



ISSN 0125-1724 (Print)

ISSN 2730-3888 (Online)

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKCRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 39 ฉบับที่ 3

กันยายน 2565

บทความวิชาการ

1. Water Crisis Management in Rainfed Agriculture – The Context of Flash Flood and Drought in Thailand 1
S. Patsinghasanee J. Laonamsai and P. Sawanyapanich

บทความวิจัย

2. การออกแบบผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคั่นเซ 11
สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล ชาตรี หอมเขียว และ อภิชาล ทองมั่ง กำเนิดว่า
3. อัตราการลู่เข้าของสมุทไฟไนท์เอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมที่แบ่งตามโหนดสำหรับการวิเคราะห์คาน เชลลูลาร์ในสองมิติ 29
สุธี ปิยะพิพัฒน์ บุญชัย ผึ้งไผ่งาม คทาพล ปิ่นพัฒนพล และ กำธรเกียรติ มุสิเกต
4. การตรวจสอบตัวชี้วัดความหนาแน่นและการอพยพของประชากรใน กรุงเทพมหานคร: ศึกษา เปรียบเทียบระหว่างปัจจัยด้านการขนส่ง เศรษฐกิจ ที่อยู่อาศัย การแพทย์ และการศึกษา 41
กฤษฎา แสนสมบูรณ์ และ ธนาพันธ์ ทับทิมหิน
5. การศึกษาความหนืดและความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนน้ำโดยใช้สารเติมแต่งผงนาโน กราไฟต์และน้ำมันดอกทานตะวัน 57
พุทธา จินคร้ว อภิสร่า มีพั้ว และ สาธิต ทับทิมทอง
6. การพัฒนาโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าอัจฉริยะสำหรับการเพาะปลูกแบบเกษตรอินทรีย์ วิสาหกิจชุมชน ต.ท่าข้าม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 72
สหพงศ์ สมวงศ์ ฐานวิทย์ แนนไส และ อธิโรจน์ มะโน
7. การประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับขั้นร่วมกับวิธีการรวมแบบถ่วงน้ำหนัก เพื่อคัดเลือก ผู้ส่งมอบวัตถุดิบที่เหมาะสมของโรงงานผลิตหมูเส้นกรอบ 83
อิสริยาพร หลวงหาญ ภาณุ บุรณจารุกร และ กณพ วัฒนา
8. สายอากาศแถบลำดับปรับค่าคลื่นได้ด้วยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม แบบแมลงหวี่ปรับปรุงสำหรับ ระบุทิศทางมาถึงของสัญญาณวิทยุ 99
อลงกรณ์ ลัง ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และ ศุภกิต แก้วดวงตา
9. การหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมของบาริลฮีตเตอร์ เพื่อลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติก ชิ้นส่วน ฝาครอบไฟเลี้ยวรถแทรกเตอร์ ด้วยการประยุกต์ใช้ DMAIC 111
อภิชาติ เสมศรี
10. พฤติกรรมการคัดของคานเชิงประกอบแบบ FG ที่พิจารณาผลกระทบของรูปทรงวางบนฐานราก ยึดหย่อน 131
มนต์ชัย ปัญญาทอง ศราวุธ เรือนศรี และ รัฐพล เกติยศ
11. เครื่องทดสอบแผ่นกรองอัตโนมัติที่ใช้ตัวนับอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพ การกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 147
วิสูตร อาสนวิจิตร และ พานิช อินตะ
12. การศึกษาความเป็นไปได้ในการติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบ ไฮบริด สำหรับอาคาร ที่พักอาศัย กรณีศึกษา อาคารพาณิชย์ขนาด 26 ห้อง 167
ชาลีฟ พงษ์วิจารณ์ และ สกนธ์ คล่องบุญจิต

“วิศวกรรมลาดกระบ้ง”

วิศวกรรมลาดกระบ้งเป็นวารสารทางวิชาการซึ่งจัดทำโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ตีพิมพ์บทความที่มีคุณภาพสูงทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีทั้งในระดับชาติและระดับนานาชาติ
2. เป็นเอกสารเผยแพร่งานวิจัยและพัฒนาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เป็นสื่อแลกเปลี่ยนผลงานวิจัยและองค์ความรู้ใหม่ ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างนักศึกษา นักวิจัย และอาจารย์ ตลอดจนผู้สนใจ
4. เป็นเอกสารรวบรวมบทความวิจัยและผลงานทางวิชาการที่น่าสนใจและมีคุณค่าทางวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

วาระที่ออก

ปีละ 4 ฉบับ (ทุก 3 เดือนต่อฉบับ)

นโยบาย

บทความที่จะเสนอตีพิมพ์ จะต้องเป็นบทความที่มีคุณค่าทางวิศวกรรม เช่น เป็นรายงานการวิจัยที่ผู้เขียนได้ทำการทดลอง สร้าง หรือมีส่วนกับงานโดยตรง เป็นบทความที่เสนอถึงความคิด หรือหลักการใหม่ที่เป็นไปได้ และมีทฤษฎีประกอบ หรือสนับสนุนอย่างเพียงพอ หรือเป็นบทความทางวิชาการที่น่าสนใจ มีประโยชน์ต่อนักศึกษาและนักวิจัย โดยผู้เขียนเป็นผู้รวบรวมและเรียบเรียงเอง

รูปแบบของบทความ

บทความที่เสนอจะเป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษก็ได้ โดยจัดพิมพ์ตามรูปแบบที่กำหนดให้ ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลทเพื่อพิมพ์ได้ทันที (camera ready) และเพื่อให้รูปแบบการพิมพ์ของบทความมีมาตรฐานเดียวกันจึงขอให้ผู้เขียนจัดเตรียมเอกสารโดยใช้เวิร์ดโปรเซสเซอร์ Microsoft Word for Windows สำหรับรูปภาพประกอบ หากมิใช่ภาพถ่ายก็ควรเขียนหรือสเก็ตโดยใช้ซอฟต์แวร์ ที่สนับสนุนการทำงานในระบบ Windows

บทความที่นำเสนอเพื่อตีพิมพ์ ควรประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับ ดังนี้

ชื่อเรื่อง	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน	ไม่ต้องระบุคุณวุฒิหรือตำแหน่งทางวิชาการใด ๆ
สถานที่ทำงาน	ในกรณีที่ผู้เขียนหรือผู้ร่วมงานเป็นนักศึกษา ให้ใช้คณะและสถาบันที่สังกัดเป็นสถานที่ทำงาน
บทคัดย่อ	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
เนื้อความ	ควรประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ และมีเลขประจำหัวข้อตามลำดับ

1. บทนำ
 2. ทฤษฎี
 3. การทดลองและผลการทดลอง
 4. สรุป
- 2.1 หลักการของ.....
 - 2.2 หลักการใหม่.....

กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง

การอ้างในบทความให้ใช้หมายเลขประจำเอกสารหรือบทความที่อ้างอิงโดยตัว เลขจะอยู่ในวงเล็บใหญ่ โดยรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงจะเป็นดังนี้

- [1] P. Choeysuwan and S. Choomchuay, “The Economics Analysis of RFID Implementation in Logistic,” Ladkrabang Engineering Journal, vol.30, no.1, pp.7-12, March, 2556.
- [2] I. M. Filanovsky and H.P. Baltess, “Simple CMOS Analog Square-Rooting and Squaring Circuits,” IEEE Trans. Circuits and Systems, vol.39, no.4, pp.312-315, Sept., 1992.
- [3] R. E. Blahut, Theory and Practice of Error Control Codes, Addison-Wesley, Reading, MA, 1983.

การส่งบทความ

บทความที่จะส่งเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกสถาบันฯ โดยเนื้อหาของบทความอยู่ระหว่าง 8–14 หน้ากระดาษ A4 โดยส่งหน้าแรกของบทความเป็นแบบระบุชื่อผู้แต่ง 1 หน้า และแบบไม่ระบุชื่อผู้แต่งอีก 1 หน้า บทความที่มีจำนวนหน้ามากกว่าที่กำหนดอาจไม่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของกองบรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบ้ง และกรุณาระบุชื่อ-นามสกุล ที่อยู่ เบอร์โทรศัพท์ติดต่อ และ E-mail address ใช้ชัดเจนในแบบฟอร์มการส่งบทความด้วย ผู้เขียนสามารถส่งผ่านระบบวารสารออนไลน์ โดยลงทะเบียนและส่งบทความ ได้ที่ ลิงก์ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/about/submissions>

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง
กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ (662) 329-8000 # 3464, 3465

โทรสาร (662) 329-8317

ที่ปรึกษา

คนบดี้

รองศาสตราจารย์ ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.อุมา สืบญะเรือง

รองหัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ

ดร.พิณช ธนชัยโชคศิริกุล

กองบรรณาธิการ

นางสาวชนัญชิตา นอบน้อย

ติดต่อประสานงาน

จัดทำต้นฉบับ Artwork

นายวิรัช จุลไกรลสุจรี

พิสูจน์อักษร และรูปเล่ม

นายทนต์ศักดิ์ ใจชื่นแสน

ออกแบบปก



วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ทรงคุณวุฒิในกองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง”

ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน

บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติ

สิรินธร ไทย-เยอรมัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า-

พระนครเหนือ

ศาสตราจารย์ ดร.อภิศักดิ์ วรพิเชฐ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชูชีพสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒ สุจิตรจร

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

ศาสตราจารย์ ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย รั้วรุจา

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติเชต สุริรักษา

ภาควิชาวิศวกรรมดนตรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.โมนาย ไกรฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ สุระกำพลธร (เกษียณอายุ)

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย เดชหาญ (เกษียณอายุ)

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง



วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วันที่ 1 เมษายน 2565

เรื่อง แจ้งเพื่อทราบ

เรียน อาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา และผู้สนใจ

กองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง” มีความประสงค์ขอเรียนแจ้งให้ท่านทราบรายละเอียดเกี่ยวกับงานวิศวกรรมลาดกระบัง ดังนี้

1. เว็บไซต์ใหม่ของวารสาร คือ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej>
2. เนื้อหาของบทความอยู่ระหว่าง 8-14 หน้ากระดาษขนาด A4 โดยส่งหน้าแรกของบทความเป็นแบบระบุชื่อผู้แต่ง 1 หน้า และแบบไม่ระบุชื่อผู้แต่งอีก 1 หน้า บทความที่มีจำนวนหน้ามากกว่าที่กำหนดอาจไม่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของกองบรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบัง
3. การส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวิศวกรรมลาดกระบัง ผู้เขียนบทความสามารถเสนอรายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่เกี่ยวข้องในสาขาที่ท่านส่งมา จำนวน 2 ท่าน โดยแนบมาพร้อมแบบฟอร์มการส่งบทความด้วยทุกครั้ง

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ จักขอบพระคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.อูมา สีนุญเรือง)

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

Water Crisis Management in Rainfed Agriculture – The Context of Flash Flood and Drought in Thailand

Supapap Patsinghasanee¹, Jeerapong Laonamsai^{2*} and Punyawee Sawanyapanich¹

¹Water Crisis Prevention Center, Department of Water Resources, Ministry of Natural Resources and Environment,
Phaya Thai, Phaya Thai, Bangkok, 10400, Thailand

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok, 65000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: jeerapongl@nu.ac.th

Received: Dec 13, 2021; **Revised:** May 01, 2022; **Accepted:** May 17, 2022

Abstract

In the context of water crisis management, the urgent need for water resources management in agriculture and disaster management to meet future food and livelihood needs is highlighted, especially given the pressure and stress on water management and the uncertainty caused by climate variability. Rainfed agriculture in Thailand's rural areas plays and will remain an important role in providing food, generating livelihoods, and ensuring water security. The primary aims of the project are to forecast and evaluate the flash flood guidance system and the seasonal drought forecasting system. The case study for real-time hydrological forecasting of flash flood risk is during the tropical storm "SINLAKU" on August 2–5, 2020. For the seasonal drought forecasting system, the water balance process has been used to determine water deficit areas at the sub-district level in the dry season from 2019 to 2020. Furthermore, disaster management is being used to establish the water crisis prevention and mitigation plan prior to, during, and after a disaster. As a result, water crisis prevention and mitigation procedures have been implemented in rainfed agriculture to reduce the severity of disasters.

Keywords: Rainfed agriculture, Flash flood guidance system, Drought forecasting system, Water crisis management

1. Introduction

The agricultural sector plays an important role in economic development [1] and poverty alleviation [2]. However, a significant number of poverty households in Asia still face hunger, food security, and malnutrition where rainfed agriculture is the main agriculture activity [3]. The significance of rainfed agriculture is varied on regional and climate conditions but mainly contributes to food for poor communities in developing countries. Nevertheless, the challenges of rainfed agriculture are complicated by climate variability, climate change, population growth, health pandemics, degrading

natural resources base, poor infrastructure, and land-use change [2],[4].

Experts predict further declines in precipitation and magnifications of extreme events [5]. Therefore, the world likely is facing a water crisis with little room for further expansion of large-scale irrigation [6]. This emphasizes the need for water resources management in rainfed agriculture, securing the water for the production sector, and building resilience for the agriculture sector. Hence, rainfed agriculture will play a key role in providing food and livelihood to alleviate poverty in rural areas.

In Thailand, the water resources are managed by an area-based approach consisting of irrigation and rainfed agriculture. The agricultural areas are approximately 238,720 km². The irrigation area is about 52,400 km² (22% of the agriculture area), whereas the other 78% is the rainfed agriculture covers around 187,200 km² [7]. In the master plan on water resources management contexts, the master plan is a framework and guideline for solving water resources problems in terms of natural resources and economic and social issues to increase national water security.

For the above reasons, the main objective of this paper is to express the water crisis management in rainfed agriculture in Thailand, including the flash flood warning system, the seasonal drought forecasting system, and the water crisis prevention and mitigation, respectively.

2. Flash Flood Warning System

A flash flood is a short and sudden local flood with significant volume. It has a limited duration which follows within a few hours of heavy or excessive rainfall [8]. Due to its characteristics, it is difficult to address the flash flood using the traditional flood forecasting system used for the lowland riverine flood. Compared with the riverine flood, flash flood often occurs in mountainous areas or the foothills due to the steep slope and thin surface soil layers in rainfed agriculture [9]. In terms of warning, a flash flood is a local hydrometeorological phenomenon that requires hydrological and meteorological tools for real-time forecasting and warning (24/7 operation). Moreover, flash flood forecasting and warning systems require more specific measures based on the characteristics of the flash flood. The Department of Water Resources (DWR) has used this system to forecast flash flood events in mountainous areas. Therefore, this section expresses the results of DWR's flash flood guidance system and early warning system.

2.1. Flash Flood Guidance System

The Flash Flood Guidance System (FFGS) was implemented to evaluate the flash flood risk for Haiti before the heavy precipitation, landslides, and debris flow of Hurricane Tomas in November 2010 [10] and employed to predict the flash flood risk during the typhoon season in Southern Thailand between November to December 2017 [11]. The evaluation results of FFGS were verified in terms of Mean Areal Precipitation (MAP), Forecasting Mean Areal Precipitation (FMAP), Average Soil Moisture Content (ASM), and Flash Flood Risk (FFR) in Haiti and Thailand. The FFGS products satisfactorily reproduced MAP, FMAP, ASM, and FFR for the evaluation results. Recently, Flash Flood Potential Index (FFPI) and Dynamic Flash Flood Hazard Index (DFFHI) were developed in Thailand for forecasting the flash flood by considering physical-geographic factors, rainfall index, and soil moisture index [12–13]. Both recent studies found that FFPI and DFFHI can be used for flash flood forecasting. However, the forecasters who need to adjust the flash flood forecasting system must consider the in-situ stations for implementing the system.

For the FFGS, further information is given by E. Shamir et al. [10] and S. Patsinghasanee et al. [11]. This section evaluated the FFGS for the real-time hydrological forecasting of flash flood risk during the tropical storm "SINLAKU" from August 2–5, 2020. Heavy rainfall over Northern Thailand has influenced the weather conditions since August 2, 2020. After that, the tropical storm moved into the South China Sea and weakened to a tropical depression over Lao PDR and Northern Thailand on August 3, 2020. In addition, a tropical depression was quickly dissipated to the low-pressure cell in Northern Thailand. For the following reasons, heavy rainfall was developed over Northern

Thailand. The daily rainfall reported by the Thai Meteorological Department (TMD) from August 2–5, 2020, is illustrated in **Fig.1**. Therefore, the preliminary assessment indicated localized flooding in Northern Thailand. However, the disaster report did not provide specific information on the actual type of flooding (e.g., riverine flood, and flash flood) or cause (e.g., flood wave, and debris). The evaluation results of FFGS during “SINLAKU” in Northern Thailand (Chiang Rai, Chiang Mai, Nan, Phrae, and Uttaradit provinces) are verified in terms of MAP, FMAP, and FFR, respectively. The evaluation results are as follows.

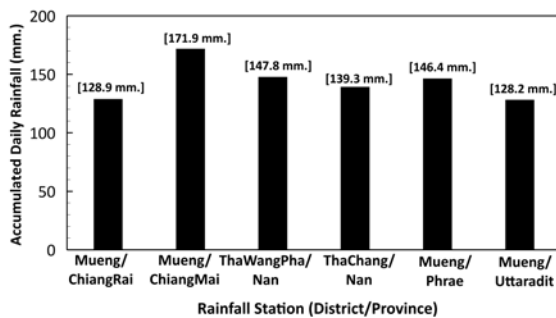


Figure 1 Accumulated Daily rainfall during August 2–5, 2020

The MAP products and observed data (TMD) were compared with the perfect agreement line, which fell within a 30% error line (**Fig.2**), and the correlation value (R^2) is 0.73. Nevertheless, many points fell outside the 30% error line capturing that the estimated daily MAP by FFGS was significantly underestimated compared to the observed daily rainfall. Furthermore, the FMAP products and observed data (TMD) were compared with the perfect agreement line, which fell outside a 30% error line (**Fig.3**), and the correlation value (R^2) is 0.46. Therefore, it was concluded that the FMAP dramatically underestimated observed daily rainfall. For this reason, the local forecasting rainfall systems, radar stations, and forecaster abilities are essential to consider with the

FMAP product for making a good decision for disaster management agency.

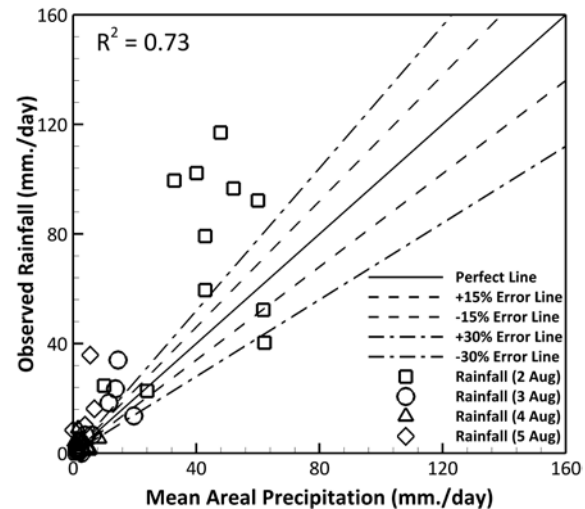


Figure 2 Comparison results between MAP and observed data during August 2–5, 2020

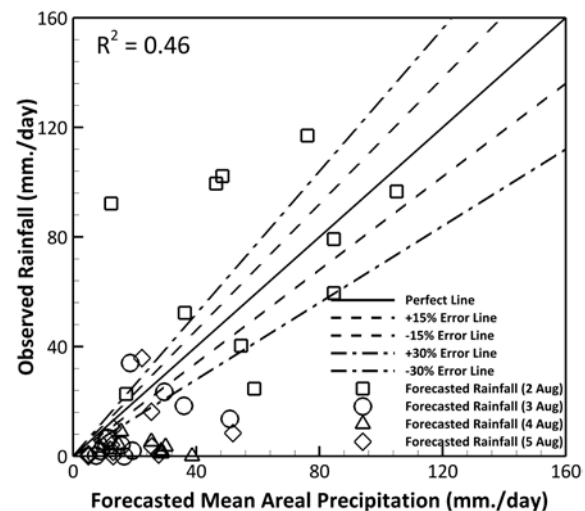


Figure 3 Comparison results between FMAP and observed data during August 2–5, 2020

The FFGS produced a product to identify the flash flood risk area during the passing of a low-pressure cell. The FFR product was compared with the inundation areas reported by the disaster management agency [14]. However, the inundation areas did not specify the actual type of flooding (e.g., flash flood, riverine flood, and debris flow). The comparison results of FFR are exhibited in **Fig.4**. The yellow, orange, and red areas are the flash flood

risk generated by FFGS, and the hatched areas are the inundation areas reported by the disaster management agency. The comparison results between FFR products and inundation areas are illustrated in good agreement in Northern Thailand on August 2, 2020.

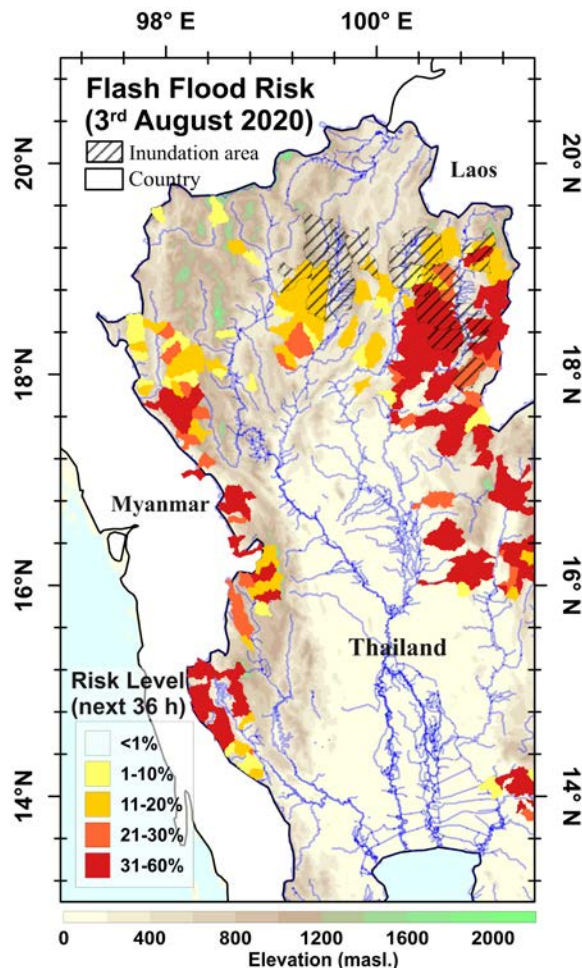


Figure 4 Comparison results between FFR and the inundation areas on August 2, 2020

2.2. Early Warning System

The Early Warning System (EWS) has been installed and operated by DWR to monitor and warn of flash floods in mountainous areas. Approximately 188 times throughout the consideration period, the EWS delivered warning information to policymakers in disaster management agencies and local authorities, covering 606 villages. Furthermore, the evacuation warning (red alert) was issued 8 times in Nan, Chiang Mai, Chiang Rai, Uttaradit, Phitsanulok, and Mae Hong Son (Fig.5).

In addition, during the tropical storm "SINLAKU," the DWR's flash flood warning systems used a combination of the forecasting system (FFGS) and in-situ stations (EWS) to clarify the flash flood risk areas in Northern Thailand. The results indicated that the coupling system for the flash flood warning system from DWR effectively implements the actual situation in Northern Thailand.

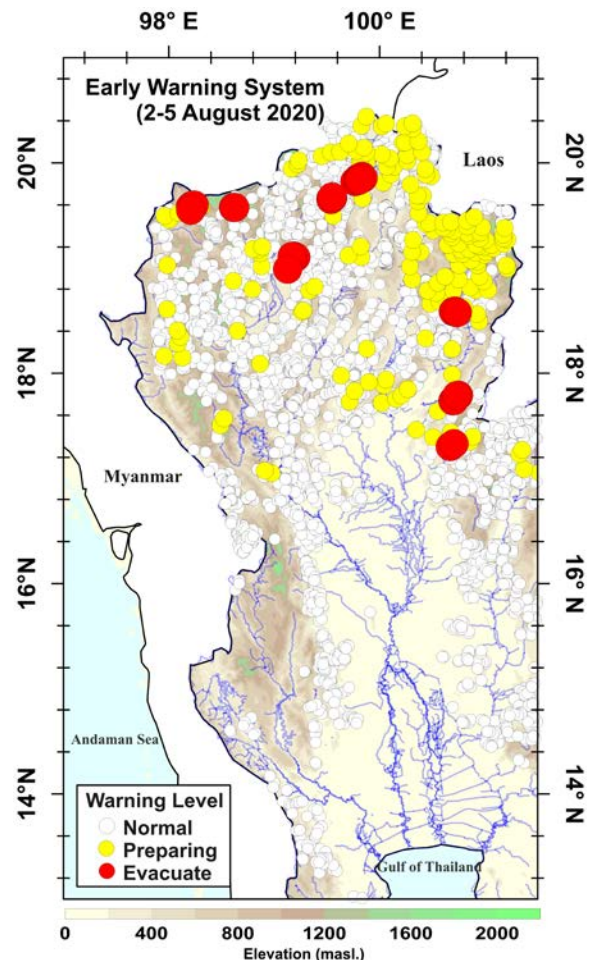


Figure 5 Alarms of the EWS during the tropical storm "SINLAKU" between 2-5 August 2020

3. Drought Forecasting System

Drought, defined by the Master Plan on Water Resources Management (Thailand), is the river discharge or water level steadily decreases, affecting living and growing conditions in the surrounding areas [7]. In addition, the drought definition according to the Disaster Prevention and Mitigation Plan (2010–2014) refers to

abnormally less rainfall or a prolonged period of less rainfall, causing deficiencies of drinking water and water scarcity. This condition resulted in water shortages, crop damage, steam flow reduction, and, therefore, low quality of life in the affected area [15]. Moreover, droughts can continue for months or years, and there are consisted of three stages of drought that increase the impact on people in drought-affected areas [16]. The first drought stage is associated with meteorological drought, occurring when the precipitation is consistently less than the average. This stage can also result in other stages. The second stage is an agricultural drought which is a drought that affects agricultural or ecological productivity. Additionally, the last stage is hydrological drought. As a result, the amount of available water in surface and sub-surface water bodies, such as rivers, lakes, reservoirs, and groundwater aquifers, is lowered below the average.

Over the past decades, Thailand has encountered droughts, affecting the economy, agriculture, ecosystem, and industry, due to less annual rainfall than average (1,554 mm). The records have shown that Thailand has 42,880 km² of drought risk areas and 7,490 villages with water shortages for consumption (9.98% of villages in the country) [7]. Drought risk analysis and forecasting systems implemented in the past have considered the hydro-meteorological data, irrigation areas, and village water supply systems to predict drought areas at the provincial level [17–18]. After that, the water balance concept was applied in Thailand's rainfed agriculture by considering the water supply (forecasting rainfall, river discharge, and available water in the water bodies) and water demand (domestic, ecological, agricultural, and industrial uses) in district level [19]. Furthermore, Standardized Precipitation Index (SPI), based on historical data (1985–2016), was used to predict the meteorological drought in the Lower Mekong region [20]. Reconnaissance Drought Index

application and daily weather data (temperature, relative humidity, sunlight count, and wind speed) during 1979–2015 were employed to analyze the drought risk areas over Thailand [21]. Furthermore, the Analytic Hierarchy Process (ANP), based on variables including the SPI, the distance from surface water resources, and groundwater yield, was used for agricultural drought assessments in the northeastern region [22]. However, most of these analyses are only based on water supply and hydro-meteorological data, which have not yet considered the water demand as a factor in predicting drought risk areas.

The rainfed agricultures cover 186,320 km² or 7,425 sub-districts in Thailand. Rainfall is the primary water supply resource for multipurpose in this rainfed agriculture. However, due to hydro-meteorological uncertainties, such areas are vulnerable to water scarcity [2]. Therefore, to obtain better drought mitigation in rainfed agriculture, this study predicted drought risk at a sub-district level by analyzing the water supply (forecasting rainfall, river discharge, and available water in the water bodies) and the water demand (domestic, agriculture, ecological, and industrial sectors), and evaluating the water balance analysis during the dry season (November 2019–April 2020). The method for analyzing and evaluating the water supply-demand and water balance analysis was detailed by S. Patsinghasanee et al. [23].

4. Water Supply

Water supply evaluation was started at the beginning of the dry season. Therefore, the forecasted rainfall was used to estimate the expected runoff during the period of interest using the Rainfall-Runoff Model (NAM model). The modeling revealed that the forecasting rainfall could change to about $652 \times 10^6 \text{ m}^3$ surface water. It is about 5.3% of the total water supply. Furthermore, another source of water supply in rainfed agriculture was from 102,112 water bodies, with about $8,748 \times 10^6 \text{ m}^3$ (74.3% of total water supply), and

the amount of water available from streams flowing through the given areas. The flow rate from the 137 runoff stations showed that $2,366 \times 10^6 \text{ m}^3$ of river water (20.1% of total water supply) could be used as a water supply during the dry season. Therefore, the total water supply for the rainfed areas during the dry season was approximately $11,766 \times 10^6 \text{ m}^3$, as shown in Fig.6.

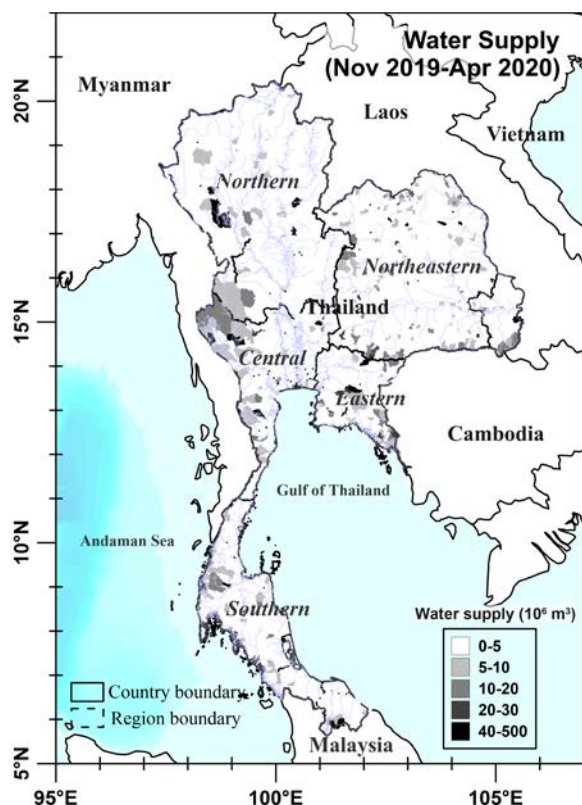


Figure 6 Water supply in the dry season 2019/2020 in the rainfed agriculture

4.1. Water Demand

The water demand estimation includes the four sectors: domestic water use, agricultural demand, ecological conservation, and industrial usage. The result showed that $927 \times 10^6 \text{ m}^3$ of water was required for domestic use (11.7% of total water demand). Agriculture water demand by considering the dry-season farming showed a plan for planting $3,520 \text{ km}^2$ of paddy field, $1,360 \text{ km}^2$ of maize, $4,576 \text{ km}^2$ of sugarcane, and $2,544 \text{ km}^2$ of cassava which were estimated at $5,692 \times 10^6 \text{ m}^3$ of water demand (71.5% of total water demand). The water used

to preserve the ecosystem and industrial sectors was approximately $937 \times 10^6 \text{ m}^3$ (11.8% of total water demand) and $401 \times 10^6 \text{ m}^3$ (5.0% of total water demand), respectively. As a result, the total water demand for rainfed agriculture during the dry season was about $7,957 \times 10^6 \text{ m}^3$. The intense water demand was seen in the lower northern and upper central regions due to multiple cultivations a year (Fig.7).

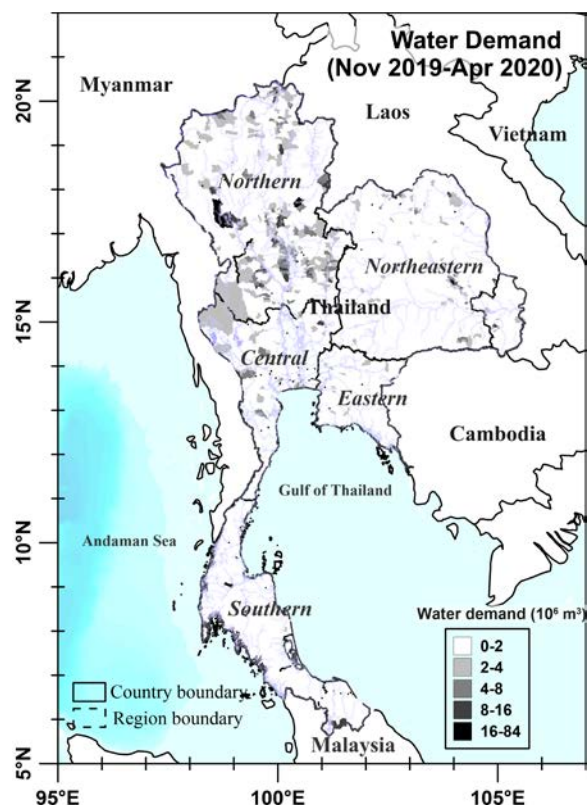


Figure 7 Water demand in the dry season 2019/2020 in the rainfed agriculture

4.2. Water Balance

Water balance in rainfed agriculture during the dry season was analyzed based on water supply and demand at the sub-district level. The results displayed that drought risk areas covered 984 sub-districts of 305 districts of 57 provinces (Fig.8). Severe drought risk areas were found in the lower northern and upper central regions, corresponding to the water demand. On the other hand, mild drought risk areas were seen in Northeastern Thailand. Furthermore, the result was consistent with other

observations at 71% of forecasted drought areas. For example, the Department of Disaster Prevention and Mitigation reported that water scarcity occurred in 782 sub-districts of 145 districts of 24 provinces in the meantime.

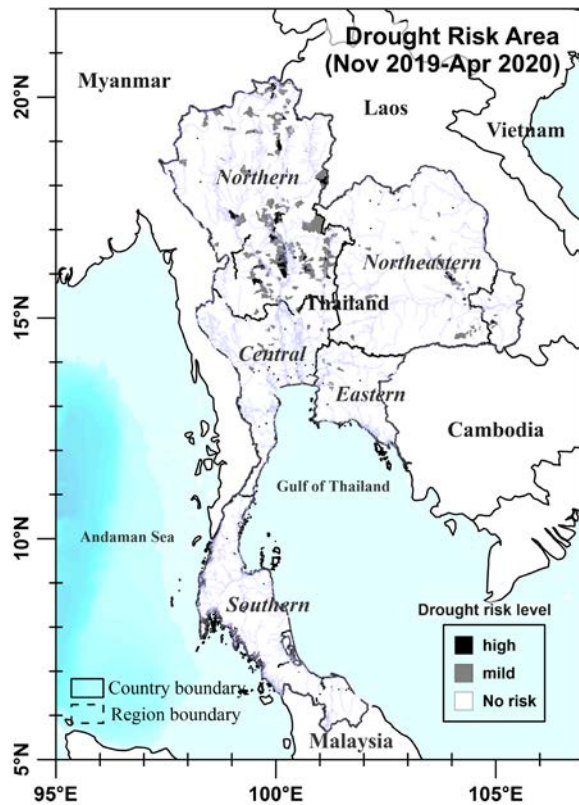


Figure 8 Drought risk areas in the dry season 2019/2020 in the rainfed agriculture

5. Discussion on Water Crisis Prevention and Mitigation

Water crisis prevention and mitigation measures by DWR were adopted to minimize the magnitude of water disasters in rainfed agriculture mainly. The measurements were taken to improve the efficiency of water resource management and reduce the impact of water disasters. Disaster management was employed to prepare the water crisis prevention and mitigation plan before, during, and after the disaster strikes. The disaster management is detailed as the following.

5.1. Prevention and Mitigation Measures

The prevention and mitigation measures are the pre-disaster management for reducing the losses of life and property from water disasters. Moreover, the impacts are felt by human suffering and property damage and loss of livelihood, economic deterioration, and environmental destruction. Therefore, DWR considered the issues and needs associated with implementing a national disaster agency and the provincial offices of natural resources and environment as described in the following information.

Flash flood and drought risk assessments for sub-district levels in rainfed agriculture were generated by applying the techniques of hydrology and water resources management. Information on water resources is critical for monitoring and warning a water crisis in high-risk areas. Each phase of the disaster management cycle must be made that requires getting the right information to the right people at the right time. Therefore, decisions are made in both the public and the private sectors and often at local or individual levels. Moreover, raising awareness of forecasting and warning systems is contingent upon comprehensive promotion. The problem is how to make this information available to many groups strategically. First, DWR planned awareness-raising activities to define the target group. Following that, we assigned each group a topic and selected an appropriate strategy.

6. Preparation Measures

The preparation measures for preventing and mitigating water crises in rainfed agriculture consist of mitigation plans and warning systems. The details of preparation measures in rainfed agriculture are as follows.

A mitigation plan at the local level by DWR was initiated with all those interested: those at risk, those who are competent in assisting risk reduction activities (e.g., crisis service, water management service, and forecasting service). Therefore, cooperation and discussion between

the groups at risk and professionals in drawing up the action plans bring many measurable advantages. Furthermore, inventory preparation is the most important element for identifying possible solutions and preparing an implementation plan. Consequently, DWR prepared and maintained real-time stations in mountainous and flood plain areas. In addition, for crisis service, the machinery and equipment were available for crisis management in the regional offices of the Department of Water Resources.

6.1. Emergency Management Measures

During the water crisis, DWR has established the water operation center in the headquarters and the 11 regional offices for emergency management to raise awareness of residents to evaluate the scale of danger, the various methods of countering damage, and behavior during a water crisis.

7. Rehabilitation Measures

Rehabilitation and reconstruction are post-disaster measurements. Therefore, it is critical to prevent and reduce disaster risk by “Building Back Better.” For example, DWR rehabilitated and reconstructed its infrastructures damaged by the disaster, such as hydraulic structures, water bodies, real-time stations, water distribution projects, and solar-powered irrigation systems.

8. Conclusions

In view of rising demand and stress on water management and climate variability, the urgent need for water resources management in agricultural and disaster management to meet future food and livelihoods is highlighted. Rainfed agriculture plays and thus will continue to play a dominant role in providing food, generating incomes, and ensuring water security. This study described the flash flood warning system, seasonal drought forecasting, and water crisis mitigation strategy in DWR's water crisis management in rainfed agriculture.

DWR installed the Early Warning System to observe rainfall and water levels in mountainous areas for flash flood monitoring and forecasting. Furthermore, the flash flood warning systems used the forecasting system and in-situ stations to clarify the flash flood risk. The results indicated that the coupling system for the flash flood warning system is adequate for implementing the actual situation in flash flood forecasting. Moreover, it substantially reduces the number of affected people from flash floods and landslides reported by the local authorities. In terms of a drought forecasting system, the water balance process was applied to determine the water deficit areas at the sub-district level in Thailand. The water supplies were evaluated by measuring all the available water in rainfall-runoff, water bodies, and watercourses. Furthermore, the water demands were calculated for domestic, agriculture, ecology, and industry sectors. The study results on water balance were in good agreement with drought areas identified by the disaster management agency, which consequently decreased the number of drought-affected areas.

DWR implemented water crisis preventive and mitigation strategies to reduce the severity of water disasters, primarily in rainfed agriculture. The measurements were taken to improve the efficiency of water resource management and reduce the impact of water disasters. Additionally, disaster management was employed to prepare the water crisis prevention and mitigation plans before, during, and after the water disaster. To begin, prevention and mitigation measures are used to reduce the loss of life and property caused by water disasters before the disaster. Therefore, the DWR considered the issues and needs of implementing a national disaster agency and the provincial offices regarding water resources information and forecasting systems. Secondly, the preparation measures for preventing and mitigating water crises consist of mitigation plans and warning systems. Thirdly, in emergency management, DWR has established the water operation center

in the headquarters and the regional offices for emergency management to raise residents' awareness of evaluating the danger scale. Lastly, rehabilitation is post-disaster measurements. Consequently, it is critical to prevent and reduce disaster risk by "Building Back Better."

9. Acknowledgments

The authors would like to express their sincere gratitude to the Department of Water Resources for providing the Early Warning System information and preparing Water Crisis Prevention and Mitigation Plans. The Flash Flood Guidance System in Lower Mekong member countries were developed by the World Meteorological Organization, Mekong River Commission, and Hydrologic Research Center (San Diego, CA, USA).

References

- [1] World Bank, "The Role of Agricultural Growth in Development Strategies to Benefit the Poor," in *Agricultural growth for the poor: an agenda for development*, Washington, DC, USA: The World Bank, 2005, ch. 1, sec. 1, pp. 3–6. [Online]. Available: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/7247>.
- [2] S. Patsinghasanee, J. Laonamsai, K. Suwanprasert, M. Lakmuang, R. Parasirisakul and R. Patsinghasanee, "Classification of the rainfed areas for the water development projects in Thailand," in *Proc. the THA 2019 International Conference on Water Management and Climate Change towards Asia's Water-Energy-Food Nexus and SDGs*, Bangkok, Thailand, Jan. 23–25, 2019, pp. 257–261.
- [3] S. P. Wani, T. K. Sreedevi, J. Rockström and Y. S. Ramakrishna, "Rainfed agriculture – Past trends and future prospects," in *Rainfed Agriculture: Unlocking the Potential*, S. P. Wani, J. Rockström and T. Oweis, Eds., London, U.K.: CAB International, 2009, pp. 1–35.
- [4] J. G. Ryan and D. C. Spencer, "Some challenges, trends, and opportunities shaping the future of the semi-arid tropics," in *Proc. Future of agriculture in the semi-arid tropics Proceedings of an International Symposium on Future of Agriculture in Semi-Arid Tropics (ICRISAT)*, Andhra Pradesh, India: Nov. 14, 2000, pp. 4–11.
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change, "Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability," Cambridge University Press, Cambridge, UK, Rep. 2007. Accessed: Jul. 26, 2021. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg2/>.
- [6] J. Rockström, L. Karlberg, S. P. Wani, J. Barron, N. Haibu, T. Oweis, A. Bruggeman, J. Farahani and Z. Qiang, "Managing water in rainfed agriculture—The need for a paradigm shift," *Agricultural Water Management*, vol. 97, no. 4, pp. 543–550, 2010, doi: 10.1016/j.agwat.2009.09.009.
- [7] Office of the National Water Resources, "The 20-year Master Plan on Water Resources Management B.E.2561-2580 (2018-2037) in Thailand," Office of the National Water Resources, Bangkok, Thailand, final report, Accessed: Jul. 26, 2021. [Online] Available: <https://shorturl.asia/9U3V4>.
- [8] Association Programme on Flood Management, "Integrated Flood Management Tools Series management of flash floods," World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, no. 6, Accessed: Jul. 26, 2021. [Online]. Available: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7337
- [9] Association Programme on Flood Management, "How are flash floods generated," in *Guidance on Flash Flood Management Recent Experience from Central and Eastern Europe*, Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2007, ch. 2, sec. 1, pp. 13–15.
- [10] E. Shamir, K. P. Georgakakos, C. Spencer, T. M. Modrick, M. J. Murphy and R. Jubach, "Evaluation of

- real-time flash flood forecasts for Haiti during the passage of Hurricane Tomas, November 4–6, 2010,” *Natural Hazards*, vol. 67, no. 2, pp. 459–482, 2010, doi: 10.1007/s11069-013-0573-6.
- [11] S. Patsinghasanee, J. Laonamsai, K. Suwanprasert and J. Pracheepchai, “Evaluation of MRC flash flood guidance system for the Southern Thailand: Case study from 28th November to 4th December 2017,” presented at the 23rd National Convention on Civil Engineering, Nakhon Nayok: Thailand, Jul. 18–20, 2018.
- [12] A. Mooktaree, S. Chantip and P. Sisomphon, “Development of a flash flood forecasting model and decision support system,” presented at the 23rd National Convention on Civil Engineering, Nakhon Nayok: Thailand, Jul. 18–20, 2018.
- [13] S. Chantip, N. Marjang and K. Pongput, “Development of dynamic flash flood hazard index (DFFHI) in Wang River Basin, Thailand,” in *the 22nd IAHR-APD Congress*, Hokkaido University, Hokkaido, Japan, Sep. 15–16, 2020.
- [14] *Record flood events caused by the influence of storm SINLAKU*, Hydro-Informatics Institute (Public Organization), Aug. 2020. [Online] Available: <https://tiwrm.hii.or.th/current/2020/SINLAKU2020/damage.html>. (in Thai)
- [15] Department of Local Administration, “National disaster prevention and mitigation plan B.E.2553-2557 (2010-2014) in Thailand,” Department of Disaster Prevention and Mitigation, Bangkok, Thailand, Accessed: Jul. 26, 2021. [Online]. Available: http://www.dla.go.th/upload/ebook/column/2013/8/2082_5380.pdf. (in Thai)
- [16] D. A. Wilhite and M. H. Glantz, “Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions,” *Water International*, vol. 10, no.3, 1985, pp. 111–120.
- [17] S. Tovichakchaikul, P. Chitprom and S. Patsinghasanee, “Annual report of Thailand drought situation and forecasting 2007,” in *Proc. the 4th Kasetsart University Kamphaengsane Campus Conference*, Nakhon Pathom, Thailand, Dec. 6–7, 2007, pp. 328–335. (in Thai)
- [18] B. Jarusdumrongnit, P. Chitprom and S. Patsinghasanee, “Annual Report of Thailand Drought Situation and Forecasting 2010,” presented at the 3rd Ministry of Natural Resource and Environment Conference, Bangkok, Thailand, Jul. 21–22, 2010, pp. 4–11. (in Thai)
- [19] J. Laonamsai, S. Patsinghasanee, K. Suwanprasert, J. Pracheepchai and W. Wangpimool, “Evaluation of water balance process in dry season for the rainfed areas in Thailand: Case study from 2016 to 2018,” presented at the 3rd Mekong River Basin International Conference, Siem Reap, Cambodia; Apr. 2–3, 2018.
- [20] X. Zhang and H. Liu, “Analysis of drought character in the Mekong River Basin,” in *Flood Prevention and Drought Relief in Mekong River Basin*, H. Liu, Ed., Singapore: Springer Tracts in Civil Engineering, 2020, pp. 95–107.
- [21] T. Promping and T. Tingsanchali. Meteorological drought hazard assessment for agriculture area in eastern region of Thailand. Presented at the 26th National Convention on Civil Engineering. Available: <https://conference.thaince.org/index.php/ncce26/article/view/1175/671>
- [22] T. Promping and C. Foyhirun. Assessment of future drought hazard to agricultural area in Mun river basin, Thailand. Presented at the 26th National Convention on Civil Engineering. Available: <https://conference.thaince.org/index.php/ncce26/article/view/1178>.
- [23] S. Patsinghasanee, J. Pracheepchai, K. Suwanprasert, T. Sapratheth and J. Laonamsai, “Drought management for the rainfed areas in Thailand: A case study of October 2019 to April 2020 period,” *Srinakharinwirot Engineering Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 54–64, 2020. (in Thai)

การออกแบบผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่โดยการประยุกต์ใช้เทคนิค การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคั่นเซ

Products Design of Bamboo Sofa Set Using Quality Function Deployment Technique with Kansei Engineering

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2*}, จุลาลักษณ์ โรจนานุกูล¹, ชาทรี หอมเขียว^{1,2} และ อภิชาล ทองมั่ง กำเนิดว่า¹

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย บ่อยาง เมือง สงขลา 90000

²หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย บ่อยาง เมือง สงขลา 90000

Surasit Rawangwong^{1,2*}, Julaluk Rodjananugoon¹, Chatree Homkhiew^{1,2}, Apichon Thongmung Kamnerdwam¹

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya,

Boyang, Muang, Songkhla 90000, Thailand

²Materials Processing Technology Research Unit, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Boyang, Muang,

Songkhla 90000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: surasit.r@rmutsv.ac.th

Received: Dec 09, 2021; Revised: May 16, 2022; Accepted: Jun 01, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคั่นเซสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่ที่ตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ดียิ่งขึ้น โดยผลการวิจัยสามารถช่วยยกระดับผลิตภัณฑ์ท้องถิ่นและเพิ่มกลยุทธ์ทางการตลาดให้กับกลุ่มผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ในตำบลน่าน้อย อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา งานวิจัยนี้ได้รวมเอาความต้องการของลูกค้าเข้าไว้ในกระบวนการวิเคราะห์ 2 เมทริกซ์ของเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ คือ การวางแผนผลิตภัณฑ์และการแปลงการออกแบบ เทคนิควิศวกรรมคั่นเซถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์อารมณ์ และความรู้สึกของลูกค้าที่มีผลต่อการใช้ผลิตภัณฑ์ ผลการวิเคราะห์ พบว่า ผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปแบบ วัสดุ ความสะดวก คุณภาพ และการตลาด ซึ่งมีความสอดคล้องกับความรู้สึกและความต้องการของลูกค้า นอกจากนี้ จากการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคั่นเซ พบว่า คำแสดงความรู้สึกที่ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่ ประกอบด้วย 3 คำหลัก ๆ คือ เรียบง่าย สบาย และสวยงาม โดยมีค่าคะแนนความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านรูปทรงหลากหลายและมีจุดเด่นมากที่สุดอยู่ในระดับดีมากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.71 และมีค่าคะแนนความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านการใช้วัสดุจากธรรมชาติและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอันดับสอง มีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.68

คำสำคัญ: การออกแบบผลิตภัณฑ์, การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ, วิศวกรรมคั่นเซ, ไม้ไผ่, ชุดโซฟา

Abstract

This research employed Quality Function Deployment and Kansei Engineering to redesign and develop bamboo Sofa set products that better corresponded to the needs of customers. The results of the research can help upgrade the local products and increase marketing strategies for bamboo furniture production group in Nam Noi Sub-district, Hat Yai District, Songkhla Province.

This research incorporated the customers' needs in the analysis of QFD's 2 matrixes: product planning and design deployment. Kansei Engineering was adopted to analyze the customers' emotions and feelings when using the products. The analysis results show that the design and development of new bamboo sofa set products there are changes in style, material, convenience, quality, and marketing, which are more in line with the feelings and needs of customers. In addition, from the application of Kansei engineering, it was found that the expressions used in the design of the bamboo sofa set consisted of 3 key words: simple, creative, and beautiful. This research found that the customers had the highest satisfaction in the terms of shapes and various features of the redesigned product at the very high level ($\bar{X} = 4.71$), followed by the satisfaction on its using natural materials and environmentally friendly, rated at the very high level ($\bar{X} = 4.68$).

Keywords: product design, quality function deployment, Kansei engineering, bamboo, Sofa set

1. บทนำ

ไฟในประเทศไทยมีหลากหลายชนิดขึ้นกระจายตามภูมิภาคต่าง ๆ โดยทั่วไปความแตกต่างของไฟแต่ละชนิดส่งผลให้เกิดความหลากหลายของการแปรรูป โดยเฉพาะการแปรรูปไม้ไฟเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องเรือน วัสดุตกแต่งเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น ปัจจุบันการผลิตในภาคอุตสาหกรรมไทยมีการแข่งขันทางด้านการตลาดสูงมาก โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีผู้ผลิตมากมาย ทำให้ลูกค้ามีโอกาสในการตัดสินใจเลือกซื้อและเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตได้มากขึ้น ดังนั้น เพื่อให้ผลิตภัณฑ์สามารถรองรับลูกค้าได้มากที่สุด ผู้ผลิตต้องคำนึงถึงกลยุทธ์เกี่ยวกับกระบวนการออกแบบพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองตามความต้องการของลูกค้าเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อส่งผลให้เกิดความถูกต้องของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ [1]

กระบวนการออกแบบพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองตามความต้องการของลูกค้านั้นมีด้วยกันหลากหลายกระบวนการ โดยเทคนิคกระบวนการที่น่าสนใจ คือ เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment: QFD) และเทคนิควิศวกรรมคันเซ (Kansei Engineering: KE) เพราะเป็นเทคนิคที่มีการศึกษาถึงความต้องการของลูกค้าแล้วทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้ทราบถึงความต้องการหรือคุณลักษณะของลูกค้าในส่วนที่สำคัญ โดยจากการค้นคว้าผลงานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพและวิศวกรรมคันเซสำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์นั้นมีด้วยกันหลากหลายผลิตภัณฑ์ไม่ว่าจะเป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เก้าอี้สำนักงาน [2] หรือการพัฒนาบรรจุภัณฑ์สำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์ [3] อีกทั้งการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันเซในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากไม้ไฟ [4] พบว่า ผลิตภัณฑ์แบบใหม่ที่ได้รับการพัฒนาโดยการประยุกต์ใช้การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพและวิศวกรรมคันเซ สามารถรองรับลูกค้าและสามารถตอบสนองตามความต้องการของลูกค้าได้

ผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไฟของกลุ่มผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไฟ ตำบลน้ำน้อย อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมจากลูกค้าเป็นอย่างมาก ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ลงพื้นที่สำรวจกลุ่มผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไฟพบว่า กลุ่มผู้ผลิตมีปัญหาข้อร้องเรียนของลูกค้าในด้านคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐาน พร้อมทั้งในด้านของรูปแบบผลิตภัณฑ์ในปัจจุบันมีลักษณะแบบเดิม ๆ ไม่ตรงตามความต้องการและไม่สามารถดึงดูดความสนใจจากลูกค้า ดังรูปที่ 1 ด้วยปัญหาข้างต้นทำให้ทราบว่าทางกลุ่มผู้ผลิตมีความต้องการออกแบบพัฒนาผลิตภัณฑ์แบบใหม่ที่สามารถลดปัญหาข้อร้องเรียนของลูกค้า ดังนั้นเทคนิคการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่สามารถเข้ามาช่วยแก้ปัญหาด้านคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐานและรูปแบบผลิตภัณฑ์ไม่ตรงกับความต้องการของลูกค้า ก็คือเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ศึกษาถึงการออกแบบผลิตภัณฑ์ภายใต้แนวคิดของความต้องการของลูกค้า เพื่อรับรู้ความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของลูกค้ากับลักษณะเชิงเทคนิคออกมาเป็นข้อกำหนดในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้เทคนิคที่สามารถเข้ามาช่วย

แก้ปัญหาด้านรูปแบบผลิตภัณฑ์ไม่สามารถดึงดูดความสนใจจากลูกค้า คือเทคนิควิศวกรรมคันเซ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ศึกษาถึงการออกแบบพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้สามารถดึงดูดความสนใจจากลูกค้า ด้วยการแปลงความต้องการของลูกค้าออกมาเป็นคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีความสอดคล้องกับอารมณ์ ความรู้สึก



รูปที่ 1 ผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่ปัจจุบัน

ดังนั้น จากการค้นพบปัญหาของกลุ่มผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ ตำบลน้ำน้อย อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา และแนวทางการเป็นไปได้ของการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่กล่าวข้างต้น ส่งผลให้เกิดการวิจัยครั้งนี้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่ สร้างความแตกต่างของรูปแบบลักษณะผลิตภัณฑ์ สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์จากไม้ไผ่ของกลุ่มผู้ผลิต และเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้ามากที่สุด

2. แนวคิดและทฤษฎี

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่ โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซ ซึ่งเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพเป็นเทคนิคที่ศึกษาถึงการออกแบบพัฒนาผลิตภัณฑ์ภายใต้แนวคิดความต้องการของลูกค้า เพื่อรับรู้ความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของลูกค้ากับลักษณะเชิงเทคนิคออกมาเป็นข้อกำหนดในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ไม่ได้อารมณ์ และความรู้สึกของลูกค้าเข้าไปในกระบวนการวิเคราะห์ ดังนั้น การนำเทคนิควิศวกรรมคันเซมาใช้ในการวิเคราะห์จึง

เป็นสิ่งที่น่าสนใจ เพื่อสุดท้ายผลิตภัณฑ์สามารถแสดงให้เห็นถึงอารมณ์ ความรู้สึกของลูกค้า และข้อกำหนดเชิงเทคนิคได้ตรงตามความต้องการของลูกค้า เพราะฉะนั้นการวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูลจากเอกสารทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

2.1 การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function

Deployment: QFD)

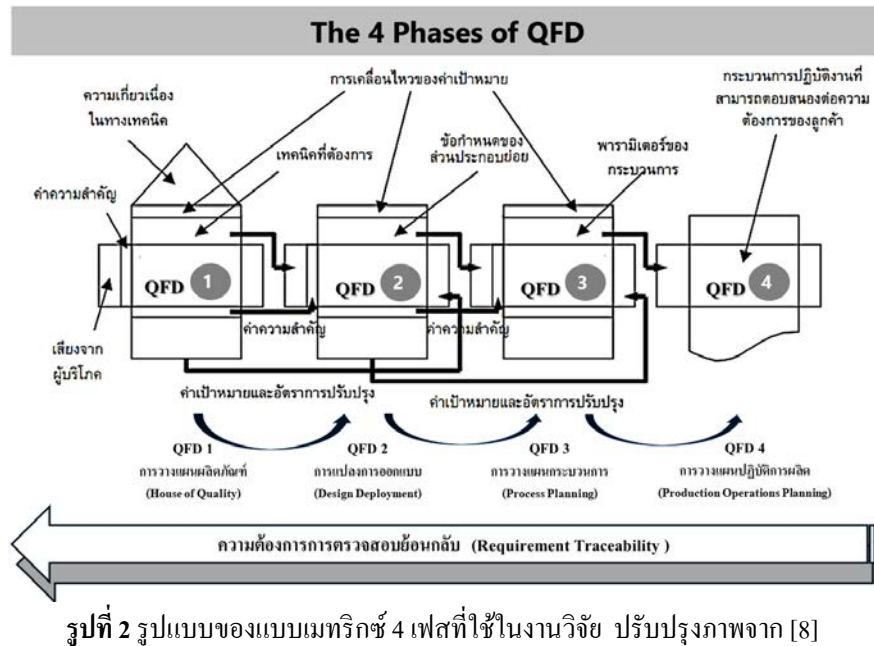
การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพถูกพัฒนาขึ้นโดย Dr.Yoji Akao เมื่อปี ค.ศ.1972 ประยุกต์ใช้เป็นครั้งแรกที่อุตสาหกรรมของบริษัทมิตซูบิชิ ประเทศญี่ปุ่น [5] โดยเป็นเทคนิคที่ใช้ในการจัดโครงสร้างเพื่อวางแผน ออกแบบ และพัฒนาผลิตภัณฑ์ ที่คำนึงถึงความต้องการของลูกค้า และสามารถเปลี่ยนความต้องการของลูกค้าด้วยการนำความต้องการมาระบุกระบวนการในการผลิตหรือเทคนิคทางวิศวกรรม เพื่อกำหนดข้อกำหนดทางเทคนิคที่จำเป็นสำหรับออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ตรงตามความต้องการของลูกค้า [6] อีกทั้งเพื่อจัดลำดับความสำคัญของความต้องการ เพื่อแปลงเป็นกิจกรรมดำเนินงานในเชิงผลิตภัณฑ์ [7] โดยเทคนิค QFD มีทั้งหมด 4 เฟส [8] ดังรูปที่ 2 โดยมีรายละเอียดดังนี้

เฟส 1 เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ (Product Planning) หรือบ้านคุณภาพ (House of Quality: HOQ) เป็นการแปลงความต้องการลูกค้าให้เป็นข้อกำหนดทางเทคนิค

เฟส 2 เมทริกซ์การแปลงการออกแบบ (Design Deployment) เป็นการถ่ายทอดข้อกำหนดทางเทคนิคให้อยู่ในรูปของข้อกำหนดทางด้านส่วนประกอบย่อย

เฟส 3 เมทริกซ์การวางแผนกระบวนการ (Process Planning) เป็นการแปลงข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อยจากเฟสที่ 2 ให้อยู่ในรูปข้อกำหนดของกระบวนการผลิต

เฟส 4 เมทริกซ์การวางแผนปฏิบัติการผลิต (Production Operations Planning) เป็นการแปลงข้อกำหนดพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตมาเป็นกระบวนการปฏิบัติงานที่ตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า



2.2 วิศวกรรมคันเซ (Kansei Engineering: KE)

วิศวกรรมคันเซหรือการออกแบบเกี่ยวกับอารมณ์ (Emotion Design, Affective Engineering) ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ.1970 โดย Dr.Mitsuo Nagamachi มหาวิทยาลัยชิโรชิมา ประเทศญี่ปุ่น [9] การพรรณนาแนวความคิดของผลิตภัณฑ์ของวิศวกรรมคันเซสามารถแบ่งออกเป็น 2 มุมมอง คือ การพรรณนาเชิงความรู้สึก และการพรรณนาเชิงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ [10] โดยขั้นตอนวิศวกรรมคันเซ มีดังนี้ [11]

1) การเลือกกลุ่มตลาดหรือผลิตภัณฑ์ วิศวกรรมคันเซ จะเริ่มจากการตัดสินใจในด้านการสร้างหรือพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีลักษณะเฉพาะ

2) การกำหนดขอบเขตค่าแสดงความรู้สึก จะทำการรวบรวมค่าที่แสดงความรู้สึกหรือเรียกอีกชื่อว่า คำคันเซ (Kansei Word) ที่เกี่ยวกับกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ต้องการศึกษา

3) การกำหนดกรอบคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ จะระบุออกเป็นเชิงกายภาพให้ตรงกับกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ได้กำหนดไว้แล้วสามารถทำคู่ขนานกับกรอบด้านความรู้สึกที่มีต่อผลิตภัณฑ์

4) การสังเคราะห์ เป็นการนำข้อมูลค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์มาเชื่อมโยง และประมวลผลทางสถิติและวิเคราะห์เชิงปริมาณ

5) การตรวจสอบความถูกต้องและการสร้างแบบจำลอง โดยนำผลที่ได้มาทำการตรวจสอบความถูกต้อง การสำรวจข้อมูลประกอบด้วยข้อมูล 3 ส่วน คือ คำคันเซที่แสดงขอบเขตความรู้สึก คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่แสดงขอบเขตคุณลักษณะที่กล่าวถึงประกอบด้วยคุณลักษณะหลักและคุณลักษณะย่อย และภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นข้อมูลที่ผ่านการคัดเลือกจากขั้นตอนก่อนหน้า

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซ ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลอยู่ในช่วงเดือนมีนาคม ถึง มิถุนายน 2563 ซึ่งสามารถสรุปวิธีการดำเนินงานวิจัยหลัก ๆ 5 ขั้นตอนดังนี้

3.1 การสำรวจความต้องการของลูกค้า

สำรวจความต้องการของลูกค้า เพื่อค้นหาเสียงของลูกค้า (Voice of Customer: VOC) เกี่ยวกับลักษณะของผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่ ด้วยวิธีการสัมภาษณ์ พูดคุย และวิธีการสำรวจด้วยแบบสอบถามที่ 1 ลักษณะคำถามปลายเปิด โดยการคำนวณหาขนาดกลุ่มตัวอย่างเพื่อใช้ในการสำรวจความต้องการของลูกค้า ได้เลือกใช้ระดับความเชื่อมั่น 90% และได้เลือกใช้สมการกรณีไม่ทราบจำนวนประชากรของ W.G.Cochran ซึ่งจะสอดคล้องกับ

วิธีดำเนินการวิจัยของ Sinthavalai and Ruengrong [12] กล่าวคือ ในการคำนวณหาขนาดของกลุ่มตัวอย่าง พบว่าได้มีการคำนวณจากสมการกรณีไม่ทราบจำนวนประชากรของ W.G.Cochran และมีการเลือกใช้ระดับความเชื่อมั่น 90% ดังสมการที่ (1)

$$n = \frac{P(1-P)Z^2}{d^2} \quad (1)$$

เมื่อ n คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ

P คือ สัดส่วนของประชากรที่ต้องการสุ่ม (กำหนดให้

P = 0.30 เพราะเป็นที่ยอมรับ)

Z คือ ระดับนัยสำคัญทางสถิติ (กำหนดให้ Z = 1.65 เพราะได้กำหนดความเชื่อมั่น 90%)

d คือ สัดส่วนความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับให้เกิดขึ้น (กำหนดให้ d = 0.10 เพราะได้กำหนดความเชื่อมั่น 90%)

แทนค่าในสูตร ตามสมการที่ 1 จะได้ $n = \frac{0.30(1-0.30)1.65^2}{0.10^2} = 58$

ดังนั้น ในขั้นตอนของการสำรวจความต้องการของลูกค้า พบว่า มีจำนวนขนาดของกลุ่มตัวอย่างจากการคำนวณได้ 58 ท่าน แต่ในการสำรวจจริงได้เพิ่มเป็น 139 ท่าน เพื่อเพิ่มระดับความมั่นใจ ซึ่งกลุ่มผู้บริหาร โภคเป้าหมายหลักในการสำรวจ ประกอบไปด้วย กลุ่มร้านค้าตัวแทนจำหน่าย นักท่องเที่ยว และกลุ่มผู้ใช้ผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่

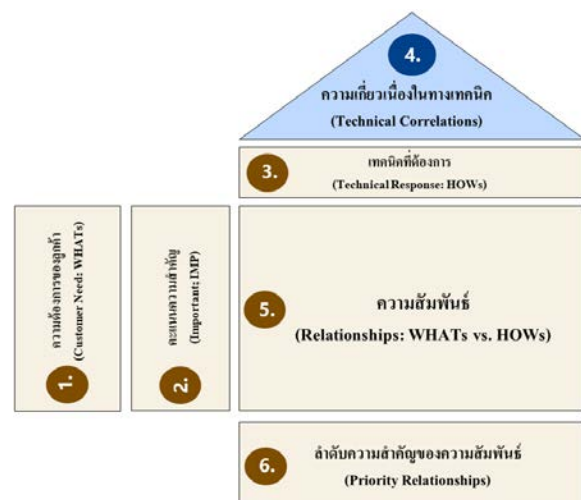
3.2 การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

เนื่องจากงานวิจัยนี้เน้นในส่วนของการแปลงความต้องการของลูกค้าให้เป็นคุณลักษณะทางคุณภาพหรือคุณลักษณะทางวิศวกรรม และการถ่ายทอดคุณลักษณะทางวิศวกรรมให้เป็นคุณลักษณะของชิ้นส่วน (Part Characteristic) เพียงเท่านั้น ไม่ได้วิเคราะห์ในส่วนของการแปลงคุณลักษณะของชิ้นส่วนให้เป็นรายละเอียดต่าง ๆ ของกระบวนการผลิต (Process Parameter) และการแปลงรายละเอียดต่าง ๆ ของกระบวนการผลิตให้เป็นรายละเอียดในการปฏิบัติงาน ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถลงมือปฏิบัติหน้างานจริงของกลุ่มผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ ตำบลน้ำน้อย อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์สำหรับงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิค QFD จำนวน 2 เมทริกซ์ คือ เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ (Product Planning) และเมทริกซ์การแปลงการออกแบบ (Design Deployment) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 การประยุกต์ใช้เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์

ประกอบด้วยส่วนการวิเคราะห์หลัก ๆ 6 ส่วน ดังนี้ [13-14] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างบ้านคุณภาพ (HOQ)

1) ส่วนความต้องการของลูกค้า นำผลจากการสำรวจความต้องการของลูกค้ามาเรียบเรียงใหม่

2) ส่วนคะแนนความสำคัญ นำถ้อยคำความต้องการของลูกค้าที่เรียบเรียงใหม่มาพัฒนาเป็นแบบสอบถามที่ 2 ซึ่งเป็นลักษณะคำถามแบบการวัดค่าเป็นตัวเลข 5 ระดับ โดยการคำนวณหาขนาดของกลุ่มตัวอย่าง ได้เลือกใช้สมการกรณีไม่ทราบจำนวนประชากรของ W.G.Cochran ดังสมการที่ (1) เช่นเดียวกับแบบสอบถามที่ 1

ดังนั้น ในขั้นตอนของการสำรวจความต้องการของลูกค้า พบว่า มีจำนวนขนาดของกลุ่มตัวอย่างจากการคำนวณได้ 58 ท่าน แต่เมื่อสำรวจจริงได้เพิ่มเป็น 139 ท่าน เพื่อเพิ่มระดับความมั่นใจขึ้น ซึ่งกลุ่มผู้บริหาร โภคเป้าหมายหลักในการสำรวจ ประกอบไปด้วยกลุ่มร้านค้าตัวแทนจำหน่าย นักท่องเที่ยว และกลุ่มผู้ใช้ผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่จากนั้น นำข้อมูลจากแบบสอบถามมาคำนวณค่าเฉลี่ยคะแนนความสำคัญ

3) ส่วนเทคนิคที่ต้องการ ผู้วิจัยระดมสมองร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและกลุ่มผู้ผลิต เพื่อกำหนดข้อกำหนดทางเทคนิค (Design Attributes) ที่ตรงตามความต้องการของกลุ่มลูกค้า พร้อมกำหนดเป้าหมาย

4) ส่วนความเกี่ยวเนื่องในทางเทคนิค ทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องระดมสมองร่วมกัน เพื่อสรุปความเกี่ยวเนื่องของเทคนิคที่นำมาใช้ในตัวแทนลักษณะเฉพาะทางคุณภาพ โดยสัญลักษณ์แทนความสัมพันธ์คือ “O” มีความสัมพันธ์ต่อกันมาก “X” มีความสัมพันธ์ต่อกันน้อย และ “ช่องว่าง” ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

5) ส่วนความสัมพันธ์ ทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องระดมสมองร่วมกัน เพื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดทางเทคนิคกับความต้องการของลูกค้าในแต่ละคู่ โดยค่าคะแนนความสัมพันธ์นิยมใช้ตัวเลข 0, 1, 3 และ 9 หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์ มีความสัมพันธ์น้อย มีความสัมพันธ์ปานกลาง และมีความสัมพันธ์มาก ตามลำดับ

6) ส่วนลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ คือ การบ่งบอกถึงความสำคัญในปริมาณต่าง ๆ เพื่อผู้พัฒนาผลิตภัณฑ์ได้ทราบความต้องการและตัวแทนลักษณะเฉพาะทางและคุณภาพที่ต้องได้รับการเอาใจใส่อย่างสูง โดยประกอบด้วย 2 ส่วนย่อย ๆ คือ ค่าน้ำหนักความสำคัญข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ ดังสมการที่ (2) และค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบ ดังสมการที่ (3)

$$I_A = \sum(A \times B) \quad (2)$$

เมื่อ I_A = ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์

A = ค่าความสัมพันธ์ของข้อกำหนดทางด้านเทคนิคต่อความต้องการของลูกค้า

B = ค่าลำดับที่ของการให้น้ำหนักเริ่มต้น

$$IMP = \frac{I_A}{\sum I_A} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ IMP = ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบ

3.2.2 การประยุกต์ใช้เมทริกซ์การแปลงการออกแบบ (Design Deployment)

เป็นการพิจารณาถึงส่วนประกอบย่อยที่สามารถตอบสนองต่อเทคนิคที่ได้จากเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ [15,16] มีขั้นตอน 5 ส่วน ดังนี้

1) ข้อกำหนดทางเทคนิค เลือกข้อกำหนดทางเทคนิคจากบ้านคุณภาพมาแปลงเป็นข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อย โดยเลือกข้อกำหนดทางเทคนิคทุกข้อกรอกในช่องซ้ายมือของเมทริกซ์การแปลงการออกแบบ

2) ระบุค่าความสำคัญ นำค่า IMP จากการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิค โดยเปรียบเทียบในส่วนบ้านคุณภาพ มาใส่ช่องซ้ายมือติดกับข้อกำหนดทางเทคนิค

3) วิเคราะห์ข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อย ทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องระดมสมองร่วมกัน เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อยและข้อกำหนดทางเทคนิคที่ส่งผลต่อความต้องการของลูกค้า พร้อมกำหนดเป้าหมายข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อย

4) สร้างเมทริกซ์ความสัมพันธ์ ให้ค่าระดับคะแนนความสัมพันธ์แบบตัวเลข 1, 3, และ 9 เช่นเดียวกับขั้นตอนการประยุกต์ใช้บ้านคุณภาพ

5) คำนวณลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ คำนวณเช่นเดียวกับบ้านคุณภาพ และมีการคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อยโดยเปรียบเทียบ เพื่อวัดผลคุณลักษณะว่ามีความสำคัญมากหรือน้อยเพียงใด โดยข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อยที่มีความสำคัญจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบและผลิตผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่ต่อไป

3.3 การประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซ

นำเทคนิควิศวกรรมคันเซช่วยในการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ เพื่อครอบคลุมความต้องการของลูกค้า ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ดังนี้

1) เลือกกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการพัฒนา บทความนี้ได้กำหนดกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายคือ กลุ่มร้านกาแฟจำหน่าย นักท่องเที่ยว และกลุ่มผู้ใช้ผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ และได้กำหนดจำนวนของกลุ่มผู้บริโภค

เป้าหมายสำหรับการตอบแบบสอบถามที่ 4 และแบบสอบถามที่ 5 จำนวน 75 และ 35 ท่าน ตามลำดับ พร้อมทั้งได้กำหนดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการพัฒนาคือ ผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่

2) กำหนดขอบเขตค่าแสดงความรู้สึกรวบรวมค่าแสดงความรู้สึกลักษณะผลิตภัณฑ์ที่สอดคล้องกับรูปแบบของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการพัฒนา เพื่อสร้างแบบสอบถามที่ 3 และประเมินแบบสอบถามโดยผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ ผู้เชี่ยวชาญด้านการผลิต จำนวน 25 ท่าน และวิเคราะห์ค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item Objective Congruence: IOC) และดำเนินการคัดเลือกรายการค่าแสดงความรู้สึกลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีค่า IOC มากกว่า 0.5 เพื่อแสดงว่าข้อมูลวัดตรงกับนิยามของตัวแปร

3) กำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ รวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ต้องการพัฒนาในมิติต่าง ๆ เพื่อสร้างแบบสอบถามที่ 4 และประเมินแบบสอบถามโดยกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายหลัก จำนวน 75 ท่าน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย และคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีค่าเฉลี่ยมากกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประเมินทั้งหมด

4) การกำหนดภาพตัวแทนภาพผลิตภัณฑ์ โดยรวบรวมภาพผลิตภัณฑ์ที่มีคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย ประยุกต์ใช้แผนภาพความสัมพันธ์แบ่งกลุ่มภาพผลิตภัณฑ์ตามขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ หลังจากนั้นเลือกภาพผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ตรงกับขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์มากที่สุด

5) ประเมินผลการสอบถามด้วยหลักการทางสถิติและสรุปผล เป็นการสังเคราะห์ผลจากแบบสอบถามที่ 5 ที่ผ่านการประเมินโดยกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายหลัก จำนวน 35 ท่าน เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกลักษณะผลิตภัณฑ์ โดยวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่นิยมใช้กันมากคือ ทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 (Quantification Theory Type I: QT1)

3.4 การออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

ในขั้นตอนนี้เป็นกรนำข้อกำหนดเชิงเทคนิคที่ได้จากเทคนิค QFD และข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะที่สื่อถึงอารมณ์ความรู้สึกของลูกค้าจากเทคนิควิศวกรรมคันเซมาดำเนินการสรุปผล เพื่อส่งให้กับทีมออกแบบดำเนินการออกแบบผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาไม้ไผ่ และดำเนินการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่อไป

3.5 การประเมินความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์

สำรวจความพึงพอใจด้วยแบบสอบถามที่ 6 ของกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายหลักที่มีต่อต้นแบบผลิตภัณฑ์แบบใหม่ เนื่องจากการประเมินแบบสอบถามเป็นการสำรวจและรวบรวมความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายเป็นหลัก อีกทั้งต้องการให้ข้อมูลด้านคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบกับผลความพึงพอใจมีความสอดคล้องกัน ดังนั้นผู้ตอบแบบสอบถามที่ 6 จึงเป็นกลุ่มเดิมกับแบบสอบถามก่อนหน้านี้ ประกอบด้วย กลุ่มร้านค้าตัวแทนจำหน่าย นักท่องเที่ยว และกลุ่มผู้ใช้ผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ จำนวน 150 ท่าน

4. ผลการวิจัย

ผลการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับเทคนิควิศวกรรมคันเซสำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

4.1.1 ผลการประยุกต์ใช้เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ

พบว่ามีรายละเอียดของผลการดำเนินงาน 6 ส่วน ดังรูปที่ 4 ดังนี้

1) ความต้องการของลูกค้าที่ได้จากแบบสอบถามที่ 1 มีจำนวน 22 ความต้องการ ประกอบด้วย 5 กลุ่ม คือ รูปแบบวัสดุ ความสะดวก คุณภาพ และการตลาด ดังส่วนที่ 1 ของบ้านคุณภาพในรูปที่ 4

2) คะแนนความสำคัญ พบว่า ลูกค้าได้ให้คะแนนความสำคัญกับปัจจัยในกลุ่มของรูปแบบด้านรูปทรงหลากหลายและมีจุดเด่นเป็นอันดับแรก โดยมีค่าคะแนนเฉลี่ย 3.97 คะแนน ดังส่วนที่ 2 ของบ้านคุณภาพในรูปที่ 4

3) เทคนิคที่ต้องการ ผลจากการระดมสมองของผู้วิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ พบว่า สามารถกำหนดข้อกำหนดทางเทคนิคได้ 18 ข้อกำหนด ดังส่วนที่ 3 ของบ้านคุณภาพในรูปที่ 4

4) ความเกี่ยวเนื่องทางเทคนิค จากการระดมสมองของฝ่ายต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง พบว่า ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ

ผลิตภัณฑ์แต่ละข้อกำหนดมีความสัมพันธ์ที่ต่างกันไป ดัง
ส่วนที่ 4 ของบ้านคุณภาพในรูปที่ 4

5) ความสัมพันธ์ ในการให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่าง
ความต้องการของลูกค้าและข้อกำหนดทางเทคนิคของเมท
ริกการวางแผนผลิตภัณฑ์ พบว่า ได้ผลการให้คะแนนความ

สัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการให้คะแนนได้ทำการ
เปรียบเทียบแบบเป็นคู่ ๆ โดยใช้การระดมสมองของผู้วิจัย
ร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ และผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์
ไม้ไฟ ดังส่วนที่ 5 ของบ้านคุณภาพในรูปที่ 4

สัญลักษณ์ด้านความเกี่ยวข้องในทางเทคนิค	
สัญลักษณ์	ความหมาย
O	มีความสัมพันธ์ต่อกันมาก
X	มีความสัมพันธ์ต่อกันน้อย
ช่องว่าง	ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

สัญลักษณ์ค่าการเคลื่อนไหวของเป้าหมาย	
สัญลักษณ์	ความหมาย
↑	ยิ่งมากยิ่งดี
○	เป้าหมายเหมาะสม
↓	ยิ่งน้อยยิ่งดี

สัญลักษณ์ด้านความเกี่ยวเนื่องในทางเทคนิค	
สัญลักษณ์	ความหมาย
○	มีความสัมพันธ์ต่อกันมาก
×	มีความสัมพันธ์ต่อกันน้อย
ช่องว่าง	ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

สัญลักษณ์ด้านการเคลื่อนไหวของเป้าหมาย	
สัญลักษณ์	ความหมาย
↑	ยิ่งมากยิ่งดี
○	เป้าหมายเหมาะสม
↓	ยิ่งน้อยยิ่งดี

ข้อกำหนดทางเทคนิค																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	<table><tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td><td>18</td></tr><tr><td rowspan="3">รูปแบบ</td><td>รูปแบบมีความหลากหลาย</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>การใช้ประโยชน์</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>น้ำหนัก</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td rowspan="3">วัสดุ</td><td>ขนาด</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>สี</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>ความคงทน</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td rowspan="3">คุณภาพ</td><td>อุปกรณ์เสริม</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>วัสดุในการผลิต</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>ความทนทานของวัสดุโครงสร้าง</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td rowspan="3">อื่น ๆ</td><td>ความทนทานของอุปกรณ์ยึด</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>การทำความสะอาด</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>การทำความสะอาด</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td rowspan="3">อื่น ๆ</td><td>การทำความสะอาด</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>การทำความสะอาด</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>การทำความสะอาด</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	รูปแบบ	รูปแบบมีความหลากหลาย																		การใช้ประโยชน์																		น้ำหนัก																		วัสดุ	ขนาด																		สี																		ความคงทน																		คุณภาพ	อุปกรณ์เสริม																		วัสดุในการผลิต																		ความทนทานของวัสดุโครงสร้าง																		อื่น ๆ	ความทนทานของอุปกรณ์ยึด																		การทำความสะอาด																		การทำความสะอาด																		อื่น ๆ	การทำความสะอาด																		การทำความสะอาด																		การทำความสะอาด																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	รูปแบบ	รูปแบบมีความหลากหลาย																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
การใช้ประโยชน์																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
น้ำหนัก																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
วัสดุ	ขนาด																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
	สี																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
	ความคงทน																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
คุณภาพ	อุปกรณ์เสริม																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
	วัสดุในการผลิต																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
	ความทนทานของวัสดุโครงสร้าง																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
อื่น ๆ	ความทนทานของอุปกรณ์ยึด																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
	การทำความสะอาด																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
	การทำความสะอาด																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
อื่น ๆ	การทำความสะอาด																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
	การทำความสะอาด																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
	การทำความสะอาด																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
No.	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8	B-9	B-10	B-11	B-12	B-13	B-14	B-15	B-16	B-17	B-18																																																																																																																																																																																																																																																																																																						

รูปแบบ	ความต้องการของผู้บริโภค	No.	↑	↑	○	○	○	○	○	○	↑	↑	↓	↑	○	↑	↑	○	○
	รูปทรงหลากหลายและมีจุดเด่น	A-1	3.97	9	3	1	3	3	3	9			3		3		1		3
	ใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย	A-2	3.83	3	9		1		1	1			3		3	1	3	3	
	ขนาดเหมาะสม	A-3	3.83	3	1	1	9			1		1	1	1	3	3		1	1
	ลดเสียงรบกวน	A-4	3.81	1				9	9	3	3							1	
	น้ำหนักเบา	A-5	3.75	1	1	9	1		1	3	1	1		1	3				
	สีสวยงาม	A-6	3.56	3				9	3	9	1							1	
วัสดุ	มีการตกแต่งเพิ่มเติม	A-7	3.45	3	1	1		1	9	9	1		3	1		1		1	
	วัสดุที่ไม่เป็นอันตราย	A-8	3.80		1					1	3				1				
	มีการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม	A-9	3.79	1	1		3		1		9	3	3		1		1		
	ใช้วัสดุจากธรรมชาติเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	A-10	3.66		3			3	3		1	9	3	1	1		3	3	1
	วัสดุที่มีคุณภาพ	A-11	3.62	1	3				1		9	3	3				3	3	3
	ใช้อุปกรณ์ยึดประกอบที่เหมาะสม	A-12	3.52	3	3					1		3	9		1	3	3	3	
ความสะดวก	เคลื่อนย้ายได้สะดวก	A-13	3.76		3	3	3	3		1				3	9				1
	เหมาะสมกับการใช้งาน	A-14	3.75	3	3	1	3	1			3	3	3		9	3	1	1	
	มีอุปกรณ์เสริมช่วยในการอำนวยความสะดวก	A-15	3.63	1	3	1	1			9					1	1			1
	ทำความสะอาดง่าย	A-16	3.59				1				3	1			9				
คุณภาพ	มีความแข็งแรงทนทาน	A-17	3.68	3	3	1	1				3	9	3			1	3	3	3
	งานประกอบที่มีคุณภาพ	A-18	3.66	3	1		1			1		3	3				9	3	3
	ไม่เป็นเชื้อรา	A-19	3.32		1						3			3				3	1
	ปกผิวและผิวด้านไม่กินเนื้อไม้	A-20	3.25		1					1	3	3	1					3	1
อื่น ๆ	ราคาที่เหมาะสม	A-21	3.73	3			1	3	1	1	3		3	3		3	3	3	9
	มีบริการหลังการขาย	A-22	3.47	1		1	1				3					3			1

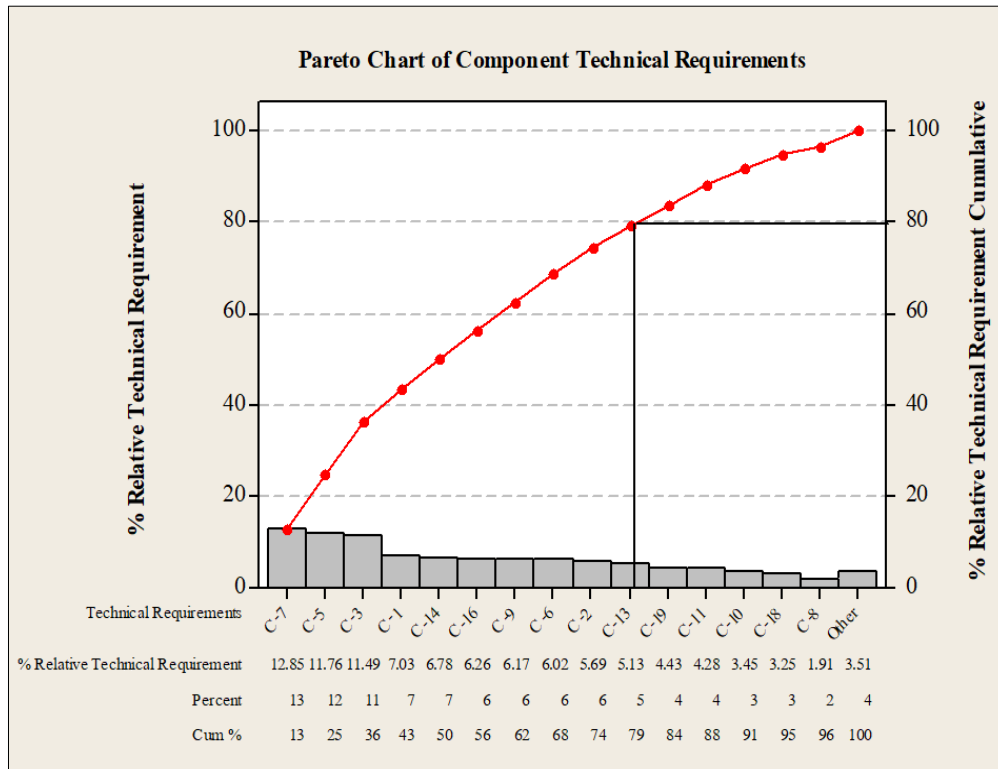
ลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์			1	2	16	10	12	13	7	5	3	6	4	17	11	15	9	14	8	18	รวม
ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์			156.8	152.1	70.8	109.6	107.6	106.4	125.2	135.3	149.1	127.6	142.9	53.2	109.6	99.9	110.2	104.4	121.8	38.8	2021.46
ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคเปรียบเทียบ			7.76	7.52	3.50	5.42	5.32	5.27	6.19	6.69	7.38	6.31	7.07	2.63	5.42	4.94	5.45	5.16	6.03	1.92	100

เป้าหมายทางเทคนิค	รูปทรงให้ได้สองด้าน 2 รูปทรง	สามารถรองรับการใช้งานได้หลากหลาย	น้ำหนักไม่เกิน 50 กิโลกรัมต่อจุด	พื้นเป็นกรณีพิเศษไม่เกิน 3 ตารางเมตร	สีและสีเคลือบไม่หลุดลอกภายใน 2 ปี	มีความคงทนได้อีกอย่างน้อย 2 ปี	มีการตกแต่งเพื่อความสวยงาม	มีการเสริมอุปกรณ์เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการใช้งาน	ใช้ไม้ที่เป็นวัสดุโครงสร้างหลัก	อุปกรณ์ยึดโครงสร้างไม้เนื้อทว่า 5 ปี	อุปกรณ์ยึดโครงสร้างไม้เนื้อทว่า 5 ปี	สามารถทำความสะอาดได้ง่าย	สามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องทำความสะอาดและไม่เกิดความเสียหาย	สามารถรองรับการปรับเปลี่ยนหรือการเคลื่อนย้ายได้ง่าย	ไม่มีจุดหรือร่องเงาเงาเงา	อุปกรณ์ใช้งานมากกว่า 5 ปี	น้ำหนักไม่เกิน 10,000 บาทต่อจุด	มีการรับประกัน 1 ปี หลังการขาย	
-------------------	------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	----------------------------	---	---------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------	---	---	---------------------------	---------------------------	---------------------------------	--------------------------------	--

รูปที่ 4 เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ

6) ลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ พบว่ามีผลการจัดเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ และโดยเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์ ชุดโซฟาจากไม้ไผ่ และสามารถสรุปผลได้ว่าการจัดเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์

และโดยเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่มีคุณลักษณะการออกแบบที่มีคะแนนสูงสุด 12 ข้อ หรือสิ่งที่ผู้ผลิตต้องให้ความสำคัญเป็นลำดับแรก ๆ ตามหลักการแผนภาพพาเรโต [12] ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์และโดยเปรียบเทียบ

4.1.2 ผลการประยุกต์ใช้เมทริกซ์การแปลงการออกแบบ

พบว่า มีรายละเอียดผลการดำเนินงาน 4 ส่วน ดังรูปที่ 6 ดังนี้

1) ข้อกำหนดทางเทคนิค และค่า IMP พบว่า ได้เลือกข้อกำหนดทางเทคนิคทุกข้อจากเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการจัดเรียงลำดับความสำคัญจากค่ามากไปหาค่าน้อย จากนั้น จะนำข้อกำหนดทางเทคนิค และค่า IMP อยู่ช่องซ้ายมือของเมทริกซ์การแปลงการออกแบบ

2) ข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อย พบว่า จากการระดมสมองของผู้วิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ สามารถกำหนดข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อยได้ 19 ข้อกำหนด

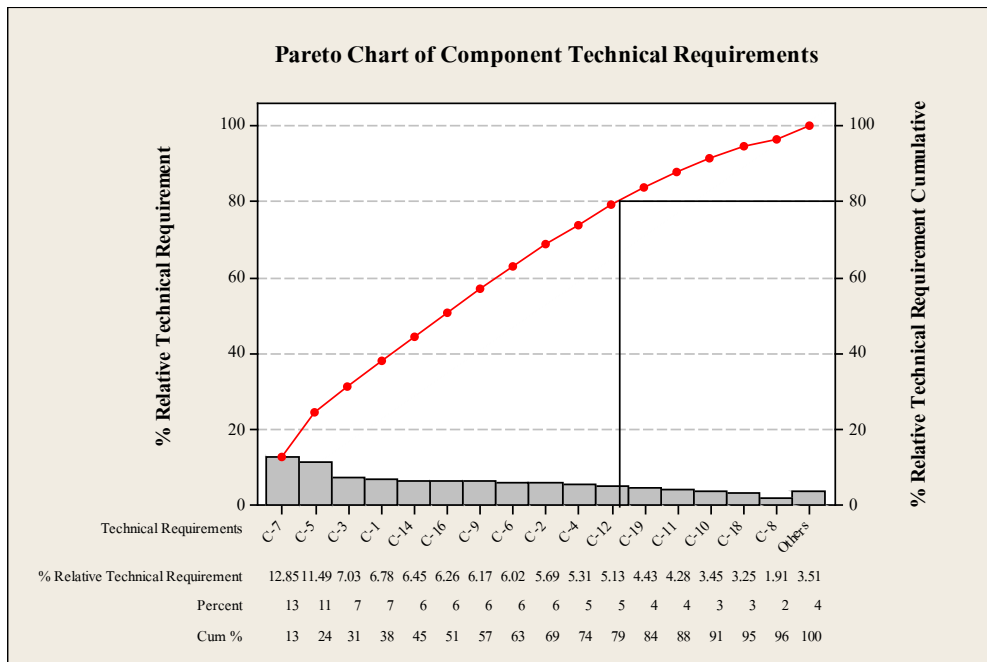
3) เมทริกซ์ความสัมพันธ์ พบว่า ได้ผลการให้คะแนนความสัมพันธ์ ซึ่งในการให้คะแนนจะทำการเปรียบเทียบแบบเป็นคู่ ๆ โดยใช้การระดมสมองของผู้วิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่

