The Journal of Applied Science **Vol. 17 No. 1: 1-11 [2018]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2018.05.001
ISSN 1513-7805 (Printed in Thailand) ISSN 2586-9663 (Online)

Research Article

Demethylcurcumin analogs, the highly potent compounds for antioxidation in G6PD normal and deficient subjects

Duangmanee Sanmun[1*], Chatchawan Changtam[2], Sarawut Saichanma[1], Sucha Chulsomlee[1], Pornsuri Pongsuchart[1] and Apichart Suksamrarn[3]

[1]Division of Clinical Microscopy, Faculty of Medical Technology, Huachiew Chalermprakiet University, Samutprakarn 10540, Thailand
[2]Division of Physical Science, Faculty of Science and Technology, Huachiew Chalermprakiet University, Samutprakarn 10540, Thailand
[3]Department of Chemistry and Center of Excellence for Innovation in Chemistry, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University, Bangkok 10240, Thailand
*** E-mail**: dsanmun@gmail.com
Received: 15/12/2017; Accepted: 03/05/2018

Abstract

Glucose-6-phosphate dehydrogenase (G6PD) deficiency can cause hemolytic anemia in response to oxidative stress. This study was undertaken to study the protective effect of natural curcuminoids (curcumin, demethoxycurcumin, bisdemethoxycurcumin) with curcuminoid analogs (di-*O*-demethylcurcumin and mono-*O*-demethylcurcumin) in healthy and G6PD-deficient red blood cells. After pretreatment blood with the test compounds, 0.75 mM sodium nitrite-oxidized hemolysate was determined for methemoglobin (metHb) formation. Concurrently, the released hemoglobin from 2,2'-azobis(2-amidinopropane) dihydrochloride (AAPH)-challenged cells was measured for hemolysis. We found that most of the compounds reduced metHb formation and oxidative hemolysis in red cells. After pretreatment with curcuminoid analogs, the oxidized hemoglobins were lower than treated with natural compounds. Furthermore, this study showed that demethylcurcumin analogs certainly protect AAPH-induced red cell lysis. This study can be concluded that curcuminoid analogs with different phenol rings possibly have higher antioxidant activity in order to protect the oxidative stress condition, especially in G6PD deficiency.

Keywords: antioxidant, curcuminoids, curcumin analog, red blood cell, G6PD deficiency

Introduction

Glucose-6-phosphate dehydrogenase (G6PD) deficiency is the most common enzymatic disorders of red blood cells. Patients with G6PD deficiency are sensitive and susceptible to oxidative agents and affects to phagocytic function depending on the severity (Vives Corrons et al., 1982; Beutler, 1994). Avoiding of toxic chemical substances should be concerned in G6PD patients in order to protect hemolytic anemia (Francis et al., 2013). Factors affect clinical severity in G6PD deficiency, including the age, the sex, the genetic variant, the pharmacology of the drug and coexisting disease conditions (Pamba et al, 2012). Supplement with some herbs that compose of antioxidant compounds may possibly applied (Brahmachari, 2012). Turmeric (*Curcuma longa* L.) is popular supplemented in Asian and Arab people because abundance with curcuminoids (Mueller and Mechler, 2005; Singh et al., 2010). Curcuminoids are active ingredients that consist of 46-67% curcumin, 11-24% demethoxycurcumin and

6-14% bisdemethoxycurcumin (Pothirat & Gritsanapa, 2005). Curcumin has been extensively used as anti-inflammation, antioxidant or anticancer agent (Anand et al, 2008; Ammon & Wahl, 1991; He et al., 2015). Since synthetic drugs can cause adverse effect toward the patient. The compounds derived from natural product have benefits because such natural compound can be modified as the analog. In addition, the analog compound offers the researchers to manipulate its structure with the target molecule (Lahlou, 2013). Biological activities of curcuminoid analogs have been interested in investigating their potential therapeutic benefits. In this study, in order to determine the effect of turmeric on erythrocytes, curcuminoids and various forms of analogs were examined in healthy and G6PD-deficient blood. Therefore, aim of this study was to evaluate the antioxidant activity between natural curcuminoids and its analogs.

Materials and methods

Reagents and compound preparation

Reagents and chemicals were purchased from the following sources: dimethyl sulfoxide (DMSO); 2,2'-azobis(2-amidinopropane) dihydrochloride (AAPH); from Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA). Sodium nitrite was purchased from Merck (Darmstadt, Germany) and Dulbecco's PBS (pH 7.4) was purchased from Gibco, Life Technologies (Grand Island, NY, USA). The individual natural curcuminoids, curcumin (C1) ,demethoxycurcumin (C2) and bisdemethoxycurcumin(C3), were isolated from the rhizomes of *Curcuma longa* L. as previously described (Changtam et al., 2010). The curcuminoid analogs, di-*O*-demethylcurcumin (C4) and mono-*O*-demethylcurcumin (C5), were prepared from curcumin by the method of Changtam et al. (2010). The spectroscopic (^{1}H NMR and mass spectra) data of the synthesized compounds were consistent with a previous report (Venkateswarlu et al., 2005). All of five compounds were reconstituted in 60% DMSO, as a stock solution.

Sample collection

Male subjects (age range 20-30 years old) recruited in this study were students of faculty Medical Technology at Huachiew Chalermprakiet University, Thailand. This study was approved by the ethical committee at Huachiew Chalermprakiet University, no.082/2555 according to the Declaration of Helsinki (Samutprakarn, Thailand) and informed consent was signed from individual participating subjects. Blood samples were collected in sterile tube containing citrate phosphate dextrose anticoagulant before investigation. Diagnosis of G6PD deficiency has been performed by fluorescent spot test, using the G6PD screening kit (R&D Diagnostics Ltd, Holargos, Greece). Here, venous blood samples from four G6PD-deficient subjects (age 20.5 ± 5.1 years old) and six healthy subjects (age 21.7 ± 4.1 years old) were obtained.

Assay for methemoglobin

Once freshly isolated red blood cells from healthy blood volunteers were obtained, doses of 10-40 μM of compounds were tested in pilot studies. Experiment in control cells, whole blood was washed with PBS three times and then centrifuged. Packed red cells were separated and diluted in PBS as 40% hematocrit. Next, the suspension of red blood cells was dissolved in distilled water in the ratio 1:100 (v; v) to produce the hemolysate. Hemolysate sample was pretreated with compounds C1-C5 for 15 min and then added with 0.75 mM sodium nitrite. After 20 minute incubation, the level of metHb was measured by spectrophotometer at absorbance 630 nm.

To verify whether G6PD deficiency responded to curcuminoids similar to red blood cells, blood samples were also investigated as described above. The formation of metHb was

monitored with time interval from 5 min to 45 min (Lewis and Roper, 2006). Treatment conditions were divided into three conditions with 2 mL volume: negative control (hemolysate+ control DMSO + sodium nitrite), positive control (hemolysate + control DMSO + sodium nitrite + ascorbic acid) and test tubes (hemolysate + sodium nitrite + compound in 60%DMSO). Control DMSO can be performed by adding 3.3 µL of 60%DMSO for 2 mL reaction to yield a final concentration at 0.1%DMSO.

Assay for oxidative hemolysis

The washed red blood cells were diluted in PBS to give 4% hematocrit. Cell suspension from healthy volunteers was pretreated with compounds C1-C5 (concentration range 5-40 µM) at 37 °C for 30 minutes. The cells were washed once and then mixed with 25 mM AAPH at 37 °C for 3 hours. The supernatant was collected from treated samples by centrifugation (3,000 rpm, 5 minutes). The absorbance of released Hb was determined by spectrophotometer at 540 nm (Niki et al., 1988). Percent of hemolysis was computed by reading the absorbance of hemoglobin in supernatant compared with 100% hemolysis (blood mixed in distilled water containing 0.1%DMSO and 25 mM AAPH). Value of inhibition hemolysis was calculated using equation (1): where $ABS_{DMSO+AAPH}$ is the absorbance of supernatant containing control buffer plus AAPH and ABS_{C+AAPH} is the absorbance of supernatant containing individual compound plus AAPH.

$$\% \text{ Inhibition hemolysis} = \frac{(ABS_{DMSO+AAPH} - ABS_{C+AAPH})}{ABS_{AAPH+DMSO}} \times 100 \qquad \text{Eq.1}$$

Data analysis

The program packages of R version 3.2.0 statistical software (Copyright 2015, The R Foundation for Statistical Computing Platform: i386-w64-mingw32/i386) was used to analyze the data. The median differences between sample control and sample treated with compound were compared using Kruskal-Wallis test, followed by Wilcoxon rank sum test for pair wise comparison. All data were expressed as median±IQR of three separated experiments and statistical test was considered to be significant when $P<0.05$.

Results

The chemical structures of curcuminoids examined are shown in Figure 1. Three natural curcuminoids, curcumin (C1) ,demethoxycurcumin (C2) and bisdemethoxycurcumin (C3), and the synthesized curcuminoid analogs, di-*O*-demethylcurcumin (C4) and mono-*O*-demethylcurcumin (C5) had been investigated for the possible reduction of metHb formation and hemolysis in erythrocytes.

Protective effect against oxidation

In this *in vitro* experiment, curcuminoids inhibited nitrite-induced metHb formation, at a concentration range 10-40 µM (Figure 2). Ascorbic acid is a common standard antioxidant compound, so it was used to co-treatment as a positive control as same as various curcuminoids study in this protocol. The experiment was performed in G6PD-deficient cells at dose 40 µM in five compounds including ascorbic acid. Noticeably, hemolysate with the analogs C4 and C5 at 10 µM concentration were able to inhibit the transformation of reduced hemoglobin to oxidized hemoglobin more than two times (2.52-3.53 fold change) as compared to the DMSO condition (negative control) and were two most potent compounds (Figure 3).

As shown in Figure 2, natutal compounds (C1, C2 and C3) at 20-40 μM concentration was determined to be the most efficient. Interestingly, analog compounds (C4 and C5) at 10 μM concentration can inhibit metHb formation as compared with control DMSO. Obviously, the metHb formation in hemolysate pretreated with analogs were lower than the natural curcuminoids (Figure 3).

Figure 4A (G6PD-deficient samples) shows the change of absorption spectra of metHb produced by hemolysate containing 0.75 mM sodium nitrite. C5 was found to be the most efficient for anti-oxidation of hemoglobin induced by sodium nitrite followed by AA, C4, C2, C1 and C3, respectively. In comparison with studies conducted in healthy blood samples, figure 4B showed that C5, AA and C4 were found to be the most efficient for anti-oxidation of hemoglobin induced by sodium nitrite followed by C2, C3 and C1, respectively. All together, the potent of C4 versus C5 and C1 versus C3 is slightly different, the variation of the experiment probably due to dose optimization, low number of replicates or small sample size.

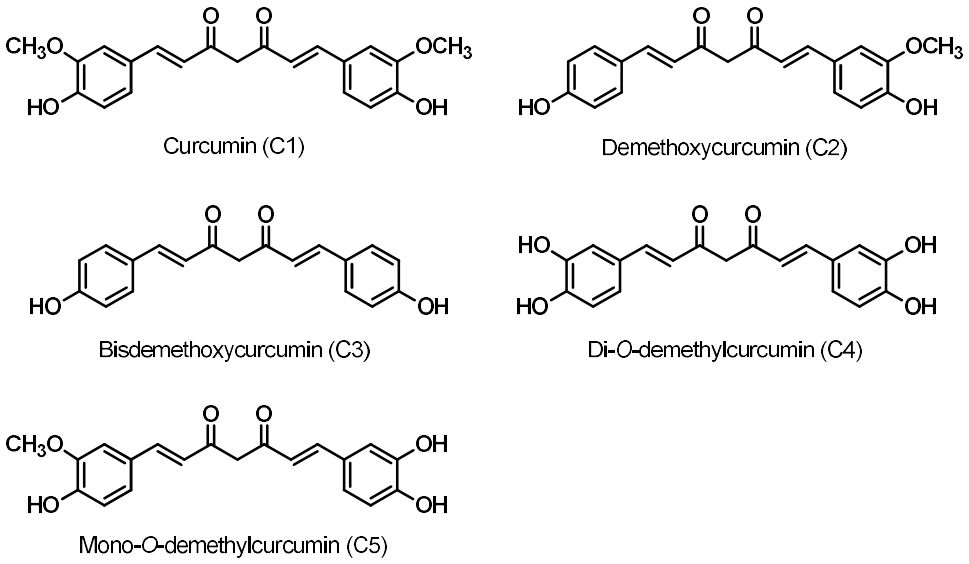


Figure 1. Structures of curcuminoids C1-C5

Effect of natural and curcuminoids analogs on hemolysis

At concentration 5-40 μM, curcuminoids and analogs suppressed hemolysis in a dose-dependent manner (Table 1). As observed, inhibitory effects of individual compound was remarkable at 20 μM concentration (all of them can suppressed hemolysis by more than 50%). To validate this finding, G6PD-deficient cells were investigated. This study showed that C5, C4, C3 and C2 significantly suppressed hemolysis but the action was less pronounced in C1 as seen in Figure 5. As shown in Table 1, 20 μM concentration was chosen to be effective dose for inhibition hemolysis. G6PD-deficient cells were further evaluated to see whether natural curcuminoids or analogs could prevent hemolysis differently (Figure 5).

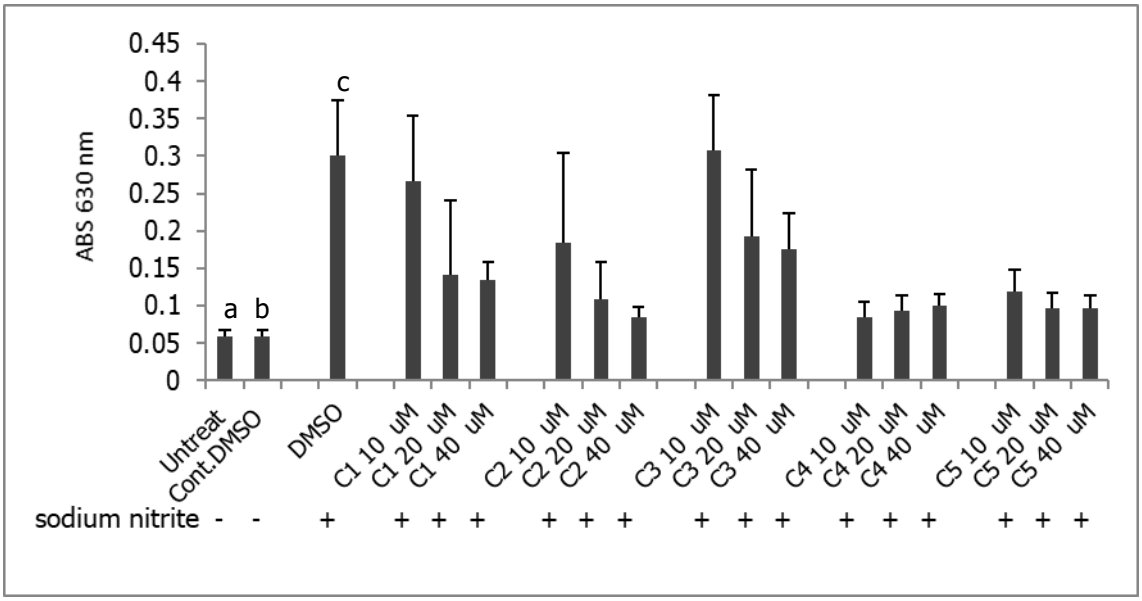


Figure 2. The absorbance of hemolysate from healthy red cells were pretreated with different conditions. The level of metHb was determined at 630 nm after incubating with sodium nitrite for 20 minutes. Data represent the median of three separated experiments (n=3). (a) hemolysate alone, (b) hemolysate containing control DMSO (c) hemolysate + DMSO + sodium nitrite, and (d) hemolysate + sodium nitrite + compounds (curcumin: C1, demethoxycurcumin: C2, bisdemethoxycurcumin: di-*O*-demethylcurcumin: C4 or mono-*O*-demethylcurcumin: C5)

Discussion

It seems that didemethylcurcumin analog is a very potent antioxidant. The ability of C4 and C5 to inhibit hemoglobin oxidation was two- to three-fold higher than that of parent compound (C1). This difference may be due to the number of hydroxyl group (-OH) in the benzene ring. We also found that curcuminoids and analogs exhibit anti-radical property as proved in the hemolytic assay. Our results are in agreement with elegant previous studies which showed that the phenolic group of curcumin analogs inhibited nitrite-oxidized hemoglobin and hemolysis in the AAPH-challenged red cells (Venkatesan et al., 2003; Zhang et al., 2014). Portes et al. (2007) also claimed that the benzylic hydrogens (not the beta-diketone moiety) are responsible for the anti-oxidation process. Recent studies pointed out that tetrahydrocurcumin, the hydrogenated analog, seems to enhance a greater biological activity than the parent compound (Okada et al., 2001; Nakmaroeng et al., 2011). Therefore, further investigation should be carried out to convince that tetrahydrocurcuminoids and curcuminoid analogs are more promising than the natural curcuminoids.

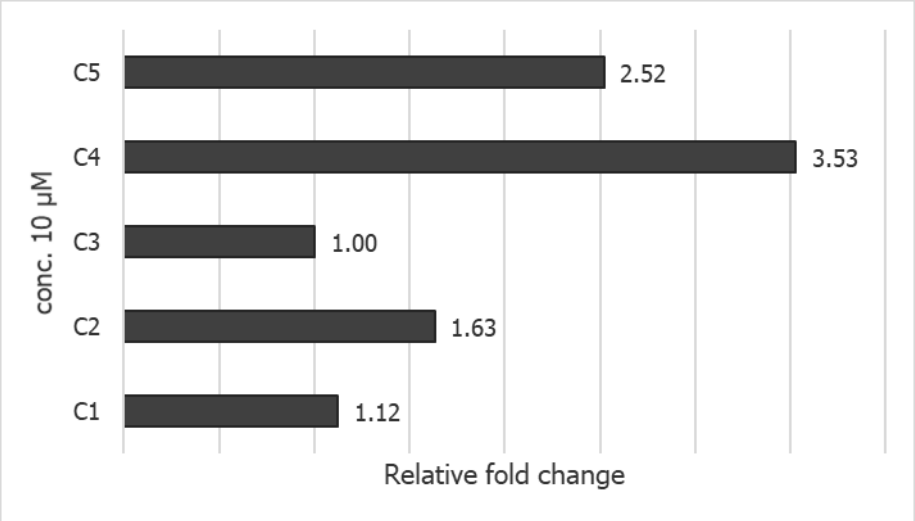


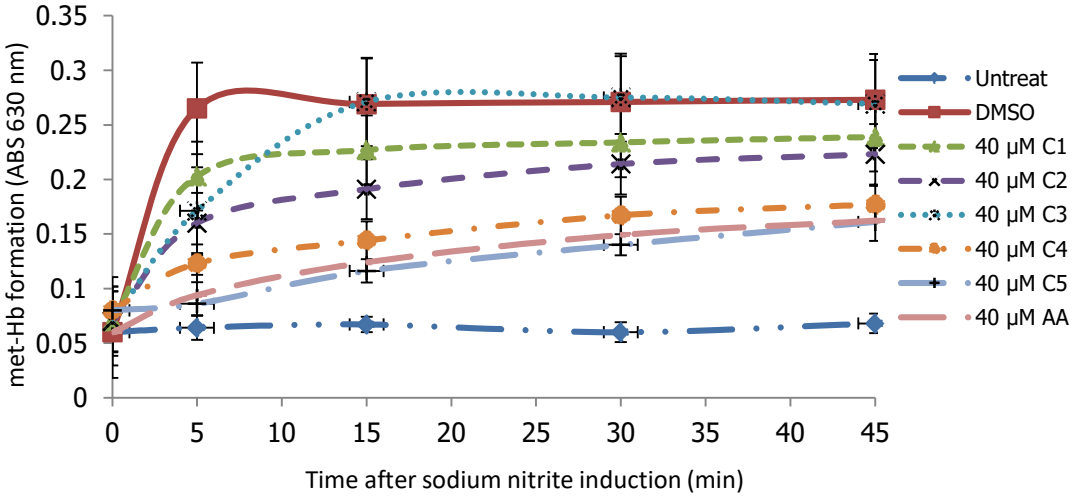
Figure 3. The fold change metHb on metHb formation after treated with different curcuminoids; curcumin: C1, demethoxycurcumin: C2, bisdemethoxycurcumin: di-*O*-demethylcurcumin: C4 or mono-*O*-demethylcurcumin: C5 and DMSO treated with nitrite (data represent the meadian±IQR). The fold change ratio of metHb formation calculated by setting the absorbance of DMSO control as denomination divided by the absorbance of individual compound.

Previous studies showed that the number of methoxyl group (-OCH_3) on the benzene ring involves in the radical scavenging activities, the relative potency followed by C1, C2, and C3, respectively (Somparn et al., 2007; Barzegar & Moosavi-Movahedi, 2011). Nevertheless, this investigation showed the strong effect of C2 and the weak activity of C3 and C1. There is one -OH group on demethoxycurcumin, while two on curcumin and none of -OH group on bisdemethoxycurcumin. Our study indicated that the number of -OH group on the benzene rings is not crucial for the antioxidant activity. Thus, some contrasting finding suggests that removal of methoxy group can enhance potency of natural compound (Zhang et al., 2008).

Comparing the biological effect of C5 versus C4, we usually found that didemethycurcumin analog suppressed AAPH radicals more effectively than if we were to use monodemethylcurcumin analog. The maximal activity of the demethylated analogs C4 could be due to an extra phenolic hydroxyl groups on the phenyl rings (Tocharus et al., 2012). However, the ability of the two analogs in anti-hemolytic action did not depend on structure only but could perhaps be the result of its ability to scavenge free radicals in different microenvironment (Malik & Mukherje, 2014).

Vol. 17 No. 1: 1-11 [2018]
doi: 10.14416/j.appsci.2018.05.001

A.



B.

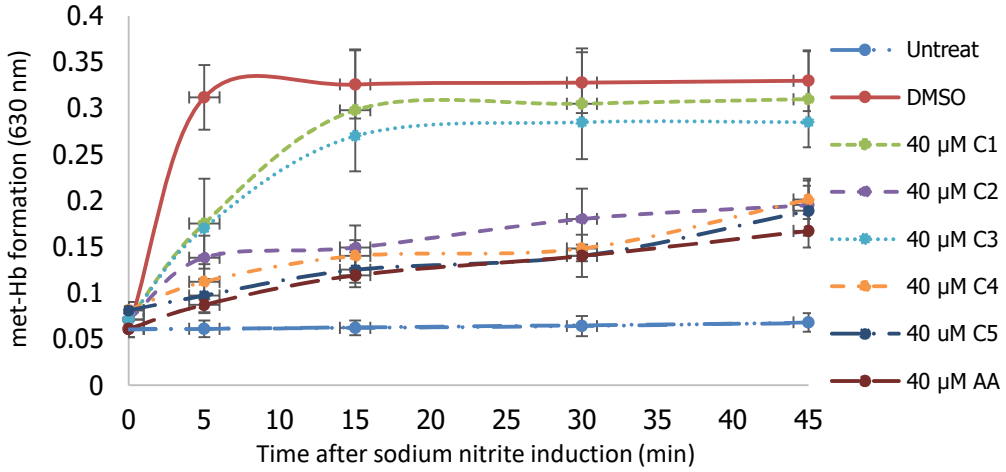


Figure 4. Changes of metHb formation in pre-treated hemolysates with different compounds during incubation with sodium nitrite for 45 min. The degree of metHb was measured at 15 minute intervals under sodium nitrite induction. Data represent the median values of hemolysate samples from G6PD deficient subjects (A; n=4) and healthy subjects (B; n=3) at different time points. Note: C1 = curcumin, C2 = demethoxycurcumin, C3 = bisdemethoxycurcumin, C4 = di-*O*-demethylcurcumin, C5 = mono-*O*-demethylcurcumin and AA = ascorbic acid

The parent compound curcumin has some concern about its poor bioavailability and rapid metabolism. In attempt to solve these problems, the researchers have developed new delivery systems and modified parent's chemical structure for improving curcumin as therapeutic agent (Vyas et al., 2013). Our results have shown that substitution of a $-OCH_3$ of the benzene rings in the curcumin structure leads to dramatically increase in anti-radical activity. We believe that the biochemical effect of curcuminoids and their analogs is not only due to the phenolic hydroxyl group, but is also associated with the number of free -OH groups on the benzene ring as shown in Figure 1. Collectively, there is a possibility of using the modified analogs as supplement for human diseases (Gupta et al., 2012; Bergamaschi et al., 2011). However, additional studies are needed to elucidate this finding into the realm of clinical management of G6PD-deficient patients.

Table 1. The percentage of hemolysis inhibition between compounds compared to DMSO control. Data were expressed as median values±IQR of three separated experiments (n=3).

	% Inhibition hemolysis			
Compound	5 μM	10 μM	20 μM	40 μM
Cont. DMSO	0	0	0	0
C1	0±15.70	12.95±6.91	55.88±6.91	83.76±10.78
C2	29.28±11.44	69.46±2.07	75.53±2.07	77.54±4.01
C3	46.78±13.91	81.42±6.18	71.10±6.18	78.82±11.91
C4	63.90±11.02	89.42±1.77	94.91±1.77	94.21±2.49
C5	54.05±17.02	88.42±0.85	89.84±0.85	91.95±3.90

Note: C1 = curcumin, C2 = demethoxycurcumin, C3 = bisdemethoxycurcumin,
C4 = di-*O*-demethylcurcumin and C5 = mono-*O*-demethylcurcumin

Conclusion

Our study has demonstrated the antioxidant properties of natural curcuminoids and analogs in two ways: (1) The demethylcurcumin analogs (C4 and C5) have higher activity on reduction the metHb formation, and (2) Di-*O*-demethylcurcumin and mono-*O*-demethylcurcumin also have more potential effect on protect the red cell hemolysis than the natural compounds.

It was obvious that the two curcuminoid analogs which are structurally modified have been found to be the more highly potent compounds for antioxidant activity than the parent compound. Moreover, individual curcuminoids might have different effects on biological blood. It is particularly important when patients have vulnerability in red blood cells, especially G6PD deficiency. Therefore, considering pure curcuminoids to be the medicinal herbs possibly applied, but it also needed to more clinical studied in the future.

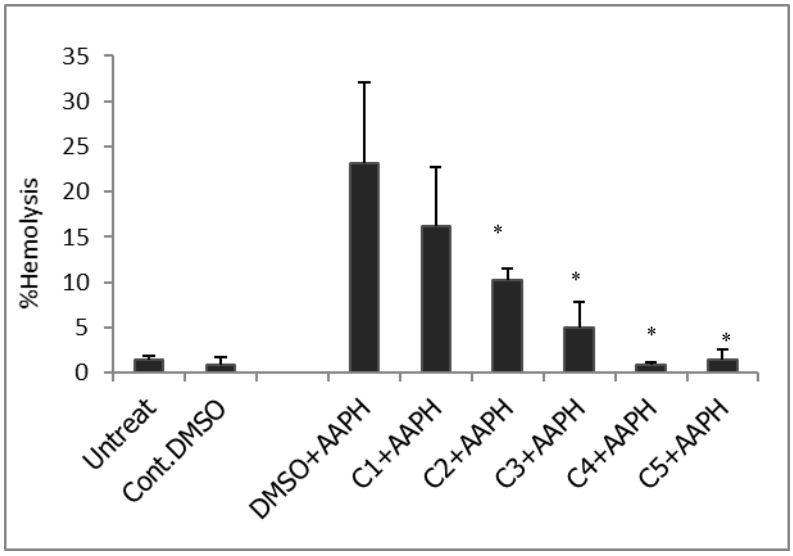


Figure 5. Percentage of red cells hemolysis when added AAPH in pre-incubation with compounds (curcumin: C1, demethoxycurcumin: C2, bisdemethoxycurcumin: C3, di-*O*-demethylcurcumin: C4 or mono-*O*-demethylcurcumin: C5) compared to untreated and DMSO treated cells. *P<0.05 as compared with Control DMSO+AAPH condition.

Acknowledgement

This work was supported by Huachiew Chalermprakiet University fund and the Thailand Research Fund (DBG5980003), Thailand.

References

Ammon, H. P. & Wahl, M. A. (1991). Pharmacology of *Curcuma longa*. *Planta Medica, 57*(1): 1-7.

Anand, P., Thomas, S. G., Kunnumakkara, A. B., Sundaram, C., Harikumar, K. B., Sung, B., et al. (2008). Biological activities of curcumin and its analogues (congeners) made by man and mother nature. *Biochemical Pharmacology, 76*(11): 1590-1611. doi: 10.1016/j.bcp.2008.08.008

Barzegar, A. & Moosavi-Movahedi, A. A. (2011). Intracellular ROS protection efficiency and free radical-scavenging activity of curcumin. *PLoS One, 6*(10): e26012. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0026012

Bergamaschi, M. M., Alcantara, G. K., Valério, D. A. & Queiroz, R. H. (2011). Curcumin could prevent methemoglobinemia induced by dapsone in rats. *Food and Chemical Toxicology, 49*(7): 1638-1641. doi: 10.1016/j.fct.2011.03.025

Beutler, E. (1994). G6PD deficiency. *Blood, 84*(11): 3613-3636.

Brahmachari, G. (2012). *Bioactive natural products: opportunities and challenges in medicinal chemistry.* Singapore: World Scientific Publishing.

Changtam, C., Koning, H. P., Ibrahim, H., Sajid, M. S., Gould, M. K. & Suksamrarn, A. (2010). Curcuminoid analogs with potent activity against *Trypanosoma* and *Leishmania* species. *European Journal of Medicinal Chemistry, 45*(3): 941-956. https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2009.11.035

Francis, R. O., Jhang, J. S., Pham, H. P., Hold, E. A., Zimring, J. C. & Spitalnik, S. L. (2013). Glucose-6-phosphate dehydrogenase deficiency in transfusion medicine: the unknown risks. *Vox Sanguinis, 105*(4): 271-282. doi: 10.1111/vox.12068

Gupta, S. C., Patchva, S., Koh, W. & Aggarwal, B. B. (2012). Discovery of curcumin, a component of the golden spice, and its miraculous biological activities. *Clinical and Experimental Pharmacology & Physiology, 39*(3): 283-299. doi: 10.1111/j.1440-1681.2011.05648.x

He, Y., Yue, Y., Zheng, X., Zhang, K., Chen, S. & Du, Z. (2015). Curcumin, inflammation, and chronic diseases: how are they linked?. *Molecules, 20*: 9183-9213. doi: 10.3390/molecules 20059183

Lahlou, M. (2013). The success of natural products in drug discovery. *Pharmacology & Pharmacy*, 4: 17-31. doi: 10.4236/pp.2013.43A003

Lewis, S. M. & Roper, D. (2006). Laboratory methods used in the investigation of the haemolytic anaemias. In S. M. Lewis, & B. J. Bain (Eds.), *Dacie and Lewis practical haematology* (10th ed.) pp. 199-202. Philadelphia, USA: Churchill Livingstone Elsevier.

Malik, P. & Mukherje, T. K. (2014). Structure-function elucidation of antioxidative and prooxidative activities of the polyphenolic compound curcumin. *Chinese Journal of Biology, 2014, Article ID 396708*, 8 pp. http://dx.doi.org/10.1155/2014/396708

Mueller, M. & Mechler, E. (2005). Curcuma longa (Zingiberaceae). pp. 154-161. In M. Muller and E. Mechler (eds), *Medicinal plants in tropical countries: traditional use-experience-facts*. Stuttgart, Germany: Thieme Publishers.

Nakmaroeng, S., Kukongviriyapan, U., Pakdeechote, P., Donpunha, W., Kukongviriyapan, V., Kongyingyoes, B., et al. (2011). Antioxidant and vascular protective effects of curcumin and tetrahydrocurcumin in rats with L-NAME-induced hypertension. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology, 383*(5): 519-29. doi: 10.1007/s00210-011-0624-z

Niki, E., Komuro, E., Takahashi, M., Urano, S., Ito, E. & Terao, K. (1988). Oxidative hemolysis of erythrocytes and its inhibition by free radical scavengers. *The Journal of Biological Chemistry, 263*(36): 19809-19814.

Okada, K., Wangpoengtrakul, C., Tanaka, T., Toyokuni, S., Uchida, K. & Osawa, T. (2001). Curcumin and especially tetrahydrocurcumin ameliorate oxidative stress-induced renal injury in mice. *The Journal of Nutrition, 131*(8): 2090-2095.

Pamba, A., Richardson, N. D., Carter, N., Duparc, S., Premji, Z., Tiono, A. B., et al. (2012). Clinical spectrum and severity of hemolytic anemia in glucose 6-phosphate dehydrogenase–deficient children receiving dapsone. *Blood*, 120(20): 4123-4133. doi: 10.1182/blood-2012-03-416032

Portes, E., Gardrat, E. & Castellan, A. (2007). A comparative study on the antioxidant properties of tetrahydrocurcuminoids and curcuminoids. *Tetrahedron, 63*: 9092-9099. doi: 10.1016/j.tet.2007.06.085

Pothitirat, W. & Gritsanapan, W. (2005). Quantitative analysis of curcumin, demethoycurcumin and bisdemethoxycurcumin in the crude curcuminoid extract from *Curcuma longa* in Thailand by TLC-densitometry. *Mahidol University Journal of Pharmaceutical Sciences, 32*(1-2): 23-30.

Singh, G., Kapoor, I. P., Singh, P., Heluani, C. S., Lampasona, M. P. & Catalan, C. A. (2010). Comparative study of chemical composition and antioxidant activity of fresh and dry rhizomes of turmeric (*Curcuma longa* Linn.). *Food and Chemical Toxicology, 48*(4): 1026-1031. doi: 10.1016/j.fct.2010.01.015

Somparn, P., Phisalaphong, C., Nakornchai, S., Unchern, S. & Morales, N.P. (2007). Comparative antioxidant activities of curcumin and its demethoxy and hydrogenated derivatives. *Biological Pharmaceutical Bulletin, 30*(1): 74-78.

Tocharus, J., Jamsuwan, S., Tocharus, C., Changtam, C. & Suksamrarn, A. (2012). Curcuminoid analogs inhibit nitric oxide production from LPS-activated microglial cells. *Journal of Natural Medicines, 66*(2):400-5. doi: 10.1007/s11418-011-0599-6

Venkatesan, P., Unnikrishnan, M., Kumar, M. & Rao, M. (2003). Effect of curcumin analogues on oxidation of haemoglobin and lysis of erythrocytes. *Current Science, 84*(1): 74-78.

Venkateswarlu, S., Ramachandra, M. S. & Subbaraju, G. V. (2005). Synthesis and biological evaluation of polyhydrocurcuminoids. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, *13*(23): 6374-6380. doi: 10.1016/j.bmc.2005.06.050

Vives Corrons, J. L., Feliu, E., Pujades, M. A., Cardellach, F., Rozman, C., Carreras, A., et al. (1982). Severe-glucose-6-phosphate dehydrogenase (G6PD) deficiency associated with chronic hemolytic anemia, granulocyte dysfunction, and increased susceptibility to infections: description of a new molecular variant (G6PD Barcelona). *Blood, 59*(2): 428-434.

Vyas, A., Dandawate, P., Padhye, S., Ahmad, A. & Sarkar, S. (2013). Perspectives on new synthethic curcumin analogs and their potential anticancer properties. *Current pharmaceutical design, 19*(11): 2047-2069.

Zhang, J., Hou, X., Ahmad, H., Zhang, H., Zhang, L. & Wang, T. (2014). Assessment of free radicals scavenging activity of seven natural pigments and protective effects in AAPH-challenged chicken erythrocytes. *Food Chemistry, 145*: 57-65. doi: 10.1016/ j.foodchem.2013.08.025

Zhang, L. J., Wu, C. F., Meng, X. L., Yuan, D., Cai, X. D., Wang, Q. L., et al. (2008). Comparison of inhibitory potency of three different curcuminoid pigments on nitric oxide and tumor necrosis factor production of rat primary microglia induced by lipopolysaccharide. *Neuroscience Letters*, *447*(1): 48-53. doi: 10.1016/j.neulet. 2008.09.067

The Journal of Applied Science **Vol. 17 No. 1: 12-18 [2018]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2018.05.002
ISSN 1513-7805 (Printed in Thailand) ISSN 2586-9663 (Online)

Research Article

Formation of new low field signals in the EPR spectra of kaolin minerals

Niramon Worasith[1*], Bernard A. Goodman[2] and Wen Deng[2]

[1]Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Krungthep, Sathorn, Bangkok 10120, Thailand
[2]School of Physical Sciences and Technology, Guangxi University, Nanning, 530004 Guangxi, China
***E-mail**: niramon.w@rmutk.ac.th
Received: 20/02/2018; Accepted: 07/05/2018

Abstract

Kaolins are clay minerals that contain layers of SiO_4 tetrahedra bound to AlO_6 octahedra. They play important roles in environmental processes, and can be used in the preparation of novel products for use in various scientific industries. However, there is considerable variability in the physical and chemical properties of different samples, possibly caused by small amounts of impurity mineral phases, or isomorphous substitution of Fe^{3+} (and other cations) for Al in the structure. Fe^{3+} is paramagnetic and can be studied by electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy. EPR spectra typically show a triplet and a singlet associated with structural Fe^{3+} with their relative intensities being related to structural order in the sample. Two additional singlet signals overlaying the conventional Fe^{3+} signal are now reported. One is formed by grinding, is stable to >300 °C, and is interpreted as arising from Fe^{3+} in a breakdown product from the aluminosilicate structure. The other is observed after irradiation and has low thermal stability; it is thought to correspond to a triplet state that results from the formation of two O^- centres in neighbouring sites in the aluminosilicate structure. Although we do not know the significance of these new centres, it is clear that interpretation of kaolin EPR spectra is more complex than is generally assumed.

Keywords: kaolin; EPR; Fe^{3+}; free radical

Introduction

The kaolins are aluminosilicate minerals with a 1:1 layer structure (Figure 1), in which layers are held together by hydrogen bonds between the octahedral and tetrahedral sheets of adjacent layers. The kaolins are actually 4 distinct minerals that are distinguished by the stacking order of these layers and whether or not there is water in the interlayer space. They exhibit isomorphous substitution of various di-, tri-, or tetravalent ions for Al at the octahedral sites, and possibly additional substitutions at the Si sites; overall, the kaolin minerals are amongst the most diverse in nature (Velde, 1995). Also, kaolin deposits often contain impurity minerals, notably quartz, illite, and various poorly crystalline oxides.

Although they are used extensively in the paper, ceramics, and paint industries, kaolin minerals have a wide range of additional uses that may be influenced considerably by the types and characteristics of their structural substitutions. They may also be used as starting materials for the preparation of other products (Goodman & Worasith, 2014), and along with 2:1 layer silicates, such as bentonites, may function as environmental barriers for the containment of

 doi: 10.14416/j.appsci.2018.05.002

toxic and radioactive wastes. Understanding the factors responsible for the properties and stabilities of various kaolin deposits is, therefore, of considerable importance.

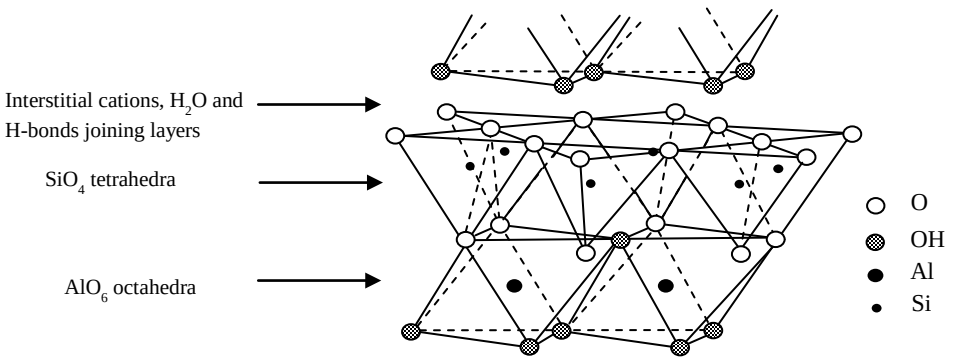


Figure 1. Diagrammatic representation of the structure of kaolin minerals

Apart from the various conventional methods that are used for evaluating mineral composition and properties, electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy can be used to identify and understand the behavior of trace paramagnetic components that may have relatively high levels of reactivity, or function as markers of origin or environmental history of the minerals. Thus, ions such as Fe^{3+}, Mn^{2+}, Mn^{4+}, V^{4+}, and Cu^{2+} have been identified in kaolin samples, in addition to various free radical centres formed by exposure to ionizing radiation (Worasith & Goodman, 2012). However, interpretation of EPR results is not always straightforward, especially with natural samples. The present paper is based on a detailed investigation of the low field signals that are conventionally association with Fe^{3+}; an additional, previously undescribed signal is observed and its spectroscopic properties reported for ground, irradiated, and heated kaolin samples.

Materials and methods

The Ranong and Lampang kaolin samples were obtained from Had Som Pan, Part. and Lampang Kaolin Part., respectively, and sample preparation was as described in a previous report (Worasith et al., 2011). Irradiation was performed to a dose of 150 kGy using ^{60}Co in a Nordion *Gammacell 220 SN 189R*. EPR spectra were acquired as 1st or 2nd derivatives of the microwave absorption with a Bruker A300 spectrometer operating at X-band frequencies and equipped with a high sensitivity resonance cavity. Spectral analyses were performed using Bruker WinEPR software, and the intensity of the new feature was assessed as the distance between its maximum and minima in 2nd derivative recordings.

Results

The EPR spectra from natural and ground samples of Lampang and Ranong kaolins (Figure 2) show signals associated with Fe, Mn, and free radical centres. Resolution of the Fe^{3+} peaks in the low field regions has been related to the crystallinity of the samples (Mestdagh et al., 1980; Brindley et al., 1986), and on the basis of these results the structure of the Lampang sample is more disordered than that from Ranong. Also, with both minerals, the ground samples are more disordered than the natural samples. When the low field region was recorded

as 2nd derivatives of the microwave absorption, an additional sharp feature was observed (Figure 3) with greater intensity in the ground samples than in the natural samples. A similar signal was also observed in samples that had been exposed to γ-radiation (Figure 4), although with these samples the highest intensity was observed with the natural specimens. In fact, the ground Lampang sample showed little effect of radiation on the signal intensity [Figure 3(b) and 4(b)].

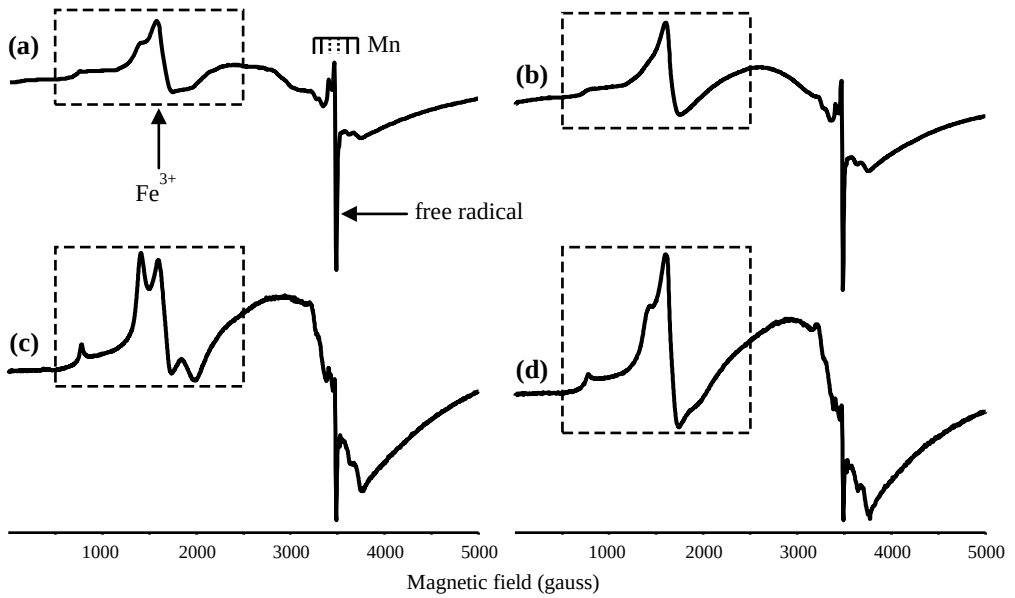


Figure 2. 1st derivative EPR spectra of natural (a) and ground (b) Lampang kaolin, and natural (c) and ground (d) Ranong kaolins. Dashed lines indicate the Fe^{3+} regions investigated in subsequent measurements.

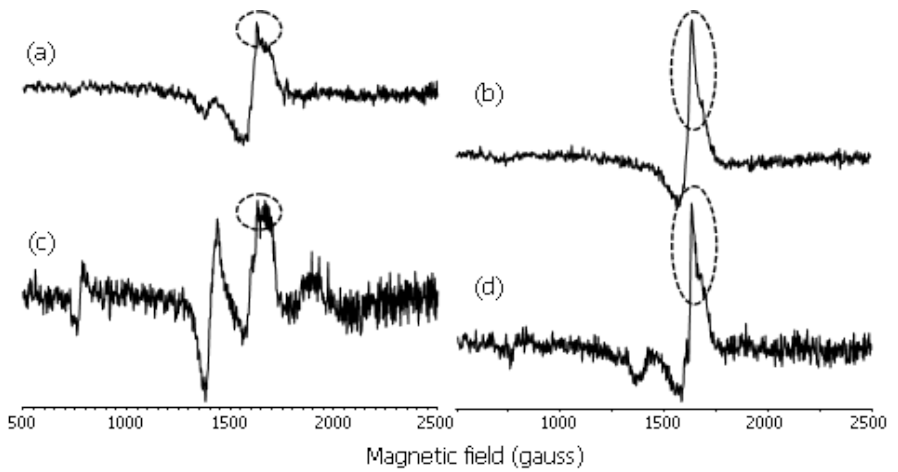


Figure 3. 2nd derivative EPR spectra of natural (a) and ground (b) Lampang kaolin ,and natural (c) and ground (d) Ranong kaolins. Dashed lines indicate the previously unreported resonance.

The stability to heat of this new sharp resonance was also influenced by the grinding history of the samples (Figure 5). For the irradiated natural samples, the sharp resonance at ~1630 gauss was almost completely lost from the natural samples after heating to 300 °C, whereas the intensity of the signal obtained from the ground samples actually increased slightly.

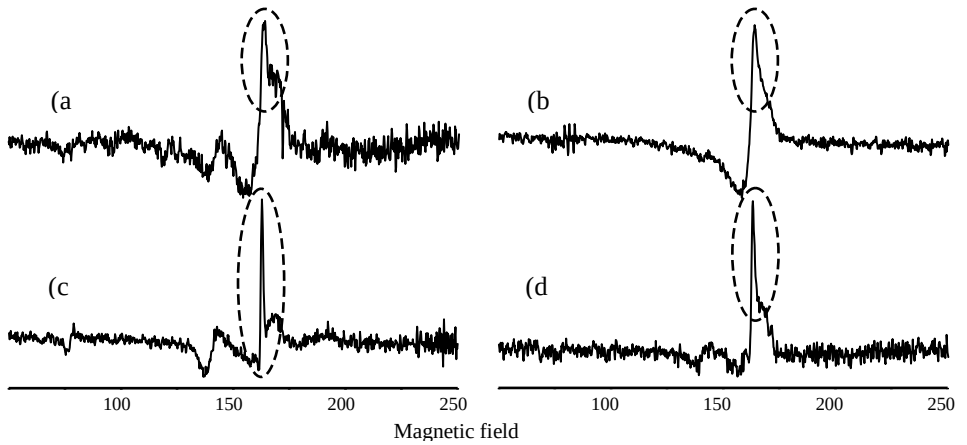


Figure 4. 2nd derivative EPR spectra of natural (a) and ground (b) Lampang kaolin and natural (c) and ground (d) Ranong kaolins after irradiation to a dose of 150 kGy. Dashed lines indicate the previously unreported resonance.

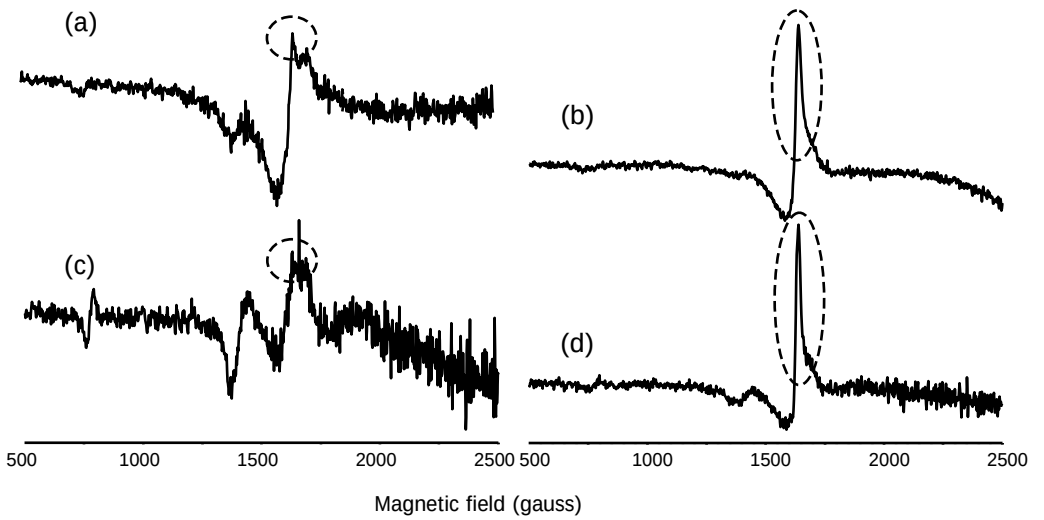


Figure 5. 2nd derivative EPR spectra of natural (a) and ground (b) Lampang kaolin and natural (c) and ground (d) Ranong kaolins after irradiation to a dose of 150 kGy, then heating to 300 °C for 1 h. Dashed lines indicate the previously unreported resonance.

Variation with temperature of the intensity of the new resonance in irradiated natural and ground Ranong samples is shown in more detail in Figure 6. With the natural sample 90%

of the intensity was lost between 80 and 160 °C, whereas with the ground sample the intensity doubled between 150 and 300 °C. It should be noted that the increase in EPR signal intensity between room temperature and 80 °C is probably the consequence of loss of water (and consequent improvement in spectral sensitivity) from the kaolin mineral which contains a high percentage of halloysite (Worasith et al 2011) (the kaolin mineral that has water in the interlayer space).

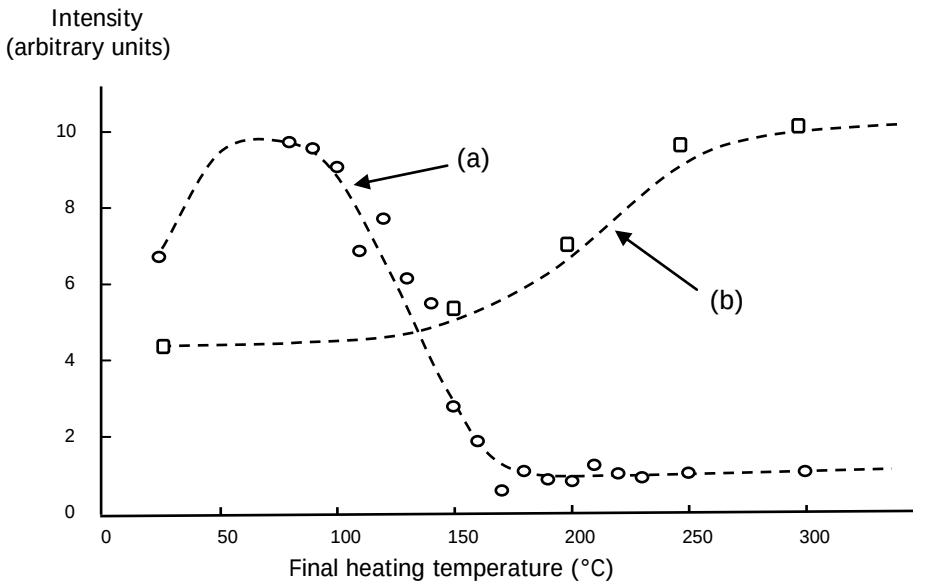


Figure 6. Effect of heating on the intensity of the narrow g = 4.3 peak in the (a) natural and (b) ground Ranong samples after irradiation to a dose of 150 kGy

Discussion

Kaolin minerals invariably show the presence of low field EPR features originating from Fe^{3+} substituting isomorphously for Al in the octahedral sites. These correspond to situations in which the metal experiences near rhombic symmetry (i.e. the zero field splitting parameters, D and E are described by E ~ D/3) and have a g-value ~4.27 (Aasa 1970). Analyses of the Fe^{3+} component in the EPR spectra of kaolin minerals have shown the presence of one singlet and one triplet feature in the spectra with relative intensities that are related to the crystallinity of the sample (Mestdagh et al., 1980; Brindley et al., 1986). In the present work, we have identified the presence of an additional sharp feature at ~1630 gauss (g = 4.28) superimposed on the singlet and central peak of the triplet resonances. This may be similar to a narrow radiation-induced signal in the g = 4.3 region of a kaolinite spectrum that was reported by Gaite et al., (1997), although these authors didn't discuss its identity. In the present work, the resolution of this feature was greatly improved by the use of 2nd derivative recordings which suppress the contributions of broader peaks relative to narrower ones.

Although as mentioned above, EPR peaks with g ~ 4.27 are conventionally associated with Fe^{3+} in rhombic symmetry (Aasa, 1970), this is not its only possible assignment, and a resonance in this position can also be observed for a Δm_S = 2 transition of a triplet state formed by combination of two S=½ centres (Smith & Pilbrow, 1974), which could result from the formation of O^- centres in neighbouring sites in the kaolin structure. This interpretation is supported by the radiation dose dependence of this signal in the unground Ranong sample (our

unpublished results), and its relatively low stability with respect to heating (Figure 6). Furthermore, the different stabilities with respect to temperature of the new signals with g = 4.28 in the irradiated natural and ground Ranong kaolin samples (Figure 6) are suggestive of different origins. Since grinding results in breakdown of the kaolin mineral structure (Makó et al., 2001), the EPR signal in the ground samples could be derived from a secondary phase, although the results with the unheated samples do not exclude a triplet state formed by damage to the mineral surface. However, the stability to heating to 300 °C combined with its insensitivity to irradiation are strong arguments against its assignment to a triplet state, and thus it most likely corresponds to Fe^{3+} expelled from the structure during the grinding process.

Conclusion

Although the broader implications of these research findings are still unclear, this work illustrates that previously unrecognized changes occur in kaolins as a result of grinding, heating, and/or irradiation, and the origins of their EPR spectra are more complex than is generally assumed. Indeed, it appears that the new resonance observed in the present work corresponds to different paramagnetic species in the natural and ground kaolin samples. Consequently, EPR spectra recorded in isolation can lead to inappropriate conclusions, and in order to fully understand the behavior of paramagnetic components in minerals such as the kaolins, it may be necessary to perform a comprehensive range of studies involving physical, chemical, and radiation treatments.

Acknowledgements

We thank Sumalee Ninlaphruk of the Office of Atoms for Peace, Bangkok for performing the sample irradiation. The research was funded by the Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand, the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11675043), and the Natural Science Foundation of Guangxi (Grant No.2010GXNSFD013036).

References

Aasa, R., (1970). Powder line shapes in the electron paramagnetic resonance spectra of high-spin ferric complexes. *The Journal of Chemical Physics, 52,* 3919-3930. https://doi.org/10.1063/1.1673591

Brindley, G. W., Kao, C. C., Harrison, J. L., Lipsicas, M. & Raythatha, R., (1986). Relation between structural disorder and other characteristics of kaolinites and dickites. *Clays and Clay Minerals, 34,* 239-249. doi: 10.1346/ccmn.1986.0340303

Gaite, J.-M., Ermakoff, P., Allard, Th. & Muller, J.-P. (1997). Paramagnetic Fe^{3+}: a sensitive probe for disorder in kaolinite. *Clays and Clay Minerals, 45,* 496-505. doi:10.1346/ccmn.1986.0340303

Goodman, B. A. & Worasith, N., (2014). Production of specialized mineral products from modified kaolins. In L. R. Wesley (Ed.), *Clays and Clay Minerals: Geological Origin, Mechanical Properties and Industrial Applications*. pp. 243-272. New York: Nova Science Publishers, Inc.

