



วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ THE JOURNAL OF APPLIED SCIENCE

ISSN 1513-7805 ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 [2560]

Vol.16, No. 1 [2017]

บทความวิจัย

หน้า

1. Direct androgenesis in anther culture of butterfly pea related to flower development 1- 6
2. On ideals and congruences in BBG-algebras 7-16
3. การวัดสมรรถนะของแผนการชักตัวอย่างแบบต่อเนื่องระดับเดียวสำหรับสายการผลิตระยะสั้น
Performance measures of single-level continuous sampling plans for short production runs 17-28
4. ผลของอุณหภูมิอบแห้งด้วยวิธีฟลูอิดไชด์เบดและสภาวะบรรจุต่อการชะลอการเสื่อมสภาพของข้าวเหนียวม่วง
ระหว่างการเก็บรักษา
The effect of fluidized bed drying temperature and packaging condition on retarding degradation
of purple waxy rice during storage 29-44
5. การตรวจสอบชิ้นงานอัตโนมัติผ่านระบบการประมวลผลภาพในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์
Automated part inspection by image processing system in vehicle part manufacturing 45-59
6. การเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าสูญหายในการสำรวจด้วยตัวอย่าง
A comparison of the estimation methods for missing data in sample survey 60-73
7. การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบและเปลือกกุ้งสุก และการใช้เป็นสารตกตะกอนน้ำแอปเปิ้ล
Comparative study on properties of chitosan from raw and cooked shrimp shell and the use as clarifying agent in apple juice 74-86



วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ เป็นวารสารที่ดีพิมพ์และเผยแพร่บทความวิจัยและบทความทางวิชาการเพื่อเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่ความรู้และวิทยาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และเพื่อเป็นแหล่งแลกเปลี่ยนเรียนรู้ระหว่างคณาจารย์ นักวิชาการและนักศึกษา ทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บทความที่เสนอมาอาจเขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้ วารสารจัดตีพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ ผู้สนใจสามารถส่งต้นฉบับแบบออนไลน์ได้โดยตรงที่ <http://www.journal.sci.kmutnb.ac.th> โดยบทความดังกล่าวจะต้องไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการหรือวารสารวิชาการอื่นใดมาก่อน และเป็นข้อคิดเห็นของผู้ส่งบทความเท่านั้น

● วัตถุประสงค์

เพื่อเผยแพร่/พัฒนาผลงานจากการวิจัยและผลงานทางวิชาการที่เกี่ยวข้องทางวิทยาศาสตร์พื้นฐาน วิทยาศาสตร์ประยุกต์ และเทคโนโลยี ที่เกี่ยวข้องกับคณิตศาสตร์ สถิติ ฟิสิกส์ อุตสาหกรรม อุปกรณ์การแพทย์ เทคโนโลยีสารสนเทศ เทคโนโลยีชีวภาพ อุตสาหกรรมเกษตร สิ่งแวดล้อม เคมีอุตสาหกรรม สถาปัตยกรรม และวิศวกรรมศาสตร์

● กำหนดการเผยแพร่วารสาร ปีละ 2 ฉบับ คือ

ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม “บทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ อย่างน้อย 2 ท่าน ก่อนที่จะตอบรับการตีพิมพ์”
“เมื่อวารสารส่งบทความไปให้ผู้มีหน้าที่แก้ไขแล้ว หากไม่มีการติดต่อกลับภายใน 4 สัปดาห์ ทางวารสาร ขอปฏิเสธการตีพิมพ์บทความนั้น”

● การเผยแพร่วารสาร

จัดส่งให้หน่วยงานห้องสมุด บริการวิชาการและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั่วประเทศและสามารถค้นหาได้ในเว็บไซต์นี้

● การส่งบทความ

ส่งไฟล์บทความ .doc และ pdf
ที่ <http://www.journal.sci.kmutnb.ac.th>

● สำนักงาน

งานวิจัยและประกันคุณภาพการศึกษา
สำนักงานคณบดี คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถ.ประชากรราษฎร์ 1 บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

● ที่ปรึกษา

รศ.ดร.สุรพันธ์	ยิ้มมัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.พิรพงษ์	พรวงศ์ทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.โดม	โล่ห์เพ็ชร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

● บรรณาธิการ

รศ.ดร.สมโภชน์	น้อยจินดา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
---------------	-----------	--

● บรรณาธิการร่วม

รศ.ดร.กิตติ	โพธิ์ปัทม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
-------------	-----------	--

● ผู้ช่วยบรรณาธิการ

รศ.ดร.เสาวณิต	สุภาภรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.วีระศักดิ์	อัครวงศ์อารยะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สุนต์ทิพย์	คงตันจันทร์พัก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วัลย์พร	ปฤษฎาภรณ์ เอื้อใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.เบญจพร	ลัษณรรมาภรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.อภิชาติ	ศุภรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.สุกัญญา	แพรสมบุญรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

● ผู้ทรงคุณวุฒิในกองบรรณาธิการ

ศ.ดร.ประนอม	จันทร์โหมทัย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศ.ดร.ยงค์วิมล	เลนบุรี	มหาวิทยาลัยมหิดล
ศ.ดร.สังวรณ์	กิจทวี	มหาวิทยาลัยมหิดล
Professor Dr. Jennifer Ayla Jay		University of California Los Angeles, USA
Professor Dr.rer. nat. Carsten Harms		University of Applied Sciences Bremerhaven, Germany
Professor Dr.Woo-Kul Lee		Dankook University, South Korea
รศ.ดร.มนตรี	มาลีวงศ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.ดุขี	อุตภาพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.เฉลิมชัย	วงษ์อารี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สอาด	ริยะจันทร์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.สิทธิวัฒน์	เลิศศิริ	มหาวิทยาลัยมหิดล
รศ.ดร.มารินา	เกตุทัต-คาร์นส์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.วราฤทธิ์	พานิชกิจโกศล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
Associate Professor Dr.Haruhiko Toyohara		Kyoto University, Japan
ผศ.ดร.กันต์พงษ์	วรรธน์ปัญญา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.เสน่ห์	รุจิวรรณ	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ผศ.ดร.ศุภกานต์	พิมพ์เรศ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.อ.หญิง ผศ.ดร.ปนัดดา หัตถโชติ		วิทยาลัยแพทยศาสตร์ พระมงกุฎเกล้า
ดร.ชีวารัตน์	ม่วงพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
Dr.Elvin James Moor		มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

● ฝ่ายประสานงานและจัดการ

นางภววรรณ	สีสวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นายภิรมย์	พาบุ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นายปิยะวัฒน์	สุธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นางสาววัลย์พร	ขันแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นางสาวรณณ	ทองศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

“บทความที่ลงพิมพ์ เป็นข้อคิดเห็นของผู้เขียนเท่านั้น

และจะต้องเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใดๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความนั้น”

Research Article

Direct androgenesis in anther culture of butterfly pea related to flower development

Kitti Bodhipadma^{1*}, Sompoch Noichinda¹, Kridsana Onnui¹, Saowaros Phanomchai¹, Luepol Punnakanta² and David W.M. Leung³

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

²Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Salaya, Nakhon Pathom 73170, Thailand

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

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

Received: 14/03/2017; Accepted: 12/04/2017

Abstract

Androgenesis is a biotechnological pathway of *in vitro* gametic embryogenesis with the potential leading to haploid plant production from male reproductive organ. Butterfly pea (*Clitoria ternatea* L.) is a versatile leguminous plant with the floral shape resembling a butterfly at full bloom. Based on the varying lengths of flower as well as petals and sepals, 5 stages of flower development were delineated. When anthers from flowers of these various stages were cultured on basal Murashige and Skoog medium supplemented with 3 mg/l 2,4-D and 60 or 80 g/l sucrose, it was found that anther-derived embryos (11.67 and 3.3% in the presence of 6 and 8% sucrose, respectively) were obtained only from stage 2 flowers. Light microscopic observation also revealed that the microspores of anthers isolated from flowers at stage 2 was uninucleate. This suggested that anther or microspore stage of butterfly pea played a very important role in direct androgenesis and 8% sucrose in the medium was detrimental to this process.

Keywords: androgenic embryo, anther, butterfly pea flower, microspore

Introduction

Butterfly pea (*Clitoria ternatea* L.), belongs to the sub-family Papilionaceae in Fabaceae, and is a nutritive multi-purpose forage legume originated from tropical Asia. This perennial edible leguminous twiner may be used as a nutraceutical, medicinal or ornamental plant. Besides, it is also valuable in cuisine and for rotational fodder (Gomez & Kalamani, 2003; Barik et al., 2007; Morris, 2009).

Clonal propagation *in vitro* can potentially be achieved via an organogenic and embryogenic pathway. For embryogenesis, adventive or nonzygotic embryos are induced either from somatic or gametic material. In gametic embryogenesis, androgenesis is a part of this pathway involving the development of embryos in cell culture initiated from isolated anther or microspore or immature pollen (Maraschin et al., 2005; Forster et al., 2007). Although there have been many publications on organogenesis and somatic embryogenesis of butterfly pea, there are few investigations of androgenesis of this crop (Barik et al., 2007; Nair & Reghunath, 2008; Mukhtar et al., 2012). In particular, the objective of this study was to examine the

relationship between flower developmental stages and anther-derived embryo formation in butterfly pea.

Materials and methods

Different sizes of butterfly pea flowers, blue flower with double petaloid cultivar, were collected (before blooming and at anthesis) at around 8-9 a.m. from the garden of the Division of Agro-Industrial Technology, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok. Firstly, the lengths of the outermost petal, sepal and entire flower as well as flower width were measured. Subsequently, the various developmental stages were operationally classified based on the different sizes of the floral parts. Then, the length and width of the anther as well as the length of the filament at each developmental stage were also determined.

For gametic embryo induction, butterfly pea flower at various developmental stages were rinsed with sterilized distilled water for 5 min, surface disinfested by soaking for 15 min in 20% (v/v) Clorox household bleach containing 3 drops of Tween 20, followed by immersion in sterilized distilled water 3 times (1 min each). Then, the petals were excised and discarded while the stamens were placed on a sterile Petri dish. Afterward, the filament was excised from the anther before the anther was cut transversely and transferred to induction medium [MS (Murashige & Skoog, 1962) semi-solid medium supplemented with 3 mg/l 2,4-D and either 60 or 80 g/l sucrose]. Subsequently, the cultures were kept for 4 weeks in a culture room under 25°C and 16 h of 20.87 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ lighting daily. Afterwards, androgenic embryos formed were transferred to grow on basal MS medium containing 30 g/l sucrose.

To determine the developmental stages of the microspores, a procedure modified from Wang et al. (2010) was used. Two anthers dissected from a flower of an appropriate developmental stage were placed on a glass slide and then covered with another glass slide before a glass rod was rolled over the upper glass slide for 10 s. The upper glass slide was removed so that microspores could be treated with 2 drops of 40% (v/v) Clorox household bleach for 1 min, followed by adding 1 drop of distilled water and covered with a cover slip. Finally, a tissue paper was used to absorb any excess solution and then a drop of 1% (w/v) acetocarmine was added at one side of the cover slip to stain the microspores for 20 min before observation under a light microscope.

Results and discussion

Various sizes of butterfly pea flowers were collected for size measurements of the petals, sepals and the whole flowers so that 5 stages of flower development were identified based on statistically significant differences in the lengths of petals, sepals and flowers (Table 1, Figure 1A). Similarly, the filament also exhibited different lengths in relation to the 5 stages of flower development. This result is quite similar to the measurement of filament length in most species of *Collinsia* as the filament gradually elongates from the first until the final stage of flower development (Armbruster et al., 2002). However, there was little difference in the anther size in relation to the first 4 stages of flower development while at stage 5 the anther size was significantly reduced. This was an overall trend opposite to those of the other flower parts (Table 2, Figure 1B and 1C).

Table 1. Analysis of butterfly pea flowers, the petals and sepals to delineate 5 stages of flower development (data from 10 replications)

Flower stages	Petal length (cm)	Sepal length (cm)	Flower length (cm)	Flower width (cm)
1	0.34±0.07a	1.05±0.10a	1.27±0.15a	0.54±0.07a
2	0.57±0.07b	1.30±0.07b	1.68±0.04b	0.66±0.05b
3	1.03±0.09c	1.38±0.08c	1.99±0.09c	0.73±0.05b
4	1.44±0.11d	1.47±0.08d	2.46±0.16d	0.74±0.05b
5	2.88±0.09e	1.60±0.07e	3.99±0.17e	2.82±0.16c

Means±S.D. in the same column with different letters were statistically significant different ($P \leq 0.05$)

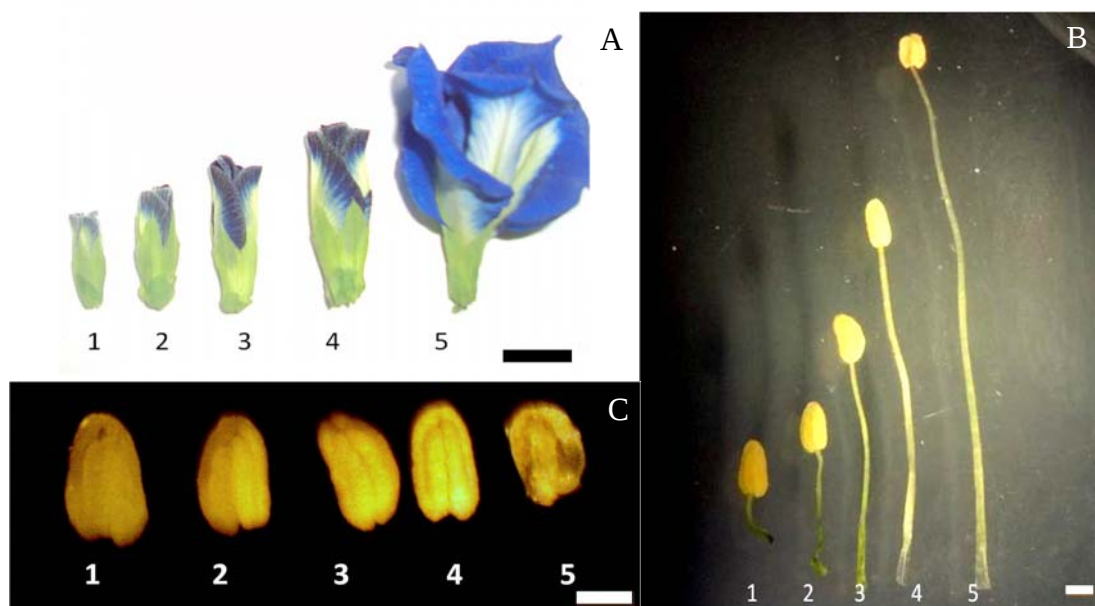


Figure 1. Butterfly pea: (A) flowers at various stages of development (scale bar = 1 cm), (B) stamens at various stages (scale bar = 0.1 cm), (C) anthers at various stages of flower development (scale bar = 0.1 cm)

After the different developmental stages were delineated, anthers from the flowers of the different stages were cultured on an androgenic embryo induction medium (see Materials and Methods). In preliminary experiments, it was found that there was no callus or gametic embryo formed when the entire butterfly pea anthers were cultured for 30 days. However, culturing the anther halves obtained by dissecting the anthers in the middle transversely resulted in formation of androgenic embryos. Dissection of anther was a kind of wounding or mechanical stress that stimulated androgenic embryo formation in some plants. For example, excision of anther tip was also found to enhance this process in white cabbage (Osolnik et al., 1993) and brussels sprout (Krzyżanowska & Górecka, 2008).

Table 2. Size of stamen at 5 stages of butterfly pea flower development (data from 30 replications)

Flower stages	Filament length (cm)	Anther length (cm)	Anther width (cm)
1	0.32±0.05a	0.20±0.02a	0.14±0.02a
2	0.46±0.06b	0.19±0.03ab	0.14±0.02a
3	0.74±0.09c	0.19±0.02ab	0.13±0.02ab
4	0.97±0.09d	0.18±0.03b	0.12±0.03b
5	1.84±0.10e	0.12±0.03c	0.11±0.02c

Means±S.D. in the same column with different letters were statistically significant different ($P \leq 0.05$)

The procedure used for androgenic embryo formation in this study was slightly adapted from a similar research of Sudharsan et al. (2008) on Sturt's desert pea (an ornamental legume which is like butterfly pea belonging to the family Fabaceae). Although the induction medium used gave the best percentage of embryogenic callus initiation in cultured Sturt's desert pea anthers, the response of butterfly pea anther explants on the same medium was dissimilar. It was found that androgenic embryos of butterfly pea developed directly from the cultured anthers (Figure 2A) and only anther explants from flowers of the stage 2 development could form this embryogenic structure. In addition, the number of anther-derived embryos in two treatments (each from 60 replications) decreased from 11.67 ± 0.32 to $3.3 \pm 0.18\%$ when sucrose concentration in the culture medium was increased from 60 to 80 g/l, respectively.

An examination under a light microscope revealed that the microspores from the anthers of flowers at stage 2 development were at the uninucleate stage (Figure 2B). It was, however, found that without exine removal according to the modified method of Wang et al. (2010), the nucleus of butterfly pea microspore was hardly to be seen. The uninucleate condition of the microspores might be important for androgenic embryo induction in butterfly pea. The same result was also found in other plants, such as peanut (Willcox et al., 1991) and chickpea (Panchangam et al., 2014), that are in the same family as butterfly pea.

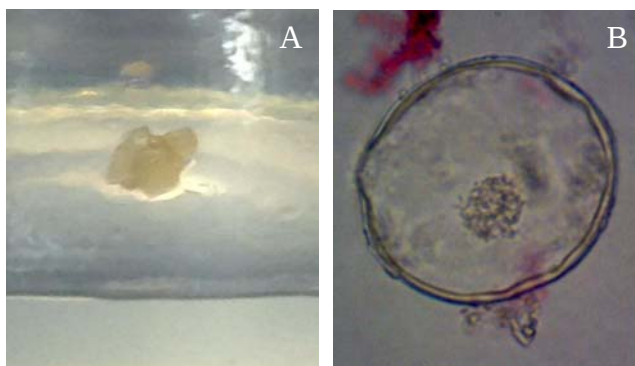


Figure 2. (A) a group of globular embryos formed in excised anther explants from butterfly pea flower of stage 2 development cultured on basal Murashige and Skoog medium supplemented with 3 mg/l 2,4-D and 60 g/l sucrose for 30 days; (B) light microscopic observation showing a microspore at the uninucleate stage

When the androgenic embryos of butterfly pea were transferred onto basal MS medium supplemented with 30 g/l sucrose without addition of any plant growth regulators, the globular embryos (Figure 3A) developed further into heart-stage embryo (Figure 3B). Nevertheless, these embryos did not convert into plantlets. Thus, unlike Sturt's desert pea, both globular and heart-stage embryos of butterfly pea seemed to develop directly from excised anther explants without any intervening callus formation. It would appear that different plant species in the same family might have dissimilar responses to a comparable androgenic embryo induction medium.

In conclusion, anther (or microspore) developmental stage and sucrose concentration affected direct androgenic embryo induction in butterfly pea. Further studies are required to refine the media used for androgenic embryo induction and plantlet conversion.

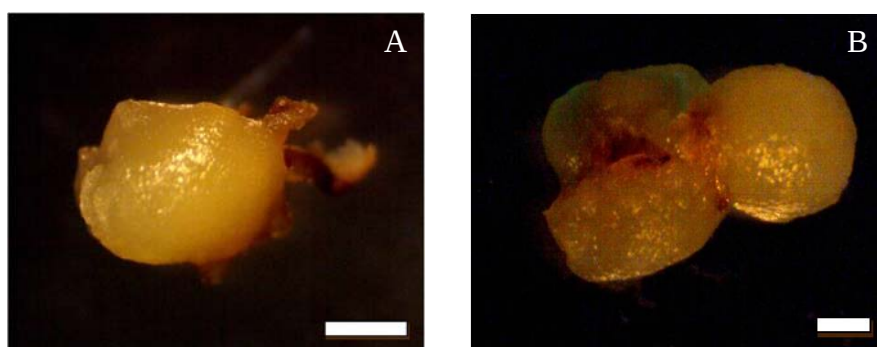


Figure 3. Androgenesis of butterfly pea: (A) globular embryo, (B) heart-stage embryo (scale bar = 1 mm)

References

- Armbruster, W. S., Mulder, C. P., Baldwin, B. G., Kalisz, S., Wessa, B. & Nute, H. (2002). Comparative analysis of late floral development and mating-system evolution in tribe Collinsieae (Scrophulariaceae S.L.). *American Journal of Botany*, 89(1), 37-49. <http://dx.doi.org/10.3732/ajb.89.1.37>
- Barik, D. P., Naik, S. K., Mudgal, A. & Chand, P. K. (2007). Rapid plant regeneration through in vitro axillary shoot proliferation of butterfly pea (*Clitoria ternatea* L.)—a twinning legume. *In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant*, 43(2), 144-148. <http://dx.doi.org/10.1007/s11627-007-9040-y>
- Forster, B. P., Heberle-Bors, E., Kasha, K. J. & Touraev, A. (2007). The resurgence of haploids in higher plants. *Trends in Plant Science*, 12(8), 368-375. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2007.06.007>
- Gomez, S. M. & Kalamani, A. (2003). Butterfly pea (*Clitoria ternatea*): a nutritive multipurpose forage legume for the tropics - an overview. *Pakistan Journal of Nutrition*, 2(6), 374-379. <http://dx.doi.org/10.3923/pjn.2003.374.379>
- Krzyżanowska, D. & Górecka, K. (2008). Effect of various stress factors on the induction of androgenesis in anther cultures of brussels sprouts (*Brassica oleracea* L. var. *gemmifera*). *Vegetable Crops Research Bulletin*, 69, 5-13. <https://doi.org/10.2478/v10032-008-0015-2>

- Maraschin, S. F., de Priester, W., Spaink, H. P. & Wang, M. (2005). Androgenic switch: an example of plant embryogenesis from the male gametophyte perspective. *Journal of Experimental Botany*, 56(417), 1711-1726. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri190>
- Morris, J. B. (2009). Characterization of butterfly pea (*Clitoria ternatea* L.) accessions for morphology, phenotype, reproduction and potential nutraceutical, pharmaceutical trait utilization. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 56, 421-427.
- Mukhtar, S., Ahmad, N., Khan, M. I., Anis, M. & Aref, I. M. (2012). Influencing micropropagation in *Clitoria ternatea* L. through the manipulation of TDZ levels and use of different explant types. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 18(4), 381-386. <http://dx.doi.org/10.1007/s12298-012-0136-4>
- Murashige, T. & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Plant Physiology*, 15, 473-497. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
- Nair, D. S. & Reghunath, B. R. (2008). Effective use of encapsulation-dehydration technique in cryopreserving somatic embryos of butterfly pea (*Clitoria ternatea* L.). *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 13(3), 83-95. http://dx.doi.org/10.1300/J044v13n03_07
- Osolnik, B., Bohanec, B. & Jelaska, S. (1993). Stimulation of androgenesis in white cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) anthers by low temperature and anther dissection. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 32(2), 241-246. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00029849>
- Panchangam, S. S., Mallikarjuna, N., Gaur, P. M. & Suravajhala, P. (2014). Androgenesis in chickpea: anther culture and expressed sequence tags derived annotation. *Indian Journal of Experimental Biology*, 52(2), 181-188.
- Sudharsan, C., Jibi Manuel, S. & Al-Sabah, L. (2008). Haploid plant production from pollen grains of Sturt's desert pea via somatic embryogenesis. *American-Eurasian Journal of Scientific Research*, 3(1), 44-47.
- Wang et al. (2010). Microsporogenesis and pollen formation in cassava. *Biologia Plantarum*, 55(3), 469-478. <http://dx.doi.org/10.1007/s10535-011-0112-9>
- Willcox, M. C., Reed, S. M., Burns, J. A. & Wynne, J. C. (1991). Effect of microspore stage and media on anther culture of peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 24(1), 25-28. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00044261>

Research Article

On ideals and congruences in BBG-algebras

Phansaporn Thamtan*, Suphawat Asawasamrit, Elvin J. Moore

Department of Mathematics, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800

*E-mail: t.phansaporn@gmail.com

Received: 30/01/2017; Accepted: 9/05/2017

Abstract

In this paper, we define the notions of ideals and congruences on BBG-algebras and investigate some related properties. Moreover, we study the relation between ideals and congruences on commutative BBG-algebras. We define the quotient in commutative BBG-algebras induced by this relation and study its properties.

Keywords: BBG-algebras, congruences, ideals, quotient BBG-algebras

Introduction

In 1998, Dudek and Zhang introduced a new concept of ideals in BCC-algebras and described connections between such ideals and congruences. (Dudek & Zhang, 1998) In 2007, Ding and Pang introduced on the properties of the element and then the definition and properties of congruences and quotient algebras are given and quotient algebras are the basic tools for explored the structures of BCI-algebras. (Ding & Pang, 2007) In 2009, Prabpayak and Leerawat introduced some kind of algebras which is called KU-algebras and defined ideals and studied congruences on KU-algebras. Furthermore, they investigated some of its properties. (Prabpayak & Leerawat, 2009) In 2010, Asawasamrit and Leerawat introduced an algebraic structure called a binary algebra and studied the relation between ideals and congruences. Finally, they defined quotient binary algebra and studied its properties. (Asawasamrit & Leerawat, 2010) In 2012, Asawasamrit and Sudprasert introduced to the general theory of KK-algebras and shown relation between ideals and congruences to defined quotient KK-algebra and investigated fundamental properties. (Asawasamrit & Sudprasert, 2012)

In 2015, Tearnbucha and Asawasamrit introduced a new algebraic structure called a BBG-algebra and studied its fundamental properties (Tearnbucha & Asawasamrit, 2015). They defined a BBG-algebra as an algebra $(X, *, 0)$ with a binary operation $*$ which satisfies the following properties:

$$(BBG-1) \quad x * x = 0,$$

$$(BBG-2) \quad 0 * x = x,$$

$$(BBG-3) \quad x * (y * z) = ((y * 0) * x) * z, \text{ for all } x, y, z \in X.$$

Before proved the basic properties of BBG-algebras, they gave some examples including the following (Tearnbucha & Asawasamrit, 2015).

Example 1.1 Let $X = \{0, 1, 2\}$ and $*$ be defined by the Cayley Table 1. Then they showed by a straightforward, but lengthy, calculation that $(X, *, 0)$ satisfied the three axioms of a BBG-algebra.

Table 1. Definition of $*$ for example 1.1 with $X = \{0, 1, 2\}$.

$*$	0	1	2
0	0	1	2
1	2	0	1
2	1	2	0

Proposition 1.2 Let $(X, *, 0)$ be a BBG-algebra. Then, for all $x, y, z \in X$:

1. $(x * 0) * (x * y) = y$,
2. $x * y = x * z$ implies $y = z$,
3. $(x * y) * z = y * ((x * 0) * z)$,
4. $x * y = 0$ implies $x = y$,
5. $(x * 0) * 0 = x$,
6. $(y * x) * 0 = x * y$,
7. $y * x = z * x$ implies $y = z$.

Tearnbucha and Asawasamrit defined a commutative BBG-algebra $(X, *, 0)$ as follows (Tearnbucha & Asawasamrit, 2015).

Definition 1.3 A commutative BBG-algebra is a BBG-algebra with the property that $(x * 0) * y = (y * 0) * x$ for all $x, y, z \in X$.

They then defined a binary operation $\wedge$ on a commutative BBG-algebra $(X, *, 0)$ by $x \wedge y = (x * y) * y$ and showed that $x \wedge y = y \wedge x$ for all $x, y \in X$ and proved the following proposition.

Proposition 1.4 If $(X, *, 0)$ is a commutative BBG-algebra, then for all $a, b, x, y, z \in X$:

1. $(y * 0) * (x * 0) = x * y$,
2. $(x * y) * y = x$,
3. $(y * b) * (x * a) = (a * b) * (x * y)$,
4. $(z * x) * (z * y) = x * y$,
5. $(y * z) * (x * z) = x * y$,
6. $(b * y) * x = (x * y) * b$,
7. $x * (y * z) = y * (x * z)$.

In this paper, we introduce the notion of ideals and congruence in BBG-algebras and investigate some of their properties. Moreover, we will show some of the relationships between ideals and congruences in commutative BBG-algebras to define the quotient in commutative BBG-algebras and study its properties.

Ideals

Definition 2.1 Let $(X, *, 0)$ be a BBG-algebra and A be a non-empty subset of X . Then, A is called a closed subset of X on condition that $x * y \in A$ whenever $x, y \in A$.

Lemma 2.2 If A is a closed subset of a BBG-algebra $(X, *, 0)$, then $0 \in A$.

Proof. If $x \in A$, then $x * x \in A$. From BBG-1, $x * x = 0$ and therefore $0 \in A$.

Definition 2.3 Let $(X, *, 0)$ be a BBG-algebra and A be a subset of X . Then A is called an ideal of $(X, *, 0)$ under the operation $*$, if it satisfies the following conditions

(I-1) $0 \in A$.

(I-2) For $x, y \in X$, if $x \in A$ and $x * y \in A$ then $y \in A$.

Example 2.4 Let $X = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ and let the binary operation $*$ be defined by Table 2.

Table 2. Definition of $*$ for Example 2.4 with $X = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$.

$*$	0	1	2	3	4	5
0	0	1	2	3	4	5
1	2	0	1	4	5	3
2	1	2	0	5	3	4
3	3	4	5	0	1	2
4	4	5	3	2	0	1
5	5	3	4	1	2	0

Then, it can easily be checked that $(X, *, 0)$ is a BBG-algebra and that $I = \{0, 1, 2\}$, $J = \{0, 3\}$ and $K = \{0, 5\}$ are closed ideals of X under the operation $*$.

Example 2.5 Let $X = \{0, 1, 2, 3\}$ and let the binary operation $*$ be defined by Table 3.

Table 3. Definition of $*$ for Example 2.4 with $X = \{0, 1, 2, 3\}$.

$*$	0	1	2	3
0	0	1	2	3
1	1	0	3	2
2	2	3	0	1
3	3	2	1	0

Then, it can easily be checked that $(X, *, 0)$ is a commutative BBG-algebra and that $I = \{0, 2\}$ is closed ideals of X under the operation $*$.

Lemma 2.6 Let $(X, *, 0)$ be a commutative BBG-algebra and let A be a closed subset of X . Then A is an ideal of X if and only if $x \in A$ and $z * y \notin A$ imply that $z * (x * y) \notin A$ for all $x, y, z \in X$.

Proof. Let A be a closed subset of X . Since $0 \in A$, property I-1 of an ideal is satisfied. Now, we prove that A is an ideal only if the stated conditions are true. We prove by contradiction. Suppose that A is an ideal of X for all $x, y, z \in X$ and that $x \in A$ and $z * (x * y) \in A$. By Proposition 1.4(7), we have $z * (x * y) = x * (z * y)$ and therefore from condition I-2 of the definition of an ideal, we have $z * y \in A$. Hence, if $z * y \notin A$ and $z * (x * y) \in A$, then A is not an ideal. Therefore A is an ideal only if $z * y \notin A$ implies that $z * (x * y) \notin A$. We now prove that if the conditions are true then A is an ideal. Assume that A is a closed subset of X , and for all $x, y, z \in X$, we have $x \in A$, and that $z * y \notin A$ implies that $z * (x * y) \notin A$. Let $x \in A$. Then since A is closed, $0 \in A$ and property I-1 of the definition of an ideal is satisfied. We prove property I-2 by contradiction. Assume that A is not an ideal and the conditions are true, i.e., that if $x \in A$ and $z * y \notin A$ then $x * (z * y) \notin A$. If A is not an ideal, then there exists $x \in A$, $x * (z * y) \in A$ and $z * y \notin A$. From the conditions, we have that $z * y \notin A$ implies that $z * (x * y) \notin A$. But, from Proposition 1.4(7), $z * (x * y) = x * (z * y)$ and therefore $x * (z * y) \notin A$ which is a contradiction. Therefore, if the conditions are true then A is an ideal of X . This completes the proof.

Corollary 2.7 Let A be a closed subset of a commutative BBG-algebra X . Then A is an ideal of X if and only if $x \in A$ and $y \notin A$ imply that $x * y \notin A$ for all $x, y \in X$.

Lemma 2.8 Let A be a closed subset of a commutative BBG-algebra X . Then A is an ideal of X if and only if $x * (y * z) \in A$ and $x * z \notin A$ imply $y \notin A$ for all $x, y, z \in X$.

Proof. Let A be a closed subset of X . Then $0 \in A$ and property I-1 of an ideal is satisfied. We now prove that property I-2 of an ideal is satisfied only if the stated conditions are true. Suppose that for all $x, y, z \in X$ the conditions $x * (y * z) \in A$ and $x * z \notin A$ are satisfied. We assume that A is an ideal and $y \in A$. We now prove that this is a contradiction. From Proposition 1.4(7), $x * (y * z) = y * (x * z) \in A$. Hence, if $y \in A$ and A is an ideal, then from condition I-2 of the definition of an ideal, we have $x * z \in A$. This is a contradiction, and therefore if $x * z \notin A$, $y * (x * z) \in A$ and $y \in A$ then A is not an ideal. Therefore A is an ideal only if $x * (y * z) \in A$ implies that $y \notin A$. We now prove that if the stated conditions $x * (y * z) \in A$, $x * z \notin A$ and $y \notin A$ are true, then property I-2 of an ideal is satisfied. We prove property I-2 by contradiction. We assume that the stated conditions are true and that A is not an ideal. Then, if A is not an ideal, there exists $y \in A$, $y * (x * z) \in A$ and $x * z \notin A$. From Proposition 1.4(7), $x * (y * z) = y * (x * z)$ and therefore $y * (x * z) \in A$. But, from the conditions $x * (y * z) \in A$ and $x * z \notin A$ implies that $y \notin A$. This is a contradiction and therefore A is an ideal. This completes the proof.

Corollary 2.9 Let A be a closed subset of a commutative BBG-algebra X . Then A is an ideal of X if and only if $x * y \in A$ and $y \notin A$ implies $x \notin A$ for all $x, y, z \in X$.

Theorem 2.10 Let $\{J_i : i \in \mathbb{N}\}$ be a family of ideals in a BBG-algebra X where $J_n \subseteq J_{n+1}$ for all

$n \in \mathbb{N}$. Then $\bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$ is an ideal of X .

