่วงเวลา 08.45 น. – 09.00 น. และ 17.45 น. – 18.30 น. และ 22.45 น. – 23.30 น. ใช้ไฟฟ้าปานกลางในช่วงเวลา 23.45 น. – 00.45 น. และ 09.15 น. – 10.45 น. และ 17.15 น. – 17.30 น. ใช้ไฟฟ้าน้อย 01.00 น. - 04.00 น. และ 05.15 น. - 06.45 น. และ 11.00 น. – 13.00 น. และ 16.15 น. – 17.00 น. ใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุดในช่วงเวลา 04.15 น. – 05.00 น. และ 07.00 น. – 08.30 น. และ 13.15 น. – 16.00 น. ดังแสดงในตารางที่ 3 และมีค่าเซนทรอยด์ของแต่ละกลุ่มคือ 65,395.48 kWh, 59,884.27 kWh, 48,422.89 kWh, 38,900.53 kWh และ 28,533.80 kWh ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4 สำหรับวันอาทิตย์ มีการใช้ไฟฟ้ามากที่สุดในช่วงเวลา 18.45 น. – 21.45 น. ใช้ไฟฟ้ามากในช่วงเวลา 09.45 น. – 10.15 น. และ 18.15 น. – 18.30 น. และ 22.00 น. – 22.45 น. ใช้ไฟฟ้าปานกลางในช่วงเวลา 22.00 น. - 00.45 น. และ 05.30 น. - 06.00 น. และ 08.30 น. – 09.15 น. และ 16.45 น. – 18.30 น. ใช้ไฟฟ้าน้อยในช่วงเวลา 01.00 น. - 01.45 น. และ 06.15 น. – 06.45 น. และ 09.30 น. ใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุดในช่วงเวลา 02.00 – 05.15 น. และ 07.00 น. – 08.15 น. และ 10.30 น. – 16.30 ดังแสดงใน ตารางที่ 3 และมีค่าเซนทรอยด์ของแต่ละกลุ่มคือ 69,653.51 kWh, 60,980.31 kWh, 48,638.54 kWh, 40,203.73 kWh และ 27,278.61 kWh ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ช่วงเวลาการใช้ไฟฟ้าจำแนกตามพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าสำหรับกลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่า 150 หน่วยต่อเดือน

พฤติกรรมการใช้ไฟฟ้า	ช่วงเวลาสำหรับวันทำงาน	ช่วงเวลาสำหรับวันอาทิตย์
ใช้ไฟฟ้ามากที่สุด	18.45 น. – 22.30 น.	18.45 น. – 21.45 น.
ใช้ไฟฟ้ามาก	08.45 น. – 09.00 น. และ 17.45 น. – 18.30 น. และ 22.45 น. – 23.30 น.	09.45 น. – 10.15 น. และ 18.15 น. – 18.30 น. และ 22.00 น. – 22.45 น.
ใช้ไฟฟ้าปานกลาง	23.45 น. – 00.45 น. และ 09.15 น. – 10.45 น. และ 17.15 น. – 17.30 น.	22.00 น. - 00.45 น. และ 05.30 น.- 06.00 น. และ 08.30 น. – 09.15 น. และ 16.45 น. – 18.30 น.
ใช้ไฟฟ้าน้อย	01.00 น. - 04.00 น. และ 05.15 น.- 06.45 น. และ 11.00 น. – 13.00 น. และ 16.15 น. – 17.00 น.	01.00 น. - 01.45 น. และ 06.15 น. – 06.45 น. และ 09.30 น.
ใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุด	04.15 น. – 05.00 น. และ 07.00 น. – 08.30 น. และ 13.15 น. – 16.00 น.	02.00 น. – 05.15 น. และ 07.00 น. – 08.15 น. และ 10.30 น. – 16.30

ตารางที่ 4 ค่าเซนทรอยด์จำแนกตามพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าสำหรับกลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่า 150 หน่วยต่อเดือน

พฤติกรรมการใช้ไฟฟ้า	ค่าเซนทรอยด์สำหรับวันทำงาน (kWh)	ค่าเซนทรอยด์สำหรับวันอาทิตย์(kWh)
ใช้ไฟฟ้ามากที่สุด	65,395.48	69,653.51
ใช้ไฟฟ้ามาก	59,884.27	60,980.31
ใช้ไฟฟ้าปานกลาง	48,422.89	48,638.54
ใช้ไฟฟ้าน้อย	38,900.53	40,203.73
ใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุด	28,533.80	27,278.61

วิเคราะห์และสรุปผล

จากการศึกษาพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของกลุ่มข้อมูลบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้ามากกว่า 150 หน่วยต่อเดือนและกลุ่มข้อมูลบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่า 150 หน่วยต่อเดือน ในเดือนมกราคม พ.ศ. 2555 ถึงเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2562 ด้วยวิธีเคมีนส์พบว่ากลุ่มข้อมูลบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้ามากกว่า 150 หน่วยต่อเดือน ทั้งวันทำงานและวันอาทิตย์มีช่วงเวลาที่ใช้ไฟฟ้ามากที่สุดคือ 20.45 น. - 22.45 น. โดยมีค่าเซนทรอยด์ในช่วงเวลาดังกล่าวคือ 454,384.59 (kWh) และ 499,098.19 (kWh) ตามลำดับ สำหรับกลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่า 150 หน่วยต่อเดือนนั้น ช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้ามากที่สุดคือ 18.45 น. – 22.30 น. ในวันทำงาน และ 18.45 น. – 21.45 น. ในวันอาทิตย์ และมีค่าเซนทรอยด์ในช่วงเวลาดังกล่าวคือ 65,395.48 (kWh) และ 69,653.51 (kWh) ตามลำดับ จากการพิจารณาช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้ามากที่สุดพบว่าพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของทั้งสองกลุ่มมีความสอดคล้องกันคือ จะมีการใช้ไฟฟ้ามากที่สุดในช่วงเวลา 20.45 น. - 21.45 น. และค่าเซนทรอยด์แสดงให้เห็นว่าในวันอาทิตย์จะมีพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าสูงกว่าวันทำงาน ช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุดของกลุ่มข้อมูลบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้ามากกว่า 150 หน่วยต่อเดือนคือเวลา 07.00 น. - 08.00 น. และ 11.45 น. - 13.00 น. ใน

วันทำงาน และในช่วงเวลา 07.15 น.-12.15 น.ในวันอาทิตย์ โดยมีค่าเซนทรอยด์ในช่วงเวลาที่ใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุดคือ 192,649.05 (kWh)ในวันทำงาน และ 181,824.40 (kWh) ในวันอาทิตย์ สำหรับกลุ่มข้อมูลบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่า 150 หน่วยต่อเดือน คือช่วงเวลา 04.15 น. – 05.00 น. และ 07.00 น. – 08.30 น. และ 13.15 น. – 16.00 น. ในวันทำงาน และในช่วงเวลา 02.00 น. – 05.15 น. และ 07.00 น. – 08.15 น. และ 10.30 น. –16.30 ในวันอาทิตย์ โดยมีค่าเซนทรอยด์ในช่วงเวลาที่ใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุดคือ 28,533.80 (kWh)ในวันทำงาน และ 27,278.61 (kWh) ในวันอาทิตย์ ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าต่ำที่สุดของทั้งสองกลุ่มข้อมูล ในวันทำงานมีความสอดคล้องกันคือ มีการใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุดในช่วงเวลา 07.00 น. - 08.00 น.สำหรับวันอาทิตย์ได้มีความสอดคล้องกันในช่วงเวลา 02.00 น. - 04.45 น. จากข้อสรุปดังกล่าวพบว่าในช่วงเวลา 20.45 น. - 21.45 น. มีการใช้ไฟฟ้ามากที่สุดของกลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยทั้งสองกลุ่มทั้งในวันทำงานและวันอาทิตย์ สำหรับสาเหตุที่มีการใช้ไฟฟ้ามากที่สุดของกลุ่มบ้านที่อยู่อาศัยในช่วงเวลาดังกล่าวผู้วิจัยมีความเห็นว่าเนื่องจาก มีการใช้ไฟฟ้าเพื่อแสงส่องสว่าง รวมทั้งการใช้งานโทรทัศน์และเครื่องปรับอากาศ ดังนั้น ควรณรงค์ที่จะปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้ไฟในช่วงดังกล่าว ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยในอนาคต ผู้วิจัยเห็นว่าควรศึกษาข้อมูลผู้ใช้ไฟฟ้ากลุ่มอื่น ๆ อาทิเช่น กลุ่มกิจการขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และ ขนาดกลาง นอกจากนี้ควรขยายกลุ่มตัวอย่างข้อมูลเป็นทั่วประเทศไทย และค้นหาสาเหตุที่ทำให้มีการใช้ไฟฟ้าสูงของแต่ละกลุ่มข้อมูลเพื่อหาแนวทางกำหนดมาตรการประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งนำผลการวิเคราะห์ช่วยในการพิจารณาอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate: TOU Rate) สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละกลุ่มและแต่ละช่วงเวลา

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

เอกสารอ้างอิง

- Moran, A., & Fuertes, J. J. (2013). Analysis of electricity consumption profiles in public buildings with dimensionality reduction techniques. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26 (8), 1872-1880.
- Chang, B., & Starcher, K. (2019) Evaluation of wind and solar energy investments in Texas. *Renewable Energy*, 132, 1348-1359.
- Ma, H., Lai, J., Li, C., Yang, F., & Li, Z. (2019). Analysis of school building energy consumption in Tianjin, China. *Energy Procedia*, 158, 3476-3481.
- Ouf, M., Issa, M., & Merkel, P. (2016). Analysis of real-time electricity consumption in Canadian school buildings. *Energy and Buildings*, 128, 530-539.
- Thongyai, N., & Assawamartbunlue, K. (2017). Wind atlas of Chanthaburi and Trat provinces, Thailand. *Energy Procedia*, 141, 389-393.
- Nadimi, R., & Tokimatsu, K. (2018). Modeling of quality of life in terms of energy and electricity consumption. *Applied Energy*, 212, 1282-1294.
- Ali, S., Taweekun, J., Techato, K., Waewsak, J., & Gyawali, S. (2019). GIS based site suitability assessment for wind and solar farms in Songkhla, Thailand. *Renewable Energy*, 132, 1360-1372.

- Kasirawat, T., Boonsiri, P., & Saksornchai, T. (2017). PEA microgrid design for coexistence with local community and environment: Case study at Khun pae village Thailand. In 2017 *IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia)* (pp. 1-5). IEEE
- Damari, Y., & Kissinger, M. (2018). An integrated analysis of households' electricity consumption in Israel. *Energy Policy*, 119, 51-58.

Research Article

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการจัดทำโครงการนโยบายของ รัฐบาลที่ช่วยเหลือเกษตรกรที่เป็นหนี้ด้อยคุณภาพ ที่เข้าร่วม โครงการพักชำระหนี้ข้าว ปี 2559/60

An analysis of the effectiveness of the government policy program for assisting farmers in non-performing loan from participation in the moratorium project on rice in the year 2016/17

สุภโชค จันติมา¹, กุลิสรา เทดไพรสันต์¹, ธีรภัทรวีร์ สุขสินสิริวัฒนา¹ และวิกานดา ผาพันธุ์^{1*}

Supachok Jantima¹, Kulisara Toedprisan¹, Teerapataravee Suppasinsiriwattana¹ and Wikanda Phaphan^{1*}

¹ภาควิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประเทศไทย

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

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

Received: 21/04/2020; Revised: 30/11/2020; Accepted: 28/03/2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลสำเร็จของการจัดทำโครงการนโยบายของรัฐบาลที่ช่วยเหลือเกษตรกรที่เป็นหนี้ด้อยคุณภาพ (non-performing loan : NPLs) ที่เข้าร่วมโครงการพักชำระหนี้ข้าว ปี 2559/60 จากการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นด้วยสถิติพรรณนา (descriptive statistics) พบว่าโครงการพักชำระหนี้ข้าว ปี 2559/60 ไม่สามารถช่วยเหลือเกษตรกรได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ส่งผลทำให้เกษตรกรส่วนหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงสถานะหนี้ปกติเป็นสถานะหนี้ NPLs ทำให้ธนาคารเกิดค่าใช้จ่ายในการจัดการหนี้ที่ไม่ก่อให้เกิดรายได้มากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาปัจจัยที่ก่อให้เกิดหนี้ NPLs จากการวิเคราะห์พฤติกรรมของเกษตรกรที่เข้าร่วมโครงการแบ่งออกเป็น 3 ด้าน ได้แก่ ด้านการชำระยอดเงินดอกเบี้ยสะสม ด้านการชำระเงินต้นคงเหลือ และด้านการเปลี่ยนแปลงสถานะหนี้ NPLs จากจังหวัดนครสวรรค์ จังหวัดสุรินทร์ และจังหวัดพัทลุง รวมทั้งสิ้น 118,508 คน

ผลการวิจัยพบว่าเกษตรกรที่มีสถานะหนี้ NPLs ที่เข้าร่วมโครงการ เมื่อสิ้นสุดโครงการมีจำนวนลดลง คิดเป็นร้อยละ 22.84 ของเกษตรกรที่เป็นสถานะหนี้ NPLs ทั้งหมด มีเกษตรกรที่เปลี่ยนแปลงจากสถานะหนี้ปกติไปเป็นสถานะหนี้ NPLs จำนวน 6 คน เนื่องจากมีผลมาจากเปลี่ยนแปลงโครงการระหว่างที่เข้าร่วมโครงการพักชำระหนี้ ข้าว ปี 2559/60 ยอดการชำระเงินต้นลดลง ร้อยละ 36.88 และยอดการชำระดอกเบี้ยสะสมเพิ่มขึ้น ร้อยละ 42.59 สรุปว่า เกษตรกรที่ยังเป็นหนี้ NPLs ตั้งแต่ก่อนเข้าร่วม จนถึงสิ้นสุดโครงการก็ยังไม่มีการชำระหนี้ หรือผัดผ่อนการชำระหนี้เหมือนเดิม ส่วนปัจจัยที่ส่งผลต่อการชำระเงิน ได้แก่ ปัจจัยทางด้านพฤติกรรมของเกษตรกร และด้านผลกระทบภายนอก คือ การย้ายหรือการเปลี่ยนแปลงโครงการในระหว่างและสิ้นสุดโครงการซึ่งส่งผลกระทบต่อเกษตรกร นอกจากนี้จากผลการจัดกลุ่มพฤติกรรมของเกษตรกรพบว่าโครงการพักชำระหนี้ต้นเงินและลดดอกเบี้ยเกษตรกรผู้ปลูกข้าว ปี 2559/60 นั้นมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับเกษตรกรเฉพาะกลุ่มเกษตรกรที่ชำระดอกเบี้ยได้บางส่วน เมื่อสิ้นสุดโครงการ ที่จำนวนเงินกู้ต่ำ (ไม่เกิน 500,000 บาท)

คำสำคัญ การวิเคราะห์พฤติกรรมการชำระเงินของเกษตรกร การจัดการหนี้ NPLs ผลสำเร็จของการจัดการ-โครงการนโยบายรัฐบาล หนี้ด้อยคุณภาพ

Abstract

The purpose of this study was to study the effectiveness of the government policy program for assisting farmers in non-performing loan (NPLs) from participation in the rice moratorium project 2016/17. The data was analyzed by descriptive statistics which it was found that the rice moratorium project 2016/17 was unable to help farmers enough, some of whom changed from being the status of normal debt to the status of NPLs' debt. Thus it causes the bank to incur expenses in managing debts which did not generate income. This research studied on factors causing NPLs' debt by analyzing farmers' behaviors from participation in the project, divided into 3 areas, namely the cumulative interest payments, the principal remaining payments, the change of the status of NPLs' debt from Nakhon Sawan, Surin, and Phatthalung provinces were a total of 118,508 people.

The results revealed at the end of the moratorium project on rice in the year 2016/17, the number of all farmers who are the status of NPLs' debt is reduced by 22.84 percent. Six farmers have changed from being the status of normal debt to the status of NPLs' debt due to the change of the moratorium project on rice in the year 2016/17. The principal remaining payments decreased by 36.88 percent and the cumulative interest payments increased by 42.59 percent. In conclusion, the farmers who are NPLs' debt from the beginning to the end of

participation in the program have still not repaid their debts or defaulted on their repayments. The factors affect repayments such as farmers' behaviors and the external impacts: transferring or changing of the project during management and the project ending. In addition, the results of grouping farmers' behaviors show that the moratorium project on the principal remaining payments and the reduction of interest rates for the farmers in the year 2016/2017 are effective and appropriate for some groups of farmers able to repay the interest at the end of the project with the low loan (not over 500,000 baht)

Keyword: Analysis of farmers' repayment behaviors, NPLs management, Effectiveness of government policy program, non-performing loan

บทนำ

ปัญหานี้เสียหรือสินเชื่อด้อยคุณภาพ (non-performing loan : NPLs) นั้นเป็นปัญหาใหญ่อย่างหนึ่งของทางสถาบันการเงิน การที่เกษตรกรมีจำนวนสินเชื่อด้อยคุณภาพ (NPLs) เพิ่มขึ้นนับว่าไม่เป็นผลดีแก่ทางสถาบันการเงินและส่งผลกระทบต่อสภาพคล่องทางการเงินเป็นอย่างมาก ซึ่งการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ นั้นโดยปกติแล้วทางสถาบันการเงินเองจะใช้ศักยภาพและความสามารถของเกษตรกรเป็นหลักในการเลือกใช้เครื่องมือแก้ปัญหาสินเชื่อด้อยคุณภาพ (NPLs) แต่ในกรณีที่การเกิดสินเชื่อด้อยคุณภาพ (NPLs) ของเกษตรกรมีสาเหตุมาจากภัยธรรมชาติ รัฐบาลจะออกนโยบายหรือมาตรการระยะหนึ่งเข้ามาช่วยเหลือและช่วยแบ่งเบาภาระของทางสถาบันการเงิน นโยบายของทางภาครัฐจึงเป็นเครื่องมือสำคัญอีกทางหนึ่งที่ช่วยลดปัญหาการเกิดสินเชื่อด้อยคุณภาพ (NPLs) แต่เนื่องจากนโยบายของทางภาครัฐที่ผ่านมาเป็นเพียงการบรรเทาปัญหาระยะสั้น ๆ เท่านั้น จึงควรมีการประเมินประสิทธิภาพของนโยบายที่เข้ามาช่วยเหลือเกษตรกรเมื่อโครงการนั้นสิ้นสุดลงว่าตรงตามเป้าหมายที่ต้องการช่วยเหลือเกษตรกรอย่างแท้จริงหรือไม่

จากนโยบายหรือมาตรการของรัฐบาลที่เข้ามาช่วยเหลืออย่างสม่ำเสมอ จึงเป็นที่มาของการเลือกศึกษาพฤติกรรมของเกษตรกรที่เข้าร่วมโครงการพักชำระหนี้เงินต้นและลดดอกเบี้ยเกษตรกรผู้ปลูกข้าว ปี 2559/60 “ซึ่งเป็นโครงการรัฐบาลที่ใช้เพื่อเป็นการช่วยเหลือและบรรเทาความเดือดร้อนให้แก่เกษตรกรผู้ปลูกข้าวที่ได้รับผลกระทบจากภาวะราคาผลผลิตตกต่ำปัญหาภัยแล้งขาดน้ำต้องชะลอการทำงานข้าว ส่งผลให้เกษตรกรผู้ปลูกข้าวไม่สามารถประกอบอาชีพได้ตามปกติ รวมถึงปัจจัยอื่นที่ทำให้รายได้ไม่เพียงพอต่อการใช้จ่ายของครัวเรือนและปัญหานี้สินแก่เกษตรกรลูกค้าธนาคาร ธ.ก.ส. ที่มีหนี้เงินกู้วัดดูประสงค์เพื่อการผลิตข้าวกับธนาคาร ธ.ก.ส.” (Jantima et al. , 2020) ภายใต้สมมติฐานว่าโครงการพักชำระหนี้ข้าว ปี 2559/60 สามารถช่วยเหลือเกษตรกรได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่ควรหรือไม่ เนื่องจากหากมีเกษตรกรส่วนหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงสถานะหนี้ปกติเป็นสถานะหนี้ NPLs ภายหลังจบโครงการ ก็จะทำให้ให้ธนาคารเกิดค่าใช้จ่ายในการจัดการหนี้ที่ไม่ก่อให้เกิดรายได้มากขึ้น โดย

เลือกเกษตรกรที่เข้าร่วมโครงการที่มีการใช้บริการสินเชื่อของสถาบันการเงินจาก 3 จังหวัดใน 3 ภาคของประเทศไทย ซึ่งแนวทางในการศึกษาปัญหาอันดับแรกจะทำการแบ่งกลุ่มเกษตรกรออกเป็นกลุ่ม ๆ จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากกลุ่มเกษตรกรทั้งก่อน ระหว่างและหลังเข้าร่วมโครงการเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนสถานะทางการเงินของเกษตรกร และวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเปรียบเทียบการจัดหนี้ลูกค้าของแต่ละสาขา

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาผลสำเร็จที่เกิดขึ้นจากนโยบายโครงการพักชำระหนี้ต้นเงินและลดดอกเบี้ยเกษตรกรผู้ปลูกข้าว ปี 2559/60
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางการเงินของเกษตรกรที่เข้าร่วมโครงการ และจัดกลุ่มเกษตรกรให้เหมาะสมในการเข้าร่วมโครงการ
3. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการจัดการหนี้ลูกค้าของแต่ละสาขาทั้ง 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดนครสวรรค์ จังหวัดสุรินทร์ และจังหวัดพัทลุง

วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง กลุ่มเดียวกันกับงานวิจัยของ Jantima et al. (2020) ประชากร คือ เกษตรกรที่เข้าร่วมโครงการพักชำระหนี้ต้นเงินและลดดอกเบี้ยเกษตรกรผู้ปลูกข้าว ปี 2559/60 จำนวน 500,000 คนโดยประมาณ โดยใช้ข้อมูล ณ สิ้นปีบัญชีวันที่ 31 มีนาคม 2559 กลุ่มตัวอย่าง คือ เกษตรกรที่เข้าร่วมโครงการพักชำระหนี้ต้นเงินและลดดอกเบี้ยเกษตรกรผู้ปลูกข้าว ปี 2559/60 ซึ่งในการสุ่มตัวอย่างนี้ทางธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์ เป็นผู้กำหนดกลุ่มตัวอย่าง โดยแต่ละจังหวัดเป็นตัวแทนในแต่ละภาค ได้แก่ ภาคเหนือตอนล่าง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง และภาคใต้ ทำการสุ่มเลือกภาคละ 1 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดนครสวรรค์ จังหวัดสุรินทร์ และจังหวัดพัทลุง ตามลำดับ รวมทั้งสิ้น 118,508 คน และงานวิจัยนี้สรุปผลเฉพาะ 3 จังหวัดเท่านั้น ไม่มีการอ้างอิงถึงประชากร

2. การเก็บรวบรวมข้อมูล

งานวิจัยนี้อาศัยข้อมูลของธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์ โดยใช้ข้อมูล ณ สิ้นปีบัญชีในแต่ละปี จำนวน 4 ปี คือ ณ สิ้นปีบัญชีวันที่ 31 มีนาคม 2559 วันที่ 31 มีนาคม 2560 วันที่ 31 มีนาคม 2561 และวันที่ 31 มีนาคม 2562 ซึ่งเป็นข้อมูลทุติยภูมิ (secondary source)

จากข้อมูลทุติยภูมิ (secondary source) ทำการแปลงข้อมูลให้เป็นตามระดับการวัดของข้อมูล คือ ข้อมูลเป็นมาตรวัดแบบนามบัญญัติ (nominal scale) ข้อมูลเป็นมาตรวัดอันดับ (ordinal scale) และข้อมูลเป็นมาตรวัดแบบช่วง (interval scale) โดยมีการสร้างตัวแปรดังนี้

ตัวแปรตาม ได้แก่

- | | |
|-------------------------------|--------------------------|
| 1) ยอดเงินดอกเบี้ยสะสมคงเหลือ | 2) ยอดเงินต้นสะสมคงเหลือ |
| 3) สถานะหนี้ NPLs ของเกษตรกร | |

ตัวแปรอิสระ ได้แก่

- | | |
|--|-----------------------|
| 1) อัตราดอกเบี้ย | 2) การเปลี่ยนโครงการ |
| 3) ความถี่ในการชำระเงินต้นและดอกเบี้ย | 4) สาขาของธนาคาร |
| 5) ประเภทเกษตรกร 3S | 6) เพศ |
| 7) อายุ | 8) อายุสัญญาเงินกู้ |
| 9) จำนวนเงินกู้ของเกษตรกรต่อคน | 10) วงเงินกู้รายสัญญา |
| 11) อัตราส่วนจำนวนเงินกู้กับวงเงินกู้ของเกษตรกรต่อคน | |
| 12) จำนวนครั้งในการชำระยอดเงินต้นคงเหลือ | |
| 13) จำนวนครั้งในการชำระดอกเบี้ยสะสมคงเหลือ | |

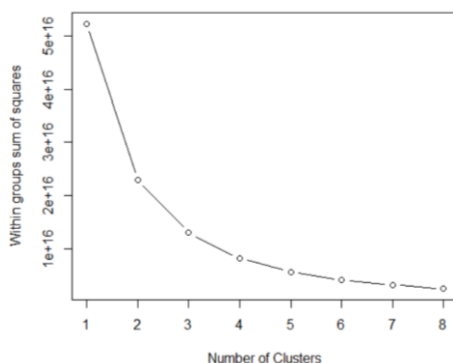
3. สถิติที่ใช้ในการวิจัย

3.1 สถิติพรรณนา (descriptive statistics) ใช้ในการนำเสนอข้อมูล และหาค่าสถิติเบื้องต้น เพื่ออธิบายลักษณะของข้อมูลและหาข้อสรุปของข้อมูลที่ทำการศึกษา โดยใช้โปรแกรม Power BI ช่วยในการประมวลผล

3.2 สถิติอนุมาน (inferential statistics)

3.2.1 การวิเคราะห์ K - Means Clustering ในการจัดกลุ่มเกษตรกรที่เข้าร่วมโครงการ โดยใช้โปรแกรมภาษา R ช่วยในการจัดกลุ่มข้อมูล ดังรูปที่ 3. โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.1.1 กำหนดหรือสุ่มค่าเริ่มต้น จำนวน k กลุ่ม และกำหนดจุดศูนย์กลางเริ่มต้น k จุด เรียกว่า จุดศูนย์กลาง (Centroid) โดยในการวิจัยนี้จะใช้วิธี Elbow ในการหาจำนวน k ที่เหมาะสมที่สุด วิธีนี้จุดที่เหมาะสมในการจัดกลุ่มคือจุดที่เหมาะสมของจำนวน Clusters คือจุดที่กราฟมีลักษณะ “หัก” มากที่สุด จากวิธี Elbow (รูปที่ 1.) ได้ $k = 3$ แสดงว่า จำนวนกลุ่มในการจัดที่เหมาะสมคือ จำนวน 3 กลุ่ม



รูปที่ 1 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์จากวิธี Elbow

```
D = read.csv("model13.csv")
library(stats)
library(cluster)
library(ggplot2)
library(tidyverse)
library(factoextra)

#elbow
set.seed(123)
wss <- (nrow(D)-1)*sum(apply(D,2,var))
for (i in 1:8) wss[i] <- sum(kmeans(D,centers=i)$withinss)
plot(1:8, wss, type="b", xlab="Number of Clusters", ylab = "within groups sum of squares")
```

รูปที่ 2 ชุดคำสั่งด้วยโปรแกรมภาษา R สำหรับการเลือกจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมด้วยวิธี Elbow

3.2.1.2 นำข้อมูลทั้งหมดจัดเข้ากลุ่ม โดยทำการหาค่าระยะห่างระหว่างข้อมูลกับจุดศูนย์กลาง หากข้อมูลไหนใกล้ค่าจุดศูนย์กลางตัวไหนที่สุดอยู่ให้กลุ่มนั้น

3.2.1.3 หาค่าเฉลี่ยแต่ละกลุ่ม และกำหนดให้เป็นค่าจุดศูนย์กลางใหม่

3.2.1.4 กลับไปยังข้อ 3.2.1.2 และเริ่มทำใหม่ จนกระทั่งค่าเฉลี่ยหรือจุดศูนย์กลางในแต่ละกลุ่มจะไม่เปลี่ยนแปลง

```
#k-means clustering with k=3
set.seed(123)
Group <- kmeans(na.omit(D), 3, nstart = 1)
Group$size
Group$cluster
S <- aggregate(D, by=list(cluster=Group$cluster),mean)
S

plot(Group$size)
plot(Group$cluster)
fviz_cluster(Group, data = D)
clusplot(D, Group$cluster, main="Group Cluster", color=TRUE, shade=TRUE, labels = 2, lines = 0)

write.csv(Group$cluster, file = "G13.csv")
write.csv(S, file = "HG13.csv")
```

รูปที่ 3 ชุดคำสั่งด้วยโปรแกรมภาษา R สำหรับการจัดกลุ่มด้วยวิธี K - Means

3.2.2 การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกพหุกลุ่ม (multinomial logistic regression) เพื่อทดสอบความสัมพันธ์ของพฤติกรรมของเกษตรกรต่อการชำระดอกเบี้ยสะสมคงเหลือ ยอดเงินต้นคงเหลือ สถานะหนี้ด้วยคุณภาพ (NPLs) ของเกษตรกร โดยสร้างตัวแบบการถดถอยโลจิสติกพหุกลุ่ม ด้วยโปรแกรม SPSS ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \alpha_i + \beta X \quad (1)$$

เมื่อ	P_i	คือ ความน่าจะเป็นสะสมของตัวแปรตามกลุ่มที่ i
	α_i	คือ ค่าคงที่สำหรับตัวแปรตามกลุ่มที่ i
	i	คือ จำนวนระดับของตัวแปรตาม
	βX	คือ $\beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k$
	k	คือ จำนวนสัมประสิทธิ์การถดถอย

3.2.2.1 ตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยโลจิสติกพหุกลุ่ม ดังนี้

3.2.2.1.1 ทดสอบความสัมพันธ์ของชุดตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม โดยมีสมมติฐานดังนี้

H_0 : ตัวแปรอิสระและตัวแปรตามไม่มีความสัมพันธ์กัน

H_1 : ตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กัน

สถิติทดสอบ คือ $\chi^2 = 2 \left[\ln L_p - \ln L_o \right]$; $df = p$ (2)

โดยที่ L_p แทน Log-likelihood ของตัวแบบที่ประกอบด้วยค่าคงที่เพียงอย่างเดียวและชุดตัวแปรอิสระ p ตัว

L_o แทน Log-likelihood ของตัวแบบที่ประกอบด้วยค่าคงที่เพียงอย่างเดียว

โดยใช้โปรแกรม SPSS ช่วยในการประมวลผล พิจารณาจากค่า p-value เทียบกับระดับนัยสำคัญทางสถิติ $\alpha = 0.05$ ซึ่งจะปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ก็ต่อเมื่อค่า p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (0.05) แสดงว่า ตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม

3.2.2.1.2 ทดสอบ Parallel line Likelihood Ratio Tests เป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยในตัวแบบแต่ละกลุ่มว่าเท่ากันหรือไม่ โดยมีสมมติฐานดังนี้

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_{j-1}$

$H_1: \beta_j$ อย่างน้อย 1 ค่าที่แตกต่างกัน; $j=1,2,\dots,j-1$

โดยที่ β_j คือเวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแบบกลุ่มที่ j (Lachin JM., 2000)

โดยใช้โปรแกรม SPSS ช่วยในการประมวลผล พิจารณาจากค่า p-value เทียบกับระดับนัยสำคัญทางสถิติ (α) 0.05 ซึ่งจะปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ก็ต่อเมื่อค่า p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ และตัวแปรอิสระทุกตัวจะต้องน้อย

กว่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญทุกตัว จึงจะปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) แสดงว่า สัมประสิทธิ์การถดถอยในตัวแบบแต่ละกลุ่มเท่ากัน

3.2.3 ตัวแบบ data envelopment analysis (DEA) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพเชิงเปรียบเทียบการจัดการการชำระหนี้ของลูกค้ายของแต่ละสาขาใน 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดนครสวรรค์ จังหวัดสุรินทร์ และจังหวัดพัทลุง โดย DEA จะทำการวัดประสิทธิภาพในรูปของสัดส่วนผลผลิตในรูปของปัจจัยการผลิต ($u'y_j / v'x_i$) ซึ่งสามารถกำหนดสมการโปรแกรมเชิงเส้นตรงได้ดังนี้

ฟังก์ชันจุดประสงค์

$$\text{Max}_{u,v}(u'y_j / v'x_i) \quad (3)$$

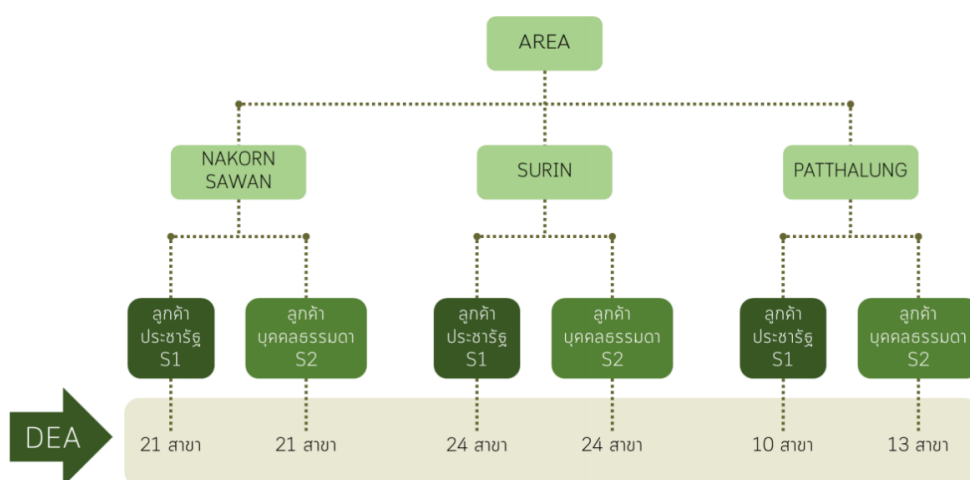
สมการเงื่อนไขบังคับ

$$(u'y_j / v'x_i) \leq 1 \quad (4)$$

$$u \geq 0, v \geq 0$$

โดย x_i คือ เวกเตอร์ของปัจจัยการผลิต
 y_j คือ เวกเตอร์ของผลผลิต
 u คือ ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของผลผลิต
 v คือ ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของปัจจัยการผลิต
 i, j คือ หน่วยผลิตที่ 1, 2, 3, ..., n

ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้โปรแกรม Matlab ช่วยในการประมวลผล โดยจัดแบ่งข้อมูลเข้าวิเคราะห์ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลเข้าวิเคราะห์ DEA

ผลการวิจัย

1. ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์

ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ คือข้อมูลของเกษตรกรที่เข้าร่วมโครงการพักชำระหนี้ต้นเงินและลดดอกเบี้ยเกษตรกรผู้ปลูกข้าว ปี 2559/60 ของรัฐบาลจาก 3 จังหวัด 3 ภูมิภาค คือ จังหวัดสุรินทร์ จังหวัดนครสวรรค์ และจังหวัดพัทลุง โดยทั้ง 3 จังหวัดนี้มีเกษตรกรเข้าร่วมโครงการทั้งสิ้น 118,508 คน เป็นเกษตรกรเข้าร่วมโครงการจากจังหวัดสุรินทร์ 80,063 คน คิดเป็นร้อยละ 67.6 จังหวัดนครสวรรค์ 37,655 คน คิดเป็นร้อยละ 31.80 และจังหวัดพัทลุง 790 คน คิดเป็นร้อยละ 0.60 สามารถทราบข้อมูลทั่วไปได้ ดังนี้

1.1 ประเภทเกษตรกร

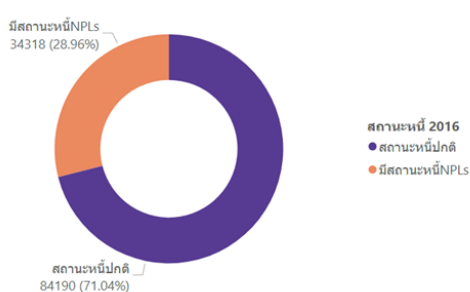
เกษตรกรของธนาคารที่เข้าร่วมโครงการมีอยู่ 2 ประเภท คือ เกษตรกรประเภทเกษตรกรประชารัฐ (S1) และเกษตรกรบุคคลธรรมดา (S2) โดยเกษตรกรประเภทเกษตรกรประชารัฐ คือ เกษตรกรประชารัฐที่มีรายได้น้อย มีจำนวน 47,150 คน คิดเป็นร้อยละ 39.79 และเกษตรกรประเภทเกษตรกรบุคคลธรรมดา มีจำนวน 71,358 คน คิดเป็นร้อยละ 60.21

1.2 จำนวนเกษตรกรที่มีหนี้ค้างชำระ

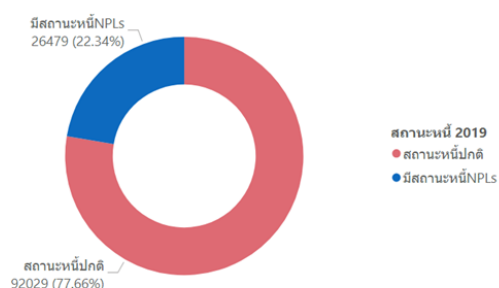
จากจำนวนหนี้รวมค้างชำระของเกษตรกรหลังจากออกโครงการ เกษตรกรที่หมดหนี้ค้างชำระทั้งหมดมีจำนวน 24,629 คน คิดเป็นร้อยละ 20.78 ของเกษตรกรทั้งหมด

1.3 จำนวนเกษตรกรในแต่ละชั้นหนี้

จากเกษตรกรผู้เข้าร่วมโครงการจาก 3 จังหวัด รวม 118,508 คน สามารถแบ่งตามชั้นหนี้ต่าง ๆ ได้ดังนี้



(ก) ก่อนเข้าโครงการ



(ข) สิ้นสุดโครงการ

รูปที่ 5 จำนวนเกษตรกรในแต่ละชั้นหนี้ทั้งก่อนเข้าร่วมโครงการและหลังออกโครงการ

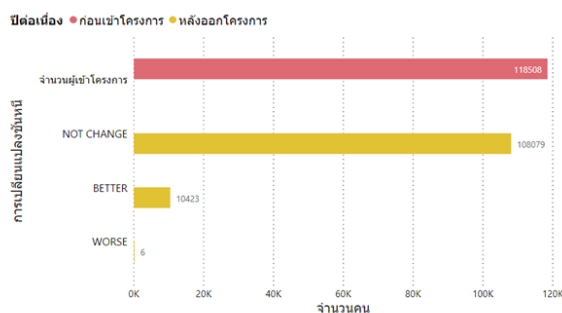
ระยะเวลาก่อนเข้าโครงการ

- ชั้นนี้ชั้นที่ 1 มีจำนวนคน 73,725 คน คิดเป็นร้อยละ 62.21
- ชั้นนี้ชั้นที่ 2 มีจำนวนคน 10,465 คน คิดเป็นร้อยละ 8.83
- ชั้นนี้ชั้นที่ 3 มีจำนวนคน 9,390 คน คิดเป็นร้อยละ 7.92
- ชั้นนี้ชั้นที่ 4 มีจำนวนคน 13,273 คน คิดเป็นร้อยละ 11.20
- ชั้นนี้ชั้นที่ 5 มีจำนวนคน 11,655 คน คิดเป็นร้อยละ 9.84

ระยะเวลาลงมือโครงการ

- ชั้นนี้ชั้นที่ 1 มีจำนวนคน 84,137 คน คิดเป็นร้อยละ 71.00
- ชั้นนี้ชั้นที่ 2 มีจำนวนคน 7,892 คน คิดเป็นร้อยละ 6.66
- ชั้นนี้ชั้นที่ 3 มีจำนวนคน 7,202 คน คิดเป็นร้อยละ 6.08
- ชั้นนี้ชั้นที่ 4 มีจำนวนคน 10,101 คน คิดเป็นร้อยละ 8.52
- ชั้นนี้ชั้นที่ 5 มีจำนวนคน 9,176 คน คิดเป็นร้อยละ 7.74

การนับจำนวนเกษตรกรที่มีสถานะหนี้เป็น NPLs หรือไม่นั้น สามารถหาได้จากชั้นนี้ โดยจะแบ่งเป็นชั้นนี้ชั้นที่ 1 และชั้นนี้ชั้นที่ 2 หมายถึง เกษตรกรที่มี “สถานะหนี้ปกติ” ส่วนชั้นนี้ชั้นที่ 3 ถึง ชั้นนี้ชั้นที่ 5 หมายถึง เกษตรกร ที่มี “สถานะหนี้ NPLs” โดยแบ่งตามระยะเวลา ดังนี้



รูปที่ 6 จำนวนเกษตรกรที่มีสถานะหนี้ NPLs

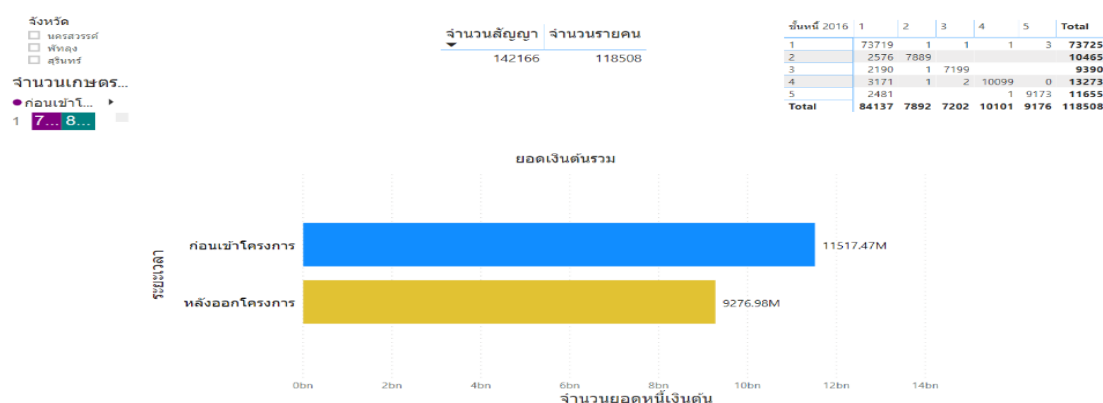
ระยะเวลาก่อนเข้าโครงการมีจำนวนเกษตรกรที่มีสถานะหนี้ NPLs 34,318 คน คิดเป็นร้อยละ 28.96 และมีสถานะหนี้ปกติ 84,190 คน คิดเป็นร้อยละ 71.04

ระยะเวลาลงมือโครงการมีจำนวนเกษตรกรที่มีสถานะหนี้ NPLs 26,479 คน คิดเป็นร้อยละ 22.34 และมีสถานะหนี้ปกติ 92,029 คน คิดเป็นร้อยละ 77.66

1.4 ยอดเงินต้นค้างชำระ

ระยะเวลาก่อนเข้าโครงการ มียอดหนี้เงินต้นค้างชำระจากผู้เข้าร่วมโครงการเป็นจำนวนเงิน 11,517.47 ล้านบาท เป็นยอดหนี้เงินต้นค้างชำระจากจังหวัดสุรินทร์ 7,270.13 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 63.2 จังหวัดนครสวรรค์ 4,150.77 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 36 และจังหวัดพัทลุง 96.57 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 0.8

ระยะเวลากลับออกโครงการ มียอดหนี้เงินต้นค้างชำระจากผู้เข้าร่วมโครงการเป็นจำนวนเงิน 9,276.98 ล้านบาท เป็นยอดหนี้เงินต้นค้างชำระจากจังหวัดสุรินทร์ 5,945.92 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 64.1 จังหวัดนครสวรรค์ 3,327.54 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 35.86 และจังหวัดพัทลุง 3.51 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 0.04

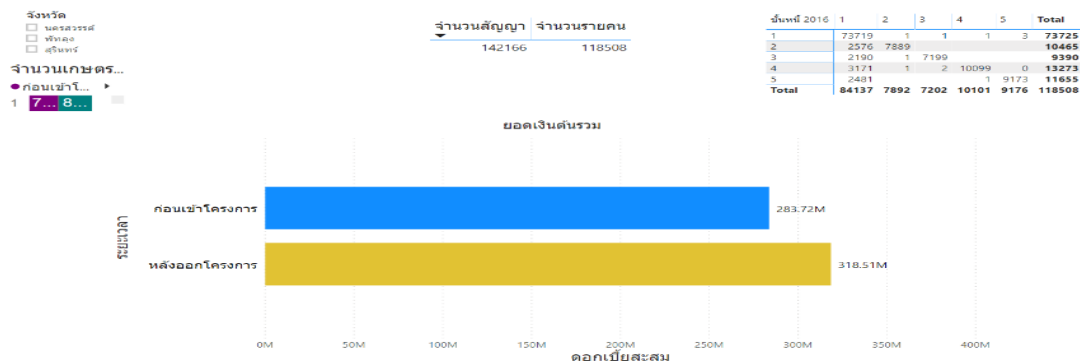


รูปที่ 7 กราฟแสดงจำนวนยอดหนี้เงินต้นรวม

1.5 ยอดดอกเบี้ยค้างชำระ

ระยะเวลาก่อนเข้าโครงการ มียอดดอกเบี้ยค้างชำระจากผู้เข้าร่วมโครงการเป็นจำนวนเงิน 283.72 ล้านบาท เป็นยอดดอกเบี้ยค้างชำระจากจังหวัดสุรินทร์ 150.62 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 53.1 จังหวัดนครสวรรค์ 128.41 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 45.26 และจังหวัดพัทลุง 4.68 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 1.64