			ข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อย (Part Characteristics)																		
			C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-9	C-10	C-11	C-12	C-13	C-14	C-15	C-16	C-17	C-18	C-19
ค่าการเคลื่อนที่ของเป้าหมาย (Movement of Target Value)			T	L	O	O	T	O	T	O	O	T	L	T	O	O	T	T	O	T	T
ข้อกำหนดทางเทคนิค (Technical Requirement)			No.	IMP																	
รูปแบบมีความหลากหลาย	B-1	7.76	9	1	1	1		1			1					1				1	1
การใช้ประโยชน์	B-2	7.52	1		1		1		1		1	1	1		3	1		3	1	1	
วัสดุในการผลิต	B-9	7.38	3	1	1	1	3	1	3	1	1	3	1				3	1		3	1
ความทนทานของอุปกรณ์ยึด	B-11	7.07		1	1		9		9							1		3			1
อุปกรณ์เสริม	B-8	6.69	1	1				3	1		1				3	1					
ความทนทานของวัสดุโครงสร้าง	B-10	6.31		1	1		9		9		1	1	3			1		3			
การตกแต่ง	B-7	6.19	1			3		9							1	3			1	1	1
ราคาของผลิตภัณฑ์	B-17	6.03	1		1	3	1	3	3			3	3	1		9		1		1	3
คุณภาพของงานประกอบ	B-15	5.45			1		9		9				1		1	1		1			3
ขนาด	B-4	5.42	1	3	9		1		1	1	3					1		1			1
ความสะดวกในการใช้งาน	B-13	5.42	1	3	3		1		3		3	1	1		9	1	1				
สีพื้น	B-5	5.32				9		1						3		1				1	1
กลไก	B-6	5.27				3		1							1		1				1
อายุการใช้งาน	B-16	5.16		1	1		3	1	3	1	1	3	3	1		1		9			3
การเคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์	B-14	4.94	1	3	3		3		3		9		3		1						
น้ำหนัก	B-3	3.5	3	9	3		1	1	1		3				1						
การทำความสะดวก	B-12	2.63	1	1	3			1		9				1				1			
การบริหารหลังการขาย	B-18	1.92		1	1						3										1
ลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อย			4	9	3	10	2	8	1	16	7	14	13	17	11	5	18	6	19	15	12 รวม
ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อยสมบูรณ์		147.32	123.76	152.85	115.49	249.80	130.89	279.39	41.63	134.06	74.96	93.09	35.05	111.49	140.23	27.56	136.05	13.71	70.77	96.25	2174.35
ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อยโดยเปรียบเทียบ		6.78	5.69	7.03	5.31	11.49	6.02	12.85	1.91	6.17	3.45	4.28	1.61	5.13	6.45	1.27	6.26	0.63	3.25	4.43	100.00
เป้าหมายของส่วนประกอบย่อย			วัสดุและชิ้นส่วนเป็นรูปเล่มที่หลากหลายได้เลือก	มีน้ำหนักต่อชุดไม่เกิน 70 กิโลกรัม	มีขนาดเหมาะสมกับความต้องการด้านวัสดุและชิ้นส่วน	ชิ้นส่วนมีสีรวมชัด	ใช้อุปกรณ์ยึดที่ได้มาตรฐานและเหมาะสมการใช้งานไม่โยกตัว 5 ปี	ใช้วัสดุตกแต่งที่เหมาะสมและสวยงาม เช่น ผ้าไหม กระดาษ เป็นต้น	คงสภาพการใช้งานได้นานกว่า 5 ปี	ไม่มีรอยขีดข่วนที่ไม่สามารถแก้ไขได้	ออกแบบให้สามารถเคลื่อนที่ได้สะดวก	ป้องกันรอยขีดข่วนได้มากกว่า 5 ปี	ขณะใส่สินค้าให้มีความแน่นอยู่ในช่วง 10-15 เปอร์เซ็นต์ เพื่อป้องกันการกระเทือน	ไม่หลุดออกหรือฉีกขาดภายใน 5 ปี	ใช้งานได้ตามระยะเวลาตามที่ระบุไว้และใช้งานได้สะดวก	กำหนดราคาให้เหมาะสมกับชิ้นส่วนและวัสดุตกแต่ง	เลือกใช้วัสดุที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบ ไม่มีสิ่งปนเปื้อน	คงสภาพการใช้งานไม่โยกตัว 5 ปี	ไม่มีกลิ่นหรือมีฝุ่นที่เกินมาตรฐาน	ชิ้นส่วนมีการเคลือบเงา	ชิ้นส่วนผ่านการบรรจุที่มีสภาพแวดล้อมที่สะอาด

รูปที่ 6 เมทริกซ์ความสัมพันธ์ของเมทริกซ์การแปลงการออกแบบของผลิตภัณฑ์

4) การคำนวณลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์พบว่า มีผลการจัดเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญข้อกำหนดส่วนประกอบย่อยสมบูรณ์ และโดยเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์ชุดโซฟา และสามารถสรุปผลได้ว่าการจัด

เรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญโดยเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์ชุดโซฟามีคุณลักษณะการออกแบบที่มีคะแนนสูงสุด 11 ข้อ หรือสิ่งที่ผู้ผลิตต้องให้ความสำคัญเป็นลำดับแรก ๆ ตามหลักการแผนภาพพาเรโต [12] ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อยสมบูรณ์ และโดยเปรียบเทียบ

4.2 ผลการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันเซ

4.2.1 ผลการกำหนดขอบเขตค่าแสดงความรู้สึก

พบว่าจากการสำรวจข้อมูลด้วยแบบสอบถามที่ 3 มีค่าแสดงความรู้สึกที่ผ่านการประเมิน (IOC > 0.5) และผ่านการคัดเลือกโดยผู้เชี่ยวชาญ เพื่อกำหนดค่าแสดงความรู้สึกที่สามารถสื่อถึงความรู้สึกเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่จำนวน 21 ค่าแสดงความรู้สึก จากผลการรวบรวมทั้งหมด 52 ค่าแสดงความรู้สึก ดังตารางที่ 1

4.2.2 ผลการกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

พบว่า จากการสำรวจข้อมูลด้วยแบบสอบถามที่ 4 มีระดับค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประเมินคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักทั้งหมดเท่ากับ 4.34

ดังนั้น คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีระดับคะแนนมากกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประเมินทั้งหมด ($\bar{x} \geq 4.34$) และผ่านการคัดกรองกับผู้เชี่ยวชาญ มีจำนวน 9 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ผลการกำหนดขอบเขตค่าแสดงความรู้สึกสำหรับผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่ จำนวน 21 ค่า

Kansei Words	IOC	Kansei Words	IOC	Kansei Words	IOC	Kansei Words	IOC
1. แข็งแรง	1.00	7. คงทน	0.80	13. โดดเด่น	0.68	19. มีความเหมาะสม	0.52
2. เอกลักษณ์	0.84	8. สวย	0.76	14. ลวดลายธรรมชาติ	0.60	20. ร่วมสมัย	0.52
3. ทนทาน	0.80	9. เหมาะสมกับการใช้งาน	0.76	15. ดูเป็นธรรมชาติ	0.56	21. มีคุณค่า	0.52
4. น่าสนใจ	0.80	10. คู่มือภาพลักษณ์	0.76	16. เรียบง่าย	0.56		
5. แปลกใหม่	0.80	11. สร้างสรรค์	0.76	17. ประทับใจ	0.56		
6. มีสไตล์	0.80	12. ทันสมัย	0.72	18. ดีไซน์เก๋	0.56		

ตารางที่ 2 ผลการกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ จำนวน 9 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก 18 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	ค่าเฉลี่ย ($\bar{x} \geq 4.34$)
1	ความมั่นคงของโครงสร้าง	มีความมั่นคงมาก, มีความมั่นคงปานกลาง	4.64
2	รูปทรงของผลิตภัณฑ์	รูปทรงแบบโค้งมน, รูปทรงแบบเหลี่ยม	4.57
3	ความกว้างของที่นั่ง	ที่นั่งกว้างพอดี, ที่นั่งกว้างมาก	4.52

ตารางที่ 2 ผลการกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ จำนวน 9 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก 18 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย (ต่อ)

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	ค่าเฉลี่ย ($\bar{X} \geq 4.34$)
4	การรับน้ำหนัก	รับน้ำหนักได้มาก, รับน้ำหนักได้แบบพอดี	4.49
5	ขนาดของผลิตภัณฑ์	ขนาดกลาง, ขนาดใหญ่	4.49
6	วัสดุรองนั่ง	เบาะหนัง, เบาะผ้า	4.48
7	ความยาวของโซฟา	โซฟายาวพอดี, โซฟายาวมาก	4.43
8	ความสูงของโซฟา	โซฟาต่ำ, โซฟาสูงปานกลาง	4.36
9	ลักษณะของโซฟา	ลักษณะแบบโปร่ง, ลักษณะแบบทึบ	4.36

4.2.3 ผลการรวบรวมภาพผลิตภัณฑ์

จากวารสารที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ชุดโซฟา และสื่ออินเทอร์เน็ตมากกว่า 3 เว็บไซต์ เช่น Exball, Pinterest and Naibann เป็นต้น พบว่า มีภาพผลิตภัณฑ์จำนวน 55 ภาพ จากนั้น แบ่งกลุ่มภาพผลิตภัณฑ์ด้วยแผนภาพความสัมพันธ์ตามขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่กำหนดในตารางที่ 2 และดำเนินการเปรียบเทียบจำนวนคุณลักษณะผลิตภัณฑ์เพื่อหาภาพผลิตภัณฑ์ที่ตรงกับขอบเขตคุณลักษณะ

ผลิตภัณฑ์มากที่สุดมาเป็นภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ ดังนั้นสรุปได้ว่ามีภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์จำนวนทั้งสิ้น 5 ภาพ โดยเป็นการเลือกจากจำนวนคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย เพื่อหาภาพผลิตภัณฑ์ที่ตรงกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยที่มากที่สุด มาเป็นรูปตัวแทนผลิตภัณฑ์ และสามารถแสดงรายละเอียดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยสำหรับภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ทั้ง 5 ภาพ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปผลการวิเคราะห์ภาพผลิตภัณฑ์ที่ตรงกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยที่มากที่สุด

ภาพผลิตภัณฑ์	รายการคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	
ตัวแทนผลิตภัณฑ์ภาพที่ 1 	1. รูปทรงแบบเหลี่ยม 2. เบาะผ้า 3. ที่นั่งกว้างพอดี 4. โซฟายาวมาก 5. โซฟาต่ำ	6. รับน้ำหนักได้มาก 7. มีความมั่นคงมาก 8. ลักษณะแบบโปร่ง 9. ลักษณะแบบทึบ 10. ขนาดใหญ่
ตัวแทนผลิตภัณฑ์ภาพที่ 2 	1. รูปทรงแบบเหลี่ยม 2. เบาะผ้า 3. ที่นั่งกว้างพอดี 4. โซฟายาวพอดี 5. โซฟาสูงปานกลาง	6. รับน้ำหนักได้มาก 7. มีความมั่นคงมาก 8. ลักษณะแบบโปร่ง 9. ลักษณะแบบทึบ 10. ขนาดใหญ่
ตัวแทนผลิตภัณฑ์ภาพที่ 3 	1. รูปทรงแบบเหลี่ยม 2. เบาะผ้า 3. ที่นั่งกว้างพอดี 4. โซฟายาวพอดี 5. โซฟาสูงปานกลาง	6. รับน้ำหนักได้มาก 7. มีความมั่นคงมาก 8. ลักษณะแบบโปร่ง 9. ลักษณะแบบทึบ 10. ขนาดใหญ่

ตารางที่ 3 สรุปผลการวิเคราะห์ภาพผลิตภัณฑ์ที่ตรงกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยที่มากที่สุด (ต่อ)

ภาพผลิตภัณฑ์	รายการคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	
ตัวแทนผลิตภัณฑ์ภาพที่ 4 	1. รูปทรงแบบเหลี่ยม 2. รูปทรงแบบโค้งมน 3. เบาะผ้า 4. ที่นั่งกว้างพอดี 5. โซฟายาวพอดี 6. โซฟาสูงปานกลาง	7. รับน้ำหนักได้มาก 8. มีความมั่นคงมาก 9. ลักษณะแบบโปร่ง 10. ลักษณะแบบทึบ 11. ขนาดใหญ่
ตัวแทนผลิตภัณฑ์ภาพที่ 5 	1. รูปทรงแบบเหลี่ยม 2. รูปทรงแบบโค้งมน 3. เบาะผ้า 4. ที่นั่งกว้างพอดี 5. โซฟายาวพอดี	6. โซฟาสูงปานกลาง 7. รับน้ำหนักได้มาก 8. มีความมั่นคงมาก 9. ลักษณะแบบทึบ 10. ขนาดกลาง

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่

1 หรือการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณของผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไฟ ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้ระหว่างกลุ่มของตัวแปรอิสระทุกตัว (คุณลักษณะผลิตภัณฑ์) กับตัวแปรตาม (ค่าคะแนนค่าแสดงความรู้สึก) พบว่ามีค่าแสดงความรู้สึกที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดและมีค่า $MCC^2 > 0.5$ อยู่จำนวน 7 ค่า ได้แก่ แข็งแรง, คู่มือมีภาพลักษณ์, สวย, สร้างสรรค์, เรียบง่าย, ดีไซน์เก๋ และดูเป็นธรรมชาติ

ดังนั้น นำข้อมูลค่าแสดงความรู้สึกที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดและมีค่า $MCC^2 > 0.5$ ก่อนหน้าจำนวนทั้ง 7 ค่า ที่ผ่านเกณฑ์ไป

วิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก (PCC) และหาค่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย (CS) ด้วยโปรแกรม Minitab รุ่น 16 และดำเนินการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ เพื่อกำหนดข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะสำหรับการออกแบบ โดยมีเกณฑ์การคัดเลือก คือ คัดเลือกเฉพาะคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก (PCC) และคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย (CS) ที่มีค่าการวิเคราะห์เป็นค่าบวกที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($P < 0.05$) ดังนั้น ผลการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ผ่านเกณฑ์มี 7 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก และ 8 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไฟ

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบ						ค่าแสดงความรู้สึกที่สื่อถึงคุณลักษณะ	ภาพแนวทางการออกแบบ	MCC^2
	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก	PCC	P-Value	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	CS	P-Value			
1	รูปทรงของผลิตภัณฑ์	0.570	0.025	รูปทรงแบบโค้งมน	1.002	0.047	แข็งแรง	ภาพที่ 1	0.64
		0.615	0.003		0.575	0.035	คู่มือมีภาพลักษณ์		0.53
		1.082	0.002		1.066	0.038	สวย		0.80
		1.067	0.001		1.093	0.028	สร้างสรรค์	ภาพที่ 4	0.57
		0.981	0.001		1.975	0.000	เรียบง่าย	ภาพที่ 2	0.53

ตารางที่ 4 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไฟ (ต่อ)

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบ						ค่าแสดงความรู้สึกลูกค้าถึงคุณลักษณะ	ภาพแนวทางการออกแบบ	MCC ²
	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก	PCC	P-Value	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	CS	P-Value			
1	รูปทรงของผลิตภัณฑ์	1.368	0.000	รูปทรงแบบเหลี่ยม	1.594	0.001	ดีไซน์เก๋	ภาพที่ 4	0.73
		1.110	0.002		1.193	0.018	ดูเป็นธรรมชาติ	ภาพที่ 2	0.51
2	ความยาวของผลิตภัณฑ์	0.462	0.024	โซฟายาวพอดี	0.047	0.020	แข็งแรง	ภาพที่ 1	0.64
3	การรับน้ำหนัก	0.396	0.039	รับน้ำหนักได้มาก	0.950	0.001	แข็งแรง	ภาพที่ 1	0.64
4	ลักษณะของผลิตภัณฑ์	0.414	0.020	ลักษณะแบบโปร่ง	0.569	0.022	แข็งแรง	ภาพที่ 1	0.64
		0.955	0.002	ลักษณะแบบโปร่ง	0.863	0.030	สวย		0.80
		1.022	0.005	ลักษณะแบบโปร่ง	1.054	0.005	สร้างสรรค์	ภาพที่ 4	0.57
5	ความสูงของผลิตภัณฑ์	1.212	0.013	โซฟาสูงปานกลาง	0.956	0.036	ดูดีมีภาพลักษณ์	ภาพที่ 1	0.53
6	ขนาดของผลิตภัณฑ์	0.683	0.042	ขนาดใหญ่	0.712	0.019	สร้างสรรค์	ภาพที่ 4	0.57
7	วัสดุรองนั่ง	1.309	0.608	เบาะผ้า	1.551	0.018	ดูเป็นธรรมชาติ	ภาพที่ 2	0.51

4.2.5 ผลการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไฟ

จากการแปลงความต้องการของลูกค้าด้วยเทคนิค QFD พบว่า ข้อกำหนดในส่วนของเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย 12 ข้อ และเมทริกซ์การแปลงการออกแบบประกอบด้วย 11 ข้อ แต่เนื่องจากข้อกำหนดในส่วนของเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์และเมทริกซ์การแปลงการออกแบบในบางประเด็นสามารถอธิบายรายละเอียดคล้ายกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าข้อกำหนด

ของเทคนิค QFD ประกอบด้วย 16 ข้อ อีกทั้งพบว่า ผลการรวบรวมความต้องการเชิงอารมณ์ความรู้สึกของลูกค้าด้วยเทคนิควิศวกรรมคันเซสามารถกำหนดข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะที่สื่อถึงความรู้สึกได้จำนวนทั้งหมด 7 ข้อ แต่เนื่องจากมีข้อกำหนดของเทคนิค QFD และวิศวกรรมคันเซ 2 ประเด็นที่มีความหมายเหมือนกัน คือ รูปทรง และขนาดของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปข้อกำหนดในการออกแบบผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไฟได้จำนวน 21 ข้อ จากจำนวนทั้งหมด 30 ข้อ ดัง ตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ข้อกำหนดในการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไฟ เรียงตามประเภทผลการวิเคราะห์

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์	รายละเอียด
คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ของผลลัพธ์สำหรับผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ได้จากการประยุกต์ใช้เทคนิค QFD		
1	รูปทรง/รูปแบบของผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลาย	- รูปทรงของผลิตภัณฑ์มีลักษณะภาพรวมเป็นรูปทรงแบบเหลี่ยมที่ให้ความรู้สึกเรียบง่าย และดูเป็นธรรมชาติ พร้อมทั้งมีการนำไม้ไฟที่มีขนาดที่หลากหลาย โดยเฉพาะขนาดใหญ่ มาเป็นวัสดุชิ้นส่วนในการขึ้นรูปเพื่อเกิดความโค้งมนในบางจุดที่สื่อถึงความแข็งแรงและสวยงามตรงตามรสนิยม
2	การใช้ประโยชน์	- ผลิตภัณฑ์มีลักษณะการใช้งานหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานนอกประสงค์ รับแขก หรือการนั่งพักผ่อนดูทีวีได้อย่างสบาย

ตารางที่ 5 ข้อกำหนดในการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่ เรียงตามประเภทผลการวิเคราะห์ (ต่อ)

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์	รายละเอียด
คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ของผลลัพธ์สำหรับผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ได้จากการประยุกต์ใช้เทคนิค QFD		
3	วัสดุในการผลิต	- โครงสร้างผลิตภัณฑ์มีการขึ้นรูปโดยใช้ไม้ไผ่ที่ไม่ให้เกิดความรู้สึกเป็นธรรมชาติเป็นหลัก และผ่านการอาบน้ำยาป้องกันแมลง อีกทั้งมีการผึ่งให้แห้ง เพื่อความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์
4	ความคงทนและทนทานของอุปกรณ์จับยึด	- การจับยึดของผลิตภัณฑ์มีการใช้ไม้แข็งที่มีมาตรฐานมาเป็นอุปกรณ์จับยึด เพื่อเสริมความทนทานและคงสภาพการใช้งานไม่น้อยกว่า 5 ปี โดย
5	อุปกรณ์เสริม	- ผลิตภัณฑ์มีการเสริมอุปกรณ์เพื่อเพิ่มหน้าที่ในการใช้งาน
6	ความคงทนและทนทานของวัสดุโครงสร้าง	- การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ใช้เทคนิคการเข้ามูมไม้ไผ่แบบขัดกลอน เพื่อสร้างความแข็งแรงทนทานของวัสดุโครงสร้าง และเพื่อยืดอายุวัสดุโครงสร้างไม่น้อยกว่า 5 ปี
7	การตกแต่งด้วยวัสดุเสริม	- ผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาใช้กระจกตกแต่งเพิ่มเติมในส่วนของโต๊ะ เพื่อความเหมาะสมและเพิ่มสวยงาม
8	ราคาของผลิตภัณฑ์	- กำหนดราคาที่เหมาะสมตามต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยคำนึงถึงราคาของชิ้นส่วน ราคาวัสดุตกแต่ง และต้นทุนการตลาด
9	คุณภาพของงานประกอบ	- ผลิตภัณฑ์มีสภาพเรียบร้อยและไม่มีตำหนิที่เกิดจากการขึ้นรูป และมีความพิถีพิถันในการขึ้นรูปอย่างมีคุณภาพและสวยงาม
10	ขนาดของผลิตภัณฑ์	- ผลิตภัณฑ์มีขนาดใหญ่สามารถรองรับการใช้งานพร้อมกันได้หลายคนโดยพื้นที่ในการติดตั้งไม่เกิน 3 ตารางเมตร พร้อมทั้งมีการออกแบบและขึ้นรูปขนาดของชิ้นส่วนให้มีความเหมาะสมตามขนาดสัดส่วนและสรีระของกลุ่มเป้าหมาย
11	ความสะดวกในการใช้งาน	- ผลิตภัณฑ์มีขนาดใหญ่ที่สามารถใช้งานได้สะดวกและไม่เกิดความรู้สึกติดขัด
12	สีสันทนของผลิตภัณฑ์	- ผลิตภัณฑ์มีสีธรรมชาติตามลักษณะของวัสดุชิ้นส่วนที่ประกอบด้วยไม้ไผ่เป็นหลัก
13	คุณภาพของสีเคลือบ	- การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ใช้สีเคลือบที่มีคุณภาพ เพื่อเพิ่มความคงทนของสีเคลือบและไม่หลุดลอกภายใน 2-3 ปี
14	อายุการใช้งาน	- ผลิตภัณฑ์มีอายุการใช้งานไม่น้อยกว่า 5 ปี เนื่องจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์มีการเข้ามูมไม้ไผ่แบบขัดกลอน และมีการจับยึดโดยใช้ไม้แข็งที่มีมาตรฐาน พร้อมทั้งมีการใช้วัสดุเคลือบผิวที่มีคุณภาพ
15	การเคลื่อนย้าย	- ผลิตภัณฑ์มีการออกแบบให้มีน้ำหนักที่เหมาะสมเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย
16	น้ำหนักของวัสดุและชิ้นส่วน	- เลือกใช้วัสดุและชิ้นส่วนที่มีน้ำหนักเหมาะสม เพื่อความเหมาะสมของการใช้งานและการเคลื่อนย้าย
คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ของผลลัพธ์สำหรับผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ได้จากการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคั่นเข		
17	ความยาวของผลิตภัณฑ์	- ความยาวของผลิตภัณฑ์ มีลักษณะความยาวแบบพอดีที่ให้ความรู้สึกถึงความแข็งแรง
18	การรับน้ำหนักของผลิตภัณฑ์	- ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างที่สามารถรับน้ำหนักได้มากและสามารถสื่อถึงความรู้สึกแข็งแรงได้ เนื่องจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์มีการเข้ามูมไม้ไผ่แบบขัดกลอน และมีการจับยึดโดยใช้ไม้แข็งที่มีมาตรฐาน

ตารางที่ 5 ข้อกำหนดในการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่ เรียงตามประเภทผลการวิเคราะห์ (ต่อ)

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์	รายละเอียด
คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ของผลลัพธ์สำหรับผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ได้จากการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซ		
19	ลักษณะของผลิตภัณฑ์	- ผลิตภัณฑ์มีลักษณะแบบพับที่สามารถสื่อถึงความแข็งแรง สวยงาม และสร้างสรรค์ได้ โดยเฉพาะในส่วนของพนักพิงหลัง
20	ความสูงของผลิตภัณฑ์	- ผลิตภัณฑ์มีลักษณะความสูงแบบพอดีมีเอกลักษณ์ ไม่สูงจนเกินไป
21	วัสดุรองนั่ง	- ผลิตภัณฑ์มีการเลือกใช้ผ้ามาเป็นวัสดุรองนั่งเป็นหลัก เพื่อผู้ใช้งานเกิดความรู้สึก สะดวกสบายในขณะที่ใช้งาน

จากนั้นได้อำหนดเชิงเทคนิคและเชิงคุณลักษณะ 21 ข้อข้างต้นให้กับทีมออกแบบดำเนินการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ซึ่งในการออกแบบครั้งนี้ ทีมออกแบบได้กำหนดค่าแสดงความรู้สึกหรือคำคันเซ จำนวน 3 คำ คือ เรียบง่าย สร้างสรรค์ และสวยงาม เนื่องจากทีมออกแบบมองว่าเป็นค่า

แสดงความรู้สึกที่สื่อถึงแบบผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่ พร้อมทั้งนำแรงบันดาลใจต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมาออกแบบร่วมกัน เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ตรงตามความต้องการของลูกค้า จากนั้นส่งแบบผลิตภัณฑ์ให้กับกลุ่มผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ ได้ทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบพร้อมตกแต่ง แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่

4.2.6 ผลการประเมินความพึงพอใจ

พบว่า กลุ่มร้านค้าตัวแทนจำหน่าย ลูกค้านักท่องเที่ยว กลุ่มผู้ใช้ผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ และกลุ่มผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ ตำบลน้ำน้อย อำเภอหาดใหญ่ จังหวัด สงขลา มีความ พึงพอใจในคุณลักษณะด้านรูปทรงที่มีความหลากหลายและมีจุดเด่นมากที่สุดเป็นอันดับแรก โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.71 ในส่วนระดับความพึงพอใจในประเด็น รองลงมาคือ คุณลักษณะด้านใช้วัสดุจากธรรมชาติและเป็น

มิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับ ดีมากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.68

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment: QFD) ร่วมกับ วิศวกรรมคันเซ (Kansei Engineering: KE) สำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่ เพื่อเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ลดข้อร้องเรียนจากลูกค้า และสร้าง

ความพึงพอใจของลูกค้า งานวิจัยนี้ได้แปลงความต้องการของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์เข้าสู่เมทริกซ์ของเทคนิค QFD 2 เมทริกซ์ คือ เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ และเมทริกซ์การแปลงการออกแบบ พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปแบบ วัสดุ ความสะดวก คุณภาพ และการตลาด โดยเฉพาะในด้านของรูปทรงที่มีความหลากหลายและมีจุดเด่นที่สามารถสร้างความพึงพอใจมากที่สุดเป็นอันดับแรก ซึ่งผลความพึงพอใจมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sinthavalai and Ruengrong [12] คือ โดยทั่วไปการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ พบว่า ประเด็นด้านความสวยงาม มีจุดเด่น และทันสมัยของผลิตภัณฑ์จะมีผลต่อความพึงพอใจของลูกค้าเป็นอันดับแรก

เนื่องจากเทคนิค QFD เป็นการมุ่งเน้นการแปลงความต้องการของลูกค้าเพื่อสร้างข้อกำหนดในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงเทคนิค โดยไม่ได้รวมอารมณ์ และความรู้สึกของลูกค้าเข้าไปในกระบวนการวิเคราะห์ ดังนั้นนำเทคนิควิศวกรรมคันเซมารวมในการวิเคราะห์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงอารมณ์ ความรู้สึกของลูกค้า ผลการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันเซ พบว่า คำแสดงความรู้สึกที่ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาจากไม้ไผ่ ประกอบด้วย 3 คำหลัก ๆ คือ เรียบง่าย สร้างสรรค์ และสวยงาม สุดท้ายจากการวิจัยครั้งนี้ พบว่า ลูกค้ามีความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านรูปทรงหลากหลายและมีจุดเด่นมากที่สุดเป็นอันดับแรกโดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.71 และมีความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านใช้วัสดุจากธรรมชาติและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอันดับสอง โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.68

ข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้พบว่า ผลการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ประเภทอื่น ๆ ที่ผู้ประกอบการต้องการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ตอบโจทย์ความต้องการของลูกค้าได้ แต่เนื่องจากยุคสมัยความต้องการของลูกค้าที่เปลี่ยนไป ดังนั้นผู้ประกอบการสามารถทำซ้ำวิธีการได้เพียงในบางส่วนเท่านั้น ไม่ว่าจะเป็นส่วนของการสอบถาม สํารวจความต้องการ และข้อร้องเรียนของลูกค้า เพื่อระบุเป็นเสียงเรียกร้องของลูกค้า แต่

ในส่วนของการวิเคราะห์ และการระดมสมองกับผู้เชี่ยวชาญหลากหลายด้านจำเป็นต้องให้คณะผู้วิจัยมาร่วมเป็นที่ปรึกษา เพื่อสร้างความมั่นใจในการประมวลผลและการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างถูกต้องเหมาะสม

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปี 2563 ขอขอบคุณผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่กรณีศึกษา ตลอดจนผู้เชี่ยวชาญที่มอบแบบทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนดำเนินงานสำเร็จลุล่วง และขอบคุณกลุ่มลูกค้าที่ให้ความร่วมมือในการตอบแบบสอบถาม และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Pinta and A. Kengpol, "The Improvement of Product by Using Quality Function Deployment (QFD) Technique: A Case Study of an Educational Wood Toy Factory," *The Journal of KMITNB*, vol. 13, no. 4, pp. 36–42, 2003 (in Thai).
- [2] C. Sritong and O. Sritong, "Product Development Using Quality Function Deployment (QFD) in Furniture Industry: A Case Study of Office Chair Design," *Valaya Alongkorn Review (Humanities and Social Science)*, vol. 6, no. 2, pp. 111–124, 2016 (in Thai).
- [3] R. Sinthavalai, P. Boonchu, and S. Polmai, "An Application of House of Quality (HOQ) in Improving a Package of Medical Equipment," *The Journal of KMUTNB*, vol. 26, no. 3, pp. 437–450, 2016, doi: 10.14416/j.kmutnb.2015.11.001. (in Thai)
- [4] S. Achmad, and I. Taufiq, "Design of Innovative Alarm Clock Made from Bamboo with Kansei Engineering Approach," *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol.3, pp. 184–188, 2015, doi: 10.1016/j.aaspro.2015.01.036.

- [5] K. Prayoonwong, "Application of Kansei Engineering for New Product Development: Conceptual Wardrobe Product Design," M.E. Thesis, Dept. Ind. Eng., King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand, 2012.
- [6] B. G. Dale, "Quality Function Deployment," in *Managing Quality*, 4th ed. Oxford: UK: Blackwell Publishers, 1999, ch. 17, sec. 3, pp.349–366.
- [7] C. Sritong and O. Sritong, "The Application of Quality Function Deployment to Purpose Supplementary Approaches for Providing Services of Small Clinics in Bangkok and Perimeter Area for Business Survival," *Journal of Business, Economics and Communications*, vol.17, no.1, pp.43–55, 2022.
- [8] S. Trongpanich and A. Kengpol, "The Improvement of Quality in the Service of Logistics Business by Using Quality Function Deployment and Analytic Hierarchy Process Techniques: A Case Study of Battery Logistics," *The Journal of KMITNB*, vol. 17, no. 3, pp. 47–56, 2007.
- [9] O. Adiyanto, H. A. Jatmiko, Erni, "Development Of Food Packaging Design With Kansei Engineering Approach," *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol.8, no.12, pp.1771–1780, 2019.
- [10] M. Nagamachi, "Kansei Engineering as a Powerful Consumer-oriented Technology for Product Development," *Applied Ergonomics*, vol. 33, no. 3, pp. 289–294, 2002, doi: 10.1016/S0003-6870(02)00019-4.
- [11] S. Schutte, "Designing Feelings into Products: Integrating Kansei Engineering Methodology in Product Development," Ph.D. Thesis, Dept. Mgmt. Eng., Linköping university; Linköping, Sweden, 2002.
- [12] R. Sinthavalai, and S. Ruengrong, "An Application of House of Quality (HOQ) for Designing Rice Product as a Souvenir," *Naresuan University Journal: Science and Technology*, vol. 26, no. 3, pp. 36–51, 2018. (in Thai)
- [13] N. O. Erdil and O. M. Arani, "Quality Function Deployment: More than a Design Tool," *International Journal of Quality and Service Sciences*, vol. 11, no. 2, pp. 142–166, doi: 10.1108/IJQSS-02-2018-0008.
- [14] L. K. Chan, and M. L. Wu, "Quality Function Deployment: A Comprehensive Review of its Concepts and Methods," *Quality Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 23–35, 2002, doi: 10.1081/QEN-120006708.
- [15] T. Pirom, S. Rawangwong, A. Thongkamkaew, and C. Hutye, "Design and Developed Product the Kindergarten Classroom Furniture with Rubber Wood Using Quality Function Development," *The Journal of Industrial Technology*, vol.15, no. 3, pp. 76–92, 2019. (in Thai)
- [16] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, and K. Pochana, "Application of a Quality Function Deployment Technique to Design and Develop Furniture Products," *Songklanakarin Journal of Science. Technology*, vol. 34, no. 6, pp. 663–668, 2012.

อัตราการเข้าสู่ของสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมที่แบ่งตามโหนดสำหรับการ วิเคราะห์คานเชลลูลาร์ในสองมิติ

Convergence Rate of N-sided Polygonal Node-based Strain Smoothed Finite Element for 2D Castellated Beam Analysis

สุธี ปิยะพิพัฒน์, บุญชัย ผึ้งไผ่งาม, กษาทพล ปิ่นพัฒนพล และ กำธรเกียรติ มุสิกเกตุ*

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คลองหก คลองหลวง
ปทุมธานี 12110

Suthee Piyaphipat, Boonchai Phungpaingam, Khathapol Pinpatthanapong and Kamtornkiat Musiket*

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thunyaburi,
Klong Hok, Khlong Luang, Pathumthani, 12110, Thailand

*Corresponding Author E-mail: kamtornkiat@rmutt.ac.th

Received: Nov 11, 2021; Revised: Mar 27, 2022; Accepted: Jun 02, 2022

บทคัดย่อ

สมูทไฟไนท์เอลิเมนต์ซึ่งแบ่งโดเมนย่อยออกเป็นเอลิเมนต์รอบโหนดของเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยมสำหรับปัญหาในสองมิติได้ถูกนำเสนอในครั้งนี้ เอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยมที่ได้จากสองรูปแบบคือ DistMesh และ PolyMesher จะถูกแบ่งออกเป็นรูปสี่ด้านเล็ก ๆ ที่เรียกว่าเซลหรือเอลิเมนต์สามเหลี่ยม รอบโหนดของเอลิเมนต์หลักหลายเหลี่ยม ปัญหาทดสอบที่ใช้คือคานเชลลูลาร์ที่มีรูเจาะจำนวนห้ารูเจาะตามความยาวของคานสำหรับเป็นตัวแทนโดเมนของปัญหาที่ไม่ต่อเนื่อง ปลายคานอิสระด้านไกลถูกกระทำด้วยแรงเฉือนในแนวดิ่ง ในขณะที่ปลายด้านตรงข้ามถูกกำหนดให้เป็นฐานรองรับแบบยึดแน่น ตรวจสอบการวิเคราะห์สามแบบที่รวมถึงแบบสถิตยศาสตร์ การสั่นแบบอิสระและการสั่นแบบชั่วขณะตามลำดับ เพื่อความสะดวกในการคำนวณ จะสมมุติให้เมทริกซ์มวลเป็นแบบรวมผลเพื่อหลีกเลี่ยงการอินทิเกรตเชิงตัวเลขของฟังก์ชันรูปร่างการประมาณภายในด้วยความสามารถที่รอบด้าน มีเสถียรภาพและประสิทธิภาพในการเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการอินทิเกรตตามเวลา การศึกษาครั้งนี้ จะใช้วิธีของนิวมาร์ค การวิเคราะห์แบบสถิตยศาสตร์นั้น PolyMesher ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีกว่า DistMesh อย่างมีนัยสำคัญทั้งในเรื่องความแม่นยำของผลลัพธ์และอัตราการเข้าสู่หาผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรง ในทางตรงกันข้ามถึงแม้ว่าผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์แบบอิสระและแบบแรงกระทำ จะแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกับค่าใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรง ประสิทธิภาพของ DistMesh ที่ดีกว่าเล็กน้อย สามารถสังเกตได้ในกรณีของการสั่นแบบอิสระ มีข้อสังเกตว่า ความแตกต่างของคำตอบระหว่างการสร้างเอลิเมนต์หลายเหลี่ยมจากทั้งสองกรณีมีค่าน้อยมากจนสามารถละเลยได้แต่ไม่ใช้กับกรณีของสถิตยศาสตร์

คำสำคัญ: เอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยม, สมูทไฟไนท์เอลิเมนต์แบบเอลิเมนต์ย่อยตามโหนด, การสั่นแบบอิสระและแรงกระทำ, คานเชลลูลาร์

Abstract

N-Sided polytype smoothed finite element based on polygonal-node for two-dimensional problem is presented. Polygonal elements obtained from different algorithms namely DistMesh and PolyMesher will be further divided into small quadrilateral shape, referred as smoothing cells or elements, around the corresponding polygonal nodes. Benchmark problem was a castellated beam punched with five holes along its longitudinal axis representing discontinuous problem domain. Its far free edge is subjected to vertical shear traction while the opposite ended is designed as fixed support. Three analyses were investigated including static, free vibration, and transient vibration, respectively. For sake of simplicity, a lumped mass matrix is assumed to avoid numerical integration for shape functions. Due to its versatile yet stability and powerful time integration tool, an implicit Newmark-Beta method is employed. For static analysis, PolyMesher has shown better performance significantly for both accuracy and convergence rate to close-to-exact solution than DistMesh. Contradictory, although the results from free and forced dynamic analyses have shown in good agreement with close-to-exact solutions, a slightly better performance on DistMesh can be observed for free vibration. It is worth noting that the differences of results between both polygonal element creation are very small and negligible but not applicable for static case.

Keywords: N-Sided Polygonal element; Node-based strain smoothed finite element; free and forced vibrations; castellated beam

1 บทนำ

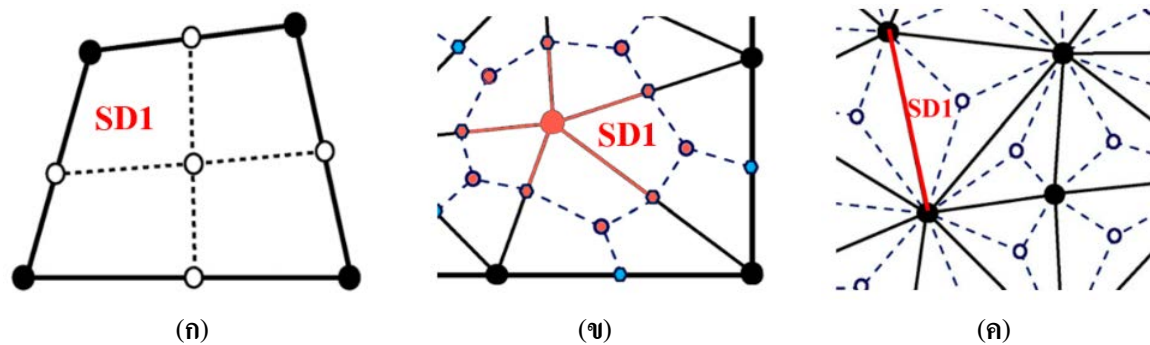
ตั้งแต่วันที่คอมพิวเตอร์มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว สามารถคำนวณปัญหาต่าง ๆ ที่มีความซับซ้อนได้อย่างรวดเร็วรวมทั้งให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูง วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Methods) ซึ่งจัดว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพไม่น้อยไปกว่าวิธีการวิเคราะห์ (Analytical Methods) วิธีหนึ่ง ที่เข้ามามีบทบาทมากยิ่งขึ้นเมื่อต้องจัดการกับปัญหาที่มีความซับซ้อนหรือไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรงจากการวิเคราะห์ได้โดยตรง

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพสูงสำหรับการแก้ปัญหาทั้งแบบสถิตยศาสตร์และพลศาสตร์ (Static and Dynamics) แบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น (Linear and Nonlinear) ของปัญหาของแข็ง ของไหล สนามแม่เหล็กไฟฟ้า วัสดุชีวภาพ และอื่น ๆ ได้อย่างหลากหลาย [1–3] อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยของมันในหลายๆ ด้าน [4] ก็กระตุ้นให้เกิดการคิดค้นวิธีใหม่ ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการคำนวณเชิงตัวเลขให้ดียิ่งขึ้น

วิธีสมูทไฟไนต์เอลิเมนต์ (Smoothed Finite Element; SFEM) [4] เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อเอาชนะข้อด้อยของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในอดีต วิธีดังกล่าวสามารถแบ่งย่อยออกได้ตามลักษณะของการสร้างเอลิ

เมนต์ย่อยต่อเนื่องสม่ำเสมอ (Smoothing Elements) ของเอลิเมนต์หลัก (Main Elements) ที่สามารถเป็นรูปสามเหลี่ยม (Triangular Element) สี่เหลี่ยม (Quadrilateral Element) หรือรูปหลายเหลี่ยมใด ๆ (An Arbitrary n-Sided Polygonal Element) จากการแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นส่วนเล็กๆ (Discretization) กล่าวคือ หากมีการสร้างเอลิเมนต์ย่อยต่อเนื่องสม่ำเสมอภายในเอลิเมนต์หลักดังกล่าว จะเรียกว่า Element-based SFEM หากมีการสร้างเอลิเมนต์ย่อยต่อเนื่องสม่ำเสมอรอบโหนดของเอลิเมนต์หลักเรียกว่า Node-based SFEM และหากมีการสร้างเอลิเมนต์ย่อยดังกล่าวรอบขอบของเอลิเมนต์หลักแล้ว เรียกว่า Edge-based SFEM (สำหรับปัญหาใน 2 มิติ) [5] หลักการสร้างเอลิเมนต์ย่อยต่อเนื่องสม่ำเสมอดังกล่าว ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1(ก)–(ค) ตามลำดับ (SD หมายถึง โดเมน/เอลิเมนต์สม่ำเสมอ)

วิธีสมูทไฟไนต์เอลิเมนต์แบบต่าง ๆ ได้ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมทั้ง 2 และ 3 มิติ อย่างแพร่หลาย วิเชียร และคณะ [6] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนความยาวด้านทั้งสองแกนต่อประสิทธิภาพของสมูทไฟไนต์เอลิเมนต์แบบแบ่งเอลิเมนต์ย่อยรูปสี่เหลี่ยมจำนวน 4 เอลิเมนต์ภายในเอลิเมนต์หลักรูปสี่เหลี่ยม ผลการศึกษาพบว่า



รูปที่ 1 การสร้างเอลิเมนต์ย่อย (ก) ภายใน (ข) ตามโหนด และ (ค) ตามด้านของเอลิเมนต์หลักใน 2 มิติ

ความแม่นยำในการคำนวณขึ้นอยู่กับอัตราส่วนดังกล่าวร่วมกับจำนวนของเอลิเมนต์หลักที่เพิ่มขึ้น วิธีสมูทไฟไนต์เอลิเมนต์ ยังได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาอย่างหลากหลาย ได้แก่ ปัญหาการถ่ายเทความร้อน [7] ปัญหาการวิเคราะห์อีลาสโตพลาสติก [8] ปัญหาการวิเคราะห์ด้านพลศาสตร์ [9] เป็นต้น ผลการศึกษาเหล่านั้น แสดงให้เห็นความได้เปรียบของวิธีสมูทไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เหนือกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นอกจากนี้ เสถียรภาพของการวิเคราะห์สมูทไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสร้างเอลิเมนต์ย่อยตามโหนดนั้น พบว่าเป็นแบบ Spatially Stable เนื่องมาจากการที่จำนวนของโดเมนหรือเอลิเมนต์ย่อยสม่ำเสมอที่ถูกสร้างขึ้นตามโหนดของเอลิเมนต์หลักนั้น มากกว่าข้อกำหนดจำนวนของโดเมนย่อยสม่ำเสมอที่น้อยที่สุดที่ต้องการสำหรับวิธีสมูทไฟไนต์เอลิเมนต์เสมอ จึงทำให้สามารถผ่านการทดสอบ Patch Test สำหรับความมีเสถียรภาพของการวิเคราะห์เชิงตัวเลข [4]

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยในครั้งนี้ มุ่งไปที่การเปรียบเทียบอัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Convergent Rate) ของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิตยศาสตร์ การหาค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies) หักล้างดับแรก สำหรับการสั่นสะเทือนแบบอิสระ รวมทั้งการวิเคราะห์แบบแรงกระทำชั่วขณะ (Transient Analysis) ตามลำดับ โดยทำการแบ่งโดเมนของปัญหาในระนาบสองมิติที่สนใจออกเป็นเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยมที่มีจำนวนด้านมากกว่าหรือเท่า

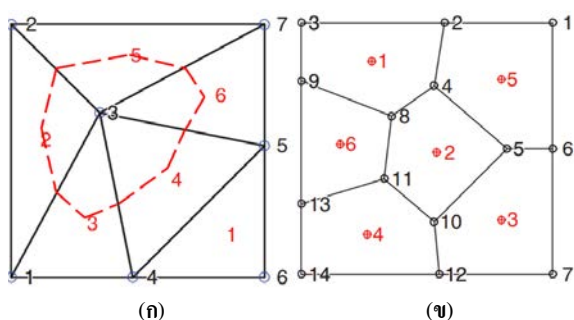
กับสี่ด้าน (N-Sided Polygonal Element) ด้วยอัลกอริทึมที่แตกต่างกันสองแบบคือ DistMesh [10] และ PolyMesher [11] แล้วจึงทำการสร้างเอลิเมนต์ย่อยต่อเนื่องสม่ำเสมอ (Smoothing Elements) ด้วยเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Quadrilateral Element) รอบโหนดของแต่ละเอลิเมนต์หลักทั้งหมด ปัญหาตัวอย่างที่ใช้คือคานเชลลูลาร์ (Castellated Beam) ที่มีรูเจาะวงกลมซึ่งเป็นปัญหาแบบไม่มีความต่อเนื่องภายในโดเมน (Discontinuous Domain) เนื่องจากไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solutions) ของคานตัวอย่างได้ ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีสมูทไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าว จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งใช้จำนวนของโครงตาข่ายขนาดเล็กแบบ (Quadrilateral element; Q4) เพื่อเป็นตัวแทนของผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรง (Close-to-Exact Solution)

บทความนี้มีรายละเอียดเนื้อหาดังต่อไปนี้ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย กล่าวถึงในส่วนที่ 1 หลักการพื้นฐานของวิธีสมูทไฟไนต์เอลิเมนต์แบบหลายเหลี่ยมที่มีการสร้างเอลิเมนต์ย่อยต่อเนื่องสม่ำเสมอรอบโหนดของเอลิเมนต์หลัก การสร้างสนามความเครียดต่อเนื่องสม่ำเสมอภายในเอลิเมนต์หลัก การอินทิเกรตเชิงตัวเลขของเวลารวมทั้งเมทริกซ์รวมแบบรวมผล ถูกกล่าวถึงในส่วนที่ 2 วิธีการวิจัย รายละเอียดและขอบเขตของปัญหาตัวอย่างที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ในครั้งนี้ จะถูกกล่าวถึงในส่วนที่ 3 ตามด้วยผลของการศึกษาและบทสรุปในส่วนที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

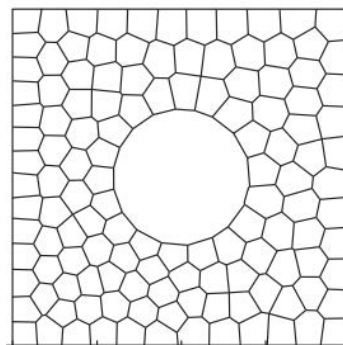
2 สมูทไฟไนท์เอลิเมนต์หลายเหลี่ยมแบบแบ่งโดเมน ย่อยตามโหนดของเอลิเมนต์หลัก (N-sided Polygonal Node-based Strain Smoothed Finite Element)

2.1 การสร้างเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยม (n-Sided Polygonal element creations)

การแบ่งโดเมนของปัญหาใน 2 มิติที่สนใจออกเป็น
ส่วนหรือเอลิเมนต์ย่อยนั้นนิยมสร้างโครงตาข่ายโดย
อาศัยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ที่ใช้งานแพร่หลาย
ทั่วไปหรือจากโปรแกรมที่ถูกสร้างขึ้นมา (In-house
Code) สำหรับการสร้างโครงตาข่ายโดยเฉพาะ เช่น
DistMesh [10], PolyMesher [11], PolyTop [12],
OpenMesh [13] หรือโปรแกรมอื่น ๆ การแบ่งโดเมนของ
ปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยมในครั้งนี้ จะ
พิจารณาอัลกอริทึมของการสร้างเอลิเมนต์หลักหลาย
เหลี่ยมจาก DistMesh และ PolyMesher ความแตกต่างที่
สำคัญของเอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมหลักภายในขอบเขต
ของปัญหาที่ได้คือ วิธีแรกนั้น ทำการสร้างเอลิเมนต์
สามเหลี่ยมภายในโดเมนของปัญหาก่อน จากนั้น จึงทำ
การกำหนดจุดกึ่งกลางด้านและจุดศูนย์กลางของ
สามเหลี่ยมแต่ละรูปก่อน แล้วจึงทำการลากเส้นเชื่อมต่อ
ระหว่างจุดต่าง ๆ เหล่านั้นดังรูปที่ 2(ก) ขั้นตอนสุดท้าย
เป็นการลบด้านและโหนดทั้งหมดที่อยู่ภายในโดเมนของ
ปัญหา จะได้เอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมต่อไปดังแสดงใน
รูปที่ 2(ข) [14] สำหรับวิธีที่สอง PolyMesher [11] นั้น จะ
เป็นการสร้างเอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมภายในโดเมนของ
ปัญหาโดยตรงดังตัวอย่างในรูปที่ 3



รูปที่ 2 (ก) จุดกึ่งกลางเอลิเมนต์สามเหลี่ยมภายในโดเมน
(ข) เอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยมที่ได้



รูปที่ 3 โดเมนของปัญหาที่ถูกสร้างโดย PolyMesher

2.2 การสร้างสนามความเครียดต่อเนื่องภายในเอลิเมนต์ หลัก (Smoothed strain field construction)

ส่วนที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างวิธีไฟไนท์เอลิ
เมนต์และสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์คือการสร้างสนาม
ความเครียด (Strain Field) สำหรับวิธีแรกนั้น สนาม
ความเครียดดังกล่าว จะถูกสร้างจากสนามความเครียดที่
เรียกว่าสนามความเครียดที่สอดคล้องกัน (Compatible Strain
Field) ในขณะที่วิธีหลัง จะสร้างจากสนามความเครียด
แบบต่อเนื่องสม่ำเสมอ (Smoothed Strain Field) โดยอาศัย
เทคนิคการทำให้เกิดความต่อเนื่องสม่ำเสมอ (Smoothing
Techniques) เทคนิคดังกล่าวที่ง่ายที่สุดคือ Strain/gradient
Smoothing Technique โดยมีสมมุติฐานคือ ความเครียดภายใน
เอลิเมนต์ย่อยที่มีความต่อเนื่องสม่ำเสมอจะถูกระบุค่า
มาจากสนามความเครียดที่สอดคล้องกัน (Compatible Strain
Field) หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของการเปลี่ยนตำแหน่ง
(Displacement Gradient) ในกรณีที่ไม่สามารถหาค่าสนาม
ความเครียดได้โดยตรงและกำหนดให้มีค่าคงที่ภายในเอลิ
เมนต์ย่อยนั้น หัวใจสำคัญอยู่ที่การเลือกใช้ฟังก์ชันต่อเนื่อง
สม่ำเสมอที่เหมาะสมโดยฟังก์ชันที่เลือกใช้นี้ จะต้องมี
คุณสมบัติดังต่อไปนี้ ได้แก่ 1) ต้องมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ณ
ตำแหน่งที่สนใจ (Locally supported) 2) ต้องมีเครื่องหมาย
เป็นบวกตลอดทั้งโดเมนที่รองรับ 3) ต้องมีศูนย์กลางอยู่ ณ
จุดที่กำลังพิจารณาและ 4) ต้องมีคุณสมบัติของการรวมกัน
เท่ากับหนึ่ง (Unity Property) [4]

สำหรับในกรณีที่สนามความเครียดที่สอดคล้องกัน
สามารถหาค่าได้อย่างง่ายนั้น สนามความเครียดต่อเนื่อง
สม่ำเสมอจะสามารถคำนวณได้ว่า เป็นค่าเฉลี่ยของสนาม
ความเครียดที่สอดคล้องกันตลอดทั่วทั้งพื้นที่ของเอลิเมนต์

ข้อต่อเนื่องสม่ำเสมอเหล่านั้นนั่นเอง ค่าสนามความเครียดที่ได้นี้ มีค่าคงที่ แต่ในกรณีทั่วไป ซึ่งสนามความเครียดที่สอดคล้องกันนั้น ไม่สามารถคำนวณค่าได้อย่างง่ายนั้น จะใช้สนามของการเปลี่ยนตำแหน่ง (Displacement Field) แทน จากสมมุติฐานที่ว่าสนามการเปลี่ยนตำแหน่งในวิธีสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์นั้น จะต้องมีความต่อเนื่องบนขอบเขต Γ_k^s ของเอลิเมนต์ย่อยสม่ำเสมอและฟังก์ชันต่อเนื่องที่กำหนด จะต้องสามารถทำอินทิเกรตตลอดทั่วทั้งโดเมนของเอลิเมนต์ย่อยต่อเนื่องสม่ำเสมอ Ω_k^s ได้ เมื่อใช้การอินทิเกรตทีละส่วน (Integration by Parts) หรือทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์ของกรีน (Green's Divergence Theory) สมการสนามความเครียดต่อเนื่องสม่ำเสมอสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (1) [5]

$$\bar{\varepsilon}(x) = \frac{1}{A_k^s} \int_{\Gamma_k^s} L_n(x) \bar{u}(x) d\Gamma \quad (1)$$

โดย $L_n(x)$ คือเมทริกซ์ที่มีองค์ประกอบเป็นเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วยกับด้านของเอลิเมนต์ย่อยต่อเนื่องสม่ำเสมอ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$L_n(x) = \begin{bmatrix} n_x & 0 & n_y \\ 0 & n_y & n_x \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

เมื่อสามารถคำนวณค่าของสนามความเครียดต่อเนื่องสม่ำเสมอได้แล้ว ขั้นตอนอื่น ๆ ต่อจากนี้ไปได้แก่ ขั้นตอนการหาเมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนตำแหน่ง (Strain-Displacement Matrix) การสร้างสมการสติฟเนสและแรงในระดับเอลิเมนต์ (Element Stiffness Matrix and Force Vector) การรวมกันของสติฟเนสและแรงของทุกเอลิเมนต์ (Assembly of Stiffness Matrix and Force Vector) รวมทั้งการแก้ระบบสมการเชิงเส้น (Linear Equation Solving) เพื่อหาค่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่ไม่ทราบค่าจะเหมือนกันกับในวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ทุกประการ จึงทำให้สามารถนำวิธีสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์ไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไปได้ในทันที โดยทำการเปลี่ยนแปลงโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพียงเล็กน้อย สมการเมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนตำแหน่งหรือที่เรียกกันทั่วไปว่า B-Matrix นั้น สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3)–(4) คือ

$$\bar{B}(x) = \frac{1}{A_k^s} \int_{\Gamma_k^s} L_n(x) N(x) d\Gamma = \begin{bmatrix} \bar{b}_{Ix} & 0 \\ 0 & \bar{b}_{Iy} \\ \bar{b}_{Iy} & \bar{b}_{Ix} \end{bmatrix} \quad (3)$$

เมื่อ

$$\bar{b}_{IJ} = \frac{1}{A_k^s} \sum_{n=1}^{n_k^s} n_{j,n} N_I(X_n^G) L_n, J = x, y \quad (4)$$

และ n_k^s คือจำนวนด้านทั้งหมดของเอลิเมนต์ย่อยที่อยู่ในเอลิเมนต์หลักหรือโดเมนต่อเนื่องสม่ำเสมอ X_n^G คือตำแหน่งของจุดของเกาส์ (Gauss Point) สำหรับการอินทิเกรตเชิงตัวเลข ในกรณีของสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์นี้ ตำแหน่งดังกล่าวจะอยู่ ณ กึ่งกลางด้านของเอลิเมนต์ย่อยซึ่งมีความยาวด้านและเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วยกับด้านนั้น ๆ เป็น L_n และ $n_{j,n}$ ตามลำดับ

2.3 การอินทิเกรตเชิงตัวเลขตามเวลา (Time Integration)

สมการของสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์หรือสมการไฟไนท์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาด้านพลศาสตร์ในระนาบ 2 มิติ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่ (5)

$$\bar{K}d + \bar{C}\dot{d} + \bar{M}\ddot{d} = \bar{F} \quad (5)$$

โดย $\bar{M}, \bar{C}$ หมายถึง เมทริกซ์มวล (Mass Matrix) และเมทริกซ์ของการต้านทานแรงสั่นสะเทือน (Damping Matrix) ตามลำดับ เครื่องหมายจุดด้านบนตัวแปรหมายถึงลำดับของอนุพันธ์เทียบกับเวลา วิธีการอินทิเกรตตามเวลาที่ใช้สำหรับการแก้สมการอนุพันธ์ลำดับสองสมการที่ (5) มีอยู่หลายวิธีเช่น วิธี Crank-Nicholson หรือ Newmark Method [15] เนื่องจากความสามารถและความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีหลังจึงได้รับความนิยมสูงและถูกนำไปใช้ในโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์สำเร็จรูปมากมาย ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้ จึงใช้การอินทิเกรตตามเวลาของ Newmark ในการหาค่าการเปลี่ยนตำแหน่งในสมการที่ (5)

สมมุติให้เวลาปัจจุบันของการวิเคราะห์เป็น t_0 และทราบค่าของตัวแปรทั้งหมด ณ เวลาดังกล่าวแล้ว การหาค่าตัวแปรเหล่านั้น ณ เวลาถัดไป $t_1 = t_1 + \Delta t$ โดย θ มีค่าอยู่ระหว่าง $0.5 \leq \theta \leq 1.0$ สามารถแสดงดังสมการที่ (6)–(8) ได้คือ

$$[\bar{M} + \beta(\Delta t)^2 K]d_{i+1} = \beta(\Delta t)^2 F_{i+1} + \bar{M}d_i + (\Delta t)\bar{M}\dot{d}_i + (\Delta t)^2 \bar{M}(0.5 - \beta)\ddot{d}_i \quad (6)$$

$$\dot{d}_{i+1} = \dot{d}_i + (\Delta t)[(1 - \gamma)\ddot{d}_i + \gamma\ddot{d}_{i+1}] \quad (7)$$

$$d_{i+1} = d_i + (\Delta t)\dot{d}_i + (\Delta t)^2[(0.5 - \beta)\ddot{d}_i + \beta\ddot{d}_{i+1}] \quad (8)$$

โดยค่าของ β และ γ คือค่าคงที่ โดยทั่วไปนิยมกำหนดให้ มีค่าเท่ากับ 0.25 และ 0.5 ตามลำดับเพื่อให้การวิเคราะห์เชิง ตัวเลขมีเสถียรภาพ [16]

เพื่อความสะดวกสำหรับการวิเคราะห์ครั้งนี้ กำหนดให้ ไม่รวมแรงต้านทานของการสั่นสะเทือนเข้าไว้ใน การคำนวณ เพราะฉะนั้น สำหรับการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติ สมการที่ (5) จะลดรูปลงเป็นสมการอนุพันธ์แบบเอกพันธ์ (Homogeneous Differential Equation) ดังสมการที่ (9)

$$\bar{K}d + \bar{M}\ddot{d} = 0 \quad (9)$$

2.4 เมทริกซ์มวลแบบรวมผล (Lumped Mass Matrix)

เพื่อหลีกเลี่ยงการอินทิเกรตฟังก์ชันรูปร่างการประมาณ ภายใน (Shape Functions) เพื่อหาค่าเมทริกซ์มวลที่เรียกว่า Consistent Mass matrix นั้น สามารถทำได้ด้วยการหาเมทริกซ์มวลแบบรวมผลแทน โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์นั้น มีความแม่นยำที่มากกว่าการใช้เมทริกซ์มวลแบบ Consistent Mass matrix สำหรับปัญหาด้านพลศาสตร์ [17] สำหรับเอลิเมนต์ย่อยต่อเนื่องสม่ำเสมอรูปสี่เหลี่ยมรอบ โหนดของเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยมนั้น เมทริกซ์ ดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการที่ (10) ได้ดังนี้

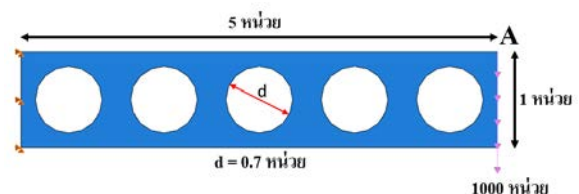
$$[\bar{K} - \omega^2 \bar{M}]d = 0 \quad (10)$$

เมื่อ $\rho, t, A, I_{8 \times 8}$ คือความหนาแน่นมวลของเอลิเมนต์ ความหนาของเอลิเมนต์ที่สนใจ พื้นที่ของเอลิเมนต์และเมทริกซ์อันดับขนาด 8×8 ตามลำดับ

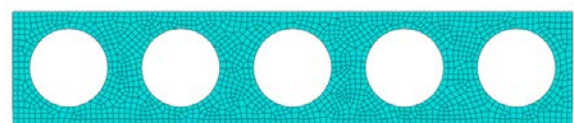
3 วิธีการและผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์คานเชลลูลาร์ (Castellated Beam) ที่มีรูเจาะเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.7 หน่วยจำนวนทั้ง

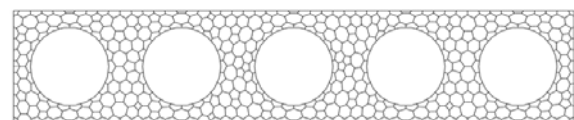
สิ้น 5 รูเจาะตามความยาวของคาน อัตราส่วนความยาวต่อ ความสูงของคานกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 5:1 เพื่อป้องกันการ เกิดพฤติกรรม Shear Locking ด้านซ้ายของคานเป็น ฐานรองรับแบบยึดแน่นในขณะที่ปลายคานอิสระด้านตรง ข้ามรับแรงเฉือนขนาด 1,000 หน่วย ดังแสดงในรูปที่ 4 ค่า โมดูลัสยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปึงของกำหนดให้มีค่า เท่ากับ $3E+07$ และ 0.28 ตามลำดับ เพื่อความสะดวกในการ วิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ขนาดต่าง ๆ ของคานถูกกำหนดให้ไม่มีหน่วย คานดังกล่าว ถูกแบ่ง ออกเป็นโครงตาข่ายแบบเอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมที่มีขนาด หยาบสุด (เอลิเมนต์ขนาดใหญ่) ถึงละเอียดสุด (เอลิเมนต์ ขนาดเล็ก) จำนวน 5 ช่วงโดยมีจำนวนโหนดของเอลิเมนต์ เท่ากับ 448, 542, 829, 1,525 และ 2,500 โหนดตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์แบบสถิติศาสตร์ ตัวอย่างของโครงตา ข่ายแบบรูปสี่เหลี่ยมสำหรับใช้เป็นค่าในการอ้างอิงซึ่ง คำนวณด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ แสดงไว้ในรูปที่ 5(ก) ในขณะที่ตัวอย่างโครงตาข่ายของเอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยม สำหรับการวิเคราะห์สมูทไฟไนท์เอลิเมนต์ แสดงไว้ในรูปที่ 5(ข) ตามลำดับ



รูปที่ 4 โมเดลของคานเชลลูลาร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 (ก) โครงตาข่ายรูปสี่เหลี่ยม (ข) โครงตาข่ายรูปหลายเหลี่ยม

3.1 การเปลี่ยนตำแหน่งของปลายคาน ณ จุด A (Tip Displacement at A)

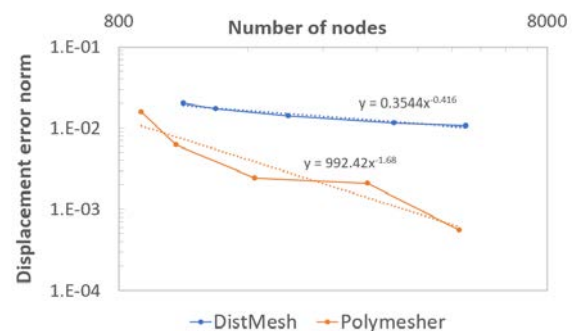
การวิเคราะห์ด้วยสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมแบบแบ่งโดเมนย่อยสม่ำเสมอตามจำนวนโหนดของเอลิเมนต์หลักในส่วนนี้ เป็นการหาการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวตั้งทางสถิติศาสตร์ของจุด A ตามรูปที่ 4 ด้วยโครงตาข่ายที่มีเอลิเมนต์ต่างกันจำนวน 5 ชุด ค่าผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงสำหรับการเปรียบเทียบผลนั้น ถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ ABAQUS [18]

ผลการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวตั้งของจุด A บนคานตัวอย่าง (รูปที่ 3) แสดงไว้ในตารางที่ 1 (ค่าในแถวสุดท้ายหมายถึงค่าผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำ) ผลจากการวิเคราะห์ด้วยสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์ดังกล่าว มีค่าเข้าใกล้ค่าสำหรับอ้างอิงเมื่อมีการเพิ่มจำนวนโครงตาข่ายให้ละเอียดมากขึ้นเช่นเดียวกับในวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง -0.027808 ถึง -0.0027545 สำหรับอัลกอริทึมแบบ DistMesh และ -0.00027686 ถึง -0.0027240 สำหรับอัลกอริทึมแบบ PolyMesher ตามลำดับ จากค่าดังกล่าว พบว่า คานตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ในครั้งนี ให้ค่า Upper bound ของการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ณ จุด A หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า คานเซลล์ดูลำมีพฤติกรรมที่เป็น Overly soft นั่นเอง

ค่ามาตรฐานความคลาดเคลื่อนของการเปลี่ยนตำแหน่ง (Displacement Error Norm) มีค่าลดลงตามจำนวนโหนดที่เพิ่มขึ้น โดยลดลงจาก 2.02 เป็น 1.06 และ 1.58 เป็น 0.05 เปอร์เซนต์ ตามลำดับสำหรับอัลกอริทึมที่ใช้ในการเปรียบเทียบทั้งสองแบบ เมื่อนำค่าดังกล่าวกับจำนวนโหนดมาวาดกราฟในแบบ log-log สเกล สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 จากรูปดังกล่าวพบว่า ความชันของกราฟ แสดงถึงอัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรงของการเปลี่ยนตำแหน่งนั่นเอง จากตัวอย่างการวิเคราะห์ในครั้งนี พบว่า PolyMesher มีค่าของการลู่เข้าหาผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรงมากกว่า DistMesh โดยมีค่าเท่ากับ 1.68 ในขณะที่อย่างหลังมีค่าเท่ากับ 0.416

ตารางที่ 1 ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวตั้ง ณ จุด A

อัลกอริทึม	จำนวน เอลิเมนต์	จำนวน โหนด	ค่าการ เปลี่ยน ตำแหน่ง	ค่ามาตรฐาน ความคลาด เคลื่อน
DistMesh	448	1,134	-0.0027808	0.0202896
PolyMesher	448	904	-0.0027686	0.0158393
DistMesh	542	1,347	-0.0027728	0.0173779
PolyMesher	542	1,091	-0.0027422	0.0061329
DistMesh	829	1,991	-0.0027643	0.0142366
PolyMesher	829	1,663	-0.0027320	0.0024179
DistMesh	1,525	3,518	-0.0027567	0.0014579
PolyMesher	1,525	3,047	-0.0027325	0.0021000
DistMesh	2,294	5,172	-0.0027545	0.0106713
PolyMesher	2,500	4,986	-0.0027240	0.0005478
ABAQUS	-	9,628	-0.0272513	0.0000000



รูปที่ 6 อัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรงของคานตัวอย่าง

3.2 ความถี่ธรรมชาติและรูปร่างของโหมด (Natural Frequencies and Mode Shapes)

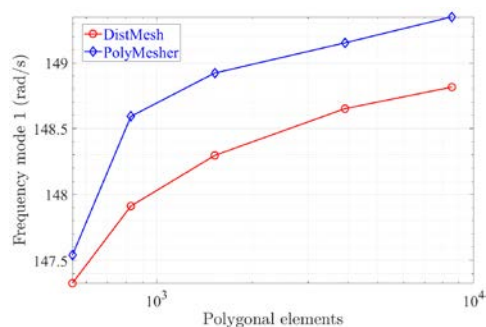
ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของคานตัวอย่างจำนวนหกลำดับแรกที่ได้ตามขนาดของโครงตาข่ายจากวิธีที่เสนอ เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 เช่นเดียวกับวิธีเชิงตัวเลขอื่น ๆ ค่าดังกล่าว มีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Error Norm) ที่ลดลงตามจำนวนของเอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับในกรณีของการเปลี่ยนตำแหน่งที่ปลายคานในหัวข้อที่ผ่านมา ความถี่ธรรมชาติลำดับแรก ๆ ซึ่งมีความสำคัญทางกายภาพมากกว่า

ความถี่ธรรมชาติลำดับอื่น ๆ นั้น มีค่าเท่ากับ 149.35 และ 148.8 รอบต่อวินาที เทียบกับค่าอ้างอิง

ตารางที่ 2 ความถี่ธรรมชาติ 6 ลำดับแรก

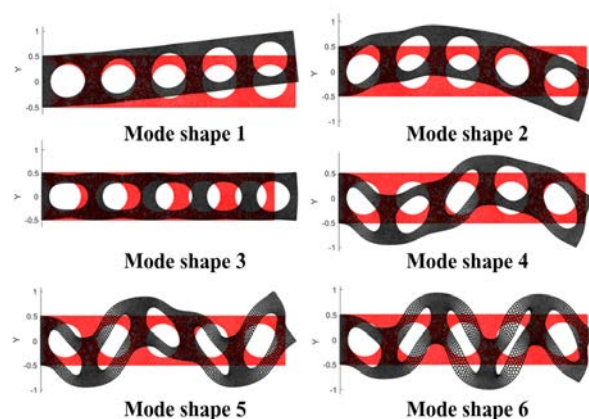
จำนวน โหนด	อัลกอริทึม	ความถี่ธรรมชาติ (รอบต่อวินาที)					
		โหมด					
		1	2	3	4	5	6
542	DistMesh	147.3	587.3	925.2	1,194.6	1,690.5	2,040.5
	PolyMesher	147.5	579.6	919.8	1,172.8	1,655.5	1,999.8
829	DistMesh	147.9	590.9	926.6	1,203.2	1,705.8	2,062.3
	PolyMesher	148.5	586.6	923.8	1,190.9	1,681.4	2,028.8
1525	DistMesh	148.2	593.6	928.6	1,210.7	1,718.6	2,078.4
	PolyMesher	148.9	591.8	926.7	1,203.8	1,704.2	2,059.2
3927	DistMesh	148.6	596.2	930.1	1,217.0	1,729.1	2,092.5
	PolyMesher	149.1	595.8	929.2	1,214.3	1,724.4	2,085.2
8543	DistMesh	148.8	597.1	930.6	1,219.4	1,733.1	2,095.6
	PolyMesher	149.3	597.4	930.3	1,218.8	1,731.4	2,095.2
Ref	ABAQUS	149.3	597.8	931.1	1,221.3	1,732.8	2,095.8

149.38 สำหรับลำดับที่หนึ่ง และ 597.4 และ 597.1 รอบต่อวินาทีเทียบกับค่าอ้างอิง 597.8 รอบต่อวินาทีสำหรับลำดับที่สองของอัลกอริทึมแบบ DistMesh และ PolyMesher ตามลำดับเป็นต้น อัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรงสำหรับความถี่ธรรมชาติลำดับแรกของทั้งสองอัลกอริทึมซึ่งแสดงในรูปที่ 7 นั้น ถึงแม้ว่าค่าที่ได้จาก DistMesh จะมีค่าเข้าใกล้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรงน้อยกว่า PolyMesher ก็ตาม อัตราการลู่เข้ากลับมีค่าที่ใกล้เคียงกันนั่นคือ 0.0034 และ 0.0037 ตามลำดับ



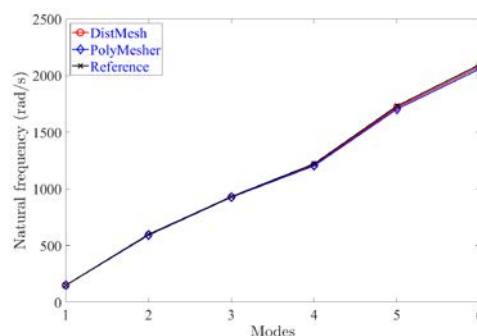
รูปที่ 7 อัตราการลู่เข้าของความถี่ธรรมชาติของโหมดแรก

รูปร่างโหมด (Mode Shapes) ซึ่งสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติหกลำดับแรกที่วิเคราะห์ได้จากวิธีที่เสนอสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8 จากรูป สังเกตเห็นว่า การเปลี่ยนรูปร่างโหมดทั้ง 6 ลำดับแรกดังกล่าวมีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนรูปร่างที่เกิดขึ้นจริงทางกายภาพ



รูปที่ 8 รูปร่างโหมดที่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติ 6 ลำดับแรก

ไม่มีปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Spurious Zero-Energy Modes [17],[18] ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดของการคำนวณเชิงตัวเลขและส่งผลให้รูปร่างโหมดของคานาเซลล์ดูลำดับที่เกิดขึ้นไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง ความถี่ธรรมชาติ 6 ลำดับแรก ณ โครงตาข่ายละเอียดสุดเมื่อนำมาวาดกราฟเทียบกับค่าที่ใช้ในการอ้างอิง สามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 9 มีข้อสังเกตว่า ค่าที่ได้จาก DistMesh เข้าใกล้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรงมากกว่า PolyMesher เล็กน้อย และถือว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (เส้นกราฟทั้งสองมีความสอดคล้องเกือบเป็นเส้นเดียวกันกับค่าอ้างอิง)

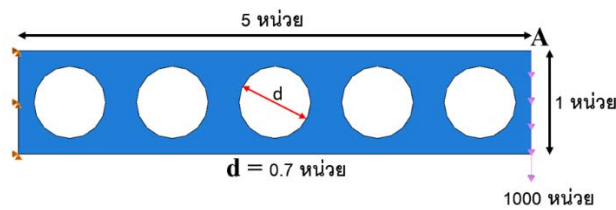


รูปที่ 9 ความถี่ธรรมชาติหกลำดับแรกเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง

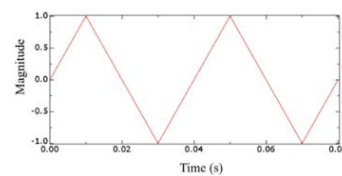
3.3 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบแรงกระทำชั่วขณะ (Transient vibration Analysis)

ส่วนสุดท้าย เป็นการวิเคราะห์คานตัวอย่างที่รับแรงกระทำชั่วขณะ โดยแรงเฉือน (Vertical Traction) ซึ่งกระทำที่ปลายคานด้านไกลนั้น ถูกกำหนดให้มีขนาดแปรเปลี่ยนเป็นฟังก์ชันของเวลาตามรูปที่ 10(b) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) ถูก

กำหนดให้มีค่าเป็น $3E+07$ และ 0.28 ตามลำดับเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบสถิตยศาสตร์ในหัวข้อที่ผ่านมา ค่าที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรง (Close-to-Exact Solution) สำหรับเปรียบเทียบนี้ สามารถหาได้ด้วยการใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ ABAQUS ที่ใช้ความละเอียดของโครงตาข่ายแบบทรงสี่หน้า (Q4) ที่มีจำนวนมากพอสำหรับใช้เป็นค่าอ้างอิง



(ก)

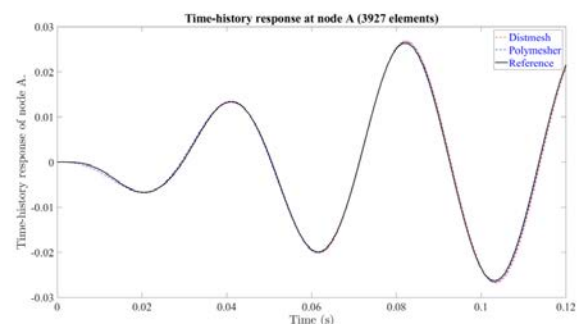
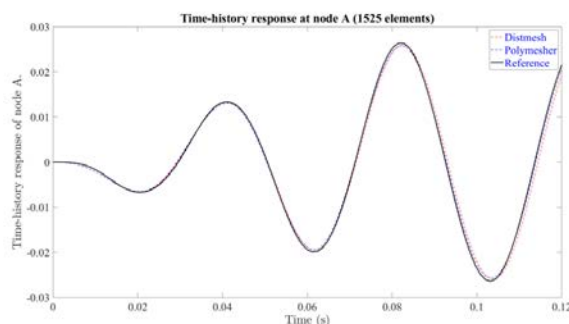
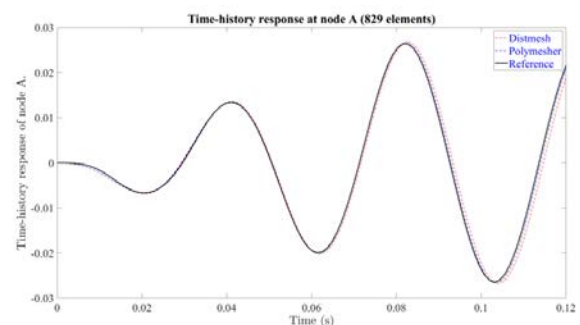
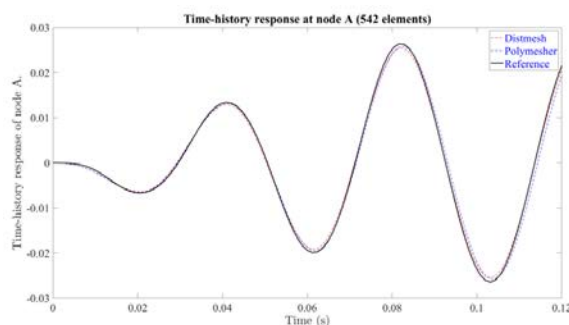


(ข)

รูปที่ 10 (ก) คานตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบรับแรงกระทำชั่วขณะ (ข) การแปรผันของแรงตามเวลา

ผลจากการวิเคราะห์เพื่อหาค่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่จุด A ที่แปรเปลี่ยนไปตลอดช่วงเวลา 0.12 วินาทีระหว่างอัลกอริทึมทั้งสองรูปแบบสำหรับความละเอียดโครงตาข่ายจำนวน 4 ชุดด้วยกัน ได้แก่ 542, 829, 1525 และ 3927 เอลิ-เมนต์รูปหลายเหลี่ยม ได้แสดงไว้ในรูปที่ 11 จากรูปพบว่า ความแตกต่างระหว่างค่าของการเปลี่ยนตำแหน่งที่จุด A ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์

แบบสร้างเอลิเมนต์ย่อยตามโหนดของเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยมด้วยอัลกอริทึมทั้งสองวิธีกับค่าอ้างอิงที่ได้จากวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์นั้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่า อัลกอริทึม PolyMesher จะให้ค่าที่ต่ำกว่า DistMesh เพียงเล็กน้อยซึ่งความแตกต่างดังกล่าวจะลดลงตามจำนวนความละเอียดของโครงตาข่ายที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 11 การเปลี่ยนตำแหน่ง ของจุด A ตามเวลา

4 สรุปและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์ทั้งทางสถิตยศาสตร์ การสันสเทือนแบบอิสระและแบบแรงกระทำชั่วคราวของคานเชลลูลาร์ตัวอย่างด้วยวิธีสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมซึ่งสร้างจากอัลกอริทึมที่แตกต่างกันสองแบบ โดยทำการแบ่งเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยมเหล่านั้นออกเป็นโดเมนย่อยสม่ำเสมอรูปสี่เหลี่ยมที่สอดคล้องกับโหนดของเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยม (n-Sided Polyshape Node-based Smoothed Finite Element)

ผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนตำแหน่งในแนวตั้งของปลายคานด้านบน ณ จุดที่กำหนด สำหรับการสร้างอัลกอริทึมแบบ PolyMesher มีค่าเข้าใกล้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรงมากกว่าแบบ DistMesh อย่างมีนัยสำคัญ ค่าความคลาดเคลื่อนที่โครงตาข่ายมากที่สุดมีค่าเพียง 0.05 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับ 1.06 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยที่ใช้ในการอ้างอิงซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.68 สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่า 1.0 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสม (Optimal) สำหรับปัญหาทางสถิตยศาสตร์ทั่วไปสำหรับเอลิเมนต์ที่เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Element) หากพิจารณาจำนวนโหนดของเอลิเมนต์ที่ใช้ พบว่า มีจำนวนเพียงแค่ครึ่งหนึ่งของเอลิเมนต์ที่ใช้ในวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์เพื่อให้ได้ค่าการของเปลี่ยนตำแหน่งที่เทียบเท่ากัน ทำให้วิธีสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์แบบเอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมแบบ PolyMesher ที่มีการสร้างโดเมนหรือเอลิเมนต์ย่อยตามโหนดของเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยมนั้น มีประสิทธิภาพในการคำนวณสูงโดยใช้จำนวนโหนดที่น้อยกว่า ถือว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ให้ค่าผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำไม่ด้อยไปกว่าวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ข้อสังเกตที่พบอีกประการหนึ่งคือ ผลของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งที่ได้นี้เป็นค่า Upper bound ของผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรง หากสามารถหาค่า Lower Bound ของค่าดังกล่าวได้ ก็จะสามารถทำการคาดคะเนผลลัพธ์ของปัญหาต่าง ๆ ซึ่งไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ได้จากการวิเคราะห์โดยตรงได้ในที่สุด

ในกรณีของการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติและโหมดรูปร่างที่สอดคล้องหกลำดับแรกด้วยการแก้ปัญหา

Eigenvalue Problem นั้นพบว่า การสร้างเอลิเมนต์หลักหลายเหลี่ยมทั้งสองแบบ มีความสอดคล้องกับค่าที่ใช้ในการอ้างอิงมาก ณ ความละเอียดของโครงตาข่ายมากที่สุดนั้น ค่ามาตรฐานความคลาดเคลื่อนของความถี่ธรรมชาติลำดับแรกมีค่าเพียง 0.02 เปอร์เซ็นต์ รูปร่างโหมด (Mode Shapes) ทั้งหกลำดับแรกที่ได้ สามารถเกิดขึ้นได้จริงและสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของคานตัวอย่าง

เช่นเดียวกับการวิเคราะห์การสันสเทือนอิสระ การเปลี่ยนตำแหน่งของจุด A ตามแรงกระทำที่แปรเปลี่ยนตามเวลาสำหรับการวิเคราะห์การสันสเทือนแบบแรงกระทำชั่วคราวนั้น อัลกอริทึมทั้งสองแบบนี้ ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับค่าอ้างอิงและไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้โครงตาข่ายจำนวนมากขึ้น ความถูกต้องแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้ ไม่ได้มาจากการเลือกใช้รูปแบบการสร้างเอลิเมนต์หลักหลายเหลี่ยมใด ๆ สำหรับการวิเคราะห์แต่เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับประเภทของการวิเคราะห์รวมทั้งคุณสมบัติอย่างอื่นของผู้วิเคราะห์ ได้แก่ ความละเอียดของโครงตาข่าย ระดับความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ต้องการ ความต่อเนื่องภายในทั้งด้านรูปทรงและคุณสมบัติวัสดุของปัญหานั้น ๆ เป็นต้น เมื่อพิจารณาใช้ร่วมกันอย่างรอบคอบ จะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้นมีความน่าเชื่อถือมากในที่สุด

5 กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีสำหรับการสนับสนุนเวลาและแหล่งข้อมูลสำหรับการสืบค้นบทความอื่น ๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. J. Bathe, "An Introduction to the Use of Finite Element Procedures," in *Finite Element Procedures*, Hoboken, NJ, USA: Prentice Hall, 1996, ch. 1, sec. 1.1-1.4, pp. 1-14.
- [2] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor and J. Z. Zhu, "The Standard Discrete System and Origins of the Finite

- Element Method,” in *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 6th ed., Waltham, MA, USA: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005, ch. 1, sec. 1.1–1.8, pp. 1–12.
- [3] T. J. Hughes, “Fundamental Concepts: A Simple One-dimensional Boundary-Value Problem,” in *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*, Mineola, NY, USA: Dover Publication, 2000, ch. 1, sec. 1.1–1.15, pp. 1–44.
- [4] G. R. Liu and T. T. Nguyen, “Introduction,” in *Smoothed Finite Element Methods*, 1st ed., Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010, ch. 1, sec. 1.1–1.7, pp. 1–11.
- [5] G. R. Liu, “The smoothed finite element method (S-FEM): A framework for the design of numerical models for desired solutions,” *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 456–477, 2019, doi: 10.1007/s11709-019-0519-5.
- [6] W. Junchum, K. Musiket, B. Phungpaingam and P. Pongsivasathit, “Two-Dimensional plane stress analysis by smoothed finite element method using 4 smoothing cells created by an arbitrary quadrilateral element,” *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 32, no. 3, pp. 33–51, 2021. (in Thai)
- [7] M. J. Kazemzadeh-Parsi and F. Daneshmand, “Solution of geometric inverse heat conduction problems by smoothed fixed grid finite element method,” *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 45, no. 10, pp. 599–611, 2009, doi: 10.1016/j.finel.2009.03.008.
- [8] J. Liu, Z. -Q. Zhang and G. Zhang, “A smoothed finite element method (S-FEM) for large-deformation elastoplastic analysis,” *International Journal of Computational Methods*, vol. 12, no. 4: pp. 1540011, 2015, doi: 10.1142/S0219876215400113.
- [9] E. Li, Z. Zhang, C. Chang, S. Zhou, G. R. Liu and Q. Li, “A new homogenization formulation for multifunctional composites,” *International Journal of Computational Methods*, vol. 13, no. 2, pp. 2016, Art. no. 1640002, doi: 10.1142/S0219876216400028.
- [10] P. O. Persson and G. Strang, “A simple mesh generator in MATLAB,” *SIAM review*, vol. 46, no. 2, pp. 329–345, 2004, doi: 10.1137/S0036144503429121.
- [11] C. Talischi, G. H. Paulino, A. Pereira and I. F. Menezes, “PolyMesher: a general-purpose mesh generator for polygonal elements written in MATLAB,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 45, pp. 309–328, 2012, doi: 10.1007/s00158-011-0706-z.
- [12] C. Talischi, G. H. Paulino, A. Pereira and I. F. Menezes, “PolyTop: a MATLAB implementation of a general topology optimization framework using unstructured polygonal finite,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 45, pp. 329–357, 2012, doi: 10.1007/s00158-011-0696-x.
- [13] L. Kobbelt. “OpenMesh”, [openmesh.org. https://www.graphics.rwth-aachen.de/software/openmesh/](https://www.graphics.rwth-aachen.de/software/openmesh/)
- [14] E. T. Ooi, C. Song, F. Tin-Loi and Z. Yang, “Polygon scaled boundary finite elements for crack propagation modelling,” *International journal for numerical methods in engineering*, vol. 91, no. 3, pp. 319–342, 2012, doi: 10.1002/nme.4284.
- [15] I. M. Smith, D. V. Griffiths, and L. Margetts, “Forced Vibrations,” in *Programming the finite element method*, 5th ed., Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2013, ch. 11, sec. 11.1–11.7, pp. 483–508.
- [16] D. L. Logan, “Structural Dynamics and Time-Dependent Heat Transfer,” in *A first course in the finite element method*, 6th ed., Boston, MA, USA:

-
- Cengage Learning, Inc., 2017, ch. 16, sec. 16.3, pp. 764–780.
- [17] K. Y. Dai, G. R. Liu and T. T. Nguyen, T. T., “An n-sided polygonal smoothed finite element method (nCSFEM) for solid mechanics,” *Finite elements in analysis and design*, vol. 43, no. 11–12, pp. 847–860, 2007, 10.1016/j.finel.2007.05.009.
- [18] Abaqus G. Abaqus 6.11. Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, RI, USA. 2011

การตรวจสอบตัวชี้วัดความหนาแน่นและการอพยพของประชากรใน กรุงเทพมหานคร:
ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างปัจจัยด้านการขนส่ง เศรษฐกิจ ที่อยู่อาศัย การแพทย์ และ
การศึกษา

An investigation of Indicators for Population Density and Immigration in Bangkok: A
Comparative Study of Transportation, Economy, Residence, Healthcare and Education
Factors

กฤษฎา แสนสมบูรณ์^{1,*} และ ธนาพันธ์ ทับทิมหิน²

¹ คณะการจัดการ โลจิสติกส์และการคมนาคมขนส่ง, สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ บางตลาด ปากเกร็ด นนทบุรี 11120

² คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ, มหาวิทยาลัยนวัตกรรมบูรณาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10300

Kritsada Saensomboon^{1,*} and Thanaphan Thapthimhin²

¹ Faculty of Logistics and Transportation Management, Panyapiwat Institute of Management, Bang Talat, Pak Kret,
Nonthaburi, 11120, Thailand

² Faculty of Science and Health Technology, Navamindradhiraj University, Wachira Phayabal, Dusit, Bangkok, 10300,
Thailand

*Corresponding Author E-mail: kritsadasaen@pim.ac.th

Received: Dec 27, 2021; Revised: Apr 15, 2022; Accepted: Jun 08, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของประชากร และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การอพยพเข้าเมืองของประชากร โดยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลของแต่ละปัจจัยจากเขตทั้งหมด 50 เขต ในกรุงเทพมหานคร โดยมี 5 ปัจจัยหลัก ได้แก่ การขนส่ง เศรษฐกิจ ที่อยู่อาศัย การแพทย์ และการศึกษา ในแต่ละปัจจัยมีตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์รวม 18 ตัวแปร สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยใช้ซอฟต์แวร์ Geo-detector ในการประมวลผลข้อมูล ผลปรากฏว่า มี 5 ตัวแปรหลักที่ส่งผลกระทบต่อ การกระจายตัวและการอพยพเข้าเมืองของประชากรมากที่สุด คือ ความยาวถนนสายหลัก ระยะห่างไกลที่สุดจากสนามบินดอนเมือง ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน จำนวนอาคารชุด และระยะห่างไกลที่สุดจากสนามบินสุวรรณภูมิ โดยถ้าหากตัวแปรทั้ง 5 ตัวแปรนี้เกิดร่วมกันก็จะส่งผลให้ความหนาแน่นของประชากรและการอพยพเข้าเมืองของประชากรมีค่ามากขึ้น ในการวางแผนพัฒนากรุงเทพมหานคร หน่วยงานราชการและรัฐวิสาหกิจสามารถนำซอฟต์แวร์นี้มาประยุกต์ใช้ในการตัดสินใจเลือกโครงการที่เหมาะสมกับการแก้ปัญหาประชากรได้ เพราะสามารถเลือกโครงการที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของประชากร และช่วยแก้ไขปัญหาระบบการกระจายตัวของประชากรอย่างมีประสิทธิภาพ ที่กำลังจะเกิดขึ้นในอนาคตได้ สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เรียนรู้วิธีใช้งานซอฟต์แวร์ Geo-detector และสามารถนำวิธีประมวลผลนี้มาช่วยวิเคราะห์ปัญหาอื่น ๆ ของประเทศไทยได้อีกด้วย

คำสำคัญ: ความหนาแน่นประชากร, การอพยพของประชากร, กรุงเทพมหานคร

Abstract

This research studies the factors which have effects on the population distribution and their migration. The researcher collected the data from 50 districts in Bangkok. The five main factors are transportation, economy, residence, medication and education. All factors comprise 18 variables in total, the data concerning each variable was collected from each district in Bangkok. For the data analysis, the Geo-detector software was used in the data processing stage. The results show that “there are 5 influential factors that mostly contribute to the population distribution and their migration” which are “the length of main roads”, “the nearest distance from Don Mueang International Airport”, “the nearest distance from Suvarnabhumi Airport”, “the average monthly expenses”, and “the number of condominiums”. When the 5 variables are detected with other factors, this leads to the population density and migration. Bangkok development planning can apply this software. It can help government agencies and state enterprises decide on the suitable projects. These findings beneficially support the decision involving Bangkok development plan since it can solve the problem concerning the unbalance population distribution which may occur in the future. For this research, the researcher has learned how to use Geo-detector software. Besides, the researcher can also use Geo-detector software to deal with other problems in Thailand.