Makó, É., Frost, R. L., Kristóf, J. & Horváth, E., (2001). The effect of quartz content on the mechanochemical activation of kaolinite. *Journal of Colloid and Interface Science*, *244,* 359-364. https://doi.org/10.1006/jcis.2001.7953

Mestdagh, M. M., Vielvoye, L. & Herbillon, A. J., (1980). Iron in kaolinite: II. The relationship between kaolinite crystallinity and iron content. *Clay Minerals*, *15,* 1-13. doi: 10.1180/claymin.1980.015.1.01

Smith, T. D. & Pilbrow, J. R., (1974). The determination of structural properties of dimeric transition metal ion complexes from EPR spectra. *Coordination Chemistry Reviews, 13,* 173-278. https://doi.org/10.1016/S0010-8545(00)80255-6

Velde, B., (1995). *Origin and Mineralogy of Clays: Clay and the Environment*. Heidelberg: Springer-Verlag Publisher.

Worasith, N. & Goodman, B. A., (2012). Influence of particle size on the paramagnetic components of kaolins from different origins. *Clay Minerals, 47,* 539-557. https://doi.org/10.1180/claymin.2012.047.4.10

Worasith, N., Goodman, B. A., Neampan, J., Jeyachoke, N. & Thiravetyan, P., (2011). Characterisation of modified kaolin from the Ranong deposit Thailand by XRD, XRF, SEM, FTIR, and EPR techniques. *Clay Minerals, 46,* 525-545. https://doi.org/10.1180/claymin.2011.046.4.539

The Journal of Applied Science **Vol. 17 No. 1: 19-32 [2018]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2018.05.005
ISSN 1513-7805 Printed in Thailand ISSN 2586-9663 (Online)

Research Article

Truncated two-parameter Lindley distribution and its application

Sirinapa Aryuyuen[1]*

[1]Department of Mathematics and Computer Science, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, 10110, Thailand
***E-mail**: sirinapa_a@rmutt.ac.th
Received: 05/04/2018; Accepted: 30/05/2018

Abstract

In this paper, the truncated two-parameter Lindley (T-TPL) distribution is proposed, which is classified as doubly, left and right truncated distributions. Some statistical properties, i.e., the moments, and functions of survival, hazard and quantile are also discussed. The maximum likelihood estimators are constructed for estimating the unknown parameters of the T-TPL distribution. Moreover, the distributions have been fitted with some real data to illustrate the efficiency of the T-TPL distribution when it compared to other distributions (i.e., exponential, Lindley, two-parameter Lindley, and truncated Lindley distributions). The results have shown that the T-TPL distribution gives a reasonable better fit to the real data about bladder cancer patients and the flood discharge rates than other distributions.

Keywords: two-parameter Lindley, hazard function, truncated distribution, lifetime data

Introduction

Truncated distributions are quite effective for using data analysis in various fields, including engineering, medicine, finance and demographics, when such types of truncated data arise in practical statistics in cases with the opportunity to record, or even when occurrences are limited to values which lie above or below a given threshold or within a specified range. For example, pH, grades, and humidity in environmental studies have upper and lower physical bounds, and their probability distribution functions are not necessarily symmetrical within these bounds (Dodge, 2003; Singh et al., 2014).

A truncated normal distribution had been derived from the standard normal distribution as proposed by Johnson et al. (1994). The truncated normal distributions are applied in many practical situations where there is a restriction on the variable under consideration. Several studies have considered the various aspects of the truncated normal distributions, i.e., Johnson (2001) studied the truncated normal distribution in characteristics of singly and doubly truncated populations of application in management science, Iwueze (2007) applied the truncated normal distribution to the left at zero is in descriptive modelling of time series data, Sun (2013) introduced the finite fault modelling for the Wenchuan earthquake using hybrid slip model with truncated normal distributed source parameters, and Hamasha (2017) proposed a mathematical approximation of the left-sided truncated normal distribution using the Cadwell an approximation model to data about the life of a television set. Therefore, many researchers being attracted to problems of analyzing such truncated data encountered in various disciplines, proposed the truncated versions of usual probability distributions. Ahmed et

al. (2010) have discussed the application of the truncated version of the Birnbaum-Saunders distribution to improve an actuarial forecasting model and particularly for modeling data from insurance payments to establish deductibles. For instance, Aban et al. (2006), and Zaninetti & Ferraro (2008) have discussed the application of the truncated Pareto distribution to the statistical analysis of the masses of stars and the diameters of asteroids. Zhang & Xie (2011) have proposed the upper-truncated Weibull distribution and its application about time-to-failure of the turbocharger of one type of engine. Recently, Singh et al. (2014) have proposed the truncated Lindley distribution and applied its distribution to a set of real data concerning the strengths of the glass of aircraft windows.

From the above commentary as well as monitoring the wide applicability of the truncated distributions, the truncated versions of a two-parameter Lindley (TPL) distribution have been proposed as a flexible alternative for analyzing the truncation data range. The TPL distribution has been introduced by Shanke et al. (2013), which becomes a lifetime distribution by mixing the exponential distribution with a scale parameter θ and the gamma distribution with the shape parameter 2 and the scale parameter θ by using the mixed proportion with $\theta/(\theta+\alpha)$ and $\alpha/(\theta+\alpha)$. The TPL has been fitted to some data-sets relating to waiting times and survival times (i.e., the waiting times of bank customers, the survival times of guinea pigs infected with virulent tubercle bacilli, and the mortality grouped data for blackbird species). Results based on chi-square test shown that the TPL distribution provides better fits than the Lindley distribution. The Lindley distribution (Lindley, 1985) is a mixture of the exponential distribution with a scale parameter θ and the gamma distribution the shape parameter 2 and the scale parameter θ. We will find that the TPL has the shape parameter α that makes it more flexible to fit the data than the Lindley distribution.

The rest of the paper has been arranged in the following sections. In methods, the TPL distribution and the truncated distribution are introduced. For results of study, a new truncated distribution of the TPL distribution is proposed, which is classified as doubly, left and right truncated distributions. Particularly, the flexibility of the proposed distribution has been shown to demonstrate the characteristics of the probability function with different combinations of the values of its parameters. Some statistical properties such as moments, survival, hazard, and quantile functions, are also discussed. Moroever, the method of the maximum likelihood estimation is applied to obtain the parameter estimate of the proposed distribution. The set of real data is modeled through the different distributions to compare the efficiency of the proposed distribution and other distributions (i.e., exponential, Lindley, two-parameter Lindley, and truncated Lindley distributions). Finally, the conclusions are shown.

Methods

Let X be distributed as the TPL random variable with the shape parameter α and the scale parameter θ, which denoted by $\mathrm{X} \sim \mathrm{TPL}(\alpha,\theta)$, where the probability density function (pdf) and cumulative density function (cdf) of X (Shanker et al., 2013) are, respectively,

$$\mathrm{f}(x;\alpha,\theta)=\frac{\theta^2}{\theta+\alpha}(1+\alpha x)e^{-\theta x} \text{ and } \mathrm{F}(x;\alpha,\theta)=1-\frac{\theta+\alpha+\alpha\theta x}{\theta+\alpha}e^{-\theta x}, \quad (1)$$

where $x>0, \theta>0,$ and $\alpha>-\theta.$

It can easily be seen that when $\alpha=1,$ the TPL distribution reduces to the one-parameter Lindley distribution (Lindley, 1985) and that when $\alpha=0,$ it reduces to the exponential distribution (Gutenberg & Richter, 1944). Some plots of the pdf of the TPL are shown in Figure 1.

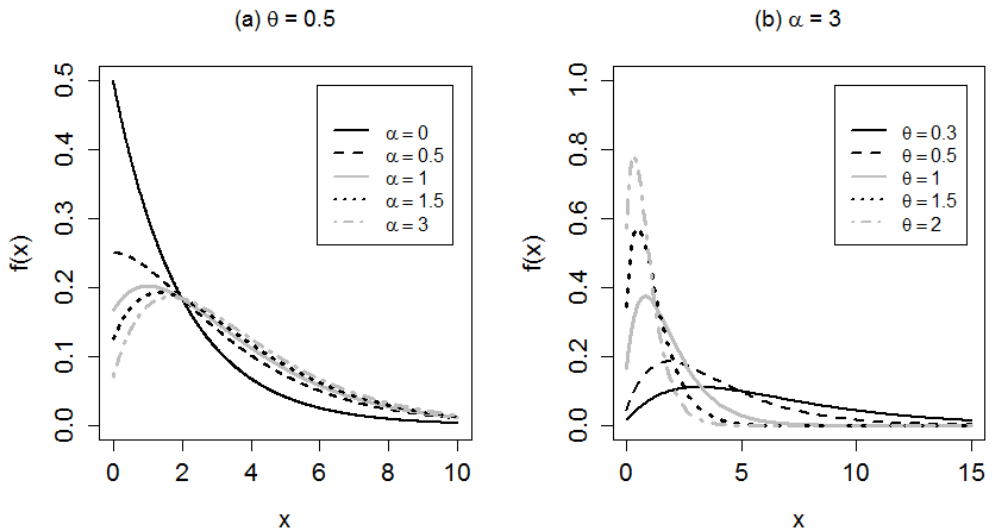


Figure 1. Some pdf plots of the TPL distribution with specified parameters θ and α

Suppose X has a parent distribution, which is a continuous random variable, $-\infty < x < \infty$, with the parameter Θ. The pdf and c.d.f of X are $\mathrm{f}(x;\Theta)$ and $\mathrm{F}(x;\Theta)$, respectively. Let $\mathrm{T} \in F$ where F is a σ-field on a real number $\Re$, such that $0 \le \mathrm{P}(\mathrm{X} \in \mathrm{T}) \le 1$. Then the conditional distribution of X, i.e., $\mathrm{P}(\mathrm{X} \le x \,|\, \mathrm{X} \in \mathrm{T})$, is defined for any $x \in \Re$ it is called the truncated distribution of X. We obtain the truncated distribution function with the cdf and the pdf of $\mathrm{X} \in \mathrm{T}$ (Dodge, 2003; Singh et al., 2014; Ahsamullah et al., 2016) are given as, respectively,

$$\mathrm{F}(x;\Theta,\mathrm{T}) = \mathrm{P}(\mathrm{X} \le x \,|\, \mathrm{X} \in \mathrm{T}) = \frac{\int_{(-\infty,x]\cap \mathrm{T}} \mathrm{f}(u;\Theta)\,du}{\int_{\mathrm{T}} \mathrm{f}(u;\Theta)\,du}, \text{ and}$$

$$\mathrm{f}(x;\Theta,\mathrm{T}) = \frac{\mathrm{f}(x;\Theta)}{\int_{\mathrm{T}} \mathrm{f}(u;\Theta)\,du}, \quad x \in \mathrm{T}. \tag{2}$$

Clearly $\mathrm{f}(x;\Theta,\mathrm{T})$ defines the pdf of X with support T, i.e., T is not necessarily a bounded set of real numbers, since $\int_{\mathrm{T}} \mathrm{f}(x;\Theta,\mathrm{T})dx = \int_{\mathrm{T}} \mathrm{f}(x;\Theta)\,dx \Big/ \int_{\mathrm{T}} \mathrm{f}(u;\Theta)\,du = 1$.

Let X is defined on $\mathrm{T} = [a,b]$, the conditional distribution of X given that $-\infty < a \le x \le b < \infty$, which is called a doubly truncated distribution on interval $[a,b]$. Then the pdf of X is

$$\mathrm{f}(x;\Theta,a,b) = \frac{\mathrm{f}(x;\Theta)}{\mathrm{F}(b;\Theta) - \mathrm{F}(a;\Theta)}; \qquad -\infty < a \le x \le b < \infty. \tag{3}$$

If X be a parent distribution, which is a lifetime distribution with the pdf $\mathrm{f}(x;\Theta)$ where $x \ge 0$ then the doubly truncated distribution of X on interval $[a,b]$, the equation (3) is consideraed in 3 cases.

1) When $a = 0$ and $b < \infty$, the doubly truncated distribution reduces to the parent distribution.

2) When $a > 0$ and $b \to \infty$, the doubly truncated distribution reduces to the left truncated distribution at a, on the other hand, its probability distribution can be derived from the parent distributioin by bounding the random variable from above a.

3) When $a = 0$ and $b < \infty$, the doubly truncated distribution reduces to the right truncated distribution at b, or its probability distribution can be derived from the parent distribution by bounding the random variable from below b.

Results and discussion

A new truncated distribution

A new distribution, namely, a truncated two-parameter Lindley (T-TPL) distribution is presented, which is classified as doubly, left and right truncated distributions. Moreover, some statistical properties are also discussed.

1) Suppose X has a two-parameter Lindley distribution with the pdf and cdf as in equation (1). We obtained the doubly truncated distribution of X on interval $[a,b]$. It is called a doubly truncated two-parameter Lindley (dT-TPL) distribution, which is denoted as $\mathrm{X} \sim$dT-TPL(θ,α,a,b). If $\mathrm{f}(x;\alpha,\theta)$ and $\mathrm{F}(x;\alpha,\theta)$ in equation (1) are replaced into equation (3) respectively, then pdf and cdf of the dT-TPL distribution are, respectively,

$$\mathrm{f}(x;\alpha,\theta,a,b) = \frac{\theta^2(1+\alpha x)e^{-\theta x}}{(\theta+\alpha+\theta\alpha a)e^{-\theta a} - (\theta+\alpha+\theta\alpha b)e^{-\theta b}}, \tag{4}$$

$$\mathrm{F}(x;\alpha,\theta,a,b) = \frac{(\theta+\alpha) - (\theta+\alpha+\theta\alpha x)e^{-\theta x}}{(\theta+\alpha+\theta\alpha a)e^{-\theta a} - (\theta+\alpha+\theta\alpha b)e^{-\theta b}}. \tag{5}$$

The plots of pdf in equation (4) is shown in Figures 2.

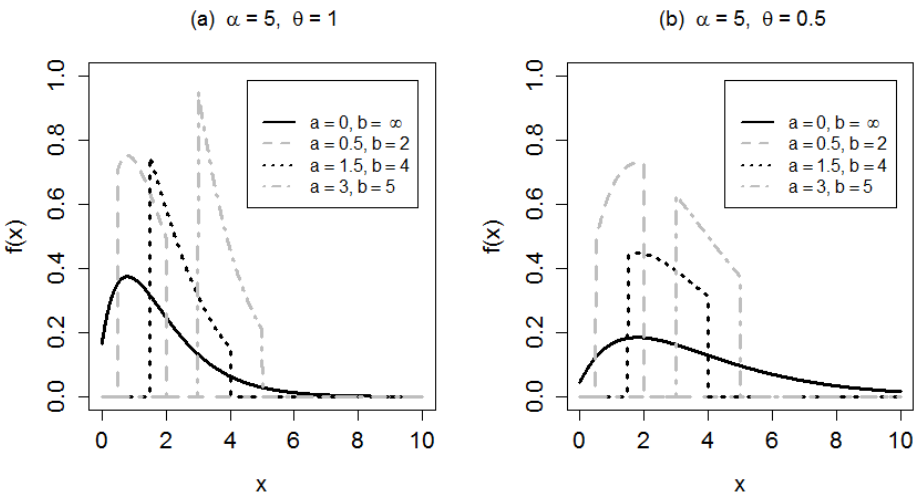


Figure 2. Plots of the pdf for the dT-PTL distribution on $[a,b]$

2) For $X \sim$dT-TPL(θ,α,a,b), when $b\to\infty$, which the distribution of X is called the left truncated two-parameter Lindley distribution, it is denoted as $X \sim$lT-TPL(θ,α,a), then the pdf and cdf of X are respectively

$$f(x;\alpha,\theta,a)=\frac{\theta^2}{\theta+\alpha+\alpha\theta a}(1+\alpha x)e^{-\theta(x-a)}, \text{ and } F(x;\alpha,\theta,a)=\frac{(\theta+\alpha)-(\theta+\alpha+\alpha\theta x)e^{-\theta x}}{(\theta+\alpha+\alpha\theta a)e^{-\theta a}}. \quad (6)$$

3) If $X \sim$dT-TPL(θ,α,a,b), and $a=0$, then the distribution of X is called the right truncated two-parameter Lindley distribution, it is denoted as $X \sim$rT-TPL(θ,α,b), then the pdf and cdf of X are respectively

$$f(x;\alpha,\theta,b)=\frac{\theta^2(1+\alpha x)e^{-\theta x}}{(\theta+\alpha)-(\theta+\alpha+\alpha\theta b)e^{-\theta b}}, \text{ and } F(x;\alpha,\theta,b)=\frac{(\theta+\alpha)-(\theta+\alpha+\alpha\theta x)e^{-\theta x}}{(\theta+\alpha)-(\theta+\alpha+\alpha\theta b)e^{-\theta b}}. \quad (7)$$

The pdf plots of the lT-TPL and rT-TPL distributions are shown in Figures 3-4, respectively.

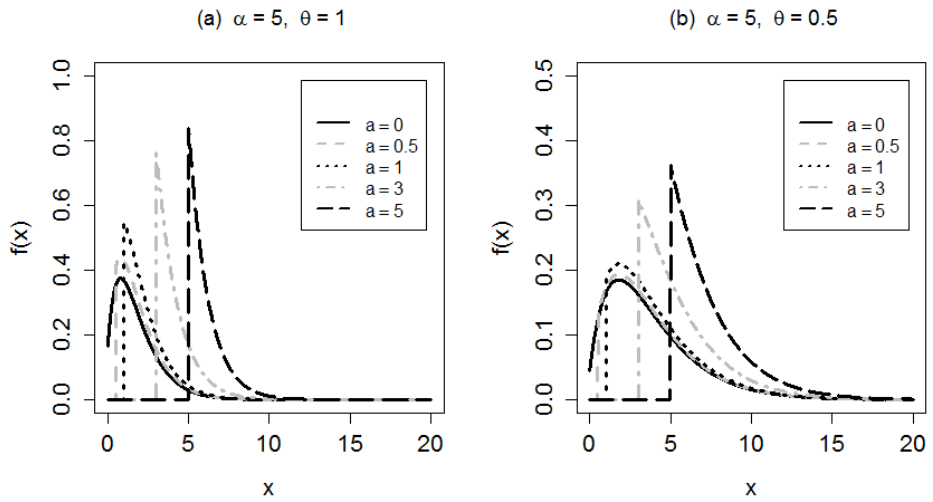


Figure 3. Plots of the pdf for the lT-TPL distribution at a

If $X \sim$T-TPL(θ,α,a,b), and $\alpha=1$, then the T-TPL distribution reduces to the truncated Lindley (T-Lindley) distribution (Singh et al., 2014) and when $\alpha=0$, it reduces to the truncated exponential (T-Exponential) distribution (Hannon & Dahiya, 1999).

Moments

The factorial moments about the origin of order kth are provided explicit expressions of $\mu_k'=E(X^k)$, where k is a positive integer. This can be used to study the most important characteristics of the distribution (e.g., mean, variance, skewness, kurtosis, etc.)

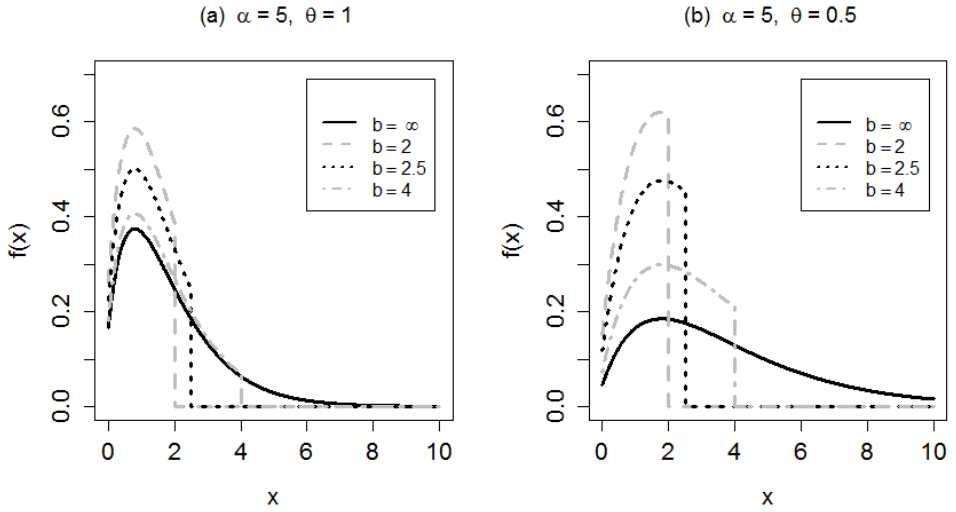


Figure 4. Plots of the pdf for the rT-TPL distribution at b

Theorem 1. If X ~dT-TPL(θ,α,a,b) then the kth moment of X is

$$\mu'_k(x;\theta,\alpha,a,b)=\frac{\theta\left[\gamma(k+1,b)-\gamma(k+1,a)\right]+\alpha\left[\gamma(k+2,b)-\gamma(k+2,a)\right]}{\theta^k\left[\left(\theta+\alpha+\alpha\theta a\right)e^{-\theta a}-\left(\theta+\alpha+\alpha\theta b\right)e^{-\theta b}\right]}, \quad (8)$$

$k=1,2,\ldots$ where $\gamma(k,b)=\int_0^b x^{k-1}e^{-x}dx$ is the lower incomplete gamma function.

Proof: Using equation (4), let $\delta_{(\theta,\alpha,a,b)}=(\theta+\alpha+\theta\alpha a)e^{-\theta a}-(\theta+\alpha+\theta\alpha b)e^{-\theta b}$, one can write

$$\mathrm{E}(\mathrm{X}^k)=\frac{\theta^2}{\delta_{(\theta,\alpha,a,b)}}\int_a^b x^k(1+\alpha x)e^{-\theta x}dx=\frac{\theta^2}{\delta_{(\theta,\alpha,a,b)}}\left[\int_a^b x^k e^{-\theta x}dx+\alpha\int_a^b x^{k+1}e^{-\theta x}dx\right].$$

By setting $u=\theta x$ and $du=\theta dx$, and based on $\gamma(k,b)$, one can write $\mathrm{E}(\mathrm{X}^k)$ as

$$\mu'_k(x;\theta,\alpha,a,b)=\frac{\theta^2}{\delta_{(\theta,\alpha,a,b)}}\left[\frac{\gamma(k+1,b)-\gamma(k+1,a)}{\theta^{k+1}}+\frac{\alpha\left(\gamma(k+2,b)-\gamma(k+2,a)\right)}{\theta^{k+2}}\right].$$

From *Theorem 1*, the mean and variance of X are respectively,

$$\mathrm{E}(\mathrm{X})=\frac{1}{\theta\delta_{(\theta,\alpha,a,b)}}\left[\theta\left(\gamma(2,b)-\gamma(2,a)\right)+\alpha\left(\gamma(3,b)-\gamma(3,a)\right)\right],$$

$$\mathrm{V}(\mathrm{X})=\frac{1}{\theta^2\delta^2_{(\theta,\alpha,a,b)}}\left[\left(\theta\left(\gamma(3,b)-\gamma(3,a)\right)+\alpha\left(\gamma(4,b)-\gamma(4,a)\right)\right)\delta_{(\theta,\alpha,a,b)}\right.$$
$$\left.-\left(\theta\left(\gamma(2,b)-\gamma(2,a)\right)+\alpha\left(\gamma(3,b)-\gamma(3,a)\right)\right)^2\right].$$

Theorem 2. If X ~lT-TPL(θ,α,a), then the kth moment of X is

doi: 10.14416/j.appsci.2018.05.005

$$\mu_k'(x;\theta,\alpha,a)=\frac{\theta\Gamma(k+1,a)+\alpha\Gamma(k+2,a)}{\theta^k\left(\theta+\alpha+\alpha\theta a\right)e^{-\theta a}},\ k=1,2,... \tag{9}$$

where $\Gamma(k,a)=\int_a^{\infty}x^{k-1}e^{-x}dx$ is the upper incomplete gamma function.

Proof: Using equation (6) and letting $\delta_{(\theta,\alpha,a)}=\left(\theta+\alpha+\alpha\theta a\right)e^{-\theta a}$, one can write

$$\mathrm{E}(\mathrm{X}^k)=\frac{\theta^2}{\delta_{(\theta,\alpha,a)}}\int_a^{\infty}x^k(1+\alpha x)e^{-\theta x}dx=\frac{\theta^2}{\delta_{(\theta,\alpha,a)}}\left[\int_a^{\infty}x^ke^{-\theta x}dx+\alpha\int_a^{\infty}x^{k+1}e^{-\theta x}dx\right].$$

By setting $u=\theta x$, and based on $\Gamma(k,a)$, the $\mathrm{E}(\mathrm{X}^k)$ can be written as

$$\mu_k'(x;\theta,\alpha,a)=\frac{\theta^2}{\delta_{(\theta,\alpha,a)}}\left[\frac{\Gamma(k+1,a)}{\theta^{k+1}}+\frac{\alpha\Gamma(k+2,a)}{\theta^{k+2}}\right].$$

From *Theorem 2*, the mean and variance of X are, respectively,

$$\mathrm{E}(\mathrm{X})=\frac{1}{\theta\delta_{(\theta,\alpha,a)}}\left[\theta\Gamma(2,a)+\alpha\Gamma(3,a)\right],$$

$$\mathrm{V}(\mathrm{X})=\frac{1}{\theta^2\delta_{(\theta,\alpha,a)}^2}\left[\left(\theta\Gamma(3,a)+\alpha\Gamma(4,a)\right)\delta_{(\theta,\alpha,a)}-\left(\theta\Gamma(2,a)+\alpha\Gamma(3,a)\right)^2\right].$$

Theorem 3. If X ~rT-TPL(θ,α,b) then the kth moment of X is

$$\mu_k'(x;\theta,\alpha,b)=\frac{\theta\gamma(k+1,b)+\alpha\gamma(k+2,b)}{\theta^k\left[\left(\theta+\alpha\right)-\left(\theta+\alpha+\alpha\theta b\right)e^{-\theta b}\right]},\ k=1,2,... \tag{10}$$

where $\gamma(k,b)$ is the lower incomplete gamma function.

Proof: Using equation (7) and letting $\delta_{(\theta,\alpha,b)}=\left(\theta+\alpha\right)-\left(\theta+\alpha+\alpha\theta b\right)e^{-\theta b}$, one can write

$$\mathrm{E}(X^k)=\frac{\theta^2}{\delta_{(\theta,\alpha,b)}}\int_0^b x^k(1+\alpha x)e^{-\theta x}dx=\frac{\theta^2}{\delta_{(\theta,\alpha,b)}}\left[\int_0^b x^ke^{-\theta x}dx+\alpha\int_0^b x^{k+1}e^{-\theta x}dx\right].$$

By setting $u=\theta x$ and based on $\gamma(k,b)$, then $\mathrm{E}(\mathrm{X}^k)$ is

$$\mu_k'(x;\theta,\alpha,b)=\frac{\theta^2}{\delta_{(\theta,\alpha,b)}}\left[\frac{\gamma(k+1,b)}{\theta^{k+1}}+\frac{\alpha\gamma(k+2,b)}{\theta^{k+2}}\right].$$

From *Theorem 3*, the mean and variance of X are

$$\mathrm{E}(\mathrm{X})=\frac{1}{\theta\delta_{(\theta,\alpha,b)}}\left[\theta\gamma(2,b)+\alpha\gamma(3,b)\right],$$

$$\mathrm{V}(\mathrm{X})=\frac{1}{\theta^2\delta_{(\theta,\alpha,b)}^2}\left[\left(\theta\gamma(3,b)+\alpha\gamma(4,b)\right)\delta_{(\theta,\alpha,b)}-\left(\theta\gamma(2,b)+\alpha\gamma(3,b)\right)^2\right].$$

Survival and hazard functions

The survival function, $\mathrm{S}(x)$, is the probability that a subject survives longer than time x. Suppose X is a lifetime random variable representing the time until a specified event of interest is occured, then the survival function of X is defined as $\mathrm{S}(x)=\mathrm{P}(\mathrm{X}>x)=1-\mathrm{F}(x)$. From the cdf in equation (5), the survival function of the dT-TPL distribution is

$$S(x) = 1 - \frac{(\theta+\alpha) - (\theta+\alpha+\theta\alpha x)e^{-\theta x}}{(\theta+\alpha+\theta\alpha a)e^{-\theta a} - (\theta+\alpha+\theta\alpha b)e^{-\theta b}},\ 0 < a \le x < b \le \infty. \quad (11)$$

Consequently, the ratio of the pdf, $f(x)$, and the survival function, $S(x)$, is given by $h(x) = f(x)/S(x)$, which is called the hazard function. From the pdf in equation (4) and the survival function in equation (11), the hazard function of X is given by

$$h(x) = \frac{\theta^2(1+\alpha x)e^{-\theta x}}{(\theta+\alpha+\theta\alpha a)e^{-\theta a} + (\theta+\alpha+\theta\alpha t)e^{-\theta t} - (\theta+\alpha+\theta\alpha b)e^{-\theta b} - (\theta+\alpha)}. \quad (12)$$

Plots of hazard in equation (12) and survival functions in equation (11) are shown in Figure 5.

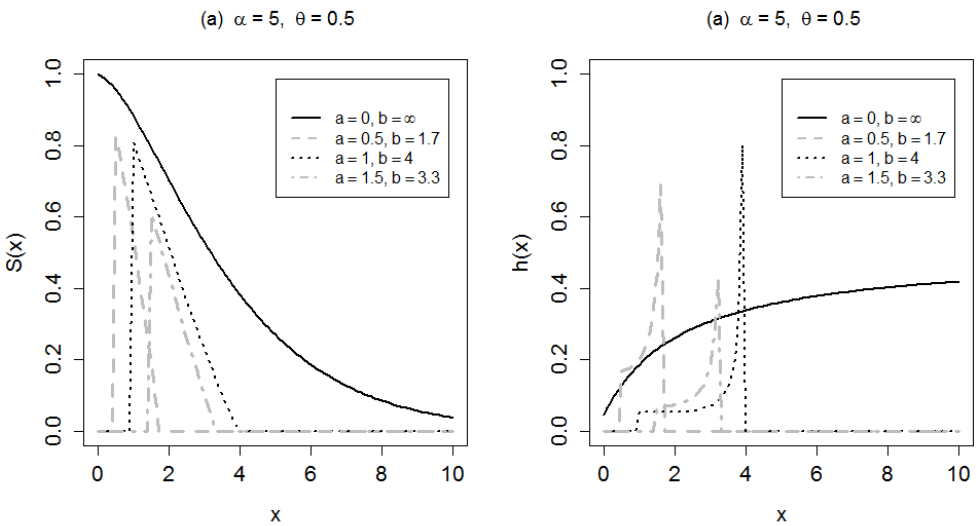


Figure 5. Plots of the survival and hazard functions for the dT-TPL distribution on $[a, b]$

Quantile function

The quantile function is specified by $q(p)$ as the value at which the probability of the random variable is not more than the given probability p. It is also called the percent-point function or inverse cumulative distribution function, i.e., $q(p) = F^{-1}(x)$. We solve this equation by using the *Lambert-W* function (Jorda, 2010), which is a multivalued complex function defined as $W(z)e^{W(z)} = z$ where z is a complex number. From the cdf in equations (5)-(7) and by defining $t = \theta/\alpha + 1$, the quantile function of X are as follows;

1) For $X \sim$dT-TPL(θ, α, a, b),

$$q(p) = -\frac{1}{\theta}\left\{W\left[\left(p(t+\theta a)e^{-\theta a} - p(t+\theta b)e^{-\theta b} - t\right)e^{-t}\right] + t\right\}. \quad (13)$$

2) For $X \sim$lT-TPL(θ, α, a),

$$q(p) = -\frac{1}{\theta}\left\{W\left[\left(p(t+\theta a)e^{-\theta a} - t\right)e^{-t}\right] + t\right\}. \quad (14)$$

3) For $X \sim$rT-TPL(θ, α, b),

doi: 10.14416/j.appsci.2018.05.005

$$\mathrm{q}(p) = -\frac{1}{\theta}\left\{W\left[\left(pt - p(t+\theta b)e^{-\theta b} - t\right)e^{-t}\right] + t\right\}. \quad (15)$$

The generation of a T-TPL random variate

The inverse transformation technique is used to generate a random variable for the TP_2L distribution by setting $x_i = \mathrm{F}^{-1}(u_i)$, where u is a random variable of the uniform distribution on (0,1), which denoted as $\mathrm{U}(0,1)$. The *LamW* package in R (Adler, 2016) is employed to solve the *Lambert-W* function in equations (13)-(15). Then $\mathrm{X}_i, i = 1,2,...,n,$ can be generated as follows:

1) Generate $u_i, i = 1,2,...,n$ from $\mathrm{U}(0,1)$.
2) Set $t = \theta/\alpha + 1$.
3) Set w_i, when w_i is $W\{z\}$ and can be obtained by using "lambertWm1(z)" in R;
   3.1) $w_i = W\left[\left(u_i(t+\theta a)e^{-\theta a} - u_i(t+\theta b)e^{-\theta b} - t\right)e^{-t}\right]$ for dT-TPL(θ, α, a, b),
   3.2) $w_i = W\left[\left(u_i(t+\theta a)e^{-\theta a} - t\right)e^{-t}\right]$ for lT-TPL(θ, α, a),
   3.3) $w_i = W\left[\left(u_i t - u_i(t+\theta b)e^{-\theta b} - t\right)e^{-t}\right]$ for rT-TPL(θ, α, b).
4) Then, $x_i = -\frac{1}{\theta}\{w_i + t\}$.

The parameter estimation

In this section, author describes the procedure to obtain the maximum likelihood estimates (MLE) of the parameters of the dT-TPL, as well as, lT-TPL and rT-TPL distributions based on the random sample $\tilde{x} = (x_1, x_2, ..., x_n)$ of n observations so that these distributions can be effectively used to model real problems depending upon the nature of the data.

1) Let $\mathrm{X}_i, i = 1,2,...,n$ be an iid (independent and identically distributed). The likelihood function of X ~dT-TPL(θ, α, a, b) on the observed sample $\tilde{x}$ is given by

$$L(\alpha, \theta \mid \tilde{x}, a, b) = \left(\frac{\theta^2}{(\theta+\alpha+\theta\alpha a)e^{-\theta a} - (\theta+\alpha+\theta\alpha b)e^{-\theta b}}\right)^n \prod_{i=1}^{n}(1+\alpha x_i)\cdot e^{-\theta\sum_{i=1}^{n} x_i}.$$

The corresponding log-likelihood equation, $L_1 = \log L(\alpha, \theta \mid \tilde{x}, a, b)$ for $\hat{a} = \min(x)$ and $\hat{b} = \max(x)$ is

$$L_1 = 2n\log(\theta) - n\log[(\theta+\alpha+\theta\alpha a)e^{-\theta a} - (\theta+\alpha+\theta\alpha b)e^{-\theta b}] + \sum_{i=1}^{n}\log(1+\alpha x_i) - \theta\sum_{i=1}^{n} x_i.$$

To estimate the unknown parameters θ and α from the differentiating of the log-likelihood function, we obtained the partial derivatives of L_1 with respect to θ and α, i.e.,

$$\frac{\partial L_1}{\partial \theta} = \frac{2n}{\theta} - [\frac{(1-\theta a-\theta\alpha a^2)e^{-\theta a} - (1-\theta b-\theta\alpha b^2)e^{-\theta b}}{(\theta+\alpha+\theta\alpha a)e^{-\theta a} - (\theta+\alpha+\theta\alpha b)e^{-\theta b}}]n - \sum_{i=1}^{n} x_i, \quad (16)$$

$$\frac{\partial L_1}{\partial \alpha} = \sum_{i=1}^{n}\frac{\partial \log(1+\alpha x_i)}{\partial \alpha} - n[\frac{(1+\theta a)e^{-\theta a} - (1+\theta b)e^{-\theta b}}{(\theta+\alpha+\theta\alpha a)e^{-\theta a} - (\theta+\alpha+\theta\alpha b)e^{-\theta b}}]. \quad (17)$$

Similarly, the estimators of the lT-TPL and rT-TPL distributions can be obtained as follows.

2) Let $\tilde{x}=(x_1,x_2,...,x_n)$ be a random sample of size n from the lT-TPL distribution. The log-likelihood function, $L_2=\log L(\alpha,\theta\,|\,\tilde{x},a)$, of X_i for $i=1,2,...,n,$ and $\hat{a}=\min(x)$ is

$$L_2=2n\log(\theta)-n\log(\theta+\alpha+\theta\alpha a)+\sum_{i=1}^{n}\log(1+\alpha x_i)-\theta\sum_{i=1}^{n}x_i+n\theta a.$$

Partial derivatives of L_2, this log likelihood function with respect to θ and α can be given by

$$\frac{\partial L_2}{\partial\theta}=\frac{2n}{\theta}-\frac{n(1+\alpha a)}{\theta+\alpha+\theta\alpha a}-\sum_{i=1}^{n}x_i+na, \tag{18}$$

$$\frac{\partial L_2}{\partial\alpha}=-\frac{n(1+\theta a)}{\theta+\alpha+\theta\alpha a}+\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial}{\partial\alpha}\log(1+\alpha x_i). \tag{19}$$

3) Let X_i ~rT-TPL(θ,α,b), $i=1,2,...,n$ be an iid random variable. The log-likelihood function of X_i is $L_3=\log L(\alpha,\theta\,|\,\tilde{x},b)$ for $\hat{b}=\max(x)$ given by

$$L_3=2n\log(\theta)-n\log[(\theta+\alpha)-(\theta+\alpha+\alpha\theta b)e^{-\theta b}]+\sum_{i=1}^{n}\log(1+\alpha x_i)-\theta\sum_{i=1}^{n}x_i.$$

Partial derivatives of this log likelihood function with respect to θ and α are given by

$$\frac{\partial L_3}{\partial\theta}=\frac{2n}{\theta}-\frac{n[1-(1-\theta b-\alpha\theta b^2)e^{-\theta b}]}{(\theta+\alpha)-(\theta+\alpha+\alpha\theta b)e^{-\theta b}}-\sum_{i=1}^{n}x_i, \tag{20}$$

$$\frac{\partial L_3}{\partial\alpha}=-\frac{n[1-(1-\alpha b-\alpha\theta b^2)e^{-\theta b}]}{(\theta+\alpha)-(\theta+\alpha+\alpha\theta b)e^{-\theta b}}+\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial}{\partial\alpha}\log(1+\alpha x_i). \tag{21}$$

These differential equations in equations (16)-(21) are not in a closed-form expression. Therefore, the MLE estimator of the parameter estimate, i.e., $\hat{\theta}$ and $\hat{\alpha},$ can be obtained by using numerical optimization with the *nlm* function in the R program (R Core Team, 2016).

Table 1. Maximum likelihood estimates, SE, and MSE values under models based on simulated data (Parameters: $\theta=0.5$ and $\alpha=5$).

Distributions	n	$\theta=0.5$			$\alpha=5$		
		Estimates	SE	MSE	Estimates	SE	MSE
dT-TPL	20	0.2171	0.0513	0.1326	2.3787	2.1801	101.9256
(θ,α,a,b)	50	0.3591	0.0280	0.0592	3.6834	1.2353	78.0323
$a=1,b=5$	100	0.3936	0.0163	0.0378	4.2341	0.7496	56.7701
	200	0.4385	0.0083	0.0174	4.7218	0.4514	40.8250
	500	0.4780	0.0030	0.0049	4.9526	0.1494	11.1658
	1000	0.4893	0.0015	0.0025	5.0420	0.0860	7.3910
lT-TPL	20	0.6312	0.0202	0.0254	5.7802	3.9994	320.5091
(θ,α,a)	50	0.6280	0.0122	0.0238	6.1164	1.8965	181.0903
$a=1,b=\infty$	100	0.6326	0.0076	0.0234	6.4807	1.2412	156.2369
	200	0.6381	0.0038	0.0220	6.7860	0.7084	103.5645
	500	0.6427	0.0015	0.0214	7.3975	0.3425	64.3930
	1000	0.6447	0.0004	0.0211	7.5028	0.1533	29.7569
tT-TPL	20	0.2719	0.0506	0.1032	4.1138	2.7196	148.7085
(θ,α,b)	50	0.3691	0.0252	0.0489	4.7495	1.6198	131.2441
	100	0.4391	0.0127	0.0198	5.0256	1.0620	112.7745
$a=0,b=5$	200	0.4737	0.0060	0.0079	5.3574	0.6547	85.8650
	500	0.4938	0.0021	0.0023	5.6355	0.2384	28.8174
	1000	0.4971	0.0011	0.0012	5.8564	0.1027	11.2816

Simulation study

Simulation study is illustrated to show the efficiency of maximum likelihood estimation (MLE). As an illustration, the sample data generated from a T-TPL random variable with the specified parameters of 3 cases has been displayed in Table 1 for the sample sizes (n) are 20, 50, 100, 200, 500, and 1,000. In each situation, the parameters are estimated via the MLE with *nlm* function in R (R Core Team, 2016) of 1000 replications. Suppose the estimated parameter of ω is $\hat{\omega}$, then the bias, standard deviation, and standard error of $\hat{\omega}$, are computed by the formulas: $\hat{\omega} = \sum_{t=1}^{1000} \hat{\omega}_t / 1000$, $\text{Bias}(\omega) = \hat{\omega} - \omega$, $\text{SD}(\hat{\omega}) = \sum_{t=1}^{1000} (\hat{\omega}_t - \hat{\omega})^2 / 999$, and $\text{SE}(\hat{\omega}) = \text{SD}(\hat{\omega})/$, respectively. The mean squared error (MSE), i.e., $\text{MSE}(\hat{\omega}) = \text{Var}(\hat{\omega}) + \text{Bias}^2(\hat{\omega})$, is used for the criteria to compare the efficiency of the MLE of each parameter.

From the results in Table 1, the MLE for estimating θ and α gives the minimum MSE value. The MSE of each estimated parameter trends to decrease when the sample size is increasing. Moreover, the estimate values of each parameter by using MLE method gives the biased estimate value from the parameter. Howover, the MLE method gives the estimate value that close to the parameter. Thus, the MLE method is used to estimate the parameters of the distributions for a real data in application study.

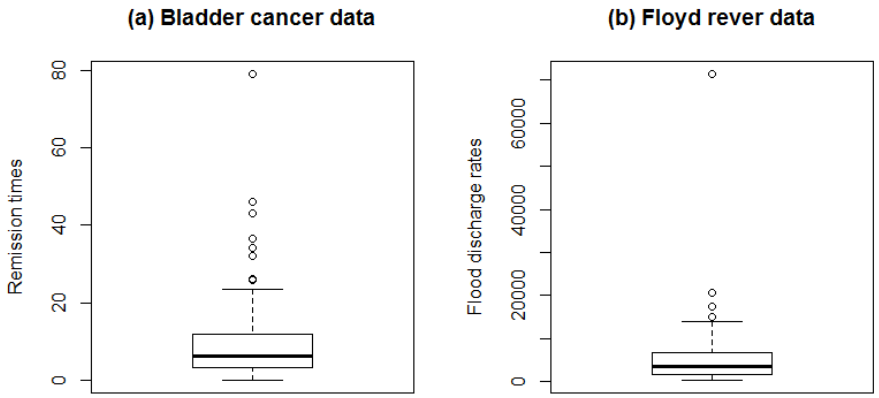


Figure 6. Box plots of the real datasets for application study

Application study

The first data set is the cancer patient data set, which is an uncensored data set corresponding to the remission times (in months) of a random sample of 128 bladder cancer patients. Thse data sets were previously studied by Lee and Wang in 2003 (Zea et al., 2012). The values of the minimum, mean, and maximum of the remission times are 0.09, 9.37, and 79.05, respectively. Another, real data set is the Floyd River flood rates for the years 1935–1973, which appeared in Akinsete et al. (2008). The minimum, mean, and maximum values of flood discharge rates are 318, 6771.10, and 71500, respectively. The summary of this data set is shown in Figure 6. Estimates of the parameters of the T-TPL distribution, Akaike Information Criterion (AIC), Consistent Akaike Information Criterion (AICC), Bayesian Information Criterion (BIC), and KS test by using value of D are, respectively, given as follows:

$$\text{AIC} = -2log\left(L\right) + 2p,$$
$$\text{AICC} = \text{AIC} + \left(2p(p+1)\right)/(n-p-1),$$
$$\text{BIC} = -2\log(L) + p\log(n),$$
$$\text{D} = \sup_x \left|F_n(x) - F_0(x)\right|,$$

where n is the sample size and p is the number of parameters.

Based on the results in Tables 2-3, the exponential, Lindley, TPL, truncated (doubly, left, right) Lindley, and truncated (doubly, left, right) TPL distributions have been compared with the KS test, and it has been found that the rT-TPL ($\hat{\theta} = 0.1066,\ \hat{\alpha} = -3.580\times10^{-6},\ b = 79.05$) gives a reasonable fit for the data of bladder cancer patients better than other distributions. And for real data of the Floyd River flood rates, the dT-TPL ($\hat{\theta} = 1.536\times10^{-4},\ \hat{\alpha} = -4.289\times10^{-7},\ a = 318,\ b = 71{,}500$) is the best fit for the flood discharge rates. Moreover, the KS-test of the exponential, Lindley, and TPL distributions are shown that they can not fit with the data.

Table 2. Maximum likelihood estimates and statistic values under models based on real data on the bladder cancer data (Zea et al., 2012).

Distributions	Maximum likelihood estimates				-logL	AIC	AICC	BIC	D (p-value)
	$\hat{\theta}$	$\hat{\alpha}$	$\hat{a}$	$\hat{b}$					
Exponential (θ)	0.1068	-	-	-	414.342	830.684	830.716	833.536	0.9453 (<0.0001)
Lindley (θ)	0.1960	-	-	-	419.530	841.060	841.092	843.912	0.9453 (<0.0001)
dT-Lindley (θ,a,b)	0.1965	-	0.08	79.05	419.189	844.378	844.572	852.934	0.1144 (0.0703)
lT-Lindley (θ,a)	0.1965	-	0.08	-	422.530	849.060	849.156	854.764	0.1165 (0.0619)
rT-Lindley (θ,b)	0.1960	-	-	79.05	419.185	842.370	842.466	848.074	0.1141 (0.0713)
TPL (θ,α)	0.1068	$1.1701\text{x}10^{-6}$	-	-	414.342	832.684	832.78	838.388	0.9453 (<0.0001)
dT-TPL (θ,α,a,b)	0.1075	$1.022\text{x}10^{-6}$	0.08	79.05	413.318	834.636	834.961	846.044	0.0875 (0.2805)
lT-TPL (θ,α,a)	0.1077	$-4.193\text{x}10^{-6}$	0.08	-	415.844	837.688	837.882	846.244	0.0878 (0.2767)
rT-TPL (θ,α,b)	0.1066	$-3.580\text{x}10^{-6}$	-	79.05	413.314	832.628	832.822	841.184	0.0844 (0.3217)

Table 3. Maximum likelihood estimates and statistic values under models based on real data about the Floyd river flood rates for the years 1935-1973 (Akinsete et al., 2008)

Distributions	Maximum likelihood estimates				-logL	AIC	AICC	BIC	D (p-value)
	$\hat{\theta}$	$\hat{\alpha}$	$\hat{a}$	$\hat{b}$					
Exponential (θ)	0.0001	-	-	-	382.996	767.992	768.100	769.656	1 (<0.0001)
Lindley (θ)	0.0003	-	-	-	392.649	787.298	787.406	788.962	1 (<0.0001)
dT-Lindley (θ,a,b)	0.0003	-	318	71500	392.485	790.970	791.656	795.961	0.2395 (0.0187)
lT-Lindley (θ,a)	0.0003	-	318	-	394.485	792.970	793.303	796.297	0.2395 (0.0187)
rT-Lindley (θ,b)	0.0003	-	-	71500	394.649	793.298	793.631	796.625	0.2406 (0.0180)
TPL (θ,α)	0.0017	0.3000	-	-	634.588	1,273.2	1,273.5	1,276.5	1 (<0.0001)
dT-TPL (θ,α,a,b)	$1.536\text{x}10^{-4}$	$-4.289\text{x}10^{-7}$	318	71500	381.121	770.242	771.419	776.896	0.1011 (0.7831)
lT-TPL (θ,α,a)	0.0003	0.0104	318	-	391.840	789.680	790.366	794.671	0.2288 (0.0282)
rT-TPL (θ,α,b)	0.0003	0.1001	-	71500	392.191	790.382	791.068	795.373	0.2395 (0.0188)

Conclusion

In this work, the doubly, left, and right truncated two-parameter Lindley distributions are proposed. Some characteristics of the proposed distributions (i.e., moments, and functions of survival, hazard, and quantile) are discussed. The unknown parameters of the proposed distributions are estimated by the maximum likelihood estimation. Two real data sets such as the bladder cancer patients and the flood discharge rates have been considered to show the usefulness of the proposed distributions. The results show that the proposed distributions provide a consistently better fit than the other distributions (i.e., the exponential, Lindley, two-parameter Lindley, and truncated-Lindley distributions). We hope that the proposed distributions will attract wider application in many areas such as engineering, economics, survival, lifetime data analysis, etc.

Acknowledgement

The author would like to express thanks to the Rajamangala University of Technology Thanyaburi for research funding.

References

Aban, I. B., Meerschaert, M. M., & Panorska, A. K. (2006). Parameter estimation for the truncated Pareto distribution. *Journal of the American Statistical Association*, *101*(473), 270-277. doi: 10.1198/016214505000000411

Adler, A. (2016). *Lambert-W Function*. Retrieved October 10, 2016, from https://bitbucket.org/aadler/lamw

Ahmed, S. E., Castro-Kuriss, C., Flores, E., Leiva, V., & Sanhueza, A. (2010). A truncated version of the birnbaum-saunders distribution with an application in financial risk. *Pakistan Journal of Statistics*, *26*, 293-311.

Ahsanullah, M., Shakil, M., & Kibria, B. M. (2016). Characterizations of continuous distributions by truncated moment. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, *15*(1), 316-331.

Akinsete, A. Famoye, F., & Lee, C. (2008). The beta-Pareto distribution. *A Journal of Theoretical and Applied Statistics*, *42*(6), 547-563.

Dodge, Y. (2003). *The Oxford Dictionary of Statistical Terms*. Oxford: The Oxford University Press.

Gutenberg, R., & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America, 34*(4), 185-188.

Hamasha M. M. (2017), A mathematical approximation of the left-sided truncated normal distribution using the cadwell approximation model. *Engineering, Technology & Applied Science Research, 7*(1), 1382-1386.

Hannon P. M. & Dahiya R. C. (1999), Estimation of parameters for the truncated exponential distribution. *Communications in Statistics-Theory and Methods, 28*(11), 2591-2612.

Iwueze I. S. (2007), Some implications of truncating the N(1, σ^2) distribution to the left at zero, *Journal of Applied Sciences*, *7*(2), 189-195.

Johnson, A. C. (2001), *On the truncated normal distribution: Characteristics of singly- and doubly-truncated populations of application in management science* (Ph.D. Dissertation) Stuart Graduate School of Business, Illinois Institute of Technology, Illinois.

Johnson, N. L., Kotz, S., & Balakrishnan, N. (1994). *Continuous Univariate Distributions*, Volume 1 (2nd Ed.). New York: Wiley-Interscience.

Jorda, P. (2010). Computer generation of random variables with Lindley or Poisson−Lindley distribution via the Lambert W function. *Mathematics and Computers in Simulation*, *81*, 851-859.

Lindley, D. V. (1985). 'Fiducial distributions and Bayes' theorem. *Journal of the Royal Staistical Society, Series B, 20*(1), 102-107.

R Core Team. (2016). *R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing*. Vienna, Austria. Retrieved October 10, 2016, from https://www.R-project.org/

Shanker, R., Sharma, S., & Shanker R. (2013). A two-parameter Lindley distribution for modeling waiting and survival times data. *Applied Mathematics, 4*(2), 363-368. doi: 10.4236/am.2013.42056

Singh, S. K., Singh, U., & Sharma, V. K. (2014). The truncated Lindley distribution: inference and application. *Journal of Statistics Applications & Probability, 3*(2), 219-228.

Sun X. D., Tao X. X & Liu C. Q. (2013), Finite fault modelling for the Wenchuan earthquake using hybrid slip model with truncated normal distributed source parameters. *Applied Mechanics and Materials*, 256-259, 2161-2167.

Zaninetti, L., & Ferraro, M. (2008). On the truncated Pareto distribution with applications. *Central European Journal of Physics*, *6*(1), 1-6. doi: 10.2478/s11534-008-0008-2

Zea, L. M., Silva, T. B., Bourguignon, M., & Santos, A. M. (2012). The beta exponentiated Pareto distribution with application to bladder cancer susceptibility. *International Journal of Statistics and Probability, 1*(2), 8-19. doi:10.5539/ijsp.v1n2p8

Zhange, T., & Xie, M. (2011). On the upper truncated Weibull distribution and its reliability implications. *Reliability Engineering & System Safety, 96*(1), 194-200. doi: 10.1016/ j.ress.2010.09.004

The Journal of Applied Science **Vol. 17 No. 1: 33-40 [2018]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2018.06.002
ISSN 1513-7805 (Printed in Thailand) ISSN 2586-9663 (Online)

Research Article

A preliminary observation of a *Trichodina* sp. (Ciliophora: Peritricha) on the skin of *Elysia singaporensis* (Sacoglossa, Plakobranchidae)

Pattanasuda Sirinupong[1]* and Somsak Buatip[1]

[1]Biology Division, Department of Science, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani 94000, Thailand
***E-mail**: pattanasuda.c@psu.ac.th
Received: 16/05/2018; Accepted: 12/06/2018

Abstract

The parasitic protozoa are a serious problem for aquatic animals both of natural and cultured condition. Therefore, the health checked investigation is necessitated. During the parasitological survey of sea slug species from Kranji mangrove forest of Singapore and tidal area of the mangrove forest in Bangtawa of Southern Thailand. Three species of sea slug (*Elysia singaporensis*, *E. bangtawaensis* and *E. leucolegnote*) were examined. A ciliate protozoan with flat disc shaped, 2 ciliary rows, denticulate ring presence. According to these characters, it was identifiled as *Trichodina* sp. This present study provides the first record of *Trichodina* sp. on the sea slug (*E. singaporensis*) host from Singapore.

Keywords: *Elysia singaporensis*, sea slug, SEM study, *Trichodina*

Introduction

Members of the genus *Trichodina* Ehrenberg, 1831, are ciliated protozoan ectoparasites classified in the phylum Protozoa, subclass Peritricha, order Peritrichida, suborder Mobilina, family Urceolariidae (after Kudo, 1977). They are regarded as an important biological indicator, whereby its density and prevalence can be used to show (water) pollution (Palm & Dobberstein, 1999).

Trichodinids are serious problem on fish because the sharp of their adhesive disc structure can lead to epithelial damage (Lom & Dykova, 1992). *Trichodina* can irritate the epithelial layer of cells in skin and gills of fish (Smith & Schwarz, 2009), and various species of *Trichodina* have been reported on gills of fish, such as *Trichodina tenuiformis* Stein, 1979 on *Cottus bairdi* (Girard, 1850) *Trichodina* sp. on *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) and *O. aureus* (Steindachner, 1864), *T. cancilae* Asmat, 2001 on *Xenentodon cancila* (Hamilton, 1822), *T. gulshae* Asmat et al., 2003 on *Mystus cavasisus* (Hamilton, 1822), *T. domergue* Wallengren, 1897 on *Neogobius melanostomus* Pallas 1814, and *T. gobii* Raabe, 1959 on *Solea aegyptiaca* Chabanaud, 1927 (see Qi & Heckmann, 1995; Hassan, 1999; Asmat, 2001; Asmat et al., 2003; Özer, 2003; Yemmem et al., 2010).

Besides fish, *Trichodina* has also been reported from invertebrate hosts. *Trichodina* was found on the exoskeleton of the blue crab *Callinectes amnicola* Rochebrune, 1883 (see Ekanem et al., 2013), and on gills of gastropods (e.g., *Patella* spp.) and bivalves (e.g., *Mya*

arenaria, Linnaeus, 1758) (see Uzmann & Stickney, 1954; Aksit et al., 2008). For sea slugs, there have been numerous reports of parasites such as copepods (see Jensen, 1987, 1990; Schrödl, 1997, 2002; Abad et al., 2011; Uyeno & Nagasawa, 2012), Turbellaria flatworms (Sudo et al., 2011) and sea spiders (Arnaud, 1978), but none of *Trichodina* thus far.

Therefore, the researchers chose to observe the presence of *Trichodina* on sea slug as it has a short lifespan parasite and can be found in the general aquatic animals. In addition, it also benefit for predicting the collection area environment. For this study three species of sea slugs, *Elysia bangtawaensis*, *E. leucolegnote*, and *E. singaporensis* were examined for the presence of *Trichodina*.