ระยะเวลากลับออกโครงการ มียอดดอกเบี้ยค้างชำระจากผู้เข้าร่วมโครงการเป็นจำนวนเงิน 318.51 ล้านบาท เป็นยอดดอกเบี้ยค้างชำระจากจังหวัดสุรินทร์ 143 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 44.9 จังหวัดนครสวรรค์ 175.25 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 55.02 และจังหวัดพัทลุง 0.26 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 0.08



รูปที่ 8 กราฟแสดงจำนวนยอดหนี้ดอกเบี้ยรวม

2. การจัดกลุ่มโดย K-Means

งานวิจัยนี้กำหนดจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมโดยใช้วิธี Elbow เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Wongjaengjinda et al. (2016) ผลการจัดกลุ่มสามารถจัดกลุ่มได้ 3 กลุ่ม สรุปได้ดังนี้

กลุ่มที่ 1 คือ กลุ่มเกษตรกรที่ชำระดอกเบี้ยได้บางส่วน เมื่อสิ้นสุดโครงการ จำนวนเงินกู้ต่ำ (ไม่เกิน 500,000 บาท)

กลุ่มที่ 2 คือ กลุ่มเกษตรกรที่ชำระดอกเบี้ยได้บางส่วน เมื่อสิ้นสุดโครงการ จำนวนเงินกู้สูง (มากกว่า 500,000 บาท)

กลุ่มที่ 3 คือ กลุ่มเกษตรกรที่ไม่สามารถชำระดอกเบี้ยได้ เมื่อสิ้นสุดโครงการ

3. ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของเกษตรกรที่เข้าร่วมโครงการพักหนี้ข้าว ประจำปี 2559

ในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวแบบสถิติ Multinomial Logistic Regression ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมในการชำระเงินดอกเบี้ยสะสมของเกษตรกร พฤติกรรมในการชำระยอดเงินต้นของเกษตรกร และการเปลี่ยนสถานะหนี้ของเกษตรกร โดยเริ่มจากการคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปสร้างตัวแบบสถิติ โดยอาศัยผู้เชี่ยวชาญ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น Ronnaronguruk (2015) และ Lojinda (2013) ช่วยในการคัดเลือกตัวแปร

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

ผลการวิเคราะห์โดยใช้ค่า Person Correlation พบว่า ตัวแปรอิสระที่นำมาอธิบายพฤติกรรมในการชำระ
เงินดอกเบี้ยสะสมของเกษตรกร (Y_1) พฤติกรรมในการชำระยอดเงินต้นของเกษตรกร (Y_2) และการเปลี่ยนสถานะ
หนี้ของเกษตรกร (Y_3) มีความสัมพันธ์กันในระดับที่ไม่เกิน 0.5 ซึ่งหมายความว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำ

3.2 ผลการวิเคราะห์ Multinomial Logistic Regression

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์โดยใช้สถิติทดสอบอัตราส่วนความควรจะเป็น (likelihood ratio tests) ในการทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง โดยดูจากค่า $-2 \text{ Log Likelihood}$ จำนวนเกษตรกร 118,508 คน มีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 พฤติกรรมในการชำระเงินดอกเบี้ยสะสมของเกษตรกร (Y_1) ผลการพยากรณ์ได้ดังนี้

ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมในการชำระเงินดอกเบี้ยสะสมของเกษตรกร ได้แก่ อัตราดอกเบี้ย ประเภทเกษตรกร 3S อายุสัญญาเงินกู้ วงเงินกู้รายสัญญา จำนวนครั้งในการชำระยอดเงินต้นคงเหลือ และจำนวนครั้งในการชำระดอกเบี้ยสะสมคงเหลือ สามารถอธิบายความผันแปรของพฤติกรรมการชำระดอกเบี้ยสะสมของเกษตรกร (Nagelkerke - R^2) ได้ร้อยละ 60.90 ตลอดจนมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ความถูกต้องของพฤติกรรม การชำระดอกเบี้ยสะสมของเกษตรกรได้ร้อยละ 88.40 และค่า $-2 \text{ Log Likelihood}$ (3537.142) ซึ่งค่าต่ำกว่า Null model (63396.633) แสดงว่า แบบจำลองมีความเหมาะสม

3.2.2 พฤติกรรมในการชำระเงินยอดเงินต้นคงเหลือของเกษตรกร (Y_2) ผลการพยากรณ์ได้ดังนี้

ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมในการชำระยอดเงินต้นคงเหลือของเกษตรกร ได้แก่ อัตราดอกเบี้ย การเปลี่ยนโครงการ ความถี่ในการชำระ ประเภทเกษตรกร 3S อายุ อายุสัญญาเงินกู้ วงเงินกู้รายสัญญา จำนวนครั้งในการชำระ ยอดเงินต้นคงเหลือ และจำนวนครั้งในการชำระดอกเบี้ยสะสมคงเหลือสามารถอธิบายความผันแปรของพฤติกรรม การชำระยอดเงินต้นคงเหลือของเกษตรกร (Nagelkerke - R^2) ร้อยละ 69.40 ตลอดจนมีประสิทธิภาพในการ พยากรณ์ความถูกต้องของพฤติกรรมการชำระยอดเงินต้นคงเหลือของเกษตรกรได้ร้อยละ 95.80 และค่า $-2 \text{ Log Likelihood}$ (11005.919) ซึ่งค่าต่ำกว่า Null model (69014.569) แสดงว่า แบบจำลองมีความเหมาะสม

3.2.3 พฤติกรรมในการเปลี่ยนสถานะหนี้ของเกษตรกร (Y_3) ผลการพยากรณ์ได้ดังนี้

ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมในการเปลี่ยนสถานะหนี้ของเกษตรกร ได้แก่ การเปลี่ยนโครงการ ความถี่ในการ ชำระ ประเภทเกษตรกร 3S เพศ และอายุสามารถอธิบายความผันแปรของพฤติกรรมในการเปลี่ยนสถานะหนี้ของ เกษตรกร (Nagelkerke - R^2) ร้อยละ 30.20 ตลอดจนมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ความถูกต้องของพฤติกรรม การชำระยอดเงินต้นคงเหลือของเกษตรกรได้ร้อยละ 96.90 และค่า $-2 \text{ Log Likelihood}$ (3095.323) ซึ่งค่าต่ำกว่า Null model (12699.514) แสดงว่า แบบจำลองมีความเหมาะสม

4. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการจัดหนี้เกษตรกรของแต่ละสาขาทั้ง 3 จังหวัด

ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวแบบ DEA (data envelopment analysis) เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการจัดการ การชำระหนี้ของเกษตรกรในแต่ละสาขาทั้ง 3 จังหวัด การหาประสิทธิภาพนั้นต้องสร้างเส้นประสิทธิภาพขึ้นมา ซึ่งเส้นนี้จะเสมือนสาขาที่มีประสิทธิภาพสูงสุด แล้วนำสาขาอื่น ๆ มาเปรียบเทียบกับสาขาที่อยู่บนเส้นนี้ หากสาขาใดอยู่บนเส้นนี้แสดงว่า ประสิทธิภาพสูงสุด มีค่าความมีประสิทธิภาพ (efficiency score) เท่ากับ 1 หรือมี การดำเนินงานที่ดีที่สุด (best practice) สาขาที่ไม่ได้อยู่บนเส้น แสดงถึงความไม่มีประสิทธิภาพ

4.1 จังหวัดนครสวรรค์

เกษตรกรประจักษ์ (S123₁) จากการวิเคราะห์พบว่าสาขาที่มีการจัดการได้ดี 6 สาขา จาก 21 สาขา คิดเป็นร้อยละ 28.57 ของสาขาทั้งหมด มีผลรวมยอดเงินต้นที่ชำระทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดโครงการพักหนี้ข้าว 297,152,471.90 บาท คิดเป็นร้อยละ 39.57 ของยอดเงินต้นรวมทั้งหมด และผลรวมยอดเงินดอกเบี้ยสะสมที่ชำระทั้งหมด เมื่อสิ้นสุดโครงการพักหนี้ข้าว 17,255,904.95 บาท คิดเป็นร้อยละ 43.89 ของยอดเงินดอกเบี้ยสะสมทั้งหมด ดังนั้นสาขาอื่น ๆ อีก 15 สาขาที่เหลือเมื่อสิ้นสุดโครงการ ควรมีการติดตามการชำระเงินของเกษตรกรแต่ละสาขา ได้แก่ ยอดเงินต้นรวมทั้งหมด 47,791,329 บาท และยอดเงินดอกเบี้ยสะสมรวมทั้งหมด 3,647,129 บาท เพื่อให้ค่า Efficiency Score มีค่าเข้าใกล้ 1

เกษตรกรบุญคุณธรรมดา (S123₂) การวัดประสิทธิภาพจากค่า Efficiency Score มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าในสาขาที่มีการจัดเกษตรกรของสาขาได้เป็นอย่างดี จากการวิเคราะห์พบว่าสาขาที่มีการจัดการได้ดี 9 สาขา จาก 21 สาขา คิดเป็นร้อยละ 42.87 ของสาขาทั้งหมด มีผลรวมยอดเงินต้นที่ชำระทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดโครงการพักหนี้ข้าว 1,221,330,287 บาท คิดเป็นร้อยละ 47.40 ของยอดเงินต้นรวมทั้งหมด และผลรวมยอดเงินดอกเบี้ยสะสมที่ชำระทั้งหมด เมื่อสิ้นสุดโครงการพักหนี้ข้าว 33,560,804.07 บาท คิดเป็นร้อยละ 24.69 ของยอดเงินดอกเบี้ยสะสมทั้งหมด ดังนั้น 12 สาขาที่เหลือเมื่อสิ้นสุดโครงการควรมีการติดตามการชำระเงินของเกษตรกรแต่ละสาขา ได้แก่ ยอดเงินต้นรวมทั้งหมด 75,885,766 บาท และยอดเงินดอกเบี้ยสะสมรวมทั้งหมด 13,166,779 บาท เพื่อให้ค่า Efficiency Score มีค่าเข้าใกล้ 1

4.2 จังหวัดสุรินทร์

เกษตรกรประจักษ์ (S123₁) การวัดประสิทธิภาพจากค่า Efficiency Score มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าในสาขาที่มีการจัดเกษตรกรของสาขาได้เป็นอย่างดี จากการวิเคราะห์พบว่าสาขาที่มีการจัดการได้ดี 9 สาขา จาก 24 สาขา คิดเป็นร้อยละ 37.50 ของสาขาทั้งหมด มีผลรวมยอดเงินต้นที่ชำระทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดโครงการพักหนี้ข้าว 1,917,526,210 บาท คิดเป็นร้อยละ 71.27 ของชำระยอดเงินต้นรวมทั้งหมด และผลรวมยอดเงินดอกเบี้ยสะสมที่ชำระทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดโครงการพักหนี้ข้าว 34,420,077.47 บาท คิดเป็นร้อยละ 66.88 ของยอดเงินดอกเบี้ยสะสมทั้งหมด ดังนั้นสาขาอื่นๆ อีก 15 สาขาที่เหลือเมื่อสิ้นสุดโครงการ ควรมีการติดตามการชำระเงินของเกษตรกรแต่ละสาขา ได้แก่ ยอดเงินต้นรวมทั้งหมด 67,524,233 บาท และยอดเงินดอกเบี้ยสะสมรวมทั้งหมด 1,178,991 บาท เพื่อให้ค่า Efficiency Score มีค่าเข้าใกล้ 1

เกษตรกรบุญคุณธรรมดา (S123₂) จากการวิเคราะห์พบว่าสาขาที่มีการจัดการได้ดี 10 สาขา จาก 24 สาขา คิดเป็นร้อยละ 41.67 ของสาขาทั้งหมด มีผลรวมยอดเงินต้นที่ชำระทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดโครงการพักหนี้ข้าว 2,369,744,614 บาท คิดเป็นร้อยละ 72.80 ของชำระยอดเงินต้นรวมทั้งหมด และผลรวมยอดเงินดอกเบี้ยสะสมที่ชำระทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดโครงการพักหนี้ข้าว 62,115,498.51 บาท คิดเป็นร้อยละ 67.87 ของยอดเงินดอกเบี้ยสะสมทั้งหมด ดังนั้น 14 สาขาที่เหลือเมื่อสิ้นสุดโครงการ ควรมีการติดตามการชำระเงินของเกษตรกรแต่ละสาขา ได้แก่

ยอดเงินต้นรวมทั้งหมด 42,398,508 บาท และยอดเงินดอกเบี้ยสะสมรวมทั้งหมด 3,573,002 บาท เพื่อให้ค่า Efficiency Score มีค่าเข้าใกล้ 1

4.3 จังหวัดพัทลุง

เกษตรกรประจักษ์ (S123₁) การวัดประสิทธิภาพจากค่า Efficiency Score มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าในสาขา มีการจัดเกษตรกรของสาขาได้เป็นอย่างดี จากการวิเคราะห์พบว่าสาขาที่มีการจัดการได้ดี 8 สาขา จาก 10 สาขา คิดเป็นร้อยละ 80.00 ของสาขาทั้งหมด มีผลรวมยอดเงินต้นที่ชำระทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดโครงการพักหนี้ข้าว 2,012,339.33 บาท คิดเป็นร้อยละ 64.70 ของชำระยอดเงินต้นรวมทั้งหมด และผลรวมยอดเงินดอกเบี้ยสะสมที่ชำระทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดโครงการพักหนี้ข้าว 186,151 บาท คิดเป็นร้อยละ 83.83 ของยอดเงินดอกเบี้ยสะสมทั้งหมด ดังนั้น จำนวน 2 สาขา ที่เหลือเมื่อสิ้นสุดโครงการ ควรมีการติดตามการชำระเงินของเกษตรกรแต่ละสาขา ได้แก่ ยอดเงินต้นรวมทั้งหมด 35,800 บาท และยอดเงินดอกเบี้ยสะสมรวมทั้งหมด 1,845 บาท เพื่อให้ค่า Efficiency Score มีค่าเข้าใกล้ 1

เกษตรกรบุคคลธรรมดา (S123₂) จากการวิเคราะห์พบว่าสาขาที่มีการจัดการได้ดี 8 สาขา จาก 13 สาขา คิดเป็นร้อยละ 61.54 ของสาขาทั้งหมด มีผลรวมยอดเงินต้นที่ชำระทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดโครงการพักหนี้ข้าว 399,477.40 บาท คิดเป็นร้อยละ 12.93 ของชำระยอดเงินต้นรวมทั้งหมด และผลรวมยอดเงินดอกเบี้ยสะสมที่ชำระทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดโครงการพักหนี้ข้าว 50,592.48 บาท คิดเป็นร้อยละ 21.51 ของยอดเงินดอกเบี้ยสะสมทั้งหมด ดังนั้น 5 สาขา ที่เหลือเมื่อสิ้นสุดโครงการ ควรมีการติดตามการชำระเงินของเกษตรกรแต่ละสาขา ได้แก่ ยอดเงินต้นรวมทั้งหมด 368,538 บาท และยอดเงินดอกเบี้ยสะสมรวมทั้งหมด 4,713 บาท เพื่อให้ค่า Efficiency Score มีค่าเข้าใกล้ 1

อธิบายผลการวิจัย

1. ข้อมูลทั่วไปพฤติกรรมของเกษตรกร

เกษตรกรที่เข้าร่วมโครงการมีจำนวน 118,508 คน เป็นเกษตรกรประเภทเกษตรกรประจักษ์หรือผู้มีรายได้น้อย (S1) จำนวน 47,150 คน คิดเป็นร้อยละ 39.79 เกษตรกรประเภทเกษตรกรบุคคลธรรมดา (S2) จำนวน 71,358 คน คิดเป็นร้อยละ 60.21 เมื่อสิ้นสุดโครงการมียอดหนี้สะสมคงเหลือลดลง คิดเป็นร้อยละ 18.69 และมีคนหมดหนี้ค้างชำระ 24,629 คน คิดเป็นร้อยละ 20.78 ของผู้เข้าร่วมโครงการทั้งหมด ก่อนเข้าร่วมโครงการ มีเกษตรกรที่เป็นหนี้ NPLs จำนวน 34,318 คน คิดเป็นร้อยละ 28.96 ของผู้เข้าร่วมโครงการทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดโครงการมีจำนวนเกษตรกรที่เป็นหนี้ NPLs จำนวน 26,474 คน ลดลงจำนวน 7,839 คน คิดเป็นร้อยละ 22.84 และคนเปลี่ยนแปลงจากสถานะหนี้ปกติ เป็นสถานะหนี้ NPLs เมื่อสิ้นสุดโครงการมีจำนวน 5 คน ทำให้มียอดดอกเบี้ยสะสมคงเหลือเพิ่มมากขึ้น ร้อยละ 42.59 และยอดเงินต้นลดลงร้อยละ 36.88 ของผู้เข้าร่วมโครงการทั้งหมด อีกทั้งการย้ายหรือเปลี่ยนแปลงโครงการยังส่งผลกระทบต่อภาระดอกเบี้ยสะสมของเกษตรกร ดังนี้

กลุ่มที่ 1 กลุ่มลูกค้าเกษตรกรที่ยังคงอยู่ในโครงการพักชำระหนี้ต้นเงินและลดดอกเบี้ยเกษตรกรผู้ปลูกข้าว ปี 2550/60 และไม่มีการย้ายโครงการ ร้อยละ 18

กลุ่มที่ 2 กลุ่มลูกค้าเกษตรกรที่มีการย้ายหรือเปลี่ยนแปลงโครงการระหว่างอยู่ในโครงการพักชำระหนี้ต้นเงินและลดดอกเบี้ยเกษตรกรผู้ปลูกข้าว ปี 2550/60 ร้อยละ 22

กลุ่มที่ 3 กลุ่มลูกค้าเกษตรกรที่มีการย้ายหรือเปลี่ยนแปลงโครงการเมื่อจบโครงการพักชำระหนี้ต้นเงินและลดดอกเบี้ยเกษตรกรผู้ปลูกข้าว ปี 2550/60 ร้อยละ 59

2. จัดกลุ่มพฤติกรรมของเกษตรกรที่เข้าร่วมโครงการพักชำระหนี้ต้นเงินและลดดอกเบี้ยเกษตรกรผู้ปลูกข้าว ปี 2559/60

2.1 การวิเคราะห์การจัดกลุ่ม

กลุ่มที่ 1 คือ กลุ่มเกษตรกรที่ชำระดอกเบี้ยได้บางส่วน เมื่อสิ้นสุดโครงการ จำนวนเงินกู้ต่ำ (ไม่เกิน 500,000 บาท) มีจำนวน 98,139 คน คิดเป็นร้อยละ 82.81

กลุ่มที่ 2 คือ กลุ่มเกษตรกรที่ชำระดอกเบี้ยได้บางส่วน เมื่อสิ้นสุดโครงการ จำนวนเงินกู้สูง (มากกว่า 500,000 บาท) มีจำนวน 18,410 คน คิดเป็นร้อยละ 15.54

กลุ่มที่ 3 คือ กลุ่มเกษตรกรที่ไม่สามารถชำระดอกเบี้ยได้ เมื่อสิ้นสุดโครงการ มีจำนวน 1,959 คน คิดเป็นร้อยละ 1.65

2.2 พฤติกรรมของเกษตรกรที่เข้าร่วมโครงการพักหนี้ข้าว

จากการวิเคราะห์การจัดกลุ่ม (K – Means) พบว่าพฤติกรรมในการชำระเงินดอกเบี้ยสะสมของเกษตรกรในกลุ่มที่ 1 มีการชำระเงินดอกเบี้ยสะสมดีขึ้นร้อยละ 3.32 กลุ่มที่ 2 มีการชำระเงินดอกเบี้ยสะสมแย่ลงร้อยละ 37.06 และกลุ่มที่ 3 มีการชำระเงินดอกเบี้ยสะสมแย่ลงร้อยละ 57.65

พฤติกรรมในการชำระยอดเงินต้นของเกษตรกรในกลุ่มที่ 1 มีการชำระยอดเงินต้นดีขึ้นร้อยละ 20.35 กลุ่มที่ 2 มีการชำระยอดเงินต้นดีขึ้นร้อยละ 17.08 และกลุ่มที่ 3 มีการชำระยอดเงินต้นดีขึ้นร้อยละ 17.19

การเปลี่ยนสถานะหนี้ของเกษตรกรในกลุ่มที่ 1 มีการเปลี่ยนสถานะหนี้ในทางดีขึ้นร้อยละ 96.82 แย่ลงร้อยละ 3.18 กลุ่มที่ 2 มีการเปลี่ยนสถานะหนี้ในทางดีขึ้นร้อยละ 94.14 แย่ลงร้อยละ 5.86 และกลุ่มที่ 3 มีการเปลี่ยนสถานะหนี้ในทางดีขึ้นร้อยละ 91.58 แย่ลงร้อยละ 8.42

3. สมการการพยากรณ์ ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของเกษตรกรที่เข้าร่วมโครงการพักหนี้ข้าว ประจำปี 2559/60

3.1 ด้านการชำระเงินดอกเบี้ยสะสม (Y_1)

$$\log \left(\frac{y_1}{y_2} \right) = 27.159 - 3.561(\text{IRN}_0) + 0.680(\text{S123}_1) + 0.119(\text{CIFREG_AGE}_2) + 0.087(\text{CIFREG_AGE}_3) - \\ 0.474(\text{CRLMT}_2) - 0.447(\text{CRLMT}_3) - 1.204(\text{Count_BAL}_0) - 0.868(\text{Count_BAL}_1) - \\ 0.574(\text{Count_BAL}_2) - 6.570(\text{Count_ACR}_0) - 4.138(\text{Count_ACR}_1) - 2.278(\text{Count_ACR}_2)$$

หมายเหตุ : y_1 คือ ยอดเงินดอกเบี้ยสะสมคงเหลือลดลงแต่ยังคงเหลือเมื่อสิ้นสุดโครงการ
 y_2 คือ ไม่มีการชำระดอกเบี้ยสะสมคงเหลือตั้งแต่เข้าร่วมโครงการจนสิ้นสุดโครงการ
 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอยมัลติโนเมียลโลจิสติก ของพฤติกรรมในการชำระเงินดอกเบี้ยสะสม
 ของเกษตรกร เกษตรกรกลุ่มที่มีพฤติกรรมชำระดอกเบี้ยมีการเปลี่ยนแปลงที่ดีขึ้น ยอดเงินดอกเบี้ยสะสมคงเหลือ
 ลดลง แต่ยังคงเหลือยอดเงินดอกเบี้ยสะสมเมื่อสิ้นสุดมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราดอกเบี้ย
 ตั้งแต่เข้าร่วมโครงการจนสิ้นสุดโครงการพักหนี้ข้าว (IRN_0) ประเภทเกษตรกรประชากร (S123₁) อายุสัญญาเงินกู้
 มากกว่า 10 ปี แต่ไม่เกิน 20 ปี (CIFREG_AGE₂) อายุสัญญาเงินกู้มากกว่า 20 ปี แต่ไม่เกิน 30 ปี (CIFREG_AGE₃)
 ช่วงวงเงินกู้รายสัญญามากกว่า 20,000 บาท แต่ไม่เกิน 40,000 บาท (CRLMT₂) ช่วงวงเงินกู้รายสัญญามากกว่า
 40,000 บาท แต่ไม่เกิน 60,000 บาท (CRLMT₃) ชำระดอกเบี้ยต้นคงเหลือจำนวน 1 ครั้ง (Count_BAL₁) ชำระดอกเบี้ย
 ต้นคงเหลือจำนวน 2 ครั้ง (Count_BAL₂) ไม่มีการชำระดอกเบี้ยสะสมคงเหลือ (Count_ACR₀) ชำระดอกเบี้ย
 คงเหลือสะสมจำนวน 1 ครั้ง (Count_ACR₁) และชำระดอกเบี้ยคงเหลือสะสมจำนวน 2 ครั้ง (Count_ACR₂) ซึ่งตัว
 แปรเหล่านี้มีค่า $Exp(B) = 0.026 \ 1.975 \ 0.939 \ 0.623 \ 0.640 \ 0.300 \ 0.420 \ 0.564 \ 0.001 \ 0.016$ และ 0.102 ตามลำดับ โดย
 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ประมาณได้มีเครื่องหมายในทิศทางบวก หมายความว่า โอกาสที่เกษตรกรกลุ่มที่มีพฤติกรรม
 ชำระดอกเบี้ยไม่มีการเปลี่ยนแปลงจะเพิ่มขึ้น เมื่อปัจจัยข้างต้นเพิ่มขึ้น 1 หน่วย

3.2 ด้านการชำระเงินคงเหลือสะสม (Y_2)

$$\log\left(\frac{y_0}{y_2}\right) = 1.822(IRN_0) - 0.610(DISTFRE_1) + 1.279(S123_1) - 1.012(AGE_1) - 0.663(AGE_2) +$$

$$0.696(CIFREG_AGE_2) + 0.728(CIFREG_AGE_3) - 0.357(Count_ACR_1)$$

$$\log\left(\frac{y_1}{y_2}\right) = 27.995 - 1.492(IRN_0) - 0.820(DISTFRE_1) + 0.681(S123_1) - 0.582(AGE_2) - 0.563(CIFREG_AGE_1) -$$

$$5.727(Count_BAL_0) - 5.187(Count_BAL_1) - 4.691(Count_BAL_2) + 1.312(Count_ACR_0) +$$

$$0.758(Count_ACR_1)$$

หมายเหตุ : y_0 คือ ไม่มีการชำระเงินต้นคงเหลือเมื่อสิ้นสุดโครงการ
 y_1 คือ ยอดเงินต้นคงเหลือลดลงแต่ยังคงเหลือยอดเงินเมื่อสิ้นสุดโครงการ
 y_2 คือ ไม่มีการชำระเงินคงเหลือตั้งแต่เข้าร่วมโครงการจนสิ้นสุดโครงการ
 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอยมัลติโนเมียลโลจิสติก ของพฤติกรรมในการชำระเงินยอดเงินต้น
 คงเหลือของเกษตรกร เกษตรกรกลุ่มที่มีพฤติกรรมชำระยอดเงินต้นคงเหลือไม่มีการชำระเงินต้นคงเหลือเมื่อสิ้นสุด
 โครงการพักหนี้ข้าว มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือ อัตราดอกเบี้ย ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราดอกเบี้ย ตั้งแต่เข้าร่วม
 โครงการจนสิ้นสุดโครงการพักหนี้ข้าว (IRN_0) ความถี่ในการชำระรายปี (DISTFRE₁) ประเภทเกษตรกรประชากร

(S123₁) ช่วงอายุไม่เกิน 30 ปี (AGE₁) ช่วงอายุตั้งแต่ 31 ถึง 60 ปี (AGE₂) อายุสัญญาเงินกู้มากกว่า 10 ปี แต่ไม่เกิน 20 ปี (CIFREG_AGE₂) อายุสัญญาเงินกู้มากกว่า 20 ปี แต่ไม่เกิน 30 ปี (CIFREG_AGE₃) และชำระดอกเบี้ยคงเหลือสะสมจำนวน 1 ครั้ง (Count_ACR₁) ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีค่า $\text{Exp}(B) = 6.185 \ 3.592 \ 0.314 \ 0.515 \ 3.020 \ 2.005$ และ 2.075 ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่ประมาณได้มีเครื่องหมายในทิศทางบวก หมายความว่า โอกาสที่เกษตรกรกลุ่มที่มีพฤติกรรมชำระยอดเงินต้นคงเหลือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากยอดเงินต้นคงเหลือสะสม เมื่อปัจจัยข้างต้นเพิ่มขึ้น 1 หน่วย

เกษตรกรกลุ่มที่มีพฤติกรรมชำระยอดเงินต้นคงเหลือ ทำให้ยอดเงินต้นคงเหลือลดลง แต่ยังคงเหลือยอดเงินเมื่อสิ้นสุดโครงการพักหนี้ข้าว มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือ อัตราดอกเบี้ยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราดอกเบี้ยตั้งแต่เข้าร่วมโครงการจนถึงสิ้นสุดโครงการพักหนี้ข้าว (IRN₀) ความถี่ในการชำระรายปี (DISTFRE₁) ประเภทเกษตรกรประชากรรัฐ (S123₁) ช่วงอายุตั้งแต่ 31 ถึง 60 ปี (AGE₂) อายุสัญญาเงินกู้ไม่เกิน 10 ปี (CIFREG_AGE₁) ไม่มีการชำระยอดเงินต้นคงเหลือ (Count_BAL₀) ชำระยอดเงินต้นคงเหลือจำนวน 1 ครั้ง (Count_BAL₁) ชำระยอดเงินต้นคงเหลือจำนวน 2 ครั้ง (Count_BAL₂) ไม่มีการชำระดอกเบี้ยสะสมคงเหลือ (Count_ACR₀) ชำระดอกเบี้ยคงเหลือสะสมจำนวน 1 ครั้ง (Count_ACR₁) ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีค่า $\text{Exp}(B) = 0.225 \ 1.856 \ 0.559 \ 0.003 \ 0.006 \ 0.009 \ 3.715 \ 2.134 \ 0.440$ และ 0.569 ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่ประมาณได้มีเครื่องหมายในทิศทางบวก หมายความว่า โอกาสที่เกษตรกรกลุ่มที่มีพฤติกรรมชำระยอดเงินต้นคงเหลือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากยอดเงินต้นคงเหลือสะสม เมื่อปัจจัยข้างต้นเพิ่มขึ้น 1 หน่วย

3.3 ด้านการเปลี่ยนสถานะหนี้เกษตรกร (Y₃)

$$\begin{aligned} \log \left(\frac{y_0}{y_2} \right) &= 12.720 - 1.653(\text{IRN}_0) + 1.191(\text{ZSUBPLN}_0) - 0.332(\text{DISTFRE}_1) - 0.194(\text{S123}_1) - 0.186(\text{AGE}_2) - \\ &\quad 2.477(\text{CRLMT}_1) - 2.146(\text{CRLMT}_2) - 1.511(\text{CRLMT}_3) - 4.930(\text{Count_BAL}_0) - 4.428(\text{Count_BAL}_1) - \\ &\quad 2.606(\text{Count_BAL}_2) - 4.590(\text{Count_ACR}_0) - 2.499(\text{Count_ACR}_1) - 1.335(\text{Count_ACR}_2) \\ \log \left(\frac{y_1}{y_2} \right) &= -18.171 + 2.051(\text{ZSUBPLN}_0) + 0.830(\text{DISTFRE}_1) + 20.783(\text{DEBT}_1) + 20.682(\text{DEBT}_2) + \\ &\quad 20.230(\text{DEBT}_3) - 3.229(\text{CRLMT}_1) - 2.130(\text{Count_BAL}_0) - 2.015(\text{Count_BAL}_1) - 1.216(\text{Count_BAL}_2) - \\ &\quad 2.957(\text{Count_ACR}_0) - 1.389(\text{Count_ACR}_1) \end{aligned}$$

หมายเหตุ : y₀ คือ สถานะหนี้ของเกษตรกรที่ไม่เป็น NPLs และไม่มีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ เข้าร่วมโครงการจนถึงสิ้นสุดโครงการ

y_1 คือ สถานะหนี้ของเกษตรกรที่เป็น NPLs และมีการเปลี่ยนสถานะเป็นเกษตรกรที่ไม่เป็น NPLs ตั้งแต่เข้าร่วมโครงการจนถึงสิ้นสุดโครงการ

y_2 คือ สถานะหนี้ของเกษตรกรที่เป็น NPLs และไม่มีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่เข้าร่วมโครงการจนถึงสิ้นสุดโครงการ

การหาค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอยมัลติโนเมียลโลจิสติก ของพฤติกรรมการเปลี่ยนสถานะหนี้ของเกษตรกร เกษตรกรกลุ่มที่มีการเปลี่ยนสถานะหนี้ มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือ อัตราดอกเบี้ยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราดอกเบี้ย ตั้งแต่เข้าร่วมโครงการจนถึงสิ้นสุดโครงการพักหนี้ข้าว (IRN₀) การย้ายหรือเปลี่ยนโครงการที่ไม่มีการย้ายโครงการระหว่างเข้าร่วมโครงการพักหนี้ข้าว (ZSUBPLN₀) ความถี่ในการชำระรายปี (DISTFRE₁) ประเภทเกษตรกรประชาธิรัฐ (S123₁) ช่วงอายุตั้งแต่ 31 ถึง 60 ปี (AGE₂) ช่วงวงเงินกู้รายสัญญาไม่เกิน 20,000 บาท (CRLMT₁) ช่วงวงเงินกู้รายสัญญามากกว่า 20,000 บาท แต่ไม่เกิน 40,000 บาท (CRLMT₂) ช่วงวงเงินกู้รายสัญญามากกว่า 40,000 บาท แต่ไม่เกิน 60,000 บาท (CRLMT₃) ไม่มีการชำระยอดเงินต้นคงเหลือ (Count_BAL₀) ชำระยอดเงินต้นคงเหลือจำนวน 1 ครั้ง (Count_BAL₁) ชำระยอดเงินต้นคงเหลือจำนวน 2 ครั้ง (Count_BAL₂) ไม่มีการชำระดอกเบี้ยสะสมคงเหลือ (Count_ACR₀) ชำระดอกเบี้ยคงเหลือสะสมจำนวน 1 ครั้ง (Count_ACR₁) ชำระดอกเบี้ยคงเหลือสะสมจำนวน 2 ครั้ง (Count_ACR₂) ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีค่า $\text{Exp}(B) = 0.192 \ 3.291 \ 0.824 \ 0.831 \ 0.084 \ 0.117 \ 0.221 \ 0.007 \ 0.012 \ 0.074 \ 0.010 \ 0.082 \ 0.263$ และ 0.718 ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่ประมาณได้มีเครื่องหมายในทิศทางบวก หมายความว่า โอกาสที่เกิดการเปลี่ยนสถานะหนี้ของเกษตรกร เมื่อปัจจัยข้างต้นเพิ่มขึ้น 1 หน่วย

เกษตรกรกลุ่มที่มีการเปลี่ยนสถานะหนี้ มีปัจจัยการย้ายหรือเปลี่ยนโครงการที่ไม่มีการย้ายโครงการระหว่างเข้าร่วมโครงการพักหนี้ข้าว (ZSUBPLN₀) ความถี่ในการชำระรายปี (DISTFRE₁) จำนวนเงินกู้ของเกษตรกรไม่เกิน 500,000 บาท (DEBT₁) จำนวนเงินกู้ของเกษตรกรมากกว่า 500,000 บาท แต่ไม่เกิน 1,000,000 บาท (DEBT₂) จำนวนเงินกู้ของเกษตรกรมากกว่า 1,000,000 บาท (DEBT₃) ช่วงวงเงินกู้รายสัญญาไม่เกิน 20,000 บาท แต่ไม่เกิน 1,500,000 บาท (CRLMT₁) ไม่มีการชำระยอดเงินต้นคงเหลือ (Count_BAL₀) ชำระยอดเงินต้นคงเหลือจำนวน 1 ครั้ง (Count_BAL₁) ชำระยอดเงินต้นคงเหลือจำนวน 2 ครั้ง (Count_BAL₂) ไม่มีการชำระดอกเบี้ยสะสมคงเหลือ (Count_ACR₀) ชำระดอกเบี้ยคงเหลือสะสมจำนวน 1 ครั้ง (Count_ACR₁) จำนวนเงินกู้ของเกษตรกรไม่เกิน 500,000 บาท (DEBT₁) จำนวนเงินกู้ของเกษตรกรมากกว่า 500,000 บาท แต่ไม่เกิน 1,000,000 บาท (DEBT₂) จำนวนเงินกู้ของเกษตรกรมากกว่า 1,000,000 บาท แต่ไม่เกิน 1,500,000 บาท (DEBT₃) ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีค่า $\text{Exp}(B) = 7.777 \ 0.040 \ 0.119 \ 0.133 \ 0.296 \ 0.052 \ 0.249 \ 2.293 \ 0.106 \ 0.959$ และ 0.611 ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่ประมาณได้มีเครื่องหมายในทิศทางบวก หมายความว่า โอกาสที่มีการเปลี่ยนสถานะหนี้ของเกษตรกรเมื่อปัจจัยข้างต้นเพิ่มขึ้น 1 หน่วย

4. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเปรียบเทียบการจัดหนี้ลูกค้านี้ของแต่ละสาขาทั้ง 3 จังหวัด

จากการศึกษาโดยตัวแบบ DEA (Data Envelopment Analysis) พบว่า

จังหวัดนครสวรรค์ ลูกค้านี้ประเภทลูกค้านี้ประจำรัฐ (S123₁) มีการจัดการได้ดี 6 สาขาจาก 21 สาขา คิดเป็นร้อยละ 28.57 ของสาขาทั้งหมด 15 สาขาควรมีการติดตามการชำระหนี้ของลูกค้านี้แต่ละสาขา เพื่อให้ค่า Efficiency Score มีค่าเข้าใกล้ 1 และประเภทลูกค้านี้บุคคลธรรมดา (S123₂) สาขาที่มีการจัดการได้ดี 9 สาขา จาก 21 สาขา คิดเป็นร้อยละ 42.87 ของสาขาทั้งหมด 12 สาขาควรมีการติดตามการชำระหนี้ของลูกค้านี้แต่ละสาขาเพื่อให้ค่า Efficiency Score มีค่าเข้าใกล้ 1

จังหวัดสุรินทร์ ลูกค้านี้ประเภทลูกค้านี้ประจำรัฐ (S123₁) สาขาที่มีการจัดการได้ดี 9 สาขา จาก 24 สาขา คิดเป็นร้อยละ 37.50 ของสาขาทั้งหมด 15 สาขาควรมีการติดตามการชำระหนี้ของลูกค้านี้แต่ละสาขา เพื่อให้ค่า Efficiency Score มีค่าเข้าใกล้ 1 และประเภทลูกค้านี้บุคคลธรรมดา (S123₂) สาขาที่มีการจัดการได้ดี 10 สาขา จาก 24 สาขา คิดเป็นร้อยละ 41.67 ของสาขาทั้งหมด 14 สาขา ควรมีการติดตามการชำระหนี้ของลูกค้านี้แต่ละสาขา เพื่อให้ค่า Efficiency Score มีค่าเข้าใกล้ 1

จังหวัดพัทลุง ลูกค้านี้ประเภทลูกค้านี้ประจำรัฐ (S123₁) สาขาที่มีการจัดการได้ดี 8 สาขา จาก 10 สาขา คิดเป็นร้อยละ 80.00 ของสาขาทั้งหมด 2 สาขาควรมีการติดตามการชำระหนี้ของลูกค้านี้แต่ละสาขา เพื่อให้ค่า Efficiency Score มีค่าเข้าใกล้ 1 และประเภทลูกค้านี้บุคคลธรรมดา (S123₂) สาขาที่มีการจัดการได้ดี 8 สาขา จาก 13 สาขา คิดเป็นร้อยละ 61.54 ของสาขาทั้งหมด 5 สาขาควรมีการติดตามการชำระหนี้ของลูกค้านี้แต่ละสาขาเพื่อให้ค่า Efficiency Score มีค่าเข้าใกล้ 1

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาพบได้ว่าภาพรวมโครงการพักชำระหนี้ต้นเงินและลดดอกเบี้ยเกษตรกรผู้ปลูกข้าว ปี 2559/60 เมื่อสิ้นสุดโครงการมียอดหนี้สะสมคงเหลือลดลง คิดเป็นร้อยละ 18.69 มีคนหมดหนี้ค้างชำระ 24,629 คน คิดเป็นร้อยละ 20.78 ของผู้เข้าร่วมโครงการทั้งหมด และเมื่อสิ้นสุดโครงการมีจำนวนลูกหนี้ NPLs ลดลง จำนวน 7,839 คน คิดเป็นร้อยละ 22.84 และคนเปลี่ยนแปลงจากสถานะหนี้ปกติเป็นสถานะหนี้ NPLs เมื่อสิ้นสุดโครงการมีจำนวน 6 คน ทำให้มียอดดอกเบี้ยสะสมคงเหลือเพิ่มมากขึ้นร้อยละ 42.59 และมียอดเงินต้นคงเหลือลดลง ร้อยละ 36.88 ทั้งนี้เนื่องมาจากการย้ายหรือการเปลี่ยนแปลงโครงการทั้งระหว่าง และสิ้นสุดโครงการ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อโครงการพักชำระหนี้ต้นเงินและลดดอกเบี้ยเกษตรกรผู้ปลูกข้าว ปี 2559/60 และจากผลการจัดกลุ่มพฤติกรรมของเกษตรกร พบว่าเกษตรกรที่ชำระดอกเบี้ยได้บางส่วน เมื่อสิ้นสุดโครงการ ที่จำนวนเงินกู้ต่ำ (ไม่เกิน 500,000 บาท) มีพฤติกรรมในการชำระหนี้ดอกเบี้ยสะสม ชำระยอดเงินต้น และเปลี่ยนสถานะหนี้ในทางที่ดีขึ้น ร้อยละ 3.32 ร้อยละ 20.35 และร้อยละ 96.82 ตามลำดับ จากพฤติกรรมที่ดีขึ้นของเกษตรกรในกลุ่มนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับเกษตรกรกลุ่มอื่น ทำให้ทราบว่าโครงการพักชำระหนี้ต้นเงินและลดดอกเบี้ยเกษตรกรผู้ปลูกข้าว

ปี 2559/60 นั้นมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับเกษตรกรเฉพาะกลุ่มดังกล่าว ซึ่งทางสถาบันการเงินสามารถนำข้อมูลที่ได้นำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการจัดการลดสินเชื่อด้อยคุณภาพ (NPLs) และจัดการลูกค้าได้ได้อย่างเหมาะสม ส่วนผลการวัดประสิทธิภาพการจัดการสินเชื่อด้อยคุณภาพ (NPLs) ในแต่ละสาขา ทางสถาบันการเงินสามารถเสนอแนะนโยบายให้แต่ละสาขาปรับปรุงการติดตามการชำระหนี้จากเกษตรกร ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการจัดการหนี้ที่ไม่ก่อให้เกิดรายได้ได้เช่นกัน อีกทั้งจากผลการศึกษาที่ได้นั้นก็จะเป็นผลสะท้อนแก่ทางภาครัฐในการออกนโยบายช่วยเหลือเกษตรกรในครั้งต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการ Thailand Digital Young Talent Development Project 2019

เอกสารอ้างอิง

- Ikram, A. (2016). Determinants of Non-Performing Loan: An Empirical Investigation of Bank-Specific Microeconomic Factors. *The Journal of Applied Business Reserch Xi'an Jiaotong University, China*. 32(6), 1-14.
- Jaisamud, W. (2015). *The influence of Non-performing loans on profitability of Thai commercial banks listed in The stock exchange of Thailand* [Unpublished master's thesis]. Bangkok University. (in Thai)
- Jantima, S., Toedprisan, K., Suppasinsiriwattana, T., & Phaphan, W. (2020). A study of Participation Behavior in the Moratorium Project on Rice in the year 2016 of Farmers in debt to NPLs in Surin, Nakhonsawan and Phatthalung. In *the 13th Srinakharinwirot University Research Conference* [pp. 594-605]. Srinakharinwirot University, Bangkok. (in Thai)
- Lojinda, T. (2013). *Factor influencing to transactional behavior in online business of the undergraduates in Nakhon Pathom province by multinomial logistic regression* [Unpublished master's thesis]. Silpakorn University. (in Thai)
- Ronnaronguruk, P. (2015). *Factor Affecting Agricultural debt of Sugarcane famers, Cassava famers and Rice farmers : An empirical study base on Kanchanaburi and Petchaburi Povince in Thailand* [Unpublished master's thesis]. Thammasat University. (in Thai)

Wongjaengjinda, W., Wiriyaehot, K., & Deesawat, U., (2016). *Finding the right area in establishing a public service point During the New Year Festival in the central region by K-Means Clustering* (Special Problems). Department of Applied Statistics, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok. (in Thai)

Research Article

การเปรียบเทียบสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มไฮโดรเจนอะมอร์ฟัสคาร์บอนที่ถูกเตรียมโดยคลื่นวิทยุแบบพัลส์ และต่อเนื่อง

Comparison of the structural properties of a-C:H films prepared by pulsed and continuous RF

วรรณวิษา บุตรชารี¹ อาทิตย์ จิ่งสูงเนิน^{2*} อุกฤษฏ์ ฤทธิหงส์³ และ สรายุทธ ตันมี³

Wanwisa Butcharee¹, Artit Chingsungnoen^{2*}, Ukit Rittihong³ and Sarayut Tunmee³

¹ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150 ประเทศไทย

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีพลาสมา ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150 ประเทศไทย

³ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 ประเทศไทย

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand

² Technological Plasma Research Unit, Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand

³ Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), Mueang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

*E-mail: artit.c@msu.ac.th

Received: 19/08/2020; Revised: 12/10/2020; Accepted: 07/12/2020

บทคัดย่อ

ฟิล์มไฮโดรเจนอะมอร์ฟัสคาร์บอน (a-C:H) ถูกเคลือบลงบนแผ่นซิลิกอน (Si) โดยใช้วิธีอาร์เอฟ-พีโอซีวีดี (RF-PECVD) ที่กำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ 100 W ได้ทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์ม a-C:H ที่เคลือบในโหมดพัลส์ (pulsed-wave, PW) และโหมดต่อเนื่อง (continuous-wave, CW) การเคลือบฟิล์มในโหมดพัลส์ที่ความถี่ 1 Hz และรอบการทำงาน 10% ใช้เวลาการเคลือบ 30 min ขณะที่การเคลือบฟิล์มในโหมดต่อเนื่องใช้เวลาการเคลือบ 3 min ใช้แก๊สอาร์กอน (Ar) และแก๊สอะเซทิลีน (C₂H₂) ในอัตราส่วน 1:10 sccm เป็นแก๊สตั้งต้นในการเคลือบฟิล์ม ได้ทำการวิเคราะห์สัดส่วน I_D / I_G โดยใช้เทคนิครามาน (Raman spectroscopy) วิเคราะห์ปริมาณ sp^2 (%) โดยใช้เทคนิคเคมซาล์ฟ (near edge X-ray absorption fine structure, NEXAFS) วิเคราะห์ปริมาณ sp^3 (%) โดยใช้เทคนิคเอกซ์พีเอส (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) และวิเคราะห์ความหนา ความขรุขระ และความ

หนาแน่นของฟิล์ม โดยใช้เทคนิคเอกซเรย์อาร์อาร์ (X-ray reflectivity, XRR) ผลการทดลองพบว่าการใช้กำลังไฟฟ้า ความถี่วิทยุในโหมดพัลส์สามารถเคลือบฟิล์ม a-C:H ที่มีสัดส่วน I_D / I_G เท่ากับ 0.76 มีปริมาณ sp^2 และ sp^3

เท่ากับ 59.3% และ 33.2 % ฟิล์มมีความหนา 53.0 nm และมีความหนาแน่น 2.1 g/cm³ ในขณะที่การใช้กำลังไฟฟ้า ความถี่วิทยุในโหมดต่อเนื่องให้ฟิล์ม a-C:H ที่มีสัดส่วน I_D / I_G เท่ากับ 0.57 มีปริมาณ sp^2 และ sp^3 เท่ากับ 62.5% และ 29.5% ฟิล์มมีความหนา 54.5 nm และมีความหนาแน่น 2.0 g/cm³ ดังนั้นที่กําลังไฟฟ้าและเวลา RF on เท่ากัน การเคลือบฟิล์ม a-C:H โดยใช้โหมดพัลส์ให้ฟิล์มที่มีสมบัติเชิงโครงสร้างเหมือนเพชรมากกว่าการใช้โหมดต่อเนื่อง

คำสำคัญ: ฟิล์มไฮโดรเจนอะมอร์ฟัสคาร์บอน, ความถี่วิทยุโหมดต่อเนื่อง, ความถี่วิทยุโหมดพัลส์, อาร์เอฟ-พีอีซีวีดี, สมบัติเชิงโครงสร้าง

Abstract

Hydrogenated amorphous carbon (a-C:H) films were grown on silicon substrates by radio frequency plasma enhanced chemical vapor deposition (RF-PECVD) with the RF power of 100 W. The structural properties of a-C:H films prepared by using RF in continuous-wave (CW) and pulsed-wave (PW) modes were compared. The pulse frequency of 1 Hz and a duty cycle of 10% were used for PW mode. The deposition time for CW and PW modes were set as 3 and 30 minutes, respectively. A mixture of argon and acetylene (1:10) was used as a precursor gas and carbon source, respectively. Raman spectroscopy was used to characterize I_D / I_G . Near edge X-ray absorption fine structure (NEXAFS) spectroscopy was used to identify sp^2 content, while the X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) was used to analyze sp^3 contents. Density, roughness, and thickness of the films were evaluated by X-ray reflectivity (XRR). The experimental results show that the a-C:H film prepared by using the RF in PW mode gives the I_D / I_G ratio of 0.76, sp^2 and sp^3 contents of 59.3% and 33.2 %, with the thickness of 53.0 nm and density of 2.1 g/cm³. While the RF on in CW mode gives the I_D / I_G ratio of 0.57, sp^2 and sp^3 contents of 62.5% and 29.5 %, with the thickness of 54.5 nm and density of 2.0 g/cm³. Therefore, with the same RF power and RF on time, the a-C:H film prepared using PW mode gives the structural properties better than using CW mode.