Keywords: Population density, Population immigration, Krung Thep Maha Nakhon (Bangkok)

1. บทนำ

ปัจจุบันกรุงเทพมหานครแบ่งออกเป็น 50 เขต ซึ่งในแต่ละเขตมีค่าความหนาแน่นของประชากรแตกต่างกัน บางเขตมีประชากรหนาแน่นมาก บางเขตมีประชากรเบาบาง ทำให้เกิดปัญหาด้านประชากร คือ การกระจายตัวแบบไม่สม่ำเสมอ[1-4] ดังนั้นการศึกษาปัจจัยที่ผลกระทบต่อความหนาแน่นของประชากรและการอพยพเข้าเมืองของประชากรจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ถ้าหากสามารถทำให้แต่ละเขตมีความหนาแน่นในระดับที่เหมาะสม หรือใกล้เคียงกัน ก็จะสามารถช่วยลดปัญหาการกระจุกตัวของประชากรในบางพื้นที่ได้

แต่ละปัจจัยที่เกิดขึ้นจากโครงการพัฒนาเมืองล้วนส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของประชากรในสองรูปแบบ คือ “ปัจจัยดูด” และ “ปัจจัยผลัก” ตัวอย่างของปัจจัยดูด เช่น ระบบการขนส่งและเศรษฐกิจที่ดีจะดึงดูดให้ประชากรอพยพเข้ามาในเมืองได้ ในทางตรงกันข้าม ตัวอย่างของปัจจัยผลัก เช่น ปัญหาของระบบการขนส่งและเศรษฐกิจจะส่งผลให้ประชากรอพยพออกนอกเมือง[2-6] ซึ่งในแต่ละพื้นที่อาจจะมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของประชากรและการอพยพของประชากรที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาในก่อนหน้านี้[7-16] ระยะที่แรกพบว่ามีสองปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นและการอพยพเข้าเมืองของประชากร คือ ปัจจัยทางธรรมชาติและปัจจัยทางเศรษฐกิจสังคม ตัวอย่างตัวแปรของปัจจัยทางธรรมชาติ เช่น สภาพอากาศ ภูมิประเทศ ทรัพยากรน้ำ ฯลฯ ตัวอย่างตัวแปรของปัจจัยทางเศรษฐกิจสังคม เช่น ความเจริญของเมือง การขนส่ง การแพทย์ การศึกษา รายรับเฉลี่ย ฯลฯ ระยะต่อมาเมื่อเริ่มมีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและทางวิศวกรรม ปัจจัยทางธรรมชาติจึงลดบทบาทและความสำคัญลงไป เหลือเพียงแค่ปัจจัยด้านเศรษฐกิจสังคมเท่านั้นที่ส่งผลกระทบหลักต่อความหนาแน่นของประชากรและการอพยพเข้าเมืองของประชากร

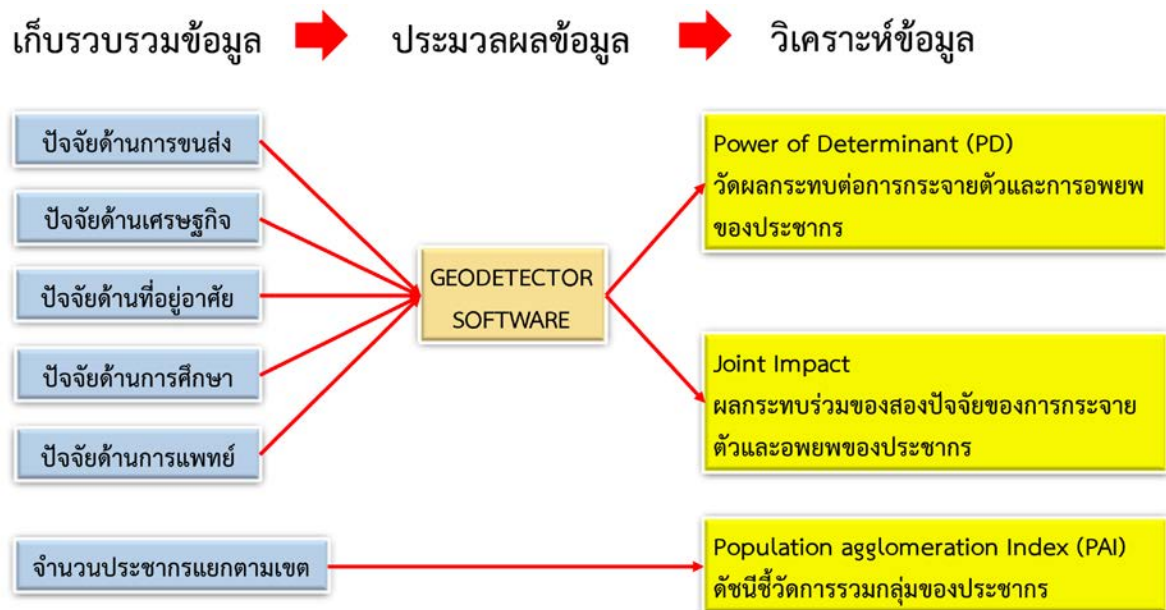
การเลือกโครงการในการพัฒนากรุงเทพมหานครมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความเจริญก้าวหน้าของประเทศไทย ถ้าหากรัฐบาลทราบว่าปัจจัยใดคือปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นและการอพยพเข้าเมืองของประชากร จะทำให้รัฐบาลสามารถเลือกโครงการเพื่อพัฒนาเมืองได้อย่างถูกต้อง ผู้วิจัยจึงแนวคิดที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบว่าปัจจัยใดส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นและการอพยพเข้าเมืองของประชากรมากที่สุด เพื่อช่วยให้

หน่วยงานของรัฐสามารถตัดสินใจเลือกโครงการพัฒนาเมืองได้อย่างแม่นยำและถูกต้อง

ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลด้านการขนส่ง เศรษฐกิจ ที่อยู่ อาศัย การแพทย์ และการศึกษา จากหน่วยงานราชการในกรุงเทพมหานครมาวิเคราะห์ผลกระทบต่อความหนาแน่นและการอพยพเข้าเมืองของประชากร เพื่อทำการศึกษเปรียบเทียบว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อความหนาแน่นและการอพยพเข้าเมืองของประชากรมากที่สุด

2. ระเบียบวิธีการวิจัย

สำหรับวิธีการวิจัยนั้น ผู้วิจัยจะทำการรวบรวมข้อมูลปัจจัยที่สนใจ 5 ปัจจัย คือ การขนส่ง เศรษฐกิจ ที่อยู่อาศัย การศึกษา และการแพทย์ ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ Geo-detector เพื่อคำนวณค่า PD และ Joint Impact เพื่อวัดค่าผลกระทบของการกระจายตัวของประชากร และใช้ข้อมูลจำนวนประชากรคำนวณค่า PAI เพื่อหาค่าดัชนีการรวมกลุ่มของประชากร ดังรูปที่ 1

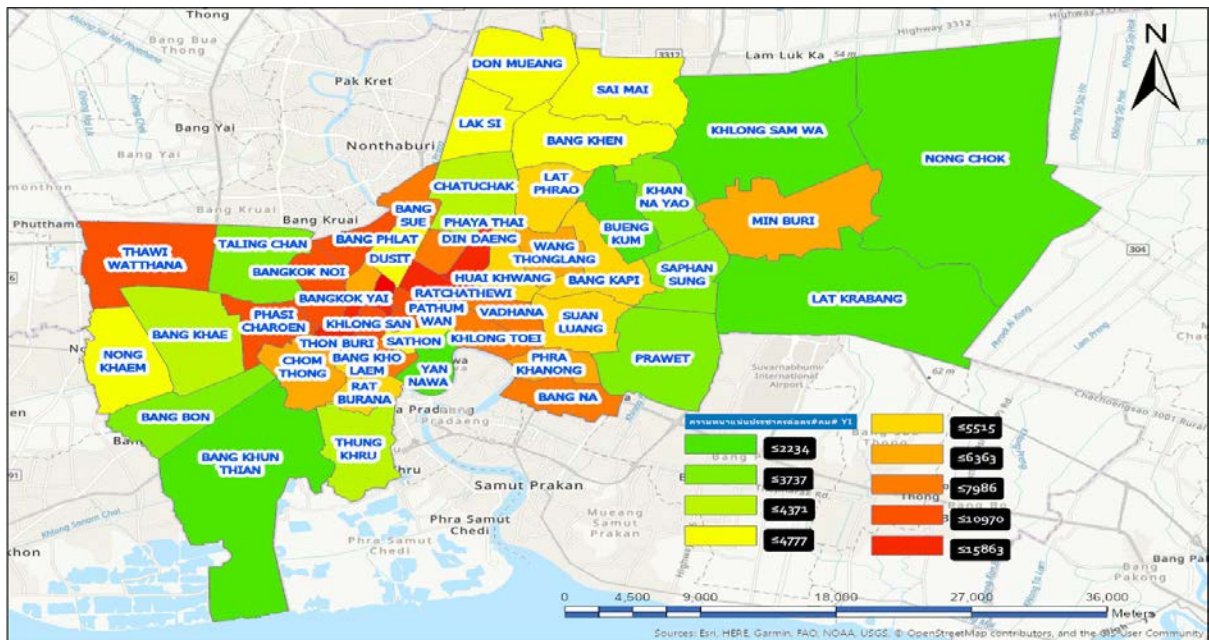


รูปที่ 1 วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล ประมวลผลข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูล

2.1 วัตถุประสงค์ สมมติฐาน และขอบเขตของการวิจัย

สำหรับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้แบ่งออกเป็น 3 ประเด็นหลัก คือ 1) เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของประชากรและการอพยพเข้าเมืองของประชากร 5 ปัจจัย อันได้แก่ การศึกษา การขนส่ง การแพทย์ เศรษฐกิจ และที่อยู่อาศัย 2) เพื่อเปรียบเทียบปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของประชากรและการอพยพเข้าเมืองของประชากรทั้ง 5 ปัจจัย ว่าแต่ละปัจจัยส่งผลกระทบมากน้อยเพียงใด 3) เพื่อศึกษาฟังก์ชันการใช้

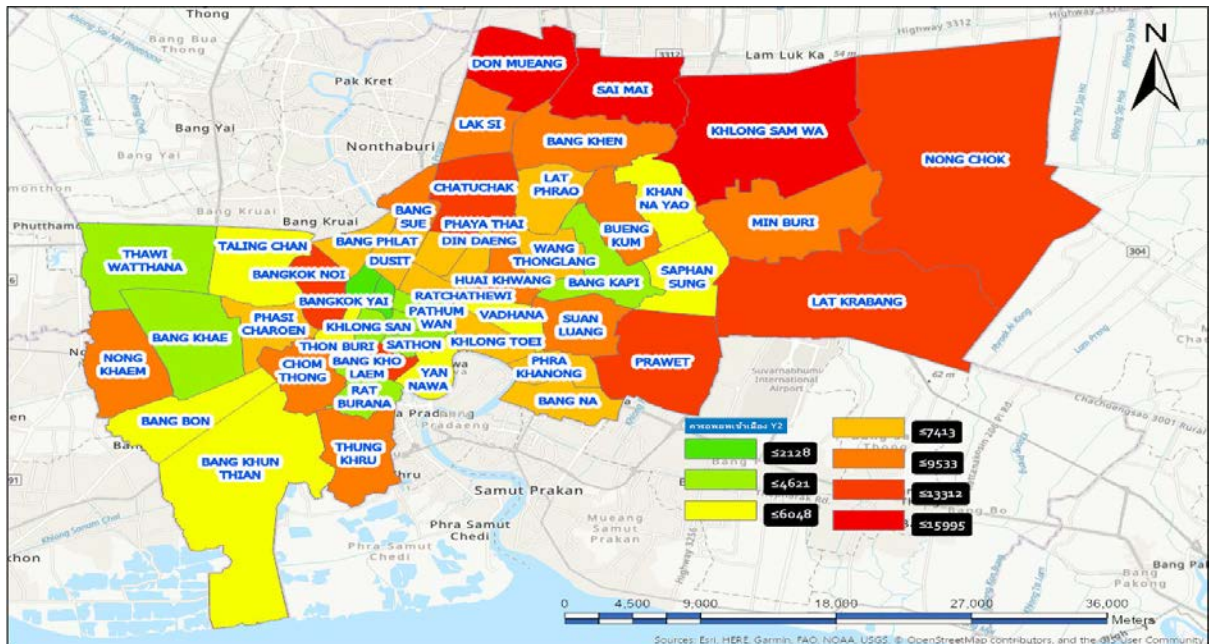
งานของซอฟต์แวร์ Geo-detector ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยอื่น ๆ ในอนาคต สำหรับสมมติฐานของงานวิจัยนี้ คือ ปัจจัยด้านการขนส่ง และเศรษฐกิจส่งผลกระทบต่อกระจายตัวของประชากรและการอพยพเข้าเมืองของประชากรมากที่สุด และขอบเขตของงานวิจัย คือ ผู้วิจัยได้เลือกเขตทั้ง 50 เขต ในกรุงเทพมหานครเป็นพื้นที่ทำการศึกษา โดยในแต่ละเขตของกรุงเทพมหานครจะมีความหนาแน่นของประชากรและการอพยพเข้าออกเมืองของประชากรที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3



รูปที่ 2 ความหนาแน่นในเขตต่างๆ ของกรุงเทพมหานคร

จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของประชากรในเขตต่างๆ ของกรุงเทพมหานคร โดยสีเขียวหมายถึงประชากรมีความหนาแน่นน้อย และสีแดงหมายถึงประชากร

มีความหนาแน่นมาก โดยในพื้นที่สีแดงหมายถึง เขตที่มีปัญหาการกระจุกตัวของประชากร



รูปที่ 3 จำนวนการอพยพเข้าเมืองในเขตต่างๆ ของกรุงเทพมหานคร

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นถึงการอพยพเข้าเมืองของประชากรในเขตต่างๆ ของกรุงเทพมหานคร โดยสีเขียว

หมายถึง ประชากรมีการอพยพเข้าเมืองน้อย และสีแดงหมายถึงประชากรมีการอพยพเข้าเมืองมาก

2.2 ปัจจัยที่ทำการศึกษา

ข้อมูลที่ผู้วิจัยได้นำมาทำการวิเคราะห์นั้นประกอบไปด้วย 5 ปัจจัย คือ 1) การขนส่ง 2) เศรษฐกิจ 3) ที่อยู่อาศัย 4) การแพทย์ และ 5) การศึกษา ซึ่งผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลจาก 50 เขต ในกรุงเทพมหานคร ในแต่ละเขตมีทั้งหมด 18 ตัวแปร เพราะทั้ง 18 ตัวแปรนี้เป็นข้อมูลที่สามารถขอได้จากหน่วยราชการที่มีอยู่ในกรุงเทพมหานคร และในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าตัวแปรด้านการขนส่ง การศึกษา การแพทย์ เศรษฐกิจ และตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเมือง มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของประชากร และการอพยพเข้าเมืองของประชากรมากกว่าปัจจัยอื่น ๆ [16–17] โดยหน่วยงานราชการที่ผู้วิจัยทำการขอข้อมูล คือ 1) ศูนย์ข้อมูลกรุงเทพมหานคร 2) สำนักประเมินราคาทรัพย์สิน กรมธนารักษ์ ส่วนข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระยะทางผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้ Google Map ในการคำนวณ สำหรับข้อมูลด้านระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ผู้วิจัยได้นำเข้าข้อมูลจาก www.bangkokgis.com

สำหรับปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ในหมวดการขนส่ง มี 5 ตัวแปร ประกอบด้วย 1) ระยะทางจากสนามบินดอนเมืองถึงสำนักงานเขต 2) ระยะทางจากสนามบินสุวรรณภูมิถึงสำนักงานเขต 3) จำนวนสถานีรถไฟและสถานีขนส่ง 4) จำนวนท่าเรือ 5) ความยาวถนนสายหลัก สำหรับปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ในหมวดเศรษฐกิจ มี 7 ตัวแปร ประกอบด้วย 1) จำนวนห้างสรรพสินค้า 2) จำนวนร้านสะดวกซื้อ 3) ราคาประเมินที่ดิน 4) รายจ่ายเฉลี่ยต่อเดือนใน 5) จำนวนอาคาร 6) จำนวนบริษัทขนาดใหญ่ 7) จำนวนตลาด สำหรับปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ในหมวดที่อยู่อาศัย มี 2 ตัวแปร ประกอบด้วย 1) จำนวนอาคารชุด ได้มาจากสำนักประเมินราคาทรัพย์สิน กรมธนารักษ์ 2) จำนวนโรงแรมหรือรีสอร์ท สำหรับปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ในหมวดการแพทย์ มี 2 ตัวแปร ประกอบด้วย 1) จำนวนคลินิกหรือสถานอนามัย 2) จำนวนโรงพยาบาล สำหรับปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ในหมวดการศึกษามี 2 ตัวแปร ประกอบด้วย 1) จำนวนวิทยาลัยหรือมหาวิทยาลัย 2) จำนวนโรงเรียน สำหรับข้อมูล GIS เช่น จำนวนโรงเรียน จำนวนมหาวิทยาลัย จำนวนคลินิกหรือสถานอนามัย จำนวนโรงพยาบาล จำนวนโรงแรมและรีสอร์ท จำนวนอาคาร จำนวนสถานีรถไฟ จำนวนบริษัทขนาดใหญ่ จำนวนร้าน

สะดวกซื้อ จำนวนห้างสรรพสินค้า ในแต่ละเขต ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยผู้วิจัยได้นำเข้าข้อมูลทุกข้อมูลมาจาก www.ezymaps.com และ www.bangkokgis.com

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์และตัวชี้วัด

ปัจจัย	ตัวชี้วัด	ตัวแปร
การขนส่ง	ระยะทางจากสนามบินดอนเมืองถึงสำนักงานเขต	X1
	ระยะทางจากสนามบินสุวรรณภูมิถึงสำนักงานเขต	X2
	จำนวนสถานีรถไฟและสถานีขนส่ง	X3
	จำนวนท่าเรือ	X4
	ความยาวถนนสายหลัก	X5
เศรษฐกิจ	จำนวนห้างสรรพสินค้า	X6
	จำนวนร้านสะดวกซื้อ	X7
	ราคาประเมินที่ดิน	X8
	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน	X9
	จำนวนอาคาร	X10
	จำนวนบริษัทขนาดใหญ่	X11
	จำนวนตลาด	X12
ที่อยู่อาศัย	จำนวนอาคารชุด	X13
	จำนวนโรงแรมหรือรีสอร์ท	X14
การแพทย์	จำนวนคลินิกหรือสถานอนามัย	X15
	จำนวนโรงพยาบาล	X16
การศึกษา	จำนวนมหาวิทยาลัยหรือวิทยาลัย	X17
	จำนวนโรงเรียน	X18

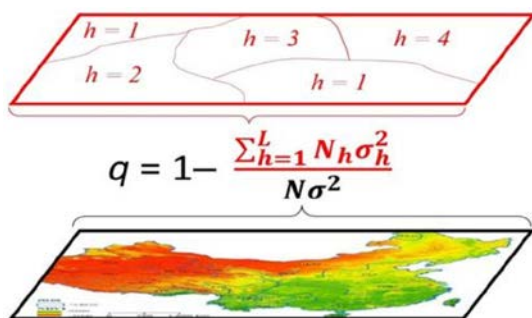
2.3 การประมวลผลข้อมูล

ผู้วิจัยได้ใช้ซอฟต์แวร์ Geo-detector [14–40] ในการประมวลผลข้อมูล 18 ตัวแปร เพื่อหาผลกระทบต่อความหนาแน่นและการอพยพเข้าเมืองของประชากร โดยซอฟต์แวร์นี้ได้พัฒนามาจากกระทรวงวิทยาศาสตร์ของสาธารณรัฐ

ประชาชนจีน ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก <http://www.geodetector.cn/> ค่าที่ประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์นี้ได้แก่ Power of determinant (PD) และ Joint impact (JI) ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data) มาจากหน่วยราชการ คือ ศูนย์ข้อมูลกรุงเทพมหานคร (ข้อมูลปี 2562) และ กรมธนารักษ์ (ข้อมูลปี 2562) โดยข้อมูลที่น่าสนใจมี 2 ประเภท คือ ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative Data) ทั้งข้อมูลแบบต่อเนื่อง (Continuous Data) และข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Data) และ ระดับของการวัด (Level of Measurement) สำหรับตัวแปรแต่ละชนิด เป็นแบบมาตราส่วน (Ratio Scale) แต่สำหรับระดับของการวัด (Level of Measurement) ของค่า PD ค่า JI และค่า PAI เป็นแบบมาตราส่วนอันดับ (Interval Scale)

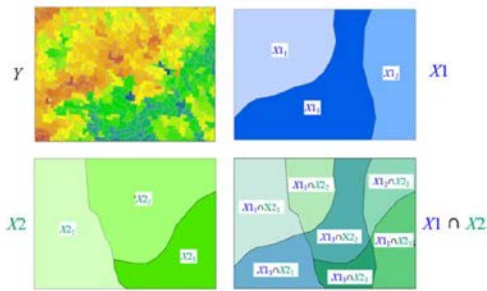
2.3.1 ซอฟต์แวร์ Geo-detector

ซอฟต์แวร์ Geo-detector คือ ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลโดยการแบ่งข้อมูลออกเป็นชั้น ๆ แล้วหาความสัมพันธ์ของตัวแปร X และตัวแปร Y จะทำให้ทราบว่าตัวแปร X ส่งผลอย่างไรต่อตัวแปร Y ดังแสดงในรูปที่ 4 นอกจากนี้ยังสามารถหาปฏิสัมพันธ์ภายในระหว่างตัวแปร X1 และ X2 ดังแสดงในรูปที่ 5 ได้อีกด้วย



รูปที่ 4 หลักการทำงานของ Geodetector

จาก รูปที่ 4 แสดงถึงข้อมูลประชากรของ Y รูปด้านบนคือการแบ่งข้อมูล Y ออกเป็น $L = 4$ ชั้น ตามค่าของข้อมูล Y ในแต่ละพื้นที่ ด้วยวิธีแบ่งชั้นข้อมูล โดย N คือ the จำนวนของหน่วยพื้นที่ σ^2 คือ ความแปรปรวนของ Y ในพื้นที่ทำการศึกษา N_h คือ จำนวนของหน่วยพื้นที่ของชั้นข้อมูล h แต่ละระดับ σ_h^2 คือ ความแปรปรวนของ Y ในชั้นข้อมูล h แต่ละระดับ L คือ จำนวนชั้นข้อมูล



รูปที่ 5 ปฏิสัมพันธ์ภายในร่วมกันระหว่างตัวแปร X1 กับ X2 ซึ่งส่งผลกับตัวแปร Y

จาก รูปที่ 5 มีตัวแปร 3 ตัว คือ Y X1 และ X2 ข้อมูล X1 แบ่งออกเป็น 3 ชั้น X2 แบ่งออกเป็น 3 ชั้น พอนำตัวแปร X1 และ X2 มาซ้อนกัน จะได้ $X1 \cap X2$ ออกเป็น 7 ส่วน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าถ้าตัวแปร X1 เกิดคู่กับตัวแปร X2 จะส่งผลอย่างไรต่อตัวแปร Y

2.3.2 ค่า Power of determinant (PD)

ค่า PD คือ ค่าที่เป็นตัวชี้วัดว่าปัจจัยนั้น ๆ ส่งผลกระทบอย่างไรต่อการกระจายตัวของประชากร ถ้าค่า PD มาก แสดงว่าส่งผลกระทบมาก โดยที่ค่า PD มีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 เมื่อ 1 หมายถึง ปัจจัยนั้นส่งผลกระทบ 100% ต่อการกระจายของประชากร และ 0 หมายถึง ปัจจัยนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของประชากร

กำลังของค่าดีเทอร์มิแนนท์ (Power of determinant) หรือ ค่า PD คำนวณได้จากสูตร

$$PD = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{i=1}^L n_{D,i} \sigma_{D,i}^2 \quad (1)$$

สมการที่ (1) สูตรการคำนวณค่า PD โดย PD คือ การกระจายของประชากร n คือ จำนวนตัวอย่างทั้งหมดในบริเวณที่สนใจ σ_D^2 คือ ความแปรปรวนของประชากรในบริเวณที่ศึกษา σ^2 คือ ความแปรปรวนของประชากรทั้งหมด L คือ จำนวนของข้อมูลที่ใช้คำนวณในบริเวณที่สนใจ

2.3.3 ค่า Joint impact

ค่า Joint impact คือ ค่าปฏิสัมพันธ์ร่วมภายในของตัวแปรสองตัวที่แตกต่างกัน ค่า Joint impact ของความหนาแน่นประชากร จะแสดงให้เห็นว่าถ้ามีสองตัวแปรใดเกิดร่วมกัน จะส่งผลอย่างไรต่อการกระจายตัวของประชากร ค่า Joint

impact ถูกกำหนดในรูปของตัวแปร C โดย A คือ ค่า PD ของตัวแปร A และ B คือ ค่า PD ของตัวแปร B

ความหมายของค่า Joint impact (C) อธิบายไว้ในตารางที่ 2 ดังนี้

$C = A \cap B$ โดย $\cap$ หมายถึง จุดร่วมกันของตัวแปร A และ B

การวิเคราะห์ค่า Joint impact (C) เทียบกับค่า PD ของตัวแปร A และ B ในกรณีต่างๆ สื่อความหมายได้ดังนี้

ถ้า $C = A + B$ แสดงว่า A กับ B เป็นอิสระต่อกัน

ถ้า $C > A \cap B$ แสดงว่า A กับ B ส่งเสริมซึ่งกันและกัน

ถ้า $C < A + B$ สามารถสื่อความหมายได้ 3 กรณี คือ กรณี 1 ถ้า $C > A$ และ $C > B$ แสดงว่า A และ B ส่งเสริมซึ่งกันและกัน กรณี 2 สามารถวิเคราะห์ได้ 2 แบบ คือ ถ้า $C > A$ หรือ $C > B$ แสดงว่า A และ B ส่งเสริมซึ่งกันและกัน แต่มีตัวแปรหนึ่งที่มีค่าอ่อนกว่าอีกตัวแปรหนึ่ง

ถ้า $C < A$ หรือ $C < B$ แสดงว่า A และ B มีตัวแปรหนึ่งส่งเสริม แต่อีกตัวแปรหนึ่งไม่ส่งเสริม กรณี 3 ถ้า $C < A$ และ $C < B$ แสดงว่า A และ B ไม่ส่งเสริมกัน และความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ค่า Joint Impact

Graphical representation	Description	Interaction	Legend	
	$X1 \cap X2 < \min(X1, X2)$	Weaken, nonlinear		$\min(X1, X2)$
	$\min(X1, X2) < X1 \cap X2 < \max(X1, X2)$	Weaken, uni-		$\max(X1, X2)$
	$X1 \cap X2 > \max(X1, X2)$	Enhance, bi-		$X1 + X2$
	$X1 \cap X2 = X1 + X2$	Independent		$X1 \cap X2$
	$X1 \cap X2 > X1 + X2$	Enhance, nonlinear		

จากตารางที่ 2 แสดงหลักการวิเคราะห์ค่า Joint impact ของตัวแปร $X1$ และ $X2$ ว่ามีความสัมพันธ์กันในลักษณะใด ส่งเสริมกัน หักล้างกัน หรือเป็นอิสระต่อกัน ลักษณะความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงหรือไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งการวิเคราะห์ผลนี้ต้องทำการวิเคราะห์ร่วมกับค่า PD จึงจะสามารถทำการวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง

2.3.4 Population Agglomeration Index (PAI)

ค่า PAI เป็นอัตราส่วนที่แสดงการรวมกลุ่มกันของประชากร โดย PAI สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$PAI = \frac{\left(\frac{P_i}{P_n}\right) \times 100\%}{\left(\frac{A_i}{A_n}\right) \times 100\%} = \frac{\frac{P_i}{A_i}}{\frac{P_n}{A_n}} \quad (2)$$

สมการที่ (2) สูตรการคำนวณค่า PAI โดย P_i คือ ประชากร

ของเมือง i P_n คือ ประชากรของเมือง n A_i คือ พื้นที่ของเมือง i A_n คือ พื้นที่ของเมือง n ถ้า $PAI > 2$ หมายถึง มีการรวมกลุ่มกันของประชากรในระดับหนาแน่นมาก ถ้า PAI อยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 2 หมายถึง มีการรวมกลุ่มกันในระดับปกติ และ $PAI < 0.5$ หมายถึง มีการรวมกลุ่มกันในระดับเบาบาง

3. ผลการวิจัย

การวิเคราะห์ผลการวิจัยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ประเด็น คือ 1) วิเคราะห์ผลกระทบต่อการกระจายและอพยพของประชากร โดยใช้ค่า PD ของตัวแปรจำนวน 18 ตัวแปร 2) วิเคราะห์ผลกระทบร่วมของสองปัจจัยต่อการกระจายและอพยพของประชากร โดยใช้ค่า Joint impact ของคู่ตัวแปร 18 ตัวแปร 3) วิเคราะห์การรวมกันเป็นกลุ่มของประชากร โดยทำการวัดค่า PAI ของพื้นที่ทั้ง 50 เขต ในกรุงเทพมหานคร

3.1 การวิเคราะห์ผลกระทบต่อการกระจายตัวและอพยพ เข้าเมืองของประชากร

สำหรับการวิเคราะห์ Power of Determinant ถ้าหากตัวแปรใดมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ามีผลกระทบต่อการกระจายตัวของประชากรมาก สำหรับงานวิจัยนี้ค่า PD ที่ระดับ 0.7 ขึ้นไปถือว่าส่งผลต่อความหนาแน่นและการอพยพเข้าเมืองของประชากรมาก ผู้วิจัยได้ทำการวัดผลกระทบของตัวแปรต่อความหนาแน่นของประชากร และการอพยพเข้าเมืองของประชากร ซึ่งได้ผลลัพธ์ออกมาตามตารางที่ 3 จากข้อมูลในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรหลักที่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของประชากรมีทั้งหมด 5 ตัว

แปร เรียงลำดับจากผลกระทบมากไปหาผลกระทบน้อย คือ ความยาวถนนสายหลัก ระยะห่างใกล้สุดจากสนามบินดอนเมือง ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน จำนวนอาคารชุดในเขตนั่น และระยะห่างใกล้สุดจากสนามบินสุวรรณภูมิ และตัวแปรหลักที่ส่งผลกระทบต่อการอพยพเข้าเมืองของประชากร มีทั้งหมด 5 ตัวแปร เรียงลำดับจากผลกระทบมากไปหาผลกระทบน้อย คือ ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน ระยะห่างใกล้สุดจากสนามบินดอนเมือง ความยาวถนนสายหลัก ระยะห่างใกล้สุดจากสนามบินสุวรรณภูมิ และจำนวนอาคารชุดในเขตนั่น

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ค่า PD

ตัวแปร	PD ของความหนาแน่น ของประชากร	PD ของการอพยพเข้าเมืองประชากร
ระยะทางจากสนามบินดอนเมืองถึงสำนักงานเขต (X1)	0.98	0.99
ระยะทางจากสนามบินสุวรรณภูมิถึงสำนักงานเขต (X2)	0.8	0.84
จำนวนสถานีรถไฟและสถานีขนส่ง (X3)	0.29	0.27
จำนวนท่าเรือ (X4)	0.2	0.24
ความยาวถนนสายหลัก (X5)	0.99	0.96
จำนวนห้างสรรพสินค้า (X6)	0.09	0.19
จำนวนร้านสะดวกซื้อ (X7)	0.41	0.58
ราคาประเมินที่ดิน (X8)	0.35	0.49
ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน (X9)	0.88	0.99
จำนวนอาคาร (X10)	0.59	0.46
จำนวนบริษัทขนาดใหญ่ (X11)	0.53	0.43
จำนวนตลาด (X12)	0.47	0.26
จำนวนอาคารชุด (X13)	0.84	0.75
จำนวนโรงแรมหรือรีสอร์ท (X14)	0.53	0.49
จำนวนคลินิกหรือสถานอนามัย (X15)	0.15	0.12
จำนวนโรงพยาบาล (X16)	0.16	0.17
จำนวนมหาวิทยาลัยหรือวิทยาลัย (X17)	0.21	0.27
จำนวนโรงเรียน (X18)	0.48	0.59

3.2 การวิเคราะห์ผลกระทบร่วมของสองปัจจัยต่อการกระจายและอพยพของประชากร

สำหรับการวิเคราะห์ค่า Joint impact ของสองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของประชากร จากตัวแปรทั้งหมด 18 ตัวแปร ได้ผลลัพธ์ตามตารางที่ 4 จากผลการวิเคราะห์ค่า Joint impact ด้วยซอฟต์แวร์ Geo-detector จากตารางที่ 4 สามารถอธิบายได้ว่า ตัวแปรที่ผู้วิจัยทำการศึกษาทั้ง 18 ตัวแปร ถ้าหากมี 2 ตัวแปรใดเกิดคู่กัน จะส่งเสริมให้มีความหนาแน่นของประชากรมากขึ้น เช่น ถ้าในเขตนั้นมีโรงเรียนและจำนวนท่าเรือมาก จำนวนโรงเรียนและท่าเรือจะส่งผลร่วมกันทำให้มีความหนาแน่นของประชากรมากขึ้น จากค่า Joint impact ในตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่ามี 5 ตัวแปรที่มีความโดดเด่น และเมื่อเกิดคู่กับปัจจัยอื่นๆ จะส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นของประชากรเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ามี 5 ตัวแปรหลัก เมื่อเกิดคู่กับตัวแปรอื่นๆ จะส่งเสริมให้มีความ

หนาแน่นของประชากรมากขึ้นอย่างยิ่งवाद โดย 5 ตัวแปรนั้นได้แก่ 1) ระยะทางใกล้สุดจากสนามบินดอนเมืองถึงสำนักงานเขต (X1) 2) ระยะทางใกล้สุดจากสนามบินสุวรรณภูมิถึงสำนักงานเขต(X2) 3) ความยาวถนนสายหลักแยกตามเขตของกรุงเทพมหานคร (X5) 4) รายจ่ายเฉลี่ยต่อเดือนแยกตามเขตของกรุงเทพมหานคร (X9) 5) จำนวนอาคารชุดแยกตามเขตของกรุงเทพมหานคร (X13) สำหรับตัวแปรอื่น ๆ ที่จะส่งผลกระทบต่อเมื่อเกิดคู่กับตัวแปรเหล่านี้ ได้แก่ 1) จำนวนสถานีรถไฟ (X3) 2) จำนวนท่าเรือ (X4) 3) จำนวนห้างสรรพสินค้า (X6) 4) จำนวนร้านสะดวกซื้อ (X7) 5) ราคาที่ดิน(X8) 6) จำนวนอาคาร (X10) 7) จำนวนบริษัท (X11) 8) จำนวนตลาด (X12) 9) จำนวนโรงแรมหรือรีสอร์ท (X14) 10) จำนวนคลินิกหรือศูนย์บริการสุขภาพ (X15) 11) จำนวนโรงพยาบาล (X16) 12) จำนวนวิทยาลัยหรือมหาวิทยาลัย (X17) 13) จำนวนโรงเรียน (X18) ในแต่ละเขตพื้นที่

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ค่า Joint Impact (JI)

Joint-Impact	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18
X1	0.98																	
X2	1.00	0.80																
X3	1.00	1.00	0.29															
X4	1.00	0.90	0.71	0.20														
X5	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99													
X6	0.99	1.00	0.51	0.54	1.00	0.09												
X7	1.00	0.96	0.64	0.97	1.00	0.79	0.41											
X8	0.99	0.97	0.73	0.60	1.00	0.71	0.99	0.35										
X9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.95	0.95	0.99	0.88									
X10	1.00	1.00	0.73	0.93	1.00	0.80	0.96	0.99	1.00	0.59								
X11	1.00	1.00	0.92	0.92	1.00	0.92	0.97	0.90	1.00	0.86	0.53							
X12	1.00	0.97	0.91	0.65	1.00	0.73	0.98	0.84	1.00	0.96	0.96	0.47						
X13	1.00	1.00	0.94	0.94	1.00	0.94	1.00	0.94	1.00	1.00	0.94	1.00	0.84					
X14	1.00	1.00	0.80	0.91	1.00	0.78	0.98	0.64	1.00	0.81	1.00	0.94	0.99	0.53				
X15	1.00	0.97	0.48	0.54	1.00	0.40	0.73	0.70	0.95	0.76	0.90	0.66	0.98	0.89	0.15			
X16	0.99	1.00	0.57	0.77	1.00	0.46	0.96	0.60	0.94	0.77	0.95	0.70	1.00	0.75	0.54	0.16		
X17	1.00	0.97	0.65	0.63	1.00	0.51	0.70	0.73	0.94	0.79	0.87	0.72	0.96	0.77	0.54	0.67	0.21	
X18	1.00	1.00	0.87	0.73	1.00	0.79	1.00	0.94	1.00	1.00	1.00	0.78	1.00	0.97	0.78	0.96	0.97	0.48

3.3 การวิเคราะห์การรวมกันเป็นกลุ่มของประชากร

สำหรับการวิเคราะห์การรวมกันเป็นกลุ่มของประชากร ผู้วิจัยได้ใช้ค่า PAI เป็นตัวชี้วัด จากตารางที่ 5 ผู้วิจัยได้จำแนกค่า PAI ออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1: $PAI > 2$ มีจำนวนทั้งสิ้น 16 เขต กลุ่มที่ 2: PAI อยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 2 มีจำนวนทั้งสิ้น 30 เขต กลุ่มที่ 3: $PAI < 0.5$ มีจำนวนทั้งสิ้น 4 เขต โดยสรุปก็คือ เขตที่มีการรวมกลุ่มของประชากรมากที่สุด 3 อันดับแรก ได้แก่ เขตป้อมปราบศัตรูพ่าย เขตสัมพันธวงศ์ และเขตดินแดง และเขตที่มีการรวมกลุ่มของประชากรเบาบางที่สุด 3 อันดับสุดท้าย ได้แก่ เขตบางขุนเทียน เขตลาดกระบัง และเขตหนองจอก ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่า PAI นี้สอดคล้องกับข้อมูลจากศูนย์ข้อมูลกรุงเทพมหานคร คือ ค่าความหนาแน่น

ของประชากรในแต่ละเขต ส่งผลต่อการวิเคราะห์ค่า PAI โดยเขตป้อมปราบศัตรูพ่าย เขตสัมพันธวงศ์ และเขตดินแดงเป็นเขตที่มีความหนาแน่นของประชากรมากที่สุด 3 อันดับแรก และเขตบางขุนเทียน เขตลาดกระบัง และเขตหนองจอก เป็นเขตที่มีความหนาแน่นของประชากรน้อยที่สุดเป็น 3 อันดับสุดท้าย อย่างไรก็ตามสำหรับเขตที่มีค่าความหนาแน่นประชากรน้อยเกินไป ($PAI < 0.5$) จะต้องเพิ่มปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของประชากร เช่น การสร้างสนามบิน การเพิ่มรายได้เฉลี่ยของประชากรในเขต การสร้างถนนสายหลักเพิ่มมากขึ้น เพื่อดึงดูดให้มีการอพยพของประชากรเข้ามาให้เขตพื้นที่ให้มากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ค่า PAI ให้อยู่ในระดับปกติ (PAI อยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 2)

ตารางที่ 5 ตารางแสดงค่า PAI ของทั้ง 50 เขต

ลำดับ	เขต	ประชากร (คน)	พื้นที่ (ตรม.)	PAI	ลำดับ	เขต	ประชากร (คน)	พื้นที่ (ตรม.)	PAI	ลำดับ	เขต	ประชากร (คน)	พื้นที่ (ตรม.)	PAI
1	คลองเตย	101,244	13.0	2.2	18	บางเขน	189,000	42.1	1.2	35	ยานนาวา	77,814	50.2	0.4
2	คลองสาน	71,197	7.1	2.8	19	บางคอแหลม	86,898	12.6	1.9	36	ราชเทวี	72,568	6.1	3.3
3	คลองสามวา	202,094	110.7	0.5	20	บางแค	193,491	44.5	1.2	37	ราษฎร์บูรณะ	80,509	15.0	1.5
4	คันนายาว	97,095	26.0	1.0	21	บางซื่อ	126,310	17.8	2.0	38	ลาดกระบัง	177,769	123.9	0.4
5	จตุจักร	156,605	35.8	1.2	22	บางนา	90,125	11.4	2.2	39	ลาดพร้าว	118,574	21.5	1.5
6	จอมทอง	150,108	26.3	1.6	23	บางบอน	105,684	34.7	0.8	40	วังทองหลาง	109,653	18.9	1.6
7	ดอนเมือง	170,021	36.8	1.3	24	บางพลัด	90,869	10.7	2.3	41	วัฒนา	87,225	10.9	2.2
8	ดินแดง	119,150	8.4	3.9	25	บางรัก	48,227	5.5	2.4	42	สวนหลวง	124,048	23.7	1.4
9	ดุสิต	89,769	18.8	1.3	26	บึงกุ่ม	142,237	63.6	0.6	43	สะพานสูง	96,059	28.1	0.9
10	คลองจั่น	104,779	29.5	1.0	27	ปทุมวัน	47,085	5.5	2.4	44	สัมพันธวงศ์	22,463	1.4	4.4
11	ทวีวัฒนา	78,548	9.3	2.3	28	ประเวศ	180,769	52.5	1.0	45	สาทร	77,773	16.7	1.3
12	ทุ่งครุ	123,048	30.7	1.1	29	ป้อมปราบศัตรูพ่าย	43,485	1.9	6.2	46	สายไหม	206,278	44.6	1.3
13	ธนบุรี	106,049	8.6	3.4	30	พญาไท	69,382	9.6	2.0	47	หนองแขม	156,354	32.9	1.3
14	บางกอกน้อย	107,732	11.9	2.5	31	พระโขนง	88,998	14.0	1.8	48	หนองจอก	176,022	236.3	0.2
15	บางกอกใหญ่	66,152	6.2	3.0	32	พระนคร	47,701	8.4	1.6	49	หลักสี่	104,285	22.8	1.3
16	บางกะปิ	146,108	28.5	1.4	33	ภาษีเจริญ	126,160	11.5	3.0	50	ห้วยขวาง	84,340	15.8	1.5
17	บางขุนเทียน	185,824	120.7	0.4	34	มีนบุรี	142,586	24.3	1.6					

4. สรุปผลการวิจัย

สำหรับงานวิจัยเรื่อง “การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยด้านการขนส่งและสังคมต่อการกระจายตัวของประชากรในกรุงเทพมหานคร” มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญ 3 เรื่อง คือ 1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของประชากรและการอพยพเข้าเมืองของประชากร 5 ปัจจัย อันได้แก่ การศึกษา การขนส่ง การแพทย์ เศรษฐกิจ และที่อยู่อาศัย 2. เพื่อเปรียบเทียบปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของประชากรและการอพยพเข้าเมืองของประชากรทั้ง 5 ปัจจัย ว่าแต่ละปัจจัยส่งผลกระทบมากน้อยเพียงใด 3. เพื่อศึกษาฟังก์ชันการใช้งานของซอฟต์แวร์ Geo-detector ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

จากการวิจัยในครั้งนี้ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของประชากรในกรุงเทพมหานครมากที่สุด คือ ปัจจัยด้านการขนส่ง ปัจจัยด้านที่อยู่อาศัย และปัจจัยด้านเศรษฐกิจตามลำดับ สำหรับปัจจัยด้านการขนส่ง ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของประชากร คือ ความยาวถนน และระยะห่างจากสนามบิน สำหรับปัจจัยด้านที่อยู่อาศัย ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของประชากร คือ จำนวนอาคารชุด สำหรับปัจจัยด้านเศรษฐกิจ ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของประชากร คือ ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือนซึ่งสัมพันธ์กับรายรับต่อเดือนของประชากร

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการอพยพเข้าเมืองของประชากรในกรุงเทพมหานครมากที่สุด คือ ปัจจัยด้านการขนส่ง ปัจจัยด้านที่อยู่อาศัย และปัจจัยด้านเศรษฐกิจตามลำดับ สำหรับปัจจัยด้านการขนส่ง ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการอพยพเข้าเมืองของประชากร คือ ความยาวถนน และระยะห่างจากสนามบิน สำหรับปัจจัยด้านที่อยู่อาศัย ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการอพยพเข้าเมืองของประชากร คือ จำนวนอาคารชุด สำหรับปัจจัยด้านเศรษฐกิจ ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการอพยพเข้าเมืองของประชากร คือ ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือนซึ่งสัมพันธ์กับรายรับเฉลี่ยต่อเดือนของประชากร ซึ่งปัจจัยดังกล่าวสอดคล้องกับความเป็นจริง เพราะจากการศึกษาในงานที่ผ่านมา เรื่องการกลายเป็นเมืองของสถาบัน

สิ่งแวดล้อมไทย[26] ปัจจัยทั้ง 5 สามารถดึงดูดประชากรเข้ามาในเมืองและทำให้ความหนาแน่นของประชากรเพิ่มมากขึ้น

ปัจจัยทั้ง 5 ถ้าหากเกิดร่วมกันจะส่งเสริมให้มีการกระจายตัวของประชากรและการอพยพของประชากรเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะถ้าหากมีตัวแปรหลัก 5 ตัวแปรนี้เกิดร่วมกับตัวแปรอื่น ๆ ตัวแปรหลักเหล่านั้น คือ ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน ระยะห่างใกล้ที่สุดจากสนามบินคอนเมือง ความยาวถนนสายหลัก ระยะห่างใกล้ที่สุดจากสนามบินสุวรรณภูมิ และจำนวนอาคารชุด

ซอฟต์แวร์ Geo-detector สามารถประมวลผลข้อมูลเพื่อคำนวณค่า PD ค่า Joint Impact ได้อย่างรวดเร็ว เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอื่น ๆ ในอนาคต

5. อภิปรายผล

ผลการวิจัยสอดคล้องกับสมมติฐานของการวิจัย คือ ปัจจัยด้านการขนส่ง และเศรษฐกิจส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของประชากรและการอพยพเข้าเมืองของประชากรมากที่สุด และผู้วิจัยได้ค้นพบเพิ่มเติม คือ สำหรับกรุงเทพมหานครปัจจัยด้านที่อยู่อาศัยส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวและการอพยพเข้าเมืองของประชากรมาก เช่นเดียวกับปัจจัยด้านการขนส่งและปัจจัยด้านเศรษฐกิจ และค่าดัชนีการรวมกลุ่มของประชากร (PAI) ที่ผู้วิจัยคำนวณได้มีความสอดคล้องกับความหนาแน่นของประชากรในแต่ละเขต

ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต[16] สำหรับตัวแปรแรกที่สุดคือ ระยะห่างจากสนามบินส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของประชากรและการอพยพเข้าเมืองของประชากร ซึ่งในงานวิจัยเดิมได้ผลลัพธ์ คือ จำนวนเที่ยวบินต่อวันส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของประชากรและการอพยพเข้าเมืองของประชากร ตัวแปรที่สองที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต คือ รายจ่ายต่อหัวของประชากรส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของประชากรและการอพยพเข้าเมืองของประชากร ซึ่งผลการวิจัยที่ผ่านมาได้ผลลัพธ์ คือ รายได้ต่อ

หัวของประชากรส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของประชากรและการอพยพเข้าออกเมืองของประชากร

สำหรับผลการวิจัยที่มีความแตกต่างจากงานวิจัยในอดีต คือ ความยาวถนนสายหลัก จำนวนบ้านและอาคารชุดที่อยู่ในเขตนั้น ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นและการอพยพเข้าเมืองของประชากรมาก ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งสามปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของประชากรและการอพยพเข้าออกเมืองไม่มากนัก สำหรับผลการวิจัยที่มีความแตกต่างจากงานวิจัยในอดีตอย่างชัดเจน คือ จำนวนมหาวิทยาลัยที่อยู่ในเขตไม่ได้ส่งผลต่อความหนาแน่นและการอพยพของประชากรมากเท่ากับงานวิจัยในอดีต สาเหตุที่ผลการวิจัยมีความแตกต่างกัน เนื่องจากการศึกษาในอดีตดำเนินการในชุมชนเมืองของสาธารณรัฐประชาชนจีน ซึ่งมีบริบททางด้านเศรษฐกิจ สังคม และรูปแบบการดำเนินชีวิตในชุมชนเมืองที่แตกต่างจากกรุงเทพมหานคร

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการทดสอบปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นและการอพยพเข้าเมืองของประชากรการทดสอบด้วยวิธี Multiple Regression พบว่าตัวแปรอิสระบางตัวไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม และไม่สามารถอธิบายผลการศึกษารหรืออธิบายผลการศึกษได้น้อย[25] ซึ่งผู้วิจัยได้ทดสอบนำข้อมูลที่ได้มาทดสอบด้วย Multiple Regression และได้ผลลัพธ์สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา คือ ไม่สามารถอธิบายผลการศึกษารหรืออธิบายผลการศึกษได้น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์กับ Geo-detector พบว่า Geo-detector สามารถอธิบายผลการศึกษารตัวแปรได้ดีกว่า เพราะสามารถเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรได้ทั้งหมด และ Geo-detector มีความสามารถในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ได้ดีกว่า Multiple Regression แต่ Geo-detector มีข้อจำกัด คือ เมื่อประมวลผลข้อมูลด้วย Geo-detector ผลลัพธ์ที่ได้ไม่แสดงว่าปัจจัยใดส่งผลบวกหรือลบต่อตัวแปรตาม ซึ่งเป็นจุดที่ Geo-detector ค่อนข้างกว่า Multiple Regression แต่อย่างไรก็ตาม การหาว่าปัจจัยใดเป็นบวกหรือลบต่อตัวแปรตาม ผู้วิจัยสามารถหาข้อมูลได้จากงานวิจัยในลักษณะเดียวกัน และ Geo-detector ยังสามารถใช้วิเคราะห์ผลร่วมกับ Multiple Regression ได้อีก

ด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ตัวแปรต้นทั้ง 18 ตัวแปรที่ผู้วิจัยทำการศึกษามีอิทธิพลเป็นบวกต่อความหนาแน่นและการอพยพของประชากร เนื่องจากตามหลักการกลายเป็นเมือง การศึกษา การขนส่ง การแพทย์ เศรษฐกิจ และที่อยู่อาศัย เป็นปัจจัยที่ทำให้ชนบทกลายเป็นเมือง เนื่องจากสามารถดึงดูดประชากรเข้ามาในเมืองได้มากขึ้น

จากการศึกษาของสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย[26] พบว่าสิ่งที่ทำให้ความหนาแน่นและการอพยพเข้าเมืองของประชากรมากขึ้น จนเกิดการเปลี่ยนจากชนบทเป็นเมือง คือ การศึกษา การจ้างงาน และการท่องเที่ยว สำหรับด้านการศึกษาประชากรส่วนใหญ่อพยพเข้าเมือง เพราะต้องการเข้าถึงระดับการศึกษาที่สูงขึ้น ดังนั้นตัวแปรสำคัญ คือ จำนวนโรงเรียนและมหาวิทยาลัย สำหรับด้านการจ้างงานประชากรส่วนใหญ่อพยพเข้าเมือง เพราะต้องการหางานทำ ดังนั้นตัวแปรสำคัญ คือ จำนวนสถานที่ทำงาน จำนวนอาคารที่เกี่ยวข้องกับการจ้างงาน สำหรับด้านการท่องเที่ยว ประชากรส่วนใหญ่มาอพยพเข้ามาในเมืองที่มีสถานที่เที่ยวและมินท์ท่องเที่ยวมาก ตัวแปรสำคัญ คือ จำนวนสถานที่ท่องเที่ยวของเมืองนั้น ๆ

6. ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะแบ่งออกเป็น 2 ประเด็น คือ ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ และข้อเสนอแนะในการศึกษาค้นคว้าครั้งต่อไป

สำหรับข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ในการวางแผนนโยบายการพัฒนาเมืองของรัฐบาล ถ้าหากต้องการกระตุ้นการเจริญเติบโตของเมือง โครงการพัฒนาเมืองควรมุ่งเน้นความสำคัญในเรื่องของ ระยะทางใกล้สุดจากสนามบิน ความยาวถนนสายหลัก รายรับรายจ่ายเฉลี่ยต่อเดือน การพัฒนาที่อยู่อาศัย ถ้าหากมีการวางแผนโครงการพัฒนาสิ่งเหล่านี้ขึ้นพร้อม ๆ กัน จะส่งผลให้อัตราการเติบโตของประชากรมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลดีต่อการพัฒนาเมืองของรัฐบาล ผู้วิจัยได้เรียนรู้การใช้ซอฟต์แวร์ Geo-detector และเข้าใจความหมายของการวิเคราะห์ผล ผู้วิจัยสามารถนำความรู้จากการศึกษาไปต่อยอดให้กับโครงการขนส่งด้านอื่น ๆ ที่กำลังจะเกิดขึ้นในอนาคต และ

มีความพร้อมในการเผยแพร่ซอฟต์แวร์ Geo-detector ให้แก่ผู้ที่สนใจศึกษา สิ่งที่คุณวิจัยค้นพบสามารถใช้ในการตัดสินใจเลือกนโยบายพัฒนาระบบขนส่งของประเทศไทยในอนาคต ซอฟต์แวร์ Geo-detector นี้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับหน่วยงานราชการในกรุงเทพมหานครเพื่อแก้ปัญหาของเมืองได้ เพราะมีข้อมูลจำนวนมากมายของกรุงเทพมหานครที่สามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ Geo-detector ได้ ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะจัดทำคู่มือการใช้ซอฟต์แวร์ Geo-detector เป็นฉบับภาษาไทยเพื่อแจกจ่ายให้กับหน่วยงานราชการ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ที่มีอยู่ในประเทศไทย นอกจากนี้ในจังหวัดอื่น ๆ ก็สามารถใช้ซอฟต์แวร์ Geo-detector วิเคราะห์ข้อมูล เพื่อแก้ไขปัญหาการพัฒนาเมือง เช่น ถ้าหากจังหวัดต้องการดึงดูดคนต้องทำอะไร การใช้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ข้อมูลที่มีอยู่ในจังหวัดจะทำให้การตัดสินใจเลือกโครงการพัฒนาเมืองของหน่วยงานราชการมีความเหมาะสมกับบริบทของเมืองนั้น ๆ มากขึ้น

สำหรับข้อเสนอแนะในการศึกษาค้นคว้าครั้งต่อไป ในการขอข้อมูลจากหน่วยงานราชการค่อนข้างใช้เวลานาน เพราะต้องขอข้อมูลในหลายส่วน โดยเฉพาะการเก็บข้อมูลย่อยไปถึงในระดับเขตพื้นที่ ข้อมูลบางอย่างไม่ได้ทำการบันทึกไว้ ทำให้ผู้วิจัยต้องหาข้อมูลทดแทน ถ้าหากต้องการให้การข้อมูลมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ควรขอข้อมูลในระดับจังหวัดขึ้นไป จะทำให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์และมีความเป็นปัจจุบันมากขึ้น ในการศึกษาครั้งต่อไป ตัวแปรที่จำเป็นต้องมี คือ ระยะห่างจากสนามบิน จำนวนอาคารชุด ความยาวถนน รายรับและรายจ่ายเฉลี่ยต่อเดือน ส่วนตัวแปรควรนำออก คือ จำนวนโรงพยาบาล จำนวนคลินิก จำนวนท่าเรือ และจำนวนมหาวิทยาลัย และควรเพิ่มเติมตัวแปรจำนวนสถานที่ท่องเที่ยวที่สำคัญ เพราะสถานที่ท่องเที่ยวเป็นปัจจัยดึงดูดซึ่งเป็นสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของประชากร[26]

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยความร่วมมือจากหน่วยงานหลายภาคส่วน ขอขอบคุณสำนักประเมินราคาทรัพย์สิน กรมธนารักษ์

ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลราคาประเมินที่ดินและจำนวนที่พักอาศัยในกรุงเทพมหานคร ขอขอบคุณสำนักงานโยธา ศูนย์ข้อมูลกรุงเทพมหานคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลความยาวของถนนสายหลักแยกตามเขตของกรุงเทพมหานคร ขอขอบคุณสำนักงานสถิติแห่งชาติที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลค่าใช้จ่ายของประชากรในกรุงเทพมหานคร ขอขอบคุณ www.ezymaps.com ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลจำนวนห้างสรรพสินค้า ร้านสะดวกซื้อ จำนวนท่าเรือ จำนวนสถานีรถไฟ จำนวนสถานศึกษา ขอขอบคุณคณะกรรมการจัดการโลจิสติกส์และการคมนาคมขนส่ง โดยเฉพาะ คุณสุธิดา เล็กแหลมหลัก ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำเอกสารติดต่อประสานงานกับหน่วยงานราชการ ขอขอบคุณ ดร.อนุพงศ์ ทิ้งในธรรม ที่ให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยในการดาวน์โหลดบทความวิจัยในต่างประเทศ ขอขอบคุณ ดร. ภูวศล ศิริรังษี ที่ให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยให้แก่ผู้วิจัย ขอขอบคุณ บริษัท อีเอสอาร์ไอ (ประเทศไทย) จำกัด ที่คอยให้แนะนำทางด้านเทคนิคการใช้ซอฟต์แวร์ ArcGIS ในการนำเสนอข้อมูล นอกจากนี้ ส่วนสำคัญที่ช่วยให้งานวิจัยราบรื่นไปได้ด้วยดี คือ ซอฟต์แวร์ Geo-detector จากถูกพัฒนา โดยทีมคณาจารย์ของมหาวิทยาลัยจากสาธารณรัฐประชาชนจีน ได้แก่ 1) Professor Jin-Feng Wang 2) Professor Xin-Hu Li 3) Professor George Christakos 4) Professor Yi-Lan Liao 5) Professor Tin Zhang 6) Professor Xue Gu และ 7) Professor Xia-Ying Zheng ผู้ทำการพัฒนาซอฟต์แวร์ขึ้นมาให้คุณค่าทั่วไปได้สามารถใช้งานได้ และมีงานวิจัยมากกว่า 1,000 ชิ้น ที่เกิดขึ้นจากซอฟต์แวร์นี้ในสาธารณรัฐประชาชนจีน

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักวิจัยและพัฒนา สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ ที่ให้การสนับสนุนทุนพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ ประจำปีการศึกษา 2562 แก่ผู้วิจัย ขอขอบคุณผู้ประสานงานโครงการวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณเมธพร ใจสุทธิ ที่คอยให้คำแนะนำในการทำวิจัยและติดตามผลการดำเนินงานของผู้วิจัยมาโดยตลอด

หากผลการศึกษานี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้วิจัยขออภัยไว้เพื่อปรับปรุงและแก้ไขสำหรับการศึกษาในภายภาคหน้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Dasgupta, “The population problem: theory and evidence. *Journal of economic literature*,” *Journal of Economic Literature*, vol. 33, no. 4, pp. 1879–1902, 1995.
- [2] Y. Liu and F. Yamauchi, “Population density, migration, and the returns to human capital and land: Insights from Indonesia,” *Food Policy*, vol. 48, pp. 182–193, 2014, doi: 10.1016/j.foodpol.2014.05.003.
- [3] S. S. Kim, C. K. Lee and D. B. Klenosky, “The influence of push and pull factors at Korean national parks,” *Tourism management*, vol. 24, no. 2, pp. 169–180, 2003, doi: 10.1016/S0261-5177(02)00059-6.
- [4] E. Swyngedouw, F. Moulaert and A. Rodriguez, “Neoliberal urbanization in Europe: large-scale urban development projects and the new urban policy,” *Antipode*, vol. 34, no. 3, pp. 542–577, 2002, doi: 10.1111/1467-8330.00254.
- [5] D. L. Carr, L. Suter and A. Barbieri, “Population dynamics and tropical deforestation: state of the debate and conceptual challenges,” *Population and Environment*, vol. 27, no. 1, pp. 89–113, 2005, doi: 10.1007/s11111-005-0014-x.
- [6] Y. N. Guo, J. Cheng, Y. Y. Cao and Y. Lin, “A novel multi- population cultural algorithm adopting knowledge migration,” *Soft computing*, vol. 15, pp. 897–905, 2011, doi: 10.1007/s00500-010-0556-4.
- [7] P. H. Gleick, “Transitions to freshwater sustainability,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, no.36, pp. 8863–8871, 2018, doi: 10.1073/pnas.1808893115.
- [8] M. T. Hannan and J. Freeman, “The population ecology of organizations,” *American journal of sociology*, vol. 82, no. 5, pp. 929–964, 1977.
- [9] G. P. Li and X. X. Chen, “Empirical research on influencing factors on population growth of Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region,” *Geographical Research*, vol. 28, pp. 191–202, 2009.
- [10] A. Lomnicki, “Individual- based models and the individual-based approach to population ecology,” in *eLs*, New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011, [Online]. Available: <http://doi.org/10.1002/9780470015902.a0003312.pub2>
- [11] J. Damuth, “Population density and body size in mammals,” *Nature*, vol. 290, pp. 699–700, 1981, Art. no. 5808.
- [12] Y. Ren, L. Deng, S. Zuo, Y. Luo, G. Shao, X. Wei, L. Hua and Y. Yang, “Geographical modeling of spatial interaction between human activity and forest connectivity in an urban landscape of southeast China,” *Landscape Ecology*, vol. 29, pp. 1741–1758, 2014, doi: 10.1007/s10980-014-0094-z.
- [13] M. Renkow and D. Hoover, “Commuting, migration, and rural – urban population dynamics,” *Journal of regional science*, vol. 40, no. 2, pp. 261–287, 2000, doi: 10.1111/0022-4146.00174.
- [14] J. Shen, N. Zhang, Gexigeduren, B. He, C. -Y. Liu, Y. Li, H. -Y. Zhang, , X. -Y. Chen and H. Lin, “Construction of a GeogDetector-based model system to indicate the potential occurrence of grasshoppers in Inner Mongolia steppe habitats,” *Bulletin of Entomological Research*, vol. 105, pp. 335–346, 2015, doi: 10.1017/S0007485315000152.
- [15] A. Shrestha, “Application of Geodetector Method and Other Statistical Methods to Study Groundwater Vulnerability to Nitrate Contamination in The Central Valley Aquifer, California,” Ph.D. dissertation, Dept. Geographic and Atmospheric Sciences, Northern Illinois Univ., Northeast Illinois, IL, USA, 2019.
- [16] L. Wang and L. Chen, “The impact of new transportation modes on population distribution in

- Jing- Jin- Ji region of China,” *Scientific data*, vol. 5, 2018, Art. no. 170204, doi: 10.1038/sdata.2017.204.
- [17] Walters, A. J. C. & Freeman, G. M. The quality of big (geo) data. *Dia. In Hum. Geogr* 3, 280–284 (2013).
- [18] J. F. Wang, X. H. Li, G. Christakos, Y. -L. Liao, T. Zhang, X. Gu and X. -Y Zheng, “Geographical detectors- based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China,” *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 24, no. 1, pp. 107–217, 2010, doi: 10.1080/13658810802443457.
- [19] S. Uttayanin, A. Intaraksa and K. Duangmal, “Influences of Socio- Economic Factors Affecting to Population Dynamics in Thung Rangsit Area, Pathum Thani,” *Journal of the Association of Researchers*, vol. 24, no. 2, pp. 111–122, 2020.
- [20] H. Wang, J. Gao and W. Hou, “Quantitative attribution analysis of soil erosion in different geomorphological types in karst areas: Based on the geodetector method,” *Journal of Geographical Sciences*, vol. 29, pp. 271–286, 2019, doi: 10.1007/s11442-019-1596-z.
- [21] W. Xinge, X. Jianchao, Y. Dongyang, and C. Tian, “Spatial Differentiation of Rural Touristization and Its Determinants in China: A Geo-Detector- Based Case Study of Yesanpo Scenic Area,” *Journal of Resources and Ecology*, vol. 7, no. 6, pp. 464–471, 2016, doi: 10.5814/j.issn.1674-764x.2016.06.006.
- [22] Y. Yang, X. Yang, M. He and G. Christakos, “Beyond mere pollution source identification: Determination of land covers emitting soil heavy metals by combining PCA/APCS, GeoDetector and GIS analysis,” *Catena*, vol. 185, 2020, Art. no. 104297, doi: 10.1016/j.catena.2019.104297.
- [23] K. Kopczewska, P. Churski, A. Ochojski, and A. Polko, “SPAG: Index of spatial agglomeration,” *Papers in Regional Science*, vol. 98, no. 6, pp. 2391–2424, 2019, doi: 10.1111/pirs.12470.
- [24] K. Zhang, D. Sun, S. Shen and Y. Zhu, “Analyzing spatiotemporal congestion pattern on urban roads based on taxi GPS data,” *Journal of Transport and Land Use*, vol. 10, no. 1, pp. 675–694, 2017, doi: 10.5198/jtlu.2017.954.
- [25] C. Rodjam, “Factors affecting towards migration of labor from rural areas to Bangkok,” Rajapruk University, Nonthaburi, Thailand, Final Rep, 2011.(in Thai)
- [26] W. Khuan-arch and P. Thinphanga, “Definition of Urban and Urbanization,” in *Urbanisation in Thailand*, Bangkok, Thailand: Environment Institute, pp. 1–34, [Online] Available: <http://www.tei.or.th/thaicityclimate/public/research-46.pdf>
- [27] S. Wang, D. Yu, X. Ma and X. Xing, “Analyzing urban traffic demand distribution and the correlation between traffic flow and the built environment based on detector data and POIs,” *European Transport Research Review*, vol. 10, 2018, Art. no. 50, doi: 10.1186/s12544-018-0325-5.
- [28] X. Wang, L. Gu, T. J. Kwon and T. Z. Qiu, “A geostatistical investigation into the effective spatiotemporal coverage of road weather information systems in Alberta,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2018, 2018, Art. no. 5179694, doi: 10.1155/2018/5179694.
- [29] X. Lin, J. Yang, Z. Tao, J. Song and T. Ren, “Transport investment, economic spatial aggregation, and multiple paths: A joint estimation by spatial panel and structural equation modeling,” *Acta Geographica Sinica*, vol. 73, no. 10, pp. 1970–1984, 2018, doi: 10.11821/dlxb201810011.
- [30] J. Cai, B. Xu, K. K. Y. Chan, X. Zhang, B. Zhang, Z. Chen and B. Xu, “Roles of different transport modes in the spatial spread of the 2009 influenza A(H1N1)

- pandemic in mainland China,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 16, no. 2, 2019, doi: 10.3390/ijerph16020222.
- [31] X. Lin, I. MacLachlan, T. Ren and F. Sun, “Quantifying economic effects of transportation investment considering spatiotemporal heterogeneity in China: a spatial panel data model perspective,” *The Annals of Regional Science*, vol. 63, pp. 437–459, 2019, doi: 10.1007/s00168-019-00937-8.
- [32] X. Q. Hao, Y. P. Shi and X. N. Zhang XN, “The distribution of traffic crashes and the geographical detection of influencing factors in county,” *Transportation Engineering*, vol. 19, no. 6, pp. 53-60, 2019.
- [33] J. B. Zhang and Q. L. Chen, “Analysis of spatial temporal evolution and influencing factor in regional integrated transport efficiency differences,” *Journal of Guizhou University (Social Sciences)*, vol. 37, no. 6, pp. 34-42, 2019.
- [34] S. Li, D. Lyu, G. Huang, X. Zhang, F. Gao, Y. Chen, X. Liu, “Spatially varying impacts of built environment factors on rail transit ridership at station level: A case study in Guangzhou, China,” *Journal of Transport Geography*, vol. 82, 2020, Art. no. 102631, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2019.102631.
- [35] J. Liu, S. Nambisan, X. Li and X. Fu, “Are young Americans carless across the United States? A spatial analysis,” *Transportation Research Part D*, vol. 78, 2020, doi: 10.1016/j.trd.2019.11.026.
- [36] Y. Song, P. Wu, D. Gilmore and Q. Li, “A spatial heterogeneity- based segmentation model for analyzing road deterioration network data in multi- scale infrastructure systems,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 11, pp. 7073–7083, 2020, doi: 10.1109/TITS.2020.3001193.
- [37] B. Lu, M. Liu, Q. Ming, A. Liu and T. Li, “Coupling and coordination situation and dynamic mechanism between tourism and transportation industry in China,” *World Regional Studies*, vol. 29, no. 1, pp. 148–158, 2020, doi: 10.3969/j.issn.1004-9479.2020.01.2018429.
- [38] A. Shrestha and W. Luo, “An assessment of groundwater contamination in Central Valley aquifer, California using geodetector method,” *Annals of GIS*, vol. 23, no. 3, pp. 149–166, 2017 doi: 10.1080/19475683.2017.1346707.
- [39] A. Shrestha and W. Luo “Analysis of groundwater nitrate contamination in the central valley: comparison of the Geodetector Method, Principal Component Analysis and Geographically Weighted Regression,” *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 6, no. 10, pp. 297, 2017, doi: 10.3390/ijgi6100297.
- [40] W. Jinfeng. (2018). Geodetector & Its Applications in Natural & Social Sciences [Online] . Available: <http://www.sssampling.cn/down/181203Geodetector-open.pdf>

การศึกษาความหนืดและความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนน้ำโดยใช้สารเติมแต่ง ผงนาโนกราไฟต์และน้ำมันดอกทานตะวัน

Study on Viscosity and Acid of Lubricant-Water Contamination using Nano- Graphite Powder and Sunflower Oil as Additives

พุทธา จินครวั^{1,*} อภัสรา มีพัว¹ และ สาธิต ทับทิมทอง¹

¹ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา แสนสุข เมือง ชลบุรี 20131

Puttha Jeenkour^{1,*}, Aphatsara Meephu¹ and Satris Tabtimthong¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Saensuk, Chonburi, 20131, Thailand

*Corresponding Author E-mail: puttha@eng.buu.ac.th

Received: Mar 22, 2022; Revised: May 31, 2022; Accepted: Jun 09, 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาความหนืดและระดับความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนน้ำโดยใช้สารเติมแต่ง การเพิ่มขึ้นทั้งค่าความหนืดและความเป็นกรดในน้ำมันหล่อลื่นเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลทำให้สารหล่อลื่นมีประสิทธิภาพ ที่ลดลง ดังนั้นการรักษาคุณภาพคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นจึงกลายเป็นหัวข้อหลักและมีความสำคัญ ตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผล ให้คุณสมบัติของน้ำมันเปลี่ยนแปลงคือการปนเปื้อนจากน้ำ ดังนั้นบทความนี้จึงทำการศึกษาคูสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ ปนเปื้อนน้ำร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนักและเติมสารเติมแต่งร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก สำหรับสารเติมแต่งที่ใช้ได้แก่ผงนาโนกราไฟต์และน้ำมันดอกทานตะวัน โดยตัวอย่างสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะทำการวัดค่าความหนืดสารหล่อลื่นโดยใช้ เครื่องวัดค่าความหนืดไดนามิก ระดับค่าความเป็นกรดวัดโดยใช้ชุดทดสอบค่า PH แบบดิจิทัลและใช้กล้องจุลทรรศน์เพื่อ ขยายภาพลักษณะทางกายภาพการผสมของสารหล่อลื่นที่ศึกษา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้ผงนาโนกราไฟต์ลงใน น้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนน้ำสามารถที่จะคงสภาพความหนืดและค่าความเป็นกรด-ด่างได้ดีกว่าการใช้น้ำมันดอกทานตะวัน เป็นสารเติมแต่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับน้ำมันพื้นฐานที่ไม่มีการปนเปื้อนน้ำ ดังนั้นการใช้ผงนาโน-กราไฟต์มีแนวโน้มที่ ดีสำหรับการใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อป้องกันผลกระทบจากการปนเปื้อนน้ำ

คำสำคัญ: การหล่อลื่น, ปฏิกิริยาออกซิเดชัน, นาโนกราไฟต์, น้ำมันดอกทานตะวัน, ความหนืด, ปริมาณความเป็นกรด-ด่าง

Abstract

This paper studies the viscosities and acid levels of the lubricant-water contamination by using the additives. The increase in both the viscosity and acid in lubricating oil are significant factors contributing to the reduced efficiency of oil. Therefore, maintaining the oil properties has become the main issue and importance. The serious parameter that affects the oil properties is water contamination. Therefore, this article examines the oil properties that are contaminated with 1-5 % water by weight and added 1-5% additives by weight. The additives used include nano graphite powder and sunflower oil. The viscosities of the lubricant samples at different temperatures are measured using a dynamic viscometer. The acid levels

are measured using a digital PH test kit, and the microscope enlarges the physical characteristics of the mixtures of the studied lubricants. The results show that adding the nano-graphite powder to a base oil with water contamination can maintain the viscosity and PH level better than the sunflower oil as an additive compared to a base oil without water contamination. Therefore, the use of nano-graphite powders is promising for use as an additive to prevent the effects of water contamination.

Keywords: Lubrication, oxidation reaction, nano-graphite, sunflower oil, viscosity, acid-base.

1. บทนำ

สารหล่อลื่นถูกใช้อย่างแพร่หลายเพื่อช่วยชีวิตอายุการใช้งานของชิ้นส่วนที่มีการสัมผัสกันเช่น เจอร์นอลแบร์ริง (Journal bearing) แบร์ริงกันรุน (Thrust bearing) ฟันเฟือง (gear) เป็นต้น ดังนั้นการตรวจสอบคุณสมบัติของสารหล่อลื่นจึงมีความสำคัญเนื่องจากสารหล่อลื่นที่เสื่อมคุณภาพจะทำให้ชิ้นส่วนทางกลเกิดการสึกหรอและแตกหักเป็นเหตุให้เครื่องจักรจะต้องหยุดทำงานและเสียเวลาในการเปลี่ยนชิ้นส่วนทำให้เสียโอกาสในการดำเนินการผลิตและต้นทุนสูงขึ้น หนึ่งในสาเหตุที่ทำให้สารหล่อลื่นเสื่อมคุณภาพก่อนเวลาอันควรคือความชื้นหรือการปนเปื้อนของน้ำลงในสารหล่อลื่นซึ่งนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้ความหนืดสูงขึ้น สารภาพของสารหล่อลื่นมีความเป็นกรด ทำให้ชิ้นส่วนทางกลที่สัมผัสกันมีแรงเสียดทานสูงขึ้น เกิดความร้อนไม่เหมาะสมที่จะใช้งานอีกต่อไป จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดที่เพิ่มขึ้นและความเป็นกรดของน้ำมันกับปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งสามารถที่จะสรุปได้ดังนี้ A. Y. El-Naggar และคณะ [1] ได้ศึกษาความเสถียรภาพของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานหลังจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน 50-150 ชั่วโมง โดยอัตราการเกิดออกซิเดชันถูกระบุโดยการเพิ่มขึ้นของค่าความหนืดและค่า TAN (total acid number) ซึ่งเป็นค่าที่วัดความเป็นกรดที่กำหนดโดยปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide) ในหน่วยมิลลิกรัมที่ใช้เพื่อทำให้สภาพความเป็นกรดเป็นกลางสำหรับน้ำมันหนึ่งกรัม C.Georgescu และคณะ [2] ได้อธิบายข้อดีของการใช้น้ำมันจากพืชคือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยได้เปรียบเทียบน้ำมันถั่วเหลืองก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันพบว่าค่าความหนืดสูงขึ้น

สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นโดยการให้ความร้อนและปล่อยให้อากาศเข้าสัมผัสกับน้ำมัน J.K. Mannekote และ S. V. Kailas [3] ได้ศึกษาผลของปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อประสิทธิภาพทางไตรโบโลยี (Tribology) ของน้ำมันหล่อลื่นจากพืชเช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันจากข้าว น้ำมันจากถั่วเป็นต้น โดยทำการให้ความร้อน 60°C เพื่อเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันจากนั้นเก็บน้ำมันไว้ 14-48 วัน และทำการวัดค่าความหนืดและปริมาณกรดไขมันเทียบกับกรณีน้ำมันใหม่พบว่าน้ำมันพืชทุกตัวมีความหนืดสูงขึ้นและมีปริมาณกรดไขมันที่สูงขึ้นหลังจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สำหรับสารเติมแต่งที่มีคุณสมบัติด้านการเกิดออกซิเดชันนั้นได้ถูกอธิบายโดย N. Canter [4] โดยสารด้านการเกิดออกซิเดชันจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารอนุมูลอิสระ (free radicals) เพื่อทำให้เกิดการเสถียรและขัดขวางวงจรการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

วิธีหนึ่งที่จะชะลอหรือรักษาคุณสมบัติของสารหล่อลื่นคือการเติมสารเติมแต่งลงไปในสารหล่อลื่นพื้นฐานสำหรับบทความวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับสารเติมแต่งในสารหล่อลื่นสามารถสรุปได้ดังนี้ น้ำมันดอกทานตะวันและน้ำมันจากถั่วถูกใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อวัตถุประสงค์สำหรับการเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [5] ถูกผสมลงในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (base oil) โดยผ่านกระบวนการ copolymerization งานวิจัยได้นำเสนอการวิเคราะห์ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นและแสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำมันดอกทานตะวันและน้ำมันจากถั่วส่งผลให้ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นและยังมียางงานวิจัยอีกจำนวนหนึ่งที่ได้ศึกษาการปรับปรุงน้ำมันจากพืช (vegetable oils) เป็นสารเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่น [6-8] สำหรับในกรณีที่ใช้น้ำมันเติมแต่งที่เป็นอนุภาคสามารถสรุปได้ดังนี้ สารเติมแต่ง

ชนิดอนุภาคนาโนโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (molybdenum-disulphide, MoS_2) และ อนุภาคนาโนซิงค์-ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ได้ศึกษาเชิงเปรียบเทียบถึงคุณสมบัติการเป็นสารเติมแต่งที่ใช้สำหรับการหล่อลื่น โดยทำการทดสอบคุณสมบัติทางไตรโบโลยี (Tribology) ด้วยวิธี pin-on-disc [9] เพื่อหาการต้านทานการสึกหรอและแรงเสียดทาน เมื่อเติมอนุภาคนาโนทำให้ความหนืดของสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นและลดการสึกหรอ สำหรับการใช้อนุภาคนาโนชนิดไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) อนุภาคนาโนไดมอนด์ (nanodiamond) และไทเทเนียมคาร์ไบด์ (Titanium Carbide, Ti_3C_2) เป็นสารเติมแต่งได้ถูกศึกษา [10–13] และการใช้สารเติมแต่งที่สกัดจากธรรมชาติเป็นอนุภาคนาโนเซลลูโลส (cellulose nanoparticles) [14] แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในช่วงการหล่อลื่นแบบผสม (mixed lubrication) จะลดลงเมื่อเติมอนุภาคนาโนในเซลลูโลสโดยร้อยละการเติมอยู่ที่ 3.3%wt จะส่งผลดีที่สุด จากข้อมูลการทดลอง 0.5%wt ถึง 6.0%wt ในทำนองเดียวกันอนุภาคนาโนกราฟต์ก็ถูกนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่น [15–18] ซึ่งรายงานว่ามีประสิทธิภาพในปริมาณที่เหมาะสมสามารถที่จะช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและเมื่อทดสอบการสึกหรอพบว่าได้ผลที่ดีขึ้น ดังนั้นอนุภาคนาโนกราฟต์ยังคงอยู่ในความสนใจและประยุกต์ใช้ในงานทางด้านการหล่อลื่น [19] อย่างไรก็ตามยังมีบางประเด็นที่ควรศึกษาเพิ่มเติมเช่นผลต่อการรักษาสภาพของน้ำมันเมื่อเกิดการปนเปื้อนน้ำเป็นต้น

จากการวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นการศึกษาสารเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่นยังคงมีความน่าสนใจ ดังนั้นบทความนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการใช้อนุภาคนาโนกราฟต์ซึ่งมีผลดีช่วยลดแรงเสียดทานและน้ำมันดอกทานตะวันซึ่งเป็นสารที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยวิเคราะห์ค่าความหนืดสารหล่อลื่นและค่าความเป็นกรดซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกสภาพของน้ำมันหล่อลื่น โดยในบทความนี้ได้ทำให้น้ำมันเสื่อมคุณภาพโดยใช้ความร้อนและการปนเปื้อนน้ำเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและได้ปล่อยน้ำมันตัวอย่างไว้เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยค่าคุณสมบัติของน้ำมันตัวอย่างจะทดสอบเทียบกับน้ำมันพื้นฐานที่ไม่ผ่านการใช้ (Fresh base oil) เป็นตัวแทนของสภาพน้ำมันที่มีคุณภาพที่ดี

2. วัสดุอุปกรณ์และทฤษฎี

ตารางที่ 1–3 แสดงค่าคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานข้อมูลจากผู้ผลิต [20] สารเติมแต่งน้ำมันดอกทานตะวัน [21–23] และสารเติมแต่งผงนาโนกราฟต์ข้อมูลจากผู้ผลิต [24] น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base Oil, BO) ที่ใช้ในงานบทความนี้เป็นประเภทจาระบีเหลว (MOBILUX EP0 Grease) ซึ่งเป็นเกรดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการหล่อลื่นชิ้นส่วนทางกลที่รับภาระสูงในเครื่องจักรอุตสาหกรรม โดยช่วงอุณหภูมิที่ทำงานผู้ผลิตแนะนำอยู่ที่ -20°C ถึง 130°C หรืออาจจะสูงกว่านี้ได้ถ้าความถี่ในการเปลี่ยนถ่ายสารหล่อลื่นมากขึ้น ที่อุณหภูมิ 40°C และที่ความดันบรรยากาศค่าความหนืดคิเนมาติก (kinematic viscosity) มีค่าเท่ากับ $160 \text{ mm}^2/\text{s}$ หรือมีค่า $0.16 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ในหน่วยของความหนืดไดนามิกและมีค่าความหนาแน่น (density) ที่อุณหภูมิ 15°C เท่ากับ $917 \text{ kg}/\text{m}^3$ มีจุดวาบไฟ (flash point) มากกว่า 204°C และจุดเดือดมากกว่า 316°C ซึ่งอยู่สูงกว่าอุณหภูมิที่ทดลองในงานบทความนี้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของน้ำมันพื้นฐานจาระบี (MOBILUX EP0 Grease)

รายการ	ค่า
ช่วงอุณหภูมิการหล่อลื่น [$^\circ\text{C}$]	-20 – 130
ความหนืดไดนามิกที่อุณหภูมิ 40°C [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	0.16
ความหนาแน่นอุณหภูมิ 15°C [kg/m^3]	917
อุณหภูมิจุดเดือด [$^\circ\text{C}$]	>316
ระยะจมน้ำมันในเนื้อจาระบีที่ 25°C [หน่วยวัดมาตรฐาน ASTM D217]	370
อุณหภูมิจุดวาบไฟ [$^\circ\text{C}$]	>204

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของน้ำมันดอกทานตะวัน

รายการ	ค่า
ความหนืดไดนามิกที่อุณหภูมิ 40°C [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	0.035
ความหนาแน่นอุณหภูมิ 40°C [kg/m^3]	900
อุณหภูมิจุดเกิดควัน [$^\circ\text{C}$] [22]	232
อุณหภูมิจุดวาบไฟ [$^\circ\text{C}$] [23]	>350

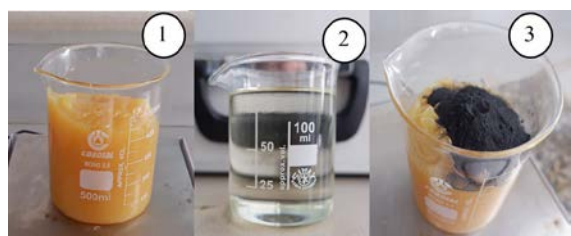
ตารางที่ 3 คุณสมบัติของผงนาโนกราฟไฟต์

รายการ	ค่า
ความหนาแน่น [kg/m^3]	2,260
อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting point) [$^{\circ}\text{C}$]	3,550
มอดูลัสของยัง [GPa]	21
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน [$\mu\text{m/m-K}$]	4.9
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค [nm]	50

สารเติมแต่งที่เติมลงในสารหล่อลื่นพื้นฐานในบทความนี้มีสองประเภทได้แก่ น้ำมันดอกทานตะวันซึ่งเป็นของเหลวและอนุภาคนาโนกราฟไฟต์ซึ่งเป็นส่วนของแข็ง น้ำมันดอกทานตะวันมีค่าความหนืดไดนามิก (dynamic viscosity) ที่อุณหภูมิ 40°C เท่ากับ 0.035 Pa.s มีค่าความหนาแน่น (density) เท่ากับ 0.919 g/cm^3 และมีอุณหภูมิจุดเกิดควัน (smoke point) เท่ากับ 232°C

สำหรับผงนาโนกราฟไฟต์ที่ใช้ในบทความนี้มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยจากข้อมูลผู้ผลิตประมาณ 50 nm มีความหนาแน่น (density) เท่ากับ $2,260 \text{ kg/m}^3$ มีอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting point) เท่ากับ $3,550^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นขณะที่ทดสอบจะไม่มีมีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตเห็นด้วยตาของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน สารเติมแต่งน้ำมันดอกทานตะวันและผงนาโนกราฟไฟต์แสดงตามรูปที่ 1

สำหรับการผสมน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานกับสารเติมแต่งจะผ่านกระบวนการให้ความร้อน โดยใช้เครื่องกวน



รูปที่ 1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและสารเติมแต่ง: หมายเลข

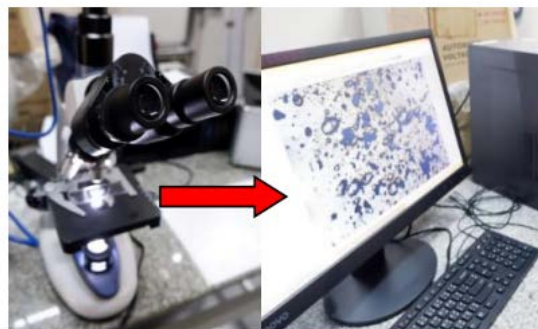
(1) จานบีเหลว หมายเลข (2) น้ำมันดอกทานตะวันและหมายเลข (3) ผงนาโนกราฟไฟต์

ผสมสารเคมีชนิดให้ความร้อน (Hot plate magnetic stirrer) ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 30 นาที ตามที่แสดงหมายเลข 1 ในรูปที่ 2 และใช้เครื่องวัดความหนืดรุ่น viscometer: Serie RI:2:M ในการหาค่าความหนืดของสารหล่อลื่นจากนั้นใช้เครื่องวัดค่าความเป็นกรดด้วยเครื่องวัดค่า PH แบบดิจิตอลแบบพกพา ยี่ห้อ Portable PH Tester รุ่น TDS ตามที่แสดงด้วยหมายเลข 2 และ 3 ในรูปที่ 2



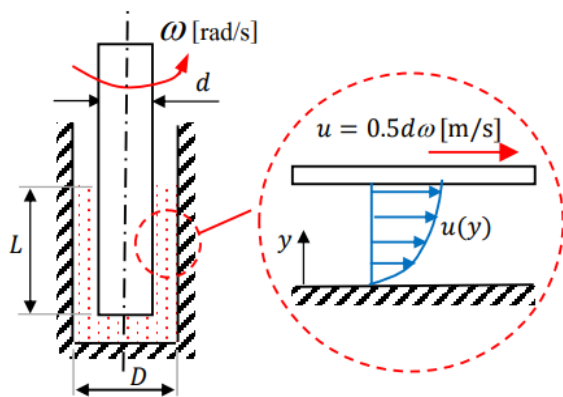
รูปที่ 2 เครื่องผสมสาร วัดความหนืดและค่า PH

เพื่อที่จะสังเกตเห็นลักษณะทางกายภาพหลังจากผสมสารเติมแต่งและการปนเปื้อนของน้ำในน้ำมันหล่อลื่น ดังนั้นจึงใช้กล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ NUV TECH, Rockville, MD, USA ตามที่แสดงในรูปที่ 3 ด้านซ้าย กล้องจุลทรรศน์จะช่วยขยายภาพตัวอย่างหยดสารหล่อลื่นที่แผ่นกระจกทำให้เห็นลักษณะการผสมได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยภาพที่ถ่ายได้จากกล้องจุลทรรศน์จะถูกถ่ายโอนข้อมูลเป็นไฟล์รูปภาพส่งไปยังคอมพิวเตอร์ดังที่แสดงในรูปที่ 3 ด้านขวามือ