Proof. We first note that $0 \in \bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$. By definition, J_1 is an ideal implies that $0 \in J_1$ and $J_1 \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$. To prove property I-2 of an ideal, we will show that $x \in \bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$ and $x * y \in \bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$ implies that $y \in \bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$. Since $x \in \bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$ and $x * y \in \bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$ it follows that $x \in J_j$ for some $j \in \mathbb{N}$ and $x * y \in J_k$ for some $k \in \mathbb{N}$. Without loss of generality, we can assume that $j \leq k$. Since $J_j \subseteq J_k$ we have $x \in J_k$ and $x * y \in J_k$. Then, since J_k is an ideal, we have from property I-2 of an ideal that $y \in J_k \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$. Therefore, property I-2 is also true for $\bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$. This completes the proof.

Theorem 2.11 Let $\{J_j : j \in \mathbb{N}\}$ be a family of closed ideals of a BBG-algebra X where $J_n \subseteq J_{n+1}$ for all $n \in \mathbb{N}$. Then $\bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$ is a closed ideal of X .

Proof. We will first show that $\bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$ is a closed subset of X . Let $x, y \in \bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$. It follows that $x \in J_j$ for some $j \in \mathbb{N}$ and $y \in J_k$ for some $k \in \mathbb{N}$. Without loss of generality, we can assume that $j \leq k$ and then $J_j \subseteq J_k$. Therefore, $x, y \in J_k$ and since J_k is a closed ideal, we have that $x * y \in J_k \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$. This proves that if $x, y \in \bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$ then $x * y \in \bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$ and therefore $x * y \in \bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$ is a closed subset of X . Finally, it follows immediately from Theorem 2.10 that $\bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$ is an ideal of X . This completes the proof.

Theorem 2.12 Let $\{I_j : j \in J\}$ be a family of ideals of a BBG-algebra X . Then $\bigcap_{j \in J} I_j$ is an ideal of X .

Proof. We note first that $0 \in \bigcap_{j \in J} I_j$ because $0 \in I_j$ for all ideals $I_j \subseteq X$.

We now prove property I-2. Let $x \in \bigcap_{j \in J} I_j$ and $x * y \in \bigcap_{j \in J} I_j$. Then, $x \in I_j$ for all j and $x * y \in I_j$ for all j . Since I_1 is an ideal there exists $y_1 \in I_1$ such that $x * y_1 \in I_1$. Similarly, since I_2 is an ideal there exists $y_2 \in I_2$ such that $x * y_2 \in I_2$. By Proposition 1.2(2), $x * y_1 = x * y_2$ implies that $y_1 = y_2$ and therefore $y_1 = y_2 \in I_1 \cap I_2$. Therefore, $x \in I_1 \cap I_2$ and $x * y \in I_1 \cap I_2$, implies that there exists $y \in I_1 \cap I_2$. Therefore, $I_1 \cap I_2$ satisfies property I-2 of an ideal. This argument can now be applied to $(I_1 \cap I_2) \cap I_3$ to prove that $(I_1 \cap I_2) \cap I_3$ is an ideal. A repeat of this argument completes the proof.

Theorem 2.13 Let $\{I_j : j \in J\}$ be a family of closed ideals of a BBG-algebra X . Then $\bigcap_{j \in J} I_j$ is an closed ideal of X .

Proof. By Theorem 2.12, $\bigcap_{j \in J} I_j$ is an ideal of X . We now show that the intersection of closed subsets of X is a closed subset of X . We first show that the intersection of two closed subsets of X is a closed subset of X . Let $x, y \in I_1 \cap I_2$. Since I_1 is closed, we have $x * y \in I_1$. Similarly, since I_2 is closed, we have $x * y \in I_2$. Therefore, $x * y \in I_1 \cap I_2$. We can now repeat the argument for the two closed ideals $I_1 \cap I_2$ and I_3 to prove that $(I_1 \cap I_2) \cap I_3$ is a closed subset of X . A repeat of this argument completes the proof.

Quotient BBG-algebras

In this section, we study congruence and quotient on BBG-algebras.

Definition 3.1 Let I be an ideal of a BBG-algebra X . Define a relation $\sim$ on X by
$$x \sim y \text{ iff } x * y \in I \text{ and } y * x \in I.$$

Theorem 3.2 If I is an ideal of a commutative BBG-algebra X , then the relation $\sim$ is an equivalence relation on X .

Proof. Let I be an ideal of a commutative BBG-algebra X and $x, y, z \in X$. By BBG-1, $x * x = 0$ and since I is an ideal $x * x = 0 \in I$. That is $x \sim x$. Hence $\sim$ is reflexive. Next, suppose that $x \sim y$. It follows that $x * y \in I$ and $y * x \in I$. Then $y \sim x$, so $\sim$ is symmetric. Finally, we prove the transitivity of $\sim$. Let $x, y, z \in X$ and $x \sim y$ and $y \sim z$. We will show that $x \sim z$. Now, by definition of $\sim$, we have $x * y, y * x, y * z, z * y \in I$. By Proposition 1.3(4), we have $(z * y) * (z * x) = y * x \in I$. However, we know that $z * y \in I$ and therefore since I is an ideal, we have $z * x \in I$. Similarly, using Proposition 1.3(5), we can prove that $x * z \in I$. Thus $\sim$ is transitive. Therefore $\sim$ is an equivalence relation.

Lemma 3.3 Let I be an ideal of a commutative BBG-algebra X . For any $x, y, u, v \in X$, if $u \sim v$ and $x \sim y$, then $u * x \sim v * y$.

Proof. We will first show that $u * x \sim v * y$. Since $u \sim v$, we have $u * v \in I$ and $v * u \in I$. Since X is a commutative BBG-algebra, we have from Proposition 1.3(5) that $(v * x) * (u * x) = u * v \in I$ and $(u * x) * (v * x) = v * u \in I$. Therefore $u * x \sim v * x$. We will next show that $v * x \sim v * y$. Since $x \sim y$, we have $x * y \in I$ and $y * x \in I$. Since X is a commutative BBG-algebra, we have from Proposition 1.3(4) that $(v * x) * (v * y) = x * y \in I$ and $(v * y) * (v * x) = y * x \in I$. Therefore $v * x \sim v * y$. Then, since $u * x \sim v * x$ and $v * x \sim v * y$, we have from transitivity of $\sim$ that $u * x \sim v * y$. This completes the proof.

Corollary 3.4 If I is an ideal of a commutative BBG-algebra X , then the relation $\sim$ is a congruence relation on X .

Proof. For the operation $*$ of the BBG-algebra and for all $x, y, u, v \in X$, we have from Theorem 3.2 that $\sim$ is an equivalence relation on X and from Lemma 3.3 that $u \sim v$ and $x \sim y$ implies that $u * x \sim v * y$. Therefore, $\sim$ is a congruence relation on X .

Definition 3.5 Let I be an ideal of a commutative BBG-algebra X . Given $x \in X$, the equivalence class $[x]_I$ of x is defined as the set of all elements of X that are equivalent to x , that is,

$$[x]_I = \{y \in X : x * y\}.$$

We define a quotient set by $X/I = \{[x]_I : x \in X\}$.

Lemma 3.6 Let $x, y \in X/I$. If $[x]_I \in X/I$ and $[y]_I \in X/I$, then $[x * y]_I \in X/I$.

Proof. By definition, if $[x]_I \in X/I$ then $x \in X$ and if $y \in [y]_I$, then $y \in X$. Since $*$ is a binary operation on X , we have $x * y \in X$. Therefore, $[x * y]_I \in X/I$.

Definition 3.7 We define an operation $\circ$ on X/I by

$$[x]_I \circ [y]_I = [x * y]_I.$$

From Lemma 3.6, this operation is a binary operation on X/I .

Theorem 3.8 If I is an ideal of a commutative BBG-algebra X with quotient set $X/I = \{[x]_I : x \in X\}$ and a binary operation $\circ$, then $\circ$ is a mapping from $X/I \times X/I$ to X/I .

Proof. Let $[x_1]_I, [x_2]_I \in X/I$. From Lemma 3.6, we have $[x_1]_I \circ [x_2]_I \in X/I$.

We prove that if $[y_1]_I = [x_1]_I \circ [x_2]_I \in X/I$ and $[y_2]_I = [x_1]_I \circ [x_2]_I \in X/I$, then $[y_1]_I = [y_2]_I$.

If $[y_1]_I = [x_1]_I \circ [x_2]_I$, then $[y_1]_I = [x_1]_I \circ [x_2]_I$ implies that $y_1 \sim x_1 * x_2$. Similarly, if $[y_2]_I = [x_1]_I \circ [x_2]_I$, then $y_2 \sim x_1 * x_2$. By the transitivity property of $\sim$, we have $y_1 \sim y_2$ and $[y_1]_I = [y_2]_I$. Therefore, if $[x_1]_I \in X/I$ and $[x_2]_I \in X/I$, then there exists a unique $[y]_I = [x_1]_I \circ [x_2]_I \in X/I$. The proof is complete.

Theorem 3.9 Let I be an ideal of a commutative BBG-algebra $(X, *, 0)$. Then $(X/I, \circ, [0]_I)$ is a commutative BBG-algebra. The set X/I is called the quotient commutative BBG-algebra X/I .

Proof. We first prove that $(X/I, \circ, [0]_I)$ is a BBG-algebra.

(BBG-1) If $[x]_I, [y]_I, [z]_I \in X/I$, then $[0]_I \circ [x]_I = [x * 0]_I = [0]_I$.

(BBG-2) It is clear that $[0]_I \circ [x]_I = [0 * x]_I = [x]_I$.

(BBG-3) Consider

$$\begin{aligned} [x]_I \circ ([y]_I \circ [z]_I) &= [x]_I \circ [y * z]_I \\ &= [x * (y * z)]_I \\ &= [((y * 0) * x) * z]_I \\ &= [((y * 0) * x)_I \circ [z]_I] \\ &= (([y * 0]_I) \circ [x]_I) \circ [z]_I \\ &= (([y]_I \circ [0]_I) \circ [x]_I) \circ [z]_I. \end{aligned}$$

We prove that $(X/I, \circ, [0]_I)$ is a commutative BBG-algebra.

$$\begin{aligned} ([x]_I \circ [0]_I) \circ [y]_I &= [x * 0]_I \circ [y]_I \\ &= [(x * 0) * y]_I \\ &= [(y * 0) * x]_I \\ &= [y * 0]_I \circ [x]_I \\ &= ([y]_I \circ [0]_I) \circ [x]_I. \end{aligned}$$

Therefore, from Definition 1.3, $(X/I, \circ, [0]_I)$ is a commutative BBG-algebra.

Example 3.10 Let $X = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ be a BBG-algebra with $*$ operation defined in Table 2 of Example 2.4. We can define a quotient algebra as $X/I = \{[0]_I, [3]_I\}$, where $[0]_I = [1]_I$

$= [2]_I = \{0, 1, 2\}$ and $[3]_I = [4]_I = [5]_I = \{3, 4, 5\}$. The operator $\circ$ can be defined on X/I as shown in Table 4.

Table 4: Definition of $\circ$ for Example 3.10, with $X/I = \{[0]_I, [3]_I\}$

$*$	$[0]_I$	$[3]_I$
$[0]_I$	$[0]_I$	$[3]_I$
$[3]_I$	$[3]_I$	$[0]_I$

Example 3.11 Let $X = \{0, 1, 2, 3\}$ be a BBG-algebra with $*$ operation defined in Table 3 of Example 2.5. We can define a quotient algebra as $X/I = \{[0]_I, [1]_I\}$, where $[0]_I = [2]_I = \{0, 2\}$ and $[1]_I = [3]_I = \{1, 3\}$. The operator $\circ$ can be defined on X/I as shown in Table 5.

Table 5: Definition of $\circ$ for Example 3.11, with $X/I = \{[0]_I, [1]_I\}$

$*$	$[0]_I$	$[1]_I$
$[0]_I$	$[0]_I$	$[1]_I$
$[1]_I$	$[1]_I$	$[0]_I$

Lemma 3.12 Let I be an ideal of a BBG-algebra X , and J be any subset of X with $I \subseteq J \subseteq X$. Then J is an ideal of X if and only if J/I is an ideal of X/I .

Proof. Let I be an ideal of BBG-algebra X with $I \subseteq J \subseteq X$. We first prove that if J is an ideal of X then J/I is an ideal of X/I . Since I and J are ideals of X , we have from property (I-1) of an ideal that $0 \in I$ and $0 \in J$. Also, since $0 * 0 = 0 \in J$, we have from Definition 3.5 that $[0]_I \in J/I$ and therefore J/I satisfies property (I-1) for an ideal. We now prove property (I-2) for J/I . We assume that $[x]_I \in J/I$ and $[x]_I \circ [y]_I \in J/I$. Therefore, $x \in J$ and also by Definition 3.7, $[x * y]_I = [x]_I \circ [y]_I \in J/I$. Therefore, $x * y \in J$, and since J is an ideal, $x \in J$ and $x * y \in J$ implies that $y \in J$ and hence $[y]_I \in J/I$. We prove that if J/I is an ideal of X/I , then J is an ideal of X . From property (I-1) of an ideal $[0]_I \in J/I$, and therefore $0 \in J$. To prove property (I-2) for J , we must prove that if $x \in J$ and $x * y \in J$ then $y \in J$. We assume that $[x]_I, [x]_I \circ [y]_I \in J/I$. Therefore, $x \in J$, since $[x * y]_I = [x]_I \circ [y]_I \in J/I$, we also have $x * y \in J$. However, since J/I is an ideal, $[x]_I, [x]_I \circ [y]_I \in J/I$ implies that $[y]_I \in J/I$ and therefore that $y \in J$. Therefore, J satisfies property (I-2) and the proof is complete.

Lemma 3.13 Let I be a closed ideal of a BBG-algebra X and J be a subset of X with $I \subseteq J \subseteq X$. Then J is a closed ideal of X if and only if J/I is a closed ideal of X/I .

Proof. Using Lemma 3.12, we prove that the ideals are closed. We first prove that if J is a closed ideal of X then J/I is a closed ideal of X/I . From Lemma 3.12, J/I is an ideal. Since J is closed, if $x, y \in J$, then $x * y \in J$. Now, assume that $[x]_I \in J/I$ and $[y]_I \in J/I$. Since $[x]_I \circ [y]_I = [x * y]_I$ and $x * y \in J$, we have $[x]_I, [x]_I \circ [y]_I \in J/I$ and therefore J/I is closed. We prove that if J/I is a closed ideal of X/I then J is a closed ideal of X . From Lemma 3.12, J is an ideal. Since J/I is closed, if $[x]_I \in J/I$ and $[y]_I \in J/I$, then $[x]_I \circ [y]_I \in J/I$. Therefore, $x \in J$ and $y \in J$. Since $[x * y]_I = [x]_I \circ [y]_I \in J/I$, we have $x * y \in J$. Therefore J is closed and hence J is a closed ideal of X .

Lemma 3.14 If I and J are ideals of a BBG-algebra X with $I \subseteq J \subseteq X$, then I is an ideal of J .

Proof. Since I is an ideal of X , we have that for all $x, y \in X$, if $x \in I$ and $x * y \in I$ then $y \in J$. Now, since $J \subseteq X$, we have that for all $x, y \in J$, if $x \in I$ and $x * y \in I$ then $y \in I$. Therefore I is an ideal in J .

Lemma 3.15 Let I be a closed ideal of a BBG-algebra X . For all $a, b \in X$, Then:

- (1) $[a]_I = I$ iff $a \in I$.
- (2) Either $[a]_I = [b]_I$ or $[a]_I \cap [b]_I = \emptyset$.

Proof. Let I be a closed ideal of a BBG-algebra X and $a, b \in X$.

(1) We first prove that if $[a]_I = I$, then $a \in I$. By definition, $x \in [a]_I$ if and only if $x \in X$ and $x \sim a$, i.e., $x * a \in I$ and $a * x \in I$. Since $a \sim a$ and $a * a = 0 \in I$, we have $a \in [a]_I$. Since $[a]_I = I$, we have $a \in I$. We prove that if $a \in I$, then $[a]_I = I$ by proving that if $x \in I$ then $x \in [a]_I$ and if $x \in [a]_I$ then $x \in I$. Let $x \in I$. Then, since $a \in I$ and I is a closed ideal, we have $a * x \in I$ and $x * a \in I$. Therefore, $a \sim x$ and hence $x \in [a]_I$. Let $x \in [a]_I$. Then, $a * x \in I$ and $x * a \in I$. Since $a \in I$ and $a * x \in I$, we have $x \in I$ from the definition of the ideal I .

(2) We consider three cases: For a closed ideal I either (a) $a, b \in I$, (b) $a \in I$ and $b \notin I$ and (c) $a, b \notin I$.

(a) From part 1, if $a, b \in I$, then $[a]_I = I$ and $[b]_I = I$. Therefore, $[a]_I = [b]_I$.

(b) Assume that $a \in I$, $b \notin I$ and that $[a]_I \cap [b]_I$ is not an empty set. There exists an element $x \in X$ such that $x \in [a]_I$ and $x \in [b]_I$. However, by definition of $[b]_I$ if $x \in [b]_I$, then $x * b \in I$ and $b * x \in I$. But, from part 1, if $x \in [a]_I$, then $x \in I$. Therefore, $x \in I$ and $x * b \in I$. By definition of the ideal I , we have the contradiction that $b \in I$.

(c) From part 1, if $a, b \notin I$, then $[a]_I, [b]_I = I$. Therefore, $[a]_I = [b]_I$ or $[a]_I \cap [b]_I = \emptyset$.

Corollary 3.16 If I is a closed ideal of a BBG-algebra X and $y \in I$, then $[y]_I$ is a closed ideal of X .

Proof. From part 1 of Lemma 3.15, if I is a closed ideal of X and $y \in I$, then $[y]_I = I$ is also closed.

Example 3.17 Let $X = \{0, 1, 2, 3\}$ be a commutative BBG-algebra with $*$ operation defined in Table 3 of Example 2.5 and $I = \{0, 2\}$ is closed ideals of X . Then the quotient set as $X/I = \{[0]_I, [1]_I\}$, where $[0]_I = [2]_I = \{0, 2\}$ and $[1]_I = [3]_I = \{1, 3\}$. From Lemma 3.15 we will shown that,

1. $[a]_I = I$ iff $a \in I$, we will have $[0]_I = [2]_I = \{0, 2\} = I$ and $0, 2 \in I$.
2. $[a]_I = [b]_I$ or $[a]_I \cap [b]_I = \emptyset$.
 - (a) For $a, b \in I$, we have $0, 2 \in I$ and that $[0]_I = [2]_I$.
 - (b) For $a \in I$ and $b \notin I$, we have $0 \in I$ and $1 \notin I$, such that $[0]_I \cap [1]_I = \emptyset$.
 - (c) For $a, b \notin I$, we have $1, 3 \notin I$ and that $[1]_I = [3]_I$.

Acknowledgements

We wish to thank the staff of the Department of Mathematics, King Mongkut's University of Technology North Bangkok for their charitable assistance and cooperation which has helped us to complete this research. We are particularly indebted to KMUTNB for granting us financial assistance for this research through their research fund.

References

- Asawasamrit, S. & Leerawat, U. (2010) On quotient binary algebras. *Scientia Magna*, 6(1), 1035-1044.
- Asawasamrit, S. & Sudprasert, A. (2012) A structure of KK-algebras and its properties. *International Journal of Mathematical Analysis*, 6(21), 1035-1044.
- Dudek, W. A. & Zhang, X. (1998) On ideals and congruences in BCC-algebras, *Czechoslovak Mathematical Journal*, 48(1), 21-29. <https://doi.org/10.1023/A:1022407325810>
- Ding, Y. & Pang, Z. (2007) Congruences and quotient algebras BCI-algebras, *Formalized Mathematics*, 15(4), 175-180. <https://doi.org/10.2478/v10037-007-0021-8>
- Prabpayak, C. & Leerawat, U. (2009) On ideals and congruences in KU-algebras, *Scientia Magna*, 5(1), 54-57.
- Tearnbucha C. & Asawasamrit S. (2015). *On BBG-algebras and quasigroups*. pp. 327-333. In The 20th Annual Meeting in Mathematics, 27-29 May 2015, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom.

Research Article

การวัดสมรรถนะของแผนการชักตัวอย่างแบบต่อเนื่องระดับเดียว สำหรับสายการผลิตระยะสั้น

Performance measures of single-level continuous sampling plans for short production runs

ธิดาเดียว มยุรีสุวรรณ*

Tidadeaw Mayureesawan*

ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

Department of Statistics, Faculty of Science, Khon Kaen University, Muang, Khon Kaen 40002

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

Received: 16/03/2017; Accepted: 4/05/2017

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ได้เปรียบเทียบสมรรถนะของแผนการชักตัวอย่างแบบต่อเนื่องจำนวน 2 แผนคือ แผนการชักตัวอย่าง CSP-C (generalized CSP-C) และแผนการชักตัวอย่าง MCSP-C (modified CSP-C) ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะโดยใช้ค่าสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ถูกตรวจสอบโดยเฉลี่ย (average fraction inspected: AFI) และค่าคุณภาพผ่านออกโดยเฉลี่ย (average outgoing quality: AOQ) ด้วยวิธีการจำลองการตรวจสอบสายการผลิตโดยใช้โปรแกรมภาษา C และโปรแกรม R ที่ระดับต่าง ๆ ของค่าพารามิเตอร์จำนวน 5 ค่าได้แก่ ค่าความยาวสายการผลิต (L) เท่ากับ 21 ระดับ ค่าสัดส่วนผลิตภัณฑ์บกพร่องของสายการผลิต (p) เท่ากับ 7 ระดับ ค่าจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์ที่ต้องตรวจพบติดต่อกันในช่วงการตรวจสอบแบบ 100% (i) เท่ากับ 2 ระดับ ค่าอัตราส่วนในการชักผลิตภัณฑ์ขึ้นมาตรวจสอบ (f) เท่ากับ 2 ระดับ ค่าจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์บกพร่องที่ยอมรับได้ในระหว่างการตรวจสอบแบบอัตราส่วน (c) เท่ากับ 2 ระดับ ค่าจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์ที่ยอมรับได้ก่อนพบผลิตภัณฑ์บกพร่อง c หน่วยในช่วงการตรวจสอบแบบอัตราส่วน ($m=i$) ของแผนการชักตัวอย่าง MCSP-C ผลการศึกษาพบว่า ค่า AFI ของ MCSP-C จะต่ำกว่า CSP-C กรณีที่ p มีค่าต่ำ ($p=0.005, 0.01, 0.015, 0.02$) ในทุกระดับค่า L, i, f และ c กรณีที่ p มีค่าสูง ($p=0.025, 0.03, 0.035$) พบว่าเมื่อช่วงของ L สั้น ค่า AFI ของ MCSP-C จะต่ำกว่า CSP-C แต่เมื่อช่วงของ L ยาว ค่า AFI ของ MCSP-C จะสูงกว่า CSP-C เล็กน้อย ผลการศึกษาค่า AOQ พบว่าค่า AOQ ของ CSP-C ต่ำกว่า MCSP-C กรณีที่ p มี

ค่าต่ำ ($p=0.005, 0.01, 0.015, 0.02$) ในทุกระดับค่า L, i, f และ c ส่วนกรณีที่ p มีค่าสูง ($p=0.025, 0.03, 0.035$) พบว่า หากช่วงของ L สั้น ค่า AOQ ของ CSP-C จะต่ำกว่า MCSP-C หากช่วงของ L ยาว ค่า AOQ ของ CSP-C จะสูงกว่า MCSP-C

คำสำคัญ: การวัดสมรรถนะ, แผนการชักตัวอย่างแบบต่อเนื่องระดับเดียว, สายการผลิตระยะสั้น

Abstract

This research compared the performance measures of the two continuous sampling plans: CSP-C (generalized CSP-C) and MCSP-C (modified CSP-C). The average fraction inspected (AFI) and the average outgoing quality (AOQ) were the performance measures to be used. Simulations was carried out and inspected with C and R program for different levels of five following parameters: 21 levels of lengths of the production line (L), 7 levels of fractions of defective units on the line (p), 2 levels of the number of consecutive non-defective units to be found during a 100% inspection of units (i), 2 levels of fractional inspection of units (f) and 3 levels of maximum allowable number of nonconforming units in sampling fractions (c). The number of conforming units to be found before allowing c non-conforming units in the sampling inspection was also simulated for the MCSP-C continuous sampling plans ($m=i$). The results showed that the AFI values of MCSP-C were lower than the CSP-C in the case of the low levels of p ($p=0.005, 0.01, 0.015, 0.02$) for all sets of L, i, f and c . At high level of p ($p=0.025, 0.03, 0.035$) and for a short range of L , the AFI values of MCSP-C were lower than the CSP-C. For a long range of L , the AFI values of MCSP-C were a little higher than the CSP-C. The results for the AOQ values indicated that the AOQ values of CSP-C were lower than the MCSP-C at the low levels of p ($p=0.005, 0.01, 0.015, 0.02$) for all sets of L, i, f and c . At high levels of p ($p=0.025, 0.03, 0.035$) and short range of L , the AOQ values of CSP-C were lower than the MCSP-C. For the high range of L , the AOQ values of CSP-C were greater than the MCSP-C.

Keywords: performance measures, single-level continuous sampling plans, short production runs

บทนำ

แผนการชักตัวอย่างแบบต่อเนื่อง (continuous sampling plan: CSP) เป็นแผนการชักตัวอย่างที่ใช้ตรวจสอบผลิตภัณฑ์จากสายการผลิตที่มีลักษณะการผลิตทีละ 1 หน่วยตามลำดับ การใช้ CSP ตรวจสอบสายการผลิตคือ จะชักผลิตภัณฑ์ขึ้นมาตรวจสอบทีละ 1 หน่วยตามลำดับการผลิต โดยแบ่งผลลัพธ์การตรวจสอบเป็น 2 ทางคือบกพร่องและดี CSP มี 2 แบบคือแบบระดับเดียวและแบบหลายระดับ โดย CSP แบบระดับเดียวนั้นแรก

คือ CSP-1 (continuous sampling plan type 1) พัฒนาโดย Dodge ในปี ค.ศ. 1943 (Dodge, 1943) การตรวจสอบโดย CSP-1 คือ เริ่มต้นตรวจสอบผลิตภัณฑ์แบบ 100% ติดต่อกันไปเรื่อยๆ จนกระทั่งมีจำนวน i หน่วยติดต่อกันเป็นผลิตภัณฑ์ดีหมด การตรวจแบบ 100% จะสิ้นสุดลงแล้วเปลี่ยนเป็นแบบตรวจบางส่วนด้วยอัตราส่วน f หรือตรวจ 1 หน่วยในทุกๆ r หน่วย ($f = 1/r$) ขณะที่ตรวจแบบบางส่วน ถ้าพบผลิตภัณฑ์บกพร่อง การตรวจแบบบางส่วนจะสิ้นสุดลงและเปลี่ยนกลับเป็นตรวจแบบ 100% เหมือนเดิม การตรวจสอบจะดำเนินการซ้ำเช่นนี้เรื่อยไป ทุกครั้งที่ตรวจพบผลิตภัณฑ์บกพร่องจะแทนที่ด้วยผลิตภัณฑ์ดี ต่อมานักวิจัยได้พัฒนา CSP ขึ้นมาอีกหลายชนิด ทั้งพัฒนาจาก CSP-1 ได้แก่ CSP-2, CSP-3, CSP-4, CSP-5, CSP-F, CSP-V, CSP-C, CSP-M, MCSP-C เป็นต้น (Mitra, 1993; Montgomery, 2009; Schilling & Neubauer, 2009) และพัฒนาโดยปรับปรุงจากแผนอื่นที่เกิดขึ้นก่อน CSP ทุกแผนจะมีสูตรคำนวณค่าวัดคุณลักษณะที่สำคัญ 2 ค่าคือ ค่าสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ถูกตรวจสอบโดยเฉลี่ย (average fraction inspected: AFI) และค่าคุณภาพผ่านออกโดยเฉลี่ย (average outgoing quality: AOQ) โดย AFI คือค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่างจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์ที่ถูกตรวจสอบในทุกช่วงของการตรวจสอบ กับจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิตทั้งหมด เช่น AFI เท่ากับ 0.70 หมายความว่า โดยเฉลี่ยแล้วจะมีจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ถูกตรวจสอบคิดเป็น 70% ของจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิตทั้งหมด ค่า AFI มีประโยชน์ด้านการวิเคราะห์ต้นทุนที่เกิดจากการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ ส่วน AOQ คือค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่างจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์บกพร่องที่หลุดออกไปโดยตรวจไม่พบ กับจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิตทั้งหมด เช่น กระบวนการผลิตมีสัดส่วนผลิตภัณฑ์บกพร่อง (p) เท่ากับ 0.03 นั่นคือหากไม่ตรวจสอบสายการผลิต ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านออกไปจะมีผลิตภัณฑ์บกพร่องปนอยู่ 3% แต่หากใช้ CSP ชนิดหนึ่งตรวจสอบสายการผลิตแล้วให้ค่า AOQ เท่ากับ 0.015 จะหมายความว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านออกไปจะมีผลิตภัณฑ์บกพร่องปนอยู่ 1.5% เป็นต้น

Govindaraju & Kandasamy (2000) ได้พัฒนาแผนการชักตัวอย่าง CSP-C (generalized CSP-C continuous sampling plans) ขึ้นในปี ค.ศ. 2000 โดยพัฒนาจาก CSP-1 เพื่อลดจำนวนการตรวจสอบในช่วงการตรวจสอบแบบ 100% ลง จุดเด่นของ CSP-C คือเป็นการออกแบบให้มีการเปลี่ยนกลับการตรวจสอบจากการตรวจแบบบางส่วนด้วยอัตราส่วน f เป็นแบบ 100% ซ้ำลงด้วยการกำหนดค่า c ขึ้นมา โดยค่า c คือจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์บกพร่องที่ยอมรับได้ในระหว่างการตรวจสอบแบบตรวจบางส่วนก่อนที่จะเปลี่ยนกลับการตรวจสอบเป็นแบบ 100% ขั้นตอนการตรวจสอบโดย CSP-C คือ จะเริ่มต้นทำการตรวจสอบผลิตภัณฑ์แบบ 100% ติดต่อกันไปเรื่อยๆ จนกระทั่งพบผลิตภัณฑ์ดี i หน่วยติดต่อกัน การตรวจสอบผลิตภัณฑ์แบบ 100% จะสิ้นสุดลง และเปลี่ยนการตรวจสอบเป็นแบบสุ่มตรวจบางส่วน การตรวจสอบแบบบางส่วนทำโดยชักผลิตภัณฑ์แบบไม่เอนเอียงจากสายการผลิตมาตรวจสอบด้วยอัตราส่วน f ($f = 1/r$) และทำการตรวจสอบด้วยอัตราส่วน f ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งพบผลิตภัณฑ์บกพร่องจำนวน $c+1$ หน่วย ในขณะที่ตรวจแบบอัตราส่วน f และพบผลิตภัณฑ์บกพร่องจำนวน $c+1$ หน่วย การตรวจสอบด้วยอัตราส่วน f จะสิ้นสุดลง และเปลี่ยนกลับการตรวจสอบเป็นแบบ 100% โดยการตรวจสอบจะดำเนินการตามขั้นตอน

แรกใหม่ และทุกครั้งที่พบผลิตภัณฑ์บกพร่อง จะทำการแก้ไขหรือแทนที่ด้วยผลิตภัณฑ์ CSP-C มีค่าวัดคุณลักษณะของแผนการสร้างขึ้นโดยใช้หลักการของลูกโซ่มาร์คอฟ (markov chain) ดังนี้

สำหรับค่าสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ถูกตรวจสอบโดยเฉลี่ย (AFI) กำหนดโดย

$$AFI = \frac{f(1+cq^i)}{f+q^i(c+1-f)} \quad (1)$$

เมื่อ f คืออัตราส่วนในการชักตัวอย่างผลิตภัณฑ์ขึ้นมาตรวจสอบในช่วงการตรวจสอบแบบตรวจบางส่วน

c คือจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์บกพร่องที่ยอมรับได้ในช่วงการตรวจสอบแบบตรวจบางส่วน

p คือค่าสัดส่วนผลิตภัณฑ์บกพร่องของกระบวนการผลิต

q คือค่าสัดส่วนผลิตภัณฑ์ดีของกระบวนการผลิต ($q = 1-p$)

i คือจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์ที่ต้องตรวจพบติดต่อกันในช่วงการตรวจสอบแบบ 100%

สำหรับค่าคุณภาพผ่านออกโดยเฉลี่ย (AOQ) กำหนดโดย

$$AOQ = \frac{pq^i(c+1)(1-f)}{f+q^i(c+1-f)} \quad (2)$$

Balamurali & Subramani (2004) ได้ปรับปรุงขั้นตอนการตรวจสอบของ CSP-C ในปี ค.ศ. 2004 และกำหนดชื่อแผนว่า MCSP-C (modified CSP-C continuous sampling plans) โดย MCSP-C จะมีพารามิเตอร์ m เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่ง m คือจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์ดีที่ยอมรับได้ในช่วงการตรวจสอบแบบตรวจบางส่วน ขั้นตอนการตรวจสอบแบบ 100% ของ MCSP-C จะเหมือน CSP-C แต่แตกต่างกันในขั้นตอนการตรวจสอบแบบตรวจบางส่วน ด้วยอัตราส่วน f คือ ถ้าในช่วงตรวจสอบด้วยอัตราส่วน f หากพบผลิตภัณฑ์บกพร่องหน่วยแรกก่อนที่จะตรวจผลิตภัณฑ์ครบ m หน่วย การตรวจสอบจะเปลี่ยนเป็นแบบตรวจ 100% ทันที แต่ถ้าการตรวจผลิตภัณฑ์ m หน่วยพบว่าผลิตภัณฑ์ดีหมด การตรวจสอบแบบอัตราส่วน f จะยังคงดำเนินต่อไปจนกระทั่งพบผลิตภัณฑ์บกพร่อง $c+1$ หน่วย การตรวจสอบจึงจะเปลี่ยนกลับเป็นแบบ 100% นั่นคือช่วงการตรวจสอบแบบอัตราส่วน f จะเปลี่ยนกลับ การตรวจสอบเป็นแบบ 100% อย่างรวดเร็วหากพบผลิตภัณฑ์บกพร่องหน่วยแรกภายในการตรวจสอบ m หน่วย ขั้นตอนการตรวจสอบโดย MCSP-C คือ จะเริ่มต้นทำการตรวจสอบผลิตภัณฑ์แบบ 100% ติดต่อกันไปเรื่อยๆ จนกระทั่งพบผลิตภัณฑ์ดี i หน่วยติดต่อกัน การตรวจสอบผลิตภัณฑ์แบบ 100% จะสิ้นสุดลง และเปลี่ยนการตรวจสอบเป็นแบบสุ่มตรวจบางส่วน การตรวจสอบแบบบางส่วนทำโดยชักผลิตภัณฑ์แบบไม่เอนเอียงจาก