Keywords: hydrogenated amorphous carbon film, RF continuous-wave (CW) mode,

RF pulsed-wave (PW) mode, RF-PECVD, structural properties

บทนำ

ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมาฟิล์มคาร์บอนเสมือนเพชร (diamond-like carbon, DLC) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากกลุ่มนักวิจัยและภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากฟิล์ม DLC มีคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น มีความแข็งสูง (high hardness) สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ (low coefficient of friction) มีความต้านทานการสึกหรอสูง (high wear resistance) มีความเฉื่อยทางเคมีสูง (high chemical inertness) และสามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส (high gas barrier) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ฟิล์ม DLC ได้รับความสนใจและมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง (Yamamoto et al., 2005) ทั้งในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเคลือบผิวโลหะ อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร และวัสดุทางการแพทย์ ฯลฯ (Ozeki et al., 2009)

โครงสร้างทางเคมีของฟิล์ม DLC จะเป็นตัวกำหนดสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์ม เช่น ความแข็ง ความลื่น สภาพนำไฟฟ้า การดูดกลืนแสง เป็นต้น (Robertson, 2002) โดยฟิล์ม DLC เกิดจากการผสมกันของคาร์บอนที่มีไฮบริดเคชันแบบ sp^2 และ sp^3 จึงถูกจัดอยู่ในกลุ่มคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) ที่มีความเป็นระเบียบในระยะสั้น (short range order) โดยคาร์บอน sp^2 จะเป็นตัวกำหนดสมบัติการนำไฟฟ้าและความลื่น ขณะที่คาร์บอน sp^3 จะเป็นตัวกำหนดสมบัติเชิงกลและความเฉื่อยทางเคมี ดังนั้นฟิล์ม DLC ที่มีอัตราส่วนของ sp^2 / sp^3 ต่ำ จะแสดงสมบัติเชิงกลที่ดี มีความแข็งสูง (Li et al., 2002) ฟิล์มไฮโดรจิเนตเตดอะมอร์ฟัสคาร์บอน (hydrogenated amorphous carbon) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า ฟิล์ม a-C:H คือ ฟิล์ม DLC ชนิดหนึ่งที่มีปริมาณไฮโดรเจน (hydrogen content) ประมาณ 20 ถึง 50% (Casiraghi et al., 2005) ซึ่งแม้ว่าการมีอะตอมไฮโดรเจนผสมอยู่จะทำให้ความแข็งของฟิล์มลดลง แต่อะตอมไฮโดรเจนก็มีส่วนช่วยให้ฟิล์ม a-C:H มีความลื่นสูง (ultralow friction) จึงนิยมนำไปประยุกต์ใช้เคลือบชิ้นงานเพื่อลดการสึกหรอและเป็นชั้นป้องกัน (protective layer) โครงสร้างทางเคมีของฟิล์ม DLC สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิครามาน เทคนิคเนกซาฟ เทคนิคเอกซ์พีเอส (Zhou, et al., 2017) และเทคนิคเอกซ์อาร์อาร์ โดยเทคนิครามานสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับคลัสเตอร์ของแกรไฟต์และโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบของฟิล์ม DLC โดยพิจารณาจากลักษณะพีคดี (disorder graphitic peak, D peak) และพีคจี (graphitic peak, G peak) ของสเปกตรัมรามาน อัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคดีต่อพีคจี (I_D / I_G) นั้นมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของ sp^2 / sp^3 (Ferrari and Robertson, 2000) ส่วนเทคนิคเอกซ์พีเอสสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับความเข้มข้นพันธะ sp^3 ได้จากสัดส่วนพื้นที่ใต้พีคของ sp^3 ต่อพื้นที่ใต้กราฟของคาร์บอน C 1s (Dos Santos et al., 2015) นอกจากนี้ ได้มีการนำเทคนิคเนกซาฟมาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์ม DLC (Tunmee et al., 2015; Zhou, et al., 2017) เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับว่าสามารถคำนวณความเข้มข้นของพันธะ sp^2 ในโครงสร้างอสัณฐานของฟิล์ม DLC ได้อย่างแม่นยำ ในขณะที่เทคนิคเอกซ์อาร์อาร์สามารถตรวจวัดความหนาและความหนาแน่นของฟิล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การเคลือบฟิล์ม DLC สามารถทำได้หลายเทคนิคเช่น การใช้ลำไอออน (ion beam) การสปัตเตอริง (sputtering) การอาร์คในสุญญากาศ (vacuum arc) การตกสะสมโดยใช้พัลส์เลเซอร์ (pulsed laser deposition) และ

การใช้พลาสมาช่วยในการตกสะสมของไอเชิงเคมี (plasma enhanced chemical vapor deposition) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า พีอีซีวีดี (Robertson, 2002; Fan et al., 2011) ซึ่งเงื่อนไขและเทคนิคการเคลือบฟิล์มมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติของฟิล์ม DLC เช่น ความแข็ง และ โมดูลัสยืดหยุ่น ซึ่งเทคนิคอาร์เอฟ-พีอีซีวีดี คือการใช้กำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ (13.56 MHz) กระตุ้นอิเล็กตรอนให้ชนกับโมเลกุลของแก๊สและแตกตัวเป็นพลาสมา ซึ่งเหมาะสำหรับการเคลือบฟิล์ม DLC ลงบนชิ้นงานที่มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า เนื่องจากอิเล็กตรอนสามารถตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่มีความถี่สูงได้ดี จึงช่วยลดการสะสมของประจุบนผิวชิ้นงานและทำให้เกิดการเคลือบได้อย่างต่อเนื่อง แม้ว่าพลาสมาที่เกิดจากการใช้เทคนิคอาร์เอฟ-พีอีซีวีดี จะมีอุณหภูมิไม่สูงมากนัก (low temperature plasma) แต่การที่ชิ้นงานถูกระดมชนด้วยไอออนและอิเล็กตรอนอย่างต่อเนื่องระหว่างการเคลือบฟิล์ม จะทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงขึ้นและอาจส่งผลเสียกับชิ้นงานที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น พอลิเมอร์ (G. Zhang et al., 2011) การเคลือบฟิล์ม a-C:H ในโหมดพัลส์ จะช่วยลดการสะสมความร้อนที่ชิ้นงาน ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เคลือบฟิล์ม a-C:H ลงบนบรรจุภัณฑ์อ่อนตัว (flexible packaging) หรือ บรรจุภัณฑ์อาหาร (food packaging) เพื่อป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน และช่วยให้อายุการเก็บรักษา (shelf life) ของอาหารยาวนานขึ้น เป็นต้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจเปรียบเทียบสมบัติเชิงโครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์ม a-C:H ที่เคลือบลงบนแผ่นซิลิกอนในโหมดพัลส์และต่อเนื่อง โดยใช้เทคนิครามาน เนคซาฟ เอกซ์พีเอส และเอกซ์อาร์อาร์ ในการวิเคราะห์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาเทคนิคการเคลือบและคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์ม a-C:H ลงบนพอลิเมอร์สำหรับอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหารของประเทศไทยต่อไป

วิธีการทดลอง

การเตรียมแผ่นฐานและการเคลือบฟิล์ม

งานวิจัยนี้ได้ใช้แผ่นซิลิกอนชนิดพี (p-type) ขนาด 1 cm^2 หนา $380\text{ }\mu\text{m}$ ระบาย (100) เป็นแผ่นฐาน ก่อนนำชิ้นงานเข้าห้องสุญญากาศ ได้ทำความสะอาดเพื่อขจัดคราบไขมัน สิ่งสกปรก และฝุ่นละอองขนาดเล็ก ด้วยการสั่นในสารละลายอะซิโตน (acetone, $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) เป็นเวลา 10 min จากนั้นสั่นในสารละลายเมทานอล (methanol, CH_3OH) 2 รอบ รอบละ 10 min สุดท้ายสั่นในน้ำปราศจากไอออน (deionized water, DI) อีก 3 รอบ รอบละ 10 min และเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน

ระบบอาร์เอฟ-พีอีซีวีดี ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นคู่ขนาน โดยชิ้นงานถูกติดตั้งไว้ที่ขั้วล่างซึ่งถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่วิทยุ (RF) 13.56 MHz (Seren, R1001) และมีน้ำหล่อเย็นที่อุณหภูมิในช่วง 15°C ถึง 20°C เพื่อช่วยในการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการตกสะสมฟิล์ม ขณะที่ขั้วบนถูกต่อลงกราวด์ ดังรูปที่ 1 บั้มสกอลล์ (scroll vacuum pump) และปั๊มเทอร์โบโมเลกูลาร์ (turbomolecular pump) ถูกใช้เพื่อสร้างสภาวะสุญญากาศ

โดยมีความดันฐาน (base pressure) อยู่ที่ 2×10^{-5} torr และสามารถควบคุมความดันขณะทำงาน (working pressure) โดยใช้วาล์วเพนดูลัม (pendulum valve) ก่อนการเคลือบฟิล์ม ได้ปรับปรุงพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนด้วยพลาสมา

ไนโตรเจน (N_2 plasma) ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (99.995%) 20 sccm กำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ (RF power) 80 W เป็นเวลา 10 s และทำการเคลือบฟิล์ม a-C:H ด้วยวิธีอาร์เอฟ-พริชี่วีดีโดยใช้ส่วนผสมของแก๊สอาร์กอน (99.995%) และแก๊สอะเซทิลีน (99.995%) ที่อัตราการไหลของแก๊สเป็น 1:10 sccm ความดันขณะทำงานถูกปรับให้คงที่ 0.75 mtorr กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบ 100 W การเคลือบฟิล์มในโหมดต่อเนื่องจะใช้เวลาในการตกสะสม 3 min ขณะที่การเคลือบฟิล์มในโหมดพัลส์ ใช้เวลาในการตกสะสม 30 min ใช้ความถี่พัลส์ (pulse frequency) 1 Hz และรอบการทำงาน (duty cycle) 10% ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาที่จ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ (RF on) 0.1 s และช่วงเวลาที่หยุดจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ (RF off) 0.9 s ดังนั้นเวลาในการตกสะสมในโหมดพัลส์ 30 min จึงสอดคล้องกับเวลาที่ RF on 3 min เท่ากับเวลาที่ใช้ในการเคลือบในโหมดต่อเนื่อง

การวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์ม

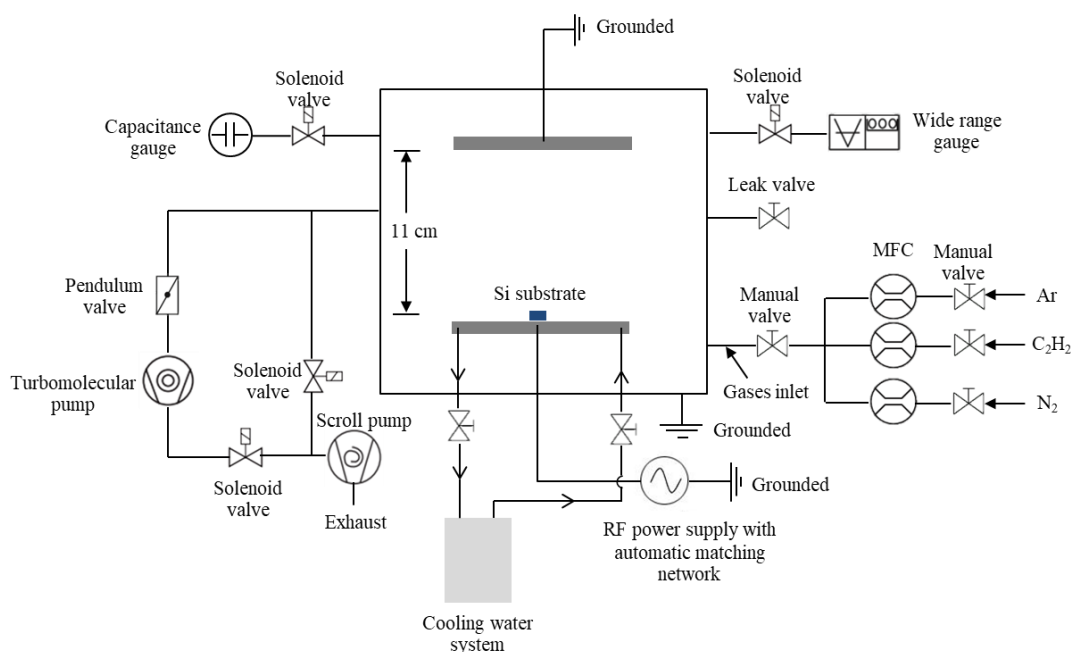
เทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมรามาน คือ เทคนิคเบื้องต้นที่ใช้ประเมินลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของฟิล์ม DLC ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องรามาน (Bruker, SENTERRA) ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา ในการตรวจวิเคราะห์ โดยการสุ่มตำแหน่งในการวัด 3 จุดต่อหนึ่งชิ้นงาน สเปกตรัมรามานถูกวัด ณ อุณหภูมิห้องโดยใช้แสงจากอาร์กอนเลเซอร์ (Ar laser) ความยาวคลื่น 532 nm กำลังแสงเลเซอร์ 12.5 mW และใช้เวลาในการเก็บข้อมูล (integration time) 20 s ความละเอียดของหัววัด (detector) $3\text{-}5\text{ cm}^{-1}$ และทำการสแกนในช่วงเลขคลื่น (wavenumber) $800\text{-}2000\text{ cm}^{-1}$ ลักษณะพีคที่ได้จากสเปกตรัมรามานจะถูกปรับเส้นโค้งแบบเกาส์เซียน (Gaussian) ด้วยโปรแกรม origin pro เพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งสูงสุด (peak position) ความกว้างที่ค่าความสูงครึ่งหนึ่งของยอดพีค (FWHM) และพื้นที่ใต้พีค (peak area)

โครงสร้างพันธะของฟิล์ม a-C:H ยังถูกตรวจสอบด้วยเทคนิคเนคซาฟ ณ ระบบลำแสงแสงที่ BL3.2Ua&b สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา สเปกตรัมคาร์บอน K-edge ถูกวัดในโหมด total electron yield (TEY) มุมตกกระทบ 55° (magic angle) โดยใช้พลังงานโฟตอนในช่วง 270 ถึง 330 eV ที่ความละเอียด energy step 0.1 eV นอกจากนี้ตำแหน่งพีคของคาร์บอน K-edge ถูกเทียบกับตำแหน่งพีคสูงสุดของตัวอย่าง highly oriented pyrolytic graphite (HOPG) ที่ตำแหน่งการสั่นพ้องของพันธะ π^* 284.6 eV ซึ่งเป็นตำแหน่งอ้างอิงพลังงานของคาร์บอนที่มีไฮบริดเซชันแบบ sp^2 (Lenardi et al., 1999)

นอกจากนี้โครงสร้างพันธะของฟิล์ม a-C:H ยังถูกตรวจสอบด้วยเทคนิคเอกซ์พีเอส ที่สถานีการทดลองเดียวกันกับเทคนิคเนคซาฟ โดยใช้รังสีเอกซ์ย่านพลังงานต่ำ (soft X-ray) 650 eV ยังเข้าใส่ผิวหน้าชิ้นงาน เพื่อวิเคราะห์พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากผิวชิ้นงานของคาร์บอน C 1s (350-370 eV) ความละเอียดในการสแกนพลังงาน energy step 0.1 eV สเปกตรัม C 1s ในฟิล์ม a-C:H ประกอบด้วยพันธะ $C-C(sp^3)$,

$C=C(sp^2)$, $C-O$ และ $C=O$ ถูกแยกด้วยการปรับเส้นโค้งแบบเกาส์เซียน (Lei et al., 2019; Nakajima et al., 2013; Rittihong et al., 2020; Zemek et al., 2018)

ความหนา ความหนาแน่น และความขรุขระของฟิล์ม a-C:H ถูกวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการสะท้อนรังสีเอกซ์ หรือเรียกย่อ ๆ ว่า เทคนิคเอกซ์อาร์อาร์ (Bruker, D8 Advance) ที่มีแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์จากเป้าทองแดง (Cu-K α) ความยาวคลื่น 1.541 Å ซึ่งตั้งอยู่ที่ศูนย์เครื่องมือกลางคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยรูปแบบการสั่น (oscillation pattern) ที่เกิดจากการแทรกสอดกันของลำรังสีเอกซ์ที่สะท้อนบริเวณรอยต่อและผิวฟิล์ม (fringe interference pattern) ของฟิล์ม a-C:H ถูกจำลองโดยใช้โปรแกรม Leptos 7.8



รูปที่ 1 แผนผังระบบบอร์เอฟ-ฟิสิกส์สำหรับเคลือบฟิล์ม a-C:H

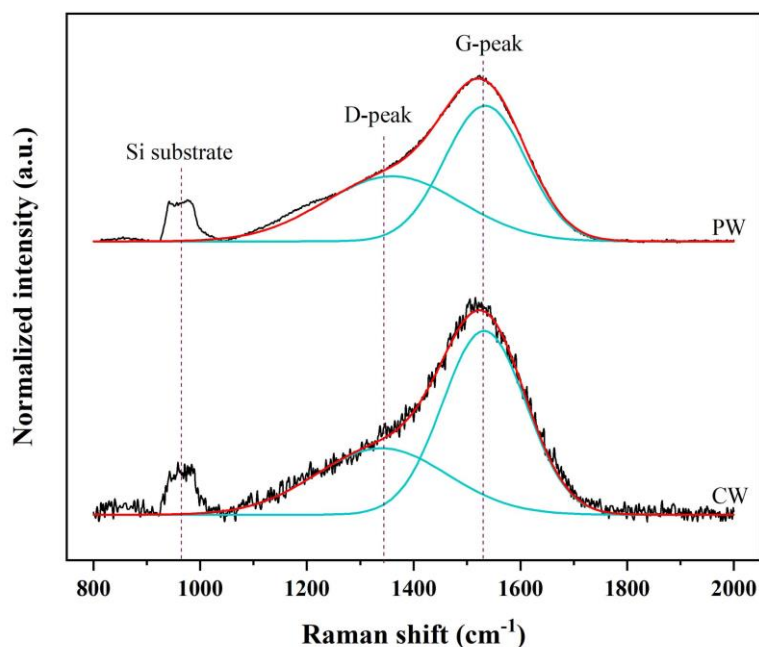
ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามาน

เมื่อทำการเปรียบเทียบเส้นสเปกตรัมรามานของฟิล์ม a-C:H ในช่วงเลขคลื่น 800 cm^{-1} ถึง 2000 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการตกสะสมที่ก่อดังไฟฟ้า 100 W ในโหมดต่อเนื่องและโหมดพัลส์ ตามรูปที่ 2 พบว่าฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมในโหมดต่อเนื่อง ปรากฏพิกัดที่ตำแหน่งเลขคลื่น $1340 \pm 0.00 \text{ cm}^{-1}$ และปรากฏพิกัดที่ตำแหน่งเลขคลื่น $1531 \pm 1.15 \text{ cm}^{-1}$ ขณะที่ฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมในโหมดพัลส์ ปรากฏพิกัดที่ตำแหน่งเลขคลื่น $1357 \pm 5.57 \text{ cm}^{-1}$ และปรากฏพิกัดที่ตำแหน่งเลขคลื่น $1533 \pm 1.15 \text{ cm}^{-1}$ โดยพิกัดเกิดจากการดูดกลืนพลังงานของพันธะคาร์บอนในคลัส

เตอร์ที่มีโครงสร้างแบบ sp^2 และทำให้เกิดการสั่นแบบยืด-หดของพันธะ (stretching vibrations) ทั้งในแบบโซ่ (chains) และแบบวงแหวนอะโรมาติก (aromatic rings) (Ferrari, 2004) และพิกัดที่เกิดจากการดูดกลืนพลังงาน

ของพันธะคาร์บอนในคลัสเตอร์ที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ (disorder) ของพันธะ sp^2 และเกิดการสั่นของวงแหวนอะโรมาติกในโหมด บริททิง (breathing mode) เท่านั้น (Ferrari, 2004) นอกจากนี้ฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมทั้งสองโหมดยังปรากฏพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 950 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับพิกของแผ่นฐานซิลิกอน (Han et al., 2012; Schwan et al., 1996) อัตราส่วนพื้นที่ใต้พีกต่อพื้นที่ใต้พีก (I_D / I_G) จากสเปกตรัมรามานจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณพันธะคาร์บอน sp^3 (%) ในโครงสร้างของฟิล์มคาร์บอนเหมือนเพชร โดยทั่วไปแล้วถ้าสัดส่วน I_D / I_G มีค่าน้อยลงจะแสดงถึงสัดส่วนคลัสเตอร์ของคาร์บอนที่มีโครงสร้าง sp^3 มากขึ้น (Han et al., 2012) และถ้าหากยอดพีกมีการเลื่อนตำแหน่งไปทางเลขคลื่นมากขึ้นจะมีแนวโน้มที่สัดส่วนคลัสเตอร์ของคาร์บอนที่มีโครงสร้าง sp^3 มีค่ามากขึ้น (Ferrari & Robertson, 2001) และค่าความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของยอดพีกสามารถเชื่อมโยงกับขนาดคลัสเตอร์ (cluster diameter) ของแกรไฟต์ (Ferrari and Robertson, 2000) คือ เมื่อความกว้างของยอดพีกมาก ขนาดเกรนของกลุ่มแกรไฟต์จะมีขนาดเล็กลง (Schwan et al., 1996) ซึ่งในงานวิจัยนี้ฟิล์ม a-C:H ที่ได้จากการตกสะสมในโหมดต่อเนื่องให้สัดส่วน I_D / I_G ประมาณ 0.57 ± 0.02 และความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของพีกมีค่าเป็น $185 \pm 2.31\text{ cm}^{-1}$ ขณะที่ ฟิล์ม a-C:H ที่ได้จากการตกสะสมในโหมดพัลส์จะให้สัดส่วน I_D / I_G ประมาณ 0.76 ± 0.05 และความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของพีกมีค่าเป็น $182 \pm 3.46\text{ cm}^{-1}$ แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้เป็นเพียงเทคนิคที่ใช้สำหรับตรวจสอบคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มเบื้องต้นเท่านั้น ซึ่งการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มโดยละเอียดต้องเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ ร่วมด้วย ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2 สเปกตรัมรามานของฟิล์ม a-C:H ที่เตรียมด้วยวิธีอาร์เอฟ-ฟิสิวิดีในโหมดต่อเนื่องและโหมดพัลส์

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเนกซาฟ (NEXAFS)

ปริมาณพันธะคาร์บอนในคลัสเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบ sp^2 ของฟิล์ม a-C:H ถูกตรวจวิเคราะห์โดยละเอียดโดยใช้เทคนิคเนกซาฟ รูปที่ 3 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนของคาร์บอน K-edge ในช่วงพลังงานโฟตอน 270 eV ถึง 330 eV สเปกตรัมของฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมในโหมดต่อเนื่องและโหมดพัลส์ถูกปรับเทียบกับตำแหน่งสูงสุดของ HOPG ซึ่งใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงของพันธะคาร์บอน π^* จากรูปจะเห็นได้ว่าสเปกตรัมคาร์บอน K-edge ของทั้ง 2 ตัวอย่างมีรูปร่างที่คล้ายคลึงกัน แสดงให้เห็นเป็น 2 โครงสร้างหลักคือ การสั่นพ้องของ pre-edge ระหว่างพลังงานโฟตอน 270 eV ถึง 289 eV ซึ่งถูกจัดให้อยู่ในสถานะ π^* และการสั่นพ้องของ post-edge ที่พลังงานโฟตอนระหว่าง 290 eV ถึง 330 eV ซึ่งถูกจัดให้อยู่ในสถานะ σ^* (Rittihong et al., 2020; Tunmee et al., 2015) ซึ่งในโครงสร้างทั้งสองนี้สามารถแยกสเปกตรัมคาร์บอน K-edge ออกเป็น 7 องค์ประกอบย่อยประกอบด้วยสถานะการสั่นพ้องของ $\pi^*(C=C)$ $\pi^*(C-H)$ $\sigma^*(C-H)$ $\pi^*(C=O)$ $\sigma^*(C-C)$ $\sigma^*(C=C)$ และ $\sigma^*(C\equiv C)$ ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งพลังงานโฟตอน 284.64, 286.03, 287.39, 288.33, 289.12, 292.59 และ 302.19 eV ตามลำดับ สำหรับฟิล์มที่ตกสะสมด้วยโหมดต่อเนื่อง และที่ตำแหน่ง 284.59, 286.07, 287.41, 288.33, 289.12, 292.50 และ 302.19 eV ตามลำดับ สำหรับฟิล์มที่ตกสะสมในโหมดพัลส์ การปรากฏสถานะการสั่นพ้องที่ตำแหน่งพลังงานโฟตอน 284.64 eV และ 284.59 eV ของฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมในโหมดต่อเนื่องและโหมดพัลส์เกี่ยวข้องโดยตรงกับการเปลี่ยนสถานะ $C1s \rightarrow \pi^*(C=C)$ หรือ sp^2 ในโครงสร้างของฟิล์ม ขอบการ

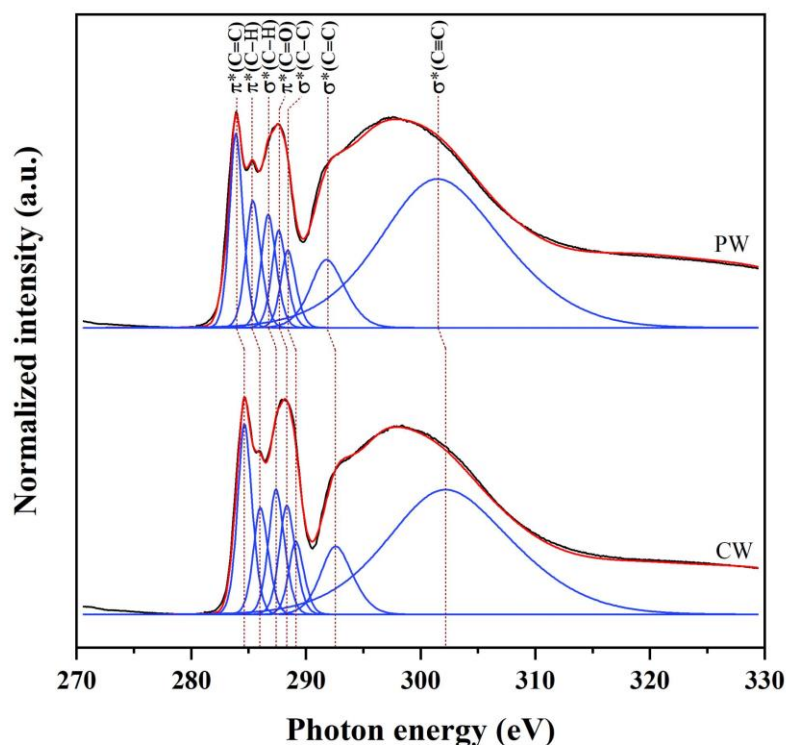
ดูดกลืนระหว่าง 288 eV และ 330 eV เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสถานะ $C1s \rightarrow \sigma^*$ ของพันธะคาร์บอนในคลัสเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบ sp sp^2 และ sp^3 (Abbas et al., 2005; Chunjaemsri et al., 2020; Lenardi et al., 1999) สเปกตรัมคาร์บอน K-edge เกี่ยวข้องกับปริมาณ sp^2 ในฟิล์มซึ่งถูกประเมินจากการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) ภายใต้พื้นที่ใต้เส้นโค้งของการสั่นพ้อง pre-edge $\pi^*(C=C)$ และปริมาณ sp^2 ถูกคำนวณโดยการเปรียบเทียบกับสเปกตรัมเนคซาฟของตัวอย่าง HOPG ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 (Lenardi et al., 1999)

$$f_{sp^2} = \frac{I_{sam}^{\pi^*} / I_{sam}(\Delta E)}{I_{ref}^{\pi^*} / I_{ref}(\Delta E)} \quad (1)$$

เมื่อ $I_{sam}^{\pi^*}$ และ $I_{ref}^{\pi^*}$ คือ พื้นที่ใต้เส้นโค้งฟิสิก $\pi^*(C=C)$ ของฟิล์ม a-C:H และวัสดุอ้างอิง HOPG ตามลำดับ $I_{sam}(\Delta E)$ และ $I_{ref}(\Delta E)$ คือ พื้นที่ใต้เส้นโค้งของสเปกตรัมที่อยู่ระหว่าง 289.0 eV ถึง 330.0 eV

โดยการปรับเส้นโค้ง สเปกตรัมคาร์บอน K-edge จะถูกลบพื้นหลังโดยใช้ฟังก์ชัน arctangent พร้อมกับการยกขอบการดูดกลืนไปที่ 290 eV (Abbas et al., 2005; Outka and Stöhr, 1988) ซึ่งจากการคำนวณหาปริมาณ sp^2 (%) ตามสมการที่ 1 แล้ว พบว่า ปริมาณ sp^2 (%) ที่ได้จากฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมในโหมดต่อเนื่องมีค่าประมาณ 62.5% ขณะที่ปริมาณ sp^2 (%) ที่ได้จากการตกสะสมฟิล์มในโหมดพัลส์มีค่าประมาณ 59.3% ปริมาณ sp^2 (%) ที่น้อยกว่าสอดคล้องโดยตรงกับปริมาณ sp^3 (%) ที่มากกว่า เนื่องจากฟิล์ม DLC ที่ปริมาณ sp^3 (%) สูงจะ

มีความหนาแน่นสูงตามไปด้วย ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ดังนั้นฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมในโหมดพัลส์จึงน่าจะมีสมบัติเป็นฟิล์มคาร์บอนเหมือนเพชรที่ดีกว่าโหมดต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามจะต้องพิจารณาผลการตรวจสอบสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มด้วยเทคนิคเอกซเรย์เอซ และเอกซอาร์อาร์ เพื่อหาปริมาณ sp^2 sp^3 และความหนาแน่นของฟิล์ม a-C:H ตามลำดับต่อไป



รูปที่ 3 สเปกตรัมเนกซาฟการดูดกลืนของคาร์บอน K-edge ของฟิล์ม a-C:H ที่เตรียมด้วยวิธีอาร์เอฟ-พรีซีวดี ในโหมดต่อเนื่องและโหมดพัลส์

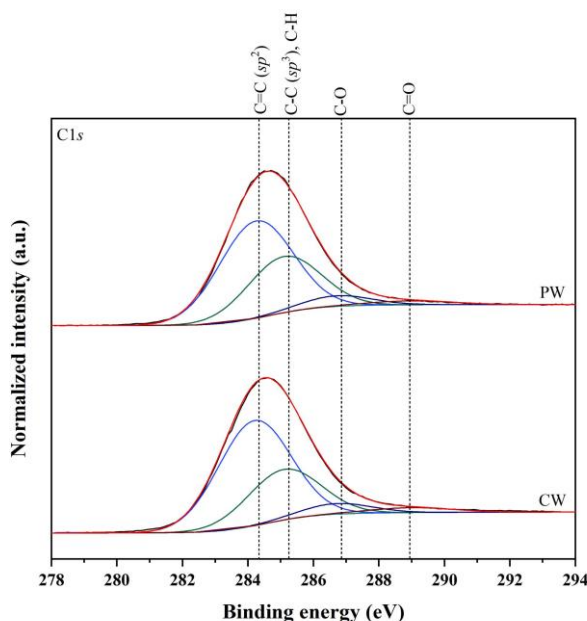
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซ์พีเอส (XPS)

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมด้วยกำลังไฟฟ้า 100 W ในโหมดต่อเนื่องและโหมดพัลส์ ด้วยเทคนิคเอกซ์พีเอส แสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งแสดงการกระจายตัวตามพลังงานของอิเล็กตรอนที่กระเจิงออกมาจากคาร์บอน C 1s ในช่วงพลังงานยึดเหนี่ยว 278 eV ถึง 294 eV ซึ่งเส้นสเปกตรัมได้รับการลบพื้นหลังโดยใช้ฟังก์ชัน Shirley เป็นเส้นฐาน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าฟิล์มประกอบด้วยคาร์บอนเป็นหลัก พีกสูงสุดของสเปกตรัม C 1s ปรากฏที่พลังงานยึดเหนี่ยว 284.2 eV ซึ่งประกอบไปด้วยพีกย่อย 4 พีกที่พลังงานยึดเหนี่ยว 284.2, 285.1, 286.7 และ 289 eV ที่สอดคล้องกับพลังงานยึดเหนี่ยวของพันธะ $C=C(sp^2)$, $C-C(sp^3)$ หรือ $C-H$, $C-O$ และ $C=O$ ตามลำดับ (Lesiak et al., 2018; Rittihong et al., 2020; Zemek et al., 2018) ในกรณี

ของแกรไฟต์ พันธะ $C=C(sp^2)$ จะปรากฏยอดพีกที่ตำแหน่ง 284.2 eV ขณะที่เพชร พันธะ $C-C(sp^3)$ จะปรากฏที่ตำแหน่ง 285.1 eV (Chen et al., 2019) พันธะระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนซึ่งมีอยู่เล็กน้อยอาจเกิดจากออกซิเจนที่หลงเหลืออยู่ (residue gases) ภายในระบบสุญญากาศเข้าไปสร้างพันธะกับอะตอมคาร์บอนระหว่างการ

ตกสะสม ปริมาณพันธะคาร์บอนในคลัสเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบ sp^2 และ sp^3 ของฟิล์ม a-C:H สามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของ $C=C(sp^2)$ และ $C-C(sp^3)$ ต่อพื้นที่ใต้กราฟของสเปกตรัม $C\ 1s$ ซึ่งในงานวิจัยนี้ ปริมาณ sp^2 (%) และ sp^3 (%) ที่ได้จากการตกสะสมฟิล์มในโหมดต่อเนื่องมีค่าเท่ากับ 61.3 % และ 29.5% ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณ sp^2 (%) และ sp^3 (%) ที่ได้จากการตกสะสมฟิล์มในโหมดพัลส์มีค่าเท่ากับ 58.1% และ 33.2% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณ sp^2 (%) ที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิคเอกซ์พีเอสสอดคล้องกับผลที่ได้จากเทคนิคเอนกซาฟ คือ ฟิล์ม a-C:H ที่ได้จากการตกสะสมในโหมดพัลส์จะมีปริมาณ sp^2 (%) ที่น้อยกว่าการใช้โหมดต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ sp^3 (%) ของฟิล์มที่ตกสะสมโดยใช้โหมดพัลส์ที่มีค่ามากกว่าการใช้โหมดต่อเนื่อง ดังนั้นฟิล์ม a-C:H ที่เตรียมโดยใช้กำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุในโหมดพัลส์จะให้สมบัติเชิงโครงสร้างที่มีความคล้ายเพอร์มามากกว่าโหมดต่อเนื่อง

เนื่องจากปริมาณพันธะคาร์บอนในคลัสเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบ sp^3 จะส่งผลโดยตรงต่อความหนาแน่นของฟิล์ม a-C:H (Zhou, et al., 2017) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการตรวจวิเคราะห์ความหนา ความหนาแน่น และความขรุขระของฟิล์มเพิ่มเติมด้วยเทคนิคเอกซ์อาร์อาร์ ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป



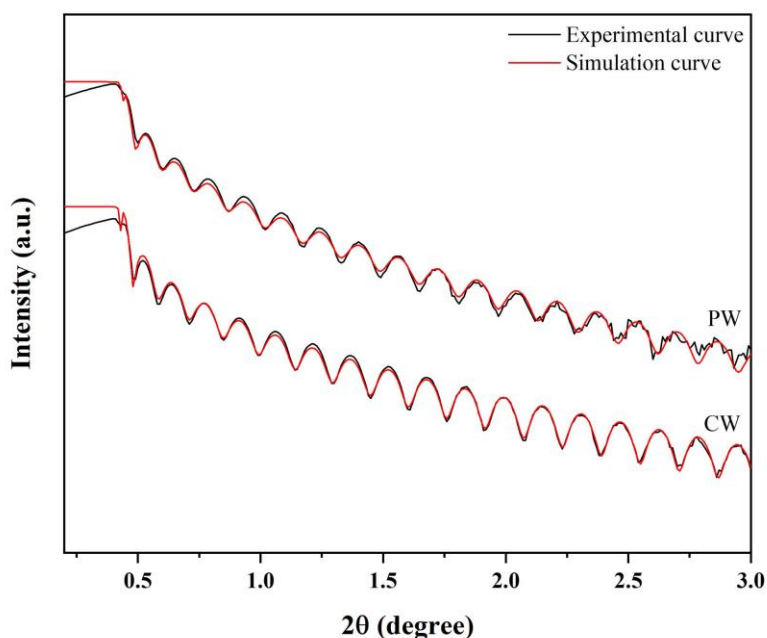
รูปที่ 4 สเปกตรัมเอกซ์พีเอสจาก $C\ 1s$ ของฟิล์ม a-C:H ที่เตรียมด้วยวิธีอาร์เอฟ-พรีซีวดีโน โหมดต่อเนื่องและโหมดพัลส์

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซ์อาร์อาร์ (XRR)

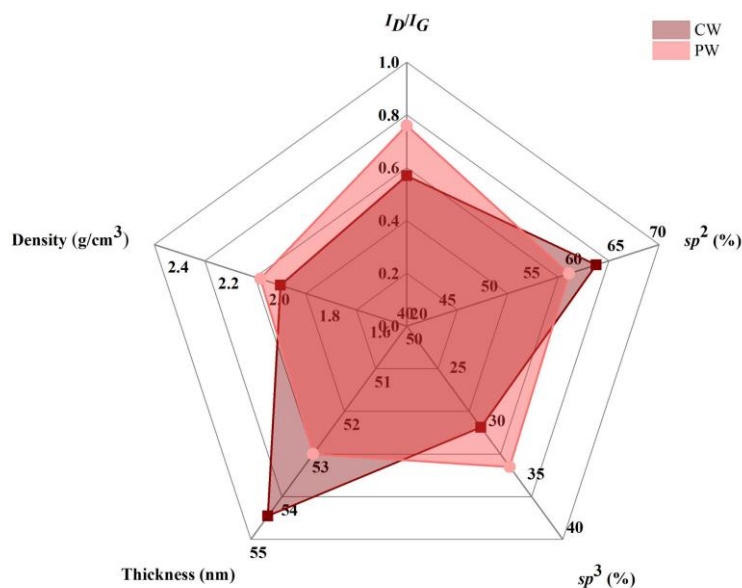
เทคนิคเอกซ์อาร์อาร์สามารถตรวจวิเคราะห์โครงสร้างของชั้นฟิล์ม (thin layered structures) พื้นผิว (surfaces) และลักษณะของรอยต่อ (interfaces) ของชั้นฟิล์ม โดยการใช้ผลของการหักเหและสะท้อนกลับหมดของ

รังสีเอกซ์ (total external reflection of X-rays) ผ่านชั้นฟิล์ม ซึ่งสามารถตรวจวิเคราะห์ได้ทั้งแบบฟิล์มชั้นเดียว (single layer structure) และฟิล์มหลายชั้น (multilayer structures) ดังนั้นการวัดการสะท้อนรังสีเอกซ์จึงต้องทำในช่วงมุมตกกระทบน้อยๆ (grazing incidence angles) ใกล้ ๆ มุมวิกฤต (around the critical angle) (Zhang et al., 1999)(Chen et al., 2019) รังสีเอกซ์ส่วนหนึ่งจะมีการสะท้อนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มซึ่งเป็นตำแหน่งที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนแปลง ลำรังสีเอกซ์ที่สะท้อนบริเวณรอยต่อและผิวฟิล์มจะเกิดการแทรกสอดกันทำให้เห็นริ้วรอยการแทรกสอดทั้งแบบเสริมและแบบหักล้าง เกิดเป็นรูปแบบการสั่นที่มีความสัมพันธ์กับความหนา ความหนาแน่น และความขรุขระของฟิล์ม (Terada et al., 2001)