Materials and methods

Ten specimens of each species were gathered as *Elysia bangtawaensis* and *E. leucolegnote* were collected with forceps from a waterway in the tidal area of a mangrove forest around the Pattani Bay, Thailand (06^0 53' 139" N, 101^0 16' 444" E). While, *E. singaporensis* was collected with forceps from Kranji mangrove forest, north region of Singapore (1^o 26' 47" N, 103^o 43' 57" E). (Figure 1) and kept in a bottle to be studied at the Zoology Lab of the Biology Division of the Department of Science, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani Campus. The specimens were narcotized in 7% $MgCl_2$ for 1 hour. They were preserved in seawater with 10% formalin before being transferred to a Petri dish with black wax layer. Fine needles and spines of cactus were used for fixing them under a stereo microscope. Next, *Trichodina* were observed from three *Elysia* under a stereo microscope and the *Trichodina* were only found on the skin of *E. singaporensis*. Ten trichodinids were transferred onto a slide for morphological study under an Olympus light microscope (BX 51), and photographs taken with attached Moticam 2000. As all measurements of *Trichodina* sp. were conducted according to the suggestion of Yemmen et al. (2011).

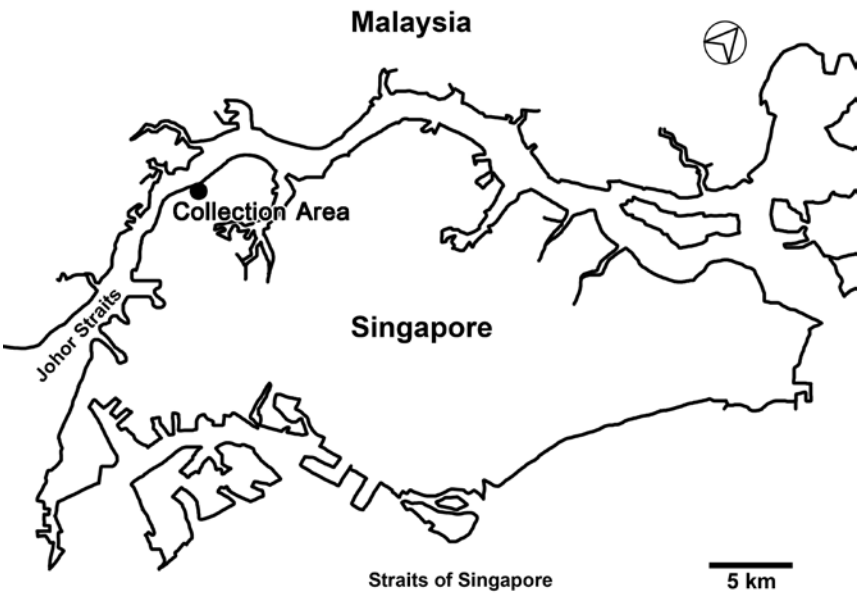


Figure 1. Study site in Singapore. Scale bars= 5 km (Line drawing by: Somsak Buatip)

For the electron microscope scanning, the skin of *E. singaporensis* was examined and soaked in 2.5% glutaraldehyde in 0.1 M Phosphate buffer saline (PBS), pH 7.8 at 4 ^{0}C for 4 hours before being fixed with 1% osmium tetroxide in 0.1M PBS, pH 7.4 at 4 ^{0}C for 2 hours. It was then washed off with 0.1M PBS pH 7.4 at 4 ^{0}C 3 times, each 5 mins., and dehydrated with ethyl alcohol of 70%, 80%, 90%, 95% (twice) and 100% (twice) for 30 mins., respectively. Next, it was dehydrated with the Critical-Point-Drying machine. A sample was put on a stub and coated with heavy metal before being put under an LEO scanning electron microscope (series 1450VP) and photographed.

Results

In this study, *Trichodina* was found on *Elysia singaporensis* only. In which, it confirmed from light microscopic and scanning electron microscopic analysis. The present study is the first to report on trichodinid existence on the skin of sea slug, especially in Genus *Elysia* as *E. singaporensis*. Detailed microscopic morphology of *Trichodina* is figured.

Electron microscope scanning clearly shows *Trichodina* attached to the epithelial layer of cells on the body of *E. singaporensis* on dorsal side, covering the head, pericardium and parapodium, as well as ventral side on the skin of its body (Figure 2). Interestingly, this protist was found on almost the whole body of the sea slug except for the sole. This fact that this body part is used for locomotion may explain the absence of the protist on this particular spot. Additionally, SEM analysis also shows the button-shape cell body of *Trichodina*. The picture reveals only the structure of cilia which is called locomotor ciliary wreath as a part of aboral ciliary complex (basal ciliary ring, locomotor ciliary wreath and marginal ciliary ring). The picture of *Trichodina* also shows the velum, which is a thick structure covering the base of the cilia of the aboral ciliary complex and separating the aboral ciliary complex from adoral ciliary spiral (Figure 3).

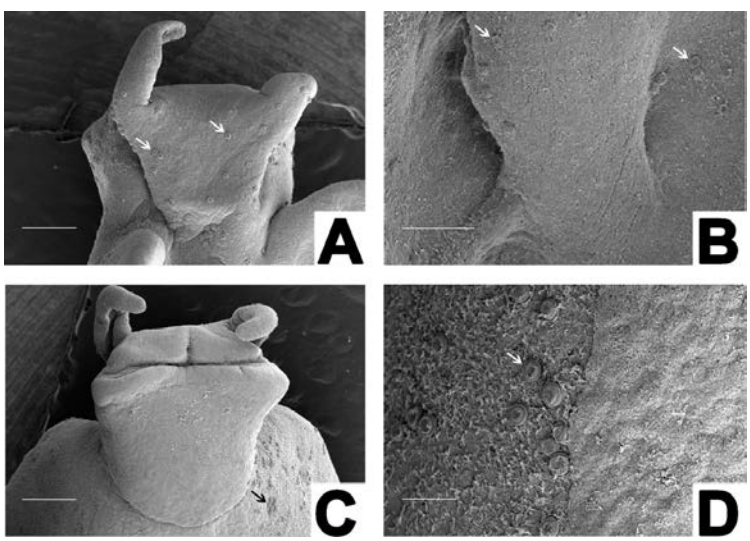


Figure 2. *Trichodina* on *Elysia singaporensis* (a few of them indicated with arrows). A, on dorsal side of head; B, on dorsal side of pericardium; C, on ventral side of its body; D, on dorsal side of parapodium. Scale bars= 400 µm [A-B], 100 µm [C], 200 µm [D] (Photographs by: Pattanasuda Sirinupong and Somsak Buatip [A-D])

 doi: 10.14416/j.appsci.2018.06.002

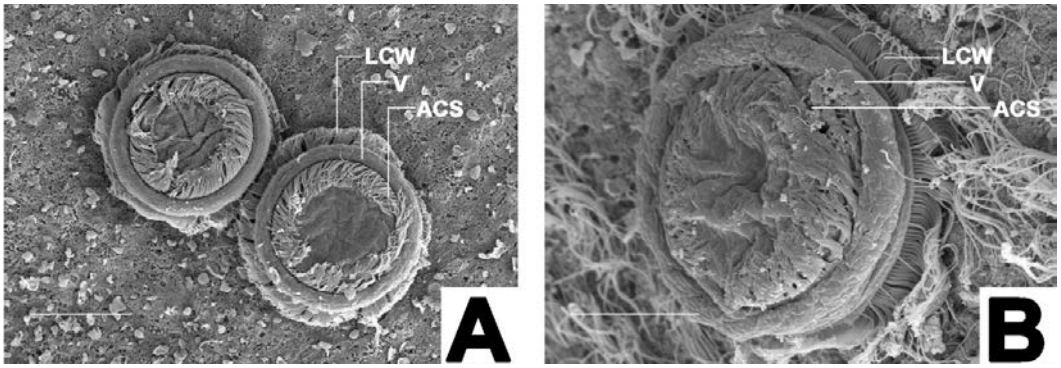


Figure 3. Scanning electron micrograph (SEM) imaging showing enlarged image of *Trichodina* on the skin of *Elysia singaporensis*. A, oral view; B, lateral view, Scale bars= 20 µm [A], 10 µm [B]. Abbreviations: ACS: adoral ciliary spiral; LCW: locomotor ciliary wreath; V: velum. (Photographs by: Pattanasuda Sirinupong and Somsak Buatip [A-B])

Light microscope shows that ten specimens of *Trichodina* between 47.73-58.76 µm (db), and the adhesive disc concave (da) was 38.24-47.73 µm in diameter. The denticulate ring was 33.38-33.62 µm in diameter (ddr) while the average denticle length were between 5.88-6.53 µm (dl). The average central circle diameter was between 17.54-18.40 µm (dcc). The central circle was dotted with small, irregularly rounded particles (Figure 4).

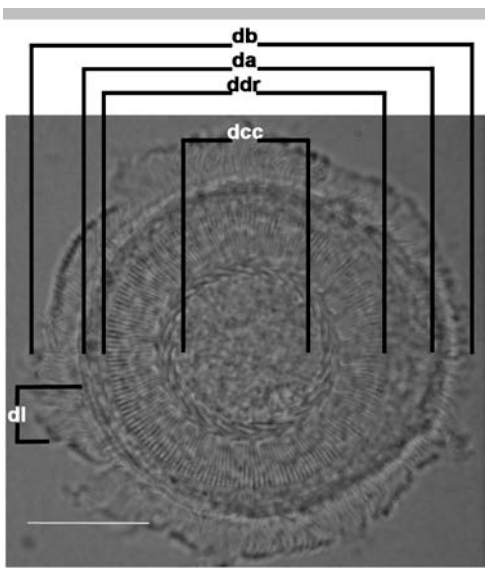


Figure 4. Photomicrograph of adhesive disc of *Trichodina* sp. from the skin of *Elysia singaporensis*. Scale bar= 15 µm, Abbreviations: da: diameter of the adhesive disc; db: diameter of body; dcc: central circle diameter; ddr: diameter of denticle ring; dl: denticle length (Photograph by: Pattanasuda Sirinupong and Somsak Buatip)

Discussion

The presence of *Trichodina* on *Elysia singaporensis* is presumed to be due to the fact that the area is suitable for their growth because the area is an abandoned shrimp pond (Swennen, 2011) or prawn aquaculture site before being declared a protected nature reserve (Cuong et al., 2005). Also, this mangrove forest is surrounded by industrial sites and residences, and it is likely that pollution from these communities has an impact on the water quality around this mangrove patch. This assumption is in accordance with the study of Cuong et al. (2005) who studied heavy metal contamination in Sungei Buloh Mangrove of Singapore. Their association of the discovery of such heavy metals as As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn with the effect on the sea slug in the area agrees with the report of Mackenzie (2008) that this parasite could be an indicator of pollution in the marine environment. Khan et al. (1994) also stated that *Trichodina* might serve as an indicator of pollution, and reported that the increase of infection rate of *Trichodina* spp. In *Myoxocephalus* spp. is proportionate to crude oil, pulp, and paper mill effluent. Khan & Thulin (1991) revealed in their study of ectoparasite of aquatic animals, especially of fish, that numbers of ectoparasites such as trichodinid ciliates and monogeneans increased significantly on the gills following exposure to a polluted environments.

Trichodina is an ectoparasite which temporarily attaches to its host, and our examination under the Scanning Electron Microscope revealed that the parasite is quite abundant on the dorsal side of its host (head, pericardium, and parapodium) as well as the ventral side or the skin of its body, except for the foot area. Whereas, in other gastropods (e.g., *Patella* spp.), *Trichodina* was only observed in its gill area (see Aksit et al., 2008). The density of *Trichodina* on the host may irritate the skin and, consequently, injure the host. Lom (1973), who studied *Trichodinella epizootica* (Raabe, 1950) on fish reported high densities of the parasites' cilia into the gill surfaces and injured the fish. However, in this study, we did not found *Trichodina* on the skin of two *Elysia* that collected from the mangrove forest of Thailand. It is possible that the study area as found *E. bangtawaensis* and *E. leucolegnote* is situated far away from the industrial sites or pollution source. Therefore, it may be not suitable for the survival of *Trichodina*. Also, in accordance with the previous study of Lom & Dykova (1992) who revealed that the ciliated protozoa like to live in greatly polluted water.

Conclusion

The present study is possibly the first report of the discovery of *Trichodina* on a sea slug, especially, on *Elysia singaporensis* collected from Kranji mangrove forest, north region of Singapore in Singapore. Because *E. singaporensis* is a very small species (around 21-30 mm), it is difficult to notify if its skin has been damaged. Further studies are needed to provide more information on the possible detrimental effects of *Trichodina* on sea slugs.

Acknowledgements

We would like to express our sincere gratitude to thank Cornelis (Kees) Swennen for our specimens, suggestions, discussion and comments as well. Furthermore, we are extremely thankful to Tan Siong Kiat from National University of Singapore for suggestions and comments. Thankfulness to the Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University as the place for doing our research.

References

Abad, M., Diaz-Agras, G. & Urgorri, V. (2011). Anatomical description and biology of the splanchnotrophid *Splanchnotrophus gracilis* Hancock & Norman, 1863 found parasitizing the Doridacean Nudibranch *Trapania tartanella* Ihering, 1886 at the Ría de Ferrol (Galicia, NW Iberian Peninsula). *Thalassas, An International Journal of Marine Sciences*, Spain, *27*(2), 49-60.

Akşit, D., Falakali-Mutaf, B., Göçmen, B. & Gürelli, G. (2008). A preliminary observations on *Trichodina* sp. (Ciliophora: Peritricha) on the gills of limpets (*Patella* spp.) in Antalya (Turkey). *North-Western Journal of Zoology*, *4*(2), 295-299.

Arnaud, F. (1978). A new species of *Ascorhynchus (*Pycnogonida) found parasitic on an opisthobranchiate mollusk. *Zoological Journal of the Linnean Society*, *63*, 99-104. https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.1978.tb02092.x

Asmat, G. S. M. (2001). *Trichodina cancilae* sp. n. (Mobilina: Trichodinidae) from the gills of a freshwater gar, *Xenentodon cancila* (Hamilton) (Belonidae). *Acta Protozoologica*, *40*(2), 141-146.

Asmat, G. S. M., Kibria, M. M. & Naher, L. (2003). *Trichodina gulshae* sp. n. (Ciliophora:Trichodinidae) from the Gangetic Mystus, *Mystus cavasius* (Hamilton-Buchanan, 1822) (Bagridae) in Chittagong. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, *6*(18), 1608-1611.

Chabanaud, P. (1927). Les soles de l' Atlantique oriental nord et des mers adjacentes. *Bulletin de l'Institut Oceanographique de Monaco*, *488*, 1-67.

Cuong, D. T., Bayen, S., Wurl, O., Subramanian, K., Wong, K. K., Sivasothi, N. & Obbard, J. P. (2005). Heavy metal contamination in mangrove habitats of Singapore. *Marine Pollution Bulletin*, *50*(12), 1732-1738. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.09.008

Ehrenberg, C. G. (1831). *Symbolae physicae seu icones et descriptions animalium evertebratorum sepositis insectis quae ex ianere per Africam Borealem et Asiam Occidentalem, novae autUlustratae redierunt*. Decas 1 Mollusca, vol. 2. (testo). Berlin: Officina Academica (Mittler).

Ekanem, A. P., Eyo, V. O., Ekpo, I. E. & Bassey, B. O. (2013). Parasites of Blue Crab (*Callinectes amnicola*) in the Cross River Estuary, Nigeria. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, *1*(1), 18-21.

Girard, C. (1850). Contributions to the natural history of the freshwater fishes of America. I. Amonograph of the cottids. *Smithsonian Institution Contribution to Knowledge*, *3*, 1-80.

Hassan, M. A. H. (1999). Trichodiniasis in farmed freshwater *Tilapia* in Eastern Saudi Arabia. *Journal of King Abdulaziz University, Marine Science*, *11*, 3-17.

Hamilton, F. (1822). *An account of the fishes found in the river Ganges and its branches*. London, England: Edinburgh Publisher.

Jensen, K. R. (1987). *Ismaila monstrosa* Bergh (Copepoda: Splanchnotrophidae) found parasitizing in *Ercolania funerea* (Costa) (Gastropoda: Ascoglossa) *Ophelia*, *28*(1), 75-84. doi: 10.1080/00785326.1987.10430805

Jensen, K. R. (1990). *Splanchnotrophus elysiae n. sp. (Copepoda; Splanchnotrophidae) found parasitizing in the sacoglossan opisthobranch Elysia australis (Quoy and Gaymard, 1832)*. pp. 291-296. In Proceedings of the Third International Marine Biological Workshop: the Marine Flora and Fauna of Albany, (no date of conference), Western Australia. Western Australian Museum, Perth.

Khan, R. A. & Thulin, J. (1991). Influence of pollution on parasites of aquatic animals. *Advances in Parasitology*, *30*, 201-238. https://doi.org/10.1016/S0065-308X(08)60309-7

Khan, R. A., Barker, D. E., Williams-Ryan, K. & Hooper, R. G. (1994). Influence of crude oil and pulp and paper mill effluent on mixed infections of *Trichodina cottidarium* and *T. saintjohnsi* (Ciliophora) parasitizing *Myoxocephalus octodecemspinosus* and *M. scorpius*. *Canadian Journal of Zoology*, *72*(2), 247-251. https://doi.org/10.1139/z94

Kudo, R. R. (1977). *Protozoology* (5th ed.). Illinois, USA: Charles, C. Thomas Publisher.

Linnaeus, C. (1758). *Systema Naturae, Ed. X.; Systema naturae per regna trianaturae, secundum classes, ordines, genera, species, cum characteribus, differentiis, synonymis, locis. Tomus I. Editio decima, reformata*. (10th ed.). Stockholm, Sweden: Holmiæ. (Salvius).

Lom, J. (1973). The adhesive disc of *Trichodinella epizootica*-ultrastructure and injury to the host tissue. *Folia Parasitologica*, *20*, 193-202.

Lom, J. & Dykova, I. (1992). *Protozoan parasites of fishes. Developments in Aquaculture and Fisheries Science 26* (1st ed.). Amsterdam, Netherlands: Elsevier Publisher.

Mackenzie, K. (2008). *Marine parasites as indicators of pollution*. pp. 27-32. In Proceedings of the International Workshop on Marine Parasitology: Applied Aspects of Marine Parasitology, 21-24 May 2006, Horta, Portugal.

Özer, A. (2003). *Trichodina domerguei* Wallengren, 1897 (Ciliophora: Peritrichia) Infestations on the Round Goby, *Neogobius melanostomus* Pallas, 1811 in Relation to Seasonality and Host Factors. *Comparative Parasitology*, *70*(2), 132-135. https://doi.org/10.1654/4073

Pallas, P. S. (1814). *Zoographia Rossa-Asiatica, sistens omnium anmalium in extensor Imperio Rossico et adjacentibus maribus observatorum recensionem, domicilia, mores, et descriptions anatomen atque icons plurimorum* (no ed.). Petropoli, Brazil: Academia Scientiarum impress.

Palm, H. W. & Dobberstein, R. C. (1999). Occurence of trichodinid ciliates (Peritricha: Urceolariidae) in the Kiel Fjord, Baltic Sea, and its possible use as a biological indicator. *Parasitology Research*, *85*, 726-732.

Qi, Y. & Heckmann, R. A. (1995). Morphological and host-symbiont studies of *Trichodina tenuiformis* and *Apiosoma camapanulatum* infesting Mottled Sculpin (Cottus Bairdi) from provo River, UTAH. *Great Basin Naturalist*, *55*, 258-266.

Raabe, Z. (1950). Uwagi o Urceolariidae (Ciliata-Peritricha) skrzel ryb. Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska Lubin. *Sectio DD Medicina et Veterinaria*, *5*, 292-310 (in Polish, with French and Russian summary)

Raabe, Z. (1959). Urceolariidae of gills of Gobiidae and Cottidae from Baltica Sea. *Acta Parasitologica Polonica*, *7*, 441-452.

Rochebrune, A. T. de. (1883). Diagnoses d' Arthropodes nouveaux propres á la Sénégambie. *Bulletin de la Société Philomathique de Paris Series*, *7*(7), 167-182.

Schrödl, M. (1997). Aspects of Chilean nudibranch biology: effects of splanchnotrophid copepod parasitism on *Flabellina* sp. (Mollusca: Nudribranchia). *Opisthobranch Newsletter*, *23*, 45-47.

Schrödl, M. (2002). Heavy infestation by endoparasitic copepod crustaceans (Poecilostomatoida: Splanchnotrophidae) in Chilean opisthobranch gastropods, with aspects of splanchnotrophid evolution. *Organisms Diversity & Evolution*, *2*(1), 19-26.

Smith, S. & Schwarz, M. (2009). Commercial fish and shellfish technology fact sheet dealing with Trichodina and Trichodina-like species. *Virginia Cooperative Extension Publication*, no. 600-205.

Stein, G. A. (1979). Variability of the ciliates of the family Urceolariidae (Peritricha, Mobilina) in the Baikal Lake. *Journal of Protozoology*. *26*(3) (Part 1, Programs and Abstracts), 36A-37A (abstract). https://doi.org/10.1111/j.1550-7408.1979.tb04631.x

Steindachner, F. (1864). Ichthyologische Notizen. Anzeiger der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. *Mathematisch-Naturwissenschaftliche Classe*, *7*(5), 37-38.

Sudo, K., Hirano, Y. J. & Hirano, Y. M. (2011). Newly discovered parasitic Turbellaria of opisthobranch gastropods. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, *91*(5), 1123-1133. https://doi.org/10.1017/S0025315410001761

Swennen, C. (2011). Large mangrove-dwelling *Elysia* species in Asia, with descriptions of two new species (Gastropoda: Opisthobranchia: sacoglossa*). The Raffles Bulletin of Zoology*, *59*(1), 29-37.

Uyeno, D. & Nagasawa, K. (2012). Four new species of splanchnotrophid copepods (Poecilostomatoida) parasitic on doridacean nudibranchs (Gastropoda, Opistobranchia) from Japan, with proposition of one new genus. *Zookeys*, *247*, 1-29. doi: 10.3897/zookeys.247.3698

Uzmann, J. R. & Stickney, A. P. (1954). *Trichodina myicola* n. sp., a Peritrichous Ciliate from the Marine Bivalve *Mya arenaria* L. *The Journal of Protozoology*, *1*, 149-155.

Wallengren, H. (1897). ZurKenntnis der Gattung Trichodina Ehrbg. *Biologisches Zentralblatt*,. *17*: 55-65.

Yemmen, C., Quilichini, Y., Ktari, M. H., Marchand, B. & Bahri, S. (2010). Morphological, ecological and histopathological studies of *Trichodina gobii* Raabe, 1959 (Ciliophora: Peritrichida) infecting the gills of *Solea aegyptiaca*. *Protistology*, *6*(4), 258-263.

Yemmen, C., Ktari, M. H., & Bahri, S. (2011). Seasonality and histopathology of *Trichodina puytoraci* Lom, 1962, a parasite of flathead mullet (*Mugil cephalus*) from Tunisia. Acta Adriatica, *52*(1), 15-20.

The Journal of Applied Science **Vol. 17 No. 1: 41-50 [2018]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2018.03.001
ISSN 1513-7805 (Printed in Thailand) ISSN 2586-9663 (Online)

Research Article

การลดการสูญเสียจากการปนเปื้อนโลหะในผลิตภัณฑ์ทูน่าสเปรดซาวน์ครีม

Loss reduction of metal contamination in sour cream - tuna spread product

กานติมา เลี้ยงหล่ำ[1] นภสร อุลิต[2] ลูกนก เทพันดุง[2] อาทรทิพย์ โนราช[2] เบญจวรรณ ธรรมธนารักษ์[1] และ วิไล รังสาดทอง[1]*

Kantima Leanglum[1], Noppasorn Oulid[2], Looknok Teapandoong[2], Artornthip Norach[2], Benjawan Thumthanaruk[1] and Vilai Rungsardthong[1]*

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาหารและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ ศูนย์วิจัยด้านอาหารและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

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

[2]บริษัทไทยยูเนี่ยนกรุ๊ป จำกัด (มหาชน) โรงงาน M&B 73/3 ถนนพระราม 2 อำเภอเมืองสมุทรสาคร จังหวัดสมุทรสาคร 74000

[2]Thai Union Group PLC, Factory M&B, 73/3 Rama 2 Road, Mueang Samut Sakhon, Samut Sakhon 74000

***E-mail**: vilai.r@sci.kmutnb.ac.th

Received: 17/10/2017; Accepted: 28/03/2018

บทคัดย่อ

จากการศึกษาขั้นตอนและกระบวนการผลิตสินค้าทูน่าสเปรดซาวน์ครีม พบการปนเปื้อนของโลหะในผลิตภัณฑ์สุดท้าย ลักษณะของโลหะที่พบมี 2 แบบ คือ เศษโลหะจากกระป๋องและสนิมเหล็ก การวิเคราะห์สาเหตุพบว่าเกิดจากใบมีดที่ใช้เปิดกระป๋องขาดความคมและตัวกดใบมีดหลวม จากการทดลองเปลี่ยนใบมีดใหม่ เปลี่ยนวัสดุภายในของตัวล็อคใบมีดเป็นสแตนเลสและปรับให้ตัวล็อคใบมีดแน่นขึ้น และมีการปรับปรุงวิธีการใช้งานเครื่องเปิดกระป๋อง ผลการดำเนินการปรับปรุงพบว่า สามารถลดของเสียที่เกิดจากการปนเปื้อนเศษโลหะจากกระป๋องได้เป็น 0% และคาดว่าจะทำให้สามารถลดจำนวนพนักงานและค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียได้รวมกันเฉลี่ย 153,000 บาท/ปี ส่วนปัญหาการพบสนิมเหล็กในผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีสาเหตุจากกระบวนการตรวจสอบเนื้อปลา

 doi: 10.14416/j.appsci.2018.03.001

ทูน่าก่อนการคลุกผสม เมื่อปรับปรุงการตรวจสอบเนื้อปลาทูน่าเป็นแบบ 2 ขั้นตอน คือ ใช้แท่งแม่เหล็กกลิ้งบนเนื้อปลาทูน่าก่อนแล้วจึงนำเนื้อปลาทูน่ามาผ่านเครื่องตรวจจับโลหะ สามารถขจัดปัญหาการพบสนิมเหล็กในผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นศูนย์ (0%) และคาดว่าทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการต้องทำลายสินค้าคิดเป็น 13,000 บาท/ปี ผลการปรับปรุงนี้สามารถเพิ่มความเชื่อมั่นให้ลูกค้าและเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตให้ดียิ่งขึ้น

คำสำคัญ: : ทูน่าสเปรดซาวน์ครีม, โลหะจากกระป๋อง, สนิมเหล็ก, ใบมีด, การลดการสูญเสีย

Abstract

The study of sour cream - tuna spread production indicated the problem of metal contamination in final products after passing through the metal detector. Two types of metal were found: metal scrap from steel cans and steel rust. The objective of the project was to decrease the metal contamination to zero waste (0%). The main cause of metal scrap contamination came from the can opener which lacked of sharpness and had loosened blade cover resulting in inefficient cutting in a single round. Lack of manual for can – opener led to inconsistent usage. Changing blade and the material in the locking blade to stainless steel and adjusting the lever blade resulted in 0% of the contaminated scrap metal from cans. Preparation of can opening instruction for standard usage could reduce the required number of employees and costs for waste management totally around 153,000 Baht/year. The rust problem found in the final product was mainly from inappropriate inspection before mixing the tuna mixture. Tuna inspection was improved into 2 steps: using the magnetic bars rolled on tuna and passing through the metal detector. The results showed that stainless steel was not found in the final product after the improvement (zero waste) for the management. Cost reduction was equivalent to 13,000 Baht/year. The improvement helped increase the customer reliability and enhanced the production efficiency.

Keywords: sour cream - tuna spread, metal scrap from steel cans, steel rust, can opener, loss reduction

บทนำ

การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมและโครงสร้างประชากรรวมทั้งวิถีการดำเนินชีวิตประจำวันส่งผลให้ผู้บริโภคส่วนใหญ่หันไปบริโภคอาหารกึ่งสำเร็จรูป อาหารพร้อมปรุงและอาหารพร้อมรับประทาน ซึ่งมีจำหน่ายในร้านสะดวกซื้อต่าง ๆ มากขึ้น (National Food Institute, 2015) บริษัทไทยยูเนี่ยน กรุ๊ป จำกัด (มหาชน) จำหน่ายผลิตภัณฑ์ทูน่าสเปรดซาวน์ครีมซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคสูง มียอดการสั่งซื้อจากลูกค้าอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลการผลิตจากฝ่ายผลิตอาหารและเบเกอรี่ ในช่วง 4 เดือน ระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2558 พบว่าบริษัทผลิตทูน่าสเปรดซาวน์ครีมโดยเฉลี่ย 168,156 กิโลกรัม/ปี แต่ยังมีปัญหาการปนเปื้อนเศษโลหะใน

 doi: 10.14416/j.appsci.2018.03.001

ผลิตภัณฑ์ทูน่าสเปรดซาวน์เป็นเศษโลหะเฉลี่ย 39 ชิ้นต่อปี บริษัทจึงมีมาตรการต่าง ๆ เพื่อกำจัดเศษโลหะและทำให้ผลิตภัณฑ์ปราศจากการปนเปื้อน เช่น การตรวจสอบเนื้อปลาทูน่าก่อนการคลุกผสมด้วยการใช้แท่งแม่เหล็กหลายครั้ง การดำเนินการดังกล่าวต้องใช้ค่าใช้จ่ายกว่า 21 ล้านบาท/ปี ดังนั้นงานวิจัยนี้ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในโครงการสหกิจศึกษาจึงเลือกปัญหาเศษโลหะในผลิตภัณฑ์มาดำเนินการวิเคราะห์ ทดลองและวิจัยเพื่อหาวิธีการปรับปรุงแก้ไข เพื่อลดการสูญเสียที่เกิดขึ้น รวมทั้งกำหนดมาตรฐานวิธีการทำงานต่าง ๆ เพิ่มเติมเพื่อทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการโดยยังคงลดการปนเปื้อนดังกล่าวให้เป็น 0 ในผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. วัสดุอุปกรณ์ ได้แก่

1.1 ปลาทูน่ากระป๋องขนาด 603×408 และขนาด 307×113 เนื่องจากบริษัทผู้ผลิตปลาทูน่ากระป๋องจัดส่งปลาทูน่าขนาดกระป๋องใหญ่สำหรับส่งให้โรงงานอุตสาหกรรม แต่ยังมีการนำทูน่ากระป๋องเล็กมาใช้เนื่องจากพบปัญหาการปนเปื้อนเศษโลหะในทูน่ากระป๋องใหญ่

1.2 เครื่องเปิดกระป๋องรหัส 4GOL3002 ใช้กับปลาทูน่ากระป๋องใหญ่เท่านั้น สำหรับกระป๋องเล็กจะใช้มือดึงเพื่อเปิดกระป๋องโดยเป็นกระป๋องแบบ easy open

1.3 เครื่องตรวจจับโลหะ รหัส 4GMD3031

1.4 แท่งแม่เหล็ก เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร

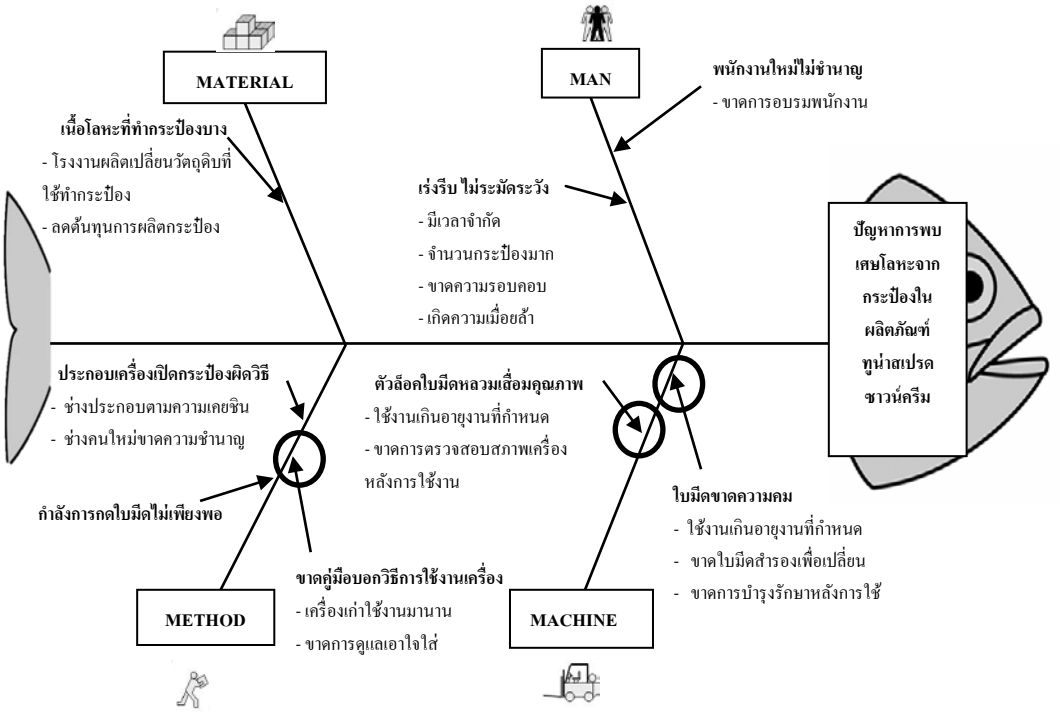
1.5 แป้งข้าวโพดดัดแปร Ultra-tex 4

2. วิธีการทดลอง

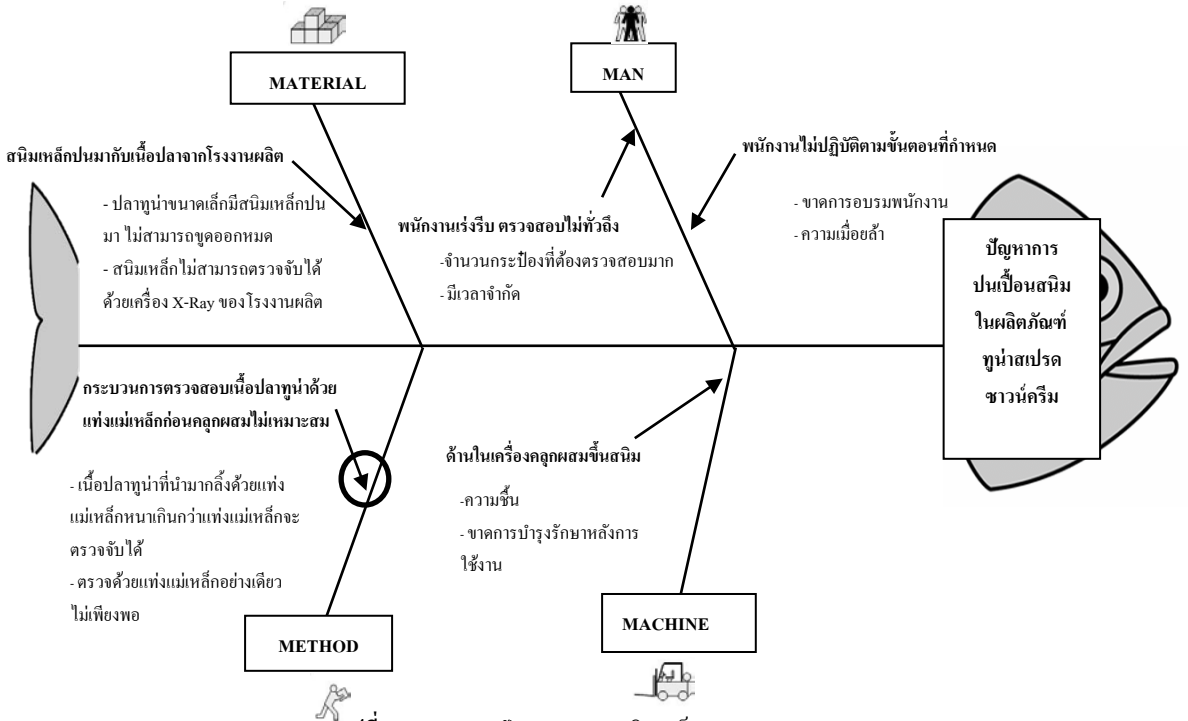
การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

ขั้นตอนการผลิตทูน่าสเปรดซาวน์ครีมเริ่มจากการนำปลาทูน่าจากกระป๋องขนาด 603×408 (ผลิตจากปลาทูน่าพันธุ์ครีบเหลืองเป็นหลัก) หรือขนาด 307×113 (ผลิตจากปลาทูน่าพันธุ์ท้องแถบเป็นหลัก) ที่ผ่านกระบวนการตรวจสอบโลหะแล้วนำมาบี้ให้ได้เนื้อปลาทูน่าขนาด 1-3 เซนติเมตร ใส่ในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิดแล้วจัดเก็บในห้องแช่เย็นที่อุณหภูมิ 0-4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3-5 ชั่วโมง โดยส่วนผสมทั้งหมดจะต้องมีอุณหภูมิใจกลาง $\leq$ 10 องศาเซลเซียส (Thai Union Group Public Company Limited, 2014) ใส่ในเครื่องตีผสมแล้วเติมแป้งดัดแปรลงไป จากการศึกษาการผลิตโดยใช้หลักการ 5 G (Kobata, 1999) พบว่าปัญหาเศษโลหะเกิดขึ้นในขั้นตอนการเตรียมเนื้อปลาทูน่าและขั้นตอนการนำสินค้าผ่านเข้าเครื่องตรวจจับโลหะ ของเสียที่พบส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเศษโลหะสีดำขนาดตั้งแต่ 0.2-0.5 เซนติเมตร เมื่อวิเคราะห์สาเหตุการเกิดปัญหาด้วยแผนภาพก้างปลา (Ishikawa, 1990) ซึ่งนิยมใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาดังเช่น การค้นหาสาเหตุการเกิดซาลาเปาหน้าเป็นรูของ Kowong (2015) สามารถแบ่งสาเหตุหลักเป็น 2 ด้าน คือ ปัญหาเศษโลหะจากกระป๋อง (รูปที่ 1) และปัญหาสนิมเหล็กในผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 2)

doi: 10.14416/j.appsci.2018.03.001



รูปที่ 1. สาเหตุของปัญหาการพบเศษโลหะจากกระป๋อง



รูปที่ 2. สาเหตุของปัญหาการพบสนิมเหล็ก

ปัญหาการปนเปื้อนเศษโลหะจากกระป๋อง

สาเหตุด้านเครื่องจักร (machine) พบว่าใบมีดขาดความคมอาจเป็นเพราะมีจำนวนกระป๋องที่ต้องเปิดจำนวนมากและต้องใช้เวลาในการเปิดติดต่อกันเป็นเวลานานหรือใช้งานเกินกำหนด และยังมีสาเหตุจากตัวล็อคใบมีดหลวมซึ่งอาจเกิดจากการใช้งานมาเป็นเวลายาวนาน ทำให้เกลียวที่ล็อคใบมีดหลวม หรืออาจเกิดจากการปรับตั้งเครื่อง ในส่วนของสาเหตุด้านวิธีการ (method) อาจเกิดจากพนักงานแต่ละคนเปิดกระป๋องด้วยวิธีที่แตกต่างกันตามความถนัด บางวิธีอาจไม่เหมาะสมและเป็นสาเหตุให้เกิดเศษโลหะปนเปื้อน

ปัญหาการปนเปื้อนสนิมเหล็ก

สาเหตุด้านวิธีการ พบว่าปัญหาสนิมเหล็กในกรณีการใช้ปลาทูน่ากระป๋องขนาด 307×113 แต่ไม่พบปัญหานี้ถ้าใช้ปลาทูน่ากระป๋องขนาดใหญ่ ทั้งนี้ อาจเกิดจากการตรวจสอบสนิมเหล็กด้วยแท่งแม่เหล็กยังไม่สมบูรณ์เพียงพอ รวมทั้งขาดการตวงวัดปริมาณเนื้อปลาทูน่าที่นำมากลิ้งด้วยแท่งแม่เหล็กในแต่ละครั้งให้แน่นอน เนื่องจากหากปริมาณเนื้อปลาแตกต่างกันในแต่ละถาดอาจส่งผลต่อความสามารถในการตรวจจับโลหะของแท่งแม่เหล็ก การปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดของเสียสามารถนำหลักการที่เรียกว่าวงล้อ PDCA มาช่วยในการดำเนินการให้มีประสิทธิภาพและเพิ่มความมั่นใจได้ (Hosotani, 2009; Ishikawa, 1985) วงล้อดังกล่าวประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 การวางแผนงาน (plan) ขั้นตอนที่ 2 การลงมือปฏิบัติตามแผนงาน (do) ขั้นตอนที่ 3 การตรวจสอบผลการปฏิบัติการนั้น (check) และขั้นตอนที่ 4 การแก้ไขข้อบกพร่อง (act)

แนวทางการแก้ปัญหา

ผู้วิจัยได้ดำเนินการแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนจากเศษโลหะโดยใช้หลักการ 5W1H ในเรื่องใบมีดขาดความคม โดยการใช้ใบมีดใหม่ การปรับปรุงตัวล็อค แล้วจึงตรวจสอบผลการทำงานดังนี้ ตรวจนับจำนวนเศษโลหะจากกระป๋องที่พบจากการใช้ใบมีดเก่าเปรียบเทียบกับผลที่ได้หลังการใช้ใบมีดใหม่ ตรวจสอบจำนวนเศษโลหะจากกระป๋องจากการตัดไม่ตรงรอยเดิม เปรียบเทียบจำนวนโลหะกระป๋องที่พบก่อนและหลังการเปลี่ยนบูทภายในตัวล็อคและปรับตัวล็อคให้แน่นมากขึ้น รวมทั้งมีการปรับปรุงคู่มือโดยมีการระบุวิธีการใช้เครื่องเปิดกระป๋องให้ละเอียดยิ่งขึ้นและมีการอบรมพนักงานเรื่องวิธีการทำงาน

สำหรับการแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนสนิมเหล็ก ได้มีการเปรียบเทียบจำนวนโลหะที่พบในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการตรวจสอบเนื้อปลาทูน่าด้วยแท่งแม่เหล็กแบบเดิมกับวิธีการตรวจสอบแบบที่ปรับปรุงใหม่ โดยวิธีใหม่ คือ เพิ่มการกลับเนื้อปลาทูน่าที่อยู่ด้านล่างของถาดขึ้นมาด้านบน แล้วกลิ้งด้วยแท่งแม่เหล็กอีกครั้ง การทดลองกับเนื้อปลาทูน่า 500 กรัม ทั้งหมด 5 ซ้ำ ศึกษาปริมาณเนื้อปลาที่เหมาะสมในการกลิ้งด้วยแท่งแม่เหล็กและศึกษาการตรวจสอบสนิมเหล็กแบบ 2 ขั้นตอน คือเนื้อปลาที่กลิ้งด้วยแท่งแม่เหล็กอย่างเดียว ใช้ปริมาณเนื้อปลา 500 กรัม เปรียบเทียบกับเนื้อปลาที่กลิ้งแท่งด้วยแม่เหล็กแล้วนำไปผ่านเครื่องตรวจจับโลหะก่อนการคลุกผสม บันทึกจำนวน

 doi: 10.14416/j.appsci.2018.03.001

สนิมเหล็กที่ตรวจจับได้ในแต่ละขั้นตอน ปริมาณเนื้อปลาทูน่าแต่ละถาดเท่ากับ 500 กรัม ทดลองทั้งหมด 5 ซ้ำ แต่ละซ้ำจะใช้เนื้อปลาทูน่าในการทดสอบ 120 กระป๋อง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ด้านการปนเปื้อนเศษโลหะจากกระป๋อง

1. การปรับปรุงใบมีดขาดความคมและตัวล็อคใบมีดหลวม

จากการทดลองใช้ใบมีดเก่า (ที่ใช้ประจำ) ในการเปิดกระป๋องปลาทูน่าขนาด 603×408 พบว่ามีค่าเฉลี่ยการปนเปื้อนเศษโลหะจากกระป๋อง 0.15±0.06 (%) การใช้ใบมีดใหม่ที่ยังไม่ได้ผ่านการใช้งานมาก่อนและเปลี่ยนตัวบูทด้านในตัวล็อคเป็นสแตนเลสและปรับตัวล็อคที่ปรับให้แน่นขึ้นไม่มีช่องว่างระหว่างตัวล็อคใบมีดกับตัวกดใบมีดดังตารางที่ 1 มีผลทำให้ไม่พบของเสียที่เกิดจากเศษโลหะปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ (0 %) พนักงานสามารถควบคุมระดับของใบมีดให้อยู่ในระดับเดิมได้เนื่องจากตัวล็อคใบมีดแน่นขึ้น ทำให้ใบมีดไม่ขยับขึ้นหรือลงได้อีก ซึ่งของเสียที่เกิดขึ้นลดลงไปได้ 100 % จากการเปลี่ยนใบมีดและตัวล็อคใหม่ ดังนั้นสมมติฐานนี้จึงเป็นสาเหตุหลักของปัญหาการปนเปื้อนเศษโลหะจากกระป๋อง และทำให้บริษัทสามารถลดจำนวนพนักงานในจุดกลิ้งแท่งแม่เหล็กเหลือเพียง 4 คนเท่านั้นในการเตรียมเนื้อปลาทูน่า จากเดิมที่ต้องใช้พนักงานถึง 9 คน ทำให้บริษัทสามารถลดค่าใช้จ่ายการจ้างงานในส่วนนี้ลงไปได้ปีละประมาณ 140,000 บาท ลดของเสียที่เกิดจากการปนเปื้อนเศษโลหะจากกระป๋องเฉลี่ยปีละ 13,000 บาท รวมแล้วบริษัทจะสามารถลดค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ได้เฉลี่ยปีละ 153,000 บาท โดยผลิตภัณฑ์นี้ปราศจากการปนเปื้อนของโลหะและสามารถทำให้ลูกค้ามีความเชื่อมั่นได้

ตารางที่ 1. เปรียบเทียบปริมาณของเสียที่พบเมื่อใช้ใบมีดเก่าและใบมีดใหม่

ลักษณะใบมีดและตัวล็อคใบมีด	เปอร์เซ็นต์ของเสีย (%) ใน 3 ซ้ำ	เปอร์เซ็นต์ของเสียเฉลี่ย (%)
ใบมีดเก่าและตัวล็อคที่หลวม	0.091 0.212 0.160	0.15±0.06
ใบมีดใหม่และตัวล็อคที่ปรับให้แน่น	0 0 0	0

doi: 10.14416/j.appsci.2018.03.001

2. การปรับปรุงคู่มือการใช้งานเครื่องเปิดกระป๋อง

การศึกษาการเปิดกระป๋องทูน่าขนาด 603×408 จากพนักงาน 3 คนหลังจากการเปลี่ยนใบมีดของเครื่องเปิดกระป๋องและปรับตัวล็อคใบมีดแล้วพบว่าไม่มีเศษโลหะจากกระป๋องเกิดขึ้นอีก แม้วิธีการที่เปิดจะแตกต่างกันก็ไม่มีผลกับการเกิดเศษโลหะจากกระป๋อง ดังนั้นวิธีการเปิดจึงไม่ใช่สาเหตุหลักของการปนเปื้อน แต่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้ดียิ่งขึ้น คณะวิจัยจึงปรับปรุงคู่มือการใช้งาน (work instruction) เครื่องเปิดกระป๋อง รหัส 4GOL3002 ให้เหมาะสมดังรูปที่ 3

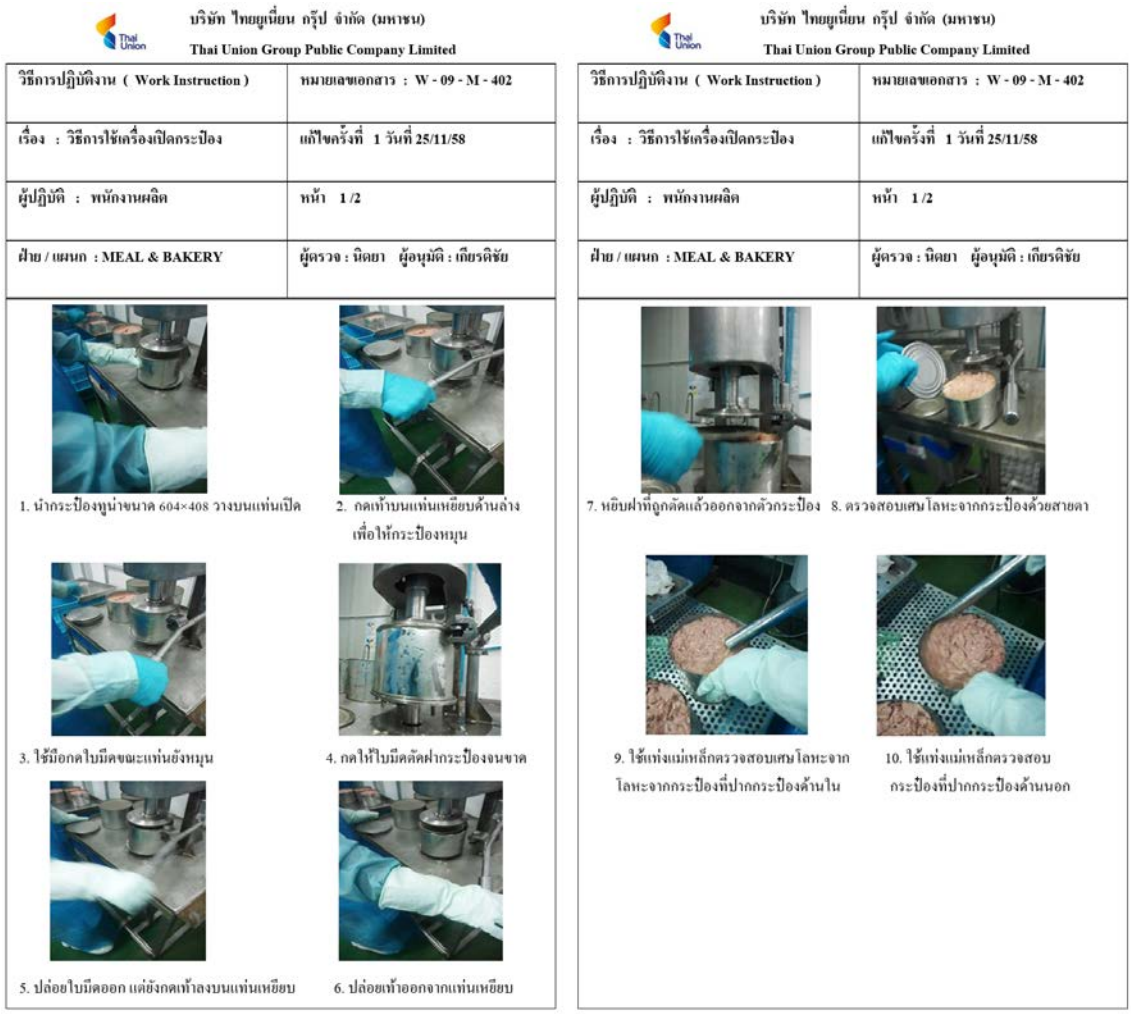
ด้านการปนเปื้อนสนิมเหล็ก

1. การแก้ไขปัญหาการพบสนิมเหล็กจากการทำงานของพนักงาน

จากการศึกษาพบว่าการตรวจสอบโลหะด้วยแท่งแม่เหล็กของพนักงานโดยวิธีการเดิมคือ ใช้แท่งแม่เหล็กกลิ้งเนื้อปลาทูน่าเข้าตัว 1 รอบ และออกจากตัว 1 รอบ พบสนิมเหล็กโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.10±0.07 % แต่วิธีการที่ปรับใหม่คือเพิ่มขั้นตอนการกลับเนื้อปลาด้านล่างขึ้นมาด้านบนแล้วเกลี่ยเนื้อปลาให้ทั่วทั้งถาด จากนั้นใช้แท่งแม่เหล็กกลิ้งซ้ำอีก ทำให้สามารถตรวจจับสนิมเหล็กได้มากขึ้นคือมีเปอร์เซ็นต์สนิมเหล็กเฉลี่ยเท่ากับ 0.13±0.08 % แต่ยังคงพบสนิมเหล็กในระหว่างการนำสินค้าผ่านเข้าเครื่องตรวจจับโลหะ จึงคาดว่าปริมาณเนื้อปลาทูน่าที่แตกต่างกันในแต่ละถาดทำให้ยังคงพบการปนเปื้อนสนิมเหล็ก ต่อมาจึงศึกษาปริมาณเนื้อปลาทูน่าที่เหมาะสมในการกลิ้งแท่งแม่เหล็กโดยใช้วิธีการเติมสนิมเหล็กขนาด 0.2 เซนติเมตร รูปร่างคล้ายสามเหลี่ยมสีดำลงไปเนื้อปลาที่มีปริมาณต่างๆ ได้แก่ 100 200 300 400 และ 500 กรัม จากการทดลองพบว่าที่ปริมาณเนื้อปลาทูน่า 300 กรัม เป็นปริมาณที่เหมาะสมเนื่องจากสามารถตรวจจับสนิมเหล็กได้หมด อย่างไรก็ตามยังพบปัญหาการปนเปื้อนสนิมเหล็กในระหว่างการนำสินค้าผ่านเข้าเครื่องตรวจจับโลหะ ดังนั้นการตรวจสอบสนิมเหล็กโดยใช้คนเพียงอย่างเดียวจึงไม่เพียงพอ ซึ่งตรงกับหลักการตรวจสอบ 3-Mu's (Chockchaloemwong, 2014) Muri คือการฝืนทำขั้นตอนการตรวจเนื้อปลาทูน่าด้วยวิธีใหม่ที่ทำให้พนักงานทำงานมากขึ้น อาจก่อให้เกิดความอ่อนล้ามากขึ้นส่งผลให้พนักงานทำงานด้อยลงได้ในระยะยาวและตรงกับ Mura เรื่องงานมีความไม่สม่ำเสมอเนื่องจากปริมาณงานที่ต้องตรวจสอบมีมากขึ้น

2. การทดลองแก้ไขปัญหาการพบสนิมเหล็กโดยการทำงานของเครื่องตรวจจับโลหะ

ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องตรวจจับโลหะโดยเปิดกระป๋องปลาทูน่าขนาด 307×113 บี้เนื้อปลาทูน่าให้มีขนาด 1-2.5 เซนติเมตร ใส่ถาดพลาสติกที่สะอาดขนาด 25×30 ตารางเซนติเมตร ถาดละ 500 กรัม เติมเศษสนิมเหล็กขนาด 0.1-0.35 เซนติเมตร ลงไปในเนื้อปลาทูน่าแล้วนำผ่านเข้าเครื่องตรวจจับโลหะรหัส 4GMD3031 มีเศษสนิมเหล็กขนาด 0.1 เซนติเมตร ที่เครื่องไม่สามารถตรวจจับได้ ดังนั้นการแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนสนิมเหล็กโดยใช้เครื่องตรวจจับโลหะเพียงอย่างเดียวจึงไม่เพียงพอ



รูปที่ 3. วิธีการใช้งานเครื่องเปิดกระป๋อง รหัส 4GOL3002

3. ผลการทดลองแก้ไขปัญหาการพบสนิมเหล็กโดยใช้กระบวนการตรวจสอบแบบ 2 ขั้นตอน

ทดลองโดยเปิดกระป๋องปลาทูน่าขนาด 307×113 จำนวน 120 กระป๋อง ทดลองทั้งหมด 5 ซ้ำ แล้วตรวจสอบด้วยแท่งแม่เหล็กก่อนในขั้นตอนแรกแล้วนำเนื้อปลาทูน่านั้นมาผ่านเครื่องตรวจจับโลหะอีกขั้นตอนหนึ่ง พบว่า เครื่องตรวจจับโลหะจะสามารถตรวจสอบสนิมเหล็กที่อยู่ด้านล่างหรือฝังลงไปในเนื้อปลาได้ดี ทำให้เมื่อนำเนื้อปลาทูน่าไปคลุกผสมเป็นผลิตภัณฑ์ทูน่าสเปรดซาวน์ครีมแล้วนำผ่านเครื่องตรวจจับโลหะในขั้นตอนสุดท้ายไม่มีการพบของเสียจากการปนเปื้อนสนิมเลย (0% ของเสีย) ดังตารางที่ 2 จึงสรุปว่าวิธีการตรวจสอบสนิมเหล็กแบบ 2 ขั้นตอนนี้เป็นวิธีการตรวจสอบเนื้อปลาทูน่าก่อนการคลุกผสมที่เหมาะสม ดังนั้นการใช้ทั้งคนและเครื่องจักรร่วมกัน

 doi: 10.14416/j.appsci.2018.03.001

จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุดและลดการสูญเสียให้เป็นศูนย์ได้ ผู้ดำเนินงานจึงได้เพิ่มการศึกษาปริมาณเนื้อปลาเพื่อให้มีความเป็นไปได้จริงในการใช้งานโดยทดลองเพิ่มเติมโดยใช้เนื้อปลาปริมาณ 2,000 กรัม พบว่าเศษสนิมเหล็กขนาด 0.1 เซนติเมตร เท่านั้นที่เครื่องตรวจจับโลหะตรวจจับไม่ได้ เนื่องจากมีขนาดเล็กมาก แต่เศษสนิมเหล็กขนาดเล็กนี้สามารถตรวจจับได้ด้วยการกลิ้งแท่งแม่เหล็กในขั้นตอนแรก ดังนั้นวิธีการนำเนื้อปลาทูน่าปริมาณ 2,000 กรัม ตรวจสอบสนิมเหล็กแบบ 2 ขั้นตอน ช่วยให้เกิดประสิทธิภาพการตรวจสอบดียิ่งขึ้น

สรุปผลการทดลอง

1. ปัญหาการปนเปื้อนเศษโลหะจากกระป๋อง

การทดลองเปลี่ยนใบมีดใหม่และเปลี่ยนวัสดุภายในของตัวล็อคใบมีดเป็นสแตนเลส ปรับให้ตัวล็อคใบมีดแน่นขึ้นส่งผลให้ของเสียที่ เกิดจากการปนเปื้อนเศษโลหะจากกระป๋องเหลือ 0% การปรับปรุงวิธีการใช้งานเครื่องเปิดกระป๋องแก่พนักงานเพื่อความถูกต้องในการใช้และป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต ทำให้สามารถลดจำนวนพนักงานลงไปเหลือเพียง 4 คนเท่านั้น และยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการทำลายสินค้าได้รวมกันเฉลี่ย 153,000 บาท/ปี

2. ปัญหาการพบสนิมเหล็กในผลิตภัณฑ์สุดท้าย

การใช้คนหรือเครื่องจักรเพียงอย่างเดียวไม่สามารถลดของเสียจากการปนเปื้อนสนิมเหล็กในผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ วิธีที่เหมาะสมที่ สุดคือใช้การทำงานร่วมกันของทั้งคนและเครื่องจักร โดยปรับปรุงกระบวนตรวจสอบเนื้อปลาทูน่าเป็นแบบ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกใช้แท่งแม่เหล็กกลิ้งลงบนเนื้อปลาเพื่อตรวจสอบในขั้นแรกแล้วแบ่งเนื้อปลาใส่ถุง ขั้นตอนที่สองคือนำเนื้อปลาที่กลิ้งด้วยแท่งแม่เหล็กแล้วแบ่งใส่ถุงแล้วมาผ่านเครื่องตรวจจับโลหะเลย พบว่าในผลิตภัณฑ์สุดท้ายนั้นไม่พบสนิมเหล็กในผลิตภัณฑ์สุดท้าย ทำให้มีของเสียที่ต้องนำไปทำลายเป็น 0% คิดเป็นสามารถลดค่าใช้จ่ายจากการทำลายสินค้าได้เฉลี่ย 13,000 บาท/ปี

ตารางที่ 2. การตรวจสอบเนื้อปลาทูน่าแบบ 2 ขั้นตอนที่ปริมาณปลา 500 กรัม

จำนวนปลาทูน่า (กระป๋อง)	การตรวจจับสนิม (ชิ้น)		การตรวจสนิมเหล็กในผลิตภัณฑ์สุดท้าย	เปอร์เซ็นต์สนิมเหล็กที่พบในผลิตภัณฑ์สุดท้าย
	ใช้แท่งแม่เหล็กกลิ้งโดยพนักงาน	ผ่านเครื่องตรวจจับโลหะ		
120	0	0	0	0
120	0	0	0	0
120	1	0	0	0
120	6	3	0	0
120	2	0	0	0

กิตติกรรมประกาศ

ผู้นิพนธ์ขอขอบพระคุณ บริษัทไทยยูเนี่ยน กรุ๊ป จำกัด (มหาชน) และคณะผู้บริหารที่ให้ความอนุเคราะห์การเข้ามาฝึกงานในโครงการสหกิจศึกษานี้

เอกสารอ้างอิง

Chockchaloemwong, P. (2014). *Defect and loss reduction in fried chicken pop production* (special project) Department of Agro-Industrial, Food, and Environmental Technology, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok. (in Thai)

Hosotani, K. (2009). *The QC prolem solving approach: solving workplace problems in the Japanese way.* (4th ed.). Bangkok, Thailand: Sat Four Printing Company Limited Publisher.