รูปที่ 3 การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์

สำหรับการวัดค่าความหนืดของสารหล่อลื่นนั้นอาศัยหลักการทางด้านรีโอโลยี (Rheology) [25] ซึ่งเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน (shear stress) ของของไหลกับค่าอัตราความเครียดเฉือน (shear strain rate) โดยค่าความชันของกราฟจะเป็นค่าความหนืดของของไหล **รูปที่ 4** แสดงแผนภาพหลักการการวัดความหนืดด้วยวิธีการหมุนของแท่งทรงกระบอก (spindle cylinder) ของเครื่องวัดความหนืดชนิดหมุน (rotational viscometer)



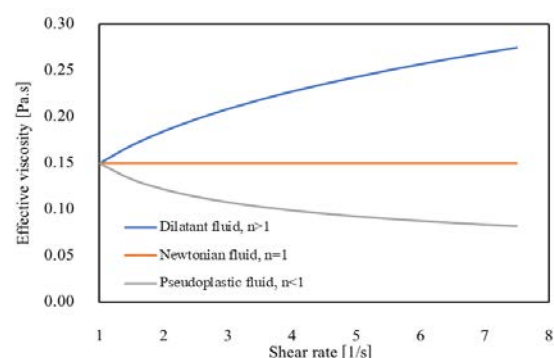
รูปที่ 4 การวัดความหนืดชนิดหมุน

สำหรับแท่งหมุนนั้นมีหลายชนิด ความเหมาะสมของการใช้งานขึ้นอยู่กับประเภทของของไหลเช่น แท่งหมุนแบบทรงกระบอก (cylinder) แผ่นจาน (disc) และ กรวย (cone) เป็นต้น ในการทดสอบแท่งหมุนจะหมุนด้วยความเร็วรอบเชิงมุม ω rad/s ตามที่ได้กำหนดค่าไว้ แรงบิดหรือทอร์ก T N.m (torque) จากแท่งจะกระทำกับผิวของไหลด้วยแรงเฉือน $\tau = T \cdot d/2$ ซึ่งทำให้ได้ค่าความเค้นเฉือน $\tau = \tau/A$ โดยที่ $A = \pi dL$ คือพื้นที่ผิวของแท่งหมุนสัมผัสกับของไหล ด้วยแรงเฉือนทำให้ของไหลเกิดการเสียรูปและเกิดการไหลด้วยรูปร่างความเร็ว (velocity profile) $u(y)$ ดังนั้นอัตราความเครียดเฉือน $\dot{\gamma}$ จะมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเทียบกับระยะตามแกน y หรือ du/dy ในกรณีของไหลที่มีพฤติกรรมเป็นนอนนิวโทเนียน (Non-Newtonian fluid) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนจะไม่เป็นเชิงเส้น ในที่นี้สามารถที่จะเขียนความสัมพันธ์โดยใช้โมเดลกฎเพาเวอร์ (Power-law model) ตามที่แสดงในสมการที่ (1) และ (2) [26]

$$\tau = \eta_e \dot{\gamma} \quad (1)$$

$$\eta_e = \eta \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2)$$

โดยที่ η_e เป็นค่าความหนืดยังผล (effective viscosity) ซึ่งสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือน τ และอัตราความเครียดเฉือน $\dot{\gamma}$ จากข้อมูลผลการทดลองสำหรับตัวแปร n และ η เป็นค่าดัชนีกฎเพาเวอร์ (power-law index) และความหนืดยังผลที่ $\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$ ตามลำดับซึ่งสามารถที่จะคำนวณหาได้จากการประมาณค่าด้วยฟังก์ชันของสมการเลขยกกำลัง (power function) จากข้อมูลระหว่าง η_e และ $\dot{\gamma}$ พฤติกรรมของของไหลนั้นสามารถที่จะจำแนกได้โดยค่า n โดยที่ค่า $n = 1$ ค่าความหนืดไม่เปลี่ยนแปลงจะเป็นของไหลชนิดนิวโทเนียน (Newtonian fluid) ในกรณีที่ $n > 1$ ความหนืดจะเพิ่มขึ้นตาม $\dot{\gamma}$ ของไหลจะเป็นชนิดนอนนิวโทเนียนแบบไดลาแทนต์ (non-Newtonian, dilatant fluid) และถ้า $n < 1$ ความหนืดจะลดลงตาม $\dot{\gamma}$ ที่เพิ่มขึ้น ของไหลที่มีพฤติกรรมในลักษณะนี้จะเป็นของไหลชนิดนอนนิวโทเนียนแบบซูโดพลาสติก (non-Newtonian, pseudoplastic fluid) **รูปที่ 5** แสดงตัวอย่างประเภทของของไหลที่ได้จากสมการที่ (2) โดยสุ่มค่า $\eta = 0.15$ และ $\dot{\gamma} = 1$ ถึง 7.5 s^{-1}

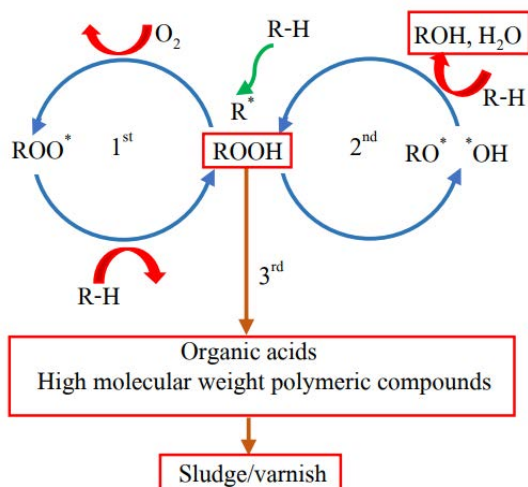


รูปที่ 5 ประเภทของของไหลตามค่าความหนืด

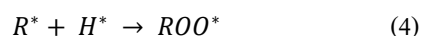
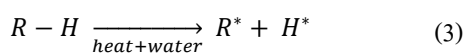
กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้นทำให้เกิดสารประกอบที่เป็นกรดและสารประกอบพอลิเมอร์โมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดตะกอนเหนียว (sludge and varnish) **รูปที่ 6** แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระดับ ได้แก่ ขั้นตอนเริ่มต้น

(initiation stage) แสดงใน loop 1st ขั้นตอนลูกกลมหรือแพร่กระจาย (propagation) แสดงใน loop 2nd และขั้นตอนสิ้นสุด (termination) แสดงลูกศร 3rd [27]

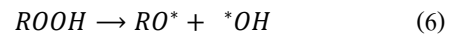
ขั้นตอนเริ่มต้น น้ำมันหล่อลื่นเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) ที่มีอะตอมของคาร์บอน 20–70 อะตอมอยู่ในรูปแบบ $R-H$ เมื่ออยู่ภายใต้การให้ความร้อนซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้พันธะระหว่าง $R-H$ แตกออกได้เป็นอนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอน R^* (hydrocarbon free radicals) ตามที่ได้แสดงในสมการที่ (3) อนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอน R^* ไม่เสถียรเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจน O_2 ได้อนุมูลเปอร์ออกไซด์ ROO^* (peroxide radicals) แสดงในสมการที่ (4) จากนั้นอนุมูลเปอร์ออกไซด์ ROO^* เข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอน $R-H$ ของน้ำมันหล่อลื่นได้สารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ $ROOH$ (hydroperoxides) และอนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอน R^* ตามที่ได้แสดงในสมการ (5)



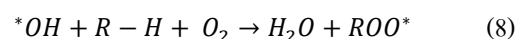
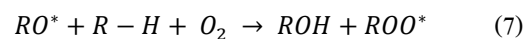
รูปที่ 6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน



ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนแพร่กระจายหรือลูกกลมสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ $ROOH$ จากสมการที่ (5) จะแตกออกได้อนุมูล RO^* และ *OH แสดงในสมการที่ (6)



จากนั้นอนุมูล RO^* เข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบ $R-H$ และโมเลกุล O_2 ได้สารประกอบประเภทแอลกอฮอล์ (alcohols) แอลดีไฮด์ (aldehyde) และ คีโตน (ketone) ในรูปแบบ ROH ที่มีสภาพเป็นกรดแสดงในสมการที่ (7) ส่วนอนุมูล *OH จากสมการที่ (6) จะเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบ $R-H$ และโมเลกุล O_2 ได้ H_2O และอนุมูล ROO^* แสดงในสมการที่ (8) อนุมูลเปอร์ออกไซด์ ROO^* ตามที่ได้แสดงในสมการที่ (7) และ (8) เข้าทำปฏิกิริยาตามขั้นตอนที่ 1 อีกครั้งตามสมการที่ (5) ก็จะเกิดการสะสมสารประกอบ $ROOH$ และได้อนุมูลอิสระ R^* เข้าทำปฏิกิริยาตามขั้นตอนที่ 1 อีกครั้ง ดังนั้นในขั้นตอนที่ 1 และ 2 จะเกิดซ้ำและเกิดปริมาณสะสมของสารประกอบ $ROOH$ และ ROH มากขึ้น



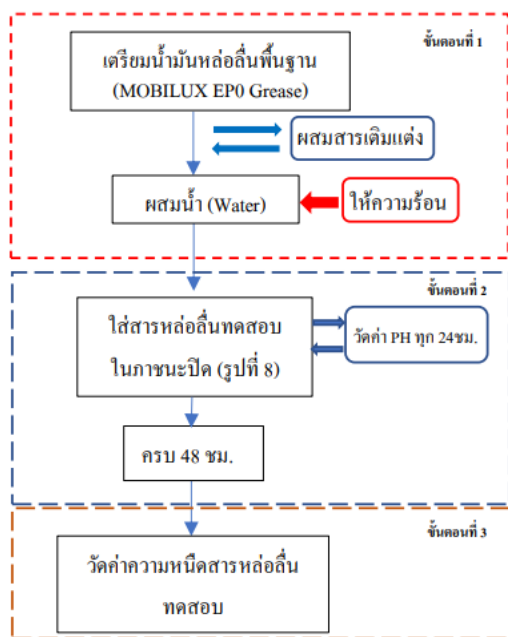
ขั้นตอนที่ 3 จากสารประกอบ $ROOH$ จะได้สารประกอบประเภทแอลกอฮอล์ (alcohols) แอลดีไฮด์ (aldehyde) และ คีโตน (ketone) ในรูปแบบ ROH และน้ำ H_2O เพิ่มขึ้นทำให้เกิดสารประกอบที่เป็นกรดอินทรีย์ (organic acids) และ พอลิเมอร์มวลโมเลกุลสูง ความหนืดของสารหล่อลื่นจะสูงขึ้น ในขั้นตอนนี้สารหล่อลื่นจะเสื่อมคุณภาพจนไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไป ดังนั้นตามขั้นตอนดังกล่าวทำให้น้ำมันหล่อลื่นหลังจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมีสภาพที่มีความหนืดสูงขึ้นและมีความเป็นกรดที่สูงขึ้น

3. วิธีการศึกษา

ผลของการปนเปื้อนของน้ำลงในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและผลของการเติมสารเติมแต่งศึกษาโดยการทดสอบคุณสมบัติของของไหลโดยการวัดค่าความหนืดและค่าความเป็นกรด สำหรับการศึกษาผลการปนเปื้อนของน้ำในน้ำมันพื้นฐานจะทำการศึกษาสัดส่วนการปนเปื้อนที่ 1% wt, 3%wt และ 5%wt ตามลำดับและทำการทดสอบที่อุณหภูมิ $T = 35^\circ\text{C} - 150^\circ\text{C}$

สำหรับการศึกษาผลของการเติมสารเติมแต่งประเภทน้ำมันดอกทานตะวันและผงนาโนกราฟิต์จะเลือกกรณีที่น้ำมันพื้นฐานมีการปนเปื้อนด้วยน้ำ 5%wt ภายใต้สมมติฐานที่ว่า การปนเปื้อนด้วยน้ำที่มากจะเป็นตัวเร่งทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมากขึ้น ในการศึกษาการเติมสารเติมแต่งทั้งสองชนิดจะทำการศึกษาที่อัตราส่วน 1% wt, 3%wt และ 5%wt ตามลำดับ และศึกษาในขณะที่อุณหภูมิสารหล่อลื่นเท่ากับ 150°C สำหรับขั้นตอนในการศึกษาจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมสารหล่อลื่นทดสอบ ขั้นตอนที่ 2 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและ ขั้นตอนที่ 3 การวัดค่าคุณสมบัติสารหล่อลื่น ดังที่แสดงด้วยแผนภาพในรูปที่ 7

รูปที่ 8 แสดงสารหล่อลื่นทดสอบปนเปื้อนน้ำ 5%wt และผสมผงนาโนกราฟิต์ 1% wt, 3%wt และ 5%wt ตามลำดับในขั้นตอนที่ 2 โดยที่ภาชนะจะเป็นระบบปิดที่ปิดโดยแผ่นพลาสติกใสและกันเป็นห้อง 3 ห้อง



รูปที่ 7 ขั้นตอนการศึกษา



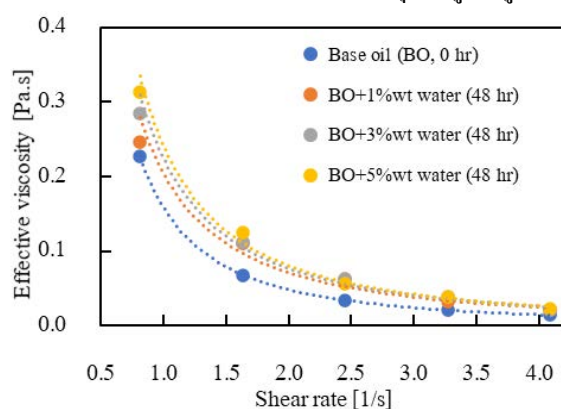
รูปที่ 8 ภาชนะปิดสำหรับน้ำมันผสมสารเติมแต่ง

4. ผลการศึกษา

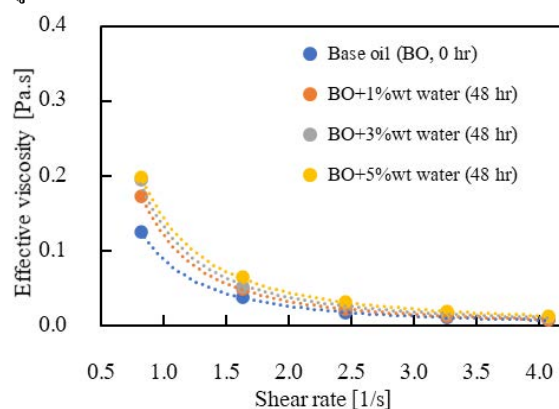
สำหรับผลการศึกษาจะแสดงค่าความหนืด ค่าความเป็นกรด และภาพจากกล้องจุลทรรศน์ตามที่ได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อวิธีการศึกษา สำหรับความหนืดในกรณีที่น้ำมันพื้นฐานปนเปื้อนน้ำแสดงในรูปที่ 9 โดยสัญลักษณ์ BO แทนน้ำมันพื้นฐานซึ่งเป็นน้ำมันใหม่ (Fresh base oil) ที่ไม่ผ่านการใช้เป็นตัวแทนน้ำมันที่ไม่เสื่อมคุณภาพทำการทดสอบทันที ไม่ปล่อยทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนน้ำมันพื้นฐานที่ปนเปื้อนน้ำจะใช้สัญลักษณ์ BO + %wt ทำการทดสอบโดยผสมน้ำ 1% wt, 3%wt และ 5%wt โดยทดสอบหลังจากทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง โดยที่รูปที่ 9 (ก)-(ค) วัดความหนืดที่อุณหภูมิ 35°C, 80°C, และ 150°C ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทุกกรณีพฤติกรรมของสารหล่อลื่นที่ทดสอบมีพฤติกรรมแบบนอนนิวโทเนียนและเป็นแบบซูโดพลาสติกที่มีค่าดัชนีกฎเพอร์เวอร์ $n < 1$ ในขณะที่ยังคงผลมีค่าลดลงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น เมื่อทำการพิจารณาผลของการปนเปื้อนของน้ำพบว่าในทุกอุณหภูมิที่ศึกษาได้ผลไปในทิศทางเดียวกันคือการปนเปื้อนของน้ำในน้ำมันพื้นฐานส่งผลให้ค่าความหนืดสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าความหนืดเมื่อน้ำมันปนเปื้อนน้ำนั้นเกิดขึ้นได้เนื่องจากสาเหตุดังนี้ประการแรกเนื่องจากน้ำมันกับน้ำไม่สามารถที่จะผสมเป็นเนื้อเดียวได้เมื่อทำการกวนหรือปั่นของผสมจะมีลักษณะเป็นอิมัลชัน (Emulsion) หรือคอลลอยด์ สำหรับบทความนี้น้ำจะแตกตัวเป็นเม็ดหรือหยดอนุภาคคอลลอยด์ (dispersed phase) และน้ำมันเป็นส่วนเนื้อเดียว (continuous phase) จากงานวิจัยหลายบทความที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับปริมาณน้ำในน้ำมันดิบ [28–30] ได้สรุปว่าการเกิดเม็ดหรือหยดของน้ำส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนืดอย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของความหนืดจะมีความชัดเจนเมื่อมีสัดส่วนของน้ำอยู่ประมาณ 20% โดยเฉพาะงานของ S.Daria และคณะ [30] แสดงให้เห็นว่าการมีน้ำในน้ำมันดิบในสัดส่วน 1–10% ที่อุณหภูมิ 30°C ความหนืดแตกต่างจากกรณีไม่มีน้ำปนเล็กน้อย อีกประการหนึ่งความหนืดยังเพิ่มขึ้นได้เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันตามที่ได้อธิบายในสมการที่ (3)–(8) และจากทบทวนวรรณกรรม [1–3] เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นกระบวนการที่อาศัยเวลา ดังนั้นความหนืดเริ่มต้นของน้ำมันพื้นฐาน (BO, 0 hr)

ความหนืดเริ่มต้นหลังจากผสมน้ำลงในน้ำมันพื้นฐาน (BO+5%wt water, 0 hr) และความหนืดสุดท้ายหลังจากปล่อยทิ้งไว้ (BO+5%wt water, 48 hr) จึงนำมาเปรียบเทียบกับกันตามที่แสดงในรูปที่ 9(ง) จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความหนืดที่เวลาเริ่มต้นหลังจากผสมน้ำ 5%wt เนื่องจากผลของหยดน้ำ (dispersed phase) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเทียบกับกรณีความหนืดเริ่มต้นของน้ำมันพื้นฐานที่ไม่มีน้ำปนเปื้อน เนื่องจากปริมาณของน้ำที่ปนเปื้อนมีน้อยซึ่งสอดคล้องกับงานของ S.Daria และคณะ[30] ดังนั้นความหนืดที่เวลาสุดท้าย (48 hr) ของน้ำมันปนเปื้อนน้ำ 5%wt เพิ่มขึ้นจากขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

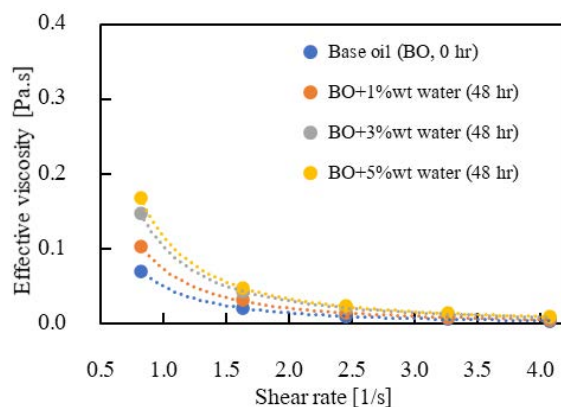
รูปที่ 10 เป็นการเปรียบเทียบกรณีที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสำหรับน้ำมันพื้นฐานปนเปื้อนน้ำ 5%wt เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเมื่อใช้งานจะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น



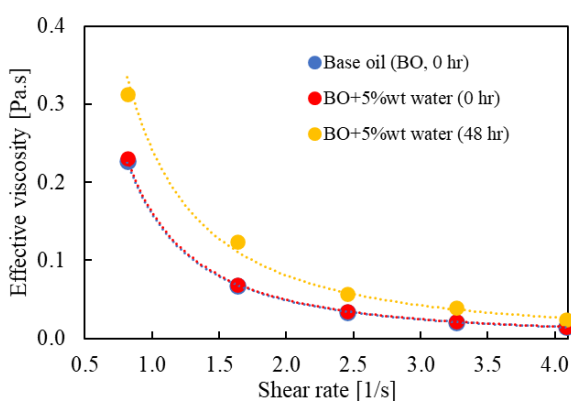
(ก)



(ข)



(ค)

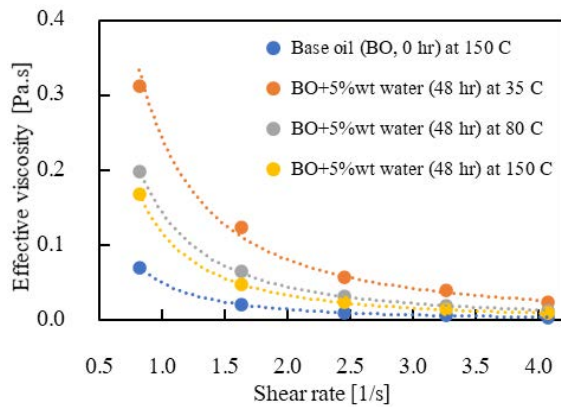


(ง)

รูปที่ 9 ความหนืดน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานปนเปื้อนน้ำ: (ก) $T=35^{\circ}\text{C}$, (ข) $T=80^{\circ}\text{C}$, (ค) $T=150^{\circ}\text{C}$ และ (ง) ความหนืดเริ่มต้นและเวลาสุดท้ายที่ $T=35^{\circ}$

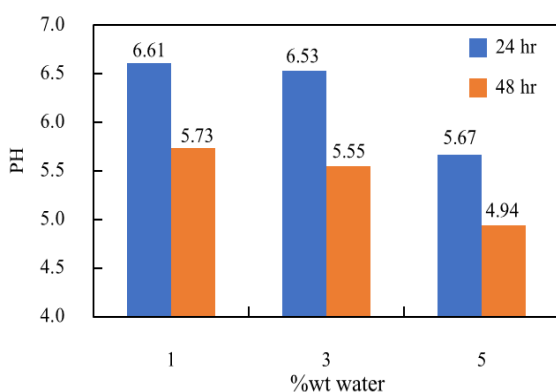
จากผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าความหนืดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตามในกรณีที่ปนเปื้อนน้ำค่าความหนืดยังคงสูงกว่ากรณีน้ำมันพื้นฐานที่ไม่มีการปนเปื้อน เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 150°C ความหนืดสูงสุดกรณีน้ำมันปนเปื้อนน้ำมีขนาดประมาณ 2 เท่าของน้ำมันพื้นฐานที่ไม่ผ่านการใช้

รูปที่ 11 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่นทดสอบโดยทำการวัดค่า PH ระดับค่า $\text{PH} < 7.0$ แสดงถึงความเป็นกรดที่เพิ่มขึ้น สภาพความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่นเกิดจากผลของปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะได้ผลิตภัณฑ์ของสารประกอบประเภทที่มีฤทธิ์เป็นกรดเช่น แอลกอฮอล์ (alcohols) แอลดีไฮด์ (aldehyde) และ คีโตน (ketone) ในรูปแบบ ROH [27]



รูปที่ 10 ผลของอุณหภูมิต่อความหนืดที่เวลาสุดท้าย

ดังนั้นเมื่อมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้นจะได้สารประกอบที่เป็นกรดเพิ่มขึ้นด้วยและทำให้สภาพของน้ำมันมีปริมาณความเป็นกรดที่สูงขึ้น ดังนั้นจากกราฟรูปที่ 11 เมื่อเวลาผ่านไปน้ำมันทดสอบมีค่าความเป็นกรดสูงขึ้นจากค่า PH ที่ลดลงต่ำกว่า 7 สะท้อนให้เห็นว่าในช่วงเวลาที่ปล่อยน้ำมันทดสอบไว้ 24 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมงตามลำดับนั้นเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเมื่อพิจารณาผลการปนเปื้อนน้ำต่อสภาพความเป็นกรดพบว่าเมื่อปริมาณของน้ำที่ปนเปื้อนเพิ่มขึ้นสภาพความเป็นกรดของน้ำมันทดสอบสูงขึ้นด้วยในที่นี้จะสังเกตเห็นได้ว่าค่า PH ในกรณีที่มีน้ำปนเปื้อนที่ 5%wt จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อทำการวัดที่ 24 ชั่วโมงและ 48 ชั่วโมง



รูปที่ 11 ระดับค่า PH ของน้ำมันปนเปื้อนน้ำ

จากผลการศึกษาการปนเปื้อนน้ำในน้ำมันหล่อลื่นจากการวัดความหนืดและปริมาณความเป็นกรด ค่าที่เพิ่มขึ้นนั้นแสดงให้เห็นว่าน้ำเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลให้อัตรา

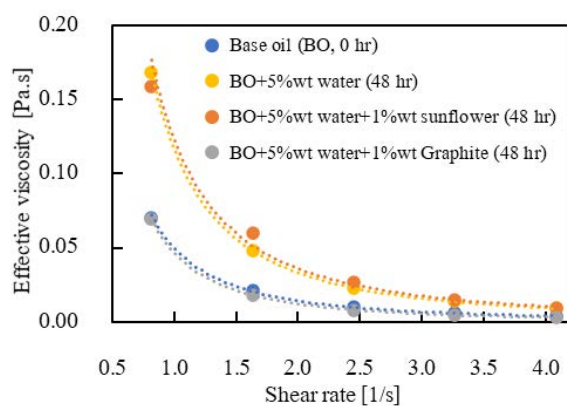
การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงขึ้น จากบทความของ P.Madhaven และ N.C.Werner [31] ได้แสดงผลการทดสอบและให้ความเห็นว่าน้ำส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้น ปัจจัยหลักที่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้นนั้นคือความร้อน ปริมาณออกซิเจนและตัวเร่งปฏิกิริยา บทความนี้มีความเห็นว่ามีความเป็นไปได้เมื่อปริมาณของน้ำเพิ่มขึ้นในขณะผสมโดยการกวนหรือปั่นภายใต้การให้ความร้อนจะเกิดจำนวนเม็ดหยดน้ำ (droplet) มากขึ้นการกระจายอยู่ในน้ำมันส่งผลให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสต่อประสานระหว่างน้ำกับน้ำมันมีมากขึ้น (water/oil interfacial area) เมื่อเม็ดหยดน้ำเคลื่อนที่หรือน้ำมันเกิดการไหลจะเกิดการเสียดสีที่ผิวสัมผัสประกอบกับการให้ความร้อนทำให้น้ำมันที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (R-H) แยกตัวเป็นอนุมูลอิสระและปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำเข้าทำปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

สำหรับการศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อการรักษาสภาพของน้ำมันนั้นจะควบคุมปัจจัยภายนอกโดยการใช้ น้ำปนเปื้อนที่ 5%wt เท่า ๆ กันสำหรับทุกอัตราส่วนผสมของสารเติมแต่งที่ศึกษาและใช้ภาชนะปิดควบคุมการสัมผัสกับอากาศภายนอก ผลของการเติมสารเติมแต่งในน้ำมันที่ปนเปื้อนน้ำแสดงในรูปที่ 12 โดยแสดงค่าความหนืดของน้ำมันทดสอบที่ปล่อยทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง ทำการวัดความหนืดที่อุณหภูมิ 150°C รูปที่ 12 (ก)-(ค) แสดงสัดส่วนการเติมสารเติมแต่งน้ำมันดอกทานตะวันและผงนาโนกราไฟต์ในอัตราส่วน 1%wt, 3%wt และ 5%wt ตามลำดับ โดยทำการเปรียบเทียบกับค่าความหนืดในกรณีน้ำมันใหม่ที่ไม่มีการปนเปื้อนและไม่ผ่านการใช้ (Base oil, BO, 0 hr) ซึ่งเป็นกรณีที่น้ำมันหล่อลื่นปกติอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้และเปรียบเทียบกับกรณีน้ำมันพื้นฐานปนเปื้อนน้ำ 5%wt ที่ปล่อยทิ้งไว้ 48 ชั่วโมงซึ่งเป็นตัวแทนในกรณีที่น้ำมันเสื่อมคุณภาพอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้นผลการเติมสารเติมแต่งถูกคาดหวังว่าจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับกรณี BO

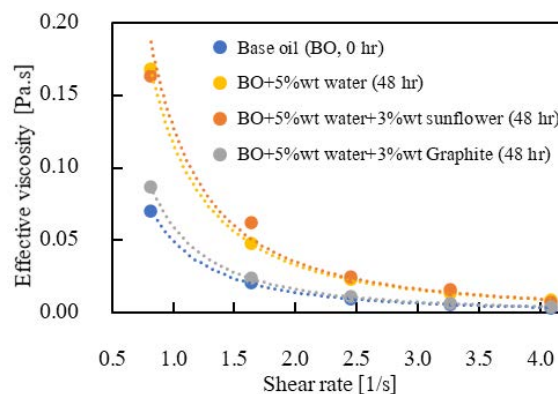
ผลการทดสอบวัดค่าความหนืดแสดงให้เห็นว่ากรณีที่เติมผงนาโนกราไฟต์เป็นสารเติมแต่งในทุกสัดส่วนผสมเทียบกับกรณีเติมน้ำมันดอกทานตะวันพบว่ากรณีใช้ผงนาโนกราไฟต์ได้ค่าความหนืดที่ใกล้เคียงกับกรณีน้ำมันพื้นฐานที่ไม่มีการ

ปนเปื้อนน้ำหรือกราฟเส้น BO มากที่สุด ในขณะที่การเติมน้ำมันดอกทานตะวันเป็นสารเติมแต่งในทุกสัดส่วนผสมพบว่าความหนืดมีค่าสูงและใกล้เคียงกับกรณีที่น้ำมันพื้นฐานปนเปื้อนน้ำ (BO+5%wt water) เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยมวลของผงนาโนกราฟไฟต์เพิ่มขึ้นพบว่าค่าความหนืดจะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามหลักการผสมของเหลวกับอนุภาคที่เป็นของแข็ง [32] อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นในที่นี้ยังคงมีค่าน้อยกว่ากรณีที่น้ำมันปนเปื้อนน้ำ

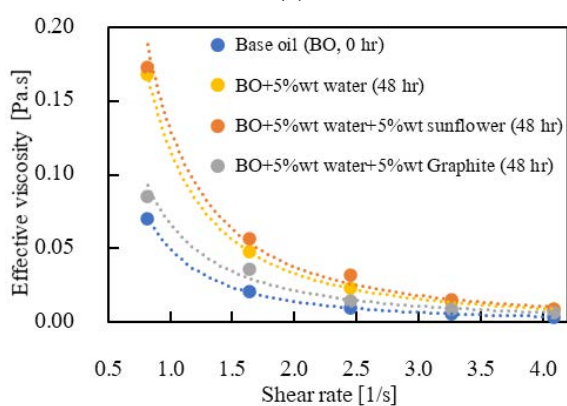
รูปที่ 12(ง) แสดงค่าความหนืดเริ่มต้นหลังจากผสมสารเติมแต่ง 5%wt (0 hr) และความหนืดสุดท้ายหลังจากปล่อยไว้ 48 ชั่วโมง (48 hr) ที่เวลาเริ่มต้นการผสมผงนาโนกราฟไฟต์ให้ค่าความหนืดที่สูงกว่ากรณีใช้น้ำมันดอกทานตะวันแต่เมื่อเวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง กรณีที่ใส่ผงนาโนกราฟไฟต์ความหนืดเพิ่มขึ้นจากเวลาเริ่มต้นเล็กน้อย ส่วนการใช้น้ำมันดอกทานตะวันความหนืดเพิ่มขึ้นจาก



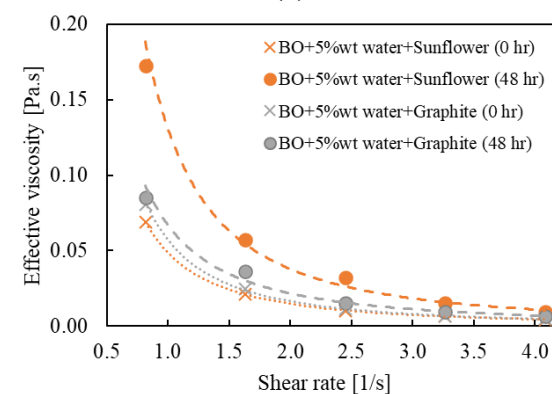
(ก)



(ข)



(ค)



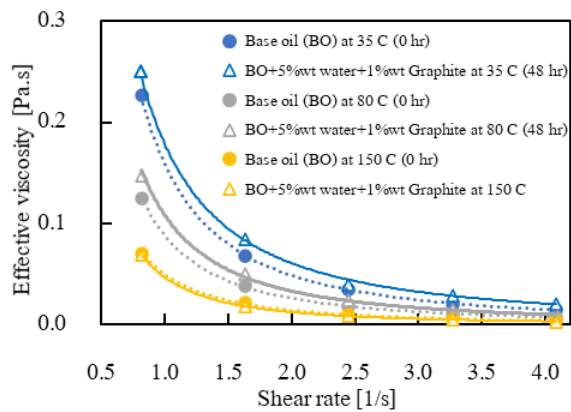
(ง)

รูปที่ 12 ความหนืดน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานปนเปื้อนน้ำผสมการเติมแต่งที่ $T = 150^\circ\text{C}$: (ก) 1%wt, (ข) 3%wt,

(ค) 5%wt, และ (ง) ความหนืดเริ่มต้นและสุดท้ายที่เติม 5%wt สารเติมแต่ง

เวลาเริ่มต้นค่อนข้างมาก การเพิ่มขึ้นของความหนืดในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นผลมาจากน้ำมันเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สำหรับการเติมผงนาโนกราฟไฟต์ในปริมาณ 1%wt ได้ค่าความหนืดที่ใกล้เคียงกรณี BO มากที่สุด เนื่องจากผลของการเพิ่มขึ้นของความหนืดเริ่มต้นเนื่องจากผสมอนุภาคของแข็งลดลง

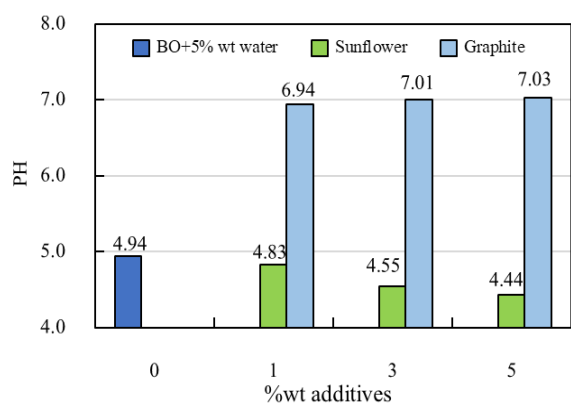
รูปที่ 13 ได้เปรียบเทียบความหนืดน้ำมันปนเปื้อนน้ำกรณีใส่ผงนาโนกราฟไฟต์ปริมาณ 1%wt ที่อุณหภูมิ 35°C , 80°C และ 150°C เปรียบเทียบกับกรณี BO ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติมผงนาโนกราฟไฟต์จะมีค่าความหนืดที่สูงกว่ากรณี BO โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 35°C และ 80°C อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นในที่นี้น้อยกว่ากรณีที่น้ำมันปนเปื้อนน้ำ (BO + 5%wt water) เมื่อพิจารณาตาม **รูปที่ 10** ประกอบที่อุณหภูมิ 35°C , 80°C และ 150°C ตามลำดับ



รูปที่ 13 ความหนืดน้ำมันทดสอบที่เวลาสุดท้ายภายใต้ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับน้ำมันสภาพดี

รูปที่ 14 แสดงปริมาณความเป็นกรดด้วยค่า PH หลังจากทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง พิจารณาในกรณีที่ได้เติมสารเติมแต่งเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการเติมสารเติมแต่งโดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมเปอร์เซ็นต์โดยมวล 1%wt 3%wt และ 5%wt ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากรณีที่เติมสารเติมแต่งชนิดผงนาโนกราไฟต์ทุกสัดส่วนผสมที่ศึกษาค่า PH มีค่าประมาณ 7.0 ซึ่งบ่งบอกถึงสภาพความเป็นกลาง ในขณะที่การเติมสารเติมแต่งชนิดน้ำมันดอกทานตะวันมีสภาพความเป็นกรดสูงที่สุดจากค่า PH ที่ต่ำที่สุดโดยเฉพาะที่สัดส่วนผสม 5%wt ค่า PH มีค่าเท่ากับ 4.44 และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกรณีน้ำมันพื้นฐานปนเปื้อนน้ำที่ 5%wt พบว่าทุกสัดส่วนผสมน้ำมันดอกทานตะวันมีค่า PH ที่ต่ำกว่า ดังนั้นการใช้น้ำมันดอกทานตะวันส่งผลให้คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นลดลง

จากผลที่ได้ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการใช้น้ำมันดอกทานตะวันในสภาพของเหลวเป็นสารเติมแต่งไม่สามารถ



รูปที่ 14 ระดับค่า PH ภายใต้การผสมสารเติมแต่ง

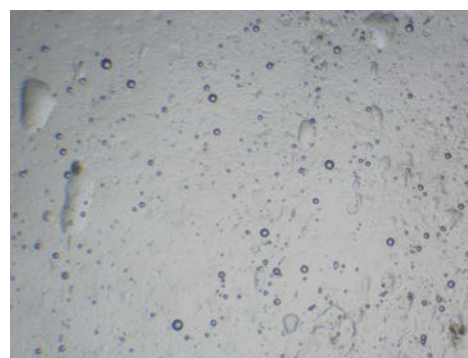
จะรักษาสภาพของน้ำมันจากการปนเปื้อนน้ำได้ จากข้อมูลค่าที่สูงขึ้นทั้งความหนืดและปริมาณความเป็นกรดซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าวเป็นตัวบ่งบอกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [1–3] เนื่องจากน้ำมันจากพืชเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเช่นกันเมื่ออยู่ภายใต้ความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายเช่นเดียวกับน้ำมันพื้นฐาน โดยเฉพาะความเห็นของ C.Georgescu และคณะ [2] ได้แสดงให้เห็นว่าน้ำมันจากพืชมีจุดอ่อนในเรื่องการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมันภายใต้การให้ความร้อน ดังนั้นน้ำมันดอกทานตะวันไม่ได้ส่งผลต่อการยับยั้งหรือชะลอการเกิดออกซิเดชันจากน้ำเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมันแต่ในทางตรงกันข้ามตัวน้ำมันดอกทานตะวันเองเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนด้วยทำให้เมื่อใช้น้ำมันดอกทานตะวันในสภาพของเหลวยังเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเห็นได้จากค่าความหนืดที่สูงที่สุดและความเป็นกรดสูงที่สุด (PH ต่ำสุด) อย่างไรก็ตามการเติมผงนาโนกราไฟต์ส่งผลดีต่อการรักษาสภาพน้ำมัน โดยเฉพาะการชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันดังที่เห็นได้จากผลของความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันพื้นฐานที่ไม่ผ่านการใช้และสภาพน้ำมันเป็นกลาง $PH \approx 7.0$ เนื่องจากผงนาโนกราไฟต์สามารถที่จะผสมเข้ากับน้ำมันและจับตัวกับน้ำได้จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ตามรูปที่ 15 จะเห็นได้ว่าการใช้ผงนาโนกราไฟต์แสดงในรูปที่ 15(ง) ก่อนข้างได้เนื้อผสมเป็นเนื้อเดียวได้ดีกว่ากรณีน้ำมันปนเปื้อนน้ำและกรณีการใช้น้ำมันดอกทานตะวันตามที่ได้แสดงในรูป 15 (ข) และ (ค) ตามลำดับ ในกรณีปนเปื้อนน้ำและใช้น้ำมันดอกทานตะวันน้ำที่ปนอยู่ในน้ำมันเกิดเป็นเม็ดหยดน้ำจำนวนมากแต่ในกรณีใช้ผงนาโนกราไฟต์เม็ดหยดน้ำน้อยลงและมีขนาดที่เล็กลง หมายความว่าผงนาโนกราไฟต์เข้าจับตัวที่ผิวเม็ดหยดน้ำส่งผลทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสต่อประสานระหว่างน้ำกับน้ำมันน้อยลง (water/oil interfacial area) ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมันถูกชะลอหรือทำให้ยากขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดได้ยากขึ้นด้วยเช่นกันจึงเป็นเหตุเป็นผลกับค่าความหนืดและความ

เป็นกรดที่ต่ำกว่าทั้งกรณีปนเปื้อนน้ำและกรณีใช้น้ำมันดอกทานตะวันเป็นสารเติมแต่ง **รูปที่ 15** ที่แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์หลังการผสมสาร โดยเครื่องผสม โดยที่ **รูปที่ 15(ก)** แสดงภาพของน้ำมันพื้นฐานก่อนปนเปื้อนน้ำและก่อนเติมสารเติมแต่งซึ่งจะสังเกตเห็นเป็นลักษณะเนื้อเดียวไม่มีสารอื่นแทรกตัวอยู่ **รูปที่ 15(ข)** แสดงการผสมระหว่างน้ำมันพื้นฐานกับน้ำ 5%wt จะสังเกตเห็นเป็นลักษณะของหยดเม็ดของน้ำกระจายตัวอยู่ในน้ำมันพื้นฐานซึ่งเป็นลักษณะการเกิดอิมัลชันแบบชั่วคราว (emulsion) จะเกิดในลักษณะนี้ได้เมื่อสารหล่อลื่นได้รับการรบกวนจากภายนอกเช่นการแกว่ง เขย่า การไหล เป็นต้น เมื่อปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลานานพอน้ำมันกับน้ำจะแยกชั้นกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสภาพของการใช้งานนั้นสารหล่อลื่นจะถูกรบกวนตลอดเวลาเนื่องจากมีการดูดสารหล่อลื่นเข้าไปใช้ในระบบที่หมุนเวียนตลอดเวลา การเกิดลักษณะดังกล่าวสารหล่อลื่นจะสูญเสียความสามารถในการรับภาระ เมื่อเกิดแรงกดจากชิ้นส่วนทางกลสัมผัสกันในพื้นที่เป็น

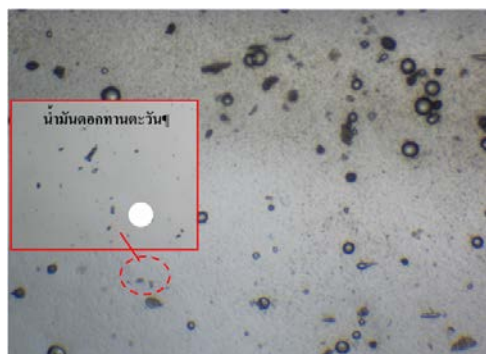
เม็ดหยดน้ำหรือเกิดโพรงอากาศบริเวณนั้นจะรับแรงได้ไม่ดีจึงส่งผลให้ชิ้นส่วนทางกลอาจเกิดการเสียดสีกันโดยตรงที่ผิวจึงทำให้ชิ้นงานเกิดการสึกหรอได้เร็วขึ้น **รูปที่ 15(ค)** แสดงการผสมระหว่างน้ำมันพื้นฐานและน้ำ 5%wt พร้อมกับเติมสารเติมแต่งชนิดน้ำมันดอกทานตะวัน 3%wt จากภาพแสดงให้เห็นว่าเกิดเม็ดหยดน้ำรูปทรงกลมแทรกตัวและกระจายอยู่ระหว่างเนื้อน้ำมันพื้นฐาน ส่วนน้ำมันดอกทานตะวันจะมีลักษณะไม่เป็นเม็ดรูปทรงกลมกระจายและแยกตัวจากเม็ดหยดน้ำ การเกิดลักษณะเช่นนี้มีผลเสียเช่นเดียวกับกรณีน้ำมันพื้นฐานปนเปื้อนน้ำตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น **รูปที่ 15(ง)** แสดงการผสมระหว่างน้ำมันพื้นฐานและน้ำ 5%wt พร้อมกับเติมสารเติมแต่งชนิดผงนาโนกราฟต์ 3%wt จากภาพแสดงให้เห็นว่าผงกราฟต์จะกระจายไปทั่วในเนื้อน้ำมันพื้นฐานตามที่เห็นเป็นจุดดำและยังคงมีเม็ดหยดน้ำทรงกลมอยู่บาง อย่างไรก็ตามระหว่างเม็ดหยดน้ำจะมีผงกราฟต์แทรกตัวอยู่ระหว่าง



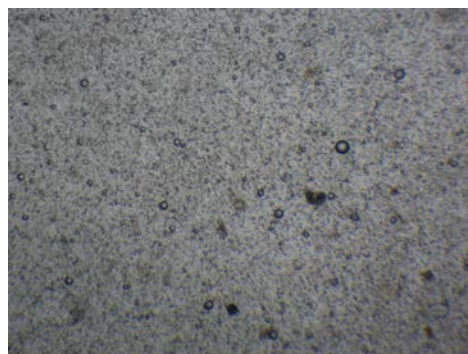
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ลักษณะการผสม (ก) Base oil (BO) (ข) BO+5%wt water (ค) BO+5%wt water+3%wt Sunflower และ (ง) BO+5%wt water+3%wt Graphit

เมื่อหยดน้ำจำนวนมากดังนั้นผงกราฟไฟต์ที่แทรกตัวอยู่มีความเป็นไปได้อาจมีส่วนช่วยรับภาระเมื่อเกิดแรงกดจากชิ้นงานที่สัมผัสกันทำให้สามารถลดการเสียดสีของผิวชิ้นงานโดยตรงจึงช่วยลดการสึกหรอ ถึงแม้ว่าจะมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทดสอบการสึกหรอโดยใช้ผงกราฟไฟต์เป็นสารเติมแต่ง [15–18] และได้แสดงให้เห็นถึงการใช้อย่างเหมาะสมจะช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและลดการสึกหรอ อย่างไรก็ตามการทดสอบเกี่ยวกับการสึกหรอยังคงมีความจำเป็นเพื่อยืนยันความเป็นไปได้ดังกล่าว

5. สรุป

บทความนี้ได้ทำการศึกษาผลการเติมสารเติมแต่ง 2 ชนิดได้แก่น้ำมันดอกทานตะวันและผงนาโนกราฟไฟต์ในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีน้ำปนเปื้อนโดยทำการวัดค่าคุณสมบัติของสารหล่อลื่นซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกสภาพน้ำมันได้แก่ความหนืดและค่าระดับความเป็นกรดจากการศึกษาสามารถที่จะสรุปได้ดังนี้

- 1) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ปนเปื้อนน้ำโดยที่ปริมาณน้ำมีมากขึ้นส่งผลทำให้ความหนืดเสื่อมคุณภาพจากค่าความหนืดและปริมาณความเป็นกรดที่สูงขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- 2) การเติมสารเติมแต่งประเภทน้ำมันดอกทานตะวันในสภาพของเหลวโดยตรงส่งผลเสียต่อสภาพของน้ำมันหล่อลื่นจากค่าความหนืดและปริมาณความเป็นกรดที่สูงขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- 3) การใช้ผงนาโนกราฟไฟต์ส่งผลดีต่อการรักษาสภาพของน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนน้ำจากค่าความหนืดที่ใกล้เคียงกับน้ำมันพื้นฐานที่ไม่ผ่านการใช้และสภาพของน้ำมันมีความเป็นกลาง
- 4) ผงกราฟไฟต์มีแนวโน้มที่ดีที่จะเป็นตัวต้านการเกิดออกซิเดชันเนื่องจากการปนเปื้อนน้ำ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทาลัยบูรพา ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายต่าง ๆ และ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่สนับสนุนการใช้เครื่องมืออุปกรณ์การทดลองและสถานที่เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Y. El-Naggar, R. A. El-Adly, T. A. Altalhi, A. Alhadhrami, F. Modather, M. A. Ebiadb and A. Salemb, “Oxidation stability of lubricating base oils,” *Petroleum Science and Technology*, vol. 36, no. 3, pp. 179–185, 2018, doi: 10.1080/10916466.2017.1403450.
- [2] C. Georgescu, L. Deleanu and G. C. Cristea, “Tribological Behavior of Soybean Oil,” in *Soybean - Biomass, Yield and Productivity*, London, United Kingdom: IntechOpen, 2018, ch. 5, pp. 1–36. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/64105>, doi: 10.5772/intechopen.81234
- [3] J. K. Mannekote and S. V. Kailas, “The Effect of Oxidation on the Tribological Performance of Few Vegetable Oils,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol.1, no. 2, pp.91–95, 2012, doi: 10.1016/S2238-7854(12)70017-0.
- [4] N. Canter, “Tribology & Lubrication Technology,” Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Park Ridge, IL, USA, Special report use of antioxidants in automotive lubricants, 2008.
- [5] G. Karmakar and P. Ghosh, “Green Additives for Lubricating Oil,” *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 1364–1370, 2013, doi: 10.1021/sc400181g.
- [6] M. A. Maleque, H. H. Masjuki and S. M. Sapuan, “Vegetable-based biodegradable lubricating oil additives,” *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 55, pp. 137–143, 2003, doi: 10.1108/00368790310470976.
- [7] P. Ghosh, T. Das, D. Nandi, G. Karmakar and A. Mandal, “Synthesis and Characterization of Biodegradable Polymer – Used as a Pour Point Depressant for Lubricating Oil,” *International Journal of Polymeric*

- Materials*, vol. 59, no. 12 pp. 1008-1017, 2010, doi: 10.1080/00914037.2010.504156.
- [8] E. Durak and F. Karaosmanoğlu, "Using of Cottonseed Oil as An Environmentally Accepted Lubricant Additive," *Energy Sources*, vol. 26, no. 7, pp. 611-625, 2004, doi: 10.1080/00908310490438605.
- [9] S. B. Mousavi, S. Z. Heris and P. Estellé, "Experimental comparison between ZnO and MoS₂ nanoparticles as additives on performance of diesel oil-based nano lubricant," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, 2020, Art. no. 5813, doi: 10.1038/s41598-020-62830-1.
- [10] H. Wu, J. Zhao, W. Xia, X. Cheng, A. He, J. Yun, L. Wang, H. Huang, S. Jiao, L. Huang, et al., "A study of the tribological behaviour of TiO₂ nano-additive water-based lubricants," *Tribology International*, vol. 109, pp. 398-408, 2017, doi: 10.1016/j.triboint.2017.01.013.
- [11] A. Beheshti, Y. Huang, K. Ohno, I. Blakey and J. R. Stokes, "Improving tribological properties of oil-based lubricants using hybrid colloidal additives," *Tribology International*, vol. 144, 2020, Art. no. 106130, doi: 10.1016/j.triboint.2019.106130.
- [12] H. T. Nguyen and K. H. Chung, "Assessment of Tribological Properties of Ti₃C₂ as a Water-Based Lubricant Additive," *Materials*, vol. 13, no. 23, 2020, Art. no. 5545, doi: 10.3390/ma13235545.
- [13] G. Cristea, D. Cazamir, D. Dima, C. Georgescu and L. Deleanu, "Influence of TiO₂ as nano additive in rapeseed oil," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 444, no. 2, 2018, Art. no. 022011, doi: 10.1088/1757-899X/444/2/022011.
- [14] S. D. Fernández-Silva, M. A. Delgado, C. Roman and M. García-Morales, "Rheological and Tribological Properties of Nanocellulose-Based Ecolubricants," *Nanomaterials (Basel)*, vol. 11, no. 11, pp. 1-14, 2021, Art. no. 34835751, doi: 10.3390/nano11112987.
- [15] M. Niu and J. Qu, "Tribological properties of nano-graphite as an additive in mixed oil-based titanium complex grease," *The royal society of chemistry*, vol. 8, pp. 42133-42144, 2018, doi: 10.1039/c8ra08109c.
- [16] E. Omrani, A. Siddaiah, A. D. Moghadam, U. Garg, P. Rohatgi and P. L. Menezes, "Ball milled graphene nano additives for enhancing sliding contact in vegetable oil," *nanomaterials*, vol.11, no. 3, 2021, Art. no. 610, doi: 10.3390/nano11030610.
- [17] G. C. Cristea, A. Radulescu, C. Georgescu, I. Radulescu and L. Deleanu, "Influence of additive concentration in soybean oil on rheological and tribological behavior," in *International conference of aerospace sciences "AEROSPATIAL2018"*, Romania, 2018, pp. 35-43, doi: 10.13111/2066-8201.2018.10.4.4.
- [18] L. Kirkhorn, O. Gutnichenko, O. Melnyk, V. Bushlya and J. E. Stahl, "Nano graphite flakes as lubricant additive," in *Proc.of the 6th Swedish production symposium*, Gothenburg, Sweden, 2014, pp.1-7.
- [19] P. S. Owuor, A. Khan, C. L. Leon, S. Ozden, R. Priestley, C. Arnold, N. Chopra and C. S. Tiwary, "Roadblocks faced by graphene in replacing graphite in large-scale applications," *Oxford open materials science*, vol. 1, no. 1, pp.1-19, 2021, doi: 10.1093/oxfmat/itab004.
- [20] Safety Data Sheet Mobilux EP0 grease, ExxonMobil, Apr. 24, 2022. [Online]. Available: <https://www.msds.exxonmobil.com/IntApps/psims/Download.aspx?ID=743086>.
- [21] V. Cortes, K. Sanchez, R. Gonzalez, M. Alcoutlabi and J. A. Ortega, "The performance of SiO₂ and TiO₂ nanoparticles as lubricant additives in sunflower oil," *Lubricants*, vol.8, no. 1, pp. 1-13, 2020, doi: 10.3390/lubricants8010010.

- [22] A. Sarwar, S. Vunguturi and A. Ferdose, "A study on smoke point and peroxide values of different widely used edible oils," *International journal of engineering technology science and research*, vol. 3, no. 5, pp. 271–273, 2016.
- [23] J. Ashrafi, A. Semnani, H. S. Langeroodi and M. Shirani, "Direct acetylation of sunflower oil in the presence of boron trioxide catalyst and the adduct usage as the base stock and lubricant additive," *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, vol. 31, no. 1, pp.39–49, 2017, doi: 10.4314/bcse.v31i1.4.
- [24] *Graphite nanoparticles/nanopowder*, American Elements, Jun.15, 2022. [Online]. Available: <https://www.americanelements.com/graphite-nanoparticles-nanopowder-7782-42-5>
- [25] B. J. Hamrock, S. R. Schmid and B. O. Jacobson, "Lubricant Properties," in *Fundamentals of fluid film lubrication*, 2nd ed., Boca Raton, NM, USA: CRC Press, 2004, ch. 4, sec. 4.17, pp. 122–123.
- [26] D. Choi, S. Yun and W. Choi, "An exact solution for power-law fluids in a slit microchannel with different zeta potentials under electroosmotic forces," *Micromachines (Basel)*, vol. 9, no. 10, 2018, Art. no. 504, doi: 10.3390/mi9100504.
- [27] M. Soleimani, L. Dehabadi, L. D. Wilson and L. G. Tabil, "Antioxidants Classification and Applications in Lubricants," in *Lubrication - Tribology, Lubricants and Additives*, London, United Kingdom: IntechOpen, 2018, ch. 2, pp. 23–42 [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/58293>.
- [28] S. Yotsawimonwat, S. Okonoki, K. Krauel, J. Sirithunyalug, B. Sirithunyalur and T. Rades, "Characterisation of microemulsions containing orange oil with water and propylene glycol as hydrophilic components," *Pharmazie*, vol.61, no. 11, pp. 920–926, 2006.
- [29] O. Juntarasakul and K. Maneeintr, "Evaluation of stability and viscosity measurement of emulsion from oil from production in northern oilfield in Thailand," *Iop conference series: Earth and environmental science*, vol. 140, 2018, Art. no. 012024, doi: 10.1088/1755-1315/140/1/012024.
- [30] D. S. Kolotova, Y. A. Kuchina, L. A. Petrova, N. G. Voron'ko and S. R. Derkach, "Rheology of water-in-crude oil emulsions: influence of concentration and temperature," *colloids and interfaces*, vol. 2, no. 4, 2018, Art. no. 64, doi: 10.3390/colloids2040064.
- [31] P. Madhaven and N. C. Werner, "Contamination Control for Extending Fluid Service Life." <https://www.machinerylubrication.com/Read/714/extending-fluid-life> (accessed: Jun.10, 2022).
- [32] J. Wen, J. Zhang and M. Wei, "Effective viscosity prediction of crude oil-water mixtures with high water fraction," *Journal of petroleum science and engineering*, vol. 147, pp.760–770, 2016, doi: 10.1016/j.petrol.2016.09.052.

การพัฒนาโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าอัจฉริยะสำหรับการเพาะปลูกแบบเกษตรอินทรีย์ วิสาหกิจชุมชน ต.ท่าข้าม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

Development of Smart Seedling Nursery for Organic Cultivation Community Enterprise, Tha Kham Subdistrict, Hat Yai District, Songkhla

สหพงศ์ สมวงศ์¹ ฐานวิทย์ แนนไส² และอิทธิโรจน์ มะโน^{1,*}

¹ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย บ่อยาง เมือง สงขลา 90000

² สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย บ่อยาง เมือง สงขลา 90000

Sahapong Somwong¹ Thanwit Naemsai² and Athirot Mano^{1,*}

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya,
Boyang, Muang, Songkhla 90000, Thailand

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya,
Boyang, Muang, Songkhla 90000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: athirot.m@rmutsv.ac.th

Received: Feb 21, 2022; Revised: May 27, 2022; Accepted: Jun 13, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าอัจฉริยะสำหรับการเพาะปลูกแบบเกษตรอินทรีย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการอนุบาลต้นกล้า และเพิ่มความแข็งแรง ความสมบูรณ์ของต้นกล้าก่อนที่จะนำไปปลูกแปลงใหญ่ ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน ตำบลท่าข้าม อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา โดยโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าอัจฉริยะนี้มีการควบคุมปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าดังนี้ อุณหภูมิภายในโรงเรือนอยู่ในช่วง 25–30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 65–90% ความชื้นในดินอยู่ในระดับกลาง (50–70%) มีระบบพ่นหมอกและระบบระบายอากาศ ช่วยในการปรับสภาพแวดล้อมให้อยู่ในช่วงที่กำหนดตลอดเวลา นอกจากนี้มีการใช้แสงจากไดโอดเปล่งแสง (LED Grown light) ยานความถี่ 430–630 นาโนเมตร ในเวลากลางคืน เพื่อช่วยให้ต้นกล้าสามารถสังเคราะห์แสงได้นานขึ้นอีก 5 ชั่วโมง โรงเรือนนี้รองรับเพาะต้นกล้าชนิด 200 หลุมได้สูงสุด 12 ถาด จากการทดสอบการอนุบาลต้นกล้ากรีนโอ๊คในโรงเรือนอัจฉริยะเป็นระยะเวลา 6 วันเทียบกับวิธีการเดิม พบว่า ต้นกล้าที่มีความอุดมสมบูรณ์ แข็งแรง เจริญเติบโตไวกว่า โดยมีความยาวของลำต้นมากกว่าการวิธีการเดิม 16.9% และลดระยะเวลาในการอนุบาลต้นกล้าก่อนลงแปลงใหญ่ได้ประมาณ 33% ที่สำคัญหากอนุบาลต้นกล้าเต็มประสิทธิภาพของโรงเรือนอัจฉริยะนี้ จะสามารถลดพื้นที่ใช้พื้นที่สอยลงได้ประมาณ 3 เท่าจากการอนุบาลต้นกล้าแบบเดิมของวิสาหกิจชุมชน

คำสำคัญ โรงเรือนอนุบาลต้นกล้าอัจฉริยะ ระบบควบคุมสภาพแวดล้อม เกษตรอินทรีย์ ระบบพลังงานแสงอาทิตย์

Abstract

This research is the development of smart seedling nursery for organic cultivation. It is used to increase the efficiency of seedling nursery and increase the strength and fertility of seedlings before they are transplanted into large plots of the community enterprise

group, Tha Kham Subdistrict, Hat Yai District, Songkhla Province. This smart seedling nursery greenhouse controls the following factors affecting seedling growth: the temperature inside is in the range of 25–30°C, the relative humidity is in the range of 65–90%, soil moisture is moderate (50–70%). This smart seedling nursery has a misting system and a ventilation system that helps to adjust the environment to the specified range at all times. In addition, it also uses light from 430–630 nm LED Grow light at night. It helps seedlings to photosynthesize for an additional 5 hours in the absence of sunlight. This smart seedling nursery can accommodate up to 12 trays of 200 holes seedling trays. From the test of nursery of green oak seedlings in the smart seedling nursery greenhouses for 6 days compared to the original method. It was found that the seedlings were fertile, strong, and growing faster. The length of the trunk was 16.9% greater than the original method. It can reduce the time of nursery seedlings before planting a large plot by about 33%. Importantly, if seedlings are reared at full efficiency, this smart greenhouse will be able to reduce the area used by about three times that of the traditional nursery of community enterprises.

Keywords: Smart seedling nursery, Environment control system, Organic farming, Solar system

1. บทนำ

ปัจจุบันในยุคที่มีการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว พบว่าได้มีการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้สำหรับการเกษตรกันมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการทำเกษตรแปลงใหญ่ การตรวจวัดและแสดงค่าพารามิเตอร์ทางการเกษตร [1] หรือใช้อากาศยานไร้คนขับทางการเกษตร [2] การทำเกษตรอัจฉริยะ [3] หรือแม้กระทั่งการพัฒนาโรงเรือนอัจฉริยะสำหรับการเพาะปลูกเพื่อควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับพืชด้วยเทคโนโลยี IoT [4–6] การควบคุมความชื้นในดินสำหรับโรงเรือนเมล็ด [7] ระบบควบคุมอุณหภูมิความชื้นสำหรับใช้ในโรงเพาะเห็ด [8] ระบบควบคุมการให้สารอาหารสำหรับการปลูกผักไฮโดรโปนิคส์ [9] เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยพบว่าไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน ที่ความยาวคลื่น 430–460 นาโนเมตร และสีแดงที่ความยาวคลื่น 630–660 นาโนเมตร ในอัตราส่วนแสงสีน้ำเงินต่อแสงสีแดงเป็น 1:3 ซึ่งเป็นย่านความยาวคลื่นที่ช่วยให้พืชที่อยู่ในช่วงระยะเริ่มต้นที่กำลังงอกเจริญเติบโตได้ดี [10],[11] ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่นำไดโอดเปล่งแสงในย่านความยาวคลื่นดังกล่าวไปใช้ในการเพาะเลี้ยงต้นกล้า โดยให้พืชได้สังเคราะห์แสงด้วยไดโอดเปล่งแสงแทนการใช้แสงธรรมชาติ [12],[13] ซึ่งพบว่าพืชสามารถเจริญเติบโตได้ดี และรวดเร็วกว่าการสังเคราะห์ด้วยแสงธรรมชาติ

สำหรับการเพาะปลูกแบบเกษตรอินทรีย์จำเป็นต้องเพาะต้นกล้าในแปลงเล็กก่อน เมื่อต้นกล้าเจริญเติบโตได้ประมาณ 14–16 วันเริ่มเมื่อมีการแตกใบอ่อนจึงค่อยนำไปปลูกแปลงใหญ่ ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศจะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าเป็นอย่างมาก โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของต้นกล้าในช่วงรากงอกอยู่ในช่วง 25–35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศอยู่ในช่วง 65–90%RH ความชื้นในดินควรมีระดับความชื้นที่เหมาะสม ประมาณ 50–70% [14]

จากการลงสำรวจพื้นที่กลุ่มวิสาหกิจผักอินทรีย์ บ้านปึก ตำบลท่าข้าม อำเภอบางใหญ่ จังหวัดสงขลา พบว่ากลุ่มเกษตรกรได้ปลูกผักอินทรีย์ ในโรงเรือนขนาดใหญ่ ซึ่งภายในโรงเรือนมีการปลูกผักหลายชนิด อาทิเช่น คะน้า กวางตุ้ง ผักกาดขาว ผักชี ขึ้นฉ่าย เรดโอ๊ค กรีนโอ๊ค เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่เกิดขึ้นสำหรับการปลูกผักอินทรีย์ของกลุ่มเกษตรกรในปัจจุบันคือ สภาพอากาศภายในโรงเรือนร้อน อบอ้าวเกินไป ทำให้การอนุบาลต้นกล้าของผักแต่ละชนิดไม่สมบูรณ์ ไม่แข็งแรง อัตราการรอดต่ำ ทำให้ต้องสูญเสียต้นทุนของการซื้อเมล็ดพันธุ์ใหม่ รวมถึงการให้น้ำและปุ๋ยกับต้นกล้าในโรงเรือนยังต้องใช้แรงงานคนในการช่วยเหลือ เนื่องจากในโรงเรือนไม่มีระบบไฟฟ้า และประปา

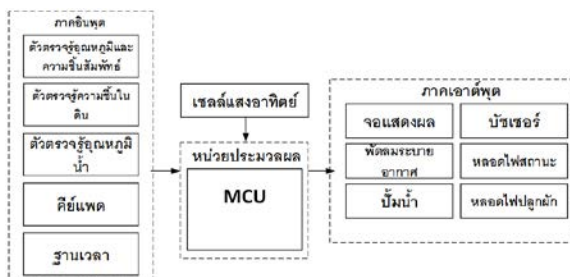
ด้วยเหตุนี้ทางผู้วิจัยจึงได้มีความคิดที่จะพัฒนาโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าอัจฉริยะที่มีการควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมสำหรับการอนุบาลต้นกล้าตลอดเวลา และมีการนำ

พลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าสำหรับใช้ควบคุมในโรงเรือน มีการใช้ไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน และสีแดง(LED Grow Light) เพื่อให้ต้นกล้าสังเคราะห์แสงในช่วงกลางวัน และให้ต้นกล้ามีความสมบูรณ์ แข็งแรง และเจริญเติบโตได้เร็วกว่าการอนุบาลแบบเดิม ส่งผลให้เมื่อนำลงแปลงใหญ่ต้นกล้ามีอัตราการรอดสูงขึ้น และมีจำนวนผลผลิตต่อรอบของการเพาะสูงขึ้น

2. การออกแบบและพัฒนาระบบ

2.1 ภาพรวมของระบบ

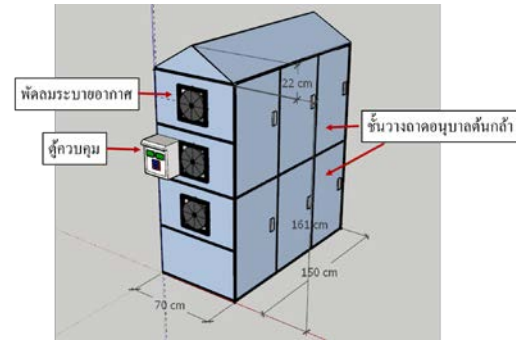
ระบบควบคุมสภาพแวดล้อมในโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าอัจฉริยะ แบ่งส่วนประกอบต่าง ๆ เป็น 4 ส่วน ดังนี้ 1) ส่วนผลิตพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ 2) ส่วนอินพุต 3) หน่วยประมวลผล และ 4) ส่วนเอาต์พุต แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ภาพรวมของระบบการอนุบาลต้นกล้าอัจฉริยะ สำหรับการเพาะปลูกแบบเกษตรอินทรีย์

2.2 การออกแบบโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าอัจฉริยะสำหรับการเพาะปลูกแบบเกษตรอินทรีย์

เนื่องจากโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าแบบเดิมที่กลุ่มวิสาหกิจดำเนินการอยู่ เป็นโรงเรือนขนาดใหญ่มีความกว้าง × ยาว × สูง ประมาณ $2 \times 6 \times 1.5$ เมตร แบบชั้นเดียว ไม่มีการควบคุมสภาพแวดล้อม รองรับถาดเพาะชนิด 200 หลุม ขนาด 35×60 เซนติเมตร ได้สูงสุด 24 ถาด ด้วยเหตุนี้ทางผู้วิจัยได้ร่วมกับกลุ่มวิสาหกิจ ออกแบบโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าอัจฉริยะที่ใช้พื้นที่น้อยลง มีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยออกแบบให้โรงเรือนมีขนาดความกว้าง × ยาว × สูง ประมาณ $0.7 \times 1.5 \times 1.6$ เมตร ชั้นวางถาดต้นกล้ามี 3 ชั้น สามารถวางถาด 200 หลุม ได้ชั้นละ 4 ถาด แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โรงเรือนอนุบาลต้นกล้าอัจฉริยะสำหรับการเพาะปลูกแบบเกษตรอินทรีย์

จากรูปที่ 2 หากพิจารณาจำนวนถาดเพาะที่เท่ากัน โรงเรือนอัจฉริยะนี้ใช้พื้นที่น้อยกว่าโรงเรือนเดิมถึง 3 เท่า ภายในโรงเรือนมีการติดตั้งอุปกรณ์และ ระบบต่าง ๆ ดังนี้

- ตัวตรวจอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความชื้นในดิน สำหรับตรวจวัดสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือน
- ระบบระบายอากาศ มีพัดลมทำหน้าที่ดูดอากาศเข้า และระบายอากาศออก ติดตั้งไว้ฝั่งตรงข้ามกันเพื่อให้อากาศมีการหมุนเวียนภายในโรงเรือน
- ระบบพ่นหมอกทุกชั้น เพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ให้เหมาะสมสำหรับการอนุบาลต้นกล้าตลอดเวลา
- ไดโอดเปล่งแสง LED Grow Light ทุกชั้น สำหรับการเพิ่มการสังเคราะห์แสงให้กับต้นกล้าในช่วงกลางวัน

2.3 ออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์

ผู้วิจัยได้ออกแบบให้มีการนำพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าสำหรับการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือน ดังนั้นจึงต้องมีวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในโรงเรือน โดยภายในโรงเรือนประกอบด้วย (A) ไดโอดเปล่งแสง LED Grow Light 12VDC 5A จำนวน 3 แถว , (B) บั๊มพ่นหมอก 12VDC 5A จำนวน 1 ชุด, (C) พัดลมระบายอากาศ 12VDC 0.25A จำนวน 6 ตัว, (D) ชุดประมวลผล ควบคุม และตัวตรวจวัดสภาพแวดล้อมในโรงเรือน 12VDC 1A จำนวน 1 ชุด ดังนั้นการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในโรงเรือนตามเงื่อนไขที่กำหนดในแต่ละวัน สามารถประมาณได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ในโรงเรือน

อุปกรณ์	แรงดัน (V)	กระแส (A)	เวลา (hr.)	กำลัง (W)	พลังงานไฟฟ้า (Wh)
A	12	10	4	120	480
B	12	5	1	60	60
C	12	1.5	4	18	72
D	12	0.5	24	6	144
รวม				204	756

จากตารางที่ 1 พบว่าการในแต่ละวันโรงเรือนจะใช้พลังงานไฟฟ้าต่อวันประมาณ 756 Wh ดังนั้นในการคำนวณขนาดแผงโซลาร์เซลล์ที่เหมาะสมสำหรับโรงเรือนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$P_{solar} = \frac{W_t}{hr} \quad (1)$$

โดย

P_{solar} คือกำลังไฟฟ้าของพลังงานแสงอาทิตย์ (W)

W_t คือพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละวัน (Wh)

hr คือ จำนวนชั่วโมงที่โซลาร์เซลล์สามารถรับแสงได้เต็มที่ใน แต่ละวัน (ประมาณ 5 ชั่วโมง)

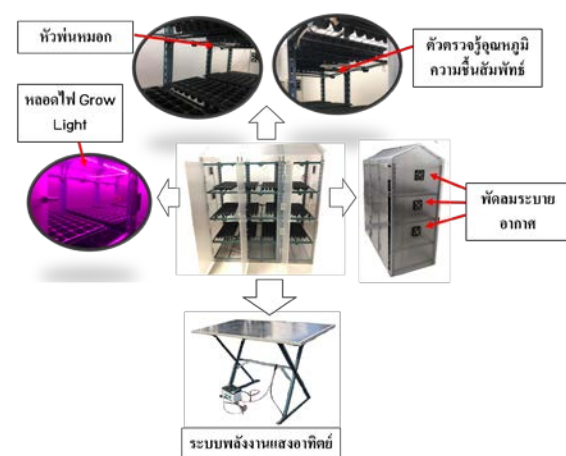
จากการคำนวณพบว่าค่า P_{solar} มีค่าประมาณ 151.2W แสดงว่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ที่จะพอดีใน 1 วัน สำหรับโรงเรือนมีค่าประมาณ 151.2W เนื่องด้วยประสิทธิภาพในการรับแสงของแผงโซลาร์เซลล์ ดังนั้นในการเลือกแผงโซลาร์เซลล์ควรเลือกแผงที่มีขนาดมากกว่าที่คำนวณได้ประมาณอย่างน้อย 1.5 เท่า เนื่องจากการใช้งานจริง แผงโซลาร์เซลล์อาจมีการสูญเสียประสิทธิภาพในการรับแสงเกิดขึ้น ส่งผลกับกำลังไฟฟ้าที่ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้แผงโซลาร์เซลล์ขนาด 300W 32V 9.3A ควบคู่กับแบตเตอรี่ 12V 75Ah รองรับการใช้งานด้วยแบตเตอรี่อย่างเดียวได้มากกว่า 1 วัน

2.4 สร้างและติดตั้งอุปกรณ์ในโรงเรือนอนุบาลต้นกล้า

อัจฉริยะสำหรับการเพาะปลูกแบบเกษตรอินทรีย์

ขั้นตอนนี้เป็น การสร้างโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าอัจฉริยะสำหรับการเพาะปลูกแบบเกษตรอินทรีย์ตามที่ได้ออกแบบในขั้นตอนที่ 2.2 โดยลักษณะโรงเรือน และระบบ

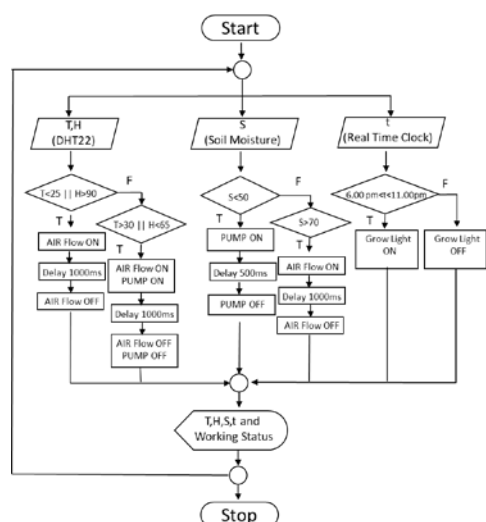
พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้สร้างขึ้น แสดงดังรูปที่ 3-4 ตามลำดับ



รูปที่ 3 โรงเรือนอนุบาลต้นกล้าอัจฉริยะ

2.5 เงื่อนไขการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนอัจฉริยะ

จากการศึกษางานวิจัย [11],[12] ที่ผ่านมา พบว่า อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นในดินเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ดังนั้นผู้วิจัยได้มีกำหนดอุณหภูมิภายในโรงเรือนที่เหมาะสมสำหรับต้นกล้าอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 65-90 %RH และต้องควบคุมให้ดินมีความชื้นพอเหมาะ (moist) หรือประมาณ 50-70 % นอกจากนี้มีการใช้แสงจาก ไดโอดเปล่งแสง Grow light ในช่วงเวลา 18.00-23.00 น. เพื่อให้ต้นกล้าสามารถสังเคราะห์แสงได้นานขึ้นเติบโตเร็วขึ้น โดยแผนผังการทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ฟังก์ชันการทำงานของระบบควบคุมสภาพแวดล้อมในโรงเรือนอัจฉริยะ

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การสอบเทียบตัวตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นในดิน

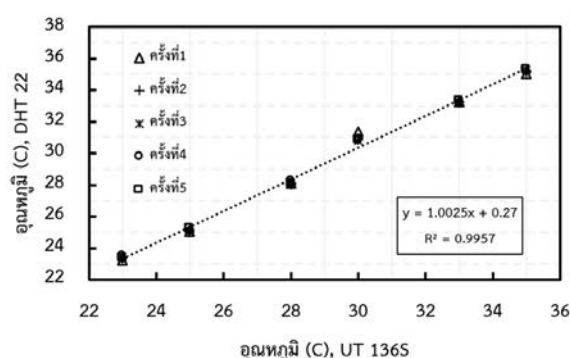
3.1.1 การสอบเทียบการตรวจวัดอุณหภูมิ

ขั้นตอนนี้เป็น การสอบเทียบตัวตรวจวัด DHT22 กับเครื่องมือสอบเทียบมีเตอร์ยี่ห้อ UNI-T รุ่น UT 136S ในช่วงอุณหภูมิ 23 25 28 30 33 และ 35 องศาเซลเซียส โดยการนำมีเตอร์ตั้งอยู่ในตำแหน่งเดียวกับตัวตรวจวัด DHT22 จากนั้นทำการวัดซ้ำอุณหภูมิละ 5 ครั้งแล้ววิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ซึ่งผลการสอบเทียบกับตัวตรวจวัดอุณหภูมิแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการสอบเทียบการตรวจวัดอุณหภูมิ

อุณหภูมิ ทดสอบ(°C)	UT 136s (°C)	DHT22 (°C)					เฉลี่ย	ความผิดพลาด สัมบูรณ์ (%)
		1	2	3	4	5		
23	23.4	23.2	23	23.5	23.1	23.4	23.24	0.68
25	25.2	25	25.3	24.9	25	25.3	25.1	0.40
28	28.3	28.5	28.6	28.4	28.2	28.1	28.36	0.21
30	31.5	31.5	31.5	31.5	30.7	30.8	31.2	0.95
33	33.4	33.6	33.5	33.9	33.7	33.5	33.64	0.72
35	35.1	35.5	35.4	34.9	35.2	35.1	35.22	0.34
เฉลี่ย								0.55

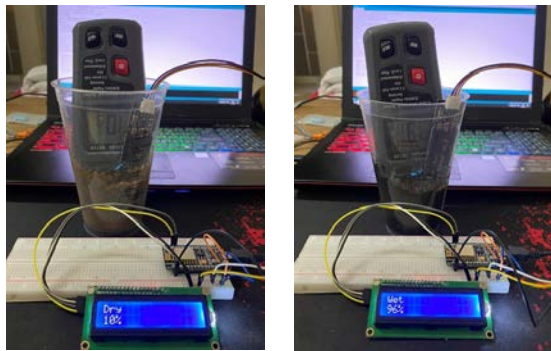
จากตารางที่ 2 เมื่อนำค่าเฉลี่ยจากการวัดซ้ำทั้ง 5 ครั้งในแต่ละอุณหภูมิมาเปรียบเทียบกับค่าจากอุปกรณ์สอบเทียบที่ได้จากพบว่า ตัวตรวจวัด DHT22 มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเทียบกับเครื่องมือสอบเทียบมีเตอร์ยี่ห้อ UNI-T รุ่น UT 136S เท่ากับ 0.55 % และเมื่อนำผลการวัดมาวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (R^2) พบว่าการวัดเทียบกับเครื่องมือสอบเทียบมีเตอร์ยี่ห้อ UNI-T รุ่น UT 136S ในลักษณะเชิงเส้นแทนได้ด้วยสมการเส้นตรง มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9957 แสดงว่าตัวตรวจวัดมีผลการวัดที่ใกล้เคียงกับอุปกรณ์สอบเทียบและอยู่ในระดับความเชื่อมั่นที่ยอมรับได้ แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การสอบเทียบตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

3.1.2 การสอบเทียบการตรวจวัดระดับความชื้นในดิน

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ดินพืชมอสสำหรับการปลูกต้นกล้าในการทดสอบ ขั้นตอนเริ่มจากการวัดแรงดันไฟฟ้าในดินด้วยตัวตรวจวัดความชื้นในดินชนิดตัวเก็บประจุ (Capacitive soil moisture) เทียบกับเครื่องวัดความชื้นในดิน (Moisture meter) เพื่อนำผลการวัดมาสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายความชื้นในดิน เริ่มจากการนำดินพืชมอสปริมาณ 300 กรัม มาใส่ในแก้วน้ำ จากนั้นทำการเติมน้ำปริมาณครั้งละ 15 มิลลิลิตร ลงในดินที่เตรียมไว้จำนวน 5 ครั้ง จนในดินมีปริมาณน้ำ 75 มิลลิลิตร จากนั้นบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ เปรียบเทียบกับค่าความชื้นในดินที่ได้จากเครื่องวัดความชื้นในดิน แสดงในรูปที่ 6 และได้ผลแสดงดังตารางที่ 3

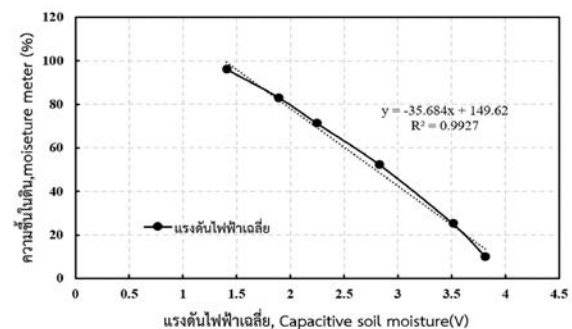


รูปที่ 6 การตรวจวัดความชื้นในดิน

ตารางที่ 3 แสดงผลการวัดความชื้นในดิน

ปริมาณน้ำ ในดิน (มิลลิลิตร)	ความชื้น ในดิน (%) Moisture meter	ค่าแรงดันไฟฟ้า ในดินชนิดตัวเก็บประจุ (V) ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	เฉลี่ย
0	10	3.56	3.56	3.60	3.57
15	25	3.48	3.52	3.54	3.51
30	52	2.78	2.83	2.89	2.83
45	71	2.12	2.26	2.38	2.25
60	83	1.84	1.90	1.94	1.89
75	96	1.38	1.40	1.44	1.40

จากการทดสอบระดับความชื้นในดินพบว่าเมื่อความชื้นในดินมีค่าสูงขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจวัดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากหากความชื้นในดินมีค่าสูง แสดงว่าดินมีสภาพการนำไฟฟ้าได้ดี ส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานในดินต่ำ และเมื่อสภาพต้านทานต่ำ ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าลดลงด้วย ด้วยเหตุนี้สามารถนำค่าแรงดันไฟฟ้าจากตัวตรวจวัดความชื้นในดิน มาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายความชื้นในดิน ได้ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายความชื้นในดิน

จากรูปที่ 7 พบว่าแรงดันไฟฟ้ากับปริมาณความชื้นในดินมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2)

$$Y = -35.684X + 149.62 \quad (2)$$

เมื่อ Y คือ % ความชื้นในดิน

X คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจวัด

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ความชื้นมี 3 ระดับ คือ ระดับ 1 แห้ง (Dry) ระดับ 2 ชื้น (Moist) และ ระดับ 3 เปียก (Wet) โดย

- ระดับแห้ง (Dry) คือดินที่มีความชื้นน้อยกว่า 50%
- ระดับชื้น (Moist) คือดินที่มีความชื้นในช่วง 50-70%
- ระดับเปียก (Wet) คือดินที่มีความชื้นในช่วง 70-100%

3.2 การควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือน

ในขั้นตอนนี้เป็น การทดสอบระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือน มีการทดลองบันทึกค่าเป็น

เวลา 6 วัน มีการบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทุก ๆ 1 ชั่วโมง เพื่อสังเกตว่าระบบสามารถควบคุมสภาวะต่าง ๆ ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้อยู่ในช่วง 25–30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ 65–90%RH ความชื้นในดินประมาณ 50–70% (Moist) และควบคุมการให้แสงในเวลากลางวัน แสดงดังรูปที่ 8

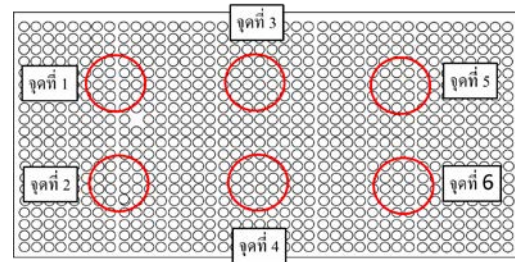


รูปที่ 8 การทดสอบระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือน

3.3 การทดสอบการอนุบาลต้นกล้า

หลังจากการทดสอบการควบคุมสภาพแวดล้อมในโรงเรือนแล้วเสร็จ ในขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบการใช้งานโรงเรือนอย่างเต็มรูปแบบ โดยการทดสอบการอนุบาลต้นกล้ากรีนโอ๊ค เนื่องจากเป็นผักสลัดที่มีความนิยมเป็นอย่างมาก ในขั้นตอนนี้ได้มีการอนุบาลต้นกล้ากรีนโอ๊คเป็นระยะเวลา 6 วัน โดยจะมีการเปรียบเทียบความสูงของลำต้น และความสม่ำเสมอในการเจริญเติบโต กับวิธีการอนุบาลต้นกล้าแบบวิธีเดิม (อนุบาลนอกโรงเรือน ไม่มีการควบคุมสภาพแวดล้อม)

ในช่วงระหว่างการทำจะทำการสุ่มหยิบต้นกล้าในแต่ละถาด 6 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 9 โดยสุ่มตำแหน่งละ 1 ต้น ในระยะเวลา 6 วัน เพื่อวิเคราะห์ความยาวลำต้นตั้งแต่ปลายรากถึงยอด มาวิเคราะห์การเจริญเติบโต และความสม่ำเสมอในการเจริญเติบโตทั่วทั้งถาดเพาะเปรียบเทียบกับการอนุบาลต้นกล้าวิธีเดิม



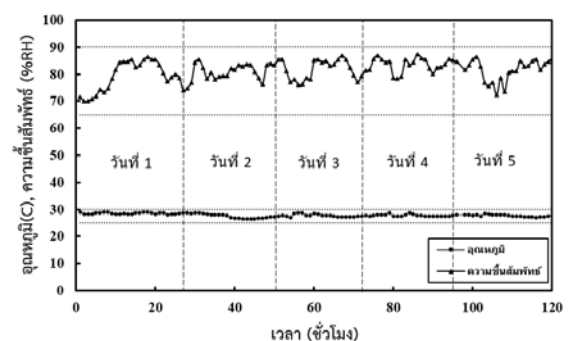
รูปที่ 9 ตำแหน่งการสุ่มหยิบต้นกล้าในการวิเคราะห์การเจริญเติบโต

4. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

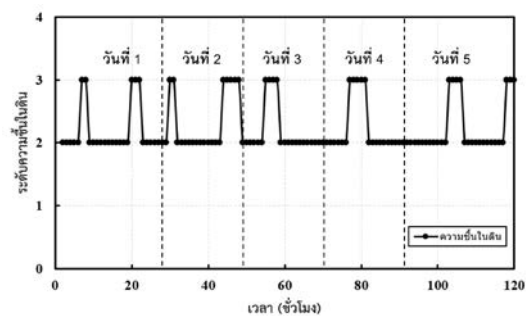
จากวิธีการดำเนินการวิจัยในหัวข้อที่ผ่านมาสามารถแสดงผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือน

จากการทดสอบการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ตลอดทั้ง 5 วัน และการควบคุมความชื้นในดินในโรงเรือน แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 10–11 ตามลำดับ



รูปที่ 10 การควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนที่เหมาะสมสำหรับการอนุบาลต้นกล้า



รูปที่ 11 การควบคุมความชื้นในดินโรงเรือนให้เหมาะสมสำหรับการอนุบาลต้นกล้า

จากรูปที่ 10 เป็นผลการควบคุมสภาพแวดล้อมของโรงเรือนเป็นระยะเวลา 5 วัน ตลอด 24 ชั่วโมง สังเกตได้ว่าระบบสามารถควบคุมสภาวะต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม โดยสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้อยู่ในช่วงต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วง 65–90%RH ได้ และจากรูปที่ 11 เป็นผลการควบคุมความชื้นในดินตลอดระยะเวลา 5 วัน สังเกตได้ว่าระบบจะควบคุมให้ระดับความชื้นในดินเฉลี่ยอยู่ในระดับ 2 หรือขึ้นพอเหมาะ (50–70%) โดยในแต่ละวันจะมีบางช่วงเวลาที่ความชื้นในดินเข้าสู่ระดับ 3 เนื่องจากน้ำจากการพ่นหมอกทำให้ดินได้รับความชื้นเพิ่มขึ้น ระบบระบายอากาศจะทำงานเพื่อระบายความชื้นภายในตู้ออก ส่งผลให้ความชื้นในดินค่อยๆลดลงกลับสู่ระดับ 2

4.2 ผลการทดสอบการอนุบาลตัวนกกล้า

จากการทดสอบการอนุบาลต้นกล้ากรีนโอ๊คใน
โรงเรือนที่มีการควบคุมสภาพแวดล้อมเป็นระยะเวลา 6 วัน
ในขั้นตอนนี้เป็นการสุ่มหยิบต้นกล้ากรีนโอ๊คมาวิเคราะห์
ความยาวลำต้นตั้งแต่ปลายราก จนถึงใบ โดยใช้ไม้บรรทัด
เหล็กในการวัด ดังรูปที่ 12 เพื่อวิเคราะห์การเจริญเติบโต
เกี่ยวกับการอนุบาลต้นกล้าแบบเดิม



รูปที่ 12 การวัดความยาวของลำต้น

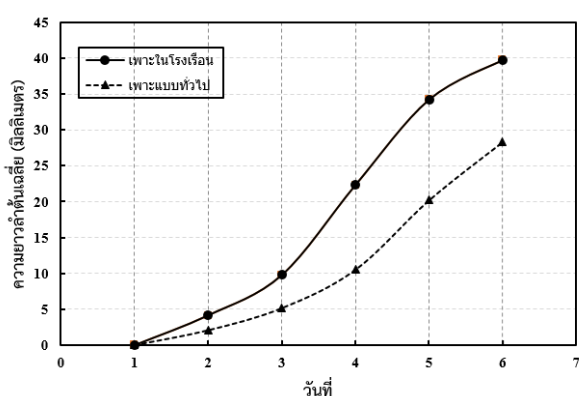
โดยความยาวของลำต้นจากการสุมหีบต้นกล้าในภาค
 ของทั้งการอนุบาลต้นกล้าแบบเดิม และการอนุบาลแบบ
 ในโรงเรือนอัจฉริยะ ตลอดระยะเวลา 6 วัน แสดงดังตาราง
 ที่ 4-5 เมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย (SD)
 ของความสูงของลำต้นจากตำแหน่งที่สุมหีบขึ้นมาในแต่ละวัน พบว่าการอนุบาลต้นกล้าในโรงเรือนมีค่าส่วน
 เบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าการอนุบาลแบบเดิม แสดงว่า
 การเจริญเติบโตของต้นกล้าในโรงเรือนมีความสม่ำเสมอ
 ทั้งทั้งถาดมากกว่าการอนุบาลแบบเดิม และหากพิจารณา
 ความสูงของลำต้นจากการสุมหีบทั้ง 6 วันพบว่าการ
 อนุบาลต้นกล้าในโรงเรือน มีการเจริญเติบโตที่เร็วกว่าการ
 อนุบาลแบบเดิมอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 13

ตารางที่ 4 แสดงความยาวของลำต้นจากการสุมหีบจากถาดการอนุบาลแบบเดิม

วันที่	ความยาวของลำต้นจากปลายรากถึงใบ (มิลลิเมตร)							SD
	ตำแหน่งการสุ่มหยิบ						เฉลี่ย	
	1	2	3	4	5	6		
1	ลำต้นขนาดเล็กไม่สามารถวัดได้							
2	1.8	2.2	2.3	1.7	1.8	2.7	2.08	0.35
3	5.1	4.8	5.4	4.9	5.2	5.6	5.17	0.27
4	9.2	10.6	11.2	10.6	11.7	9.8	10.52	0.83
5	18.9	19.2	20.4	18.1	21.5	23.1	20.20	1.70
6	29.2	28.4	27.6	28.9	26.4	29.5	28.33	1.06
SD เฉลี่ย								0.84

ตารางที่ 5 แสดงความยาวของลำต้นจากการสุ่มหยิบจากถาดการอนุบาลในโรงเรือนอัจฉริยะ

วันที่	ความยาวของลำต้นจากปลายรากถึงใบ (มิลลิเมตร)						เฉลี่ย	SD
	ตำแหน่งการสุ่มหยิบ							
	1	2	3	4	5	6		
1	ลำต้นขนาดเล็กไม่สามารถวัดได้							
2	3.9	4.4	4.3	4.2	3.9	4.3	4.17	0.20
3	10.1	9.9	9.7	10.1	9.5	9.4	9.78	0.27
4	23.1	21.9	22.8	21.6	22.7	21.9	22.33	0.56
5	34.1	33.8	34.5	35.1	33.3	34.6	34.23	0.58
6	40.2	39.5	40.1	39.6	38.4	40.7	39.75	0.72
SD เฉลี่ย								0.47



รูปที่ 13 เปรียบเทียบความยาวของลำต้นระหว่างการอนุบาลแบบเดิมกับการอนุบาลในโรงเรือนอัจฉริยะ

จากรูปที่ 13 พบว่าในช่วงวันแรกยังไม่สามารถที่จะวัดความยาวของลำต้นได้ เนื่องจากลำต้นยังมีขนาดเล็กมาก ในช่วงวันที่ 2 และ 3 ต้นกล้าจะมีการเจริญเติบโตที่รวดเร็ว ลำต้นยืดยาวขึ้น อวบขึ้น จะสังเกตเห็นได้ชัดว่าการอนุบาลต้นกล้าในโรงเรือนจะช่วยให้ต้นกล้าเจริญเติบโตเร็ว ลำต้นมีความยาวมากกว่าการอนุบาลแบบทั่วไป เมื่อพิจารณาวันที่ 6 ความยาวของลำต้นจากการอนุบาลแบบทั่วไปจะมีความยาวเฉลี่ย 28.33 มิลลิเมตร ส่วนการอนุบาลในโรงเรือนจะมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 39.75 มิลลิเมตร ซึ่งมีความยาวมากกว่าถึง 16.9% และหากพิจารณาที่ความยาวลำต้นจากการอนุบาลแบบทั่วไปในวันที่ 6 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความยาวของลำต้นจากการอนุบาลในโรงเรือนวันที่ 4.5 ซึ่งช่วยลดระยะเวลาไปได้ถึง 1.5 วัน หรือคิดเป็นประมาณ 33%

5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การอนุบาลต้นกล้าในโรงเรือนอัจฉริยะมีอัตราการเจริญเติบโตที่ดีกว่าการอนุบาลแบบเดิมที่กลุ่มวิสาหกิจชุมชนดำเนินการอยู่ อย่างมีนัยสำคัญ โดยในโรงเรือนอัจฉริยะ มีการควบคุมปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้า ดังนี้ ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 25–30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วง 65–90%RH ตลอดเวลา และควบคุมความชื้นในดินให้มีระดับความชื้นที่เหมาะสม 50–70% มีระบบพ่นหมอก ระบบระบายอากาศที่คอยทำหน้าที่ลดอุณหภูมิ และเพิ่มความชื้นภายในโรงเรือน นอกจากนี้ยังมีการใช้ไดโอดเปล่งแสง Grow light ในช่วงเวลา 18.00–23.00 น. เพื่อให้ต้นกล้าสามารถสังเคราะห์แสงได้เพิ่มขึ้นประมาณ 5 ชั่วโมงเมื่อไม่มีแสงอาทิตย์ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้การอนุบาลต้นกล้าในโรงเรือนจะได้ต้นกล้าที่มีความอุดมสมบูรณ์ แข็งแรง เจริญเติบโตไว มีอัตราการรอดสูง เมื่อนำไปปลูกลงแปลงใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเดิม ซึ่งการอนุบาลในโรงเรือนจะมีความยาวลำต้นเฉลี่ยมากกว่าการอนุบาลแบบเดิมถึง 16.9% และผลจากการให้แสงในช่วงกลางคืนในระยะเวลา 6 วัน ทำให้ต้นกล้าเจริญเติบโตได้เร็วขึ้น ประมาณ 33%

โดยจากงานวิจัย [4–6] พบว่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นในดิน เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยมีค่าประมาณ 25–30 องศาเซลเซียส

65–90 %RH และ 50–70% ตามลำดับ หากสูงหรือต่ำเกินไปจะทำให้พืชเจริญเติบโตผิดปกติ ด้วยปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้า เมื่อนำเงื่อนไขดังกล่าวมาใช้ในการควบคุมการอนุบาลต้นกล้าในโรงเรือน จะทำให้ได้ต้นกล้าที่แข็งแรง สมบูรณ์ และเมื่อมีการนำเทคนิคโดยใช้ไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน ที่ความยาวคลื่น 430–460 นาโนเมตร และสีแดงที่ความยาวคลื่น 630–660 นาโนเมตร ในการเร่งการเจริญเติบโตของต้นกล้าจากงานวิจัย [11],[12] มาประยุกต์ใช้ในโรงเรือนจึงส่งผลให้ต้นกล้าเจริญเติบโตเร็วขึ้น

ด้วยเหตุนี้การนำเทคนิคการควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของต้นกล้าตลอดเวลา และเทคนิคการใช้ไดโอดเปล่งแสงในการเร่งการเจริญเติบโตของต้นกล้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกัน จะทำให้ช่วยเพิ่มคุณสมบัติแข็งแรงของต้นกล้า และเพิ่มอัตราการรอดของต้นกล้าก่อนนำไปปลูกลงแปลงใหญ่

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ขอขอบคุณ หลักสูตรวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า และหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนเครื่องจักรและอุปกรณ์ดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผักอินทรีย์ตำบลท่าข้ามที่ให้ข้อมูลและสถานที่สำหรับการทดลอง และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยที่สนับสนุนทุนวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ปี พ.ศ.2564

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Lozoya, E. Eyzaguirre, J. Espinoza, S. L. Montes-Fonseca and G. Rosas-Perez, "Spectral Vegetation Index Sensor Evaluation for Greenhouse Precision Agriculture," in *2019 IEEE SENSORS*, Montrea, Canada, 2019, pp. 1–4, doi: 10.1109/SENSORS43011.2019.8956911.
- [2] T. Pobkrut, T. Eamsa-ard and T. Kerdcharoen, "Sensor drone for aerial odor mapping for agriculture and security services," in *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Chiang Mai, Thailand, 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/ECTICon.2016.7561340.
- [3] T. M. Bandara, W. Mudiyansele and M. Raza, "Smart farm and monitoring system for measuring the Environmental condition using wireless sensor network - IOT Technology in farming," in *2020 5th International Conference on Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications (CITISIA)*, Sydney, Australia, 2020, pp. 1–7, doi: 10.1109/CITISIA50690.2020.9371830.
- [4] L. Dan, C. Xin, H. Chongwei and J. Liangliang, "Intelligent Agriculture Greenhouse Environment Monitoring System Based on IOT Technology," in *2015 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City*, Halong Bay, Vietnam, 2015 pp. 487–490, doi: 10.1109/ICITBS.2015.126.
- [5] S. Vatari, A. Bakshi and T. Thakur, "Green house by using IOT and cloud computing," in *2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, Bangalore, India, 2016, pp. 246–250, doi: 10.1109/RTEICT.2016.7807821.
- [6] P. Unkaw, "Automatic Nutrient Solution Control System for Planting Hydroponics Vegetables with Internet of Things (IoT)," *RMUTSVRJ Research Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 146–157, 2019.
- [7] A. Chaoumead, and D. Phangkeio, "Soil Moisture Control System for Melon Cultivation in Greenhouse," *RMUTSVRJ Research Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 269–278, 2019.
- [8] T. Kaewwiset and P. Yodkhad, "Automatic temperature and humidity control system by using Fuzzy Logic algorithm for mushroom nursery," in *2017 International Conference on Digital Arts, Media and Technology*

- (ICDAMT), Chiang Mai, Thailand, 2017, pp. 396–399, doi: 10.1109/ICDAMT.2017.7905000.
- [9] M. Mehra, S. Saxena, S. Sankaranarayanan, R. J. Tom and M. Veeramanikandan, “IoT based hydroponics system using Deep Neural Networks,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 155, pp. 473–486, 2018, doi: 10.1016/j.compag.2018.10.015.
- [10] K. -H. Lin, M. -Y. Huang, W. -D. Huang, M. -H. Hsu, Z. -W. Yang and C. -M. Yang, “The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality if hydroponically grown lettuce,” *Scientia Horticulture*, vol. 150, pp. 86–91, 2013, doi: 10.1016/j.scienta.2012.10.002.
- [11] H. Li, C. Tang, Z. Xu, X. Liu and X. Han, “Effects of different light sources on the growth of non-heading chinese cabbage (*Brassica campestris* L.),” *Journal of Agricultural Science*, vol. 4, no. 4, pp. 262–273, 2012, doi: 10.5539/jas.v4n4p262.
- [12] P. Limprasitwong and C. Thongchaisuratkrul, “Plant Growth Using Automatic Control System under LED, Grow, and Natural Light,” in *2018 5th International Conference on Advanced Informatics: Concept Theory and Applications (ICAICTA)*, Krabi, Thailand, 2018, pp. 192–195, doi: 10.1109/ICAICTA.2018.8541308.
- [13] P. Yuda, P. A. Gautama, R. Andrian, “Evaluation of IoT-Based Grow Light Automation on Hydroponic Plant Growth,” *Journal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika (JITEKI)*, vol. 7, no. 2, pp. 314–325, 2021, doi: 10.26555/jiteki.v7i2.21424.
- [14] S. Sahapong and C. Mitchai, “Development of an environmental control system for growing microgreens,” *FEAT Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 15–25, 2019.

การประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้นร่วมกับวิธีการรวมแบบถ่วงน้ำหนัก เพื่อคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบที่เหมาะสมของโรงงานผลิตหมูเส้นกรอบ

Application of Analytic Hierarchy Process Together with Simple Additive Weighting Methods for Raw Materials Supplier Selection of Crispy Pork Factory

อิสริยพร หลวงหาญ^{1*}, ภาณุ บุรณจารุกร² และ กณพ วัฒนา³

^{1*} สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ท่าอิฐ เมืองอุตรดิตถ์ อุตดิตถ์ 53000

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ท่าโพธิ์ เมืองพิษณุโลก พิษณุโลก 65000

³ สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ท่าอิฐ เมืองอุตรดิตถ์
อุตดิตถ์ 53000

Itsariyaporn Luanghan^{1*}, Panu Buranajarukorn² and Kanop Wattana³

¹ Program of Logistics Engineering, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University, Tha-It, Muang
Uttaradit, Uttaradit, 53000, Thailand

² Department of Engineering Industrial, Faculty of Engineering, Naresuan University, Tha-Pho, Muang Phitsanulok,
Phitsanulok, 65000, Thailand

³ Program of Engineering Management, Faculty of Industrial Technology,
Uttaradit Rajabhat University, Tha-It, Muang Uttaradit, Uttaradit, 53000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: itsariyaporn6027@gmail.com

Received: Feb 24, 2022; **Revised:** May 27, 2022; **Accepted:** Jun 17, 2022

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาเกณฑ์และวิธีการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบที่เหมาะสมให้กับโรงงานผลิตหมูเส้นกรอบภายใต้สถานการณ์การแพร่ระบาดโควิด-19 ผลการวิจัยแสดงได้ดังนี้ (1) จากการทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถหาเกณฑ์การคัดเลือกผู้ส่งมอบที่เหมาะสมด้วยวิธีค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก ได้ทั้งหมด 7 เกณฑ์ ได้แก่ ราคา คุณภาพ การส่งมอบ ความน่าเชื่อถือของผู้ส่งมอบ ความสมบูรณ์ของการส่งมอบ รูปแบบการชำระเงิน และการจัดการภาวะวิกฤต โดยเฉพาะในปัจจุบันที่มีสถานการณ์การแพร่ระบาดโควิด-19 ดังนั้นเกณฑ์การจัดการภาวะวิกฤตถูกพิจารณาเป็นเกณฑ์ที่สำคัญเป็นอันดับ 2 รองจากเกณฑ์คุณภาพ (2) เมื่อนำเกณฑ์ที่เหมาะสม ทั้ง 7 เกณฑ์ มาทำการวิเคราะห์คัดเลือกผู้ส่งมอบ 3 รายของโรงงานกรณีศึกษาโดยใช้วิธีทั้งสามของ วิธีการกระบวนการเชิงลำดับชั้น วิธีการรวมแบบถ่วงน้ำหนัก และวิธีการกระบวนการเชิงลำดับชั้นรวมแบบถ่วงน้ำหนัก ผลการวิจัยพบว่า ทั้งสามวิธีมีลำดับการคัดเลือกผู้ส่งมอบที่เหมือนกัน คือ ผู้ส่งมอบ A ผู้ส่งมอบ C และ ผู้ส่งมอบ B และสุดท้าย (3) เมื่อพิจารณาผลลัพธ์จากวิธีทั้งสาม พบว่า ค่าคะแนนการจัดลำดับความสำคัญของวิธีการกระบวนการเชิงลำดับชั้นรวมแบบถ่วงน้ำหนักมีค่าที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น ดังนั้น วิธีการนี้จึงมีความน่าเชื่อถือ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมและปัญหาอื่นที่ใกล้เคียงได้

คำสำคัญ: การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ, การวิเคราะห์กระบวนการเชิงลำดับชั้น, การรวมแบบถ่วงน้ำหนัก

Abstract

The objective of this research was to determine the criteria and methods for selecting the suitable raw material supplier for the crispy pork factory under the COVID-19 epidemic situation. The followings are research results. First of all, literature review showed that there were total of seven criteria for selecting suitable suppliers which obtained by weighted average method. The seven criteria are price, quality, delivery, supplier's reliability, delivery's completeness, payment pattern, and crisis management. Especially in the current situation with the epidemic of COVID-19, therefore the crisis management was considered the second most important criterion after the quality. Secondly, in a case study, the seven criteria were applied to select the most suitable supplier from three suppliers and three methods; Analytic Hierarchy Process (AHP), Simple Additive Weighting (SAW), and Analytic Hierarchy Process Together with Simple Additive Weighting (AHP-SAW) were used. The results showed that all three methods yielded the same supplier ranking as Supplier A > Supplier B > Supplier C. Finally, the priority score of AHP-SAW was the highest compared to the others. Therefore, this AHP-SAW method was seemed to be the most reliable and able to solve other industries and related problems.

Keywords: Raw Materials Supplier Selection, Analytic Hierarchy Process, Simple Additive Weighting

1. บทนำ

ด้วยปัจจุบันเกิดสถานการณ์แพร่ระบาดของเชื้อโควิด-19 ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจและสังคมเป็นวงกว้างทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการดำรงชีวิตของคนทั่วไปสู่วิถีการดำรงชีวิตแบบ New Normal ทั้งนี้ ผู้บริโภคส่วนใหญ่ได้ให้ความสำคัญกับการเลือกบริโภคอาหารสำเร็จรูปที่รับประทานง่าย สามารถจัดเก็บไว้ได้เป็นระยะเวลานาน มีมาตรฐานความปลอดภัยในการผลิต สะอาดปลอดภัยและคุณค่าทางโภชนาการ โรงงานผลิตหมูเส้นกรอบเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับมาตรฐานคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) ในการผลิตสินค้าแปรรูปเพื่อการบริโภคซึ่งโรงงานผลิตหมูเส้นกรอบเป็นโรงงานผลิตและจัดส่งผลิตภัณฑ์หมูเส้นกรอบ โรงงานผลิตหมูเส้นกรอบมีการดำเนินการผลิตสินค้าตามคำสั่งซื้อ (Make to order) ด้วยการรับคำสั่งซื้อสินค้าล่วงหน้าอย่างน้อย 1-2 วัน จากเดิมผลิต สัปดาห์ละ 2-3 วัน ด้วยสถานการณ์ปัจจุบันทำให้มีคำสั่งซื้อสินค้าล่วงหน้ามีปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและไม่แน่นอน ทำให้โรงงานจำเป็นต้องมีการวางแผนการสั่งซื้อวัตถุดิบหลัก (เนื้อหมูสด) เพื่อให้ผู้ส่งมอบวัตถุดิบสามารถจัดส่งวัตถุดิบได้อย่างแม่นยำทั้งคุณภาพ ปริมาณการจัดส่งและราคาที่เหมาะสม

สามารถรองรับความต้องการของลูกค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพในการจำหน่ายสินค้า

ทั้งนี้ จากผลการดำเนินงานของผู้ส่งมอบวัตถุดิบและการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการที่ผ่านมา มีประเด็นปัญหาดังนี้ 1) การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ ผู้ประกอบการได้อาศัยประสบการณ์ในการตัดสินใจ โดยไม่มีหลักเกณฑ์หรือวิธีการพิจารณาที่เหมาะสม 2) ผู้ประกอบการขาดประสบการณ์หรือความสามารถในการหาเกณฑ์พิจารณาที่เหมาะสมกับธุรกิจ ประกอบการตัดสินใจคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบที่ดีที่สุด และ 3) บางครั้งผู้ส่งมอบวัตถุดิบไม่สามารถดำเนินการได้ตรงตามข้อตกลง ส่งผลกระทบให้เกิดปัญหาการผลิตสินค้าไม่เป็นไปตามคำสั่งซื้อ หรือทำให้การส่งมอบสินค้าล่าช้า ซึ่งทำให้ผู้ประกอบการมีความกังวลใจในการดำเนินธุรกิจร่วมกับคู่ค้าในระยะยาว ประกอบกับสถานการณ์การแพร่ระบาดโควิด-19 จำเป็นที่ผู้ส่งมอบวัตถุดิบต้องมีความรู้ความสามารถในการจัดการภาวะวิกฤตนี้

ดังนั้น เพื่อให้กรณีศึกษาสามารถคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบหลักได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยเทคนิควิธีการทางวิชาการและเกณฑ์การพิจารณาที่เหมาะสมต่อการตัดสินใจคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบหลัก ผู้วิจัยจึงได้

ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวกับการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ หรือ การคัดเลือกซัพพลายเออร์ (Supplier Selection) เกณฑ์การคัดเลือกผู้ส่งมอบ (Supplier Selection Criteria) ซึ่งเป็นการแก้ไขปัญหามแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Making: MCDM) ซึ่งเป็นปัญหาที่ซับซ้อนและต้องอาศัยเกณฑ์การพิจารณาทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ [1] จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ (Supplier) มีเทคนิคที่นิยมใช้กัน เช่น วิธี Analytic Hierarchy Process (AHP), วิธี Analytic Network Process (ANP), วิธี Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), วิธี Outranking method with Elimination and Choice Expressing Reality (ELECTREE) and Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (PROMOTHEE) และวิธี Multi-Attribute Utility Theory (MAUT method) ทั้งนี้ งานวิจัยที่ผ่านมาได้นำวิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหรือปัญหาที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้วิธี AHP เป็นวิธีที่แก้ปัญหาลักษณะซับซ้อนให้เข้าใจง่าย โดยอาศัยผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์โดยตรงในการตัดสินใจภายใต้วัตถุประสงค์ที่สำคัญของโรงงาน [2] โดยการนำเทคนิคดังกล่าวมาตัดสินใจเลือกปัจจัยและผู้ส่งมอบวัตถุดิบสำหรับโรงงานผลิตกระสอบตัวอย่าง เพื่อให้ได้ค่าน้ำหนักและความสำคัญของปัจจัยผู้ส่งมอบที่เป็นประโยชน์ที่สุด [3] ได้ศึกษารูปแบบการคัดเลือกผู้ส่งมอบที่เหมาะสมกรณีศึกษา อุตสาหกรรมยานยนต์ โดยได้เกณฑ์การพิจารณาและการประเมินผู้ส่งมอบจากผู้จัดการฝ่ายจัดซื้อจำนวน 10 คน [4] การวิเคราะห์เกณฑ์พิจารณาที่หลากหลายของการขนส่งสินค้าในเมืองขนาดใหญ่ โดยได้ประยุกต์ใช้วิธี AHP ในการคัดเลือกเกณฑ์การพิจารณาประกอบการตัดสินใจ [5] ได้วิเคราะห์การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบในการพิจารณาเกณฑ์และจัดลำดับผู้ส่งมอบที่มีค่าน้ำหนักที่ดีที่สุด

ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเพิ่มเติมพบว่า ยังมีวิธีอื่นที่นิยมใช้ในการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ วิธีการรวมแบบถ่วงน้ำหนัก (Simple Additive Weighting: SAW)

มีแนวคิดพื้นฐาน คือ การหาผลรวมถ่วงน้ำหนักของการจัดอันดับประสิทธิภาพในแต่ละทางเลือกในทุกคุณลักษณะหรือเกณฑ์การพิจารณาทั้งหมด โดยวิธี SAW ต้องการปรับกระบวนการตัดสินใจด้วยเมทริกซ์ให้มีมาตรฐานเป็นมาตรฐานเทียบได้กับการจัดอันดับทางเลือกที่มีทั้งหมด จุดเด่นของวิธี SAW คือ สามารถประเมินผลได้อย่างละเอียดโดยการกำหนดเกณฑ์พิจารณาและค่าน้ำหนักไว้ล่วงหน้า [6] ได้แก่ ระบบสนับสนุนการตัดสินใจเลือกโรงเรียนที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากเกณฑ์ที่มีและกำหนดลักษณะของแต่ละเกณฑ์ซึ่งทำให้ได้ค่าน้ำหนักในการหาคำตอบใกล้เคียงกับข้อเท็จจริงมากที่สุด [7] ระบบสนับสนุนการตัดสินใจคัดเลือกผู้ส่งมอบที่ดีที่สุดของธุรกิจคอมพิวเตอร์แห่งหนึ่ง นำไปพิจารณาการคัดเลือกผู้ส่งมอบโดยอาศัยชนิดของเกณฑ์และข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการคำนวณและกำหนดค่าน้ำหนัก เพื่อให้ผู้ใช้ได้ซัพพลายเออร์ตรงกับความต้องการมากที่สุด [8] การกำหนดเกณฑ์การคัดเลือกผู้ส่งมอบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในสถานประกอบการสิ่งทอและ การเลือกรูปแบบการจัดจำหน่ายที่เหมาะสมที่สุด กรณีศึกษาของ Giresun ซึ่งได้ใช้วิธี SAW ในการกำหนดลักษณะของเกณฑ์การพิจารณาจากกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ [9]

อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยยังพบข้อสังเกตว่า การเลือกใช้วิธี AHP และวิธี SAW มาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานวิจัย เช่น การเปรียบเทียบวิธี AHP และวิธี SAW ในการคัดเลือกพนักงาน พบว่า ทั้ง 2 วิธีให้ผลลัพธ์ตรงกัน โดยวิธี AHP จะเป็นการพิจารณาแบบเทียบคู่รายเกณฑ์ แต่วิธี SAW จะพิจารณาแต่ละเกณฑ์จากการกำหนดข้อมูลที่มีลักษณะเฉพาะของแต่ละเกณฑ์ แสดงให้เห็นว่า ผลลัพธ์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น [10] ได้เปรียบเทียบวิธี AHP และวิธี SAW ในการคัดเลือกหัวหน้าแผนกกรณีศึกษา พบว่า วิธีการดังกล่าวให้ผลลัพธ์ตรงกัน [11] เช่นเดียวกับ การเสนอที่ตั้งโรงงานอาหารกรอบ ซึ่งพิจารณาจากข้อมูลตัวอย่างสภาพอากาศในการกำหนดค่าน้ำหนักและความสำคัญ [12] จากข้อมูลดังกล่าว ผู้วิจัยจึงต้องการนำเสนอวิธีการรวมแบบถ่วงน้ำหนักด้วยกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytic Hierarchy

Process Together with Simple Additive Weighting: AHP-SAW) ซึ่งมีผู้นำไปประยุกต์ใช้เกี่ยวกับการคัดเลือกนักเรียนที่เหมาะสมช่วยเพิ่มการสนับสนุนการตัดสินใจของการวัดความถูกต้องตามหลักการและสอดคล้องค่าน้ำหนักความสำคัญได้แม่นยำกว่าวิธีที่ผ่านมา [13]

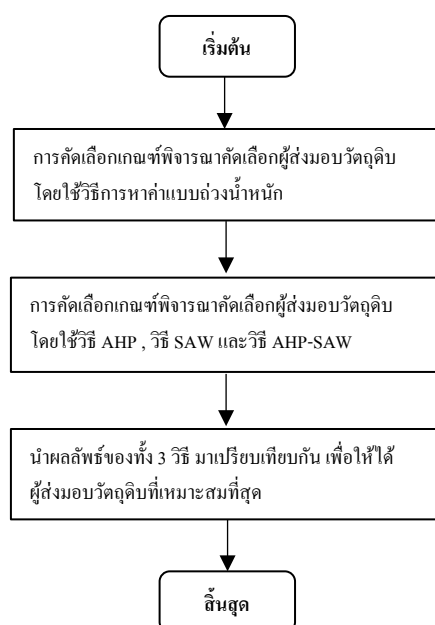
จากข้อมูลข้างต้นผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษา ดังนี้
1) การพิจารณาเกณฑ์คัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบที่เหมาะสมภายใต้สถานการณ์การแพร่ระบาดโควิด-19 และ 2) หาวิธีการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ โดยการเปรียบเทียบวิธี AHP วิธี SAW และวิธี AHP-SAW ที่มีหลักการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพที่ได้ง่ายและเป็นที่ยอมรับการพิจารณาเกณฑ์คัดเลือกด้วยวิธีการหาค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก

(Normalization Weight Average) ในการคำนวณหาผลลัพธ์ด้วยการเปรียบเทียบแต่ละวิธีด้วยการจัดเรียงลำดับในการคัดเลือกหาผู้ส่งมอบวัตถุดิบหลักที่ดีที่สุดของกรณีศึกษา

2. ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

2.1.การดำเนินขั้นตอนงานวิจัย

ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยเชิงปริมาณที่ได้ทบทวนวรรณกรรมเกณฑ์การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบอุตสาหกรรมอาหารภายใต้สถานการณ์แพร่ระบาดโควิด-19 โดยอาศัยการเปรียบเทียบด้วยวิธี AHP, วิธี SAW และวิธี AHP-SAW เพื่อให้ได้ผู้ส่งมอบวัตถุดิบที่เหมาะสมที่สุดแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

2.2.การพิจารณาเกณฑ์การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบที่

เหมาะสม

การศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบด้านอาหารที่เหมาะสมภายใต้สถานการณ์การแพร่ระบาดของ โควิด-19 ทั้งหมด 16 เกณฑ์ โดยนำมาหาค่าถ่วงน้ำหนักเฉลี่ยของแต่ละเกณฑ์ [14] เมื่อเกณฑ์คัดเลือกได้มีค่าถ่วงน้ำหนักเฉลี่ยมากกว่า 0.0640 เพื่อให้ได้เกณฑ์การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบเพียง 7 เกณฑ์

ประกอบด้วย เกณฑ์ที่ 1 ราคา (C_1 : Price), เกณฑ์ที่ 2 คุณภาพ (C_2 : Quality), เกณฑ์ที่ 3 การส่งมอบวัตถุดิบ (C_3 : Delivery), เกณฑ์ที่ 4 ความน่าเชื่อถือของผู้ส่งมอบวัตถุดิบ (C_4 : Reliability), เกณฑ์ที่ 5 ความสมบูรณ์ของการส่งมอบ (C_5 : Completeness), เกณฑ์ที่ 6 รูปแบบการชำระเงิน (C_6 : Payment Term) และ เกณฑ์ที่ 7 การจัดการภาวะวิกฤต (C_7 : Crisis management) ซึ่งมีค่าน้ำหนักเฉลี่ย 0.1149, 0.1673, 0.0785, 0.0686, 0.0694, 0.0643 และ 0.1286 ตามลำดับ แสดงตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปเกณฑ์การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบจากการทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่ผ่านมา

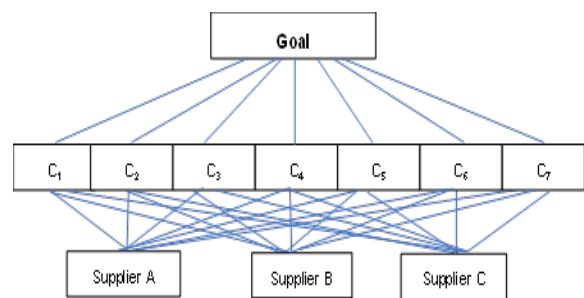
เกณฑ์การคัดเลือก	ผู้วิจัย	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	ผลรวม	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย แบบถ่วง น้ำหนัก
ต้นทุน/ราคา		0.4460	0.4690		0.3830	0.0800	0.1400	0.0900	1.6080	0.2680	0.1149
คุณภาพ		0.2370	0.2930	0.4230	0.3260	0.4200	0.6129	0.4200	2.7319	0.3903	0.1673
การส่งมอบ			0.1180	0.2710	0.0950	0.3200	0.1115		0.9155	0.1831	0.0785
ความน่าเชื่อถือ								0.1600	0.1600	0.1600	0.0686
ความสมบูรณ์ของ การส่งมอบ				0.1620					0.1620	0.1620	0.0694
รูปแบบการชำระเงิน								0.1500	0.1500	0.1500	0.0643
การจัดการภาวะวิกฤต								0.3000	0.3000	0.3000	0.1286
การจัดการสิ่งแวดล้อม /สินค้าสีเขียว				0.1440				0.030	0.1440	0.1440	0.0617
สถานที่และการกระจาย สินค้า		0.1060							0.1060	0.1060	0.0454
ปริมาณการส่งมอบ						0.0920			0.0920	0.0920	0.0394
การบริการ		0.0530	0.0590		0.1530		0.0643		0.3293	0.0823	0.0353
เทคโนโลยีที่สนับสนุน							0.0713		0.0713	0.0713	0.0306
การรับประกัน						0.0700			0.0700	0.0700	0.0300
ความเสี่ยง			0.0610						0.0610	0.0610	0.0261
ประสบการณ์								0.0500	0.0500	0.0500	0.0214
การจัดการองค์กร					0.0430				0.0430	0.0430	0.0184

2.3.การวิเคราะห์กระบวนการเชิงลำดับชั้นการคัดเลือก

ผู้ส่งมอบวัตถุดิบที่เหมาะสม

งานวิจัยในส่วนนี้ได้ออกแบบสอบถาม จำนวน 2 ชุด
ดังนี้ แบบสอบถามชุดที่ 1 ศึกษาเปรียบเทียบเกณฑ์
พิจารณาคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ เพื่อให้ได้ค่าน้ำหนัก
ความสำคัญของแต่ละเกณฑ์ ทั้ง 7 เกณฑ์ แบบสอบถาม
ชุดที่ 2 การจัดลำดับความสำคัญผู้ส่งมอบวัตถุดิบ จำนวน
3 ราย ตามเกณฑ์ที่ได้จากแบบสอบถามชุดที่ 1 มาพิจารณา
ร่วมกับทางเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ จำนวน 3 ราย
กำหนดการประเมินแบบสอบถามทั้ง 2 ชุดนี้โดย
ผู้เชี่ยวชาญด้านโลจิสติกส์และการผลิตเกี่ยวกับ

ผู้ประกอบการอาหารรายย่อยและวิสาหกิจชุมชนในพื้นที่
จำนวน 3 ราย แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างการวิเคราะห์กระบวนการเชิงลำดับ
ชั้นในการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ

2.3.1. การสร้างเมทริกซ์ความสัมพันธ์เกณฑ์

การคัดเลือกแบบเปรียบเทียบที่ละคู่

เมทริกซ์เปรียบเทียบแบบคู่จะกำหนดความสำคัญของค่าน้ำหนักของเกณฑ์การตัดสินใจภายในแต่ละระดับความสำคัญ เพื่อแสดงถึงความเท่าเทียมกันจำเป็นต้องมีการเปรียบเทียบเกณฑ์ทั้งหมด $n \times (n-1)/2$ หลังจากที่มีการเปรียบเทียบเกณฑ์การตัดสินใจทั้งหมดกับคะแนนแล้ว การเปรียบเทียบแบบคู่หรือเมทริกซ์การตัดสินใจดังสมการที่ (1) จะถูกสร้างขึ้น เมทริกซ์นี้ประกอบด้วย n แถวและ n คอลัมน์ ($n \times n$ matrix) เมื่อ n คือ จำนวนเกณฑ์การคัดเลือก ซึ่งการหาค่าน้ำหนักความสำคัญโดยใช้เกณฑ์การพิจารณาดังตารางที่ 2 เมื่อ a_{ij} คือ ผลการเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์การคัดเลือก i และ j เมทริกซ์เปรียบเทียบแบบคู่ (A) [21]

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ตารางที่ 2 ค่าน้ำหนักคะแนนในการเปรียบเทียบแบบรายคู่ (Pairwise comparison in AHP) [22]

ระดับค่าน้ำหนัก คะแนนความสำคัญ	ความหมาย
1	สำคัญเท่ากัน
3	สำคัญกว่าปานกลาง
5	สำคัญกว่ามาก
7	สำคัญกว่ามากที่สุด
9	สำคัญกว่าสูงสุด
2, 4, 6, 8	กรณีประนีประนอม 7 เพื่อลดช่องว่าง

2.3.2. การตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูล

เมื่อได้ค่า λ_{max} มันจะถูกใช้เป็นดัชนีอ้างอิงเพื่อคัดกรองข้อมูลโดยการคำนวณอัตราส่วนความสอดคล้อง

(Consistency Index: CI) ของเวกเตอร์โดยประมาณ เพื่อตรวจสอบว่าเมทริกซ์การเปรียบเทียบแบบรายคู่มีการประเมินที่สอดคล้องกันอย่างสมบูรณ์หรือไม่ ในการคำนวณค่าลักษณะเฉพาะสูงสุด λ_{max} สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2) ทั้งนี้ ถ้าข้อมูลตารางเมทริกซ์มีความสอดคล้องกัน เมื่อได้ค่า λ_{max} จึงนำมาทดสอบจะเท่ากับจำนวนเกณฑ์ การคัดเลือกที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ (n) ดังสมการที่ (3) หลังจากได้ค่า CI แล้ว จึงหาค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio: CR) ดังสมการที่ (4) [23]

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} W_j}{n} \right] \quad (2)$$

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{n - 1} \quad (3)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

เมื่อค่าดัชนีการสุ่มตัวอย่าง (Random index: RI) ที่ได้จากการประมวลผลเปรียบเทียบ ผู้วิจัยได้กำหนดค่า $RI = 1.32$ [21] โดยกำหนดให้ค่า $CR < 0.10$ แสดงว่าการประเมินภายในเมทริกซ์ของเกณฑ์มีความสอดคล้องที่ดี หากค่า $CR > 0.10$ แสดงว่าขาดความสอดคล้องกับการตัดสินใจภายในเมทริกซ์ ดังนั้น จึงมีกระบวนการทบทวนพิจารณาใหม่ และปรับปรุงให้อัตราส่วนความสอดคล้องยอมรับได้

2.4. การวิเคราะห์ข้อมูลการรวมแบบถ่วงน้ำหนัก

(Sample Additive Weighting: SAW)

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี SAW ผู้วิจัยได้ใช้แบบสอบถามชุดที่ 3 เพื่อหาทางเลือกที่ดีที่สุด โดยอาศัยกำหนดเกณฑ์พิจารณาจากข้อมูลจริงที่สถานประกอบการได้รวบรวมและร่วมพิจารณากำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญแบบระดมความคิดของผู้ที่เกี่ยวข้องกรณีศึกษาตามตารางที่ 3 ซึ่งแบบสอบถามดังกล่าวได้ให้ผู้ประกอบการกรณีศึกษาเป็นผู้ประเมิน ดังนี้

ตารางที่ 3 คำอธิบายเชิงคุณภาพการให้คะแนนของแต่ละเกณฑ์การคัดเลือกด้วยวิธี SAW

เกณฑ์การคัดเลือก	ที่	รายละเอียด	ค่าคะแนน
ราคา	1	ราคาวัตถุดิบหลัก < ราคาตลาด	100
	2	ราคาวัตถุดิบหลัก ≤ ราคาตลาด	80
	3	ราคาวัตถุดิบหลัก > ราคาตลาด	60
คุณภาพ	1	วัตถุดิบสดใหม่ แช่เย็นเพียงอย่างเดียว	100
	2	วัตถุดิบสดใหม่ แช่เย็นและแช่แข็ง	20
การส่งมอบวัตถุดิบ	1	มีบริการจัดส่งและได้รับวัตถุดิบตรงตามเวลา	100
	2	มีบริการจัดส่งและได้รับวัตถุดิบ ค่าช้าไม่เกิน 2 ชั่วโมง	80
	3	มีบริการจัดส่งและได้รับวัตถุดิบ ค่าช้าประมาณ 2 - 4 ชั่วโมง	60
	4	ไม่มีบริการจัดส่ง แต่กำหนดเวลารับวัตถุดิบได้	40
	5	ไม่มีบริการจัดส่ง กำหนดเวลารับวัตถุดิบไม่ได้	20
ความน่าเชื่อถือของผู้ส่งมอบวัตถุดิบ	1	มีเอกสารรับรองแหล่งที่มาของวัตถุดิบตามมาตรฐานทุกครั้ง	100
	2	มีเอกสารรับรองแหล่งที่มาของวัตถุดิบตามมาตรฐานบางครั้ง	90
ความสมบูรณ์ของการส่งมอบ	1	ดีเยี่ยม	100
	2	ดี	80
	3	ปานกลาง	60
	4	ควรปรับปรุง	20
รูปแบบการชำระเงิน	1	เครดิต 30 วัน	100
	2	เครดิต 15 วัน	60
	3	เครดิต 7 วัน	40
	4	เงินสด	20
การจัดการภาวะวิกฤต	1	ดีเยี่ยม	100
	2	ดี	80
	3	พอใช้	60

2.4.1. การหาค่าความสำคัญของเกณฑ์การคัดเลือก

ด้วยวิธี SAW

โดยทุกคุณลักษณะหรือเกณฑ์การพิจารณาทั้งหมด ต้องการปรับกระบวนการตัดสินใจด้วยเมทริกซ์ให้มีมาตรฐานเป็นมาตรฐานเทียบได้กับการจัดอันดับทางเลือกที่มีทั้งหมด ดังสมการที่ (5) [6]

$$R_{ij} = \frac{\frac{X_{ij}}{\max X_{ij}}}{\frac{\min X_{ij}}{X_{ij}}} \quad (5)$$

กำหนดให้ R_{ij} คือ จัดอันดับประสิทธิภาพการทำงาน $\max_{ij}$ คือ ค่าสูงสุดของแต่ละแถวและคอลัมน์ $\min_{ij}$ คือ ค่าต่ำสุดของแต่ละแถวและคอลัมน์ X_{ij} คือ แถวและคอลัมน์ของเมทริกซ์ ทั้งนี้ R_{ij} คือ การจัดอันดับประสิทธิภาพปกติของ A_i ทางเลือก

2.5.การวิเคราะห์ข้อมูลกระบวนการเชิงลำดับชั้นรวมแบบถ่วงน้ำหนัก (Analytic Hierarchy Process Together with Sample Additive Weighting: AHP-SAW)

วิธี AHP-SAW เป็นการประยุกต์ใช้วิธี AHP และวิธี SAW ร่วมกัน โดยวิธีหนึ่งจะเป็นเกณฑ์สำหรับการหาค่าน้ำหนักความสำคัญและอีกวิธีหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นการจัดอันดับทางเลือก ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดให้วิธี AHP เป็นวิธีหาค่าน้ำหนักความสำคัญแต่ละเกณฑ์การพิจารณา และวิธี SAW เป็นวิธีการจัดลำดับข้อมูล เพื่อให้ได้ทางเลือกที่ดีที่สุด [13]

3. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1.การประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การคัดเลือกด้วยวิธีวิเคราะห์กระบวนการเชิงลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process: AHP)

3.1.1.การพิจารณาประเมินค่าน้ำหนักของการคัดเลือกของผู้เชี่ยวชาญ

การวิเคราะห์ข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญด้านโลจิสติกส์และการผลิต จำนวน 3 ราย ที่ตอบแบบสอบถามเกี่ยวกับเกณฑ์ที่มีความสำคัญต่อการพิจารณาคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบด้วยวิธีวิเคราะห์กระบวนการเชิงลำดับชั้น (AHP) โดยยกตัวอย่างผู้เชี่ยวชาญรายที่ 1 ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตัวอย่างผลการประเมินเกณฑ์การพิจารณาของผู้เชี่ยวชาญรายที่ 1

เกณฑ์การคัดเลือก	ราคา	คุณภาพ	การส่งมอบวัตถุดิบ	ความน่าเชื่อถือของผู้ส่งมอบวัตถุดิบ	ความสมบูรณ์ของการส่งมอบ	รูปแบบการชำระเงิน	การจัดการภาวะวิกฤต	ค่าน้ำหนัก
ราคา	0.093	0.106	0.346	0.231	0.219	0.295	0.040	0.190
คุณภาพ	0.373	0.424	0.231	0.288	0.250	0.246	0.605	0.345
การส่งมอบวัตถุดิบ	0.016	0.106	0.058	0.058	0.094	0.049	0.050	0.061
ความน่าเชื่อถือของผู้ส่งมอบวัตถุดิบ	0.023	0.085	0.058	0.058	0.094	0.049	0.040	0.058
ความสมบูรณ์ของการส่งมอบ	0.013	0.053	0.019	0.019	0.031	0.016	0.029	0.026
รูปแบบการชำระเงิน	0.016	0.085	0.058	0.058	0.094	0.049	0.034	0.056
การจัดการภาวะวิกฤต	0.466	0.141	0.231	0.288	0.219	0.295	0.202	0.263
ผลรวม	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

จากข้อมูลในตารางที่ 4 สามารถนำมาคำนวณหาผลการประเมินเกณฑ์การพิจารณาของผู้เชี่ยวชาญรายที่ 1 โดยยกตัวอย่างการคำนวณเกณฑ์ที่ 1 ราคา ดังนี้

1. การหาผลรวมโดยคำนวณคะแนนแนวดิ่งในตารางเมทริกซ์แต่ละเกณฑ์ =

$$\frac{1}{(1+4+\frac{1}{6}+\frac{1}{4}+\frac{1}{7}+\frac{1}{6}+5)} = 0.093$$

2. จากนั้นคำนวณค่าเวกเตอร์เจาะจง (Eigenvector: λ_{max}) เพื่อให้ได้ค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การพิจารณา (Weight) โดยคำนวณหาค่าน้ำหนักใน

แนวนอน แต่ละตัวมาหารด้วยจำนวนเกณฑ์ทั้งหมด

$$\text{เพื่อปรับค่าผลรวมแนวดิ่งให้เท่ากับ 1} = \frac{0.093}{7.00} + \frac{(0.106+0.346+0.231+0.219+0.295+0.040)}{7.00} = 0.19$$

3.1.2.การประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การคัดเลือกของผู้เชี่ยวชาญ

การวิเคราะห์ข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญด้านโลจิสติกส์และการผลิต จำนวน 3 ราย ที่ตอบแบบสอบถามเกี่ยวกับเกณฑ์ที่มีความสำคัญต่อการพิจารณาคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบด้วยวิธี AHP ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละเกณฑ์การคัดเลือกของผู้เชี่ยวชาญ 3 ราย

เกณฑ์การคัดเลือก	ผู้เชี่ยวชาญคนที่ 1	ผู้เชี่ยวชาญคนที่ 2	ผู้เชี่ยวชาญคนที่ 3	ค่าน้ำหนักแต่ละเกณฑ์
ราคา	0.190	0.187	0.170	0.182
คุณภาพ	0.345	0.344	0.396	0.362
การส่งมอบวัตถุดิบ	0.061	0.054	0.055	0.057
ความน่าเชื่อถือของผู้ส่งมอบวัตถุดิบ	0.058	0.067	0.061	0.062
ความสมบูรณ์ของการส่งมอบ	0.026	0.023	0.024	0.024
รูปแบบการชำระเงิน	0.056	0.059	0.059	0.058
การจัดการภาวะวิกฤต	0.263	0.265	0.237	0.255
CI	0.0755	0.1062	0.1126	-
CR	0.091	0.094	0.088	-

จากการให้ผลประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของ แต่ละเกณฑ์การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ (Weight) ตามแบบสอบถามชุดที่ 1 ของผู้เชี่ยวชาญ 3 ราย เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องของของแต่ละเกณฑ์ (Consistency Ratio: CR) แสดงดังตารางที่ 5 พบว่า หากมีค่าน้อยกว่า 0.10 แสดงว่า ผลการประเมินเกณฑ์การคัดเลือกนั้นมีความน่าเชื่อถือและยอมรับได้ สามารถยกตัวอย่างการคำนวณของผู้เชี่ยวชาญคนที่ 1 $0.0755/1.32 = 0.091$ พบว่า ค่าความสอดคล้องของแต่ละเกณฑ์จากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 3 ราย แสดงว่ายอมรับได้ ส่วนการพิจารณาเกณฑ์ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละเกณฑ์ สามารถคำนวณตัวอย่าง เกณฑ์ที่ 1 ราคา = $(0.190 + 0.187 + 0.170) / 3 = 0.182$ เมื่อพิจารณาจากค่าน้ำหนักเกณฑ์การพิจารณาของผู้เชี่ยวชาญ ทั้ง 3 ราย พบว่า

ผู้เชี่ยวชาญได้ให้ความสำคัญของเกณฑ์การพิจารณาสูงสุด ได้แก่ คุณภาพ รองลงมา การจัดการภาวะวิกฤต, ราคา และค่าน้ำหนักเกณฑ์ต่ำสุด คือ ความสมบูรณ์ในการส่งมอบตามลำดับ การศึกษาครั้งนี้ยังพบข้อสังเกตประการหนึ่งว่าการส่งมอบวัตถุดิบ ได้ค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.057 เนื่องจากข้อมูลที่ผ่านมาผู้ประกอบการไม่ได้รับผลกระทบหรือความเสียหายจากการจัดส่งวัตถุดิบจากผู้ส่งมอบวัตถุดิบ จึงส่งผลให้การพิจารณาค่าน้ำหนักความสำคัญของผู้เชี่ยวชาญอยู่ในระดับต่ำ

3.2. การวิเคราะห์การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ ด้วยวิธี AHP

เมื่อผู้เชี่ยวชาญได้ประเมินค่าน้ำหนักในแต่ละเกณฑ์แต่ละผู้ส่งมอบวัตถุดิบเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยจึงนำมาวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบหลัก แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของผู้ส่งมอบต่อเกณฑ์การคัดเลือกจากผู้เชี่ยวชาญ

เกณฑ์การคัดเลือก	ผู้เชี่ยวชาญคนที่ 1			ผู้เชี่ยวชาญคนที่ 2			ผู้เชี่ยวชาญคนที่ 3		
	ผู้ส่งมอบ A	ผู้ส่งมอบ B	ผู้ส่งมอบ C	ผู้ส่งมอบ A	ผู้ส่งมอบ B	ผู้ส่งมอบ C	ผู้ส่งมอบ A	ผู้ส่งมอบ B	ผู้ส่งมอบ C
ราคา	0.532	0.102	0.366	0.648	0.122	0.230	0.685	0.221	0.093
คุณภาพ	0.639	0.087	0.274	0.701	0.213	0.085	0.643	0.283	0.074
การส่งมอบวัตถุดิบ	0.568	0.098	0.334	0.723	0.070	0.206	0.643	0.074	0.283

ตารางที่ 6 ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของผู้ส่งมอบต่อเกณฑ์การคัดเลือกจากผู้เชี่ยวชาญ (ต่อ)

เกณฑ์การคัดเลือก	ผู้เชี่ยวชาญคนที่ 1			ผู้เชี่ยวชาญคนที่ 2			ผู้เชี่ยวชาญคนที่ 3		
	ผู้ส่งมอบ A	ผู้ส่งมอบ B	ผู้ส่งมอบ C	ผู้ส่งมอบ A	ผู้ส่งมอบ B	ผู้ส่งมอบ C	ผู้ส่งมอบ A	ผู้ส่งมอบ B	ผู้ส่งมอบ C
ความน่าเชื่อถือของผู้ส่งมอบวัตถุดิบ	0.627	0.081	0.292	0.639	0.087	0.274	0.619	0.096	0.284
ความสมบูรณ์ของการส่งมอบ	0.620	0.224	0.156	0.548	0.211	0.241	0.682	0.236	0.082
รูปแบบการชำระเงิน	0.400	0.233	0.367	0.377	0.151	0.472	0.411	0.261	0.328
การจัดการภาวะวิกฤต	0.377	0.151	0.472	0.620	0.156	0.224	0.443	0.387	0.170
ผลรวม	3.763	0.977	2.261	4.257	1.011	1.732	4.127	1.559	1.314

จากข้อมูลตามตารางที่ 6 สามารถยกตัวอย่างการคำนวณเกณฑ์ที่ 1 ราคาของผู้เชี่ยวชาญคนที่ 1 ดังนี้ (1) $1/1.750 = 0.571$ และ (2) $(0.571 + 0.400 + 0.625) / 3 = 0.532$ พบว่าผู้เชี่ยวชาญทั้ง 3 ราย ได้ประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของผู้ส่งมอบวัตถุดิบอันดับที่ 1 ตรงกัน คือ ผู้ส่งมอบ A ได้แก่ 3.763, 4.257, 4.127 ตามลำดับ ส่วนอันดับที่ 2 พบว่าผู้เชี่ยวชาญรายที่ 1 และ

รายที่ 2 พิจารณาให้ค่าน้ำหนักความสำคัญตรงกัน คือ ผู้ส่งมอบ C ทั้งนี้ ผู้วิจัยพบข้อสังเกตเห็นว่าผู้เชี่ยวชาญรายที่ 3 ได้ให้ความสำคัญกับผู้ส่งมอบ B ด้วยค่าน้ำหนัก 1.559 แสดงได้ว่าการพิจารณาเกณฑ์การคัดเลือกและข้อมูลในแบบสอบถามที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญในการประเมินนั้นอาจยังไม่ชัดเจนและอาจคลาดเคลื่อนได้ แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ ด้วยวิธี AHP ของผู้เชี่ยวชาญทั้ง 3 ราย

เกณฑ์การคัดเลือก	ค่าน้ำหนักแต่ละเกณฑ์ (W_i)	ความสัมพันธ์ค่าน้ำหนักของแต่ละผู้ส่งมอบ (V_{ij})			ผลรวมของค่าน้ำหนักผู้ส่งมอบ (Z_{ij})		
		ผู้ส่งมอบ A	ผู้ส่งมอบ B	ผู้ส่งมอบ C	ผู้ส่งมอบ A	ผู้ส่งมอบ B	ผู้ส่งมอบ C
ราคา	0.182	0.622	0.148	0.230	0.1132	0.0269	0.0419
คุณภาพ	0.362	0.661	0.194	0.144	0.2393	0.0702	0.0521
การส่งมอบวัตถุดิบ	0.057	0.645	0.081	0.274	0.0368	0.0046	0.0156
ความน่าเชื่อถือของผู้ส่งมอบวัตถุดิบ	0.062	0.629	0.088	0.283	0.0390	0.0055	0.0175
ความสมบูรณ์ของการส่งมอบ	0.024	0.617	0.224	0.160	0.0148	0.0054	0.0038
รูปแบบการชำระเงิน	0.058	0.396	0.215	0.389	0.0230	0.0125	0.0226
การจัดการภาวะวิกฤต	0.255	0.480	0.232	0.289	0.1224	0.0592	0.0737
ความสำคัญของค่าน้ำหนัก (S_j)					0.5884	0.1842	0.2272
การจัดลำดับ					1	3	2

ผลการวิเคราะห์การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบด้วยวิธี AHP ของผู้เชี่ยวชาญทั้ง 3 ราย แสดงผลตามตารางที่ 7 สามารถยกตัวอย่างการคำนวณได้ดังนี้

1. การหาค่า Z_{ij} สำหรับเกณฑ์ที่ 1 ราคาของผู้ส่งมอบ A

$$= 0.182 \times \frac{(0.532+0.102+0.366)}{3} = 0.1132$$
2. หาความสำคัญของค่าน้ำหนัก S_i ของผู้ส่งมอบ A

$$= 0.1132 + 0.2393 + 0.0368 + 0.0390 + 0.0148 + 0.0230 + 0.1224 = 0.5884$$

จากนั้นนำผลรวมความสำคัญของค่าน้ำหนักเกณฑ์คัดเลือกของผู้ส่งมอบแต่ละราย เพื่อหาทางเลือกที่ดีที่สุด

จะเห็นว่า ผู้ส่งมอบวัตถุดิบที่ดีที่สุด คือ ผู้ส่งมอบ A มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.5884 รองลงมา ผู้ส่งมอบ C มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.2272 และผู้ส่งมอบ B มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.1842 ตามลำดับ

3.3.ผลการวิเคราะห์การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบด้วยวิธี SAW

เมื่อผู้ประกอบการได้ให้ค่าน้ำหนักเกณฑ์การคัดเลือกของผู้ส่งมอบวัตถุดิบแต่ละราย ซึ่งพิจารณาจากข้อมูลที่กรณศึกษาได้เก็บรวบรวม ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำมาวิเคราะห์คัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ ดังตารางที่ 8 และตารางที่ 9

ตารางที่ 8 ผลการให้คะแนนประเมินผู้ส่งมอบวัตถุดิบแต่ละราย ด้วยวิธี SAW ของผู้ประกอบการ

เกณฑ์การคัดเลือก	ทางเลือก		
	ผู้ส่งมอบ A	ผู้ส่งมอบ B	ผู้ส่งมอบ C
ราคา	80	80	80
คุณภาพ	100	50	100
การส่งมอบวัตถุดิบ	100	40	80
ความน่าเชื่อถือของผู้ส่งมอบวัตถุดิบ	100	100	100
ความสมบูรณ์ของการส่งมอบ	100	80	60
รูปแบบการชำระเงิน	20	20	40
การจัดการภาวะวิกฤต	100	60	80

ตารางที่ 9 ผลการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ ด้วยวิธี SAW ของผู้ประกอบการ

เกณฑ์การคัดเลือก	ทางเลือก		
	ผู้ส่งมอบ A	ผู้ส่งมอบ B	ผู้ส่งมอบ C
ราคา	1.00	1.00	1.00
คุณภาพ	1.00	0.50	1.00
การส่งมอบวัตถุดิบ	1.00	0.40	0.80
ความน่าเชื่อถือของผู้ส่งมอบวัตถุดิบ	1.00	1.00	1.00
ความสมบูรณ์ของการส่งมอบ	1.00	0.80	0.60
รูปแบบการชำระเงิน	0.50	0.50	1.00
การจัดการภาวะวิกฤต	1.00	0.60	0.80
ผลรวม	6.50	4.80	6.20
ค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก	0.3714	0.2743	0.3543
จัดลำดับ	1	3	2

ผลการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบด้วยวิธี SAW ของผู้ประกอบการ แสดงตามตารางที่ 9 สามารถยกตัวอย่างการคำนวณเพื่อคัดเลือก ผู้ส่งมอบวัตถุดิบที่เหมาะสมได้ดังนี้

1. การหาค่าคะแนนเกณฑ์ราคาของผู้ส่งมอบ A =

$$\frac{80}{\text{Max}(80:80:80)} = 1.00$$

2. ผลรวมของผู้ส่งมอบ A = 1.0 + 1.0 + 1.0 + 1.0 + 1.0

$$+ 0.5 + 1.0 = 6.50$$

3. การหาค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของผู้ส่งมอบ A =

$$\frac{6.50}{(6.50+4.80+6.20)} = 0.3714$$

ดังนั้น เมื่อได้ค่าคะแนนประเมินของผู้ประกอบการมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักและจัดลำดับ เพื่อให้ได้

ผู้ส่งมอบวัตถุดิบที่เหมาะสม พบว่า อันดับที่ 1 ผู้ส่งมอบ A มีค่าคะแนนสูงสุดเท่ากับ 0.3714 อันดับที่ 2 ผู้ส่งมอบ C มีค่าคะแนนเท่ากับ 0.3543 และ ผู้ส่งมอบ B มีค่าคะแนนเท่ากับ 0.2743

3.4.ผลการวิเคราะห์การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบด้วย

วิธี AHP-SAW

เมื่อผู้ประกอบการได้ให้ค่าน้ำหนักเกณฑ์การคัดเลือกของผู้ส่งมอบวัตถุดิบแต่ละราย ซึ่งพิจารณาจากข้อมูลที่กรณศึกษาได้เก็บรวบรวม ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำมาวิเคราะห์คัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การคำนวณผลลัพธ์การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ ด้วยวิธี AHP-SAW

เกณฑ์การคัดเลือก	ค่าน้ำหนักแต่ละเกณฑ์ (W _j)	ความสัมพันธ์ค่าน้ำหนักของแต่ละผู้ส่งมอบ (V _{ij})			ผลรวมของค่าน้ำหนักผู้ส่งมอบ (Z _{ij})		
		ผู้ส่งมอบ A	ผู้ส่งมอบ B	ผู้ส่งมอบ C	ผู้ส่งมอบ A	ผู้ส่งมอบ B	ผู้ส่งมอบ C
ราคา	0.182	1.00	1.00	1.00	0.1820	0.1820	0.1820
คุณภาพ	0.362	1.00	0.50	1.00	0.3620	0.1810	0.3620
การส่งมอบวัตถุดิบ	0.057	1.00	0.40	0.80	0.0570	0.0228	0.0456
ความน่าเชื่อถือของผู้ส่งมอบวัตถุดิบ	0.062	1.00	1.00	1.00	0.0620	0.0620	0.0620
ความสมบูรณ์ของการส่งมอบ	0.024	1.00	0.80	0.60	0.0240	0.0192	0.0144
รูปแบบการชำระเงิน	0.058	0.50	0.50	1.00	0.0290	0.0290	0.0580
การจัดการภาวะวิกฤต	0.255	1.00	0.60	0.80	0.2550	0.1530	0.2040
ความสำคัญของค่าน้ำหนัก (S _j)					0.9710	0.6490	0.9280
การจัดลำดับ					1	3	2

จากนั้นผู้วิจัยจึงนำผลการประเมินค่าความสำคัญของแต่ละทางเลือกทั้งหมดมาวิเคราะห์จัดลำดับความสำคัญโดยรวมของผู้ประกอบการ ซึ่งแสดงตัวอย่างการคำนวณเกณฑ์ที่ 1 ราคา ดังนี้ = $0.182 \times 1.00 = 0.1820$ จากนั้นจึงทำการหาผลรวมของเกณฑ์คัดเลือกของผู้ส่งมอบวัตถุดิบแต่ละราย เพื่อทางเลือกที่ดีที่สุด จะเห็นได้ว่า ผู้ส่งมอบวัตถุดิบที่ดีที่สุด คือ ผู้ส่งมอบ A มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.9710

รองลงมา ผู้ส่งมอบ C มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.9280 และ ผู้ส่งมอบ B มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.6490 ตามลำดับ

3.5.การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบที่เหมาะสมที่สุด

โดยเปรียบเทียบวิธี AHP วิธี SAW และวิธี AHP-SAW

เมื่อผู้เชี่ยวชาญได้ให้ค่าน้ำหนักในแต่ละเกณฑ์แต่ละผู้ส่งมอบวัตถุดิบเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยได้นำมาวิเคราะห์คัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ผลการจัดลำดับการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ ด้วยวิธี AHP วิธี SAW และวิธี AHP-SAW

การจัดลำดับ ความสำคัญ	ทางเลือก	ผลลัพธ์วิธี AHP	ทางเลือก	ผลลัพธ์วิธี SAW	ทางเลือก	ผลลัพธ์วิธี AHP-SAW
1	ผู้ส่งมอบ A	0.5884	ผู้ส่งมอบ A	0.3714	ผู้ส่งมอบ A	0.9710
2	ผู้ส่งมอบ C	0.2272	ผู้ส่งมอบ C	0.3543	ผู้ส่งมอบ C	0.9280
3	ผู้ส่งมอบ B	0.1842	ผู้ส่งมอบ B	0.2743	ผู้ส่งมอบ B	0.6490

ดังนั้น เมื่อผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลการจัดลำดับความสำคัญการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ ด้วยวิธี AHP วิธี SAW และ วิธี AHP-SAW พบว่า ทั้ง 3 วิธี ได้คัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบเหมือนกัน คือ ผู้ส่งมอบ A มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.5884, 0.3714 และ 0.9710 ส่วนอันดับที่ 2 ผู้ส่งมอบ C มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.2272, 0.3543 และ 0.9280 และอันดับที่ 3 ผู้ส่งมอบ B มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.1842, 0.2743 และ 0.6490 ตามลำดับ

4. อภิปรายผล

จากการวิเคราะห์ผลในหัวข้อที่ผ่านมาได้ใช้โปรแกรม Microsoft Excel สามารถสรุปได้ว่า เกณฑ์การพิจารณาคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบหลัก มี 7 เกณฑ์ ได้แก่ เกณฑ์ที่ 1 ราคา (C_1 : Price), เกณฑ์ที่ 2 คุณภาพ (C_2 : Quality), เกณฑ์ที่ 3 การส่งมอบวัตถุดิบ (C_3 : Delivery), เกณฑ์ที่ 4 ความน่าเชื่อถือของผู้ส่งมอบวัตถุดิบ (C_4 : Reliability) เกณฑ์ที่ 5 ความสมบูรณ์ของการส่งมอบ (C_5 : Completeness), เกณฑ์ที่ 6 รูปแบบการชำระเงิน (C_6 : Payment Term) และ เกณฑ์ที่ 7 การจัดการภาวะวิกฤต (C_7 : Crisis management) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี AHP วิธี SAW และวิธี AHP-SAW สามารถคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบหลักโดยการจัดลำดับทางเลือกจากค่าประเมิน ดังนี้ อันดับที่ 1 ผู้ส่งมอบ A อันดับที่ 2 ผู้ส่งมอบ C และอันดับที่ 3 ผู้ส่งมอบ B ทั้งนี้ การประเมินเกณฑ์การพิจารณาคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบหลักด้วยวิธีดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของวิธี AHP และวิธี AHP-SAW มีความสอดคล้องกัน แต่เมื่อพิจารณาวิธี SAW พบว่า เกณฑ์ที่ 6 รูปแบบการชำระเงิน มีค่าน้ำหนักน้อยที่สุด เท่ากับ 20 คะแนน

โดยงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับเกณฑ์คุณภาพและการจัดการภาวะวิกฤตของผู้ส่งมอบวัตถุดิบ เนื่องจากวัตถุดิบหลักเป็นส่วนสำคัญในการผลิตสินค้าประเภทอาหารซึ่งอยู่ในสถานการณ์การแพร่ระบาดโควิด-19 ที่ไม่เคยปรากฏมาก่อนในโลกและมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดปัญหาอื่นร่วมด้วย เช่น ปัญหาเงินทุนของผู้ประกอบการ ปัญหาแรงงานในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม ดังนั้น การตระหนักถึงคุณภาพที่ดีของวัตถุดิบย่อมต้องมีการจัดการภาวะวิกฤตที่เหมาะสมร่วมด้วย [21] เพื่อช่วยให้ผู้ส่งมอบวัตถุดิบทราบแนวทางการพัฒนาเกณฑ์ให้เหมาะสมหรือข้อกำหนดอื่น ๆ ตามที่กรณีศึกษาต้องการ อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ธุรกิจสินค้าและอุตสาหกรรมอื่นได้

สำหรับการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบได้นำ วิธี AHP วิธี SAW และวิธี AHP-SAW ประยุกต์ใช้มีจุดเด่นและ จุดด้อยแตกต่างกัน สามารถอธิบายได้ดังนี้ วิธี AHP เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและยอมรับสำหรับการนำมาใช้ตัดสินใจ แก้ไขปัญหาเกี่ยวกับการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่มีการออกแบบโครงสร้างที่ใช้เกณฑ์การกำหนดค่าน้ำหนักอย่างง่ายและใช้วิธีการเทียบเกณฑ์พิจารณาแบบรายคู่ [24] โดยอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการพิจารณาคัดสินใจอย่างเป็นระบบและข้อมูลจริง ทั้งนี้ยังพบว่า จุดด้อยวิธี AHP คือ เป็นวิธีที่ตัดสินใจที่ไม่ง่ายเมื่อต้องอาศัยการพิจารณาเปรียบเทียบแบบรายคู่ หากผู้ประเมินขาดความเข้าใจ [11] อีกทั้งไม่พิจารณาข้อจำกัดเกี่ยวกับเกณฑ์การตัดสินใจ การพิจารณาข้อมูลขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญแต่ละคน [25] ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index: CI) หากไม่เป็นไปตามกฎเกณฑ์อาจต้องมีการปรับค่าเพื่อให้เป็นที่ยอมรับ ส่วนจุดเด่นของวิธี SAW คือวิธีที่เพิ่มค่าน้ำหนักและเกณฑ์

การพิจารณาอย่างง่ายด้วย เพื่อให้ได้ทางเลือกที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นข้อมูลที่ประเมินและกำหนดไว้ล่วงหน้า [6] ที่ไม่มี การพิจารณาดัชนีความสอดคล้อง จึงทำให้ใช้เวลาในการ คำนวณหาคำตอบได้รวดเร็วและการจัดลำดับความสำคัญ เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง [26] สามารถออกแบบ ข้อกำหนดการประเมินได้ทั้งแบบแนวตั้งและแนวกว้าง มีความยืดหยุ่นต่อการนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะได้ หลากหลาย [27] จุดด้อยของ วิธี SAW ผู้กำหนดเกณฑ์และ การประเมินอาจอาศัยความรู้สึก ดังนั้น ข้อมูลที่ใช้ใน การพิจารณาควรเป็นข้อมูลเชิงปริมาณที่สามารถวัดได้ จึงจะทำให้วิธีการนี้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ ส่วน วิธี AHP-SAW การนำ 2 วิธีมารวมกันจะเพิ่มความแม่นยำใน การพิจารณาได้ดีกว่า เนื่องจากการนำวิธี AHP มาออกแบบ โครงสร้างของปัญหาที่มีความซับซ้อนได้ดี [13] และยังสามารถปรับปรุงทางเลือกให้มีความแม่นยำต่อการ ตัดสินใจได้ดีกว่าวิธีเดิม [23] เช่น การพิจารณาเกณฑ์ได้ใช้ วิธี AHP ในการหาดัชนีความสอดคล้องที่เหมาะสม หลังจากนั้นค่อยนำข้อมูลมาหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบรวม เพื่อให้ได้ทางเลือกที่ดีที่สุด ซึ่งจะช่วยลดช่องว่างของการ ตัดสินใจโดยผู้เชี่ยวชาญจากวิธี AHP เพียงอย่าง หรือการ กำหนดเกณฑ์ประเมินล่วงหน้าจากข้อมูลที่มีความคลาด เคลื่อนได้

5. สรุป

จากการศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์ ตามลำดับขั้นร่วมกับวิธีการรวมแบบถ่วงน้ำหนักเพื่อคัดเลือก ผู้ส่งมอบวัตถุดิบที่เหมาะสมของโรงงานผลิตหมูเส้นกรอบ เนื่องจากการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบต้องคำนึงถึงเกณฑ์ การพิจารณาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมอาหารและ สถานการณ์การแพร่ระบาดของโควิด-19 ดังนั้น เพื่อให้การ คัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบมีประสิทธิภาพสูงสุด ผู้วิจัยจึงได้ นำวิธีการกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับขั้นร่วมกับวิธีการรวม แบบถ่วงน้ำหนัก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาเกณฑ์และวิธีการ คัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณา เกณฑ์คัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยแบบถ่วง น้ำหนักแล้ว พบว่า มีจำนวน 7 เกณฑ์ ที่ผ่านเกณฑ์คัดเลือก

ซึ่งเกณฑ์การคัดเลือกที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 3 อันดับแรก ได้แก่ คุณภาพการจัดการภาวะวิกฤต และต้นทุน/ราคามีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 0.1673 0.1286 และ 0.1149 ตามลำดับ ส่วนผลการ จัดลำดับการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ ด้วยวิธี AHP วิธี SAW และ วิธี AHP-SAW พบว่า ทั้ง 3 วิธี ได้ผลการคัดเลือก ผู้ส่งมอบวัตถุดิบตรงกัน คือ ผู้ส่งมอบ A มีค่าน้ำหนักสูงสุด เท่ากับ 0.5884 0.314 และ 0.9710 รองลงมา ผู้ส่งมอบ B มีค่า น้ำหนัก เท่ากับ 0.2272 0.3543 และ 0.9280 อันดับสุดท้าย ผู้ ส่งมอบ C มีค่าน้ำหนัก เท่ากับ 0.1844 0.2743 และ 0.6492 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากค่าคะแนน การจัดลำดับ ความสำคัญ แสดงให้เห็นว่า วิธี AHP-SAW มีค่าน้ำหนักสูง กว่าวิธีอื่น ดังนั้น วิธีการนี้จึงมีความน่าเชื่อถือและยอมรับได้

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในครั้งต่อไปด้วย ข้อจำกัดของโรงงานการผลิตสินค้าเป็นประเภทธุรกิจขนาด กลางและขนาดย่อม (SMEs) และสินค้ามีน้อยรายการทำให้ ผู้ประกอบการมีทางเลือกในการตัดสินใจคัดเลือก ผู้ส่งมอบ วัตถุดิบได้น้อยราย เช่นเดียวกับเกณฑ์การคัดเลือก ทั้งนี้ หากผู้ประกอบการต้องการเพิ่มศักยภาพการผลิตและ โอกาสการแข่งขันทางธุรกิจในภายหน้าควรศึกษาเกณฑ์ ข้อย่อยและผู้ส่งมอบวัตถุดิบได้หลากหลายมากขึ้นจากการ นำเสนอวิธีการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบสามารถนำไป ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหรือปัญหาในลักษณะอื่นที่ ใกล้เคียงกันได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้เชี่ยวชาญและผู้ประกอบการของ โรงงานผลิตหมูเส้นกรอบที่ได้ให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์ ต่อการศึกษารั้งนี้ บทความวิจัยนี้เป็นการดำเนินงานภายใต้ การบูรณาการงานวิจัยกับการบริการวิชาการต่อการพัฒนา องค์ความรู้ไปประยุกต์ใช้ในสถานประกอบการจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Hamed and B. Aurélie, "Analyzing the Process of Supplier Selection Criteria and Methods," *Procedia Manufacturing*, vol. 32, pp. 1024–1034, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.317.

- [2] S. Watcharawit , K. Kriangkrai and J. Peerapop, "Supplier Selection Using Analytic Hierarchy Process for Sack Manufacturer," *Thai Science and Technology Journal (TSTJ)*, vol. 28, no. 5, pp.873–884, 2020.
- [3] P. Naragain and T. Supasit, "Optimal Supplier Selection Model with Multiple Criteria: A Case Study in the Automotive Parts Industry," *Engineering Journal*, vol. 23, no. 1, pp. 191–203, 2018, doi: 10.4186/ej.2019.23.1.191.
- [4] S. Anna, P. Ivana and I. J. Jorma, "Analytic Hierarchy Process in Multiple–Criteria Decision–Making: A model example," *SHS Web of Conferences*, vol.90, 2021, Art. no. 01019, doi: 10.1051/shsconf/20219001019.
- [5] B. Yusuf and P. Dudi, "Analysis of Propylene Glycol Raw Supplier Selection using The Analytic Hierarchy Process Method," *European Journal of Business and Management Research*, vol. 6, no. 2, pp.69–73, 2021, doi: 10.24018/ejbmr.2021.6.2.783.
- [6] P. T. W. Dede and P. A. Adrian, "Comparison Analysis of Simple Additive Weighting (SAW) and Weighed Product (WP) In Decision Support Systems," *MATEC Web of Conferences*, vol. 215, 2018, Art. no. 01003, doi: 10.1051/mateconf/201821501003.
- [7] A. Ibrahim and R. A. Surya, "The Implementation of Simple Additive Weighting (SAW) Method in Decision Support System for the Best School Selection in Jambi," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1338, 2019, Art. no. 012054, doi: 10.1088/1742-6596/1338/1/012054.
- [8] P. Elvis, H. Patmawati and T. M. H. Rosiyati, "Utilization SAW Method to Choose Goods suppliers at PT.King Computer," *Creative Communication and Innovative Technology Journal*, vol. 13,no. 1, pp.111–124, 2020, doi: 10.33050/ccit.v13i1.928.
- [9] K. Çağlar, K. Selçuk and E. Mustafa, "Determining the Green Supplier Selection Criteria in Textile Enterprises and Selecting the Most Ideal Distribution Model: A Case Study of Giresun," *Alphanumeric Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 311–324, 2021, doi: 10.17093/alphanumeric.1052033.
- [10] J. Deny, Yunarto, Ridwan and Johan, "Comparison of Analytical Hierarchy Process and Simple Additive Weighting on the Selection of Outstanding Employees," *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 7, no. 9, pp.36–45, 2018.
- [11] M. Saputra, O. S. Sitompul and P. Sihombing, "Comparison AHP and SAW to promotion of head major department SMK Muhammadiyah 04 Medan," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1007, 2018, Art. no. 012034, doi: 10.1088/1742-6596/1007/1/012034.
- [12] N. Fiftin, T. Ali and H. Hendika, "Food Crops Planting Recommendation Using Analytic Hierarchy Process (AHP) And Simple Additive Weighting (SAW) Methods," *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 9, no. 2, pp. 4743–4749, 2020.
- [13] C. Afrianda and S. Riyanarto, "Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) and Simple Additive Weighting (SAW) Methods in Singer Selection Process," in *International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*, Yogyakarta, Indonesia, 2018, pp. 234–239, doi: 10.1109/ICOIACT.2018.8350707.
- [14] J. Supaluck and T. Adisak, "Selection of Logistics Service Providers of Hana Microelectronics Public Company Limited by Applying the Analytic Hierarchy Process (AHP)," *Journal of Business Administration*, vol. 35, no. 134, pp. 65–89, 2012.
- [15] R. Tanara, S. Kantamon, H. Niusara and S. Aunchalee, "Factors influencing supplier selection in seafood delivery. Case study of ABC," in *The 9th Hatyai*

- National and International Conference*, Hat Yai, Songkhla, 2018, pp.1429–1439.
- [16] S. Watchariporn and S. Kittiwat, “Criteria Weight Determination for Supplier Selection Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process: A Case Study of a Frozen Chicken Distribution in the North-central Region of Thailand,” *Journal of Science Ladkrabang*, vol. 29, no. 1, pp. 23–37, 2020.
- [17] M. Renna, “Supplier Selection for Food Industry: A Combination of Taguchi Loss Function and Fuzzy Analytical Hierarchy Process,” *Asian Journal of Technology Management*, vol. 5, no. 1, pp. 13–22, 2012.
- [18] R. Rohaiza, B. A. E. N. M. Engku, M. Fatimah and N. K. Hooi, “The Ideal Criteria of Supplier Selection for SMEs Food Processing Industry,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 70, 2016, Art. no. 05006.
- [19] A.C. Putri, B. Imam and A. Dewanti, “Supplier Selection Using Analytical Hierarchy Process at PT. Indolacto,” *JURNAL SAINS DAN SENI ITS*, vol. 6, no. 1, pp. 27–31, 2017, doi: 10.12962/j23373520.v6i1.21479.
- [20] A. Nazihah, K. M. Maznah and I. Hawa, “The Integration of Fuzzy Analytic Hierarchy Process and VIKOR for Supplier Selection,” *International Journal of Supply Chain Management*, vol. 6, no. 4, pp. 289–293, 2017.
- [21] I. Merve and P. Tolga, “Food supplier selection in the catering industry using the analytic hierarchy process,” *Food Science and Technology*, vol. 42, pp. 1–11, 2021, doi: 10.1590/fst.48420
- [22] T. Hamed, “Decision Making Using the Analytic Hierarchy Process (AHP); A Step by Step Approach,” *International Journal of Economics and Management Systems*, vol. 2, pp. 244–246, 2017.
- [23] K. Kankanith and P. Busba, “The Critical Factors Affecting Green Supply chain Management Implementation in Electrical Industry in Thailand,” *SWU Engineering Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 1–11, 2015.
- [24] Y. Vinod and S.K. Milind, “Multi-criteria supplier selection model using the analytic hierarchy process approach,” *Journal of Modelling in Management*, vol. 11, no. 1, pp. 326–354, 2016, doi: 10.1108/JM2-06-2014-0052.
- [25] F. D. Felice, M. H. Deldoost, M. Faizollahi and A. Petrillo, “Performance measurement model for the supplier selection based on AHP,” *International Journal of Engineering Business Management*, vol. 7, no. 17, pp. 1–13, 2015, doi: 10.5772/61702.
- [26] G. Arijit, “Supplier Selection in A Supply Chain Using Multi- Criteria Decision Making Methods,” *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 6, no. 10, pp. 338–345, 2017.
- [27] D. Kurniawati, F. N. Lenti and R. W. Nugroho, “Implementation of AHP and SAW Methods for Optimization of Decision Recommendations,” *Journal of International Conference Proceedings (JICP)*, vol. 4, no. 1, pp.254–265, 2021, doi: 10.32535/jicp.v4i1.1152.

**สายอากาศแฉะลำดับปรับค่าคลื่นได้ด้วยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม
แบบแมลงหิวปรับปรุงสำหรับระบุทิศทางมาถึงของสัญญาณวิทยุ
Adaptive Array Antenna with Modify Fruit Fly Optimization Algorithm
for Finding Arrival Direction of Radio Signal**

อลงกรณ์ ลัง¹, ชวงค์ พงษ์เจริญพานิชย์ และ สุภกิต แก้วดวงตา^{1,*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ช้างเผือก เมือง เชียงใหม่ 50300

² ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Alongkorn Lang¹, Chuwong Phongcharoenpanich², Supakit Kawdungta^{1,*}

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering,
Rajamangala University of Technology Lanna, Chang Phueak, Muang, Chiang Mai, 50300, Thailand

² Department of Telecommunications Engineering, School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

*Corresponding Author E-mail: supakitting@rmutl.ac.th

Received: Feb 19, 2022; **Revised:** Jun 15, 2022; **Accepted:** Jun 27, 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอสายอากาศแฉะลำดับปรับค่าคลื่นได้เพื่อใช้สำหรับการระบุทิศทางมาถึงของสัญญาณวิทยุในช่วงความถี่ 2.4–2.5 GHz สำหรับแก้ไขปัญหการรบกวนของสัญญาณวิทยุในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยจะใช้สายอากาศแฉะลำดับปรับค่าคลื่นร่วมกับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุงในการช่วยระบุทิศทางที่มีสัญญาณแรงที่สุด สายอากาศแฉะลำดับปรับค่าคลื่นที่ได้แนะนำประกอบด้วย สายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมวางเรียงกันเป็นแฉะลำดับเชิงระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบ วงจรเลื่อนเฟสแบบดิจิทัล ตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง และไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งกระบวนการพิจารณาทิศทางและการปรับค่าคลื่นหลักของสายอากาศจะถูกควบคุมด้วยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ จากผลการจำลองของสายอากาศแฉะลำดับเชิงระนาบพบว่าสามารถปรับเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่นหลักที่มีความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 30 องศา ได้ในระนาบมุมกวาดและระนาบมุมยก ด้วยการปรับความต่างเฟสของสัญญาณของแต่ละองค์ประกอบย่อย จากผลการสร้างและทดสอบพบว่าสายอากาศต้นแบบสามารถปรับค่าคลื่นได้สอดคล้องกับผลการจำลองและเมื่อใช้งานร่วมกับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมในการระบุทิศทางของสัญญาณวิทยุสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศได้

คำสำคัญ: สายอากาศแฉะลำดับปรับค่าคลื่นได้, กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง, แฉะลำดับเชิงระนาบ, การระบุทิศทางมาถึงของสัญญาณ, สายอากาศแฉะลำดับแบบแพทช์

Abstract

This paper presents an adaptive array antenna for radio signal direction finder application in the frequency of 2.4–2.5 GHz for troubleshooting co-channel interference issue in wireless local area network by using adaptive array antenna together with the modified fruit fly optimization algorithm (MFOA) to help finding Arrival Direction of Radio Signal. The proposed antenna consists of 4 elements of a microstrip patch planar array antenna, digital phase shifter, directional coupler and microcontroller. The simulation results show that the radiation pattern has main lobe of beamwidth 30 degrees and the main beam can be adjusted in both azimuth and elevation plane by controlling the phase of the signal on each element. The measurement results of the prototype antenna show that the radiation pattern can be adapted according to the simulation result by using the modified fruit fly optimization algorithm. The antenna should efficiently estimate the direction of arrival of the radio signal.

Keywords: Adaptive Array Antenna, Modified Fruit Fly Optimization Algorithm, Planar Array, Arriva Directionl, Patch Antenna Array.