ลักษณะริ้วรอยการแทรกสอดของฟิล์ม a-C:H ที่ได้จากการตกสะสมในโหมดต่อเนื่องและโหมดพัลส์ (เส้นสีดำ) และผลการจำลองข้อมูลของเส้นโค้งเอกซ์อาร์อาร์ด้วยโปรแกรม Leptos 7.8 ในช่วงมุมตกกระทบ 0.2° ถึง 3° (เส้นสีแดง) แสดงไว้ในรูปที่ 5 ซึ่งสามารถพิจารณาการแทรกสอดออกเป็น 3 บริเวณ ดังนี้ 1) ค่ามุมวิกฤตของการลดลงช่วงแรก จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนาแน่นของฟิล์ม 2) คาบเวลาของการสั่น (oscillation period) จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนาของฟิล์มชั้นบนสุด 3) แอมพลิจูดของการสั่น (oscillation amplitude) และความชันของการลดลงของความเข้มรังสีเอกซ์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความขรุขระของผิวฟิล์ม (surface roughness) และความขรุขระบริเวณรอยต่อของฟิล์ม (interface roughness) (Kojima et al., 1999; Yasaka, 2010) ผลการวิเคราะห์กราฟเอกซ์อาร์อาร์ ตามรูปที่ 5 พบว่าฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมในโหมดต่อเนื่องมีความหนา 55.5 nm มีความหนาแน่น 2.0 g/cm^3 และมีความขรุขระเฉลี่ย 0.6 nm ในขณะที่ฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมในโหมดพัลส์ที่มีความหนาอยู่ที่ 53.0 nm มีความหนาแน่น 2.1 g/cm^3 และมีความขรุขระเฉลี่ย 0.8 nm โดยตัวแปรสำคัญที่สัมพันธ์กับโครงสร้างของฟิล์ม คือ ความหนาแน่น จากผลการวิเคราะห์เอกซ์อาร์อาร์นี้จะเห็นว่าฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมในโหมดพัลส์มีความหนาแน่นมากกว่าฟิล์ม a-C:H ที่ได้จากการตกสะสมในโหมดต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดปริมาณ sp^2 (%) ที่น้อยกว่าโดยใช้เทคนิคเคมิกซาลและปริมาณ sp^3 (%) ที่มากกว่าจากเทคนิคเอกซ์พีเอส ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยค่าสัดส่วน I_D / I_G ที่วิเคราะห์ได้จากสเปกตรัมรามานจะขึ้นอยู่กับการปนเปื้อนคาร์บอนในคลัสเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบ sp^2 ที่ตอบสนองโดยตรงต่อการกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นในช่วงที่ตามองเห็นได้ (visible light) ซึ่งปริมาณคลัสเตอร์ sp^2 (%) อาจจะไม่ขึ้นกับปริมาณคลัสเตอร์ sp^3 (%) (Casiraghi et al., 2005) ดังนั้นค่าสัดส่วน I_D / I_G ของฟิล์ม a-C:H ที่เตรียมได้จากเงื่อนไขการตกสะสมที่ไม่ต่างกันมาก อาจจะทำให้แนวโน้มที่ไม่สัมพันธ์กับปริมาณ sp^2 (%) และ sp^3 (%) ที่วัดได้จากเทคนิคอื่น ๆ



รูปที่ 5 รูปแบบการสั่นจากการสะท้อนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม a-C:H ที่เตรียมด้วยวิธีอาร์เอฟ-พีโอซีวีดีในโหมดต่อเนื่องและโหมดพัลส์



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วน I_D / I_G ปริมาณ sp^2 และ sp^3 ความหนาและความหนาแน่นของฟิล์ม a-C:H ที่เตรียมด้วยวิธีอาร์เอฟ-พีโอซีวีดีในโหมดต่อเนื่องและโหมดพัลส์

วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมโดยใช้กำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ 100 W ในโหมดต่อเนื่องและโหมดพัลส์ โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามาน เนคชาฟ เอกซ์พีเอส และเอกซ์อาร์อาร์ พบว่าการใช้กำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุในโหมดพัลส์ให้ฟิล์ม a-C:H ที่มีสัดส่วน I_D / I_G เท่ากับ 0.76 ปริมาณ sp^2 และ sp^3 เท่ากับ 59.3% และ 33.2% ตามลำดับ ฟิล์มมีความหนา 53.0 nm และมีความหนาแน่น เท่ากับ 2.1 g/cm^3 ในขณะที่การใช้กำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุในโหมดต่อเนื่องให้ฟิล์ม a-C:H ที่มีสัดส่วน I_D / I_G เท่ากับ 0.57 ปริมาณ sp^2 และ sp^3 เท่ากับ 62.5% และ 29.5% ตามลำดับ ฟิล์มมีความหนา 54.5 nm และมีความหนาแน่น เท่ากับ 2.0 g/cm^3 ดังนั้นที่กำลังไฟฟ้าและเวลา RF on เท่ากัน ฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมในโหมดพัลส์มีความหนาแน่นมากกว่าฟิล์ม a-C:H ที่ได้จากการตกสะสมในโหมดต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดปริมาณ sp^2 (%) ที่น้อยกว่า โดยใช้เทคนิคเนคชาฟ และปริมาณ sp^3 (%) ที่มากกว่าจากเทคนิคเอกซ์พีเอส

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์ในการตรวจวัดสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มจากสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา และศูนย์เครื่องมือกลางคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เอกสารอ้างอิง

- Abbas, G. A., Roy, S. S., Papakonstantinou, P., & McLaughlin, J. A. (2005). Structural investigation and gas barrier performance of diamond-like carbon based films on polymer substrates. *Carbon*, 43(2), 303–309. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.09.016>
- Casiraghi, C., Piazza, F., Ferrari, A. C., Grambole, D., & Robertson, J. (2005). Bonding in hydrogenated diamond-like carbon by Raman spectroscopy. *Diamond and Related Materials*, 14(3–7), 1098–1102. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2004.10.030>
- Chen, L., Wang, J., Shang, L., Lu, Z., Wu, Z., & Zhang, G. (2019). Gas phase lubrication on diamond-like carbon film: Tribochemical reactions under isobutane condition. *Tribology International*, 133(September 2018), 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.004>
- Chunjaemsri, T., Chanlek, N., Sukkha, U., Nakajima, H., Rujirawat, S., Yimnirun, R., & Kidkhunthod, P. (2020). Synchrotron-based NEXAFS analysis of thermal-treated diamond-like carbon films. *Radiation Physics and Chemistry*, 175, 108271. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.04.021>

- Dos Santos, F. C., Harb, S. V., Menu, M. J., Turq, V., Pulcinelli, S. H., Santilli, C. V., & Hammer, P. (2015). On the structure of high performance anticorrosive PMMA-siloxane-silica hybrid coatings. *RSC Advances*, 5(129), 106754–106763. <https://doi.org/10.1039/c5ra20885h>
- Fan, M., Andrade, G. F. S., & Brolo, A. G. (2011). A review on the fabrication of substrates for surface enhanced Raman spectroscopy and their applications in analytical chemistry. *Analytica Chimica Acta*, 693(1–2), 7–25. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2011.03.002>
- Ferrari, A. C., & Robertson, J. (2000). Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physical Review B*, 61(20), 14095–14107. <https://doi.org/10.1103/physrevb.61.14095>
- Ferrari, A. C., & Robertson, J. (2001). Origin of the 1150 – cm^{-1} Raman mode in nanocrystalline diamond. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 63(12), 2–5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.63.121405>
- Ferrari, A. C. (2004). Diamond-like carbon for magnetic storage disks. *Surface and Coatings Technology*, 180, 190–206. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.146>
- Han, L., Liu, D., Chen, X., Yang, L., & Zhao, Y. (2012). The deposition of a thick tetrahedral amorphous carbon film by argon ion bombardment. *Applied Surface Science*, 258(10), 4794–4800. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.01.100>
- Kojima, I., Boquan, L., & Fujimoto, T. (1999). Structural characterization of thin films by grazing incidence X-ray reflectivity. *Journal of the National Institute of Materials and Chemical Research*, 7(6), 335–346.
- Lei, Y., Jiang, J., Wang, Y., Bi, T., & Zhang, L. (2019). Structure evolution and stress transition in diamond-like carbon films by glancing angle deposition. *Applied Surface Science*, 479, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.02.063>
- Lenardi, C., Piseri, P., Briois, V., Bottani, C. E., Li Bassi, A., & Milani, P. (1999). Near-edge X-ray absorption fine structure and Raman characterization of amorphous and nanostructured carbon films. *Journal of Applied Physics*, 85(10), 7159–7167. <https://doi.org/10.1063/1.370527>
- Lesiak, B., Kövér, L., Tóth, J., Zemek, J., Jiricek, P., Kromka, A., & Rangan, N. (2018). C sp^2/sp^3 hybridisations in carbon nanomaterials – XPS and (X)AES study. *Applied Surface Science*, 452, 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.269>
- Li, L., Zhang, H., Zhang, Y., Chu, P. K., Tian, X., Xia, L., & Ma, X. (2002). Structural analysis of arc deposited diamond-like carbon films by Raman and X-ray photoelectron spectroscopy. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 94(1), 95–101. [https://doi.org/10.1016/S0921-5107\(02\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5107(02)00079-X)

- Nakajima, H., Tong-On, A., Sumano, N., Sittisard, K., Rattanasuporn, S., Euaruksakul, C., & Songsiririthigul, P. (2013). Photoemission spectroscopy and photoemission electron microscopy beamline at the Siam Photon Laboratory. *Journal of Physics: Conference Series*, 425(13), 132020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/425/13/132020>
- Outka, D. A., & Stöhr, J. (1988). Curve fitting analysis of near-edge core excitation spectra of free, adsorbed, and polymeric molecules. *The Journal of Chemical Physics*, 88(6), 3539–3554. <https://doi.org/10.1063/1.453902>
- Ozeki, K., Nagashima, I., Ohgoe, Y., Hirakuri, K. K., Mukaibayashi, H., & Masuzawa, T. (2009). Gas barrier properties of diamond-like carbon films coated on PTFE. *Applied Surface Science*, 255(16), 7286–7290. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.03.082>
- Rittihong, U., Akasaka, H., Euaruksakul, C., Tomidokoro, M., Kamonsuttipaijit, N., Nakajima, H., Supruangnet, R., Rojviriya, C., Chingsungnoen, A., Poolcharuansin, P., Ohtake, N., & Tunmee, S. (2020). Synchrotron-based spectroscopic analysis of diamond-like carbon films from different source gases. *Radiation Physics and Chemistry*, 173, 108944. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108944>
- Robertson, J. (2002). Diamond-like amorphous carbon. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 37(4–6), 129–281. [https://doi.org/10.1016/s0927-796x\(02\)00005-0](https://doi.org/10.1016/s0927-796x(02)00005-0)
- Schwan, J., Ulrich, S., Batori, V., Ehrhardt, H., & Silva, S. R. P. (1996). Raman spectroscopy on amorphous carbon films. *Journal of Applied Physics*, 80(1), 440–447. <https://doi.org/10.1063/1.362745>
- Terada, S., Murakami, H., & Nishihagi, K. (2001). Thickness and density measurement for new materials with combined X-ray technique. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing Conference (IEEE Cat. No. 01CH37160)*, (pp. 125–130). <https://doi.org/10.1109/ASMC.2001.925630>
- Tunmee, S., Supruangnet, R., Nakajima, H., Zhou, X., Arakawa, S., Suzuki, T., Kanda, K., Ito, H., Komatsu, K., & Saitoh, H. (2015). Study of synchrotron radiation near-edge X-ray absorption fine-structure of amorphous hydrogenated carbon films at various thicknesses. *Journal of Nanomaterials*, 16(1), 1-7. <https://doi.org/10.1155/2015/276790>
- Yasaka, M. (2010). X-ray thin-film measurement techniques V. X-ray reflectivity measurement. *The Rigaku Journal*, 26(2), 1-9.
- Yamamoto, S., Kodama, H., Hasebe, T., Shirakura, A., & Suzuki, T. (2005). Oxygen transmission of transparent diamond-like carbon films. *Diamond and Related Materials*, 14(3–7), 1112–1115. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2004.10.025>

- Zemek, J., Houdkova, J., Jiricek, P., & Jelinek, M. (2018). Surface and in-depth distribution of sp² and sp³ coordinated carbon atoms in diamond-like carbon films modified by argon ion beam bombardment during growth. *Carbon*, 134, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.03.072>
- Zhang, G., Chen, Q., Xu, W., Pan, F., & Miao, B. (2011). Influence on the proprieties of PET coated diamond-like carbon film for different preparing condition by PECVD. *Applied Mechanics and Materials*, 80, 104–107. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.80-81.104>
- Zhang, Q., Yoon, S. F., Rusli, Ahn, J., Yang, H., & Bahr, D. (1999). Study of hydrogenated diamond-like carbon films using x-ray reflectivity. *Journal of Applied Physics*, 86(1), 289–296. <https://doi.org/10.1063/1.370792>
- Zhou, X. L., Suzuki, T., Nakajima, H., Komatsu, K., Kanda, K., Ito, H., & Saitoh, H. (2017). Structural analysis of amorphous carbon films by spectroscopic ellipsometry, RBS/ERDA, and NEXAFS. *Applied Physics Letters*, 110(20). <https://doi.org/10.1063/1.4983643>
- Zhou, X. L., Tunmee, S., Suzuki, T., Phothongkam, P., Kanda, K., Komatsu, K., Kawahara, S., Ito, H., & Saitoh, H. (2017). Quantitative NEXAFS and solid-state NMR studies of sp³/(sp² + sp³) ratio in the hydrogenated DLC films. *Diamond and Related Materials*, 73, 232–240. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2016.09.026>

Research Article

การเปรียบเทียบผลการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวที่ไม่มี รูพรุนจากกาที่ใช้ในงานทั่วไปและกาสำหรับงานทาง นิติวิทยาศาสตร์ด้วยตู้อบไซยาโนอะคริเลต

Comparison of general cyanoacrylate and Sirchie cyanoacrylate for latent fingerprint on non-porous surfaces by cyanosafe fuming chamber with Airsafe controller

ปรารถนา พานทอง^{1,3} ไพเราะ ไพหรียญกิจ² สุชาดา จิรสิริสุข⁴ และ สุนิษา โอบอ้อม^{2*}

Pratthana Phanthong^{1,3}, Pairoa Praihirunkit², Suchada Jirasirisuk⁴ and Sunisa Aobaom^{2*}

¹บัณฑิตศึกษา สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ประเทศไทย

²ภาควิชาเทคนิคการแพทย์ คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ประเทศไทย

³พิสูจน์หลักฐานจังหวัดนครสวรรค์ ประเทศไทย

⁴สถาบันนิติวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย

¹Graduate Program in Forensic Science, Faculty of Allied Health Sciences, Thammasat University, Rangsit Campus, Thailand

²Department of Medical Technology, Faculty of Allied Health Sciences, Thammasat University, Rangsit Campus, Thailand

³Nakhon Sawan Provincial Police Forensic Science, Thailand

⁴Central Institute of Forensic Science, Thailand

*E-mail: Sunisa.aobaom@gmail.com

Received: 19/12/2020; Revised: 10/02/2021; Accepted: 14/02/2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝงด้วยกาที่ใช้ในงานทั่วไป (กา ECA ที่ใช้ในงานทั่วไป) 5 ชนิด ที่มีความเข้มข้นของเอทิลไซยาโนอะคริเลตต่างกันระหว่าง 84.5 – 99.5% เปรียบเทียบกับกาสำหรับการตรวจหารอยลายนิ้วมือทางด้านนิติวิทยาศาสตร์โดยเฉพาะ (ECA Sirchie) ผลการทดลองพบว่ากา ECA ที่ใช้ในงานทั่วไปที่มีความเข้มข้นของเอทิลไซยาโนอะคริเลต 99.5% ใช้เวลารวมที่ 40 นาทีให้จำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษ เทียบเท่ากับกา ECA Sirchie และเมื่อเก็บรักษาลายนิ้วมือที่ได้จากการรมกา ECA ที่ใช้ในงานทั่วไป 99.5% ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 4 เดือน พบว่าลายนิ้วมือยังคงปรากฏจุดลักษณะสำคัญพิเศษชัดเจน เมื่อทดสอบการใช้

งานจริงกับอาสาสมัครที่ทำการประทับรอยนิ้วมือ จากนั้นเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1, 7, 14 และ 30 วัน ก่อนนำไปปรอทกวาด พบว่าลายนิ้วมือที่เก็บไว้ตั้งแต่ 1-30 วัน ให้คุณภาพลายนิ้วมืออยู่ในระดับดีมากถึงปานกลาง ในอาสาสมัคร 80% ซึ่งมีจำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษเพียงพอต่อการตรวจพิสูจน์บุคคลตามมาตรฐานการตรวจลายพิมพ์นิ้วมือของประเทศไทย งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่ากาวที่ใช้ในงานทั่วไปที่มีความเข้มข้นของเอทิลไซยาโนอะคริเลต 99.5% มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับกาว ECA Sirchie ที่ระยะเวลาการรมกาว 40 นาที และสามารถใช้ทดแทนกาว ECA Sirchie ซึ่งมีราคาสูงกว่า เพื่อเป็นลดต้นทุนการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงด้วยการรมไซยาโนอะคริเลต

คำสำคัญ: ลายนิ้วมือแฝง, พื้นผิวที่ไม่มีรูพรุน, ไซยาโนอะคริเลต, เทคนิคการรม

Abstract

The present study aims to compare the number of minutiae from latent fingerprints treated with five cyanoacrylate adhesives, ethyl-2-cyanoacrylate concentrations ranging from 84.5 – 99.5%, to the forensically specific ethyl-2-cyanoacrylate adhesives (ECA Sirchie). The result showed that the number of minutiae obtained from the 99.5% ethyl-2-cyanoacrylate adhesive was comparable to that from ECA Sirchie when the fuming time is 40 minutes. The fingerprints treated with the 99.5% cyanoacrylate adhesive were stored at room temperature for 4 months and the result showed that their minutia remained detectable. Furthermore, the functional testing by group samples of latent fingerprints prior to cyanoacrylate fuming was tested using the fingerprint stored at room temperature for 1, 7, 14 and 30 days. Following the fuming with the 99.5% ethyl-2-cyanoacrylate adhesive, it was revealed that the 80% of fingerprints stored for 1-30 day showed a very good to medium quality, respectively. The numbers of minutiae obtained from these fingerprints were sufficient for person identification according to the standard guideline of the Office of Police Forensic Science Thailand. In conclusion, this study showed that the 99.5% ethyl-2-cyanoacrylate adhesive can be effectively used for the development of latent fingerprints and could replace ECA SirchieTM. This can reduce the cost of cyanoacrylate fuming techniques since the 99.5% ethyl-2-cyanoacrylate adhesive is cheaper than ECA Sirchie.

Keywords: Latent fingerprint, Non-porous materials, Cyanoacrylate, Fuming technique

บทนำ

ลายนิ้วมือกลายเป็นส่วนหนึ่งของการระบุเอกลักษณ์บุคคลในงานทางนิติวิทยาศาสตร์ เนื่องจากลายนิ้วมือมีคุณสมบัติสำคัญ ได้แก่ ลายนิ้วมือไม่สามารถเปลี่ยนแปลง แม้อายุจะมากขึ้นก็ตาม และลายนิ้วมือของแต่ละบุคคลจะไม่ซ้ำกัน แม้จะเป็นฝาแฝดที่เกิดจากไข่ใบเดียวกัน ลายนิ้วมือแฝงที่พบในสถานที่เกิดเหตุ ประกอบด้วย ลายนิ้วมือ

ที่มองเห็นด้วยตาเปล่า และลายนิ้วมือที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า โดยแต่ละประเภทจะมีเทคนิคการตรวจพิสูจน์ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิว ด้วยคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้การตรวจลายนิ้วมือเป็นที่นิยม ส่งผลให้มีการศึกษาค้นคว้า และพัฒนาเทคนิคการตรวจหาลายนิ้วมือแฝง เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการตรวจพิสูจน์อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาการหาลายนิ้วมือแฝงด้วยการรมไซยาโนอะคริเลต ที่มีงานวิจัยมากมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจพิสูจน์รอยลายนิ้วมือแฝงให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

การหาลายนิ้วมือแฝงด้วยการรมไซยาโนอะคริเลต (cyanoacrylate : CA) สามารถใช้ตรวจหารอยลายนิ้วมือบนวัสดุที่ไม่มีรูพรุนหรือกึ่งรูพรุน เช่น แผ่นกระจก แผ่นพลาสติก หรือกระดาษเคลือบมัน โดยโมเลกุลของไซยาโนอะคริเลต เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) บนสารประกอบในลายนิ้วมือแฝงอย่าง โปรตีนและกรดอะมิโน (Wargacki et al., 2007; Lekpradit, 2010) เกิดเป็นเส้นสีขาว โดยโมโนเมอร์ไซยาโนอะคริเลตเมื่อถูกเร่งปฏิกิริยาคด้วยความชื้นเกิดเป็นพอลิไซยาโนอะคริเลต (Bumbrab, 2017) ซึ่งปัจจุบันการรมไซยาโนอะคริเลตมีตั้งแต่วิธีการประกอบอุปกรณ์การรมไซยาโนอะคริเลตขึ้นมาเองโดยใช้เครื่องให้ความร้อน (Heat Source) ในการเร่งปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งสารไซยาโนอะคริเลตที่เปลี่ยนเป็นไอ มีความเป็นพิษสูงเมื่อสูดดมเข้าไปจะทำลายระบบทางเดินหายใจ เป็นสารก่อมะเร็ง ที่อาจเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน ต่อมาจึงพัฒนาเป็นการใช้ตู้อบไซยาโนอะคริเลต (cyanoacrylate fuming chamber, CFC) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น และปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน จากการศึกษาพบว่าหากต้องการใช้ตู้อบไซยาโนอะคริเลต จะต้องใช้สารไซยาโนอะคริเลต เฉพาะสำหรับการรม ซึ่งมีราคาสูง และใช้เวลาในการสั่งซื้อ และนำเข้าจากต่างประเทศที่ค่อนข้างนาน จึงทำให้ผู้วิจัยมองหาการใช้ในงานทั่วไปทดแทนเพื่อลดปัญหาดังกล่าว จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทำการทดสอบคุณภาพของกาวที่มีส่วนผสมของไซยาโนอะคริเลตใน 4 โครงสร้างทางเคมี ซึ่งได้แก่ เมทิลไซยาโนอะคริเลต (methyl-cyanoacrylate), เอทิลไซยาโนอะคริเลต (ethyl-2-cyanoacrylate), บิวทิลไซยาโนอะคริเลต (n-butyl-cyanoacrylate) และ ออกทิลไซยาโนอะคริเลต (2-octyl-cyanoacrylate) บนพื้นผิวไม่มีรูพรุน ผลปรากฏว่า กาวที่สามารถเกาะตัวกับลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวไม่มีรูพรุนได้ดี ได้แก่ เอทิลไซยาโนอะคริเลต และ บิวทิลไซยาโนอะคริเลต แต่เอทิลไซยาโนอะคริเลต มีราคาค้นทุนที่ต่ำกว่า ทำให้เป็นที่นิยมนำมาใช้งาน (Hirth & Royds, 2013; Casault et al., 2017) ซึ่งเมื่อนำไปทำสอบกับส่วนประกอบของเหงื่อในลายนิ้วมือแฝงซึ่ง ได้แก่ แลคเตท และอะลานีน โดยการรมด้วยเอทิลไซยาโนอะคริเลต พบว่าเอทิลไซยาโนอะคริเลตเป็นสารเคมีที่มีโครงสร้างของหมู่อะคริเลต (acrylate group) ที่ติดกับหมู่ไวนิล (vinyl group) สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิเลต (carboxylate group) ที่เป็นโครงสร้างทางเคมีของสารที่เป็นส่วนประกอบของเหงื่ออย่าง แลคเตท และอะลานีน ได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำที่เป็นส่วนประกอบหลักของเหงื่อ และเมื่อเพิ่มระยะเวลาที่นานขึ้น น้ำหนักโมเลกุลของเอทิลไซยาโนอะคริเลตบนลายนิ้วมือแฝงได้เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย (Wargacki et al., 2007; Wargacki et al., 2008) โดยเมื่อหาข้อมูลเกี่ยวกับกาวที่ใช้ในงานทั่วไปที่ขายตามท้องตลาดนั้นก็มีส่วนประกอบของเอทิลไซยาโนอะคริเลตเช่นเดียวกัน จึงทำให้เกิดงานวิจัยนี้ขึ้น

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝงของกาวที่ใช้ในงานทั่วไป และกาวสำหรับการตรวจหารอยลายนิ้วมือทางด้านนิติวิทยาศาสตร์โดยเฉพาะ และทดสอบหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการรมไซยาโนอะคริเลตจากกาวที่ใช้ในงานทั่วไป ที่ทำให้ลายเส้นสีขาวของรอยลายนิ้วมือแฝงปรากฏชัดเจน คณะผู้วิจัยจึงศึกษาผลการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝงด้วยกาวที่ใช้ในงานทั่วไป ซึ่งได้แก่ กาวซูเปอร์กลู (super glue) หรือที่เรียกทั่วไปว่า กาวตราช้าง หรือกาวร้อน โดยแต่ละชนิดส่วนประกอบของเอทิลไซยาโนอะคริเลต (Ethyl-2-cyanoacrylate : ECA) ต่างกันระหว่าง 84.5 – 99.5% เปรียบเทียบกับกาวสำหรับการตรวจหารอยลายนิ้วมือทางด้านนิติวิทยาศาสตร์โดยเฉพาะ (ECA Sirchie) ซึ่งมีส่วนประกอบของเอทิลไซยาโนอะคริเลต อยู่ที่ 95 – 100% (Sirchie, 2017) ในระยะเวลาการรมต่าง ๆ โดยตรวจสอบจากค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษ (minutiae) ของรอยลายนิ้วมือแฝงด้วยระบบตรวจลายพิมพ์นิ้วมืออัตโนมัติ (Automated Fingerprint Identification System ; AFIS) นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังได้นำไปทดสอบการใช้งานกับอาสาสมัคร เพื่อเป็นการยืนยันว่าสามารถนำไปใช้ในสถานการณ์จริงได้

วิธีการทดลอง

การทดลองทำการแบ่งเป็น 2 ช่วงหลัก ช่วงแรก การเปรียบเทียบกาวไซยาโนอะคริเลตสำหรับงานทางนิติวิทยาศาสตร์กับกาวไซยาโนอะคริเลตทั่วไปโดยการเปรียบเทียบจำนวนจุดลักษณะพิเศษ ระหว่างกาวที่ใช้สำหรับงานทางนิติวิทยาศาสตร์ และกาวที่ใช้ในงานทั่วไป ในความเข้มข้นต่าง ๆ โดยใช้ค่า p-value จากการคำนวณค่าสถิติ T-test ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% และช่วงสอง การทดสอบการนำไปใช้จริง นำกาวที่ดีที่สุดจากช่วงแรก มาทดสอบการใช้งานกับลายพิมพ์นิ้วมือของจริง ซึ่งทั้งสองช่วงมีรายละเอียดการทดลอง ต่อไปนี้

1. การศึกษาชนิดกาวและเวลาที่เหมาะสมในการรมกาวเอทิลไซยาโนอะคริเลต และความคงทนของรอยลายนิ้วมือแฝงที่ได้จากการรมกาวเอทิลไซยาโนอะคริเลต

1.1. การเก็บตัวอย่าง

ล้างมือด้วยน้ำสะอาด เช็ดให้แห้ง ใช้นิ้วชี้ข้างขวา สัมผัสขี้ผึ้งอัดแข็ง (fingertip moistener) เพียง 1 ครั้ง และประทับลายนิ้วมือลงบนแผ่นพลาสติกใส จำนวน 5 ช่อง โดยไม่สัมผัสขี้ผึ้งใหม่ ซึ่งใช้น้ำหนักในการประทับลายนิ้วมือแต่ละครั้งอยู่ในช่วง 300-700 กรัม และวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 1 วัน

1.2. การรมไซยาโนอะคริเลต ด้วย CyanoSafe Fuming Chamber with AirSafe Controller

ทำการรมไซยาโนอะคริเลต ด้วยตู้อบไซยาโนอะคริเลต (Sirchie model CAS48T ,USA) ด้วยกาว 2 ประเภท ได้แก่ กาวสำหรับการตรวจหารอยลายนิ้วมือทางด้านนิติวิทยาศาสตร์โดยเฉพาะ คือ กาว ECA Sirchie (Sirchie, USA) และ กาวที่ใช้ในงานทั่วไป ได้แก่ กาว ECA 84.5% (Scotch,THA), ECA 95% (Papermate, THA), ECA 96% (Kanji, THA), ECA 97% (Kato-10, THA) และ ECA 99.5% (Daico 105, TW) รวม 6 ชนิด โดยในแต่ละครั้งจะชั่งกาวแต่ละชนิดที่ปริมาณ 1 กรัมในถ้วยฟอยด์ทรงกลม (Foil dish) จากนั้นนำไปวางบนแท่นให้ความร้อน (Solid state heating elements) ในตู้อบไซยาโนอะคริเลต นำตัวอย่างรอยลายนิ้วมือแฝงของอาสาสมัครจากการสัมผัส

จีฟิงอัดแข็งที่ทิ้งไว้ที่ระยะเวลา 1 วัน เข้าไปแขวนไว้ในตู้อบไซยาโนอะครีเลตที่ตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ประมาณ 100 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 80% จากนั้นปิดตู้ และกำหนดเวลาการทำงานภายใต้ตู้ ตั้งแต่ 12, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที นำตัวอย่างที่รมเสร็จออกมาถ่ายภาพผลการทดลอง ด้วยกล้องหัวเว่ย (HUAWEI) รุ่น P30 โดยใช้แสงธรรมชาติ ทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

1.3 การวิเคราะห์ผล

นำภาพที่ได้มาทำการวิเคราะห์จำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษ (minutiae) ด้วยเครื่องตรวจพิสูจน์ลายพิมพ์ นิ้วมืออัตโนมัติ (AFIS 4 version CAFIS 6.2) โดยเลือกภาพจากช่องที่ 4 และ 5 เนื่องจากมีความใกล้เคียงกับรอยลายนิ้วมือแท้จริง ในการวิเคราะห์บันทึกค่าของจำนวนจุดที่ได้

1.4 การวิเคราะห์ค่าสถิติ และเปรียบเทียบผลการทดลอง

จำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษที่ได้จากระบบตรวจลายพิมพ์นิ้วมืออัตโนมัติ (AFIS) ถูกนำมาวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยผู้วิจัยเปรียบเทียบผลที่ได้จากกาวที่ใช้ในงานทั่วไป 5 ชนิดกับกาวสำหรับการตรวจหารอยลายนิ้วมือทางด้านนิติวิทยาศาสตร์โดยเฉพาะ (ECA Sirchie) ด้วยค่าสถิติ T-test ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel 365 หากมีค่า $p\text{-value} < 0.05$ ถือว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการทดสอบสมมติฐานทางสถิติจากการตั้งสมมติฐานดังต่อไปนี้

H_0 = ค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของกาวสำหรับการตรวจหารอยลายนิ้วมือทางด้านนิติวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะ เท่ากับ ค่าเฉลี่ยจุดลักษณะพิเศษของกาวที่ใช้ในงานทั่วไป ($p\text{-value} \geq 0.05$)

H_1 = ค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของกาวสำหรับการตรวจหารอยลายนิ้วมือทางด้านนิติวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะ ไม่เท่ากับ ค่าเฉลี่ยจุดลักษณะพิเศษของกาวที่ใช้ในงานทั่วไป ($p\text{-value} < 0.05$)

จากนั้นเปรียบเทียบราคาต่อกรัม ของกาวทั้ง 6 ชนิด เก็บลายนิ้วมือที่รมกาว 6 ชนิด เป็นระยะเวลา 4 เดือน ถ่ายภาพ และ วิเคราะห์ผลเพื่อคัดเลือกกาวที่ให้ประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ ECA Sirchie และนำไปทดสอบการใช้งานจริงในขั้นต่อไป

2. การทดสอบการนำไปใช้จริง

2.1. การเก็บตัวอย่างอาสาสมัคร

ทำการคัดเลือกอาสาสมัครชาย จำนวน 5 คน และ อาสาสมัครหญิง จำนวน 5 คน ล้างมือด้วยน้ำสะอาด เช็ดให้แห้ง ประทับลายนิ้วมือ โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

2.1.1 พิมพ์นิ้วชี้ข้างขวาของอาสาสมัคร ด้วยหมึกพิมพ์ลายนิ้วมือ (Policemate, JAP) ลงบนแผ่นกระดาษสีขาว

2.1.2 ล้างมือด้วยน้ำสะอาด เช็ดให้แห้ง และถู้นิ้วชี้ข้างขวามองบริเวณหน้าผาก หรือ บริเวณจมูก ประทับลายนิ้วมือลงบนแผ่นพลาสติกใส 3 ช่อง ทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องตั้งแต่วะยะเวลา 1, 7, 14 และ 30 วัน

2.2 การรมไซยาโนอะคริเลต ด้วย CyanoSafe Fuming Chamber with AirSafe Controller และการวิเคราะห์ผล

นำตัวอย่างจากข้อ 2.1.2 มารวมและระยะเวลาการรมที่ได้จากการวิเคราะห์ผลข้อที่ 1 ถ่ายภาพ และนำภาพที่ได้จากข้อที่ 2.1.1 และ 2.1.2 วิเคราะห์จำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษด้วยเครื่องตรวจพิสูจน์ลายพิมพ์นิ้วมืออัตโนมัติ (AFIS 4 version CAFIS 6.2)

2.3 การวิเคราะห์ค่าสถิติ และเปรียบเทียบระดับคุณภาพความคมชัดของลายนิ้วมือแฝง

คำนวณค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของอาสาสมัคร วิเคราะห์ผลเชิงคุณภาพ และเปรียบเทียบระดับคุณภาพ โดยแบ่งคุณภาพลายนิ้วมือแฝงเป็นระดับคะแนนตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การแบ่งระดับคุณภาพของลายนิ้วมือ เป็นตัวเลขคะแนน 0-4 (Casault et al., 2016)

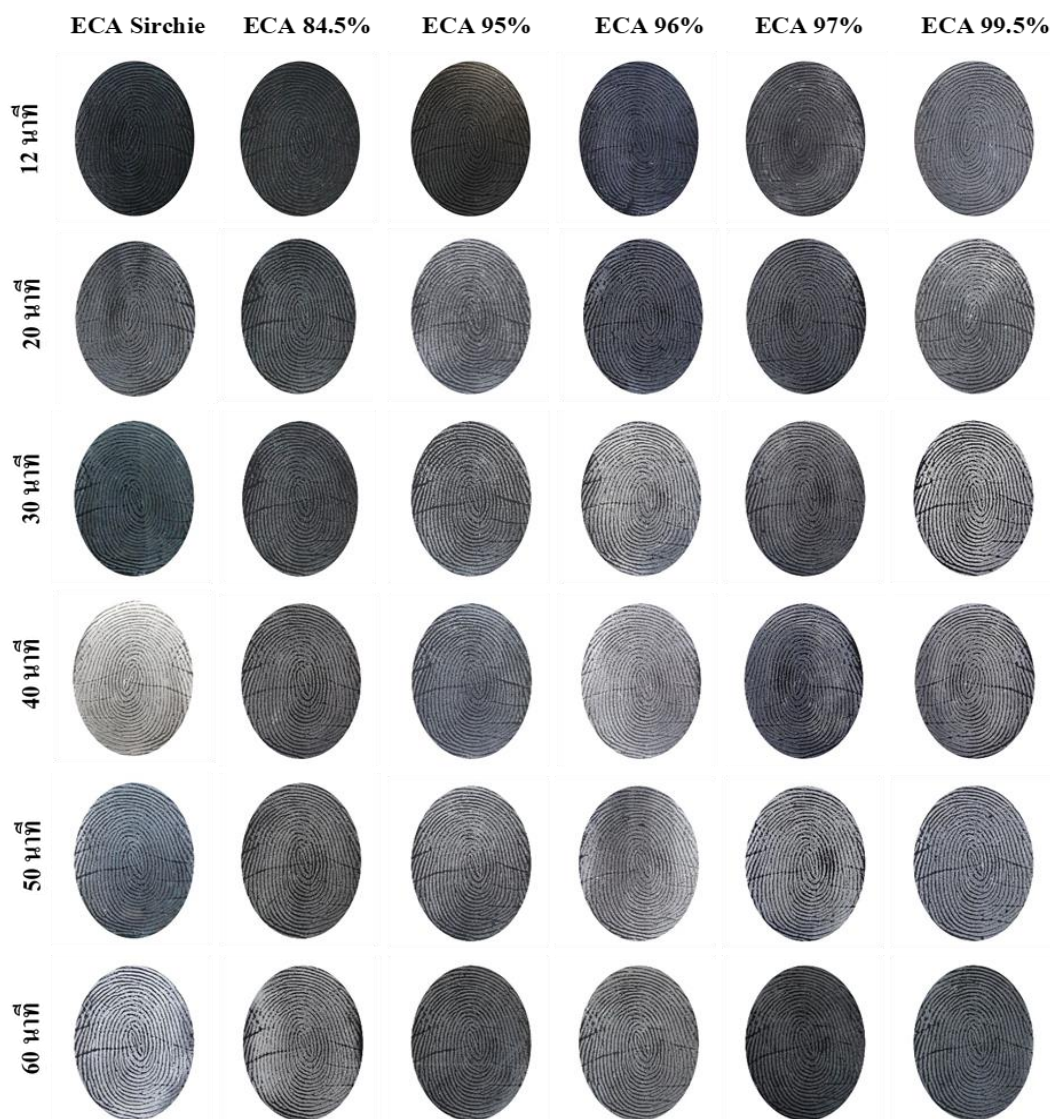
คะแนน	รายละเอียดที่มองเห็น	คุณภาพ
0	ไม่พบลายนิ้วมือที่มองเห็นได้	ไม่พบ
1	พบลายนิ้วมือ แต่ไม่พบจุดลักษณะพิเศษของลายเส้น	น้อย
2	พบจุดลักษณะพิเศษของลายเส้นน้อยกว่า 1 ใน 3 ของลายนิ้วมือ	ปานกลาง
3	พบจุดลักษณะพิเศษของลายเส้นอยู่ระหว่าง 1 ใน 3 ถึง 2 ใน 3	ดี
4	พบจุดลักษณะพิเศษของลายเส้นมากกว่า 2 ใน 3 ของลายนิ้วมือ	ดีมาก

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

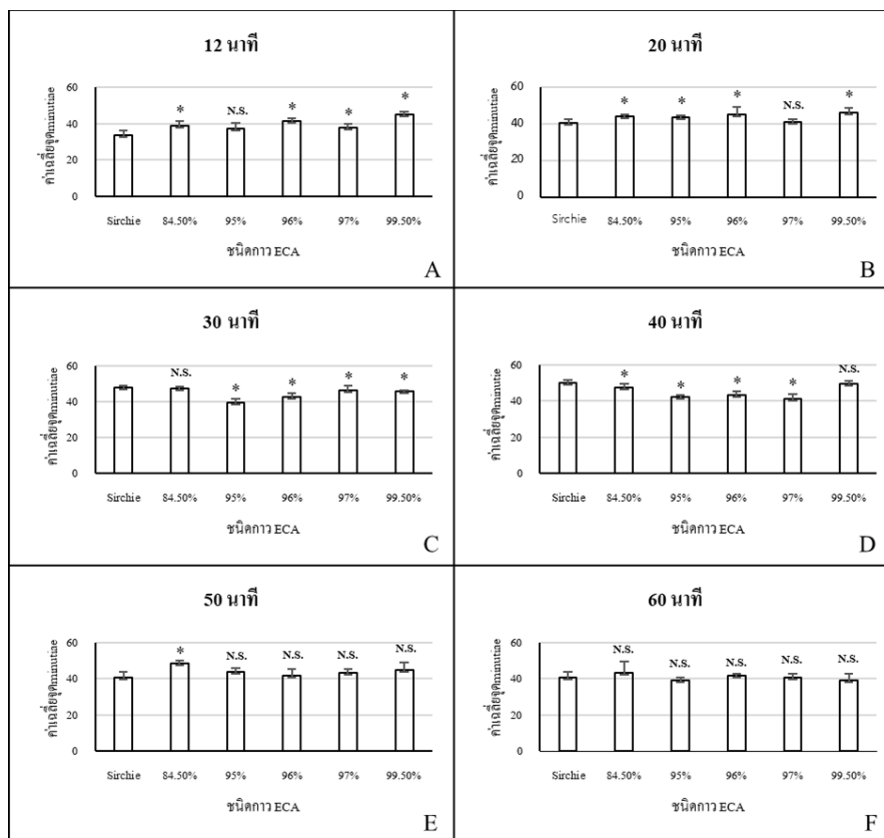
1. ศึกษาชนิดกาวและเวลาที่เหมาะสมในการรมกาวเอทิลไซยาโนอะคริเลต

จากการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงโดยการทดสอบหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการรมกาวเอทิลไซยาโนอะคริเลต ของกาวสำหรับการตรวจหารอยลายนิ้วมือทางด้านนิติวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะ และกาวที่ใช้ในงานทั่วไป ทั้ง 6 ชนิด ได้แก่ ECA Sirchie, ECA 84.5%, ECA 95%, ECA 96%, ECA 97% และ ECA 99.5% และศึกษาที่ระยะเวลา 12, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที โดยทำการถ่ายภาพ และวิเคราะห์หาจำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษ (minutia) ด้วยเครื่อง AFIS 4 (ภาพที่ 1 และ ภาพที่ 2) ผลการทดลองพบว่ากาวที่ให้ความคมชัดของลายเส้นสีขาวของรอยลายนิ้วมือแฝง และจุดลักษณะสำคัญพิเศษ จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นจาก 12 นาทีจนถึง 40 นาที (ภาพที่ 2A - 2D) หลังจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อทำการรมกาวต่อไปจนถึง 60 นาที (ภาพที่ 2E - 2F) โดยกาวที่ให้ความคมชัดของลายเส้นสีขาวของรอยลายนิ้วมือแฝงและให้จำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษสูงสุด คือ กาว ECA Sirchie และกาว ECA 99.5% ที่ระยะเวลาในการรมกาว 40 นาที ซึ่งมีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 50.00 ± 1.41 และ 49.67 ± 1.37 ตามลำดับ โดยผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วย T-test ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% พบว่าค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของกาว ECA 99.5% ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกาว ECA Sirchie ที่ระยะเวลา 40 นาที มีค่า p-value = 0.686 (ตารางที่ 2) ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ที่มีการทดสอบน้ำหนักโมเลกุลของกาวเอทิลไซยาโนอะคริเลตด้วยวิธีการรม พบว่า

น้ำหนักโมเลกุลของกาวเอทิลไซยาโนอะครีเลตเกาะกับส่วนประกอบของลายนิ้วมือเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการรมนานขึ้น และเมื่อกาวเกาะมากยิ่งขึ้นจะทำให้ลายเส้นและจุดลักษณะสำคัญพิเศษเกิดการเบียดกันและทำให้ไม่สามารถตรวจจับจุดลักษณะสำคัญพิเศษได้ และทำให้ค่าเฉลี่ยลดลง (Wargacki et al., 2007; Wargacki et al., 2008) จากการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่ากาวที่ใช้ในงานทั่วไป ECA 99.5% มีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดลายเส้นสีขาวของลายนิ้วมือแฝงเทียบเท่ากาวสำหรับการตรวจหารอยลายนิ้วมือทางด้านนิติวิทยาศาสตร์โดยเฉพาะ (ECA Sirchie) ซึ่งประกอบด้วย ECA 95-100% ที่ระยะเวลาในการรกกาว 40 นาที



ภาพที่ 1 รอยลายนิ้วมือแฝงที่เก็บด้วยผงอัดแข็งของอาสาสมัครจำนวน 1 คน จากการรกกาว ECA ทั้งหมด 6 ชนิดตามระยะเวลาดังแต่ 12, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที



ภาพที่ 2 ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของจุดลักษณะสำคัญของรอยลายนิ้วมือแฝงจากการรมกาวเอทิลไซยาโนอะคริเลตทั้งหมด 6 ชนิด ที่ระยะเวลาในการรมกาว 12, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที โดยเก็บตัวอย่างทั้งหมด 3 ซ้ำ และทำการวิเคราะห์สถิติด้วย T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (*p-value < 0.05 และ N.S. : Not Significant)