สายการผลิตมาตรวจสอบด้วยอัตราส่วน f ($f = 1/r$) และทำการตรวจสอบไปเรื่อยๆ ในขณะที่ตรวจสอบแบบอัตราส่วน f ถ้าพบผลิตภัณฑ์บกพร่องจำนวน c หน่วยหลังจากพบ m หน่วยติดต่อกันเป็นผลิตภัณฑ์ดีหมด การตรวจสอบด้วยอัตราส่วน f จะดำเนินต่อไป ในขณะที่ตรวจสอบแบบอัตราส่วน f ถ้าพบผลิตภัณฑ์บกพร่อง 1 หน่วยก่อนพบผลิตภัณฑ์ดี m หน่วยติดต่อกัน หรือพบผลิตภัณฑ์บกพร่องจำนวน $c+1$ หน่วยหลังจากพบ m หน่วยติดต่อกันเป็นผลิตภัณฑ์ดีหมด จะเปลี่ยนกลับการตรวจสอบเป็นแบบ 100% ทันที และทุกครั้งที่พบผลิตภัณฑ์บกพร่อง จะทำการแก้ไขหรือแทนที่ด้วยผลิตภัณฑ์ดี แผนการชักตัวอย่าง MCSP-C มีค่าวัดคุณลักษณะของแผนดังนี้

ค่าสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ถูกตรวจสอบโดยเฉลี่ย (AFI) กำหนดโดย

$$AFI = \frac{f(1+cq^{i+m})}{f(1-q^i)+q^i(1-q^m)+(c+1)q^{i+m}} \quad (3)$$

เมื่อ f คืออัตราส่วนในการชักตัวอย่างผลิตภัณฑ์ขึ้นมาตรวจสอบในช่วงการตรวจสอบแบบตรวจบางส่วน

c คือจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์บกพร่องที่ยอมรับได้ในระหว่างการตรวจสอบแบบตรวจบางส่วน

p คือค่าสัดส่วนผลิตภัณฑ์บกพร่องของกระบวนการผลิต

q คือค่าสัดส่วนผลิตภัณฑ์ดีของกระบวนการผลิต ($q = 1-p$)

i คือจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์ที่ต้องตรวจพบติดต่อกันในช่วงการตรวจสอบแบบ 100%

ค่าคุณภาพผ่านออกโดยเฉลี่ย (AOQ) กำหนดโดย

m คือจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์ที่ยอมรับได้ในระหว่างการตรวจสอบแบบตรวจบางส่วน

$$AOQ = \frac{pq^i(1-f)(1+cq^m)}{f(1-q^i)+q^i(1-q^m)+(c+1)q^{i+m}} \quad (4)$$

สูตร AFI และ AOQ สร้างขึ้นสำหรับสายการผลิตระยะยาว แต่บางครั้งกระบวนการผลิตอาจเป็นสายการผลิตระยะสั้น (short production runs) ที่ไม่ยาวมาก ทำให้เกิดปัญหาว่าเมื่อใช้ CSP ตรวจสอบจะได้ค่า AFI และ AOQ ที่เกิดขึ้นจริงตรงตามที่ประมาณได้จากสูตรหรือไม่ Karithap (2009) ได้เคยทำการศึกษาผลของความยาวสายการผลิตต่อค่า AFI และ AOQ ของ CSP ชนิดหลายระดับจำนวน 2 แผนคือ CSP-M และ MCSP-T และ Mayuresawan (2014) ได้ทำการศึกษาผลของความยาวสายการผลิตต่อค่า AFI และ AOQ ของ CSP ชนิดระดับเดียวจำนวน 2 แผนคือ CSP-1 และ CSP-V โดยวิธีการจำลองการตรวจสอบสายการผลิตที่มีความยาวระดับต่างๆ ซ้ำจำนวนมาก นำค่า AFI และ AOQ ที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบกับที่ได้จากสูตรคำนวณ ผลการศึกษาพบว่า

ความยาวของสายการผลิตมีผลต่อความแม่นยำของสูตร AFI และ AOQ จริง โดยความแม่นยำของสูตรขึ้นอยู่กับระดับค่า p และระดับค่าพารามิเตอร์ของแผนที่กำหนดใช้ในการตรวจสอบด้วย

ดังนั้น สำหรับสายการผลิตระยะสั้น สูตรคำนวณค่า AFI และ AOQ ที่ผู้ออกแบบแผนสร้างขึ้นอาจขาดความแม่นยำในบางสถานการณ์ของการผลิต และในกรณีที่ผู้ตรวจสอบต้องการเปรียบเทียบค่า AFI และ AOQ ของแผนการชักตัวอย่างชนิดต่างๆ เพื่อตัดสินใจในการเลือกใช้แผนการชักตัวอย่างให้เหมาะสมกับระดับความยาวของสายการผลิต อาจไม่สามารถเปรียบเทียบได้จากค่า AFI และ AOQ ที่ได้จากสูตรคำนวณ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจหาค่าและเปรียบเทียบค่า AFI และ AOQ ของ CSP ระดับเดียวสำหรับสายการผลิตระยะสั้น ด้วยวิธีการจำลองการตรวจสอบสายการผลิต โดย CSP ที่น่าสนใจจำนวน 2 แผนที่ศึกษาได้แก่ แผนการชักตัวอย่าง CSP-C (generalized CSP-C continuous sampling plans) และแผนการชักตัวอย่าง MCSP-C (modified CSP-C continuous sampling plans) ทำการศึกษาในแต่ละสถานการณ์ของการผลิตที่เปลี่ยนไป ได้แก่ ความยาวของสายการผลิต ค่าสัดส่วนผลิตภัณฑ์บกพร่องของกระบวนการผลิต และระดับค่าพารามิเตอร์ของ CSP-C และ MCSP-C เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ตรวจสอบการผลิตสามารถเลือกใช้แผนการชักตัวอย่างที่ตรงตามความต้องการและตรงตามคุณลักษณะของกระบวนการผลิตได้

วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบสมรรถนะของแผนการชักตัวอย่างแบบต่อเนื่องทั้ง 2 แผนด้วยค่าวัด 2 ค่า โดยค่าแรกคือ ค่าคุณภาพผ่านออกโดยเฉลี่ย (average outgoing quality: AOQ) ซึ่งหมายถึงค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่างจำนวนผลิตภัณฑ์บกพร่องที่ผ่านออกไปโดยไม่ถูกตรวจพบ กับจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ผ่านออกไปทั้งหมดตลอดความยาวรอบ โดยความยาวรอบหมายถึงจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ผ่านไบนสายการผลิตตั้งแต่ช่วงการตรวจสอบแบบตรวจ 100% จนกระทั่งจบด้วยช่วงการตรวจสอบแบบตรวจบางส่วน ภายใต้เงื่อนไขว่าผลิตภัณฑ์บกพร่องที่ถูกตรวจพบทั้งหมดต้องถูกแก้ไขหรือแทนที่ด้วยผลิตภัณฑ์ดี จึงทำให้ไม่มีผลิตภัณฑ์บกพร่องผ่านออกไปในช่วงตรวจแบบ 100% นอกจากค่า AOQ แล้ว ค่าวัดสมรรถนะของแผนอีกค่าหนึ่งคือ ค่าสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ถูกตรวจสอบโดยเฉลี่ย (average fraction inspected: AFI) ซึ่งค่า AFI หมายถึงค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่างจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ถูกตรวจสอบทั้งหมด (average total inspection: ATI) กับความยาวรอบ โดยค่า ATI เป็นผลรวมของจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ถูกตรวจสอบในช่วงตรวจสอบแบบ 100% และจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ถูกตรวจสอบในช่วงตรวจสอบแบบบางส่วน ส่วนความยาวรอบหมายถึงจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ผ่านไบนสายการผลิตตั้งแต่ช่วงการตรวจสอบแบบ 100% จนกระทั่งจบด้วยช่วงการตรวจสอบแบบตรวจบางส่วน การเปรียบเทียบค่า AFI และ AOQ ของแผนการชักตัวอย่าง CSP-C และ MCSP-C มีวิธีดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. ใช้โปรแกรม R จำลองกระบวนการผลิตทีละ 1 หน่วยคล้ายสายการผลิต กำหนดสายการผลิตมีความยาว (L) เท่ากับ 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2400, 2600, 2800, 3000, 3200, 3400, 3600, 3800 และ 4000 หน่วย โดยที่แต่ละสายการผลิตมีส่วนผลิตกันบกพร่องคือ p เท่ากับ 0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.025, 0.03 และ 0.035 ในแต่ละระดับค่า p และ L จำลองสายการผลิตซ้ำ 100 สายการผลิต

2. กำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ของแผนดังนี้

2.1 สำหรับ CSP-C และ MCSP-C กำหนดจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์ที่ต้องตรวจพบติดต่อกันในช่วงตรวจสอบแบบ 100% (i) เท่ากับ 10 และ 20 กำหนดอัตราส่วนในการชักผลิตภัณฑ์ขึ้นมาตรวจสอบในช่วงการตรวจสอบแบบตรวจบางส่วน (f) เท่ากับ $1/2$ และ $1/3$

2.2 สำหรับ CSP-C กำหนดจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์บกพร่องที่ยอมรับได้ในช่วงตรวจสอบแบบตรวจบางส่วน (c) เท่ากับ 1, 2 และ 3

2.3 สำหรับ MCSP-C กำหนดจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์ที่ยอมรับได้ในช่วงการตรวจสอบแบบตรวจบางส่วน (m) โดย $m = i$ และกำหนดจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์บกพร่องที่ยอมรับได้ในช่วงการตรวจสอบแบบตรวจบางส่วน (c) เท่ากับ 1, 2 และ 3

3. เขียนโปรแกรม Visual C++ เพื่อจำลองการตรวจสอบสายการผลิต โดยสายการผลิตแต่ละระดับค่า p และ L จะถูกจำลองการตรวจสอบด้วยแผนการชักตัวอย่างทั้ง 2 ตามระดับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดใช้ในขอบเขตการวิจัย ในขณะที่จำลองการตรวจสอบสายการผลิต จะคำนวณค่าสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ถูกตรวจสอบ (fraction inspected: FI) และค่าคุณภาพผ่านออก (outgoing quality: OQ) โดย FI คำนวณจากอัตราส่วนของ 2 ค่า โดยค่าแรกคือจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์ที่ถูกตรวจสอบในทุกช่วงของการตรวจสอบตลอดสายการผลิต และค่าที่สองคือจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ในทุกช่วงของการตรวจสอบตลอดสายการผลิตซึ่งเท่ากับ L ส่วน OQ คำนวณจากอัตราส่วนของ 2 ค่า โดยค่าแรกคือจำนวนผลิตภัณฑ์บกพร่องที่ผ่านออกไปโดยตรวจไม่พบในทุกช่วงของการตรวจสอบ และค่าที่สองคือจำนวนหน่วยผลิตภัณฑ์ที่ผลิตในทุกช่วงของการตรวจสอบตลอดสายการผลิต ซึ่งเท่ากับ L

4. ในระดับค่า p , L และพารามิเตอร์เดียวกัน จำลองการตรวจสอบสายการผลิตด้วยแผนการชักตัวอย่างแต่ละแผนซ้ำ 100 สาย เพื่อหาค่าเฉลี่ยของ FI และ OQ ค่าเฉลี่ยของ FI คือ AFI และค่าเฉลี่ยของ OQ คือ AOQ แล้วเปรียบเทียบค่า AFI และค่า AOQ เพื่อหาข้อสรุปในแต่ละระดับค่า p , L และแต่ละระดับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดใช้

ผลการวิจัย

การเปรียบเทียบสมรรถนะของแผนการชักตัวอย่าง CSP-C และ MCSP-C ด้วยค่า AFI และค่า AOQ แสดงดังในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ ผลการศึกษาค่า AFI พบว่ากรณี $p=0.005, 0.01, 0.015$ และ 0.02 ให้ผลเช่นเดียวกันคือ แผนการชักตัวอย่าง MCSP-C ให้ค่า AFI ต่ำกว่า CSP-C ทุกระดับค่า i, f, c และ L กรณี $p=0.025$ ที่ $i=10$ พบว่าให้ผลเช่นเดียวกันกับกรณี p ข้างต้น ที่ $i=20$ พบว่า $f=1/2$ และ $f=1/3$ ให้ผลต่างกัน โดยความแตกต่างใน

ค่า AFI ของ MCSP-C และ CSP-C ขึ้นอยู่กับระดับค่า f , c และ L แต่สำหรับสายการผลิตระยะสั้นหรือ L ต่ำ พบว่า MCSP-C ให้ค่า AFI ต่ำกว่า CSP-C เสมอในทุกระดับค่า f และ c แต่เมื่อ L มีค่ามากจะให้ผลตรงกันข้ามคือ MCSP-C ให้ค่า AFI สูงกว่า CSP-C ในทุกระดับค่า i, f และ c กรณี $p=0.03$ และ 0.035 พบว่าให้ผลคล้ายคลึงกับกรณี $p=0.025$ เมื่อ $i=20$ คือสำหรับสายการผลิตระยะสั้นหรือ L ต่ำ MCSP-C ให้ค่า AFI ต่ำกว่า CSP-C ในทุกระดับค่า i, f และ c แต่เมื่อ L มีค่ามากจะให้ผลตรงกันข้ามคือ MCSP-C ให้ค่า AFI สูงกว่า CSP-C ในทุกระดับค่า i, f และ c แต่ผลการเปรียบเทียบค่า AFI ของแผนการชักตัวอย่าง 2 แผนนี้ที่ $p=0.025, 0.03$ และ 0.035 นั้น ระดับของค่า L ที่มีผลต่อความสูงต่ำในค่าของ AFI จะแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับระดับค่า i, f และ c ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

สำหรับผลการศึกษาค่า AOQ ของแผนการชักตัวอย่าง MCSP-C และ CSP-C เนื่องจากค่า AOQ จะตรงกันข้ามกับค่า AFI คือหากแผนใดให้ค่า AFI สูงกว่า แผนนั้นก็ให้ค่า AOQ ต่ำกว่าเสมอ ดังนั้นผลการเปรียบเทียบค่า AOQ ของแผนการชักตัวอย่าง 2 แผนนี้จะตรงกันข้ามกับค่า AFI ดังนี้ กรณี $p=0.005, 0.01, 0.015$ และ 0.02 พบว่าให้ผลเช่นเดียวกัน คือ CSP-C ให้ค่า AOQ ต่ำกว่า MCSP-C ในทุกระดับค่า i, f, c และ L ส่วนกรณี $p=0.025, 0.03$ และ 0.035 สำหรับสายการผลิตระยะสั้นหรือ L ต่ำ พบว่า CSP-C ให้ค่า AOQ ต่ำกว่า MCSP-C เสมอในทุกระดับค่า i, f และ c แต่เมื่อ L มีค่ามากจะให้ผลตรงกันข้ามคือ CSP-C ให้ค่า AOQ สูงกว่า MCSP-C ในทุกระดับค่า i, f และ c ทำนองเดียวกันกับการเปรียบเทียบค่า AFI คือ ผลการเปรียบเทียบค่า AOQ ของแผนการชักตัวอย่าง 2 แผนนี้ที่ $p=0.025, 0.03$ และ 0.035 นั้น ระดับของค่า L ที่มีผลต่อความสูงต่ำในค่าของ AOQ จะแตกต่างกัน โดยพบว่าขึ้นอยู่กับระดับค่า i และ f เป็นสำคัญ ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

ดังนั้นสำหรับการเปรียบเทียบค่า AFI ของแผนการชักตัวอย่าง CSP-C และ MCSP-C กรณีที่ p มีค่าต่ำถึงปานกลาง ($p=0.005, 0.01, 0.015, 0.02$) พบว่า MCSP-C ให้ค่า AFI ต่ำกว่า CSP-C ในทุกระดับค่า L, i, f และ c โดยค่า L มีผลต่อขนาดความต่างในค่า AFI ของ 2 แผนคือ กรณีสายการผลิตมีระยะสั้น MCSP-C จะให้ค่า AFI ต่ำกว่า CSP-C มากกว่ากรณีที่สายการผลิตมีระยะยาว กรณี p มีค่าสูงขึ้น ($p=0.025, 0.03, 0.035$) พบว่าระดับค่า L, i และ f มีผลต่อความแตกต่างในค่า AFI ของ 2 แผน แต่ระดับของค่า c มีผลเล็กน้อย โดยพบว่าหากสายการผลิตมีระยะสั้น MCSP-C จะให้ค่า AFI ต่ำกว่า CSP-C แต่เมื่อสายการผลิตมีระยะยาวจะให้ผลตรงกันข้ามคือ MCSP-C ให้ค่า AFI สูงกว่า CSP-C แต่สูงกว่าเพียงเล็กน้อย และค่า AFI ของทั้ง 2 แผนจะลดลงเมื่อสายการผลิตมีระยะยาวขึ้น สำหรับค่า AOQ ของแผนการชักตัวอย่าง CSP-C และ MCSP-C กรณีที่ p มีค่าต่ำถึงปานกลาง ($p=0.005, 0.01, 0.015, 0.02$) พบว่า CSP-C ให้ค่า AOQ ต่ำกว่า MCSP-C ในทุกระดับค่า L, i, f และ c กรณี p มีค่าสูงขึ้น ($p=0.025, 0.03, 0.035$) พบว่าค่า L, i และ f มีผลต่อความแตกต่างในค่า AOQ ของ 2 แผน แต่ระดับของค่า c ไม่มีผล โดยพบว่าหากสายการผลิตมีระยะสั้น CSP-C จะให้ค่า AOQ ต่ำกว่า MCSP-C แต่เมื่อสายการผลิตมีระยะยาว ผลสรุปจะตรงกันข้ามคือ CSP-C จะให้ค่า AOQ สูงกว่า MCSP-C

ตารางที่ 1. เปรียบเทียบค่า AFI ของแผนการชักตัวอย่าง CSP-C และ MCSP-C ในแต่ละระดับค่า p, i, f, c, L

p	i	f	c	L	ผลการเปรียบเทียบ ค่า AFI	ข้อสังเกตเกี่ยวกับ ระดับความต่างของค่า AFI
0.005, 0.01	ทุกระดับ	ทุกระดับ	ทุกระดับ	ทุกระดับ	MCSP-C < CSP-C	
0.015, 0.02	ทุกระดับ	ทุกระดับ	ทุกระดับ	ทุกระดับ	MCSP-C < CSP-C	L สูงๆ ค่าใกล้เคียงกัน
0.025	10	ทุกระดับ	ทุกระดับ	ทุกระดับ	MCSP-C < CSP-C	L สูงๆ ค่าใกล้เคียงกัน
	20	1/2	ทุกระดับ	< 1200	MCSP-C < CSP-C	
				≥ 1200	MCSP-C > CSP-C	
		1/3	1	< 1600	MCSP-C < CSP-C	
				≥ 1600	MCSP-C > CSP-C	
				< 3600	MCSP-C < CSP-C	
				≥ 3600	MCSP-C > CSP-C	เล็กน้อย
0.03	10	1/2	ทุกระดับ	< 3000	MCSP-C < CSP-C	
				≥ 3000	MCSP-C > CSP-C	เล็กน้อย
		1/3	ทุกระดับ	ทุกระดับ	MCSP-C < CSP-C	L สูงๆ ค่าใกล้เคียงกัน
				ทุกระดับ	MCSP-C < CSP-C	
	20	1/2	ทุกระดับ	< 1600	MCSP-C < CSP-C	
				≥ 1600	MCSP-C > CSP-C	
		1/3	ทุกระดับ	< 3000	MCSP-C < CSP-C	
				≥ 3000	MCSP-C > CSP-C	เล็กน้อย
0.035	10	1/2	ทุกระดับ	< 2200	MCSP-C < CSP-C	
				≥ 2200	MCSP-C > CSP-C	เล็กน้อย
		1/3	ทุกระดับ	ทุกระดับ	MCSP-C < CSP-C	L สูงๆ ค่าใกล้เคียงกัน
				ทุกระดับ	MCSP-C < CSP-C	
	20	1/2	ทุกระดับ	< 1200	MCSP-C < CSP-C	
				≥ 1200	MCSP-C > CSP-C	
		1/3	ทุกระดับ	< 1800	MCSP-C < CSP-C	
				≥ 1800	MCSP-C > CSP-C	เล็กน้อย

ตารางที่ 2. เปรียบเทียบค่า AOQ ของแผนการชักตัวอย่าง CSP-C และ MCSP-C ในแต่ละระดับค่า p, i, f, c, L

p	i	f	c	L	ผลการเปรียบเทียบ ค่า AOQ	ข้อสังเกตเกี่ยวกับ ระดับความต่างของค่า AOQ
0.005, 0.01	ทุกระดับ	ทุกระดับ	ทุกระดับ	ทุกระดับ	CSP-C < MCSP-C	
0.015, 0.02	ทุกระดับ	ทุกระดับ	ทุกระดับ	ทุกระดับ	CSP-C < MCSP-C	
0.025	10	ทุกระดับ	ทุกระดับ	< 1200	CSP-C < MCSP-C	
				≥ 1200	CSP-C < MCSP-C	เล็กน้อย
	20	1/2	ทุกระดับ	< 1200	CSP-C < MCSP-C	
				≥ 1200	CSP-C > MCSP-C	เล็กน้อย
		1/3	ทุกระดับ	< 1600	CSP-C < MCSP-C	
				≥ 1600	CSP-C > MCSP-C	เล็กน้อย
0.03	10	1/2	ทุกระดับ	< 2600	CSP-C < MCSP-C	
				≥ 2600	CSP-C > MCSP-C	เล็กน้อย
		1/3	ทุกระดับ	ทุกระดับ	CSP-C < MCSP-C	L สูงๆ ค่าใกล้เคียงกัน
	20	1/2	ทุกระดับ	< 2400	CSP-C < MCSP-C	
				≥ 2400	CSP-C > MCSP-C	
		1/3	ทุกระดับ	< 1600	CSP-C < MCSP-C	
				≥ 1600	CSP-C > MCSP-C	
0.035	10	1/2	ทุกระดับ	< 2400	CSP-C < MCSP-C	
				≥ 2400	CSP-C > MCSP-C	
		1/3	ทุกระดับ	ทุกระดับ	CSP-C < MCSP-C	L สูงๆ ค่าใกล้เคียงกัน
	20	1/2	ทุกระดับ	< 2000	CSP-C < MCSP-C	
				≥ 2000	CSP-C > MCSP-C	
		1/3	ทุกระดับ	< 1800	CSP-C < MCSP-C	
				≥ 1800	CSP-C > MCSP-C	

วิจารณ์และสรุปผลการวิจัย

จากการที่ MCSP-C พัฒนามาจาก CSP-C หากพิจารณาขั้นตอนการตรวจสอบของทั้ง 2 แผนจะพบว่า MCSP-C ได้ออกแบบให้มีการเปลี่ยนกลับการตรวจสอบจากตรวจแบบบางส่วนกลับไปเป็นแบบ 100% เร็วกว่า CSP-C เมื่อกระบวนการผลิตมีคุณภาพไม่ดีหรือมีค่า p สูง กรณีเช่นนี้ MCSP-C ควรมีค่า AFI สูงกว่า CSP-C และ

MCSP-C ควรมีค่า AOQ ต่ำกว่า CSP-C เนื่องจาก 2 คำนี้อาจตรงข้ามกันคือ หากแผนใดให้ค่า AFI สูงกว่า แผนนั้นก็จะให้ค่า AOQ ต่ำกว่า นั่นคือความแตกต่างในค่า AFI และค่า AOQ ของ 2 แผนควรจะชัดเจนในกรณีที่กระบวนการผลิตมีค่า p สูง แต่จากผลการศึกษาพบว่าความแตกต่างในค่า AFI และค่า AOQ ของ 2 แผนไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่า p เท่านั้น แต่ขึ้นอยู่กับระดับค่าพารามิเตอร์ของแผนที่ใช้ในการตรวจสอบด้วย คือขึ้นอยู่กับค่า i, f, c ด้วย โดยค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีผลต่อความแตกต่างในค่า AFI และค่า AOQ ของ 2 แผน ซึ่งจะเห็นว่า MCSP-C ไม่ได้มีค่า AFI สูงกว่าหรือต่ำกว่า CSP-C ในทุกสถานการณ์ของการผลิตและการตรวจสอบ หรือไม่ได้มีค่า AOQ ต่ำกว่าหรือสูงกว่า CSP-C ในทุกสถานการณ์ของการผลิตและการตรวจสอบเช่นกัน ดังนั้น เมื่อผู้ตรวจสอบต้องการเลือกใช้ MCSP-C และ CSP-C ตรวจสอบสายการผลิต สามารถใช้ผลสรุปในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 เป็นแนวทางในการเปรียบเทียบและเลือกใช้แผนการชักตัวอย่างทั้ง 2 แผนให้เหมาะสมกับสภาพและสถานการณ์การผลิตของตนเองได้นอกจากนี้ยังพบว่าค่า L หรือระดับความยาวของสายการผลิตมีผลต่อค่า AFI และค่า AOQ ด้วย โดยภาพรวมพบว่า MCSP-C มีค่า AFI ต่ำกว่าและมีค่า AOQ สูงกว่า CSP-C เมื่อสายการผลิตมีระยะสั้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้คาดว่าเกิดจากแผนการชักตัวอย่างแบบต่อเนื่องทั้งหมดออกแบบสำหรับตรวจสอบสายการผลิตที่มีระยะยาวมาก ค่า AFI และค่า AOQ เป็นการคิดค่าเฉลี่ยต่อ 1 รอบของการตรวจสอบ โดย 1 รอบของการตรวจสอบหมายถึงจำนวนหน่วยผลิตทั้งหมดที่ผลิตได้ทั้งหมดตั้งแต่เริ่มต้นการตรวจสอบแบบ 100% จนกระทั่งสิ้นสุดการตรวจสอบแบบตรวจสอบบางส่วนด้วยอัตราส่วน f ก่อนที่จะวนกลับไปเริ่มต้นการตรวจสอบแบบ 100% ใหม่ สำหรับสายการผลิตที่มีระยะสั้นมากๆ เช่นจำนวนหน่วยการผลิตต่ำกว่า 1200 หน่วย ($L < 1200$) เป็นไปได้ว่าเมื่อความยาวสายการผลิตมีระยะสั้นจะยังไม่สิ้นสุด 1 รอบของการตรวจสอบ จึงทำให้การหาค่าเฉลี่ยไม่ถูกต้อง ค่า AFI และค่า AOQ ที่ได้จึงอาจไม่ถูกต้อง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- Balamurali, S. & Subramani, K. (2004). Modified CSP-C continuous sampling plan for consumer protection. *Journal of Applied Statistics*, 31(4), 481-494. <http://dx.doi.org/10.1080/02664760410001681765A>
- Dodge, H. F. (1943). A sampling inspection plan for continuous production. *The Annals of Mathematical Statistics*, 14(3), 264-279.
- Govindaraju, K. & Kandasamy, C. (2000). Design of generalized CSP-C continuous sampling plan. *Journal of Applied Statistics*, 27(7), 829-841. <http://dx.doi.org/10.1080/02664760050120524>

- Karithap, M. (2009). *A Study of the effect of limiting the length of a production line on performance measures of multi-level continuous sampling plans* (Master thesis) Department of Applied Statistics, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok (in Thai).
- Mayureesawan, T. (2014). A study of the effect of length of production line on performance measures for single-level continuous sampling plans. *Journal of KMUTNB*, 24(1), 158-167. (in Thai)
- Mitra, A. (1993). *Fundamentals of Quality Control and Improvement* (2nd ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Montgomery, D. C. (2009). *Introduction to Statistical Quality Control* (6th ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Schilling, E. G. & Neubauer, D. V. (2009). *Acceptance Sampling in Quality Control* (2nd ed.). New York: CRC Press.

Research Article

ผลของอุณหภูมิอบแห้งด้วยวิธีฟลูอิด์เบดและสภาวะบรรจุต่อการชะลอการเสื่อมสภาพของข้าวเหนียวม่วงระหว่างการเก็บรักษา

The effect of fluidized bed drying temperature and packaging condition on retarding degradation of purple waxy rice during storage

นิตยา จันกา^{1,*}, เฉลิมชัย วงษ์อารี^{2,3}, พนิดา บุญฤทธิ์ธงไชย^{2,3} และชัยวัฒน์ รัตนมัยชัยสกุล⁴

Nittaya Junka^{1,*}, Chalermchai Wongs-Aree^{2,3}, Panida Boonyarittthongchai^{2,3} and

Chaiwat Rattanamechaikul⁴

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

¹ Division of Crop Production Technology, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Muang, Nakhon Pathom 73000

² หลักสูตรเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
วิทยาเขตบางขุนเทียน เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150

² Postharvest Technology Program, School of Bioresources and Technology, King Mongkut's University Technology Thonburi, Bangkoktuen Campus, Bangkoktuen, Bangkok 10150

³ ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400

³ Postharvest Technology Innovation Center, Commission on Higher Education, Ratchathewi, Bangkok 10400

⁴ สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร 86160

⁴ Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Pathiu, Chumphon 86160

*E-mail: nittaya717@hotmail.com

Received: 23/01/2017; Accepted: 17/05/2017

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคการอบแห้งหลังการเก็บเกี่ยวและบรรจุภัณฑ์ เพื่อชะลอการเสื่อมสภาพของคุณภาพด้านสี ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณสารฟีนอลทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระและการก่อตัวของกรดไขมันอิสระ ซึ่งเป็นสาเหตุของกลิ่นหืนในข้าวเหนียวม่วง โดยนำตัวอย่างข้าวเปลือกที่มีความชื้นหลังการเก็บเกี่ยว 25%w.b. ไปทำการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไรซ์เบดแบบวงจที่อุณหภูมิสูง 100 130 และ 150°C จนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือ 18%w.b. จากนั้นกะเทาะเปลือกและบรรจุข้าวเหนียวม่วงน้ำหนัก 50 กรัมบรรจุลงในถุงพลาสติกสาน ถุงลามิเนต และถุงลามิเนตร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจน ทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิบรรยากาศเป็นระยะเวลา 90 วัน ผลการวิเคราะห์คุณภาพภายหลังการอบแห้งพบว่า อุณหภูมิสูงสุดที่ควรใช้ในการอบแห้งคือ 130°C การใช้อุณหภูมิดังกล่าวไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของข้าว นอกจากนี้ยังทำให้กรดไขมันอิสระมีการก่อตัวลดลง อย่างไรก็ตามข้าวที่ผ่านการอบแห้งควรเก็บรักษาในถุงลามิเนตร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจนเนื่องจากสามารถชะลอการเสื่อมสภาพของคุณภาพได้ดีที่สุด

คำสำคัญ: ข้าวเหนียวม่วง, การอบแห้งหลังการเก็บเกี่ยว, บรรจุภัณฑ์, การเสื่อมสภาพ

Abstract

The objective of this research was to retard degradation in color, anthocyanin content, total phenolic content, antioxidant activity and free fatty acid content resulting in undesirable rancidity in purple waxy rice by applying post harvested drying technique and packaging. Paddy with initial moisture content of 25%w.b. was dried by a batch fluidized bed dryer with various temperatures of 100, 130 and 150°C till the moisture reduced to 18.0%w.b. The dried paddy was then dehulled and packed, 50 g/bag, in a polypropylene woven bag, laminate bag and laminated bag within and without an oxygen absorber at ambient temperature for 90 days storage. After drying process, the results revealed that the proper temperature for drying paddy was at 130°C which did not affect the postharvested quality of sample. However, the dried rice should be kept in the laminated bag containing an oxygen absorber for it was the most effective retarding rice quality degradation.