Ishikawa, K. (1985). *What is total quality control?: The Japanese way* (translated by David J. Lu). NJ: Prentice-Hall.

Ishikawa, K. (1990). *Introduction to Quality Control* (translated by J. H. Loftus) (3rd ed). Tokyo: 3A Corporation.

Kobata, T. (1999). *5 - Gen Shugi Nyuumon* (translated by Pairot Luangpituksa & Co.) (1st ed.). Bangkok, Thailand: Technology Promotion Association (Thailand-Japan) Publisher.

Kowong, T., Siriputpiboon, P., Itsarakunritta, C., Domrongpokkaphan, V., Thumthanaruk, B. & Rungsardthong, V. (2015). Loss reduction in product A, *The Journal of Applied Science*, *14*(2), 29-39.

National Food Institute. (2015). *Thai Food Industry Summary in 2014 and Trend in 2015*. Retrieved August 27, 2015, from http://fic.nfi.or.th/foodindustry_quarterlySituation_detail.php?smid=389

Thai Union Group Public Company Limited, (2014). Standard for microbial detection in sour cream - tuna spread product. Samut Sakhon: Thai Union Group Public Company Limited.

The Journal of Applied Science **Vol. 17 No. 1: 51-63 [2018]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2018.04.001
ISSN 1513-7805 (Printed in Thailand) ISSN 2586-9663 (Online)

Research Article

การบำบัดไอระเหยตัวทำละลายอินทรีย์ด้วยเครื่องกรองชีวภาพ

Removal of organic solvent vapor by biofilter

วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์ [1*] พรรณวดี สุวัฒิกะ[2] เนตรนภา ช่างปัด[2] และ ปพน คงสุวรรณ[2]

Wongpun Limpaseni[1*], Panwadee Suwattiga[2], Nednapa changpad[2] and Paphon Khongsuwan[2]

[1*]วิทยาลัยพัฒนามหานคร มหาวิทยาลัยนวมินทราธิราช กรุงเทพฯ 10330 ประเทศไทย

[2] คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 ประเทศไทย

[1*] Institute of Metropolitan Development, Navamindradhiraj University, Bangkok, 10330, Thailand

[2] Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand

***E-mail**: wongpunl@gmail.com

Received: 18/01/2018; Accepted: 9/04/2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกรองชีวภาพในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยที่ใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรม ได้แก่ ไอระเหยของโทลูอีน ไซลีน และทินเนอร์ (ซึ่งประกอบด้วยโทลูอีนประมาณ 64%) แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง คือ การบำบัดไอระเหยของโทลูอีน ไอระเหยไซลีน และไอระเหยทินเนอร์ ที่ความเข้มข้นของไอระเหย 50 100 200 300 และ 400 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เวลากักพัก (Empty Bed Retention Time, EBRT) 30 60 และ 90 วินาที เครื่องกรองชีวภาพประกอบด้วยตัวกลางผสมของปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก เศษไม้ และตะกอนจุลินทรีย์ อัตราส่วน 60:10:20:10 โดยปริมาตร อัตราการไหลเท่ากับ 6.28 ลิตรต่อนาที ผลการศึกษาพบว่าที่ความเข้มข้นโทลูอีน 50 ppm เวลากักพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของโทลูอีนได้ 99.9±0.1% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 100 200 300 และ 400 ppm เวลากักพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของโทลูอีนได้ 97.8±1.7% 91.5±1.0% 86.4±2.0% และ 78.5±3.0% ตามลำดับ การบำบัดไอระเหยไซลีนพบว่าที่ความเข้มข้น 50 ppm เวลากักพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของไซลีนได้ 97.5±1.9% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 100 200 300 และ 400 ppm เวลากักพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของไซลีนได้ 99.5±0.5% 96.6±1.1% 93.4±1.1% และ 85.9±1.6% ตามลำดับ การบำบัดไอระเหยทินเนอร์ พบว่าที่ความเข้มข้น 50 ppm เวลากักพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของทินเนอร์ได้ 99.3±0.3% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 100 200 300 และ 400 ppm เวลากักพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของทินเนอร์ได้ 99.1±0.4% 95.6±0.4% 87.0±4.1% และ 70.5±5.8% ตามลำดับ

 doi: 10.14416/j.appsci.2018.04.001

คำสำคัญ: สารประกอบอินทรีย์ระเหย, ไอระเหยตัวทำละลาย, เครื่องกรองชีวภาพ, การบำบัด, ไอระเหยทินเนอร์, ไอระเหยโทลูอีน, ไอระเหยไซลีน

Abstract

The study investigated the efficiency of a biofilter to treat volatile organic compounds used as solvent in industrial activities including Toluene, Xylene and Thinner which consists of 64% Toluene. The experiment was divided into 3 parts consisting of treatment of Toluene, Xylene and Thinner vapor at concentrations of 50, 100, 200, 300 and 400 ppm and Empty Bed Retention Time (EBRT) of 30, 60 and 90 seconds. The biofilter compositions were mixture of compost, manure, wood chips and microorganism sludge having composition by volume of 60:10:20:10 respectively. The flowrate was maintained at 6.28 liter per minute. The results showed that treatment of 50 ppm Toluene vapor with EBRT 90 seconds yielded efficiency of 99.9 ±0.1%. When the concentrations were increased to 100, 200, 300 and 400 ppm using EBRT of 90 seconds the removal efficiency of Toluene was 97.8±1.7%, 91.5±1.0%, 86.4±2.0% and 78.5±3.0%, respectively. Treatment of 50 ppm Xylene vapor at 90 seconds EBRT yielded efficiency of 97.5±1.9%. When Xylene vapor concentrations were increased to 100, 200, 300 and 400 ppm using EBRT of 90 seconds the removal efficiency were 99.5±0.5%, 96.6±1.1%, 93.4±1.1% and 85.9±1.6%, respectively. Treatment of 50 ppm Thinner vapor at 90 seconds EBRT yielded efficiency of 99.3±0.3%. When Thinner vapor concentrations were increased to 100, 200, 300 and 400 ppm using EBRT of 90 seconds the removal efficiency were 99.1±0.4%, 95.6±0.4%, 87.0±4.1% and 70.5±5.8%, respectively.

Keywords: volatile organic compound, vapor of solvent, biofiter, removal, toluene vapor, xylene vapor, thinner vapor

บทนำ

เหตุเดือดร้อนรำคาญในเรื่องกลิ่นจากการประกอบกิจการของโรงงานต่างๆ เช่น กิจการพ่นสีรถยนต์ขนาดเล็กที่มีกระจายอยู่ทั่วไป พบเห็นได้ในชุมชนตามริมถนน หรือแม้แต่ในหมู่บ้าน การเคาะพ่นสีรถยนต์ในกิจการขนาดเล็กถึงแม้จะมีห้องพ่นสี แต่มักขาดระบบบำบัดตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพ หรือบางสถานประกอบการมีห้องพ่นสีแต่ใช้วิธีระบายอากาศออกสู่ภายนอกโดยไม่ได้ผ่านการบำบัด กลิ่นตัวทำละลายหรือทินเนอร์ที่ใช้ในการพ่นสีเป็นมลพิษในอากาศ ซึ่งการตรวจวัด การประเมินผลต่อสุขภาพ และการควบคุมอาจทำได้ยากกว่ามลพิษอากาศทั่วไป ไอระเหยของทินเนอร์มีผลเสียต่อสุขภาพ และกลิ่นสร้างความเดือดร้อนรำคาญต่อผู้อยู่อาศัยใกล้เคียง (Pollution Control Department, 2014)

การสำรวจและตรวจวัดปริมาณสารประกอบอินทรีย์ระเหยหรือตัวทำละลายทินเนอร์ภายในโรงงานพ่นสีรถยนต์ขนาดเล็กแห่งหนึ่ง โดยผู้วิจัยทำการตรวจวัดเองในโครงการนี้ พบว่ามีปัญหาเรื่องกลิ่นของทินเนอร์ซึ่งใช้เป็นตัวทำละลายในการผสมสีสำหรับการพ่นสีรถยนต์ จากการตรวจวัดปริมาณสารประกอบอินทรีย์ระเหยทั้งหมดภายในสถานประกอบการอู่เคาะพ่นสีรถยนต์ ทั้งภายนอกและภายในห้องพ่นสี ก่อนการพ่นสี ระหว่างการพ่นสี และหลังการพ่นสี พบความเข้มข้นสารประกอบอินทรีย์ระเหยทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 40-350 ส่วนในล้านส่วน (ppm) สำหรับบริเวณอื่นๆ เช่น สำนักงาน มีความเข้มข้น 10 ppm มาตรฐานสารเคมีในสถานประกอบการไม่มีการกำหนดค่าตัวทำละลายทินเนอร์ แต่กำหนดเป็นรายสาร ในที่นี้จะพิจารณาค่ามาตรฐานของไซลีนและโทลูอีนในอากาศ เนื่องจากในทินเนอร์จะใช้สารดังกล่าวเป็นองค์ประกอบหลัก ไซลีนกำหนดความเข้มข้นในสถานที่ทำงานไว้ไม่เกิน 100 ppm และโทลูอีน ไม่เกิน 200 ppm ตลอดเวลาการทำงาน 8 ชั่วโมง (Ministry of Interior, 1977) ซึ่งพบว่าในช่วงการพ่นสี และหลังจากพ่นสี ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยทั้งหมดมีค่าเกินมาตรฐาน ส่วนในพื้นที่ทั่วไปจะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานแต่ก็อยู่ในระดับที่สามารถรับรู้ถึงกลิ่นก่อให้เกิดเหตุเดือดร้อนรำคาญต่อผู้พักอาศัยแวดล้อมได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดไอระเหยของตัวทำละลายด้วยเครื่องกรองชีวภาพ เครื่องกรองชีวภาพเป็นระบบบำบัดที่ใช้กระบวนการทางชีวภาพโดยอาศัยความสามารถของจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่บนตัวกลางที่เป็นของแข็ง เช่น ดิน ปุ๋ยอินทรีย์ ปุ๋ยคอก หรือเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีความพรุน เมื่อไอระเหยตัวทำละลายผ่านตัวกลาง แก๊สมลพิษจะถูกดูดซับโดยแผ่นฟิลม์จุลินทรีย์ที่อยู่บนตัวกลางและถูกเปลี่ยนให้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพของจุลินทรีย์ (Cheng et al., 2016) โดยพิจารณาเลือกขนาดตัวกลางที่เหมาะสม และให้ความชื้นที่เหมาะสม ข้อดีของเครื่องกรองชีวภาพคือมีราคาถูกกว่าระบบบำบัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยอื่นๆ เช่น การใช้ตัวดูดซับ การกลั่น หรือการเผาทำลาย ซึ่งต้องใช้พลังงานมากกว่าและมีค่าใช้จ่ายสูงกว่า ไม่เหมาะกับการประกอบกิจการขนาดเล็กและขนาดกลาง นอกจากนั้นเครื่องกรองชีวภาพยังมีการทำงานที่ไม่ยุ่งยาก ดูแลรักษาง่ายไม่ต้องใช้ความรู้ความสามารถเฉพาะ

วิธีการทดลอง

1. การสร้างเครื่องกรองชีวภาพ

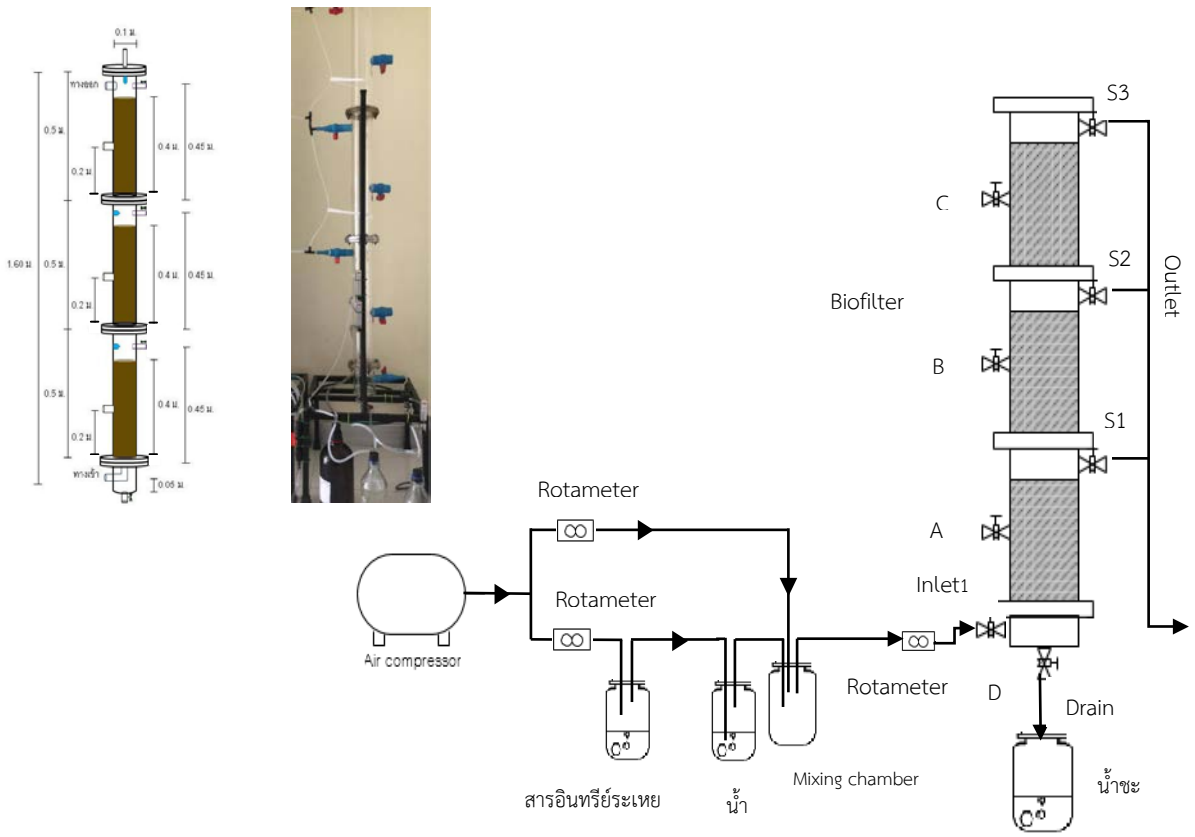
เครื่องกรองชีวภาพที่สร้างขึ้น (รูปที่ 1) ทำจากท่ออะครีลิคใส เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.10 เมตร สูง 1.60 เมตร โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น (ชั้นบน ชั้นกลาง และชั้นล่าง) ด้วยตะแกรงสแตนเลส ให้แต่ละชั้นสูง 0.50 เมตร กำหนดให้บรรจุตัวกลางชั้นละ 0.40 เมตร มีจุดทางเข้าไอระเหยที่ระดับ 0.05 เมตร จุดเก็บตัวอย่างทางออก 3 จุด (S1, S2, S3) ที่ระดับ 0.45 เมตรวัดจากฐานของแต่ละชั้น และใช้เป็นจุดฉีดน้ำให้แก่ตัวกลางแต่ละชั้น ขนาดช่องเก็บตัวอย่างอากาศมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร มีจุดวัดความชื้นของตัวกลาง อุณหภูมิ และความเป็นกรด-เบสของ

ตัวกลาง 3 จุด (A, B, C) ที่ระดับ 0.2 เมตร วัดจากฐานของแต่ละชั้น ในการทดลองนี้กำหนดเวลากักพัก (Empty Bed Retention Time, EBRT) 30 60 และ 90 วินาที

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ตรวจวัดได้แก่ ความเข้มข้นไอระเหยขาเข้า-ขาออก อุณหภูมิตัวกลาง ความเป็นกรด-เบสของตัวกลาง ความชื้นตัวกลาง การทรุดตัวของตัวกลาง ความดันลด ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (ตารางที่ 1)

2. การบรรจุตัวกลาง

นำวัสดุตัวกลาง ได้แก่ ปุ๋ยหมัก (ยี่ห้อ ดินสีดา) ปุ๋ยคอก (ยี่ห้อ ขงเบ้ง) เศษไม้ (ขอจากโรงไม้ ในลักษณะขี้กบ) และตะกอนจุลินทรีย์ (จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนโรงบำบัดน้ำเสียบางซื่อ กรุงเทพมหานคร) มาผสมกันในอัตราส่วน 60:10:20:10 โดยปริมาตร ตามลำดับ (Wongwutthi, 2011) คำนวณน้ำหนักของตัวกลางที่นำมาผสมให้ได้อัตราส่วนที่ต้องการจากค่าความหนาแน่นของตัวกลาง ใส่ในเครื่องกรองชีวภาพและเดินระบบในแต่ละการทดลอง



รูปที่ 1. เครื่องกรองชีวภาพและระบบป้อนไอระเหย

doi: 10.14416/j.appsci.2018.04.001

ตารางที่ 1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์	พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	รุ่นและขนาด	ความถี่
เครื่องวัดความเข้มข้นสารประกอบอินทรีย์-ระเหย/ไอระเหยตัวทำละลาย	ความเข้มข้นไอระเหยของโทลูอีน ไซลีน และทินเนอร์	MiniRAE 3000 0.1-15,000 ส่วนในล้านส่วน ความถูกต้อง ±3% Calibration gas i-C_4H_8 100 ppm	แต่ละจุดวัด ทุก 20 นาที วันละ 8 ชั่วโมง
โรตามิเตอร์	อัตราไหลของอากาศ	Dwyer 5-25 ลิตรต่อนาที	ควบคุมตลอดเวลา
มาโนมิเตอร์	ความดันลดของตัวกลาง	Dwyer / Series 477-3 Max pressure 29 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว	ทุก 20 นาที วันละ 8 ชั่วโมง
เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง	ความเป็นกรดด่างของตัวกลาง	Gardman Soil pH meter pH 3-10	ก่อนและหลังการทดลองในแต่ละวัน
เครื่องตรวจวัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	Qtrak model 7556 Infrared (NDIR) 0-5,000 ส่วนในล้านส่วน	แต่ละจุดวัด ทุก 20 นาที วันละ 8 ชั่วโมง
เครื่องวัดความชื้นในดิน	ความชื้นตัวกลาง	E.M. System soil test Moisture 1-100 เปอร์เซ็นต์	ก่อนเริ่มการทดลองในแต่ละวัน
เทอร์โมมิเตอร์	อุณหภูมิ	Brannan 10-100 องศาเซลเซียส	ก่อนเริ่มการทดลองในแต่ละวัน

3. การป้อนไอระเหย

การทดลองบำบัดไอระเหยของโทลูอีน ไซลีน และทินเนอร์ แปรผันความเข้มข้นขาเข้าที่ 50-400 ppm ใช้อัตราไหลอากาศเข้าเครื่องกรองชีวภาพ 6.28 ลิตรต่อนาที ระยะเวลากักพัก (EBRT) 30-90 วินาที ที่แต่ละความเข้มข้นและแต่ละเวลากักพักใช้เวลาทดลอง 3-5 วัน โดยที่ระบบจะต้องมีสภาพการทดลองและประสิทธิภาพการบำบัดคงที่ ทำการวัดทันทีเมื่อเริ่มเดินระบบที่จุดเข้าระบบ และทางออกของแต่ละชั้น 3 ชั้น รวมเป็น 4 จุดวัด หมุนเวียนจุดวัดทุก 5 นาที หรือเวียนกลับมาที่จุดวัดเดิมทุก 20 นาที รวม 8 ชั่วโมง ได้ผล 24 ค่าที่แต่ละจุดวัด หากทำการทดลอง 5 วัน จะได้ผล 120 ค่าที่แต่ละจุดวัด

 doi: 10.14416/j.appsci.2018.04.001

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. สมบัติของตัวกลาง

ตัวกลางที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก เศษไม้ และตะกอนจุลินทรีย์มีลักษณะทางกายภาพได้แก่ ขนาดอนุภาค ความหนาแน่น ความพรุน ความชื้น ความเป็นกรดด่าง และธาตุอาหาร ดังแสดงในตารางที่ 2

การกระจายขนาดอนุภาคตัวกลางเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญในการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวกลาง โดยจะมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของตัวกลาง กล่าวคือ อนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง ซึ่งจะขัดขวางการไหลผ่านของอากาศหรือไอระเหย ทำให้สูญเสียความดัน จากผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคในการทดลองนี้ได้เลือกใช้ปุ๋ยหมักเป็นตัวกลางหลักเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีจุลินทรีย์หนาแน่น มีสมบัติในการกักเก็บน้ำและมีความพรุนทำให้อากาศถ่ายเทได้ดี แต่พบว่ามีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าค่าแนะนำของ Leson & Winner (1991) ที่กล่าวว่า ขนาดอนุภาคของวัสดุตัวกลางที่เหมาะสมควรใหญ่กว่า 4 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้สูญเสียความดันลดน้อยลง ไม่เกิดการอุดตันของตัวกลาง ดังนั้นในการทดลองจึงใช้ปุ๋ยหมักเป็นตัวกลางเพียงชนิดเดียวไม่ได้ เพราะมีโอกาสที่ทำให้สูญเสียค่าความดันลดเพิ่มขึ้น จึงต้องทำการเติมเศษไม้เพื่อช่วยลดการสูญเสียความดันลด ซึ่งเศษไม้ที่มาผสมมีขนาด 20-40 มิลลิเมตร

ตารางที่ 2. ลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวกลาง

พารามิเตอร์	ปุ๋ยหมัก	ปุ๋ยคอก	เศษไม้	ตะกอนจุลินทรีย์	ตัวกลางผสม 60:10:20:10
ขนาดอนุภาค D50 (มม)	<2	<2	20-40	-	-
ความหนาแน่น (ก./ลบ.ซม.)	0.72	0.26	0.25	0.76	-
ความพรุน (%)	15.92	44.22	74.86	9.41	62.27*
ความชื้น (%)	10.97	25.22	0.07	3.00	60*
ความเป็นกรดด่าง	7.19	7.92	ไม่ได้ตรวจวัด	ไม่ได้ตรวจวัด	7*
ธาตุอาหาร (%) N : P : K	0.93:1.70:0.73	1.86:1.05:2.14	ไม่ได้ตรวจวัด	ไม่ได้ตรวจวัด	ไม่ได้ตรวจวัด

หมายเหตุ : วิเคราะห์ที่กรมพัฒนาที่ดิน

*ตรวจวัดโดยผู้วิจัยในโครงการนี้

ตัวกลางหลัก (ปุ๋ยหมัก) มีความหนาแน่น 0.72 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หากมีความหนาแน่นมากกว่านี้จะทำให้เกิดการกดทับของตัวกลาง สำหรับวัสดุเสริม ได้แก่ ปุ๋ยคอกและตะกอนจุลินทรีย์พบว่ามีความหนาแน่น 0.26 และ 0.76 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลดีกับระบบ เพราะช่วยป้องกันการกดทับของตัวกลาง ทำให้อายุการใช้งานของตัวกลางนานขึ้น

ความพรุนเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของอากาศ ซึ่งวัสดุที่มีความพรุนสูงจะมีข้อดีคือทำให้มีการกระจายตัวของอากาศได้ดี ทำให้แก๊สที่ต้องการบำบัดเกิดการสัมผัสกับฟิล์มชีวภาพได้สูงขึ้นและทำให้เกิดการสูญเสียความดันลดน้อยลง แต่มีข้อเสียคือ อาจทำให้ตัวกลางเกิดการทรุดตัวในภายหลัง งานวิจัยที่ผ่านมาแนะนำให้เลือกใช้ตัวกลางที่มีความพรุน 40-80% (Devinny et al., 1999) ผลการวิเคราะห์พบว่าตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักมีความพรุน 16% ดังนั้นจึงต้องเลือกวัสดุเสริมที่มีความพรุนสูงมาเป็นส่วนผสมในที่นี้คือ ปุ๋ยคอกและเศษไม้ ซึ่งมีความพรุน 44 และ 75% ตามลำดับ ในการทดลองใช้ตัวกลาง 4 ตัวคือ ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก ตะกอนจุลินทรีย์และเศษไม้ผสมกันมีความพรุน 60% ทำให้มีความพรุนอยู่ในช่วงที่เหมาะสมและลดการทรุดตัวในตัวกลาง

ความชื้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดในระบบกรองชีวภาพ เนื่องจากจุลินทรีย์ต้องการน้ำในการดำรงชีวิต โดยความชื้นที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 40-80% (Devinny et al., 1999) ผลการวิเคราะห์พบว่าตัวกลางประเภทปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก เศษไม้ และตะกอนจุลินทรีย์ มีความชื้น 11 25 0.07 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีความชื้นต่ำมาก ดังนั้นในการทดลองก่อนทำการเดินระบบจึงต้องเติมน้ำให้ตัวกลางมีความชื้นอยู่ในช่วงประมาณ 60%

ความเป็นกรด-เบส มีผลต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ในระบบกรองชีวภาพ เพราะจุลินทรีย์จะเจริญได้ดีในสภาพเป็นกลาง โดยมีค่าความเป็นกรดด่างประมาณ 6-8 (Devinny et al., 1999) ผลการวิเคราะห์ตัวกลางทั้ง 4 ประเภท พบว่าตัวกลางประเภทปุ๋ยหมักและปุ๋ยคอกมีค่าความเป็นกรดด่าง 7.19 และ 7.92 สำหรับตัวกลางผสมที่บรรจุในเครื่องกรองชีวภาพมีค่าความเป็นกรดด่างอยู่ที่ 7

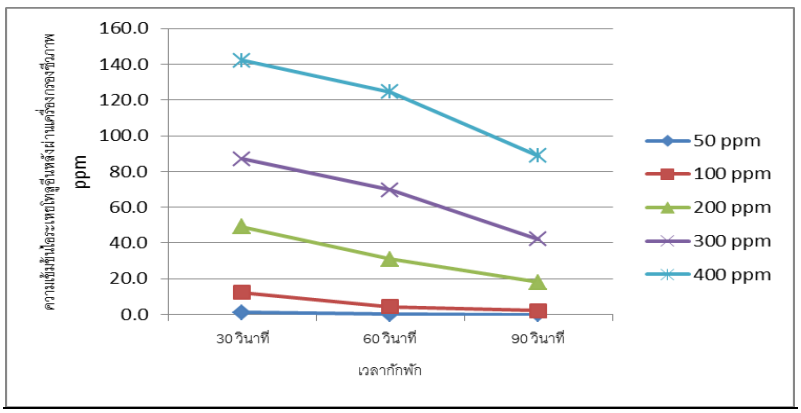
ในการดำรงชีพของจุลินทรีย์จำเป็นต้องใช้ธาตุอาหารประเภท ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม (N, P, K) ประมาณ 0.4% 0.15% และ 0.15% ตามลำดับ (Devinny et al., 1999) ผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวกลาง ปุ๋ยคอกและปุ๋ยหมักมีธาตุอาหารเพียงพอต่อการนำไปใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ของปุ๋ยหมักได้เท่ากับ 0.93% 1.70% และ 0.73% ตามลำดับ และปุ๋ยคอกเท่ากับ 1.86% 1.05% และ 2.14% ตามลำดับ

2. ผลการบำบัดไอระเหยโทลูอีน ไซลีน และทินเนอร์

ตัวทำละลายที่ใช้ทั่วไปในการผสมสี องค์ประกอบหลักได้แก่ โทลูอีน หรือ ไซลีน ขึ้นกับวัตถุประสงค์การใช้งาน ในการทดลองนี้ทดลองบำบัด ไอระเหยโทลูอีน ไอระเหยไซลีน และไอระเหยตัวทำละลายที่ใช้ในการพ่นสีรถยนต์ (สารโทลูอีน ไซลีน และทินเนอร์ ที่นำมาทำไอระเหยในการทดลองมีข้อมูลดังนี โทลูอีน 99% (Analytical reagent grade, Fisher Scientific, UK); ไซลีน 99% (Analytical reagent grade, Fisher Scientific, UK) สำหรับไซลีนไม่แจ้งสัดส่วนของ o-, p-, และ m- ; ทินเนอร์ขอจากอู่เคาะพ่นสีรถยนต์ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมา

โตกราฟ พบว่าทินเนอร์ที่นำมาทดลองมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ โทลูอีน คิดเป็นร้อยละ 64 และมีสารประกอบอินทรีย์ระเหยตัวอื่นด้วย เช่น อะซิโตน แอลกอฮอล์ อีเทอร์ สารจากปิโตรเลียม) การทดลองทั้ง 3 การทดลองเป็นการทดลองป้อนไอระเหยเข้าระบบวันละ 8 ชั่วโมง ใช้ เวลาในการทดลองแต่ละความเข้มข้นประมาณ 5 วัน เมื่อผลการบำบัดคงที่จึงเพิ่มความเข้มข้นขึ้น ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการวัดทุกๆ 5 นาที 8 ชั่วโมงต่อวันตลอดช่วงเวลาของแต่ละการทดลองที่ผลการบำบัดคงที่

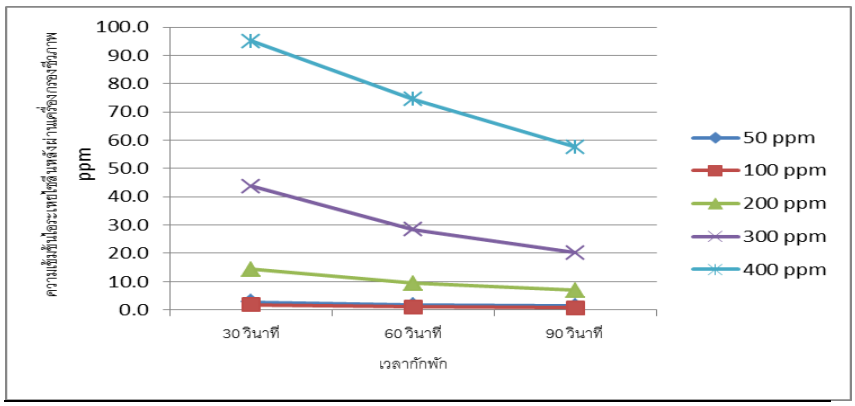
<u>การบำบัดไอระเหยโทลูอีน</u> ที่ความเข้มข้น 50-400 ppm เวลากักพัก (EBRT) 30-90 วินาที พบว่าที่ความเข้มข้น 50 ppm เวลากักพัก 60 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของโทลูอีนได้ 99.8±0.3% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 100 ppm ประสิทธภาพลดลงจะต้องเพิ่มเวลากักพักเป็น 90 วินาที จึงสามารถบำบัดไอระเหยของโทลูอีนได้ 97.8±1.7% ที่ความเข้มข้น 200 300 และ 400 ppm เวลากักพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของโทลูอีนได้ 91.5±1.0% 86.4±2.0% และ 78.5±3.0% ตามลำดับ (รูปที่ 2)



	ประสิทธิภาพการบำบัด (% mean±SD)		
	เวลากักพัก		
ความเข้มข้น (ppm)	**30 วินาที**	**60 วินาที**	**90 วินาที**
50	97.7±0.1	99.8±0.3	99.9±0.1
100	88.0±1.8	95.9±1.5	97.8±1.7
200	76.9±1.6	85.5±1.2	91.5±1.0
300	71.9±1.7	77.5±1.5	86.4±2.0
400	65.5±3.3	69.8±2.6	78.5±3.0

รูปที่ 2. ความเข้มข้นไอระเหยโทลูอีนหลังผ่านตัวกรองชีวภาพ และประสิทธิภาพการบำบัด

การบำบัดไอระเหยไซลีน ที่ความเข้มข้น 50-400 ส่วนในล้านส่วน เวลากักพัก (EBRT) 30-90 วินาที พบว่าที่ความเข้มข้น 50 ppm เวลากักพัก 30 60 และ 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของไซลีนได้ 94.8±3.7% 96.7±2.6% และ 97.5±1.9% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 100 ppm สามารถบำบัดไอระเหยของไซลีนได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 98.2±1.2% 99.0±1.0% และ 99.5±0.5% แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 200 300 และ 400 ppm ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากไซลีนอยู่ในกลุ่ม moderate biodegradability (Devinny et al., 1999) ย่อยสลายยากกว่าโทลูอีนที่จัดอยู่ในกลุ่ม good biodegradability จึงพบว่าจะต้องปรับให้จุลินทรีย์ชินต่อไซลีนก่อนในการบำบัดระยะแรกที่ความเข้มข้น 50 ppm อย่างไรก็ดีประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้น 50 และ 100 ppm มีความแตกต่างน้อยมากและอยู่ในช่วงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ทั้งนี้ที่เวลากักพัก 90 วินาที เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 200 300 และ 400 ppm ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงเป็น 96.6±1.1% 93.4±1.1% และ 85.9±1.6% ตามลำดับ (รูปที่ 3)

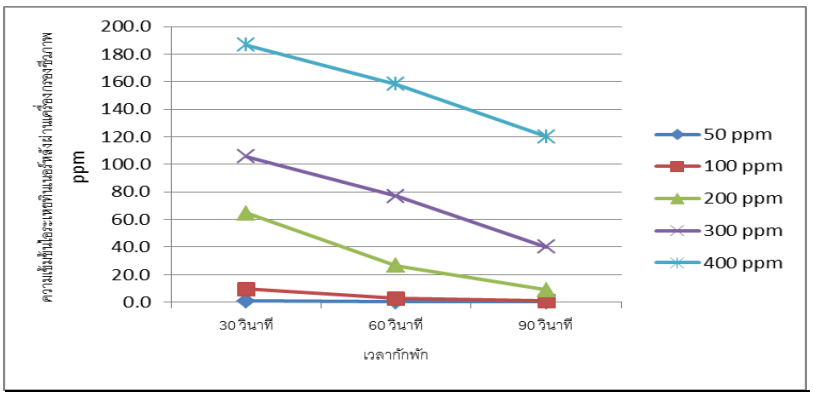


	ประสิทธิภาพการบำบัด (% mean±SD)		
	เวลากักพัก		
ความเข้มข้น (ppm)	**30 วินาที**	**60 วินาที**	**90 วินาที**
50	94.8±3.7	96.79±2.6	97.5±1.9
100	98.2±1.2	99.0±1.0	99.5±0.5
200	92.9±1.7	95.3±1.4	96.6±1.1
300	85.8±2.9	90.8±1.8	93.4±1.1
400	76.7±1.3	81.7±1.2	85.9±1.6

รูปที่ 3. ความเข้มข้นไอระเหยไซลีนหลังผ่านตัวกรองชีวภาพ และประสิทธิภาพการบำบัด

การบำบัดไอระเหยทินเนอร์ ความเข้มข้น 50-400 ppm เวลากักพัก (EBRT) 30-90 วินาที พบว่าที่ความเข้มข้น 50 ppm เวลากักพัก 60 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของทินเนอร์ได้ 99.2±0.4% (ทินเนอร์มีโทลูอีนเป็นองค์ประกอบหลัก 64%) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 100 ppm จะต้องเพิ่มเวลากักพักเป็น 90 วินาที จึงสามารถบำบัดไอระเหยของทินเนอร์ได้ 99.1±0.4% ที่ความเข้มข้น 200 300 และ 400 ppm เวลากักพัก 90 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของทินเนอร์ได้ 95.6±0.4% 87.0±4.1% และ 70.5±5.8% ตามลำดับ (รูปที่ 4)

ในการทดลองบำบัดไอระเหยของโทลูอีน ไซลีน และทินเนอร์นี้พบว่าหากความชื้นต่ำกว่า 60% ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลง ดังนั้นในการทำงานของระบบกรองชีวภาพความชื้นจึงมีความสำคัญที่จะต้องควบคุม ในการทดลองนี้ทดลองการทำงานเป็นกะ วันละ 8 ชั่วโมง ระบบสามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพ ความเข้มข้นไอระเหยทินเนอร์ที่ 50-300 ppm สามารถบำบัดไอระเหยของทินเนอร์ลงเหลือความเข้มข้นต่ำกว่า 100 ppm โดยที่ความเข้มข้น 400 ppm จำเป็นต้องเพิ่มเวลากักพักให้มากขึ้น



	ประสิทธิภาพการบำบัด (% mean±SD)		
	เวลากักพัก		
ความเข้มข้น (ppm)	**30 วินาที**	**60 วินาที**	**90 วินาที**
50	98.1±1.1	99.2±0.4	99.3±0.3
100	90.9±1.9	97.5±0.9	99.1±0.4
200	68.5±4.0	87.0±1.7	95.6±0.4
300	65.5±4.8	75.0±4.6	87.0±4.1
400	54.3±6.2	61.2±5.8	70.5±5.8

รูปที่ 4. ความเข้มข้นไอระเหยทินเนอร์หลังผ่านตัวกรองชีวภาพ และประสิทธิภาพการบำบัด

เนื่องจากระบบกรองชีวภาพเป็นการทำงานของจุลินทรีย์ดังนั้นในการเดินระบบจะต้องเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าบรรยากาศทั่วไป จากการตรวจวัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกเวลากักพัก 90 วินาที พบว่ามีค่าระหว่าง 2,000-4,000 ppm นอกจากนั้นความเป็นกรดด่างของตัวกลางมีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ ในการทดลองนี้วัดความเป็นกรดด่างของตัวกลางพบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 7.5-8.0 อุณหภูมิตัวกลาง 29-34 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในเครื่องกรองชีวภาพ (Devinny et al., 1999; Schnelle Jr. & Brown, 2002)

ผลการศึกษาการบำบัดไอระเหยตัวทำละลายในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นแสดงในตารางที่ 3 พบว่าที่ความเข้มข้นสารประกอบอินทรีย์ระเหยไม่เกิน 200 ppm ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่า 90% เช่นเดียวกันในทุกการศึกษา เฉพาะในการศึกษานี้มีการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโทลูอีนและทินเนอร์ซึ่งมีโทลูอีนเป็นองค์ประกอบหลักที่ความเข้มข้น 300 และ 400 ppm ประสิทธิภาพจะลดต่ำกว่า 90% การบำบัดให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้นอาจต้องเพิ่มเวลากักพักหรือเจือจางความเข้มข้นของ ตัวทำละลาย

สรุปผลการทดลอง

การบำบัดไอระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหย ได้แก่ โทลูอีน ไซลีน และตัวทำละลายทินเนอร์ ด้วยเครื่องกรองชีวภาพ โดยมีตัวกลาง ได้แก่ ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก ตะกอนจุลินทรีย์และเศษไม้ ในอัตราส่วน 60:10:20:10 เวลากักพัก 30 60 และ 90 วินาที พบว่าการบำบัดไอระเหยของโทลูอีนที่ความเข้มข้น 300-400 ppm เวลากักพัก 30 วินาทีสามารถบำบัดไอระเหยของโทลูอีนให้มีค่าต่ำกว่า 200 ppm ซึ่งเป็นค่าโทลูอีนที่ยอมให้มีได้ในสถานประกอบการ การบำบัดไอระเหยของไซลีนที่ความเข้มข้น 200-400 ppm เวลากักพัก 30 วินาที สามารถบำบัดไอระเหยของไซลีนให้มีค่าต่ำกว่า 100 ppm ซึ่งเป็นค่าไซลีนที่ยอมให้มีได้ในสถานประกอบการ สำหรับการบำบัดไอระเหยของทินเนอร์ที่ความเข้มข้น 100-200 ppm เวลากักพัก 30 วินาทีสามารถบำบัดไอระเหยของทินเนอร์ให้มีค่าต่ำกว่า 100 ppm ที่ความเข้มข้น 300 ppm ต้องเพิ่มเวลากักพักเป็น 60 วินาทีจึงจะสามารถบำบัดไอระเหยของทินเนอร์ได้ต่ำกว่า 100 ppm และที่ความเข้มข้น 400 ppm ไม่สามารถบำบัดไอระเหยของทินเนอร์ให้ต่ำกว่า 100 ppm ได้ อาจต้องเพิ่มเวลากักพักหรือเจือจางความเข้มข้น ทั้งนี้การบำบัดไอระเหยของทินเนอร์จะยากกว่าการบำบัดไอระเหยของโทลูอีนหรือไซลีน เนื่องจากในไอระเหยของทินเนอร์ยังมีสารประกอบอินทรีย์ระเหยตัวอื่นๆ ผสมอยู่ด้วย เช่น อะซิโตน แอลกอฮอล์ อีเทอร์ เป็นต้น

ข้อแนะนำในการทำงานของระบบกรองชีวภาพสำหรับโรงงานขนาดกลางและขนาดเล็ก ระบบนี้สามารถทำงานเป็นกะได้ เมื่อจะปิดระบบในแต่ละวันควรฉีดพรมน้ำให้ความชื้นและเมื่อเปิดระบบในวันรุ่งขึ้นควรตรวจวัดความชื้นของตัวกลางหากลดต่ำควรฉีดพรมน้ำเพิ่มให้ได้ความชื้นของตัวกลางที่ประมาณ 60% ระบบกรองชีวภาพใช้การทำงานของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายแก๊สมลพิษได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมวลชีวภาพ ดังนั้นเมื่อทำงานไปชักระยะหนึ่งจำเป็นต้องเพิ่มธาตุอาหาร ในการทดลองนี้พบว่าเมื่อเดินระบบไปประมาณ 15-20 วัน

ประสิทธิภาพเริ่มลดลง ทั้งนี้เพราะธาตุอาหารที่จำเป็นถูกใช้ไป จึงควรเติมธาตุอาหารปุ๋ยสูตรธรรมดา 15-15-15 ผสมในน้ำฉีดพรมลงบนตัวกลางพร้อมการให้ความชื้น

ตารางที่ 3. เปรียบเทียบผลการศึกษาการบำบัดไอระเหยตัวทำละลายและแก๊สมลพิษ

ชนิดไอระเหยที่บำบัด	เวลากักพัก (วินาที)	ประสิทธิภาพ (%)	ตัวกลางที่ใช้
ไอระเหยโทลูอีน 20-200 ppm (Tungmungmee, 2003)	50	97	ปุ๋ยหมัก:เศษไม้:ตะกอนจุลินทรีย์ 70:20:10
ไอระเหยไซลีน 50-2,000 ppm (Lertphadungwit, 2005)	90	96	ดินใบก้ามปู:ปุ๋ยคอก 60:40
แอมโมเนีย 200 ppm	20	99	ปุ๋ยหมัก:ปุ๋ยคอก:เศษไม้: ตะกอนจุลินทรีย์ 60:10:20:10
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 200 ppm	40	100	
แอมโมเนียและไฮโดรเจนซัลไฟด์ 200:200 ppm (Wongwutthi, 2011)	30	99,98	
งานวิจัยนี้ ไอระเหยโทลูอีน 50, 100, 200, 300, 400 ppm	90	99, 98,92,86,79	ปุ๋ยหมัก:ปุ๋ยคอก:เศษไม้: ตะกอนจุลินทรีย์ 60:10:20:10
ไอระเหยไซลีน 50, 100, 200, 300, 400 ppm	90	98,99,97,93,86	
ไอระเหยทินเนอร์ 50, 100, 200, 300, 400 ppm	90	99,99,96,87,70	

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากวิทยาลัยพัฒนามหานคร มหาวิทยาลัยนวมินทราธิราช กรุงเทพมหานคร

เอกสารอ้างอิง

Cheng, Y., He, H., Yang, C., Zeng, G., Li, X., Chen, H., & Yu, G. (2016). Challenges and solutions for biofiltration of hydrophobic volatile organic compounds. *Biotechnology Advances. 34,* 1091-1102. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.06.007

Devinny, J. S., Deshusses, M. A. & Webster, T. S. (1999). *Biofiltration for Air Pollution Control*. Boca Raton: Lewis Publishers.

Lertphadungwit, E. (2005). Removal of xylene by a composite media biofilter. *Thai Environmental Engineering Journal*, *20*(2), 57-66. (in Thai)

Leson, M. C. & Winner, A. M. (1991). Biofiltration: An innovation air pollution control technology for VOC emission. *Journal of the Air & Waste Management Association*. *41*(8), 1045-1054. https://doi.org/ 10.1080/10473289.1991.10466898

Ministry of the Interior (1977) *Ministry of the Interior Notification: Safety in the Work Environment (Chemicals)*. Retrive June 25, 2017, from http://203.157.80.2/replyImages/20131218133746181.pdf (in Thai)

Pollution Control Department (2014) *Pollution Complaint Statistics 2014*, Retrive June 25, 2017, from http://www.pcd.go.th/info_serv/pol2_stat2557.html (in Thai)

Schnelle Jr., K. B. & Brown, C. (2002). *Air Pollution Control Technology Handbook*. Boca Raton: CRC Press.

Tungmungmee, S. (2003). *Removal efficiency of toluene by bench scale biofilter* (Master thesis) Department of Environmental Engneering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok. (in Thai)

Wongwutthi, C. (2011). *Simultaneous removal of ammonia and hydrogen sulfide in air stream using a compost-based biofilter* (Master thesis) Department of Environmental Engneering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok. (in Thai)

The Journal of Applied Science **Vol. 17 No. 1: 64-74 [2018]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2018.04.002
ISSN 1513-7805 Printed in Thailand ISSN 2586-9663 (Online)

Research Article

การบำบัดของเสียกลีเซอรอลโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว

Treatment of glycerol waste using single chamber microbial fuel cell

วนัสพรรัศม์ สวัสดี[1] ปิ่นอนงค์ ธนิกกุล[2] และ นิพนธ์ พิสุทธิ์ไพศาล[2,3,4*]

Vanatpornratt Sawasdee[1], Pinanong Tanikkul[2] and Nipon Pisutpaisal[2,3,4*]

[1]สาขาวิชาสิ่งแวดล้อมศึกษา วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 13180

[2]ศูนย์วิจัยเฉพาะทางไบโอเซ็นเซอร์และไบโออิเล็คทรอนิคส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[3]ศูนย์วิจัยด้านเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์และพลังงานหมุนเวียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[4]ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาหารและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

[1] Department of Environmental Studies, College of Innovative Management, Valaya Alongkorn Rajabhat University under The Royal Patronage, Khlong Luang, Pathum Thani Province 13180, Thailand

[2] The Biosensor and Bioelectronics Technology Center, King Mongkut's University of Technology North Bangkok,

[3] The Research and Technology Center for Renewable Products and Energy, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

[4] Department of Agro-Industrial, Food and Environment Technology, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand

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

Received: 15/11/2017; Accepted: 27/04/2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าและประสิทธิภาพการบำบัดจากของเสียกลีเซอรอล ที่ได้จากกระบวนการปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชั่น ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยการใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว มีการใส่เชื้อจุลินทรีย์ที่ทำการปรับสภาพด้วยความร้อนเข้าสู่ระบบ และมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียสเพื่อเริ่มต้นเดินระบบ เริ่มจากการเดินระบบแบบเปิดวงจร เพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์ปรับสภาพ จากนั้นเดิน

ระบบโดยใส่ตัวต้านทานไฟฟ้า 1,000 โอห์มเพื่อให้เป็นวงจรปิด จากการทดลองพบว่า ของเสียกลีเซอรอลที่แปรผันค่าความเข้มข้นเท่ากับ 2,000 มก.ซีโอดี/ล. มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 57.61 มิลลิโวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้า $5.76x10^{-2}$ มิลลิแอมป์ และมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีทั้งหมดเฉลี่ยสูงสุด 75.22 เปอร์เซ็นต์ และที่ค่าความเข้มข้นซีโอดี 2,500 มก.ซีโอดี/ล. พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าลดลงและเข้าสู่สภาวะคงที่ที่ 28.22 มิลลิโวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้า $2.82x10^{-2}$ มิลลิแอมป์ และมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองพบว่าสามารถใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า และบำบัดค่าความสกปรกจากของเสียกลีเซอรอลได้

คำสำคัญ: ของเสียกลีเซอรอล, เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว, ประสิทธิภาพการบำบัดกลีเซอรอล

Abstract

This research was studied the electricity generation and treatment efficiency from glycerol waste from transesterification reaction in biodiesel production process by single-chamber microbial fuel cell (SC-MFC). The SC-MFCs were inoculated with the heat pre-treated seed and the synthetic wastewater in fed batch mode at 37^{o}C with external resistance 1,000 ohms. The waste glycerol was varied concentration of 2,000 and 2,500 mg COD/L. The results showed that waste glycerol concentration of 2,000 and 2,500 mg COD/L can be obtained maximum current $5.76x10^{-2}$ mA and $2.82x10^{-2}$, respectively. Maximum total COD removal efficiencies from 2,000 and 2,500 mg COD/L were 75.22% and 80%, respectively. These results suggested that SC-MFC is a potential technology for electricity generation and glycerol waste treatment.