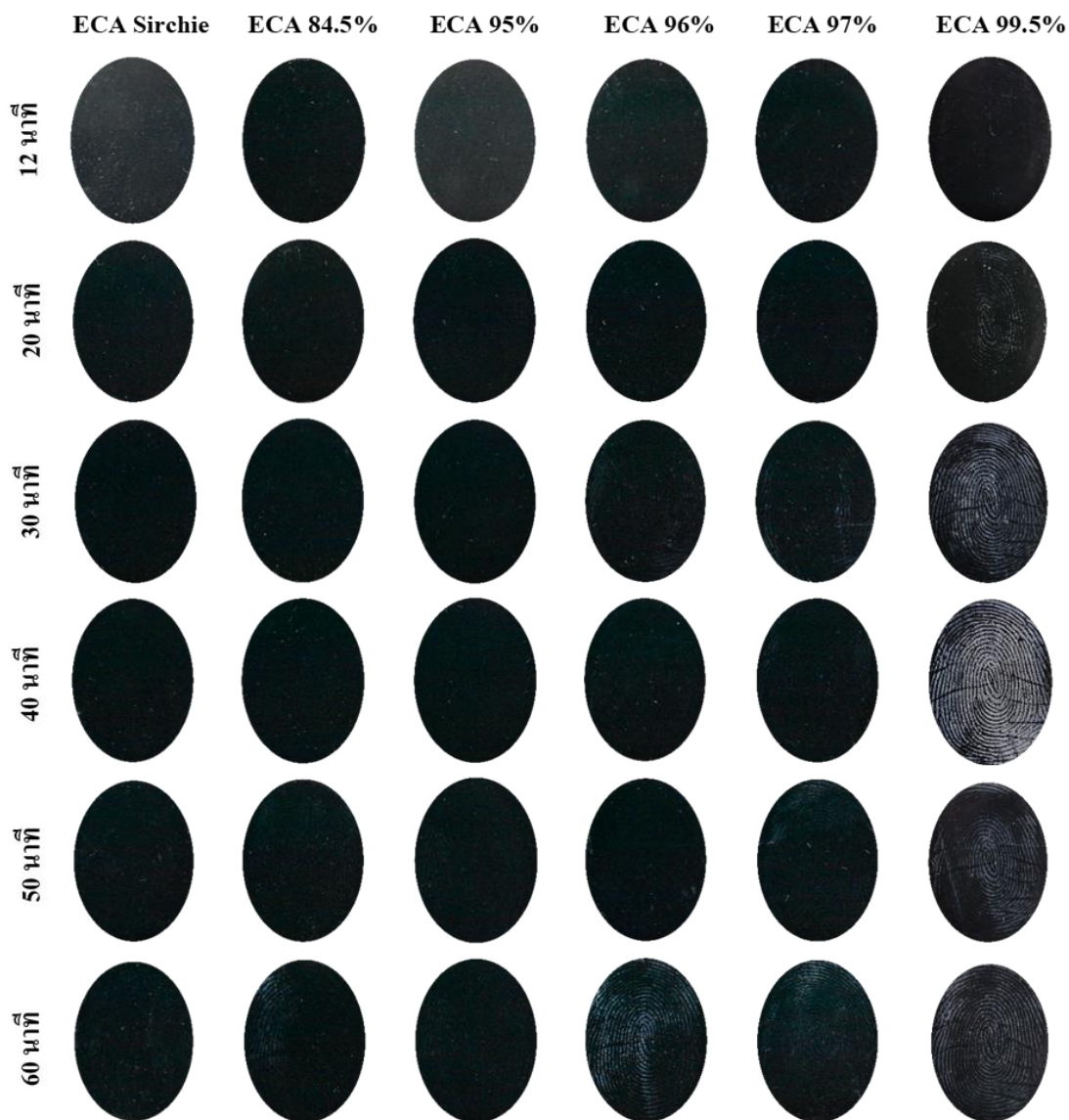
ตารางที่ 2 ผลทดสอบสมมติฐานทดสอบรอยลายนิ้วมือแฝงระหว่างกาว ECA Sirchie กับ กาว ECA ที่ใช้ในงานทั่วไป 5 ชนิด (* p-value < 0.05 : แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ)

ระยะเวลาการรมกาว (นาที)	ECA Sirchie					
	12	20	30	40	50	60
ECA 84.5%	0.0070*	0.0058*	0.3730	0.0283*	0.0008*	0.3928
ECA 95%	0.0709	0.0121*	0.0000*	0.0000*	0.0531	0.2363
ECA 96%	0.0003*	0.0362*	0.0012*	0.0001*	0.6374	0.6273
ECA 97%	0.0097*	0.6643	0.0006*	0.0001*	0.1245	0.8276
ECA 99.5%	0.0000*	0.0022*	0.0031*	0.6867	0.0649	0.3454

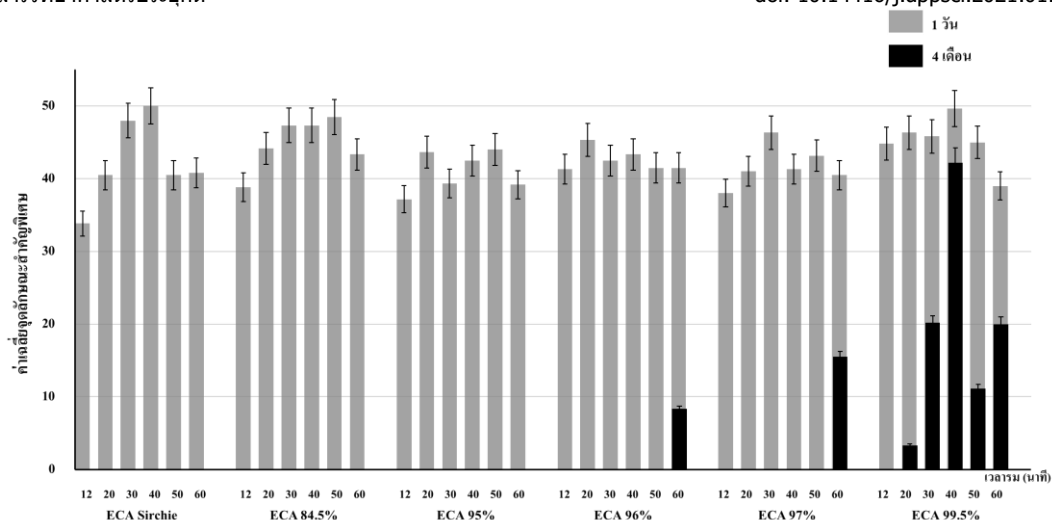
2. ศึกษาความคงทนของรอยลายนิ้วมือแฝงที่ได้จากการมกาวเอทิลไซยาโนอะคริเลต

จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 1 ศึกษาชนิดกาวและเวลาที่เหมาะสมในการมกาวเอทิลไซยาโนอะคริเลต คณะผู้วิจัยทำการเก็บรักษาลายนิ้วมือที่ได้จากการมกาวทั้ง 6 ชนิด ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 เดือน เพื่อศึกษาความคงทนของรอยลายนิ้วมือ ผลการทดสอบพบว่ากาว ECA 99.5% ที่เวลาในการม 40 นาที ยังคงความคมชัดของลายเส้นสีขาวของรอยลายนิ้วมือแฝงที่ชัดเจน และยังคงมีค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษสูงสุดคือ 42.17 เมื่อเปรียบเทียบกับกาวที่เหลือทั้ง 5 ชนิด (ECA Sirchie, ECA 84.5%, ECA 95%, ECA 96%, ECA 97%) ซึ่งสามารถนำผลไปตรวจพิสูจน์เพื่อเปรียบเทียบและยืนยันรอยลายนิ้วมือแฝงได้ (ภาพที่ 3 และ ภาพที่ 4) ผลการทดลองนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่าลายนิ้วมือแฝงที่ปรากฏขึ้นหลังการมไซยาโนอะคริเลตยังคงทนอยู่เมื่อเก็บตัวอย่างไว้เป็นเวลานาน 1 เดือน (Casault et al., 2017) แสดงให้เห็นว่าการทำให้ลายนิ้วมือแฝงที่เก็บด้วยขี้ผึ้งอัดแข็งปรากฏขึ้นด้วยการมไซยาโนอะคริเลตช่วยให้การถ่ายภาพ หรือนำลายนิ้วมือแฝงนั้นไปวิเคราะห์ผลต่อไปมีความยืดหยุ่นด้านระยะเวลา และความคงทนของลายนิ้วมือ และเป็นที่สังเกตได้ว่ากาว ECA 99.5% มีลักษณะความหนืดแบบเหลวใส (2-5 cPs.) ซึ่งแตกต่างจากกาวประเภทที่เหลือที่มีลักษณะความหนืดแบบข้นใส (70-100 cPs.) เมื่อถูกความร้อนจากแท่นให้ความร้อนภายในตู้จึงทำให้ กาว ECA 99.5% สามารถระเหยได้ดีกว่า (Cooper et al, 1972; Aulton & Taylor, 2017) ประจวบกับความเข้มข้นของเอทิลไซยาโนอะคริเลตที่มากทำให้โมเลกุลของไซยาโนอะคริเลตสามารถทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์เชชันได้มาก เกิดเป็นโครงสร้างพอลิไซยาโนอะคริเลตที่ต่อกันไปสายได้ยาวมากขึ้น (Bumbrab, 2017) ทำให้ความคมชัดของลายเส้นสีขาวของกาว ECA 99.5% ที่ระยะเวลาการม 40 นาที มีความคมชัดดีที่สุดเมื่อเทียบกับระยะเวลาการมที่ 50-60 นาที หรือที่ 12-30 นาที หรือในกาวชนิดอื่น ๆ

เมื่อพิจารณาจากข้อมูลราคาของเอทิลไซยาโนอะคริเลตต่อหนึ่งกรัมของกาวทั้งหมด 6 ชนิด ณ เดือนมกราคม ปี พ.ศ.2563 พบว่ากาว ECA 99.5% มีราคา 1.65 บาท มีราคาต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับ กาว ECA Sirchie ซึ่งมีราคา 8.25 บาท กาว ECA 84.5% มีราคา 36.00 บาท กาว ECA 95% มีราคา 5.60 บาท กาว ECA 96% มีราคา 3.60 บาท และกาว ECA 97% มีราคา 11.50 บาท ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากาว ECA 99.5% ซึ่งมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกาว ECA Sirchie มีราคาต่ำกว่ากาว ECA Sirchie ประมาณ 5 เท่า ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกกาวที่ใช้ในงานทั่วไป ECA 99.5% ที่ระยะเวลาในการม 40 นาที เพื่อทดสอบในอาสาศัมครต่อไป



ภาพที่ 3 แสดงความคงทนของรอยลายนิ้วมือแฝงหลังการรมกาว ECA ทั้งหมด 6 ชนิด ตั้งแต่เวลา 12, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ตามลำดับ ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลานาน 4 เดือน



ภาพที่ 4 ค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของรอยลายนิ้วมือแฝง ของกาวทั้ง 6 ชนิดภายหลังจากการรมกาวตั้งแต่เวลา 12 – 60 นาที ที่ทำการเก็บรักษาไว้ในที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 1 วัน และ 4 เดือน โดยเก็บตัวอย่างทั้งหมด 3 ซ้ำ

3. ทดสอบการนำไปใช้จริงของลายนิ้วมือที่เกิดจากเหงื่อของอาสาสมัครจำนวน 10 คน โดยใช้กาว ECA 99.5% ที่ระยะเวลาในการรมกาว 40 นาที

จากผลการทดลองในข้อ 1 และ 2 พบว่ากาวที่ใช้ในงานทั่วไปคือ กาว ECA 99.5% ที่ระยะเวลาในการรมกาว 40 นาที มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับกาวสำหรับการตรวจหารอยลายนิ้วมือทางนิติวิทยาศาสตร์โดยเฉพาะ (ECA Sirchie) ซึ่งสามารถให้จำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษสูงสุด อีกทั้งมีความคงทนเมื่อเก็บรอยลายนิ้วมือนั้นเป็นระยะเวลา 4 เดือน เมื่อนำมาทดสอบการนำไปใช้จริงของลายนิ้วมือที่เกิดจากเหงื่อของอาสาสมัครจำนวน 10 คน แบ่งเป็นเพศชาย 5 คน และเพศหญิง 5 คน ที่มีช่วงอายุระหว่าง 38 – 53 ปี โดยเปรียบเทียบคุณภาพกับรอยนิ้วมือที่ได้จากหมึกพิมพ์มือสำเร็จรูป คณะผู้วิจัยเก็บตัวอย่างลายนิ้วมือจากอาสาสมัครจำนวน 3 ซ้ำ และเก็บรักษาลายนิ้วมือ ณ อุณหภูมิห้อง เป็นระยะ 1 - 30 วัน แล้วนำมารมด้วยกาวที่ใช้ในงานทั่วไป ECA 99.5% เป็นระยะเวลา 40 นาที และวิเคราะห์จำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษด้วยเครื่องตรวจพิสูจน์ลายพิมพ์นิ้วมืออัตโนมัติ (AFIS 4 version CAFIS 6.2) การทดลองนี้ใช้ค่าเฉลี่ยจำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษที่ได้จากหมึกพิมพ์มือสำเร็จรูปของอาสาสมัครแต่ละคน เป็นเกณฑ์ในการกำหนดการแบ่งระดับคุณภาพ โดยแบ่งระดับเป็นตัวเลขคะแนน 0-4 ดังตารางที่ 4 พบว่ารอยลายนิ้วมือของอาสาสมัครที่ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วัน จำนวน 9 คน (90%) มีระดับคุณภาพเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก ยกเว้นในอาสาสมัครหญิง 1 คน (F2) ซึ่งมีระดับคุณภาพเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ดี เมื่อระยะเวลาผ่านไป 7, 14 และ 30 วัน พบว่ารอยลายนิ้วมือของอาสาสมัครมีคุณภาพลดลงตามลำดับ และที่ระยะเวลา 30 วัน รอยลายนิ้วมือของอาสาสมัครจำนวน 8 คน (80%) มีคุณภาพระดับดี โดยมีค่าเฉลี่ยจำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษระหว่าง 14.56 - 29.11 (ตารางที่ 5) ซึ่งเพียงพอต่อการตรวจพิสูจน์บุคคล เนื่องจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับมาตรฐานในการตรวจตรวจพิสูจน์ลายนิ้วมือเพื่อยืนยันตัวบุคคลไว้ที่ 12 จุดขึ้นไป แต่ไม่ต่ำกว่า 10 จุด (Adam, 2016) ซึ่งสอดคล้องกับ

มาตรฐานการตรวจพิสูจน์ลายนิ้วมือเพื่อยืนยันตัวตนบุคคลของสำนักงานพิสูจน์หลักฐานตำรวจ สำนักงานตำรวจแห่งชาติ ที่ต้องใช้จุดลักษณะสำคัญพิเศษ 10 จุดขึ้นไป

ตารางที่ 4 จำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษ (minutiae) ของอาสาสมัครจำนวน 10 คน จากหมึกพิมพ์มือสำเร็จรูป (Ink print) และการแบ่งระดับคุณภาพของลายนิ้วมือ เป็นตัวเลขคะแนน 0-4 เป็นช่วงคะแนนเฉลี่ย จากตัวอย่างทั้งหมด 1 ซ้ำ (F : เพศหญิง , M : เพศชาย, X : ค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของอาสาสมัคร)

อาสาสมัคร	จำนวน minutiae (Ink print)	การแบ่งระดับคุณภาพคะแนน 0 - 4				
		0 ไม่พบ	1 น้อย	2 ปานกลาง	3 ดี	4 ดีมาก
F1	43	0	0	$X < 14.33$	$14.33 \geq X < 28.67$	$X \geq 28.67$
F2	43	0	0	$X < 14.34$	$14.34 \geq X < 28.67$	$X \geq 28.67$
F3	38	0	0	$X < 12.67$	$12.67 \geq X < 25.33$	$X \geq 25.33$
F4	32	0	0	$X < 10.67$	$10.67 \geq X < 21.33$	$X \geq 21.33$
F5	49	0	0	$X < 16.33$	$16.33 \geq X < 32.67$	$X \geq 32.67$
M1	48	0	0	$X < 16.00$	$16.00 \geq X < 32.00$	$X \geq 32.00$
M2	61	0	0	$X < 20.33$	$20.33 \geq X < 28.73$	$X \geq 28.73$
M3	56	0	0	$X < 18.67$	$18.67 \geq X < 40.67$	$X \geq 40.67$
M4	59	0	0	$X < 19.67$	$19.67 \geq X < 39.33$	$X \geq 39.33$
M5	31	0	0	$X < 10.33$	$10.33 \geq X < 20.67$	$X \geq 20.67$

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของอาสาสมัคร 10 คน และค่าเฉลี่ยระดับคุณภาพของลายนิ้วมือที่ทิ้งไว้ อุณหภูมิห้องตั้งแต่ 1, 7, 14 และ 30 วัน จากการรบกวน ECA 99.5% ที่ระยะเวลาในการรบกวน 40 นาที จากตัวอย่างทั้งหมด 1 ซ้ำ (F : เพศหญิง , M : เพศชาย)

อาสาสมัคร	1 วัน		7 วัน		14 วัน		30 วัน	
	ค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษ	ระดับคุณภาพ	ค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษ	ระดับคุณภาพ	ค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษ	ระดับคุณภาพ	ค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษ	ระดับคุณภาพ
F1	38.67±1.03	4.00	29.11±6.93	3.67	20.33±7.07	2.67	9.45±3.39	2.00
F2	18.89±1.42	3.00	18.89±4.65	2.67	14.33±6.18	2.67	5.11±1.60	2.00
F3	27.67±3.21	4.00	22.00±1.65	3.00	20.44±1.09	3.00	20.22±1.80	3.00
F4	25.56±1.77	4.00	20.11±4.21	3.33	19.78±2.39	3.00	16.67±2.61	3.00
F5	40.33±1.80	4.00	23.89±2.22	3.00	21.77±1.73	3.00	21.22±6.59	3.00
M1	41.2±1.80	4.00	32.00±6.08	3.67	30.60±2.43	3.67	22.10±6.51	3.00
M2	35.67±1.98	4.00	25.67±2.62	3.33	24.44±6.40	3.00	20.67±1.87	3.00
M3	47.45±2.08	4.00	37.67±4.62	4.00	30.00±8.33	3.00	26.67±3.20	3.00
M4	46.67±2.12	4.00	34.55±5.85	3.00	36.45±2.10	3.00	29.11±2.90	3.00
M5	23.78±2.70	4.00	23.67±3.03	3.66	16.78±2.50	3.00	14.56±2.24	3.00

สรุปผลการทดลอง

การเปรียบเทียบผลการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวที่ไม่มีรูพรุนจากกาที่ใช้ในงานทั่วไป และกาสำหรับงานทางนิติวิทยาศาสตร์ด้วยตูบไซยาโนอะครีเลต เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝงของกาที่ใช้ในงานทั่วไป และกาสำหรับการตรวจหารอยลายนิ้วมือทางด้านนิติวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะ ทดสอบหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการรมไซยาโนอะครีเลตจากกาที่ใช้ในงานทั่วไป และทดสอบการใช้งานจริงในอาสาสมัคร สามารถสรุปได้ว่ากา ECA 99.5% มีประสิทธิภาพในการทำให้ลายนิ้วมือแฝงปรากฏเทียบเท่ากาสำหรับการตรวจหารอยลายนิ้วมือทางด้านนิติวิทยาศาสตร์โดยเฉพาะ (ECA Sirchie) เมื่อรมกาเป็นระยะเวลา 40 นาที นอกจากนี้ ลายนิ้วมือภายหลังการรมกาดังกล่าวยังมีความคงทนเป็นระยะเวลา 4 เดือน และเมื่อทดสอบการใช้งานจริงกับอาสาสมัครก็สามารถให้จำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษที่เป็นไปตามมาตรฐานการตรวจพิสูจน์ได้ อีกทั้งเมื่อพิจารณาด้านราคา พบว่ากา ECA 99.5% มีราคาต่ำที่สุด โดยต่ำกว่ากา ECA Sirchie ถึง 5 เท่า ดังนั้น กา ECA 99.5% จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์ด้านการตรวจพิสูจน์ลายนิ้วมือแฝงในประเทศไทย เพื่อลดระยะเวลาการนำเข้าจากต่างประเทศ และลดต้นทุนการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงด้วยการรมไซยาโนอะครีเลตในแต่ละครั้ง

กิตติกรรมประกาศ

เป็นผลงานวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนวิจัยคณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562

เอกสารอ้างอิง

- Adam, C. (2016). *Forensic Evidence in Court: Evaluation and Scientific Opinion*, In C. Adam (Ed.). *Fingerprints and Finger - Marks - Identifying Individuals?* New York City, United States: Wiley Publisher.
- Aulton, M. E., & Taylor, K. M. (2017). *Aulton's Pharmaceutics E-Book: The Design and Manufacture of Medicines* (5th ed.). Amsterdam, Netherlands, Elsevier Health Sciences Publisher.
- Bumbrab, G. S. (2017). Cyanoacrylate fuming method for detection of latent fingermarks: a review. *Egyptian Journal of Forensic Sciences*, 7(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s41935-017-0009-7>
- Casault, P., Gilbert, N., & Daoust, B. (2017). Comparison of various alkyl cyanoacrylates for fingerprint development, *Canadian Society of Forensic Science Journal*, 50 (1), 1-22. <https://doi.org/10.1080/00085030.2016.1223438>
- Cooper, J. W., Gunn, C., & Carter, S. J. (1972). *Cooper and Gunn's Tutorial Pharmacy. Edited by SJ Carter Pitman Medical* (6th ed.). London United States: Pitman Medical Publisher.
- Hirth, S., & Royds, D. (2013). Stabilisation of charred documents using alkyl-2-cyanoacrylate ester (superglue fuming). *Australian Journal of Forensic Sciences*, 45(1), 103-105. <https://doi.org/10.1080/00450618.2012.677065>
- Lekpradit, T. (2010). *Development of Cyaneacrylate fuming kit for develop latent fingerprint* [Unpublished master's thesis]. Silpakorn University. (in Thai)
- Sirchie. (2017). *Technical Information of OMEGA-PRINT Fingerprint Developer 16 oz*. https://www.sirchie.com/media/resourcecenter/item/o/m/omega-print_ti01-6eng-rev6e.pdf
- Wargacki, S. P., Lewis, L. A., & Dadmun, M. D. (2007) Understanding the chemistry of the development of latent fingerprints by superglue fuming. *Journal of Forensic Sciences*, 52(5), 1057-1062. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2007.00527.x>
- Wargacki, S. P., Lewis, L. A., & Dadmun, M. D. (2008). Enhancing the quality of aged latent fingerprints developed by superglue fuming: loss and replenishment of initiator. *Journal of Forensic Sciences*, 53(5), 1138-1144. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2008.00822.x>

Research Article

ผลของระยะเวลาการแช่ข้าวในสารสกัดสมุนไพรภายใต้ความดันสุญญากาศและความดันบรรยากาศปกติต่อคุณภาพของข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรด้วยเทคนิคการแทรกซึมภายใต้สภาวะสุญญากาศ

Effect of vacuum and relaxation times on the quality of rice fortified with herbal plant extracts by vacuum impregnation technique

หทัยทิพย์ ร้องคำ^{1*}, เกตุการ ดาจันทา¹, อุทัยวรรณ ฉัตรธง¹ และ ทรงพรรณ สังข์ทรัพย์¹

Hathaitip Rongkom^{1*}, Katekan Dajanta¹, Utaiwan Chatthong¹ and Songpan Sungsub¹

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000 ประเทศไทย

¹Division of Food Science and Technology, Faculty of Food and Agricultural Technology,

Pibulsongkram Rajabhat University, Phitsanulok 65000 Thailand

*E-mail: hathaitip_111@hotmail.com

Received: 13/10/2020; Revised: 27/01/2021; Accepted: 14/02/2021

บทคัดย่อ

เทคนิคการแทรกซึมภายใต้สภาวะสุญญากาศ เป็นเทคนิคที่ใช้เดิมองค์ประกอบที่มีประโยชน์ลงในโครงสร้างของอาหาร โดยไม่ทำลายโครงสร้างอาหาร งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการแช่ข้าวในสารสกัดสมุนไพรภายใต้ความดันสุญญากาศและความดันบรรยากาศปกติต่อคุณภาพของข้าวเสริมสารสกัดดอกกระเจี๊ยบแดง (*Hibiscus sabdariffa* L.) และดอกอัญชัน (*Clitoria ternatea* L.) ด้วยเทคนิคการแทรกซึมภายใต้สภาวะสุญญากาศ ผันแปรระยะเวลาการแช่ภายใต้ความดันสุญญากาศ 50 มิลลิบาร์ (Vacuum time) นาน 10 และ 20 นาที จากนั้นเพิ่มระดับความดันให้เข้าสู่ความดันบรรยากาศปกติ และแช่ต่อเป็นเวลา 10 และ 20 นาที (Relaxation time) จากการทดลองพบว่า ค่าความสว่าง (L^* value) ของข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรลดลงตามระยะเวลาการแช่ภายใต้ความดันสุญญากาศและความดันบรรยากาศปกติที่เพิ่มขึ้น ขณะที่เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย น้ำ ปริมาตรสารสกัดสมุนไพรที่แทรกซึมในเมล็ดข้าว ปริมาตรของเมล็ดข้าวที่เสียรูป และความพรุนที่ยอมให้สารสกัดสมุนไพรเคลื่อนที่ผ่านเมล็ด

ข้าวสูงขึ้น ตามเวลาการแช่ภายใต้ความดันสุญญากาศและความดันบรรยากาศปกติที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรที่แช่ภายใต้ความดันสุญญากาศและความดันบรรยากาศปกติ 20/20 นาที มีสมบัติการต้านอนุมูลอิสระซึ่งประกอบด้วย ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานิน รวมถึงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ Ferric reducing antioxidant power (FRAP value) สูงที่สุด โดยข้าวเสริมสารสกัดดอกกระเจี๊ยบแดงมีปริมาณสารฟลาโวนอยด์ (483.79 mg Catechin equivalent/100g) และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP value (55.64 Trolox equivalent/100g) สูงกว่าข้าวเสริมสารสกัดดอกอัญชัน (155.09 mg Catechin equivalent/100g และ 25.41 Trolox equivalent equivalent/100g ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระยะเวลาการแช่ข้าวในสารสกัดสมุนไพรภายใต้ความดันสุญญากาศและความดันบรรยากาศปกติ ช่วยให้สารสกัดสมุนไพรสามารถแทรกซึมเข้าไปในเมล็ดข้าวได้มากขึ้น

คำสำคัญ: การแทรกซึมภายใต้สภาวะสุญญากาศ, ระยะเวลาการแช่ภายใต้ความดันสุญญากาศ, ระยะเวลาการแช่ภายใต้ความดันปกติ, สารสกัดสมุนไพร

Abstract

Vacuum impregnation is a non-destructive technology, use to introduce external liquid into the structures of food matrices. The aim of this study was to investigate the effect of vacuum and relaxation times on the qualities of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) and butterfly pea (*Clitoria Ternatea* L.) vacuum impregnated rice. A vacuum pressure of 50 mbar was applied for 10 and 20 min (Vacuum time), following atmospheric pressure restoration for 10 and 20 min (Relaxation time). The result shown that, lightness (L^* value) of both herbal plants vacuum impregnated rice reduced with increasing the vacuum and relaxation times. Whereas, the values of water loss, mass fraction of fruit occupied by impregnation liquid (X), sample volume deformation (γ) and effective porosity (E_p) were increased as increasing the vacuum and relaxation times. In addition, the impregnated rice treated with 20 min vacuum time and 20 min relaxation time significantly highest antioxidant properties including, total phenolic compounds, total flavonoids, total anthocyanins, DPPH-radical scavenging activity and ferric reducing antioxidant power (FRAP value). The roselle vacuum impregnated rice showed significant higher total flavonoids (483.79 mg Catechin equivalent/100g) and FRAP value (55.64 Trolox equivalent/100g) than butterfly pea vacuum impregnated sample (155.09 mg Catechin equivalent/100g and 25.41 Trolox equivalent equivalent/100g, respectively). This study indicated that the longer vacuum and relaxation times were useful for enriching the herbal plant extracts in rice.

Keywords: Vacuum impregnation, Vacuum time, Relaxation time, Herbal plant extracts

บทนำ

เทคนิคการแทรกซึมภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Vacuum impregnation, VI) เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการเติมองค์ประกอบที่มีประโยชน์ลงในโครงสร้างของอาหารที่มีรูพรุน โดยไม่มีการทำลายโครงสร้างของอาหาร (Occhino et al., 2011) โดยอาศัยระบบการแช่ชิ้นอาหารในสารละลายภายใต้สุญญากาศเพื่อให้สารละลายภายนอกแทรกซึมเข้าไปแทนที่น้ำและอากาศในรูพรุนของชิ้นอาหาร ระบบสุญญากาศช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนมวลสาร (Lima et al., 2016) ซึ่งช่วยลดเวลาเมื่อเทียบกับการแช่ภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพด้วยเทคนิค VI จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจเช่น การเสริมสารสกัดผักขาวในข้าวเจ้าขาว (Purnomo et al., 2018) เสริมแคลเซียมในมะเขือ แครอท เห็ด และสับปะรด (Gras et al., 2002; Lima et al., 2016) การเสริมสารสกัดชาเขียวและแอนโทไซยานินจากน้ำบลูเบอร์รี่ ในชิ้นแอปเปิ้ล (Castagnini et al., 2015; Tappi et al., 2017) และการเสริมจุลินทรีย์โพรไบโอติกลงในข้าวและแอปเปิ้ล (Krasaekoopt & Suthanwong, 2008; Akman et al., 2019) โดยเวลาการแช่อาหารในสารละลายภายใต้ความดันสุญญากาศ (Vacuum time) และความดันบรรยากาศปกติ (Relaxation time) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการ VI อย่างมาก โดยเวลาการแช่ภายใต้ความดันสุญญากาศคือระยะเวลาในขณะที่แช่ชิ้นอาหารในสารละลายและลดความดันลงทำให้โครงสร้างของอาหารเกิดการเสียรูป (Deformation) หรือการยืดขยายของท่อขนาดเล็ก (Capillaries) ส่งผลให้อากาศและสารละลายตามธรรมชาติที่อยู่ในรูพรุนของชิ้นอาหารแพร่ออกจากโครงสร้างอาหารและเกิดการแทนที่อากาศในรูพรุนบางส่วนด้วยสารละลายภายนอก ในขณะที่เวลาการแช่ภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ คือระยะเวลาหลังจากช่วงของการลดความดัน โดยจะเพิ่มความดันให้กลับสู่สภาวะความดันบรรยากาศปกติ ในขั้นตอนนี้โครงสร้างของอาหารจะกลับสู่สภาวะสมดุล สารละลายภายนอกจะแพร่ผ่านรูขนาดเล็กเข้าไปในเนื้อเยื่อของชิ้นอาหาร โดยอาศัยกลไก Hydrodynamic mechanism (Derossi et al., 2012) ผลการศึกษาของ Moreira & Almohaimeed (2018) พบว่าการเพิ่มเวลาการแช่ชิ้นมันฝรั่งภายใต้ความดันสุญญากาศและความดันบรรยากาศปกติจาก 5 เป็น 15 นาที ช่วยให้สารสกัดบีทรูทแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างของชิ้นมันฝรั่งได้มากขึ้น และ Hironaka et al. (2011) รายงานว่าการแช่ภายใต้ชิ้นมันฝรั่งภายใต้สภาวะความดันสุญญากาศที่ระดับ 70 มิลลิเมตรปรอท นาน 60 นาที ส่งผลให้ชิ้นมันฝรั่งมีวิตามินซีสูงกว่าการแช่เป็นเวลา 15 และ 30 นาที Derossi et al. (2010) พบว่าการเพิ่มระยะเวลาการแช่ภายใต้ความดันปกติจาก 10 เป็น 30 นาที สามารถเพิ่มปริมาณกรดแกล็กติกในพริกหยวกสไลด์ ซึ่งสามารถลดค่าความเป็นกรด-ด่างของพริกหยวกสไลด์และยืดอายุการเก็บรักษาพริกหยวกได้

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยและภูมิภาคเอเชีย โดยข้าวเจ้าขาวเป็นข้าวที่นิยมบริโภคและส่งออกรายได้ให้กับประเทศมากที่สุด (Makmuang et al., 2016; Purnomo et al., 2018) การเพิ่มมูลค่าข้าวขาวโดยแปรรูปให้เป็นข้าวเสริมสมุนไพรกำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น แต่ส่วนใหญ่เป็นข้าวที่เคลือบด้วยสมุนไพรที่ผลิตโดยการแช่ข้าวในสารสกัดสมุนไพรในบรรยากาศปกติหรือการฉีดพ่นสารสกัดสมุนไพรลงบนเมล็ดข้าวก่อนนำไปอบแห้ง และการเคลือบสารสกัดสมุนไพรด้วยเครื่องเคลือบแบบกระแทกหมุน (Duangkhamchan &

Siriamornpun, 2015) แต่การผลิตข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรด้วยวิธีเหล่านี้มีข้อด้อยคือ ใช้ระยะเวลานานในการเคลือบ สารสกัดสมุนไพรเกิดการฟุ้งกระจายและเคลือบอยู่เพียงบริเวณผิวของเมล็ดข้าวเท่านั้น จึงเกิดความไม่สม่ำเสมอของสารสกัดสมุนไพรที่เคลือบเมล็ดข้าว นอกจากนี้ยังเกิดการเสียหายของเมล็ดข้าวในระหว่างการเคลือบ และเกิดการเสื่อมสภาพของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่นำมาเคลือบเมล็ดข้าว เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนและมีการสัมผัสกับแสงและออกซิเจน อีกทั้งยังเกิดการสูญเสียสารสำคัญในระหว่างกระบวนการล้างและการหุงต้มอีกด้วย (Steiger et al., 2014) ในขณะที่การเสริมสารสกัดสมุนไพรด้วยเทคนิค VI สามารถลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ทำให้ออกซิเจนในรูปของชั้นอาหารถูกแทนที่ด้วยสารละลายภายนอก อีกทั้งยังเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ความร้อนอีกด้วย (Hironaka et al., 2011)

ดอกกระเจี๊ยบแดง (*Hibiscus sabdariffa* var. *sabdariffa* Linn.) มีสารสำคัญในกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) และเฟินิลโพรพานอยด์ (Phenylpropanoid) รวมถึงสารสีในกลุ่มแอนโทไซยานินที่ละลายน้ำ และสารประกอบฟีนอลิก (Danpikulthong et al., 2017) ซึ่งสารสำคัญเหล่านี้สามารถลดระดับไขมันและคอเลสเตอรอลในเลือด ลดความดันโลหิต และต้านทานการเป็นพิษต่อเซลล์มะเร็งได้ จึงนิยมเติมสารสกัดกระเจี๊ยบแดงลงในอาหารเพื่อเสริมสมบัติการต้านอนุมูลอิสระหรือใช้เป็นสืพสมอาหารจากธรรมชาติแทนสีสังเคราะห์ (Anthika et al., 2015) ส่วนดอกอัญชัน (*Clitoria ternatea* L.) เป็นพืชสมุนไพรที่นำมาใช้ประโยชน์ในการเป็นสารสีตามธรรมชาติอย่างแพร่หลาย มีรงควัตถุสำคัญคือ สารแอนโทไซยานินซึ่งมีสีน้ำเงินถึงม่วง มีสมบัติการละลายน้ำและเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ดี (Azima et al., 2017) และมีงานวิจัยระบุว่าสารสกัดดอกอัญชันมีสารต้านอนุมูลอิสระหลายชนิด เช่น Glucoside และ Malonyl flavonal glycosides การนำสารสกัดดอกอัญชันมาใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารจะช่วยเพิ่มสารต้านอนุมูลอิสระในอาหารได้ (Rajan et al., 2018) ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสริมสารต้านอนุมูลอิสระจากสารสกัดดอกกระเจี๊ยบแดงและดอกอัญชันในข้าวเจ้าขาวด้วยเทคนิค VI โดยค้นแปรเวลาการแช่ข้าวเจ้าขาวในสารสกัดดอกกระเจี๊ยบแดงและดอกอัญชันภายใต้ความดันสุญญากาศที่ระดับ 50 มิลลิบาร์ (Vacuum time) เป็นเวลา 10 และ 20 นาที และเวลาในการแช่ข้าวในสารสกัดพืชสมุนไพรภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ (Relaxation time) เป็นเวลา 10 และ 20 นาที ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าและคุณค่าทางโภชนาการให้แก่ข้าวขาวที่มีราคาตกต่ำได้

วิธีการทดลอง

1. การเตรียมตัวอย่าง

1.1 การนึ่งข้าว

นำข้าวเจ้าขาวสายพันธุ์ กข. 31 ที่ได้รับจากวิสาหกิจชุมชนบ้านบางกระน้อย จังหวัดพิษณุโลก มาอบในตู้อบลมร้อน (Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปแช่น้ำร้อนอุณหภูมิ

90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ก่อนนำไปแช่เต้าน้ำ (Danpikulthong et al., 2017) จากนั้นนำข้าวไปนึ่งบนน้ำเดือดเป็นเวลา 20 นาที พักไว้ให้เย็นก่อนนำไปเสริมสารสกัดสมุนไพรด้วยเทคนิค VI ต่อไป

1.2 การเตรียมสารสกัดพืชสมุนไพร

บดดอกกระเจี๊ยบแดงและดอกอัญชันอบแห้งจากห้างแม็คโคร จังหวัดพิษณุโลก ให้ละเอียดด้วยเครื่องบดสมุนไพร (Disintegrator, WF-10B, China) จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 เมช และแช่ผงสมุนไพรในน้ำอุ่นอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วน 1:30(w/v) เป็นเวลา 30 นาที ก่อนกรองด้วยผ้าขาวบางจะได้สารสกัดดอกกระเจี๊ยบแดงและดอกอัญชัน จากนั้นปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องก่อนนำไปเสริมในเมล็ดข้าวด้วยเทคนิค VI ต่อไป

2. การเสริมสารสกัดสมุนไพรในข้าวด้วยเทคนิค VI

นำข้าวที่ผ่านการนึ่งจากข้อ 1.1 จำนวน 300 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร เติมสารสกัดดอกกระเจี๊ยบแดงและดอกอัญชันที่สกัดได้ในข้อ 1.2 จำนวน 300 มิลลิลิตร นำตัวอย่างไปผ่านกระบวนการ VI ในตู้สุญญากาศ (JEIO TECH, Korea) โดยกำหนดระดับความดันสุญญากาศที่ 50 มิลลิบาร์ และผันแปรเวลาการแช่ข้าวในสารสกัดสมุนไพรภายใต้ความดันสุญญากาศ (Vacuum time) ที่แตกต่างกัน 2 ระดับคือ 10 และ 20 นาที และเวลาในการแช่ข้าวในสารสกัดสมุนไพรที่ความดันบรรยากาศปกติ (Relaxation time) 2 ระดับ คือ 10 และ 20 นาที จะได้ข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพร จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และนำข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรไปอบแห้งในตู้อบลมร้อน (Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จนมีค่า Water activity ต่ำกว่า 0.6 จะได้ข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรที่ผ่านการอบแห้ง จากนั้นบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เพื่อรอการตรวจวิเคราะห์คุณภาพการต้านอนุมูลอิสระต่อไป

3. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของข้าวเสริมสารสกัดพืชสมุนไพร

3.1 ค่าสี

วัดค่าสีระบบ CIE แสดงค่า L*, a* และ b* ของข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรที่ผ่านกระบวนการ VI ด้วยเครื่องวัดสี Minolta (CR-10, Japan)

3.2 เปอร์เซนต์การสูญเสียของเมล็ดข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพร (Water loss)

คำนวณเปอร์เซนต์การสูญเสียของเมล็ดข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรด้วยเทคนิค VI ดังสมการที่ 1 (Rongkom et al., 2013)

$$WL = \frac{W_{w0} - W_{wt}}{W_{ro}} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ w_{w0} คือ น้ำหนักของน้ำในข้าวก่อนผ่านเทคนิค VI (g)

w_{wt} คือ น้ำหนักของน้ำในข้าวหลังผ่านเทคนิค VI (g)

w_{ro} คือ น้ำหนักของข้าวก่อนผ่านกระบวนการ VI (g)

3.3 ปริมาตรสารสกัดสมุนไพรที่แทรกซึมเข้าสู่เมล็ดข้าวหลังผ่านกระบวนการ VI (Impregnated sample volume fraction, X)

คำนวณปริมาตรสารสกัดสมุนไพรที่แทรกซึมเข้าสู่เมล็ดข้าวหลังผ่านกระบวนการ VI (X) โดยชั่งน้ำหนักข้าวที่ผ่านการนึ่งก่อนนำไปเสริมสารสกัดสมุนไพรด้วยเทคนิค VI (M_i) และชั่งน้ำหนักข้าวที่ผ่านการเสริมสารสกัดสมุนไพรด้วยเทคนิค VI (M_f) หาค่าความหนาแน่นของสารสกัดสมุนไพร (ρ_s) ด้วยเครื่อง Pycnometer ขนาด 25 มิลลิเมตร และวัดปริมาตรเริ่มต้นของข้าวก่อนเข้าสู่กระบวนการ VI จำนวน 20 กรัม ด้วยกระบอกตวงขนาด 50 มิลลิเมตร (V_0) คำนวณปริมาตรสารสกัดสมุนไพรที่แทรกซึมเข้าสู่เมล็ดข้าวหลังผ่านกระบวนการ VI (X) ดังสมการที่ 2 (Rongkom et al., 2013)

$$X = \frac{M_f - M_i}{\rho_s V_0} \quad (2)$$

เมื่อ: M_f คือ น้ำหนักข้าวหลังผ่านเทคนิค VI (kg)
 M_i คือ น้ำหนักข้าวก่อนผ่านเทคนิค VI (kg)
 ρ_s คือ ความหนาแน่นของสารสกัดพืชสมุนไพรที่ทำ VI (kg/m^3)
 V_0 คือ ปริมาตรเริ่มต้นของเมล็ดข้าว (cm^3)

3.4 ค่าความพรุนที่ยอมให้สารสกัดพืชสมุนไพรแทรกซึมเข้าสู่เมล็ดข้าว (Effective porosity, ϵ_e)

คำนวณค่าความพรุนที่ยอมให้สารสกัดสมุนไพรแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้าง (ϵ_e) ของเมล็ดข้าวที่ผ่านเทคนิค VI ดังสมการที่ 3 (Rongkom et al., 2013)

$$\epsilon_e = [(X - \gamma) + (\gamma/r)] / (1 - 1/r) \quad (3)$$

เมื่อ: r คือ อัตราส่วนแรงดันสาร = $\frac{\text{ความดันบรรยากาศ}}{\text{ความดันสุญญากาศ}}$

4. การวิเคราะห์สมบัติการต้านอนุมูลอิสระ

4.1 การสกัดสารต้านอนุมูลอิสระ

นำข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรด้วยเทคนิค VI ที่อบแห้งแล้วมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดสมุนไพร (Disintegrator, WF-10B, China) ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 เมช ผสมผงข้าวเสริมสมุนไพรกับตัวทำละลายเอทานอล ความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ ในอัตราส่วน 1:5 (w/v) ภายใต้สภาวะอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

นาน 30 นาที แล้วนำมากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4 เก็บสารสกัดที่กรองได้ในขวดสีชาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เพื่อรอการตรวจวิเคราะห์คุณภาพการต้านอนุมูลอิสระต่อไป

4.2 วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic compounds)

ตรวจวิเคราะห์ปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรตามวิธีของ Dajanta & Rongkom (2017) โดยผสมสารสกัด 400 ไมโครลิตร กับสารละลาย Folin-Ciocalteu reagent (Merck, Germany) ที่มีความเข้มข้น 0.25 นอร์มัล จำนวน 2 มิลลิตร และเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Merck, Germany) ความเข้มข้น 7.5 เปอร์เซ็นต์, (w/v) จำนวน 1.6 มิลลิตร ผสมให้เข้ากันดีด้วย Vortex และบ่มในอ่างน้ำอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที และบ่มต่อในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (Evolution 201, USA) ที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร คำนวณหาปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในหน่วย mg Gallic acid equivalent (GAE)/100 g โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ Gallic acid (Fluka Biochemica, Switzerland) ในช่วงความเข้มข้นที่ 10 - 100 µg/ml ซึ่งมีค่า R^2 เป็น 0.9991

4.3 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ (Total flavonoids)

ตรวจวิเคราะห์ปริมาณของสารประกอบฟลาโวนอยด์ในข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรตามวิธีของ Dajanta et al. (2013) โดยผสมสารสกัด 250 ไมโครลิตร กับสารละลาย Sodium nitrite (Merck, Germany) ที่มีความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 75 ไมโครลิตร นำไป Vortex และบ่มในที่มืดนาน 5 นาที จากนั้นเติมสารละลาย Aluminum chloride (Merck, Germany) ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 150 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันดีด้วย Vortex และบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที เติมสารละลาย Sodium hydroxide (Merck, Germany) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ จำนวน 500 ไมโครลิตร และน้ำกลั่นจำนวน 775 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันดีด้วย Vortex นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (Evolution 201, USA) ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร คำนวณปริมาณ Total flavonoids ในหน่วย mg Catechin equivalent (CE) /100 g เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ Catechin (Fluka Biochemica, Switzerland) ในช่วงความเข้มข้นที่ 10-100 µg/ml ซึ่งมีค่า R^2 เป็น 0.9990