Keywords: purple waxy rice, post harvested drying, packaging, degradation

บทนำ

ข้าวเปลือกเหนียวม่วงภายหลังการเก็บเกี่ยวจะต้องลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการบรรจุและเก็บรักษา แม้ว่าวิธีการตากแดดจะเป็นวิธีลดความชื้นที่มีต้นทุนต่ำเนื่องจากไม่มีค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงาน แต่

วิธีการดังกล่าวอาจทำให้ข้าวเปลือกเกิดการเสียหายจาก แมลง นก หนู เชื้อจุลินทรีย์ และปนเปื้อนฝุ่นละออง (Esper & Mühlbauer, 1998) สาเหตุนี้กระบวนการอบแห้งด้วยเทคนิคต่าง ๆ จึงถูกเลือกเพื่อนำมาใช้แทนที่การลดความชื้นด้วยวิธีการตากแดด หนึ่งในเทคนิคซึ่งมีประสิทธิภาพสูงคือเทคนิคฟลูอิดซ์เบด เนื่องจากขณะที่ทำการลดความชื้นเมล็ดข้าวจะลอยตัวคล้ายของไหล การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ จึงสามารถใช้อุณหภูมิที่สูงมากกว่า 100°C ในการลดความชื้นได้ (Junka et al., 2015) เมื่อข้าวเปลือกม้วนมีความชื้นอยู่ในระดับที่เหมาะสมแล้วจะถูกนำมาแกะทะเปลือกออกได้เป็นข้าวกล้องที่มีชั้นรำเป็นสีม่วง หรือข้าวเหนียวม้วนที่ประกอบไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระและแอนโทไซยานินจำนวนมาก เพื่ออบบรรจุใส่ถุงและจัดจำหน่ายต่อไป ในปัจจุบันการบรรจุข้าวเพื่อจัดจำหน่ายแบ่งได้เป็นสองแบบใหญ่ ๆ คือ แบบแรก บรรจุลงในถุงพลาสติกสานถุงละ 20 กิโลกรัม เพื่อนำมาแบ่งขายที่ตลาดท้องถิ่นระดับล่างและแบบที่สองบรรจุลงในถุงลามิเนตถุงละ 1 กิโลกรัม เพื่อรอจัดจำหน่ายที่ห้างสรรพสินค้าหรือร้านค้าระดับบน ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นคือข้าวเหนียวม้วนที่บรรจุในถุงพลาสติกสานมีการเกิดกลิ่นเหม็นหืนอย่างรวดเร็ว จากการที่ไขมันในรำข้าวเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสโดยเอนไซม์ลิเพสและจากปฏิกิริยาไมซ์เอนไซม์โดยออกซิเจนกลายเป็นกรดไขมันอิสระ (FFA) ซึ่งเป็นสาเหตุของกลิ่นเหม็นหืน (Liu et al., 2013) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการโดยร้อนสามารถชะลอการทำงานของเอนไซม์ลิเพสได้ โดยความสามารถในการชะลอขึ้นอยู่กับระดับอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อน (Jaisut et al., 2009; Kim et al., 2014) สำหรับวิธีการอื่น ๆ ที่นำมาใช้ในการลดการก่อตัวของกรดไขมันอิสระนั้น Mexis & Kontominas (2010) ได้ทำการศึกษาผลของการประยุกต์ใช้ตัวดูดซับออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์เมล็ดอัลมอนต์ พบว่า สามารถช่วยในการชะลอการก่อตัวของกรดไขมันอิสระระหว่างการเก็บรักษาได้เป็นอย่างดี

ส่วนข้าวเหนียวม้วนที่บรรจุในถุงลามิเนตนั้น แม้ว่าปัญหาการเกิดกลิ่นเหม็นหืนจะเกิดขึ้นได้ช้ากว่าในถุงพลาสติกสาน แต่การศึกษากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการทางความร้อนส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของปริมาณแอนโทไซยานิน โดยอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญต่อปริมาณการเสื่อมสภาพ (Patras et al., 2010) นอกเหนือไปจากปัจจัยดังกล่าวแล้ว ออกซิเจนยังเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่สำคัญโดยสามารถเร่งให้แอนโทไซยานินนั้นเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ ผลของการเสื่อมสภาพดังกล่าวมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อการลดลงของสารประกอบโพลีฟีนอลทั้งหมด สารต้านอนุมูลอิสระ และยังส่งผลทำให้สีของผลิตภัณฑ์นั้นสลายตัวลง (Sarni et al., 1995; Kim et al., 2007) ด้วยเหตุผลดังที่กล่าวมา การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงแม้ส่งผลดีในการชะลอการทำงานของเอนไซม์ลิเพสระหว่างการเก็บรักษา แต่อาจส่งผลเสียต่อการเสื่อมสภาพของปริมาณแอนโทไซยานินภายหลังจากการอบแห้ง ในปัจจุบันข้อมูลดังที่กล่าวมายังไม่มีการทดสอบ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของการอบแห้งข้าวเปลือกเหนียวม้วนด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เบด จากนั้นทำการวิเคราะห์คุณภาพในระหว่างการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 90 วัน โดยใช้บรรจุภัณฑ์ที่ใช้งานจริง ซึ่งเพิ่มสถานะการเก็บรักษาโดยมีตัวดูดซับออกซิเจนร่วมด้วย ภายหลังจากทดสอบจะทำให้ทราบถึงสถานะการอบแห้ง และการเก็บรักษาที่เหมาะสมซึ่งจะช่วยทำให้คงคุณภาพที่ต้องการในด้านต่าง ๆ ตั้งแต่ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวจนถึงมือของผู้บริโภคโดยยังคงคุณภาพไว้สูงที่สุด ข้อมูลที่ได้

จะเป็นประโยชน์และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตข้าวเหนียวม่วงที่กำลังขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

วัสดุ

ตัวอย่างข้าวเหนียวม่วงสายพันธุ์ก่ำดอยสะเก็ดจากศูนย์วิจัยข้าวม่วง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ได้นำมาใช้งานวิจัยครั้งนี้ โดยตัวอย่างทั้งหมดมาจากแปลงปลูกเดียวกันซึ่งมีปริมาณอะไมโลสน้อยกว่า 5 เปอร์เซนต์และความชื้นภายหลังจากการเก็บเกี่ยวที่ 25%w.b.

การอบแห้งและบรรจุ

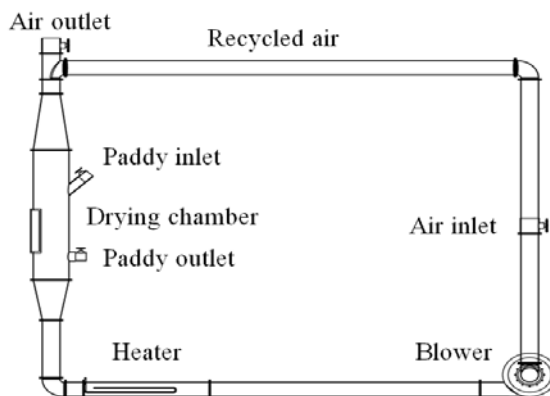
ข้าวเปลือก (ข้าวเหนียวม่วงสายพันธุ์ก่ำดอยสะเก็ด) ถูกลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบงวด (batch) ซึ่งประกอบไปด้วยตัวเครื่องยาว 270 เซนติเมตร สูง 260 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางท่อและห้องอบแห้งมีขนาด 10 และ 20 เซนติเมตร ขดลดความร้อนขนาด 12 kW และพัดลมขนาด 1.5 kW ดังรูปที่ 1 ในกระบวนการอบแห้ง ข้าวเปลือกถูกลดความชื้นจากความชื้นหลังการเก็บเกี่ยวให้มีความชื้นลดลงเหลือ 18%w.b. อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้คือ 100°C 6 นาที 130°C 4 นาทีและ 150°C 3 นาที ตามคำแนะนำของ Soponronnarit & Prachayawarakorn (1994) เพื่อหลีกเลี่ยงความเครียดที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่มากเกินไปบริเวณผิวของเมล็ดข้าวในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เมล็ดข้าวเกิดรอยแตกร้าว ที่สภาวะการอบแห้งดังกล่าวอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกมีค่า 71.9, 82.1 และ 106.0°C ตามลำดับ จากนั้นข้าวเปลือกถูกนำออกจากห้องอบแห้ง เก็บในขวดอับอากาศและใช้พัดลมเป่าด้วยอากาศแวดล้อมเป็นระยะเวลาขึ้นตอนละ 30 นาทีจนความชื้นลดลงเหลือ 10%w.b. จึงทำการกะเทาะเปลือกได้เป็นข้าวเหนียวม่วงแบ่งบรรจุใส่ถุง 3 ชนิดถุงละ 50 กรัม ได้แก่ ถุงพลาสติกสาน ถุงลามิเนตประเภท oriented polyester/linear low density polyethylene (Digital Gravure Packaging Co. Ltd., model OPET/LLDPE, Bangkok, Thailand) และถุงลามิเนตร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจนขนาด 10 มิลลิตร (Janjaras Chem Supply Co. Ltd., model S-10, Bangkok, Thailand) เพื่อบรรเทาวิเคราะห์คุณภาพเป็นระยะเวลา 90 วัน (ทำการวิเคราะห์คุณภาพทุก ๆ 15 วัน จำนวน 3 ซ้ำ) ในอุณหภูมิและสภาพบรรยากาศที่ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยในช่วงระยะเวลาการเก็บรักษาอยู่ที่ 32.1°C และ 58.5%

การวัดสี

ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าสีของข้าวเหนียวม่วงโดยใช้เครื่องวัดสี Minolta color meter (model CR 400, Tokyo, Japan) แสดงค่าสีโดยใช้ tristimulus parameters ซึ่งประกอบด้วยค่า L^* (lightness/darkness) ค่า a^* (redness/greenness) และค่า b^* (yellowness/blueness) สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าสีทั้งหมด (ΔE) คำนวณได้จากสมการที่ 1

$$\Delta E = [(L_i^* - L^*)^2 + [(a_i^* - a^*)^2 + [(b_i^* - b^*)^2]^{0.5} \quad (1)$$

ค่า L_i^* , a_i^* และ b_i^* คือค่าสีเริ่มต้นของตัวอย่างอ้างอิง (ตัวอย่างควบคุมที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 23.1 9.1 และ 1.8 ตามลำดับ



รูปที่ 1. แบบของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดการอบแห้งข้าวเหนียวม่วง

การวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานิน

การวิเคราะห์หาปริมาณแอนโทไซยานินใช้เทคนิค pH differential technique ตามวิธีการของ Giusti & Wrolstad (2005) เตรียมตัวอย่างข้าวเหนียวม่วงโดยการบดให้เป็นผงด้วยเครื่อง Analytical Mill Model A11 Basic (IKA[®], Germany) จากนั้นสกัดข้าวเหนียวม่วงที่บดแล้วด้วยเมทานอลที่ผสมกรดไฮโดรคลอริก 0.01% นำตัวอย่างไปต้มในอ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิที่ 38°C นาน 2 ชั่วโมง คัดแปลงวิธีการของ Rodriguez-Saona & Wrolstad (2005) ภายหลังกรองแยกกากสารสกัดข้าวเหนียวม่วงออกจากสารสกัด นำตัวอย่างของสารสกัดจากข้าวเหนียวม่วงปริมาตร 100 ไมโครลิตรใส่หลอดทดลองที่ 1 นำไปผสมกับบัฟเฟอร์ KCl pH 1.0 ปริมาตร 900 ไมโครลิตร และหลอดทดลองที่ 2 นำไปผสมกับบัฟเฟอร์ CHOONa pH 4.5 ปริมาตร 900 ไมโครลิตรตามวิธีการของ Giusti & Wrolstad (2005) จากนั้นนำหลอดทดลองทั้ง 2 หลอด ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Shimadzu, model 1800, Kyoto, Japan) ที่ $\lambda_{vis-max}$ 700 นาโนเมตร หาค่า absorbance of the diluted sample (A) ตามสมการที่ 2

$$A = (A_{\lambda_{vis-max}} - A_{700})_{pH\ 1.0} - (A_{\lambda_{vis-max}} - A_{700})_{pH\ 4.5} \quad (2)$$

ปริมาณแอนโทไซยานิน(มิลลิกรัม/ลิตร) คำนวณได้จากสมการที่ 3

$$\text{anthocyanin pigment (mg/liter)} = (A \times MW \times DF \times 1000) / (\mathcal{E} \times l) \quad (3)$$

โดยใช้ cyanidin-3-glucoside ซึ่งมี $MW = 449.2 \text{ g/mol}$ เป็นเกณฑ์

$\mathcal{E}$ (โมลาร์แอฟฟิวดิตี) = $26,900 \text{ L/mol/cm}$

l (ความกว้างของ cuvette) = 1 cm

DF = Dilution factor ของสารละลายตัวอย่าง

รายงานผลเป็นปริมาณแอนโทไซยานินมิลลิกรัมในตัวอย่าง 100 กรัมวัตถุแห้ง (mg /100 g dry matter)

การวิเคราะห์ปริมาณสารฟีนอลทั้งหมด

ใช้วิธีการของ Swain & Hillis (1959) ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารฟีนอลทั้งหมดของข้าวเหนียวม่วงโดยการนำสารสกัดที่สกัดได้ตามวิธีการของ Rodriguez-Saona & Wrolstad (2005) ปริมาตร 150 ไมโครลิตรใส่หลอดทดลอง เติมน้ำกลั่น 2,400 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex mixer จากนั้นเติม folin-ciocalteu reagent ความเข้มข้น 0.25 N ปริมาตร 150 ไมโครลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้ทำปฏิกิริยานาน 3 นาที แล้วเติม Na_2CO_3 ความเข้มข้น 1 N ปริมาตร 300 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex mixer นำไปวางในที่มืดแล้วตั้งทิ้งไว้อุณหภูมิห้องนาน 2 ชั่วโมง นำสารละลายตัวอย่างที่ทำปฏิกิริยาเสร็จแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Shimadzu, model 1800, Kyoto, Japan) ที่ความยาวคลื่น 725 นาโนเมตร นำค่าที่ได้วิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลทั้งหมดโดยใช้ gallic acid ที่ความเข้มข้น 0.1 mg/mL เป็นกราฟมาตรฐาน และรายงานผลโดยใช้หน่วย mg-GAE (gallic acid equivalent)

การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

ทำการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระโดยใช้เทคนิค 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical (DPPH) ตามวิธีการของ Brand-Williams et al. (1995) นำ working solution ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer (Shimadzu, model 1800, Kyoto, Japan) ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ($\text{Abs}_{\text{control}}$) จากนั้นนำไปทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระโดยการผสมกับสารสกัดข้าวเหนียวม่วงแล้วตั้งทิ้งไว้ในที่มืด อุณหภูมิบรรยากาศนาน 30 นาที ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง ($\text{Abs}_{\text{sample}}$) ที่ความยาวคลื่นเดียวกัน เปรียบเทียบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$\% \text{ inhibition activity} = [(\text{Abs}_{\text{control}} - \text{Abs}_{\text{sample}}) / \text{Abs}_{\text{control}}] \times 100 \quad (4)$$

การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ

วิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระตามวิธีการของ American Association of Cereal Chemistry (AACC, 1995) ใช้ตัวอย่างน้ำหนัก 10 กรัม ในการเตรียมตัวอย่าง จากนั้นทำการไทเตรทด้วย 0.0178 N KOH จนกระทั่งสีของตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อนนาน 1 นาที จึงทำการบันทึกปริมาตรที่ใช้ในการไทเตรทและนำมาคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระดังสมการ 5

$$\text{FFA (mg /100 g dry matter)} = [(10 \times \text{mL}_{\text{titrated}}) - (\text{mL}_{\text{blank}} \times 100)] / [100 - (\text{g water in 100 g sample})] \quad (5)$$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงค่าทั้งหมด

ที่สภาวะเริ่มต้นค่า ΔE ของข้าวเหนียวม่วงอ้างอิงเก็บรักษาโดยใช้ถุงพลาสติกสาน ถูกลามิเนตและถูกลามิเนตร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจนมีค่าอยู่ในช่วง 0.5-2.8 เมื่อข้าวเหนียวม่วงผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ 100 130 และ 150°C พบว่าค่า ΔE มีค่าไม่แตกต่างจากข้าวเหนียวม่วงอ้างอิงคือมีค่าอยู่ในช่วง 1.3-2.2 1.3-1.8 และ 0.8-2.1 ตามลำดับ เมื่อนำข้าวเหนียวม่วงที่บรรจุอยู่ในถุงทั้ง 3 ชนิดมาทำการเก็บรักษา พบว่าค่า ΔE ของข้าวเหนียวม่วงอ้างอิงเก็บรักษาโดยใช้ถุงพลาสติกสานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 7.2 เมื่อระยะเวลาการเก็บผ่านไป 30 วัน ในขณะที่ ΔE ของสภาวะถูกลามิเนตและถูกลามิเนตร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 4.8 และ 5.8 เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาผ่านไป 45 และ 75 วัน ดังแสดงในรูปที่ 2 (a) ส่วนผล ΔE ของข้าวเหนียวม่วงอบแห้งที่ 100°C (ไม่ได้แสดงข้อมูล) และ 130°C ให้ผลการวิเคราะห์ไปในทิศทางเดียวกันกับข้าวเหนียวม่วงอ้างอิง โดยที่สภาวะการเก็บรักษาโดยใช้ถุงพลาสติกสานข้าวเหนียวม่วงจะมีการเพิ่มขึ้นของค่า ΔE เร็วที่สุด ถัดมาคือที่สภาวะการเก็บรักษาโดยใช้ถูกลามิเนตและที่สภาวะถูกลามิเนตร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจน การเปลี่ยนแปลงค่า ΔE ซึ่งได้กล่าวมาและของข้าวเหนียวม่วงอบแห้งที่ 150°C ที่ไม่ได้ทำการวิเคราะห์จะมีการอธิบายในหัวข้อถัดไป

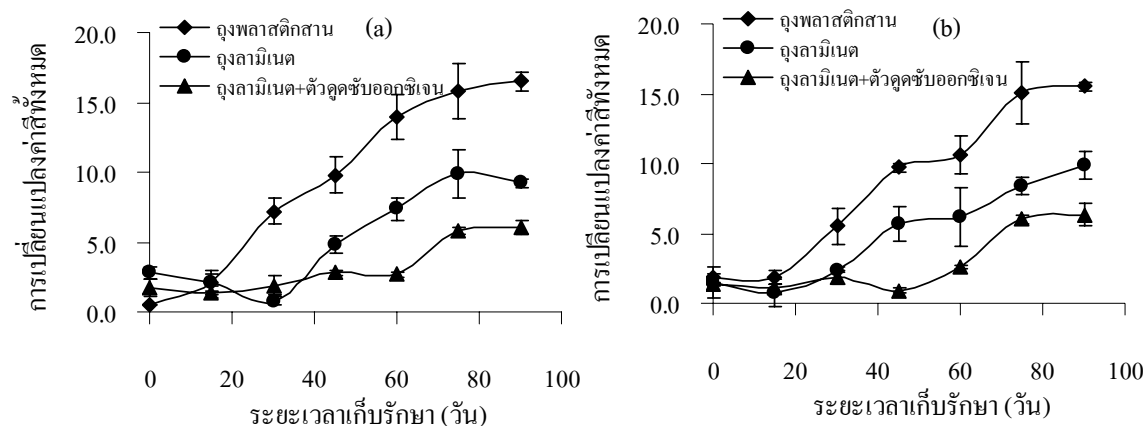
ปริมาณแอนโทไซยานิน

ปริมาณแอนโทไซยานินของข้าวเหนียวม่วงอ้างอิงที่เก็บรักษาโดยใช้ถุงพลาสติกสาน ถูกลามิเนต และถูกลามิเนตร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจนมีค่าเริ่มต้นอยู่ในช่วง 4.4 – 4.6 mg/100g dry matter เมื่อข้าวเหนียวม่วงผ่านกระบวนการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 และ 130°C ไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณแอนโทไซยานิน อย่างไรก็ตามที่การอบแห้ง 150°C ปริมาณแอนโทไซยานินของข้าวเหนียวม่วงมีปริมาณลดลงเหลือ 3.6 – 3.9 mg/100g dry matter การลดลงของปริมาณแอนโทไซยานินเกิดจากการเสื่อมสลายโดยความร้อน (Patras et al., 2010) Rubinskiene et al. (2005) ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการทางความร้อนต่อองค์ประกอบของสารสีในผลองุ่นพบว่าสารสีจากแอนโทไซยานินมีความเสถียรต่อกระบวนการทางความร้อนมากที่สุดที่ 95°C ดังนั้นในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เบด แม้จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น แต่ด้วยการถ่ายเทความร้อนอย่าง

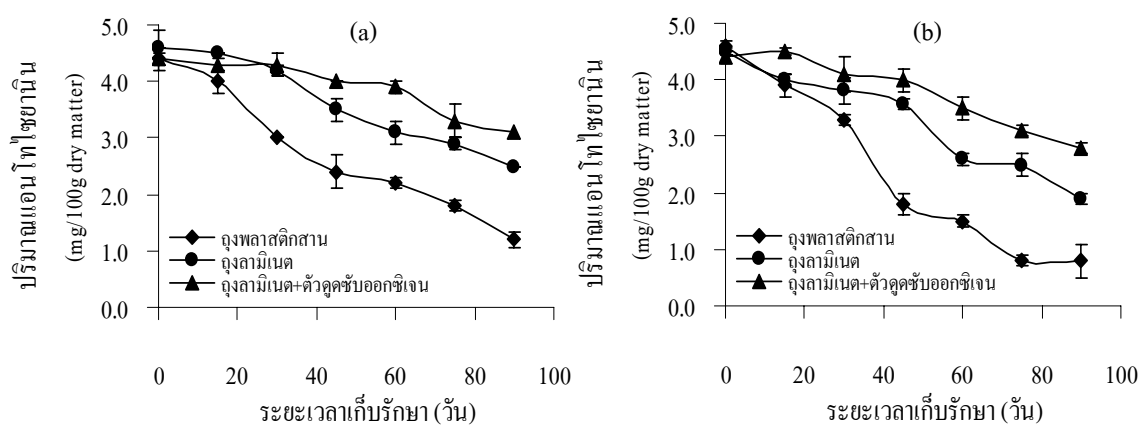
มีประสิทธิภาพจากการที่ตัวอย่างมีการลอยตัวคล้ายของไหลในห้องอบแห้ง (Mujumdar & Devahastin, 2003) จึงทำให้อุณหภูมิของเมล็ดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิการอบแห้งที่ 150°C เป็นระยะเวลานาน 3 นาที อุณหภูมิของเมล็ดมีอุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 106°C ในขณะที่เมล็ดจะออกจากห้องอบแห้ง ส่งผลทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินของข้าวเหนียวม่วงภายหลังการอบที่อุณหภูมิดังกล่าวมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแอนโทไซยานินของข้าวเหนียวม่วงอ้างอิงและข้าวเหนียวม่วงอบแห้งที่ 100 และ 130°C ดังนั้นการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิ 150°C ส่งผลกระทบในด้านลบจึงทำให้ข้าวเหนียวม่วงอบแห้งที่ 150°C ไม่ได้มีการวิเคราะห์คุณภาพในระหว่างการเก็บรักษาสำหรับการเปลี่ยนแปลงของสีภายหลังการผ่านกระบวนการทางความร้อนนั้น Paciulli et al. (2016) ได้รายงานว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของบิทรูท ค่าสีที่เปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากการเสื่อมสลายของแอนโทไซยานินในผลดังกล่าว (Patras et al., 2009) ผลการวิเคราะห์ค่า ΔE ของข้าวเหนียวม่วงที่ผ่านการอบแห้งที่ 150°C นั้น ไม่เปลี่ยนแปลงตามการลดลงของปริมาณแอนโทไซยานินซึ่งไม่สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณการลดลงของแอนโทไซยานินที่อุณหภูมิอบแห้งดังกล่าว ไม่มากพอที่จะสามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องวัดค่าสี

ข้าวเหนียวม่วงอ้างอิงและข้าวเหนียวม่วงอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 และ 130°C ถูกนำมาเก็บรักษาที่สภาวะต่าง ๆ เมื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโทไซยานินที่สภาวะการเก็บรักษาโดยอุณหภูมิสูง ปริมาณแอนโทไซยานินมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่ 15 วันแรกของการเก็บรักษา โดยมีปริมาณแอนโทไซยานินลดลงมากกว่า 20% เมื่อเก็บรักษานาน 30 วัน การลดลงดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจนครบระยะเวลาการเก็บรักษาที่ 90 วัน ดังแสดงในรูปที่ 3(a) และ 3(b) ส่วนปริมาณแอนโทไซยานินของข้าวเหนียวม่วงเมื่อเก็บรักษาโดยใช้ถุงลามิเนตนั้น สามารถชะลอการเสื่อมสลายของแอนโทไซยานินได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ถุงลามิเนตร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจน สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโทไซยานินของข้าวเหนียวม่วงอบแห้งที่ 100°C ให้ผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน (ไม่ได้แสดงข้อมูล) การลดลงของแอนโทไซยานินที่สภาวะการเก็บรักษาโดยใช้ถุงพลาสติกใส่นั้นเกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อข้าวเปลือกถูกกะเทาะเปลือกออก ปริมาณแอนโทไซยานินที่สะสมเป็นสารประกอบหลักอยู่ในชั้นของรำ (Min et al., 2014) จะสัมผัสกับออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศโดยตรง ซึ่งออกซิเจนสามารถเร่งการเสื่อมสลายจากปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยไม่ใช้เอนไซม์ (Ioannou et al., 2012) ดังนั้นการบรรจุข้าวเหนียวม่วงในถุงลามิเนตจึงช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ส่วนสภาวะการเก็บรักษาด้วยถุงลามิเนตนั้น ปริมาณแอนโทไซยานินมีการลดลงที่น้อยกว่าการเก็บที่สภาวะถุงพลาสติกใสเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการเก็บรักษาเดียวกัน อย่างไรก็ตาม แม้สภาวะการเก็บรักษาด้วยถุงลามิเนตจะช่วยชะลอการเสื่อมคุณภาพจากการที่ข้าวเหนียวม่วงไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศโดยตรง แต่ด้วยการศึกษาในครั้งนี้อยู่ในระดับห้องปฏิบัติการเครื่องมือที่ใช้สร้างสภาวะสุญญากาศจึงมีขนาดเล็กและประสิทธิภาพในการดูดอากาศอาจยังไม่สมบูรณ์จึงทำให้เมื่อทำการเก็บรักษาเป็นระยะเวลานาน จึงส่งผลทำให้บางถุงมีก๊าซออกซิเจนจากภายนอกสามารถซึมเข้ามาในถุงได้เล็กน้อย ดังนั้นการใช้ตัวดูดซับออกซิเจนร่วมด้วยจึงช่วยชะลอการเสื่อมสลายของแอนโทไซยานินได้มากที่สุด

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าสีและการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอนโทไซยานินในระหว่างการเก็บรักษาพบว่าค่า ΔE เริ่มมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณแอนโทไซยานินมีค่าลดลงมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ยกตัวอย่างเช่นที่ข้าวเหนียวอบแห้งที่ 130°C ค่า ΔE ที่สภาวะการเก็บรักษาถุงพลาสติกสานจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเป็น 5.5 ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 30 วัน ขณะที่สภาวะการเก็บรักษาด้วยถุงลามิเนตและถุงลามิเนตร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจนค่า ΔE จะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเป็น 5.7 และ 6.0 ที่ 45 และ 75 วัน ที่ระยะเวลาดังกล่าวปริมาณแอนโทไซยานินมีค่าลดลง 28, 20 และ 29% ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเริ่มต้น



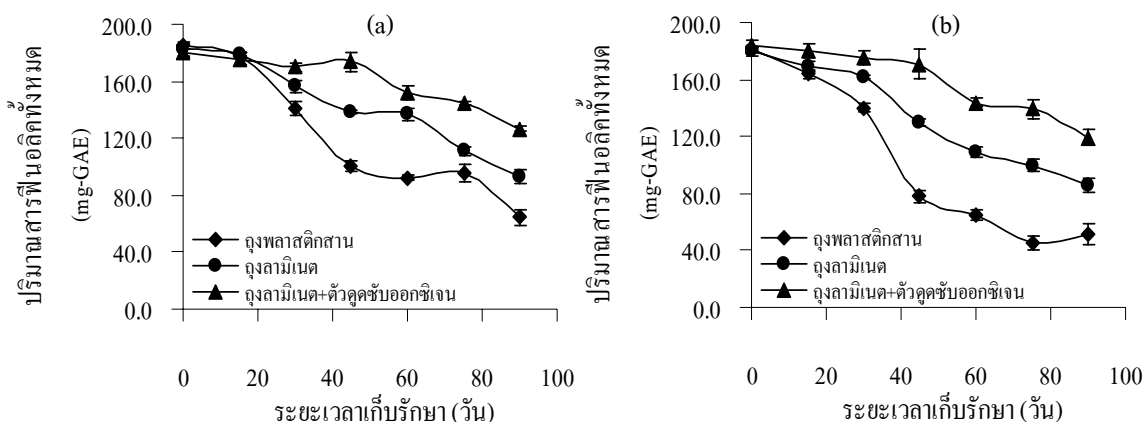
รูปที่ 2. การเปลี่ยนแปลงค่าสีทั้งหมดของข้าวเหนียวม่วงอ้างอิง (a) และข้าวเหนียวม่วงอบแห้งที่ 130°C (b) ระหว่างการเก็บรักษา



รูปที่ 3. การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโทไซยานินของข้าวอ้างอิง (a) และข้าวอบแห้งที่ 130°C (b) ระหว่างการเก็บรักษา

ปริมาณสารฟีนอลทั้งหมด

ปริมาณสารฟีนอลทั้งหมดของข้าวเหนียวม่วงมีค่าเริ่มต้นอยู่ในช่วง 180.1-184.9 mg-GAE ข้าวเหนียวม่วงที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่ 100 และ 130°C ปริมาณสารฟีนอลทั้งหมดมีค่าไม่แตกต่างกับข้าวเหนียวม่วงอ้างอิง อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ 150°C ส่งผลต่อการลดลงของปริมาณสารฟีนอลทั้งหมดเป็น 168.4-175.0 mg-GAE รูปที่ 4(a) และ 4(b) แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารฟีนอลทั้งหมดของข้าวเหนียวม่วงอ้างอิงและข้าวเหนียวม่วงอบแห้งที่ 130°C ในระหว่างการเก็บรักษา จากผลการศึกษาพบว่าทุกสภาวะการเก็บรักษาปริมาณสารฟีนอลทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง การใช้ถุงลามิเนตร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจนสามารถชะลอการลดลงของปริมาณสารฟีนอลทั้งหมดได้มากที่สุด รองลงมาคือในสภาวะการใช้ถุงลามิเนตและถุงพลาสติกตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบปริมาณสารฟีนอลทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโทไซยานิน ทั้งภายหลังการอบแห้งและระหว่างการเก็บรักษา ความสอดคล้องกันระหว่างผลการวิเคราะห์นี้ เนื่องมาจากแอนโทไซยานินเป็นสารซึ่งเป็นอนุพันธ์ของสารประกอบฟีนอล (Kim et al., 2007)

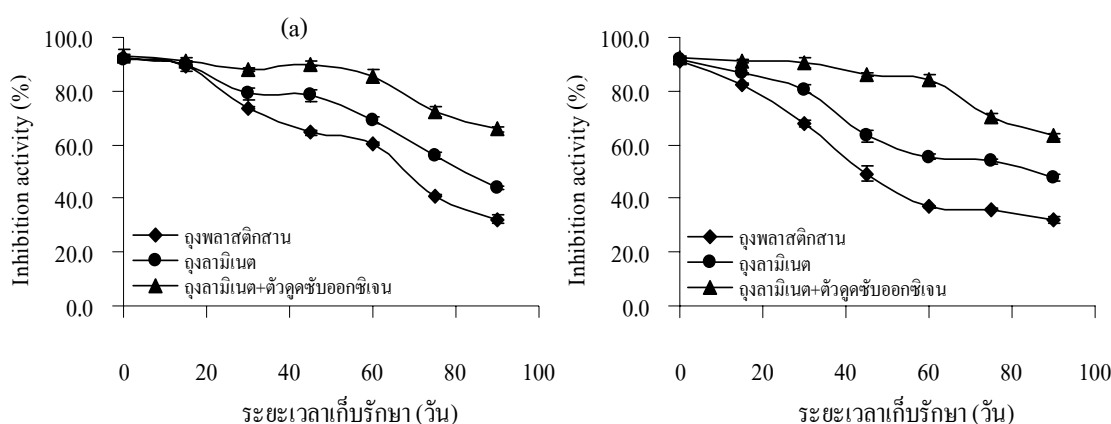


รูปที่ 4. การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารฟีนอลทั้งหมดของข้าวเหนียวม่วงอ้างอิง (a) และข้าวเหนียวม่วงอบแห้งที่ 130°C (b) ระหว่างการเก็บรักษา

ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของข้าวเหนียวม่วงแสดงโดยค่าเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ มีค่าเริ่มต้นที่ 92.7-93.3% เมื่อข้าวม่วงผ่านกระบวนการอบแห้งที่ 100 130 และ 150°C เปอร์เซ็นต์ดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วง 92.4-93.1 91.5-92.6 และ 86.5-88.2 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่า กระบวนการทางความร้อนที่ 150°C ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีค่าลดลงมากที่สุด จากรูปที่ 5 แสดง

เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของข้าวเหนียวม่วงอ้างอิงและข้าวเหนียวม่วงอบแห้งที่ 130°C ในระหว่างการเก็บรักษาที่สภาวะต่าง ๆ พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารฟีนอลทั้งหมด เนื่องจากปริมาณสารฟีนอลทั้งหมดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ โดยความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระจะลดลงตามการลดลงของปริมาณสารฟีนอลทั้งหมด (Kim et al., 2007; Patra et al., 2009; Zhang et al., 2014) ดังนั้นที่ระยะการเก็บรักษา 90 วัน การใช้ถุงลามิเนตร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจนทำให้ข้าวเหนียวม่วงมีการสูญเสียความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระน้อยที่สุด



รูปที่ 5. ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของข้าวเหนียวม่วงอ้างอิง (a) และข้าวอบเหนียวม่วงแห้งที่ 130°C (b) ระหว่างการเก็บรักษา

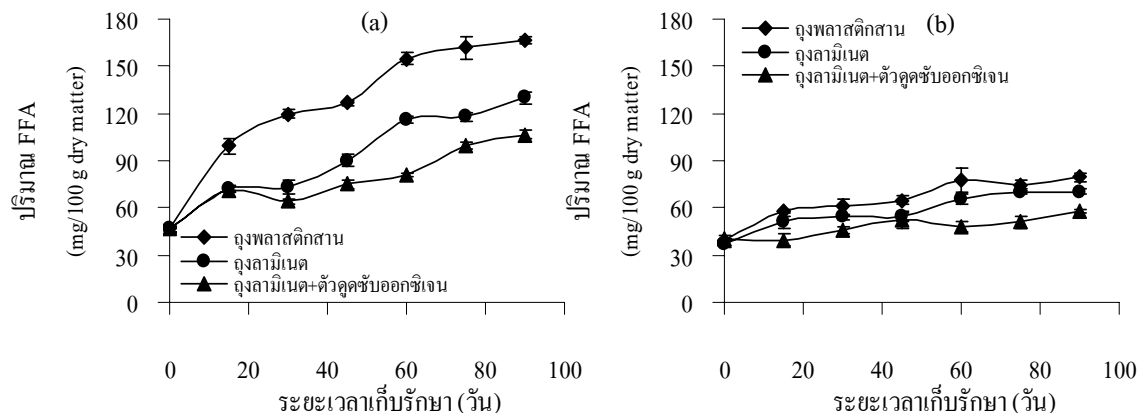
ปริมาณกรดไขมันอิสระ

ข้าวเหนียวม่วงอ้างอิงเก็บรักษาด้วยถุงพลาสติกมีปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้นที่ 46.7 mg/100 g dry matter เมื่อระยะเวลาผ่านไป 15 วัน ปริมาณกรดไขมันอิสระมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นประมาณ 2 เท่า แนวโน้มดังกล่าวยังเพิ่มมากขึ้นตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับข้าวเหนียวม่วงที่เก็บรักษาด้วยสภาวะเดียวกันแต่ผ่านการอบแห้ง ปริมาณกรดไขมันอิสระมีแนวโน้มการก่อตัวที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 ปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวเหนียวม่วงอ้างอิงที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมีสาเหตุจากปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสโดยเอนไซม์ลิเพสและจากปฏิกิริยาไมใช้เอนไซม์โดยออกซิเจน (Liu et al., 2013) ปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวเหนียวม่วงที่ผ่านการอบแห้งมีแนวโน้มการก่อตัวที่ลดลงตามอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มสูงขึ้น จากการที่ความร้อนสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ลิเพสได้บางส่วนสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim et al. (2014) ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ลิเพสในรำข้าวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้