Keywords: glycerol waste, single chamber microbial fuel cell, glycerol treatment efficiency

บทนำ

ในปัจจุบันสถานการณ์พลังงานของประเทศไทยยังคงมีความต้องการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการเติบโตทางเศรษฐกิจ ส่งผลให้ประเทศไทยยังคงต้องมีการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ เพื่อขับเคลื่อนประเทศ ซึ่งในปี พ.ศ. 2557 ประเทศไทยมีการนำเข้าพลังงานรวม 69,248 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ น้ำมันจากเชื้อเพลิงฟอสซิลยังคงเป็นพลังงานที่มีความต้องการใช้มากที่สุด โดยคิดเป็นร้อยละ 50 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด ในส่วนของการใช้พลังงานทดแทน หรือพลังงานหมุนเวียนนั้น (Ministry of energy, 2017) ยังถือได้ว่ามีปริมาณน้อย เพียงร้อยละ 9.2 เท่านั้น ซึ่งถือว่ายังมีปริมาณการใช้ยังไม่แพร่หลาย ในส่วนของภาครัฐและภาคเอกชนเริ่มเข้ามาให้ความสำคัญกับพลังงานทางเลือกเพิ่มมากขึ้น พลังงานทดแทนหรือพลังงานหมุนเวียนถือว่าเป็นพลังงานสะอาดและ

ไม่สร้างผลกระทบสิ่งแวดล้อม พลังงานทดแทนในปัจจุบันมีหลากหลายประเภท เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานชีวมวล ไบโอดีเซล เอทานอล ก๊าซชีวภาพ เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ รวมไปถึงการนำของเสียจากอุตสาหกรรมมาบำบัดและได้พลังงานสะอาด ก็ถือได้ว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากได้ประโยชน์ถึงสองทาง (Ministry of Energy, 2015) ซึ่งข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ คือ สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากสารตั้งต้นทางชีวภาพได้โดยตรง เช่น น้ำเสีย ทำให้สามารถบำบัดน้ำเสีย และผลิตกระแสไฟฟ้าได้ในเวลาเดียวกัน ทั้งยังถือว่าเป็นพลังงานสะอาดอีกด้วย (Pant et al., 2009)

ของเสียกลีเซอรอลเป็นของเสียที่เกิดจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชั่น (transesterification) ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (Yang et al., 2012) ในปัจจุบันมีการสนับสนุนจากกระทรวงพลังงานให้มีการผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น เพื่อลดการนำเข้าเชื้อเพลิง รวมไปถึงผู้บริโภคในปัจจุบันได้ให้ความสนใจเชื้อเพลิงไบโอดีเซลเป็นอย่างมาก จึงได้มีการพัฒนาเครื่องยนต์เพื่อรองรับเชื้อเพลิงไบโอดีเซล เช่น เครื่องยนต์ดีเซล 2 จังหวะ และเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ เป็นต้น ถือได้ว่าไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ทำให้เกิดปริมาณของเสียกลีเซอรอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจำนวนมาก และยากต่อการกำจัด (Almeida et al., 2012) จึงต้องหาเทคโนโลยีที่เหมาะสมและได้ประโยชน์สูงสุดทั้งในด้านการบำบัดของเสียกลีเซอรอลและต้นทุนที่ราคาไม่แพง ซึ่งของเสียกลีเซอรอลสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายประเภท เช่น การนำเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ ใช้เป็นอาหารสัตว์ เป็นต้น แต่เทคโนโลยีที่เหมาะสมและน่าสนใจสำหรับของเสียกลีเซอรอล คือ เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสีย และเปลี่ยนพลังงานที่เกิดขึ้นทางชีวเคมีไปเป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรงและสามารถนำไปใช้ได้ในทันที (Nimje et al., 2011)

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (Microbial Fuel Cell, MFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ (Du et al., 2007) โดยมีหลักการคือย่อยสลายสารอินทรีย์ และมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา จากนั้นจะมีการขนส่งอิเล็กตรอนเพื่อส่งต่อให้ตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายต่อไป ซึ่งเมื่อมีการเปรียบเทียบระบบบำบัดแบบใช้อากาศ ไม่ใช้อากาศ และเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ ก็พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ นั้นมีประสิทธิภาพสูง เหมาะแก่การบำบัดน้ำเสีย และผลิตกระแสไฟฟ้าไปพร้อมกัน (ตารางที่ 1) ดังนั้นเทคโนโลยีนี้จึงสามารถบำบัดน้ำเสียและผลิตกระแสไฟฟ้าได้พร้อมกัน ทำให้งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการนำของเสียกลีเซอรอลที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล มาบำบัดโดยใช้เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ เพื่อเพิ่มมูลค่าให้ของเสียกลีเซอรอลได้อีกด้วย

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์มีต้นแบบมาจากงานวิจัยของ Liu & Logan (2004) ซึ่งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว ดังรูปที่ 1 การดำเนินการใช้วงจรไฟฟ้าแบบปิด คือ วงจรไฟฟ้าที่อิเล็กตรอนสามารถไหลได้ครบวงจร โดยระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จะดำเนินการบำบัดกลีเซอรอลของเสียและการผลิตกระแสไฟฟ้าไปพร้อมกัน ใน

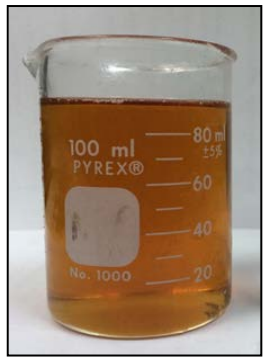
การเดินระบบนั้นเริ่มต้นจากการปรับสภาพเชื้อจุลินทรีย์ให้สามารถเกาะขั้วแอโนด โดยการใช้น้ำเสียสังเคราะห์ผสมกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่กำหนดความเข้มข้นซีโอดี 1,000 มก.ซีโอดี/ล. และสภาวะที่ใช้ในการดำเนินระบบ คือ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-เบส มีค่า 7 (Behera & Ghangrekar, 2009) และใส่ตัวต้านทานภายนอก 1,000 โอห์ม (Sawasdee & Pisutpaisal, 2016)



รูปที่ 1. แสดงลักษณะภายนอกของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว

2. ของเสียกลีเซอรอลและเชื้อจุลินทรีย์

ของเสียกลีเซอรอลที่ใช้ในการทดลองนำมาจากบ่อบำบัดน้ำของบริษัท ตรังน้ำมันปาล์ม จำกัด มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลและมีความบริสุทธิ์กลีเซอรอล 78-80 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 2) โดยมีค่าองค์ประกอบต่างๆ ของของเสียกลีเซอรอลดังแสดงในตารางที่ 1 ในส่วนของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในระบบจะผ่านการให้ความร้อน 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในกลุ่มเมทาโนเจน (Ruggeri et al., 2015)



รูปที่ 2. ของเสียกลีเซอรอลที่ใช้ในการทดลอง

 doi: 10.14416/j.appsci.2018.04.002

ตารางที่ 1. องค์ประกอบทั่วไปของของเสียกลีเซอรอล

องค์ประกอบ	ความเข้มข้น	หน่วย
กลีเซอรอล	75	เปอร์เซ็นต์
เถ้า	10	เปอร์เซ็นต์
น้ำ	10	เปอร์เซ็นต์
สารอินทรีย์อื่น	5	เปอร์เซ็นต์

ที่มา: Tan et al., 2013

3. การเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว

การเดินระบบการบำบัดของเสียกลีเซอรอลร่วมกับการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวนั้นเริ่มจากการนำจุลินทรีย์ที่ผ่านการให้ความร้อนเพื่อทำลายสปอร์ที่มีความสามารถในการสร้างก๊าซมีเทนออก หลังจากนำจุลินทรีย์เข้าระบบแล้ว จึงนำน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นแหล่งคาร์บอน โดยมีการเดินระบบแบบแบท (batch) และควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส โดยไม่ใส่ตัวต้านทานไฟฟ้า (open circuit operation) ต่อวงจรของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เข้ากับมัลติมิเตอร์และทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาแบบอัตโนมัติทุกๆ 10 นาที ทำการเปลี่ยนน้ำเสียสังเคราะห์ทุกวัน จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่ เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่โดยไม่ใส่ตัวต้านทานไฟฟ้าแล้ว จากนั้นทำการใส่ตัวต้านทานไฟฟ้า (1,000 โอห์ม) และเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ 1,000 มก.ซีโอดี/ล. จนได้ค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ ในช่วงการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ได้ติดตามบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและเก็บตัวอย่างน้ำเสียมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ (ตารางที่ 2) เพื่อติดตามลักษณะการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ หลังจากที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คงที่ แสดงว่าเชื้อจุลินทรีย์เข้าสู่สภาวะ steady state พร้อมที่นำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของของเสียกลีเซอรอลที่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยเพิ่มความเข้มข้นเป็น 2,000 และ 2,500 มก.ซีโอดี/ล. เพื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรวมถึงประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในรูปของซีโอดี

4. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

การวิเคราะห์ตัวอย่างหลังจากการทำการทดลองบำบัดของเสียกลีเซอรอลและผลิตกระแสไฟฟ้านั้น มีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2. แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบบำบัดของเสียกลีเซอรอลและผลิตกระแสไฟฟ้า

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	ความถี่ในการวิเคราะห์	วิธีการวิเคราะห์
ความเป็นกรด-เบส (pH)	2 วัน 1 ครั้ง	Electrode pH Meter
ซีโอดีทั้งหมด (COD_T)	2 วัน 1 ครั้ง	วิธีรีฟลักซ์ปิดแบบเทียบสี
ซีโอดีละลาย (COD_S)	2 วัน 1 ครั้ง	วิธีรีฟลักซ์ปิดแบบเทียบสี
ปริมาณกลีเซอรอล	2 วัน 1 ครั้ง	วิธีมาตรฐาน Chromatropic acid method
กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA_S)	สัปดาห์ละ 1 ครั้ง	เครื่อง Gas chromatography
องค์ประกอบของก๊าซ	สัปดาห์ละ 1 ครั้ง	เครื่อง Gas Chromatograph

ที่มา: Standard Methods for Examination of Water and Wastewater ซึ่ง APHA : American Public Health Association, AWWA : American Water Works Association และ WPCF : Water Pollution Control Federation

5. การคำนวณค่าทางไฟฟ้า

ในการทดลองจะเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าจากโปรแกรม ExcelLINX ที่แสดงผลมาจากเครื่องมัลติมิเตอร์ รุ่น Keithly Series 2700, Ohio, United States of America โดยเครื่องมัลติมิเตอร์จะต่อเข้ากับเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์และคอมพิวเตอร์โดยตรงเพื่อเก็บข้อมูลค่าแรงดันไฟฟ้าทุกๆ 10 นาที

สูตรการคำนวณทางไฟฟ้า (Logan, 2008)

แรงดันไฟฟ้า $V = IR$ (1)

กระแสไฟฟ้า $I = V/R$ (2)

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การปรับสภาพเชื้อจุลินทรีย์และการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์เป็นแผ่นฟิล์มชีวภาพ

การปรับสภาพเชื้อจุลินทรีย์สำหรับระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว เพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถเกาะขั้วแอโนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เริ่มจากการปรับสภาพจะใช้วงจรแบบเปิด (Open circuit voltage, OCV) และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ร่วมกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ เพื่อเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อ เมื่อทำการปรับสภาพจนถึงวันที่ 14 พบว่า แรงดันไฟฟ้าคงที่ประมาณ 297 มิลลิโวลต์ ในส่วนประสิทธิภาพการใช้ซีโอดีมีค่าสูงถึง 88.7 เปอร์เซ็นต์ คือมีการใช้ ซีโอดีไปเท่ากับ 950 มก./ล. จากผลการทดลองนี้ พบว่าการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ภายในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ความเข้มข้นน้ำเสีย 1,000 มก.ซีโอดี/ล. เพียงพอที่จะเป็นพลังงานสำหรับเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ จากนั้นระบบจะเข้าสู่การต่อวงจรไฟฟ้าแบบปิดวงจร (close circuit voltage) โดยการใส่ตัวต้านทานไฟฟ้า 1,000 โอห์ม เข้าไป เพื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ มีการควบคุมอย่างสม่ำเสมอและครบวงจรไฟฟ้า จากผลการทดลองเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นกลีเซอรอลบริสุทธิ์ 1,000 มก.ซีโอดี/ล.

เป็นเวลา 6 วัน พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้มีแนวโน้มคงที่ เมื่อคำนวณค่ากระแสไฟฟ้า ได้เฉลี่ยสูงสุดที่ 0.0007 มิลลิแอมป์ หลังจากนั้นทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นกลีเซอรอลบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นเป็น 2,000 มก.ซีโอดี/ล. พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเริ่มคงที่ที่แรงดันไฟฟ้าประมาณ 1.22 มิลลิโวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 0.0013 มิลลิแอมป์ เมื่อพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นกลีเซอรอล 1,000 มก.ซีโอดี/ล. ให้ค่ากระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่เท่ากับ 1.26 มิลลิแอมป์/ตร.ม. และเพิ่มขึ้นเป็น 1.76 มิลลิแอมป์/ตร.ม. เมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 2,000 มก.ซีโอดี/ล. แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นกลีเซอรอลบริสุทธิ์ 2,000 มก.ซีโอดี/ล. ส่งผลให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีและกลีเซอรอลในน้ำเสียแล้วปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโปรตอนและอิเล็กตรอนได้มากขึ้นตามลำดับ (Kim et al., 2005)

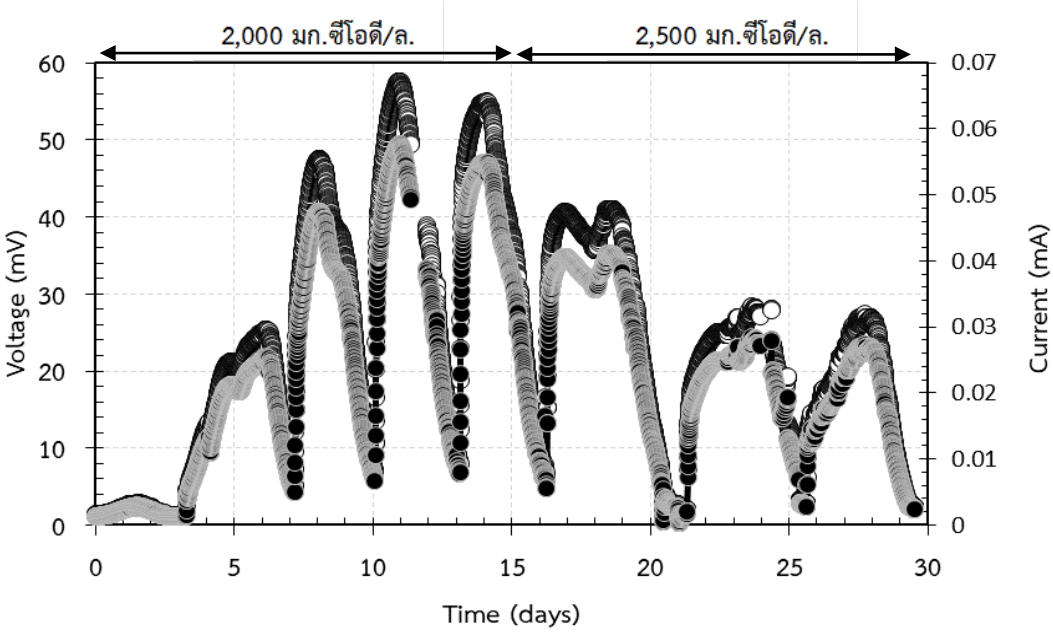
2. การผลิตกระแสไฟฟ้าจากของเสียกลีเซอรอล

การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์นั้น สามารถใช้สารตั้งต้นได้หลายชนิด เช่น น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนัง ซึ่งสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 100 มิลลิแอมป์ ต่อตร.ม. (Sawasdee & Pisutpaisal, 2016) น้ำเสียจากโรงงานอาหาร ซึ่งสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 527 มิลลิแอมป์ ต่อตร.ม. (Mansoorian et al., 2013) น้ำเสียจากโรงงานแป้ง ซึ่งสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 900 มิลลิแอมป์ ต่อตร.ม. (Lu et al., 2009) เป็นต้น ซึ่งน้ำเสียเหล่านี้เป็นแหล่งคาร์บอนได้ดี แต่ในงานวิจัยนี้ได้นำของเสียกลีเซอรอลมาใช้ในงานวิจัย เพื่อเพิ่มทางเลือกในการนำของเสียกลีเซอรอลไปใช้ประโยชน์ต่อไป โดยงานวิจัยนี้มีการศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของของเสียกลีเซอรอล โดยมีการผันแปรความเข้มข้นที่ 2,000 และ 2,500 มก.ซีโอดี/ล. จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้น 2,000 มก.ซีโอดี/ล. ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นในทุกรอบการทดลองและมีค่าเฉลี่ยคงที่ 57.61 มิลลิโวลต์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของของเสียกลีเซอรอลเป็น 2,500 มก.ซีโอดี/ล. พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าลดลงและเข้าสู่สภาวะคงที่ที่ 28.22 มิลลิโวลต์ และมีค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2.82×10^{-2} มิลลิแอมป์ หรือ 39.92 มิลลิแอมป์ ต่อตร.ม. ดังรูปที่ 3 จากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของของเสียกลีเซอรอล จะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ผลิตกระแสไฟฟ้าพบว่าได้ค่ากระแสไฟฟ้าที่น้อยกว่าสารตั้งต้นชนิดอื่น ความเข้มข้นของของเสียกลีเซอรอลที่มากขึ้นนั้น ส่งผลให้มีปริมาณเกลือในระบบมากเกินพอ ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถทำงานได้ดี ส่งผลทำให้ผลิตแรงดันและกระแสไฟฟ้าออกมาได้น้อยลงตามลำดับ (Yong et al., 2014)

3. ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

จากการทดลองเมื่อพิจารณาในด้านประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี (ดังรูปที่ 4) ที่ความเข้มข้น 2,000 มก.ซีโอดี/ล. มีค่าประสิทธิภาพการบำบัดทั้งหมดเฉลี่ย 75.22±3.35 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 2,500 มก.ซีโอดี/ล. พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีทั้งหมดสูงขึ้นเฉลี่ยเท่ากับ 80±1.77 เปอร์เซ็นต์ เนื่องด้วยที่ความเข้มข้นของกลีเซอรอลของเสียเท่ากับ 2,500 มก.ซีโอดี/ล. เมื่อนำประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ใช้กลีเซอรอลพบว่า ในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่า ดังตัวอย่าง Chookaew et al. (2014) ทำงานวิจัยโดย

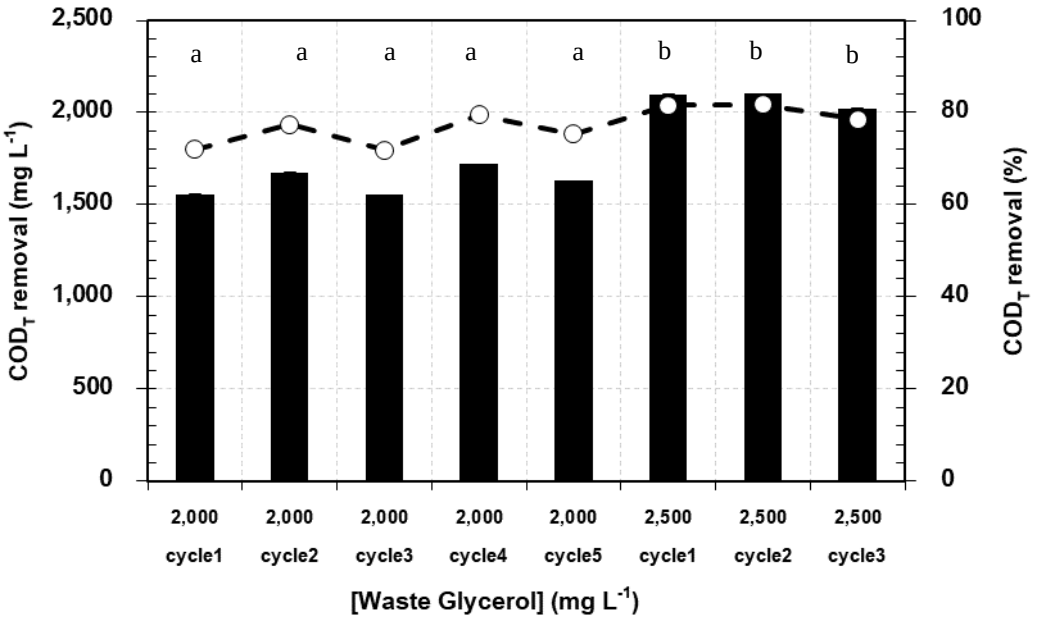
นำของเสียกลีเซอรอลมาบำบัดและผลิตกระแสไฟฟ้าในเวลาเดียวกันโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์นั้น พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 50% ในขณะที่ในงานวิจัยนี้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงถึง 80% แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ในระบบสามารถปรับสภาพให้เข้ากับระบบได้ อีกทั้งจุลินทรีย์ในระบบสามารถใช้กลีเซอรอลเป็นแหล่งคาร์บอนได้เป็นอย่างดี ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดในรูปซีโอดีมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3. ค่าแรงดันไฟฟ้า (ดำ) และค่ากระแสไฟฟ้า (ขาว) ของน้ำเสียกลีเซอรอลของเสีย

สรุปผลการทดลอง

การทดลองใช้เทคโนโลยีการบำบัดของเสียกลีเซอรอลโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ แบบห้องเดี่ยวนั้น พบว่า เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวสามารถบำบัดของเสียกลีเซอรอลได้โดยหลังจากการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ให้มีลักษณะเป็นฟิล์มชีวภาพ ระบบจะเริ่มเข้าสู่สภาวะการบำบัดของเสียกลีเซอรอลและการผลิตกระแสไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ โดยพบว่า ค่าการบำบัดที่ความเข้มข้น 2,000 มก.ซีโอดี/ล. มีค่าการบำบัดน้อยแต่ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่ามากกว่าที่ความเข้มข้น 2,500 มก.ซีโอดี/ล. เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูงจะมีปริมาณเกลือสูงทำให้ เกิดการยับยั้งการผลิตกระแสไฟฟ้า (Yong et al., 2014; Santibáñez et al., 2011) แต่อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว เพื่อการบำบัดของเสียกลีเซอรอลควบคู่ไปกับการผลิตกระแสไฟฟ้า ยังถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจและเหมาะสมที่จะพัฒนาสู่อุตสาหกรรมต่อไป



รูปที่ 4. ปริมาณการบำบัดซีโอดีทั้งหมด (กราฟแท่ง) และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีโอดีทั้งหมด (จุดข้อมูล) (n=3) จุดข้อมูลที่มีอักษรกำกับเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนจุดข้อมูลที่มีอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ (ทุนวิจัยเลขที่ 6244101) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) สัญญาทุนเลขที่ PHD/0322/2552 และบัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนวิจัย (สัญญาทุนเลขที่ JGSEE/THESIS/226) ทำให้งานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

Almeida, J. R M., Fávaro1, L. C. L., & Quirino, B. F. (2012). Biodiesel biorefinery: opportunities and challenges for microbial production of fuels and chemicals from glycerol waste. *Biotechnology for Biofuels*, *5, 48*. https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-48

American Public Health Association-American Water Works Association-Water Pollution Control Federation (APHA-AWWA-WPCF). (2000) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed. APHA, Washington, DC.

Behera, M., & Ghangrekar, M. M. (2009). Performance of microbial fuel cell in response to change in sludge loading rate at different anode feed pH. *Bioresource Technology*, 100(21), 5114-5121. doi: 10.1016/j.biortech.2009.05.020

Chookaew, T., Prasertsan, P., & Ren Z. J. (2014). Two-stage conversion of crude glycerol to energy using dark fermentation linked with microbial fuel cell or microbial electrolysis cell. New Biotechnology, *31*(2), 179-184. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2013.12.004

Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: a promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advance*, 25(5), 464-482. doi: 10.1016/j.biotechadv.2007.05.004

Kim, J. R., Min, B., & Logan, B. E. (2005). Evaluation of procedures to acclimate a microbial fuel cell for electricity production. *Applied Microbiology Biotechnology*, 68, 23-30. doi 10.1007/s00253-004-1845-6

Liu, H., & Logan, B. E. (2004). Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of proton exchange membrane. *Environmental Science and Technology*, 38 (14), 4040-4046. doi: 10.1021/es0499344

Logan B. E., (2008). Microbial Fuel Cells. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Lu, N., Zhou, S.-G., Zhuang, L., Zhnag, J.-T., Ni, J.-R., (2009). Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology. *Biochemical Engineering Journal*. *43*(3), 246-251. https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.10.005

Mansoorian, J. H., Mahvi, H. A., Jafari, J. A., Amin, M. M., Rajabizadeh, A., & Khanjani, N. (2013). Bioelectricity generation using two chamber microbial fuel cell treating wastewater from food processing. *Enzyme and Microbial Technology*. *52*(6-7), 352-357. https://doi.org/10.1016/j.enzmictec. 2013.03.004

Ministry of energy. (2015). Alternative Energy Development Plan: AEDP2015. Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Bangkok, Thailand. (in Thai)

Ministry of energy. (2017). Biogas production from several materials. (1st ed.). Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Bangkok, Thailand. (in Thai)

Nimje, V. R., Chen, C-Y., Chen, C-C., Chen, H-R., Tseng, M-J., Jean, J-S., & Chang, Y-F. (2011). Glycerol degradation in single-chamber microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 102 (3), 2629-2634. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.062

Pant, D., Bogaert, G. V., Diels, L., & Vanbroekhoven K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology, 101*(6), 1533-1543. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017

Ruggeri, B., Tommasi, T. & Sanfilippo, S. (2015) Pretreatment to increase hydrogen producing bacteria (HPB). In B. Ruggeri, T. Tommasi & S. Sanfilippo (Eds.), $BioH_2$ & $BioCH_4$ Through Anaerobic Digestion, Green Energy and Technology pp. 25-36. London: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-1-4471-6431-9_2

Sawasdee, V., & Pisutpaisal, N. (2016). Simultaneous pollution treatment and electricity generation of tannery wastewater in air-cathode single chamber MFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (35), 15632-15637. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.179

Santibáñez, C., Varnero, M. T., & Bustamante, M. (2011). Residual glycerol from biodiesel manufacturing, waste or potential source of bioenergy: A review. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 71 (3), 469- 475. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392011000300019

Tan, H.W., Abdul, Aziz A.R., & Aroua, M. K. (2013). Glycerol production and its applications as a raw material: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 118-127. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.035

Yang, F., Hanna, M. A., & Sun, R. (2012). Value-added uses for crude glycerol--a byproduct of biodiesel production. *Biotechnology for Biofuels*, 5(13), https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-13

Yong, L., Wu, H.Y., Jia, J. J., Li, X. F., Zhang, Q. M., Xiao, C., Ming, P. & Nan, J. (2014). Salinity effect on the microbial fuel cell performance. Applied Mechanics and Materials, 651-653, 1365-1369. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.651-653.1365

The Journal of Applied Science **Vol. 17 No. 1: 75-86 [2018]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2018.05.003
ISSN 1513-7805 (Printed in Thailand) ISSN 2586-9663 (Online)

Research Article

การปรับสภาพลำต้นปาล์มน้ำมันด้วยตัวทำละลายเพื่อย่อยด้วยเอนไซม์

Organoslov pretreatment of oil palm trunk for enzymatic hydrolysis

พงษ์ศักดิ์ นพรัตน์[1,2]*

Pongsak Noparat[1,2]*

[1]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี สุราษฎร์ธานี 84100

[2]หน่วยวิจัยพลังงานทดแทนและสิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชน มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี สุราษฎร์ธานี 84100

[1]Program in Environmental Science, Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University, Suratthani 84100, Thailand

[2]Renewable Energy and Environment Research for Local Community Unit (REERCU), Suratthani Rajabhat University, Suratthani 84100, Thailand

***E-mail**: pongsak@sru.ac.th

Received: 09/03/2018; Accepted: 15/05/2018

บทคัดย่อ

ลำต้นปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรที่มีองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสปริมาณสูงเหมาะสำหรับการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล การปรับสภาพชีวมวลลำต้นปาล์มน้ำมันด้วยตัวทำละลายทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการย่อยด้วยเอนไซม์ งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับสภาพลำต้นปาล์มน้ำมันด้วยเอทานอลร่วมกับกรดซัลฟิวริก โดยศึกษาความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกร้อยละ 1-3 เอทานอลร้อยละ 40-60 และอุณหภูมิ 170-190 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการย่อย 30 นาที ผลการทดลอง พบว่า การปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ร่วมกับเอทานอลร้อยละ 50 ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณชีวมวลหลังการปรับสภาพกลับคืนมาร้อยละ 66.1 สามารถกำจัดลิกนินและไซโลสได้ร้อยละ 18.2 และ 93.9 ตามลำดับ เมื่อย่อยชีวมวลหลังการปรับสภาพด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่ความเข้มข้น 15 FPU/กรัมเซลลูโลส ร่วมกับเอนไซม์ ß-glucosidase ที่ความเข้มข้น 30 CBU/กรัมเซลลูโลส สามารถเปลี่ยนเซลลูโลสเป็นกลูโคสได้ร้อยละ 100 ภายในวลา 24 ชั่วโมง

คำสำคัญ: ลำต้นปาล์มน้ำมัน, เอนไซม์, การปรับสภาพ, เอทานอล

Abstract

Oil palm trunk (OPT) an abundant agriculture waste was evaluated as an alternative lignocellulosic biomass resource for bioethanol production. Organosolv pretreatment was applied to the OPT to enhance its enzymatic saccharification. The pretreatment conditions were optimized through a designed experiment within the initial H_2SO_4 concentrations 1-3% (w/w), 40-60% Ethanol and 170-190ºC for 30 min. The results indicated that 3% H_2SO_4, 50% Ethanol at 170ºC, the recoveries of biomass was 66.1%. Organosolv pretreatment removed were 18.2% lignin and 93.9% xylose. OPT pretreated for enzymatic hydrolysis with a cellulase loading of 15 FPU/g cellulose with ß-glucosidase (30 CBU/g cellulose), the cellulose to glucose conversion yields was 100% at 24 h.

Keywords: oil palm trunk, enzyme, pretreatment, ethanol

บทนำ

เมื่อต้นปาล์มน้ำมันอายุประมาณ 25-30 ปี จะให้ผลผลิตน้ำมันที่น้อยลง ชาวสวนปาล์มจึงต้องโค่นต้นปาล์มเหล่านั้นทิ้งเพื่อปลูกปาล์มใหม่ ปาล์มที่ถูกโค่นเหล่านั้นจะถูกทำลายด้วยหลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นการเผาหรืออัดสารเคมีให้ปาล์มยืนต้นตายซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นการทำให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ดังนั้นถ้ามีวิธีการนำต้นปาล์มน้ำมันไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและเป็นการช่วยลดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ต้นปาล์มที่ตัดทิ้งหลังจากต้นปาล์มมีอายุมาก (>25 ปี) และมีผลผลิตน้อย (70 ตันน้ำหนักแห้งต่อเฮกแตร์ของพื้นที่ปลูกปาล์ม) (Kee, 2004) เมื่อพิจารณาพบว่าองค์ประกอบของต้นปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส (ร้อยละ 31.3-42.5) เฮมิเซลลูโลส (ร้อยละ 19.7-31.0) และลิกนิน (ร้อยละ 10.74-18.5) (Chin et al., 2010; Noparat et al., 2011) จากองค์ประกอบเหล่านี้สามารถนำมาผลิตเป็นน้ำตาลโดยกระบวนการทางเคมีและทางชีวภาพ โดยก่อนนำต้นปาล์มน้ำมันไปผลิตน้ำตาลด้วยเอนไซม์นั้นต้องมีการปรับสภาพหลายกระบวนการทั้งกระบวนการทางกายภาพ (physical pretreatment) โดยการใช้แรงกล เช่น การบด การตัด เป็นต้น การปรับสภาพโดยกระบวนการทางเคมีกายภาพ (physical-chemical pretreatment) เช่น การระเบิดด้วยไอน้ำ (steam explosion) การระเบิดด้วยแอมโมเนีย (ammonia fiber explosion) เป็นต้น การปรับสภาพโดยกระบวนการทางเคมี (chemical pretreatment) เช่น การใช้กรด (acid hydrolysis) การใช้ด่าง (alkaline hydrolysis) (Mosier et al., 2005; Obama et al., 2012) การใช้สารละลายอินทรีย์ (organosolv) การใช้โอโซน การกำจัดลิกนินในเซลลูโลสด้วยซัลไฟท์ (sulfite pretreatment to overcome recalcitrance of lignocellulose, SPORL) การใช้ของเหลวไอออนิก (ionic liquid)

 doi: 10.14416/j.appsci.2018.05.003

และการปรับสภาพโดยกระบวนการทางชีวภาพ (biological pretreatment) เช่น การใช้เชื้อจุลินทรีย์จำพวกรา ได้แก่ ราขาว ราน้ำตาล เป็นต้น (Noparat et al., 2017) อย่างไรก็ตามแต่ละกระบวนการปรับสภาพจะส่งผลต่อโครงสร้างของวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสแตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกกระบวนการปรับสภาพมาใช้ในการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุชีวมวลนั้นจำเป็นต้องทราบถึงชนิด โครงสร้างทางเคมี และองค์ประกอบอื่น ๆ ของวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสแต่ละชนิดก่อน ทำการเลือกกระบวนการปรับสภาพให้เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยเซลลูโลส นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการดำเนินการและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย (Megawati et al., 2010)

ดังนั้น งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการปรับสภาพด้วยสารละลายอินทรีย์ (organosolv) เนื่องจากวิธีนี้มีข้อดีคือสามารถเก็บเกี่ยวเอทานอลโดยการกลั่นแล้วนำกลับมาใช้ปรับสภาพในครั้งต่อไปได้ นอกจากนี้ลิกนินที่ได้จากการปรับสภาพด้วยสารละลายอินทรีย์สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ (Pan et al., 2005; Zhao et al., 2009)

วิธีการทดลอง

งานวิจัยเป็นแบบเป็นการวิจัยแบบทดลอง (experimental research) โดยมีวิธีดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. วิเคราะห์องค์ประกอบลำต้นปาล์มน้ำมัน โดยนำลำต้นปาล์มน้ำมันสดอายุ 25 ปี จากสวนปาล์มน้ำมันบ้านไทรทอง ตำบลบางวัน อำเภอคุระบุรี จังหวัดพังงา มาตัดเป็นท่อน ๆ ยาวประมาณท่อนละ 50 เซนติเมตร แล้วนำแต่ละท่อนมาบดด้วยเครื่องย่อยปุ๋ยพืชสดให้มีขนาดน้อยกว่า 3 มิลลิเมตรแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105±2 องศาเซลเซียส ให้เหลือความชื้นประมาณร้อยละ 10 แล้วนำไปบดให้ละเอียดขนาด 0.5-1 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องบด (hammer mill) หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของลำต้นปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ชนิดของน้ำตาล และเถ้า (AOAC, 2012)

2. ศึกษาการปรับสภาพลำต้นปาล์มน้ำมันด้วยเอทานอลร่วมกับกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิสูง โดยนำลำต้นปาล์มน้ำมันมาปรับสภาพด้วยเอทานอลร่วมกับกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิสูงโดยออกแบบการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1 โดยศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (ร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนัก) ความเข้มข้นของเอทานอล (ร้อยละ 40-60 โดยน้ำหนัก) และอุณหภูมิ (170-190 องศาเซลเซียส) ใช้เวลาในการย่อย 30 นาที (Noparat et al., 2015)

ตารางที่ 1. ปัจจัยและระดับของการทดลองแบบ Fractional factorial design

ปัจจัย	ระดับ		
กรดซัลฟิวริก (ร้อยละ)	1	2	3
เอทานอล (ร้อยละ)	40	50	60
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	170	180	190

การปรับสภาพในการทดลองนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้ไมโครเวฟ ในการให้ความร้อน ประกอบด้วยถังย่อย 6 ถัง มีปริมาตรถังทั้งหมด 50 มิลลิลิตร ใช้ปริมาณลำต้นปาล์มน้ำมัน 10 กรัม และสารละลายกรดกับเอทานอลที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) โดยทำการผสมที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส) (Noparat et al., 2015)

ชุดการทดลองแบบ Fractional factorial design ประกอบด้วย 9 ชุดการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 2 หลังจากปรับสภาพแล้วกรองแยกของเหลวออกจากของแข็ง นำส่วนของของเหลวไปวิเคราะห์ชนิดและปริมาณน้ำตาลรวมทั้งกรดฟอร์มิก (formic acid) ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล (hydroxymethylfurfural, HMF) เฟอร์ฟูรัล (furfural) กรดแอซีติก (acetic acid) และกรดเลวูลินิค (levulinic acid) ด้วยเครื่อง High performance liquid chromatography (HPLC) สำหรับในส่วนของของแข็งนำไปหาความชื้นและผลผลิตที่ได้รวมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบแล้วนำไปย่อยด้วยเอนไซม์ (Shuai et al., 2010)

ตารางที่ 2. ชุดการทดลองแบบ Fractional factorial design

ชุดการทดลอง	กรดซัลฟิวริก (ร้อยละ)	เอทานอล (ร้อยละ)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	1	40	170
2	3	50	170
3	2	60	170
4	3	40	180
5	2	50	180
6	1	60	180
7	2	40	190
8	1	50	190
9	3	60	190

หมายเหตุ: เวลาที่ใช้ย่อย 30 นาที

3. ศึกษาการย่อยลำต้นปาล์มหลังการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ โดยใช้เอนไซม์ทางการค้าประกอบด้วยเอนไซม์เซลลูเลส (cellulase) และเบต้ากลูโคซิเดส (ß-glucosidase) ของ Novozymes North America (Franklinton, NC, USA) โดยศึกษาการย่อยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ใช้ปริมาณเซลลูโลสที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว 0.8 กรัม ปริมาตรทั้งหมด 50 มิลลิลิตร เติมโซเดียมอะซิเตทบัฟเฟอร์ (พีเอช 4.8) ที่ความเข้มข้น 0.05 M ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เติม Tetracycline chloride ร้อยละ 5 เพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ระหว่างการย่อยด้วยเอนไซม์ (Noparat et al., 2015) ปริมาณของเอนไซม์ Cellulase ที่ใช้ เท่ากับ 15 FPU (Filter Paper Unit) ต่อกรัมเซลลูโลส และ ß-glucosidase เท่ากับ 30 CBU (Cellobiase Unit) ต่อกรัมเซลลูโลส โดยเติมเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดพร้อมกัน หลังจากย่อยด้วยเอนไซม์แล้วนำส่วนใสไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลกลูโคสด้วยเครื่อง HPLC

4. วิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (SPSS 16.0) วิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์หาองค์ประกอบของลำต้นปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ชนิดของน้ำตาล และเถ้า (AOAC, 2012) วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC (ICS-3000) โดยใช้ Amperometry detector และ Carbopac™ PA1 guard (Shuai et al., 2010) และวิเคราะห์ปริมาณสารยับยั้งด้วยเครื่อง HPLC (ICS-3000) โดยใช้คอลัมน์ Supelcogel C-610H ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสและใช้ UV detector ที่ 210 นาโนเมตร (Shuai et al., 2010)

ผลการทดลอง

ลำต้นปาล์มน้ำมันอายุ 25 ปี มีความยาว 12 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร โดยใช้ส่วนปลายของลำต้นห่างจากยอดลงมา 3 เมตร จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของลำต้นปาล์มน้ำมัน พบว่า มีความชื้นร้อยละ 12.44 เซลลูโลสร้อยละ 38.8 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 23.7 ลิกนินร้อยละ 21.4 และเถ้าร้อยละ 2.94

จากการปรับสภาพลำต้นปาล์มน้ำมันด้วยสารละลายเอทานอลร่วมกับกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิสูง โดยทำการศึกษาจำนวน 9 ชุดการทดลอง พบว่า ปริมาณชีวมวลลำต้นปาล์มน้ำมันหลังจากการปรับสภาพมีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 44.67-66.11 โดยชุดการทดลองที่ให้ปริมาณชีวมวลลำต้นปาล์มน้ำมันสูงสุด คือ ชุดการทดลองที่ 1 (ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกร้อยละ 1 เอทานอลร้อยละ 40 และอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส) ให้ปริมาณชีวมวลสูงสุดร้อยละ 66.11 เมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่ 6 (ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกร้อยละ 1 เอทานอลร้อยละ 60 และอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส) ให้ปริมาณชีวมวลร้อยละ 63.54 พบว่า ปริมาณชีวมวลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) (ตารางที่ 3) สำหรับปริมาณน้ำตาลกลูโคส พบว่า ชุดการทดลองที่ 1-8 ให้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยให้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสร้อยละ 53.05-61.43 ในขณะที่ปริมาณลิกนินหลังการปรับสภาพ พบว่า ชุดการทดลองที่ 1-3 ให้ปริมาณลิกนินไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยให้ปริมาณลิกนินร้อยละ 26.47-28.16

ตารางที่ 3. ปริมาณชีวมวล น้ำตาลกลูโคส และลิกนินในส่วนของแข็งหลังการปรับสภาพด้วยสารละลายเอทานอลร่วมกับกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิสูง

ชุดการทดลอง	กรดซัลฟิวริก (ร้อยละ)	เอทานอล (ร้อยละ)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ชีวมวล (ร้อยละ)	กลูโคส (ร้อยละ)	ลิกนิน (ร้อยละ)
1	1	40	170	66.11 ± 1.01^{d}	59.82 ± 5.64^{b}	26.47 ± 1.48^{a}
2	3	50	170	56.94 ± 2.88^{c}	61.43 ± 5.36^{b}	28.16 ± 2.03^{a}
3	2	60	170	58.72 ± 0.17^{c}	59.78 ± 3.61^{b}	27.22 ± 0.93^{a}
4	3	40	180	50.04 ± 2.41^{b}	56.24 ± 3.99^{b}	29.98 ± 1.37^{b}
5	2	50	180	57.74 ± 2.79^{c}	59.62 ± 2.53^{b}	28.88 ± 1.05^{b}
6	1	60	180	63.54 ± 1.67^{d}	58.02 ± 2.71^{b}	29.94 ± 1.84^{b}
7	2	40	190	56.84 ± 1.15^{c}	53.05 ± 3.58^{b}	29.39 ± 0.66^{a}
8	1	50	190	63.11 ± 0.09^{d}	55.58 ± 2.09^{b}	28.53 ± 1.43^{b}
9	3	60	190	44.67 ± 1.90^{a}	28.47 ± 2.35^{a}	30.63 ± 1.10^{b}

หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อศึกษาการปรับสภาพลำต้นปาล์มน้ำมันด้วยเอทานอลร่วมกับกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิสูง พบว่าหลังจากการปรับสภาพมีชนิดและปริมาณของน้ำตาลในไฮโดรไลเสท ประกอบด้วยน้ำตาล 4 ชนิด ได้แก่ อะราบิโนส กาแลคโตส กลูโคส และไซโลส โดยน้ำตาลแต่ละชนิดมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ปริมาณเอทานอล และอุณหภูมิที่ใช้ (ตารางที่ 4) ชุดการทดลองที่ให้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสในไฮโดรไลเสทสูงสุด (ร้อยละ 11.55) คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 เอทานอลร้อยละ 60 และอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 5 ชนิดและปริมาณสารยับยั้งในไฮโดรไลเสทที่ได้จากการปรับสภาพลำต้นปาล์มน้ำมันด้วยสารละลายเอทานอลร่วมกับกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิสูง ประกอบด้วย กรดฟอร์มิก (formic acid) กรดแอซีติก (acetic acid) กรดเลวูลินิค (levulinic acid) เฟอร์ฟูรัล (furfural) และไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล (hydroxymethylfurfural, HMF) โดยปริมาณสารยับยั้งแต่ละชนิดมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ปริมาณเอทานอล และอุณหภูมิที่ใช้

 doi: 10.14416/j.appsci.2018.05.003

ตารางที่ 4. ชนิดและปริมาณน้ำตาลในไฮโดรไลเสทที่ได้จากหลังการปรับสภาพลำต้นปาล์มน้ำมันด้วยสารละลายเอทานอลร่วมกับกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิสูง

ชุดการทดลอง	กรดซัลฟิวริก (ร้อยละ)	เอทานอล (ร้อยละ)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณน้ำตาล (ร้อยละ)			
				อะราบิโนส	แกแลคโตส	กลูโคส	ไซโลส
1	1	40	170	0.46 ± 0.00^{d}	0.20 ± 0.01^{ab}	0.43 ± 0.11^{ab}	2.88 ± 0.13^{b}
2	3	50	170	0.79 ± 0.05^{g}	0.25 ± 0.03^{bc}	4.46 ± 0.28^{de}	5.23 ± 0.69^{c}
3	2	60	170	0.67 ± 0.08^{e}	0.26 ± 0.05^{bc}	2.16 ± 0.21^{bc}	4.49 ± 0.90^{c}
4	3	40	180	0.41 ± 0.03^{d}	0.35 ± 0.04^{d}	6.57 ± 1.65^{f}	4.63 ± 0.56^{c}
5	2	50	180	0.31 ± 0.04^{c}	0.32 ± 0.01^{cd}	2.91 ± 0.10^{cd}	4.04 ± 0.22^{c}
6	1	60	180	0.20 ± 0.02^{b}	0.20 ± 0.01^{ab}	0.46 ± 0.04^{a}	2.61 ± 0.25^{b}
7	2	40	190	0.17 ± 0.05^{ab}	0.20 ± 0.04^{ab}	4.90 ± 0.42^{e}	2.28 ± 0.68^{b}
8	1	50	190	0.19 ± 0.01^{b}	0.20 ± 0.04^{ab}	0.62 ± 0.04^{ab}	2.39 ± 0.40^{b}
9	3	60	190	0.09 ± 0.01^{a}	0.16 ± 0.01^{a}	11.55 ± 1.18^{g}	1.04 ± 0.09^{a}

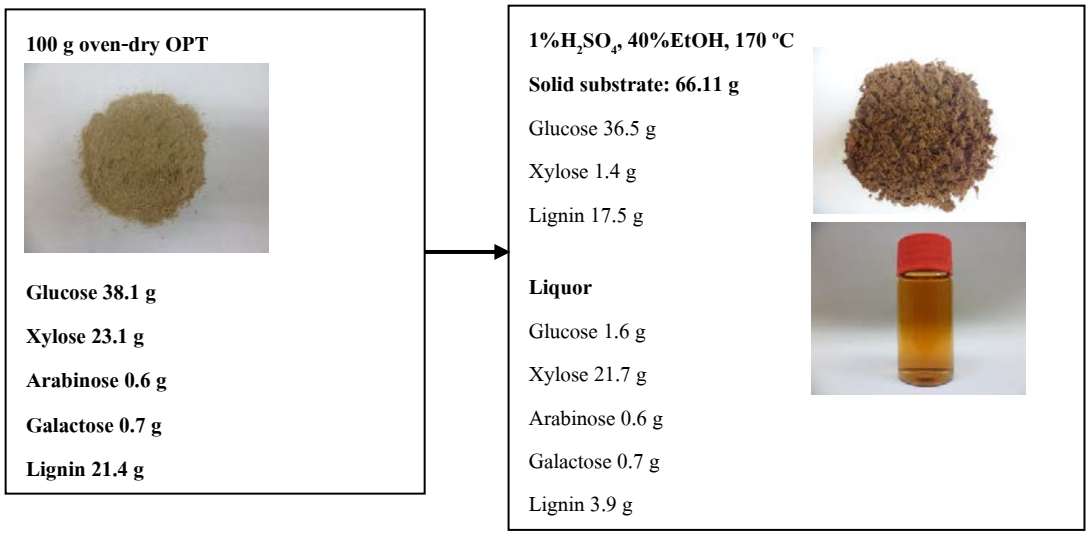
หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 5. ชนิดและปริมาณสารยับยั้งในไฮโดรไลเสทที่ได้จากหลังการปรับสภาพลำต้นปาล์มน้ำมันด้วยสารละลายเอทานอลร่วมกับกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิสูง

ชุดการทดลอง	กรดซัลฟิวริก (ร้อยละ)	เอทานอล (ร้อยละ)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณสารยับยั้ง (ร้อยละ)				
				Formic acid	Acetic acid	Levulinic acid	HMF	Furfural
1	1	40	170	0.46 ± 0.00^{d}	0.20 ± 0.01^{b}	0.43 ± 0.11^{a}	2.88 ± 0.13^{c}	2.88 ± 0.13^{c}
2	3	50	170	0.79 ± 0.05^{f}	0.25 ± 0.03^{c}	4.46 ± 0.28^{f}	5.23 ± 0.69^{f}	5.23 ± 0.69^{e}
3	2	60	170	0.67 ± 0.08^{e}	0.26 ± 0.05^{c}	2.16 ± 0.21^{c}	4.49 ± 0.90^{d}	4.49 ± 0.90^{d}
4	3	40	180	0.41 ± 0.03^{d}	0.35 ± 0.04^{d}	6.57 ± 1.65^{g}	4.63 ± 0.56^{d}	4.63 ± 0.56^{d}
5	2	50	180	0.31 ± 0.04^{c}	0.32 ± 0.01^{d}	2.91 ± 0.10^{d}	4.04 ± 0.22^{cd}	4.04 ± 0.22^{cd}
6	1	60	180	0.20 ± 0.02^{b}	0.20 ± 0.01^{b}	0.46 ± 0.04^{a}	2.61 ± 0.25^{c}	2.61 ± 0.25^{c}
7	2	40	190	0.17 ± 0.05^{b}	0.20 ± 0.04^{b}	4.90 ± 0.42^{f}	2.28 ± 0.68^{b}	2.28 ± 0.68^{b}
8	1	50	190	0.19 ± 0.01^{b}	0.20 ± 0.04^{b}	0.62 ± 0.04^{ab}	2.39 ± 0.40^{b}	2.39 ± 0.40^{b}
9	3	60	190	0.09 ± 0.01^{a}	0.16 ± 0.01^{a}	1.55 ± 1.18^{b}	1.04 ± 0.09^{a}	1.04 ± 0.09^{a}

หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อศึกษาสมดุลมวลของลำต้นปาล์มน้ำมันก่อนและหลังปรับสภาพโดยวิเคราะห์องค์ประกอบของลำต้นปาล์มน้ำมันก่อนการปรับสภาพ และหลังการปรับสภาพแยกออกเป็นส่วนของของแข็งและของเหลวซึ่งทั้งสองส่วนนี้ประกอบด้วยน้ำตาลและลิกนินที่ได้จากการปรับสภาพ โดยเริ่มต้นจากลำต้นปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการปรับสภาพปริมาณ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส 38.1 กรัม ไซโลส 23.1 กรัม อะราบิโนส 0.6 กรัม กาแลคโตส 0.7 กรัม และลิกนิน 21.4 กรัม เมื่อผ่านการแปรภาพลำต้นปาล์มน้ำมันด้วยเอทานอลร่วมกับลำต้นปาล์มน้ำมันที่อุณหภูมิสูง พบว่า ปริมาณชีวมวลที่เหลือเท่ากับ 66.11 กรัม ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส 36.5 กรัม ไซโลส 1.4 กรัม และลิกนิน 17.5 กรัม คิดเป็นการกำจัดลิกนินและไซโลสได้ร้อยละ 18.2 และ 93.9 ตามลำดับ สำหรับในส่วนของไฮโดรไลเสทประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส 1.6 กรัม ไซโลส 21.7 กรัม อะราบิโนส 0.6 กรัม กาแลคโตส 0.7 กรัม และลิกนิน 3.9 กรัม (รูปที่ 1)



รูปที่ 1. สมดุลมวลลำต้นปาล์มน้ำมันหลังการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 เอทานอลร้อยละ 40 และอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

เมื่อศึกษาการย่อยชีวมวลลำต้นปาล์มน้ำมันหลังการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ พบว่า การใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในช่วงร้อยละ 1-3 เอทานอลร้อยละ 40-60 และอุณหภูมิ 170-190 องศาเซลเซียสนั้น เอนไซม์เซลลูเลสและ ß-glucosidase สามารถเปลี่ยนเซลลูโลสเป็นกลูโคสได้ร้อยละ 100 ในเวลา 24 ชั่วโมง ในชุดการทดลองที่ 2 (ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 เอทานอลร้อยละ 50 และอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส) ชุดการทดลองที่ 3 (ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกร้อยละ 2 เอทานอลร้อยละ 60 และอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส) และชุดการทดลองที่ 7 (ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกร้อยละ 2 เอทานอลร้อยละ 40 และอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส) (ตารางที่ 6)

doi: 10.14416/j.appsci.2018.05.003

ตารางที่ 6. ร้อยละการเปลี่ยนเซลลูโลสเป็นกลูโคสของชีวมวลหลังการปรับสภาพ

ชุดการทดลอง	กรดซัลฟิวริก (ร้อยละ)	เอทานอล (ร้อยละ)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละการเปลี่ยนเซลลูโลสเป็นกลูโคส	
				24 h	48 h
1	1	40	170	85.53	92.95
2	3	50	170	100	100
3	2	60	170	100	100
4	3	40	180	97.96	100
5	2	50	180	99.62	100
6	1	60	180	92.83	100
7	2	40	190	100	100
8	1	50	190	93.16	100
9	3	60	190	84.12	93.60

วิจารณ์ผลการทดลอง

การปรับสภาพด้วยเอทานอลทำให้สามารถเก็บเกี่ยวตัวเอทานอลโดยการกลั่นแล้วนำกลับมาใช้ปรับสภาพในครั้งต่อไปได้ นอกจากนี้ลิกนินที่ได้จากการปรับสภาพสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ (Pan et al., 2005; Zhao et al., 2009) ผลจากการปรับสภาพลำต้นปาล์มน้ำมันด้วยเอทานอลโดยใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกร้อยละ 1 เอทานอลร้อยละ 40 และอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณชีวมวลร้อยละ 66.11 หรือคิดเป็นปริมาณชีวมวลที่ได้จากหลังการปรับสภาพเท่ากับ 66.11 กรัมต่อลำต้นปาล์มน้ำมันแห้ง 100 กรัม โดยปริมาณชีวมวลที่ได้จากการปรับสภาพนั้น สามารถนำมาวิเคราะห์สมดุลชีวมวลลำต้นปาล์มน้ำมันก่อนและหลังการปรับสภาพซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ใช้ในการประเมินความเหมาะสมในการเลือกวิธีการปรับสภาพชีวมวล (Qin et al., 2012; Li et al., 2010; Lau & Dale, 2009) อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์สมดุลชีวมวลนั้นไม่สามารถทำได้ง่ายเนื่องจากต้องวิเคราะห์ผลผลิตที่ได้จากการปรับสภาพให้ครบถ้วนทุกผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น (Palmqvist & Hahn-Hägerdal, 2000a; Garlock et al., 2011)

องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสในส่วนของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสบางส่วนที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอทานอลร่วมกับกรดซัลฟิวริกให้ปริมาณน้ำตาลที่สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเอทานอลได้ นอกจากนี้น้ำตาลบางส่วนเปลี่ยนเป็นสารยับยั้ง ได้แก่ น้ำตาลเพนโตสย่อยสลายเป็นสารเฟอร์ฟูรัล (furfural) และน้ำตาลเฮกโซสย่อยสลายเป็นไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลดีไฮด์ (hydroxy methylfurfural, HMF) สำหรับในส่วนของไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลดีไฮด์สามารถย่อยสลายได้เป็นกรดเลวูลินิค (levulinic acid) (Palmqvist & Hahn-Hägerdal, 2000a; Palmqvist & Hahn-Hägerdal, 2000b) จากการทดลองนี้ชนิดและปริมาณสารยับยั้งในไฮโดรไลเสทที่ได้จากการปรับ

สภาพลำต้นปาล์มน้ำมันด้วยเอทานอลร่วมกับกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิสูง ประกอบด้วยกรดฟอร์มิก กรดแอซีติก กรดเลวูลินิค เฟอร์ฟูรัล และและไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล โดยปริมาณสารยับยั้งแต่ละชนิดมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ปริมาณเอทานอล และอุณหภูมิที่ใช้ ทั้งนี้การนำไฮโดรไลเสทไปใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตเอทานอลนั้นต้องมีการกำจัดสารยับยั้งก่อนนำไปหมัก เนื่องจากสารยับยั้งเหล่านี้มีผลในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (Chandel et al., 2007)

คุณลักษณะของชีวมวลหลังจากย่อยเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ พบว่า ในส่วนของปริมาณเฮมิเซลลูโลส และโครงสร้างของลิกนิน บางส่วนถูกทำลายโดยขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเซลลูโลส ค่า degree of polymerization (DP) พื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน และขนาดของชีวมวล (Shuai et al., 2010; Mansfield et al., 1999; Zhu et al., 2009) จากการศึกษาการย่อยลำต้นปาล์มน้ำมันโดยการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที พบว่า มีความสามารถในการเปลี่ยนเซลลูโลสไปเป็นกลูโคสได้ร้อยละ 80 (Noparat et al., 2015) และการปรับสภาพชีวมวลด้วยโซเดียมซัลไฟล์ด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โซเดียมซัลไฟล์ร้อยละ 9 อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเซลลูโลสไปเป็นกลูโคสร้อยละ 90 (Shuai et al., 2010) เมื่อเปรียบเทียบการทดลองในงานวิจัยนี้ พบว่า การใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในช่วงร้อยละ 1-3 เอทานอลร้อยละ 40-60 และอุณหภูมิ 170-190 องศาเซลเซียสนั้น เอนไซม์เซลลูเลสและß-glucosidase สามารถเปลี่ยนเซลลูโลสเป็นกลูโคสได้ร้อยละ 100 ในเวลา 24 ชั่วโมง เนื่องจากลักษณะของชีวมวลหลังการปรับสภาพด้วยเอทานอลนั้นทำให้ประสิทธิภาพการย่อยด้วยเอนไซม์เพิ่มขึ้น (Pan et al., 2005)

สรุปผลการทดลอง

การปรับสภาพลำต้นปาล์มน้ำมันด้วยเอทานอลร่วมกับกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิสูงได้น้ำตาลเฮกโซสและเพนโตสหลังการปรับสภาพกลับคืนมาร้อยละ 66.1 สามารถกำจัดลิกนินและไซโลสได้ร้อยละ 18.2 และ 93.9 ตามลำดับ การปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ร่วมกับเอทานอลร้อยละ 50 ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส สามารถเปลี่ยนเซลลูโลสเป็นกลูโคสได้ร้อยละ 100 ภายในเวลา 24 ชั่วโมง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานีสำหรับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณ หมวดเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

เอกสารอ้างอิง

AOAC. (2012). *Official Methods of Analysis of AOAC* (19th ed.) Gaithersburg, MD: AOAC International.

Chandel, A. K., Kapoor, R. K., Singh, A. & Kuhad, R. C. (2007). Detoxification of sugarcane bagasse hydrolysate improves ethanol production by *Candida shehatae* NCIM 3501. *Bioresource Technology*, *98*, 1947-1950. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.047

Chin, K. L., H'ng, P. S., Wong, L. J., Tey B. T. & Paridah, M. T. (2010). Optimization study of ethanolic fermentation from oil palm trunk, rubberwood and mixed hardwood hydrolysates using *Saccharomyces cerevisiae*. *Bioresource Technology, 101*, 3287-3291. doi: 10.1016/j.biortech.2009.12.036

Garlock, R. J., Balan, V., Dale, B. E., Pallapolu, V. R., Lee, Y. Y., Kim, Y. et al. (2011). Comparative material balances around pretreatment technologies for the conversion of switchgrass to soluble sugars. *Bioresource Technology, 102*, 11063-11071. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.002

Kee, K. K. (2004). *Nutrient reserves and recycling from oil palm trunks at replanting*. pp. 1-6. In the 4th International Crop Science Congress, 26 September-1 October 2004, Brisbane, Australia.