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้มีการพัฒนาไปอย่างก้าวกระโดดจนได้กลายเป็นปัจจัยสำคัญในสังคมปัจจุบันและมีแนวโน้มของความต้องการใช้งานเพิ่มมากขึ้นในอนาคต ยกตัวอย่างเช่น เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 4 และ 5 โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) และเทคโนโลยีบลูทูธ (Bluetooth) เป็นต้น

เทคโนโลยีเหล่านี้ล้วนแล้วแต่ใช้คลื่นวิทยุในการส่งข้อมูลโดยมีช่องความถี่สำหรับใช้งานที่จำกัด ดังนั้นการใช้งานอุปกรณ์สื่อสารไร้สายโดยเฉพาะตั้งแต่ความถี่ 2.4 ไปจนถึง 2.5 GHz ซึ่งเป็นช่องความถี่ที่มีการใช้งานกันอย่างหนาแน่นย่อมมีโอกาสเกิดการรบกวนที่ช่องสัญญาณเดียวกัน (Co-Channel Interference : CCI) และส่งผลให้จำนวนช่องสัญญาณที่สามารถใช้งานได้จริงลดน้อยลง [1–5]

ในแก้ไขปัญหาของสัญญาณรบกวนนั้นสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การลดกำลังงานส่ง การเปลี่ยนช่องความถี่ การลดความหนาแน่นการใช้งานในบริเวณเดียวกัน อย่างไรก็ตามหากมีการรบกวนกันจำนวนมากเกินขีดจำกัดจึงจำเป็นต้องทำการค้นหาแหล่งที่มาและยุติการส่งสัญญาณในช่องสัญญาณที่มีปัญหา แต่การจะทราบอุปกรณ์ส่งสัญญาณที่มีปัญหาอยู่นั้นต้องอาศัยเทคนิคการหาทิศทางมาถึงของสัญญาณ ซึ่งแต่เดิมต้องอาศัยสายอากาศ

แบบชี้ทิศทางและใช้กำลังคนในการออกตรวจสอบ [6] ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาสายอากาศแถวลำดับปรับลำคลื่นได้ (Adaptive Array Antenna: AAA) สำหรับประยุกต์ใช้กับระบบการหาทิศทางของคลื่นวิทยุที่มาถึงเพื่อใช้ในการค้นหาแหล่งที่มาของสัญญาณได้

การระบุทิศทางของคลื่นวิทยุนี้มีหลายวิธีและมีความแตกต่างกันในส่วนหลักการทำงานของสายอากาศเครื่องรับสัญญาณและระบบประมวลผล ในอดีตนักวิจัยได้ทดลองใช้สายอากาศแบบบ่วงต่อเข้ากับเครื่องรับสัญญาณแล้วสังเกตความแรงของสัญญาณที่รับได้ในขณะที่ทำการหมุนตัวสายอากาศ แต่เนื่องจากข้อจำกัดของสายอากาศแบบบ่วงที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น 2 ทิศทางจึงไม่สามารถระบุทิศทางของคลื่นวิทยุได้แน่ชัด [7] หลังจากนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบดังกล่าวโดยการเพิ่มองค์ประกอบของสายอากาศเป็นสายอากาศไดโพลหรือโมโนโพลจำนวน 4–5 องค์ประกอบ แล้วทำการเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณที่รับได้จากแต่ละองค์ประกอบมีชื่อเรียกว่าสายอากาศ Adcock [8–10] แต่วิธีนี้ยังมีข้อเสียเนื่องจากต้องใช้เครื่องรับสัญญาณเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนของสายอากาศไปด้วย

นอกจากหลักการระบุทิศทางโดยการเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณแล้วยังมีวิธีการระบุทิศทางโดยใช้การวัดผลต่างของความถี่ที่รับได้ในขณะที่สายอากาศมีการ

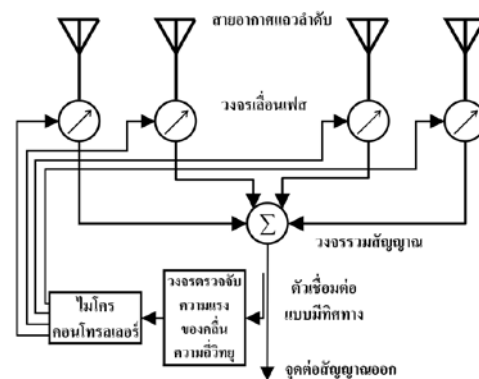
เคลื่อนที่โดยอาศัยของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler Effect) [11] ระบบระบุทิศทางที่ใช้หลักการนี้จะมีสายอากาศหลายองค์ประกอบจัดวางเป็นวงกลมรอบทิศทางและใช้สวิตช์ในการจำลองการเคลื่อนที่ของสายอากาศ จากนั้นทำการวัดผลต่างของความถี่ที่รับได้ในขณะทำการสวิตช์ แต่ข้อจำกัดของระบบนี้จะต้องอาศัยสวิตช์ความเร็วสูงและต้องใช้สายอากาศหลายองค์ประกอบ

ต่อมาเป็นการระบุทิศทางโดยใช้หลักการวัดเฟสของสัญญาณที่รับเข้ามาในสายอากาศแต่ละองค์ประกอบหรือมีชื่อเรียกว่าอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ (Interferometer) [12],[13] ระบบนี้มักใช้สายอากาศ 9 ถึง 10 องค์ประกอบจัดวางเป็นวงกลมรอบทิศทางเช่นเดียวกับหลักการของดอปเพลอร์แต่ให้ความแม่นยำสูงกว่าและเป็นที่ยอมรับมากที่สุดในปัจจุบัน แต่ข้อจำกัดของหลักการอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์คือต้องใช้สายอากาศหลายองค์ประกอบและต้องอาศัยระบบประมวลผลที่มีความซับซ้อนและมีราคาสูง

จากหลักการระบุทิศทางของสัญญาณวิทยุต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น การระบุทิศทางด้วยวิธีการวัดความแรงของสัญญาณเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุด แต่ต้องอาศัยสายอากาศที่มีแบบรูปกระจายคลื่นเป็นแบบชีททิศทางและสามารถปรับลำคลื่นได้ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การออกแบบองค์ประกอบสายอากาศจำนวน 4 องค์ประกอบมาวางแถวลำดับเชิงระนาบ (Planar Array) [14–20] และใช้หลักการปรับลำคลื่นทางไฟฟ้าด้วยการเลื่อนเฟสของสัญญาณที่รับเข้ามาจากสายอากาศทั้ง 4 องค์ประกอบจนกว่าจะรับความแรงสัญญาณได้สูงสุด การนำเอากระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวี่ปรับปรุงจากงานวิจัย [21–23] มาประยุกต์ใช้ ซึ่งเชื่อได้ว่าจะเป็นส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการปรับลำคลื่นของสายอากาศ โดยกระบวนการนี้จะประยุกต์ใช้ในไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมวงจรเลื่อนเฟสในการปรับลำคลื่นของสายอากาศให้ชี้ไปยังทิศทางที่มีความแรงสัญญาณสูงสุดได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ จากนั้นจึงนำทิศทางของลำคลื่นมาใช้เป็นแนวทางในการหาแหล่งที่มาของสัญญาณวิทยุ โดยมีขอบเขตการระบุทิศทางได้ไม่เกิน ± 30 องศา ในระนาบมุมกวาดและระนาบมุมยก

2. สายอากาศแถวลำดับปรับลำคลื่นด้วยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวี่ปรับปรุง

งานวิจัยนี้จะเริ่มต้นจากการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีการลัดวงจรองค์ประกอบเดียว จากนั้นนำสายอากาศดังกล่าวมาวางเป็นแถวลำดับเชิงระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบ บนวัสดุฐานรองเดียวกัน ออกแบบวงจรสำหรับวางไอซีเลื่อนเฟสจำนวน 4 วงจร ออกแบบวงจรรวมสัญญาณแบบเข้า 4 ทาง ออก 1 ทางและออกแบบตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทางต่อไปยังวงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลสัญญาณด้วยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวี่ปรับปรุงและปรับวงจรเลื่อนเฟสจนกว่าจะได้รับความแรงสูงสุด ซึ่งส่วนประกอบของงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของสายอากาศแถวลำดับปรับลำคลื่นด้วยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวี่ปรับปรุง

2.1 สายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีการลัดวงจร

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบสายอากาศมาจากโครงสร้างไมโครสตริปแผ่นที่มีการป้อนสัญญาณเข้าทางด้านหลังของส่วนแพร์กระจายคลื่นด้วยเทคนิคการป้อนสัญญาณแบบโพรบ (ProbeFeed) แล้วทำการลดขนาดของสายอากาศเพื่อความสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงภาคสนามด้วยการเพิ่มจุดลัดวงจร (Shorting Pin Loading) เข้าไประหว่างส่วนแพร์กระจายคลื่นและระนาบกราวด์จำนวน 2 จุด การออกแบบเริ่มจากสายอากาศองค์ประกอบเดียวมีส่วนแพร์กระจายคลื่นแบบแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด $L = 28 \text{ mm}$ $W = 38 \text{ mm}$ ที่ความถี่ 2.45 GHz จากนั้นทดลองเพิ่มจุดลัดวงจรเข้าไปในสายอากาศโดย

สามารถประมาณค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนไปด้วยวิธีการของแบบจำลองควอด [24] ตามสมการที่ (1)

$$f_{10} = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

โดย

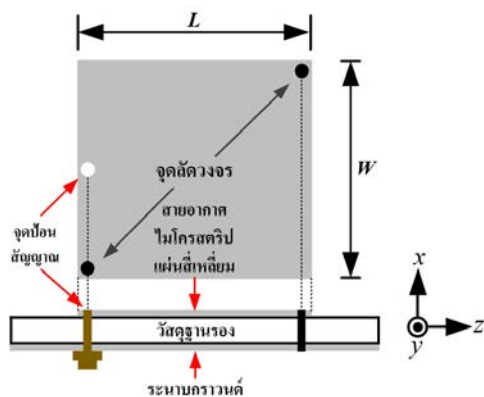
f_{10} = ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศที่โหมด TM_{10}

c = ความเร็วแสงในอากาศว่าง 3×10^8 m/s

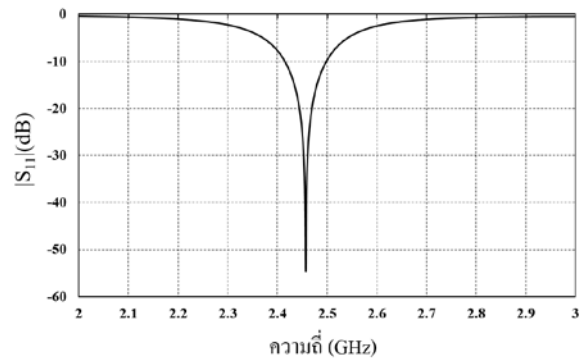
L = ขนาดของส่วนแผ่กระจายคลื่น

ϵ_r = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก

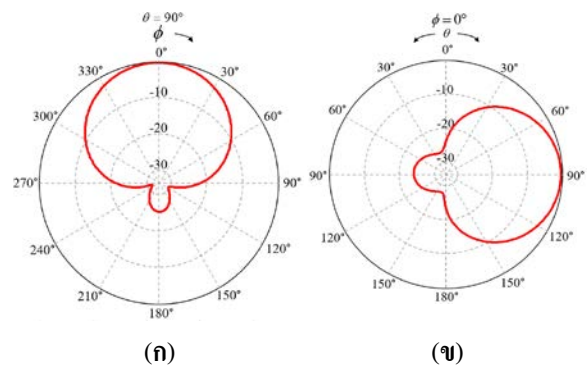
เมื่อทำการเพิ่มจุดลัดวงจรพบว่าผลของการเพิ่มจุดลัดวงจรเข้าไปยังโครงสร้างสายอากาศส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์ต่ำลงจึงสามารถลดขนาดของสายอากาศลงจากเดิมมีโครงสร้างดังรูปที่ 2 และผลการออกแบบดังตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจุดลัดวงจรเข้าไปยังองค์ประกอบสายอากาศนั้นส่งผลต่อขนาด ช่วงกว้างความถี่ และอัตราขยายของสายอากาศ โดยสายอากาศมีความยาวลดลงจากเดิม 10.3 mm ความกว้างลดลงจากเดิม 0.3 mm คิดเป็น 28% มีช่วงกว้างความถี่เพิ่มขึ้น 20.6 MHz คิดเป็น 33% และมีอัตราขยายเพิ่มขึ้น 0.12 dB คิดเป็น 2% จากผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนในรูปที่ 3 พบว่าสายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยกว่า -10 dB ตั้งแต่ความถี่ 2.4–2.5 GHz จากผลการจำลองแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศองค์ประกอบเดียวดังรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าสายอากาศมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นชี้ทิศทาง มีลำคลื่นหลักชี้ไปยังทิศทาง 0 องศา มีความกว้างลำคลื่น 30 องศา



รูปที่ 2 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีการลัดวงจรองค์ประกอบเดียว



รูปที่ 3 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน



รูปที่ 4 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (ก)

ระนาบ xy (ข) ระนาบ xz

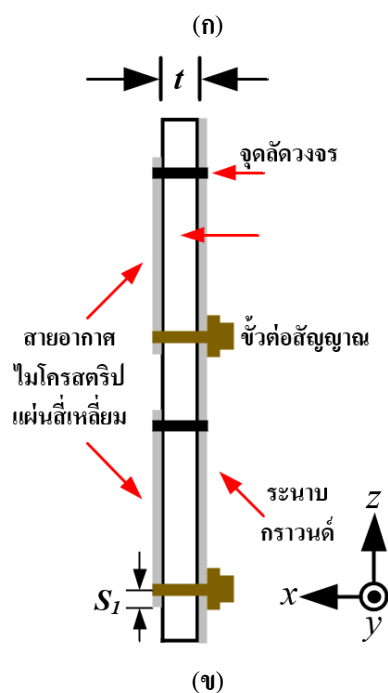
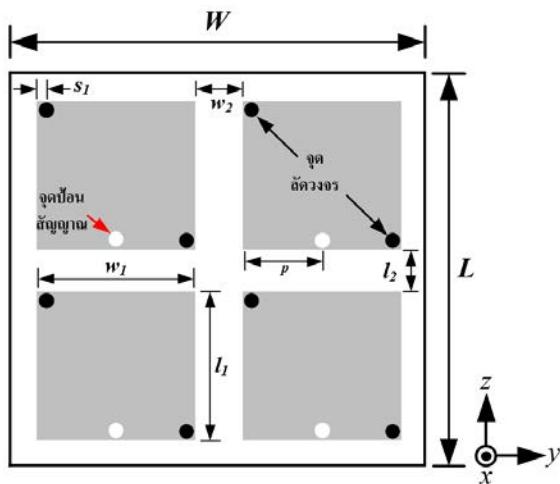
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีการลัดวงจรองค์ประกอบเดียว

พารามิเตอร์	เมื่อไม่มีจุดลัดวงจร	เมื่อเพิ่มจุดลัดวงจร
L	38 mm	27.7 mm
W	28 mm	27.7 mm
ช่วงกว้างความถี่	62 MHz	82.6 MHz
อัตราขยาย	5.95 dBi	6.07 dBi

เมื่อได้สายอากาศองค์ประกอบเดียวเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงนำเอาสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมทำการลัดวงจร 2 จุด จำนวน 4 องค์ประกอบมาจัดวางเป็นแถวลำดับเชิงระนาบด้วยระยะห่างแต่ละองค์ประกอบเท่ากับ w_2 มีโครงสร้างดังรูปที่ 5 และมีรายละเอียดโครงสร้างของสายอากาศดังตารางที่ 2

ในขั้นตอนการออกแบบได้มีการจำลองแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบมุมกวาด (xy)

และระนาบมุมยก (xz) ทำการจำลองโดยใช้วิธีการเปลี่ยนเฟสขององค์ประกอบย่อย โดยเลื่อนเฟสไป 90 องศา ครึ่งละ 2 องค์ประกอบ เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับ ได้ผลการจำลองดังรูปที่ 6-10 ตามลำดับ เมื่อทำการออกแบบเรียบร้อยแล้วจึงได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบดังรูปที่ 11 ตามลำดับ



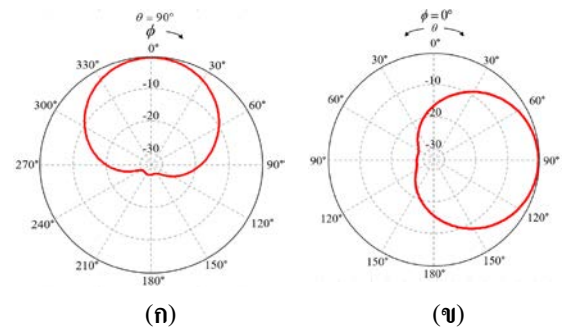
รูปที่ 5 โครงสร้างสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ จำนวน 4 องค์ประกอบ (ก) มุมมองด้านหน้า (ข) มุมมองด้านข้าง

โดยรูปแบบขององค์ประกอบในรูปที่ 5 สายอากาศและการจัดวางองค์ประกอบจะมีความแตกต่างจากงานวิจัยอ้างอิงที่

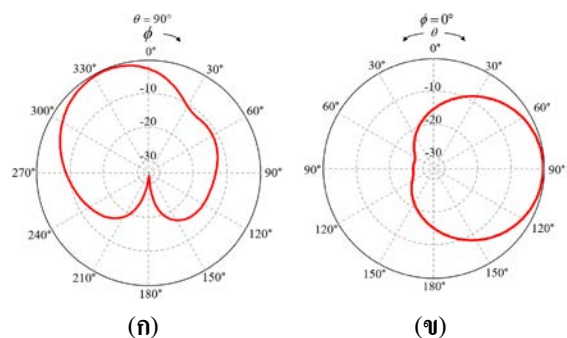
[21] เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดสอบการจัดวางองค์ประกอบเชิงระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบ สามารถปรับค่าคลื่นของสายไปยังทิศทางต่างๆ ได้รวมไปถึงสามารถนำไปประยุกต์ในการหาทิศทางของสัญญาณวิทยุ

ตารางที่ 2 รายละเอียดของโครงสร้างสายอากาศ

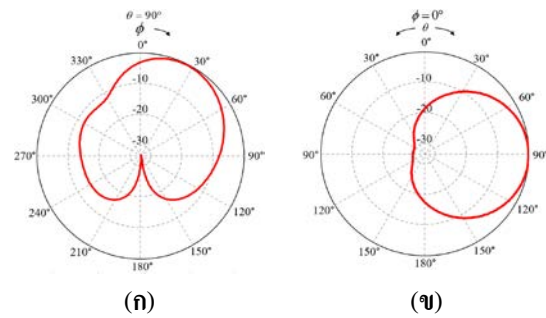
พารามิเตอร์	รายละเอียด	ขนาด (mm)
W	ความกว้างสายอากาศ	75
L	ความยาวสายอากาศ	75
t	ความหนาวัสดุฐานรอง	3.2
w_1	ความกว้างองค์ประกอบ	29.5
w_2	ช่องระหว่างองค์ประกอบ	7.5
l_1	ความยาวองค์ประกอบ	29.5
l_2	ช่องระหว่างองค์ประกอบ	7.5
p	จุดป้อนสัญญาณ	14.75
s_1	จุดต่อลัดวงจร	2



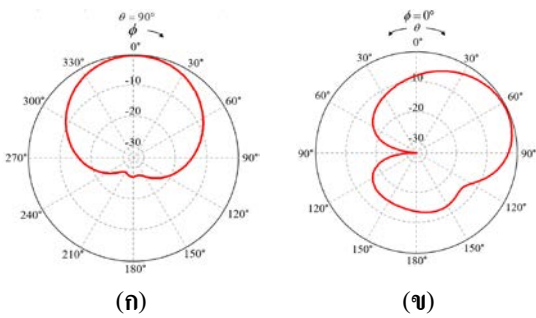
รูปที่ 6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz โดยไม่มีการเลื่อนเฟส (ก) ระนาบ xy (ข) ระนาบ xz



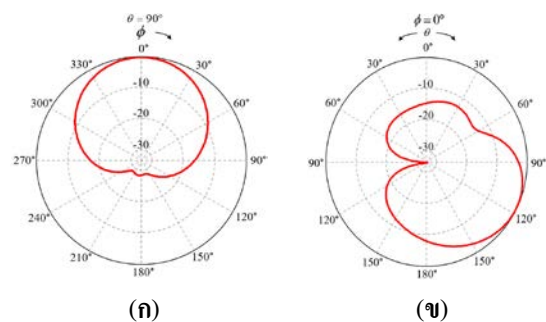
รูปที่ 7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz โดยเลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 1 และ 3 เท่ากับ 90 องศา (ก) ระนาบ xy (ข) ระนาบ xz



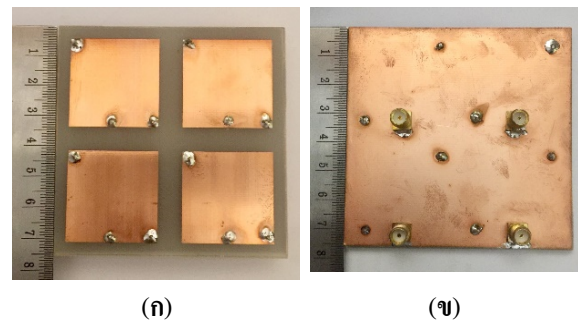
รูปที่ 8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz โดยเลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 2 และ 4 เท่ากับ 90 องศา (ก) ระนาบ xy (ข) ระนาบ xz



รูปที่ 10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz โดยเลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 3 และ 4 เท่ากับ 90 องศา (ก) ระนาบ xy (ข) ระนาบ xz



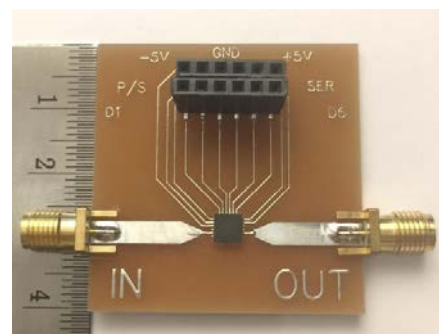
รูปที่ 9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz โดยเลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 1 และ 2 เท่ากับ 90 องศา (ก) ระนาบ xy (ข) ระนาบ xz



รูปที่ 11 ต้นแบบสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ จำนวน 4 องค์ประกอบ (ก) มุมมองด้านหน้า (ข) มุมมองด้านหลัง

2.2 วงจรเลื่อนเฟส

ต่อมาเป็นการออกแบบวงจรเลื่อนเฟส ซึ่งจะทำหน้าที่ปรับแต่งเฟสของสัญญาณที่รับมาจากสายอากาศทั้ง 4 องค์ประกอบ แยกออกจากกัน 4 วงจร ควบคุมด้วยสัญญาณดิจิทัลจากไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยมีโครงสร้างเป็นสายส่งสัญญาณไมโครสตริป พร้อมกับจุดต่อไฟเลี้ยงและจุดต่อสัญญาณดิจิทัล วงจรเลื่อนเฟสนี้ใช้ไอซีเลื่อนเฟสยี่ห้อ MACOM Technology, Lowell, MA, USA รุ่น MAPS-010144 [25] มีตัวถังแบบ PQFN ขนาด 4 mm รองรับความถี่ตั้งแต่ 2.3–3.8 GHz ควบคุมการเลื่อนเฟสด้วยสัญญาณดิจิทัลขนาด 4 บิต สามารถเลื่อนเฟสได้ทั้งหมด 16 สภาวะ ตั้งแต่ 0–360 องศา ครึ่งละ 22.5 องศา มีค่าความผิดพลาดของเฟส ± 3.5 องศา มีค่าการสูญเสียภายในเฉลี่ย 2.5 dB ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันเท่ากับ 1.3 วงจรเลื่อนเฟสดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 12 และตารางผลการทดสอบการเลื่อนเฟสในแต่ละสถานะแสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 12 วงจรเลื่อนเฟสดังกล่าว

ตารางที่ 3 ตารางผลการทดสอบวงจรเลื่อนเฟสดังกล่าว

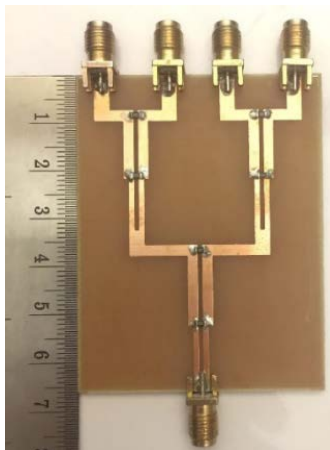
สถานะลอจิก						มุมเฟส
D6	D5	D4	D3	D2	D1	องศา
0	0	0	0	x	x	0
0	0	0	1	x	x	15.6
0	0	1	0	x	x	27.5
0	1	0	0	x	x	53.2

ตารางที่ 3 ตารางผลการทดสอบวงจรเลื่อนเฟสดังกล่าว (ต่อ)

สถานะลอจิก						มุมเฟส
1	0	0	0	x	x	205.5
1	1	1	1	x	x	344.5

2.3 วงจรรวมสัญญาณ

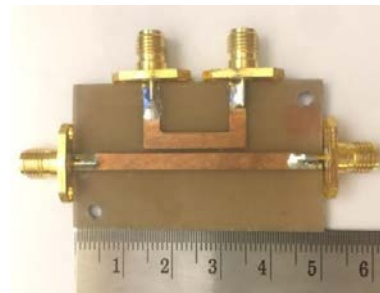
ถัดมาเป็นการออกแบบวงจรรวมสัญญาณ สำหรับใช้ในการรวมสัญญาณที่รับมาจากวงจรเลื่อนเฟสทั้ง 4 วงจรเข้าด้วยกัน โดยจะใช้หลักการออกแบบวงจรรวมสัญญาณแบบ Wilkinson [26] แบบเข้า 4 ทาง ออก 1 ทางบนโครงสร้างแบบไมโครสตริปใช้วัสดุฐานรองแบบ FR 4 ($\epsilon_r = 4.3$) ความหนา 1.7 mm ดังรูปที่ 13 จากผลการทดสอบวงจรรวมสัญญาณต้นแบบมีค่าการสูญเสียการส่งผ่าน 7 dB ค่าการสูญเสียการสะท้อนกลับ -20 dB



รูปที่ 13 วงจรรวมสัญญาณต้นแบบ

2.4 ตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง

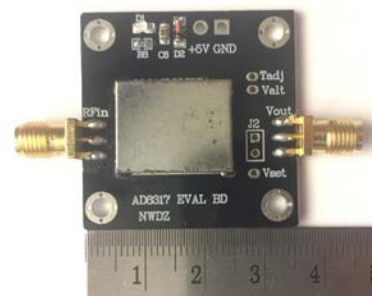
ตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทางมีหน้าที่ในการดึงสัญญาณส่วนหนึ่งจากเอาต์พุตของวงจรมาป้อนให้กับวงจรวัดความแรงของสัญญาณ ตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทางเป็นอุปกรณ์ที่มี 4 พอร์ต ประกอบไปด้วยพอร์ตอินพุตสำหรับสัญญาณขาเข้าที่รับมาจากวงจรรวมสัญญาณ พอร์ตเอาต์พุตสำหรับส่งสัญญาณออกไปใช้งาน พอร์ตเชื่อมต่อสำหรับดึงสัญญาณมาวิเคราะห์ และ พอร์ตแยกโคเดเคียวซึ่งไม่ได้ใช้งานและได้ต่อโหลด 50 โอห์มไว้ จากการทดสอบตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทางมีค่าการสูญเสียภายในเท่ากับ 2 dB และค่าอัตราส่วนการเชื่อมต่อเท่ากับ 15 dB โดยตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทางต้นแบบแสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทางต้นแบบ

2.5 วงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณวิทยุ

วงจรนี้ทำหน้าที่รับสัญญาณจากตัวเชื่อมต่อแบบมีทิศทาง นำมาผ่านภาคขยายสัญญาณและส่งไปยังไอซีตรวจวัดระดับความแรงสัญญาณยี่ห้อ Analog Device รุ่น AD8317 [27] รองรับความถี่ตั้งแต่ 1 MHz ถึง 10 GHz สามารถตรวจจับความแรงของสัญญาณได้ต่ำสุด -55 dBm และให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 0.5 ถึง 1.2 V วงจรวัดความแรงของสัญญาณต้นแบบแสดงดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 วงจรตรวจจับความแรงของสัญญาณวิทยุ

2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์

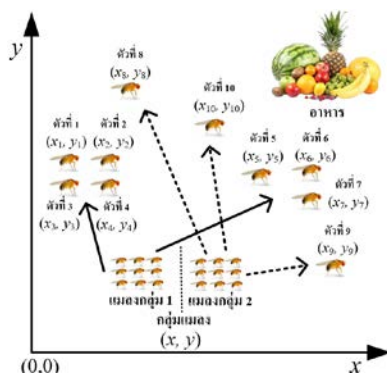
ไมโครคอนโทรลเลอร์ในงานวิจัยนี้ใช้ Arduino รุ่น Uno R3 [28] ดังรูปที่ 16 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR มีขา ที่รองรับสัญญาณดิจิทัลได้สูงสุด 19 ขา โดยจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณดิจิทัลไปควบคุมวงจรเลื่อนเฟส และตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากวงจรวัดความแรงของสัญญาณ ให้ได้แรงดันที่สูงที่สุด และใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงห้วยปรับปรุงมาใช้ในการประมวลผล และควบคุมวงจรเลื่อนเฟสทั้ง 4 ตัว



รูปที่ 16 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3

2.7 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง

กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง[21–23] เป็นเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่เลียนแบบพฤติกรรม การหาอาหารของแมลงหิว ถ้าตัวใดตัวหนึ่งเจออาหารแมลง หิวตัวอื่นๆ ก็จะตามไปหาอาหารในทิศทางนั้นๆ ในทาง คณิตศาสตร์ถ้าพารามิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งเจอคำตอบที่ เหมาะสม พารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ก็จะใช้วิธีเดียวกันในการหา คำตอบ โดยมีการแบ่งกลุ่มของแมลงหิวออกเป็น 2 กลุ่ม แยกกันทำหน้าที่ 2 ส่วน คือ Local Search และ Global Search ดังรูปที่ 17 ไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้ค่าการเปลี่ยนแปลง สถานะลอจิกที่ควบคุมวงจรเลื่อนเฟสทั้ง 4 ตัวซึ่งเป็นตัวแปร ของฟังก์ชันแมลงหิวที่กำลังบินเข้าหาแหล่งอาหาร โดยมี ฟังก์ชันเป้าหมายคือ แรงดันสูงสุดที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ รับเข้ามาจากรวมวงจรจับความแรงของสัญญาณวิทยุ ตัวแปร การปรับเฟสทั้งหมด 4 ตัว ตัวละ 16 สถานะ จึงสามารถเลื่อน เฟสได้รวมกัน 64 สถานะ โดยการเลื่อนเฟสนั้นจะส่งผล โดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางลำคลื่นของสายอากาศ การใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมนี้จึงมีส่วนสำคัญในการ ปรับตัวแปรดังกล่าวจนกว่าลำคลื่นจะชี้ไปยังทิศทางของ สัญญาณที่มีความแรงสูงสุด

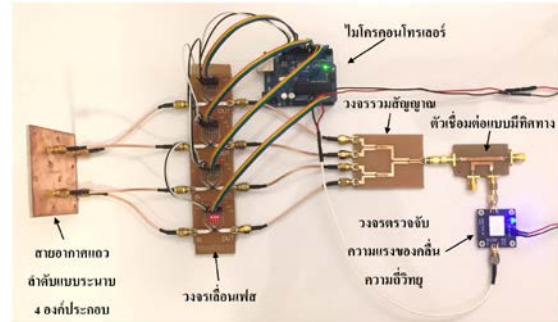


รูปที่ 17 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง

2.8 สายอากาศต้นแบบแถวลำดับปรับค่าคลื่นได้ด้วย

กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง

หลังจากได้ทำการออกแบบวงจรทุกส่วนเป็นที่ เรียบร้อยแล้วจึงได้นำเอาส่วนประกอบข้างต้นมาต่อ ร่วมกันตามโครงสร้างที่ออกแบบไว้สำหรับการทดสอบ และเก็บผล ภาพรวมของงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 สายอากาศต้นแบบแถวลำดับปรับค่าคลื่นได้ด้วย กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง

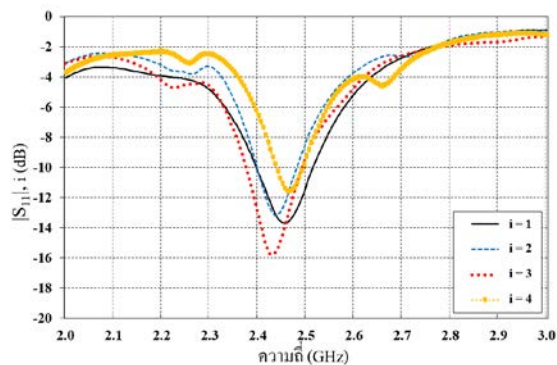
3. ผลการทดสอบ

ในขั้นตอนนี้เป็น การนำเอาส่วนต่างๆ ที่ได้ทำการ ออกแบบข้างต้นนำมาประกอบเข้าด้วยกันตามโครงสร้างที่ ออกแบบไว้โดยทำการทดสอบที่ความถี่กลาง 2.45 GHz ใช้ เครื่องกำเนิดสัญญาณตั้งไว้ ณ จุดทดสอบ สัญญาณที่รับเข้า มาผ่านทางสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ จำนวน 4 องค์ประกอบเข้ามายังวงจรเลื่อนเฟสทั้ง 4 วงจร จากนั้น สัญญาณจะผ่านไปยังวงจรรวมสัญญาณ ในจุดนี้สัญญาณที่ รับเข้ามาจากสายอากาศ 4 องค์ประกอบจะถูกรวมเป็น สัญญาณเดียวผ่านไปยังตัวเชื่อมต่อบีมทิศทางและดึง สัญญาณส่วนหนึ่งเข้าไปยังวงจรวัดความแรงของสัญญาณ ที่เข้ามาแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตรวจจับแรงดันไฟฟ้า โดย ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งข้อมูลขนาด 4 บิต ไปยังวงจร เลื่อนเฟสทั้ง 4 ตัว เพื่อเลื่อนเฟสของสัญญาณจนกว่าจะได้ ความแรงสูงสุด

ในการทดสอบปรับค่าคลื่นครั้งแรกเป็นการโปรแกรม ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการเลื่อนเฟสสายอากาศ 2 องค์ประกอบ ครั้งละ 90 องศา โดยจะทำการเลื่อนเฟสค้าง ไว้แล้ววัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดย

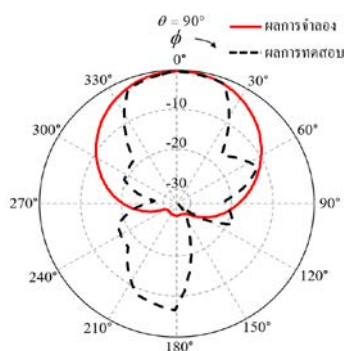
ใช้สายอากาศด้านรับหมุนวนรอบทิศทางของสายอากาศ
แถวลำดับจนครบ 360 องศา จากนั้นจึงทดสอบการปรับลำ
คลื่นสถานะถัดไป

จากผลการทดสอบค่า $|S_{11}|$ ของแต่ละองค์ประกอบ (i)
ในรูปที่ 19 แสดงให้เห็นว่าการนำสายอากาศมาจัดวาง
องค์ประกอบแถวลำดับเชิงระนาบ 4 องค์ประกอบ ส่งผลต่อ
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลการ
จำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศองค์ประกอบเดียวจากรูปที่ 3

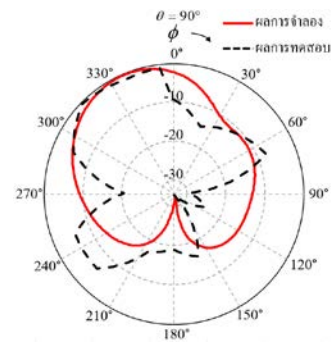


รูปที่ 19 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของ
สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ จำนวน 4 องค์ประกอบ

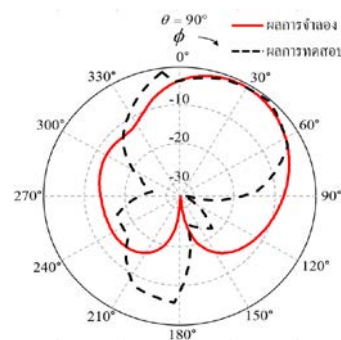
ต่อมาเป็นผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น
ในแต่ละสถานะที่มีการเลื่อนเฟสขององค์ประกอบ
สายอากาศในระนาบมุมกวาด (xy) ทดสอบทั้งหมด 3
สถานะ เริ่มจากสถานะที่ไม่มีการเลื่อนเฟสได้ผลดังรูปที่ 20
จากนั้นทดสอบเลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 1 และ 3 ไป 90
องศา ได้ผลทดสอบดังรูปที่ 21 และเลื่อนเฟสองค์ประกอบ
ที่ 2 และ 4 ไป 90 องศาได้ผลทดสอบดังรูปที่ 22 ตามลำดับ



รูปที่ 20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy ที่
ความถี่ 2.45 GHz โดยไม่มีการเลื่อนเฟส

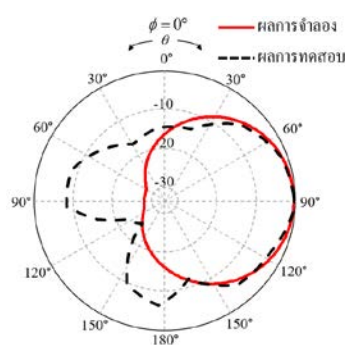


รูปที่ 21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy ที่ความถี่
2.45 GHz เลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 1 และ 3 ไป 90 องศา

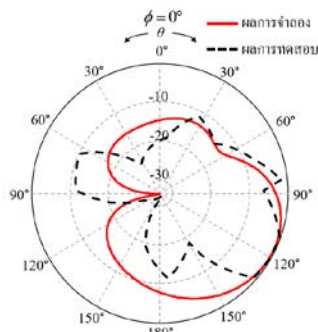


รูปที่ 22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy ที่ความถี่
2.45 GHz เลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 2 และ 4 ไป 90 องศา

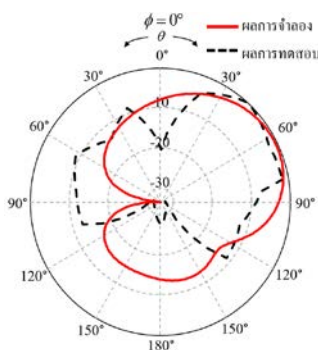
ต่อมาเป็นผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น
ในระนาบมุมยก (xz) เช่นเดียวกับการทดสอบในระนาบมุม
กวาดโดยทำการทดสอบทั้งหมด 3 สถานะ เริ่มจากสถานะที่
ไม่มีการเลื่อนเฟสได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 23 จากนั้น
ทดสอบเลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 1 และ 2 ไป 90 องศา
ได้ผลทดสอบดังรูปที่ 24 และเลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 3
และ 4 ไป 90 องศา ได้ผลทดสอบดังรูปที่ 25 ตามลำดับ



รูปที่ 23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz ที่
ความถี่ 2.45 GHz โดยไม่มีการเลื่อนเฟส



รูปที่ 24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz ที่ความถี่ 2.45 GHz เลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 1 และ 2 ไป 90 องศา



รูปที่ 25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz ที่ความถี่ 2.45 GHz เลื่อนเฟสองค์ประกอบที่ 3 และ 4 ไป 90 องศา

จากผลการทดสอบการปรับค่าคลื่นของสายอากาศทั้ง 5 สถานะ พบว่าสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสอดคล้องกับผลการจำลอง โดยมีค่าคลื่นหลักชี้ไปในทิศทางเดียวกัน ประกอบกับการใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุงช่วยในการปรับเฟสของสายอากาศแถวลำดับทั้ง 4 องค์ประกอบให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชี้ไปยังทิศทางที่มีความแรงของสัญญาณสูงสุดเพื่อเป็นการยืนยันประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม เป็นผลให้การระบุทิศทางของสัญญาณวิทยุมีประสิทธิภาพมากขึ้น รวดเร็วกว่าการระบุทิศทางด้วยบุคคล โดยการทดลองเป็นการนำแหล่งกำเนิดคลื่นวางในตำแหน่ง ± 45 องศา จากหน้าสายอากาศในระนาบ xy และ xz ตามลำดับ จากนั้นใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุงทำการปรับค่าคลื่นจนกว่าจะได้ทิศทางที่มีความแรงสัญญาณสูงสุด โดยมีความคลาดเคลื่อนของมุมที่ ± 10 องศา

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบในการระบุตำแหน่ง โดยใช้สายอากาศไมโครสติปแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีการลัดวงจรเพื่อลดขนาดลง 25% จากผลการออกแบบสายอากาศมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2.4–2.5 GHz มีความกว้างลำคลื่นหลัก 30 องศา มีอัตราขยาย 6.07 dBi จากผลการออกแบบได้นำสายอากาศดังกล่าวจัดวางเป็นแถวลำดับเชิงระนาบจำนวน 4 องค์ประกอบ จากผลการทดสอบสายอากาศมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2.4–2.5 GHz มีความกว้างลำคลื่นหลัก 30 องศา มีอัตราขยายเฉลี่ย 8.19 dBi สามารถปรับค่าคลื่นได้สูงสุด ± 30 องศา ทั้งในระนาบมุมกวาด (xy) และระนาบมุมยก (xz) เมื่อนำมาใช้งานร่วมกับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง ส่งผลให้สายอากาศนี้สามารถปรับค่าคลื่นไปยังทิศทางที่มีความแรงสัญญาณสูงสุดได้โดยมีความคลาดเคลื่อนของมุมที่ ± 10 องศา จึงสามารถนำไปใช้ในการระบุทิศทางของสัญญาณวิทยุได้ โดยในงานวิจัยนี้ยังคงค้างการนำสายอากาศไปทดสอบใช้งานจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. K. Tiwary, N. Maskey, S. Khakurel and G. Sachdeva, "Effects of Co-channel Interference in WLAN and Cognitive Radio Based Approach to Minimize It," in *2010 International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing*, Kottayam, India, 2010, pp. 158–160, doi: 10.1109/ARTCom.2010.57.
- [2] M. Yang, D. Kaffes, D. Mavrakis and S. Stavrou, "The Impact of Environment Variation on Co-channel Interference in WLAN," *Twelfth International Conference on Antennas and Propagation*, 2003 (ICAP 2003), Exeter, UK, 2003, pp. 71–75, doi: 10.1049/cp:20030018.
- [3] J. Zhang, G. Han and Y. Qian, "Queuing Theory Based Co-Channel Interference Analysis Approach

- for High-Density Wireless Local Area Networks,” *Sensors*, vol. 16, no. 9, 2016, Art. no. 1348, doi: 10.3390/s16091348.
- [4] H. Furukawa, Y. Kamio and H. Sasaoka, “Cochannel Interference Reduction and Path-diversity Reception Technique Using CMA Adaptive Array Antenna in Digital Land Mobile Communications,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 50, no. 2, pp.605–616, 2001, doi: 10.1109/25.923072.
- [5] B. R. Petersen and D. D. Falconer, “Suppression of Adjacent-channel, Co-channel, and Intersymbol Interference by Equalizers and Linear Combiners,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 42, no. 12, pp. 3109–3118, 1994, doi: 10.1109/26.339831.
- [6] P. Denisowski and P. Busch, “Interference hunting tools,” in *An Introduction to Interference Hunting*, Columbia, MD, USA: Rohde & Schwarz white paper, 2014, ch. 2, sec. 2, pp. 8–10.
- [7] J. Duplouty, “Wideband Reconfigurable Vector Antenna for 3-D Direction Finding Application,” Ph.D. Thesis, Dept. Electromagnetism and High Frequency Systems, Univ. de Toulouse, Toulouse, France, 2019.
- [8] C. A. W. Vale, “Variations on Loop and Adcock Array Topologies for Improved Radio Direction Finding Performance,” in *2012 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, Cape Town, South Africa, 2012, pp. 997–1000, doi: 10.1109/APWC.2012.6324979.
- [9] M. A. Tinati and S. Bayati, “Designing of an Adaptive Adcock Array and Reducing the Effects of Other Transmitters, Unwanted Reflections and Noise,” in *2006 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, Bangkok, Thailand, 2006, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICCIS.2006.252350.
- [10] R. Mueller and R. Lorch, “Application of Modern DOA Algorithms to an Adcock Array Antenna,” in *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, The Hague, Netherlands, 2014, pp. 2215–2218, doi: 10.1109/EuCAP.2014.6902250.
- [11] D. N. Aloï and M. S. Sharawi, “Modeling and Validation of a 915MHz Single Channel Pseudo Doppler Direction Finding System for Vehicle Applications,” in *2009 IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall*, Anchorage, AK, USA, 2009, pp. 1–5, doi: 10.1109/VETECF.2009.5378802.
- [12] A. Xiaobo, F. Zhenghe, W. weidong and T. Li, “A Single Channel Correlative Interferometer Direction Finder Using VXI Receiver,” in *2002 3rd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 2002. Proceedings. ICMMT 2002.*, Beijing, China, 2002, pp. 1158–1161, doi: 10.1109/ICMMT.2002.1187913.
- [13] H. Sengül, A. E. Gürel and A. Orduyılmaz, “Passive Direction Finding Using Correlative Interferometer,” in *2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Istanbul, Turkey, 2021, pp. 1–4, doi: 10.1109/SIU53274.2021.9477965.
- [14] G. -P. Gao, B. Hu and J. -S. Zhang, “Design of a Miniaturization Printed Circular-Slot UWB Antenna by the Half-Cutting Method,” in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 567–570, 2013, doi: 10.1109/LAWP.2013.2259790.
- [15] J. Huang and V. Jamnejad, “A microstrip array feed for land mobile satellite reflector antennas,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 37, no. 2, pp. 153–158, 1989, doi: 10.1109/8.18701.
- [16] M. Krairiksh, P. Ngamjanyaporn and C. Kessuwan, “A Flat Four-Beam Compact Phased Array Antenna,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 12, no. 5, pp. 184–186, 2002, doi: 10.1109/7260.1000197.

- [17] A. Buffi, A. A. Serra, P. Nepa, H.-T. Chou and G. Manara, "A Focused Planar Microstrip Array for 2.4 GHz RFID Readers," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 5, pp. 1536–1544, 2010, doi: 10.1109/TAP.2010.2044331.
- [18] S. Loya and H. Khan, "An Efficient Microstrip Planar Array For Evaluating Channel Capacity Of Massive MIMO Systems," in *2021 2nd International Conference on Range Technology (ICORT)*, Balasore, India, 2021, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICORT52730.2021.9581885.
- [19] Q. X. Lai, Y. M. Pan, S. Y. Zheng and W. J. Yang, "Mutual Coupling Reduction in MIMO Microstrip Patch Array Using TM₁₀ and TM₀₂ Modes," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 11, pp. 7562–7571, 2021, doi: 10.1109/TAP.2021.3090520.
- [20] R. Kawdungta, S. Kawdungta, D. Torrungrueng and C. Phongcharoenpanich, "Switched Beam Multi-Element Circular Array Antenna Schemes for 2D Single-Anchor Indoor Positioning Applications," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 58882–58892, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3072951.
- [21] S. Kawdungta and C. Phongcharoenpanich, "MFOA-integrated Modified Inverted F-based Adaptive Array Antenna for 2.4 GHz Band Applications," *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, vol. 26, no. 9, pp. 784–795, 2016, doi: 10.1002/mmce.21030.
- [22] S. Kawdungta, D. Torrungrueng, A. Lang and C. Phongcharoenpanich, "Design of Antenna Arrays by Using Modified Fruit Fly Optimization Algorithm," in *2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Chiang mai, Thailand, 2021, pp. 69–72, doi: 10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454774.
- [23] M. Mhudsongon, C. Phongcharoenpanich, and S. Kawdungta, "Modified Fruit Fly Optimization Algorithm for Analysis of Large Antenna Array," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2015, 2015, Art. no. 124675, doi: 10.1155/2015/124675.
- [24] K. Wong, "Compact Microstrip Antennas," in *Compact and Broadband Microstrip Antennas*, Cullompton, United Kingdom: John Wiley & Sons., 2002, ch. 2, sec. 2, pp. 23–26.
- [25] Macom Technologies, "Digital Phase Shifter 4-Bit, 2.3 - 3.8 GHz," MAPS-010144 Data Sheet, November. 2010.
- [26] E. J. Wilkinson, "An N-Way Hybrid Power Divider," *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 8, no. 1, pp. 116–118, 1960, doi: 10.1109/TMTT.1960.1124668.
- [27] Analog Devices, "Log Detector Controller," AD8317 Data Sheet, 2019.
- [28] Arduino, "Arduino UNO R3," Product Reference Manual, Dec. 2021.

การหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมของบาร์เรลฮีตเตอร์ เพื่อลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติก ชิ้นส่วนฝาครอบไฟเลี้ยวรถแทรกเตอร์ ด้วยการประยุกต์ใช้ DMAIC

Determination of Optimum Temperature of Barrel Heater for Reducing Waste in Plastic Injection Molding Process of Tractor Turn Signal Cover Parts using DMAIC Techniques

อภิชาติ เสมศรี

สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก, บางนา บางนา

กรุงเทพมหานคร 10260

Aphichit Semsri

Department of Industrial Engineering Technology, Faculty of Science and Technology, Southeast Bangkok College,

Bangna, Bangkok, 10260, Thailand

*Corresponding Author E-mail: Aphichit@southeast.ac.th

Received: Apr 06, 2022; Revised: Aug 01, 2022; Accepted: Aug 02, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกชิ้นส่วนฝาครอบไฟเลี้ยวรถแทรกเตอร์ ด้วยการวิเคราะห์เพื่อหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมของบาร์เรลฮีตเตอร์โดยประยุกต์ใช้เทคนิค DMAIC ในการแก้ไขปัญหา ผู้วิจัยได้กำหนดเป้าหมายไว้ให้มีของเสียต่ำกว่าร้อยละ 1.00 โดยใช้เครื่องมือคุณภาพ 7 อย่าง (7 QC Tools) และทำการออกแบบการทดลองที่เป็นแบบแฟกทอเรียล 2^k ระดับของปัจจัย 2 ระดับ เพื่อหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อของเสีย ผลการศึกษาพบว่า ของเสียมากที่สุด ได้แก่ การเกิดประกายเงิน คิดเป็นร้อยละ 53.27 จากการออกแบบการทดลองระดับปัจจัยเพื่อการใช้งาน พบว่าอุณหภูมิฮีตเตอร์ 1 คือ 210°C อุณหภูมิฮีตเตอร์ 2 คือ 220°C อุณหภูมิฮีตเตอร์ 3 คือ 225°C และอุณหภูมิฮีตเตอร์ 4 คือ 246°C ผลที่ได้จากการนำไปผลิตชิ้นงานจริง พบว่าของเสียประเภทประกายเงินก่อนการปรับปรุง คิดเป็นร้อยละ 0.80 หลังการปรับปรุง คิดเป็นร้อยละ 0.31 ของเสียลดลงจากเดิมคิดเป็นร้อยละ 61.25 เมื่อเปรียบของเสียทั้งหมดพบว่า ก่อนการปรับปรุงมีของเสียคิดเป็นร้อยละ 1.51 หลังการปรับปรุงจำนวนของเสียคิดเป็นร้อยละ 0.83 ของเสียลดลงจากเดิม คิดเป็นร้อยละ 45.1 เมื่อเปรียบเทียบกับเป้าหมายของทางบริษัทฯ ของเสียต่ำกว่าร้อยละ 1.00 สามารถทำได้ตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ หลังการปรับปรุงแล้วของเสียเกิดขึ้นคิดเป็นร้อยละ 0.83

คำสำคัญ: เครื่องฉีดพลาสติก, การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล, บาร์เรลฮีตเตอร์, DMAIC

Abstract

This research aims is to reduce waste in the plastic injection molding process of tractor turn signal cover parts. The researcher used 7QC tools with DMAIC techniques to reducing waste below the target of 1 percent. The experimental research design was a 2^k factorial at the 2-level. The research findings pointed out that the main cause of the waste problems was a silver spark accounting for 53.27 percent. Besides, the appropriate values of the factor level for using should be heater 1 temperature is 210°C , heater 2

temperature is 220°C, heater 3 temperature is 225°C, and heater 4 temperature is 246°C. In addition, in a true experiment with the plastic injection molding process of tractor turn signal cover parts, it reduced from 0.80 percent to 0.31 percent. It means that the waste decreased from the original accounting for about 61.25 percent. After the improvement process, the amount of waste was reduced to 0.83 percent from 1.51 percent or reducing of 45.1 percent. When compared to the goals of the company waste less than 1.00 percent found that it can achieve the goals set. After the improvement, waste occurred at 0.83 percent.

Keywords: Injection molding machine, Factorial experiment design, Barrel heater, DMAIC

1. บทนำ

คุณภาพของผลิตภัณฑ์จากการฉีดขึ้นรูปพลาสติกจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของวัสดุและการออกแบบแม่พิมพ์ เป้าหมายหลักในกระบวนการฉีดขึ้นรูป คือการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แม่พิมพ์ นอกจากการลดรอบเวลาการทำงานให้น้อยลง และการลดต้นทุนการผลิตให้มีค่าต่ำที่สุด สิ่งที่สำคัญอีกประการ คือมีความยากจากการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตที่จะส่งผลที่ดีออกมาได้ ข้อบกพร่องในชิ้นส่วนและผลิตภัณฑ์หรือส่วนประกอบที่พบ เช่น การหดตัวและการบิดงอ ซึ่งจะทำให้เกิดข้อบกพร่องมากมายในแม่พิมพ์ ปัจจัยหลักที่ทำให้พลาสติกเสียรูป คือระบบเกต ระบบหล่อเย็น และระบบฉีด [1] การฉีดขึ้นรูปพลาสติกจะทำได้โดยการให้ความร้อนกับวัสดุจนละลายแล้วฉีดเข้าไปยังแม่พิมพ์ จนเย็นตัวลงและแข็งตัวเป็นรูปร่างสุดท้าย วัสดุพลาสติกจะมีรูปแบบเป็นเม็ดพลาสติก จะถูกใส่ลงไปในถังป้อน จากนั้นถูกทำให้เกิดความร้อนในกระบอกสูบจนถึงการละลายหรือทำให้เป็นพลาสติกที่อุณหภูมิหลอมเหลวแปรผันตามวัสดุ [2]

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนประเภทพลาสติกในส่วน ของชิ้นส่วนยานยนต์ อุปกรณ์ ทางไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และอื่น ๆ อีกหลากหลายผลิตภัณฑ์ สำหรับภายในประเทศได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เป็นพลาสติกเป็นที่นิยมใช้มากในปัจจุบัน คือกระบวนการฉีดขึ้นรูป เนื่องจากให้อัตราการผลิตที่สูง และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้อย่างแม่นยำ [3] การได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพที่ดีหรือผลิตภัณฑ์ที่เกิดข้อบกพร่อง โดยทั่วไปแล้วขึ้นอยู่กับกระบวนการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด นอกจากนี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้อีกด้วย และสิ่งสำคัญ

คือการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องฉีดสำหรับการขึ้นรูป อันได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป ความเร็วในการฉีดขึ้นรูป แรงดันคงค้าง และอุณหภูมิแม่พิมพ์ฉีด [3-5]

ปัญหาจากการเกิดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตที่เพิ่มมากขึ้น หรือทำให้เกิดความเสียหาย ด้านเวลา ด้านกำลังคน และมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มมากขึ้น จากกรณีศึกษาบริษัทแห่งหนึ่งที่ถูกวิจัยได้เข้าปศึกษา เป็นผู้ประกอบการเกี่ยวกับการฉีดพลาสติก เป็นผลิตภัณฑ์ฝาครอบไฟฟ้าเลี้ยงที่ใช้กับรถแทรกเตอร์ซึ่งปัจจุบันบริษัทประสบปัญหาในด้านการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ที่มีของเสียเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต อยู่ที่ร้อยละ 1.5 โดยมีลักษณะข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ได้แก่ ชิ้นงานเป็นประกายเงิน ชิ้นงานเป็นผิวลาย ชิ้นงานเป็นจุดดำ และชิ้นงานเป็นรอยต่าง ๆ จากปัญหาดังกล่าวทางบริษัทจึงได้มีการกำหนดเป้าหมายเพื่อที่จะดำเนินการลดของเสียที่เกิดขึ้นโดยรวมให้ต่ำกว่าร้อยละ 1 ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีการกำหนดวัตถุประสงค์เพื่อดำเนินการศึกษาดังนี้

1.1. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อลดของเสียจากกระบวนการผลิตฝาครอบไฟฟ้าเลี้ยงให้ต่ำกว่าร้อยละ 1

จากปัญหาดังกล่าว ทางผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นความสำคัญของการลดของเสียที่เกิดขึ้น จึงได้มีการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้น และหาสาเหตุต่าง ๆ ที่มีผลทำให้เกิดปัญหาและทำการวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยจึงได้มีการศึกษาข้อมูลดังนี้

1.2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.2.1. พลาสติก (Plastic)

พลาสติกที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ คือ อะคริลิกพลาสติก (Acrylic plastic) เป็นพลาสติกชนิดเดียวกับกับ โพลีเมทิลเม

ทาโครเลตหรือพีเอ็มเอ็มเอ (Polymethyl methacrylate, PMMA) และสูตรเคมีของพลาสติกชนิดนี้คือ $C_5H_8O_2$ อะคริลิกพลาสติกหรือโพลีเมทิลเมทาโครเลตเป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่ง มีชื่อทางการค้าหลายชื่อด้วยกัน เช่น Plexiglas, Lucite, Perspex เป็นต้น วัสดุจะมีสมบัติโดดเด่นในเรื่องความเหนียว ความโปร่งใส สามารถขึ้นรูปได้ง่าย

คุณสมบัติของอะคริลิกพลาสติก มีความหนาแน่นประมาณ 1.15–1.19 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 130–140 องศาเซลเซียส และจุดเดือดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีความทนทานต่อการกระแทก มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ดึกกว่าพลาสติกชนิดอื่น ๆ [6]

1.2.2. การฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

การฉีดขึ้นรูป เป็นกระบวนการผลิตชิ้นส่วนพลาสติกที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เพราะสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 6 ส่วน (6M) ได้แก่ วัสดุุดิบ (Material) แม่พิมพ์ (Mold) เครื่องฉีด (Machine) พารามิเตอร์ (Method) ช่างฉีด (Man) และการจัดการ (Management) [7–8]

1.2.3. เครื่องมือคุณภาพ 7 อย่าง (7 QC Tools)

เครื่องมือคุณภาพ 7 อย่าง เป็นเครื่องมือช่วยในการแก้ปัญหา เพื่อช่วยศึกษาสภาพทั่วไปของปัญหา คัดเลือกปัญหา ค้นหาและวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่แท้จริง เพื่อทำการแก้ไขอย่างถูกต้องและป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาเหล่านั้นซ้ำ โดยมีส่วนประกอบดังนี้ [9]

- 1) แผ่นตรวจสอบ (Check sheet)
- 2) ผังพาเรโต (Pareto diagram)
- 3) กราฟ (Graphs)
- 4) ผังเหตุและผล (Cause and effect diagram)
- 5) ฮิสโตแกรม (Histogram)
- 6) ผังการกระจาย (Scatter diagram)
- 7) แผนภูมิควบคุม (Control chart)

1.2.4. กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

(Analytic Hierarchy Process)

กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการตัดสินใจ มีการแบ่งองค์ประกอบ

ของปัญหาออกเป็นส่วน ๆ ในรูปของแผนภูมิตามลำดับชั้น แล้วมีการให้ค่าน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบแล้วนำมาคำนวณค่าน้ำหนักเพื่อนำไปสู่ค่าลำดับความสำคัญของแต่ละทางเลือกว่าทางเลือกใดมีค่าสูงสุดแล้วนำมาประกอบการตัดสินใจ เทคนิคนี้จึงเหมาะสำหรับทั้งการตัดสินใจที่เป็นรายบุคคลและเป็นกลุ่ม โดยมีจุดเด่น คือมีความง่ายในการสร้าง และสามารถนำเอาปัจจัยที่เป็นทั้งนามธรรมและรูปธรรมมาวินิจฉัยได้อย่างมีความสอดคล้องกันของเหตุผล อาศัยเกณฑ์การประเมินมาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบความสำคัญโดยมีคะแนน 1-9 ดังตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบทางเลือกเป็นคู่ ๆ โดยอาศัยเกณฑ์ประเมินมาตรฐาน [10–11]

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบทางเลือกเป็นคู่ ๆ โดยอาศัยเกณฑ์ประเมินมาตรฐาน

ระดับความสำคัญ	ความหมาย	คำอธิบาย
1	สำคัญเท่ากัน	ทั้ง 2 เกณฑ์ส่งผลกระทบท่อวัตถุประสงค์เท่า ๆ กัน
3	สำคัญกว่าปานกลาง	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับปานกลาง
5	สำคัญกว่ามาก	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับมาก
7	สำคัญกว่ามากที่สุด	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับมากที่สุด
9	สำคัญกว่ามากที่สุด	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับสูงสุด
2,4,6,8	อยู่ระหว่างระดับที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น	อยู่ระหว่างระดับที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น

1.2.5.เมทริกซ์เหตุและผล

(Cause and Effect matrix)

เมทริกซ์เหตุและผล เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการจัดลำดับความสำคัญของตัวแปรหรือปัจจัยหลักในกระบวนการผลิต โดยการให้คะแนนความสำคัญของแต่ละตัวแปรหรือปัจจัยจากการระดมความรู้หรือประสบการณ์ของผู้ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต เมทริกซ์เหตุและผลจะช่วยคัดเลือกตัวแปรหรือปัจจัยใดที่ควรได้รับการตรวจสอบเพื่อระบุว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างเหตุ (Cause) และผล (Effect) ที่เกิดขึ้นสามารถบ่งบอกได้ว่า ตัวแปรหรือปัจจัยเหล่านี้มีความจำเป็นที่ควรได้รับการควบคุม [10]

1.3.งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

O. Siriswasdi [12] ได้ศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดของเสียอันเนื่องจากการผลิตเทฟลอน และหาสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย โดยแผนการทดลองที่ใช้เป็นแบบแฟกทอเรียลดีไซน์ (2k) ระดับของปัจจัย 2 ระดับ ทำการทดลองกับผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น จากการพิจารณาค่าที่เหมาะสมของระดับปัจจัยเพื่อการใช้งาน พบว่าอุณหภูมิฮีตเตอร์โซน 1 คือ 350°C อุณหภูมิฮีตเตอร์โซน 2 คือ 370°C อุณหภูมิฮีตเตอร์โซน 3 คือ 400°C อุณหภูมิฮีตเตอร์โซน 4 คือ 280°C และความเร็ว คือ 80 เซนติเมตรต่อชั่วโมง จากการนำไปทดลองการฉีดจริง พบว่าของเสียก่อนการปรับปรุงของผลิตภัณฑ์รุ่น G201 คิดเป็นร้อยละ 0.1301 และรุ่น F4PN คิดเป็นร้อยละ 0.2373 หลังการปรับปรุงสัดส่วนของเสียจากการผลิตเทฟลอนรุ่น G201 คิดเป็นร้อยละ 0.086 และรุ่น F4PN คิดเป็นร้อยละ 0.1788 สามารถลดของเสียของผลิตภัณฑ์รุ่น G201 คิดเป็นร้อยละ 33.9 คิดเป็นมูลค่าประมาณ 500,000 บาท และ 600,000 บาท สำหรับการลดของเสียผลิตภัณฑ์รุ่น F4PN คิดเป็นร้อยละ 24.65

C. Surasak and K. Rapee [13] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ในกระบวนการฉีดพลาสติก โดยการควบคุมคุณภาพเชิงสถิติ ซึ่งพบว่าปัญหาประเภทเงินมีของเสียสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 95.60 หลังจากการปรับปรุงกระบวนการผลิต พบว่าสามารถลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากปัญหาของประเภทเงินจาก 33,748 ppm ลดลง

เหลือ 6,084 ppm และสัดส่วนของเสียเฉลี่ยโดยรวมของยอดผลิตชิ้นงานจากเดิม 8,947 ppm ลดลงเหลือ 2,320 ppm สามารถลดคิดเป็นร้อยละ 74.06

P. Homsri, C. Kongthana [14] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนฉีดพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนยานยนต์ โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีลำดับความสำคัญมากที่สุดจะอยู่ในส่วนของวิธีการได้แก่ แรงดันย้ำ (Holding pressure) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) และรอบการทำงาน (Cycle time) นำปัจจัยมาทำการออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบ 2k Factorial Design ในการปรับปรุงแก้ไขปัญหา โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัว พบว่าปริมาณของเสียจากเดิมคิดเป็นร้อยละ 39.05 สามารถลดคิดเป็นร้อยละ 2.78

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1.วัสดุที่นำมาใช้ในการศึกษา

ชิ้นส่วนฝาครอบไฟเลี้ยว เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ผลิตมาจากวัตถุดิบ PLEXIGLAS ชนิด 8 N clear, IRD 50 และสีผสมเม็ดสีส้ม ถูกผสมกันตามสูตรของผู้ผลิต (ส่วนผสมตามสูตรไม่สามารถเปิดเผยได้) ก่อนนำไปผลิตจริง ดังรูปที่ 1 แสดงผลิตภัณฑ์ฝาครอบไฟเลี้ยว



รูปที่ 1 ผลิตภัณฑ์ฝาครอบไฟเลี้ยว

2.2.อุปกรณ์

เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding machine) ยี่ห้อ Victor Taichung รุ่น Ve-80ES โครงสร้างโดยพื้นฐานจะมีส่วนประกอบสำคัญแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนชุดหัวฉีด (Injection unit) ส่วน

ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ (Clamping unit) ส่วนฐานของเครื่องฉีด (Base) [15]

1) ส่วนชุดหัวฉีด (Injection unit) จะทำหน้าที่ดึงพลาสติกเข้าสู่กระบอกฉีดหลอมเหลวและส่งพลาสติกเหลวไปยังหัวฉีด เพื่อทำหน้าที่ในการฉีดและรักษาความดันย้ำ มีส่วนประกอบ ได้แก่ กรวยใส่เม็ดพลาสติก (Hopper) ชุดหัวฉีด (Nozzle) สกรู (Screw) ชุดกระบอกฉีด (Barrel) แผ่นความร้อน (Heater) ชุดกระบอกสูบและลูกสูบไฮดรอลิก (Hydraulic cylinder and piston) และชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนสกรู (Drive motor)

2) ส่วนชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ (Clamping unit) จะทำหน้าที่ในการยึดแม่พิมพ์ทั้งสองส่วน เลื่อนเปิด-ปิด แม่พิมพ์ ให้แรงในการปิดล็อกแม่พิมพ์ และปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

3) ส่วนฐานของเครื่องฉีด (Base) ทำหน้าที่ รับน้ำหนักของชุดหัวฉีด และชุดปิด-เปิด แม่พิมพ์ และยึดติดตั้งอุปกรณ์ของระบบไฮดรอลิก และทำหน้าที่เป็นถังน้ำมันไฮดรอลิก ดังรูปที่ 2 แสดงเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติกจากสถานที่ทำงานจริง



รูปที่ 2 เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก จากสถานที่ทำงานจริง

2.3.วิธีการดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยได้มีการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องถึงแนวทางในการลดข้อเสียที่เกิดขึ้น โดยใช้หลักการของ Six Sigma เพื่อการลดความสูญเสียจากการผลิต และประยุกต์ใช้เทคนิค DMAIC ในการค้นหาปัญหาเพื่อปรับปรุงคุณภาพอย่างต่อเนื่อง

DMAIC คือ การปรับปรุงในกระบวนการอย่างต่อเนื่อง (Continuous improvement) ก่อนเข้าสู่กระบวนการหลัก จำเป็นต้องนิยามถึงปัญหาที่ต้องการนำไปสู่การปรับปรุง การ

เลือกปัญหาที่เป็นปัญหาที่สำคัญ เป็นต้นเหตุที่ทำให้ลูกค้าไม่พอใจและส่งผลกระทบต่อกระบวนการหรือเห็นเป็นปัญหาที่ควรปรับปรุงได้อย่างชัดเจน เพื่อนำมาแก้ไขปัญหาก่อน จากนั้นทำการเลือกลักษณะของตัวแปรตอบสนอง (Response variable) เพื่อนำมาทำการศึกษาและเป็นตัววัดผลในการปรับปรุง (Key process output value, KPOV) จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการในขั้นตอน ต่าง ๆ ต่อไป ขั้นตอนการดำเนินการ DMAIC มีทั้งหมด 5 ขั้นตอนดังนี้ [16]

1) การกำหนดปัญหาที่เกิดขึ้น (Define phase) เป็นขั้นตอนศึกษาความต้องการของลูกค้าและนำความต้องการของลูกค้าที่เป็นปัญหามานำจัดลำดับความสำคัญและเลือกมาดำเนินการแก้ไขปรับปรุง

2) การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา (Measure phase) เป็นขั้นตอนกำหนดแนวทางในการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการ ที่ทำการศึกษากระบวนการโดยละเอียด กำหนดปัจจัยที่ได้รับจากกระบวนการหรือตัวแปรตอบสนองของกระบวนการ

3) การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analysis phase) เป็นขั้นตอนการนำปัจจัยที่มีความสำคัญของกระบวนการมาทำการวิเคราะห์ผ่านวิธีการทางสถิติเชิงอนุมานเพื่อดูว่าปัจจัยต่างๆ เหล่านี้มีนัยสำคัญกับปัญหาซึ่งจะนำไปดำเนินการปรับปรุงในขั้นตอนต่อไป

4) การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improve phase) เป็นขั้นตอนการออกแบบและทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับปัจจัยตอบสนอง และหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยที่จะทำให้ระดับปัจจัยนำเข้าที่ดีที่สุด

5) การควบคุมตัวแปรต่าง ๆ (Control phase) เป็นขั้นตอนการออกแบบวิธีการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ และทำการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง

3. ผลการวิจัย

3.1.ขั้นตอนการกำหนดปัญหา (Define phase)

ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูล ปริมาณการผลิตในช่วงเดือน มีนาคม-เมษายน 2563 โดยเก็บรวบรวมจากใบตรวจสอบ พบว่าปริมาณการผลิตรวมเท่ากับ 67,093 ชิ้น จำนวนของเสียเท่ากับ 1,010 ชิ้น ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของ

เสียเท่ากับ 1.51 และจึงได้มีการกำหนดเป้าหมายไว้ในการลดปริมาณของเสียในการศึกษาค้างนี้ให้เหลือไม่เกินร้อยละ 1 ดังตารางที่ 2 แสดงจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในช่วงระหว่างเดือน มีนาคม-เมษายน 2563

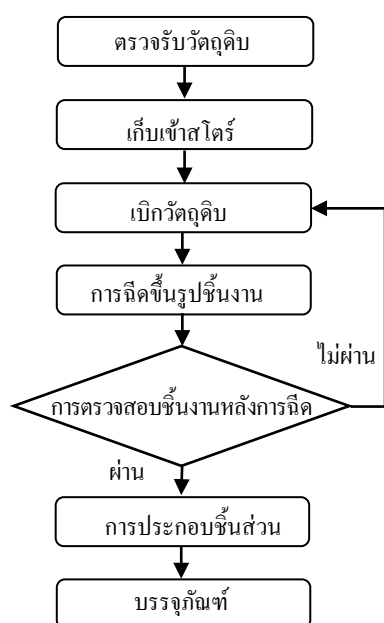
ตารางที่ 2 จำนวนของเสียที่เกิดขึ้น ในช่วงระหว่างเดือน มีนาคม-เมษายน 2563

เดือน	ปริมาณการผลิต (ชิ้น)	จำนวนของเสีย (ชิ้น)	เปอร์เซ็นต์ของเสีย (%)
มีนาคม	38,863	568	1.46
เมษายน	28,176	442	1.57
รวม	67,039	1,010	1.51

3.2. ขั้นตอนการวัด (Measure phase)

3.2.1. การศึกษากระบวนการผลิตชิ้นส่วนฝาครอบไฟเลียว

การศึกษากระบวนการผลิตทำให้สามารถเข้าใจขั้นตอนการทำงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตได้อย่างละเอียด เพื่อช่วยเป็นแนวทางในการวิเคราะห์หาสาเหตุในขั้นตอนของการวิเคราะห์ แผนผังกระบวนการผลิตฝาครอบไฟเลียวในการศึกษาค้างนี้ ดังรูปที่ 3 แสดงกระบวนการผลิตฝาครอบไฟเลียว



รูปที่ 3 กระบวนการผลิตฝาครอบไฟเลียว

ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการผลิตชิ้นส่วนฝาครอบไฟเลียวรถแทรกเตอร์ประกอบด้วย 8 กระบวนการดังนี้

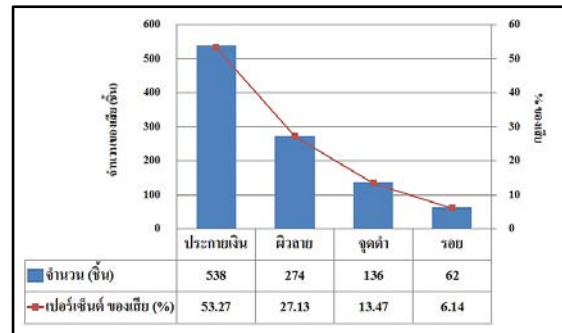
- 1) ตรวจสอบวัตถุดิบ เป็นกระบวนการตรวจสอบวัตถุดิบจากซัพพลายเออร์
- 2) การเก็บวัตถุดิบเข้าสโตร์ เป็นกระบวนการจัดเก็บวัตถุดิบเข้าคลังสินค้า
- 3) การเบิกวัตถุดิบ เป็นกระบวนการเบิกวัตถุดิบเพื่อนำสู่กระบวนการผลิต
- 4) การฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน เป็นกระบวนการผลิตการฉีดพลาสติก ชิ้นส่วนฝาครอบไฟเลียวรถแทรกเตอร์
- 5) การตรวจสอบชิ้นงานหลังการฉีด เป็นกระบวนการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานหลังจากการฉีด
- 6) การประกอบชิ้นงาน เป็นกระบวนการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้ากับฝาครอบไฟเลียว
- 7) การบรรจุชิ้นงาน เป็นกระบวนการนำผลิตภัณฑ์เก็บบรรจุลงกล่องเตรียมพร้อมส่งให้ลูกค้า
- 8) จัดส่งชิ้นงาน เป็นกระบวนการจัดเตรียมขนส่งชิ้นงานให้กับลูกค้า

3.2.2. การวิเคราะห์ข้อมูลของเสียในกระบวนการผลิต

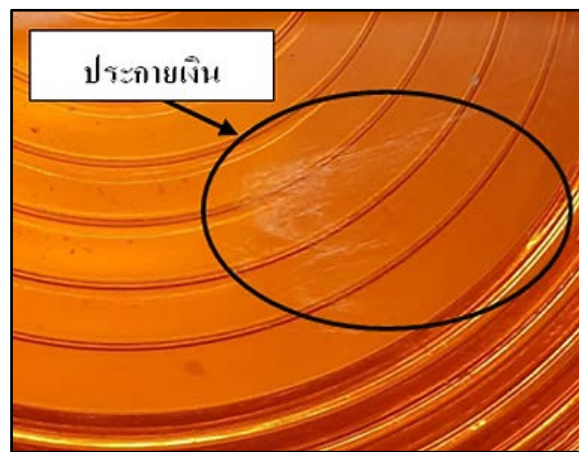
จากการตรวจสอบชิ้นงานหลังการฉีด (กระบวนการที่ 5) พบว่าของเสียที่เกิดขึ้นที่กระบวนการการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานสามารถแยกปัญหาของเสียออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ ปัญหาด้านประกายเงินมีจำนวนของเสียเท่ากับ 538 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 53.27 ลำดับต่อมา ปัญหาด้านผิวลายมีจำนวนของเสียเท่ากับ 274 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 27.13 ลำดับต่อมา ปัญหาด้านจุดดำมีจำนวนของเสียเท่ากับ 136 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 13.47 และปัญหาด้านเป็นรอยมีจำนวนของเสียเท่ากับ 62 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 6.14 ดังตารางที่ 3 แสดงการแจกแจงข้อมูลของเสียชิ้นส่วนฝาครอบไฟเลียว ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตฝาครอบไฟเลียวสามารถนำมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบจำนวนของเสียกับเปอร์เซ็นต์ของเสียที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 4 จากข้อมูลของเสียที่เกิดขึ้นได้มีข้อสรุปว่า จะทำการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับประกายเงินที่มีจำนวนของเสียมากที่สุด ดังรูปที่ 5 แสดงลักษณะปัญหาประกายเงินบนผิวชิ้นงาน

ตารางที่ 3 การแจกแจงข้อมูลของเสียชิ้นส่วนฝาครอบไฟเลียว

ประเภทของเสีย	จำนวนของเสีย(ชิ้น)	เปอร์เซ็นต์ของเสีย(%)
ประกายเงิน	538	53.27
ผิวลาย	274	27.13
จุดดำ	136	13.47
รอย	62	6.14
รวม	1,010	100



รูปที่ 4 เปรียบเทียบข้อมูลจำนวนของเสียกับเปอร์เซ็นต์ของเสีย ในการผลิตชิ้นส่วนฝาครอบไฟเลี้ยว

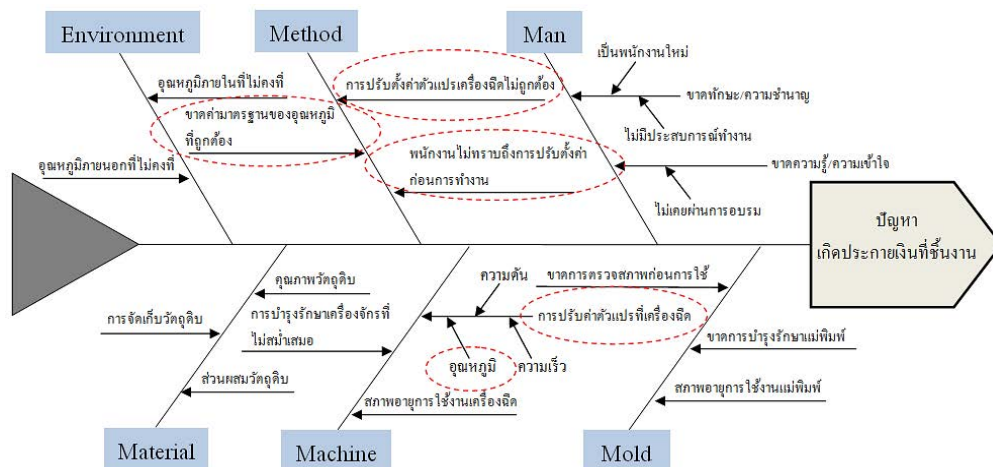


รูปที่ 5 ลักษณะปัญหาประกายเงินบนผิวชิ้นงาน

3.3.การวิเคราะห์ (Analysis phase)

การดำเนินการในขั้นตอนนี้ เป็นขั้นตอนวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยได้นำเครื่องมือเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ โดยใช้หลักการ 5 M 1 E ในแผนภูมิแสดงสาเหตุและผล เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดปัญหา ดังรูปที่ 6

แผนภูมิแสดงสาเหตุและผล หลังจากนั้นนำไปหาความสัมพันธ์ ระหว่างเหตุและผล (Cause & Effect Metric) ดังตารางที่ 4 และดังรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุของปัญหากับคะแนนที่ส่งผลโดยตรงต่อปัญหา



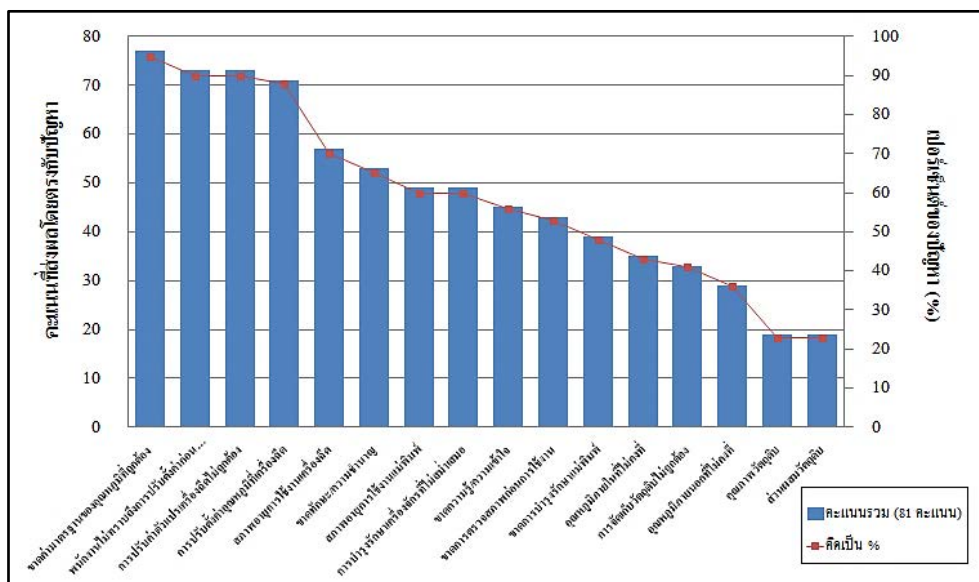
รูปที่ 6 แผนภูมิแสดงสาเหตุและผล

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ ระหว่างเหตุและผล (Cause & Effect Metric)

ลำดับ ที่	ปัจจัยของปัญหา	เทคนิคการระดมสมอง									คะแนน	คิด เป็น %
		ผจก. ฝ่ายผลิต	หัวหน้า แผนก	วิศวกร (PD)	ผจก. QA/QC	หัวหน้า QA/QC	วิศวกร QA/QC	ช่าง ช่าง	ผู้เชี่ยวชาญ คนที่ 1	ผู้เชี่ยวชาญ คนที่ 2		
1	คน (Man)											
	ขาดทักษะ/ความชำนาญ	5	5	7	5	5	7	5	7	7	53	65%
	ขาดความรู้ ความเข้าใจ	5	3	5	5	5	5	3	7	7	45	56%
2	แม่พิมพ์ (Mold)											
	ขาดการตรวจสอบสภาพก่อน การใช้งาน	3	5	5	3	3	5	5	7	7	43	53%
	ขาดการบำรุงรักษา แม่พิมพ์	3	3	5	3	3	5	3	7	7	39	48%
	สภาพอายุการใช้งาน แม่พิมพ์	5	5	5	5	5	5	5	7	7	49	60%
3	เครื่องจักร (Machine)											
	การปรับค่าตัวแปรที่ เครื่องคิดไม่ถูกต้อง	9	7	9	7	7	9	7	9	9	73	90%
	การบำรุงรักษาเครื่องจักร ที่ไม่สม่ำเสมอ	5	5	5	5	5	5	5	7	7	49	60%
	สภาพอายุการใช้งาน เครื่องคิด	7	7	7	5	5	7	5	7	7	57	70%
	วิธีการ (Method)											
	การปรับตั้งค่าตัวแปร เครื่องคิดไม่ถูกต้อง	9	7	9	7	5	9	7	9	9	71	88%
	ขาดค่ามาตรฐานของ อุณหภูมิที่ถูกต้อง	9	7	9	9	9	9	7	9	9	77	95%
	พนักงานไม่ทราบถึงการ ปรับตั้งค่าก่อนทำงาน	9	9	9	7	7	7	7	9	9	73	90%
5	วัสดุ (Material)											
	คุณภาพวัตถุดิบ	1	3	1	1	1	1	5	3	3	19	23%
	การจัดเก็บวัตถุดิบ	5	5	3	3	3	3	5	3	3	33	41%
	ส่วนผสมวัตถุดิบ	1	1	3	1	1	3	3	3	3	19	23%

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ ระหว่างเหตุและผล (Cause & Effect Metric) (ต่อ)

ลำดับ ที่	ปัจจัยของปัญหา	เทคนิคการระดมสมอง									คะแนน รวม	คิด เป็น %
		ผก.ฝ่าย ผลิต	หัวหน้า แผนก	วิศวกร (PD)	ผก. QA/QC	หัวหน้า QA/QC	วิศวกร QA/QC	ช่าง ช่าง	ผู้เชี่ยวชาญ คนที่ 1	ผู้เชี่ยวชาญ คนที่ 2		
6	สิ่งแวดล้อม (Environment)											
	อุณหภูมิภายในที่ไม่ คงที่	5	5	3	3	3	3	3	5	5	35	43%
	อุณหภูมิภายนอกที่ไม่ คงที่	3	3	3	5	5	3	5	1	1	29	36%



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุของปัญหากับคะแนนที่ส่งผลโดยตรงต่อปัญหา

ลำดับต่อไปคือการนำข้อมูลที่ได้จากแผนภูมิแสดงสาเหตุและผล มาหาความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผลด้วยวิธีการระดมสมอง โดยมีการเรียนเชิญผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการทำงานในกระบวนการผลิต ดังนี้ ผู้จัดการฝ่ายผลิต หัวหน้าแผนก วิศวกรฝ่ายผลิต ผู้จัดการฝ่ายตรวจสอบคุณภาพ หัวหน้าฝ่ายตรวจสอบคุณภาพ วิศวกรฝ่ายตรวจสอบคุณภาพ พนักงานช่าง ผู้เชี่ยวชาญด้านการผลิต รวมจำนวนทั้งหมด 9 ท่าน การวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้วิธีการตัดสินใจแบบพหุหลักเกณฑ์ ด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ จากการสอบถามข้อมูลกับผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง โดยการให้คะแนนตามเกณฑ์การประเมินที่มีความเป็นมาตรฐาน จากตารางที่ 5 แสดงระดับเกณฑ์การประเมินตามมาตรฐาน [10-11]

ตารางที่ 5 ระดับเกณฑ์การประเมินตามมาตรฐาน

การกำหนดเกณฑ์การประเมินตามมาตรฐาน	
ระดับคะแนน	ความหมายการให้คะแนน
9	ส่งผลโดยตรงมากที่สุด 100%
7	ส่งผลโดยตรงมากที่สุด 80%,
5	ส่งผลโดยตรงมากที่สุด 60%
3	ส่งผลโดยตรงปานกลาง 40%,
1	ส่งผลโดยตรงต่อปัญหา < 20%

จากตารางที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์ลำดับสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งสรุปสาเหตุที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด 16 สาเหตุ

จากนั้นนำมาหาค่าคะแนนรวมทั้งหมดและคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เพื่อเลือกสาเหตุที่มีค่าของเปอร์เซ็นต์ที่อยู่ในเกณฑ์จะต้องได้รับการปรับปรุงแก้ไขต่อไป

วิธีการคำนวณคะแนนรวม (จากตารางที่ 6) พิจารณาได้จาก

คะแนนรวม = 9 (ระดับคะแนนสูงสุด) $\times$ 9 (จำนวนผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการประเมิน) = 81 คะแนน

วิธีการคำนวณเพื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ (จากตารางที่ 6) พิจารณาได้จาก

เปอร์เซ็นต์ = (ผลรวมในแต่ละสาเหตุ / คะแนนรวม) $\times$ 100

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ลำดับสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น

ลำดับ	สาเหตุของปัญหา	คะแนนรวม (81คะแนน)	คิดเป็น %
1	ขาดค่ามาตรฐานของอุณหภูมิที่ถูกต้อง	77	95%
2	พนักงานไม่ทราบถึงการปรับตั้งค่าก่อนทำงาน	73	90%
3	การปรับตั้งค่าตัวแปรเครื่องฉีดไม่ถูกต้อง	73	90%
4	การปรับตั้งค่าอุณหภูมิที่เครื่องฉีดไม่ถูกต้อง	71	88%
5	สภาพอายุการใช้งานเครื่องฉีด	57	70%
6	ขาดทักษะ/ความชำนาญ	53	65%
7	สภาพอายุการใช้งานแม่พิมพ์	49	60%
8	การบำรุงรักษาเครื่องจักรที่ไม่สม่ำเสมอ	49	60%
9	ขาดความรู้/ความเข้าใจ	45	56%
10	ขาดการตรวจสภาพก่อนการใช้งาน	43	53%
11	ขาดการบำรุงรักษาแม่พิมพ์	39	48%
12	อุณหภูมิภายในที่ไม่คงที่	35	43%
13	การจัดเก็บวัตถุดิบไม่ถูกต้อง	33	41%
14	อุณหภูมิภายนอกที่ไม่คงที่	29	36%
15	คุณภาพวัตถุดิบ	19	23%
16	ส่วนผสมวัตถุดิบ	19	23%

ผลการวิเคราะห์จากลำดับความสำคัญของสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น พบว่าสาเหตุที่ 1 เกิดจากการขาดค่ามาตรฐานของอุณหภูมิที่ถูกต้อง คิดเป็นร้อยละ 95 สาเหตุที่ 2 เกิดจากพนักงานไม่ทราบถึงการปรับตั้งค่าก่อนทำงาน

และสาเหตุที่ 3 การปรับตั้งค่าตัวแปรเครื่องฉีดไม่ถูกต้อง คิดเป็นร้อยละ 90 และสาเหตุที่ 4 เกิดจากการปรับตั้งค่าอุณหภูมิที่เครื่องฉีดไม่ถูกต้อง คิดเป็นร้อยละ 88

จากการลงมติในที่ประชุม เกณฑ์การเลือกสาเหตุของปัญหา คือ ต้องมากกว่า 80 % ขึ้นไป ที่จะส่งผลโดยตรงกับปัญหามากที่สุด

3.4.การปรับปรุง (Improve phase)

ผลการวิเคราะห์ เพื่อหาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น พบว่าสาเหตุเกิดขึ้นที่ 2 ปัจจัยคือ

ปัจจัยที่ 1 เกี่ยวกับวิธีการ (Method) สามารถแยกสาเหตุออกเป็น 3 สาเหตุ ได้แก่

- 1) การปรับตั้งค่าตัวแปรเครื่องฉีดไม่ถูกต้อง
- 2) ขาดค่ามาตรฐานของอุณหภูมิที่ถูกต้อง
- 3) พนักงานไม่ทราบถึงการปรับตั้งค่าอุณหภูมิก่อนทำงาน

ปัจจัยที่ 2 เกี่ยวกับเครื่องจักร (Machine) สามารถแยกสาเหตุออกเป็น 1 สาเหตุ ได้แก่ การปรับตั้งค่าอุณหภูมิที่เครื่องฉีดไม่ถูกต้อง

จากข้อสรุปสาเหตุที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยได้มีการประชุมกับคณะทำงานทั้งหมด เพื่อระดมความคิดเห็นและข้อเสนอแนะในการหาแนวทางการแก้ไขดังนี้

ประเด็นที่ 1 การปรับตั้งค่าตัวแปรเครื่องฉีดไม่ถูกต้อง จากข้อสรุปในที่ประชุม ได้มีการพิจารณาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก โดยให้พิจารณาตัวแปรด้านอุณหภูมิเป็นหลักก่อนเพราะเป็นจุดที่สำคัญ โดยพิจารณาจุดที่เกี่ยวข้องกับจุดหลอมเหลวของพลาสติก ที่บริเวณทางออกของหัวฉีด เมื่อนำมาพิจารณาพบว่า อุปกรณ์ที่สำคัญคือ บาร์เรลฮีตเตอร์ (Barrel heaters) และเครื่องอัดรีด (Extruder) ที่จะต้องมีการปรับค่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์รวมทั้งหมด 4 ตัว และเนื่องจากทางบริษัทมีการปรับส่วนผสมของวัตถุดิบใหม่ แต่ยังใช้ค่าอุณหภูมิเดิมอยู่ และยังไม่มีความของอุณหภูมิที่ถูกต้องที่เป็นค่ามาตรฐาน จึงเป็นเหตุผลที่จะต้อง

นำไปพิจารณาในการทดลองปรับค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อไป

สรุปแนวทางการแก้ไข ประเด็นที่ 1 ทำการทดลองเพื่อหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในอุปกรณ์บาร์เรลฮีตเตอร์ (Barrel heaters)

ประเด็นที่ 2 ขาดค่ามาตรฐานของอุณหภูมิที่ถูกต้อง จากข้อสรุปในที่ประชุม ให้ทำการทดลองเพื่อหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม และกำหนดค่ามาตรฐานในการปรับตั้งค่าอุณหภูมิก่อนที่จะทำการฉีดพลาสติกทุกครั้ง

สรุปแนวทางการแก้ไข ประเด็นที่ 2 กำหนดค่ามาตรฐานในการปรับตั้งค่าอุณหภูมิก่อนที่จะทำการฉีดพลาสติกทุกครั้ง

ประเด็นที่ 3 พนักงานไม่ทราบถึงการปรับตั้งค่าอุณหภูมิ ก่อนทำงาน จากข้อสรุปในที่ประชุม เมื่อได้ผลในการปรับตั้งค่าที่เป็นมาตรฐานแล้ว ดำเนินการจัดทำคู่มือ และอบรมให้พนักงานได้รับทราบเป็นลำดับต่อไป

สรุปแนวทางการแก้ไข ประเด็นที่ 3 ดำเนินการจัดทำคู่มือ และอบรมให้พนักงานได้รับทราบเป็นลำดับต่อไป

ประเด็นที่ 4 การปรับตั้งค่าอุณหภูมิเครื่องฉีดไม่ถูกต้อง จากข้อสรุปในที่ประชุม ดำเนินการตามแนวทางในประเด็นที่ 3

สรุปแนวทางการแก้ไข ตามแนวทางประเด็นที่ 3 ดำเนินการจัดทำคู่มือ และอบรมให้พนักงานได้รับทราบเป็นลำดับต่อไป

จากทั้ง 3 ประเด็น ผู้วิจัยสรุปสาเหตุของปัญหาพร้อมทั้งแนวทางการแก้ไขปรับปรุง พิจารณาได้จากตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สาเหตุของปัญหา ที่จะดำเนินการแก้ไขปรับปรุง

ลำดับ	สาเหตุของปัญหา	แนวทางการแก้ไขปรับปรุง
1	การปรับตั้งค่าตัวแปรเครื่องฉีดไม่ถูกต้อง	การทดลองเพื่อหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม ในอุปกรณ์บาร์เรลฮีตเตอร์ (Barrel heaters)
2	ขาดค่ามาตรฐานของอุณหภูมิที่ถูกต้อง	กำหนดค่ามาตรฐานในการปรับตั้งค่าอุณหภูมิก่อนที่จะทำการฉีดพลาสติกทุกครั้ง

ตารางที่ 7 สาเหตุของปัญหา ที่จะดำเนินการแก้ไขปรับปรุง (ต่อ)

ลำดับ	สาเหตุของปัญหา	แนวทางการแก้ไขปรับปรุง
3	พนักงานไม่ทราบถึงการปรับตั้งค่าอุณหภูมิ ก่อนทำงาน	ดำเนินการจัดทำคู่มือ และอบรมให้พนักงานได้รับทราบเป็นลำดับต่อไป
4	การปรับตั้งค่าอุณหภูมิเครื่องฉีด ไม่ถูกต้อง	ดำเนินการจัดทำคู่มือ และอบรมให้พนักงานได้รับทราบเป็นลำดับต่อไป

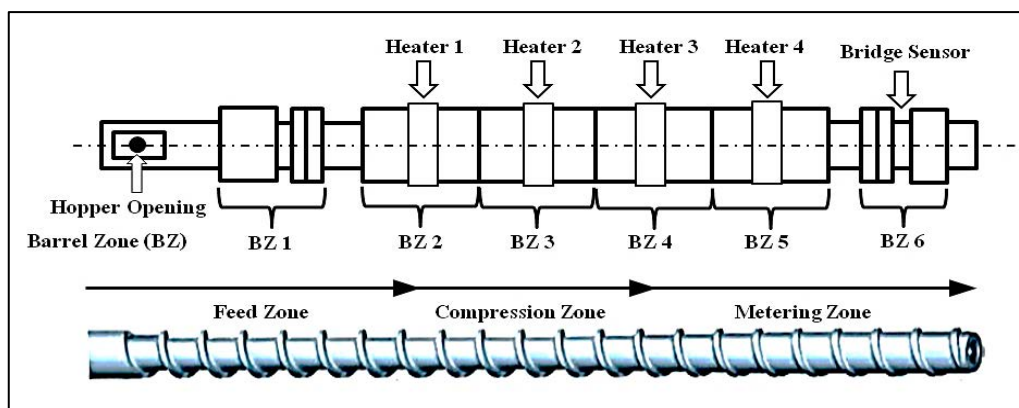
3.4.1. เครื่องอัดรีด (Extruder)

เครื่องอัดรีด เป็นอุปกรณ์สำหรับการรีดขึ้นรูปในกระบวนการผลิตที่สำคัญที่สุด คุณภาพการหลอมที่ได้ขึ้นอยู่กับ การตั้งค่าพารามิเตอร์ด้านอุณหภูมิ ของเครื่องอัดรีดเพื่อให้วัสดุเป็นเนื้อเดียวกันด้วยความร้อนที่จะทำให้ เกิดการหลอมเหลว การตั้งค่าอุณหภูมิที่มีประสิทธิภาพ จะต้องระบุการตั้งค่าอุณหภูมิที่บาร์เรลให้มีความถูกต้อง การควบคุมอุณหภูมิจะส่งผลต่อคุณภาพการหลอมและทำให้มีคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอัดรีดจะต้องคำนึงถึงการตั้งค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม ในทางปฏิบัติเรียกว่า "การทดลองและมีการทดสอบข้อผิดพลาด" ดังนั้นการตั้งค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวทำความร้อนแบบบาร์เรลจึงเป็นประโยชน์สำหรับผลลัพธ์คุณภาพการหลอม เพื่อให้แม่นยำยิ่งขึ้น อุณหภูมิของบาร์เรลจะส่งผลต่อเกณฑ์ต่าง ๆ เช่น การกระจายตัวของวัสดุหลอมเหลวอุณหภูมิบนหน้าตัด ความสม่ำเสมอของวัสดุ การสึกหรอ อุณหภูมิหลอมเหลว ฯลฯ [17–19]

จากรูปที่ 8 แสดงเครื่องอัดรีด (Extruder) พร้อมข้อมูลการติดตั้งบาร์เรลฮีตเตอร์ (Barrel heaters) และตำแหน่งของอุปกรณ์ [17] เครื่องอัดรีด (Extruder) สามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกเป็น Feed zone จะเป็นช่วงที่ทำหน้าที่ในการลำเลียงเม็ดพลาสติกที่ไหลลงมาจาก Hopper throat เพื่อส่งต่อไปยังช่วงที่ 2 Compression zone ของ Screw เป็นช่วงที่ทำให้พลาสติกเกิดการหลอมเหลวและผสมผสานกัน และช่วงที่ 3 Metering zone เป็นช่วงที่มีการเนียนกันของพลาสติก

และจะเพิ่มมากขึ้น ระหว่างบาร์เรล (Barrel) กับ สกรู (Screw) และจะเพิ่มการหลอมละลายของพลาสติก บางส่วนที่ยังหลอมละลายไม่ดีพอ เพื่อที่จะทำการฉีด

พลาสติกต่อไป บาร์เรลโซน (Barrel zone) แบ่งออกเป็น 6 โซน ตั้งแต่โซนที่ 2 (BZ2) ถึง โซน ที่ 5 (BZ5) มี อุปกรณ์ฮีตเตอร์ (Heaters) รวมจำนวน 4 ตัว



รูปที่ 8 เครื่องอัดรีด (Extruder) พร้อมข้อมูลการติดตั้งบาร์เรลฮีตเตอร์ (Barrel Heaters) และตำแหน่งของอุปกรณ์

3.4.2. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

ผู้วิจัยได้ศึกษาปัจจัยที่นำมาทำการทดลองจากปัญหา ประกายเงิน พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลและส่งผลกระทบต่อ ปัญหา คือการปรับตั้งค่าตัวแปรที่เครื่องฉีด ผู้วิจัยจึงได้นำ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ของบาร์เรลฮีตเตอร์ (Barrel heaters) นำมาพิจารณา เป็นปัจจัยในการออกแบบการทดลอง ซึ่งมี 4 ปัจจัย ได้แก่

- 1) อุณหภูมิที่ Heater 1
- 2) อุณหภูมิที่ Heater 2
- 3) อุณหภูมิที่ Heater 3
- 4) อุณหภูมิที่ Heater 4

การแบ่งระดับปัจจัยเพื่อใช้ในการทดลอง ดังตารางที่ 8 แสดงปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^4

ตารางที่ 8 ปัจจัยและระดับของปัจจัยนำเข้าที่ใช้ในการ ออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^4

ปัจจัย ที่พิจารณา	ระดับที่ใช้ ในปัจจุบัน	ค่าระดับปัจจัย ในการทดลอง		หน่วยวัด
		ระดับต่ำ	ระดับสูง	
Heater 1	200	200	210	°C
Heater 2	210	210	220	°C