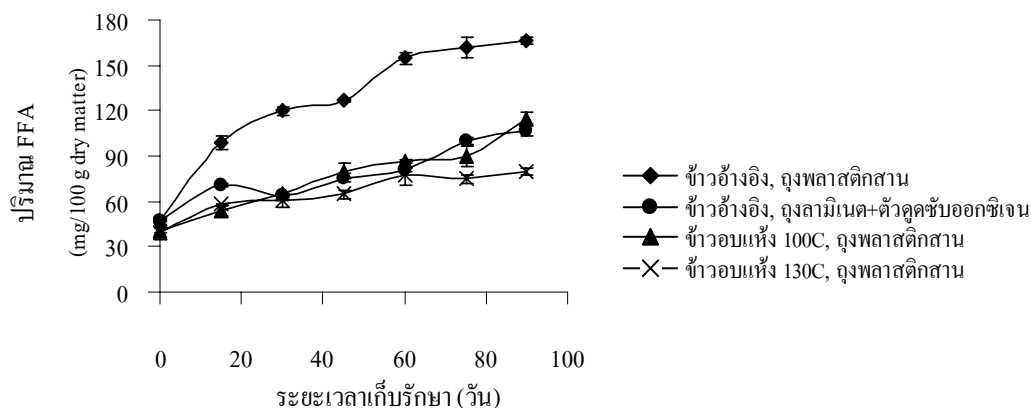
ความร้อน ในการนึ่งรำข้าวด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 20 นาทีสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์
ลิเพสได้ ทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระในรำข้าวมีปริมาณค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 6 เดือน

รูปที่ 6(a) และ 6(b) แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันอิสระที่เก็บรักษาด้วยถุงพลาสติกสาน ถุงลามิเนต
และถุงลามิเนตร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจนของข้าวเหนียวม่วงอ้างอิงและข้าวเหนียวม่วงที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 130°C
พบว่าปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวเหนียวม่วงอ้างอิงทุกสภาวะการเก็บรักษา มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตลอดระยะเวลา
90 วัน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวเหนียวม่วงอ้างอิงที่ระยะเวลาการเก็บรักษาตั้งแต่ 15 วัน การก่อดั้ว
ดังกล่าวเมื่อเก็บรักษาด้วยถุงลามิเนต มีแนวโน้มลดลงและลดลงมากที่สุดหากเก็บรักษาที่สภาวะถุงลามิเนตร่วมกับ
ตัวดูดซับออกซิเจน สำหรับข้าวเหนียวม่วงที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 130°C ปริมาณกรดไขมันอิสระ ในทุกสภาวะมี
แนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 90 วัน ปริมาณกรดไขมันอิสระที่
สภาวะถุงลามิเนตร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจนมีปริมาณน้อยที่สุด ปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวเหนียวม่วงอ้างอิง
ที่สภาวะการเก็บรักษาด้วยถุงลามิเนตมีแนวโน้มลดลง และลดลงมากที่สุดเมื่อใช้ร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจนเนื่องมา
จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิดถูกยับยั้งจากการที่ข้าวเหนียวม่วงไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจนโดยตรง ส่วนออกซิเจน
บางส่วนที่ได้ซึมผ่านถุงลามิเนตจะถูกดูดซับโดยตัวดูดซับออกซิเจน อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาด้วยถุงลามิเนต
ร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจนนั้นไม่ส่งผลในการยับยั้งปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของลิพิด โดยมีเอนไซม์ลิเพสเป็นตัวเร่ง
ปฏิกิริยา ดังนั้นข้าวเหนียวม่วงอ้างอิงแม้ถูกเก็บที่สภาวะถุงลามิเนตร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจนปริมาณกรดไขมัน
อิสระยังคงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา (Tsuzuki et al., 2014) นอกจากนี้ข้าวเหนียวม่วงที่ถูก
อบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง 130°C ยังมีความจำเป็นที่ต้องเก็บตัวอย่างด้วยถุงลามิเนตร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจน เนื่องจาก
เทคนิคฟลูอิดซ์เบดมีระยะเวลาการอบแห้งที่รวดเร็ว การอบแห้งที่อุณหภูมิ 130°C นาน 4 นาที ส่งผลให้อุณหภูมิ
เมล็ดข้าวในหี้ออบแห้งมีอุณหภูมิเพียง 82°C ซึ่งที่อุณหภูมิเมล็ดข้าวดังกล่าวยังไม่สูงพอต่อการยับยั้งการทำงานของ
เอนไซม์ลิเพสได้อย่างสมบูรณ์

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวเหนียวม่วงอ้างอิงที่เก็บรักษาด้วยถุงลามิเนต
ร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจนและข้าวเหนียวม่วงที่ผ่านการอบแห้งและเก็บรักษาด้วยถุงพลาสติกสาน พบว่าทุกสภาวะ
มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาที่ระยะเวลา 90 วัน ข้าวเหนียวม่วงอ้างอิงเก็บรักษาด้วยสภาวะ
ถุงลามิเนตร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจนมีปริมาณกรดไขมันอิสระน้อยกว่าข้าวเหนียวม่วงที่ผ่านการอบแห้งที่ 100°C
 อย่างไรก็ตาม ข้าวเหนียวม่วงที่ผ่านการอบแห้งอุณหภูมิสูง 130°C แม้เก็บด้วยถุงพลาสติกสาน ปริมาณกรดไขมัน
อิสระยังคงมีน้อยกว่า ข้าวเหนียวม่วงอ้างอิงที่เก็บรักษาด้วยถุงลามิเนตร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนมีอิทธิพลในการลดการก่อดั้วของกรดไขมันอิสระมากกว่า
ผลกระทบของสภาวะการบรรจุ (Galliard, 1994)



รูปที่ 6. ปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวเหนียวม่วงอึ้งอึ้ง (a) และข้าวเหนียวม่วงอบแห้งที่ 130°C (b) ระหว่างการเก็บรักษา



รูปที่ 7. ปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวเหนียวม่วงอึ้งอึ้งและข้าวเหนียวม่วงอบแห้งที่อุณหภูมิและสภาวะการเก็บรักษาต่าง ๆ

สรุปผลการทดลอง

กระบวนการลดความชื้นที่ 130°C เป็นอุณหภูมิเหมาะสมที่ควรใช้ในการอบแห้งข้าวเหนียวม่วง เนื่องจากมีระยะเวลาในการอบแห้งที่รวดเร็ว ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านสี ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณสารฟีนอล ทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ นอกจากนี้ยังทำให้การก่อตัวของกรดไขมันอิสระมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามข้าวเหนียวม่วงที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิดังกล่าวยังมีความจำเป็นที่ต้องเก็บรักษาด้วยถุงลามิเนต ร่วมกับตัวดูดซับออกซิเจนเพื่อชะลอการเสื่อมสภาพของปริมาณแอนโทไซยานินและการก่อตัวของกรดไขมันอิสระ ในระหว่างการเก็บรักษา

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐมและสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติที่สนับสนุนทุนอุดหนุนตลอดการวิจัย รองศาสตราจารย์ ดร.ชนากานต์ เทโบลต์ พรหมอุทัย ภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่สำหรับข้าวเหนียวม่วงสายพันธุ์ก่ำคอดยสะเก็ดห้องปฏิบัติการอบแห้ง สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ หลักสูตรเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี และศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- AACC. (1995). *Approved Method of the American Association of Cereal Chemists* (9th ed.). Minnesota: St. Paul Publisher.
- Brand-Williams, E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT- Food Science and Technology*, 28(1), 25-30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Esper, A., & Mühlbauer, W. (1998). Solar drying - an effective means of food preservation. *Renewable Energy*, 15, 95-100. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00143-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00143-8)
- Galliard, T. (1994). Rancidity in cereal products. In J. Allen, & R. Hamilton (Eds.), *Rancidity in Foods* (3rd ed.) pp. 141-159. London: Blackoe Academic & Professional.
- Giusti, M. M. & Wrolstad R. E. (2005). Characterization and measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy, In: R. E. Wrolstad, T. E. Acree, E. A. Decker, M. H. Penner, D. S. Reid, S. J. Schwartz et al. (Eds.), *Handbook of Food Analytical Chemistry: Pigments, Colorants, Flavors, Texture, and Bioactive Food Components* pp. 19-31. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- Ioannou, I., Hafsa, I., Hamdi, S., Charbonnel, C. & Ghoul, M. (2012). Review of the effects of food processing and formulation on flavonol and anthocyanin behavior. *Food Engineering*, 111(2), 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.02.006>
- Jaisut, D., Prachayawarakorn, S., Varayanond, W., Tungtrakul P. & Soponronnarit S. (2009). Accelerated aging of jasmine brown rice by high-temperature fluidization technique. *Food Research International*, 42, 674-681. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.02.011>
- Junka, N., Wongs-Aree, C., Rattanamechaiskul, C., Kanlayanarat, S., Boonyariththongchai, P. & Prom-u-thai, C. T. (2015). Effect of high-temperature fluidized bed drying on quality of 'Kum Doi Saket' variety of purple rice. *International Food Research Journal*, 22(2), 593-597.

- Kim, M. J., Hyun, J. N., Kim, J. A., Park, J. C., Kim, M. Y., Kim, J. G. et al. (2007). Relationship between phenolic compounds, anthocyanins content and antioxidant activity in colored barley germplasm. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(12), 4802-4809. doi: 10.1021/jf0701943
- Kim, S. M., Chung, H. J. & Lim, S. T. (2014). Effect of various heat treatments on rancidity and some bioactive compounds of rice bran. *Journal of Cereal Science*, 60(1), 243-248. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.04.001>
- Liu, L., Waters, D. L. E., Rose, T. J., Bao, J. & King, G. J. (2013). Phospholipids in rice: significance in grain quality and health benefits a review. *Food Chemistry*, 139, 1133-1145. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.12.046>
- Mexis, S. F. & Kontominas, M. G. (2010). Effect of oxygen absorber, nitrogen flushing, packaging material oxygen transmission rate and storage conditions on quality retention of raw whole unpeeled almond kernels (*Prunus dulcis*). *LWT- Food Science and Technology*, 43(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.06.024>
- Min, B., McClung, A. & Chen, M. (2014). Effects of hydrothermal processes on antioxidants in brown, purple and red bran whole grain rice (*Oryza sativa* L.). *Food Chemistry*, 159, 106-115. doi: 10.1016/j.foodchem.2014.02.164
- Mujumdar, S. & Devahastin, S. (2003). *Handbook of Fluidization and Fluid-particle Systems* pp. 469-484. New York: Taylor & Francis Group LLC.
- Paciulli, M., Medina-Meza, I. G., Chiavarom, E. & Barbosa-Cánovas G. V. (2016). Impact of thermal and high pressure processing on quality parameters of beetroot (*Beta vulgaris* L.). *LWT- Food Science and Technology*, 68, 98-104. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.12.029>
- Patras, A., Brunton, N. P., Pieve, S. D. & Butler F. (2009). Impact of high pressure processing on total antioxidant activity, phenolic, ascorbic acid, anthocyanin content and colour of strawberry and blackberry purées. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 10(3), 308-313. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2008.12.004>
- Patras, A., Brunton, N. P., O'Donnell, C. & Tiwari, B. K. (2010). Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation. *Trends in Food Science & Technology*, 21(1), 3-11. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.07.004>

- Rodriguez-saona, L. E. & Wrolstad, R.E. (2005). Extraction, isolation, and purification of anthocyanins, In: R. E. Wrolstad, T. E. Acree, E. A. Decker, M. H. Penner, D. S. Reid, S. J. Schwartz et al. (Eds.), *Handbook of Food Analytical Chemistry: Pigments, Colorants, Flavors, Texture, and Bioactive Food Components* pp. 7-17. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- Rubinskiene, M., Viskelis, P., Jasutiene, I., Viskeliene, R. & Bobinas, C. (2005). Impact of various factors on the composition and stability of black currant anthocyanins. *Food Research International*, 38, 867-871. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.02.027>
- Sarni, P., Fulcrand, H., Souillol, V., Souquet, J. M. & Cheynier, V. (1995). Mechanisms of anthocyanin degradation in grape must-like model systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 69(3), 385-391. doi: 10.1002/jsfa.2740690317
- Soponronnarit, S. & Prachayawarakorn, S. (1994). Optimum strategy for fluidized bed paddy drying. *Drying Technology*, 12(7), 1667-1686. <http://dx.doi.org/10.1080/07373939408962192>
- Swain, T. & Hillis, W. E. (1959). The phenolic constituents of *Prunus domestica* I- the quantitative analysis of phenolic constituents. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 10, 63-68.
- Tsuzuki, T., Suzuki, Y., Yamada, S., Kano, S., Ohnishi, H., Fujimoto, T. et al. (2014). Effect of oxygen absorber on accumulation of free fatty acids in brown rice and whole grain wheat during storage. *LWT- Food Science and Technology*, 58(1), 222-229. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.02.015>
- Zhang, Z., Diao, E., Shen, X., Ma, W., Ji, N. & Dong, H., (2014). Ozone-induced changes in phenols and antioxidant capacities of peanut skins. *Journal of Food Process Engineering*, 37(5), 506-514. doi: 10.1111/jfpe.12108

Research Article

การตรวจสอบชิ้นงานอัตโนมัติผ่านระบบการประมวลผลภาพในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

Automated part inspection by image processing system in vehicle part manufacturing

เอกชัย พรรณวัลย์¹ และสุภัทรชัย สูดสawat²

Akekachai Pannawan¹ and Supattarachai Sudsawat²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการวัดคุมและอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง อำเภอบ้านค่าย จังหวัดระยอง 21120

¹Division of Instrumentation and Automation Engineering Technology, Faculty of Engineering Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Rayong Campus, Ban Khai, Rayong 21120

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

²Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520

*E-mail: akekachai.p@eat.kmutnb.ac.th

Received: 22/10/2016; Accepted: 6/06/2017

บทคัดย่อ

ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ คุณภาพถือเป็นสิ่งสำคัญที่ผู้ผลิตต้องคำนึงถึง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพแบบอัตโนมัติ โดยการประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพแบบภาพสีเทาในการตรวจสอบขนาดของชิ้นงาน (gray image processing) เพื่อนำมาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ประเภทงานฉีดพลาสติกในส่วนของกระบวนการวัดขนาดซึ่งมีความซับซ้อน และมีความหลากหลายของชิ้นงาน และเพื่อแทนที่การใช้ผู้ปฏิบัติงานในการตรวจสอบ ผลการทดลองพบว่าระบบตรวจสอบคุณภาพแบบอัตโนมัติสามารถ

ลดเวลาและเพิ่มความแม่นยำในการตรวจสอบชิ้นงาน ดังนั้นการตรวจสอบชิ้นงานอัตโนมัติผ่านระบบการประมวลผลภาพนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และสร้างความน่าเชื่อถือให้กับลูกค้าได้

คำสำคัญ: ชิ้นส่วนยานยนต์, ระบบตรวจสอบคุณภาพแบบอัตโนมัติ, ระบบการประมวลผลภาพ

Abstract

In automotive part manufacturing, part's qualities are main important that manufacturers have to concern during production process. The purpose of this research was to develop the automated quality inspection by applying the gray image processing system to investigate the quality of plastic injection parts in vehicle part industry in dimension measurement section which were complicated and had various geometries and to replace an operator's inspection. The results showed that automated inspection could reduce time and enhance precision of inspection process. Therefore this automated part inspection by image processing system was able to increase work's efficiency and reliability to enhance customer's satisfaction.

Keywords: automotive part, automated quality inspection, image processing system

บทนำ

อุตสาหกรรมยานยนต์ ถือได้ว่าเป็นมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจไทย และก่อให้เกิดการจ้างงานเป็นจำนวนมาก โดยในรถยนต์หนึ่งคันประกอบไปด้วยชิ้นส่วนมากกว่า 20,000 ชิ้น ทำให้ผู้ผลิตรถยนต์ไม่สามารถผลิตทุกชิ้นส่วนเองได้ จึงต้องมีการจ้างผลิต และเมื่อพิจารณาจำนวนผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในประเทศไทยตามลำดับการส่งมอบพบว่า มีผู้ผลิตชิ้นส่วนลำดับที่ 1 (1st Tier) จำนวน 462 บริษัท และมีผู้ผลิตชิ้นส่วนลำดับที่ 2 และ 3 (2nd Tier and 3rd Tier) อีกกว่า 1,137 บริษัท (Thailand Automotive Institute, 2014) ทางผู้ผลิตรถยนต์จึงให้ความสำคัญในการควบคุมคุณภาพของชิ้นส่วนที่จ้างผลิตซึ่งอาจมาจากผู้ส่งมอบเพียงรายเดียวหรือหลายรายก็ได้ เพื่อให้มีคุณภาพและมาตรฐานเดียวกัน

การตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์จึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับผู้ผลิต หรือผู้ส่งมอบชิ้นส่วน ซึ่งนอกจากจะช่วยให้อินค้ามีคุณภาพเป็นไปตามความต้องการของลูกค้าแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนค่าเสียโอกาสและลดการส่งมอบล่าช้าเนื่องจากต้องผลิตใหม่จากสินค้าที่ไม่ได้คุณภาพ (Laofor & Peansupa, 2012) จึงช่วยสร้างความเชื่อมั่นให้กับลูกค้า และเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันให้แตกต่างจากคู่แข่งอีกด้วย (Luo & He, 2016) อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบคุณภาพต้องใช้ทั้งเวลา ต้นทุน และแรงงาน การตรวจสอบคุณภาพโดยพนักงาน มีความถูกต้องสูงสุดเพียง 80% (Molleda et al., 2013) อันเนื่องมาจากความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงาน

ทั้งยังขาดมาตรฐานในการทำงาน จึงต้องมีการฝึกทักษะและสอนวิธีการใช้เครื่องมือวัดให้แก่พนักงาน (Huang & Pan, 2015) ในช่วงปลายคริสต์ทศวรรษ 1980 จึงได้มีการนำระบบอัตโนมัติมาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพและได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้นเรื่อย ๆ ในปัจจุบัน (Molleda et al., 2013)

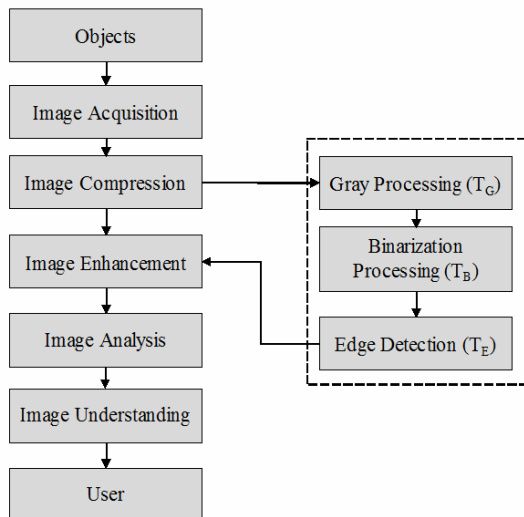
การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพโดยระบบการประมวลผลภาพ

การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพโดยระบบการประมวลผลภาพเป็นเทคนิคหนึ่งที่ยอมรับได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในทุกอุตสาหกรรมเพื่อช่วยลดเวลาในการทำงาน และเพิ่มประสิทธิภาพ รวมทั้งสร้างความน่าเชื่อถือในการตรวจสอบ (Huang & Pan, 2015) ทั้งในอุตสาหกรรมที่ต้องการความแม่นยำในการตรวจสอบสูง สำหรับชิ้นส่วนขนาดเล็กอย่างอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มีการประยุกต์ใช้เทคนิคการตรวจสอบด้วยภาพเพื่อตรวจสอบจุดบกพร่องในการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ เซมิคอนดักเตอร์ (Huang & Pan, 2015) และแผ่นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น (Wang et al., 2010)

ในสภาวะการทำงานที่อันตราย หรือต้องใช้ความร้อนสูงนิยมใช้เทคนิคการตรวจสอบด้วยภาพ ทำให้อุปกรณ์ในการตรวจสอบไม่ต้องสัมผัสกับชิ้นงานโดยตรง เช่น การตรวจสอบจุดบกพร่องในการผลิตเหล็กแผ่นม้วน ช่วยให้พบจุดบกพร่องได้อย่างทันเวลา สร้างความน่าเชื่อถือ และลดต้นทุนในการผลิต (Luo & He, 2016) เป็นต้น การตรวจสอบความกว้างและความเรียบในการผลิตโลหะแผ่นม้วน จะช่วยเพิ่มความเร็วและความสามารถในการผลิต อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนและลดความเสียหายจากการตรวจสอบด้วยสายตา (Molleda et al., 2013) รวมถึงการตรวจสอบและแยกแยะจุดบกพร่องในระหว่างการผลิตโลหะแผ่นม้วนที่ใช้ความเร็วสูง และมีสภาวะการทำงานที่ไม่ปลอดภัย แทนวิธีการตรวจสอบแบบเดิมที่ต้องใช้ผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งทำได้เพียงแค่การตรวจสอบคุณภาพในขั้นตอนสุดท้ายเท่านั้น (Eremin, 2006) และในกระบวนการหล่อโลหะ มีการนำเทคนิคการตรวจสอบด้วยภาพมาใช้ในการวัดขนาดของชิ้นงาน ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ทำให้ลดเวลาในการตรวจสอบโดยไม่ต้องรอให้ชิ้นงานเย็นตัว จึงช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้พนักงาน (Li & Sha, 2011)

การประมวลผลภาพ (image processing) คือ การจัดการภาพด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ต้องการ เป็นการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงคุณภาพของภาพถ่ายให้ดีขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปวิเคราะห์ และใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ขั้นตอนการประมวลผลภาพ เริ่มด้วยการนำเข้าภาพ (image acquisition) จากนั้นเข้าสู่การบีบอัดภาพ (image compression) การปรับปรุงภาพ (image enhancement) การวิเคราะห์ภาพ (image analysis) และการสร้างความเข้าใจและการรับรู้แก่ผู้ใช้งาน (image understanding) ดังรูปที่ 1

จากรูปที่ 1 ขั้นตอนการบีบอัดภาพไปจนถึงการปรับปรุงภาพ ประกอบไปด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญ (Yang et al., 2015) ได้แก่ กระบวนการแปลงภาพสีให้เป็นภาพสีเทา (gray processing) เมื่อได้ภาพสีเทาแล้วจึงเข้าสู่กระบวนการแปลงภาพสีเทาให้เป็นภาพขาวดำ (binarization processing) และสุดท้ายเป็นกระบวนการหาขอบภาพ (edge detection) จะได้ภาพที่มีขอบชัดเจนเพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 1. ขั้นตอนการประมวลผลภาพ (ดัดแปลงจาก Laofor & Peansupap, 2012 และ Yang et al., 2015)

กระบวนการแปลงภาพสีให้เป็นภาพสีเทา

ภาพถ่ายดิจิทัลประกอบไปด้วยจุดภาพ หรือพิกเซล (Pixels) มากมายประกอบกันเป็นภาพ ซึ่งในแต่ละพิกเซลจะมีความเข้มของแสงแตกต่างกันออกไป จากการรวมกันของแสง 3 สีหลัก คือ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (RGB) สามารถแสดงออกมาเป็นตัวเลขได้ดังสมการ (1)

$$F_{col}(x,y) = [c_r(x,y), c_g(x,y), c_b(x,y)]^T \quad (1)$$

โดยที่ x,y คือ พิกัดของพิกเซล และ $c_r(x,y)$, $c_g(x,y)$, $c_b(x,y)$ คือ ค่าความเข้มของแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ตามลำดับในการลดภาระงานจึงทำการแปลงภาพสีให้เป็นภาพสีเทา ดังสมการ (2)

$$f_g(x,y) = T_G [F_{col}(x,y)] \quad (2)$$

โดยที่ $T_G : R^3 \rightarrow R^1$ คือ มีความสัมพันธ์จาก R^3 ไป R^1 และ $f_g(x,y)$ คือ ค่าความเข้มของแสงของพิกเซลในภาพสีเทา

กระบวนการแปลงภาพสีเทาให้เป็นภาพขาวดำ

หลังจากที่ได้ภาพสีเทาแล้วกระบวนการถัดมาคือการแปลงให้เป็นภาพขาวดำเพื่อให้ง่ายต่อการหาขอบภาพในกระบวนการต่อไป โดยการแปลงค่าความเข้มของแสงของพิกเซลให้เป็น 0 หรือ 255 สำหรับภาพ 8 บิต ซึ่งจะได้อัตราและสีขาวตามลำดับแสดงได้ดังสมการ (3)

$$f_b(x,y) = T_B [f_g(x,y)] \quad (3)$$

โดยที่ $T_B : R^1 \rightarrow R^1$ คือ มีความสัมพันธ์ตามฟังก์ชัน

$$T_B : f_b(x,y) = \begin{cases} 255, & f_g(x,y) \geq T \\ 0, & f_g(x,y) < T \end{cases} \quad (4)$$

กระบวนการหาขอบภาพ

เมื่อได้ภาพขาวดำแล้ว ต่อมาเป็นกระบวนการหาขอบภาพ ซึ่งจะช่วยในการหาพื้นที่และตำแหน่งของจุดบกพร่องเพื่อการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การแปลงจากภาพขาวดำมาเป็นภาพที่แสดงขอบงาน สามารถแสดงได้ดังสมการ (5)

$$f_c(x,y) = T_E [f_b(x,y)] \quad (5)$$

โดยที่ $T_E : R^1 \rightarrow R^1$ คือ การดำเนินการเพื่อหาขอบภาพ

การประมวลผลภาพในอุตสาหกรรม

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยปกติมักใช้การตรวจสอบด้วยสายตา ซึ่งต้องใช้เวลาค่อนข้างนาน และขาดความน่าเชื่อถือ จึงมีการนำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการตรวจสอบรอยย่นตามตะเข็บผ้า โดยใช้เทคนิคการตรวจสอบด้วยภาพ จึงช่วยลดขั้นตอนการฝึกทักษะของพนักงาน ทำให้การทำงานง่ายและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น (Han et al., 2010) ในอุตสาหกรรมไม้ มีการรวมกระบวนการผลิตกับการประกันคุณภาพโดยนำเทคนิคการตรวจสอบด้วยภาพเข้ามาช่วยในการตรวจสอบพื้นผิวของชิ้นงานแบบอัตโนมัติ ซึ่งอาจเกิดจุดบกพร่องจากการทำงานของเครื่องจักรในระหว่างการผลิต (Hesselbach et al., 2007) หรือแม้กระทั่งในงานสถาปัตยกรรม มีการประยุกต์ใช้ในงานปูกระเบื้องเพื่อทดแทนการตรวจสอบด้วยสายตา ช่วยลดความแตกต่างจากดุลพินิจในแต่ละบุคคล และเพิ่มความน่าเชื่อถือในการตรวจสอบ (Laofor & Peansupa, 2012) สำหรับในอุตสาหกรรมยานยนต์มีการประยุกต์ใช้งานระบบการตรวจสอบด้วยภาพกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความถูกต้องแม่นยำสูง ทำให้การทำงานสะดวกรวดเร็ว และมี

ประสิทธิภาพ ได้แก่ ในการตรวจสอบคุณภาพถุงลมนิรภัยโดยใช้โปรแกรม MATLAB ควบคู่กับโครงข่ายประสาทเทียม (BP neural network) (Xianjiang et al., 2012) และการตรวจสอบขนาดและรูปร่างของชิ้นส่วนในระบบเบรครถยนต์ (Yu & Tan, 2010) สำหรับกระบวนการฉีดพลาสติกมีการประยุกต์ใช้งานการตรวจสอบด้วยภาพเพื่อหาข้อบกพร่องของชิ้นงานจากการเกิดครีบกาว และการหดตัวของชิ้นงานพลาสติก ควบคู่ไปกับการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเป็นค่าตั้งต้นของเครื่องจักรเพื่อลดปัญหาคุณภาพ (Yang et al., 2015)

อย่างไรก็ตามพบว่า การนำระบบการประมวลผลภาพไปใช้ส่วนใหญ่จะนำไปใช้กับการผลิตจำนวนมาก (mass production) ซึ่งมีรูปแบบชิ้นงานแบบเดียว และเป็นการผลิตแบบต่อเนื่อง แต่สำหรับสถานประกอบการที่เป็นกรณีศึกษา ซึ่งเป็นผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ประเภทงานฉีดพลาสติก มีความต้องการในการตรวจสอบชิ้นงานตั้งแต่ในช่วงของการผลิตงานต้นแบบ ซึ่งมีรูปแบบที่หลากหลายและจุดตรวจสอบจำนวนมาก ในงานวิจัยครั้งนี้ จึงมีการประยุกต์ใช้เทคนิคการตรวจสอบด้วยภาพ โดยออกแบบให้มีความยืดหยุ่นในการทำงาน โดยสามารถ สามารถตรวจสอบชิ้นงานได้อย่างหลากหลายรูปแบบ เหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีโครงสร้างซับซ้อน และมีจุดตรวจสอบตามข้อกำหนดหลายจุด เพื่อช่วยลดเวลา และเพิ่มความน่าเชื่อถือในการตรวจสอบ รวมทั้งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน

วิธีการทดลอง

การเก็บข้อมูลชิ้นงานและวิธีการตรวจสอบ

สถานประกอบการที่เป็นกรณีศึกษาในครั้งนี้ (บริษัท ไมโครเทคโปรดักส์ จำกัด) ดำเนินธุรกิจด้านงานฉีดพลาสติกแบบครบวงจร ตั้งแต่รับทำแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก ไปจนถึงประกอบชิ้นงานให้ลูกค้า โดยลูกค้าส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ ซึ่งให้ความสำคัญในเรื่องคุณภาพ และมาตรฐานของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก ดังนั้น การตรวจสอบคุณภาพจึงเป็นขั้นตอนหนึ่งที่ทางบริษัทฯ ให้ความสำคัญ

ในปัจจุบัน กระบวนการตรวจสอบคุณภาพของทางบริษัทฯ จะทำการตรวจสอบตั้งแต่ลักษณะปรากฏ ได้แก่ สีไม่ได้ตามมาตรฐาน ฉีดไม่เต็ม มีรอยขีด หรือ โกงงอ ตรวจสอบขนาดของชิ้นงาน รวมทั้งตรวจสอบฟังก์ชันการใช้งาน หรือการประกอบเข้ากับชิ้นส่วนอื่น โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การตรวจสอบชิ้นงานต้นแบบ ซึ่งต้องทำแบบร้อยเปอร์เซ็นต์ โดยการตรวจสอบชิ้นงานต้นแบบทุกชิ้นก่อนส่งมอบและวัดขนาดทุกจุดตามแบบ (drawing) ของลูกค้า และการสุ่มตรวจชิ้นงานในระหว่างการผลิต ซึ่งจะทำการวัดขนาดของชิ้นงานเฉพาะในจุดที่สำคัญโดยส่วนใหญ่อาศัยการตรวจวัดโดยผู้ปฏิบัติงานด้วยสายตา และวัดขนาดชิ้นงานโดยใช้เวอร์เนียดังรูปที่ 2

พนักงานที่ทำการตรวจวัดจะต้องถูกฝึกฝนทักษะในการตรวจสอบชิ้นงาน รวมถึงการใช้เครื่องมือ ซึ่งต้องใช้เวลาในการเรียนรู้ นอกจากนี้ ยังต้องใช้เวลาในการตรวจสอบนาน โดยเฉพาะในการวัดขนาดของชิ้นงาน ซึ่งค่อนข้างมีความซับซ้อน และบางครั้งมีจุดที่ต้องวัดมากถึงร้อยจุด ซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดได้ ทำให้ขาดความ

นำเชื่อถือในคุณภาพและมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำระบบอัตโนมัติเข้ามามีใช้ในการวัดขนาดชิ้นงาน เพื่อให้การทำงานรวดเร็ว และแม่นยำมากขึ้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงาน และสร้างความน่าเชื่อถือให้แก่ลูกค้า



รูปที่ 2. วิธีการตรวจวัดชิ้นงานในปัจจุบัน

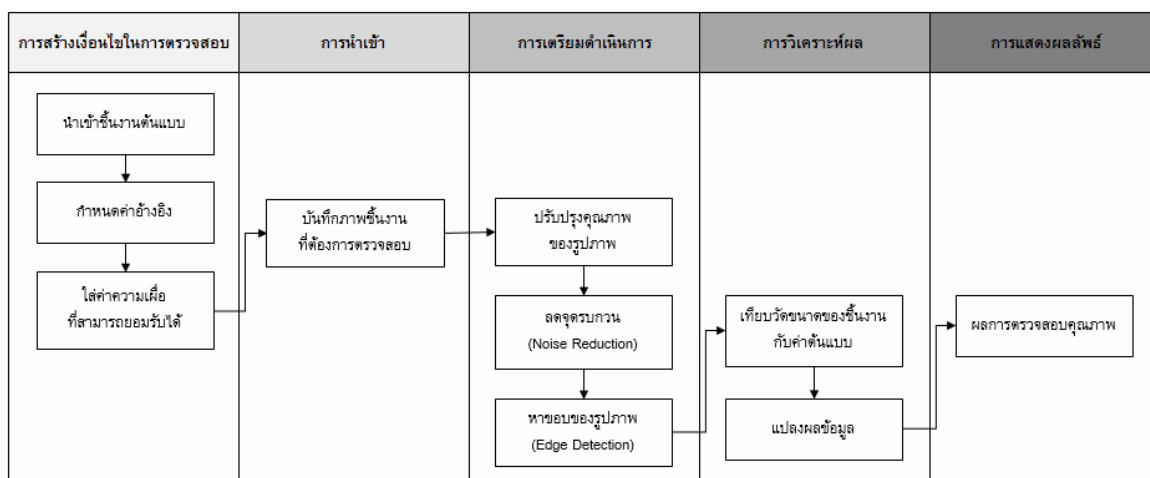
การออกแบบและปรับปรุงวิธีการตรวจสอบใหม่

ระบบการตรวจสอบชิ้นงานอัตโนมัติจะถูกนำมาใช้ในการวัดขนาดของชิ้นงานโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการตรวจสอบด้วยภาพผ่านโปรแกรม LabVIEW โดยมีการออกแบบและปรับปรุงวิธีการทำงานให้ง่าย และสะดวกต่อผู้ปฏิบัติงานซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 3 จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการทำงานแบ่งเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การสร้างเงื่อนไขในการตรวจสอบ ผู้ปฏิบัติงานจะต้องนำเข้าชิ้นงานต้นแบบที่มีลักษณะถูกต้องตามข้อกำหนด ใส่ค่าอ้างอิงเพื่อเป็นค่าขนาดของชิ้นงานพร้อมทั้งใส่ค่าความเผื่อที่สามารถยอมรับได้เพื่อใช้เป็นต้นแบบในการเทียบวัด (2) การนำเข้าโดยการบันทึกภาพชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ (3) การเตรียมค่าเนกการ โดยทำการปรับภาพเพื่อให้สามารถใช้ในการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป (4) การวิเคราะห์ผล โปรแกรมจะเทียบวัดขนาดของชิ้นงานกับค่าต้นแบบ (5) การแสดงผลลัพธ์ โดยจัดทำเป็นรายงานคุณภาพสำหรับจุดที่ผ่านและไม่ผ่านการตรวจสอบ