Lau, M. W. & Dale, B. E. (2009). Cellulosic ethanol production from AFEX-treated corn stover using *Saccharomyces cerevisiae* 424A(LNH-ST). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 106*, 1368-1373.

Li, B. Z., Balan, V., Yuan, Y. J. & Dale, B. E. (2010). Process optimization to convert forage and sweet sorghum bagasse to ethanol based on ammonia fiber expansion (AFEX) pretreatment. *Bioresource Technology, 101*, 1285-1292. doi: 10.1016/j.biortech.2009.09.044

Mansfield, S. D., Mooney, C. & Saddler, J. N. (1999) Substrate and enzyme characteristics that limit cellulose hydrolysis. *Biotechnology Progress, 15*, 804-816. doi: 10.1021/bp9900864

Megawati, H., Sediawan, W. B., Sulistyo, H. & Hidayat M. (2010). Pseudo-homogeneous kinetic of dilute-acid hydrolysis of rice husk for ethanol production: effect of sugar degradation. *World Academy of Science, Engineering and Technology, 41*, 5-23.

Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y. Y., Holtzapple M. et al. (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology, 96*, 673-686. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.025

Noparat, P., Prasertsan, P. & O-Thong, S. (2011). Isolation and characterization of high hydrogen-producing strain *Clostridium beijerinckii* PS-3 from fermented oil palm sap. *International Journal of Hydrogen Energy*, *36*, 14086-14092. https://doi.org/10.1016/ j.ijhydene.2011.04.143

Noparat, P., Prasertsan, P., O-Thong, S. & Pan, X. (2015). Dilute acid pretreatment of oil palm trunk biomass at high temperature for enzymatic hydrolysis. *Energy Precedia, 79*, 924-929. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.588

Noparat, P., Prasertsan, P., O-Thong, S. & Pan, X. (2017). Sulfite pretreatment to overcome recalcitrance of lignocellulose for enzymatic hydrolysis of oil palm trunk. *Energy Precedia, 138*, 1122-1127. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.209

Obama, P., Ricochon, G., Muniglia, L. & Brosse, N. (2012). Combination of enzymatic hydrolysis and ethanol organosolv pretreatments: Effect on lignin structures, delignification yields and cellulose-to-glucose conversion. *Bioresource Technology, 112*, 156-163. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.080

Palmqvist, E. & Hahn-Hägerdal, B. (2000a). Fermentation of lignocellulosic hydrolysates, I: inhibition and detoxification. *Bioresource Technology, 74*(1), 17-24. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00160-1

Palmqvist, E. & Hahn-Hägerdal, B. (2000b). Fermentation of lignocellulosic hydrolysates, II: inhibitors and mechanisms of inhibition. *Bioresource Technology, 74*(1), 25-33. doi: 10.1016/S0960-8524(99)00161-3

Pan, X., Arato, C., Gilkes, N., Gregg, D., Mabee, W., Pye, K. et al. (2005).Biorefining of Softwoods Using Ethanol Organosolv Pulping: Preliminary Evaluation of Process Streams for Manufacture of Fuel-Grade Ethanol and Co-products. *Biotechnology and Bioengineering, 90*(4), 473-481. doi: 10.1002/bit.20453

Qin, L., Liu, Z. H., Li, B. Z., Dale, B. E. & Yuan, Y. J. (2012). Mass balance and transformation of corn stover by pretreatment with different dilute organic acids. *Bioresource Technology, 112*, 319-326. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.134

Shuai, L., Yang, Q., Zhu, J. Y., Lu, F. C., Weimer, P. J., Ralph, J. et al. (2010). Comparative study of SPORL and dilute-acid pretreatments of spruce for cellulosic ethanol production. *Bioresource Technology, 101*, 3106-3114. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.044

Zhao, X., Cheng, K. & Liu, D. (2009). Organosolv Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Enzymatic Hydrolysis. *Applied Microbiology* and *Biotechnology, 82*, 815-827. doi: 10.1007/s00253-009-1883-1

Zhu, J. Y., Wang, G. S., Pan, X. J. & Gleisner, R. (2009). Specific surface to evaluate the efficiencies of milling and pretreatment of wood for enzymatic saccharification. *Chemical Engineering Science, 64*, 474-485. https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.09.026

The Journal of Applied Science **Vol. 17 No. 1: 87-100 [2018]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2018.05.004
ISSN 1513-7805 Printed in Thailand ISSN 2586-9663 (Online)

Research Article

การศึกษาเปรียบเทียบการควบคุมเสียงรบกวนแบบแอ็กทิฟระหว่างแบบป้อนไปข้างหน้าและแบบป้อนกลับ

Comparative study of active noise control between feedforward and feedback control

ศุภฤกษ์ จันทร์ศุภเสน[1]*

Suparoek Junsupasen[1]*

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

[1]Department of Instrumentation and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800

***E-mail**: suparoek.j@eng.kmutnb.ac.th

Received: 29/03/2018; Accepted: 15/05/2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบวิธีการควบคุมเสียงรบกวนแบบแอ็กทีฟแบบป้อนไปข้างหน้าและแบบป้อนกลับ เพื่อนำไปใช้ลดเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรม จากผลการทดลองพบว่าระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า สามารถลดระดับเสียงได้มากที่สุดถึง 20.4 dB ที่ 80Hz ในขณะที่ระบบควบคุมแบบป้อนกลับนั้นสามารถลดระดับเสียงได้มากที่สุด 15 dB ที่ 63Hz ซึ่งน้อยกว่าแบบป้อนไปข้างหน้า 5.4 dB ส่วนที่ย่านความถี่ 80 Hz ที่เป็นเป้าหมายของการวิจัยระบบควบคุมเสียงแบบป้อนกลับสามารถลดเสียงได้ 14.5 dB ดังนั้นจึงสามารถนำวิธีการทั้งสองแบบไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้ มีการอภิปรายถึงการประยุกต์ใช้และข้อจำกัดของการวิจัยในครั้งนี้

คำสำคัญ: การควบคุมเสียงรบกวนแบบแอ็กทิฟ, การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า, การควบคุมแบบป้อนกลับ

Abstract

The purpose of this research was to compare the feedforward active noise control and feedback active noise control using to reduce noise in industrial plants. The results showed that the feedforward control system could reduce 20.4 dB at 80 Hz whereas the feedback control system could reduce the sound level to 15 dB at 63Hz. The target band of the research feedback control system at 80 Hz could reduce noise 14.5 dB, which was satisfactory. Thus, both methods could be used in industrial plants. Applications and limitations for this research were also discussed.

Keywords: active noise control, feedforward control system, feedback control system

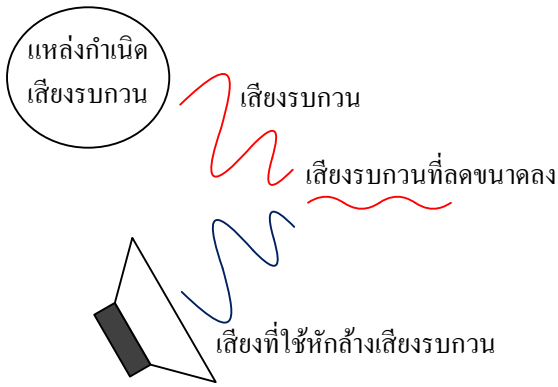
บทนำ

เสียงรบกวนเป็นปัญหาหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ มีการศึกษาค้นคว้ามากมายที่ระบุว่าเสียงรบกวนสามารถนำไปสู่ปัญหาสุขภาพหลาย ๆ อย่าง เช่น ความดันโลหิตสูง ระบบหัวใจ สภาวะทางจิตใจ การรบกวนการนอนหลับ เป็นต้น (Rylander, 2004) ซึ่งสิ่งบ่งชี้ทั้งหลายเหล่านี้เป็นเหตุทำให้มีค่าใช้จ่ายในการรักษามากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะผู้ใช้แรงงานในโรงงานอุตสาหกรรมหลายแห่ง จากการค้นคว้าพบว่าเสียงรบกวนสามารถเกิดขึ้นจากหลายรูปแบบจากทั้งการทำงานด้วยมือหรือจากเครื่องจักร เช่น การก่อสร้าง การจราจร งานในโรงงาน เป็นต้น ซึ่งมีผลต่อคุณภาพชีวิตที่ลดลง

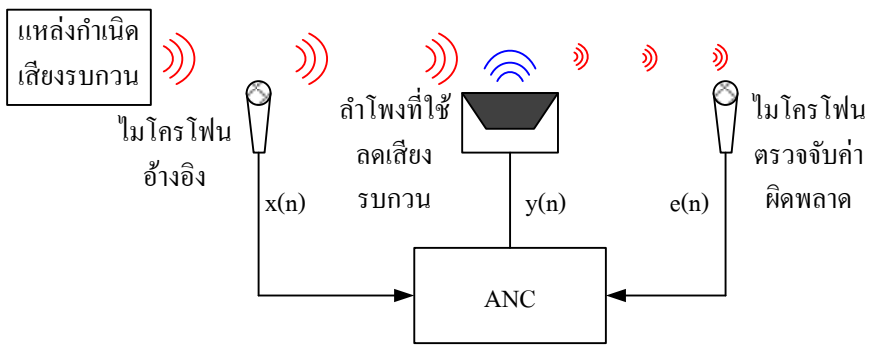
ในการลดเสียงรบกวนนั้นโดยทั่วไปจะใช้วิธีการลดเสียงรบกวนแบบแพสซิฟ (passive) ซึ่งเป็นการใช้วัสดุดูดซับเสียงหรือใช้อุปกรณ์ครอบแหล่งกำเนิดเสียงเพื่อลดเสียงรบกวนที่เกิดขึ้น แต่วิธีการนี้ไม่สามารถใช้ได้กับเสียงความถี่ต่ำ เนื่องจากเสียงความถี่ต่ำมีความยาวคลื่นมาก ดังนั้นจะต้องวัสดุดูดซับเสียงที่มีความหนามากจึงจะสามารถลดเสียงความถี่ต่ำได้ เช่น หากต้องการลดเสียงรบกวนความถี่ต่ำที่มีความถี่ 40Hz จะต้องใช้วัสดุดูดซับเสียงที่มีความหนาถึง 8.575 เมตร (จากสูตร $\lambda=c/f$ เมื่อ λ คือความยาวของคลื่น, c คือความเร็วของวิ่งในอากาศที่มีอุณหภูมิ 20 $^{\circ}$C มีค่าเท่ากับ 343 m/s และ f คือความถี่) ซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากและไม่สามารถทำได้กับแหล่งกำเนิดเสียงที่มีขนาดใหญ่ วิธีการลดเสียงรบกวนความถี่ต่ำที่เหมาะสมคือการลดเสียงรบกวนแบบแอ็กทิฟ (active) มีหลักการคือจะใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์สร้างคลื่นเสียงที่มีเฟสตรงกันข้ามกับคลื่นเสียงรบกวน 180 องศาผ่านออกมาทางลำโพง เพื่อนำมาหักล้างกัน ผลที่ได้คือเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิดจะมีขนาดลดลง หลักการทำงานของการควบคุมเสียงรบกวนแบบแอ็กทิฟจะแสดงดังรูปที่ 1

สำหรับการลดเสียงรบกวนแบบแอ็กทิฟสามารถแบ่งได้สองวิธีการคือ การใช้วิธีการแบบป้อนไปข้างหน้า (feedforward) และวิธีการแบบป้อนกลับ (feedback) โดยวิธีการป้อนไปข้างหน้าจะใช้ไมโครโฟนอ้างอิง (reference

microphone) รับสัญญาณจากแหล่งกำเนิดเสียง x(n) แล้วนำมาประมวลผลในชุดการประมวลสัญญาณดิจิทัล (digital signal processing: DSP) ซึ่งอยู่ในอุปกรณ์ควบคุมเสียงรบกวนแบบแอ็กทิฟ (active noise control: ANC) จากนั้นจึงส่งสัญญาณที่มีเฟสตรงกันข้ามกับสัญญาณเสียงรบกวน 180 องศา ผ่านไปยังลำโพง y(n) และใช้ไมโครโฟนตรวจจับค่าผิดพลาด (error microphone) e(n) เป็นจุดรับเสียงที่เกิดขึ้นหลังจากการหักล้างกันเพื่อนำไปประมวลผล โดยจะให้ค่าผิดพลาดลดลงมากที่สุด (Kuo & Morgan,1999) ดังแสดงในรูปที่ 2

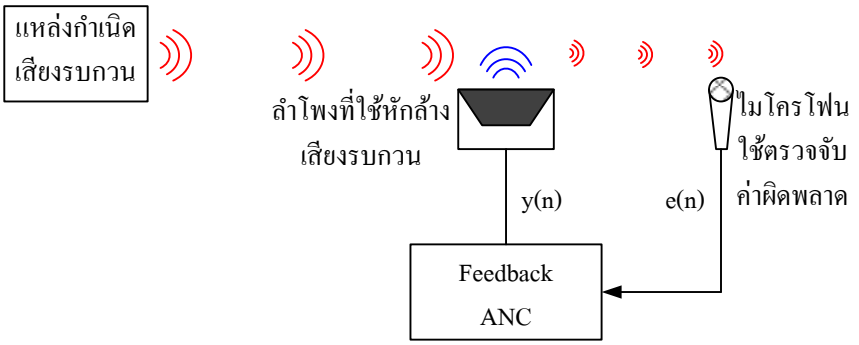


รูปที่ 1. หลักการทำงานของการควบคุมเสียงรบกวนแบบแอ็กทิฟ



รูปที่ 2. การควบคุมเสียงความถี่ต่ำแบบป้อนไปข้างหน้า

วิธีการควบคุมเสียงรบกวนแบบป้อนกลับจะมีเพียงไมโครโฟนตรวจจับค่าผิดพลาดเท่านั้น (รูปที่ 3) ซึ่งวิธีการนี้เหมาะกับการควบคุมเสียงความถี่ต่ำแบบที่ไม่สามารถวัดสัญญาณของแหล่งกำเนิดเสียงความถี่ต่ำได้โดยตรงและเหมาะกับเสียงความถี่ต่ำที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่เล็กน้อย



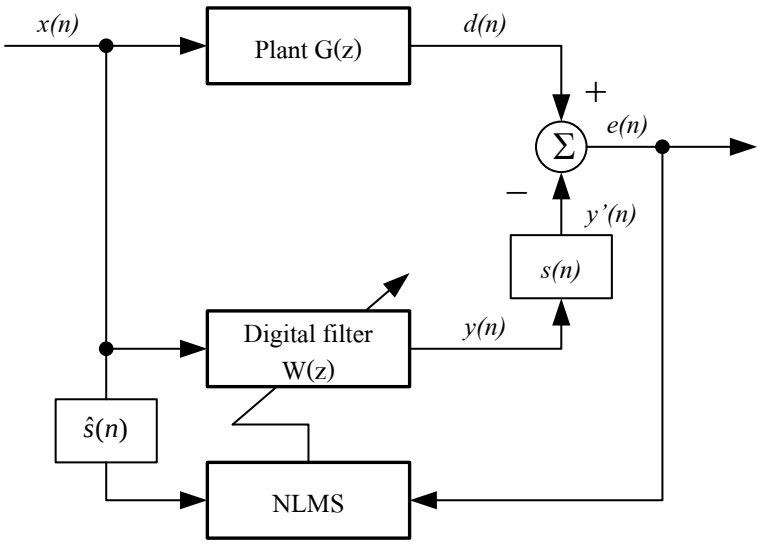
รูปที่ 3. การควบคุมเสียงความถี่ต่ำแบบป้อนกลับ

จากการศึกษาเกี่ยวกับเสียงรบกวนในโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ โรงงานผลิตพลาสติก พบว่าเสียงที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผาไหม้ก่อให้เกิดเสียงรบกวนที่มีค่าระดับความดันของเสียงมาก จะอยู่ที่ความถี่ 86 Hz (Peter, 2017) ผู้วิจัยจึงต้องการศึกษาวิธีการลดเสียงรบกวนที่ความถี่นี้ เนื่องจากหากสามารถลดเสียงรบกวนที่ความถี่นี้ได้ก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับช่วงความถี่อื่น ๆ ที่ใกล้เคียงกันได้ และจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดเสียงรบกวนแบบแอ็กทิฟ พบว่าเป็นการลดเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นในเครื่องเป่าลมเย็นและท่อโดยใช้ขั้นตอนวิธี (algorithm) ชนิด FXLMS (Kuersirikul, 2001; Nimdum & Kuntanapreeda, 2001) สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบลดเสียงรบกวนแบบแอ็กทิฟที่ใช้กับพื้นที่ภายในห้องปฏิบัติการเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่เปิดโล่งต่อไป โดยมีข้อแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาดังกล่าวที่มีการใช้บอร์ด TMS320 ในการประมวลผล ซึ่งข้อจำกัดของบอร์ดนี้คือใช้ได้เฉพาะกับ Windows XP งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้บอร์ด DE1-SoC ซึ่งสามารถใช้กับ Windows 10 ซึ่งมีความสะดวกในการพัฒนาภายใต้สภาวะแวดล้อมปัจจุบัน

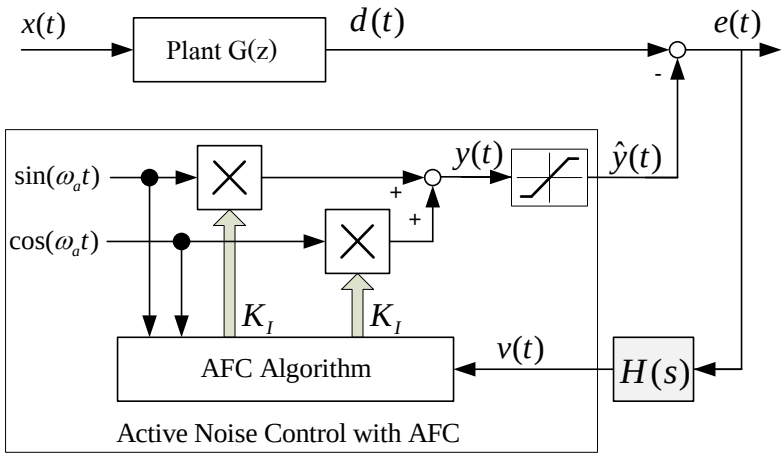
สำหรับขั้นตอนวิธีที่เลือกใช้สำหรับการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าคือ Filtered-X NLMS โดยมีลักษณะโครงสร้างของขั้นตอนวิธี ดังรูปที่ 4 x(n) คือ สัญญาณของเสียงรบกวนที่เข้ามา, Plant G(z) คือเส้นทางเดินของเสียงผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศ , $\hat{S}$(n) คือsecondary path ซึ่งเป็นโมเดลทางคณิตศาตร์ที่ใช้ชดเชยการหน่วงเวลาของ s(n) , Digital filter มีหน้าที่สร้างสัญญาณที่มีเฟสตรงกันข้ามกับสัญญาณของเสียงรบกวน, ส่วน NLMS มีหน้าที่ปรับค่าตัวแปรที่เหมาะสมให้กับ Digital filter , s(n) คือค่าฟังก์ชั่นของอุปกรณ์ประกอบเช่น เครื่องขยายเสียง ลำโพงเป็นต้น

ส่วนขั้นตอนวิธีที่ใช้สำหรับการควบคุมแบบป้อนกลับคือ adaptive feed forward cancellation (AFC) ลักษณะโครงสร้างขั้นตอนวิธีแสดงไว้ดังรูปที่ 5 สัญญาณ e(t) จะถูกตรวจจับผ่าน Error Microphone ซึ่งมีค่าฟังก์ชั่นเท่ากับ H(s) เข้าไปเป็น สัญญาณ v(t) เพื่อนำไปคูณกับค่า $\sin(\omega_a t)$ และ $\cos(\omega_a t)$ จะได้สัญญาณที่มีค่ากลับเฟสกับสัญญาณของเสียงรบกวน180 องศา y(t) แล้วนำมาคูณกับค่า K_l ซึ่งเป็นค่า learning rate โดยความเร็วในการลดเสียงรบกวนของ AFC จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการปรับค่านี้ หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งออกไปทางลำโพง

เพื่อหักล้างกับเสียงรบกวน แล้วใช้ Error Microphone รับสัญญาณเพื่อตรวจสอบผลลัพธ์วนไปเรื่อย ๆ จนสามารถลดเสียงรบกวนให้ได้มากที่สุด โดยวิธีการนี้ได้มีการทดลองโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยจำลองสถานการณ์แล้ว พบว่าสามารถนำมาใช้ทดลองจริงได้ (Junsupasen et al., 2015)



รูปที่ 4. ขั้นตอนวิธีของระบบ Filtered-X NLMS



รูปที่ 5. ขั้นตอนวิธีของระบบ คือ adaptive feed forward cancellation (AFC)

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. อุปกรณ์และเครื่องมือวัด ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1.1 คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ในการโปรแกรมการทำงานของบอร์ด DE1-SoC เพื่อให้บอร์ดสามารถทำการประมวลผลและทำการสื่อสารกับฮาร์ดแวร์ต่าง ๆ และยังทำหน้าที่สร้างสัญญาณเสียงที่มีความถี่ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการทดลอง

1.2 บอร์ด DE1-SoC ทำหน้าที่ในการประมวลผลสัญญาณของเสียงรบกวนที่ส่งเข้ามาโดยมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแบบแอนะล็อก (analog) ให้เป็นสัญญาณแบบดิจิทัล (digital) เพื่อให้บอร์ดสามารถทำการประมวลผลและสร้างสัญญาณที่มีเฟสตรงกันข้ามกับสัญญาณเสียงรบกวน 180 องศา แล้วทำการแปลงสัญญาณแบบดิจิตอลเป็นอนาล็อกเพื่อส่งไปขยายสัญญาณที่เพาเวอร์แอมป์แล้วส่งต่อไปยังลำโพงต่อไป

1.3 มิกเซอร์ (mixer) ทำหน้าที่ในการควบคุมสัญญาณเสียงต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Alto PROFESSIONAL Zephyr ZMX862 และ NTS mx-600

1.4 ไมโครโฟนทำหน้าที่รับสัญญาณเสียงที่เกิดขึ้น ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไมโครโฟน superlux PRA118S Shotgun เป็นไมโครโฟนอ้างอิง และไมโครโฟน Superlux ECM 999 เป็นไมโครโฟนตรวจจับค่าผิดพลาด

1.5 เพาเวอร์แอมป์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณเสียงที่ได้ออกไปยังลำโพง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เพาเวอร์แอมป์ คลาส H ขนาด 1200W

1.6 ลำโพงทำหน้าที่ปล่อยคลื่นเสียงออกมา โดยผู้วิจัยจะใช้ลำโพง Subwoofer ขนาด1200W สองตู้ โดยตู้แรกทำหน้าที่ปล่อยเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงออกมา ส่วนอีกหนึ่งตู้ทำหน้าที่ปล่อยเสียงที่มีเฟสตรงกันข้ามกับแหล่งกำเนิดเสียงออกมา

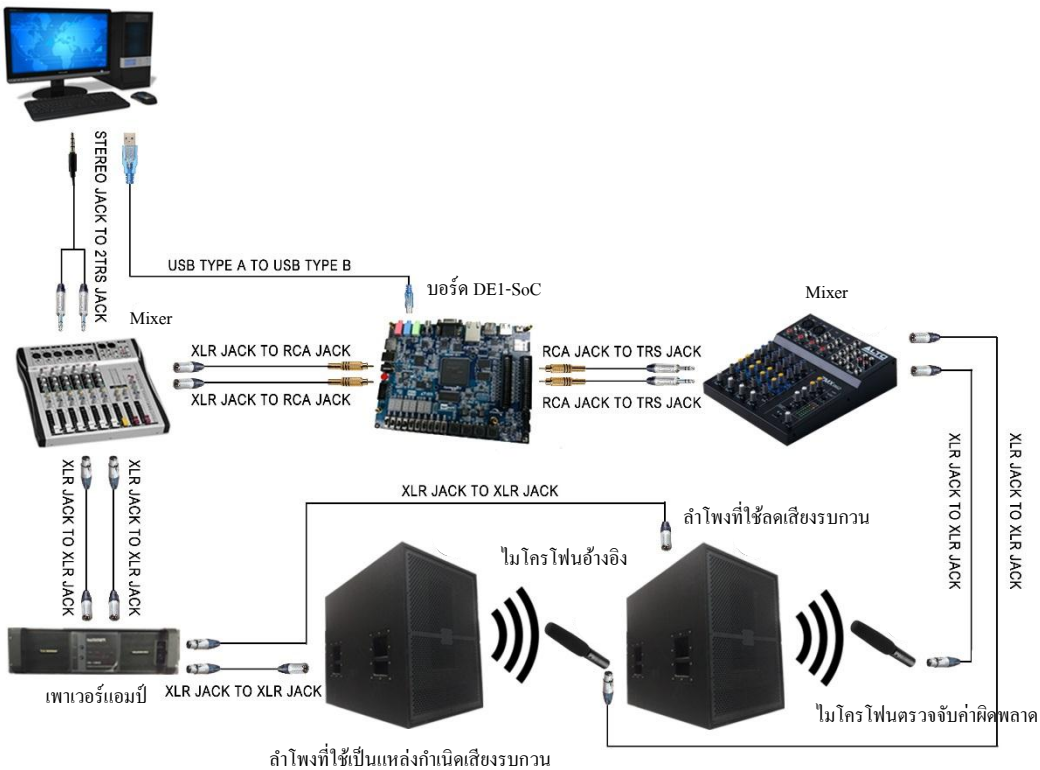
1.7 อุปกรณ์วิเคราะห์ความถี่เสียง ใช้ Brüel & Kjær 2250-Light-G4

2. วิธีการทดลอง แบ่งออกเป็น 2 การทดลองดังนี้

2.1 การทดลองการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า โดยใช้ขั้นตอนวิธี Filtered-X NLMS

2.1.1 เชื่อมต่ออุปกรณ์ด้วยสายสัญญาณต่าง ๆ ดังรูปที่ 6

2.1.2 จัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ดังรูปที่ 7 โดยระยะการจัดวางไมโครโฟนอ้างอิงกับหน้าลำโพงแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนอยู่ที่ 10 ซม. ส่วนระยะจากหน้าลำโพงแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนถึงหน้าลำโพงที่ใช้ลดเสียงรบกวนอยู่ที่ 120 ซม. โดยลำโพงที่ใช้ลดเสียงรบกวนอยู่เยื้องกับหน้าลำโพงแหล่งกำเนิดเสียง 30 ซม. และระยะจากไมโครโฟนตรวจจับค่าผิดพลาดถึงหน้าลำโพงที่ใช้ลดเสียงรบกวนอยู่ที่ 15 ซม. สาเหตุในการเลือกระยะการจัดวางไมโครโฟนนี้นั้น เนื่องจากผู้วิจัยได้ทดลองที่ระยะต่างๆแล้วปรากฏว่าที่ระยะ 15 ซม.สามารถลดเสียงได้มากที่สุดจึงเลือกที่ระยะนี้



รูปที่ 6. ลักษณะการต่ออุปกรณ์สำหรับการทดลองการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

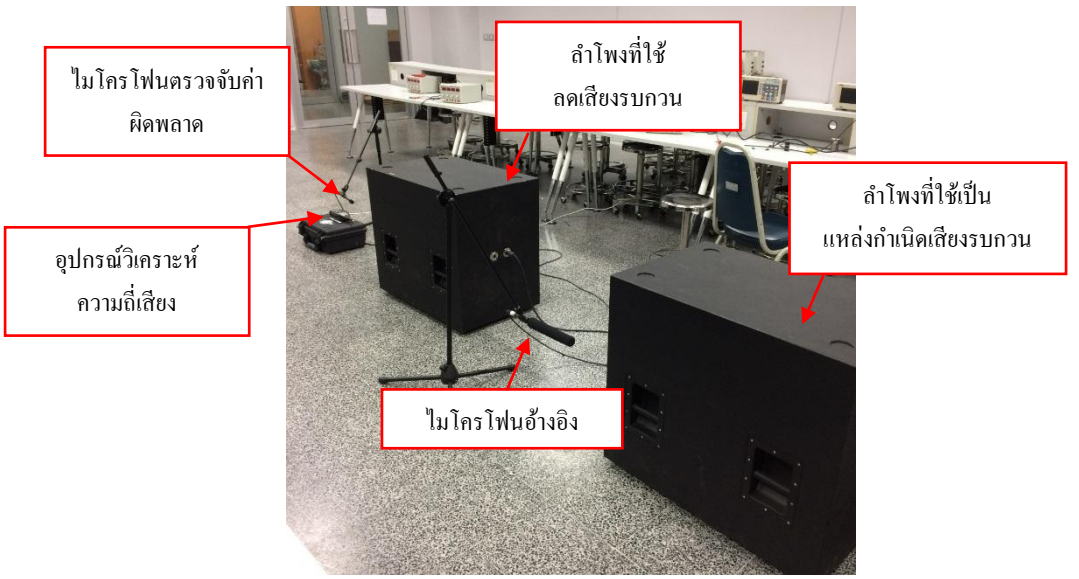
2.1.3 ทำการทดลองโดยจ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 86 Hz แล้วบันทึกผลจากการวิเคราะห์ความถี่เสียงที่ได้ก่อนและหลังเปิดระบบการควบคุมเสียงแบบป้อนไปข้างหน้าโดยไม่มีการเคลื่อนย้ายลำโพงทั้งสองตัว

2.2 การออกแบบการทดลองการควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ขั้นตอนวิธี AFC

2.2.1 เชื่อมต่ออุปกรณ์ด้วยสายสัญญาณต่าง ๆ ดังรูปที่ 8

2.2.2 จัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ดังรูปที่ 9 โดยระยะจากหน้าลำโพงแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนถึงหน้าลำโพงที่ใช้ลดเสียงรบกวนอยู่ที่ 120 ซม. โดยลำโพงที่ใช้ลดเสียงรบกวนอยู่เยื้องกับหน้าลำโพงแหล่งกำเนิดเสียง 30 ซม. และระยะจากไมโครโฟนตรวจจับค่าผิดพลาดถึงหน้าลำโพงที่ใช้ลดเสียงรบกวนอยู่ที่ 90 ซม. สาเหตุในการเลือกระยะการจัดวางไมโครโฟนนี้นั้น เนื่องจากผู้วิจัยได้ทดลองที่ระยะต่างๆแล้วปรากฏว่าที่ระยะ 90 ซม.สามารถลดเสียงได้มากที่สุดจึงเลือกที่ระยะนี้

2.2.3 ทำการทดลองโดยจ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 86 Hz แล้วบันทึกผลจากการวิเคราะห์ความถี่เสียงที่ได้ก่อนและหลังเปิดระบบการควบคุมเสียงแบบป้อนกลับโดยไม่มีการเคลื่อนย้ายลำโพงทั้งสองตัว



รูปที่ 7. ลักษณะการจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์เพื่อทดลองระบบควบคุมเสียงรบกวนแบบป้อนไปข้างหน้า

ผลการทดลอง

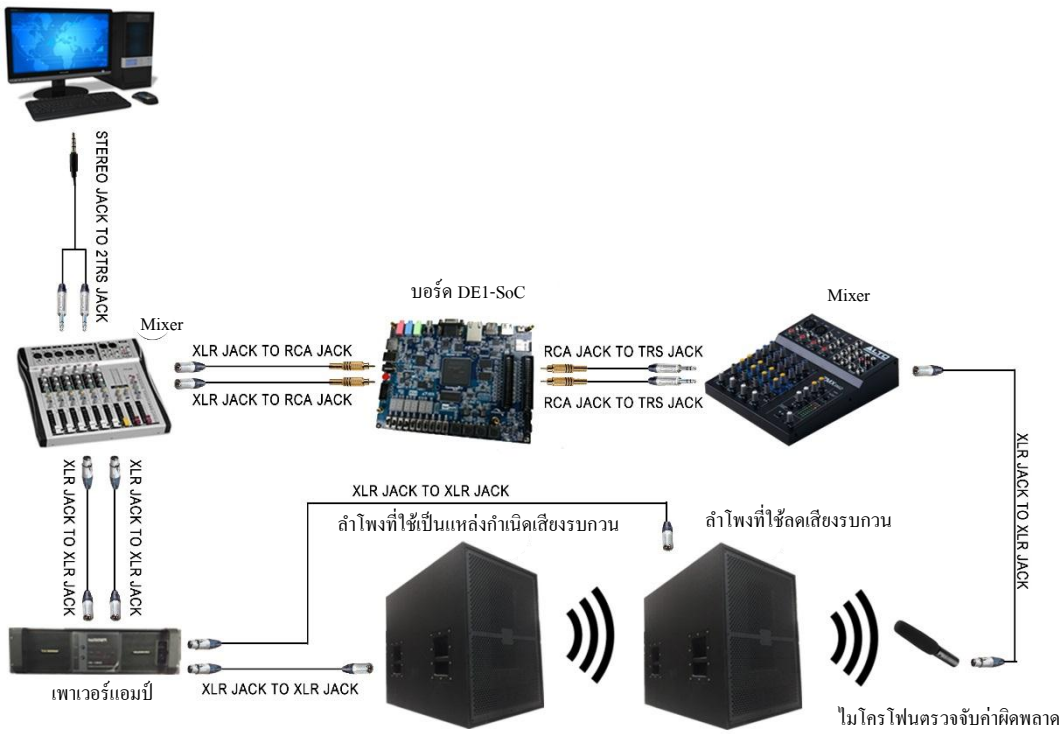
1. การทดลองการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

จากตารางที่ 1 พบว่าระบบควบคุมเสียงความถี่ต่ำแบบป้อนไปข้างหน้าสามารถทำการลดระดับเสียงความถี่ต่ำได้ดีที่สุดที่ย่านความถี่ 80 Hz สามารถลดเสียงได้มากที่สุดถึง 20.4 dB ซึ่งตรงอยู่ในย่านความถี่ที่สัญญาณรบกวนของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมมีอยู่คือ 86 Hz (เนื่องจากเครื่องมือวิเคราะห์ความถี่เสียงเป็นแบบ 1/3 octave band จึงไม่สามารถแสดงค่าระดับเสียงที่ความถี่ 86 ได้โดยตรง) รองลงมาคือที่ความถี่ 100 Hz ลดได้ 20.2 dB ส่วนย่านความถี่ที่ลดเสียงความถี่ต่ำได้น้อยที่สุดคือที่ 50 Hz สามารถลดเสียงรบกวนได้เพียง 8.3 dB

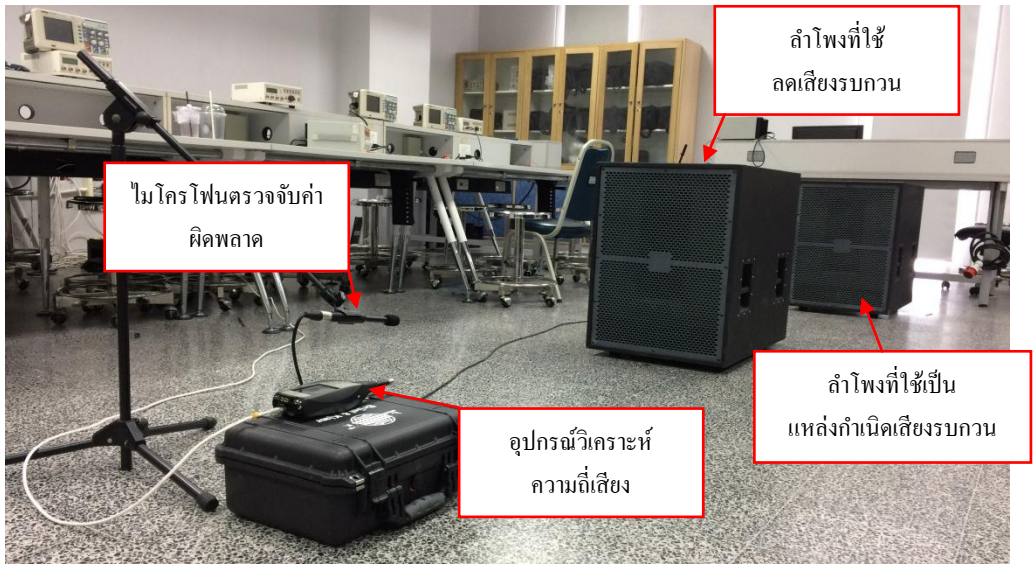
เมื่อพิจารณาตลอดทั้งย่านความถี่โดยใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักแบบ A ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าสามารถลดเสียงลงได้ถึง 15.5 dB กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์เสียงที่ความถี่ต่างๆเมื่อเปิดและปิดระบบควบคุมเสียงแบบป้อนไปข้างหน้าแสดงในรูปที่ 10

จากผลจากการวิเคราะห์เสียงที่ความถี่ต่างๆ ดังรูปที่ 11 พบว่า ที่ความถี่ต่ำมาก เช่น ที่ 12.5 Hz , 20 Hz หรือ 31.5 Hz เมื่อเปิดระบบควบคุมเสียงความถี่ต่ำแบบป้อนไปข้างหน้าแล้วมีระดับเสียงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยทั้งนี้อาจเกิดเนื่องมาจากลำโพงที่ใช้ไม่สามารถสร้างเสียงที่มีความถี่ต่ำมาก ๆได้ ส่วนที่ความถี่ 50 Hz, 63 Hz , 80 Hz , 100 Hz และ 125 Hz หลังเปิดใช้งานระบบแล้ว ระบบสามารถควบคุมเสียงรบกวนได้ดี ส่วนในความถี่ที่สูงขึ้นไปบางความถี่ เช่นที่ 250 Hz และ 400 Hz พบว่าเมื่อเปิดใช้งานแล้วมีระดับเสียงเพิ่มขึ้น สาเหตุอาจเกิดจากจากการสะท้อนของเสียงจากผนังห้อง

Vol. 17 No. 1: 87-100 [2018]
doi: 10.14416/j.appsci.2018.05.004



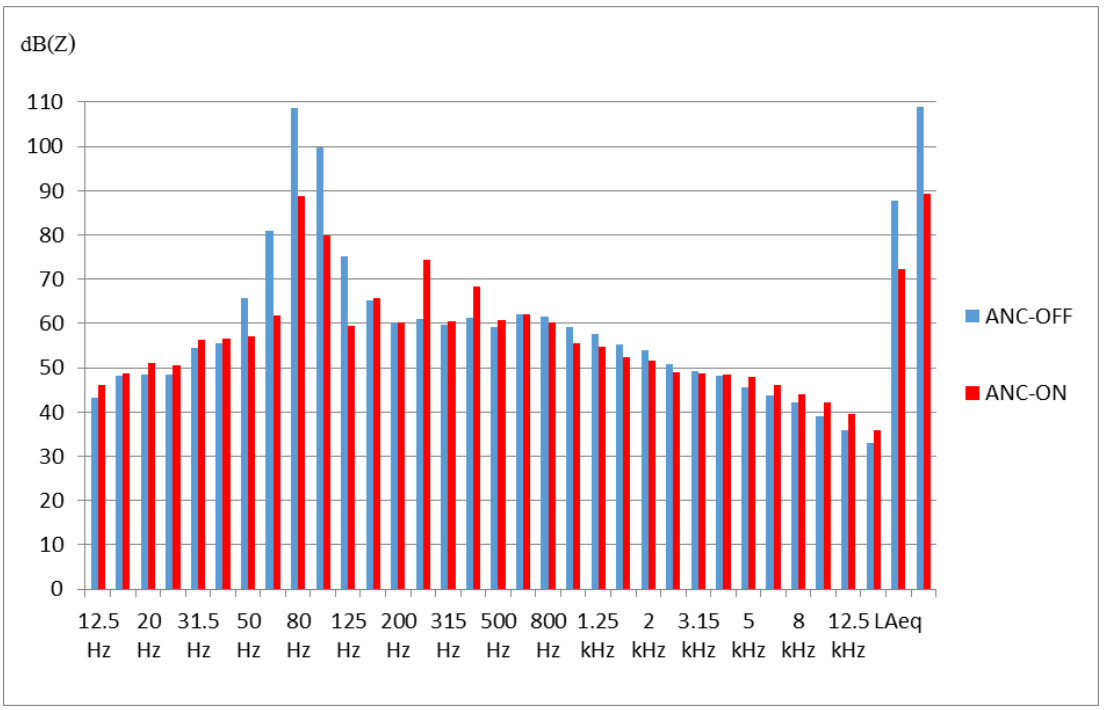
รูปที่ 8. ลักษณะการต่ออุปกรณ์สำหรับการทดลองการควบคุมแบบป้อนกลับ



รูปที่ 9. ลักษณะการจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์เพื่อทดลองระบบควบคุมเสียงรบกวนแบบป้อนกลับ

ตารางที่ 1. เปรียบเทียบค่าระดับเสียงจากการวัดระดับเสียงในที่ความถี่ต่างๆ โดยพิจารณาทั้งเฉพาะย่านความถี่และตลอดทั้งย่านความถี่ของการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

วิธีการวัดเสียง	ความถี่	ระดับเสียง		ระดับเสียงที่ลดลง
		ANC OFF	ANC ON	
แบบพิจารณาเฉพาะย่านความถี่ SPL dB(Z)	50 Hz	65.5 dB(Z)	57.2 dB(Z)	8.3 dB
	63 Hz	81.1 dB(Z)	61.2 dB(Z)	19.9 dB
	80 Hz	108.5 dB(Z)	88.1 dB(Z)	20.4 dB
	100 Hz	100.1 dB(Z)	79.9 dB(Z)	20.2 dB
	125 Hz	75.3 dB(Z)	59.4 dB(Z)	15.9 dB
แบบพิจารณาตลอดทั้งย่านความถี่โดยใช้วิธีถ่วงน้ำหนักแบบ A dB(A)	86Hz	87.7 dB(A)	72.2 dB(A)	15.5 dB



รูปที่ 10. แสดงผลจากการวิเคราะห์เสียงที่ความถี่ต่าง ๆ ในสภาวะที่ทำการเปิดระบบ และทำการปิดระบบ ควบคุมเสียงรบกวนแบบป้อนไปข้างหน้า เมื่อป้อนสัญญาณเข้าแหล่งกำเนิดเสียงที่ความถี่ 86 Hz

2. การทดลองการควบคุมแบบป้อนกลับ

จากตารางที่ 2 พบว่าระบบควบคุมเสียงความถี่ต่ำแบบป้อนกลับสามารถทำการลดระดับเสียงความถี่ต่ำได้ดีที่สุดที่ย่านความถี่ 63 Hz ซึ่งสามารถลดเสียงได้มากที่สุด 15 dB รองลงมาคือที่ความถี่ 80 Hz และ100 Hz ลดได้เท่ากันคือ 14.5 dB ส่วนย่านความถี่ที่ลดเสียงความถี่ต่ำได้น้อยที่สุดคือที่ 50 Hz สามารถลดเสียงรบกวนได้เพียง 10.4 dB เมื่อพิจารณาตลอดทั้งย่านความถี่โดยใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักแบบ A ระบบควบคุมแบบป้อนกลับสามารถลดเสียงลงได้ถึง 13.9 dB กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์เสียงที่ความถี่ต่างๆ เมื่อเปิดและปิดระบบควบคุมเสียงแบบป้อนกลับแสดงในรูปที่ 11

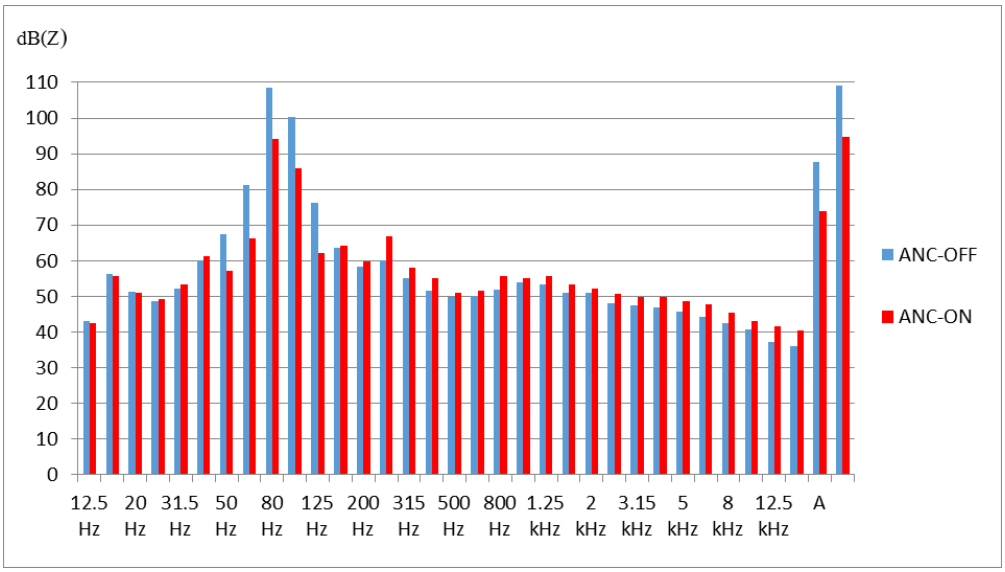
ตารางที่ 2. เปรียบเทียบค่าระดับเสียงจากการวัดระดับเสียงในที่ความถี่ต่างๆ โดยพิจารณาทั้งเฉพาะย่านความถี่และตลอดย่านความถี่ของการควบคุมแบบป้อนกลับ

วิธีการวัดเสียง	ความถี่	ระดับเสียง		ระดับเสียงที่ลดลง
		ANC OFF	ANC ON	
แบบพิจารณาเฉพาะย่านความถี่ SPL dB(Z)	50 Hz	67.5 dB(Z)	57.1 dB(Z)	10.4 dB
	63 Hz	81.2 dB(Z)	66.2 dB(Z)	15 dB
	80 Hz	108.5 dB(Z)	94 dB(Z)	14.5 dB
	100 Hz	100.3 dB(Z)	85.8 dB(Z)	14.5 dB
	125 Hz	76.3 dB(Z)	62.2 dB(Z)	14.1 dB
แบบพิจารณาตลอดทั้งย่านความถี่โดยใช้วิธีถ่วงน้ำหนักแบบ A dB(A)	86Hz	87.8 dB(A)	73.9 dB(A)	13.9 dB

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกบอร์ด DE1-SoC มาใช้ในการประมวลผล เนื่องจากบอร์ดนี้มีสะดวกในการพัฒนาภายใต้สภาพแวดล้อมปัจจุบันที่มีการใช้ Windows 10 เมื่อเทียบกับบอร์ด TMS320C ที่ต้องใช้งานกับ Windows XP ที่ถูกนำไปใช้กับหลายงานวิจัยที่ผ่านมา (Nimdum & Kuntanapreeda, 2001; Thassanamethin & Srekitsuwan, 2008) จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้บอร์ด DE1-SoC ประมวลผลสำหรับระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า สามารถทำการลดระดับเสียงได้มากที่สุดถึง 20.4 dB ที่ย่านความถี่ 80 Hz ซึ่งเป็นย่านความถี่เป้าหมายของการวิจัย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณากราฟแจกแจงความถี่ของแบบป้อนไปข้างหน้าพบว่ามีบางความถี่ที่เมื่อเปิดระบบแล้วเสียงเพิ่มขึ้นกว่าเดิม เช่นที่ย่านความถี่ 250 Hz และที่ 400 Hz ซึ่งอาจเกิดจากการสะท้อนของเสียงในห้อง เมื่อพิจารณาตลอดทั้งย่านความถี่โดยใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักแบบ A ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าสามารถลด

เสียงลงได้ถึง 15.5 dB เมื่อเทียบกับการศึกษาเชิงทดลองการลดระดับเสียงรบกวนด้วยวิธี FXLMS (Kuntanapreeda & Srekitsuwan, 2001) ซึ่งใช้หลักการควบคุมเป็นแบบป้อนไปข้างหน้าเช่นเดียวกัน สามารถลดเสียงรบกวนได้ 20-30 dB ที่ความถี่ 200 และ 300 Hz พบว่างานวิจัยดังกล่าวสามารถลดระดับเสียงรบกวนได้มากกว่างานวิจัยนี้ เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการซึ่งควบคุมเสียงได้ยากกว่าการทดลองในท่อ



รูปที่ 11. แสดงผลจากการวิเคราะห์เสียงที่ความถี่ต่าง ๆ ในสภาวะที่ทำการเปิดระบบ และทำการปิดระบบ ANC เมื่อป้อนสัญญาณเข้าแหล่งกำเนิดเสียงที่ความถี่ 86 Hz ในการควบคุมแบบป้อนกลับ

ส่วนระบบควบคุมแบบป้อนกลับนั้นสามารถทำการลดระดับเสียงได้ดีที่สุดที่ความถี่ 63 Hz ซึ่งสามารถลดเสียงได้ 15 dB(Z) ซึ่งน้อยกว่าแบบป้อนไปข้างหน้า 5.4 dB ส่วนที่ย่านความถี่ 80 Hz ซึ่งเป็นเป้าหมายของการวิจัย ระบบควบคุมเสียงแบบป้อนกลับสามารถลดเสียงได้ 14.5 dB ซึ่งเป็นที่น่าพอใจ และเมื่อพิจารณาตลอดทั้งย่านความถี่โดยใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักแบบ A ระบบควบคุมแบบป้อนกลับสามารถลดเสียงลงได้ 13.9 dB ซึ่งน้อยกว่าแบบป้อนไปข้างหน้า 1.6 dB เมื่อเทียบกับผลการวิจัยเรื่องการควบคุมเสียงรบกวนแบบป้อนกลับด้วยกฎ FXLMS (Nimdum & Kuntanapreeda, 2001) ซึ่งใช้หลักการควบคุมเป็นแบบป้อนกลับเช่นเดียวกัน สามารถลดเสียงรบกวนได้ 25-35 dB ที่ความถี่ 220 และ 240 Hz พบว่างานวิจัยดังกล่าวสามารถลดเสียงรบกวนได้มากกว่างานวิจัยนี้ เนื่องจากงานวิจัยนี้ เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการซึ่งควบคุมเสียงได้ยากกว่าการทดลองในท่อ

เมื่อเปรียบกันระหว่างการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าและแบบป้อนกลับ ถึงแม้ว่าระบบควบคุมแบบป้อนกลับจะสามารถลดเสียงรบกวนความถี่ต่ำได้น้อยกว่าแบบป้อนไปข้างหน้า แต่ข้อดีของระบบควบคุมแบบป้อนกลับคือระบบจะมีเสถียรภาพดีกว่าคือเมื่อเกิดการสั่นสะเทือนของไมโครโฟนหรือมีลมพัดเข้าไมโครโฟนจะไม่มีปัญหากับระบบมากนักเนื่องจากไม่มี secondary path (Junsupasen et al., 2018) จึงเป็นไปได้ที่สามารถนำทั้งสองวิธีการไปทดลองใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาตราจารย์ ดร.นันทกฤษณ์ ยอดพิจิตรและ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทวัส ผ่องญาติ ที่ให้ความรู้ในด้านวิศวกรรม ขอขอบคุณ นายวรุต ชุมวรฐายี และนายเทพากร สิทธิวันชัย นักวิจัยรุ่นใหม่ที่ช่วยให้งานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี ขอขอบคุณ นายณัฐวุฒิ อัครเนตร และนายธนโชติ ไตรพลรัตน ที่ช่วยในด้านการทดลองต่าง ๆ

เอกสารอ้างอิง

Junsupasen, S., Pongyart, W., Yodpijit, N. (2015). *Adaptive Feedforward Cancellation (AFC) in Sound Fields: Computer-Based Approach for Active Noise Control (ANC)*, pp. 902-906, Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015, 18-20 March 2015, The Royal Garden Hotel, Kowloon, Hong Kong.

Junsupasen, S., Pongyart, W., Jongprasithporn, M., Yodpijit, N. (2018). Low frequency noise reduction with active noise control in laboratory settings. *KMUTNB: International Journal of Applied Science and Technology, 11*(1), 39-44. http//dx.doi.org/10.14416/jijast.2018.01.002

Kuersirikul, S. (2001). *Noise reduction of a fan coil unit by active control* (M.E. thesis). Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok. (in Thai)

Kuntanapreeda, S. & Srekitsuwan, S. (2001) Experimental studies of noise attenuation using FXLMS method. *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 11*(1), 33-36. (in Thai)

Kuo, S. M. & Morgan, D. R. (1999) Active noise control: a tutorial review. *Proceedings of the IEEE, 87*, 943-973.

Messner, W. & Bodson, M. (1994) Design of adaptive feedforward controllers using internal model equivalence. *American Control Conference, 2,* 1619-1623.

Nimdum, P. & Kuntanapreeda, S. (2001). *Feedback noise control using FXLMS rule*, pp. 108-112, In The 15th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 28-30 November 2001, Srinakharinwirot University, Bangkok. (in Thai)

Peter, B. (2017) *Noise in the Plastics Processing Industry: A Practical Guide.* pp. 219. Shawbury, UK: Smithers Rapra Technology.

Rylander, R. (2004). Physiological aspects of noise-induced stress and annoyance. *Journal of Sound and Vibration, 277*(3), 471-478. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.03.008

Thassanamethin T. & Srekitsuwan S. (2008). *Active Noise Control Using Frequency Splitting Techniques* , pp. 346-351, In The 22th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 15-17 October 2008, Thammasat University, Bangkok. (in Thai)

The Journal of Applied Science **Vol. 17 No. 1: 101-110 [2018]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2018.06.001
ISSN 1513-7805 (Printed in Thailand) ISSN 2586-9663 (Online)

Research Article

แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์ยอดจำหน่ายสินค้าเซรามิกส์

Mathematical model for forecasting number of ceramic sales

หัสยา วงค์วัน[1]*

Hussaya Wongwan[1]*

[1]หมวดวิชาศึกษาทั่วไป วิทยาลัยอินเตอร์เทค อ.เมือง จ.ลำปาง 52100

[1]Division of General Education, Lampang Inter-Tech College, Muang, Lampang 52100

***E-mail**: xbonus3@gmail.com

Received: 18/12/2017; Accepted: 01/06/2018

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ใช้รูปแบบการวิจัยเชิงปฏิบัติการ (action research) มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์ยอดจำหน่ายสินค้าเซรามิกส์ในร้านจำหน่ายสินค้าของบริษัทกรณีศึกษา จากการศึกษาถึงปัญหาการจำหน่ายสินค้าของบริษัทในแต่ละร้าน พบว่าปัญหาหลักคือปริมาณสินค้าที่ผลิตในบางช่วงเวลาผลิตสินค้ามากเกินความต้องการของผู้ซื้อ และบางช่วงเวลาผลิตน้อยเกินไปไม่เพียงพอกับความต้องการของผู้ซื้อ นอกจากนี้ยังพบปัญหาการนำสินค้าเพื่อวางจำหน่ายในแต่ละร้านของบริษัท บางร้านวางสินค้าแต่ละประเภทน้อยหรือมากเกินไปไม่เหมาะสมกับปริมาณความต้องการของกลุ่มลูกค้าในแต่ละร้าน ส่งผลให้บริษัทพลาดโอกาสในการจำหน่ายสินค้า และสูญเสียรายได้จากการจำหน่ายสินค้าเป็นจำนวนมาก ดังนั้นงานวิจัยจึงได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์ยอดจำหน่ายสินค้าแต่ละร้านของบริษัท และคำนวณค่าความคาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการใช้แบบจำลอง ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองคณิตศาสตร์ดังกล่าวสามารถพยากรณ์ยอดจำหน่ายสินค้าได้ใกล้เคียงกับยอดจำหน่ายจริงในแต่ละช่วงเวลา ช่วยลดปัญหาการผลิตสินค้า และช่วยในการวางจำหน่ายในแต่ละร้านที่ไม่เหมาะสมกับความต้องการของผู้ซื้อ มีค่าความคลาดเคลื่อนการพยากรณ์เมื่อเปรียบเทียบกับยอดจำหน่ายจริงเฉลี่ยตลอดปีเพียง 3.70% ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าการคาดคะเนจากผู้จัดการบริษัทและส่งผลให้ยอดจำหน่ายสินค้าของบริษัทเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: แบบจำลองคณิตศาสตร์, พยากรณ์, ยอดจำหน่ายสินค้าเซรามิค

Abstract

This research utilized an action research model that aimed to develop a mathematical model for forecasting number of ceramic sales at the studied ceramic company's outlet. From the study of the problem related to company's product sales at each outlet, it was found that the main problems were the excess amount of products producing at certain times more than the demand of the market as well as there was insufficient amount of products producing at some periods less than the demand in the market. Besides, the type of product displayed at each outlet was also one of the problems. Some outlets displayed some types of products more or less than the need of a group of customers. This imbalance of the product display led to the loss of company's opportunity to sale and high sales revenue. Thus, this research had developed mathematical model for forecasting number of products in each ceramic outlet of the company and calculating the error occurred during the study. It was revealed that this mathematical model could forecast the product sales closed to the real one in each period, reduce production problem and assist the imbalanced product display in each outlet. There was an error on the forecast only at 3.70% when compared with the real annual product sales which was less than the expectation from company manager and elevated product sales of the company.