4.4 การวิเคราะห์ปริมาณสารแอนโทไซยานิน (Anthocyanins)

ตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารแอนโทไซยานินในข้าวเสริมสารสกัดพืชสมุนไพรตามวิธีของ Huang et al. (2019) โดยผสมสารสกัด 2 มิลลิตร กับสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.0 จำนวน 2 มิลลิตร และผสมสารสกัด 2 มิลลิตร กับสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4.5 จำนวน 2 มิลลิตร ผสมให้เข้ากันด้วย Vortex จากนั้นนำไปบ่มในที่มืดที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (Evolution 201, USA) ที่ความยาว

คลื่น 510 และ 700 นาโนเมตร คำนวณหาปริมาณของสารแอนโทไซยานินทั้งหมดในสารสกัดจากสมการที่ 4 และรายงานในหน่วยของ mg cyanidin-3-glucoside (CGE)/100g

$$\text{แอนโทไซยานิน (mg cyanidin-3-glucoside/100g)} = \frac{[(A_{510} - A_{700})_{\text{pH } 1.0} - (A_{510} - A_{700})_{\text{pH } 4.5}] \times V \times n \times M}{\epsilon \times L \times m} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ: A_{510} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ 510 นาโนเมตร A_{700} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ 700 นาโนเมตร
 V คือ ปริมาตรของสารสกัด (มิลลิลิตร) M คือ น้ำหนักโมเลกุลของ cyaniding-3-glucoside (449.2 กรัม/โมล)
 n คือ Dilution factor ของสารละลายตัวอย่าง ϵ คือ ค่าโมลาร์เอพซอพติวิตี (26,900 ลิตร/โมล/เซนติเมตร)
 L คือ ความกว้างของ Cuvette (1 เซนติเมตร) m คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

4.5 วิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH radical scavenging activity (DPPH)

ตรวจวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH ในข้าวเสริมสารสกัดดอกกระเจี๊ยบแดงและดอกอัญชันตามวิธีการของ Dajanta & Rongkom (2017) โดยผสมสารสกัด 1 มิลลิลิตร กับสารละลาย 2,2- Diphenyl-1-picrylhydrazyl (Fluka Biochemica, Switzerland) ความเข้มข้น 0.2 มิลลิโมลาร์ จำนวน 2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันดีด้วย Vortex บ่มในที่มืดนาน 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-Vis spectrophotometer (Spectrophotometer evolution 201, USA) ที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร สำหรับชุดควบคุมใช้เอทานอล (Lab-scan analytical science, Thailand) ความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ แทนสารสกัด คำนวณค่า DPPH ในหน่วย Ascorbic acid equivalent (AAE)/100 g โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ Ascorbic acid (Fluka, USA) ในช่วงความเข้มข้นที่ 1-50 $\mu\text{g/ml}$ ซึ่งมีค่า R^2 เป็น 0.9990

4.6 วิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ Ferric reducing antioxidant power (FRAP value)

ตรวจวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP value ในข้าวเสริมสารสกัดกระเจี๊ยบและอัญชันตามวิธีการของ Dajanta & Rongkom (2017) โดยผสมสารสกัด 400 ไมโครลิตร กับสารละลาย FRAP reagent (Fluka Biochemica, Switzerland) จำนวน 3,000 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันดีด้วย Vortex บ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส นาน 4 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-Vis spectrophotometer (Spectrophotometer evolution 201, USA) ที่

ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร สำหรับชุดควบคุมใช้เอทานอล (Lab-scan analytical science, Thailand) ความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ แทนสารสกัด คำนวณค่า FRAP value ในหน่วย mg Trolox equivalent (TE) /100g โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ Trolox (Fluka, USA) ในช่วงความเข้มข้นที่ 5-35 $\mu\text{g/ml}$ ซึ่งมีค่า R^2 เป็น 0.9993

4.7 การวางแผนการทดลองทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design ทำการทดลอง 3 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ยและวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยวิธี One-Way Analysis of Variance และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของเวลาการแช่ขั้วในสารสกัดสมุนไพรรักษาความดันสูงและ/หรือความดันบรรยากาศปกติต่อสมบัติทางกายภาพของขั้วเสริมสารสกัดสมุนไพรรักษาด้วยเทคนิค VI

ขั้วเสริมสารสกัดดอกกระเจี๊ยบแดงและดอกอัญชันที่แช่ในสารสกัดสมุนไพรรักษาความดันสูงและ/หรือความดันบรรยากาศปกติเป็นเวลา 20 นาที/20 นาที มีค่าความสว่างหรือค่า L^* ค่าที่ต่ำสุด (ตารางที่ 1) เนื่องจากระยะเวลาการแช่ขั้วในสารสกัดสมุนไพรรักษาความดันสูงและ/หรือความดันบรรยากาศปกติที่นานขึ้น ช่วยให้สารสกัดสมุนไพรรักษาซึมเข้าไปในโครงสร้างของเมล็ดขั้วได้มากขึ้น ส่วนของค่า a^* ซึ่งหมายถึงค่าสีแดง-เขียว จากการทดลองพบว่าขั้วเสริมสารสกัด ดอกกระเจี๊ยบแดงมีค่าสีแดง (a^*) เป็นบวก ($a^* = 10.48 - 12.39$) ซึ่งแสดงค่าสีตามสีธรรมชาติของสารสกัดดอกกระเจี๊ยบแดง ขณะที่ขั้วเสริมสารสกัดดอกอัญชันมีค่าสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) เป็นลบ ($-b^* = -16.94$ ถึง -18.89) แสดงถึงความเป็นสีน้ำเงินตามสีธรรมชาติของสารสกัดดอกอัญชัน และค่าสี a^* และ b^* มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มระยะเวลาการแช่ขั้วในสารสกัดสมุนไพรรักษาความดันสูงและ/หรือความดันบรรยากาศปกติมากขึ้น บ่งชี้ว่าสารแอนโทไซยานินซึ่งเป็นสารสีสำคัญที่พบในสารสกัดดอกกระเจี๊ยบแดงและดอกอัญชันสามารถแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างของเมล็ดขั้วในระหว่างกระบวนการ VI ได้มากขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Adsare et al. (2016) ที่พบว่าค่าสี a^* ของขึ้นโทงเทงฝรั่ง (*Emblica officinalis*) ที่แช่ในสารสกัดส้มแขก (*Garcinia indica*) ที่มีสีแดงภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติ 4 ชั่วโมง สูงกว่าค่าสี a^* ของขึ้นโทงเทงฝรั่งที่ถูกแช่ในสารสกัดส้มแขกภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติ 1 2 และ 3 ชั่วโมง

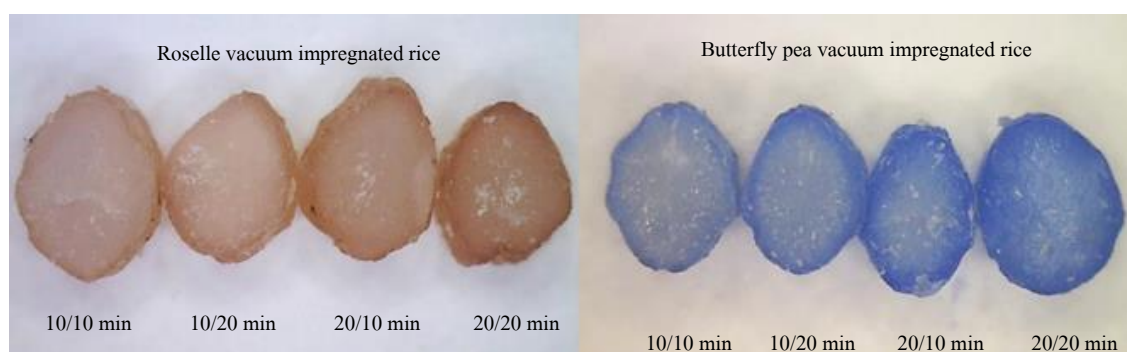
ตารางที่ 1 ค่าสี L^* a^* และ b^* ของขั้วเสริมสมุนไพรรักษาด้วยเทคนิค VI ที่ผันแปรเวลาการแช่ขั้วในสารสกัดสมุนไพรรักษาความดันสูง 50 มิลลิบาร์ และความดันบรรยากาศปกติที่แตกต่างกัน

Herbal plant extracts	Vacuum time (min)	Relaxation time (min)	L*	a*	b*
Roselle	10	10	52.09±0.37 ^a	11.60±0.63 ^b	7.08±0.62 ^a
	10	20	52.17±1.03 ^a	10.48±0.59 ^c	7.02±0.50 ^a
	20	10	50.44±0.80 ^b	11.77±0.61 ^b	7.03±0.50 ^a
	20	20	48.22±0.90 ^c	12.39±0.53 ^a	6.83±0.71 ^a
Butterfly pea	10	10	48.18±1.22 ^a	1.37±0.48 ^{ab}	-16.94±1.22 ^a
	10	20	48.13±1.12 ^a	1.30±0.54 ^{ab}	-18.59±1.18 ^b
	20	10	48.23±0.99 ^a	1.51±0.68 ^a	-18.78±1.36 ^b
	20	20	47.27±1.76 ^a	0.86±0.35 ^b	-18.89±1.18 ^b

- ข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 3) อักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันตามแนวตั้งของแต่ละพืชสมุนไพรแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ (P≤0.05)

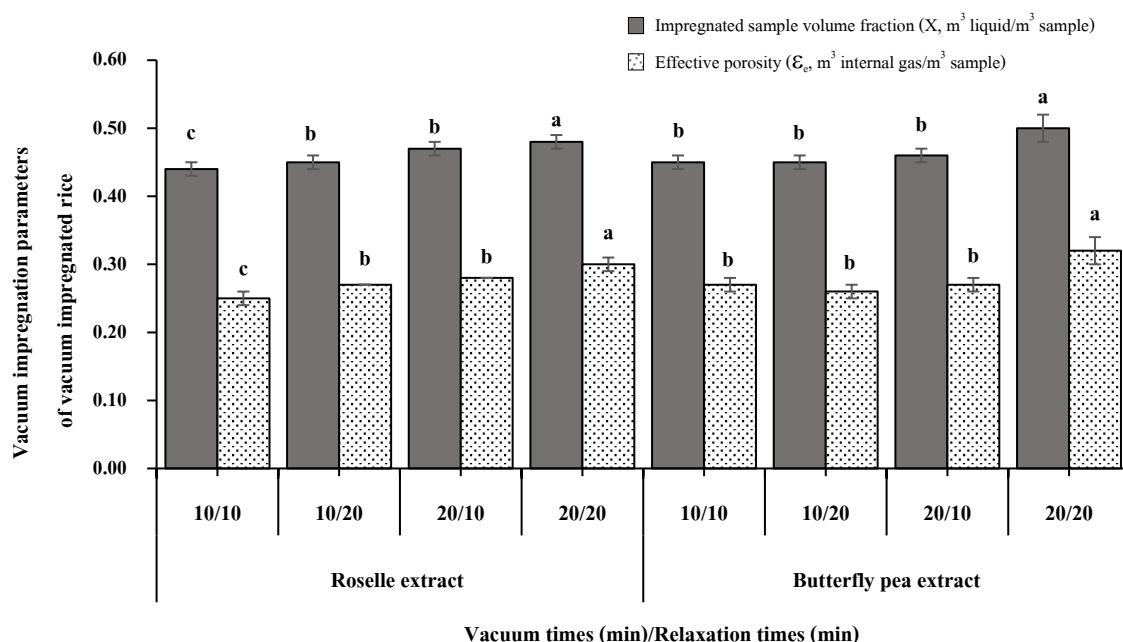
- L * = ค่าความสว่าง; a* = +ค่าสีแดง และ - ค่าสีเขียว; b * = +ค่าสีเหลือง และ - ค่าสีน้ำเงิน

เมื่อนำข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรที่ผ่านแปรเวลาในการแช่ข้าวในสารสกัดดอกกระเจี๊ยบแดงและดอกอัญชันภายใต้ความดันสุญญากาศและความดันบรรยากาศปกติที่แตกต่างกันมาตัดขวางเมล็ดและส่องด้วยกล้องกำลังขยายต่ำ สามารถเห็นการแทรกซึมของสารสกัดดอกกระเจี๊ยบแดงและดอกอัญชันเข้าไปในเนื้อของเมล็ดได้มากขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มเวลาการแช่ข้าวในสารสกัดสมุนไพรภายใต้สภาวะความดันสุญญากาศและความดันบรรยากาศปกติจาก 10 นาที เป็น 20 นาที (ภาพที่ 1)



รูปที่ 1 ภาพตัดขวางเมล็ดข้าวเสริมสารสกัดดอกกระเจี๊ยบแดงและดอกอัญชันด้วยกระบวนการ VI ที่ผ่านแปรเวลาการแช่ข้าวในสารสกัดสมุนไพรภายใต้ความดันสุญญากาศและความดันบรรยากาศปกติที่แตกต่างกัน

ปริมาณของสารสกัดสมุนไพรที่แทรกซึมเข้าไปในเมล็ดข้าว (X) และความพรุนที่ยอมให้ของสารสกัดสมุนไพรที่สามารถแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างเมล็ดข้าว (ϵ_e) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาการแช่ข้าวในสารสกัดสมุนไพรภายใต้ความดันสุญญากาศและ/หรือบรรยากาศปกติจาก 10 นาที เป็น 20 นาที โดยข้าวที่แช่ในสารสกัดดอกกระเจี๊ยบแดงและดอกอัญชันภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ระดับ 50 มิลลิบาร์ นาน 20 นาที และความดันบรรยากาศปกติ นาน 20 นาที มีค่า X และ ϵ_e สูงที่สุด ($0.48 - 0.50 \text{ m}^3 \text{ liquid/m}^3 \text{ sample}$ และ $0.24 - 0.32 \text{ m}^3 \text{ internal gas/m}^3 \text{ sample}$ ตามลำดับ) (ภาพที่ 2) ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของเมล็ดข้าวประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก สารที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนในโครงสร้างของเมล็ดข้าวเช่น น้ำ วิตามิน แร่ธาตุ และสารสกัดสมุนไพรสามารถแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างของเมล็ดข้าวหลังผ่านกระบวนการ VI ได้ (Makmuang et al., 2016) และการเพิ่มเวลาการแช่ข้าวภายใต้ความดันสุญญากาศและบรรยากาศปกติ ทำให้เกิดพื้นที่ว่างในโครงสร้างของเมล็ดข้าวมากขึ้น เป็นผลจากการขยายตัวของฟองอากาศภายในโครงสร้างของเมล็ดข้าวและฟองอากาศดังกล่าวจะเคลื่อนที่ออกจากรูพรุนของเมล็ดข้าวในช่วงของการแช่ข้าวภายใต้ความดันสุญญากาศ จากนั้นสารสกัดสมุนไพรจะแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างของเมล็ดข้าวในช่วงของการแช่ข้าวภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ (Krasaekoopt & Suthanwong, 2008) ประกอบกับเวลาในการแช่ข้าวในสารสกัดสมุนไพรที่นานขึ้นจะเกิดการแลกเปลี่ยนมวลสารมากขึ้น สารสกัดสมุนไพรจึงสามารถแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างของเมล็ดข้าวได้มากขึ้น (Phianmongkhol et al., 2015) สอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Benyakart et al. (2016) ที่พบว่าค่า X ของชั้นมะละกอบที่แช่ในสารละลายไอโซโทนิคเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาการแช่ภายใต้ความดันสุญญากาศจาก 5 นาที เป็น 10 นาที และความดันบรรยากาศปกติจาก 10 นาที เป็น 30 นาที



ภาพที่ 2 ปริมาตรของสารสกัดสมุนไพรที่แทรกซึมเข้าไปในเมล็ดข้าว (X) และค่าความพรุนที่ยอมให้ของสารสกัดสมุนไพรที่สามารถแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้าง (E) ข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรด้วยเทคนิค VI ที่ผันแปรเวลาการแช่ภายใต้ความดันสุญญากาศและความดันบรรยากาศปกติที่แตกต่างกัน

เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย (Water loss) แสดงถึงเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำของข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรหลังผ่านกระบวนการ VI พบว่าข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรทั้งสองชนิดมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำเป็นลบ (ตารางที่ 2) แสดงถึงสารสกัดสมุนไพรแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างของเมล็ดข้าวในระหว่างกระบวนการ VI (Benyakart et al., 2016) โดยข้าวเสริมสกัดดอกกระเจี๊ยบแดงและดอกอัญชันมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำลดลง ขณะที่เกิดการแทรกซึมของสารสกัดสมุนไพรเข้าสู่โครงสร้างเมล็ดข้าวมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเพิ่มเวลาการแช่ข้าวในสารสกัดสมุนไพรภายใต้ความดันสุญญากาศและ/หรือบรรยากาศปกติ ทำให้ข้าวเสริมสารสกัดดอกกระเจี๊ยบแดงและดอกอัญชันที่แช่ในสารสกัดภายใต้สภาวะสุญญากาศ 50 มิลลิบาร์ นาน 20 นาที และความดันบรรยากาศปกติ 20 นาที มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำต่ำที่สุด (-35.57 และ -38.70 เปอร์เซ็นต์) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Phianmongkhon et al. (2015) ที่พบว่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำของขึ้นแปปเปิ้ลและแคนตาลูปที่แช่ในสารละลายไอโซโทนิคและใช้เวลาการแช่ภายใต้ความดันสุญญากาศ 50 มิลลิบาร์ และความดันบรรยากาศปกติที่ 20 นาที/20 นาที มีค่าต่ำกว่าการแช่ขึ้นแปปเปิ้ลและแคนตาลูปสารละลายไอโซโทนิค 10 นาที/10 นาที และ Martinez-Valencia et al. (2011) ที่พบว่าการเพิ่มเวลาการแช่ขึ้นเมลอนในสารละลายน้ำตาลนานขึ้น (10-360 นาที) ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำของขึ้นเมลอนลดลง ซึ่งแสดงถึงการมีสารละลายน้ำตาลแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างของขึ้นเมลอนมากขึ้น

ตารางที่ 2 ผลของเวลาการแช่ข้าวในสารสกัดสมุนไพรภายใต้ความดันสุญญากาศ 50 มิลลิบาร์และความดันบรรยากาศปกติที่แตกต่างกันต่อเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำของข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรด้วยเทคนิค VI

Plant extracts	Vacuum time (min)	Relaxation time (min)	Water loss (%)
Roselle	10	10	-16.37±0.15 ^a
	10	20	-23.33±0.35 ^b
	20	10	-27.57±0.15 ^c
	20	20	-35.57±0.40 ^d
Butterfly pea	10	10	-14.00±0.52 ^a
	10	20	-35.77±0.42 ^b
	20	10	-32.90±0.56 ^c
	20	20	-38.70±0.26 ^d

ข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ และตัวอักษรภาษาอังกฤษที่กำหนดค่าของข้อมูลในแต่ละคอลัมน์ที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ($P \leq 0.05$)

ผลของเวลาในการแช่ข้าวในสารสกัดสมุนไพรภายใต้ความดันสุญญากาศและความดันบรรยากาศปกติต่อสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรด้วยเทคนิค VI

ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระในข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพร

ระยะเวลาการแช่เมล็ดข้าวในสารสกัดสมุนไพรในสภาวะความดันสุญญากาศที่ระดับ 50 มิลลิบาร์ และเวลาการแช่ภายใต้ความดันบรรยากาศปกติที่นานขึ้นจาก 10 นาที เป็น 20 นาที มีผลทำให้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์และแอนโทไซยานินในข้าวเสริมสมุนไพรทั้ง 2 ชนิดเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ส่งผลให้ข้าวเสริมสมุนไพรที่แช่เมล็ดข้าวในสารสกัดภายใต้สภาวะสุญญากาศ 50 มิลลิบาร์ นาน 20 นาที และความดันบรรยากาศปกติ 20 นาที มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์และแอนโทไซยานินสูงที่สุด โดยข้าวเสริมสารสกัดดอกกระเจี๊ยบและดอกอัญชันมีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระรวม 530.20 และ 214.54 mg/100 g ตามลำดับ และมีองค์ประกอบส่วนใหญ่ (72.29 – 91.25 เปอร์เซนต์) เป็นสารประกอบฟลาโวนอยด์ (ตารางที่ 3) สอดคล้องกับ Moreira & Almohaimeed (2018) ที่รายงานว่าระยะเวลาการแช่ขึ้นมันฝรั่งในสารสกัดบีทรูทภายใต้ความดันสุญญากาศและบรรยากาศปกติที่นานกว่า (15 นาที/15 นาที) ส่งผลให้ขึ้นมันฝรั่งมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่าการแช่ภายใต้ความดันสุญญากาศและบรรยากาศปกติสั้นกว่า (5 นาที/5 นาที) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ดอกกระเจี๊ยบแดงมีองค์ประกอบของสารฟลาโวนอยด์ในกลุ่ม Flavonol หลายชนิด ส่วนใหญ่คือ Gossypetin, Hibiscetin, Quercetin และ Sabdaretin และพบสารในกลุ่มแอนโทไซยานินคือ Delphinidin-3-O-sambubioside, Cyanidin-3-O-sambubioside, Cyaniding-3,5-diglucoside และ Delphinidin (Tsai et al., 2002) ดอกอัญชันมีสารประกอบฟลาโวนอยด์เป็นองค์ประกอบหลักของสารต้านอนุมูลอิสระ โดยส่วนใหญ่เป็นสารในกลุ่ม Flavonol glycosides, Kaemferol glycosides, Quercetin glycosides และสารในกลุ่มแอนโทไซยานิน (Anthika et al., 2015) สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเป็นสารให้สีและรสชาติในผักและผลไม้มีความสามารถในการให้ไฮโดรเจนอะตอมกับอนุมูลอิสระเปลี่ยนเป็นโมเลกุลที่มีความเสถียรจึงเป็นการหยุดห่วงโซ่การสร้างอนุมูลอิสระและกำจัดอนุมูลอิสระได้โดยตรง นอกจากนี้ยังมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระทางอ้อมด้วยการปกป้องเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ต้านอนุมูลอิสระในร่างกาย (Pradeep & Sreerama, 2015) และการจับกับไอออนของโลหะ (Metal chelator) (Pereira et al., 2009) จึงมีบทบาทสำคัญในการปกป้องเซลล์และเนื้อเยื่อของร่างกายจากการทำลายของอนุมูลอิสระ สารแอนโทไซยานินเป็นสารสีหรือรงควัตถุในกลุ่มของฟลาโวนอยด์ที่ให้สีแดงตั้งแต่สีแดง สีส้มไปจนถึงสีม่วงมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ดี เนื่องจากมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนอิสระหรือไฮโดรเจนอะตอมกับอนุมูลอิสระได้อย่าง

รวดเร็ว นอกจากนี้ยังมีฤทธิ์ด้านการอักเสบ (Anti-inflammatory activity) และฤทธิ์ต้านมะเร็ง (Anti-carcinogenic activity) (Miguel, 2011) รายงานวิจัยทางด้านระบาดวิทยาพบว่า การบริโภคอาหารที่มีแอนโทไซยานินเป็นองค์ประกอบมีส่วนช่วยป้องกันหรือลดความเสี่ยงของการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจ มะเร็ง เบาหวาน โรคระบบประสาท และโรคข้อต่ออักเสบ (Li et al., 2017) และสารประกอบฟลาโวนอยด์เป็นรงควัตถุที่พบในพืชตามธรรมชาติเพื่อทำหน้าที่ในการป้องกันอันตรายจากรังสียูวี การเข้าทำลายของเชื้อราและสัตว์ที่กินพืช รวมถึงป้องกันการเกิดโรคและการเกิดออกซิเดชันของเซลล์ที่ได้รับความเสียหาย (Majer et al., 2014) สารประกอบฟลาโวนอยด์สามารถยับยั้งการสร้างอนุมูลอิสระและกำจัดอนุมูลอิสระผ่านทางกลไกต่างๆ คือ เช่น กำจัดอนุมูลอิสระ ยุติการสร้างซึ่งเกิดออกซิเจนและยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่สร้างอนุมูลอิสระ (Mierziak et al., 2014) ทำให้ฟลาโวนอยด์มีฤทธิ์ยับยั้งปฏิกิริยาลิปิดเปอร์ออกซิเดชัน ยับยั้งการเกิดเนื้องอก ด้านการแข็งตัวของเลือด ด้านการเกิดโรคหัวใจขาดเลือด ด้านการแพ้และการอักเสบ (Cao et al., 1997) และมีส่วนช่วยลดการเกิดโรคมะเร็งและโรคหลอดเลือดหัวใจ (Ignat et al., 2011) ดังนั้นข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรที่พัฒนาได้จากงานวิจัยนี้ซึ่งมีองค์ประกอบของสารประกอบฟลาโวนอยด์สูงจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายในการป้องกันโรค

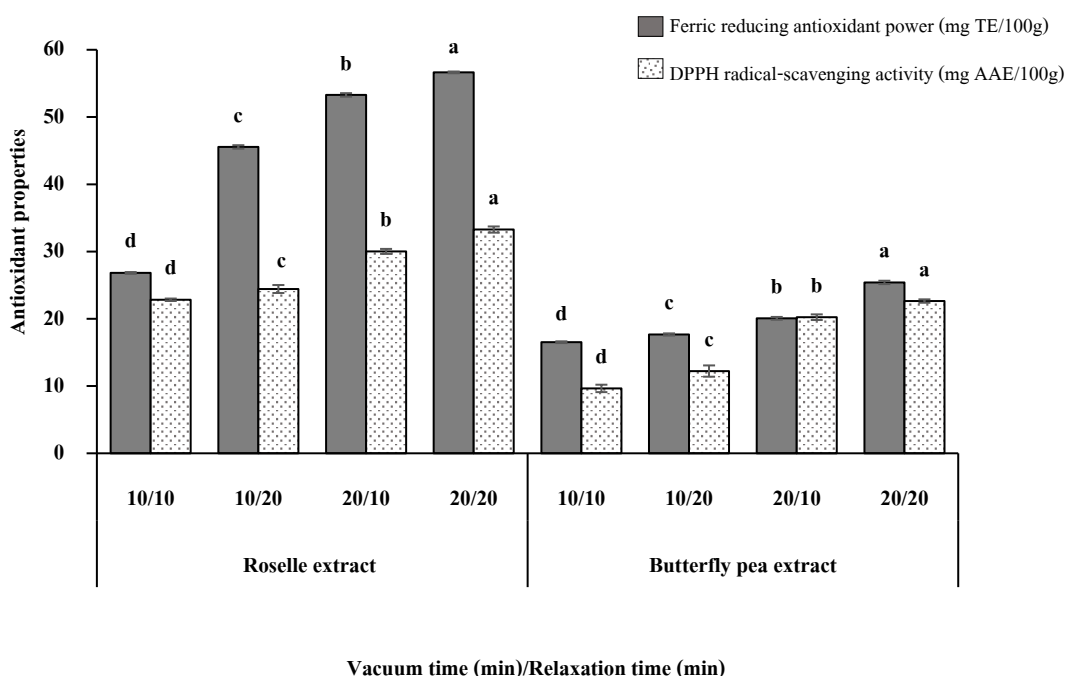
ตารางที่ 3 ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระในข้าวเสริมสมุนไพรด้วยเทคนิค VI ที่ผันแปรเวลาในการแช่ข้าวในสารสกัดสมุนไพรภายใต้ความดันสุญญากาศ 50 มิลลิบาร์ และความดันบรรยากาศปกติที่แตกต่างกัน

Plant extracts	Vacuum time (min)	Relaxation time (min)	Total phenolic (mg GAE/100g)	Anthocyanins (mg CEG/100g)	Flavonoids (mg CTE/100g)
Roselle	10	10	18.30±0.44 ^d	2.64±0.08 ^d	293.50±3.57 ^d
	10	20	28.86±0.85 ^c	3.39±0.12 ^c	343.50±2.65 ^c
	20	10	34.33±0.44 ^b	4.31±0.14 ^b	361.44±4.53 ^b
	20	20	41.63±0.54 ^a	4.78±0.12 ^a	483.79±3.53 ^a
Butterfly pea	10	10	19.36±0.66 ^d	2.13±0.18 ^d	105.38±1.35 ^d
	10	20	30.94±0.47 ^c	2.67±0.04 ^c	120.19±2.07 ^c
	20	10	49.49±0.50 ^b	3.04±0.10 ^b	125.58±1.62 ^b
	20	20	55.78±0.29 ^a	3.67±0.04 ^a	155.09±2.61 ^a

ข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 3) อักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันตามแนวตั้งของแต่ละพืชสมุนไพร แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ (P≤0.05)

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในข้าวเสริมสมุนไพร

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ FRAP value ในข้าวเสริมสารสกัดกระเจี๊ยบและอัญชันแสดงในภาพที่ 3 โดยฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ FRAP value ของข้าวเสริมสมุนไพรทั้ง 2 ชนิด เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเพิ่มเวลาการแช่ข้าวในสารสกัดสมุนไพรภายใต้ความดันสุญญากาศและ/หรือบรรยากาศปกติจาก 10 นาที เป็น 20 นาที สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของสารต้านอนุมูลอิสระในตารางที่ 3 ทำให้ข้าวเสริมสมุนไพรที่แช่ในสภาวะสุญญากาศที่ระดับ 50 มิลลิบาร์ นาน 20 นาที และความดันบรรยากาศปกติ 20 นาที แสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ FRAP value สูงที่สุด โดยข้าวเสริมสารสกัดดอกกระเจี๊ยบแดงและดอกอัญชันมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH เป็น 33.27 และ 22.64 mg AAE/100g และมี FRAP value เป็น 56.64 และ 25.41 mg TE/100g ตามลำดับ



ภาพที่ 3 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ FRAP value ในข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรที่ผันแปรเวลาการแช่ภายใต้สภาวะสุญญากาศและเวลาการแช่ภายใต้ความดันบรรยากาศปกติที่แตกต่างกัน

จากผลของปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดฟลาโวนอยด์และแอนโทไซยานินรวมทั้งฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ FRAP value ที่พบในข้าวเสริมสารสกัดดอกกระเจี๊ยบแดงและดอกอัญชันด้วยเทคนิค VI ที่ตรวจพบในงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นสิ่งบ่งชี้ได้ว่า ข้าวเสริมสารสกัดสมุนไพรที่ผลิตได้จากกระบวนการ VI เป็นแหล่งที่ดีของสารต้านอนุมูลอิสระโดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มฟลาโวนอยด์ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการป้องกันโรคที่เกิดจากอนุมูลอิสระให้กับร่างกายได้

สรุปผลการทดลอง

ผลของระยะเวลาการแช่ข้าวภายใต้ความดันสุญญากาศ 50 มิลลิบาร์ และความดันบรรยากาศปกติที่แตกต่างกัน 4 ระยะเวลา ได้แก่ 10/10 10/20 20/10 และ 20/20 นาที พบว่าเมื่อเวลาการแช่ภายใต้ความดันสุญญากาศ 50 มิลลิบาร์ และความดันบรรยากาศปกติเพิ่มขึ้นส่งผลให้สารสกัดสมุนไพรมสามารถแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างของเมล็ดข้าวมากขึ้น โดยการแช่ข้าวในสารสกัดสมุนไพรมภายใต้ความดัน 50 มิลลิบาร์ นาน 20 นาที และแช่ที่ความดันบรรยากาศปกติ 20 นาที มีปริมาณสารสกัดสมุนไพรมที่แทรกซึมเข้าไปในเมล็ดข้าวสูงสุด และมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานิน รวมถึงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (DPPH และ FRAP value) สูงที่สุดอีกด้วย ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ของสารต้านอนุมูลอิสระที่พบในข้าวเสริมสารสกัดดอกกระเจี๊ยบแดงและดอกอัญชันคือ ฟลาโวนอยด์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

เอกสารอ้างอิง

- Adsare, S. R., Bellary, A. N., Sowbhagya, H. B., Baskaran, R., Prakash, M., & Rastogi, N. K. (2016). Osmotic treatment for the impregnation of anthocyanin in candies from Indian gooseberry (*Emblca officinalis*). *Journal of Food Engineering*, 175, 24-32.
- Akman, P. K., Uysal, E., Ozkaya, G. U., Tornuk, F., & Durak, M. Z. (2019). Development of probiotic carrier dried apples for consumption as snack food with the impregnation of *Lactobacillus paracasei*. *LWT - Food Science and Technology*, 103, 60-68.
- Anthika, B., Kusumocahyo, S. P., & Sutanto, H. (2015). Ultrasonic approach in *Clitoria ternatea* (butterfly pea) extraction in water and extract sterilization by ultrafiltration for eye drop active ingredient. *Procedia Chemistry*, 16, 237-244.
- Azima, A. M. S., Noriham, A., & Manshoor, N. (2017). Phenolics, antioxidants and color properties of aqueous pigmented plant extracts: *Ardisia colorata* var. *elliptica*, *Clitoria ternatea*, *Garcinia mangostana* and *Syzygium cumini*. *Journal of Functional Foods*, 38, 232-241.
- Benyakart, N., Phianmongkhon, A., & Wirjantoro, T. I. (2016). Effect of impregnation solution ratio and periods on vacuum impregnated papaya. *KKU Research Journal*, 21(2), 291-298.
- Cao, G., Sofic, E., & Prior, R. L. (1997). Antioxidant and prooxidant behavior of flavonoids: Structure-activity relationships. *Free Radical Biology and Medicine*, 22, 749-760.

- Castagnini, J. M., Betoret, N., Betoret, E., & Fito, P. (2015). Vacuum impregnation and air drying temperature effect on individual anthocyanins and antiradical capacity of blueberry juice included into an apple matrix. *LWT - Food Science and Technology*, 64, 1289-1296.
- Dajanta, K., & Rongkom, H. (2017). Effects of drying temperature on the isoflavone content and antioxidant capacity of fermented soybean (Thua Nao). *KKU Science Journal*, 45(1), 138-150.
- Dajanta, K., Janpum, P., & Leksing, W. (2013). Antioxidant capacities, total phenolics and flavonoids in black and yellow soybeans fermented by *Bacillus subtilis*: A comparative study of Thai fermented soybeans (thua nao). *International Food Research Journal*, 20(6), 3125-3132.
- Danpikulthong, P., Dajanta, K., & Rongkom, H. (2017). Effect of steaming time and vacuum pressure level on physicochemical and antioxidant properties of vacuum impregnated rice. *In the Proceedings Innovation and Technology Conference (ITC2017)* (pp.832-841). Rajamangala University of Technology Isan Surin, Surin.
- Derossi, A., Pilli, T. D., & Severini, C. (2012). The application of vacuum impregnation techniques in food industry. In: Valdez B (Ed), *Scientific, health and social aspects of the food industry*. (pp. 25-56). Croatia.
- Derossi, A., Pilli, T. D., & Severini, C. (2010). Reduction in the pH of vegetables by vacuum impregnation: A study on pepper. *Journal of Food Engineering*, 99, 9-15.
- Duangkhamchan, W., & Siriamornpun, S. (2015). Quality attributes and anthocyanin content of rice coated by purple-corn cob extract as affected by coating conditions. *Food and Bioproducts Processing*, 96, 171-179.
- Gras, M., Vidal-Brotons, D., Betoret, N., Chiralt, A., & Fito, P. (2002). The response of some vegetables to vacuum impregnation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 3, 263-269.
- Hironaka, K., Kikuchi, M., Koaze, H., Sato, T., Kojima, M., Yaamamoto, K., Yasuda, K., Mori, M., & Tsuda, M. (2011). Ascorbic acid enrichment of whole potato tuber by vacuum impregnation. *Food Chemistry*, 127, 1114-1118.
- Huang, H., Xua, Q., Belwal, T., Lia, L., Aalim, H., Wu, Q., Zhenhu, D., Zhangc, X., & Luo, Z. (2019). Ultrasonic impact on viscosity and extraction efficiency of polyethylene glycol: A greener approach for anthocyanins recovery from purple sweet potato. *Food Chemistry*, 283, 59-67.
- Ignat, I., Volf, I., & Popa, V. I. (2011). A critical review of methods for characterization of polyphenolic compounds in fruits and vegetables. *Food Chemistry*, 126, 1821-1835.
- Krasaekoopt, W., & Suthanwong, B. (2008). Vacuum impregnation of probiotics in fruit pieces and their survival during refrigerated storage. *Kasetsart Journal*, 42, 723-731.

- Li, D., Wang, P., Luo, Y., Zhao, M., & Chen, F. (2017). Health benefits of anthocyanins and molecular mechanisms: Update from recent decade. *Journal Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(8), 1729-1741.
- Lima, M. M., Tribuzi, L., Souza, J. A. R., Sousa, I. G., Laurindo, J. B., & Carciofi, B. A. (2016). Vacuum impregnation and drying of calcium-fortified pineapplesnacks. *LWT - Food Science and Technology*, 72, 501-509.
- Majer, P., Neugart, S., Krumbein, A., Schreiner, M., & Hideg, É. (2014). Singlet oxygen scavenging by leaf flavonoids contributes to sunlight acclimation in *Tilia platyphyllos*. *Environmental and Experimental Botany*, 100, 1-9.
- Makmuang, C., Phianmongkhon, A., & Wirjantoro, T. I. (2016). Vacuum impregnated rice as affected by moisture content and rice varieties. *KKU Research Journal*, 21(2), 299-309.
- Martinez-Valencia, B. B., Abud-Archila, M., Ruiz-Cabrera, M. A., Grajales-Lagunes, A., Dendooven, L., Ovando-Chacón, S. L., & Gutiérrez-Miceli, F. A. (2011). Pulsed vacuum osmotic dehydration kinetics of melon (*Cucumis melo* L.) var. cantaloupe. *African Journal of Agricultural Research*, 6(15), 3588-3596.
- Mierziak, J., Kostyn, K., & Kulma, A. (2014). Flavonoids as important molecules of plant interactions with the environment. *Molecules*, 19, 16240-16265.
- Miguel, M. G. (2011). Anthocyanins: Antioxidant and/or anti-inflammatory activities. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 1(6), 7-15.
- Moreira, R. G., & Almohaimeed, S. (2018). Technology for processing of potato chips impregnated with red beetroot phenolic compounds. *Journal of Food Engineering*, 228, 57-68.
- Occhioia, E., Hernando, I., Llorcab, E., Neria, L., & Pittiaa, P. (2011). Effect of vacuum impregnation treatments to improve quality and texture of zucchini (*Cucurbita pepo*, L). *Procedia Food Science*, 1, 829-835.
- Pereira, D. M., Valentão, P., Pereira, J. A., & Andrade, P. B. (2009). Phenolics: From chemistry to biology. *Molecules*, 14(2), 202-211.
- Peters, U., Poole, C., & Arab, L. (2001). Does tea affect cardiovascular disease? A meta-analysis. *American Journal of Epidemiology*, 154, 495-503.
- Phianmongkhon, A., Rongkom, H., & Wirjantoro, T. I. (2015). Effect of fruit size and processing time on vacuum impregnation parameters of cantaloupe and apple. *CMU Journal of Natural Science*, 14(2), 125-132.
- Pradeep, P. M., & Sreerama, Y. N. (2015). Impact of processing on the phenolic profiles of small millets: Evaluation of their antioxidant and enzyme inhibitory properties associated with hyperglycemia. *Food Chemistry*, 169, 455-463.

- Purnomo, E. H., Nindyautami, F. A., Konsue, N., & Pathomrungsinyounggul, P. (2018). Fortification of rice grain with gac aril (*Momordica conchinchinensis*) using vacuum impregnation technique. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 6(2), 412-424.
- Rajan, V. K., Hasna, C. K., & Muraleedharan, K. (2018). The natural food colorant Peonidin from cranberries as a potential radical scavenger-A DFT based mechanistic analysis. *Food Chemistry*, 262, 184-190.
- Rongkom, H., Phianmongkhol, A., & Wirjantoro, T. I. (2013). Physical properties of impregnated cantaloupe and apple affected by different pressure levels. *Asian Journal of Agriculture and Food Sciences*, 1(4), 163-171.
- Steiger, G., Müller-Fischer, N, Cori, H., & Conde-Petit, B. (2014). *Fortification of rice: technologies and nutrients: Annals of the New York academy of sciences*. New York: Wiley-Blackwell.
- Tappi, S., Tylewicz, U., Romani, S., Rosa, M. D., Rizzi, F., & Rocculi, P. (2017). Study on the quality and stability of minimally processed apples impregnated with green tea polyphenols during storage. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 39, 148-155.
- Tsai, P. J., McIntosh, J., Pearce, P., Camden, B., & Jordan, B. R. (2002). Anthocyanin and antioxidant capacity in Roselle (*Hibiscus Sabdariffa* L.) extract. *Food Research International*, 35, 351-356.

Research Article

ผลของวิธีการเตรียมถั่วเหลืองต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและ
ประสาทสัมผัสของนํ้านมถั่วเหลือง และผลของอุณหภูมิอบแห้ง
และปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินต่อคุณภาพของนมถั่วเหลืองผงด้วย
วิธีอบแห้งแบบพ่นฝอย

Effect of soybean preparation methods on physicochemical
and sensory properties of soy milk and effect of drying
temperatures and maltodextrin concentrations on quality of
spray-dried soy milk powder

สุธิดา อัครชนียากร^{1*} สิริกุล นิธิธนาธร¹ และสิริกอร์ ลิขิตวานิชกุล¹

Suthida Akkarachaneeyakorn^{1*}, Sirikul Nititanatorn¹ and Sirikorn Likhitwanichakul¹

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาหาร และสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 ประเทศไทย

¹Department of Agro-Industrial, Food, and Environmental Technology, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of
Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800 Thailand

*E-mail: suthida.a@sci.kmutnb.ac.th

Received: 19/10/2020; Revised: 26/02/2021; Accepted: 17/03/2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการเตรียมถั่วเหลือง (วิธีที่ 1 ใช้นํ้าและความร้อน และวิธีที่ 2 ใช้นํ้าและคาร์บอนเนตและความร้อน) ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ และประสาทสัมผัสของนํ้านมถั่วเหลือง ผลการทดลองพบว่านํ้านมถั่วเหลืองที่เตรียมด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และคะแนนการยอมรับจากผู้ทดสอบในด้านกลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมมากกว่าวิธีที่ 2 ปริมาณความชื้น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และเถ้าของนํ้านมถั่วเหลืองที่เตรียมโดยวิธีที่ 1 เท่ากับ ร้อยละ 90.71 3.83 3.41 1.73 0.32 (โดยน้ำหนักเปียก) ตามลำดับ หลังจากนั้นนํ้านมถั่วเหลืองที่เตรียมโดยวิธีที่ 1 ไปผลิตเป็นนมถั่วเหลืองผงด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยศึกษาผลของอุณหภูมิลมร้อนเข้า (150 160 และ 170 องศาเซลเซียส) และ

ความเข้มข้นของมอลโตเด็คซ์ตริน (ร้อยละ 9 12 และ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของนมถั่วเหลืองผง ผลการทดลองพบว่าการทำแห้งโดยใช้อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าเท่ากับ 160 และ 170 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของมอลโตเด็คซ์ตรินเท่ากับร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีที่สุด โดยมีดัชนีการละลาย (1 มิลลิลิตร) และค่าความคงตัว (ร้อยละ 31) สูงที่สุด ดังนั้นสภาวะที่ดีที่สุดในการผลิตนมถั่วเหลืองผงด้วยวิธีอบแห้งแบบพ่นฝอย ที่ทำให้ค่าดัชนีการละลาย และความคงตัวของนมถั่วเหลืองผงมีค่าสูงที่สุด และใช้พลังงานน้อยที่สุด คือ การใช้มอลโตเด็คซ์ตรินร้อยละ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าเท่ากับ 160 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ: การทำแห้งแบบพ่นฝอย การเตรียมถั่วเหลือง นมถั่วเหลืองผง มอลโตเด็คซ์ตริน อุณหภูมิลมร้อน

Abstract

The research aimed to study effect of soybean preparation methods (method 1 using water and heat, and method 2 using sodium bicarbonate and heat) on physicochemical and sensory properties of soy milk. It was found that soymilk prepared by method 1 contained higher content of protein, carbohydrate, and panelists' acceptance scores in terms of odor, taste, texture, and overall liking than method 2. The moisture, protein, carbohydrate fat and ash contents of soy milk which prepared from method 1 were 90.71, 3.83, 3.41, 1.73, 0.32% (wet basis), respectively. Thereafter, the soy milk prepared from the method 1 was used for producing soy milk powder using a spray dryer. The effects of inlet hot air temperature (150, 160, and 170 °C) and maltodextrin concentration (9, 12, and 15% (w/v) on physicochemical properties of soy milk powder were studied. The results showed that drying with the inlet hot air temperatures of 160 and 170 °C with maltodextrin concentration of 15% (w/v) gave the good quality of product with the highest solubility index (1 ml) and stability value (31%). Therefore, the best condition for production of spray-dried soybean powder which gave the highest solubility index and stability value while the lowest energy consumption was using maltodextrin 15% (w/v) and inlet hot air temperature at 160 °C.