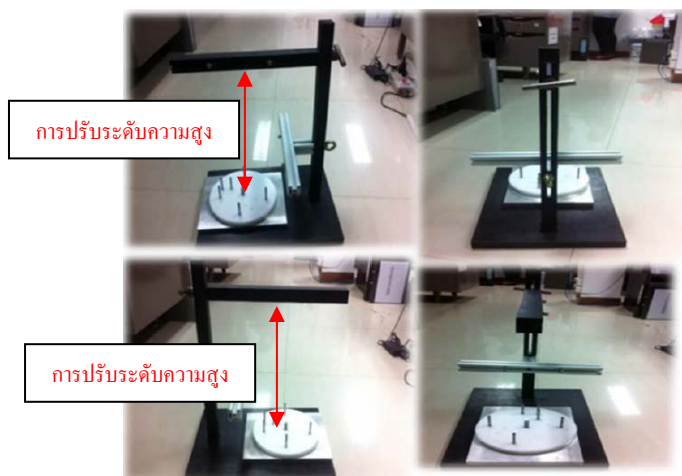
การจัดทำชุดตรวจสอบ

ชุดตรวจสอบชิ้นงานอัตโนมัติประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหลัก คือ กล้อง ไฟส่องสว่าง โครงสร้างของชุดตรวจสอบ และตัวจับยึดชิ้นงาน โดยเลือกใช้กล้องที่มีความละเอียดของภาพ (resolution) 2,592 x 1,944 pixel ความเร็วชัตเตอร์ 1/10,000 ถึง 30 วินาที ไฟส่องสว่าง สำหรับควบคุมความเข้มของแสงให้เหมาะสมในการ

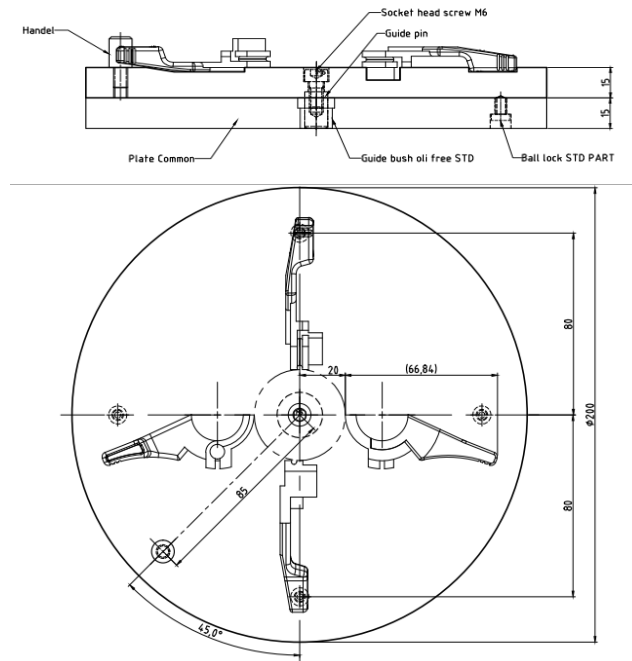
ตรวจสอบชิ้นงาน โครงสร้างของชุดตรวจสอบ ออกแบบให้รองรับกับกล้องและหลอดไฟ สามารถเลื่อนขึ้นลงได้ เพื่อปรับระดับให้เหมาะสมกับชิ้นงาน ดังรูปที่ 4 ส่วนตัวจับยึดชิ้นงาน มีไว้เพื่อจับยึดชิ้นงานให้อยู่ในตำแหน่งและทิศทางเดิมในขณะที่ตรวจสอบชิ้นงานดังรูปที่ 5 และ 6 ซึ่งข้อควรระวังคือเมื่อมีการปรับระดับความสูงการตรวจสอบชิ้นงานแล้วต้องจับยึดที่ระยะตรวจสอบนั้นเพราะเมื่อมีการเปลี่ยนระยะการตรวจสอบ โปรแกรมจะเพิ่มหน่วยความจำของความเข้มแสงที่เปลี่ยนไปและอาจส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนในการตรวจสอบชิ้นงานได้



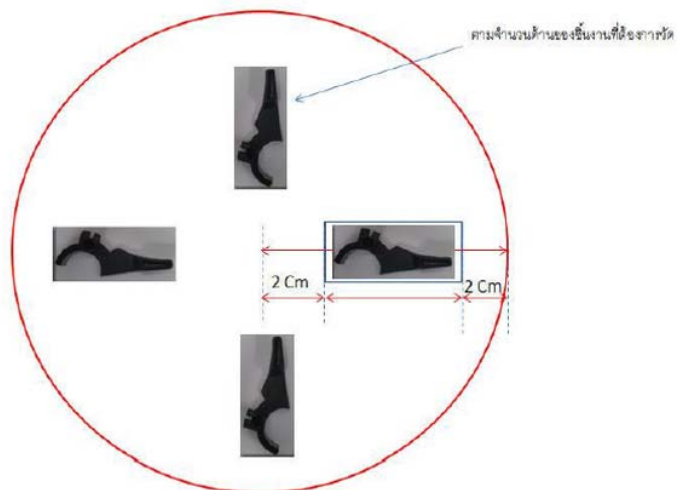
รูปที่ 3. ขั้นตอนการทำงานของระบบอัตโนมัติ



รูปที่ 4. โครงสร้างของชุดตรวจสอบ



รูปที่ 5. ตัวอย่างการออกแบบตัวจับยึดชิ้นงาน



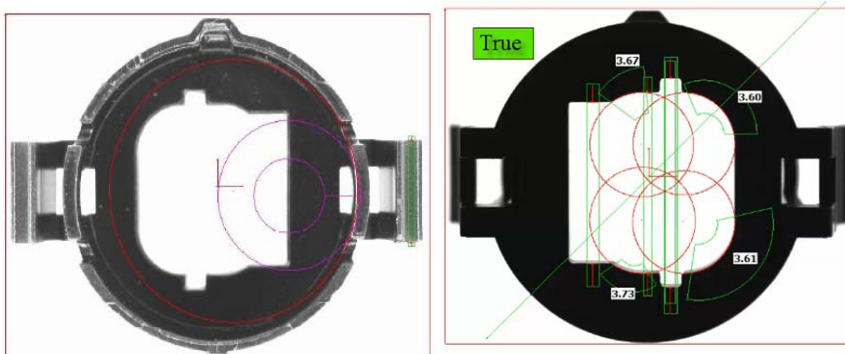
รูปที่ 6. แบบจำลองตัวจับยึดชิ้นงาน

ผลการทดลอง

จากการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการตรวจสอบชิ้นงาน จากเดิมเป็นการตรวจวัดโดยผู้ปฏิบัติงานด้วยสายตา และวัดขนาดชิ้นงานโดยใช้เวอร์เนีย ได้พัฒนามาเป็นการตรวจสอบชิ้นงานอัตโนมัติ โดยใช้เทคนิคการตรวจสอบด้วยภาพ ดังรูปที่ 7 โดยมีการแสดงผลผ่านจอคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 8



รูปที่ 7. วิธีการตรวจวัดชิ้นงานหลังปรับปรุง



รูปที่ 8. ตัวอย่างการแสดงผลในการตรวจสอบชิ้นงาน

จากนั้น จึงได้ทำการทดสอบกับชิ้นงาน 3 แบบ โดยการตรวจสอบชิ้นละ 5 จุดตรวจสอบ แสดงผลเปรียบเทียบกับวิธีการทำงานแบบเดิม ดังตารางที่ 1 ถึง 3

ตารางที่ 1. ผลการทดสอบชิ้นงาน Cover (TAD)

Part name : Cover (TAD)					
No	Original Dimension (mm.)	Tolerance		Measuring Actual	
		Min	Max	Human	Project
1	$\varnothing 20.80 -0/+0.2$	20.80	21.00	20.81	20.48
2	$12.70 -0/+0.2$	12.70	12.90	12.81	12.74
3	$11.30 -0/+0.2$	11.30	11.60	11.58	11.26
4	$14.70 -0/+0.2$	14.70	14.90	14.98	14.50
5	$1.40 -0/+0.2$	1.40	1.60	1.47	1.47

ตารางที่ 2. ผลการทดสอบชิ้นงาน Knob

Part name : Knob					
No	Original Dimension (mm.)	Tolerance		Measuring Actual	
		Min	Max	Human	Project
1	$R35 \pm 0.1$	34.90	35.10	-	35.82
2	$\varnothing 1.60 -0/+0.1$	1.60	1.70	1.58	1.54
3	4.05 ± 0.1	3.95	4.15	4.00	4.06
4	15.90 ± 0.1	15.80	16.00	15.53	15.93
5	25 ± 0.1	24.90	25.10	24.98	24.65

ตารางที่ 3. ผลการทดสอบชิ้นงาน Choke Lever

Part name : Choke Lever					
No	Original Dimension (mm.)	Tolerance		Measuring Actual	
		Min	Max	Human	Project
1	6 ±0.1	5.90	6.10	6.08	5.96
2	Ø22.50 -0/+0.2	22.50	22.70	22.55	20.26
3	11 ±0.2	10.80	11.20	11.17	10.97
4	2 -0/+0.2	2.00	2.20	2.15	2.24
5	Ø6.20 -0/+0.2	6.20	6.40	6.39	6.65

ผลการทดสอบ พบว่า ค่าที่ได้จากการตรวจวัดด้วยผู้ปฏิบัติงาน (human) และด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมา (project) มีค่าใกล้เคียงกัน และแตกต่างกันในบางจุด จากการตรวจสอบชิ้นงานทั้ง 3 แบบ ผู้ปฏิบัติงานตรวจพบค่าที่ไม่ได้ตามข้อกำหนดจำนวน 2 จุดในชิ้นงานที่ 1 และ 2 และไม่พบจุดที่ไม่ได้มาตรฐาน ตามลำดับ ส่วนเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นตรวจพบค่าที่ไม่ได้ตามข้อกำหนดจำนวน 4 จุด 3 จุด และ 3 จุด ตามลำดับ และในขณะเดียวกันในการตรวจสอบในชิ้นงานตัวอย่างที่ 3 โดยใช้เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นตรวจพบค่าที่ไม่ได้ตามข้อกำหนดจำนวนถึง 3 จุด ในขณะที่วิธีการตรวจสอบแบบเก่าไม่พบจุดที่ไม่ได้มาตรฐาน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Laofor และ Peansupap (Laofor & Peansupa, 2012) ที่พบว่า ระบบตรวจสอบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจพบจุดที่ไม่ได้มาตรฐานมากกว่าการตรวจสอบโดยผู้ปฏิบัติงาน

สำหรับชิ้นงาน Knob มีจุดที่ต้องตรวจสอบค่ารัศมี ซึ่งถ้าเป็นแบบเดิมผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถตรวจสอบเองได้ เนื่องจากไม่มีเครื่องมือ ต้องส่งไปตรวจสอบที่อื่นซึ่งมีค่าใช้จ่าย และต้องใช้เวลาในการส่งไป แต่เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาใหม่สามารถวัดค่ารัศมีได้ จากการประเมินเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบด้วยภาพ โดยเปรียบเทียบกับวิธีการทำงานแบบเดิม แสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4. สรุปผลการประเมินการตรวจสอบชิ้นงาน

ชื่องาน	เวลาที่ใช้ก่อน ปรับปรุง (นาทีก)	เวลาที่ใช้หลังปรับปรุง (นาทีก)		
		เวลาในกระบวนการ สร้างเงื่อนไข	เวลาในการตรวจวัด	รวม
Cover (TAD)	5	2	0.3	2.3
Knob	8	3	0.3	3.3
Choke Lever	6	2	0.3	2.3

ผลการตรวจสอบชิ้นงาน พบว่า ในการตรวจสอบโดยผู้ปฏิบัติงานใช้เวลาชิ้นละ 5 – 8 นาทีก เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเวลาการตรวจสอบด้วยภาพ จะใช้เวลาเพียง 2.3 – 3.3 นาทีก ทำให้ลดเวลาในการทำงานลง 54%, 58.75% และ 54% ตามลำดับ โดยเฉพาะในกรณีของชิ้นงาน Knob เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาช่วยลดเวลาการทำงานได้ถึง 58.75% เนื่องจากไม่ต้องเสียเวลาในการส่งชิ้นงานไปตรวจสอบที่อื่น

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการวิจัยและพัฒนากระบวนการตรวจสอบด้วยภาพ เพื่อใช้ในการตรวจสอบชิ้นงาน พบว่า สามารถลดเวลาในการปฏิบัติงานได้มากกว่า 59% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang & Pan (2015) และ Li & Sha (2011) ที่พบว่า การตรวจสอบด้วยระบบอัตโนมัติช่วยลดเวลาในการทำงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานมากยิ่งขึ้น

จากผลการทดลองสามารถนำมาใช้ในการทำงานได้จริงกับทุกผลิตภัณฑ์ของทางบริษัท ทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลายกลุ่มอุตสาหกรรมอีกด้วย สำหรับเครื่องตรวจสอบชิ้นงานอัตโนมัติที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นมานี้ นอกจากจะใช้วัดขนาดของชิ้นงานได้แล้ว ยังสามารถวัดค่าความเข้มสีของชิ้นงาน และจุดบกพร่องของชิ้นงานที่มีขนาดเล็กมาก แต่ข้อจำกัดของชุดการตรวจสอบชิ้นงานนี้คือ ผู้ตรวจสอบชิ้นงานต้องเลือกชุดเลนส์การตรวจสอบให้เหมาะสมกับลักษณะของชิ้นงานเพื่อการถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้นในการตรวจสอบขนาด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) และบริษัท ไมโครเทคโปรดักส์ จำกัด ที่สนับสนุนงบประมาณ รวมถึงกรณีศึกษาภายในสถานประกอบการ ภายใต้โครงการโปรแกรมสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรม (ITAP)

เอกสารอ้างอิง

- Eremin, S. N. (2006). Image processing technology in the systems for quality control of sheet metal roll. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 16(1): 127-130. doi:10.1134/S1054661806010408
- Han, F., Wan, T. & Stylios, G. K. (2010). *Grade assessment of fabric surface wrinkling by using image analysis*. pp. 9-12, In: 3rd International Conference on Information and Computing, 4-6 June 2010, Wuxi, China. doi:10.1109/ICIC.2010.96
- Hesselbach, J., Hoffmeister, H. W. & Loohß, T. (2007). Process-integrated quality assurance in wood machining centers with the help of image processing. *Production Engineering*, 7(1): 97-101. doi:10.1007/s11740-007-0032-x
- Huang, S. H. & Pan, Y. C. (2015) Automated visual inspection in the semiconductor industry: A survey. *Computers in Industry*, 66: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.10.006>
- Laofor, C., & Peansupa, V. (2012). Defect detection and quantification system to support subjective visual quality inspection via a digital image processing: a tiling work case study. *Automation in Construction*, 24: 160-174. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.02.012>
- Li, X. & Sha, F. (2011). *Application of moment invariants in checking the overall dimension of the head cover*. pp. 932-935, In: International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 12-14 August 2011, Harbin, China. doi:10.1109/EMEIT.2011.6023247
- Luo, Q. & He, Y. (2016). A cost-effective and automatic surface defect inspection system for hot-rolled flat steel. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 38: 16-30. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.09.008>
- Molleda, J., Usamentiaga, R., Garcia, D. F., Bulnes, F. G., Espina, A., Dieye, B. & Smith, L. N. (2013). An improved 3D imaging system for dimensional quality inspection of rolled products in the metal industry. *Computers in Industry*, 64(9): 1186-1200. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.05.002>
- Thailand Automotive Institute. (2014). *Structure study on part manufacturing of Thai automotive industry*. Retrieved July 12, 2016, from http://data.thaiauto.or.th/iu3/images/stories/PDF/Research/RD_Supply_Chain.pdf (in Thai)
- Wang, Q., Li, D., Zhang, W., Cao, D. & Chen, H. (2010). *Unsupervised defect detection of flexible printed circuit board gold surfaces based on wavelet packet frame*, pp. 324-327, In: 2nd International Conference on Industrial and Information systems (IIS), 10-11 July 2010, Dalian, China. doi:10.1109/INDUSIS.2010.5565716

- Xianjiang, S., Yue, Z., Peng, S., Han, S., Xiaohui, L. & Andong W. (2012). *Automotive airbag assembly quality visual inspection method studies based on MATLAB*. pp. 1225-1228, In: 2nd International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT), 29-31 December 2012, Changchun, China. doi:10.1109/ICCSNT.2012.6526145
- Yang Y., Yang B., Zhu S., Chen X., (2015) Online quality optimization of the injection molding process via digital image processing and model-free optimization. *Journal of Materials Processing Technology*, 226: 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.07.001>
- Yu, Z., & Tan, W. (2010). *Measuring instrument for compensated hole of hydraulic brake master cylinder based on machine vision*. pp. 3176-3179, In: International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 26-28 June 2010, Wuhan, China. doi:10.1109/MACE.2010.5535625

Research Article

การเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าสูญหายในการสำรวจด้วยตัวอย่าง

A comparison of the estimation methods for missing data in sample survey

พิมพ์ชนก ชาวนาพรรณ* และวัชรินทร์ ไชยมงคล

Pimchanok Chaovanaphan and Watchareeporn Chaimongkol

วิชาเอกสถิติ คณะสถิติประยุกต์ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ บางกะปิ กรุงเทพฯ 10240

Statistics Major, Graduate School of Applied Statistics, National Institute of Department Administration, Bangkok, Bangkok 10240

*E-mail: mint1234@hotmail.com

Received: 19/03/2017; Accepted: 6/06/2017

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการประมาณค่าสูญหาย 3 วิธี คือ วิธีการถดถอย วิธีการถดถอยด้วยระยะห่างค่าสุด และวิธีเอ็มไอ โดยการจำลองข้อมูลด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล ประกอบด้วยตัวแปรอิสระและตัวแปรตามอย่างละหนึ่งตัวแปรที่มีการแจกแจงแบบปกติ มีค่าเฉลี่ย 10 และความแปรปรวน 1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ คือ 0.10, 0.30, 0.50, 0.70 และ 0.90 กำหนดขนาดตัวอย่างเป็น 30, 60, 100 และ 300 ทำซ้ำ 1,000 รอบทุกกรณี กำหนดเปอร์เซ็นต์การสูญหายของตัวแปรตามเป็นไปอย่างสุ่มที่ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ในทุกขนาดตัวอย่าง กำหนดสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น 0.95 เกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ คือ สัมประสิทธิ์การแปรผันและค่าความน่าจะเป็นครอบคลุม ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวประมาณ วิธีการประมาณค่าสูญหายทั้ง 3 วิธีให้ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันและค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมของตัวประมาณใกล้เคียงกัน และค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวประมาณมีค่าลดลงเมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมของตัวประมาณมีค่าใกล้เคียงค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น 0.95 เนื่องจากวิธีการถดถอยเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน วิธีการถดถอยจึงเป็นวิธีการประมาณค่าสูญหายที่เหมาะสมที่สุดในการวิจัยครั้งนี้

คำสำคัญ: การประมาณค่า, ค่าสูญหาย

Abstract

The objective of this research was to study three imputation methods including, regression imputation method (RI), distance regression imputation method (DRI) and multiple imputation method (MI). The Monte

Carlo simulation technique, conducting for 1,000 replications, was composed of one independent variable (X) and one dependent variable (Y) with normal distribution, the mean of 10 and the variance of 1. The correlation coefficients were 0.10, 0.30, 0.50, 0.70 and 0.90. The sample sizes were 30, 60, 100 and 300. The Percentages of missing at random in the dependent variable were 5, 10 and 15. Confidence coefficient was 0.95. Coefficient of variation (CV) and coverage probability (CP) were used as the criteria of comparison. The result of this research showed that the three imputation methods led to similar coefficient of variations and coverage probabilities. When the sample sizes increased, the coefficient of variation decreased, and the coverage probability was adjacent to the confidence coefficient of 0.95. Since the Regression method was uncomplicated and easier, it was the most appropriate imputation method for this research.

Keywords: imputation, missing value

บทนำ

ปัจจุบันการเก็บรวบรวมข้อมูลของประชากรหรือการสำรวจด้วยตัวอย่าง มักจะพบปัญหาจากการไม่ตอบหรือไม่ให้ความร่วมมือของประชากรหรือกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งทำให้ข้อมูลที่ได้จากประชากรหรือตัวอย่างสูญหาย โดยข้อมูลที่สูญหายนั้นอาจเป็นการไม่ตอบของข้อมูลบางหน่วย (unit nonresponse) หรือการไม่ตอบเฉพาะบางคำถาม (item nonresponse) จึงแก้ปัญหาเหล่านั้นด้วยการประมาณค่าข้อมูลที่เก็บไม่ได้ หรือการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย (imputation) ให้สมบูรณ์ก่อน จึงจะนำข้อมูลนั้นไปวิเคราะห์และสรุปผลได้ แต่นักวิจัยหรือผู้ทำการสำรวจบางกลุ่มที่แก้ปัญหาโดยการตัดหน่วยตัวอย่างที่สูญหายออกไป เหลือแต่หน่วยที่ครบถ้วน ซึ่งเป็นการกระทำที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากจะก่อให้เกิดผลต่อการวิเคราะห์ข้อมูลหลายประการ ได้แก่ (1) เมื่อขนาดตัวอย่างลดลง ทำให้สูญเสียอำนาจในการทดสอบทางสถิติ (2) ค่าประมาณที่ได้ อาจเป็นค่าที่เอนเอียง (3) รูปแบบของการสุ่มตัวอย่างเปลี่ยนไปทำให้ผลวิเคราะห์ที่ได้ อาจไร้ความหมาย และ (4) การใช้น้ำหนักในการประมาณพารามิเตอร์อาจไม่มีความหมาย เนื่องจากผลบวกของน้ำหนักของหน่วยที่เหลืออยู่ขาดสมบัติที่ต้องการ หากไม่มีการปรับแก้ ดังนั้นการประมาณค่าของข้อมูลที่เก็บไม่ได้จึงมีความสำคัญมาก (Suwattee, 2009a; Suwattee, 2009b).

วิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย (imputation) มีมากมายหลายวิธี มีทั้งวิธีที่อาศัยตัวแบบในการประมาณค่าสูญหาย นั่นคือ model-donor imputation ซึ่งได้แก่ วิธีค่าเฉลี่ย (mean imputation) ที่เสนอโดย Wilks (1932) ซึ่งวิธีนี้เป็นการแทนค่าสูญหายด้วยค่าเฉลี่ยของตัวแปรที่สูญหายเมื่อตัดค่าสูญหายออกโดยไม่ใช้ตัวแปรช่วย ต่อมา Buck (1960) ได้นำเงื่อนไขของวิธีค่าเฉลี่ยมาใช้ในรูปแบบของวิธีการถดถอย (regression imputation) โดยการนำข้อมูลของตัวแปรที่สนใจกับตัวแปรช่วยมาใช้ในการประมาณค่าสูญหาย และอีกรูปแบบหนึ่งที่ใช้ข้อมูลของตัวแปรที่สนใจกับตัวแปรช่วย คือวิธีอัตราส่วน (ratio imputation) ซึ่งทั้งวิธีค่าเฉลี่ย วิธีสมการถดถอย และวิธีอัตราส่วนนั้น

เป็นวิธี single imputation คือ การแทนค่าสูญหายด้วยค่าเดียว ในปี 1987 Rubin ได้เสนอวิธีการใส่ค่าหลายค่าแทนข้อมูลที่สูญหายแต่ละค่า (multiple imputation) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องสูง เนื่องจากการคำนวณหลายครั้งเพื่อให้ได้ค่าหลายค่า และนำค่ามาสรุปเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุด ลดข้อเสียของวิธี single imputation เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากวิธี single imputation นั้นมีความแตกต่างจากค่าจริงและมีความเอนเอียงสูง (Rubin, 1987) และนอกจากนี้ยังมีวิธีการประมาณค่าสูญหายโดยไม่อาศัยตัวแบบ เรียกว่า real-donor imputation ซึ่งเป็นการประมาณค่าสูญหายที่ได้จากเซตข้อมูลของค่าที่สังเกตได้ ได้แก่ วิธี hot deck imputation, cold deck imputation และ nearest neighbor imputation เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการประมาณค่าสูญหายเฉพาะกรณีการไม่ตอบเฉพาะบางคำถาม (item nonresponse) และทำการประมาณค่าสูญหายด้วยวิธีการถดถอย (regression imputation : RI) วิธีการถดถอยด้วยระยะห่างต่ำสุด (distance regression imputation : DRI) และวิธีเอ็มไอ (multiple imputation: MI)

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากการจำลองโดยวิธีมอนติคาร์โล (Monte carlo simulation) ด้วยโปรแกรม SAS สร้างประชากรขนาด 5,000 หน่วย ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) ที่มีการแจกแจงแบบปกติ มีค่าเฉลี่ย 10 และความแปรปรวน 1 มีระดับสหสัมพันธ์ (ρ) ระหว่าง X และ Y คือ 0.10, 0.30, 0.50, 0.70 และ 0.90 กำหนดขนาดตัวอย่างเท่ากับ 30, 60 100 และ 300 โดยสุ่มตัวอย่างแบบง่าย (simple random sampling) ทำซ้ำ 1,000 รอบในทุกกรณี กำหนดเปอร์เซ็นต์การสูญหายของตัวแปรตามให้สูญหายเป็นไปอย่างสุ่ม (missing at random) ที่ 5% 10% และ 15% ในทุกขนาดตัวอย่าง และกำหนดสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น 0.95 เกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการประมาณค่าสูญหายของตัวประมาณค่าเฉลี่ย คือ สัมประสิทธิ์การแปรผัน (coefficient of variation : CV) และค่าความน่าจะเป็นครอบคลุม (coverage probability)

การประมาณค่าสูญหายในการสำรวจด้วยตัวอย่างในครั้งนี้ ใช้วิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย 3 วิธี ดังต่อไปนี้

1. วิธีการถดถอย (regression imputation : RI)

การประมาณค่าสูญหายด้วยวิธีสมการถดถอย เป็นการประมาณค่าตัวแปรที่ต้องการศึกษาโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (X) กับตัวแปรตาม (Y) มาช่วยในการประมาณค่า โดยกำหนดให้ $y_1, \dots, y_r$ เป็นค่าข้อมูลที่สมบูรณ์ และ $y_{r+1}, \dots, y_n$ เป็นค่าข้อมูลที่สูญหาย และค่า x_i ทั้งหมดมีค่าที่สมบูรณ์ เมื่อ $i = 1, \dots, n$ จากการใช้ข้อมูล $(x_1, y_1), \dots, (x_r, y_r)$ เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ในตัวแบบ ดังนั้น จึงได้สมการถดถอยเพื่อประมาณค่าสูญหายเป็นดังนี้ (Jitthavech, 2015)

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_i \quad (1)$$

เมื่อ $i = r+1, r+2, \dots, n$

โดยที่ $\hat{y}_i$ เป็นค่าประมาณค่าสูญหายของตัวแปรตาม หน่วยที่ i

x_i เป็นค่าสังเกตของตัวแปรอิสระที่สอดคล้องกับตัวแปรตามหน่วยที่ i

b_0, b_1 เป็นค่าประมาณของ β_0 และ β_1

$$\text{เมื่อ } b_1 = \frac{\sum_{i=1}^r (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^r (x_i - \bar{x})^2}, \quad b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x}, \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^r x_i}{r} \text{ และ } \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^r y_i}{r}$$

2. วิธีการถดถอยด้วยระยะทางต่ำที่สุด (distance regression imputation : DRI)

Chaimongkol (2005) ได้เสนอวิธีการประมาณค่าสูญหายด้วยวิธีการถดถอยระยะห่างต่ำสุด หรือ DRI โดยได้กำหนดให้ $y_1, \dots, y_r$ เป็นค่าข้อมูลที่สมบูรณ์ และ $y_{r+1}, \dots, y_n$ เป็นค่าข้อมูลที่สูญหาย และค่า x_i $i = 1, \dots, n$ ทั้งหมดมีค่า เมื่อ $i = 1, \dots, r$ ให้ $d_{xi} = x_{(i+1)} - x_{(i)}$ และ $d_{yi} = y'_{i+1} - y'_i$ เมื่อ y'_i คือค่าของ y ที่สอดคล้องกับสถิติลำดับของ $x_{(i)}$ ดังนั้น สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายระหว่าง d_{xi} กับ d_{yi} คือ

$$\hat{d}_y = \hat{\beta}'_0 + \hat{\beta}'_1 d_x \quad (2)$$

$$\text{เมื่อ } \hat{\beta}'_1 = \frac{\sum_{i=1}^{r-1} (d_{xi} - \bar{d}_x)(d_{yi} - \bar{d}_y)}{\sum_{i=1}^{r-1} (d_{xi} - \bar{d}_x)^2}, \quad \hat{\beta}'_0 = \bar{d}_y - \hat{\beta}'_1 \bar{d}_x, \quad \bar{d}_y = \frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^{r-1} d_{yi} \text{ และ } \bar{d}_x = \frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^{r-1} d_{xi}$$

สำหรับหน่วยที่มีค่าสูญหาย $j = r+1, \dots, n$

ให้ $m_j = |x_j - x_{(i)}| = \min_{1 \leq k \leq r} |x_i - x_{(k)}|$ สำหรับบางค่า k เมื่อ $1 \leq k \leq r$ ดังนั้น

$$\Delta y_j = \hat{\beta}'_0 + \hat{\beta}'_1 m_j \quad (3)$$

เมื่อ Δy_j เป็นค่าประมาณระยะห่างของ y_j ดังนั้น ค่าสูญหายจะถูกแทนที่ด้วยค่าประมาณ $\hat{y}'_j = y'_k + \Delta y_i$ เมื่อ y'_k เป็นค่าของ y ที่สอดคล้องกับค่า $x_{(k)}$ โดยสถิติลำดับที่ k มีค่าใกล้เคียงกับค่า $x_{(i)}$ เมื่อ $1 \leq k \leq r$

โครงสร้างของวิธี DRI

$x_{(i)}$	d_{xi}	y'_i	d_{yi}	Δy_j	$\hat{y}'_i$
$x_{(1)}$	$x_{(2)} - x_{(1)}$	y'_1	$y'_2 - y'_1$		y'_1
$x_{(2)}$	$x_{(3)} - x_{(2)}$	y'_2	$y'_3 - y'_2$		y'_2
...	...	...	...		...
$x_{(r-1)}$	$x_{(r)} - x_{(r-1)}$	y'_{r-1}	$y'_r - y'_{r-1}$		y'_{r-1}
$x_{(r)}$	-	y'_r	-		y'_r
x_{r+1}				Δy_{r+1}	$\hat{y}'_k + \Delta y_{r+1}$
...				...	...
x_n				Δy_n	$\hat{y}'_k + \Delta y_n$

ตัวประมาณค่าสูญหายของ y_j เมื่อ $j = r+1, \dots, n$ แสดงได้ดังนี้

สำหรับ $\beta'_1 > 0$

$$\hat{y}'_j = \begin{cases} y'_k + \Delta y_j & \text{เมื่อ } x_j \geq x_{(k)} \\ y'_k - \Delta y_j & \text{เมื่อ } x_j < x_{(k)} \end{cases} \quad (4)$$

และสำหรับ $\beta'_1 < 0$

$$\hat{y}'_j = \begin{cases} y'_k + \Delta y_j & \text{เมื่อ } x_j \leq x_{(k)} \\ y'_k - \Delta y_j & \text{เมื่อ } x_j > x_{(k)} \end{cases} \quad (5)$$

3. วิธีเอ็มไอ (multiple imputation)

วิธีการประมาณค่าสูญหายด้วยวิธีเอ็มไอ นั้น ได้มีการเสนอแนวความคิดโดย Rubin (1987) เป็นการแทนที่ค่าสูญหายด้วยวิธีการต่าง ๆ ตั้งแต่ 2 วิธีขึ้นไป (รูปที่ 1) มีขั้นตอนดังนี้ (Little & Rubin, 1987, Carpenter & Kenward, 2013)

- 3.1 สร้างชุดข้อมูลที่สมบูรณ์ด้วยวิธีการประมาณค่าสูญหายแต่ละวิธี
- 3.2 วิเคราะห์ตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ที่สนใจศึกษาจากแต่ละวิธีการประมาณค่าสูญหาย
- 3.3 รวมตัวประมาณค่าพารามิเตอร์จากแต่ละวิธีเป็นชุดเดียวกัน โดยใช้กฎของ Rubin นั่นคือค่าประมาณของตัวประมาณค่าเฉลี่ย คือ

$$\bar{\theta} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \hat{\theta}_i \quad (6)$$

เมื่อ $\hat{\theta}_i$ แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลของแต่ละวิธี ; $i = 1, 2, \dots, M$