Keywords: mathematical model, forecast, sales of ceramic products

บทนำ

การวางแผนการผลิตที่มีประสิทธิภาพเป็นสิ่งสำคัญต่อธุรกิจยุคปัจจุบันเนื่องจากส่งผลต่อต้นทุนรวม หรือยอดขาย รวมทั้งโอกาสในการขายผลิตภัณฑ์ หากผู้ประกอบการไม่มีการวางแผนการผลิตและจำหน่ายที่เหมาะสมจะเกิดปัญหาสินค้าไม่เพียงพอต่อความต้องการ หรือมากเกินไป ซึ่งส่งผลต่อกำไรของผู้ประกอบการ อุตสาหกรรมเซรามิกส์ของจังหวัดลำปาง เป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของจังหวัด แต่เดิมการผลิตเซรามิกส์ของจังหวัดลำปางเป็นเพียงการผลิตภายในครัวเรือนโดยใช้แรงงานภายในครัวเรือนเท่านั้น ต่อมาการท่องเที่ยวของจังหวัดลำปางมีการขยายตัวมากขึ้น นักท่องเที่ยวต่างมีความสนใจซื้อสินค้าเซรามิกส์กันมากขึ้น ทำให้สินค้าจำพวกเซรามิกส์กลายเป็นที่นิยมและสร้างชื่อเสียงเป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไป ปัจจุบันการผลิตภายในครัวเรือนจึงได้พัฒนาเป็นการผลิตในเชิงพาณิชย์มากขึ้น

Rangavibha (1991) ศึกษาการดำเนินธุรกิจผลิตและจำหน่ายสินค้าเซรามิกส์ ได้แก่ ของใช้ และของที่ระลึก ซึ่งมีร้านจำหน่ายจำนวน 9 ร้าน โดยบริษัทจะผลิตสินค้าและนำส่งไปยังร้านจำหน่าย ปัญหาหลักที่พบในปัจจุบันของบริษัท คือ ปริมาณสินค้าที่ผลิตในบางช่วงเวลาผลิตสินค้ามากเกินความต้องการของผู้ซื้อ และบางช่วงเวลาผลิต

น้อยเกินไปไม่เพียงพอกับความต้องการของผู้ซื้อ นอกจากนี้ยังพบปัญหาการนำสินค้าเพื่อวางจำหน่ายในแต่ละร้าน บางร้านวางสินค้าแต่ละประเภทน้อยหรือมากเกินไปไม่เหมาะสมกับปริมาณความต้องการของกลุ่มลูกค้าในแต่ละร้าน ส่งผลให้บริษัทพลาดโอกาสในการจำหน่ายสินค้า สูญเสียรายได้จากการจำหน่ายสินค้าเป็นจำนวนมาก จากการวิเคราะห์ปัญหาพบว่าสาเหตุเกิดจากปริมาณการผลิตและวางจำหน่ายในแต่ละร้านที่ผิดพลาดของผู้จัดการ เนื่องจากไม่มีหลักเกณฑ์ในการวางแผนที่แน่นอนเป็นการใช้ประสบการณ์ของผู้จัดการโดยพิจารณาจากข้อมูลยอดขายในอดีตที่ผ่านมา ถ้าสินค้าใดขายดี ก็จะผลิตเป็นปริมาณมาก

แบบจำลองคณิตศาสตร์ คือ การนำเอาหลักการคณิตศาสตร์มาใช้ในการจำลองสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง เกิดประโยชน์ในธุรกิจต่าง ๆ เช่น ช่วยลดต้นทุน ช่วยในการวางแผนการตัดสินใจของผู้บริหาร (Rompho, 2012) และจากปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยจึงศึกษาลักษณะของความต้องการซื้อสินค้า เพื่อนำไปวางแผนการผลิต และจำหน่ายสินค้าเซรามิกส์ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อช่วยการวางแผนการผลิตสินค้า และจำหน่ายสินค้าเซรามิกส์ในบริษัทให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากความต้องการของซื้อจริงน้อยที่สุด ลดปัญหาปริมาณการผลิตสินค้า และปริมาณการวางจำหน่ายสินค้าของบริษัทในแต่ละร้านที่ไม่เหมาะสมกับความต้องการของผู้ซื้อ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มยอดขายการจำหน่ายสินค้าของบริษัทให้สูงขึ้น

วิธีการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อช่วยวางแผนการผลิต และการจำหน่ายสินค้าเซรามิกส์ช่วยลดปัญหาปริมาณการผลิตสินค้า และปริมาณการวางจำหน่ายสินค้า ไม่เหมาะสมกับความต้องการของผู้ซื้อ โดยมีวิธีดำเนินการดังนี้

1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ร้านจำหน่ายสินค้าของบริษัทลำปางศิลปนคร จำกัด มีผลิตภัณฑ์เซรามิคจำนวน 93 รายการโดยผู้วิจัยเลือกศึกษายอดจำหน่ายสินค้าที่มียอดขายสูงจำนวน 3 รายการ

2. ขั้นตอนการวิจัยมีดังนี้

2.1 เก็บรวบรวมข้อมูล โดยในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลแบบปฐมภูมิซึ่งได้จากการเก็บข้อมูลยอดขายสินค้าจำนวน 3 รายการจากทุกร้านจำหน่ายของบริษัทจำนวนทั้งสิ้น 9 ร้าน ตั้งแต่ เดือนมกราคม 2558 ถึง เดือนธันวาคม 2558 และตั้งแต่ เดือนมกราคม 2559 ถึง เดือนธันวาคม 2559

2.2 นำข้อมูลที่รวบรวมได้ไปสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้หลักการวิเคราะห์แนวโน้มเชิงเส้น (linear trend analysis) เนื่องจากเป็นวิธีการพยากรณ์ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ต่ำที่สุด (Nananok, 2010) ใช้โปรแกรม Visual Basic (version 6.0, Microsoft®) มาช่วยในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อการพยากรณ์หาจำนวนยอดขายสินค้า และนำข้อมูลดังกล่าวมาช่วยในการวางแผนจำนวนสินค้าที่ต้องนำมาวางจำหน่ายในแต่ละร้านของบริษัท

หลักการวิเคราะห์แนวโน้มเชิงเส้น (linear trend analysis) แสดงได้ดังสมการที่ 1

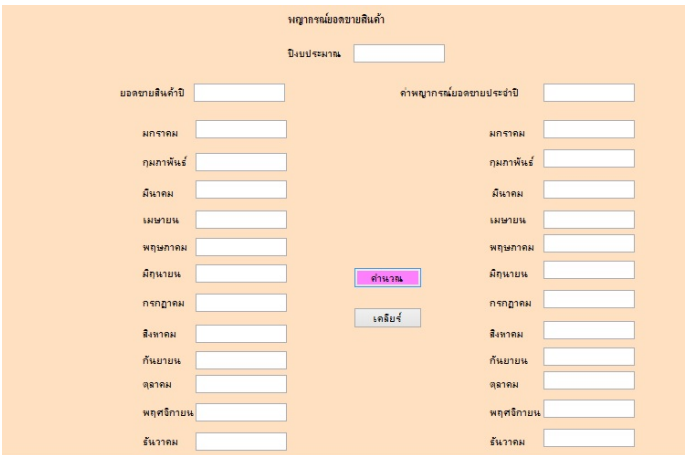
$$\hat{Y} = a + bt \quad (1)$$

โดยที่ $\hat{Y}$ เป็นค่าแนวโน้มเชิงเส้นที่มีจำนวน n ตัว

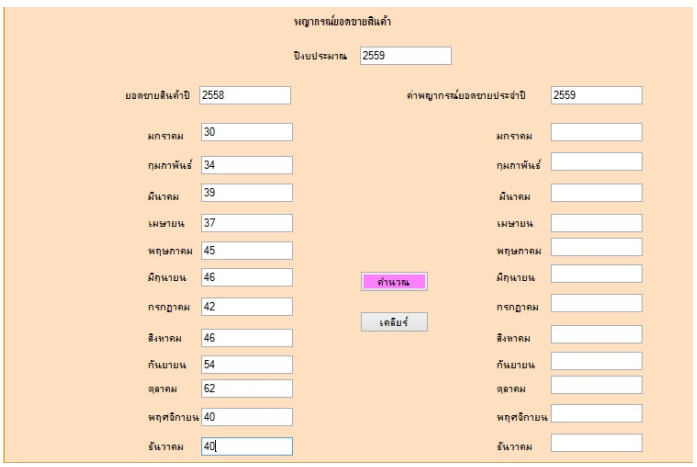
และ

$$b = \frac{n\sum tY - \sum Y \cdot \sum t}{n\sum t^2 - (\sum t)^2} \qquad a = \frac{\sum Y_i}{n}$$

ตัวอย่างหน้าจอแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อการพยากรณ์ยอดขายสินค้าที่สร้างจากโปรแกรม Visual Basic แสดงไว้ดังรูปที่ 1 โดยสามารถป้อนข้อมูลย้อนหลังก่อนถึงปีพยากรณ์ได้ 1 ปี ดังรูปที่ 2



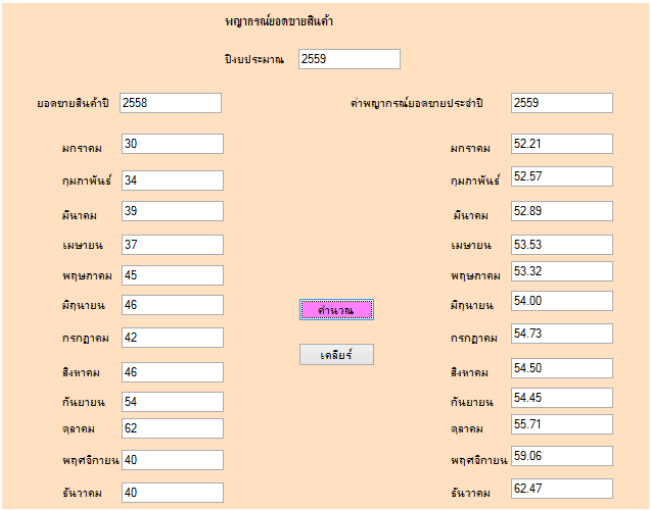
รูปที่ 1. ตัวอย่างหน้าจอแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างจากโปรแกรม Visual Basic



รูปที่ 2. ตัวอย่างหน้าจอแสดงการทดลองป้อนข้อมูลยอดขายในปี 2558 เพื่อการพยากรณ์ในปี 2559

doi: 10.14416/j.appsci.2018.06.001

และเมื่อทดลองกดปุ่มคำนวณในโปรแกรม สามารถแสดงผลลัพธ์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อการพยากรณ์หาจำนวนยอดขายสินค้า ได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3. ตัวอย่างหน้าจอแสดงการทดลองคำนวณค่าพยากรณ์ยอดขายประจำปี

3. ทดสอบแบบจำลอง เป็นการทดสอบความถูกต้องและแม่นยำของแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยหาค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์โดยพิจารณาเปรียบเทียบจากยอดขายสินค้าแต่ละรายการในร้านจำหน่ายที่เกิดขึ้นจริงกับการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยการหาค่าเปอร์เซนต์ค่าคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เฉลี่ย (mean absolute percentage error หรือ MAPE) เป็นค่าวัดความถูกต้องของการพยากรณ์โดยพิจารณาจากขนาดของความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์เทียบกับค่าจริง โดยค่า MAPE ที่ต่ำบ่งบอกว่าเทคนิคที่ใช้นั้นมีความแม่นยำ ดังสมการที่ 2

$$\text{MAPE} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left|(D_i - F_i)/D_i\right|}{n} \times 100 \qquad (2)$$

โดยที่ D = ยอดขายที่เกิดขึ้นจริง

F = ยอดขายที่เกิดจากการพยากรณ์

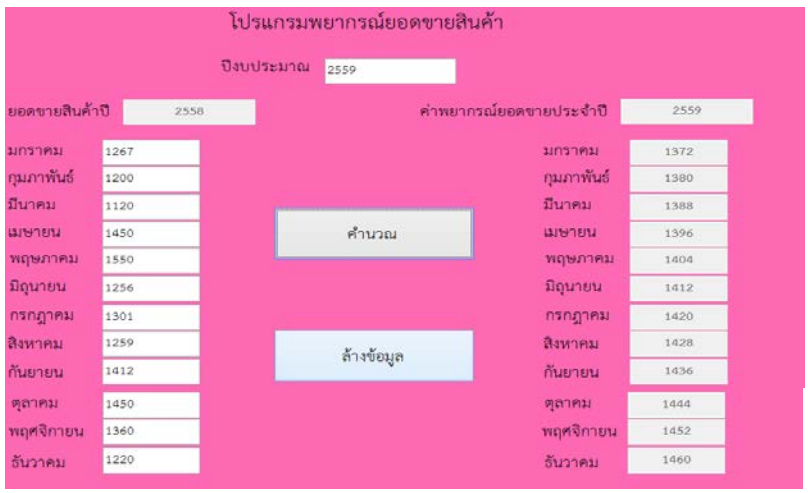
n = จำนวนครั้ง

4. พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

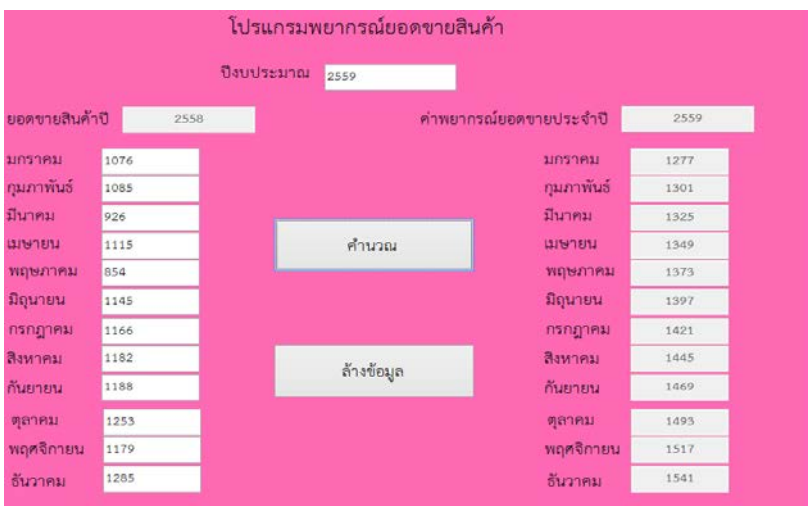
doi: 10.14416/j.appsci.2018.06.001

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

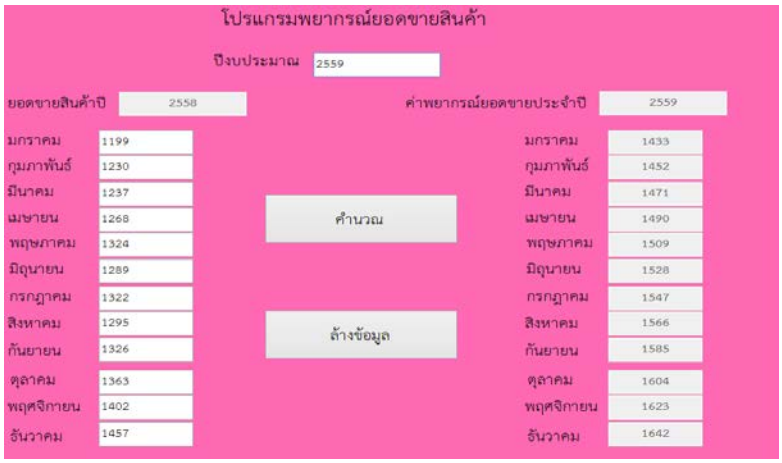
การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยเลือกศึกษาเฉพาะยอดจำหน่ายผลิตภัณฑ์เซรามิคที่มียอดขายสูงจำนวน 3 รายการ จาก 93 รายการ ได้แก่ ถ้วย (CR001) จาน (CR002) และแก้วกาแฟ (CR003) โดยการพยากรณ์จะทำเฉพาะในปี 2559 ส่วนยอดขายในปี 2558 เป็นการเก็บข้อมูลยอดขายเดิมเพื่อเป็นข้อมูลเปรียบเทียบในการพยากรณ์ในปี 2559 ผลการดำเนินงานวิจัยสามารถใช้โปรแกรม Visual Basic มาช่วยในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อการพยากรณ์หาจำนวนยอดขายสินค้าได้ โดยโปรแกรมสามารถพยากรณ์ยอดขายสินค้าทุกชนิดได้จริงดังรูปที่ 4 ถึง 6



รูปที่ 4. หน้าจอแสดงการคำนวณสินค้าถ้วย (CR001)



รูปที่ 5. หน้าจอแสดงการคำนวณสินค้าจาน (CR002)



รูปที่ 6. หน้าจอแสดงการคำนวณสินค้าแก้วกาแฟ (CR003)

เมื่อได้ค่าจากการพยากรณ์โดยการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์คำนวณยอดขายสินค้ากลุ่มตัวอย่างของบริษัทจำนวน 3 รายการ ในร้านจำหน่ายสินค้าจำนวน 9 ร้าน ผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บข้อมูลยอดจำหน่ายสินค้าจริงแต่ละรายการจากร้านจำหน่ายของบริษัทตั้งแต่เดือนมกราคม 2559 จนถึงเดือนธันวาคม 2559 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1. แสดงยอดขายสินค้าตามจริงทั้ง 3 รายการจำนวน 9 ร้าน (ชิ้น) ในปี 2558 และ 2559

เดือน	CR001		CR002		CR003	
	ปี 2558	ปี 2559	ปี 2558	ปี 2559	ปี 2558	ปี 2559
มกราคม	1267	1320	1076	1326	1199	1425
กุมภาพันธ์	1200	1350	1085	1213	1230	1429
มีนาคม	1120	1251	926	1123	1237	1491
เมษายน	1450	1450	1115	1364	1268	1510
พฤษภาคม	1550	1420	854	1365	1324	1510
มิถุนายน	1256	1520	1145	1325	1289	1530
กรกฎาคม	1301	1420	1166	1421	1322	1561
สิงหาคม	1259	1223	1182	1400	1295	1596
กันยายน	1412	1325	1188	1512	1326	1625
ตุลาคม	1450	1562	1253	1324	1363	1615
พฤศจิกายน	1360	1356	1179	1521	1402	1595
ธันวาคม	1220	1470	1285	1624	1457	1625

เมื่อนำยอดจำหน่ายสินค้าจริงในแต่ละรายการจากร้านจำหน่ายของบริษัทตั้งแต่เดือนมกราคม 2559 จนถึงเดือนธันวาคม 2559 มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ แล้วคำนวณหาเปอร์เซนต์ค่าคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) จะปรากฏผลดังตารางที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการพยากรณ์ยอดจำหน่ายสินค้าจากแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อการพยากรณ์ยอดขายสินค้านี้มีค่าเฉลี่ยของ MAPE เพียง 3.70 % และเมื่อได้เปรียบเทียบกับการคาดคะเนจากผู้จัดการบริษัทลำปางศิลปนคร จำกัด พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนการคาดคะเนเปรียบเทียบกับยอดจำหน่ายจริงเฉลี่ยตลอดปีเท่ากับ 15.35 % ดังนั้นการพยากรณ์ยอดจำหน่ายสินค้าจากแบบจำลองฯ นี้ จึงมีค่าความคาดเคลื่อนต่ำกว่าการคาดคะเนจากผู้จัดการบริษัท และสามารถพยากรณ์ยอดจำหน่ายได้ใกล้เคียงกับยอดจำหน่ายจริงของบริษัท

ตารางที่ 2. แสดงค่าพยากรณ์ยอดจำหน่ายสินค้าปี 2559 (ชิ้น) เมื่อเทียบกับยอดขายสินค้าตามจริงทั้ง 3 รายการ จำนวน 9 ร้าน (ชิ้น)

เดือน	CR001		CR002		CR003	
	ค่าพยากรณ์	จำนวนขายจริง	ค่าพยากรณ์	จำนวนขายจริง	ค่าพยากรณ์	จำนวนขายจริง
มกราคม	1372	1320	1277	1326	1433	1425
กุมภาพันธ์	1380	1350	1301	1213	1452	1429
มีนาคม	1388	1251	1325	1123	1471	1491
เมษายน	1396	1450	1349	1364	1490	1510
พฤษภาคม	1404	1420	1373	1365	1509	1510
มิถุนายน	1412	1520	1397	1325	1528	1530
กรกฎาคม	1420	1420	1421	1421	1547	1561
สิงหาคม	1428	1223	1445	1400	1566	1596
กันยายน	1436	1325	1469	1512	1585	1625
ตุลาคม	1444	1562	1493	1324	1604	1615
พฤศจิกายน	1452	1356	1517	1521	1623	1595
ธันวาคม	1460	1470	1541	1624	1642	1625
MAPE		5.50		4.46		1.15

ในการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด งานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการวิเคราะห์แนวโน้มเชิงเส้นร่วมกับโปรแกรม Visual Basic มาพัฒนา และเมื่อได้นำค่าพยากรณ์ยอดจำหน่ายสินค้าปี 2559 มาใช้จริง พบว่าส่งผลให้ยอดจำหน่ายสินค้าของบริษัทในปี 2559 เพิ่มขึ้นจากปี 2558 เป็นจำนวน 187,550.00 บาท

เนื่องจากทางบริษัทได้นำข้อมูลจากการพยากรณ์มาใช้ในการวางแผนการผลิตและจำหน่าย แทนการคำนวณจากผู้จัดการบริษัท จึงช่วยลดปัญหาการผลิต และการจำหน่ายไม่เหมาะสมกับความต้องการของลูกค้าในแต่ละร้าน โดยข้อมูลการจำหน่ายสินค้าจริงจากฝ่ายขายของบริษัทเมื่อเปรียบเทียบยอดจำหน่ายสินค้าในปี 2558 กับปี 2559 มียอดจำหน่ายสินค้าเท่ากับ 2,825,140 และ 3,012,690 บาท ตามลำดับ ดังนั้นค่าจากการพยากรณ์โดยการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์คำนวณยอดขายสินค้ากลุ่มตัวอย่างของบริษัทจึงช่วยเพิ่มรายได้ให้กับบริษัทได้จริง

ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ditsa & Prasomsin (2008) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับการวางแผนจัดการผลิตสวนป่าไม้สักโดยการประยุกต์เทคนิคกำหนดการเชิงเส้น (linear programming technique) ทำให้ได้กำไรตลอดระยะเวลาในการวางแผน 925,569.00 บาท และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jongraklikhit (2009) ที่สร้างแบบจำลองเชิงเส้น (linear programming) เพื่อสร้างแผนการผลิต แล้วเปรียบเทียบกับการวางแผนการผลิตแบบเดิมและการผลิตจริง และพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อช่วยในการวางแผนการผลิต สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ 153,018 บาท หรือร้อยละ 0.30 จนถึง 214,582 บาท/เดือน หรือร้อยละ 0.44

สรุปผลการทดลอง

แบบจำลองคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเพื่อพยากรณ์ยอดจำหน่ายสินค้าเซรามิกส์โดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์การวิเคราะห์แนวโน้มเชิงเส้น (linear trend analysis) ประยุกต์เข้ากับโปรแกรม Visual Basic ซึ่งสามารถนำไปพยากรณ์ยอดจำหน่ายสินค้าของบริษัทลำปางศิลปนคร จำกัด ได้ใกล้เคียงกับยอดจำหน่ายจริงในแต่ละช่วงเวลา จึงช่วยลดปัญหาการผลิตสินค้า และการวางจำหน่ายในแต่ละร้านน้อยหรือมากเกินไปซึ่งไม่เหมาะสมกับความต้องการของผู้ซื้อ และเมื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) ในการพยากรณ์ยอดจำหน่ายสินค้าแล้ว พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนการพยากรณ์เมื่อเปรียบเทียบกับยอดจำหน่ายจริงเฉลี่ยตลอดปีเพียง 3.70 % ซึ่งเป็นค่าความคลาดที่ต่ำกว่าการคาดคะเนจากผู้จัดการบริษัท

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากวิทยาลัยอินเตอร์เทคลำปาง อ.เมือง จ.ลำปาง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

เอกสารอ้างอิง

Ditsa, T. & Prasomsin, P. (2008). Timber production planning using linear programming technique: A case study of Mae Mo plantation, Lampang province. *Journal of Forest Management 2*(3), 134-135. (in Thai)

Jongraklikhit, C. (2009). *The Linear Programmng for production planning, Case study: industrial gas plant* (Independent Study for M.Sc.) Division of Technology Management, College of Innovation, Thammasat university, Bangkok. (in Thai)

Nananok, H. (2010). *Study of sales forecasts for production planning* (Special Problems) Department of Industrial Management, Faculty of Industrial Technology and Management, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok. (in Thai)

Rangavibha, C. (1991). Report on the study of investment opportunities in the ceramic industry in the North. Bangkok: Office of the Permanent Secretary, Ministry of Industry. (in Thai)

Rompho, N. (2012). *Data Analysis for Decision Making* (1st ed.). Bangkok: Faculty of Commerce and Accountancy, Thammasat University. (in Thai)

The Journal of Applied Science **Vol. 17 No. 1: 111-124 [2018]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2018.06.003
ISSN 1513-7805 (Printed in Thailand) ISSN 2586-9663 (Online)

Research Article

อิทธิพลของการเชื่อมเทมเปอร์บีทในวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

Effects of temper bead on carbon steel by shielded metal arc welding process

สิทธิพงษ์ แสงอินทร์[1]*

Sittipong sang-in[1]*

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการเชื่อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

[1] Department of Welding Engineering Teachnology, College of Industrial Tecahnology, King Mongkut's University of Teachnology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800

***E-mail**: sittipong.a@cit.kmutnb.ac.th

Received: 12/02/2018; Accepted: 12/06/2018

บทคัดย่อ

การเชื่อมเทมเปอร์บีทเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ได้ถูกดำเนินการเพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งของโลหะเชื่อม วัสดุในการทดลอง คือ แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A 36 ที่มีขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 150 และหนา 5 มิลลิเมตร ลวดเชื่อมที่ใช้คือ AWS A 5.1 E 7016 การทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรก ศึกษาอิทธิพลผลของระยะการเชื่อมทับแนวที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อม โดยทำการเชื่อมด้วยกระแส 90-110 แอมแปร์ ส่วนที่สอง ศึกษาอิทธิพลของชั้นแนวเชื่อมจำนวน 6 ชั้น ที่กระแส 120 แอมแปร์ ที่มีผลต่อสมบัติโลหะเชื่อม จากผลการศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของพื้นที่ผลกระทบร้อน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและมีรูปร่างเกรนที่มีความหยาบมากกว่าพื้นที่การหลอมละลาย โครงสร้างจุลภาคของพื้นที่การเทมเปอร์ถูกปรับปรุงและแสดงความแข็งลงต่ำกว่าโลหะฐานและพื้นที่กระทบร้อน เมื่อเปรียบเทียบความแข็งก่อนและหลังการเทมเปอร์พบว่าความแข็งของโลหะเชื่อมมีค่าลดลงทุกชั้นการเชื่อม

doi: 10.14416/j.appsci.2018.06.003

คำสำคัญ: การเชื่อมเทมเปอร์บีท, ความแข็งของโลหะเชื่อม, โครงสร้างจุลภาค

Abstract

A temper bead welding of carbon steel using a shielded metal arc welding (SMAW) process was performed to study microstructure and hardness of the weld metal. A material using in this experiment was ASTM A36 carbon steel plate that was 50 millimeters in width, 150 millimeters in length and 5 millimeters in thickness. The welding electrode was AWS A5.1 E7016. The experiment was divided into 2 parts. Firstly, the effect of welding bead overlap distance on the weld property with the welding current of 90-110 amperes was investigated. Secondly, the effect of the welding layer on the weld property with 6 welding layers and the welding current of 120 amperes was inspected. From the study and analysis on macro and microstructure of the heat affected zone (HAZ), it was found that there was the alteration in microstructure and more rough grains shape than in the fusion area. The microstructure of the tempered area was improved and showed the decreasing of hardness lower than the base metal and HAZ. When compared the hardness of pre- and post- temper, it was revealed that the hardness of the weld metal decreased in all weld layers.

Keywords: temper bead welding, weld metal hardness, microstructure

บทนำ

กระบวนการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ความร้อนได้จากการอาร์กระหว่างลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์กับชิ้นงาน เพื่อหลอมละลายลวดเชื่อมและชิ้นงานให้ติดกัน แกนลวดเชื่อมทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าและหลอมละลายเป็นเนื้อโลหะเชื่อม ส่วนฟลักซ์ที่หุ้มลวดเชื่อมหลอมละลายแตกตัวเป็นแก๊สปกคลุม และหลอมละลายเป็นแสลกหลอมเหลว (molten slag) เพื่อป้องกันบรรยากาศภายนอกเข้ามาทำปฏิกิริยากับแนวเชื่อมและช่วยลดอัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อม

เหล็กกล้าคาร์บอนสามารถเปลี่ยนสมบัติทางกลได้โดยวิธีการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน การเพิ่มความแข็งแรงทางกล การเพิ่มธาตุผสม หรือหลายวิธีการร่วมกัน เหล็กกล้าคาร์บอนเมื่อได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ จะเปลี่ยนเป็นเฟสออสเทนไนต์ซึ่งเป็นเฟสที่ไม่เสถียร ณ อุณหภูมิห้อง และสามารถละลายคาร์บอนได้สูง ถ้าควบคุมการเย็นตัวอย่างช้า ๆ ลงมาที่อุณหภูมิห้อง เฟสออสเทนไนต์จะกลับมาเป็นเฟอร์ไรต์ หรือเฟอร์ไรต์หรือเพิร์ลไลท์ หรือทั้งสองโครงสร้างร่วมกัน (Limmaneevichitr, 2005)

Shen et al. (2012) ได้ศึกษาผลของความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานต่อขนาดรูปร่างของแนวเชื่อม ผลกระทบต่อบริเวณกระทบร้อนของเนวเชื่อม (heat affected zone: HAZ) ในกระบวนการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (submerged arc welding: SAW) พบว่าเมื่อความร้อนลงสู่ชิ้นงานสูงขึ้น ขนาดรูปร่าง ทั้งความนูน ความกว้าง ความลึก ของแนวเชื่อม รวมถึงขนาดของบริเวณกระทบร้อนเพิ่มสูงขึ้น โครงสร้างจุลภาคเป็นโปรยูเทคตอยเฟอร์ไรท์เกรนละเอียด บริเวณ HAZ ซึ่งละเอียดกว่าเนื้อโลหะเดิมที่ทำการเชื่อมบริเวณ HAZ เกรนหยาบ ได้โครงสร้างเบนไนท์ เฟอร์ไรท์ และเพริลไลท์ ในขณะที่ Aloraier et al. (2006) ได้ศึกษาการเชื่อมอาร์กฟลักซ์คอร์ (flux cored arc welding: FCAW) ด้วยการทำเทมเปอร์บีท (temper bead) เพื่อลดการให้ความร้อนหลังการเชื่อมเป็นวิธีการลดความเค้นตกค้างจากการเชื่อม ซึ่งส่งผลต่อการเทมเปอร์โครงสร้างแนวเชื่อมและ HAZ ซึ่งทำให้สมบัติทางกลถูกลดทอนลงไปด้วย อันได้แก่ ความต้านทานการคืบตัว ความต้านทานแรงดึง เมื่อผ่านวัฏจักรทางความร้อนจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อมหลายครั้ง

ความร้อนจากการเชื่อมส่งผลทำให้บริเวณชิ้นงานที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อน HAZ เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาค เป็นผลให้สมบัติทางกลที่ได้เปลี่ยนแปลง จำเป็นต้องให้ความร้อนกับชิ้นงานหลังการเชื่อมเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกล อุณหภูมิสูงที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานขณะการเชื่อมซ้อนแนวหลายชั้น ในกรณีชิ้นงานหนา ที่สูงเกินค่าอุณหภูมิวิกฤต เป็นช่วงอุณหภูมิที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค อย่างไรก็ตาม ความร้อนจากการเทมเปอร์บีทในแนวเชื่อมถัดไปมีข้อจำกัดเรื่องความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิอันเนื่องจากเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับที่ต่างกันและระดับของการเทมเปอร์เมื่อมีการเชื่อมซ้อนทับหลายแนวเชื่อม เพื่อที่จะเข้าใจถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวนั้นว่าส่งผลอย่างไรต่อสมบัติทางกล และโครงสร้างทางจุลภาคที่เกิดขึ้น การวิจัยอิทธิพลของการเชื่อมเทมเปอร์บีทในเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์นี้จะทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติทางกล

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้แบ่งการทดลองออกเป็นชุดการทดลอง ใช้วัสดุ ASTM A36 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 1

<u>การทดลองที่ 1</u> ศึกษาเปอร์เซ็นต์การเชื่อมทับแนวต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล โดยในการทดลองนำชิ้นงานวัสดุเหล็กกล้า ASTM A36 มาตัดให้ได้ขนาดกว้าง 50 ยาว 150 และหนา 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1 นำชิ้นงานมาลบคมจากการตัดบริเวณขอบของชิ้นงาน และบริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน จากนั้นอบลวดเชื่อมเพื่อลดความชื้นภายในฟลักซ์ ที่อุณหภูมิ 350 ºC เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เชื่อมโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบ DC electrode positive (DCEP) ลวดเชื่อม AWS A5.1 E7016 เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร ด้วยกระแส 90, 100 และ 110 แอมแปร์ ทำการเชื่อมแนวที่หนึ่ง เป็นการเชื่อมเดินแนวบนแผ่นงาน ทำความสะอาดแนวเชื่อมแนวที่หนึ่งและปล่อยให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วเชื่อมแนวเชื่อมแนวที่สองตามจุดที่กำหนดไว้เพื่อให้ได้เปอร์เซ็นต์การเชื่อมทับ

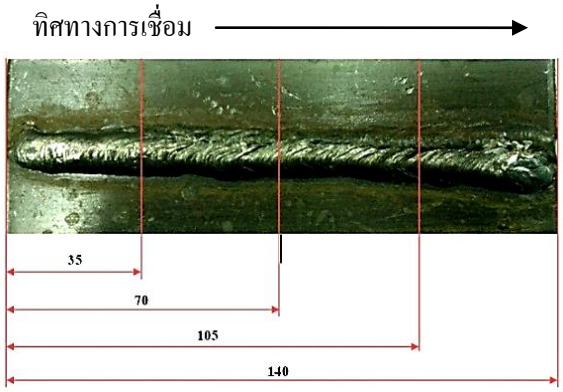
แนวที่หลากหลาย หลังจากนั้นจะทำการตัดชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การวัดการซ้อนทับ และการทดสอบค่าความแข็งในแนวตัดขวางชิ้นงาน ดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1. ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงาน (ASTM A36/A36M-14 Standard Specification for Carbon Structural Steel) (American Society of Mechanical Engineers, 2007)

Fe	C	P	S	Mn	Cu
99%	0.26%	0.04%	0.05%	0.75%	0.2%



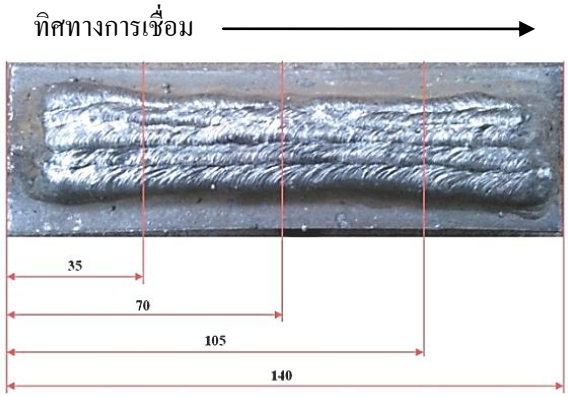
รูปที่ 1. ขนาดชิ้นงาน



รูปที่ 2. ตำแหน่งการตัดชิ้นงานทดสอบเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ

<u>การทดลองที่ 2</u> ศึกษาผลของจำนวนชั้นของแนวเชื่อมต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล โดยในการทดลองนำชิ้นงานวัสดุเหล็กกล้า ASTM A36 มาตัดให้ได้ขนาดกว้าง 50 ยาว 150 และหนา 5 มิลลิเมตร ใช้กระแสไฟฟ้า

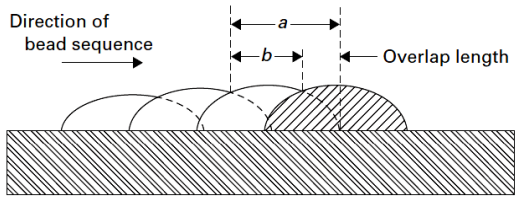
แบบ DCEP ด้วยกระแสไฟฟ้า 120 แอมแปร์ กับลวดเชื่อม AWS A5.1 E7016 เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 มิลลิเมตร เชื่อมทั้งหมด 6 ชั้น หลังจากนั้นทำการตัดขวางชิ้นงาน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3. ตำแหน่งการตัดชิ้นงานทดสอบ

การวัดผลเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ

การวัดผลเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับสามารถหาได้จากสมการ $\frac{(a-b)}{a}\times 100\%$ ตามวิธีการของ ASME section IX (American Society of Mechanical Engineers, 2015) ดังรูปที่ 4

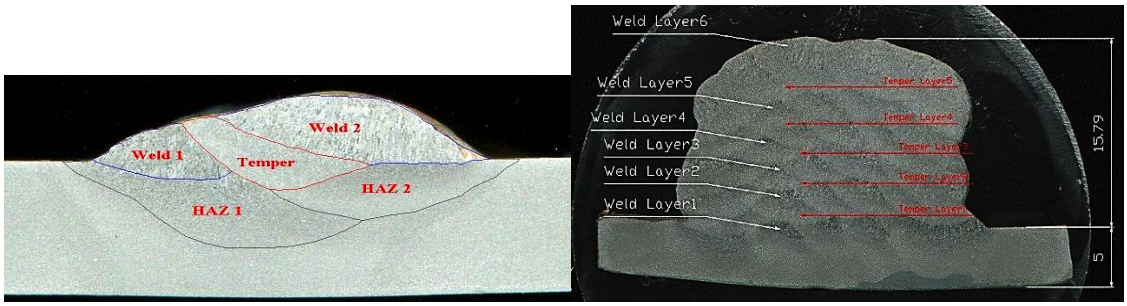


รูปที่ 4. การวัดผลเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ

ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบความแข็ง

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเพื่อศึกษาบริเวณผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อม เตรียมชิ้นงานการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ตัดด้วยเลื่อยกลในแนวตัดขวางที่แสดงก่อนหน้า แล้วจึงนำชิ้นงานมาขึ้นรูปตัวเรือนเย็น ขัดผิวให้ละเอียดด้วยกระดาษทรายและขัดขั้นตอนสุดท้ายด้วยผงอะลูมินาออกไซด์ ล้างชิ้นงานให้สะอาด กัดกรดด้วยส่วนผสมของสารละลายที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างตามมาตรฐาน ASM handbook 2004 (Benscoter &

Bramfitt, 2004) ประกอบด้วย กรดไนตริค (NHO_3) เข้มข้น 5 มิลลิลิตร และเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) 95 มิลลิลิตร หลังจากการกัดกรดเสร็จแล้ว นำชิ้นงานที่ได้ มาถ่ายภาพโครงสร้างและทดสอบความแข็งด้วยวิธีไมโครวิกเกอร์ (micro vickers hardness testing) ต่อไป ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5. ผิวงานที่ผ่านการกัดกรดจากการทดลองที่ 1 (ซ้าย) และ 2 (ขวา)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวัดเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ

การวัดเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับของแนวเชื่อมจากกระแสไฟฟ้า 90 และ 100 แอมแปร์ พบว่าที่ตำแหน่งเดียวกัน เมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เป็นผลมาจากความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความกว้างของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น แต่ในตำแหน่ง 1 และ 2 ของกระแสไฟฟ้า 100 และ 110 แอมแปร์ ความกว้างของแนวเชื่อมลดลงเล็กน้อย ทำให้เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับลดลง เป็นผลมาจากความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานมีความเข้มข้นสูงขึ้นมาก จึงทำให้ถ่ายเทลงสู่ด้านล่างของชิ้นงานส่งผลให้การหลอมลึกมากขึ้น ในขณะที่อัตราการเติมเนื้อโลหะงานเท่าเดิมความกว้างจึงลดลงแต่ไปเพิ่มขึ้นในส่วนของความลึกแทน ตำแหน่งที่ 3 นั้นได้ผลเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับเพิ่มขึ้นเช่นเดิมเพราะใกล้กับจุดหยุดเชื่อมซึ่งบังคับให้ทับกันสมบูรณ์จากการออกแบบการทดลอง ตารางที่ 2 แสดงเปอร์เซ็นต์การเชื่อมซ้อนทับ จากการวัดที่ตำแหน่งเดียวกันเมื่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 90-110 แอมแปร์

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

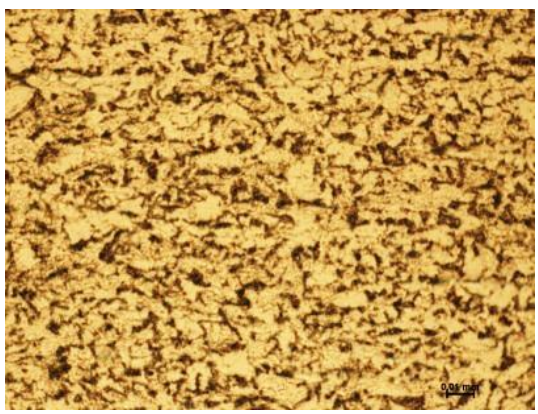
วัสดุ ASTM A36 เหล็กกล้าคาร์บอน มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เพิร์ลไลท์ ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งได้จากการเตรียมโครงสร้างจากวัสดุก่อนการเชื่อม

ตารางที่ 2. ผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมต่อเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับของแนวเชื่อมในตำแหน่งต่าง ๆ

กระแสไฟฟ้าเชื่อม (แอมแปร์)	เปอร์เซ็นต์ซ้อนทับแนวเชื่อม		
	หน้าตัดที่ 1	หน้าตัดที่ 2	หน้าตัดที่ 3
90	32	57	70
100	37	63	74
110	34	60	84

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

วัสดุ ASTM A36 เหล็กกล้าคาร์บอน มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เพิร์ลไลท์ ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งได้จากการเตรียมโครงสร้างจากวัสดุก่อนการเชื่อม

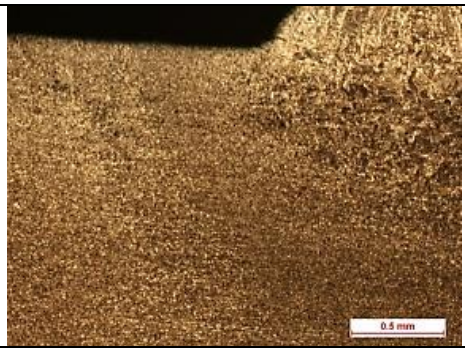
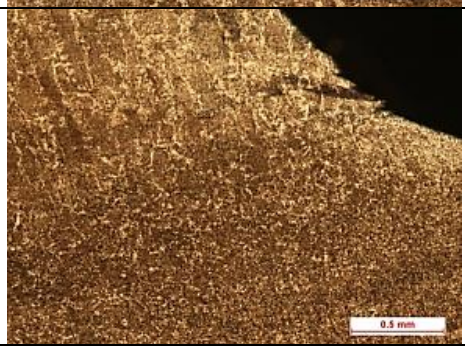


รูปที่ 6. แสดงภาคโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน (กำลังขยาย 500 เท่า)

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของบริเวณการเชื่อมซ้อนทับ

จากผลการทดลองในตารางที่ 3 หลังการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 90 แอมป์แปร์ บริเวณ HAZ ใกล้กับบริเวณแนวเชื่อม ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคมีขนาดเกรนที่โตและหยาบกว่า HAZ ที่ติดกับบริเวณเนื้อวัสดุ อันเป็นผลมาจากความร้อนจากการเชื่อมสูงเกินจุดวิกฤติ และเย็นตัวช้ากว่า HAZ ที่ติดกับชิ้นงานส่วนบริเวณแนวเชื่อม ส่วนบริเวณของแนวเชื่อมลักษณะโครงสร้างจุลภาคเกิดจากการแข็งตัวภายในแนวเชื่อม บริเวณเทมเปอร์โครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมแนวแรกที่ถูกเทมเปอร์จากแนวเชื่อมแนวที่สอง เพริลไลท์เปลี่ยนเป็นเพริลไลท์ที่ละเอียดขึ้น ส่วนในตำแหน่งเหนือแนวเทมเปอร์จะมีเกรนที่หยาบ

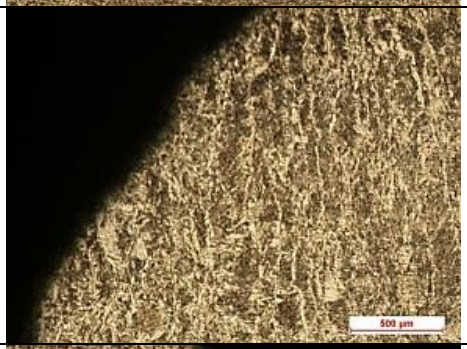
ตารางที่ 3. ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณการเชื่อมซ้อนทับของแนวเชื่อมในตำแหน่งต่าง ๆ โดยใช้กระแสไฟฟ้า 90 แอมแปร์

ภาพโครงสร้างทางจุลภาค	ตำแหน่ง	ลักษณะของโครงสร้างจุลภาค
	HAZ	บริเวณ HAZ
	Weld	ลักษณะการแข็งตัวภายในแนวเชื่อม
	Temper Bead	บริเวณแนวเชื่อมแนวแรกถูกความร้อนจากแนวเชื่อมที่สองกระทำ

จากผลการทดลองในตารางที่ 4 หลังการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ บริเวณ HAZ ที่ติดกับส่วนที่หลอมละลายมีขนาดเกรนที่หยาบกว่าบริเวณชิ้นงาน เกรนในบริเวณดังกล่าวเกิดการขยายตัวเนื่องจากมีอุณหภูมิสูงขณะเชื่อมเป็นเวลานาน ช่วงของเกรนหยาบอยู่ใกล้กับแนวหลอมละลาย ในช่วงการจัดเรียงผลึกใหม่บางส่วนโครงสร้างจะประกอบไปด้วยเฟอร์ไรท์และเพริลไลท์ บริเวณเทมเปอร์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมแนวแรกที่ถูกซ้อนทับจากแนวเชื่อมแนวที่สอง เพริลไลท์เปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์ ทั้งนี้เมื่อโครงสร้างออสเทนไนท์

เย็นตัวลงจะเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเพิลไลท์ที่ละเอียดขึ้น ซึ่งไกล้เคียงกับงานวิจัยของ Shen et al. (2012) ที่ศึกษาผลของความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานต่อขนาดรูปร่างของแนวเชื่อม ผลกระทบต่อบริเวณ HAZ ในกระบวนการเชื่อม SAW โดยพบว่าเมื่อความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานสูงขึ้น ขนาดรูปร่าง ทั้งความนูน ความกว้าง ความลึก รวมถึงขนาดของ HAZ เพิ่มสูงขึ้น โครงสร้างจุลภาคเป็นโปรยูเทคตอยเฟอร์ไรท์ในเกรนละเอียดบริเวณ HAZ ซึ่งละเอียดกว่าเนื้อโลหะงานที่ทำการเชื่อม บริเวณ HAZ เกรนหยาบมีโครงสร้างเป็นเบนไนท์ เฟอร์ไรท์ และเพริลไลท์

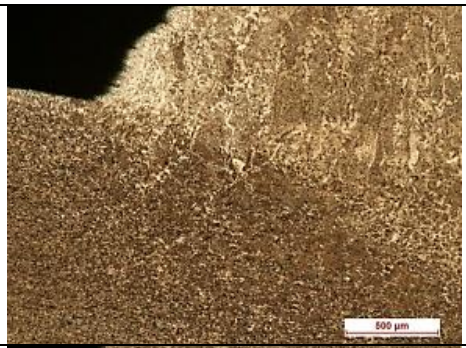
ตารางที่ 4. ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณการเชื่อมซ้อนทับของแนวเชื่อมในตำแหน่งต่าง ๆ โดยใช้กระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์

ภาพโครงสร้างทางจุลภาค	ตำแหน่ง	ลักษณะของโครงสร้างจุลภาค
	HAZ	บริเวณ HAZ
	Weld	ลักษณะการแข็งตัวภายในแนวเชื่อม
	Temper Bead	บริเวณแนวเชื่อมแนวแรกถูกความร้อนจากแนวเชื่อมแนวที่สองกระทำ

doi: 10.14416/j.appsci.2018.06.003

จากผลการทดลองในตารางที่ 5 หลังการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์ บริเวณ HAZ มีขนาดเกรนที่หยาบกว่าบริเวณชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานได้รับความร้อนจากการเชื่อมสูงแต่ชิ้นงานยังมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลาย มีการจัดเรียงผลึกใหม่ มีอัตราการเย็นตัวต่ำเป็นผลให้โครงสร้าง HAZ บริเวณที่เทมเปอร์แสดงให้เห็นลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมแนวแรกที่ถูกซ้อนทับจากแนวเชื่อม แนวมีขนาดเกรนที่ละเอียดขึ้น ส่วนในตำแหน่งเหนือแนวเทมเปอร์มีขนาดเกรนโต

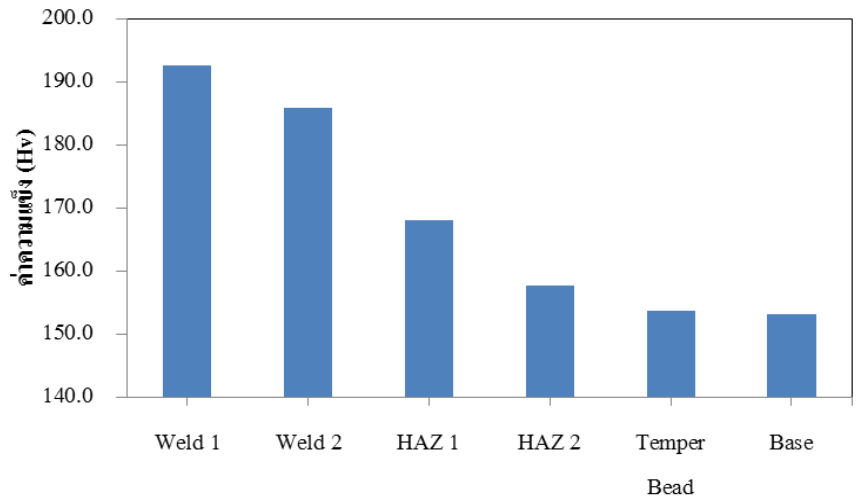
ตารางที่ 5. ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณการเชื่อมซ้อนทับของแนวเชื่อมในตำแหน่งต่าง ๆ โดยใช้กระแสไฟฟ้า 110 แอมแปร์

ภาพโครงสร้างทางจุลภาค	ตำแหน่ง	ลักษณะของโครงสร้างจุลภาค
	HAZ	บริเวณ HAZ
	Weld	ลักษณะการแข็งตัวภายในแนวเชื่อม
	Temper Bead	บริเวณแนวเชื่อมแนวแรกถูกความร้อนจากแนวเชื่อมแนวที่สองกระทำ

ผลของการศึกษาโครงสร้างจุลภาคดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Aloraier et al. (2006) ที่ได้ศึกษาการเชื่อม FCAW ด้วยการทำเทมเปอร์บีทเพื่อลดการให้ความร้อนหลังการเชื่อม เป็นวิธีการลดความเค้นตกค้างจากการเชื่อม ซึ่งส่งผลต่อการเทมเปอร์โครงสร้างแนวเชื่อมและ HAZ ที่ทำให้สมบัติทางกลถูกลดทอนลงไปด้วย อันได้แก่ ความต้านทานการคืบตัว ความต้านทานแรงดึง เมื่อผ่านวัฏจักรทางความร้อนจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อมหลายครั้ง โดยศึกษาเปอร์เซ็นต์การเชื่อมซ้อนแนวที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ผลการวิจัยพบว่าถึงแม้ว่าจะเกิดการเชื่อมซ้อนทับก็ยังให้โครงสร้างและสมบัติทางกลที่ดี โดยที่เปอร์เซ็นต์การเชื่อมซ้อนแนว 70 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นในบริเวณที่ไม่ถูกการเทมเปอร์และบริเวณที่ไม่ถูกการเชื่อมซ้อนทับ ส่วนบริเวณที่ถูกซ้อนทับและถูกเทมเปอร์บีทให้ค่าความแข็งที่ลดลง โดยพบเกรนที่หยาบในบริเวณ HAZ ของแนวเชื่อมแนวที่ 1 และละเอียดขึ้นใน HAZ ของแนวเชื่อมแนวที่ 2 จึงเห็นได้ชัดว่าเปอร์เซ็นต์การเชื่อมซ้อนแนวส่งผลต่อค่าความแข็งและโครงสร้างจุลภาค โดยยังคงให้โครงสร้างและค่าความแข็งที่ดีที่เปอร์เซ็นต์การเชื่อมซ้อนแนวระหว่าง 50-70 เปอร์เซ็นต์ โดยโครงสร้างของ HAZ มีค่าความแข็งลดลง 22 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดสอบความแข็ง (จากการทดลองที่ 1: เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับของแนวเชื่อม)

ในการทดสอบค่าความแข็งดังรูปที่ 7 แนวเชื่อมแนวแรกมีค่าความแข็งเฉลี่ย 192.5 Hv และแนวเชื่อมแนวที่สองมีค่าความแข็งเฉลี่ย 185.5 Hv เมื่อเทียบกับบริเวณที่ถูกเทมเปอร์มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 153.8 Hv จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งเฉลี่ยที่ได้มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากบริเวณแนวเชื่อมแนวที่ 1 ถูกเทมเปอร์โดยแนวที่ 2



รูปที่ 7. ค่าความแข็งที่ตำแหน่งต่าง ๆ

บริเวณ HAZ 1 มีค่าความแข็งเฉลี่ย 168 Hv และบริเวณ HAZ 2 มีค่าความแข็งเฉลี่ย 155.7 Hv เมื่อเทียบกับบริเวณที่ถูกเทมเปอร์ค่าความแข็งเฉลี่ยของบริเวณ HAZ มีค่าสูงกว่า จะเห็นได้ว่า วัฏจักรทางความร้อนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรวมถึงค่าความแข็งอีกด้วย ผลการทดสอบนี้เป็นไปในทางเดียวกับการศึกษาของ Aloraier et al. (2004) ซึ่งได้ศึกษาถึงลำดับการเชื่อม FCAW ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและค่าความแข็งด้วยเทคนิคเทมเปอร์บีท พบว่าลำดับขั้นการเชื่อมมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและส่งผลทำให้ค่าความแข็งและขนาดของ HAZ ลดลง หลังจากที่ได้ทำการเชื่อมแนวที่สองและความร้อนส่งผลต่อแนวเชื่อมแรก

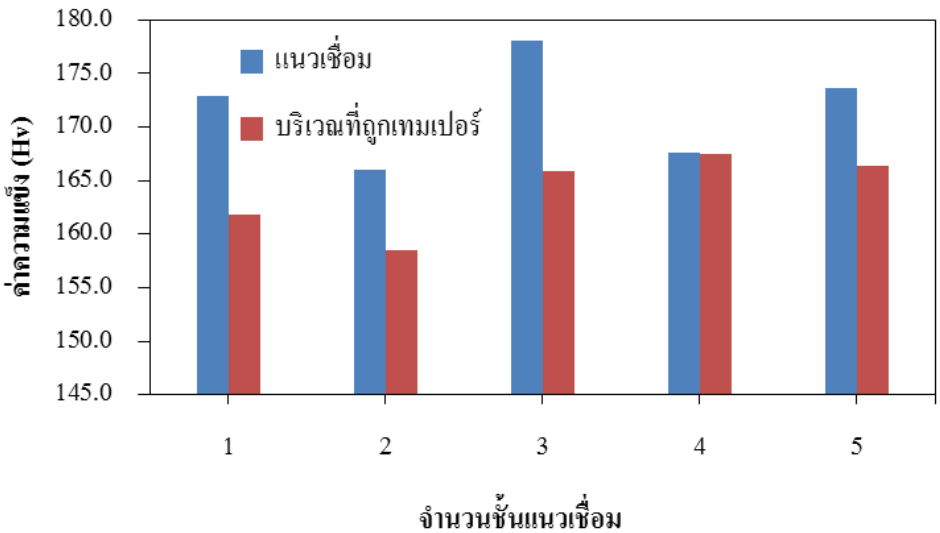
ผลการทดสอบความแข็ง (จากการทดลองที่ 2: จำนวนชั้นของแนวเชื่อม)

จากการทดสอบค่าความแข็งดังรูปที่ 8 แนวเชื่อมแนวที่ 1 มีค่าความแข็งเฉลี่ย 172.9 Hv แนวเชื่อมแนวที่ 1 ที่ถูกแนวเชื่อมแนวที่ 2 เทมเปอร์มีค่าความแข็งเฉลี่ย 161.9 Hv ค่าความแข็งแนวเชื่อมแนวที่ 2 มีค่าความแข็งเฉลี่ย 166 Hv แนวเชื่อมแนวที่ 2 ที่ถูกแนวเชื่อมแนวที่ 3 เทมเปอร์ มีค่าความแข็งเฉลี่ย 158.5 Hv ซึ่งผลการทดสอบความแข็งมีแนวโน้มเห็นได้ชัดว่า ค่าความแข็งบริเวณที่ถูกเทมเปอร์มีค่าความแข็งลดลงทุกชั้นที่ถูกเทมเปอร์ ซึ่งเทียบเคียงได้กับการศึกษาของ Suarez et al. (2015) ที่ศึกษาวิธีการเชื่อมเหล็กกล้าสำหรับทำแม่พิมพ์ AISI P20 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สปกคลุม (gas tungsten arc welding: GTAW) โดยทำการเชื่อมแนวเชื่อมและแบบเชื่อมซ้อนแนว และศึกษาผลด้านขนาดรูปร่างของแนวเชื่อม ค่าความแข็งและโครงสร้างจุลภาค ซึ่งการเชื่อมซ้อนแนวทำให้เกิดการเทมเปอร์ด้วยวัฏจักรทางความร้อนกับแนวเชื่อมและ HAZ ซึ่งความร้อนในแนวถัดมาทำให้เกิดการเทมเปอร์มาร์เทนไซด์ที่บริเวณ HAZ ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง โดยหากในแนวถัดไปใช้พลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น ก็จะทำให้ค่าความแข็งที่ได้ลดลงมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งกรณีของเหล็กกล้าไร้สนิมอาจให้ผลของค่าความแข็งต่างออกไป ได้แก่การศึกษาของ Das et al. (2009) ที่ศึกษาเกี่ยวกับการเลือกให้โลหะเติมและผลของการเทมเปอร์ต่อสมบัติทางกลของการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม 403 และ 304L(N) พบว่า ความร้อนจากแนวบัทเตอร์ริ่งด้วยลวดเชื่อม 403 SS และเชื่อมด้วยลวด ERNiCr-3 ผลของการเทมเปอร์ไม่ส่งผลต่อสมบัติทางกลในด้านลบโดยยังคงให้ค่าความเหนียวและความแข็งแรงจากการทดสอบการดัดโค้งที่ดี ซึ่งหลังจากเชื่อมเสร็จแล้วก็ไม่ต้องทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

สรุปผลการทดลอง

1. จากการศึกษาการเชื่อมเปอร์เซ็นต์การซ้อนแนวและจำนวนชั้นของแนวเชื่อม 6 ชั้น พบว่าส่วนบริเวณแนวเชื่อม ลักษณะโครงสร้างจุลภาคเกิดจากการแข็งตัวภายในแนวเชื่อม บริเวณเทมเปอร์โครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมแนวก่อนหน้าที่ถูกเทมเปอร์จากแนวเชื่อมแนวที่ถัดไป มีผลให้เพริลไลท์เปลี่ยนเป็นเพริลไลท์ที่ละเอียดขึ้น ส่วนในตำแหน่งเหนือแนวเทมเปอร์จะเป็นส่วนของเกรนหยาบ

2. ค่าความแข็งของแนวเชื่อมแนวแรกให้ค่าความแข็งที่ต่ำกว่าแนวที่สอง เนื่องจากแนวเชื่อมแนวแรกได้รับอิทธิพลของความร้อนทำให้ค่าความเครียดในเนื้อแนวเชื่อมลดลง
3. ค่าความแข็งของจำนวนชั้นแนวเชื่อม 6 ชั้น บริเวณที่ถูกเทมเปอร์ในทุกชั้นของแนวเชื่อม ค่าความแข็งเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับบริเวณเนื้อแนวเชื่อมเนื่องจากผลของความร้อนที่เกิดขึ้นในวัฏจักรทางความร้อนที่กระทำจากการเชื่อม



รูปที่ 8. ค่าความแข็งแนวเชื่อมและบริเวณที่ถูกเทมเปอร์จากแนวถัดไป

เอกสารอ้างอิง

Aloraier, A., Ibrahim, R. & Thomson, P. (2006). FCAW process to avoid the use of post weld heat treatment. *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, *83*(5), 394-398. http://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2006.02.028

Aloraier, A. S., Ibrahim, R. N. & Ghojel, J. (2004). Eliminating post-weld heat treatment in repair welding by temper bead technique: role bead sequence in metallurgical changes. *Journal of Materials Processing Technology, 153-154*, 392-400. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.383

American Society of Mechanical Engineers. (2007). *ASME BPVC Section II, Part A (Beginning to SA-450) Materials*. New York: The American Society of Mechanical Engineers.