Keywords: spray drying, soy bean preparation, soy milk powder, maltodextrin, hot air temperature

บทนำ

นํ้านมถั่วเหลือง คือ เครื่องดื่มที่ได้จากการนำถั่วเหลืองมาล้างให้สะอาด แช่นํ้า บดกับนํ้าแล้วกรอง อาจมีการปรุงแต่งกลิ่นรส และเติมส่วนผสมอื่น เช่น นํ้าตาล นํ้าลูกเดือย ชาเขียว แล้วนำไปฆ่าเชื้อแบบพาสเจอร์ไรซ์ก่อนหรือหลังบรรจุ และเก็บรักษาโดยการแช่เย็น (Thai Industrial Standards Institute, 2015) นํ้านมถั่วเหลืองมีโปรตีนเทียบเท่านํ้านมวัว มีกรดแอมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย ไม่มีคลอเรสเตอรอล มีสารที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น ไอโซฟลาโวน ซาโปนิน โอลิโกแซ็กคาไรด์ เส้นใยอาหาร (Ikya et al., 2013; Ma et al., 2015; Zhanhi & Jideani, 2012) นํ้านมถั่วเหลืองมีกลิ่นไม่พึงประสงค์ เนื่องจากเอนไซม์ลิวอกซิจีเนส ซึ่งส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค เอนไซม์ลิวอกซิจีเนส (EC 1.13.11.12) คือ เอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว เช่น กรดลิโนเลอิก ลิโนเลนิก และอะเรกิดอนิก ทำให้เกิดสารประกอบแอลดีไฮด์ และคีโตน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์ในนํ้านมถั่วเหลือง (Alhendi, 2016; Yan-Chun et al., 2011) วิธียับยั้งการทำงานของเอนไซม์ลิวอกซิจีเนสได้แก่ การให้ความร้อนเพื่อทำให้เอนไซม์เสียสภาพ และ/หรือใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกสีขาวที่ละลายน้ำได้ดี เป็นสารละลายมีฤทธิ์เป็นด่าง ซึ่งปฏิกิริยาที่ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ลิวอกซิจีเนส ทำให้ประจุในบริเวณเร่งและบริเวณจับของเอนไซม์รวมทั้งประจุของตัวเข้าทำปฏิกิริยาไม่เหมาะสมที่จะทำปฏิกิริยากัน โดยสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เอนไซม์ลิวอกซิจีเนสทำงานได้ดีที่สุด คือ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 6-7 และอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส (Alhendi, 2016; Ikya et al., 2013; Nelson et al., 1976; Yan-Chun et al., 2011) เพื่อเป็นการยืดอายุการเก็บรักษาและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ นํ้านมถั่วเหลือง จึงนำ นํ้านมถั่วเหลืองมาทำแห้งแบบพ่นฝอย ข้อดีของการทำแห้งแบบพ่นฝอย คือ มีอัตราเร็วของการทำแห้งสูง ใช้เวลาอบแห้งสั้น เนื่องจากการทำให้ของเหลวถูกพ่นฝอยเป็นละอองขนาดเล็กก่อนอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ผงที่ได้มีขนาดสม่ำเสมอ มอลโตเด็คซ์ทรินเป็นพอลิเมอร์ของแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วย D-glucose หลายหน่วยมาต่อกันด้วยพันธะแอลฟา 1-4 สามารถละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิห้อง สารละลายที่ได้มีสมบัติทางด้านความเป็นเนื้อ (body) ช่วยเพิ่มปริมาณของแข็งให้กับวัตถุดิบก่อนที่จะนำมาเข้าเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย และช่วยลดการดูดความชื้นกลับในผลิตภัณฑ์ผงซึ่งมีนํ้าตาลเป็นองค์ประกอบสูง เช่น นํ้าผลไม้ผง ทำให้ผลิตภัณฑ์ผงไหลได้สะดวก ทำหน้าที่เป็นสารช่วยกักเก็บสารต่าง ๆ ที่ถูกทำลายได้ง่ายด้วยความร้อน (Furia, 1980) ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณผลผลิต สมบัติทางเคมีกายภาพ และประสาทสัมผัสของนํ้าผลไม้และ นํ้านมถั่วเหลืองผงด้วยวิธีอบแห้งแบบพ่นฝอย ได้แก่ อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า-ขาออก ชนิดและความเข้มข้นของสารห่อหุ้ม อัตราการไหลเข้าของตัวอย่าง ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของตัวอย่าง อัตราเร็วของลมร้อนในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Chegini & Ghobadian, 2007; Ishiwu et al., 2014; Nguyen et al., 2017; Phisut, 2012; Tran & Nguyen, 2018) Tran & Nguyen (2018) พบว่าการทำแห้งสารสกัดใบตะไคร้แบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าเท่ากับ 110 องศาเซลเซียส และการใช้มอลโตเด็คซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้ม สามารถรักษาสารต้านอนุมูลอิสระในผงจากสารสกัดใบตะไคร้ที่ทำแห้งแบบพ่นฝอยได้ดีที่สุด Ishiwu et al. (2014) และ Nguyen et al. (2017) พบว่าใน

การทำให้น้ำนมถั่วเหลืองแบบพ่นฝอย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิความร้อนเข้าทำให้น้ำนมถั่วเหลืองผงมีปริมาณความชื้นลดลง แต่มีค่าการละลายลดลง จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ายังไม่มียานวิจัยที่ศึกษาผลของวิธีการเตรียมถั่วเหลืองต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสาทสัมผัสของน้ำนมถั่วเหลือง และผลของอุณหภูมิอบแห้งและปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินต่อคุณภาพของนมถั่วเหลืองผงด้วยวิธีอบแห้งแบบพ่นฝอย ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการเตรียมถั่วเหลือง (ด้วยน้ำและความร้อน และโซเดียมไบคาร์บอเนตและความร้อน) ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ และประสาทสัมผัสของน้ำนมถั่วเหลือง โดยพิจารณาวิธีการเตรียมที่ดีที่สุดที่ทำให้น้ำนมถั่วเหลืองมีคุณค่าทางสารอาหาร และผู้บริโภครับมากที่สุด หลังจากนั้นนำน้ำนมถั่วเหลืองที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีที่ดีที่สุดไปทำแห้งแบบพ่นฝอย เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิความร้อนเข้า และความเข้มข้นของมอลโตเด็กซ์ทรินต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของนมถั่วเหลืองผงที่ได้ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยพิจารณาจากสภาวะที่ทำให้น้ำนมถั่วเหลืองผงมีดัชนีการละลายและค่าความคงตัวมากที่สุด และใช้พลังงานน้อยที่สุด ตรวจสอบสมบัติทางเคมีกายภาพของนมถั่วเหลืองผงที่ผลิตได้จากสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ปริมาณความชื้น และสี เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีกายภาพของนมถั่วเหลืองผงในรูปแบบที่ผลิตได้จากสภาวะที่เหมาะสมกับน้ำนมถั่วเหลืองทางการค้า ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ โปรตีน ไขมัน เถ้า และค่าสี

วัตถุประสงค์และวิธีการทดลอง

1. วัสดุุดิบ

ถั่วเหลืองผ่าซีก (*Glycine max* L. Merrill) (ไรท์พี, บริษัท ไทยซีเรียลส์เวิลด์ จำกัด, ประเทศไทย); มอลโตเด็กซ์ทริน (DE12, บริษัท ฟุคส์ อีควิเมนต์, ประเทศไทย); น้ำนมถั่วเหลืองทางการค้า (ตลาดทำนันทน์ อ. เมือง จ. นนทบุรี)

2. การศึกษาผลของวิธีการเตรียมถั่วเหลืองต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของน้ำนมถั่วเหลือง

2.1 การผลิตน้ำนมถั่วเหลือง

ผลิตน้ำนมถั่วเหลืองจากวิธีการเตรียมถั่วเหลืองที่แตกต่างกัน 2 วิธี ได้แก่

ก) วิธีที่ 1 การใช้น้ำและความร้อน

วิธีการเตรียมถั่วเหลืองด้วยน้ำและความร้อน ดัดแปลงจาก Alhendi (2016) และ Nelson et al. (1976) ล้างถั่วเหลืองกะเทาะเปลือก 1 กิโลกรัมด้วยน้ำเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก แช่ในน้ำที่มีอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ปริมาตร 10 ลิตร (อัตราส่วนเมล็ดถั่วเหลืองต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 10) เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อทำให้เปลือกถั่วเหลืองอ่อนตัว ลวกถั่วเหลืองด้วยน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ลิวอกซิจีเนส ทำให้เย็นโดยจุ่มลงในน้ำผสมน้ำแข็ง และทำให้สะเด็ดน้ำ

ข) วิธีที่ 2 การใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตและความร้อน

วิธีการเตรียมถั่วเหลืองด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตและความร้อน ดัดแปลงจาก Alhendi

(2016) Nelson et al. (1976) และ Odu et al. (2012) แช่ถั่วเหลืองกะเทาะเปลือกที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว 1 กิโลกรัม ในน้ำอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ปริมาตร 10 ลิตร (อัตราส่วนเมล็ดถั่วเหลืองต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 10) เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง ลวกด้วยน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ลิวอกซิเนส ทำให้เย็นโดยจุ่มลงในน้ำผสมน้ำแข็ง และทำให้สะเด็ดน้ำ

นำถั่วเหลืองที่ได้จากการเตรียมทั้ง 2 วิธี ไปบดกับน้ำในอัตราส่วน 1 ต่อ 10 (ถั่วเหลือง 1 กิโลกรัมต่อน้ำ 10 ลิตร) (Alhendi, 2016) กรองแยกกากออกจากร้านมถั่วเหลือง คั้นให้เคี้ยว (อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส) และให้ความร้อนต่อ นาน 15 นาที พร้อมทั้งคนตลอดเวลา ทำให้เย็นจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ซึ่งการให้ความร้อนแบบพาสเจอร์ไรซ์ในขั้นตอนนี้ มีจุดประสงค์เพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค นอกจากนี้ยังช่วยยับยั้งการทำงานของทริปซิน อินฮิบิเตอร์ (trypsin inhibitor) ซึ่งเป็นสารยับยั้งการย่อยสลายและการดูดซึมของโปรตีน ลดกรดไฟติก (phytic acid) ซึ่งเป็นสารต้านโภชนา ที่ยับยั้งการดูดซึมแร่ธาตุ เช่น สังกะสี เหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียม (Lima et al., 2014; Pardeshi et al., 2014)

2.2 การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพ และประสาทสัมผัสของนํ้านมถั่วเหลืองที่ได้

ก) ตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

ตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ โดยวัดค่าสีของนํ้านมถั่วเหลือง ด้วยเครื่องวัดสี (Color Quest 45/0 Reston, Virginia) วัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ด้วยรีแฟรกโตมิเตอร์ (N-50E, N.O.W., Tokyo, Japan)

ข) การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางเคมี

ตรวจวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของนํ้านมถั่วเหลือง โดยวัดปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้า ตามวิธีวิเคราะห์ AOAC 991.20 989.05 และ 945.46 (AOAC, 2012) และหาปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids) โดยชั่งนํ้านมถั่วเหลือง 3 กรัม ใส่ลงในถ้วยอลูมิเนียมซึ่งผ่านการอบแห้งและชั่งน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำไประเหยที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น จนอุณหภูมิคงที่เท่ากับอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนัก คำนวหาปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณน้ำ และปริมาณคาร์โบไฮเดรต ดังสมการที่ 1-3 ตามลำดับ

$$\text{ปริมาณของแข็งทั้งหมด (\%)} = (\text{ปริมาณของแข็งที่เหลือ/น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{ปริมาณน้ำ (\% wb)} = 100 - \text{ปริมาณของแข็งทั้งหมด} \quad (2)$$

$$\text{ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (\% wb)} = 100 - \text{ปริมาณน้ำ} - \text{ปริมาณโปรตีน} - \text{ปริมาณไขมัน} - \text{ปริมาณเถ้า} \quad (3)$$

ค) การทดสอบทางประสาทสัมผัส

ทดสอบน้ำนมถั่วเหลืองที่ได้จากการเตรียมถั่วเหลืองทั้ง 2 วิธี ทางด้านประสาทสัมผัส โดยใช้ผู้ทดสอบชิมจำนวน 30 คน ที่ไม่ผ่านการฝึกฝน ซึ่งเป็นนักศึกษาสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โดยเสิร์ฟตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง ประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการยอมรับต่อผลิตภัณฑ์ (Acceptance test) โดยใช้ 9-point hedonic scale ในด้านกลิ่น สี รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดย 1 คะแนน หมายถึงไม่ชอบมากที่สุด และ 9 คะแนน หมายถึงชอบมากที่สุด

3. การศึกษาผลของอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า และปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของนมถั่วเหลืองผง

ทำแห้งน้ำนมถั่วเหลืองด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Mini Spray Dryer models B-191, BÜCHI, Switzerland) โดยแปรผันอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าเท่ากับ 150 160 และ 170 องศาเซลเซียส และแปรผันปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินเท่ากับ ร้อยละ 9 12 และ 15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (สภาวะที่แปรผันได้จากการทำการทดลองเบื้องต้น) หาสภาวะที่ดีที่สุดในการผลิตนมถั่วเหลืองผงแบบพ่นฝอย โดยพิจารณาจากสภาวะที่ทำให้นมถั่วเหลืองผงมีความคงตัวและดัชนีการละลายมากที่สุด และใช้พลังงานน้อยที่สุด

3.1 การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของนมถั่วเหลืองผงคั้นรูป

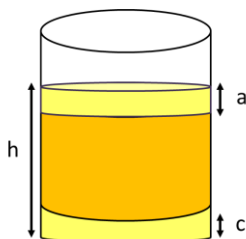
ตรวจวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของนมถั่วเหลืองผงคั้นรูป ได้แก่

ก) ค่าดัชนีการละลาย (solubility index)

วิธีการวัดค่าดัชนีการละลายน้ำ คัดแปลงมาจาก U.S. dairy export council (2005) โดยชั่งตัวอย่างนมถั่วเหลืองผง 10 กรัม เติมน้ำกลั่นอุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (GEA Niro Soavi SpA, Italy) ความเร็วรอบเท่ากับ 150 รอบต่อนาที ใช้เวลาทวน 90 วินาที ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที อ่านปริมาตรของตะกอนในหน่วยมิลลิลิตร โดยค่าดัชนีการละลาย คือ ปริมาตรของตะกอนที่อ่านได้

ข) ค่าความคงตัว (stability value)

ตรวจวิเคราะห์ค่าความคงตัว โดยคั้นรูปนมถั่วเหลืองผง และวัดค่าความคงตัว ซึ่งดัดแปลงจากวิธีของ Nelson (1976) ชั่งนมถั่วเหลืองผง 20 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นอุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ทำให้ตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกัน ด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (Niro Soavi SpA, Italy) โดยตั้งใบกวนให้มีความสูงประมาณ 1/3 ของความสูงของตัวอย่าง ทวนด้วยความเร็วรอบเท่ากับ 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที ตั้งตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง นาน 1 ชั่วโมง วัดความสูงของส่วนที่แยกชั้น (a+c) หาด้วยความสูงของตัวอย่างทั้งหมด (h) ดังรูปที่ 1 และหาค่าความคงตัวได้จากสมการที่ (4)



รูปที่ 1 การวิเคราะห์ค่าความคงตัวของนมถั่วเหลืองผงคั้นรูปในบีกเกอร์

$$\text{ค่าความคงตัว} = (a+c)/h * 100 \quad (4)$$

ค) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และค่าสีของนมถั่วเหลืองผงคั้นรูป

ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และค่าสีของนมถั่วเหลืองผงคั้นรูป วิธีการเตรียมนมถั่วเหลืองผงคั้นรูป โดยชั่งนมถั่วเหลืองผง 20 กรัม เติมน้ำกลั่นอุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร แล้วคณนนมถั่วเหลืองผงกับน้ำให้เป็นเนื้อเดียวกัน วัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้โดยใช้รีแฟรกโตมิเตอร์ (N-50E, N.O.W., Tokyo, Japan) และวัดค่าสีโดยใช้เครื่องวัดสี (Color Quest 45/0 Reston, Virginia)

ง) ปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าของนมถั่วเหลืองผงคั้นรูป วัดตามวิธีของ AOAC 991.20 989.05 และ 945.46 ตามลำดับ (AOAC, 2012)

4. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

4.1 การศึกษาผลของวิธีการเตรียมนมถั่วเหลืองต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของนมนมถั่วเหลือง วางแผนการทดลองแบบ Complete randomized design (CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS version 20 โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทรีทเมนต์โดยใช้วิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิหมักและปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของนมถั่วเหลืองที่อบแห้งแบบพ่นฝอย วางแผนการทดลองแบบ 3x3 แฟกทอเรียล ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS version 20 เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทรีทเมนต์ด้วย Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.3 การเปรียบเทียบและตรวจสอบสมบัติทางเคมีกายภาพของนมถั่วเหลืองผงคั้นรูปที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสมกับนมนมถั่วเหลืองทางการค้า ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ โปรตีน ไขมัน เถ้า และค่าสี ด้วยวิธี t-test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS version 20

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลของวิธีเตรียมน้ำนมถั่วเหลืองต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและประสาทสัมผัสของน้ำนมถั่วเหลือง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการเตรียมน้ำนมถั่วเหลือง 2 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1 ใช้น้ำและความร้อน ทำการทดลองโดยการนำถั่วเหลืองแช่น้ำ ทำให้สะเด็ดน้ำ ลวกด้วยน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ลิวอกซิจีเนส ที่เป็นสาเหตุของกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ในน้ำนมถั่วเหลือง โดยความร้อนทำให้เอนไซม์เสียสภาพ วิธีที่ 2 ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตและความร้อน ทำการทดลองโดยนำถั่วเหลืองแช่น้ำ ลวกด้วยน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ที่มีอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที เป็นการใช้ความร้อนและโซเดียมไบคาร์บอเนต เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ลิวอกซิจีเนส โดยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตมีฤทธิ์เป็นด่าง จึงไม่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ลิวอกซิจีเนส โดยส่งผลทำให้ประจุในบริเวณเร่งและบริเวณจับของเอนไซม์ลิวอกซิจีเนสเปลี่ยนไป จนไม่เหมาะสมที่จะทำปฏิกิริยากับซับสเตรต เอนไซม์ลิวอกซิจีเนสจะทำงานได้ดีที่สุดในสภาวะที่มีความเป็นกรด-ด่างเหมาะสม เท่ากับ 6-7 และอุณหภูมิเหมาะสมเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส (Alhendi, 2016; Lima et al., 2014; Pardeshi et al., 2014)

1.1 ผลของวิธีเตรียมน้ำนมถั่วเหลืองต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำนมถั่วเหลือง

จากตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำนมถั่วเหลืองหลังพาสเจอร์ไรซ์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที จากการเตรียมทั้ง 2 วิธี พบว่า ปริมาณความชื้น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และเถ้าที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Tang (2013) Ikya et al. (2013) และ Odu et al. (2012) โดย Tang (2013) ได้ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำนมถั่วเหลืองจากถั่วเหลือง 5 สายพันธุ์ ได้แก่ KB10-23#1681 KB10-5#1137 KB10-25#1235 KB09-5(2) #15 และ 534545 โดยแช่เมล็ดถั่วเหลืองในน้ำที่มีอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง ทำให้สะเด็ดน้ำ แล้วนำถั่วเหลืองที่ได้ไปบดกับน้ำในอัตราส่วน 1 ต่อ 9 ในเครื่องผลิตนมถั่วเหลือง กรองแยกกาก ต้มน้ำนมถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที พบว่าในน้ำนมถั่วเหลืองจากถั่วเหลือง 5 สายพันธุ์ มีปริมาณโปรตีนและไขมันเฉลี่ยอยู่ระหว่างร้อยละ 3.55-3.96 2.09-2.14 โดยน้ำหนักเปียก ตามลำดับ และมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดเฉลี่ยระหว่างร้อยละ 4.54-4.92 Ikya et al. (2013) หาค่าประกอบทางเคมีของน้ำนมถั่วเหลืองที่พาสเจอร์ไรซ์ โดยแช่ถั่วเหลืองในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น ร้อยละ 10 นาน 10 นาที และบดถั่วเหลืองกับน้ำ และพาสเจอร์ไรซ์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ได้แก่ 80 90 100 และ 110 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที พบว่าน้ำนมถั่วเหลืองที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์ มีปริมาณความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 89.19-93.29 โปรตีนเฉลี่ย ร้อยละ 2.66-3.50 คาร์โบไฮเดรตเฉลี่ย ร้อยละ 1.76-3.99 ไขมันเฉลี่ย ร้อยละ 1.81-2.36 และเถ้าเฉลี่ย ร้อยละ 0.22-0.58 และงานวิจัยของ Odu et al. (2012) หาค่าประกอบทางเคมีของน้ำนมถั่วเหลืองที่เตรียมโดยการแช่ถั่วเหลืองในน้ำ นาน 12 ชั่วโมง

ตารางที่ 1 สมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการเตรียมน้ำและความร้อนและโซเดียมไบคาร์บอเนตและความร้อน

สมบัติทางเคมีกายภาพ	วิธีการเตรียม	
	น้ำและความร้อน	โซเดียมไบคาร์บอเนตและความร้อน
ความชื้น (%) โดยน้ำหนักเปียก)	90.71±0.44 ^a	94.30±0.40 ^b
โปรตีน (%) โดยน้ำหนักเปียก)	3.83±0.09 ^b	2.61±0.19 ^a
คาร์โบไฮเดรต (%) โดยน้ำหนักเปียก)	3.41±0.22 ^b	0.81±0.14 ^a
ไขมัน (%) โดยน้ำหนักเปียก)	1.73±0.03 ^a	2.11±0.05 ^b
เถ้า ^{ns} (%) โดยน้ำหนักเปียก)	0.32±0.10	0.17±0.02
ของแข็งทั้งหมด (%)	9.29±0.44 ^b	4.70±0.40 ^a
ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (%)	8.33±0.58 ^b	3.00±0.87 ^a
ค่าสี		
L*	76.14±0.56 ^a	79.41±0.24 ^b
a*	-1.21±0.11 ^b	-2.69±0.11 ^a
b*	13.51±0.06 ^b	5.26±0.09 ^a
C*	13.56±0.06 ^b	5.91±0.04 ^a
h*	84.88±0.45 ^a	62.91±0.38 ^b

หมายเหตุ: a,b,c,... หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

^{ns} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≥0.05)

และลวกในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1.25 นาน 30 นาที บดถั่วเหลืองกับน้ำในอัตราส่วน 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก พาสเจอร์ไรซ์ที่อุณหภูมิ 71 องศาเซลเซียส นาน 15 วินาที น้ำมันถั่วเหลืองที่ได้มีปริมาณความชื้น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และ เถ้า ร้อยละ 93.29 2.69 1.99 1.81 และ 0.22 โดยน้ำหนักเปียก ตามลำดับ ดังนั้นปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันถั่วเหลืองหลังพาสเจอร์ไรซ์ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของถั่วเหลือง สภาพภูมิอากาศ และลักษณะภูมิประเทศที่เพาะปลูก วิธีการเตรียมถั่วเหลืองที่แตกต่างกัน อัตราส่วนของถั่วเหลืองที่บดกับน้ำ อุณหภูมิ และเวลาที่ฆ่าเชื้อน้ำมันถั่วเหลือง ตามประกาศมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเรื่องน้ำมันถั่วเหลือง ฉบับที่ 529 พ.ศ. 2558 กำหนดให้น้ำมันถั่วเหลืองมีปริมาณโปรตีน และไขมันไม่น้อยกว่าร้อยละ 2

และ 1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ (Thai Industrial Standards Institute, 2015) จากตารางที่ 1 พบว่าน้ำมันถั่วเหลืองที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีที่ 1 และ 2 มีปริมาณของโปรตีนเท่ากับ ร้อยละ 3.83 และ 2.61 โดยน้ำหนักเปียก ซึ่งมีค่าตามมาตรฐานกำหนด ส่วนปริมาณไขมันในน้ำมันถั่วเหลืองที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.73 และ 2.11 โดยน้ำหนักเปียก ตามลำดับ ซึ่งมีค่าตามเกณฑ์ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เรื่อง น้ำมันถั่วเหลือง ฉบับที่ 529 พ.ศ. 2558 กำหนด (Thai Industrial Standards Institute, 2015) และเมื่อพิจารณาปริมาณเถ้า พบว่า น้ำมันถั่วเหลืองที่เตรียมโดยวิธีที่ 1 และ 2 วิธีมีปริมาณเถ้าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 0.32 และ 0.17 โดยน้ำหนักเปียก ตามลำดับ โดยปริมาณโปรตีนในน้ำมันถั่วเหลืองที่ได้จากการเตรียมวิธีที่ 2 มีปริมาณโปรตีนน้อยกว่าการเตรียมวิธีที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) เนื่องจากการเตรียมวิธีที่ 2 ได้แช่ถั่วเหลือง ในน้ำที่มีอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง เพื่อทำให้เปลือกถั่วเหลืองนุ่ม และยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ลิพอกซิจีเนสด้วยความร้อนและด่าง โดยลวกถั่วเหลืองด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที และ แช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที ส่วน การเตรียมถั่วเหลืองวิธีที่ 1 ได้ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ลิพอกซิจีเนสด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียว โดยลวก ถั่วเหลืองด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที ดังนั้นโปรตีนในถั่วเหลืองที่เตรียมด้วยวิธีที่ 2 เกิดการเสียสภาพมากกว่าวิธีที่ 1 เพราะสัมผัสทั้งความร้อนและด่าง และทำให้สายโมเลกุลของโปรตีนที่ยาว กลายเป็นสายที่สั้นลง ส่งผลทำให้สูญเสียโปรตีนในขั้นตอนการลวกด้วยน้ำร้อน และแช่ในสารละลายโซเดียม ไบคาร์บอเนตมากกว่าวิธีที่ 1 (Lime et al., 2014)

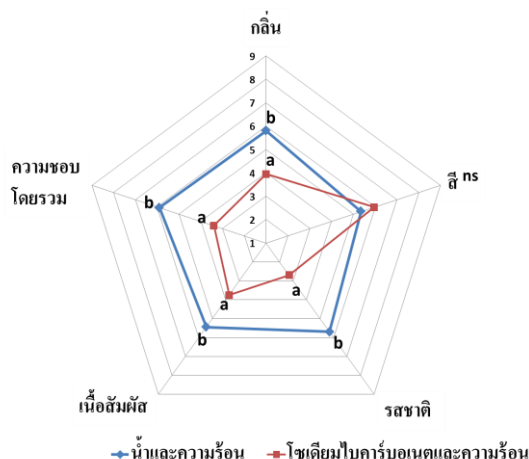
จากผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด และของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (ตารางที่ 1) พบว่าการ เตรียมน้ำมันถั่วเหลืองด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ เท่ากับ ร้อยละ 9.29 และ 8.33 ซึ่งมีความมากกว่าการเตรียมด้วยวิธีที่ 2 มีปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ เท่ากับ ร้อยละ 4.70 และ 3.00 เนื่องมาจากการเตรียมน้ำมันถั่วเหลืองด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตและความร้อน มีขั้นตอน การลวกถั่วเหลืองด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 นาที และแช่ต่อในสารละลาย โซเดียมไบคาร์บอเนตและความร้อน ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที ความ ร้อนและความเป็นด่างจะทำให้เส้นใยอาหาร และโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่ไม่ละลายน้ำ กลายเป็นมोनอแซ็กคาไรด์ ไคแซ็กคาไรด์ และพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำได้ ละลายออกมากับน้ำที่ลวกและแช่ ส่งผลให้เมื่ออบถั่วเหลืองกับ น้ำ ทำให้น้ำมันถั่วเหลืองที่ได้จากการเตรียมด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตและความร้อนมีปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้น้อยกว่าการเตรียมด้วยน้ำและความร้อน

จากตารางที่ 1 น้ำมันถั่วเหลืองที่เตรียมด้วยวิธีที่ 1 และ 2 มีค่า n_d^{20} เท่ากับ 84.88° และ 62.91° ตามลำดับ ซึ่งมีเนคตีไกล์แกนสีเหลือง ซึ่งสอดคล้องกับการสังเกตด้วยตาเปล่า ที่พบว่าน้ำมันถั่วเหลืองที่เตรียมทั้ง 2 วิธี มีสี ขาวอมเหลือง เนื่องจากในน้ำมันถั่วเหลืองมีไอโซฟลาโวนซึ่งเป็นสารฟลาโวนอยด์ที่มีสี ไอโซฟลาโวนที่พบในถั่ว เหลือง คือ เดซิ่น (daidzein) และจินีสทีน (genistein) (Bursac et al., 2017) น้ำมันถั่วเหลืองที่เตรียมด้วย

โซเดียมไบคาร์บอเนตและความร้อน (การเตรียมวิธีที่ 2) มีสีขาวอมเหลืองน้อยกว่า และสว่างกว่าการเตรียมถั่วเหลืองด้วยน้ำ (การเตรียมวิธีที่ 1) เนื่องจากโซเดียมไบคาร์บอเนตมีสมบัติในการฟอกสี ซึ่งสอดคล้องกับค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ของน้ำมันถั่วเหลืองที่เตรียมด้วยวิธีที่ 2 ที่มีค่าความสว่าง (L^*) มากกว่า แต่มีค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) น้อยกว่าการเตรียมด้วยวิธีที่ 1 ค่าสี L^* , a^* และ b^* ของน้ำมันถั่วเหลืองที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Tang (2013) ที่วัดค่าสีของน้ำมันถั่วเหลืองจากถั่วเหลือง 5 สายพันธุ์ ได้แก่ KB10-23#1681 KB10-5#1137 KB10-25#1235 KB09-5(2) #15 และ 534545 พบว่าน้ำมันถั่วเหลืองที่ได้มีค่า L^* อยู่ระหว่าง 86.90-96.76 a^* มีค่าอยู่ระหว่าง -3.34-3.23 และ b^* มีค่าอยู่ระหว่าง 17.58-18.18

1.2 ผลการวิเคราะห์ทางด้านประสาทสัมผัสของน้ำมันถั่วเหลือง

ทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสของน้ำมันถั่วเหลืองที่ได้จากการเตรียมทั้ง 2 วิธี ด้วย Acceptance test โดยใช้ 9-point Hedonic Scale จำนวนผู้ทดสอบ 30 คน ที่ไม่ผ่านการฝึกฝน แสดงดังรูปที่ 2 พบว่าค่าเฉลี่ยของคะแนนความชอบด้านสีของน้ำมันถั่วเหลืองที่เตรียมทั้ง 2 วิธี ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ส่วนคะแนนความชอบด้านกลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมเฉลี่ยของน้ำมันถั่วเหลืองที่เตรียมด้วยวิธีที่ 1 มีค่ามากกว่าการเตรียมด้วยวิธีที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) และจากการประเมินความชอบโดยรวมจะพบว่าคะแนนความชอบโดยรวมเฉลี่ยของการเตรียมด้วยวิธีที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 6.00 (ชอบเล็กน้อย) และ 3.40 (ไม่ชอบปานกลาง) ตามลำดับ แสดงว่าผู้บริโภคยอมรับน้ำมันถั่วเหลืองที่เตรียมด้วยน้ำและความร้อน (วิธีที่ 1) ในด้านกลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมมากกว่าการเตรียมถั่วเหลืองด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตและความร้อน (วิธีที่ 2) เนื่องจากน้ำมันถั่วเหลืองที่เตรียมด้วยวิธีที่ 2 มีรสขมฝืดเล็กน้อยของโซเดียมไบคาร์บอเนต

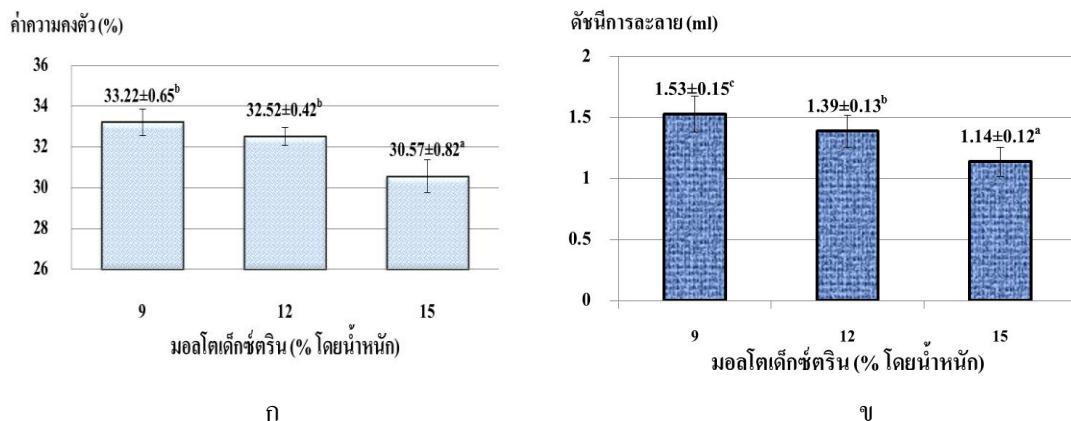


รูปที่ 2 ผลการทดสอบด้านประสาทสัมผัสของน้ำมันถั่วเหลืองที่ได้จากการเตรียมด้วยน้ำและความร้อนและโซเดียมไบคาร์บอเนตและความร้อน

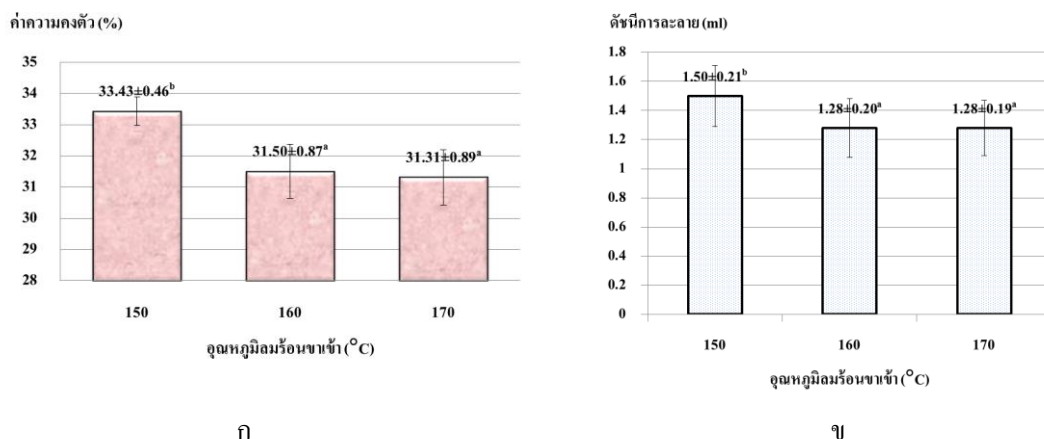
2. ผลการศึกษาผลของอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า และปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของนมถั่วเหลืองผงที่อบแห้งแบบพ่นฝอย

จากผลการทดลองพบว่านมถั่วเหลืองผงที่ทำแห้งแบบพ่นฝอยทุกสภาวะ มีปริมาณความชื้นเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 2.40-3.10 (โดยน้ำหนักเปียก) และพบว่าปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินและอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าที่แตกต่างกันจะไม่ส่งผลต่อปริมาณความชื้นของนมถั่วเหลืองผงอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ปริมาณความชื้นของนมถั่วเหลืองผงที่ได้จากงานวิจัยนี้น้อยกว่างานวิจัยของ Ishiwu et al. (2014) ซึ่งผลิตนํ้านมถั่วเหลืองด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยซึ่งมีการไหลแบบทางเดียวกัน (co-current flow) ที่อุณหภูมิขาเข้าเท่ากับ 204 และ 260 องศาเซลเซียส พบว่านมถั่วเหลืองผงมีปริมาณความชื้น เท่ากับร้อยละ 4.20 และ 3.12 (โดยน้ำหนักเปียก) ตามลำดับ ปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า อัตราการป้อน ปริมาณของสารที่ช่วยในการอบแห้ง สมบัติทางเคมีกายภาพ และองค์ประกอบของอาหาร (Ishiwu et al., 2014; Pardeshi et al., 2014)

ปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินและอุณหภูมิลมร้อนขาเข้ามีผลต่อดัชนีการละลาย และค่าความคงตัวของนํ้านมถั่วเหลืองคั้นรูปอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) ค่าดัชนีการละลายพิจารณาจากปริมาณตะกอนที่หลงเหลืออยู่ โดยถ้ามีปริมาณตะกอนที่เหลืออยู่น้อย แสดงว่าค่าดัชนีการละลายนํ้ามาก ส่วนค่าความคงตัวพิจารณาจากดัชนีการแยกชั้น โดยถ้าดัชนีการแยกชั้นน้อยแสดงว่ามีค่าความคงตัวมาก จากรูปที่ 3 พบว่าเมื่อปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินเพิ่มมากขึ้นทำให้ดัชนีการละลายและความคงตัวมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) โดยปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก มีค่าดัชนีการละลายและค่าความคงตัวมากที่สุด เท่ากับ 1.14 มิลลิลิตร และร้อยละ 30.57 ตามลำดับ รองลงมา คือ ปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินร้อยละ ร้อยละ 12 และ 9 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เนื่องมาจากมอลโตเด็กซ์ทรินมีสมบัติป้องกันการเกาะกันเป็นก้อนของผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นผงไม่ติดกัน ส่งผลให้เกิดการกระจายตัว และละลายในนํ้าได้ดี (Ishiwu et al., 2014) จากรูปที่ 4 พบว่านํ้านมถั่วเหลืองผงที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และ 170 องศาเซลเซียส มีค่าดัชนีการละลายและค่าความคงตัวไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) และมีค่าดัชนีการละลาย และค่าความคงตัวเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 1.28 มิลลิลิตร และร้อยละ 31.41 ตามลำดับ นํ้านมถั่วเหลืองผงที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส มีค่าดัชนีการละลาย และค่าความคงตัวเฉลี่ยต่ำที่สุด เนื่องมาจากอาหารผงที่ผ่านการอบแห้งแบบพ่นฝอยมีลักษณะเป็นทรงกลม และมีพื้นผิวเปียก (wet surface) อยู่โดยรอบ ถ้ามีพื้นผิวเปียกอยู่มาก จะทำให้อนุภาคผงแต่ละอนุภาคเกิดแรงดึงดูดกันเอง เป็นผลให้เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน (Ishiwu et al., 2014; Pardeshi et al., 2014) การใช้อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าเท่ากับ 160 และ 170 องศาเซลเซียส ซึ่งมีอุณหภูมิที่สูงกว่า จึงทำให้มีบริเวณพื้นผิวเปียกโดยรอบของนมถั่วเหลืองผงน้อยกว่าการใช้อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส ดังนั้นนมถั่วเหลืองผงที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และ 170 องศาเซลเซียสได้จึงเกิดการรวมตัวเป็นก้อนน้อยกว่า ซึ่งส่งผลให้เกิดการละลายนํ้าได้ดีกว่า ทำให้ค่าดัชนีการละลาย และค่าความคงตัวมีสูงกว่านมถั่วเหลืองผงที่ทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 150 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3 กราฟแท่งแสดงค่าความคงตัว (ก) และดัชนีการละลาย (ข) ของนมถั่วเหลืองที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าต่าง ๆ



รูปที่ 4 กราฟแท่งแสดงค่าความคงตัว (ก) และดัชนีการละลาย (ข) ของนมถั่วเหลืองที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิลมร้อนที่มีค่าต่าง ๆ

3. ผลการตรวจสอบสมบัติทางเคมีกายภาพของนมถั่วเหลืองทางการค้าและนมถั่วเหลืองคั้นรูป

สภาวะการทำแห้งนมถั่วเหลืองที่ทำให้ค่าดัชนีการละลายน้ำ และค่าความคงตัวของนมถั่วเหลืองคั้นรูปสูงที่สุด คือ การเติมมอลโตเด็กซ์ตรินร้อยละ 15 และทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าเท่ากับ 160 องศาเซลเซียส นมถั่วเหลืองที่ได้มีสีขาวอมเหลือง เมื่ออุณหภูมิลมร้อนขาเข้าเพิ่มขึ้นจาก 160 เป็น 170 องศาเซลเซียส ไม่ส่งผลต่อค่า L^* , a^* , b^* และ h^* ของนมถั่วเหลืองอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ค่า L^* , a^* , b^* , c^* และ h^* ของนมถั่วเหลืองที่ถูกทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 160 องศาเซลเซียส เท่ากับ 91.44 0.40 10.39

11.22 และ 87.99° ตามลำดับ ส่วนผลิตภัณฑ์นมถั่วเหลืองที่ทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 170 องศาเซลเซียส มีค่า L^* a^* b^* c^* และ h^* เท่ากับ 91.30 0.41 11.57 11.58 และ 87.93° ตามลำดับ

ผลจากการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันถั่วเหลืองและนมถั่วเหลืองผงคั้นรูป ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และปริมาณโปรตีน ไขมัน เกล็ด และค่าสี (L^* a^* b^* c^* และ h^*) ของน้ำมันถั่วเหลืองทางการค้า และนมถั่วเหลืองผงคั้นรูปที่มีมอลโตเด็คซ์ทรินร้อยละ 15 และทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 160 และ 170 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ปริมาณโปรตีน ไขมัน และเกล็ดของน้ำมันถั่วเหลืองคั้นรูปทั้ง 2 สถานะการทำแห้งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) สอดคล้องกับ Ishiwu et al. (2014) ทำแห้งน้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยศึกษาผลของอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าที่มีผลต่อสมบัติทางเคมีของน้ำมันถั่วเหลืองผงคั้น แปรผันอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าเท่ากับ 204 และ 260 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิลมร้อนไม่มีผลต่อปริมาณไขมัน เกล็ด และค่าความเป็นกรด-ด่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) จากตารางที่ 2 ปริมาณโปรตีนในน้ำมันถั่วเหลืองทางการค้ามีค่ามากกว่าในน้ำมันถั่วเหลืองผงคั้นรูปทั้งสองสถานะอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) เนื่องมาจากกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีการใช้ความร้อนที่สูง ทำให้โปรตีนเสียสภาพเมื่อนำถั่วเหลืองไปคั้นรูปจึงมีปริมาณโปรตีนลดลง และพบว่าปริมาณเกล็ดของนมถั่วเหลืองผงคั้นรูปมีค่าน้อยกว่าน้ำมันถั่วเหลืองทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) เนื่องจากก่อนการอบแห้งแบบพ่นฝอย มีการกรองน้ำมันถั่วเหลืองด้วยผ้าขาวบาง 3 ชั้น เพื่อป้องกันการอุดตันในหัวฉีด (atomizer) ของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย น้ำมันถั่วเหลืองผงคั้นรูปมีค่า L^* b^* และ c^* ต่ำกว่าน้ำมันถั่วเหลืองทางการค้า โดยค่า h^* ของน้ำมันถั่วเหลืองผงคั้นรูปที่ทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าเท่ากับ 160 170 องศาเซลเซียส และทางการค้ามีค่าเท่ากับ 120.90° 112.59° และ 95.37° ตามลำดับ น้ำมันถั่วเหลืองผงคั้นรูปมีกรดไขมันอิสระมากกว่าน้ำมันถั่วเหลืองผงทางการค้า ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ สถานะที่ดีที่สุดในการผลิตนมถั่วเหลืองผงแบบพ่นฝอยที่ทำให้มีปริมาณโปรตีน ค่าดัชนีการละลายน้ำ และค่าความคงตัวที่มีค่าสูงที่สุด และใช้พลังงานน้อยที่สุด คือ การใช้มอลโตเด็คซ์ทรินเท่ากับร้อยละ 15 และอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าเท่ากับ 160 องศาเซลเซียส นมถั่วเหลืองผงคั้นรูปที่ผลิตจากสถานะที่ดีที่สุดมีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเกล็ด เท่ากับร้อยละ 2.18 1.92 และ 0.12 โดยน้ำหนักเปียก ตามลำดับ และมีปริมาณของแข็งละลายน้ำได้เท่ากับร้อยละ 8.33 Pardeshi et al. (2014) ศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการทำแห้งน้ำมันถั่วเหลืองด้วยวิธีอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยแปรผันอัตราป้อนเท่ากับ 230-480 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และแปรผันอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าเท่ากับ 160-200 องศาเซลเซียส พบว่าสถานะที่ทำให้ผู้บริโภครับโดยรวมนมากที่สุด คือ นมถั่วเหลืองที่ผลิตได้จากสถานะการผลิตที่มีอัตราป้อนเท่ากับ 350-375 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า เท่ากับ 178-182 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันถั่วเหลืองและนมถั่วเหลืองผงคืนรูปที่มีมอลโตเด็กซ์ทรินร้อยละ 15 และถูกทำแห้งที่อุณหภูมิร้อนชาเข้า 160 และ 170 องศาเซลเซียส