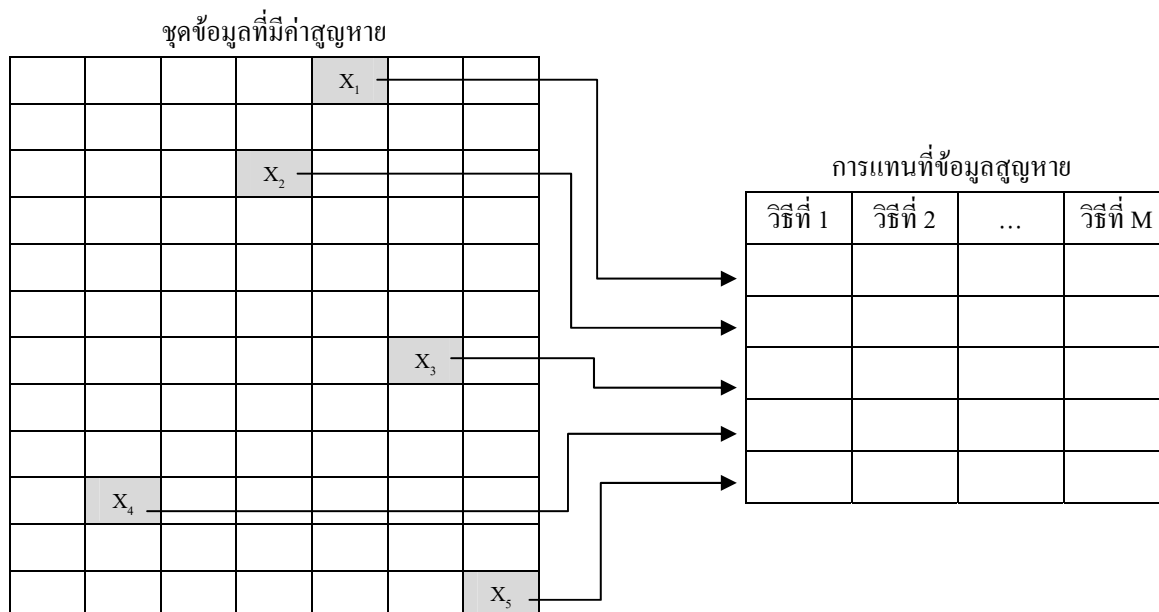
ความแปรปรวนของตัวประมาณค่าเฉลี่ย เกิดจากองค์ประกอบ 2 องค์ประกอบ คือความแปรปรวนภายใน และความแปรปรวนภายนอก

$$\text{ความแปรปรวนภายใน} \quad \bar{W} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M W_i \quad (7)$$

เมื่อ W_i แทน ความแปรปรวนของแต่ละวิธี ; $i = 1, 2, \dots, M$

$$\text{ความแปรปรวนภายนอก} \quad B = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (\hat{\theta}_i - \bar{\theta})^2 \quad (8)$$

ดังนั้น ความแปรปรวนของตัวประมาณค่าเฉลี่ย คือ $T = \bar{W} + (1 + M^{-1})B$



รูปที่ 1. วิธีการแทนที่ข้อมูลสูญหายด้วยวิธีเอ็มไอ

เกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวประมาณ 2 วิธี คือ

1. สัมประสิทธิ์การแปรผัน (coefficient of variation)

$$c.v.(\hat{\theta}) = \frac{\sqrt{v(\hat{\theta})}}{\mu_{\theta}} \times 100 \quad (9)$$

2. ค่าความน่าจะเป็นครอบคลุม (coverage probability)

เมื่อช่วงความเชื่อมั่น 95% ของ $\bar{y}_I$ สร้างจาก $\bar{y}_I \pm 1.96\sqrt{\hat{V}(\bar{y}_I)}$ และค่าความน่าจะเป็นครอบคลุม คือ

$$CP_M(\bar{y}_I) = \frac{t}{M} \quad (10)$$

โดยที่ $\bar{y}_I$ คือ ค่าเฉลี่ยของ y เมื่อมีการทดแทนค่าสูญหายแล้ว

M คือ จำนวนรอบในการทำซ้ำ; $M = 1,000$ รอบ

t คือ จำนวนครั้งที่ช่วงความเชื่อมั่นคลุมค่าเฉลี่ยของ Y

การทดสอบของดูเกีย (Tukey's Test)

การทดสอบของดูเกีย (Tukey's test) เสนอโดย Tukey เป็นการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มหรือเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแต่ละคู่โดยการคำนวณค่าวิกฤตในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทุกคู่ที่เป็นไปได้ นั่น จะใช้ค่านัยสำคัญของพิสัยstudentized range (significant studentized range) นั่นคือ

$$T_{\alpha} = q_{\alpha}(k, v)s_{\bar{y}} \quad (11)$$

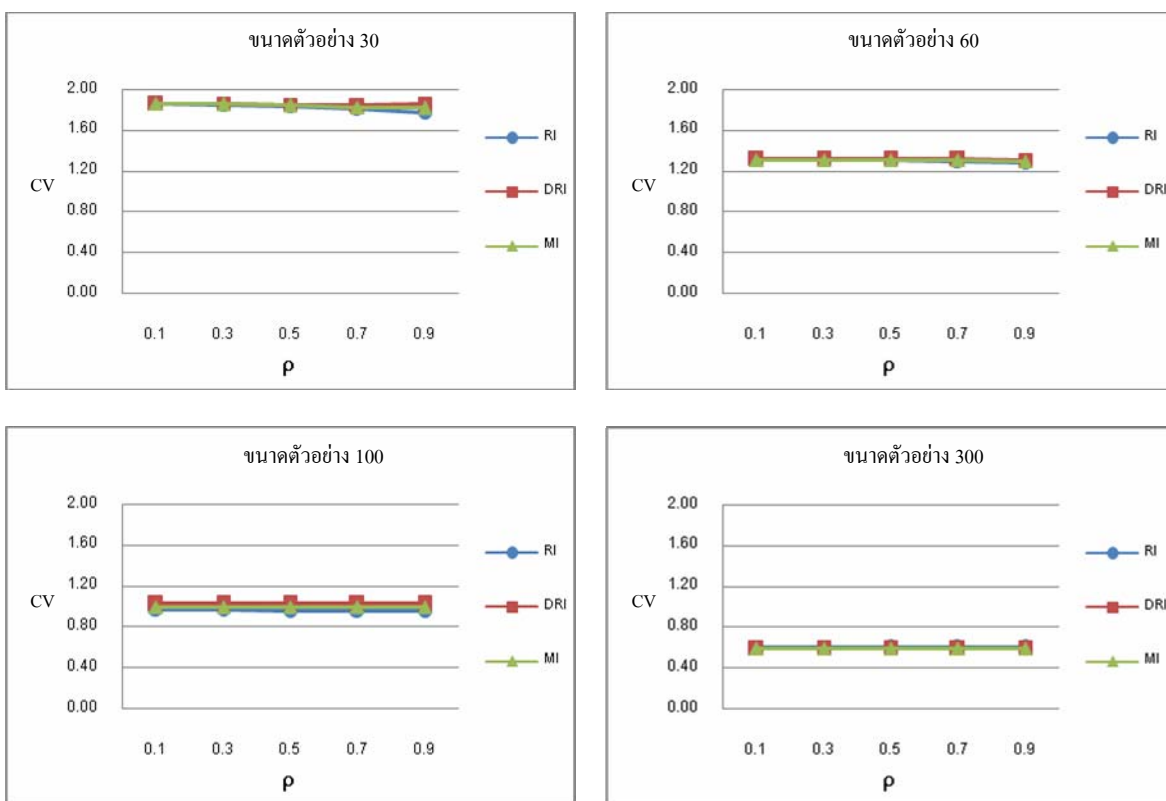
เมื่อ $q_{\alpha}(k, v)s_{\bar{y}}$ คือ ค่านัยสำคัญของพิสัยstudentized range ที่ระดับนัยสำคัญ α และที่องศาความเสรีของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ v ในการวิเคราะห์ k กลุ่ม

ผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวประมาณ

1.1 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวประมาณ เมื่อเปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูล 5%

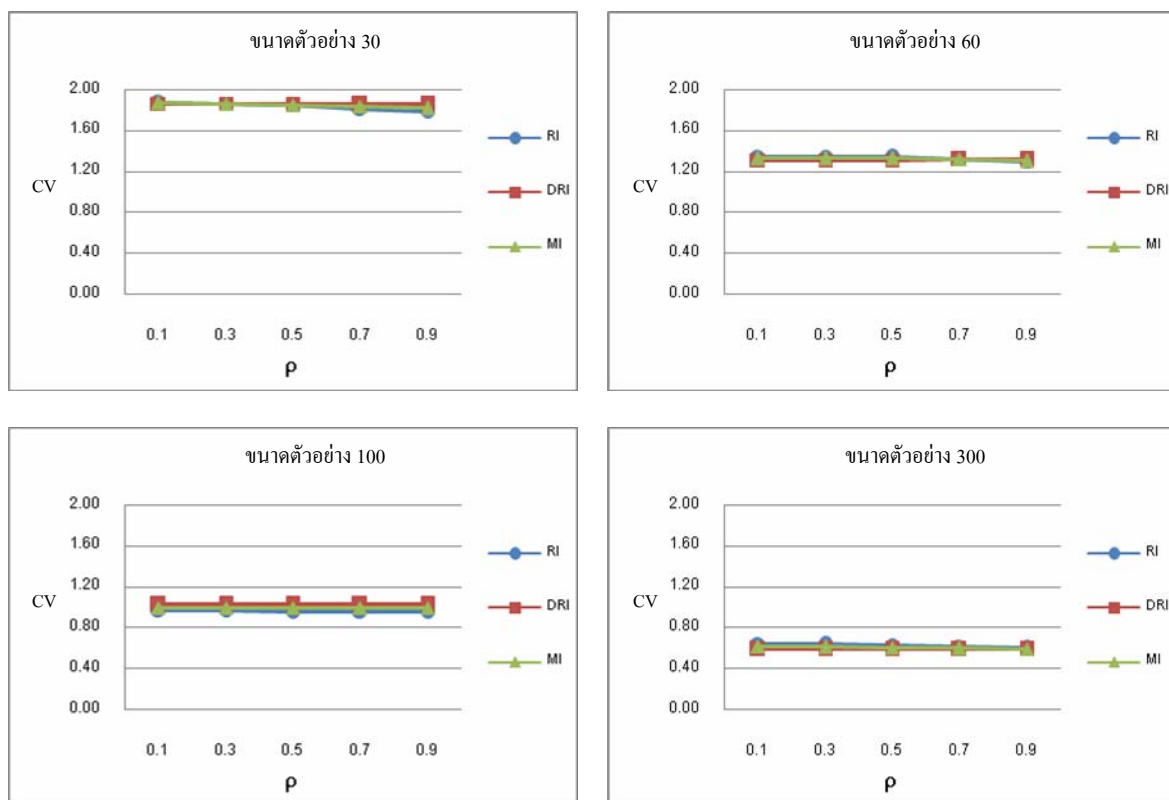
พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวประมาณ ที่เปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูล 5% พบว่า เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการประมาณค่าสูญหายทั้ง 3 วิธี คือ วิธีการถดถอย วิธีการถดถอยด้วยระยะทางต่ำที่สุด และวิธีเอ็มไอ ด้วยการทดสอบของคูเกีย ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวประมาณใกล้เคียงกัน ไม่ว่าขนาดตัวอย่างและสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะเป็นเท่าใดก็ตาม และเมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวประมาณมีแนวโน้มลดลงในทุกกรณี (รูปที่ 2)



รูปที่ 2. ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวประมาณ เมื่อเปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูล 5%
จำแนกตามขนาดตัวอย่าง

1.2 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวประมาณ เมื่อเปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูล 10%

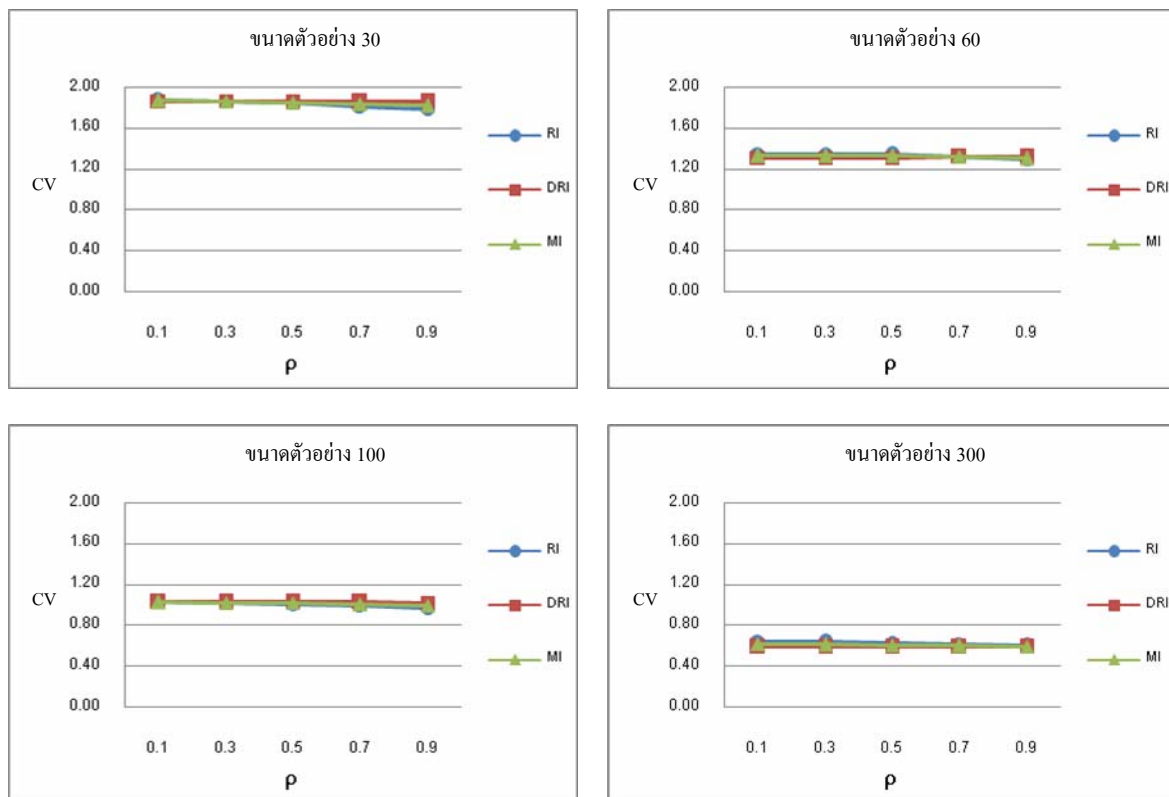
พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวประมาณ ที่เปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูล 10% พบว่า เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการประมาณค่าสูญหายทั้ง 3 วิธีด้วยการทดสอบของดูก็ย์ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวประมาณใกล้เคียงกัน (รูปที่ 3)



รูปที่ 3. ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวประมาณ เมื่อเปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูล 10%
จำแนกตามขนาดตัวอย่าง

1.3 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวประมาณ เมื่อเปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูล 15%

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวประมาณ ที่เปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูล 15% พบว่า เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการประมาณค่าสูญหายด้วยวิธีการถดถอย วิธีการถดถอยด้วยระยะทางต่ำที่สุด และวิธีเอ็มไอ ด้วยการทดสอบของดูก็ย์ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวประมาณใกล้เคียงกัน และค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวประมาณมีค่าลดลงเมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4)

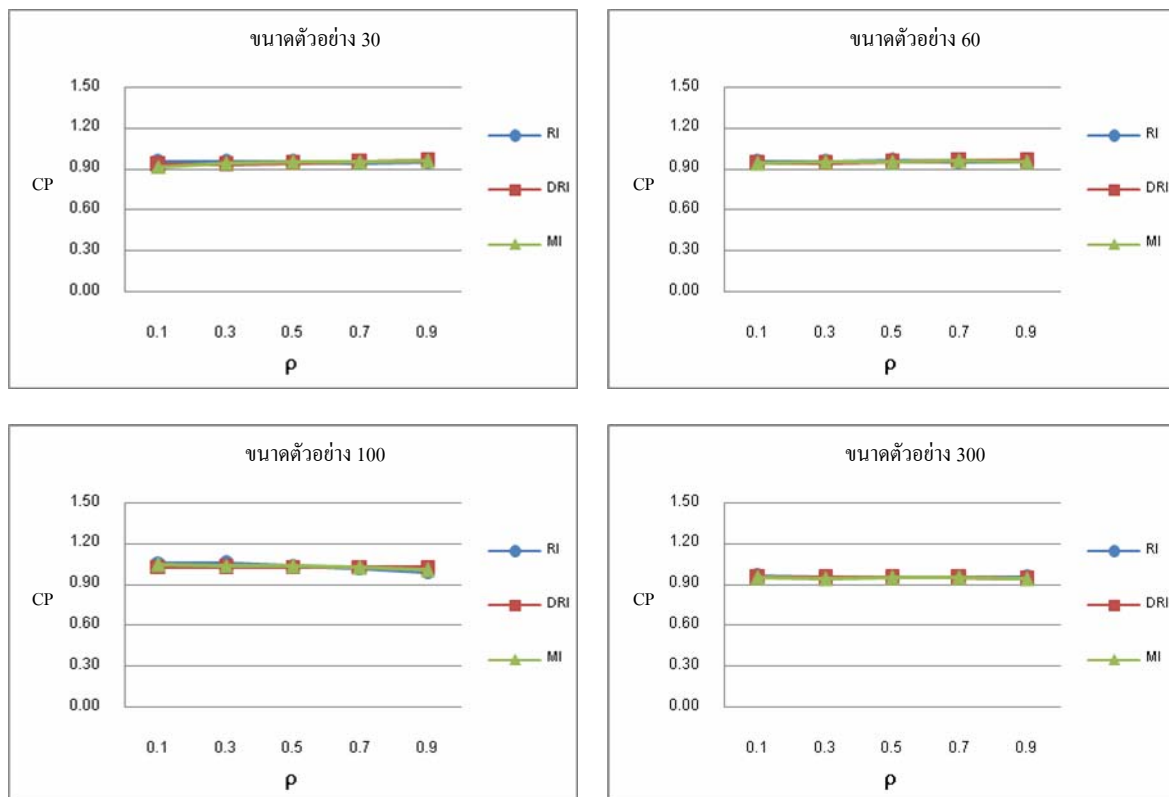


รูปที่ 4. ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวประมาณ เมื่อเปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูล 15%
จำแนกตามขนาดตัวอย่าง

2. แสดงผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมค่าเฉลี่ยของประชากร

2.1 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมค่าเฉลี่ยของประชากร เมื่อเปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูล 5%

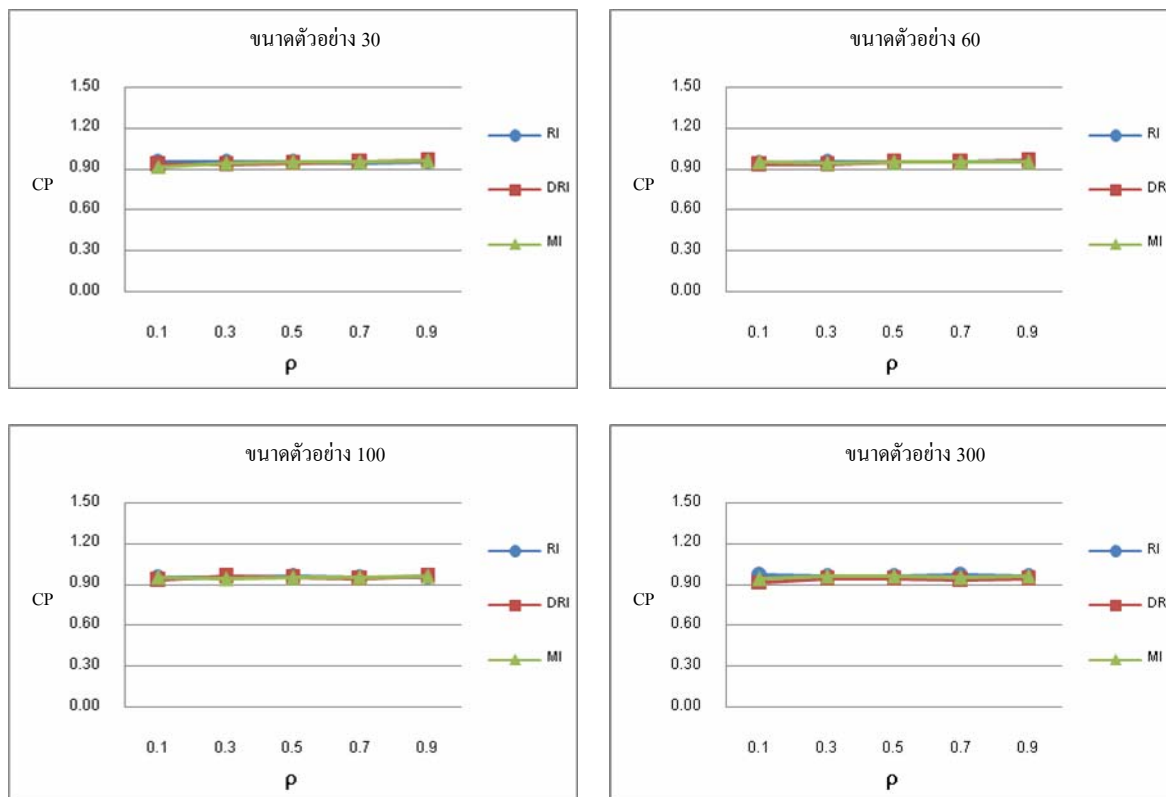
พิจารณาค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมค่าเฉลี่ยของประชากร ที่เปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูล 5% พบว่าเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการประมาณค่าสูญหายทั้ง 3 วิธี คือ วิธีการถดถอย วิธีการถดถอยด้วยระยะทางต่ำที่สุด และวิธีเอ็มไอ ด้วยการทดสอบของดูกีส์ ให้ค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมค่าเฉลี่ยของประชากรไม่แตกต่างกัน มีค่าใกล้เคียงค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น 0.95 (รูปที่ 5)



รูปที่ 5. ค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมค่าเฉลี่ยของประชากร เมื่อเปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูล 5%
จำแนกตามขนาดตัวอย่าง

2.2 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมค่าเฉลี่ยของประชากร เมื่อเปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูล 10%

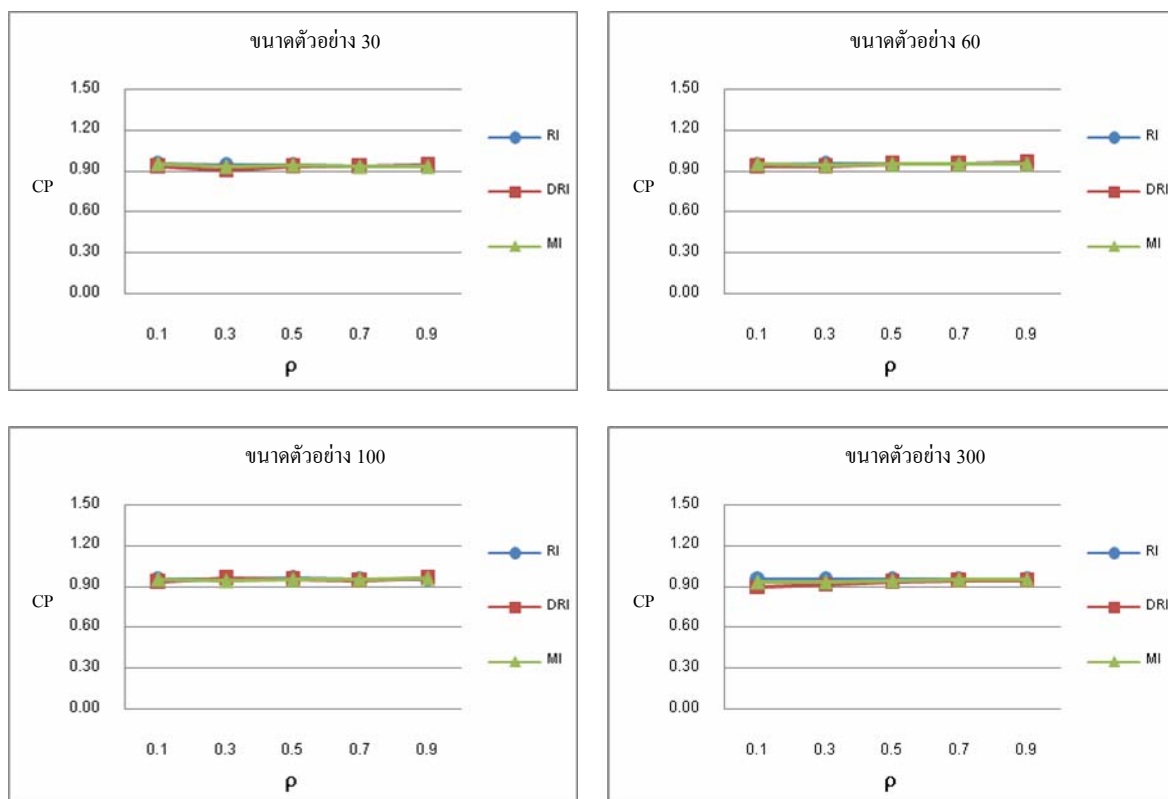
พิจารณาค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมค่าเฉลี่ยของประชากร ที่เปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูล 10% พบว่า เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการประมาณค่าสูญหายวิธีการถดถอย วิธีการถดถอยด้วยระยะทางต่ำที่สุด และวิธีเอ็มไอ ด้วยการทดสอบของคูทซ์ ให้ค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมค่าเฉลี่ยของประชากรไม่แตกต่างกัน มีค่าใกล้เคียงค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น 0.95 (รูปที่ 6)



รูปที่ 6. ค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมค่าเฉลี่ยของประชากร เมื่อเปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูล 10%
จำแนกตามขนาดตัวอย่าง

2.3 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมค่าเฉลี่ยของประชากร เมื่อเปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูล 15%

พิจารณาค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมค่าเฉลี่ยของประชากร ที่เปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูล 15% พบว่า เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการประมาณค่าสูญหายวิธีการถดถอย วิธีการถดถอยด้วยระยะทางต่ำที่สุด และวิธีเอ็มไอ ด้วยการทดสอบของดูก็ซ ให้ค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมค่าเฉลี่ยของประชากรไม่แตกต่างกัน มีค่าใกล้เคียงค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น 0.95 (รูปที่ 7)



รูปที่ 7. ค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมค่าเฉลี่ยของประชากร เมื่อเปอร์เซ็นต์การสูญเสียของข้อมูล 15%
จำแนกตามขนาดตัวอย่าง

วิจารณ์และสรุปผลการวิจัย

วิธีการประมาณค่าสูญเสียในการสำรวจด้วยตัวอย่างนั้น มีหลายวิธีด้วยกัน ในงานวิจัยนี้ ศึกษาวิธีการประมาณค่าสูญเสีย 3 วิธี คือ วิธีการถดถอย วิธีการถดถอยด้วยระยะทางต่ำที่สุด และวิธีเอ็มไอ ผลการศึกษา พบว่า วิธีการประมาณค่าสูญเสียทั้ง 3 วิธี ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันและค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมค่าเฉลี่ยของประชากรที่ใกล้เคียงกันหรือไม่แตกต่างกัน โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวประมาณมีค่าลดลงเมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น เนื่องจากข้อมูลที่มีขนาดใหญ่จะช่วยลดความคลาดเคลื่อนหรือเพิ่มความแม่นยำในการประมาณมากขึ้น ขณะที่ค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมค่าเฉลี่ยของประชากรมีค่าใกล้เคียงค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น 0.95 และวิธีการถดถอยเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน วิธีการถดถอยจึงเป็นวิธีการประมาณค่าสูญเสียที่เหมาะสมที่สุดในการวิจัยครั้งนี้

เมื่อพิจารณาขนาดตัวอย่าง เปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูล และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ พบว่า ระดับของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ไม่มีผลต่อการเลือกวิธีการประมาณค่าสูญหาย เนื่องจากในแต่ละกรณีเมื่อค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันและค่าความน่าจะเป็นครอบคลุมค่าเฉลี่ยของประชากรมีค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่ขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันมีค่าลดลง ผลสรุปที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันแตกต่างจากงานวิจัยของ Chaimongkol (2005) เป็นผลมาจากงานวิจัยของ Chaimongkol (2005) ศึกษาข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มและการแจกแจงแบบแกมมา ขณะที่งานวิจัยนี้ใช้การแจกแจงแบบปกติ

เอกสารอ้างอิง

- Buck, S. F. (1960). A method of estimation of missing values in multivariate data suitable for use with an electronic computer. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 22(2): 302-306.
- Carpenter, J. R. & Kenward, M. G. (2013). *Multiple Imputation and Its Application* (1st ed.). West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Chaimongkol, W. (2005). *Three composite imputation methods for item nonresponse estimation in sample surveys* (Doctoral dissertation) Graduate School of Applied Statistics, National Institute of Development Administration, Bangkok.
- Jitthavech J. (2015). *Regression Analysis* (1st ed.). Bangkok, Thailand: Academic Promotion and Development Program, National Institute of Development Administration. (in Thai)
- Little, R. J. A. & Rubin, D. B. (1987). *Statistical Analysis with Missing Data* (1st ed.). New York: John Wiley & Sons, Ltd.
- Rubin, D. B. (1987). *Multiple Imputation for Nonresponse in Surveys* (1st ed.). New York: John Wiley & Sons, Ltd.
- Suwattee P. (2009a). *Sample Surveys : Sampling Designs and Analysis* (1st ed.). Bangkok, Thailand: Academic Promotion and Development Program, National Institute of Development Administration. (in Thai)
- Suwattee P. (2009b). *Sampling Theory* (1st ed.). Bangkok, Thailand: Academic Promotion and Development Program, National Institute of Development Administration. (in Thai)
- Wilks, S. S., (1932). Moments and distributions of estimates of population parameters from fragmentary samples. *Annals of Mathematical Statistics*, 3(3): 163-195. doi:10.1214/aoms/1177732885

Research Article

การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบและเปลือกกุ้งสุก และการใช้เป็นสารตกตะกอนน้ำแอปเปิ้ล

Comparative study on properties of chitosan from raw and cooked shrimp shell and the use as clarifying agent in apple juice

สุธีรา ขันทพันธ์* และสุธิดา อัครชนียากร

Sutheera Khantaphant* and Suthida Akkarachaneeyakorn

ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาหารและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

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

*E-mail: sutheera.k@sci.kmutnb.ac.th

Received: 11/01/2017; Accepted: 13/06/2017

บทคัดย่อ

การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของไคโตซานโดยใช้เปลือกกุ้งดิบและสุกเป็นวัตถุดิบ พบว่าปริมาณแร่ธาตุและโปรตีนในเปลือกกุ้งดิบและสุกเริ่มต้นไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) หลังผ่านขั้นตอนกำจัดแร่ธาตุและโปรตีนเพื่อให้ได้ไคตินในลำดับแรก สามารถกำจัดแร่ธาตุและโปรตีนออกจากเปลือกกุ้งดิบได้ร้อยละ 95.65 และ 49.38 ตามลำดับ ขณะที่กำจัดออกจากเปลือกกุ้งสุกได้ร้อยละ 97.38 และ 50.59 ตามลำดับ และเมื่อผ่านขั้นตอนการกำจัดหมู่อะซีติล (deacetylation) เพื่อให้ได้เป็นไคโตซาน พบว่าร้อยละผลผลิต (โดยน้ำหนักแห้ง) ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งสุกสูงกว่าจากเปลือกกุ้งดิบ (46.61 และ 38.59 ตามลำดับ) และสารละลายไคโตซานจากเปลือกกุ้งสุกมีความหนืดสูงกว่าจากเปลือกกุ้งดิบและไคโตซานทางการค้าที่นำมาเปรียบเทียบ (3203, 2888 และ 620 cP ตามลำดับ) ในขณะที่ค่า L^* และ pH ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบและสุกไม่พบว่ามีค่าแตกต่างกัน ($p>0.05$) เทคนิค FT-IR ช่วยยืนยันว่าไคโตซานที่สกัดได้มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับโครงสร้างของไคโตซานทางการค้า เมื่อนำไคโตซานไปใช้เป็นสารตกตะกอนน้ำแอปเปิ้ลเพื่อเพิ่มความใส โดยเติมสารละลายไคโตซานร้อยละ 1 ลงในน้ำแอปเปิ้ล พบว่าน้ำแอปเปิ้ลที่

ไม่ได้เติมสารละลายไคโตซานมีความขุ่นสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับค่า b^* ที่สูงที่สุด และน้ำแอปเปิ้ลที่เติมสารละลายไคโตซานจากเปลือกกุ้งมีความขุ่นต่ำสุด ตามด้วยน้ำแอปเปิ้ลที่เติมสารละลายไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบและทางการค้า ตามลำดับ โดยสารละลายไคโตซานที่เติมนั้นไม่ส่งผลต่อ pH ของน้ำแอปเปิ้ล

คำสำคัญ : ไคติน, ไคโตซาน, เปลือกกุ้ง, สารตกตะกอน, ความขุ่น, FT-IR

Abstract

Raw shrimp shell (RSS) and cooked shrimp shell (CSS) were used for chitosan extraction. The demineralization and deproteinization step provided mineral and protein elimination from RSS for 95.65 and 49.38%, respectively and 97.38 and 50.59%, respectively from CSS. After deacetylation, chitosan obtained from CSS yielded higher than that from RSS, 46.61 and 38.59%, respectively. At 1% concentration, chitosan solution of CSS showed higher viscosity than that of RSS and commercial one, respectively (3203, 2888 and 620 cP, respectively). No difference in L^* and pH between chitosan from RSS and CSS ($p>0.05$) had been found. FT-IR technique revealed that the obtained chitosan structures were similar to the structure of the commercial one. As clarifying agent, chitosan solution (1% concentration) was able to decrease the turbidity of apple juice with no effect on pH of juice. Among the samples, apple juice with CSS chitosan solution showed the lowest turbidity than those with RSS and commercial chitosan solution, respectively.