American Society of Mechanical Engineers. (2015). *ASME BPVC Section IX, qualification standard for welding, brazing, and fusing procedures; welders; brazers; and welding, brazing, and fusing operators*. New York: The American Society of Mechanical Engineers.

Benscoter, A. O. & Bramfitt, B. L. (2004). Metallography and microstructures of low-carbon and coated steels. In G. F. V. Voort (Ed.), Metallography and Microstructures, Vol 9, ASM Handbook pp. 588-607. Ohio: ASM International.

Das, C. R., Bhaduri, A. K., Srinivasan, G., Shankar, V. & Mathew, S. (2009). Selection of filler wire for and effect of auto tempering on the mechanical properties of dissimilar metal joint between 403 and 304L(N) stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology, 209*(3), 1428-1435. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.053

Limmaneevichitr, C. (2005). *Welding Metallurgy* (1st ed). Bangkok, Thailand: King Mongkut's University of Technology thonburi. (in Thai)

Suarez, S.-A., Suarez, A. M. & Preciado, W. T. (2015). Arc welding procedures on steels for molds and dies. *Procedia Engineering, 100,* 584-591. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.408

Shen, S., Oguocha, I. N. A. & Yannacopoulos, S. (2012). Effect of heat input on weld bead geometry of submerged arc welded ASTM A709 Grade 50 steel joint. *Journal of Material Processing Technology, 212*(1), 286-294. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.09.013

The Journal of Applied Science **Vol. 17 No. 1: 125-139 [2018]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2018.06.004
ISSN 1513-7805 (Printed in Thailand) ISSN 2586-9663 (Online)

Research Article

คุณภาพปลาทูนึ่งลดโซเดียมระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น

Quality of reduced sodium steamed mackerel during chilled storage

เบญจวรรณ ธรรมธนารักษ์[1]* และ ธัญลักษณ์ ธีระพรกิตติกุล[1]

Benjawan Thumthanaruk[1]* and Thanyalak Teerapornkittikul[1]

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาหารและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

[1]Department 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** benjawan.t@sci.kmutnb.ac.th

Received: 02/05/2018; Accepted: 13/06/2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพปลาทูนึ่งลดโซเดียมในบรรจุภัณฑ์ต่างชนิดที่เก็บรักษาอุณหภูมิแช่เย็น โดยแปรปัจจัยการผลิต ได้แก่ อัตราความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) (0%, 10, 15 และ 20%) ร่วมกับโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) (20, 15, 10, 5 และ 0%) เวลาต้มปลาทู (1, 3, 5, 7 และ 9 นาที) ทดสอบการเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ทั้ง 3 แบบ ได้แก่ บรรจุในถาด (polystyrene) หุ้มด้วย polyvinyl chloride (PS และ PVC), Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) และ Nylon Linear Low Density Polyethylene (NLLDPE) เก็บรักษาเป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิแช่เย็น 4±2ºC โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธี response surface methodology (RSM) ผลการทดลองพบว่าปลาทูนึ่งลดโซเดียมสูตรที่ดีที่สุดคือความเข้มข้นของ NaCl และ KCl เท่ากับ 10% ใช้เวลาต้มนาน 3 นาที มีปริมาณโซเดียมและโพแทสเซียมเท่ากับ 5,817 และ 5,997 mg/kg คะแนนความชอบโดยรวมสูงสุดเท่ากับ 8.40 คะแนน โดยมีคะแนนความชอบไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับชุดควบคุม (NaCl 30%) (p>0.05) การบรรจุปลาทูนึ่งลดโซเดียมในถาด PS แล้วหุ้มฟิล์ม PVC สามารถเก็บได้เพียง 3 วัน มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดเกินมาตรฐาน แต่การบรรจุปลาทูนึ่งลดโซเดียมในถุง LLDPE และ NLLDPE ที่อุณหภูมิแช่เย็น 4±2ºC สามารถเก็บรักษาได้ 6 วัน โดยปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดพบว่าไม่เกินมาตรฐาน ไม่พบ *E. coli*, *Salmonella* spp., *S. aureus*, yeast และ mold

doi: 10.14416/j.appsci.2018.06.004

คำสำคัญ: ปลาทูนึ่ง, ลดโซเดียม, โพแทสเซียมคลอไรด์

Abstract

The aim of research was to study the factors affecting quality of reduced sodium steamed mackerel during chilled storage. This study varied the concentration of sodium chloride (NaCl) (20, 15, 10, 5 and 0%) combined with the concentration of potassium chloride (KCl) (20, 15, 10, 5 and 0%), cooking time (1, 3, 5, 7 and 9 min). The proper reduced sodium steamed mackerel were tested by using different types of packaging (polystyrene and polyvinyl chloride; PVC and PS), Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) and Nylon Linear Low Density Polyethylene (NLLDPE). All samples were kept refrigerated at 4±2°C for 7 days. The experimental design was used response surface methodology (RSM). Results showed that the proper reduced sodium steamed mackerel used 10% NaCl combined with 10% KCl and steamed for 3 min had the sodium and potassium values of 5,817 และ 5,997 mg/kg and received highest overall sensory score (8.40). The values of the sensory score were no significant difference from the control (30% NaCl) (8.25) ($p>0.05$). The shelf life of reduced sodium steamed mackerel packed in PS and PVC was only 3 days having total microbial count higher than the standard. While, the reduced sodium steamed mackerel packed in LLDPE and NLLDPE had the shelf life of 6 days at 4±2°C. The microbiological result of total plate count was not exceeding the standard. No *E. coli, Salmonella* spp. yeast and mold were detected.

Keywords: boiled mackerel, reduced sodium, potassium chloride

บทนำ

ปลาทู (*Rastrelliger brachysoma*) เป็นสัตว์น้ำที่คนไทยนิยมบริโภคถึงร้อยละ 85.1 (National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards, 2016) ผลิตภัณฑ์จากปลาทูที่ได้รับความนิยมในการบริโภคจะใช้ขั้นตอนการต้ม แต่เป็นที่รู้จักว่าในชื่อปลาทูนึ่งซึ่งจะใช้ชื่อนี้ตลอดงานวิจัย ปลาทูมีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยน้ำหนัก 100 กรัม ให้พลังงาน 140 แคลอรี่ ไขมัน 6.7 กรัม โปรตีน 20 กรัม มีกรดอะมิโนที่สำคัญ คือไลซีน และทรีโอนีน ช่วยในเรื่องการพัฒนาการเจริญเติบสำหรับเด็ก ให้แร่ธาตุที่สำคัญต่อร่างกาย เช่น แคลเซียม ฟอสฟอรัส และเหล็ก (Nutrition Division, Department of Health, 1990; Nutrition Division, Department of Health, 2001) ในกระบวนการผลิตปลาทูนึ่งจะนิยมใช้เกลือแกงหรือเกลือโซเดียมคลอไรด์ซึ่งประกอบด้วยโซเดียมอะตอม ร้อยละ 39.33 และคลอไรด์อะตอมร้อยละ 60.67 (He & MacGregor, 2008) เกลือโซเดียมคลอไรด์ช่วยลดค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ (water activity; a_w) ช่วยยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ทำให้เพิ่มอายุการเก็บรักษา (shelf life) และเพิ่มรสชาติ

ของผลิตภัณฑ์ได้ (Ruusunen & Puolanne, 2550) โดยปริมาณเกลือสูงสุดที่องค์การอนามัยโลกแนะนำให้รับประทานคือไม่เกิน 5 กรัมต่อวัน จะมีปริมาณโซเดียม 2,000 มิลลิกรัม และเพื่อลดความเสี่ยงในการเป็นโรคหลอดเลือดหัวใจและความดันโลหิตสูง สำหรับเกลือโพแทสเซียม แนะนำให้บริโภคไม่เกินวันละ 3,510 มิลลิกรัม (World Health Organization, 2012a; World Health Organization, 2012b) โดยรายงานผลการสำรวจสุขภาพประชาชนไทยโดยการตรวจร่างกายครั้งที่ 4 พบว่าการประเมินการบริโภคโซเดียมโดยการซักประวัติการบริโภคอาหารย้อนหลัง 24 ชั่วโมง จำนวน 2,969 คน มีการบริโภคโซเดียมสูงกว่าปริมาณที่แนะนำ กล่าวคือค่ามัธยฐานของการบริโภคโซเดียมอยู่ที่ 3,264 มิลลิกรัมต่อวัน (Aekplakorn et al., 2012) และผลการสำรวจการบริโภคอาหาร 10 ลำดับแรก ที่นิยมบริโภคที่มีปริมาณโซเดียมสูง ได้แก่ บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปพร้อมเครื่องปรุง ปลากระป๋อง ปลาทูนึ่ง น้ำพริกต่างๆ ปลาต้ม ข้าวโพดต้ม ลูกชิ้น แคปหมู มันฝรั่งทอดและไข่เค็ม (Kriangsinyot, 2012) ผลเสียจากการรับประทานโซเดียมมากเกินไปมีผลทำให้ระดับความดันโลหิตในร่างกายสูงขึ้นและเสี่ยงต่อโรคหัวใจวายได้ (Cook et al., 2007) วิธีลดปริมาณโซเดียมในผลิตภัณฑ์โดยทั่วไปลงร้อยละ 30-50 คือ การใช้เกลือโพแทสเซียมคลอไรด์ (potassium chloride, KCl) เพราะมีคุณสมบัติเป็นตัวปรับสมดุลของโซเดียมในร่างกาย (Kriangsinyot, 2012; Ruusunen & Puolanne, 2005) และลักษณะทางด้านเคมีของเกลือทั้งสองชนิดนี้ มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ไม่มีสี และไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ขุ่น แต่ข้อจำกัดการใช้ KCl คือ หากใช้ปริมาณมากจะทำให้เกิดรสขมหลังจากการบริโภคได้ และไม่เหมาะต่อผู้ป่วยเบาหวานชนิดที่1 โดยอาจพบปัญหาที่ตับและหัวใจจากระดับโพแทสเซียมสูง (Cook et al., 2007)

รูปแบบการบรรจุผลิตภัณฑ์ปลาทูนึ่งเพื่อจำหน่ายมีหลายแบบ เช่น การบรรจุปลาทูนึ่งในเข่งที่มีใบตองรองอยู่ ซึ่งที่ไม่เหมาะสมสามารถปนเปื้อนจากสภาพแวดล้อมได้และปลาทูนึ่งเมื่อตากลมเป็นเวลานานจะทำให้ผิวหน้าแห้ง การบรรจุในถาดโฟมแล้วหุ้มด้วยพลาสติก polyvinyl chloride (PVC) ทำให้มองเห็นผลิตภัณฑ์ภายในได้ชัดเจน สะดวกในการขนส่ง ลดการปนเปื้อน แต่การซ้อนทับกันทำให้น้ำออกจากตัวปลาได้ หรือการนำปลาทูนึ่งแช่แข็งแล้วบรรจุในถุงพลาสติก ในการศึกษาพฤติกรรมการซื้อปลาทูนึ่งของผู้บริโภค พบว่าผู้บริโภคเลือกปลาทูนึ่งที่จัดใส่บรรจุภัณฑ์ที่มีพลาสติกหุ้มเรียบร้อย เพราะมั่นใจในคุณภาพและความสะอาดถึงร้อยละ 57.29 และปัญหาที่พบมากที่สุดในการเลือกซื้อปลาทูนึ่ง คือ ความไม่มั่นใจในคุณภาพของสินค้าสูงถึงร้อยละ 41.5 (Benjarajaroenwong, 2007) การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ในบรรจุภัณฑ์ที่มีสภาพบรรยากาศดัดแปลง (modified atmosphere packaging: MAP) มีรายงานผลว่าสามารถช่วยยืดอายุคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 50-400% เปรียบเทียบกับการบรรจุในสภาพบรรยากาศปกติ (Rao & Sachindra, 2002) โดยพบว่าปัญหาเชื้อจุลินทรีย์ที่พบมากในกลุ่มของปลาสดได้แก่ Pseudomonas, Moraxella, Acetobacter, *Shewanella putrefaciens*, *Vibrio parahemolyticus*, Flavobacterium และ *Aeromonas* spp. สำหรับปลาสดที่อาศัยในแถบเขตร้อนชื้น พบเชื้อจุลินทรีย์ในกลุ่มของ *Staphylococcus* spp., Micrococcus, Bacillus, Clostridium, Brochotrix thermospacta และ Streptococcus (Masniyom, 2011) โดยเฉพาะ *Clostridium botulinum* type E ทำให้เกิดการเน่าเสียโดยไม่ปรากฏกลิ่นเหม็นหรือเมือกซึ่งเป็นลักษณะของการเน่าเสียของปลาสดทั่วไป แนวทางในการบรรจุปลาในบรรจุภัณฑ์ที่มีสภาพบรรยากาศดัดแปลงจึงสามารถยืดเวลาใน

doi: 10.14416/j.appsci.2018.06.004

การเก็บรักษาได้นาน 10-14 ºC วันที่อุณหภูมิแช่เย็น และเก็บได้นานถึง 18-20 วันที่อุณหภูมิ 2-0.9ºC (Robertson, 2012)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตปลาทูนึ่งโดยลดปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์จาก 30% (ชุดควบคุม) และทดแทนด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์ แปรเวลาที่ใช้ในการต้ม คุณภาพของปลาทูนึ่งลดโซเดียมที่ให้คะแนนความชอบสูงที่สุดนำมาศึกษาการเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ทั้ง 3 แบบ ได้แก่ การบรรจุในถาด polystyrene แล้วหุ้มด้วยฟิล์ม polyvinyl chloride (PS และPVC) การบรรจุในถุง Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) และการบรรจุในถุง Nylon Linear Low Density Polyethylene (NLLDPE) เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิแช่เย็น 4±2ºC วิเคราะห์คุณภาพคุณภาพของปลาทูนึ่งลดโซเดียมในบรรจุภัณฑ์โดยประเมินผลความชอบของผู้ทดสอบด้วยวิธี 9 point hedonic scale ตรวจสอบทางเคมี กายภาพ และจุลินทรีย์

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. วัตถุดิบ

วัตถุดิบปลาทูแช่แข็งสายพันธุ์ Short-bodied mackerel ซื้อจากตลาดนนทบุรี ประเทศไทย เลือกขนาดน้ำหนักตัว 45±5 กรัม เก็บรักษาในกล่องโฟมที่มีในน้ำแข็ง ขนส่งมาที่ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาหารและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ โซเดียมคลอไรด์ยี่ห้อเกลือปรุงทิพย์

2. ขั้นตอนการเตรียมปลาทูนึ่ง

กระบวนการผลิตปลาทูนึ่งชุดควบคุมผลิตตามวิธีการของ Teerapornkittkul et al. (2017) โดยนำปลาทูแช่เยือกแข็งละลายน้ำเย็น (1-2°C) เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำเครื่องในออก และล้างทำความสะอาดปลาทู โดยชุดควบคุมแช่ปลาทูในน้ำเกลือ NaCl เข้มข้น 30% เป็นเวลา 3 นาที ต้มปลาทูในน้ำเกลือ (30% NaCl) อัตราส่วนน้ำเกลือต่อปลาเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 5 นาที นำมาตั้งให้สะเด็ดน้ำและผึ่งให้เย็นลงเป็นเวลานาน 3 นาที แล้วราดด้วยน้ำต้มสุกลงบนตัวปลาเพื่อกำจัดคราบเกลือและสิ่งสกปรกออก

3. ศึกษาการแปรปริมาณโซเดียมคลอไรด์ร่วมกับโพแทสเซียมคลอไรด์ ในการผลิตปลาทูนึ่งลดโซเดียม

กระบวนผลิตปลาทูนึ่งลดโซเดียมใช้วิธีเดียวกับปลาทูนึ่งในข้อ 2 การแปรอัตราส่วนความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ร่วมกับเกลือโพแทสเซียมคลอไรด์ใช้วิธี Response Surface Methodology (RSM) (Myers et al., 2016) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตปลาทูนึ่งลดโซเดียม โดยวางแผนการทดลองแบบ CCD มี 3 ปัจจัย 5 ระดับ ได้แก่ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (ร้อยละ20, 15, 10, 5 และ 0) ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคลอไรด์ (ร้อยละ 20, 15, 10, 5 และ 0) เวลาในการต้ม (1, 3, 5, 7 และ 9 นาที) ตามตารางที่ 1

doi: 10.14416/j.appsci.2018.06.004

ตารางที่ 1. สัญลักษณ์และระดับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ โพแทสเซียมคลอไรด์ และเวลาในการต้ม

Factor	Independent variables	Units	Actual Values		Coded Values	
			Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
X_1	ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์	ร้อยละ	0	20	-2	2
X_2	ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคลอไรด์	ร้อยละ	0	20	-2	2
X_3	เวลาในการต้ม	นาที	1	9	-2	2

4. ศึกษาเปรียบเทียบการบรรจุปลาทูนึ่งลดโซเดียมในบรรจุภัณฑ์ต่างกัน

ปลาทูนึ่งลดโซเดียมที่มีคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุดนำมาบรรจุ 3 แบบคือ การบรรจุปลาทูนึ่งในถาดโฟม polystyrene แล้วหุ้มด้วย ฟิล์ม polyvinyl chloride (PS และ PVC) การบรรจุปลาทูนึ่งในถุง Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) และการบรรจุปลาทูนึ่งในถุง Nylon Linear Low Density Polyethylene (NLLDPE) ปลาทูนึ่งชุดควบคุม (เกลือ 30%) จะบรรจุถาดโฟมที่มีฟิล์มหุ้มยึด (PS และPVC) เก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น 4 ±2°C เป็นเวลานาน 7 วัน

5. วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัส

ผลิตภัณฑ์ปลาทูนึ่งตรวจสอบคุณภาพทางด้านเคมีกายภาพ ได้แก่ ความเป็นกรด-เบสโดย pH meter ความแน่นเนื้อวัดด้วยเครื่อง Texture analyzer ใช้หัวทดสอบแบบกดรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร กดลงใช้แรง 75 % ที่ความเร็ว 60 มิลลิเมตรต่อนาที โดยตัดปลาทูบริเวณลำตัว เป็นชิ้นเล็กขนาด 2×2×1.5 เซนติเมตรดัดแปลงจาก Sun (2009) ปริมาณ Thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) ดัดแปลงตามวิธี Buege & Aust (1978) ปริมาณ Na^+ และ K^+ โดยใช้เครื่อง ICP Atmomic Emission Spectroscopy (ICP-AES) (ตรวจชุดควบคุมและตัวอย่างที่ให้คะแนนทดสอบทางประสาทสัมผัสสูงสุด) (Ploegaerts et al., 2016) และตรวจสอบคุณภาพทางจุลชีววิทยา ได้แก่ ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด *Salmonella* spp., *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus,* yeast และ mold ด้วยวิธี BAM (2001) การทดสอบทางประสาทสัมผัสใช้วิธีการทดสอบความชอบ (9 point hedonic scale) ตามวิธี Mailgaad et al. (1999) มีระดับคะแนน 1- 9 โดยแบ่งระดับความชอบได้ดังนี้ 1 คือ ไม่ชอบมากที่สุด

และ 9 คือ ชอบมากที่สุดโดยใช้ผู้ทดสอบชิม 30 คน ตรวจสอบ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม เฉพาะการทดสอบการบรรจุ (ข้อ 4) จะไม่ทดสอบชิมรสชาติ

คุณสมบัติของบรรจุภัณฑ์ถุงฟิล์ม LLDPE และ NLLDPE ตรวจวัดความหนา (thickness) ด้วยเครื่องวัดความหนา (digimatic thickness gauge) วัดอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ (WVTR) ด้วยเครื่อง vapor permeation analyzer วัดอัตราการแพร่ผ่านก๊าซออกซิเจนด้วยเครื่อง oxygen permeation analyzer วัดอัตราการแพร่ผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยเครื่อง carbon dioxide permeation analyzer (Fuongfuchat et al., 2006)

ผลวิเคราะห์ความแตกต่างค่าเฉลี่ยระหว่างทรีตเมนต์ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Statistical Package for the Social Science (SPSS Version 17.0, USA)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลของปัจจัยการผลิต (ปริมาณ NaCl, KCl และระยะเวลาต้ม) ต่อคุณภาพปลาทูนึ่งลดโซเดียม

การวางแผนการทดลองโดยใช้ RSM แปรปัจจัยปริมาณ NaCl, KCl และระยะเวลาต้มของปลาทูนึ่งลดโซเดียมจำนวน 16 สภาวะ (รวมชุดควบคุม) พบว่า การใช้ระยะเวลาในการต้มนานขึ้นจะมีผลต่อเนื้อสัมผัสของปลาทูทำให้มีเนื้อปลาแข็งขึ้น ปลามีลักษณะสุก โดยความร้อนจะทำให้โปรตีนในเนื้อปลาเสียสภาพ เมื่อให้ความร้อนเป็นเวลานาน ก็จะทำให้น้ำระเหยออกมาจากเนื้อปลามากขึ้น ทดสอบโดยการวัดความแน่นเนื้อพบว่าค่าความแน่นเนื้อของปลาทูนึ่งในการทดลองนี้มีค่าระหว่าง 3,505 – 5,885 g สภาวะที่ใช้เกลือ NaCl 5% และเกลือ KCl 5% ต้มนานเป็นเวลา 1 , 7 และ 9 นาที มีค่าความแน่นเนื้อเท่ากับ 3,505±332, 5,387±310 และ 5,885±634 g ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของเกลือ NaCl และ KCl มีผลต่อความแน่นเนื้อของปลาทูนึ่ง ผลการทดลองของ Desmond (2006) พบว่าเกลือมีผลต่อความสามารถในการอุ้มน้ำ โดยการเพิ่มความเข้มเข้นของเกลือ NaCl ในเนื้อปลาบดให้ค่า WHC สูงกว่าการเพิ่ม KCl เล็กน้อย เพราะ NaCl สามารถอุ้มน้ำในกล้ามเนื้อของปลามากกว่าเกลือ KCl

ค่าความเป็นกรด-เบสของปลาทูนึ่ง อยู่ระหว่าง 6.34-6.78 ปลาทูนึ่งจัดเป็น low acid food มีโอกาสที่เชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมาสามารถเติบโตได้ง่ายก่อให้เกิดการเน่าเสียของผลิตภัณฑ์และไม่ปลอดภัยสำหรับการบริโภค (ตารางที่ 2)

ผลการตรวจสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าคะแนนความชอบโดยรวมทางด้านเนื้อสัมผัส รสชาติความเค็มและความขมที่เกิดจากเกลือ NaCl เกลือ KCl และเวลาที่ใช้ในการต้มของปลาทูนึ่งมีค่าระหว่าง 5.80±0.95 (ใช้ปริมาณ NaCl 5% , KCl 5% ระยะเวลาต้ม 1 นาที) ถึง 8.40±0.50 (ใช้ปริมาณ NaCl 10% , KCl 10% ระยะเวลาต้ม 3 นาที) อยู่ในช่วงรู้สึกเฉย ๆ ถึงชอบมาก สภาวะการผลิตปลาทูนึ่งลดโซเดียมที่มีคะแนนความชอบสูงสุดคือสภาวะที่มีสัดส่วนของเกลือ NaCl เข้มข้น 10% (w/w) เกลือ KCl เข้มข้น 10% (w/w) และเวลาในการต้ม 3 นาที ได้รับคะแนนเท่ากับ 8.40±0.50 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (คะแนนเท่ากับ 8.25±0.72) พบว่ามีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 3 และรูปที่ 1)

ตารางที่ 2. ผลทางเคมีกายภาพและประสาทสัมผัสของปลาทูนึ่งในสภาวะต่าง ๆ

Treatment	X_1 %Nacl (w/w)	X_2 %KCl (w/w)	X_3 cooking time (min)	ความแน่นเนื้อ(g)	pH	คะแนนความชอบโดยรวม
1	30	0	5	5,498±981^{a}	6.34±0.06^{c}	8.25±0.72^{a}
2	0	10	5	5,108±563^{ab}	6.50±0.02^{b}	6.55±1.00^{a}
3	5	5	1	3,505±332^{d}	6.49±0.03^{b}	5.80±0.95^{b}
4	5	5	7	5,387±310^{a}	6.47±0.04^{b}	7.60±0.68^{a}
5	5	5	9	5,885±634^{a}	6.51±0.05^{b}	6.30±0.47^{b}
6	5	15	3	4,457±218^{c}	6.49±0.02^{b}	6.85±0.75^{ab}
7	5	15	7	5,679±279^{a}	6.66±0.07^{b}	6.80±0.89^{ab}
8	10	0	5	5,281±57.7^{b}	6.69±0.01^{b}	8.25±0.64^{a}
9	10	10	3	4,746±231^{c}	6.68±0.06^{ab}	8.40±0.50^{a}
10	10	10	5	5,873±717^{a}	6.47±0.09^{b}	7.55±0.51^{a}
11	10	20	5	5,130±544^{ab}	6.70±0.02^{b}	7.30±0.66^{a}
12	15	5	3	4,411±162^{c}	6.30±0.03^{c}	8.15±0.49^{a}
13	15	5	7	5,329±221^{a}	6.53±0.05^{b}	7.25±0.64^{a}
14	15	15	3	4,550±259^{c}	6.45±0.05^{b}	7.50±0.51^{a}
15	15	15	7	5,516±83^{a}	6.78±0.05^{a}	7.60±0.50^{a}
16	20	10	5	5,464±148^{a}	6.61±0.09^{b}	7.75±0.44^{a}

หมายเหตุ : ผลการทดลองแสดงค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กในคอลัมน์เดียวกันต่างกันแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

ผลจากวิเคราะห์ปริมาณเกลือ NaCl และ KCl พบว่าในผลิตภัณฑ์ชุดควบคุมมีปริมาณเกลือ NaCl และ KCl เท่ากับ 18,130 และ124 mg/kg แสดงให้เห็นว่าผู้ทดสอบมีความเคยชินกับการบริโภคอาหารที่มีรสชาติเค็ม การลดปริมาณ NaCl ลดลงเหลือ 10% แล้วทดแทนด้วยเกลือ KCl 10% พบว่าในตัวอย่างมีปริมาณเกลือ Na^{+} และ K^{+} อยู่ในช่วง 5,817 และ 5,997 mg/kg ซึ่งสภาวะดังกล่าวได้รับคะแนนทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยรวมสูงที่สุด ปริมาณค่าเกลือ Na^{+} และ K^{+} สูงมากกว่าปริมาณการบริโภคโซเดียมคลอไรด์ของประชากรไทยที่สำรวจในปี 2550 มี

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4,351.70 มิลลิกรัมต่อคนต่อวัน (Kriangsinyot, 2012) ดังนั้นจึงใช้สภาวะที่มีเกลือ NaCl 10% เกลือ KCl 10% ต้มเป็นเวลานาน 3 นาทีเพื่อศึกษาอายุการเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ ต่อไป

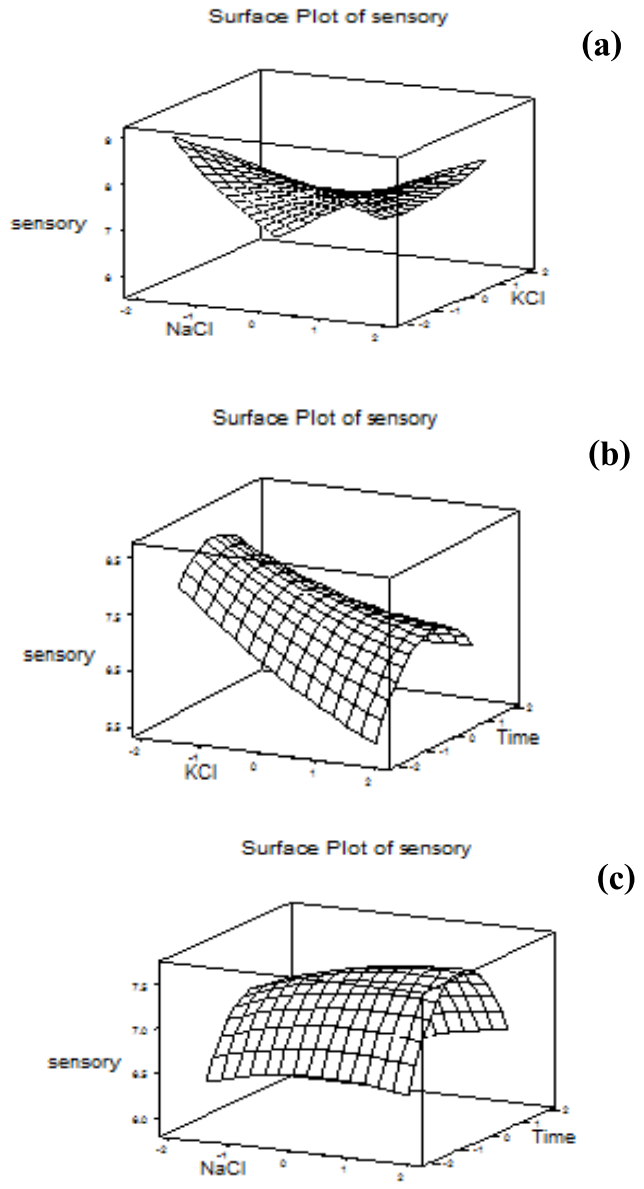
ตารางที่ 3. สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตปลาทูนึ่งลดโซเดียม

Dependent variable	Parameters	Optimum values
Y (overall sensory score)	NaCl (%(w/w))	10
	KCl (%(w/w))	10
	cooking time (min)	3

2. ผลของการบรรจุต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพของปลาทูนึ่งลดโซเดียมระหว่างการเก็บรักษา

ผลการตรวจสอบคุณภาพของบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพบว่าฟิล์ม PVC, LLDPE และ NLLDPE มีความหนา ค่า WVTR และ OTR แตกต่างกัน (ตารางที่ 4)

เมื่อนำปลาทูนึ่งสภาวะที่มีเกลือ NaCl 10% เกลือ KCl 10% ต้มเป็นเวลานาน 3 นาทีบรรจุแตกต่างกัน 3 แบบ ผลการตรวจสอบคุณภาพของปลาทูนึ่งลดโซเดียมในบรรจุภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิด คือปลาทูนึ่งลดโซเดียมบรรจุในถาดโฟม PS แล้วหุ้มด้วย PVC บรรจุในถุง LLDPE และบรรจุในถุง NLLDPE พบว่าระหว่างเก็บรักษาค่า pH เฉลี่ยของปลาทูนึ่งลดโซเดียมเริ่มต้นเท่ากับ 6.30 ใกล้เคียงกับปลาทูที่ผ่านกระบวนการความดันสูงมีค่า pH สูงที่สุด 6.34 (Aubourg et al., 2013) โดยปลาทูนึ่งลดโซเดียมบรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกันและระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มขึ้นจะมีค่า pH เพิ่มขึ้น โดยปลาทูนึ่งใน PVCและPS มีค่า pH เพิ่มสูงที่สุด (8.26) ใน LLDPE และ NLLDPE มีค่า pH แตกต่างกันเล็กน้อยโดยมี (รูปที่ 2a) แสดงให้เห็นว่าปลาทูนึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เน่าเสียได้หากมีสภาวะที่ไม่เหมาะสม ผลของค่า pH ที่สูงขึ้นอาจเป็นผลเนื่องมาจากการย่อยสลายของเนื้อปลาในกลุ่มของ biogenic amines (agmatine, cadaverine, dopamine, histamine, noradrenaline, putrescine, serotonin, spermidine, spermine, tryptamine และ tyramine) โดยปริมาณสาร biogenic amines เพิ่มขึ้นเกิดจากการสลายตัวของกรดอะมิโนในระหว่างการเก็บรักษา (Masniyom, 2011) ผลการทดลองสอดคล้องกับค่าความแน่นเนื้อพบว่าอายุการเก็บรักษานานขึ้นปลาทูนึ่งลดโซเดียมทั้งสามชุดค่าความแน่นเนื้อมีค่าลดลงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของปลาทูนึ่งอาจจะสัมพันธ์กับกิจกรรมของเอนไซม์เช่น Cathepsins, Ca^{2+}-ATPase หรือ Mg^{2+}-EGTA-ATPase ที่มีผลต่อความแข็งแรงของโปรตีนโครงสร้างของเนื้อปลาเช่น myosin, troponin-trotomyosin complex (Masniyom, 2011; Benjakul et al., 1997)



รูปที่ 1. กราฟพื้นผิวการตอบสนองสามมิติ พารามิเตอร์ของปลาทูนึ่งลดโซเดียมต่อคะแนนประสาทสัมผัสโดยรวม:

(a) NaCl concentration (X1) and KCl concentration (X2);

(b) NaCl concentration (X1) and cooking time (X3);

(c) KCl concentration (X2) and cooking time (X3)

 doi: 10.14416/j.appsci.2018.06.004

ตารางที่ 4. คุณสมบัติของฟิล์มที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติ	หน่วย	PVC	LLDPE	NLLDPE
ความหนา	μm	0.030	0.075	0.099
Water Vapor Transmission Rate (WVTR)	$g/cm^2.d.(\times 10^{-3})$	6.318	0.970	0.124
Oxygen Transmission Rate (OTR)	$Cc/m^2.d$	nd	3.907	7.125

ปริมาณกรดไทโอบาร์บิทูริกแอซิด (Thiobarbituric acid, TBARS) เป็นค่าที่แสดงความหืนที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ปริมาณ TBARS ของปลาทูนึ่งลดโซเดียม พบว่าวันแรกของการเก็บรักษาพบว่ามีค่า TBARS เท่ากับ 0.057–0.060 มิลลิกรัมมาโลนัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัมซึ่งใกล้เคียงกับปลาทูสด (0.045 มิลลิกรัมมาโลนัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัม) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นปริมาณ TBARS ของปลาทูนึ่งลดโซเดียมในทุกชุดของการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) วันสุดท้าย (วันที่ 7) ของการเก็บรักษาปริมาณ TBARS ของปลาทูนึ่งลดโซเดียมบรรจุในบรรจุภัณฑ์ PSและPVC, LLDPE และ NLLDPE เท่ากับ 0.45, 0.26 และ 0.35 มิลลิกรัมมาโลนัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 2b) โดยค่า TBARS ของปลาทูนึ่งลดโซเดียมบรรจุในบรรจุภัณฑ์ PSและPVC มีค่ามากกว่าในบรรจุภัณฑ์ LLDPE และ NLLDPE เนื่องจากในการบรรจุปลาทูนึ่งในถาด PS และ PVC ไม่สามารถบรรจุได้เต็มพื้นที่เนื่องจากลักษณะรูปร่างของตัวปลาและไม่สามารถกำจัดออกซิเจนออกได้จึงเกิดมีช่องว่างภายในหลังจากปิดด้วยฟิล์ม PVC ผลของปริมาณ TBARS จากการทดลองสอดคล้องกับผลการทดลองของ Tone & Maria (2016) พบว่าปริมาณ TBARS ของปลาทูน่าจะเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์แตกต่างกันมีค่าแตกต่างกันนี่องจากปลาทูน่าเป็นปลาที่มีไขมันสูง 3.53% รูปแบบการบรรจุมีผลต่อค่า TBARS โดยผลการทดลองปลา Chub mackerel บรรจุแบบ MAP มีปริมาณ TBARS มากกว่าปลา Chub mackerel บรรจุแบบสูญญากาศ โดยการบรรจุที่มีออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์น้อยก็สามารถชะลอปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันได้ (Erkan et al., 2011)

ผลการทดลองวัดปริมาณก๊าซ O_2 และ CO_2 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงก๊าซในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4±2°C ปลาทูนึ่งลดโซเดียมในบรรจุภัณฑ์ PS และ PVC มีค่าก๊าซ O_2 เพิ่มขึ้นมากที่สุด ปลาทูนึ่งลดโซเดียมในบรรจุภัณฑ์ LLDPE และ NLLDPE มีค่าก๊าซ O_2 ลดลงเท่ากับ 11.56% และ 11.47% เนื่องจากบรรจุภัณฑ์ LLDPE และ NLLDPE มีค่าการซึมผ่านออกซิเจน (OTR) เท่ากับ 3.907 และ 7.125 $CC/m^2.d$ ก๊าซออกซิเจนจึงสามารถแพร่ผ่านเข้าและออกภายในบรรจุภัณฑ์ปลาทูนึ่งที่เก็บรักษาไว้ได้ สำหรับปริมาณก๊าซ CO_2ของปลาทูนึ่งลดโซเดียมในบรรจุภัณฑ์ PS&PVC, บรรจุภัณฑ์ LLDPE และบรรจุภัณฑ์ NLLDPE มีปริมาณที่ต่ำมากเฉลี่ย 0.36% เมื่อติดตามการ

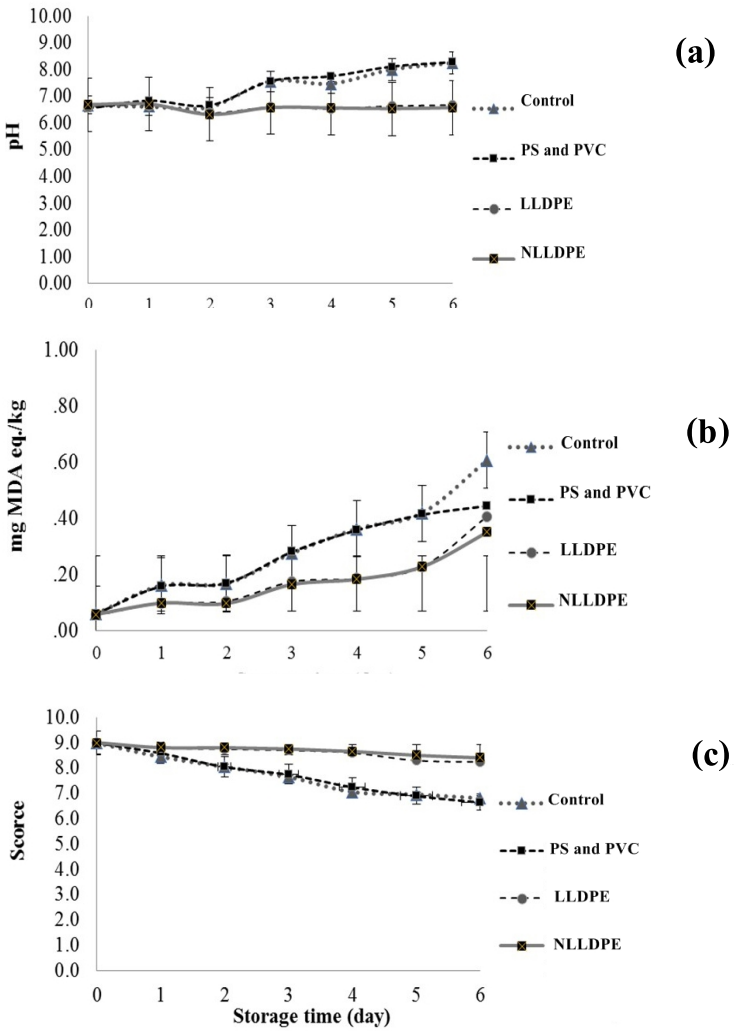
เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ที่บรรจุภัณฑ์แตกต่างพบว่ามีค่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทุกชุดของการศึกษา (p<0.05) โดยวันสุดท้ายของการเก็บรักษา (วันที่ 7) ปลาทูนึ่งในบรรจุภัณฑ์ PSและ PVC, LLDPE, NLLDPE มีค่าก๊าซ CO_2 เท่ากับ 3.56, 2.13 และ 2.47% เมื่อทดสอบทางสถิติพบว่าค่า CO_2 ในบรรจุภัณฑ์ LLDPE และ NLLDPE มีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มขึ้นของก๊าซ CO_2 ในบรรจุภัณฑ์ปลาทูนึ่งอาจเนื่องจากการเจริญของจุลินทรีย์และสร้างก๊าซ CO_2 (Gram & Huss, 1996)

คุณภาพทางจุลชีววิทยาตรวจสอบจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดตามมาตรฐานของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ (Department of Medical Health, 2017) กำหนดให้อาหารทะเลปรุงสุกต้องมีจำนวนจุลินทรียทั้งหมดไม่เกิน 6.0 log cfu/g ผลการตรวจสอบจุลินทรีย์ในปลาทูนึ่งลดโซเดียมเมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ปลาทูนึ่งลดโซเดียมในทุกชุดการทดลองมีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) การเก็บรักษาปลาทูนึ่งลดโซเดียมเป็นเวลา 7 วัน พบว่าวันแรกของการเก็บรักษามีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด 2.85-3.14 log CFU/g ปลาทูนึ่งลดโซเดียมในบรรจุภัณฑ์ PSและ PVC มีจำนวนจุลินทรีย์เกินมาตรฐานในวันที่ 4 คือ 6.48 log CFU/g ส่วนปลาทูนึ่งในบรรจุภัณฑ์ LLDPE เท่ากับ 3.47 log cfu/g และปลาทูนึ่งในบรรจุภัณฑ์ NLLDPE มีค่าเท่ากับ 3.32 log cfu/g แสดงว่าปลาทูนึ่งในบรรจุภัณฑ์ PS และPVC มีอายุการเก็บรักษาน้อยกว่า 4 วันแต่เมื่อบรรจุใน LLDPE และ NLLDPE มีอายุการเก็บรักษานานจนถึง 6 วัน (เนื่องจากมีกลิ่นผิดปกติในวันที่ 7 ของการเก็บรักษา) ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกินมาตรฐาน (6 log CFU) ไม่พบทั้ง *E. coli*, *Salmonella* spp, *S. aureus*, yeast และ mold โดย Gram & Huss (1996) รายงานว่าผลิตภัณฑ์ปลาเค็มอาจเกิดจากเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่ทนเค็มได้ หรือกลุ่มของแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศและยีสต์ ซึ่งในกรณีนี้ปลาทูนึ่งลดโซเดียมสามารถเน่าเสียได้จากเชื้อดังกล่าวจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมอีก

ผลการทดสอบความชอบโดยรวม (ไม่ได้ทดสอบชิม) พบว่าปลาทูนึ่งลดโซเดียมในบรรจุภัณฑ์LLDPE และ NLLDPE ระหว่างวันแรก และเมื่อเก็บรักษาไว้ 6 วัน ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p> 0.05) โดยปลาทูนึ่งลดโซเดียมบรรจุใน NLLDPE มีคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุด แต่เริ่มมีกลิ่นผิดปกติในวันที่ 7 ของการเก็บรักษา และปลาทูนึ่งลดโซเดียมในบรรจุภัณฑ์ PS และ PVC และ ชุดควบคุม มีค่าลดลงแตกต่างจากการบรรจุใน LLDPE และ NLLDPE ดังนั้นอายุการเก็บรักษาของปลาทูนึ่งลดโซเดียมในบรรจุภัณฑ์ LLDPE และ NLLDPE เก็บที่ 4°C มีอายุการเก็บรักษา 6 วัน (รูปที่ 2c)

สรุปผลการทดลอง

ผลของการศึกษานี้คือสภาวะการผลิตปลาทูนึ่งลดโซเดียมสูตรที่ดีที่สุด คือความเข้มข้นของ NaCl และ KCl เท่ากับ 10 % เวลาที่ใช้ต้ม 3 นาที เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ LLDPE และ NLLDPE สามารถเก็บได้นานเป็นเวลา 6 วัน ที่อุณหภูมิแช่เย็น 4±2ºC



รูปที่ 2. ผลทดสอบคุณภาพของปลาทูนึ่งลดโซเดียมในบรรจุภัณฑ์แบบต่าง ๆ

(a) pH (b) TBARS (mg MDA eq/kg) (c) Sensory score

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยเลขที่ 5944102 ประจำปี2559 คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เอกสารอ้างอิง

Aekplakorn, W., Sangthong, R., Kessomboon, P., Putwatana, P., Inthawong, R., Taneepanichskul, S., Sritara, P., Sangwatanaroj, S. & Chariyalertsak, S. (2012). National Health Examination Survey IV study group. Changes in prevalence, awareness, treatment and control of hypertension in Thai population, 2004-2009: Thai National Health Examination Survey III-IV. *Journal of Hypertension*, *30*(9), 1734-1742. doi: 10.1097/HJH.0b013e3283568158

Aubourg, S. P., Torres, J. A., Saraiva, J. A., Guerra-Rodríguez, E. & Vazquez, M. (2013). Effect of high-pressure treatments applied before freezing and frozen storage on the functional and sensory properties of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*). *LWT-Food Science and Technology, 53*(1), 100-106. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.01.028

Bacteriological Analytical Manual (BAM). (2001).*Microbiological methods & Bacteriological analytical manual.* Retrieved September 11, 2016, from https://www.fda.gov/Food/FoodScienceResearch/Laboratory Methods/ucm2006949.htm

Benjakul, S., Seymour, T. A., Morrissey, M. T. & An, H. 1997. Physicochemical changes in Pacific whiting muscle proteins during iced storage. *Journal of Food Science. 62,* 729-733.

Benjarajaroenwong, T. (2007). *Consumer buying behavior towards purchasing steamed mackerel in Mueang district, Chiang Mai Province* (Master Thesis) Chiang Mai University, Chiang Mai.

Buege, J. A. & Aust, S. D. (1978). Microsomal lipid peroxidation. *Methods in Enzymology, 52,* 302-310. https://doi.org/10.1016/S0076-6879(78)52032-6

Cook, N. R., Cutler, J. A., Obarzanek, E., Buring, J. E., Rexrode, K. M., Kumanyika, S. K., Appel, L. J. & Whelton, P. K. (2007). Long term effects of dietary sodium reduction on cardiovascular disease outcomes: observational follow-up of the trials of hypertension prevention (TOHP*). British Medical Journal, 334* (7599), 885-888. doi: 10.1136/bmj.39147.604896.55

Department of Medical Health. (2017). *Guidelines for the Assessment of Microbiological Quality of Foods and Containers, Issue 3.* Retrieved August 14, 2016, from http://dmsc-library.moph.go.th/ebooks/ files/micro-ISBN60.pdf

Desmond**,** E. (2006). Reducing salt: A challenge for meat industry. *Meat Science, 74*(1), 188-196. https://doi.org/ 10.1016/j.meatsci.2006.04.014

Erkan, N., Tosun, S.Y., Safak, U. & Uretener, G. (2011). The use of thyme and laurel essential oil treatments to extend the shelf life of bluefish (*Pomatomus saltatrix*) during storage in ice. *Journal of Consumer Protection and Food Safety, 6*(1), 39-48. doi: 10.1007/s00003-010-0587-x

Fuongfuchat, A., Chinsirikul, W., Kerddonfag, N., Trongsatitkul, T., Phiboonkulsumrit, S., Chaiwong, S. & Chonhenchob, V. (2006). The Utilization of Simple Mathematical Model in Developing Equilibrium Modified Atmosphere inside The package of Fresh Produce *Agricultural Science Journal*, *37*(5) (Supplement), 62-65.

Gram, L. & Huss, H. H. (1996). Microbiology of fish and fish product. *International Journal of Food Microbiology, 33*(1), 121-137. https://doi.org/10.1016/0168-1605(96)01134-8

He, F. J. & MacGregor, G. A. (2009). A comprehensive review on salt and health and current experience of worldwide salt reduction programs. *Journal of Human Hypertension, 23*, 363-384. doi: 10.1038/jhh.2008.144

Kriangsinyot, W. (2012). *Reduced Sodium Extended Life* (1 st ed.). *The War Veterans Organization of Thailand under Royal Patronage of His Majesty the King: Bangkok.* Retrieved August 14, 2016, from http://tnfc.fda.moph.go.th/file/fileDoc/2015-04-29_6645.pdf

Mailgaad, M. L., Civille, G. V. & Carr, B. T. (1999). *Sensory Evaluation Techniques* (3 rd ed.). New York: CRC Press.

Masniyom, P. (2011). Deterioration and shelf-life extension of fish and fishery products by modified atmosphere packaging. *Songklanakarin Journal of Science and Technology, 33*(2), 181-192.

Myers, R. H., Montgomery, D. C. & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface Methodology*: *Process and Product Optimization using Designed Experiment*s. New York: Wiley.

National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards. (2016). *Food Consumption Data of Thailand*. Retrieved August 14, 2016, from http://www.acfs.go.th/document/download_document/FCDT.pdf

Nutrition Division, Department of Health. (1990). Amino Acids Content of Thai Foods. Retrieved August 14, 2016, from http://nutrition.anamai.moph.go.th/images/design2016.pdf

Nutrition Division, Department of Health. (2001). Nutritive Values of Thai Foods. Retrieved August 14, 2016, from http://nutrition.anamai.moph.go.th/images/files/nutritive_values_of_thai_foods.pdf.

Ploegaerts, G., Desmet, C. & Van Krieken, M. (2016). Assay of sodium in food: Comparison of different preparation methods and assay techniques. *Journal of Food Composition and Analysis, 45,* 66-72. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.09.017

Rao, D. N. & Sachindra, N. M. (2002). Modified atmosphere and vacuum packaging of meat and poultry products. *Food Reviews International, 18*, 263-293. https://doi.org/10.1081/FRI-120016206

Robertson, G. L. (2012). *Food Packaging: Principles and Practices* (3rd ed). New York: CRC Press.

Ruusunen, M. & Puolanne, E. (2005). Reducing sodium intake from meat products. *Meat Science, 70*(3), 531-541. doi: 10.1016/j.meatsci.2004.07.016

Sun, X. D. (2009). Utilization of restructuring technology in the production of meat products: A review. *CyTA-Journal of Food, 7*(2), 153-162. https://doi.org/10.1080/19476330903010193

Teerapornkittkul, T., Wongsangasri, P. & Thumthanaruk, B. (2017). *Effect of packaging on quality of boiled mackerel*. pp 349-355. In Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2017): Green Convergence on Chemical Frontiers. Session: Sustainable Food and Agricultural Chemistry, 2-3 February 2017, Centra Government Complex Hotel & Convention Centre, Bangkok, Thailand.

Tone, M. R. & Maria, B. H. (2016). High pressure processing extend the shelf life of fresh salmon, cod and mackerel. *Food Control, 70*, 242-248. doi: 10.1016/j.foodcont.2016.05.045

World Health Organization. (2012a). *Guideline: Sodium Intake for Adults and Children.* Retrieved August 14, 2016, from http://www.who.int/nutrition/publications/guidelines/sodium_intake_printversion.pdf

World Health Organization. (2012b). *Guideline: Potassium Intake for Adults and Children*. Retrieved August 14, 2016, from http://www.who.int/nutrition/publications/guidelines/potassium_intake/en/