องค์ประกอบทางเคมีและค่าสี	นมถั่วเหลือง ทางการค้า	นมถั่วเหลืองผงคืนรูป ที่อุณหภูมิร้อนชาเข้า	นมถั่วเหลืองผงคืนรูป ที่อุณหภูมิร้อนชาเข้า
		160 °C	170 °C
ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ^{ns} (%)	8.33±0.58	8.33±0.17	8.17±0.29
โปรตีน (%) โดยน้ำหนักเปียก)	2.88±0.11 ^b	2.18±0.06 ^a	2.09±0.16 ^a
ไขมัน ^{ns} (%) โดยน้ำหนักเปียก)	2.04±0.01	1.92±0.11	1.94±0.05
เถ้า (%) โดยน้ำหนักเปียก)	0.28±0.01 ^b	0.12±0.02 ^a	0.11±0.01 ^a
ค่าสี			
L *	79.93±0.03 ^b	68.65±0.72 ^a	68.01±0.51 ^a
a *	-1.21±0.00 ^b	-3.03±0.07 ^a	-2.88±0.45 ^a
b *	12.91±0.33 ^b	5.12±0.72 ^a	4.87±0.65 ^a
c *	12.97±0.33 ^b	5.96±0.59 ^a	5.77±0.46 ^a
h *	95.37±0.11 ^a	120.90±0.06 ^b	112.59±0.78 ^b

หมายเหตุ: a,b,c,... หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

^{ns} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≥0.05)

สรุปผลการทดลอง

การเตรียมถั่วเหลืองด้วยน้ำและความร้อน ทำให้น้ำมันถั่วเหลืองมีปริมาณโปรตีน คาร์โบไฮเดรต ปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งที่ละลายน้ำ และคะแนนการยอมรับจากผู้บริโภคในด้านกลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมมากกว่าการเตรียมถั่วเหลืองด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตและความร้อน โดยทำให้น้ำมันถั่วเหลืองที่ได้ปริมาณความชื้น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และเถ้า เท่ากับ ร้อยละ 90.71 3.83 3.41 1.73 0.32 (โดยน้ำหนักเปียก) ตามลำดับ โดยน้ำมันถั่วเหลืองที่ได้จากการเตรียมถั่วเหลืองด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตและความร้อนมีสีขาวอมเหลืองน้อยกว่า และสว่างกว่าการเตรียมถั่วเหลืองด้วยน้ำและความร้อน สภาพะที่ที่ดีที่สุดในการผลิตนมถั่วเหลืองผงด้วยวิธีอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ทำให้นมถั่วเหลืองผงคืนรูปมีปริมาณโปรตีนมากที่สุด (ร้อยละ 1.18 โดยน้ำหนักเปียก) ดัชนีการละลาย และค่าความคงตัวสูงที่สุด (1 มิลลิลิตร และร้อยละ 31) และใช้พลังงานน้อยที่สุด คือ การใช้มอลโตเด็กซ์ทรินเท่ากับร้อยละ 15 อุณหภูมิร้อนชาเข้าเท่ากับ 160 องศาเซลเซียส

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ ประจำปี 2560 เลขที่สัญญารับทุน 6044103 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณแหล่งทุนวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Alhendi, A. S. (2016). *Inactivation of lipoxygenase in soymilk and soybean by pulsed light* [Doctoral's thesis, Florida University]. UPDC. <https://ufdc.ufl.edu/UFE0050266/00001>
- AOAC. (2012). *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL* (19th ed.). Gaithersburg, Maryland: AOAC International.
- Bursac, M., Krstonosic, M. A., Miladinovic, J., Malencic, D., Gvozdencovic, L., & Cvejic, J. H. (2017). Isoflavone composition, total phenolic content and antioxidant capacity of soybeans with colored seed coat. *Natural Product Communications*, 12(4), 527-532.
- Chegini, G. R., & Ghobadian, B. (2007). Spray dryer parameters for fruit juice drying. *World Journal of Agricultural Sciences*, 3(2), 230-236.
- Furia, T. E. (1980). *Handbook of food additives* (2nd ed.). Cleveland: CRC Press.
- Ikya, J. K., Gernah, D. I., Ojobo, H. E., & Oni, O. K. (2013). Effect of cooking temperature on some quality characteristics of soy milk. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 5(5), 543-546. <https://doi.org/10.19026/ajfst.5.3123>
- Ishiwu, C. N., Obiegbuna, J. E., & Iwouno, J. O. (2014). Effect of inlet-air temperature on physico-chemical and sensory properties of spray-dried soy milk. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrient and Development*, 14(6), 9439-9453.
- Lima, F. S., Kurozawa, L. E., & Ida, E. I. (2014). The effects of soybean soaking on grain properties and isoflavones loss. *LWT-Food Science and Technology*, 59, 1274-1282. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.04.032>
- Ma, L., Han, F., Yan, S., Wang, L., & Sun, J. (2015). Evaluation of the chemical quality traits of soybean Seeds, as related to sensory attributes of soymilk. *Food Chemistry*, 173, 694-701. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.096>
- Nelson, A. I., Steinberg, M. I., & Wei, L. S. (1976). Illinois process for preparation of soymilk. *Journal of Food Science*, 41(1), 57-61. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1976.tb01100.x>

- Nguyen, D. Q., Nguyen, T. H., Mounir, S., & Allaf, K. (2017). Effect of feed concentration and inlet air temperature on the properties of soymilk powder obtained by spray drying. *Drying Technology*, 36(3), 10-14. [https://doi.org/ 10.1080/07373937.2017.1357040](https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1357040)
- Odu, N. N., Egbo, N. N., & Okonko, I. O. (2012). Assessment of the effect of different preservatives on the shelf-life of soymilk stored at different temperatures. *Researcher*, 4(6), 62-69.
- Pardeshi, I. L., Murumkar, R. P., & Tayade, P. T. (2014). Optimization of process for spray drying of soy milk and sprouted soybean milk. *Journal of Grain Processing and Storage*, 1(1), 13-20.
- Tang, J. (2013). *Physicochemical and sensory properties of soymilk from five soybean lines* [Master's Thesis, University of Missouri-Columbia]. <https://doi.org/10.32469/10355/43027>
- Thai Industrial Standards Institute. (2015). *Thai community products standard: soy bean milk (TCPS. 529/2015)*. Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry. (in Thai)
- Tran, T. T. A., & Nguyen, H. V. H. (2018). Effects of spray-drying temperatures and carriers on physical and antioxidant properties of lemongrass leaf extract powder. *Beverage*, 4(4), 84. <https://doi.org/10.3390/beverages4040084>
- U. S. dairy export council. (2005). *Reference manual for U.S. milk powders*. Arlington, Virginia: U.S. Dairy Export Council.
- Ly, Y. C., Song, H. L., Li, X., Wu, L., & Guo, S. T. (2011). Influence of blanching and grinding process with hot water on beany and non-beany flavor in soymilk. *Journal of Food Science*, 76(1), S20-S25. [https://doi: 10.1111/j.1750-3841.2010.01947.x](https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01947.x)
- Zanhi, N. K., & Jideani, I. A. (2012). Physico-chemical and sensory qualities of soy and milk solids fortified low fat yoghurt. *African Journal of Agricultural Research*, 7(38), 5336-5343. <https://doi.org/10.5897/AJAR11.449>

Academic Article

การพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนของจังหวัดบุรีรัมย์ด้วยวิธีฟังก์ชันการถ่ายโอน

Monthly rainfall amount forecasting of Buriram province by transfer function method.

เจนจิรา มงคลเมือง^{1*}, ศศิธร พิศพล¹ และ เฉลิมวุฒิ คำเมือง¹

Jenjira Mongkolmuang^{1*}, Sasithon Pitsapol¹ and Chalermwut Comemuang¹

¹ภาควิชาสาขาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ 31000 ประเทศไทย

¹ Department of Mathematics, Faculty of Science, Buriram Rajabhat University, Mueang District, Buri Ram Province 31000, Thailand

*E-mail: 600112210030@bru.ac.th

Received: 10/08/2020; Revised: 11/11/2020; Accepted: 06/12/2020

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้แบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝน และเผยแพร่ข้อมูลไปใช้ในการสร้างกลยุทธ์การวางแผนที่เหมาะสมในด้านเกษตรกรรมระบบการระบายน้ำและการใช้ทรัพยากรน้ำอื่น ๆ ในจังหวัดบุรีรัมย์ โดยพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนของจังหวัดบุรีรัมย์ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 จำนวน 120 ค่า ผู้วิจัยได้แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 จำนวน 108 ค่า ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 สำหรับการศึกษาตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีการแยกส่วนประกอบแบบการคูณ วิธีปรับให้เรียบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย และวิธีฟังก์ชันการถ่ายโอน ข้อมูลชุดที่ 2 จำนวน 12 ค่า ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 นำมาใช้สำหรับการเปรียบเทียบความแม่นยำ ผลการวิจัยพบว่าจากวิธีการพยากรณ์ทั้งหมดที่ได้ศึกษา วิธีพยากรณ์ฟังก์ชันการถ่ายโอนโดยค่าพยากรณ์ด้วยเกณฑ์เปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยมีค่าน้อยที่สุด

คำสำคัญ: อนุกรมเวลา, ARIMA, อุณหภูมิอากาศ, ความเร็วลม

Abstract

The purpose of this research was to obtain the rainfall forecasting model and disseminate information for be used in establish strategies for the proper planning of agriculture, drainage systems and other water resource applications in Buriram province, by forecasting the monthly rainfall in Buriram province. January 2010 to December 2019 of 120 value were used and divided into 2 sets. The first 108 values from January 2010 until December 2018 were used for the modeling by Decomposition Method, Simple Exponential Smoothing Method, and Transfer Function Method. The last 12 values from January to December 2019 were used for checking the accuracy. The research results find that the for all the forecasting methods the had been studied, Transfer Function Method is the forecasting by percentage basis, Mean Absolute Percentage Error (MAPE) is the smallest value.

Keywords: time series, ARIMA, air temperature, wind speed

บทนำ

ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกรายใหญ่ของโลกในด้านการผลิตและส่งออกสินค้าทางการเกษตรไปยังตลาดข้าว ซึ่งได้ก่อให้เกิดการเข้าถึงเกษตรกรรมอันเป็นเอกลักษณ์ของประเทศไทยสมัยใหม่ นำไปสู่การเข้าถึงเกษตรกรรมแบบยั่งยืนอย่างชัดเจน ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีเนื้อที่มากที่สุดของประเทศไทย ประมาณ 168,854 ตารางกิโลเมตร หรือมีเนื้อที่ร้อยละ 33.17 (Chaiyotha, 2015) เทียบได้หนึ่งในสามของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศไทยถึงหนึ่งในสามของประเทศ ที่ตั้งอยู่บนแอ่งโคราชและแอ่งสกลนคร มีแม่น้ำโขงกั้นประเทศลาวทางทิศเหนือ ประชาชนส่วนใหญ่ประกอบอาชีพด้านเกษตรกรรมเป็นหลัก มีลักษณะทำการเกษตรแบบยังชีพเป็นส่วนใหญ่ คือทำการเกษตรเพื่อที่จะนำผลผลิตมาบริโภคในครัวเรือนของตน การเกษตรส่วนใหญ่จะเน้นที่ การทำนาเป็นส่วนใหญ่ จังหวัดบุรีรัมย์เป็นจังหวัดหนึ่งของภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีสภาพพื้นที่โดยทั่วไปเป็นที่ราบสูง ตั้งอยู่ทางตอนล่างของประเทศไทย มีเทือกเขาเพชรบูรณ์และเทือกเขาดงพญาเย็นอยู่ทางทิศตะวันตก ส่วนเทือกเขาสนกำแพงและเทือกเขาพนมดงรักอยู่ทางทิศใต้เป็นแนวกั้นไม่ให้มรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดปกคลุมบริเวณจังหวัดบุรีรัมย์ได้เต็มที่ นอกจากนี้พื้นที่ดงในจังหวัดบุรีรัมย์ส่วนใหญ่เป็นผืนเนื่องจากอิทธิพลของพายุหมุนเขตร้อนที่เคลื่อนตัวจากทะเลจีนใต้ ทำให้มีปริมาณน้ำฝนตลอดทั้งปีอยู่ที่ 1,193.9 มิลลิเมตร(Faculty of Geography and Geospatial Education, 2018) และบุรีรัมย์เป็นอีกหนึ่งจังหวัดที่เกิดประสบปัญหาภัยแล้งขึ้นวิกฤต เกิดภาวะฝนทิ้งช่วงหรือภาวะฝนแล้งฝนไม่ตกต้องตามฤดูกาล ทำให้ปริมาณน้ำฝนที่ตกไม่สม่ำเสมอ จึงส่งผลต่อปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ เริ่มแห้งขอด น้ำไม่เพียงพอต่อการเกษตร และความต้องการน้ำของประชาชน ดังนั้นการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนของจังหวัดบุรีรัมย์จึงเป็นสิ่งที่ให้ความสนใจศึกษา

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ วราฤทธิ์ พานิชกิจโกศลกุล (2547) ได้ศึกษาการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนของจังหวัดนครราชสีมา พบว่าวิธีบอซ-เจนกินส์จะมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีวินเตอร์และวิธีแยกส่วนประกอบ เนื่องจากวิธีบอซ-เจนกินส์มีค่า $MAPE = 31.323$ ซึ่งน้อยกว่าวิธีวินเตอร์และวิธีแยกส่วนประกอบ จึงได้รูปแบบที่ได้จากวิธีบอซ-เจนกินส์ คือ รูปแบบ $ARIMA(p,d,q)(P,D,Q)_s$ ที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาเวลา คือ $ARIMA(1,0,0)(1,0,1)_{12}$ งานวิจัยของวรารचना กิระวิบูลย์ (2558) ได้ศึกษาการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝน อำเภอเมือง จังหวัดน่าน พบว่าสำหรับการศึกษาตัวแบบพยากรณ์ด้วยวิธีการทางสถิติ 3 วิธี ได้แก่ วิธีบอซ-เจนกินส์ วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายและวิธีพยากรณ์รวม ได้ผลวิจัยว่าวิธีการพยากรณ์รวมมีความแม่นยำในการพยากรณ์มากที่สุด เนื่องจากให้ค่าพยากรณ์ที่มีความแตกต่างจากข้อมูลจริงน้อยที่สุด จึงเป็นตัวแบบที่เหมาะสมสำหรับพยากรณ์ปริมาณน้ำฝน และงานวิจัยของ Asep Rusyana, Nany Salwa, Ainur Marziah (2019) ได้ทำวิจัยการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนโดยใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอนในจังหวัดจาเฮอร์, อินโดนีเซีย พบว่าวิธีฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบอนุกรมเวลาเพื่อพยากรณ์ค่าในอนาคต โดยใช้ข้อมูลอนุกรมเวลานำออกและอนุกรมเวลานำเข้า ที่มีรูปแบบ $ARMA(3,2)$ ซึ่งเป็นรูปแบบที่เหมาะสมไปใช้ในการพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำฝนของรูปแบบอนุกรมเวลาชุดนี้

ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวแบบการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนของจังหวัดบุรีรัมย์ในปีพ.ศ. 2562 โดยเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ 3 วิธี คือ วิธีแยกส่วนประกอบ (decomposition method) วิธีพยากรณ์ปรับให้เรียบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย (simple exponential smoothing) และวิธีพยากรณ์โดยรูปแบบฟังก์ชันการถ่ายโอน (transfer function) โดยใช้โปรแกรมทางสถิติในการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบตัวแบบการพยากรณ์วิธีต่าง ๆ เพื่อหาตัวแบบการพยากรณ์ที่เหมาะสม โดยใช้เกณฑ์พิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error) ที่มีค่าต่ำสุด สำหรับใช้เป็นข้อมูลประกอบการปรับปรุงและพัฒนาการบริหารงานต่าง ๆ ต่อไป และเพื่อให้การพยากรณ์มีความถูกต้องและสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงในการวางแผนตัดสินใจและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้กำหนดนโยบายส่งเสริมทางการเกษตรให้เหมาะสมกับปริมาณน้ำฝน

วิธีการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝน

การพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนของจังหวัดบุรีรัมย์ มีวิธีดำเนินการดังต่อไปนี้

1. การจัดเตรียมข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการพยากรณ์เป็นข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายเดือนของจังหวัดบุรีรัมย์ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 ถึง พ.ศ. 2562 ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจาก สถานีกรมอุตุนิยมวิทยา อ.สตึก จ.บุรีรัมย์ ผู้วิจัยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 จำนวน 108 ค่า สำหรับการศึกษาตัวแบบพยากรณ์ และข้อมูลชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือนมกราคมจนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 จำนวน 12 ค่า นำมาใช้สำหรับการตรวจสอบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ด้วยเกณฑ์เปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE)

2. การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยครั้งนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ในการคำนวณค่าพยากรณ์โดยวิธีการแยกส่วนประกอบแบบการคูณ วิธีปรับให้เรียบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย และวิธีฟังก์ชันการถ่วงน้ำหนัก มีวิธีดำเนินการวิเคราะห์ ดังนี้

2.1 การพยากรณ์โดยวิธีแยกส่วนประกอบ

วิธีแยกส่วนประกอบเป็นวิธีการวิเคราะห์อนุกรมเวลาที่เน้นการแยกแต่ละส่วนประกอบต่าง ๆ ของอนุกรมเวลาออกจากกัน คือ แนวโน้ม ฤดูกาล วัฏจักร และเหตุการณ์ผิดปกติ จากแต่ละส่วนประกอบที่แยกออกมาได้จะทำให้เห็นลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาแต่ละส่วน ซึ่งตัวแบบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้อยู่ในรูปตัวแบบเชิงคูณ (Panichkitkosoalkun, 2004) คือ

$$Y_t(\tau) = (\mu_t + \beta_t t) S_t C_t \varepsilon_t \quad (1)$$

โดยที่

พารามิเตอร์ μ_t, β_t, S_t และ C_t แทนระดับของข้อมูล ความชัน ส่วนประกอบฤดูกาล และวัฏจักร ตามลำดับ
ตัวแปรสุ่ม $\varepsilon_t, t = 1, 2, 3, \dots, T$ แทนความคลาดเคลื่อนที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ไม่มีสหสัมพันธ์ และความแปรปรวนคงที่
ค่าพยากรณ์ τ หน่วยเวลาล่วงหน้า ที่พยากรณ์ ณ เวลา t คือ

$$Y_t(\tau) = (\hat{\mu}_t + \tau \hat{\beta}_t) \hat{S}_t \hat{C}_t \quad (2)$$

2.2 การพยากรณ์โดยวิธีปรับให้เรียบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย (Simple Exponential Smoothing)

เป็นวิธีการสร้างสมการพยากรณ์โดยการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก โดยให้น้ำหนักหรือความสำคัญของข้อมูลคือ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 วิธีการนี้จะใช้เมื่อข้อมูลมีลักษณะการเคลื่อนไหวในระดับคงที่ หรือข้อมูลไม่มีแนวโน้ม (Trend) และไม่มีอิทธิพลของฤดูกาล (Seasonality) ซึ่งจะแสดงลักษณะของข้อมูลสมการพยากรณ์หนึ่งช่วงเวลาล่วงหน้าที่เวลา t (Taesombat, 2006) ดังนี้

$$F_{t+1} = \alpha X_t + (1 - \alpha) F_t \quad (3)$$

โดยที่

X_t = ข้อมูลจริง ณ เวลา t ; $t = 1, 2, \dots, N$

α = น้ำหนักหรือความสำคัญที่ให้แก่ข้อมูล ณ เวลา t

F_{t+1} = ค่าปริมาณหรือค่าพยากรณ์ของข้อมูล ณ เวลา $t+1$

2.3 การพยากรณ์โดยวิธีรูปแบบฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer function)

ฟังก์ชันการถ่ายโอนเป็นรูปแบบอนุกรมเวลาเพื่อพยากรณ์ค่าในอนาคตที่รวมวิธีการอนุกรมเวลาเข้ากับวิธีการเชิงสาเหตุ อนุกรมเวลา $\{x_t\}$ มีผลต่ออนุกรมเวลา $\{y_t\}$ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยบางอย่างที่แทนด้วยอนุกรมเวลา $\{x_t\}$ ซึ่งแบบจำลองที่ได้เรียกว่า ฟังก์ชันการถ่ายโอน ที่เชื่อมโยงอนุกรมนำออก $\{y_t\}$ กับอนุกรมนำเข้า $\{x_t\}$ และ n_t เป็นความคลาดเคลื่อนในรูปแบบที่เวลา t ในหนังสือทางวิชาการหลายเล่มเรียกรูปแบบการถ่ายโอน ว่ารูปแบบ MARIMA (multivariate ARIMA) เพราะเกิดจากการรวมรูปแบบการถดถอยพหุและรูปแบบ ARIMA ด้วยกัน (Rusyana, Salwa, & Marziah, 2019)

รูปแบบฟังก์ชันการถ่ายโอนแรกเป็น ดังนี้

$$Y_t = v(B)X_t + N_t \quad (4)$$

โดยที่

Y_t แทนอนุกรมนำออก (ปริมาณน้ำฝน)

X_t แทนอนุกรมนำเข้า (อุณหภูมิของอากาศและความเร็วลม)

N_t แทนความคลาดเคลื่อนรวมกันของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ Y_t ทั้งหมด

$$v(B) = (v_0 + v_1B + v_2B^2 + \dots + v_kB^k)$$

รูปแบบฟังก์ชันการถ่ายโอนสุดท้าย หรือสมการการพยากรณ์รูปแบบ Transfer Function เป็นดังนี้

$$y_t = \frac{\omega_s(B)}{\delta_r(B)} x_{t-b} + \frac{\theta_q(B)}{\phi_p(B)} a_t \quad (5)$$

โดยที่

$\omega_s(B) = \omega_0 - \omega_1B - \omega_2B^2 - \dots - \omega_sB^s$ โดย $\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_s$ เป็นพารามิเตอร์ในรูปแบบที่เรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์ฟังก์ชันการถ่ายโอน

$\delta_r(B) = \delta_0 - \delta_1 B - \delta_2 B^2 - \dots - \delta_r B^r$ โดย $\delta_0, \delta_1, \dots, \delta_r$ เป็นพารามิเตอร์ในรูปแบบที่เรียกว่า

ค่าสัมประสิทธิ์ฟังก์ชันการถอยหลัง

$\theta_q(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$ แทนค่าพารามิเตอร์เฉลี่ยเคลื่อนที่อันดับ q

$\phi_p(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$ แทนค่าพารามิเตอร์การถอยหลังอันดับ p

B แทนตัวดำเนินการถอยหลัง (Backward Operator) โดย $BX_t = X_{t-1}$

y_t แทนค่า Y_t (ปริมาณน้ำฝน) ที่เป็นสแตชันนารี

x_t แทนค่า X_t (อุณหภูมิอากาศและความเร็วลม) ที่เป็นสแตชันนารี

a_t แทนค่าความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม

r, s, p, q และ b เป็นค่าคงที่

3. การตรวจสอบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์

การวิจัยครั้งนี้ได้ตรวจสอบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์จากวิธีการพยากรณ์ 3 วิธี คือ วิธีฟังก์ชันการถอยหลัง วิธีการปรับให้เรียบแบบเอกซ์โปเนนเชียลอย่างง่าย และวิธีการแยกส่วนประกอบแบบการคูณ โดยทำการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝน จังหวัดบุรีรัมย์ ของข้อมูลชุดที่ 2 คือ ข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 จำนวน 12 ค่า ซึ่งใช้วิธีตรวจสอบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ (Maenmin, 2006) คือ

- 1) เกณฑ์เปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE)

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{e_t}{Y_t} \right| \times 100}{n} \quad (6)$$

โดยกำหนดให้

$e_t = Y_t - \hat{Y}_t$ แทนค่าความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ ณ เวลา t

n แทนจำนวนเทอมทั้งหมดของ e_t

Y_t แทนข้อมูล ณ เวลา t

$\hat{Y}_t$ แทนค่าพยากรณ์ ณ เวลา t

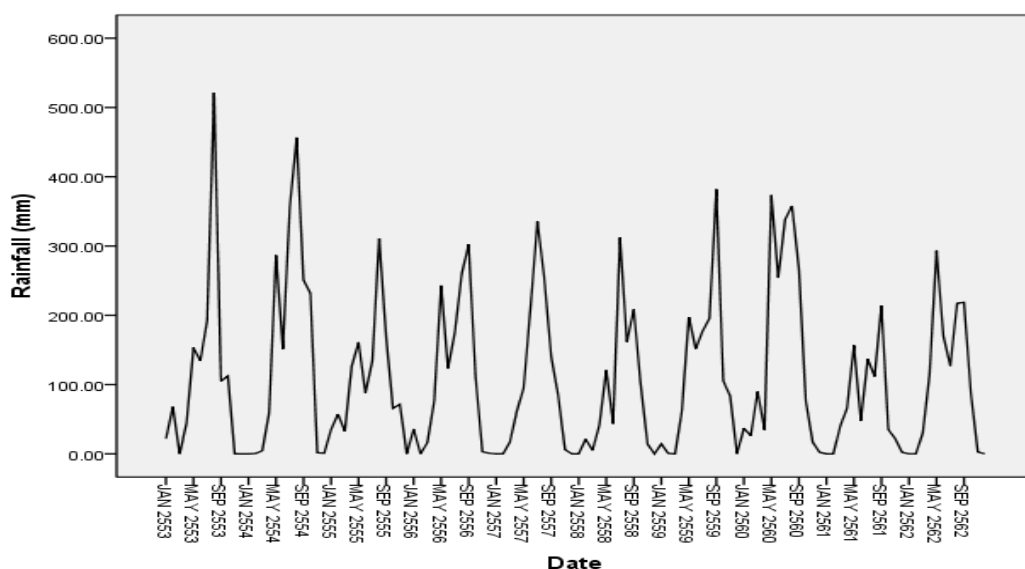
4. การเลือกตัวแบบพยากรณ์

จากการศึกษาตัวแบบพยากรณ์ทั้ง 3 แบบ โดยใช้ข้อมูลชุดที่ 1 แล้วนำข้อมูลชุดที่ 2 นำมาใช้ตรวจสอบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ด้วย MAPE ที่มีค่าต่ำที่สุดจะถือว่าเป็นตัวแบบการพยากรณ์ที่แม่นยำสุดแล้วจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนในจังหวัดบุรีรัมย์

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

จากการพิจารณาลักษณะข้อมูลชุดที่ 1 คือปริมาณน้ำฝนของจังหวัดบุรีรัมย์ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 จะพบว่าอนุกรมเวลาชุดนี้มีลักษณะข้อมูลที่มีแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาลที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามเวลาที่เปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กราฟอนุกรมเวลาปริมาณน้ำฝนรายเดือน จังหวัดบุรีรัมย์ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

2. ผลการพยากรณ์โดยวิธีแยกส่วนประกอบ

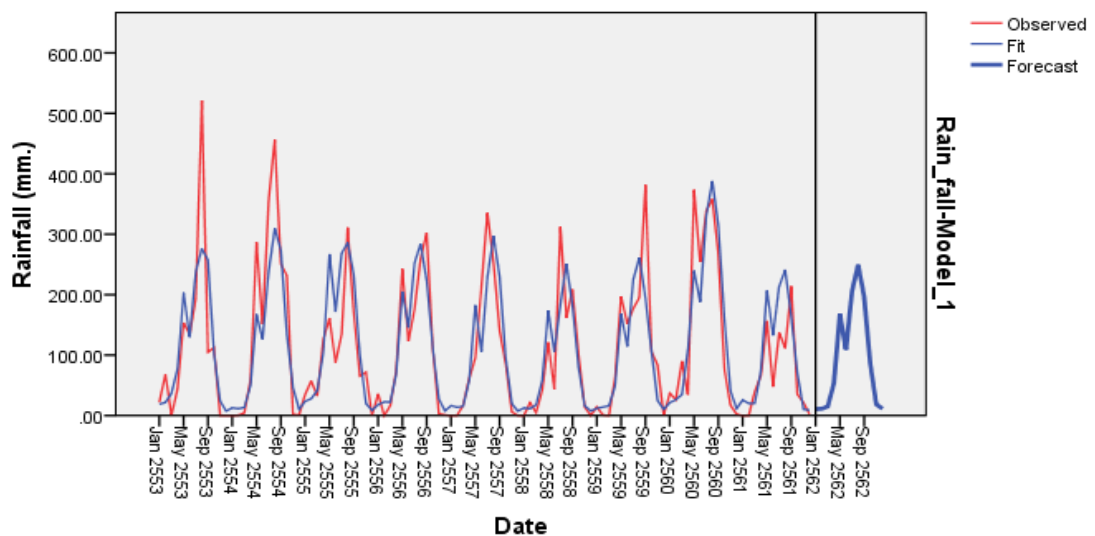
เมื่อทำการพยากรณ์ด้วยวิธีแยกส่วนประกอบในรูปแบบเชิงคูณ มีค่าพยากรณ์ คือ

$$Y_t(\tau) = (\hat{\mu}_t + \tau\hat{\beta}_t)\hat{S}_t\hat{C}_t$$

ซึ่งผลการพยากรณ์แสดงดังตารางที่ 1

3. ผลการพยากรณ์โดยวิธีปรับให้เรียบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย

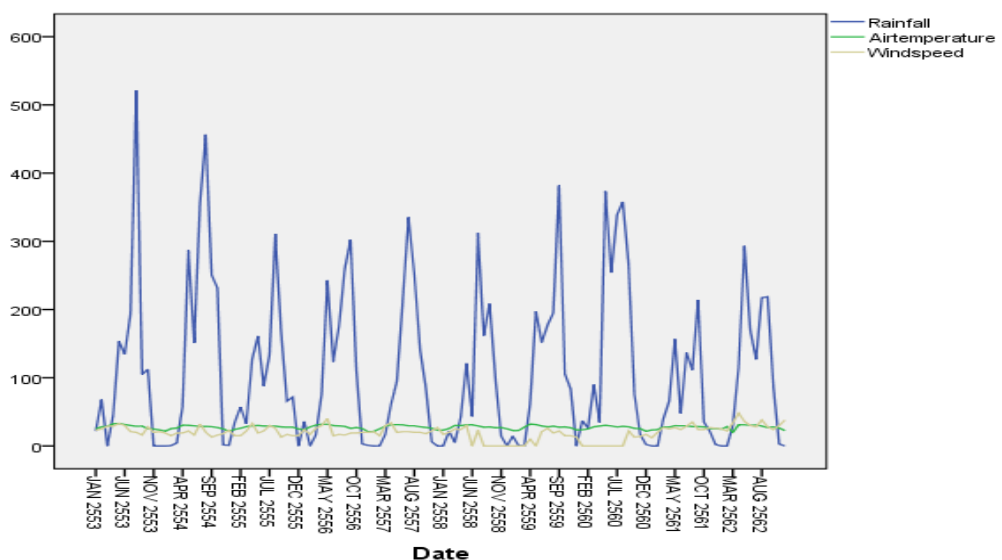
จากสมการ (3) ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ คำนวณค่าพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนในจังหวัดบุรีรัมย์ล่วงหน้า 12 เดือน ได้ผลดังรูปที่ 2 และแสดงค่าพยากรณ์ได้ดังตารางที่ 1 โดย $\alpha = 0.5$



รูปที่ 2 เปรียบเทียบปริมาณน้ำฝนจริงกับค่าพยากรณ์โดยวิธีปรับให้เรียบเอกซ์โพเนนเชียลแบบง่าย

4. ผลการพยากรณ์โดยวิธีฟังก์ชันการถ่วงโอน

จากการวิเคราะห์ฟังก์ชันการถ่วงโอน จะเห็นว่าข้อมูลอนุกรมนำออก (ปริมาณน้ำฝน) และข้อมูลอนุกรมนำเข้า (อุณหภูมิอากาศและความเร็วลม) จากความสัมพันธ์ข้อมูลความเร็วลมจะไม่มีผลกระทบต่อปริมาณน้ำ แต่อุณหภูมิอากาศจะมีผลกระทบต่อปริมาณน้ำฝนเพียงเล็กน้อย จะแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนรายเดือน อุณหภูมิอากาศและความเร็วลม

ดังนั้น เราจะดำเนินการดำเนินการทดสอบข้อมูลให้เป็นสแตชันนารีโดยพิจารณาจากกราฟ ACF และ PACF จากนั้นทำการแปลงอนุกรมเวลาโดยการหาผลต่าง ($d=1$) พบว่าการหาผลต่างอันดับที่ 1 ทำให้อนุกรมเวลามีความแปรผันอย่างคงที่

จากการระบุ (r, s, b) ในรูปแบบฟังก์ชันการถ่ายโอน จะได้ค่า (r, s, b) ของอนุกรมเวลาอากาศคือ (1,0,2) และ (r, s, b) ของความเร็วลมคือ (1,0,4) ดังนั้นรูปแบบฟังก์ชันการถ่ายโอนนำเข้าคู่ที่จะได้รับดังต่อไปนี้

$$\hat{y}_t = \frac{\hat{\omega}_0}{(1-\hat{\delta}_1 B)} x_{1,t-2} + \frac{\hat{\omega}_0}{(1-\hat{\delta}_1 B)} x_{2,t-4} + noise$$

จะเห็นว่า รูปแบบที่เหมาะสมของแบบจำลองความคลาดเคลื่อนรวม ที่ขึ้นอยู่กับกราฟ ACF และ PACF ที่มีความต่อเนื่อง สามารถกำหนดได้ว่ารูปแบบความคลาดเคลื่อนรวมที่เลือก คือ รูปแบบ ARMA (2,1) ดังนั้น ฟังก์ชันการถ่ายโอนนำเข้าคู่ได้ดังต่อไปนี้

$$\hat{y}_t = \frac{\hat{\omega}_0}{(1-\hat{\delta}_1 B)} x_{1,t-2} + \frac{\hat{\omega}_0}{(1-\hat{\delta}_1 B)} x_{2,t-4} + \frac{(1-\hat{\theta}_1 B)}{(1-\hat{\phi}_1 B - \hat{\phi}_2 B^2)} a_t$$

จากการประมาณค่ารูปแบบฟังก์ชันการถ่ายโอนนำเข้า จะได้สมการรูปแบบฟังก์ชันการถ่ายโอนนำเข้า ดังต่อไปนี้

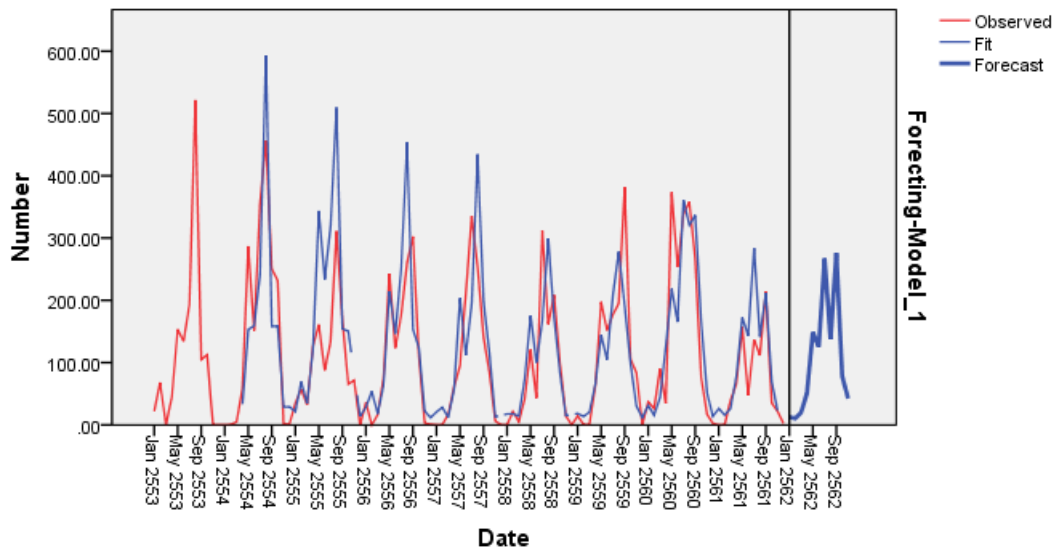
$$\hat{y}_t = \frac{0.477}{(1-0.562B)} x_{1,t-2} - \frac{0.099}{(1-0.748B)} x_{2,t-4} + \frac{(1-0.814B)}{(1+0.080B-0.106B^2)} a_t$$

จากการทดสอบพารามิเตอร์พบว่าความเร็วลมไม่มีผลกระทบต่อปริมาณน้ำฝน ดังนั้นอนุกรมนำเข้าความเร็วลมจะถูกลบออกจากรูปแบบ ดังนั้นรูปแบบสุดท้ายการประมาณค่าฟังก์ชันการถ่ายโอนจะแสดงในรูปแบบ ต่อไปนี้

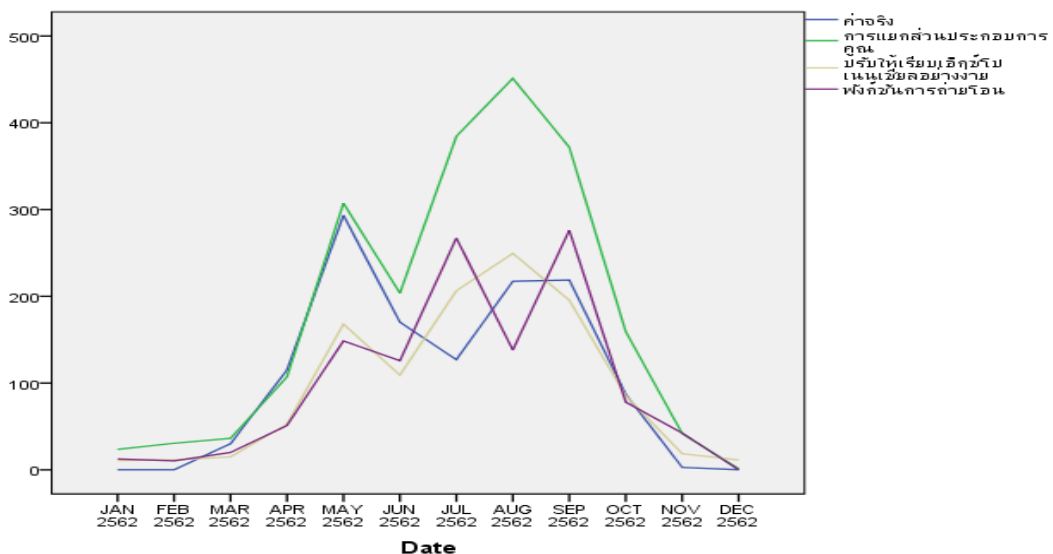
$$\hat{y}_t = \frac{0.477}{(1-0.562B)} x_{1,t-2} + \frac{(1-0.814B)}{(1+0.080B-0.106B^2)} a_t$$

หรือ

$$\begin{aligned} \hat{y}_t = & 0.482y_{t-1} + 0.151y_{t-2} + 0.059y_{t-3} + 0.477x_{1,t-2} + 0.038x_{1,t-3} - 0.051x_{1,t-4} \\ & + a_t - 1.376a_{t-1} + 0.457a_{t-2} \end{aligned}$$



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนจริงกับค่าพยากรณ์โดยวิธีฟังก์ชันการถ่ายโอน



รูปที่ 5 ค่าจริงและค่าพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนของปี พ.ศ. 2562

5. การเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์

เมื่อเปรียบเทียบตัวแบบพยากรณ์ พบว่า ตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีแยกส่วนประกอบการคูณ วิธีการพยากรณ์ปรับให้เรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย และวิธีการพยากรณ์ฟังก์ชันการถ่ายโอน ให้ค่า MAPE เป็นร้อยละ 47.54 28.27 และ 20.43 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 5

ตารางที่ 1 ค่าพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนของปี พ.ศ. 2562

หน่วย : มิลลิเมตร

เดือน	ปริมาณน้ำฝนจริง	ปริมาณน้ำฝน จากการพยากรณ์โดยวิธี		
		การแยกส่วนประกอบ	ปรับให้เรียบเอกซ์โพเนนเชียล	ฟังก์ชันการถ่ายโอน
ม.ค.	0.1	23.54	10.66	12.46
ก.พ.	0.1	30.69	11.40	10.39
มี.ค.	30.1	36.31	14.94	20.04
เม.ย.	115.1	107.12	52.17	51.05
พ.ค.	293.3	307.20	168.05	148.58
มิ.ย.	170.2	203.65	109.14	125.80
ก.ค.	126.9	384.46	206.37	267.18
ส.ค.	217.3	451.20	249.48	138.04
ก.ย.	218.8	371.71	195.50	276.09
ต.ค.	87.2	159.49	85.35	77.98
พ.ย.	2.8	41.68	18.61	42.4
ธ.ค.	0.1	1.21	11.33	0
MAPE		47.54	28.27	20.43

การอภิปรายผล

การวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาและคัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาปริมาณน้ำฝนของจังหวัดบุรีรัมย์ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 จำนวน 120 ค่า ซึ่งผู้วิจัยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด สำหรับการศึกษาตัวแบบพยากรณ์ 3 วิธี พบว่าวิธีการพยากรณ์ด้วยฟังก์ชันการถ่ายโอน เป็นวิธีที่เหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากมีค่า MAPE น้อยที่สุด คือ 20.43 % และมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลจริง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yulianti Hasanaha, Marizsa Herlinaa, Hilda Zaikarinaa ที่พบว่าการคาดการณ์น้ำท่วมและแนวทางการปล่อยน้ำแบบจำลองการคาดการณ์โดยใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอนดีกว่าแบบจำลองของ ARIMA เนื่องจากค่า MAPE ของแบบจำลองฟังก์ชันการถ่ายโอนน้อยกว่าค่า MAPE ของแบบจำลอง ARIMA ที่ 15.23 %

สรุปผล

การวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาและคัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาปริมาณน้ำฝนของจังหวัดบุรีรัมย์ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 จำนวน 120 ค่า ซึ่งผู้วิจัยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด สำหรับการศึกษาตัวแบบพยากรณ์ 3 วิธี ผลวิจัยพบว่าวิธีการพยากรณ์โดยฟังก์ชันการถ่ายโอนมีค่า MAPE น้อยที่สุด และจึงได้สมการการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือน จังหวัดบุรีรัมย์ เป็น

$$\hat{y}_t = 0.482y_{t-1} + 0.151y_{t-2} + 0.059y_{t-3} + 0.477x_{1,t-2} + 0.038x_{1,t-3} - 0.051x_{1,t-4} \\ + a_t - 1.376a_{t-1} + 0.457a_{t-2}$$

เมื่อ $\hat{y}_t$ และ y_{t-3} แทนค่าพยากรณ์เดี่ยว ณ เวลา t จากวิธีฟังก์ชันการถ่ายโอน a_t คือ ค่าความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม ณ เวลา t และ x_t แทนค่าอุณหภูมิอากาศและความเร็วลม

เอกสารอ้างอิง

- Chaiyotha, D. (2015). *Accordins to the claim regulation* (1st ed.). O Dian Sato, Bangkok, Thailand.
- Faculty of Geography and Geospatial Education. (2018). *Local studies* (7th ed.). Phi. Et. Phret chamkat, Bangkok, Thailand.
- Keerativibool, W. (2015). Forecasting the rainfall in Muang, Nan Province. *KMUTT Research and Development Journal*, 38(3), 211-223. (in Thai)

Ketiam, S. (2005). *Forecasting Techniques* (2nd ed.). Thaksin University, Songkhla.

Maenmin, M. (2006). *Time Series and Forecasting* (2nd ed.). Fophring Chamkat, Bangkok, Thailand.

Panichkitkosoalkun, W. (2004). Forecasting of Rainfall of Nakhonratchasima Province. *KMUTT Research and Development Journal*, 28(2), 155 -167. (in Thai)

Rusyana, A., Salwa, N., & Marziah, A. (2019). Forecasting Rainfall Using Transfer Function In Aceh Province, Indonesia, *Applied Mathematical Sciences*, 13(7), 299-307. <https://doi.org/10.12988/ams.2019.9121>

Sopipan, N. (2015). Statistical Model for Forecasting Rainfall in Nakhon Ratchasima Province. *Naresuan University Journal: Science and Technology*, 23(2), 56-65. (in Thai)

Taesombat, S. (2006). *Quantitative forecasting* (1st ed.). Kasetsast University, Bangkok, Thailand. (in Thai)

Wanitbancha, K. (2002). *Using SPSS for Windows is data analysis*. Chalalongkorn University, Bangkok, Thailand.