Keywords: chitin, chitosan, shrimp shell, clarifying agent, turbidity, FT-IR

บทนำ

ไคติน (chitin) เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของ *N*-acetyl-D-glucosamine ไคตินในธรรมชาติพบได้ในเปลือกของแมลง เปลือกกุ้ง กระดองปู และแกนหมึก และผนังเซลล์ของรา ยีสต์และจุลินทรีย์หลายชนิด เมื่อหมู่อะซิติล (acetyl group) ที่ตำแหน่ง C2 ใน *N*-acetyl-D-glucosamine ถูกแทนที่ด้วยหมู่อะมิโน (amino group) ภายใต้สภาวะด่างเข้มข้น จะได้อนุพันธ์ของไคตินที่เรียกว่า ไคโตซาน (chitosan) (Rinaudo, 2006). ซึ่งการกำจัดหมู่อะซิติลออกจากโมเลกุลไคติน เรียกว่ากระบวนการดีอะซิติลเลชัน (deacetylation)

ไคโตซาน เป็นวัสดุชีวภาพที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ มีความปลอดภัยในการนำมาใช้กับมนุษย์ อีกทั้งยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ผลจากการถูกแทนที่ด้วยหมู่อะมิโนที่ตำแหน่ง C2 ทำให้โมเลกุลของไคโตซานมีความเป็นขั้วบวกสูง (strong positive polarity) ส่งผลให้ไคโตซานสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย จึงมีการนำไคโตซานมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง โดยในทางอาหาร สามารถใช้ไคโตซานเป็นสารกันเสีย เนื่องจากไคโตซานมีสมบัติในการต่อต้านจุลินทรีย์ โดยประจุบวกของไคโตซานสามารถจับกับเชื้อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นประจุลบ จึงส่งผล

ให้เซลล์จุลินทรีย์ทำงานผิดปกติ (Shahidi et al., 1999) หรือใช้เป็นอาหารเสริมเพื่อลดระดับไขมันและโคเลสเตอรอลในกระแสเลือด เนื่องจากประจุบวกของไคโตซานสามารถจับกับประจุลบของกรดไขมัน อีกทั้งไคโตซานยังสามารถจับไขมันไว้ในโครงสร้างพอลิเมอร์ ทำให้ร่างกายดูดซึมไขมันได้น้อยลง (Aranaz et al., 2009) หรือใช้เพื่อทำให้น้ำผักและผลไม้ใสโดยทำหน้าที่เป็นสารตกตะกอน/สารช่วยให้ใส (clarifying agent) (Rungsardthong et al., 2006) หรือใช้ไคโตซานเป็นฟิล์มเคลือบอาหาร (edible film) เพื่อรักษาความสดของผักและผลไม้ (Martíñon et al., 2014)

แหล่งวัตถุดิบของไคโตซานมักได้จากวัสดุเศษเหลือจากเปลือกและกระดองของสัตว์ทะเล (crustacean shell waste) (Knorr, 1991) ซึ่งมีทั้งเศษวัตถุดิบสดและเศษวัตถุดิบที่เหลือจากการแปรรูปผ่านความร้อน (ปิ้งสุก) ผู้วิจัยจึงต้องการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสกัดและสมบัติของไคโตซานที่ได้จากเปลือกกุ้งต้มสุกและเปลือกกุ้งดิบ รวมถึงการนำไคโตซานไปประยุกต์ใช้ในระบบอาหารโดยใช้เป็นสารตกตะกอนเพื่อทำให้น้ำผลไม้ใสขึ้น

วิธีการทดลอง

1. การเตรียมเปลือกกุ้งดิบและเปลือกกุ้งสุก

นำเปลือกกุ้งสด (กุ้งขาว: *Litopenaeus vannamei*) มาล้างด้วยน้ำสะอาด แยกส่วนที่เป็นเนื้อและไขมันที่ติดกับเปลือกออกเพื่อให้ได้เฉพาะส่วนเปลือก จากนั้นนำเปลือกกุ้งสดมาตัดเป็นชิ้นขนาดประมาณ 1x1 เซนติเมตร ได้เป็นเปลือกกุ้งสดที่พร้อมนำไปสกัดไคโตซาน กรณีเปลือกกุ้งสุกเตรียมโดยการต้มเปลือกกุ้งสดในน้ำเดือดนาน 3 นาที แล้วจึงตัดเป็นชิ้นขนาดประมาณ 1x1 เซนติเมตร

2. การวิเคราะห์หองค์ประกอบพื้นฐานทางเคมีของเปลือกกุ้ง

นำเปลือกกุ้งจากข้อ 1. มาวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุและปริมาณโปรตีน ตามวิธีการของ AOAC (1990)

3. การกำจัดแร่ธาตุ

นำเปลือกกุ้งจากข้อ 1. มากำจัดแร่ธาตุโดยการแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 2 M กวนตลอดเวลา เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 2 องศาเซลเซียส) โดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักต่อปริมาตรเป็น 1 ต่อ 20 จากนั้นนำเปลือกกุ้งมาล้างด้วยน้ำจนเป็นกลาง (ทดสอบโดยใช้กระดาษลิตมัส) สะเด็ดน้ำบนตะแกรงเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำมาผึ่งบนถาดนาน 30 นาที

4. การกำจัดโปรตีน

นำเปลือกกุ้งที่ได้จากขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุมาแช่ต่อในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 2 M กวนตลอดเวลาเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 2 องศาเซลเซียส) ใช้อัตราส่วนน้ำหนักต่อปริมาตรเป็น 1 ต่อ 20 จากนั้นล้างเปลือกกุ้งด้วยน้ำจนเป็นกลาง (ทดสอบโดยใช้กระดาษลิตมัส) สะเด็ดน้ำบนตะแกรงเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำมาผึ่งบนถาด 30 นาที

5. การวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นฐานทางเคมีของเปลือกกุ้งที่ผ่านการกำจัดแร่ธาตุและโปรตีน

นำเปลือกกุ้งที่ได้จากขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุและโปรตีนมาวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุและโปรตีนตามวิธีการของ AOAC (1990)

6. การสกัดไคโตซาน

นำไคติน (เปลือกกุ้งที่ได้จากขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุและโปรตีน) มาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 50 (w/v) โดยใช้อัตราส่วน 1 ต่อ 100 กวนตลอดเวลาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนสารละลายใหม่ทุก 1 ชั่วโมง จนครบ 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาล้างด้วยน้ำจนเป็นกลาง (ทดสอบโดยใช้กระดาษลิตมัส) สะเด็ดน้ำบนตะแกรงเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อควบคุมให้มีความชื้นที่ร้อยละ 10 ± 0.5 ชั่งน้ำหนักไคโตซานที่ได้เพื่อใช้คำนวณหาร้อยละผลผลิตจากสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละผลผลิตของไคโตซาน} = (\text{น้ำหนักไคโตซานที่ได้หลังอบ} / \text{น้ำหนักเปลือกกุ้งเริ่มต้น}) \times 100 \quad (1)$$

7. การวิเคราะห์สมบัติของไคโตซาน

นำไคโตซานที่ได้มาลดขนาดโดยเครื่องมือ (Perten Instruments รุ่น Laboratory Mill 120) แล้วนำผงไคโตซานมาวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ดังนี้

7.1 สี

ชั่งผงไคโตซาน 1 กรัม ใส่จานวัดสีแล้วนำไปวัดสีโดยเครื่องวัดสี (HunterLab Colorimeter รุ่น Color Quest 45/0) ภายใต้แหล่งแสง D65 รายงานผลค่าสีเป็น L^* (lightness), a^* (redness) และ b^* (yellowness)

7.2 โครงสร้างโมเลกุล

นำผงไคโตซานมาตรวจสอบโครงสร้างโมเลกุลโดยวิธี Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) โดยใช้ความยาวคลื่น $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ (Velde & Kiekens, 2004)

7.3 ความหนืด

เตรียมสารละลายไคโตซานให้มีความเข้มข้นร้อยละ 1 (w/v) โดยการละลายผงไคโตซานในกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 1 วัดค่าความหนืดโดยเครื่องวัดความหนืด (Brookfield Viscometer รุ่น Programmable DV-II) โดยใช้หัววัดเบอร์ 5 ความเร็วรอบ 100 rpm อ่านค่าความหนืดที่เวลา 1 นาที รายงานผลเป็นค่าเซนติพอยด์ (cP)

7.4 pH

กระจายผงไคโตซานในน้ำกลั่น โดยให้มีความเข้มข้นร้อยละ 1 (w/v) กวนผสมนาน 30 นาที แล้วนำไปวัด pH ด้วย pH meter (Eutech Instruments รุ่น 510)

8. การใช้ไคโตซานเพื่อตกตะกอนน้ำแอปเปิ้ล

8.1 การเตรียมน้ำแอปเปิ้ล

แอปเปิ้ลฟรุ๊ตเป็นชิ้นเล็ก ผสมกับน้ำเปล่าในอัตราส่วน 1:3 โดยน้ำหนัก แล้วปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นผสม (Buono Blender รุ่น BUO-119371) ใช้ความเร็วเบอร์ 1 (ความเร็วต่ำสุด) เป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที โดยน้ำแอปเปิ้ลที่เตรียมได้ต้องนำไปใช้ทันทีในข้อ 8.3 เพื่อไม่ให้เกิดการแยกชั้นของน้ำแอปเปิ้ล

8.2 การเตรียมน้ำละลายไคโตซาน

เตรียมน้ำละลายไคโตซานให้มีความเข้มข้นร้อยละ 1 (w/v) โดยการละลายไคโตซานในกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 1

8.3 การตกตะกอนน้ำแอปเปิ้ลด้วยสารละลายไคโตซาน

ตวงน้ำแอปเปิ้ลปริมาตร 80 มิลลิลิตรลงในบีกเกอร์ ปีเปตสารละลายไคโตซานจากข้อ 8.2 ลงไป 1 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเทส่วนใส่ออกมาใส่บีกเกอร์ใบใหม่ แล้วกรองน้ำแอปเปิ้ลส่วนใสด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ

8.4 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำแอปเปิ้ลที่ผ่านการตกตะกอน

8.4.1 ความขุ่น

นำน้ำแอปเปิ้ลไปวัดความขุ่นโดยเครื่องวัดความขุ่น (Hach Turbidity Meter รุ่น 2100P)

8.4.2 สี

นำน้ำแอปเปิ้ลไปวัดสีโดยเครื่องวัดสี ภายใต้แหล่งแสง D65 รายงานผลค่าสีเป็น L^* , a^* และ b^*

8.4.3 pH

นำน้ำแอปเปิ้ลไปวัด pH ด้วย pH meter

9. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ CRD ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ด้วยโปรแกรม SPSS version 17 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างพรีดิคเมนต์ของการทดลองที่ 2 และ 5 ด้วย t-test ของการทดลองที่ 7 ด้วย Least Significant Difference (LSD) และของการทดลองที่ 8.4 ด้วย Duncan's New Multiple Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. องค์ประกอบพื้นฐานทางเคมีของเปลือกกุ้ง

ผลการวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุและโปรตีนในเปลือกกุ้งดิบและสุก แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1. องค์ประกอบพื้นฐานทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง) ของเปลือกกุ้งดิบและเปลือกกุ้งสุก

ตัวอย่าง	แร่ธาตุ ^{ns}	โปรตีน ^{ns}
เปลือกกุ้งดิบ	7.59±0.06	32.56±2.78
เปลือกกุ้งสุก	7.64±0.24	34.61±1.03

หมายเหตุ: ns คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ไม่มีความแตกต่างกัน ($p>0.05$)

ปริมาณแร่ธาตุและโปรตีนในเปลือกกุ้งดิบและสุกไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) แต่พบว่าปริมาณแร่ธาตุที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าต่ำกว่าที่ได้จากเปลือกกุ้งขาวอินเดีย ซึ่งรายงานไว้ที่ร้อยละ 26.6 (Ravichandran et al., 2009) ส่วนปริมาณโปรตีนที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าสูงกว่าที่ได้จากเปลือกกุ้งกุลาดำ ซึ่งรายงานไว้ที่ร้อยละ 27.7 (Lertsutthiwong et al., 2002) ซึ่งให้เห็นว่า วัตถุดิบที่แตกต่างกันอาจมีปริมาณองค์ประกอบพื้นฐานที่แตกต่างกันตามไปด้วย

2. องค์ประกอบพื้นฐานทางเคมีของไคติน

เปลือกของสัตว์ตระกูลครัสเตเชียน (crustacean) มีองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด คือ ไคติน แร่ธาตุและโปรตีน ดังนั้นในการสกัดไคตินจึงต้องกำจัดแร่ธาตุและโปรตีนออกจากวัตถุดิบ (Lertsutthiwong et al., 2002) ปริมาณแร่ธาตุและโปรตีนในเปลือกกุ้งดิบและสุกที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุและโปรตีน (ไคติน) แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2. องค์ประกอบพื้นฐานทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง) ของไคตินจากเปลือกกุ้งดิบและเปลือกกุ้งสุก

ตัวอย่าง	แร่ธาตุ	โปรตีน ^{ns}
เปลือกกุ้งดิบ	0.33 ^a ±0.06	16.48±1.41
เปลือกกุ้งสุก	0.20 ^b ±0.03	17.10±0.83

หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่แตกต่างกัน ($p<0.05$)

ns คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ไม่มีความแตกต่างกัน ($p>0.05$)

ปริมาณแร่ธาตุและโปรตีนในเปลือกกุ้งดิบและสุกเริ่มต้นมีค่าไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 1) แต่เมื่อผ่านขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุ พบว่าไคตินจากเปลือกกุ้งสุกมีปริมาณแร่ธาตุต่ำกว่าจากเปลือกกุ้งดิบ ($p<0.05$) บ่งชี้ว่าแร่ธาตุในเปลือกกุ้งสุกถูกกำจัดออกไปได้มากกว่า ซึ่งอาจเป็นเพราะโครงสร้างของเปลือกกุ้งสุกเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านการให้ความร้อนในขั้นตอนการเตรียม ส่งผลให้ความแข็งแรงของโครงสร้างลดลง จึงทำให้สามารถกำจัดแร่ธาตุออกจากเปลือกกุ้งได้มากกว่า อย่างไรก็ตาม ปริมาณโปรตีนในไคตินจากเปลือกกุ้งสุกและดิบไม่ต่างกัน เมื่อ

เปรียบเทียบปริมาณแร่ธาตุและโปรตีนในไคตินที่ได้กับในเปลือกกุ้งเริ่มต้น (ตารางที่ 1) พบว่ามีค่าลดลงอย่างชัดเจน โดยแร่ธาตุในเปลือกกุ้งดิบและเปลือกกุ้งสุกถูกกำจัดออกไปได้ร้อยละ 95.65 และ 97.38 ตามลำดับ ขณะที่โปรตีนในเปลือกกุ้งดิบและเปลือกกุ้งสุกถูกกำจัดออกไปได้ร้อยละ 49.38 และ 50.59 ตามลำดับ

3. ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง

3.1 ร้อยละผลผลิตของไคโตซาน

ไคโตซานที่ได้จากเปลือกกุ้งสุกให้ร้อยละผลผลิตโดยน้ำหนักแห้งสูงกว่าไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบ ($p < 0.05$) โดยมีค่า 46.61 และ 38.59 ตามลำดับ

3.2 สี

จากการวิเคราะห์สีของวัตถุดิบเริ่มต้นและสีของไคโตซาน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3. ค่าสี (L^* , a^* และ b^*) ของเปลือกกุ้งและไคโตซานที่สกัดจากเปลือกกุ้ง

ตัวอย่าง	L^*	a^*	b^*
เปลือกกุ้งดิบ	55.95 ^b ±0.36	4.54 ^c ±0.07	12.04 ^b ±0.22
เปลือกกุ้งสุก	49.84 ^c ±0.12	9.16 ^a ±0.29	13.79 ^a ±0.05
ไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบ	71.82 ^a ±0.50	5.94 ^b ±0.40	11.44 ^b ±0.54
ไคโตซานจากเปลือกกุ้งสุก	71.94 ^a ±0.63	3.60 ^d ±0.16	8.54 ^c ±0.35

หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่แตกต่างกัน ($p < 0.05$)

ค่า L^* ของเปลือกกุ้งดิบมีค่าสูงกว่าของเปลือกกุ้งสุก ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการให้ความร้อนแก่เปลือกกุ้ง ทำให้โปรตีนที่จับอยู่กับสารสีกลุ่มแคโรทีนอยด์ (carotenoids) เสื่อมสภาพธรรมชาติ ส่งผลให้แคโรทีนอยด์เป็นอิสระ และปรากฏให้เห็นเป็นสีแดงของเปลือกกุ้งสุก ค่า L^* จึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับค่า a^* และ b^* ของเปลือกกุ้งสุกที่มีค่าสูงกว่าของเปลือกกุ้งดิบ

เมื่อผ่านขั้นตอนการสกัด พบว่าไคโตซานที่ได้มีลักษณะใส สีออกเหลืองจาง ๆ โดยไคโตซานที่สกัดได้มีค่า L^* สูงกว่าของเปลือกกุ้ง และค่า a^* และ b^* มีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากสารสีในเปลือกกุ้งถูกกำจัดออกไปในขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุและโปรตีน โดยค่า a^* และ b^* ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบมีค่าสูงกว่าของเปลือกกุ้งสุก ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่แคโรทีนอยด์ในเปลือกกุ้งสุกเป็นอิสระมากกว่าในเปลือกกุ้งดิบ จึงทำให้สามารถถูกสกัดออกไปจากเปลือกกุ้งได้มากกว่า อย่างไรก็ตาม L^* ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบและเปลือกกุ้งสุก

มีค่าไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) อาจเป็นเพราะสารสีที่เหลือในเปลือกกุ้งนั้น มีปริมาณเพียงเล็กน้อย จึงไม่ส่งผลกระทบต่อค่า L^* อย่างเด่นชัด

3.3 pH

การวัด pH ของไคโตซานที่ได้ เพื่อใช้ยืนยันว่าในขั้นตอนการสกัดได้ทำการล้างตัวทำละลายออกจนหมด เพื่อให้ได้ไคโตซานที่เป็นกลาง ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อการใช้งานไคโตซานไปประยุกต์ใช้ในขั้นต่อไป ซึ่ง pH ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบและเปลือกกุ้งสุกมีค่าไม่ต่างกัน ($p>0.05$) คือ 7.27 และ 7.31 ตามลำดับ และ pH ดังกล่าวเป็น pH ที่ใกล้เคียงกับ pH ของน้ำกลั่นที่ใช้ในการทดลอง (7.29)

3.4 ความหนืด

ความหนืดของสารละลายไคโตซานแปรผันตามขนาดโมเลกุล แต่หากเกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) ก็อาจส่งผลให้ความหนืดลดลงได้ อันเนื่องมาจากขนาดโมเลกุลที่เล็กลง ซึ่งปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดจากหลายสาเหตุ อาทิเช่น สภาวะที่ใช้ในการกำจัดหมู่อะซิดิล สภาวะที่ใช้ในการกำจัดโปรตีน ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ pH หรืออุณหภูมิ (Rinaudo, 2006) ความหนืดของสารละลายไคโตซานที่ได้แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4. ความหนืดของสารละลายไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบและเปลือกกุ้งสุก

ตัวอย่าง	cP
ไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบ	2888 ^b ±69
ไคโตซานจากเปลือกกุ้งสุก	3203 ^a ±125
ไคโตซานทางการค้า*	620 ^c ±32

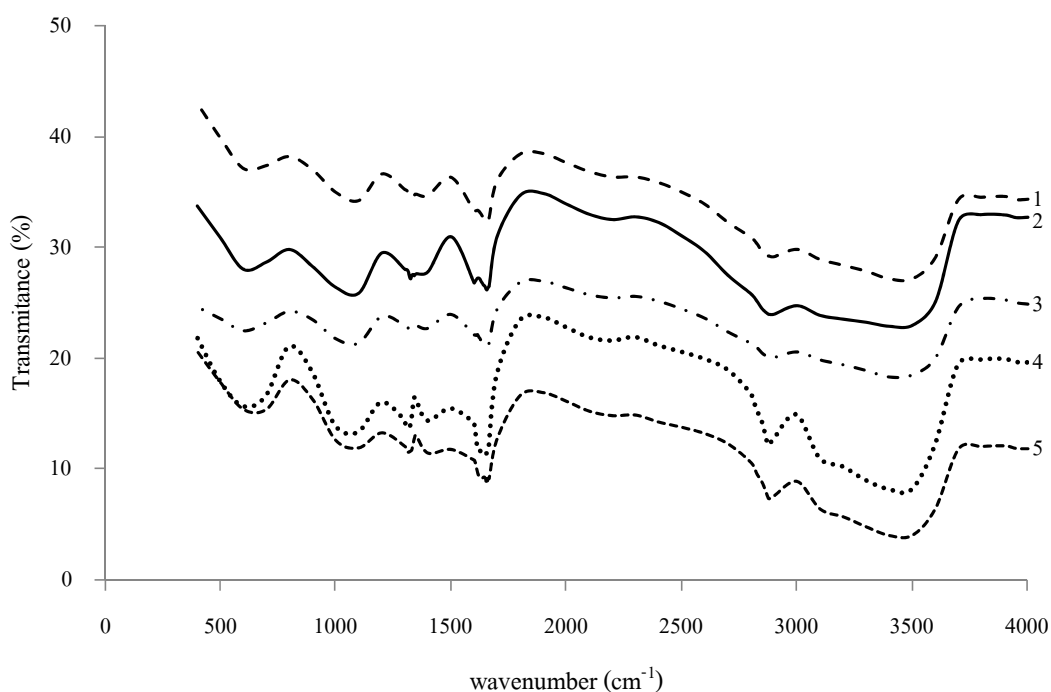
หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่แตกต่างกัน ($p<0.05$)

* ผลผลิตจากแกนหมึก (บริษัท ด้าหมิงเอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด ประเทศไทย, %DD=94.39)

จากตารางที่ 4 พบว่า ความหนืดของไคโตซานจากเปลือกกุ้งสุกมีค่ามากกว่าไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบ และไคโตซานทางการค้าตามลำดับ โดยไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบและสุกให้ค่าความหนืดที่สูงกว่าของไคโตซานทางการค้าอย่างชัดเจน ตามรายงานของ Li et al. (1992) ระบุว่าความหนืดของสารละลายไคโตซานความเข้มข้นร้อยละ 1 ในกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 1 ว่าอยู่ในช่วง 200 – 2000 cP จะเห็นได้ว่าความหนืดของสารละลายไคโตซานที่สกัดได้มีค่าสูงกว่าค่าดังกล่าว ซึ่งค่าความหนืดของสารละลายไคโตซานที่มากกว่านี้ ชี้บ่งถึงขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่าของไคโตซานที่สกัดได้เมื่อเทียบกับขนาดของโมเลกุลไคโตซานทางการค้า อย่างไรก็ตาม หากมีการวิเคราะห์ขนาดโมเลกุลของไคโตซานร่วมด้วย ก็จะสามารถใช้เป็นข้อมูลยืนยันผลการวิเคราะห์ความหนืดได้

3.5 โครงสร้างโมเลกุล

เทคนิค Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy ใช้ในการจำแนกชนิดของสารหรือใช้ยืนยันอัตลักษณ์ของสาร โดยอาศัยชนิดของพันธะเคมีในโมเลกุล ที่มีการดูดกลืน (absorption) หรือการปลดปล่อย (transmission) ของรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ต่าง ๆ ของแต่ละพันธะในโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละพันธะ (Velde & Kiekens, 2004) โครงสร้างโมเลกุลของโคโคซานที่สกัดจากเปลือกกุ้งและโคโคซานทางการค้า เมื่อวิเคราะห์ด้วย FT-IR แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1. โครงสร้างโมเลกุลของโคโคซานและโคโคซานจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| ----- โคโคซานจากเปลือกกุ้งดิบ (5) | โคโคซานจากเปลือกกุ้งสุก (4) |
| ———— โคโคซานจากเปลือกกุ้งดิบ (2) | - - - โคโคซานจากเปลือกกุ้งสุก (1) |
| - · - โคโคซานทางการค้า (3) | |

โดยทั่วไป โครงสร้างของโคโคซานที่ตำแหน่ง C2 จะมีหมู่อะซิติล (*N*-acetyl group: -NHC=OCH_3) เป็นหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งประกอบด้วยพันธะ N-H, C-H, C=O และ C-N เมื่อผ่านกระบวนการกำจัดหมู่อะซิติลเพื่อเปลี่ยนโคโคซาน

ให้เป็นไคโตซาน จะทำให้หมู่ฟังก์ชันที่ตำแหน่ง C2 ของบางโมโนเมอร์ในโมเลกุลไคตินเปลี่ยนเป็นหมู่อะมิโน (amino group: $-NH_2$) ทำให้พันธะ C-H, C=O และ C-N ซึ่งมีพิกตรงกับเลขคลื่น 2878, 1550 และ 1320 cm^{-1} ตามลำดับ ของไคโตซานที่ได้ลดลงหรือหายไปเมื่อเทียบกับไคตินเริ่มต้น

เมื่อพิจารณาจากกราฟในรูปที่ 1 พบว่าไคตินจากเปลือกกุ้งดิบและสุกปรากฏพิกที่เลขคลื่นดังกล่าวชัดเจน แต่ในไคโตซานที่ได้หลังผ่านขั้นตอนการสกัด พิกที่เลขคลื่นเหล่านี้ลดลงอย่างสังเกตเห็นได้ ซึ่งเป็นข้อชี้บ่งว่าไคตินได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นไคโตซานแล้ว (Velde & Kiekens, 2004) และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบและสุกกับไคโตซานทางการค้า พบว่าให้กราฟที่มีรูปแบบคล้ายคลึงกัน ซึ่งแสดงว่าไคโตซานที่สกัดได้มีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลใกล้เคียงกับไคโตซานทางการค้า นอกจากนี้หากสามารถตรวจสอบขนาดโมเลกุลและระดับการกำจัดหมู่อะซิติก (degree of deacetylation) ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์ FT-IR ก็จะทำให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วนสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ต่อไป

4. การใช้ไคโตซานเพื่อตกตะกอนน้ำแอมเปิ้ล

น้ำแอมเปิ้ลที่เติมไคโตซานเพื่อเพิ่มความใส ถูกนำมาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมี ดังแสดงผลในตารางที่ 5 และ 6

ตารางที่ 5. ค่าความขุ่นของน้ำแอมเปิ้ลที่เติมและไม่เติมสารละลายไคโตซาน

ตัวอย่าง	ความขุ่น (NTU)
น้ำแอมเปิ้ล ¹	$844.78^a \pm 41.79$
น้ำแอมเปิ้ลเติมไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบ ²	$150.33^c \pm 13.53$
น้ำแอมเปิ้ลเติมไคโตซานจากเปลือกกุ้งสุก ²	$57.81^d \pm 4.85$
น้ำแอมเปิ้ลเติมไคโตซานทางการค้า ²	$155.00^b \pm 5.29$

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่แตกต่างกัน ($p < 0.05$)

: ¹ ตัวอย่างถูกตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนโดยไม่เติมไคโตซาน แล้วนำมากรอง

: ² ตัวอย่างถูกตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนโดยหลังจากเติมไคโตซาน แล้วนำมากรอง

ความขุ่นของน้ำแอมเปิ้ลเกิดจากคอลลอยด์ของโมเลกุลแทนนิน โปรตีนและเพคติน โดยในสภาวะกรด เพคตินซึ่งมีประจุลบจะห่อหุ้มโมเลกุลของโปรตีนซึ่งมีประจุบวกเอาไว้ (Mukprasirt, 2002) ไคโตซานซึ่งมีหมู่ อะมิโนที่แสดงประจุบวกจึงจับและห่อหุ้มอนุภาคนี้นี้ไว้ได้ ทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นและตกตะกอนได้ง่ายขึ้น จากการทดลองพบว่า ความขุ่นของน้ำแอมเปิ้ลที่เติมไคโตซานมีค่าต่ำกว่าของน้ำแอมเปิ้ลที่ไม่ได้เติมถึง 5-14 เท่า โดยที่

ไคโตซานจากเปลือกกุ้งสุกให้น้ำแอปเปิ้ลที่มีความใสสูงสุด (ความขุ่นต่ำสุด) ซึ่งอาจเกิดจากการที่ไคโตซานจากเปลือกกุ้งสุกมีประจุบวกของหมู่อะมิโนมากกว่า นอกจากนี้ยังอาจเป็นผลมาจากขนาดของโมเลกุลของไคโตซานจากเปลือกกุ้งสุกที่ใหญ่กว่าของไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบและไคโตซานทางการค้า (แปลผลจากความหนืดที่สูงกว่า-ตารางที่ 4) โดยไคโตซานที่มีโมเลกุลใหญ่กว่า มีโอกาสจับคอลลอยด์ในน้ำแอปเปิ้ลได้มากกว่าและทำให้ตกตะกอนได้ดีกว่าดังผลปรากฏ

ตารางที่ 6. pH และค่าสีของน้ำแอปเปิ้ลที่เติมและไม่เติมสารละลายไคโตซาน

ตัวอย่าง	pH ^{ns}	L*	a*	b*
น้ำแอปเปิ้ล ¹	4.06±0.03	26.07 ^a ±0.21	1.20 ^a ±0.29	12.90 ^a ±0.76
น้ำแอปเปิ้ลเติมไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบ ²	4.08±0.01	24.36 ^b ±0.23	-1.30 ^b ±0.06	3.31 ^b ±0.47
น้ำแอปเปิ้ลเติมไคโตซานจากเปลือกกุ้งสุก ²	4.10±0.02	23.37 ^c ±0.17	-1.51 ^b ±0.02	1.33 ^c ±0.59
น้ำแอปเปิ้ลเติมไคโตซานทางการค้า ²	4.09±0.01	24.36 ^b ±0.25	-1.38 ^b ±0.01	2.65 ^b ±0.17

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่แตกต่างกัน ($p < 0.05$)

: ns คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ไม่มีความแตกต่างกัน ($p > 0.05$)

: ¹ ตัวอย่างถูกตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนโดยไม่เติมไคโตซาน แล้วนำมากรอง

: ² ตัวอย่างถูกตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนโดยหลังจากเติมไคโตซาน แล้วนำมากรอง

pH ของน้ำแอปเปิ้ลที่เติมสารละลายไคโตซานมีค่าไม่แตกต่างกับ pH ของน้ำแอปเปิ้ลปกติที่ไม่ได้เติมสารละลายไคโตซาน ทั้งนี้เพราะ pH ของสารละลายไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบ เปลือกกุ้งสุกและไคโตซานทางการค้าต่างอยู่ในช่วงกรด (3.62, 3.58 และ 3.52 ตามลำดับ) และปริมาตรที่ใช้เติมเพียง 1 มิลลิลิตร จึงทำให้ไม่กระทบกับค่า pH

เมื่อพิจารณาลักษณะปรากฏของสีน้ำแอปเปิ้ล พบว่าน้ำแอปเปิ้ลที่เติมไคโตซานมีสีเหลืองอ่อนกว่าน้ำแอปเปิ้ลที่ไม่ได้เติมไคโตซาน ซึ่งผลการสังเกตสอดคล้องกับค่า b* ของน้ำแอปเปิ้ล โดยน้ำแอปเปิ้ลที่ไม่ได้เติมไคโตซานมีค่า b* สูงกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่ไคโตซานสามารถจับกับสารเชิงซ้อนที่เกิดจากพอลิเมอร์ของสารตัวกลางที่ได้จากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ทำให้สารเชิงซ้อนกลายเป็นอนุภาคขนาดใหญ่และตกตะกอน น้ำแอปเปิ้ลที่เติมไคโตซานจึงมีสีที่อ่อนกว่าดังผลปรากฏ

สรุปผลการทดลอง

แม้ว่าองค์ประกอบพื้นฐานทางเคมีของเปลือกกุ้งดิบและเปลือกกุ้งสุกไม่มีความแตกต่างกัน แต่เปลือกกุ้งสุกถูกกำจัดแร่ธาตุออกไปได้มากกว่า และร้อยละผลผลิตของไคโตซานที่ได้จากเปลือกกุ้งสุกมีค่าสูงกว่าที่ได้จากเปลือกกุ้งดิบ ไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบและเปลือกกุ้งสุกมีค่า L^* เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับของเปลือกกุ้งดิบและสุกเริ่มต้น ในขณะที่ค่า a^* และ b^* มีแนวโน้มลดลง ความหนืดของสารละลายไคโตซานจากเปลือกกุ้งสุกมีค่าสูงกว่าของเปลือกกุ้งดิบ น้ำแอปเปิ้ลที่เติมไคโตซานให้ความใสมากกว่าน้ำแอปเปิ้ลที่ไม่ได้เติม โดยไคโตซานจากเปลือกกุ้งสุกช่วยให้น้ำแอปเปิ้ลมีความใสสูงสุดเมื่อเทียบกับที่ได้จากการเติมไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบหรือจากทางการค้า และผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างโดยเทคนิค FT-IR ยืนยันว่าโครงสร้างของไคโตซานที่สกัดได้จากเปลือกกุ้งดิบและเปลือกกุ้งสุกมีลักษณะเฉพาะเหมือนไคโตซานทางการค้า

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทนักวิจัยทั่วไป ประจำปี 2559 (เลขที่สัญญารับทุน 5944104) และขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาหารและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สำหรับการเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย รวมถึงบริษัท ด้าหมิงเอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด ประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ไคโตซาน

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. (1990). Official methods of analysis of the AOAC (15th ed.). Arlington, VA, USA: Association of official analytical chemists.
- Aranaz, I., Mengibar, M., Harris, R., Panos, I., Miralles, B., Acosta, N., et al. (2009). Functional characterization of chitin and chitosan. *Current Chemical Biology*, 3(2), 203-230.
- Knorr, D. (1991). Recovery and utilization of chitin and chitosan in food processing waste management. *Food Technology*, 45(1), 114-122.
- Lertsutthiwong, P., How, N. C., Chandkrachang, S. & Stevens, W. F. (2002). Effect of chemical treatment on the characteristics of shrimp chitosan. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 12(1), 11-18.
- Li, Q., Dunn, E. T., Grandmaison, E. W. & Goosen, M. F. A. (1992). Applications and properties of chitosan. *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*, 7(4), 370-397. <http://doi.org/10.1177/088391159200700406>

- Martiñon, M. E., Moreira, R. G., Castell-Perez, M. E. & Gomes C. (2014). Development of a multilayered antimicrobial edible coating for shelf-life extension of fresh-cut cantaloupe (*Cucumis melo* L.) stored at 4°C. *LWT-Food Science and Technology*, 56(2), 341-350. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.11.043>
- Mukprasirt, A. (2002). Clarification of guava juice by chemical and biochemical methods. *Journal of King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok*, 12(3), 57-64. (in Thai)
- Ravichandran, S., Rameshkumar G. & Prince, R. A. (2009). Biochemical composition of shell and flesh of the Indian white shrimp *Penaeus indicus*. *American-Eurasian Journal of Scientific Research*, 4(3), 191-194.
- Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in Polymer Science*, 31(7), 603-632. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>
- Rungsardthong, V., Wongvuttanakul, N., Kongpien, N. & Chotiwaranon, P. (2006). Application of fungal chitosan for clarification of apple juice. *Process Biochemistry*, 41(3), 589-593. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.08.003>
- Shahidi, F., Arachchi, J. K. V. & Jeon, Y. J. (1999). Food applications of chitin and chitosan. *Trends in Food Science and Technology*, 10(2), 37-51.
- Velde, K. V. & Kiekens, P. (2004). Structure analysis and degree of substitution of chitin, chitosan and dibutylchitin by FT-IR spectroscopy and solid state. *Carbohydrate Polymer*, 58(4), 409-416. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.08.004>