ตารางที่ 8 ปัจจัยและระดับของปัจจัยนำเข้าที่ใช้ในการ ออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^4 (ต่อ)

ปัจจัย ที่พิจารณา	ระดับที่ใช้ ในปัจจุบัน	ค่าระดับปัจจัย ในการทดลอง		หน่วยวัด
		ระดับต่ำ	ระดับสูง	
Heater 3	216	216	225	°C
Heater 4	242	242	246	°C

วิธีการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบ 2 ระดับ (2^k Full Factorial Experiment) โดยปัจจัยมี 2 ระดับ คือ “ต่ำ” และ “สูง” โดยการทดลองแบบสุ่ม (Random) จากนั้น ทำการทดลองผลการตอบสนอง โดยกำหนดให้ ผลตอบสนองของการทดลองเป็นสัดส่วนของเสียต่อ ปริมาณการผลิต ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) มี รูปแบบการทดลอง 2^k ทั้งหมด 4 ปัจจัย ซึ่งจะเท่ากับ 2^4 เท่ากับ 16 การทดลองและกำหนดการทดลองซ้ำกัน 2 ครั้ง (2 Replicates) ดังนั้นผู้วิจัยจะต้องทำการทดลองทั้งหมด

เท่ากับ 32 ครั้ง ขึ้นงานที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง ดังตารางที่ 9 แสดงจำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง 2^k Full Factorial Design การทำการทดลองโดยการวิเคราะห์ผลจากการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab17 ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 9 จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง 2^k Full Factorial Design

จำนวนชิ้นงาน (ชิ้น)	จำนวนครั้งที่ทดสอบ (ครั้ง)	รวมจำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ (ชิ้น)
500	32	16,000

ตารางที่ 10 การจัดการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab17

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Temperature heater A	Temperature heater B	Temperature heater C	Temperature heater D	Response
1	18	1	1	200	210	216	242	8.8
2	19	1	1	210	210	216	242	7.5
3	6	1	1	200	220	216	242	7.0
4	7	1	1	210	220	216	242	6.8
5	3	1	1	200	210	225	242	4.8
6	13	1	1	210	210	225	242	4.0
7	11	1	1	200	220	225	242	4.2
8	9	1	1	210	220	225	242	3.7
9	17	1	1	200	210	216	246	6.5
10	20	1	1	210	210	216	246	6.3
11	26	1	1	200	220	216	246	5.8
12	22	1	1	210	220	216	246	5.5
13	14	1	1	200	210	225	246	4.2
14	5	1	1	210	210	225	246	3.9
15	21	1	1	200	220	225	246	3.5
16	23	1	1	210	220	225	246	3.1
17	16	1	1	200	210	216	242	7.6
18	4	1	1	210	210	216	242	7.3
19	28	1	1	200	220	216	242	7.3
20	31	1	1	210	220	216	242	6.7
21	8	1	1	200	210	225	242	5.1
22	10	1	1	210	210	225	242	4.5
23	27	1	1	200	220	225	242	3.8
24	30	1	1	210	220	225	242	3.5
25	24	1	1	200	210	216	246	6.8
26	32	1	1	210	210	216	246	6.4

ตารางที่ 10 การจัดการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab17 (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Temperature heater A	Temperature heater B	Temperature heater C	Temperature heater D	Response
27	1	1	1	200	220	216	246	6.0
28	15	1	1	210	220	216	246	5.7
29	12	1	1	200	210	225	246	4.0
30	25	1	1	210	210	225	246	3.8
31	2	1	1	200	220	225	246	3.3
32	29	1	1	210	220	225	246	2.9

3.4.3. การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab 17

จากผลการทดลอง ผู้วิจัยได้นำค่าผลตอบสนองที่ได้จากจำนวนของชิ้นงานที่เสียจากปัญหาชิ้นงานเป็นประจายเงิน มาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab17 จากผลการทดลองในตารางที่ 10 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

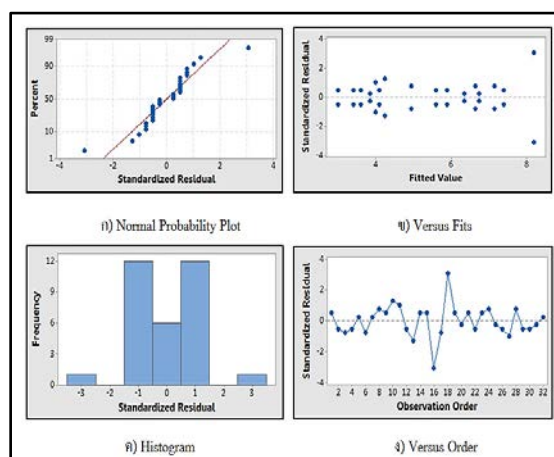
1) การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal probability plot) จากรูปที่ 9(ก) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวใกล้เคียงเส้นตรงหรือข้อมูลถูกลากผ่านได้โดยเส้นตรง ซึ่งแสดงว่าข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์นั้นมีการแจกแจงแบบปกติ

2) การตรวจสอบความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อน (Versus fits) จากรูปที่ 9(ข) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอรอบเส้นกึ่งกลางศูนย์ และไม่มีลักษณะรูปแบบคล้ายลำโพง (Megaphone) แสดงว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนคงที่

3) การทดสอบโดยฮิสโตแกรม (Histogram) จากรูปที่ 9(ค) พบว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent)

4) การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าความคลาดเคลื่อนจุดของข้อมูลกระจายตัวรอบเส้นกึ่งกลางศูนย์ และไม่มีลักษณะของแนวโน้มหรือมีรูปแบบอย่างชัดเจน แสดงว่า

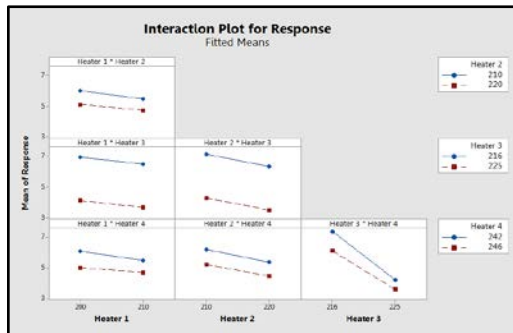
ค่าความคลาดเคลื่อนเป็นตัวแปรสุ่มอิสระ ไม่มีสหสัมพันธ์ (Correlation) ต่อกัน



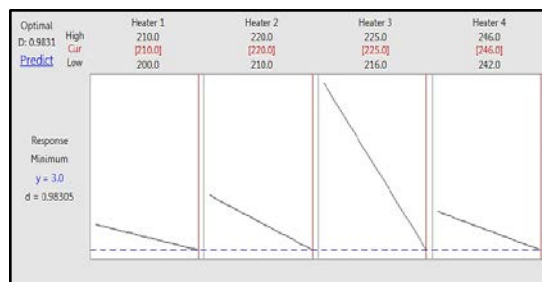
รูปที่ 9 การวิเคราะห์ผลการทดลอง Residual plots for response ก) Normal probability plot ข) Versus fits ค) Histogram ง) Versus order

การวิเคราะห์ Interaction plot ดังรูปที่ 10 แสดงผลการวิเคราะห์ Interaction plot พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสำหรับ Heater 1 Heater 2 Heater 3 และ Heater 4 ที่สูงขึ้น จะส่งผลทำให้ของเสียลดลง

จากรูปที่ 11 แสดงผลตอบสนอง Response optimizer พบว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมของอุณหภูมิสำหรับ Heater 1 คือ 210°C Heater 2 คือ 220°C Heater 3 คือ 225°C และ Heater 4 คือ 246°C หลังจากนั้นให้นำค่าปัจจัยที่เหมาะสม ใช้ในการปรับตั้งค่าที่เครื่องฉีดพลาสติก และดำเนินการทดลองในการฉีดพลาสติกจริงต่อไป



รูปที่ 10 การวิเคราะห์ผลการทดลอง Interaction plot



รูปที่ 11 ผลการตอบสนอง Response optimizer

3.4.4. ผลการทดลองจากการฉีดพลาสติก

จากการประเมินผลด้วยโปรแกรม Minitab17 ซึ่งจะได้ค่าระดับปัจจัยของอุณหภูมิที่เหมาะสม ผู้วิจัยจึงได้มีการดำเนินการขั้นตอน ในส่วนของการนำมาทดสอบการฉีดพลาสติก เพื่อพิจารณาปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น หลังจากนั้น จะเป็นการดำเนินการในส่วนของการผลิตจริง

ก่อนเริ่มการทดสอบการฉีดพลาสติก จะต้องมีการปรับค่าต่าง ๆ ของเครื่องฉีดพลาสติกดังนี้

1) การตั้งค่าตัวแปรควบคุม เพื่อการควบคุมการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก ให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ค่ากำหนดประกอบด้วย ระยะการฉีดที่ 1 ความเร็วในการฉีด 15% แรงดันในการฉีด 65 bar ระยะการฉีดที่ 2 ความเร็วในการฉีด 25% แรงดันในการฉีด 85 bar ระยะการฉีดที่ 3 ความเร็วในการฉีด 25% แรงดันในการฉีด 85 bar ระยะการฉีดที่ 4 ความเร็วในการฉีด 15% แรงดันในการฉีด 85 bar ระยะการฉีดที่ 5 ความเร็วในการฉีด 15% แรงดันในการฉีด 65 bar และระยะการฉีดที่ 6 ความเร็วในการฉีด 5.1% แรงดันในการฉีด 56 bar ค่าต่าง ๆ จะถูกระบุ ดังตารางที่ 11 แสดงการตั้งค่าตัวแปรควบคุมด้านความเร็วและแรงดันที่เครื่องฉีดพลาสติกก่อนการทำงาน

2) การตั้งค่าอุณหภูมิ Heater เป็นการตั้งค่าอุณหภูมิที่เครื่องฉีดพลาสติกก่อนการทดสอบ โดยมีค่ากำหนดดังนี้ Heater 1 คือ 210°C Heater 2 คือ 220°C Heater 3 คือ 225°C และ Heater 4 คือ 246°C

จากตารางที่ 12 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบการฉีดพลาสติก โดยผู้วิจัยได้มีการกำหนดจำนวนครั้งในการทดสอบรวมทั้งหมดรวม 10 ครั้ง ขึ้นงานในการทดสอบจำนวน 500 ชิ้นต่อครั้ง รวมทั้งหมด 5,000 ชิ้น เมื่อทำการตรวจสอบของเสียที่เกิดจากประกายเงิน พบว่ามีของเสียรวมทั้งหมด 9 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 0.18 จากของเสียที่เกิดขึ้น จึงได้มีการประชุมและมีความคิดเห็นว่าของเสียที่เกิดขึ้นนั้นลดลงอยู่ในระดับที่ไม่สูงมากและสามารถยอมรับได้ จึงมีบทสรุปให้ดำเนินการผลิตชิ้นงานจริงได้ต่อไป

ตารางที่ 11 การตั้งค่าตัวแปรควบคุมด้านความเร็วและแรงดันที่เครื่องฉีดพลาสติกก่อนการทำงาน

ตัวแปรควบคุมในการฉีดพลาสติก	การปรับตั้งค่าตัวแปรควบคุม					
	ระยะการฉีดที่ 1	ระยะการฉีดที่ 2	ระยะการฉีดที่ 3	ระยะการฉีดที่ 4	ระยะการฉีดที่ 5	ระยะการฉีดที่ 6
ความเร็วการฉีด	15%	25%	25%	15%	15%	5.1%
แรงดันการฉีด	65 bar	85 bar	85 bar	85 bar	65 bar	56 bar

ตารางที่ 12 ผลจากการทดสอบการฉีดพลาสติก

จำนวนครั้งในการทดสอบฉีด	เวลาในการฉีด (Cycle Time)	ปัจจัยค่าอุณหภูมิ				จำนวนชิ้นงานทดสอบ(ชิ้น)	ของเสียประกายเงิน(ชิ้น)	เปอร์เซ็นต์ของเสีย (%)
		Heater 1	Heater 2	Heater 3	Heater 4			
1	38.4	210	220	224	246	500	1	0.2

ตารางที่ 12 ผลจากการทดสอบการฉีดพลาสติก (ต่อ)

จำนวนครั้งในการทดสอบฉีด	เวลาในการฉีด (Cycle Time)	ปัจจัยค่าอุณหภูมิ				จำนวนชิ้นงานทดสอบ(ชิ้น)	ของเสียประเภทเงิน(ชิ้น)	เปอร์เซ็นต์ของเสีย (%)
		Heater 1	Heater 2	Heater 3	Heater 4			
2	39.0	210	220	225	245	500	1	0.2
3	39.6	210	219	225	246	500	2	0.4
4	38.1	210	219	225	245	500	2	0.4
5	39.3	210	219	225	245	500	2	0.4
6	37.8	210	220	225	246	500	0	0
7	38.2	210	220	225	245	500	1	0.2
8	37.9	210	220	225	246	500	0	0
9	37.9	210	220	225	246	500	0	0
10	37.9	210	220	225	246	500	0	0
ค่าเฉลี่ยรวม	38.4	210	220	225	246	5,000	9	0.18

จากผลการดำเนินการการผลิตชิ้นส่วนฝาครอบไฟเลี้ยว ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณการผลิตในช่วงหลังการปรับปรุง ระหว่างเดือน กรกฎาคม-กันยายน 2563 โดยเก็บรวบรวมจากใบตรวจสอบ ปริมาณการผลิตรวมเท่ากับ 50,977 ชิ้น พบว่าจำนวนของเสียประเภทเงินเท่ากับ 159 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 0.31 ดังตารางที่ 13 แสดงจำนวนของเสียที่เกิดขึ้น จึงสรุปได้ว่า ปัจจัยด้านอุณหภูมิที่เหมาะสมจะส่งผลต่อของเสียที่เกิดขึ้น

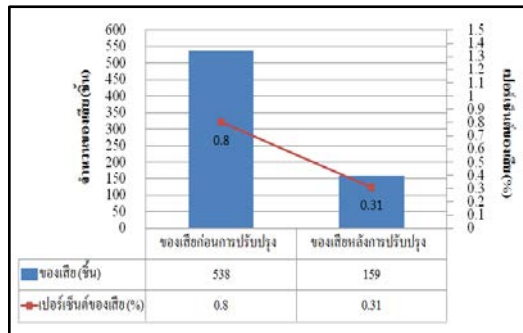
จากตารางที่ 14 แสดงการแจกแจงข้อมูลของเสียประเภทเงินเปรียบเทียบก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง พบว่าก่อนการปรับปรุงมีของเสียเกิดขึ้นรวมทั้งหมด 538 ชิ้น จากปริมาณการผลิต 67,039 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 0.80 หลังการปรับปรุงจำนวนของเสียลดลงอยู่ที่ 159 ชิ้น จากปริมาณการผลิต 50,977 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 0.31 เมื่อนำมาเปรียบเทียบของเสียที่เกิดขึ้นก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง พบว่าของเสียสามารถลดลง คิดเป็นร้อยละ 61.25 ดังรูปที่ 12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของเสียประเภทเงินก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง

ตารางที่ 13 ข้อมูลของเสียชิ้นส่วนฝาครอบไฟเลี้ยว หลังการปรับปรุง ในช่วงระหว่างเดือน กรกฎาคม-กันยายน 2563

เดือน	จำนวนการผลิต(ชิ้น)	จำนวนของเสียประเภทเงิน (ชิ้น)	เปอร์เซ็นต์ของเสีย (%)
กรกฎาคม	17,945	54	0.30
สิงหาคม	14,997	49	0.33
กันยายน	18,035	56	0.31
รวม	50,977	159	0.31

ตารางที่ 14 การแจกแจงข้อมูลของเสียประเภทเงินเปรียบเทียบก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง

ประเภทของเสีย	จำนวนของเสีย (ชิ้น)	เปอร์เซ็นต์ของเสีย (%)
ก่อนการปรับปรุง		
ประเภทเงิน	538	0.80
หลังการปรับปรุง		
ประเภทเงิน	159	0.31



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบของเสียประเภทเงินก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง

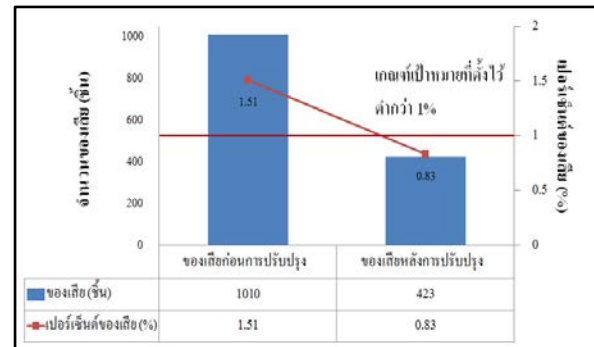
จากตารางที่ 15 แสดงจำนวนของเสียรวมจากประเภทที่เกิดขึ้น จากการเก็บรวบรวมข้อมูล เปรียบเทียบก่อนการปรับปรุงในช่วงระหว่างเดือน มีนาคม-เมษายน 2563 และหลังการปรับปรุง ในช่วงระหว่างเดือน กรกฎาคม-กันยายน 2563 พบว่าก่อนการปรับปรุงมีของเสียเกิดขึ้นรวมทั้งหมด 1,010 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 1.51 หลังการปรับปรุงจำนวนของเสียลดลงอยู่ที่ 423 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 0.83 เมื่อเปรียบเทียบของเสียที่เกิดขึ้นก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงพบว่าของเสียสามารถลดลง คิดเป็นร้อยละ 45.1

ตารางที่ 15 จำนวนของเสียรวมที่เกิดขึ้น เปรียบเทียบก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง

เดือน	ปริมาณการผลิต (ชิ้น)	จำนวนของเสีย (ชิ้น)	เปอร์เซ็นต์ของเสีย (%)
ก่อนการปรับปรุง			
มีนาคม	38,863	568	1.46
เมษายน	28,176	442	1.57
รวม	67,039	1,010	1.51
หลังการปรับปรุง			
กรกฎาคม	17,945	152	0.85
สิงหาคม	14,997	125	0.83
กันยายน	18,035	146	0.81
รวม	50,977	423	0.83

เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการตั้งเป้าหมายของทางบริษัทฯ สามารถลดของเสียที่เกิดขึ้นต่ำกว่าร้อยละ 1 จาก

ข้อสรุปพบว่าสามารถทำได้ตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ หลังจากการปรับปรุงแล้วของเสียเกิดขึ้นคิดเป็นร้อยละ 0.83 ดังรูปที่ 13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของเสียรวมทั้งหมดตามเกณฑ์เป้าหมายที่กำหนดไว้



รูปที่ 13 การเปรียบเทียบของเสียรวมทั้งหมดตามเกณฑ์เป้าหมายที่กำหนดไว้

3.5.การควบคุม (control)

ขั้นตอนการควบคุมเป็นการควบคุมข้อบกพร่องจากสาเหตุต่างๆ ซึ่งจะต้องพยายามควบคุมขั้นตอนหรือวิธีการทำงานให้มากขึ้นเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาซ้ำขึ้นอีก โดยมีการปรับปรุงมาตรฐานการทำงาน และอบรมให้กับพนักงานอยู่เสมอและต่อเนื่อง เพื่อให้พนักงานมีความเข้าใจและสามารถปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้อง ดังตารางที่ 16 แนวทางการควบคุมปัจจัยที่ดำเนินการปรับปรุงแก้ไขแล้ว

ตารางที่ 16 แนวทางการควบคุมปัจจัยที่ดำเนินการปรับปรุงแก้ไขแล้ว

ปัจจัยที่ได้ดำเนินการปรับปรุง	แนวทางการควบคุม
การปรับค่าอุณหภูมิที่ฮีตเตอร์ (Heater) รวมทั้งหมด 4 ตัว ตามปัจจัยในการออกแบบการทดลอง	1) จัดทำแบบฟอร์มการตรวจเช็คเครื่องจักร (Machine check sheet)
	2) จัดทำคู่มือ การปรับตั้งค่าอุณหภูมิ ให้เป็นมาตรฐาน ก่อนการทำงานทุกครั้ง
	3) จัดอบรมให้ความรู้กับพนักงานคุมการทำงานเครื่องจักร

4. อภิปรายผลและสรุป

จากการศึกษาและวิจัยเพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนไฟเลียวรถแทรกเตอร์ ผู้วิจัยได้มีการนำเทคนิค DMAIC มาประยุกต์ใช้ในการดำเนินการทำวิจัยครั้งนี้ และนำเครื่องมือคุณภาพ 7 อย่าง (7 QC Tools) เพื่อคัดเลือกรูปแบบและวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่แท้จริง และผ่านกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process) การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้วิธีการตัดสินใจแบบพหุหลักเกณฑ์ เพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัญหา ด้วยการระดมสมอง พบว่าของเสียที่มากที่สุด ได้แก่ ปลายเงิน จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการทดลองที่เป็นแบบแฟกทอเรียล (Design of Experiments: DOE) 2^4 ระดับของปัจจัย 2 ระดับ ซึ่งจากผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยหลักการทางสถิติพบว่า มี 4 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเกิดของเสีย คือ อุณหภูมิที่ Heater 1 อุณหภูมิที่ Heater 2 อุณหภูมิที่ Heater 3 และอุณหภูมิที่ Heater 4 จากการพิจารณาค่าที่เหมาะสมของระดับปัจจัยเพื่อการใช้งาน พบว่า อุณหภูมิที่ Heater 1 คือ 210°C อุณหภูมิที่ Heater 2 คือ 220°C อุณหภูมิที่ Heater 3 คือ 225°C และอุณหภูมิที่ Heater 4 คือ 246°C

จากผลการดำเนินการผลิตชิ้นส่วนฝาครอบไฟเลียวรถ ผู้วิจัยได้รวบรวมเก็บข้อมูล พบว่าของเสียปลายเงินก่อนการปรับปรุงมีของเสีย คิดเป็นร้อยละ 0.80 หลังจากการปรับปรุงจำนวนของเสียลดลง คิดเป็นร้อยละ 0.31 ของเสียสามารถลดลงจากเดิม คิดเป็นร้อยละ 61.25 เมื่อเปรียบเทียบของเสียทั้งหมด พบว่าก่อนทำการปรับปรุงมีของเสีย คิดเป็นร้อยละ 1.51 หลังจากการปรับปรุงจำนวนของเสียลดลง คิดเป็นร้อยละ 0.83 ของเสียสามารถลดลงคิดเป็นร้อยละ 45.1

จากของเสียที่เกิดขึ้นสามารถลดลงตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ ที่ไม่เกินร้อยละ 1 หลังจากการปรับปรุงแล้วของเสียเกิดขึ้นคิดเป็นร้อยละ 0.83

ผลจากการศึกษาในงานวิจัยนี้ ทำให้ผู้วิจัยทราบว่า อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อของเสีย และเป็นตัวแปรที่สำคัญ จะส่งผลกระทบต่อเม็ดพลาสติกให้เกิดการหลอมเหลวและผสมผสานกันได้ดี เม็ดพลาสติกที่นำมาใช้

ซึ่งอาจจะมีส่วนผสมที่แตกต่างกันออกไป โดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมา ผู้วิจัยคิดเห็นว่าถ้ามีการนำวัตถุดิบมาใช้และมีส่วนผสมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของวัสดุ ควรที่จะต้องมีการทดสอบเพื่อหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมก่อนจะนำมาผลิตชิ้นงานจริง และผู้วิจัยยังมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมในส่วนของการพิจารณาตัวแปรที่เกี่ยวกับ ความดันการฉีด และความเร็วในการฉีด ซึ่งจะมีผลกระทบกับของเสียด้วย ควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติม

งานวิจัยที่ผู้วิจัยได้ศึกษานี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ O. Siriswasdi [12] ซึ่งได้กล่าวไว้ว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเกิดของเสียในการผลิตเพลลอน คือ อุณหภูมิฮีตเตอร์โซน 1 อุณหภูมิฮีตเตอร์โซน 2 อุณหภูมิฮีตเตอร์โซน 3 และอุณหภูมิฮีตเตอร์โซน 4 เมื่อนำไปทดสอบ พบว่ามีผลที่ทำให้ของเสียลดลง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บริษัทกรณีสึกษาและบุคลากรทุกท่านที่ได้ร่วมกันเก็บข้อมูล ระดมสมอง ช่วยกันคิดวิเคราะห์ เพื่อหาสาเหตุและการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น จนทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. R. Katkhede, A. A. Raut and K. Labade, "Defects and Solution of Plastic Parts during Injection Moulding," *International Journal for Scientific Research & Development*, vol. 5, no. 9, pp.2321–0613, 2017.
- [2] B. S. Reddy, K. Arun, M. C. S. Reddy and B. N. Reddy, "Experimental Investigation and Optimizing of Parameters on Injection Moulding Process with LLDPE Reinforced Fly ash using Taguchi," *International Journal of Advanced Research in Basic Engineering Sciences and Technology (IJARBEST)*,

- vol.3, no.38, pp.88–93, 2017, doi: 10.20238/IJARBEST.2017.03s38050013.
- [3] S. Patcharaphan, "Defects of Injection Molded Parts: Causes and Troubleshooting," *Kasetsart Engineering Journal*, vol.69, no. 22, pp. 91 -104, 2009.
- [4] D. V. Rosato, D. V. Rosato, M. G. Rosato, "The Complete Injection Molding process," in *Injection Molding Handbook*, 3rded. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, 2000, ch.1, sec. 1, pp.1-27.
- [5] D. V. Rosato, "Injection Molding," in *Plastics Processing Data Handbook*, New York, NY, USA: Van Nostrand Reinhold, 1997. Ch. 2, pp.121–129.
- [6] National Metal and Materials Technology Center. "Services." mtec.or.th http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=577&Itemid=36 (accessed: Feb. 10, 2021)
- [7] W. Techawinyuatham, "Fundamentals of the plastic injection process," in *Plastic injection Engineering*, 1st ed. Bangkok, Thailand: Technology promotion (Thai-Japanese), Association, 2010. ch. 1, sec. 1.2, pp. 1–3.
- [8] S. Choobthaisong and R. Kanchana, "Reducing Defectives in Plastic Injection Process of Telephone Part By Design of Experiment," *Srinakharinwirot University Engineering Journal (SEJ)*, vol. 15, no. 3, pp.17–31, 2020.
- [9] M. Kittiyakajon, "Application of Analytic Hierarchy Process to Select Quality Improvement for Defect Reduction Projects: A Case Study of Air Tank Manufacturer," *Journal of Engineering RMUTT*, vol. 16, no. 2, pp.71–83, 2018.
- [10] A. Semsri, A. Suksukont, S. Sisamut and T. Pudtipatkosit, "Quality Control and Loss Reduction in the Front Side Fender Model Assembly Process Using Poka-Yoke Techniques," *RMUTP Research Journal Science & Technology*, vol. 15, no. 2, pp.103–117, 2021, doi: 10.14456/jrmutp.2021.25.
- [11] R. W. Satty, "The Analytic Hierarchy Process-What it is and how it is used," Pergamon Journals Ltd, Vol. 9, No. 3-5, pp.161-176, 1987.
- [12] O. Siriswasdi, "Study on Appropriate Method of Teflon Production by Design of Experiment Technigue," M.S. thesis, Dept. Ind Eng., Chulalongkorn Univ., Thailand, 2008.
- [13] C. Surasak and K. Rapee, "Product quality improvement in plastic injection process by statistical quality control," in *15th RSU National Graduate Research Conference*, Pathum Thani, Thailand, 2020, pp.2369–2381.
- [14] P. Homsri and, C. Kongthana, "Design of Experiment (DOE) to Reduce Waste in Plastic Injection Process of Automotive Parts," *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 73–95, 2013
- [15] B. Sornin, "Plastic injection," in *Plastic Technology*, 17th ed. Bangkok, Thailand: Technology promotion (Thai-Japanese), Association, 2005. ch.8, sec. 8.2, pp. 146–147.
- [16] N. Roth and M. Franchetti, "Process improvement for printing operation through the DMAIC Lean Six Sigma approach: A case study from Northwest Ohio, USA," *International Journal of Lean Six Sigma*, vol. 1, no. 2, pp.119–133, 2010, doi: 10.1108/20401461011049502.
- [17] V. Resonnek and V. Schöppner, "Self-Optimizing Barrel Temperature Setting Control of Single Screw Extruders for Improving the Melt Quality," in *34th International Conference of the Polymer Processing Society*, Taipei, Taiwan, 2019, pp. 1–5, doi: 10.1063/1.5088268.

- [18] V. Schöppner and V. Resonnek, "Investigation of the barrel temperature profile on the process behavior of single screw extruders and strategies to determine the optimal temperature control," in *33rd International Conference of the Polymer Processing Society*, Cancun Mexico, 2019, pp. 1–5, doi: 10.1063/1.5121650.
- [19] *Time to Learn about Dynamic Optimization of Extruder Barrel Temperatures*, *Plastics Technology*, May. 2008, [Online]. Available: <https://www.ptonline.com/articles/time-to-learn-about-dynamic-optimization-of-extruder-barrel-temperatures>

พฤติกรรมการดัดของคานเชิงประกอบแบบ FG ที่พิจารณาผลกระทบของรูพรุนวางบน ฐานรากยืดหยุ่น

Bending Behavior of Functionally Graded Beam with Including Effect of Porosity on Elastic Foundation

มนต์ชัย ปัญญาทอง¹, ศราวุธ เรือนศรี¹ และ รัฐพล เกติยศ^{1,*}

¹ สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ทรายขาว พาน
เชียงใหม่ 57120

Monchai Panyatong¹, Saravoot Ruensee¹ and Rattapon Ketiyot^{1,*}

¹ Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Lanna, Sai Khao, Phan, Chiang Rai, 57120, Thailand

*Corresponding Author E-mail: rattapon.ste7@rmutl.ac.th

Received: Apr 19, 2022; Revised: Jul 10, 2022; Accepted: Aug 01, 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแบบจำลองในศึกษาพฤติกรรมการดัดของคานเชิงประกอบแบบ FG วางบนฐานรากยืดหยุ่นและพิจารณาถึงผลกระทบจากรูพรุนของวัสดุ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตามความหนา กำหนดให้เป็นไปตามกฎกำลังและรวมผลกระทบจากรูพรุน จากนั้นใช้ทฤษฎีคานของออยเลอร์-เบอร์นูลลีเพื่ออธิบายพฤติกรรมการดัดของคาน สำหรับสมการควบคุมของปัญหาได้พัฒนาขึ้นจากการประยุกต์ใช้หลักการของงานเสมือน ในขณะที่คำตอบของปัญหามุ่งสร้างจากวิธีเชิงวิเคราะห์และได้เปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้กับคำตอบจากวิธีกัลเลอรินไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อประเมินความถูกต้องของคำตอบ จากการศึกษาพบว่า 1) การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์ความพรุนทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าที่ลดลง 2) การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์ความพรุนและดัชนีเลขยกกำลังจะทำให้ตำแหน่งของแกนสะเทินเลื่อนสูงขึ้น อีกทั้งยังทำให้ความแข็งแกร่งการดัดมีค่าที่ลดลงส่งผลให้คานเกิดการโก่งตัวที่เพิ่มขึ้น 3) ลักษณะการกระจายของความเค้นตามแนวแกน x บนหน้าตัดจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความพรุนและดัชนีเลขยกกำลัง 4) ฐานรากยืดหยุ่นมีอิทธิพลต่อคานที่มีความพรุนสูงมากกว่าคานที่มีความพรุนต่ำ

คำสำคัญ: วัสดุเชิงประกอบแบบ FGMs, คานเชิงประกอบแบบ FG, วัสดุรูพรุน, พฤติกรรมการดัด, ฐานรากยืดหยุ่น

Abstract

The objective of this paper is to propose the analytical model to study the bending behavior of functionally graded (FG) beam with including effect of porosity on elastic foundation. The distribution of modulus of elasticity of beam through the thickness is defined by using the power law distribution and also considering the influence of porosity. The Euler-Bernoulli beam theory is employed to describe the bending behavior of beam. The governing equation of the problem is established by applying the principle of virtual work. The solution of problem is obtained by using the analytical method. The validation of the solution is evaluated by comparing the obtained results with those from the Galerkin Finite Element

Method solutions. The results reveal that: 1) an increase in the porous coefficient leads to a decrease of the modulus of elasticity; 2) an increase in the porous coefficient and the power index results the neutral axis move up and it reduces the bending stiffness which lead to an increase in the deflection; 3) the characteristic distributions of the stresses in x direction depend on the values of the porous coefficient and the power index; 4) the influences of the elastic foundation have more effect on the beam with higher porosity than those with lower porosity.

Keywords: Functionally Graded Materials, Functionally Graded Beam, Porous Materials, Bending Behavior, Elastic Foundation

1. บทนำ

วัสดุเชิงประกอบแบบ FGMs (Functionally Graded Materials, FGMs) เป็นวัสดุชนิดหนึ่งของวัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials) ที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอย่างต่อเนื่องตามทิศทางที่กำหนด (เช่น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น หรือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวจากความร้อน เป็นต้น) ซึ่งตรงข้ามกับวัสดุเชิงประกอบแบบแซนด์วิชหรือลามิเนต (Sandwich/Laminated Composite Materials) เพราะวัสดุประเภทนี้มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอย่างกะทันหันบริเวณผิวสัมผัสของวัสดุในแต่ละชนิดและเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากระทำหรือมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะทำให้เกิดความเข้มของความเค้น (Stress Concentrations) และความไม่ต่อเนื่องของความเค้นขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาการแยกชั้นและการลื่นไถลบริเวณผิวสัมผัส (Delamination and Slipping) [1],[2]

นอกจากนี้ วัสดุเชิงประกอบแบบ FGMs ยังมีคุณสมบัติโดดเด่นอีกหลายด้าน เช่น มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบาและมีความต้านทานความร้อนสูง เป็นต้น ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงทำให้วัสดุเชิงประกอบแบบ FGMs ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในหลากหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นวิศวกรรมการบิน วิศวกรรมยานยนต์ วิศวกรรมไฟฟ้า ชีวการแพทย์และอื่นๆ [3] อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการผลิตพบว่าจะเกิดรูพรุนขึ้น โดยลักษณะการกระจายของรูพรุนนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้และวิธีการผลิต ยกตัวอย่างเช่น Zhu et al. [4] ได้สร้างวัสดุเชิงประกอบแบบ FGMs จากเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) และนิโครม (NiCr) ด้วยวิธี Powder Metallurgy และพบว่ารูพรุนเกิดขึ้นในกระบวนการเผา (Sintering) เนื่องจากอุณหภูมิการแข็งตัว (Solidification Temperatures) ของแต่ละองค์ประกอบในวัสดุมีค่าแตกต่างกัน โดยพบว่ารู

พรุนมีลักษณะการกระจายแบบไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้งานวิจัยของ Wattanasakulpong et al. [5] ได้ใช้วิธี A multistep sequential infiltration technique ในการสร้างคานเชิงประกอบแบบ FG จากอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และอีพ็อกซี (Epoxy) จากการเตรียมตัวอย่างคานพบว่าคานเกิดรูพรุนบริเวณตรงกลางมากกว่าบริเวณอื่นๆ เนื่องจากในกระบวนการแทรกเข้าไปของอีพ็อกซีเป็นไปอย่างไม่สมบูรณ์ ดังนั้น จึงต้องพิจารณาถึงผลกระทบของรูพรุนเพื่อให้การใช้งานมีความปลอดภัยและเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับคานที่ทำจากวัสดุเชิงประกอบแบบ FGMs ซึ่งเรียกว่า “คานเชิงประกอบแบบ FG (Functionally Graded Beam)” เป็นโครงสร้างที่สำคัญทางวิศวกรรมและสามารถพบได้ในหลากหลายอุปกรณ์ เช่น ตัวกระตุ้น/เซ็นเซอร์ (Actuators/Sensors) [6] ใบพัดกังหัน (Turbine Blades) [7] และแขนหุ่นยนต์ (Robot Arms) [8] เป็นต้น อีกทั้งยังพบว่า คานเชิงประกอบแบบ FG ได้มีการประยุกต์ใช้งานด้วยการวางหรือฝังไว้ในฐานรากยึดหุ่นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มเสถียรภาพให้แก่คาน [9] การเพิ่มขนาดของน้ำหนักบรรทุกวิกฤต [10] หรือการเพิ่มความแข็งแรงให้ระบบโครงสร้าง [11] เป็นต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการศึกษาพฤติกรรมของคานเชิงประกอบแบบ FG ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากนักวิชาการ ยกตัวอย่างเช่น Fouda et al. [12] ทำการศึกษาพฤติกรรมการคด การสั่นสะเทือนและการโก่งเดาะของคานเชิงประกอบแบบ FG ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการศึกษาพบว่าเมื่อดัชนีเลขยกกำลัง (Power Index) และความพรุนมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้คานเกิดการโก่งตัวที่เพิ่มขึ้น ส่วนน้ำหนักบรรทุกวิกฤตและความถี่ธรรมชาติจะมีค่าที่ลดลง Gao et al. [13] นำเสนอวิธี Hybrid Chebyshev Surrogate Model with Discrete Singular Method เพื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของคานเชิงประกอบแบบ

FG ที่มีคุณสมบัติวัสดุที่ไม่แน่นอน จากการศึกษาพบว่าความไม่แน่นอนของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของคานามากที่สุด Fouaidi et al. [14] ได้ศึกษาการตัดแบบไม่เชิงเส้นของคานาเชิงประกอบแบบ FG โดยใช้ทฤษฎีแรงเฉือนอันดับหนึ่ง (First-Order Shear Deformation Theory) สำหรับจำลองพฤติกรรมของคานาและได้ศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองต่อพฤติกรรมการตัดแบบไม่เชิงเส้นของคานา Phuong et al. [15] วิเคราะห์การตัดของคานาเชิงประกอบแบบ FG วางบนฐานรากยืดหยุ่น โดยใช้ทฤษฎีคานาของ Timoshenko ในการอธิบายพฤติกรรมของคานาและใช้วิธีนาเวียร์ (Navier Solution) ในการหาคำตอบของปัญหา Penna and Feo [16] ศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นของคานาเชิงประกอบแบบ FG ขนาดนาโนวางบนฐานรากแบบ Winkler และใช้วิธีกาลูร์กินในการหาคำตอบจากการวิเคราะห์พบว่าค่าการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงของฐานรากและค่าการโก่งตัวเริ่มต้นทำให้อัตราส่วนความถี่แบบไม่เชิงเส้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย Nguyen et al. [17] ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งเดาะ การตัดและการสั่นสะเทือนของคานาเชิงประกอบแบบ FG ด้วยการใช้อธิบายทฤษฎีแรงเฉือนแบบสองตัวแปรอย่างง่าย (A Simple Two-Variable Shear Deformation Theory) และได้อธิบายถึงผลกระทบของรูพรุน ลักษณะการกระจายคุณสมบัติของวัสดุและความเครียดเนื่องต่อค่าของความถี่ธรรมชาติ น้ำหนักบรรทุกวิกฤต การโก่งตัวของคานาและความถี่ที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่นๆ ที่ทำการศึกษาพฤติกรรมของคานาเชิงประกอบแบบ FG อีกจำนวนมากซึ่งสามารถศึกษาได้จากงานของ Boggarapu et al. [18]

แม้ว่าม้งานวิจัยจำนวนมากที่ทำการศึกษาพฤติกรรมของคานาเชิงประกอบแบบ FG แต่พบว่ายังไม่มีการนำเสนอแบบจำลองที่กำหนดให้ลักษณะการกระจายของรูพรุนเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ (Uneven Distribution) และแบบ SCED (Symmetrical Center Enhanced Distribution, SCED) ร่วมกับการใช้ทฤษฎีคานาของออยเลอร์-เบอร์นูลลี (Euler-Bernoulli Beam Theory) ในอธิบายพฤติกรรมของคานาวางบนฐานรากยืดหยุ่น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ

นำเสนอแบบจำลองของคานาเชิงประกอบแบบ FG วางบนฐานรากยืดหยุ่นและพิจารณาถึงผลกระทบจากรูพรุนของวัสดุที่มีลักษณะการกระจายแบบไม่สม่ำเสมอและแบบ SCED อย่างไรก็ดีตาม ในการประยุกต์ใช้แบบจำลองการกระจายของรูพรุนตามที่เสนอนี้จำเป็นต้องที่จะต้องปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองให้มีความสอดคล้องกับผลการตรวจวัดจากตัวอย่างจริง เนื่องจากการกระจายตัวของรูพรุนมีค่าที่ไม่แน่นอนซึ่งจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้และวิธีการผลิต จากนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาคำตอบเชิงวิเคราะห์และเปรียบเทียบคำตอบที่ได้กับวิธีกาลูร์กินไฟไนต์เอลิเมนต์ (Galerkin Finite Element Method) เพื่อยืนยันความถูกต้องของคำตอบ ซึ่งวิธีกาลูร์กินไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นเป็นวิธีหนึ่งของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals) โดยจะกำหนดให้ฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting Function) มีฟังก์ชันเป็นฟังก์ชันรูปร่าง (Shape Function) และเป็นวิธีที่สะดวกสำหรับปัญหาที่เขียนอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้อธิบายอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองต่อพฤติกรรมการตัดของคานา

2. ทฤษฎีและสมการควบคุมของปัญหา

2.1.แบบจำลองของวัสดุ

งานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคานามีการเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเป็นไปตามกฎกำลัง (Power Law Distribution) อีกทั้งยังพิจารณาถึงอิทธิพลของรูพรุนจากการวิจัยของ Wattanasakulpong et al. [5] ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการกระจายตามกฎกำลังมีความสอดคล้องกับผลการตรวจวัดตัวอย่างคานาเชิงประกอบแบบ FG ที่ทำจากอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และอีพ็อกซี (Epoxy) ด้วยการปรับค่าดัชนีเลขยกกำลังให้เหมาะสม โดยแบบจำลองการกระจายตามกฎกำลังที่พิจารณาผลของรูพรุนสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1) [19]

$$E(z) = E_b + (E_t - E_b) \left(\frac{2z+h}{2h} \right)^p - \phi(z) \quad (1)$$

เมื่อ E_t คือโมดูลัสยืดหยุ่นที่ผิวบนของคานา

E_b คือ โมดูลัสยืดหยุ่นที่ผิวล่างของคาน

h คือ ความหนาของคาน

p คือ ดัชนีเลขยกกำลัง

$\Phi(z)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายของรูปพรุน

ลักษณะการกระจายของรูปพรุนที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้มี 2 แบบ ได้แก่ 1) การกระจายแบบไม่สม่ำเสมอ และ 2) แบบ SCED ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

1) การกระจายแบบไม่สม่ำเสมอ [16]

$$\Phi(z) = \frac{e_0}{2} (E_t + E_b) \left(1 - \frac{2|z|}{h}\right) \quad (2)$$

2) การกระจายแบบ SCED [19]

$$\Phi(z) = \frac{e_0}{2} \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) \left(E_b + (E_t - E_b) \left(\frac{2z+h}{2h}\right)^p\right) \quad (3)$$

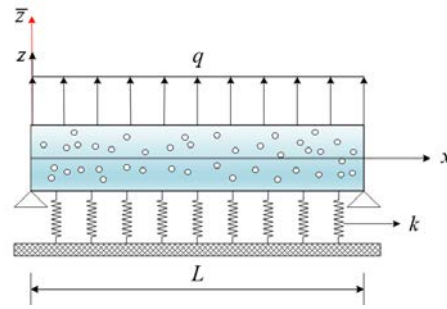
เมื่อ e_0 คือ สัมประสิทธิ์ความพรุนและหากคานไม่มีรูปพรุนค่าของ e_0 จะมีค่าเป็นศูนย์

2.2. สมการควบคุมของคานวางบนฐานรากยืดหยุ่น

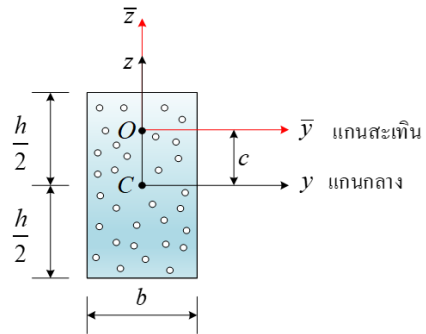
พิจารณาคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมซึ่งมีความกว้าง b หนา h โดยมีขนาดหน้าตัดสม่ำเสมอตลอดความยาว L วางบนฐานรากยืดหยุ่นที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ k และมีน้ำหนักบรรทุกแบบสม่ำเสมอ q กระทำต่อคาน จากนั้นกำหนดให้แกน y วางตำแหน่งตรงกลางของหน้าตัดและแกน $\bar{y}$ วางบนแกนสะเทิน ซึ่งทั้งสองแกนมีระยะห่างเท่ากับ c แสดงดังรูปที่ 1 สำหรับพฤติกรรมการคดของคานได้กำหนดให้เป็นไปตามทฤษฎีคานของออยเลอร์-เบอร์นูลลี ซึ่งมีสมมุติฐานที่สำคัญคือ ระบายที่ตั้งฉากกับผิวสะเทินก่อนคานเกิดการโก่งตัวยังคงตั้งฉากเช่นเดิมเมื่อคานมีการโก่งตัวและสามารถแสดงการเคลื่อนที่ของตำแหน่งใดๆ บนหน้าตัดคานในแนวแกน x ได้ดังสมการที่ (4)

$$u = \bar{z} \frac{dw}{dx} \quad (4)$$

เมื่อ w คือ ระยะโก่งตัวของคาน



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 คานเชิงประกอบแบบ FG วางบนฐานรากยืดหยุ่นและหน้าตัดคาน (ก) คานเชิงประกอบแบบ FG วางบนฐานรากยืดหยุ่น (ข) หน้าตัดคาน

จากสมการที่ (4) สามารถแสดงค่าความเครียดตามแนวแกน x ได้ดังสมการที่ (5)

$$\varepsilon_x = \bar{z} \frac{d^2w}{dx^2} \quad (5)$$

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างแกน $\bar{z}$ กับ z มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6)

$$\bar{z} = z - c \quad (6)$$

จากนั้นแทนสมการที่ (6) ลงในสมการที่ (5) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7)

$$\varepsilon_x = (z - c) \frac{d^2w}{dx^2} \quad (7)$$

สมมุติให้พฤติกรรมของวัสดุเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Material) ดังนั้น ความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (8)

$$\sigma_x = E(z)\varepsilon_x \quad (8)$$

ในการสร้างสมการควบคุมของปัญหาสามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้หลักการของงานเสมือน (Principle of Virtual Work) และแสดงได้ดังสมการที่ (9)

$$\delta U_B + \delta U_F + \delta V = 0 \quad (9)$$

เมื่อ δU_B , δU_F และ δV คือพลังงานความเครียดเสมือนของคานเนื่องจากการดัด พลังงานความเครียดเสมือนที่สะสมในฐานรากยึดหยุ่นและงานเสมือนเนื่องจากแรงภายนอกกระทำ ตามลำดับ

โดยพลังงานความเครียดเสมือนของคานเนื่องจากการดัดสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (10)

$$\delta U_B = \int_V \sigma_x \delta \varepsilon_x dV \quad (10)$$

ส่วนพลังงานความเครียดเสมือนที่สะสมในฐานรากยึดหยุ่นมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (11)

$$\delta U_F = \int_0^L k w \delta w dx \quad (11)$$

ในขณะที่งานเสมือนเนื่องจากแรงภายนอกกระทำแสดงได้ดังสมการที่ (12)

$$\delta V = - \int_0^L q \delta w dx \quad (12)$$

แทนสมการที่ (10)–(12) ลงในสมการที่ (9) ร่วมกับการใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ (7) และ (8) จากนั้นทำการอินทิเกรตแยกส่วน (Integration by Part) จะได้สมการควบคุมของปัญหาดังสมการที่ (13)

$$\frac{d^2 M}{dx^2} + k w = q \quad (13)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตดังสมการที่ (14) และ (15)

$$w = 0 \text{ หรือ } Q = 0 \text{ ที่ตำแหน่ง } x = 0, x = L \quad (14)$$

$$\frac{dw}{dx} = 0 \text{ หรือ } M = 0 \text{ ที่ตำแหน่ง } x = 0, x = L \quad (15)$$

โดยที่ Q และ M คือแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (16) และ (17) ตามลำดับ

$$Q = D \frac{d^3 w}{dx^3} \quad (16)$$

$$M = D \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (17)$$

เมื่อ $D = \int_A (z - c)^2 E(z) dA$ คือค่าความแข็งแกร่งการดัดของคาน (Bending Stiffness)

สุดท้ายแทนสมการที่ (17) ลงในสมการที่ (13) จะได้สมการควบคุมของปัญหาที่อยู่ในรูปของระยะโก่งตัว w ได้ดังสมการที่ (18)

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} + k w = q \quad (18)$$

สำหรับการหาระยะ c สามารถหาได้จากผลรวมของแรงภายในตามแนวแกน x มีค่าเป็นศูนย์ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (19)

$$\int_A \sigma_x dA = 0 \quad (19)$$

จากนั้นแทนสมการที่ (8) ลงในสมการที่ (19) และใช้ความสัมพันธ์ของความเครียดจากสมการที่ (7) ทำให้สามารถคำนวณระยะ c ได้ดังสมการที่ (20)

$$c = \frac{\int_{-h/2}^{h/2} z E(z) dz}{\int_{-h/2}^{h/2} E(z) dz} \quad (20)$$

3. การหาคำตอบเชิงวิเคราะห์

ในการหาคำตอบเชิงวิเคราะห์จะเริ่มต้นด้วยการเขียนตัวแปรต่างๆ ให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติเพื่อให้สมการต่างๆ อยู่ในรูปอย่างกระชับและสะดวกในการหาคำตอบซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (21)

$$\bar{w} = \frac{w}{L}, \bar{x} = \frac{x}{L}, \eta = \frac{kL^4}{D}, \bar{q} = \frac{qL^3}{D} \quad (21)$$

จากสมการที่ (21) สามารถเขียนสมการควบคุมของปัญหา (18) ใหม่ให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติได้ดังสมการที่ (22)

$$\frac{d^4 \bar{w}}{d\bar{x}^4} + \eta \bar{w} = \bar{q} \quad (22)$$

ส่วนค่าแรงเฉือนและโมเมนต์คัตสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (23) และ (24) ตามลำดับ

$$Q = \frac{D}{L^2} \frac{d^3 \bar{w}}{d\bar{x}^3} \quad (23)$$

$$M = \frac{D}{L} \frac{d^2 \bar{w}}{d\bar{x}^2} \quad (24)$$

คำตอบเชิงวิเคราะห์ของสมการที่ (22) เป็นผลรวมของคำตอบแบบเติมเต็ม (Complementary Solution) กับคำตอบแบบเฉพาะ (Particular Solution) และสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (25)

$$\bar{w} = e^{\xi \bar{x}} [C_1 \cos(\xi \bar{x}) + C_2 \sin(\xi \bar{x})] + e^{-\xi \bar{x}} [C_3 \cos(\xi \bar{x}) + C_4 \sin(\xi \bar{x})] + \frac{\bar{q}}{\eta} \quad (25)$$

เมื่อ $\xi = \frac{4}{\sqrt{2}}$ ส่วนค่าคงที่ C_1, C_2, C_3 และ C_4 หาได้จากเงื่อนไขขอบเขตที่ตำแหน่ง $\bar{x} = 0$ และ $\bar{x} = 1$ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.คานอย่างง่าย (Simple Beam)

เงื่อนไขขอบเขตของคานอย่างง่ายคือ $\bar{w}(0) = M(0) = 0$ และ $\bar{w}(1) = M(1) = 0$ แทนเงื่อนไขลงในสมการที่ (23) และ (25) จะได้ค่าคงที่ดังสมการที่ (26)–(29)

$$C_1 = - \left[\frac{e^{\xi} \cos(\xi) + 1}{2e^{\xi} \cos(\xi) + e^{2\xi} + 1} \right] \frac{\bar{q}}{\eta} \quad (26)$$

$$C_2 = - \left[\frac{e^{\xi} \sin(\xi)}{2e^{\xi} \cos(\xi) + e^{2\xi} + 1} \right] \frac{\bar{q}}{\eta} \quad (27)$$

$$C_3 = - \left[\frac{e^{\xi} \cos(\xi) + e^{2\xi}}{2e^{\xi} \cos(\xi) + e^{2\xi} + 1} \right] \frac{\bar{q}}{\eta} \quad (28)$$

$$C_4 = - \left[\frac{e^{\xi} \sin(\xi)}{2e^{\xi} \cos(\xi) + e^{2\xi} + 1} \right] \frac{\bar{q}}{\eta} \quad (29)$$

3.2.คานปลายยื่น (Cantilever Beam)

สำหรับคานปลายยื่นจะมีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้ $\bar{w}(0) = \frac{d\bar{w}}{d\bar{x}} = 0$ และ $Q(1) = M(1) = 0$ จากเงื่อนไขดังกล่าวจะได้ค่าคงที่ดังสมการที่ (30)–(33)

$$C_1 = - \left(\frac{2e^{2\xi} \cos^2(\xi) - 2e^{2\xi} \sin(\xi) \cos(\xi)}{+e^{2\xi} + 1} \right) \frac{\bar{q}}{\eta} \quad (30)$$

$$C_2 = - \left(\frac{2e^{2\xi} \cos^2(\xi) + 2e^{2\xi} \sin(\xi) \cos(\xi)}{-e^{2\xi} - 1} \right) \frac{\bar{q}}{\eta} \quad (31)$$

$$C_3 = - \left(\frac{2e^{2\xi} \cos^2(\xi) + 2e^{2\xi} \sin(\xi) \cos(\xi)}{+e^{4\xi} + e^{2\xi}} \right) \frac{\bar{q}}{\eta} \quad (32)$$

$$C_4 = - \left(\frac{-2e^{2\xi} \cos^2(\xi) + 2e^{2\xi} \sin(\xi) \cos(\xi)}{+e^{4\xi} + e^{2\xi}} \right) \frac{\bar{q}}{\eta} \quad (33)$$

3.3.คานปลายยึดแน่น (Fixed End Beam)

คานแบบยึดแน่นมีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้ $\bar{w}(0) = \frac{d\bar{w}}{d\bar{x}} = 0$ และ $\bar{w}(1) = \frac{d\bar{w}}{d\bar{x}}(1) = 0$ จากเงื่อนไขทำให้ได้ค่าคงที่ดังสมการที่ (34)–(37)

$$C_1 = - \left(\frac{2e^{2\xi} \cos^2(\xi) - 2e^{2\xi} \sin(\xi) \cos(\xi)}{+e^{3\xi} \cos(\xi) + e^{3\xi} \sin(\xi)} \right) \frac{\bar{q}}{\eta} \quad (34)$$

$$C_2 = - \left(\frac{2e^{2\xi} \cos^2(\xi) + 2e^{2\xi} \sin(\xi) \cos(\xi)}{-e^{2\xi} - e^{3\xi} \cos(\xi) + e^{3\xi} \sin(\xi)} \right) \frac{\bar{q}}{\eta} \quad (35)$$

$$C_3 = - \left(\frac{2e^{2\xi} \cos^2(\xi) + 2e^{2\xi} \sin(\xi) \cos(\xi)}{+e^{4\xi} - e^{3\xi} \cos(\xi) - e^{3\xi} \sin(\xi)} \right) \frac{\bar{q}}{\eta} \quad (36)$$

$$C_4 = - \left(\frac{2e^{2\xi} \cos^2(\xi) - 2e^{2\xi} \sin(\xi) \cos(\xi)}{-e^{4\xi} + e^{3\xi} \cos(\xi) + 3e^{3\xi} \sin(\xi)} \right) \frac{\bar{q}}{\eta} \quad (37)$$

3.4.คานยื่นปลายหมุน (Propped Cantilever Beam)

คานปลายยื่นปลายหมุนมีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้ $\bar{w}(0) = \frac{d\bar{w}}{d\bar{x}} = 0$ และ $\bar{w}(1) = M(1) = 0$ ซึ่งทำให้ได้ค่าคงที่ดังสมการที่ (38)–(41)

$$C_1 = - \left(\frac{2e^{2\xi} \cos^2(\xi) + 2e^{2\xi} \sin(\xi) \cos(\xi)}{-e^{3\xi} \cos(\xi) - e^{\xi} \cos(\xi) - e^{2\xi} + 1} \right) \frac{\bar{q}}{\eta} \quad (38)$$

$$C_2 = - \left(\frac{2e^{2\xi} \cos^2(\xi) - 2e^{2\xi} \sin(\xi) \cos(\xi)}{+e^{3\xi} \sin(\xi) - 2e^{\xi} \cos(\xi)} \right) \frac{\bar{q}}{\eta} \quad (39)$$

$$C_3 = - \left(\frac{2e^{2\xi} \cos^2(\xi) - 2e^{2\xi} \sin(\xi) \cos(\xi)}{-e^{3\xi} \cos(\xi) - e^{\xi} \cos(\xi) + e^{4\xi} - e^{2\xi}} \right) \frac{\bar{q}}{\eta} \quad (40)$$

$$C_4 = - \left(\frac{2e^{2\xi} \cos^2(\xi) + 2e^{2\xi} \sin(\xi) \cos(\xi)}{-2e^{3\xi} \cos(\xi) - e^{3\xi} \sin(\xi) - e^{\xi} \sin(\xi)} \right) \frac{\bar{q}}{\eta} \quad (41)$$

4. การหาคำตอบด้วยวิธีกัลเลอร์กินไฟไนต์เอลิเมนต์

วัตถุประสงค์ในการพัฒนาวิธีกัลเลอร์กินไฟไนต์เอลิเมนต์ก็เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบเชิงวิเคราะห์ที่ได้ทำการสร้างขึ้นมาก่อนหน้านี้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เริ่มต้นทำการคูณฟังก์ชันน้ำหนักเข้ากับสมการที่ (18) จากนั้นทำการอินทิเกรตตลอดความยาวคานและกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (42)

$$\int_0^L \left(D \frac{d^4 w}{dx^4} + kw - q \right) \bar{v} dx = 0 \quad (42)$$

เมื่อ $\bar{v}$ คือฟังก์ชันน้ำหนัก ต่อมาทำการอินทิเกรตแยกส่วนสมการที่ (42) จนกระทั่งได้ดังสมการที่ (43)

$$D \int_0^L \frac{d^2 w}{dx^2} \frac{d^2 \bar{v}}{dx^2} dx + k \int_0^L w \bar{v} dx - q \int_0^L \bar{v} dx + \left(Q \bar{v} + M \frac{d\bar{v}}{dx} \right) \Big|_0^L = 0 \quad (43)$$

ทำการแบ่งคานออกเป็นชิ้นส่วนย่อย (Element) จำนวน N_E ชิ้น และกำหนดให้แต่ละชิ้นส่วนประกอบด้วยจุดต่อ (Node) จำนวน 2 จุด โดยแต่ละจุดต่อมีดีกรีความอิสระเท่ากับ 2 ได้แก่ 1) การเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง w_i และ 2) มุมหมุน $\theta_i = dw_i/dx$ ($i = 1, 2$) แสดงดังรูปที่ 2 จากนั้นทำการประมาณระยะการโก่งตัวในแต่ละชิ้นส่วนย่อยจากการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและมุมหมุนของจุดต่อทั้งสองข้างซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (44)

$$w = [N]\{d\} \quad (44)$$

เมื่อ $\{d\} = [w_1 \ \theta_1 \ w_2 \ \theta_2]$ คือเวกเตอร์การเคลื่อนที่ของจุดต่อและ $[N] = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4]$ คือ เมตริกฟังก์ชันรูปร่างโพลีโนเมียลอันดับที่สาม (Cubic Polynomial Shape Function) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (45)–(48)

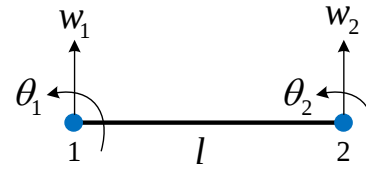
$$N_1 = 1 - 3 \frac{x^2}{l^2} + 2 \frac{x^3}{l^3} \quad (45)$$

$$N_2 = x - 2 \frac{x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2} \quad (46)$$

$$N_3 = 3 \frac{x^2}{l^2} - 2 \frac{x^3}{l^3} \quad (47)$$

$$N_4 = \frac{x^3}{l^2} - \frac{x^2}{l} \quad (48)$$

เมื่อ l คือ ความยาวของชิ้นส่วนย่อย



รูปที่ 2 ลักษณะชิ้นส่วนย่อยของคานและดีกรีความอิสระของจุดต่อ

สำหรับวิธีการจลน์ไฟไนต์เอลิเมนต์จะกำหนดให้ฟังก์ชันน้ำหนักเป็นฟังก์ชันรูปร่าง ($\bar{v}_i = N_i$, $i = 1, 2, 3, 4$) จากนั้นแทนสมการที่ (44) ลงในสมการที่ (43) และแทนฟังก์ชันน้ำหนักด้วยฟังก์ชันรูปร่างซึ่งจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (49)

$$[K]\{\Delta\} = \{F\} \quad (49)$$

เมื่อ $\{\Delta\} = \sum_{i=1}^{N_E} \{d\}$ คือเวกเตอร์การเคลื่อนที่ของจุดต่อ $[K] = \sum_{i=1}^{N_E} [k_e]$ คือเมตริกค่าความแข็งแกร่งของระบบโครงสร้างและ $\{F\} = \sum_{i=1}^{N_E} \{f_e\}$ คือเวกเตอร์ของน้ำหนักบรรทุก โดยที่เมตริก $[k_e]$ และเวกเตอร์ $\{f_e\}$ ของแต่ละชิ้นส่วนย่อยซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (50) และ (51) ตามลำดับ

$$[k_e] = \frac{D}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} + k \begin{bmatrix} \frac{13l}{35} & \frac{11l^2}{210} & \frac{9l}{70} & -\frac{13l^2}{420} \\ \frac{11l^2}{210} & \frac{l^3}{105} & \frac{13l^2}{420} & -\frac{l^3}{140} \\ \frac{9l}{70} & \frac{13l^2}{420} & \frac{13l}{35} & -\frac{11l^2}{210} \\ -\frac{13l^2}{420} & -\frac{l^3}{140} & -\frac{11l^2}{210} & \frac{l^3}{105} \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$\{f_e\} = \frac{q}{12} \begin{Bmatrix} 6l \\ l^2 \\ 6l \\ -l^2 \end{Bmatrix} \quad (51)$$

ในการหาคำตอบทำได้ด้วยการแทนเงื่อนไขขอบเขตลงในสมการที่ (49) และทำการแก้สมการดังกล่าวจนได้เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของจุดต่อ $\{\Delta\}$ จากนั้นสร้างเวกเตอร์ $\{d\}$ จากเวกเตอร์ $\{\Delta\}$ และทำการแทนเวกเตอร์ $\{d\}$ ที่ได้ลงในสมการที่ (44) ก็จะทำให้ได้ระยะการโก่งตัวของคานในแต่ละชิ้นส่วนย่อย

5. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

งานวิจัยนี้จะสมมุติให้คานาทำจากอะลูมิเนียมออกไซด์/อะลูมิเนียม (Al_2O_3/Al) เพื่อศึกษาผลกระทบของรูปพจน์ต่อพฤติกรรมการค้ำตามแบบจำลองที่นำเสนอ โดยวัสดุเชิงประกอบแบบ FGMs ที่ทำขึ้นจากอะลูมิเนียมออกไซด์/อะลูมิเนียมนั้นจะมีความแข็งแรงสูง ด้านทานความร้อนและการกัดกร่อนได้ดี และพบว่ามีประสิทธิภาพใช้งานด้านวิศวกรรมยานยนต์และวิศวกรรมอวกาศ [3],[20],[21] เช่น จานเบรก, ปลูกเครื่องยนต์, พัดลมในเครื่องยนต์และใบพัดกังหันก๊าซ เป็นต้น โดยคุณสมบัติของอะลูมิเนียมออกไซด์และอะลูมิเนียมรวมถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ของคานาที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 1

5.1. ตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบเชิงวิเคราะห์

ก่อนทำการศึกษาพฤติกรรมการค้ำของคานาจะเริ่มต้นด้วยการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากคำตอบเชิงวิเคราะห์กับคำตอบจากวิธีกัลเลอร์กินไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบเชิงวิเคราะห์ที่ได้พัฒนาขึ้นมา โดยขั้นตอนต่างๆ ของวิธีกัลเลอร์กินไฟไนต์เอลิเมนต์ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 4 จะถูกพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งเขียนด้วยโปรแกรม MATLAB สำหรับข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์กำหนดให้เป็นไปตามตารางที่ 1 และให้รูปพจน์การกระจายแบบไม่สม่ำเสมอโดยค่าดัชนีเลขยกกำลัง p และสัมประสิทธิ์ความพูน e_0 มีค่าเท่ากับ 2 และ 0.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติต่างๆ ของคานาเชิงประกอบแบบ FG

คุณสมบัติ	ค่าต่างๆ
โมดูลัสยืดหยุ่นที่ผิวบน E_t (Al_2O_3)	380 GPa
โมดูลัสยืดหยุ่นที่ผิวล่าง E_b (Al)	70 GPa
ความยาวคานา L	5 m
ความกว้างของหน้าตัด b	0.2 m
ความหนาของหน้าตัด h	0.4 m
ค่าความแข็งแรงของฐานรากยึดหยุ่น k	1×10^6 N/m ²
น้ำหนักบรรทุกแบบสม่ำเสมอ q	1×10^4 N/m

สำหรับความถูกต้องของการวิเคราะห์ด้วยวิธีกัลเลอร์กินไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นส่วนย่อย อย่างไร

ก็ตาม หากใช้ชั้นส่วนย่อยที่มีจำนวนมากก็จะทำให้การคำนวณใช้เวลามากขึ้นตามไปด้วย ตารางที่ 2 แสดงระยะการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางของคานาแบบต่างๆ ซึ่งจะเห็นว่าคำตอบที่ได้จากทั้งสองวิธีมีค่าที่สอดคล้องกัน โดยผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีกัลเลอร์กินไฟไนต์เอลิเมนต์จะให้คำตอบที่เท่ากับวิธีเชิงวิเคราะห์เมื่อมีจำนวนชั้นส่วนย่อยตั้งแต่ 8 ชั้นเป็นต้นไป ดังนั้นจากผลดังกล่าวสามารถยืนยันความถูกต้องของคำตอบเชิงวิเคราะห์ที่ได้พัฒนาขึ้นมาและจะนำไปใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการค้ำของคานาต่อไป

5.2. อิทธิพลของรูปพจน์ต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและตำแหน่งของแกนสะเทิน

รูปที่ 3 แสดงลักษณะการกระจายของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตลอดความหนาของหน้าตัดซึ่งคำนวณจากสมการที่ (1) จากรูปจะเห็นว่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ผิวบนและผิวล่างมีค่าเท่ากับ 380 GPa และ 70 GPa ตามลำดับ เนื่องจากที่ตำแหน่งผิวบนมีส่วนประกอบเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) 100% และอะลูมิเนียม (Al) 0% ในทางกลับกันที่ผิวล่างจะมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) 0% และอะลูมิเนียม (Al) 100% นอกจากนี้ยังพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในช่วงระหว่างผิวบนจนถึงผิวล่างมีค่าที่ลดลงเมื่อสัมประสิทธิ์ความพูนมีค่าที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นเพราะสัมประสิทธิ์ความพูนเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงปริมาณความพูนของวัสดุ หากวัสดุที่มีความพูนสูงค่าของสัมประสิทธิ์ความพูนก็จะมีค่าสูงตามไปด้วยซึ่งจะส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าที่ลดลง

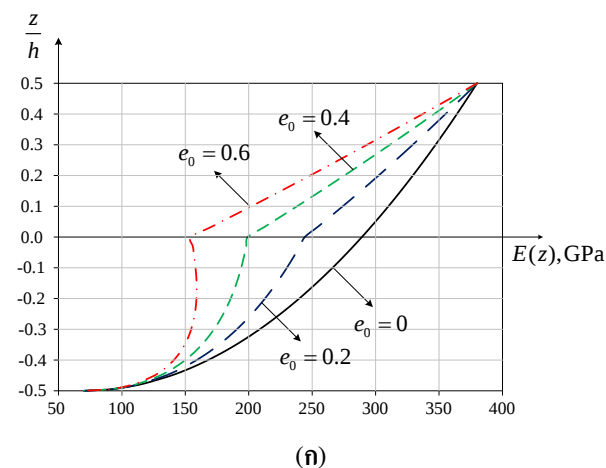
ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบระยะการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลาง ($\bar{x} = 0.5$) ของคานาแบบต่างๆ

วิธีหาคำตอบ	จำนวนชั้นส่วนย่อย	$\bar{w} \times 10^5$	
		1) คานอย่างง่าย	2) คานปลายยื่น
เชิงวิเคราะห์	-	14.7405	36.2882
กัลเลอร์กินไฟไนต์เอลิเมนต์	2	14.7482	36.3014
	4	14.7410	36.2891
	6	14.7406	36.2884
	8	14.7405	36.2882
	10	14.7405	36.2882

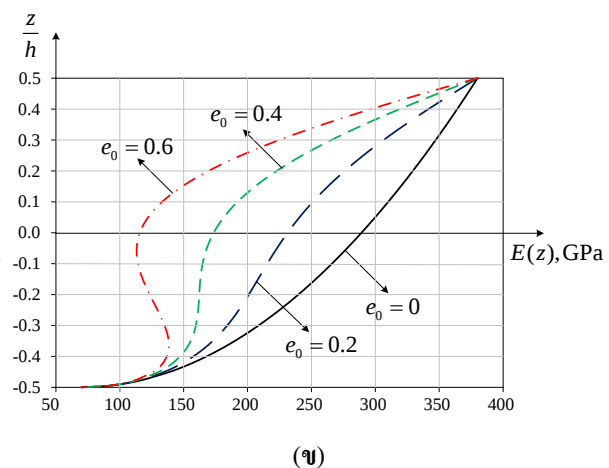
ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบระยะการ โกงตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลาง ($\bar{x} = 0.5$) ของคานแบบต่างๆ (ต่อ)

วิธีหาคำตอบ	จำนวนชั้นส่วนย่อย	$\bar{w} \times 10^5$	
		3) คานปลายยึดแน่น	4) คานยื่นหนุนปลาย
เชิงวิเคราะห์	-	3.0932	6.1065
กาลเออร์กิ้นไฟไนต์เอลิเมนต์	2	3.0948	6.1098
	4	3.0933	6.1067
	6	3.0932	6.1066
	8	3.0932	6.1065
	10	3.0932	6.1065

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความพูนกับตำแหน่งของแกนสะเทิน จากรูปพบว่าเมื่อสัมประสิทธิ์ความ



พูนมีค่าเพิ่มขึ้นตำแหน่งของแกนสะเทินจะเลื่อนสูงขึ้นเนื่องจากตำแหน่งของแกนสะเทินเป็นตำแหน่งที่ขนาดของแรงลัพธ์ในแนวแกน x ที่อยู่เหนือแกนสะเทินมีค่าเท่ากับขนาดของแรงลัพธ์ที่อยู่ใต้แกนสะเทินซึ่งแรงลัพธ์ทั้งสองจะแปรผันโดยตรงกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นบริเวณด้านบนจะมีค่าสูงกว่าบริเวณด้านล่าง จึงทำให้ตำแหน่งของแกนสะเทินเลื่อนขึ้นเพื่อให้ขนาดของแรงลัพธ์ทั้งสองมีค่าที่เท่ากันและเมื่อสัมประสิทธิ์ความพูนมีค่าที่เพิ่มขึ้นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นบริเวณด้านล่างจะมีค่าน้อยกว่าบริเวณด้านบนเพิ่มมากขึ้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ตำแหน่งของแกนสะเทินเลื่อนขึ้นไปมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้พบว่าเมื่อดัชนีเลขยกกำลังมีค่าสูงขึ้นตำแหน่งของแกนสะเทินจะเลื่อนสูงขึ้นตามไปด้วย

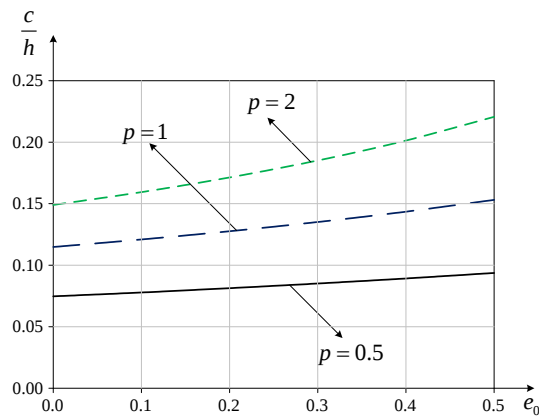


รูปที่ 3 การกระจายของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตลอดความหนาของหน้าตัดเมื่อค่า $p = 0.5$ (ก) การกระจายแบบไม่สม่ำเสมอ (ข) การกระจายแบบ SCED

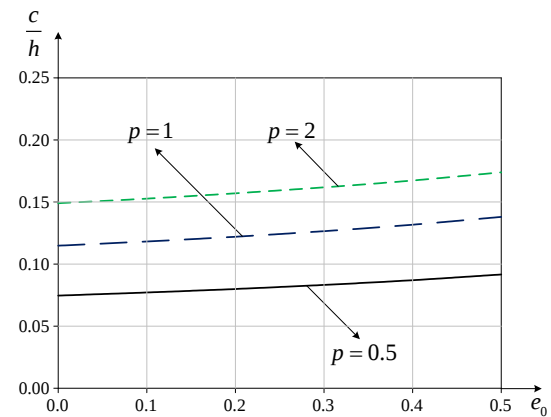
5.3.อิทธิพลของรูปพูนและดัชนีเลขยกกำลังต่อการโก่งตัวของคาน

รูปที่ 5-6 แสดงการโก่งตัวของคานอย่างง่ายและคานปลายยื่น ตามลำดับ เมื่อสัมประสิทธิ์ความพูนมีค่าที่แตกต่างกัน จากรูปทั้งสองพบว่าการ โกงตัวของคานจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความพูนมีค่าที่สูงขึ้น เพราะการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์ความพูนจะทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าที่ลดลงส่งผลให้ความแข็งแกร่งการดัดของคานมีค่าลดลงตามไปด้วย

เพื่อเข้าใจถึงพฤติกรรมนี้มากยิ่งขึ้นจึงได้ทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความพูนกับอัตราส่วนความแข็งแกร่งการดัดของคานซึ่งแสดงดังรูปที่ 7 จากรูปจะเห็นว่าเมื่อสัมประสิทธิ์ความพูนมีค่าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความแข็งแกร่งการดัดของคานมีค่าที่ลดลง นอกจากนี้พบว่าการกระจายของรูปพูนแบบไม่สม่ำเสมอมีอัตราการลดลงที่มากกว่าการกระจายแบบ SCED



(ก)

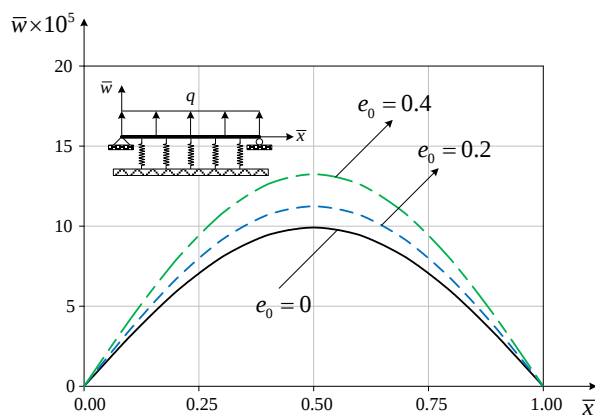


(ข)

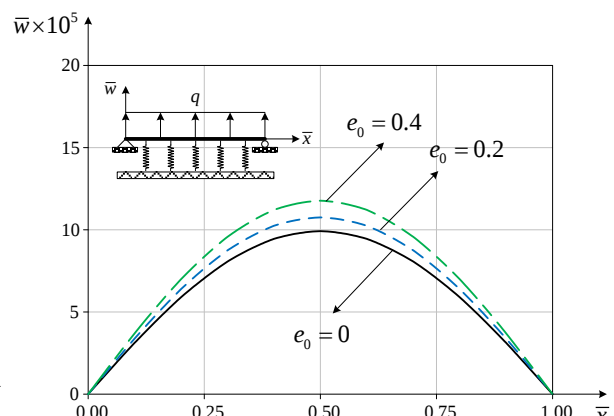
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ความพูนกับตำแหน่งของแกนสะเทิน (ก) การกระจายแบบไม่สม่ำเสมอ (ข) การกระจายแบบ SCED

ต่อมาจะทำการศึกษาอิทธิพลของดัชนีเลขยกกำลังต่อการโก่งตัวของคานซึ่งดัชนีเลขยกกำลังเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดลักษณะการกระจายและขนาดของโมดูลัสยืดหยุ่นรูปที่ 8-9 แสดงการโก่งตัวของคานอย่างง่ายและคานปลายยื่น ตามลำดับเมื่อดัชนีเลขยกกำลังมีค่าที่แตกต่างกัน จากรูปพบว่า การโก่งตัวของคานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อดัชนีเลขยกกำลังมีค่าที่เพิ่มขึ้น เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมดังกล่าวมากยิ่งขึ้นจึงได้ทำ

การสร้างลักษณะการกระจายของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตลอดความหนาของหน้าตัดเมื่อดัชนีเลขยกกำลังมีค่าที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 10 จากรูปจะเห็นว่าเมื่อดัชนีเลขยกกำลังมีค่าที่เพิ่มขึ้น โมดูลัสยืดหยุ่นจะมีค่าที่ลดลง นั่นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ความแข็งแกร่งการดัดของคานมีค่าที่ลดลงและส่งผลให้การโก่งตัวของคานที่มีค่าดัชนีเลขยกกำลังที่สูงมีการโก่งตัวที่มากกว่าคานที่มีค่าดัชนีเลขยกกำลังที่ต่ำ



(ก)



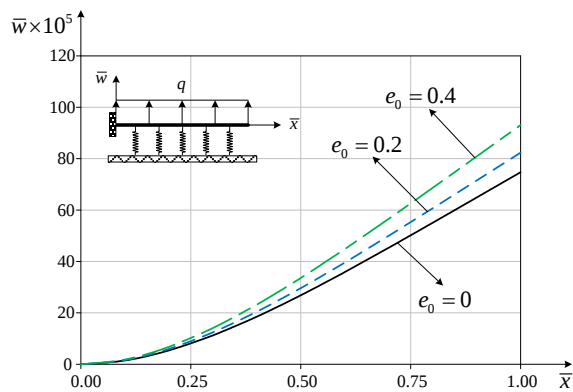
(ข)

รูปที่ 5 การโก่งตัวของคานอย่างง่ายเมื่อสัมประสิทธิ์ความพูนมีค่าที่แตกต่างกันและค่า $p = 2$ (ก) การกระจายแบบไม่สม่ำเสมอ (ข) การกระจายแบบ SCED

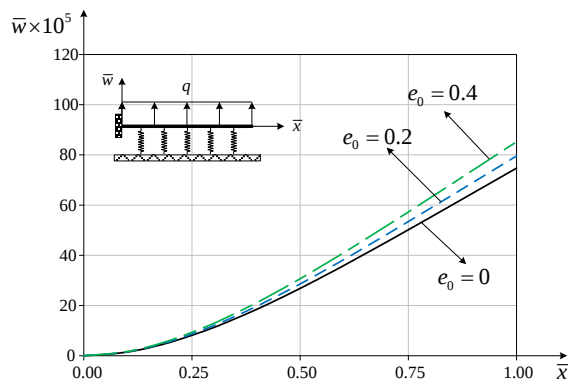
5.4. อิทธิพลของรูพูนและดัชนีเลขยกกำลังต่อการกระจายของความเค้นบนหน้าตัด

เนื้อหาในส่วนนี้จะทำการวิเคราะห์คานอย่างง่ายและสร้างรูปการกระจายของความเค้น σ_x ตลอดความหนาของ

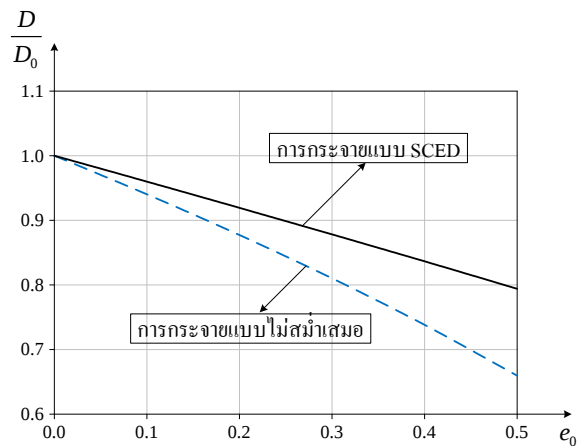
หน้าตัดที่ตำแหน่งตรงกลางคาน เพื่อศึกษาผลกระทบของรูพูนและดัชนีเลขยกกำลังต่อการกระจายของความเค้นบนหน้าตัด



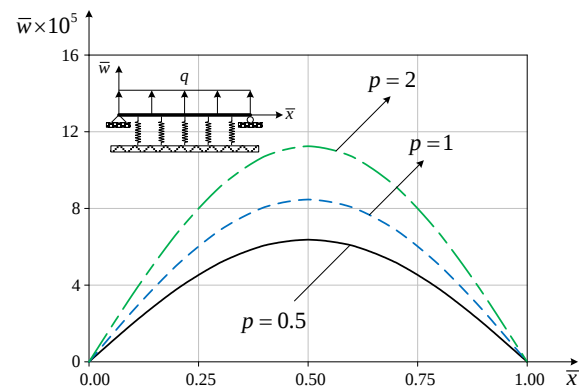
(ก) การกระจายแบบไม่สม่ำเสมอ



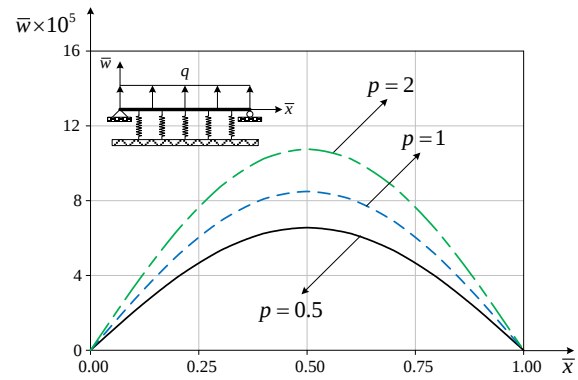
(ข) การกระจายแบบ SCED

รูปที่ 6 การโค้งตัวของคานปลายยื่นเมื่อสัมประสิทธิ์ความพูนมีค่าที่แตกต่างกันและค่า $p = 2$ 

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ความพูนกับอัตราส่วนความแข็งแรงการค้ำของคาน

เมื่อ D_0 คือ ความแข็งแรงการค้ำของคานที่ไม่มีรูปพูน

(ก)

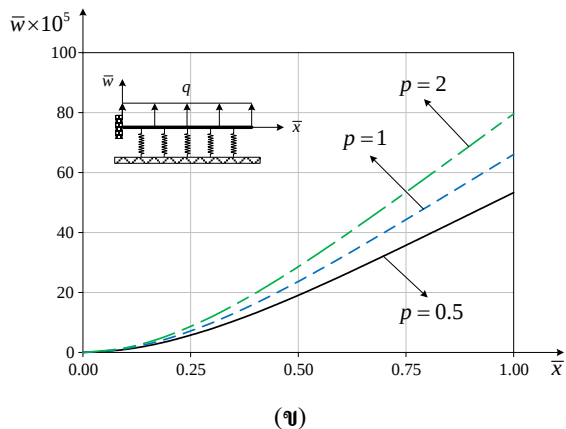
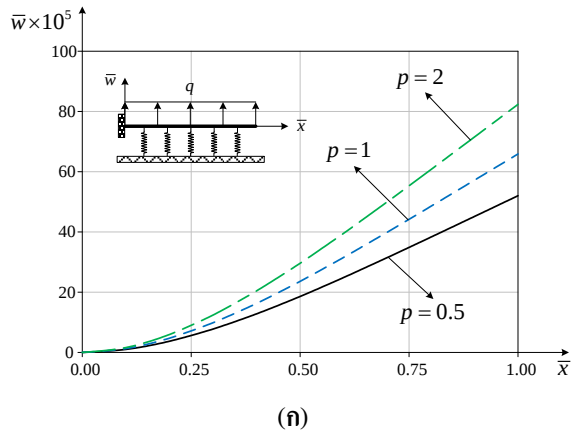


(ข)

รูปที่ 8 การโค้งตัวของคานอย่างง่ายเมื่อดัชนีเลขยกกำลังมีค่าที่แตกต่างกันและค่า $e_0 = 0.2$ (ก) การกระจายแบบไม่สม่ำเสมอ (ข) การกระจายแบบ SCED

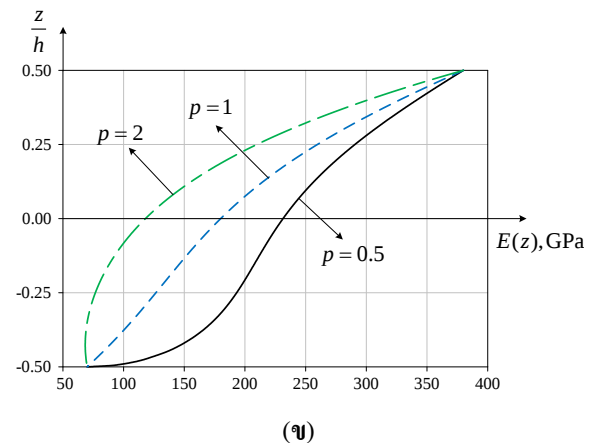
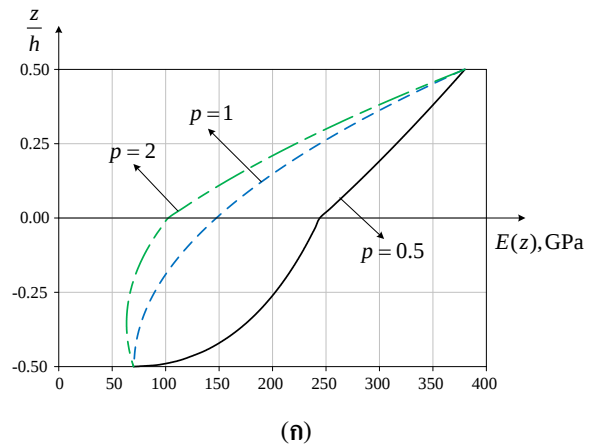
รูปที่ 11 แสดงการกระจายของความเค้น σ_x ตลอดความหนาของหน้าตัดเมื่อสัมประสิทธิ์ความพูนมีค่าที่แตกต่างกัน จากรูปจะเห็นว่าการกระจายของความเค้นดิ่งของการกระจายรูปพูนทั้งสองแบบมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อตำแหน่งนั้นห่างจากแกนสะเทินมากยิ่งขึ้นซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นโค้งและมีค่าสูงสุดที่ผิวบน นอกจากนี้พบว่าค่าสูงสุดจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันแม้สัมประสิทธิ์ความพูนจะมีค่าที่แตกต่างกัน ในทางกลับกันการกระจายของความเค้นอัดจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยการกระจายของรูปพูนแบบไม่สม่ำเสมอพบว่าความเค้นอัดจะมีค่าที่ลดลงเมื่อสัมประสิทธิ์ความพูนมีค่าที่เพิ่มขึ้นและค่าสูงสุดจะเกิดที่ผิวล่าง ส่วนการกระจายความเค้นอัดของการกระจายของรูปพูนแบบ SCED จะมีลักษณะการกระจายที่ใกล้เคียงกันแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความพูนมีค่าที่แตกต่างกันก็ตามและพบว่าค่าสูงสุดจะเกิดที่ผิวล่าง

โดยคานที่มีสัมประสิทธิ์ความพรุนที่มากกว่าจะให้ค่าความเค้นอัดสูงสุดมากกว่าคานที่มีสัมประสิทธิ์ความพรุนที่น้อยกว่าแต่มีค่าแตกต่างกันไม่มาก



รูปที่ 9 การโก่งตัวของคานปลายยื่นเมื่อคานนี้เลขยกกำลังมีค่าที่แตกต่างกันและค่า $e_0 = 0.2$ (ก) การกระจายแบบไม่สม่ำเสมอ (ข) การกระจายแบบ SCED

รูปที่ 12 แสดงการกระจายของความเค้น σ_x ตลอดความหนาของหน้าตัดเมื่อคานนี้เลขยกกำลังมีค่าที่แตกต่างกัน จากรูปพบว่า การกระจายของรูปพหุนามทั้งสองแบบให้ลักษณะการกระจายของความเค้นที่คล้ายกัน โดยความเค้นดึงจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามระยะห่างจากแกนสะเทินและมีค่าสูงสุดที่ผิวบนซึ่งค่าสูงสุดนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อคานนี้เลขยกกำลังมีค่าที่เพิ่มขึ้น ส่วนความเค้นอัดพบว่า มีค่าที่ไม่แน่นอนตามระยะห่างจากแกนสะเทิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อคานนี้เลขยกกำลังมีค่าเท่ากับ 0.5 ความเค้นอัดจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมากที่บริเวณด้านล่างและพบว่าความเค้นอัดสูงสุดนั้นไม่ได้เกิดที่ผิวล่าง



รูปที่ 10 การกระจายของโมดูลัสยืดหยุ่นตลอดความหนาของหน้าตัดเมื่อคานนี้เลขยกกำลังมีค่าที่แตกต่างกันและค่า $e_0 = 0.2$ (ก) การกระจายแบบไม่สม่ำเสมอ (ข) การกระจายแบบ SCED

5.5.อิทธิพลของรูปพหุนามและฐานรากยึดหยุ่นต่อโมเมนต์ดัด

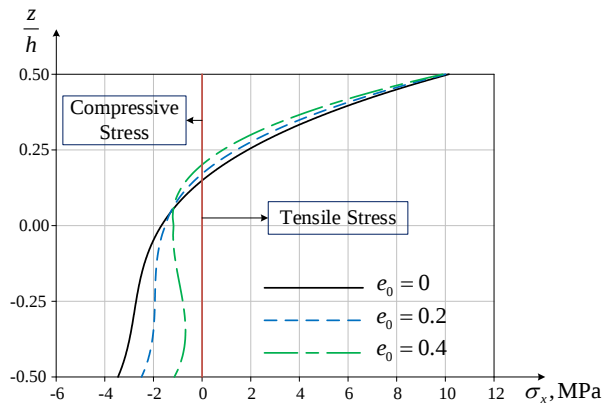
ต่อมาจะทำการวิเคราะห์คานปลายยึดแน่นที่มีค่าความแข็งแรงของฐานรากยึดหยุ่นที่แตกต่างกันและคำนวณหาโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่ง $x = 0$ เพื่อศึกษาผลกระทบของรูปพหุนามและฐานรากยึดหยุ่นต่อโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นโดยผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจะนำเสนอในรูปแบบของอัตราส่วนโมเมนต์ดัด R_M ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (52)

$$R_M = \frac{M}{M_0} \quad (52)$$

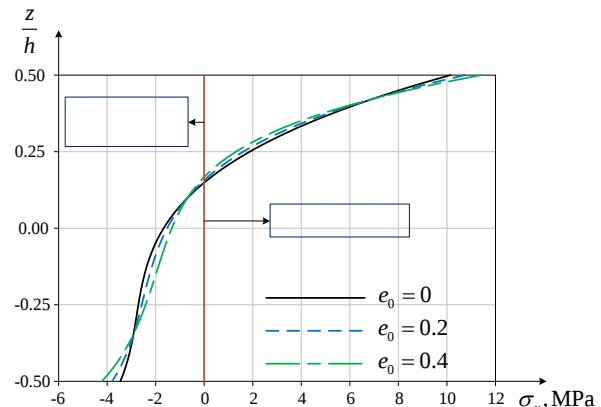
เมื่อ M และ M_0 คือโมเมนต์ดัดของคานที่พิจารณาผลจากรูปพหุนามและไม่พิจารณาผลจากรูปพหุนาม ตามลำดับ

รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมเมนต์ตัดกับความแข็งแรงของฐานรากยึดหุ่นเมื่อสัมประสิทธิ์ความพรมมีค่าที่แตกต่างกัน จากรูปพบว่าอัตราส่วนโมเมนต์ตัดของคานในทุกกรณีมีค่าที่น้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากฐานพรมทำให้โมเมนต์ตัดที่เกิดขึ้นมีค่าที่ลดลง ซึ่งคานที่มีสัมประสิทธิ์ความพรมที่สูงจะเกิดโมเมนต์ตัดที่น้อยกว่าคานที่มีสัมประสิทธิ์ความพรมที่ต่ำ

นอกจากนี้ เมื่อค่าความแข็งแรงของฐานรากยึดหุ่นมีค่าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราส่วนโมเมนต์ตัดมีค่าที่ลดลง โดยคานที่มีสัมประสิทธิ์ความพรมสูงจะมีอัตราการลดลงที่มากกว่าคานที่มีสัมประสิทธิ์ความพรมต่ำ พฤติกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าฐานรากยึดหุ่นมีอิทธิพลต่อคานที่มีความพรมสูงมากกว่าคานที่มีความพรมต่ำ

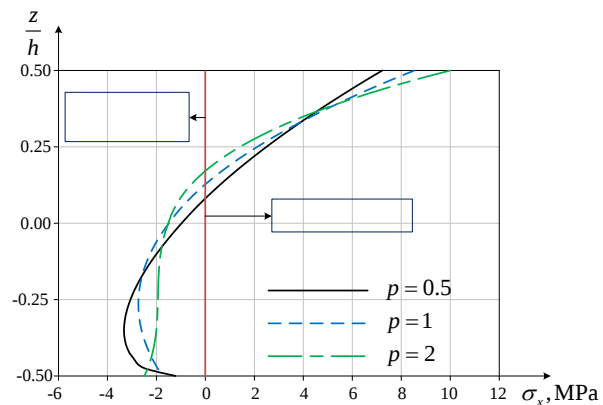


(ก)

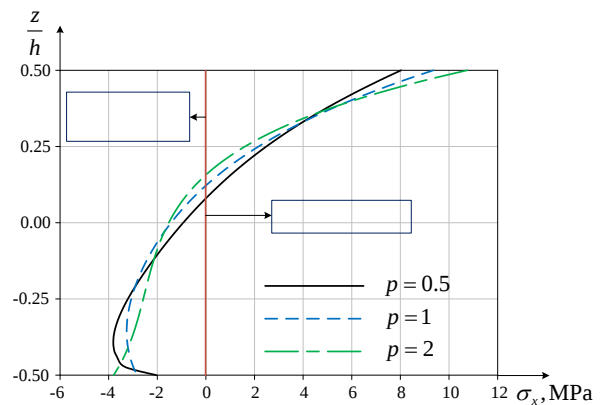


(ข)

รูปที่ 11 การกระจายความเค้น σ_x ตลอดความหนาของหน้าตัดเมื่อสัมประสิทธิ์ความพรมมีค่าที่แตกต่างกันและค่า $p = 2$ (ก) การกระจายแบบไม่สม่ำเสมอ (ข) การกระจายแบบ SCED

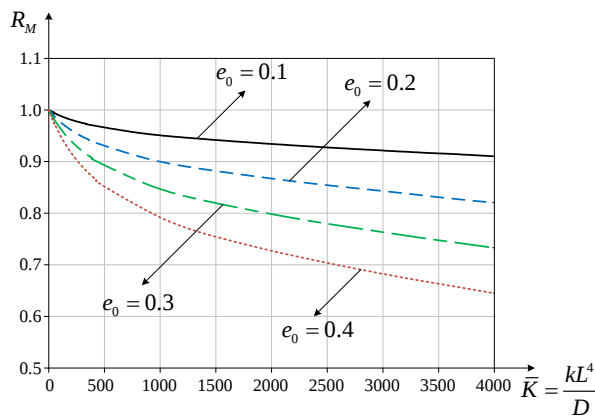


(ก)

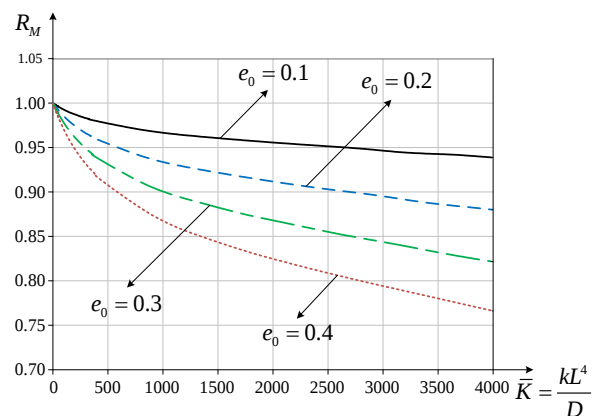


(ข)

รูปที่ 12 การกระจายความเค้น σ_x ตลอดความหนาของหน้าตัดเมื่อดัชนีเลขยกกำลังมีค่าที่แตกต่างกันและค่า $e_0 = 0.2$ (ก) การกระจายแบบไม่สม่ำเสมอ (ข) การกระจายแบบ SCED



(ก)



(ข)

รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมเมนต์คดกับค่าความแข็งแรงของฐานรากยึดหุ่นเมื่อคานามีค่าสัมประสิทธิ์ความพรุนที่ต่างกันและค่า $p = 2$ (ก) การกระจายแบบไม่สม่ำเสมอ (ข) การกระจายแบบ SCED

6. สรุปผลการศึกษา

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับการศึกษาพฤติกรรมการคดของคานาเชิงประกอบแบบ FG วางบนฐานรากยึดหุ่นและพิจารณาผลกระทบจากฐานรากของวัสดุ โดยที่คำตอบของปัญหาได้สร้างขึ้นจากวิธีเชิงวิเคราะห์และได้ทำการเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากวิธีกัลเลอร์คินไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อประเมินความถูกต้องและพบว่าคำตอบทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน จากนั้นทำการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองต่อพฤติกรรมการคดของคานา จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์ความพรุนทำให้โมดูลัสยึดหุ่นมีค่าที่ลดลง
- 2) เมื่อสัมประสิทธิ์ความพรุนและดัชนีเลขยกกำลังมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ตำแหน่งของแกนสะเทินเลื่อนสูงขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ความความแข็งแรงการคดมีค่าที่ลดลงจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้คานามีการโก่งตัวที่เพิ่มขึ้น
- 3) ค่าสัมประสิทธิ์ความพรุนและดัชนีเลขยกกำลังส่งผลกระทบต่อลักษณะการกระจายของความเค้นตามแนวแกน x บนหน้าตัด
- 4) คานาที่มีความพรุนสูงจะได้รับอิทธิพลจากฐานรากยึดหุ่นมากกว่าคานาที่มีความพรุนต่ำ

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยพฤติกรรมการคดของคานาเชิงประกอบแบบ FG ที่พิจารณาผลกระทบของฐานรากวางบนฐานรากยึดหุ่นนี้ ได้รับงบการสนับสนุนจากทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2565 ภายใต้แผนงานวิจัยโครงการการวิจัยและพัฒนาการขับเคลื่อนเศรษฐกิจด้วยนวัตกรรมโดยใช้กระบวนการสะสมศึกษาสำหรับสร้างมูลค่าเชิงรุกบนฐานทุนทรัพยากรและวัฒนธรรมล้านนา สัญญาเลขที่ 2565FF167

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. M. Mahamood and E. T. Akinlabi, "Introduction to Functionally Graded Materials," in *Functionally graded materials*, Cham, Switzerland: Springer, 2017, ch. 1, sec. 1, pp. 1–2.
- [2] I. Elishakoff, D. Pentaras and C. Gentilini, "Introduction to Functionally Graded Materials," in *Mechanics of functionally graded material structures*, Toh Tuck Link, Singapore: World Scientific, 2015, ch. 2, pp. 13–14.
- [3] B. Saleh, J. Jiang, R. Fathi, T. Al-hababi, Q. Xu, L. Wang, D. Song and A. Ma, "30 Years of Functionally Graded Materials: An Overview of Manufacturing Methods, Applications and Future Challenges,"

- Composite Part B*, vol. 201, 2020, Art.no. 108376, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108376.
- [4] J. Zhu, Z. Lai, Z. Yin, J. Jeon and S. Lee, "Fabrication of ZrO₂-NiCr Functionally Graded Material by Powder Metallurgy," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 68, no. 1–3, pp. 130–135, 2001, doi: 10.1016/S0254-0584(00)00355-2.
- [5] N. Wattanasakulpong, B. G. Prusty, D. W. Kelly and M. Hoffman, "Free Vibration Analysis of Layered Functionally Graded Beams with Experimental Validation," *Materials and Design*, vol. 36, pp. 182–190, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.10.049.
- [6] K. E. Harti, M. Rahmoune, M. Sanbi, R. Saadani, M. Bentaleb and M. Rahmoune, "Finite Element Model of Vibration Control for an Exponential Functionally Graded Timoshenko Beam with Distributed Piezoelectric Sensor/Actuator," *actuators*, vol. 8, no. 1, 2019, Art.no. 19, doi: 10.3390/act8010019.
- [7] P. R. Kumar, K. M. Rao and N. M. Rao, "Effect of Taper on Free Vibration of Functionally Graded Rotating Beam by Mori-Tanaka Method," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 100, pp. 729–736, 2019, doi: 10.1007/s40032-018-0477-z.
- [8] R. Singh and P. Sharma, "A Review on Modal Characteristics of FGM Structures," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2148, no. 1, 2019, Art.no. 030037, doi: 10.1063/1.5123959.
- [9] S. C. Mohanty, R. R. Dash and T. Rout, "Parametric Instability of a Functionally Graded Timoshenko Beam on Winkler's Elastic Foundation," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 241, no. 8, pp. 2698–2715, 2011, doi: 10.1016/j.nucengdes.2011.05.040.
- [10] S. C. Mohanty, R. R. Dash and T. Rout, "Static and Dynamic Analysis of a Functionally Graded Timoshenko Beam on Winkler's Elastic Foundation," *Journal of Engineering Research and Studies*, vol. 1, no.2, pp. 149–165, 2010.
- [11] N. D. Nguyen, T. P. Vo and T. -K. Nguyen, "An Improved Shear Deformation Theory for Bending and Buckling Response of Thin-walled FG Sandwich I-beams Resting on the Elastic Foundation," *Composite Structures*, vol. 254, 2020, Art.no. 112823, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112823.
- [12] N. Fouda, T. El-midany and A.M. Sadoun, "Bending, Buckling and Vibration of a Functionally Graded Porous Beam Using Finite Elements," *Journal of Applied and Computational Mechanics*, vol. 3, no. 4, pp. 274–282, 2017, doi: 10.22055/JACM.2017.21924.1121.
- [13] K. Gao, R. Li and J. Yang, "Dynamic Characteristics of Functionally Graded Porous Beams with Interval Material Properties," *Engineering Structures*, vol. 197, 2019, Art.no. 109441, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109441.
- [14] M. Fouaidi, M. Jamal and N. Belouaggadia, "Nonlinear Bending Analysis of Functionally Graded Porous Beams Using the Multiquadric Radial Basis Functions and a Taylor Series-Based Continuation Procedure," *Composite Structures*, vol. 252, 2020, Art.no. 112593, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112593.
- [15] N. T. B. Phuong, T. M. Tu, H. T. Phuong and N. V. Long, "Bending Analysis of Functionally Graded Beam with Porosities Resting on Elastic Foundation Based on Neutral Surface Position," *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 33–45, 2019, doi: 10.31814/stce.nuce2019-13(1)-04.
- [16] R. Penna and L. Feo, "Nonlinear Dynamic Behavior of Porous and Imperfect Bernoulli-Euler Functionally Graded Nanobeams Resting on Winkler Elastic Foundation," *technologies*, vol. 8, no. 4, 2020, Art.no. 56, doi: 10.3390/technologies8040056.
- [17] N. D. Nguyen, T. N. Nguyen, T. K. Nguyen and T. P. Vo, "A new two-variable shear deformation theory for

- bending, free vibration and buckling analysis of functionally graded porous beams,” *Composite Structures*, vol. 282, 2022, Art.no. 115095, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.115095.
- [18] V. Boggarapu, R. Gujjala, S. Ojha, S. Acharya, P.V. Babu, S. Chowdary, D. K. Gara, “State of the Art in Functionally Graded Materials,” *Composite Structures*, vol. 262, 2021, Art.no. 1113596, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.1113596.
- [19] M. Dhuria, N. Grover and K. Goyal, “Influence of Porosity Distribution on Static and Buckling Responses of Porous Functionally Graded Plates,” *Structures*, vol. 34, pp. 1458–1474, 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2021.08.050.
- [20] G. Udupa, S.S. Rao and K.V. Gangadharan, “Functionally Graded Composite Materials: An Overview,” *Procedia Materials Science*, vol. 5, pp. 1291–1299, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.442.
- [21] D. Gayen, R. Tiwari and D. Chakraborty, “Static and Dynamic analyses of Cracked Functionally Graded Structural Components: A Review,” *Composites Part B*, vol. 173, 2019, Art.no. 106982, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.106982.

เครื่องทดสอบแผ่นกรองอัตโนมัติที่ใช้ตัวนับอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95

An Automated Filter Tester Based on an Electrostatic Particle Counter for Testing the Particle Filtration Efficiency of Surgical Masks and N95 Masks

วิสูตร อาสนวิจิตร¹ และ พานิช อินต๊ะ^{1,*}

¹หน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม, วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ป่าป้อง ดอยสะเก็ด เชียงใหม่ 50220

Visut Asanavijit¹ and Panich Intra^{1,*}

¹Research Unit of Applied Electric Field in Engineering, College of Integrated Science and Technology,
Rajamangala University of Technology Lanna, Papong, Doi Saket, Chiangmai, 50220, Thailand

*Corresponding Author E-mail: panich.intra@rmu.l.ac.th

Received: Jan 21, 2022; Revised: Jul 20, 2022; Accepted: Aug 03, 2022

บทคัดย่อ

จุดมุ่งหมายของการศึกษานี้คือการพัฒนาและประเมินเครื่องทดสอบตัวกรองอัตโนมัติโดยอิงจากตัวนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตเพื่อหาค่าการผ่านทะลุหรือประสิทธิภาพของตัวกรองและความดันตกของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ต้นแบบของเครื่องทดสอบตัวกรองอัตโนมัติถูกสร้างขึ้นตามมาตรฐาน มอก. 2424-2562 และ มอก. 2480-2562 และทำการทดสอบเชิงการทดลองต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอนุภาคละอองลอย ตัวทำให้อนุภาคเป็นกลาง ตัวทำความร้อนอากาศ ถังผสม ห้องทดสอบ ตัวนับจำนวนอนุภาค ตัววัดความดันแตกต่าง ตัววัดอากาศ ตัววัดอัตราการไหล และชุดประมวลผลและแสดงผลการทดสอบ ในเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นอนุภาค PSL และ NaCl สามารถสร้างขึ้นด้วยความเข้มข้นเชิงจำนวนตั้งแต่ 1 ถึง 20,000 particles/cm³ โดยเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นได้รับการออกแบบมาให้ทำงานที่อัตราการไหลของอนุภาคทดสอบที่ประมาณ 5 ถึง 100 L/min ที่ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคสูงถึง 99.999% ในการศึกษานี้ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคจากเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นกับผลที่ได้จากเครื่องทดสอบตัวกรองที่ใช้เทคนิคการนับอนุภาคแบบกระเจิงแสง และจากการเปรียบเทียบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน มีความแตกต่างของประสิทธิภาพการกรองอนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm และ อนุภาคเกลือขนาด 0.264 μm ระหว่างเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องทดสอบตัวกรองที่ใช้เทคนิคการนับอนุภาคแบบกระเจิงแสงประมาณ 0.35% และ -0.47% ตามลำดับ ทำให้เห็นว่าต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้เป็นเครื่องทดสอบตัวกรองแบบอัตโนมัติได้และการทดสอบต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นแสดงให้เห็นผลที่ดีในการหาค่าการผ่านทะลุหรือประสิทธิภาพการกรองของอนุภาคและความดันตกของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95

คำสำคัญ: โควิด-19, เครื่องทดสอบตัวกรอง, ประสิทธิภาพการกรอง, หน้ากากอนามัย, หน้ากากกรองอากาศ

Abstract

The aim of this study is to develop and evaluate an automated filter tester based on an electrostatic counter for determining penetration or filter efficiency and pressure drop of surgical masks and N95 masks. The prototype of the automated filter tester was

built based on the TIS 2424-2562 and TIS 2480-2562 standards and experimentally tested. The developed filter tester consisted of an aerosol atomizer, an air heater, a filtered air supply, an aerosol neutralizer, a mixing chamber, a heater, a filter holder, a pressure transducer, a diffusion dryer, an electrostatic particle counter, a mass flow meter and controller and a vacuum pump. In the developed filter tester, PSL and NaCl particles could be generated with number concentration ranging from about 1 to 20,000 particles/cm³. The developed filter tester was designed to operate at a test aerosol flow rate of about 5 to 100 L/min with particle filtration efficiency up to 99.999%. In this study, the particle filtration efficiency from the developed filter tester was compared with that obtained from the light scattering particle counting filter tester and good agreement was found from the comparison, the difference in the filtration efficiency of 0.1 μ m PSL particles and 0.264 μ m NaCl particles between the developed filter tester and the scattering particle counting filter tester was approximately 0.35% and -0.47%, respectively. It was shown that the developed prototype can be used in the automated filter tester and testing of a prototype of the automated filter tester showed promising results for determining penetration or filtration efficiency of particles and pressure drop of surgical masks and N95 masks.

Keywords: COVID-19, Filter Tester, Filtration Efficiency, Surgical Mask, Respirator

1. บทนำ

การแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ไปทั่วทุกภูมิภาคของโลกทำให้ยอดผู้ติดเชื้อสะสมสูงถึง 163,161,728 ราย และเสียชีวิตสะสมสูงถึง 3,381,269 ราย สำหรับประเทศไทยมีผู้ติดเชื้อสะสม 111,082 ราย และเสียชีวิตสะสม 614 ราย ข้อมูล ณ วันที่ 18 พฤษภาคม 2564 [1] ทำให้หน้ากากอนามัยประเภทใช้ครั้งเดียว (Disposable surgical masks) หน้ากากผ้า (Fabric masks) และหน้ากาก N95 (N95 masks) มีความต้องการสูงเพื่อใช้ในการป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโควิด-19 จากละอองฝอยหรือสารคัดหลั่งจากการไอจามและการดักจับละอองของเหลวและละอองลอยแบคทีเรียจากปากและจมูก [2] โดยในช่วงโควิด-19 ระบาดในประเทศไทยทั้ง 3 รอบเกิดปัญหาการขาดแคลนอุปกรณ์ทางการแพทย์โดยเฉพาะหน้ากากอนามัยประเภทใช้ครั้งเดียว (Disposable surgical masks) หน้ากากผ้า (Fabric masks) และหน้ากาก N95 (N95 masks) ทำให้ความต้องการหน้ากากอนามัย หน้ากากผ้าและหน้ากาก N95 เพิ่มขึ้นหลายเท่าตัว เกิดการขาดแคลนหน้ากากอนามัยสำหรับบุคลากรทางการแพทย์และผู้ป่วยในโรงพยาบาลทั่วประเทศ เนื่องจากสถานะขาดแคลนวัตถุดิบในการผลิตหน้ากาก โรงงานผู้ผลิตหน้ากากจึงไม่สามารถผลิตและส่งหน้ากากอนามัยและหน้ากาก

N95 ให้กับโรงพยาบาลได้ตามความต้องการปกติ ในขณะที่ความต้องการหน้ากากอนามัย หน้ากากผ้าและหน้ากาก N95 ของประชาชนทั่วไปก็สูงขึ้นตามไปด้วย

จากปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบในการผลิตหน้ากากดังกล่าว ได้มีงานวิจัยที่แนะนำเกี่ยวกับวัสดุป้องกันระบบทางเดินหายใจอื่นๆ รวมไปถึงวัสดุผ้าทั่วไป เช่น เสื้อยืด ผ้าเช็ดหน้าและผ้าพันคอสำหรับทำหน้ากากผ้าที่เป็นทางเลือกในการใช้ในช่วงที่หน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ขาดแคลน [2-7] แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีนำเข้าหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ที่ไม่ผ่านมาตรฐานหรือไม่มีความแตกต่างประเทศมาจำหน่ายในประเทศเป็นวงกว้าง ซึ่งหน้ากากที่ไม่ได้มาตรฐานดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพการกรองที่ต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดจึงไม่สามารถป้องกันการแพร่กระจายของโรคทางเดินหายใจจากละอองฝอยหรือสารคัดหลั่งจากการไอจามและการดักจับละอองของเหลวและละอองลอยแบคทีเรียจากปากและจมูกของผู้สวมใส่ได้ ในช่วงที่มีการระบาดของโควิด-19 รอบแรก Sickbert-Bennett et al. [4] ได้ประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากเพื่อเป็นทางเลือกใช้ป้องกันการติดเชื้อ โดยได้เลือกหน้ากากอนามัยจำนวน 29 แบบที่ทดสอบกับผู้ชาย 1 คนและผู้หญิง 1 คน โดยพบว่าประสิทธิภาพของหน้ากาก N95 ที่มีขนาดไม่เหมาะสมกับใบหน้ามีประสิทธิภาพลดลงเล็กน้อยคือ 90% ถึง 95% และหน้ากากอนามัยมี

ประสิทธิภาพในการกรองที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับหน้ากาก N95 (มีประสิทธิภาพ 98.5%) โดยหน้ากากอนามัยมีประสิทธิภาพต่ำสุดคือ 38.1% Whiley et al. [8] ได้ใช้วิธีมาตรฐานในการประเมินประสิทธิภาพของหน้ากากแบบผ้าที่มีอยู่ในปัจจุบันเพื่อกรองไวรัสเปรียบเทียบกับหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 แสดงให้เห็นว่าโดยทั่วไปแล้วหน้ากากผ้าที่มีอยู่จะมีประสิทธิภาพในการกรองไวรัสอย่างน้อย 50% ส่วนหน้ากากอนามัยจะมีประสิทธิภาพ 99.9% และหน้ากาก N95 มีประสิทธิภาพ 99.9% เมื่อทดสอบกับอนุภาคที่มีขนาดเฉลี่ย $6.0 \mu\text{m}$ Dugdale and Walensky [9] ได้รายงานประสิทธิภาพการกรอง ประสิทธิภาพและความพร้อมใช้งานของหน้ากาก N95 สำหรับการป้องกัน COVID-19 โดยพบว่าหน้ากาก N95 ที่หลายคนซื้อหรือบริจาคให้กับโรงพยาบาลในสหรัฐอเมริกา มีประสิทธิภาพการกรองอนุภาคตั้งแต่ 53% ถึง 85% และหน้ากากอนามัยแบบสายรัดหุ้มประสิทธิภาพในการกรองต่ำกว่ามากถึง 37% ถึง 69% เนื่องจากมีแผ่นกรองที่บางกว่าและสวมใส่สบายกว่าสำหรับในประเทศไทย Intra [10] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัย หน้ากากผ้าและหน้ากาก N95/KN95/FFP1/FFP2 ที่มีใช้ในช่วงที่โควิด-19 ระบาดในประเทศไทยรอบแรก โดยในการศึกษานี้ได้สุ่มเก็บตัวอย่างหน้ากากที่มีขายในท้องตลาดจำนวน 259 ตัวอย่าง ประกอบด้วย หน้ากากอนามัยจำนวน 67 ตัวอย่าง หน้ากากผ้าจำนวน 71 ตัวอย่างและหน้ากาก N95/KN95/FFP1/FFP2 จำนวน 121 ตัวอย่าง ทำการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบมาตรฐาน ASTM F2299-03 เพื่อหาประสิทธิภาพการกรองกับอนุภาค ผลการศึกษาของ Intra [10] พบว่าหน้ากากอนามัยมีประสิทธิภาพการกรองอนุภาคเฉลี่ย ต่ำสุด สูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 50.50%, 2.50%, 95.90% และ 26.34% ตามลำดับ หน้ากากผ้ามีประสิทธิภาพการกรองอนุภาคเฉลี่ย ต่ำสุด สูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 39.10%, 5.93%, 87.55% และ 19.64% ตามลำดับ และหน้ากาก N95/KN95/FFP1/FFP2 มีประสิทธิภาพการกรองอนุภาคเฉลี่ย ต่ำสุด สูงสุดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 72.21%, 8.92%, 99.97% และ 26.65% ตามลำดับ

จากคุณภาพของหน้ากากอนามัยดังกล่าวสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ได้ออกมาตรฐาน มอก.2424-2562 หน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียว และ มอก.2480-2563 หน้ากาก N95 ลดความเสี่ยงการติดเชื้อทางการแพทย์ขึ้นเพื่อกำหนดมาตรฐานและคุณภาพให้กับหน้ากากอนามัยที่จำหน่ายในท้องตลาด โดยหน้ากากที่จำหน่ายจะต้องผ่าน มอก. นี้และจากความต้องการหน้ากากอนามัย หน้ากากผ้า และหน้ากาก N95 เพิ่มขึ้น จึงเกิดโรงงานผลิตหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ขึ้นในประเทศมากกว่า 100 โรงงาน ซึ่งในกระบวนการผลิตหน้ากากจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณภาพและประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากทุกล็อตการผลิต แต่เนื่องจากค่าตรวจสอบวิเคราะห์ในปัจจุบันยังมีราคาสูงหากส่งตรวจต่างประเทศ อีกทั้งห้องปฏิบัติการทดสอบในประเทศยังมีจำกัดไม่เพียงพอต่อความต้องการในการทดสอบ จึงทำให้โรงงานมีความต้องการเครื่องมือทดสอบเพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของโรงงาน แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องมือตรวจสอบวิเคราะห์ประสิทธิภาพยังมีราคาสูงอยู่ในหลักหลายล้านบาท จึงทำให้โรงงานผลิตหน้ากากส่วนใหญ่ยังไม่มีการตรวจสอบคุณภาพได้ตามที่มาตรฐานกำหนดได้ ในปัจจุบันการพัฒนาเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 แบบอัตโนมัติที่มีการนำเข้ามีลักษณะโครงสร้าง เทคนิค วิธีการ การทำงาน และราคาแตกต่างกันออกไป เช่น TSI 8130A AUTOMATED FILTER TESTER ของบริษัท TSI ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากาก N95 แบบอัตโนมัติตามมาตรฐาน 42 CFR 84 สามารถกำเนิดอนุภาค PSL, NaCl, Emery Oil, DEHS ช่วงการวัดความเข้มข้นของอนุภาค 0.1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ถึง 200 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถปรับอัตราการไหลของอนุภาคทดสอบได้ในช่วง 5–90 L/min สามารถวัดความดันแตกต่างได้ 0–250 mmH₂O สามารถวัดประสิทธิภาพการกรองได้สูงสุด 99.999% ราคาประมาณ 6 ล้านบาท [11] TSI 3610 AUTOMATED FILTER TESTER ของบริษัท TSI ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยแบบอัตโนมัติตามมาตรฐาน

ASTM F2299-03 และ 42 CFR 84 สามารถกำหนดอนุภาค PSL, NaCl, Emery Oil, DEHS สามารถวัดประสิทธิภาพการกรองได้สูงสุด 99.999% ราคาประมาณ 8 ล้านบาท [12] Automatically Particular Filtration Efficiency Tester รุ่น G506 ของบริษัท QINSUN/STANDARD ประเทศจีน เป็นเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากาก N95 แบบอัดโนมิติตามมาตรฐาน 42 CFR 84 สามารถกำหนดอนุภาค PSL, NaCl, Emery Oil, DEHS ช่วงการวัดความเข้มข้นของอนุภาค 0.1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ถึง 200 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถปรับอัตราการไหลของอนุภาคทดสอบได้ในช่วง 5–90 ลิตรต่อนาที สามารถวัดความดันแตกต่างได้ 0–250 mmH₂O สามารถวัดประสิทธิภาพการกรองได้สูงสุด 99.999% ราคาประมาณ 2.6 ล้านบาท [13] สำหรับในประเทศไทยยังไม่มีมีการวิจัยและพัฒนาเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 แบบอัดโนมิติ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาต้นแบบ และจัดหาเครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ ที่มีอยู่ภายในประเทศให้ได้ต้นแบบที่สามารถทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคได้ทั้งหน้ากาก

อนามัยและหน้ากาก N95 ได้ตามมาตรฐาน มอก. 2424-2562 และ มอก. 2480-2562 สามารถลดการนำเข้าจากต่างประเทศได้

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 แบบอัดโนมิติ ซึ่งได้อาศัยหลักวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน 42 CFR 84 และ ASTM F2299 เป็นแนวทางตั้งข้อมูลในตารางที่ 1 โดยใช้เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ ที่พัฒนาและหาได้ภายในประเทศทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศให้ได้ต้นแบบที่สามารถทดสอบได้ตามเงื่อนไขของมาตรฐาน มอก.2424-2562 และ มอก.2480-2562 โดยข้อมูลผลการศึกษาในบทความวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อโรงงานผลิตหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ในประเทศและทันต่อความต้องการเครื่องทดสอบตัวกรองอนุภาคในการศึกษาวิจัยทางประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ช่วงโควิด-19 ระบาดในประเทศไทยและเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขึ้นในประเทศ

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบการทดสอบหน้ากากมาตรฐาน 42 CFR 84 และ ASTM F2299

รายละเอียดตัวแปรทดสอบ	หน้ากาก N95 ตามมาตรฐาน 42	หน้ากากอนามัย ตามมาตรฐาน
	CFR 84 [14]	ASTM F2299 [15]
อนุภาคทดสอบ	โซเดียมคลอไรด์ (NaCl), CMD = $0.075 \pm 0.02 \mu\text{m}$ MMAD = $0.3 \mu\text{m}$ GSD $\leq 1.86\%$	อนุภาคทรงกลมชนิดพอลิสไตรีนลาเท็กซ์ (Polystyrene Latex) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง $0.1\text{--}5.0 \mu\text{m}$ GSD $\leq 1.6\%$
ความเข้มข้นของอนุภาค	ไม่เกิน 200 mg/m^3	ช่วง $10^7 - 10^8 \text{ particles/m}^3$
อัตราการไหลทดสอบ	$85 \pm 4 \text{ L/min}$ (ตัวกรองเดียว) $42.5 \pm 2 \text{ L/min}$ (ด้านใดด้านหนึ่งตัวกรองคู่)	-
ความเร็วการไหล	10.6 cm/s ที่พื้นที่ทดสอบ (Test Area) 135 cm^2	ช่วง $0.5 - 25 \text{ cm/s}$
ที่ใส่ตัวอย่าง (Specimen holder)	-	มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $5\text{--}15 \text{ cm}$
การเก็บตัวอย่าง	-	แบบไอโซไคเนติก (Isokinetic sampling)

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบการทดสอบหน้ากากมาตรฐาน 42 CFR 84 และ ASTM F2299 (ต่อ)

รายละเอียดตัวแปรทดสอบ	หน้ากาก N95 ตามมาตรฐาน 42	หน้ากากอนามัย ตามมาตรฐาน
	CFR 84 [14]	ASTM F2299 [15]
อนุภาคทำให้มีสมดุลประจุบอลลทซ์มัน (Boltzmann Equilibrium Charge Equivalent)	ด้วยตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลาง	ด้วยตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลางแบบ
ระบบการไหลอากาศ	แบบ (Aerosol Neutralizer)	(Aerosol Neutralizer)
อุณหภูมิขณะทดสอบ	25 ± 5°C	21 ± 3°C
ความชื้นสัมพัทธ์ขณะทดสอบ	30 ± 10%RH	30 – 50 ± 5%RH

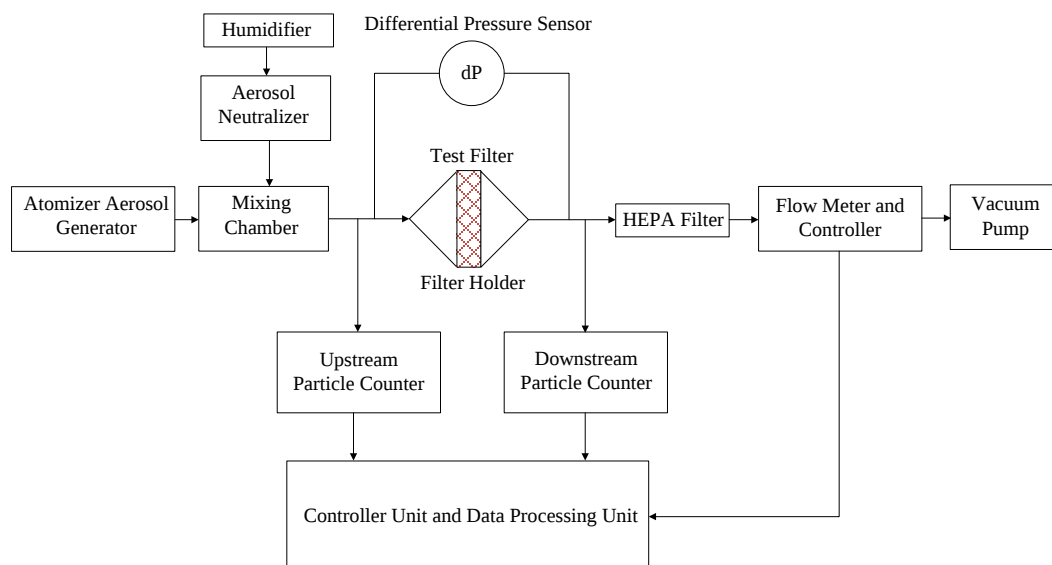
2. ต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองอัดโนมิตที่ใช้ ตัวนับอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต

เงื่อนไขในการออกแบบต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองในงานนี้คือต้นแบบต้องสามารถทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ได้ตามมาตรฐาน มอก.2424-2562 และ มอก.2480-2562 ในเครื่องเดียวและเป็นระบบอัตโนมัติ โดยใช้เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ ในการสร้างที่สามารถหาได้ภายในประเทศทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศ ต้นแบบที่สร้างขึ้นต้องใช้งานง่าย มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องต่ำรวมถึงราคาของต้นแบบต้องมีราคาต่ำกว่าเครื่องทดสอบตัวกรองที่มีการนำเข้าจากต่างประเทศ มาตรฐาน มอก.2424-2562 เป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียวที่ออกโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) กระทรวงอุตสาหกรรม ในรายละเอียดการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขนาด 0.1 μm ตามหัวข้อที่ 4.6 รายการที่ 3 ของ มอก.2424-2562 ได้อ้างอิงมาตรฐาน ASTM F2100 ซึ่งเป็นข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับประสิทธิภาพของวัสดุที่ใช้ในหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่กำหนดโดยสมาคมการทดสอบและวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials) [16] และในมาตรฐาน ASTM F2100 ได้มีการอ้างอิงมาตรฐาน ASTM F2299-03 วิธีทดสอบมาตรฐานสำหรับการหาประสิทธิภาพการกรองและการทะลุผ่านของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์โดยการใช้อนุภาคทรงกลมชนิดพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ (Polystyrene Latex, PSL) รายละเอียดในมาตรฐาน ASTM F2299-03 ได้

กำหนดให้ทดสอบกับอนุภาคทรงกลมชนิดพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ แบบขนาดเดี่ยว (Monodispersed aerosol) ขนาดอนุภาคที่ทดสอบอยู่ในช่วง 0.1–5 μm ที่ความเร็วด้านหน้าทดสอบได้ในช่วง 0.5–25 cm/s โดยใช้เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง (Light scattering particle counter) หรือเครื่องมือแบบเทียบเคียง (Equivalent instrumentations) เป็นตัวนับจำนวนอนุภาค ดังแสดงตามตารางที่ 1 ส่วน มอก.2480-2562 เป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหน้ากากใช้ครั้งเดียวชนิด N95 ลดความเสี่ยงการติดเชื้อทางการแพทย์ ในการทดสอบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคตามหัวข้อที่ 4.3 รายการที่ 1 ของ มอก.2424-2562 ได้อ้างอิงมาตรฐาน 42 CFR 84 (ข้อ 84.181) ของสถาบันอาชีวอนามัยและความปลอดภัยของสหรัฐอเมริกา (National Institute for Occupational Safety & Health, NIOSH) รายละเอียดการทดสอบหน้ากาก N95 ตามมาตรฐาน 42 CFR 84 (ข้อ 84.181) นี้จะเป็นการจำลองในกรณีที่เลวร้ายที่สุด (Worst-case) ที่อาจพบได้ในสภาพแวดล้อมการทำงานทั่วไปคือทำให้เกิดการผ่านทะลุตัวกรองสูงสุด จึงกำหนดอัตราการไหลอากาศในการทดสอบที่อัตราการทำงานสูงของมนุษย์คือ 85 หรือ 95 L/min กับอนุภาคเกลือหรือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (Count median diameter, CMD) เท่ากับ $0.075 \pm 0.02 \mu\text{m}$ หรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์มัธยฐานมวล (Mass median aerodynamic diameter, MMAD) เท่ากับ 0.3 μm และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิต (Geometric standard deviation, GSD) ไม่เกินกว่า 1.86% (ตารางที่ 1) สำหรับเครื่องนับจำนวนอนุภาคในมาตรฐาน 42 CFR 84 ได้กำหนดให้เป็นตัวนับจำนวนอนุภาค

แบบโฟโตมิเตอร์กระเจิงแสง (Light scattering photometer) หรือเครื่องมือแบบเทียบเคียง (Equivalent instrumentations) ดังนั้น ในการออกแบบเครื่องต้นแบบส่วนประกอบหลักได้ แสดงไดอะแกรมในรูปที่ 1 และภาพถ่ายอุปกรณ์หลักที่ใช้

แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งได้อาศัยหลักของวิธีการทดสอบตาม มาตรฐาน 42 CFR 84 และ ASTM F2299 เป็นแนวทางเพื่อให้ ครอบคลุมการทดสอบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของ หน้ากากทั้ง 2 ชนิดในระบบการทดสอบเดียว



รูปที่ 1 ส่วนประกอบหลักของต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้น



(ก) เครื่องต้นแบบ



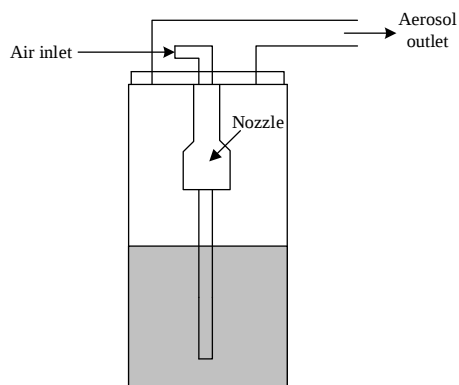
(ข)



(ค) จอแสดงผลการทดสอบ

รูปที่ 2 ภาพถ่ายต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ (ก) เครื่องต้นแบบ (ข) พื้นที่ทดสอบและตัวยึดแผ่นกรอง (ค) จอแสดงผลการทดสอบ

รูปที่ 1 แสดงแผนภาพส่วนประกอบหลักของต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้น โดยต้นแบบประกอบด้วยชุดแหล่งกำเนิดอนุภาคละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (Atomizer aerosol generator) ชุดทำให้อนุภาคเป็นกลาง (Aerosol neutralizer) ชุดควบคุมความชื้น (Humidifier) ถังผสม (Mixing chamber) ตัวยึดแผ่นกรอง (Filter holder) ตัวนับจำนวนอนุภาค (Particle counter) ชุดวัดความแตกต่างของความดัน (Differential pressure sensor) ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ชุดวัดและควบคุมอัตราการไหล (Flow meter and controller) ชุดควบคุมการทำงานและประมวลผล (Controller unit and data processing unit) **รูปที่ 2(ก)** แสดงภาพถ่ายต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นในงานนี้ โดยประกอบด้วยพื้นที่ทดสอบและตัวยึดแผ่นกรอง แสดงใน **รูปที่ 2(ข)** และจอแสดงผลการทดสอบแสดงใน **รูปที่ 2(ค)** ซึ่งต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นสามารถกำเนิดอนุภาคพอลิสไตรีนลาเท็กซ์ (PSL particles) อนุภาคเกลือ (NaCl particles) และอนุภาคน้ำมัน (Oil particles) ได้ ในการทดสอบประสิทธิภาพการกรองของเครื่องต้นแบบนี้ทำการสร้างอนุภาค PSL หรือ NaCl จากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ดังแสดงใน **รูปที่ 3**



รูปที่ 3 แหล่งกำเนิดละอองลอยเป็นแบบอะตอมไมเซอร์

จากนั้นอนุภาค PSL หรือ NaCl จะผ่านเข้าไปยังถังผสมเพื่อผสมและเจือจางอนุภาคกับอากาศสะอาดที่มีประจุสมดุลหรืออนุภาคที่เป็นกลาง (Neutralized particle) ซึ่งอากาศสะอาดที่เข้าถึงผสมนี้ถูกผ่านตัวทำความร้อนและตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลางแบบโคโรนาไอออไนเซชัน (Corona ionization) [17] หลังจากถังผสมจะได้อุณหภูมิขณะทดสอบ

$25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ขณะทดสอบ $30 \pm 10\% \text{RH}$ อัตราการไหลทดสอบในช่วง $5\text{--}90\text{ L/min}$ และความเข้มข้นของอนุภาคในช่วงไม่เกิน $20,000\text{ particles/cm}^3$ หรือไม่เกิน 200 mg/m^3 เพื่อป้องกันการสูญเสียอนุภาค (Particle losses) ในระบบหรือในท่อและตัวยึดแผ่นกรอง (Filter holder) ในการศึกษานี้ใช้ท่อซิลิโคนนำไฟฟ้า (Conductive silicone tube) และท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel tube) เป็นท่อสำหรับนำส่งและการเก็บตัวอย่างอนุภาคเพื่อป้องกันการสูญเสียของอนุภาคในระบบทดสอบ จากนั้นอนุภาค PSL หรือ NaCl จะผ่านเข้าไปยังตัวยึดแผ่นกรอง ซึ่งมีแผ่นกรองทดสอบอยู่ภายใน การเก็บตัวอย่างอนุภาคในต้นแบบนี้จะเป็นการเก็บตัวอย่างแบบไอโซไคเนติก (Isokinetic sampling) ทิศทางของของไหลที่ทางเข้าหัววัดและแกนของหัวเก็บตัวอย่างอยู่ในแกนเดียวกันคือขนานกับเส้นการไหลของของไหลและความเร็วของของไหลที่จุดทางเข้าหัววัดมีค่าเท่ากับความเร็วของการไหลภายนอก โดยในขณะทดสอบได้มีการวัดค่าความต่างของความดันของแผ่นกรองในหน่วย mmH_2O ด้วยมาโนมิเตอร์เซ็นเซอร์ แผ่นกรองหน้ากากที่ใช้ในการทดสอบจะถูกตัดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 13 cm มีพื้นที่ในการทดสอบประมาณ 132.73 cm^2 ดัง **รูปที่ 2(ข)**

โดยการหาประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของแผ่นกรองจะทำการนับจำนวนอนุภาคทั้งก่อน (Upstream) และหลังผ่าน (Downstream) แผ่นกรองทดสอบด้วยเครื่องนับจำนวนอนุภาค เมื่อได้ค่าความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคก่อนและหลังผ่านแผ่นกรองจากเครื่องนับจำนวนอนุภาคแล้วจะสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค (Particle filtration efficiency) ของแผ่นกรองของหน้ากาก η ได้จากสมการ

$$\eta = \frac{c_{\text{inlet}} - c_{\text{outlet}}}{c_{\text{inlet}}} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ c_{inlet} คือความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคก่อนผ่านของตัวกรองและ c_{outlet} คือความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคหลังผ่านของตัวกรอง และค่าการทะลุผ่านอนุภาค (Particle penetration) ของตัวกรอง P จะสามารถคำนวณได้จาก

$$P = 100 - \eta \quad (2)$$

สำหรับการวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิต (Electrostatic particle counter) ที่พัฒนาขึ้นโดย Intra et al. [18–20] เนื่องจากเป็นเครื่องนับจำนวนอนุภาคที่สามารถนับจำนวนอนุภาคได้เทียบเคียงกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง สามารถพัฒนาและสร้างขึ้นเองได้ภายในประเทศและมีราคาถูกกว่าเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง จึงทำให้ต้นทุนของเครื่องต้นแบบมีราคาถูกกว่าเครื่องนำเข้าจากต่างประเทศที่ใช้ลูกถ้วยฟาราเดย์ (Faraday cup) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการวัดประจุอนุภาค สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของอนุภาคที่มีประจุที่วัดได้จากลูกถ้วยฟาราเดย์ในหน่วย mV/cm³ สัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นจำนวนอนุภาคในหน่วย particles/cm³ โดยแรงดันไฟฟ้าของประจุอนุภาคที่วัดได้จะถูกแปลงผันไปเป็นความเข้มข้นจำนวนของอนุภาค N_p สำหรับละอองลอยที่แพร่กระจายแบบเดี่ยว (Monodisperse aerosol) ดังสมการต่อไปนี้ [20]

$$N_p = \frac{V_p}{n_p e Q_a R_{in}} \quad (3)$$

เมื่อ V_p คือแรงดันไฟฟ้าของประจุอนุภาค n_p คือจำนวนประจุของอนุภาค e คือประจุพื้นฐานของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.61×10^{-19} C Q_a อัตราการไหลอนุภาคและ R_f คือความต้านทานภายในของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งหลักการวัดอนุภาคหรือฝุ่นละอองลอยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ได้มีออกเป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) มอก. 3030-2563 เครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองลอยหลักการไฟฟ้าสถิตโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเพื่อกำหนดเป็นมาตรฐานเครื่องวัดฝุ่นละอองลอย PM1.0, PM2.5 และ PM10 ขึ้นในประเทศไทยอีกด้วย

เพื่อให้เป็นการประยุกต์ใช้งานเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิต (Electrostatic particle counter) ที่พัฒนาขึ้นโดย Intra et al. [18–20] สำหรับการนับจำนวนอนุภาคสำหรับเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัย ในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับปรุงเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตให้สามารถนับความ

เข้มข้นจำนวนอนุภาคต่ำกว่า 10^6 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยการผสมผสานใช้หลักการการตกกระทบเนื่องจากแรงเฉื่อยของอนุภาคร่วมกับลูกถ้วยฟาราเดย์อิเล็กโทรมิเตอร์ ซึ่งในส่วนตัวคัดกรองอนุภาค (Particle collector) ที่มีการปรับปรุงตามรูปที่ 4 จะประกอบด้วย แผ่นช่องเร่ง (Acceleration nozzle plate) แผ่นตกกระทบ (Impaction plate) ตะแกรงละเอียด แผ่นกรองประสิทธิภาพสูงและตะแกรงหยาบทั้งสองแผ่นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร อนุภาคละอองลอยไหลผ่านเข้า ในเครื่องจะผ่านช่องเร่งอนุภาคละอองลอยที่มีขนาดใหญ่จะมีความเฉื่อยสูงจะตกกระทบที่แผ่นกระทบเพราะไม่สามารถเคลื่อนที่อ้อมผ่านแผ่นกระทบไปได้ ส่วนอนุภาคละอองลอยที่มีขนาดเล็กพอจะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นกระทบไปได้พร้อมกับกระแสการไหลของของไหลและไปสะสมตัวอยู่บนแผ่นกรองประสิทธิภาพสูง ด้านล่างของแผ่นกระทบ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคละอองลอยที่ถูกแยกออกเรียกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจุดตัดอนุภาค (Particle cut-point diameter) ในการประดิษฐ์นี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจุดตัดฝุ่นละอองมีค่าเท่ากับ 0.1 ไมโครเมตรที่อัตราการไหลของฝุ่นละอองเท่ากับ 7 ลิตรต่อนาที และได้มีการปรับแต่งวงจรอิเล็กทรอนิกส์ให้สามารถวัดกระแสระดับต่ำคือ 10 mV ต่อกระแสอินพุตเท่ากับ 10 fA ได้ ทำให้มีความไวและความละเอียดสูงในการนับจำนวนอนุภาคในช่วงความเข้มข้นจำนวน 10^1 ถึง 10^6 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อนุภาคนาโนค่าสุดคือ 100 nm และมีราคาถูกเนื่องจากมีใช้เครื่องมือวัสดุ อุปกรณ์ ที่สามารถพัฒนาและหาได้ภายในประเทศทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศ โดย Intra et al. [21] ได้รายงานค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงและไฟฟ้าสถิตในช่วงค่า 95.38–98.61% โดยความแตกต่างของค่าความผิดพลาดร้อยละ สัมบูรณ์เฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกรองอนุภากระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงและไฟฟ้าสถิตเท่ากับ 0.99, 2.03, 1.84 และ 1.79 สำหรับอนุภาคนาโน 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 μm ตามลำดับ

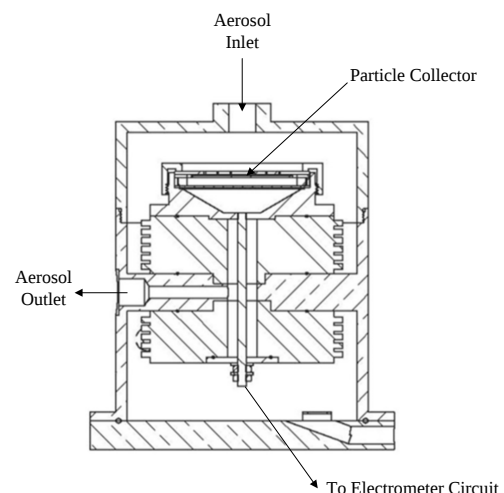
เนื่องจากการสร้างอนุภาค PSL ด้วยอะตอมไมเซอร์จะมิอนุภาคตกค้าง (Residual particles) ที่เป็นอนุภาครั่วธาตุ

ของน้ำขนาดเล็กกว่า $0.1 \mu\text{m}$ และอนุภาคประจุทวีคูณ (Multiply charged particles) ที่มีขนาดใหญ่กว่า $0.1 \mu\text{m}$ เจือปนกับอนุภาค PSL ซึ่งอนุภาคตกค้างและอนุภาคประจุทวีคูณเหล่านี้จะมีผลต่อการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของวัสดุกรองในช่วงขนาดอนุภาคเล็กและใหญ่กว่า $0.1 \mu\text{m}$ เพื่อหลีกเลี่ยงผลของอนุภาคตกค้างและอนุภาคประจุทวีคูณดังกล่าวต้องมีการคัดแยกขนาดอนุภาคก่อนด้วยเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบความเคลื่อนที่ได้ทางไฟฟ้า (Electrical mobility) เพื่อคัดแยกอนุภาคตกค้างที่เป็นอนุภาคแร่ธาตุของน้ำและอนุภาคประจุทวีคูณออกให้ได้เฉพาะอนุภาค PSL ที่มีขนาดเดี่ยว (Monodisperse aerosol) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $0.1 \mu\text{m}$ ในการศึกษานี้ได้ใช้เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต [23–24] ทำการคัดแยกขนาดอนุภาคก่อนเข้าเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคที่ได้ในการศึกษานี้ได้มีการพัฒนาปรับปรุงจากงานเดิมของ Intra and Tippayawong [23–24] เพื่อให้สามารถคัดแยกขนาดอนุภาค PSL ได้ในช่วงขนาด $0.05\text{--}0.14 \mu\text{m}$ สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการกรองของอนุภาค PSL ได้ โดยระบบการวัดประกอบด้วยเครื่องอัดประจุอนุภาคแบบโคโรนา (Corona particle charger) เครื่องแยกขนาดอนุภาคแบบความเคลื่อนที่ได้ทางไฟฟ้า (Electrical mobility size classifier) และเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic particle counter) โดยอนุภาคตัวอย่างจะถูกอัดประจุโดยเครื่องอัดประจุแบบโคโรนาเข็ม จากนั้นอนุภาคที่ได้รับการอัดประจุจะถูกนำเข้าในเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค โดยเครื่องคัดแยกในการศึกษานี้ได้มีการปรับปรุงในส่วนการคัดแยกขนาดดังแสดงในรูปที่ 6 ที่มีลักษณะเป็นแผ่นอิเล็กโทรดคู่ขนานสองแผ่นคั่นด้วยช่องว่างที่โซนการคัดแยกขนาดอนุภาค (Size classification zone) โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าขั้วบวกให้แผ่นอิเล็กโทรดด้านบนและให้แผ่นอิเล็กโทรดด้านล่างเป็นกราวด์ และให้การไหลของอนุภาคที่เข้ามาถูกนำเข้าสู่ที่

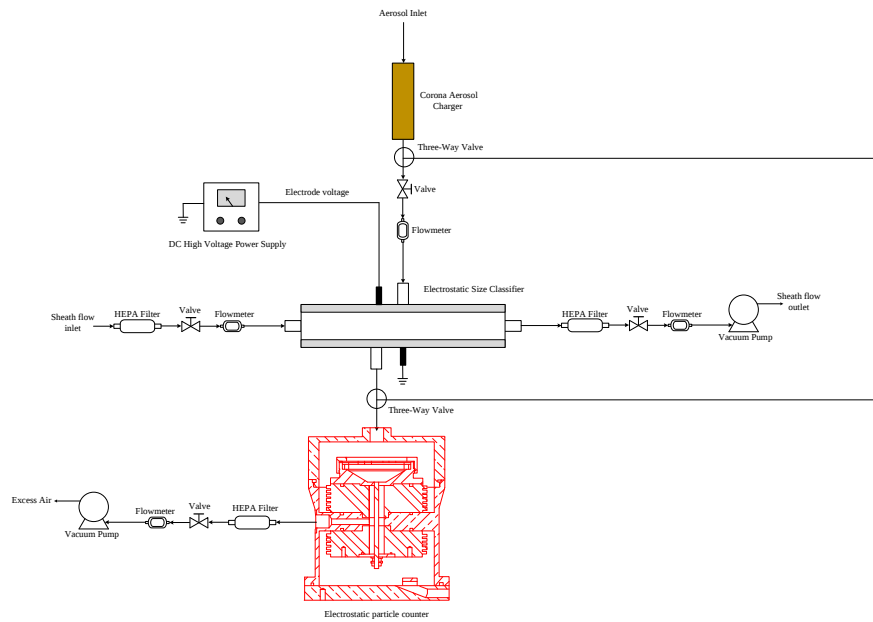
ด้านบนสุดของเครื่องคัดแยก จากนั้นผ่านช่องทางการไหลรูปสามเหลี่ยม (Triangular-shaped) ก่อนเข้าสู่โซนการคัดแยกขนาดอนุภาคผ่านช่องทางเข้าด้านบน โดยอนุภาคที่มีขนาดที่เหมาะสมกับแรงดันของสนามไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคเคลื่อนที่เป็นวิถีโค้งเข้าหาช่องทางออกด้านล่าง เครื่องคัดแยกซึ่งต่อกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคไฟฟ้าสถิตเพื่อบันทึกจำนวนอนุภาค โดยความเคลื่อนที่ได้ทางไฟฟ้าของอนุภาค Z_p ที่เป็นฟังก์ชันของระยะการเคลื่อนที่อนุภาคภายในเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคนี้สามารถหาได้จาก

$$Z_p(z) = -\frac{y}{Vz} \left(-\frac{h^2}{2\mu} \frac{dp}{dz} \left(\frac{y}{4} - \frac{y^3}{3h^2} \right) \right) \quad (3)$$

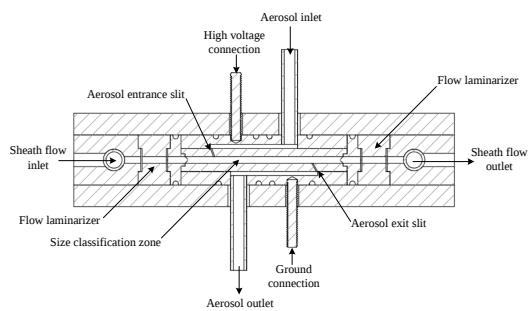
เมื่อ V คือแรงดันไฟฟ้าระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด z คือระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากช่องทางเข้าและทางออก $\frac{dp}{dz}$ คือค่าคงที่ของความดันเกรเดียนต์ (Pressure gradient) y คือความกว้างของแผ่นอิเล็กโทรด h คือระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดและ μ คือความหนืดของแก๊ส รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างทฤษฎีและการทดลองของแรงดันอิเล็กโทรดการแยกขนาดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค PSL ที่คัดแยกในช่วง $0.05\text{--}0.14 \mu\text{m}$ ได้



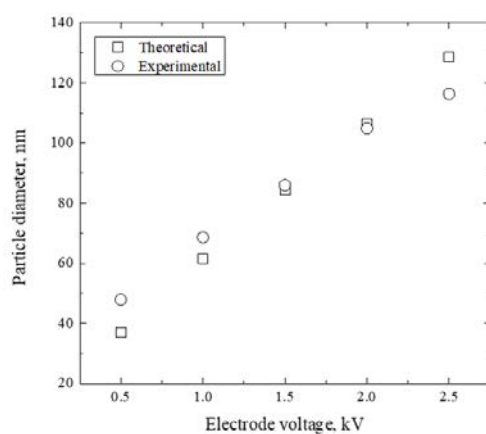
รูปที่ 4 ลักษณะโครงสร้างของเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิต



รูปที่ 5 ระบบการวัดแยกขนาดอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นสำหรับการนับจำนวนอนุภาคขนาดในช่วง 0.05-0.15 μm



รูปที่ 6 เครื่องวัดแยกขนาดอนุภาคที่ได้พัฒนาปรับปรุงขึ้นในการศึกษานี้



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบระหว่างทฤษฎีและการทดลองของแรงดันอิเล็กโตรการแยกขนาดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่คัดแยกได้

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคตามมาตรฐาน 42 CFR 84 จะเป็นการทดสอบกับอนุภาค NaCl หลายขนาด (Polydisperse aerosol) ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิต (Geometric standard deviation, GSD) ไม่เกินกว่า 1.86% จึงไม่จำเป็นต้องมีการคัดแยกขนาดอนุภาคก่อนนับจำนวนอนุภาค ดังนั้นในการทดสอบจะมีการข้ามผ่าน (by pass) เครื่องวัดแยกขนาดอนุภาคด้วยวาล์ว 3 ทางเพื่อให้อนุภาค NaCl สามารถนับจำนวนได้โดยตรงกับเครื่องนับจำนวนอนุภาค

สำหรับระบบการไหลอากาศของต้นแบบจะถูกวัดและควบคุมให้คงที่ด้วยตัววัดอัตราการไหลเชิงมวลและปั๊มสุญญากาศ สำหรับการควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติและประมวลผลข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบนี้จะถูกควบคุมและประมวลผลด้วยตัวควบคุมลอจิกแบบ โปรแกรมได้ (Programmable logic controller, PLC) ให้สามารถใช้งานได้ง่าย โดยแสดงผลจะแสดงผลการทดสอบให้อ่านง่ายและเห็นชัดเจน แสดงค่าประสิทธิภาพการกรองอนุภาคและสภาวะทดสอบ เช่น ประสิทธิภาพการกรอง อัตราการไหล ความต่างความดัน อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และมีการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ และมีระบบป้องกันการปรับแต่งเครื่องหรือการปรับแต่งโดยไม่ตั้งใจจากผู้ใช้งาน แสดงรูปที่ 2(ค)

3. ระเบียบวิธีวิจัย

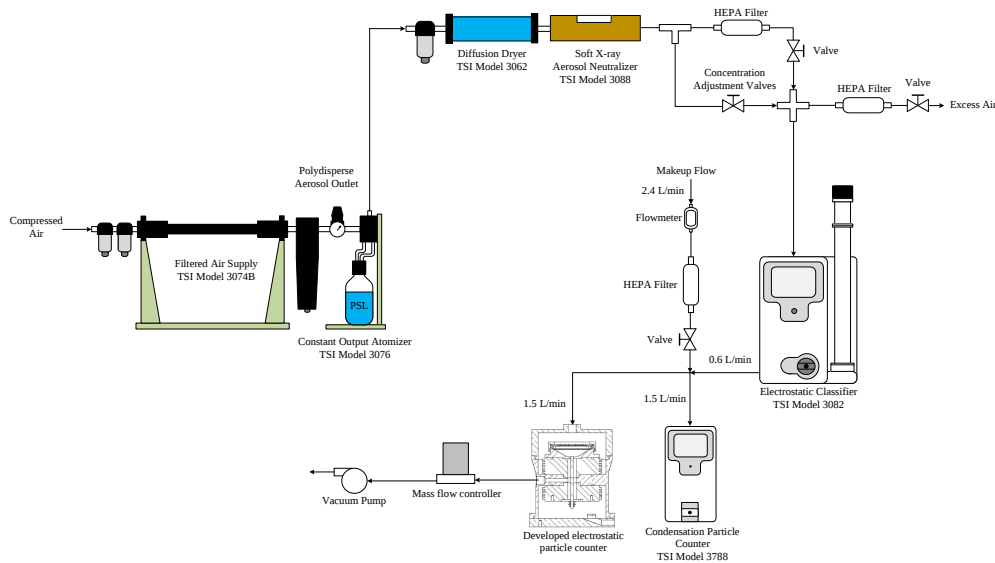
ในการวิจัยนี้ได้แบ่งการสอบเครื่องต้นแบบออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนแรกคือการศึกษาการกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution) ที่ออกจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอม ไมเซอร์เพื่อทำให้ทราบถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ มัธยฐานมวลและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเรขาคณิตเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM F2299-03 และ 42 CFR 84 กำหนดหรือไม่ และส่วนที่สองคือการศึกษาเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาคระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองนี้กับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงเพื่อเป็นการยืนยันว่าทั้งสองหลักการนี้สามารถเทียบเคียงกันได้ การศึกษาการกระจายขนาดอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอม ไมเซอร์ในงานวิจัยนี้ใช้อนุภาค PSL ขนาด $0.1\ \mu\text{m}$ ของ Thermo Scientific™ Dri-Cal™ ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางเรขาคณิต 1.6% ได้รับการรับรองตามมาตรฐานจากสถาบันแห่งชาติของมาตรฐานและเทคโนโลยี (National Institute of Standards and Technology, NIST) ผสมในน้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water) ในสัดส่วน 1000 : 1 สำหรับอนุภาคเกลือใช้เกลือ 2% ผสมในน้ำกลั่นปราศจากไอออน โดยทำการวัดการกระจายขนาดอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอม ไมเซอร์ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคแบบสแกนความเคลื่อนที่ได้ (Scanning mobility particle sizer, SMPS) ที่ประกอบด้วย ตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลาง เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic size classifier, Model 3082, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) และเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบควบแน่น (Condensation particle counter, Model 3788, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) ค่าการกระจายขนาดอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือที่วัดได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่มาตรฐาน ASTM F2299-03 และ 42 CFR 84 กำหนด

ส่วนการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาคระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองนี้กับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง ในการศึกษาได้แบ่งเป็น 2 การทดลอง คือ

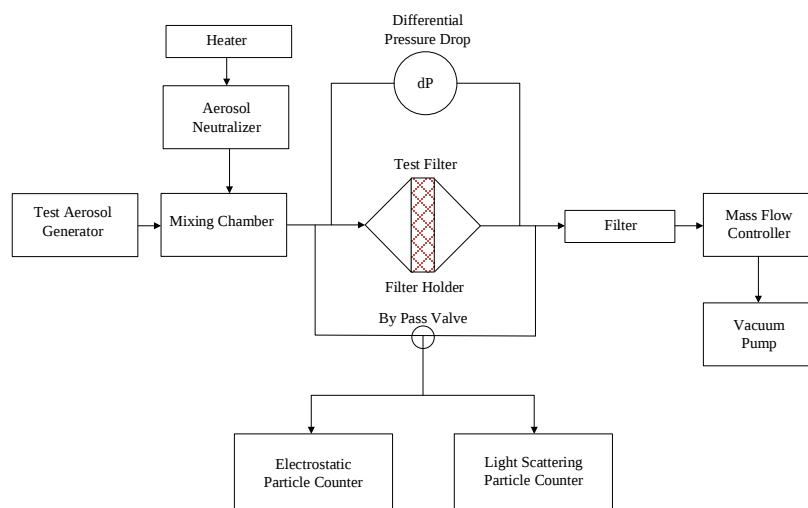
1) การเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอม ไมเซอร์ที่แต่ละความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคและ 2) ทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง **รูปที่ 8** แสดงแผนภาพการทดสอบเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือที่ความเข้มข้นจำนวนต่างๆ อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วยแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอม ไมเซอร์ แหล่งจ่ายอากาศสะอาด (Filtered air supply) เครื่องอัดอากาศ ตัวไล่ความชื้นแบบเพอร์ (Diffusion dryer) ตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลาง (aerosol neutralizer) แบบ Soft X-ray (Model 3088, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) ชุดวาล์วปรับความเข้มข้น (Concentration adjustment valve) เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต (Model 3082, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตและเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง ในการทดสอบนี้ใช้เครื่องนับจำนวนอนุภาคกระเจิงแสงแบบควบแน่นของบริษัท TSI Inc., St. Paul, MN, USA Model 3788 สามารถนับจำนวนอนุภาคได้ในช่วง $2.5\ \text{nm}$ ถึง $3\ \mu\text{m}$ ทำการเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาค PSL ขนาด $0.1\ \mu\text{m}$ และอนุภาคเกลือขนาด $0.264\ \mu\text{m}$ MMAD โดยปรับ ความเข้มข้นจำนวนอนุภาคที่ชุดวาล์วปรับความเข้มข้นในช่วง 0–12,000 particles/cm³ แล้วนำค่าที่ได้จากการวัดมาเปรียบเทียบเพื่อหาสหสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear correlation) ระหว่าง 2 เทคนิคการนับจำนวนอนุภาค **รูปที่ 9** แสดงการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากาก N95ทางการแพทย์ ที่ได้ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง ในการทดสอบใช้หน้ากากอนามัยทางการแพทย์ตาม มอก 2424-2562 และหน้ากาก N95ทางการแพทย์ ตาม มอก 2480-2563 ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดจำนวน 5 ตัวอย่าง หรือ 5 ยี่ห้อ ที่ได้รับรองมาตรฐานจาก มอก และ อย จากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (FDA) ประเทศสหรัฐอเมริกาหรือได้มาตรฐาน ASTM F2100 ประเทศสหรัฐอเมริกา หรือ ได้รับการรับรองให้นำเข้า/ผลิต/

จำหน่ายจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา หรือ หน้ากากที่มีเอกสารผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการที่น่าเชื่อถือ โดยซื้อมาจำนวน 1 กล่องต่อตัวอย่าง ใน 1 กล่องบรรจุ 50 ชิ้น และในแต่ละกล่องได้สุ่มตัวอย่างมา 10 ชิ้นสำหรับนำมาทดสอบ เพื่อใช้เป็นค่าเปรียบเทียบในการทดสอบทำการนับจำนวนอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือทั้งก่อนและหลังผ่านแผ่นกรองหน้ากากตัวอย่างพร้อมกันทั้ง 2

เครื่อง จากนั้นนำความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคที่ได้จากการวัดมาคำนวณหาประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคตามสมการที่ (1) เพื่อเปรียบเทียบหาค่าความต่างระหว่าง 2 หลักการนับจำนวนอนุภาค สำหรับผลของอัตราการไหลอากาศต่อประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL ขนาด $0.1\ \mu\text{m}$ และอนุภาคเกลือขนาด $0.264\ \mu\text{m}$ ของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากาก N95 ทางกรแพทย์ ตามลำดับ



รูปที่ 8 อุปกรณ์ทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากาก N95ทางการแพทย์ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง



รูปที่ 9 แผนภาพทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากาก N95ทางการแพทย์ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง

ในการวิจัยนี้ได้มีการทดสอบโดยการปรับอัตราการไหลอากาศ 2 ช่วงคือ 28.3 และ 85 L/min โดยในแต่ละการทดสอบ

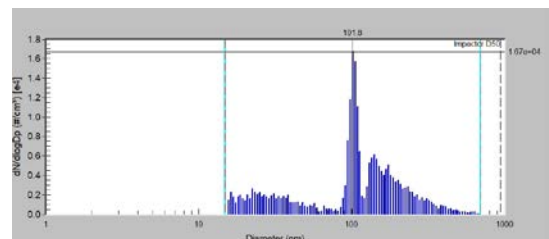
จะทำการทดสอบ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง โดยใช้เวลาทดสอบ 1 นาทีต่อ 1 ชิ้นการทดสอบ โดยงานวิจัยนี้ได้มุ่ง เน้นทดสอบตาม

มาตรฐาน มอก 2424-2562 ดังนั้น การทดสอบจึงต้องทดสอบกับหน้ากากอนามัยทางการแพทย์เท่านั้น และทดสอบตามมาตรฐาน มอก 2480-2562 จึงต้องทดสอบกับหน้ากาก N95 ทางทางการแพทย์เท่านั้น จะไม่มีการทดสอบกับหน้ากากชนิดอื่นนอกเหนือจากมาตรฐาน มอก ของหน้ากากทั้ง 2 แบบนี้ เนื่องจากในการออกแบบพื้นที่ทดสอบ (Test area) จะออกแบบพื้นที่ทดสอบตามมาตรฐาน มอก ทั้ง 2 กำหนด หากเป็นหน้ากากชนิดอื่นจะมีความแตกต่างกับพื้นที่ทดสอบและมีความหลากหลายมากเกินไป อีกอย่างการทดสอบต้องใช้ตัวอย่างหลากหลายมากเกินจะทำให้เกิดความแปรปรวนของข้อมูลสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ได้รับมาตรฐาน มอก และรับรองจาก อย. เป็นตัวอย่างในการทดสอบ อีกทั้งปัจจุบัน อย. และ มอก เข้ามาควบคุมและกำกับดูแลเรื่องคุณภาพดังนั้นหน้ากากที่มีขายหรือจำหน่ายในท้องตลาดจึงต้องมีมาตรฐานและการรับรองจาก อย. ซึ่งการซื้อหน้ากากที่ไม่มีการรับรอง หรือ ไม่มีคุณภาพมาใช้เป็นตัวอย่างในการทดสอบจึงหาได้ยากในปัจจุบัน ดังนั้นในการเลือกสำหรับนำมาใช้ในการทดสอบหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ระดับ 2 ต้องมีประสิทธิภาพมากกว่าหรือเท่ากับ 95% และหน้ากาก N95 ทางทางการแพทย์ที่นำมาใช้ในการทดสอบ ต้องมีประสิทธิภาพมากกว่าหรือเท่ากับ 98%

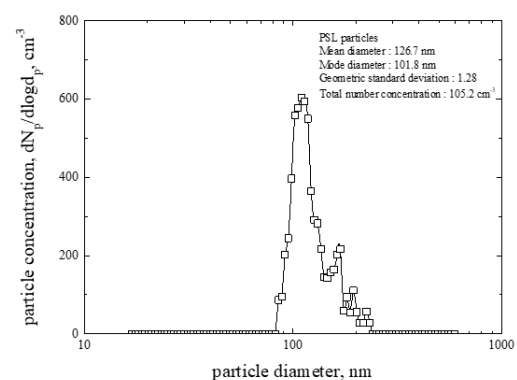
4. ผลการทดลอง

รูปที่ 10 แสดงการกระจายขนาดอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือ จากรูปที่ 10(ก) พบว่าอนุภาค PSL ขนาด $0.1\ \mu\text{m}$ ที่ออกจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ของเครื่องต้นแบบมีเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (Median diameter) เท่ากับ $0.107\ \mu\text{m}$ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Mean diameter) เท่ากับ $0.128\ \mu\text{m}$ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometric mean diameter) เท่ากับ $0.096\ \mu\text{m}$ เส้นผ่านศูนย์กลางฐานนิยม (Mode diameter) เท่ากับ $0.101\ \mu\text{m}$ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิตเท่ากับ 2.29 และในรูปยังพบอนุภาคตกค้าง (Residual particles) ที่เป็นอนุภาคแร่ธาตุของน้ำขนาดเล็กกว่า $0.1\ \mu\text{m}$ และอนุภาคประจุทวีคูณขนาดใหญ่กว่า $0.1\ \mu\text{m}$ เจือปนกับอนุภาค PSL โดยอนุภาคตกค้างและอนุภาคประจุทวีคูณของอนุภาค PSL มีผลต่อประสิทธิภาพในการ

กรองอนุภาคของหน้า ถากอนามัยทางการแพทย์จึงจำเป็นต้องมีการคัดแยกขนาดก่อนทำการนับจำนวนอนุภาค รูปที่ 10 (ข) แสดงการกระจายขนาดอนุภาค PSL ขนาด $0.1\ \mu\text{m}$ ที่ผ่านการคัดแยกขนาดด้วยเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย เท่ากับ $0.126\ \mu\text{m}$ เส้นผ่านศูนย์กลางฐานนิยม เท่ากับ $0.101\ \mu\text{m}$ และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิต เท่ากับ 1.28 ซึ่งจะทำให้ได้ขนาดอนุภาค PSL ที่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM F2299-03 กำหนดคือมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิตน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.61 ส่วนการกระจายขนาดอนุภาคเกลือที่ออกจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ของเครื่องต้นแบบในรูปที่ 11(ก)-(ข) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (CMD) ของอนุภาคเกลือเท่ากับ $57.4\ \text{nm}$ หรือ $0.0574\ \mu\text{m}$ และเมื่อแปลง CMD ไปเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์มัธยฐานมวล (MMAD) จะเท่ากับ $0.264\ \mu\text{m}$ โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิตของ CMD และ MMAD ประมาณ 1.83 และ 1.84 ตามลำดับ ซึ่งเป็นการกระจายขนาดอนุภาค NaCl ที่ได้

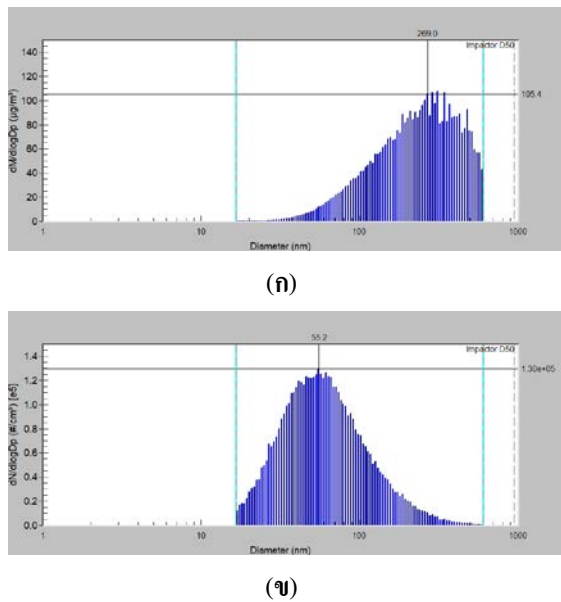


(ก)



(ข)

รูปที่ 10 การกระจายขนาดอนุภาค PSL (ก) อนุภาค PSL ที่ออกจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (ข) อนุภาค PSL ขนาด $0.1\ \mu\text{m}$ ที่คัดแยกด้วยเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค

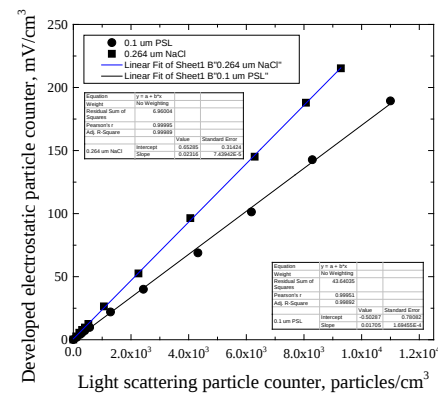


รูปที่ 11 การกระจายขนาดอนุภาคเกลือ NaCl ที่ออก
จากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (ก) 0.264
μm (MMAD) (ข) 0.0574 μm (CMD)

เป็นตามข้อกำหนดของมาตรฐาน 42 CFR 84 คืออนุภาค
NaCl ต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (CMD) เท่ากับ
 $0.075 \pm 0.02 \mu\text{m}$ หรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศ
พลศาสตร์มัธยฐานมวล (MMAD) ประมาณ $0.3 \mu\text{m}$ และมีค่า
เบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิต ไม่เกินกว่า 1.86 ดังแสดงตาม
ตารางที่ 1

รูปที่ 12 แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณในหน่วย mV
ของเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้น
และความเข้มข้นเชิงจำนวนในหน่วย particles/cm³ ของเครื่อง
นับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง จากรูปพบว่าสัญญาณใน
หน่วย mV และความเข้มข้นเชิงจำนวนในหน่วย particles/cm³
ของอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือมีความสัมพันธ์กันได้ดี
แบบเชิงเส้น โดยอนุภาค PSL มีค่าสัญญาณ mV/cm³ ในช่วง
0.12–189.4 mV/cm³ สอดคล้องกับความเข้มข้นเชิงจำนวนใน
หน่วย particles/cm³ ในช่วง 0–11,000 particles/cm³ มีค่า
Intercept เท่ากับ -0.50288, Slope เท่ากับ 0.01705 และ R²
เท่ากับ 0.99892 และสัดส่วนระหว่าง particles/cm³ ต่อ
mV/cm³ เฉลี่ยเท่ากับ 58.42 ซึ่งหมายความว่า 1 mV/cm³ มีค่า
เท่ากับ 58.42 particles/cm³ สำหรับอนุภาคเกลือมีค่าสัญญาณ
mV/cm³ ในช่วง 0.16–215.2 mV สอดคล้องกับความเข้มข้น

เชิงจำนวนในหน่วย particles/cm³ ในช่วง 0–9,280
particles/cm³ มีค่า Intercept เท่ากับ 0.65285, Slope เท่ากับ
0.02316 และ R² เท่ากับ 0.99989 และสัดส่วนระหว่าง
particles/cm³ ต่อ mV/cm³ เฉลี่ยเท่ากับ 43.23 ซึ่งหมายความว่า
1 mV/cm³ มีค่าเท่ากับ 43.23 particles/cm³ โดย Slope ของ
สัญญาณ mV/cm³ ที่แตกต่างกันระหว่างอนุภาค PSL และ
อนุภาคเกลือ เนื่องจากเป็นผลของประสิทธิภาพการอัดประจุ
ต่อขนาดอนุภาคและการสูญเสียภายในเครื่องอัดประจุอนุภาค
และเครื่องนับจำนวนอนุภาคของอนุภาคแต่ละขนาดมีความ
แตกต่างกัน ซึ่งในการคำนวณค่าประสิทธิภาพของ
เครื่องต้นแบบได้คิดรวมค่าประสิทธิภาพการอัดประจุและ
การสูญเสียของอนุภาคในระบบไว้แล้ว



รูปที่ 12 ผลเปรียบเทียบการนับอนุภาคระหว่างตัวนับอนุภาค
ไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นกับตัวนับอนุภาคแบบกระเจิงแสง

ตารางที่ 2–3 แสดงผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการ
กรองอนุภาค PSL ขนาด $0.1 \mu\text{m}$ และอนุภาคเกลือขนาด
 $0.264 \mu\text{m}$ ของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากาก
N95 ทางกายภาพ ตามลำดับ ที่ได้ระหว่างเครื่องนับ
จำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวน
อนุภาคแบบกระเจิงแสงโดยทำการทดสอบที่อัตราการไหล
 28.3 L/min จากผลในตารางที่ 2 พบว่าค่าความเข้มข้นเชิง
จำนวนของอนุภาค PSL ก่อนและหลังผ่านหน้ากากอนามัย
ทางการแพทย์ที่วัดได้จากเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบ
กระเจิงแสงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11,000 และ 173.20
particles/cm³ ตามลำดับ เมื่อนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพ
ในการกรองอนุภาคตามสมการที่ (1) ได้ประสิทธิภาพใน

การกรองอนุภาคเท่ากับ 98.43% สำหรับเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นวัดได้สัญญาณ mV/cm³ ก่อนและหลังผ่านหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 187.38 และ 3.60 mV/cm³ ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 98.08% แสดงให้เห็นค่าความแตกต่างของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงประมาณ 0.35% สำหรับอนุภาคเกลือ 0.264 μm ในตารางที่ 3 พบว่าค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคเกลือก่อนและหลังผ่านหน้ากาก N95 ทางกายภาพที่วัดได้จากเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10,200 และ 271.20 particles/cm³ ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 97.34% สำหรับเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นวัดได้สัญญาณ mV/cm³ ก่อนและหลังผ่านหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 205.14 และ 4.50 mV/cm³ ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 97.81% แสดงให้เห็นค่าความแตกต่างของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเกลือขนาด 0.264 μm ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องนับ

จำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงประมาณ -0.47% โดยความแตกต่างของค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงมีความแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างของเทคนิคการวัดอนุภาค ในเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงจะผลิตสัญญาณแสงรังสีหักเหที่สามารถตรวจจับอนุภาคได้ การกระเจิงแสงมีความไวในการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหที่ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคหรือรูปร่างอนุภาคและมุมการกระเจิงแสง ถ้าอนุภาคที่มีรูปร่างหรือรูปทรงต่างกันจะให้ค่าการกระเจิงแสงหรือดัชนีการหักเหต่างกัน ซึ่งค่าการกระเจิงแสงจะมีผลต่อจำนวนของอนุภาคที่นับได้ ส่วนเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตเป็นการอาศัยหลักการวัดประจุไฟฟ้าของอนุภาคและแปลงค่าประจุไฟฟ้าของอนุภาคไปเป็นจำนวนอนุภาค ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดต่างกันก็จะมีจำนวนประจุไฟฟ้าต่างกันหรืออนุภาคขนาดเดียวกันแต่รูปร่างหรือรูปทรงต่างกัน เช่น ทรงกลม ทรงกระบอกหรือไม่เป็นทรงกลม ก็จะมีประจุไฟฟ้าต่ออนุภาคที่ต่างกัน เมื่อมีประจุไฟฟ้าต่ออนุภาคต่างกันอาจมีผลต่อจำนวนอนุภาคที่นับได้จากวิธีการทางไฟฟ้าสถิตและทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง 2 หลักการวัดนี้ขึ้นได้ [20]

ตารางที่ 2 ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm ของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์จำนวน 5 ตัวอย่างที่ได้ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง

ตัวอย่างทดสอบ	เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง			เครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้น			ความแตกต่าง (%)
	ก่อนผ่าน	หลังผ่าน	ประสิทธิภาพ	ก่อนผ่าน	หลังผ่าน	ประสิทธิภาพ	
	(Particles/cm ³)	(Particles/cm ³)	(%)	(mV/cm ³)	(mV/cm ³)	(%)	
1	10700.00	172.00	98.39	187.60	3.20	98.29	0.10
2	11300.00	171.00	98.49	189.50	3.70	98.05	0.44
3	11100.00	178.00	98.40	188.30	3.80	97.98	0.41
4	11000.00	175.00	98.41	182.50	3.81	97.91	0.50
5	10900.00	170.00	98.44	189.00	3.50	98.15	0.29
เฉลี่ย	11000.00	173.20	98.43	187.38	3.60	98.08	0.35

ตารางที่ 3 ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเกลือ NaCl ขนาด $0.264\ \mu\text{m}$ ของหน้ากาก N95 ทางการแพทย์ จำนวน 5 ตัวอย่างที่ได้ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง

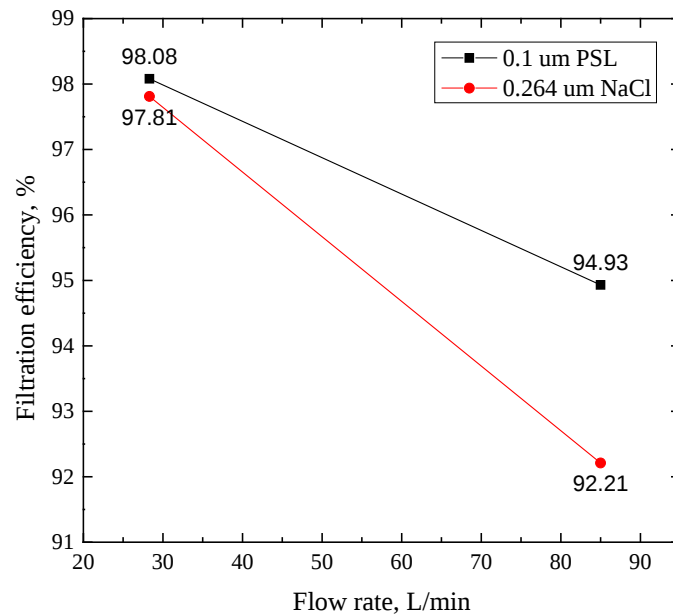
ตัวอย่างทดสอบ	เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง			เครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้น			ความแตกต่าง(%)
	ก่อนผ่าน	หลังผ่าน	ประสิทธิภาพ	ก่อนผ่าน	หลังผ่าน	ประสิทธิภาพ	
	(Particles/cm ³)	(Particles/cm ³)	(%)	(mV/cm ³)	(mV/cm ³)	(%)	
1	10100.00	271.00	97.32	202.10	4.30	97.87	-0.56
2	10000.00	270.00	97.30	204.40	4.78	97.66	-0.36
3	10200.00	273.00	97.32	209.10	4.51	97.84	-0.52
4	10300.00	270.00	97.38	204.80	4.60	97.75	-0.38
5	10400.00	272.00	97.38	205.30	4.30	97.91	-0.52
เฉลี่ย	10200.00	271.20	97.34	205.14	4.50	97.81	-0.47

รูปที่ 13 แสดงประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL ขนาด $0.1\ \mu\text{m}$ และอนุภาคเกลือขนาด $0.264\ \mu\text{m}$ ของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากาก N95 ทางการแพทย์ ที่ได้ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นที่อัตราการไหลอากาศ 28.3 และ 85 L/min จากรูปพบว่าค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคมีค่าลดลงที่อัตราการไหลที่สูงขึ้นเนื่องจากเมื่ออัตราการไหลอากาศสูงขึ้นความเร็วด้านหน้า (Face velocity) จะสูงขึ้นจะส่งผลให้มีโมเมนตัมหรือแรงเฉื่อยสูงจึงทำให้อนุภาคสามารถผ่านทะลุได้ง่าย เนื่องจากอนุภาคสามารถเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างเส้นใยที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบได้ง่ายหลายทิศทาง [22] โดยที่อัตราการไหลอากาศ 28.3 L/min อนุภาค PSL ขนาด $0.1\ \mu\text{m}$ ได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 98.08 % ส่วนอนุภาคเกลือขนาด $0.264\ \mu\text{m}$ ได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 97.81 % และที่อัตราการไหลอากาศ 85 L/min อนุภาค PSL ขนาด $0.1\ \mu\text{m}$ ได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 94.93 % ส่วนอนุภาคเกลือขนาด $0.264\ \mu\text{m}$ ได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 92.21 % จากรูปยังสังเกตได้ว่าอนุภาค $0.1\ \mu\text{m}$ มีประสิทธิภาพในการกรองสูงกว่าอนุภาคเกลือขนาด $0.264\ \mu\text{m}$ เนื่องจากประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของแผ่นกรองแบบนอนวูฟเวนจะต่ำในช่วงอนุภาคขนาด 0.1 ถึง $0.5\ \mu\text{m}$ เนื่องจากเป็นช่วงขนาดอนุภาคที่กลไกการแพร่กระจายการกระเจิงด้วยแรงเฉื่อยและการสัดกันดักกรองได้ต่ำ โดยขนาดอนุภาคที่สามารถผ่านทะลุแผ่นกรองแบบนอนวูฟเวน

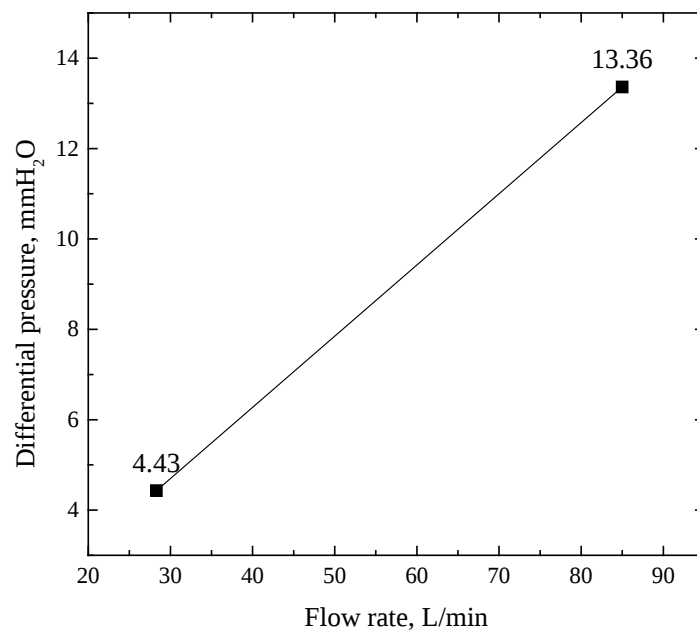
ได้ดีที่สุด (Most penetrating particle size) คืออนุภาคขนาด $0.3\ \mu\text{m}$ [22] จึงทำให้อนุภาคเกลือขนาด $0.264\ \mu\text{m}$ ผ่านทะลุแผ่นกรองได้ง่ายกว่าอนุภาค PSL นอกจากนี้รูปร่างของอนุภาค (Particle shape) ยังมีผลต่อประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคอีกด้วย โดยที่อนุภาค PSL จะเป็นอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ที่เป็นรูปทรงกลม ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลมจะมีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ฉายภาพทรงกลมเทียบเท่า (Equivalent sphere projected area diameter) ส่วนอนุภาคเกลือจะเป็นอนุภาคที่มีลักษณะเป็นผลึกไม่เป็นรูปทรงกลม ซึ่งอนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลมจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ฉายภาพทรงกลมเทียบเท่า โดยเมื่อเทียบขนาดทรงกลมปริมาตรเทียบเท่า (Equivalent volume sphere) ระหว่างอนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลมและอนุภาคทรงกลมจะมีค่าที่ต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยของรูปร่างของอนุภาค (Shape factor) โดยที่อนุภาคที่มีลักษณะไม่เป็นทรงกลมจะมีผลกระทบกับแรงเสียดลาก (Drag force) ในพื้นที่ผิวที่ต่างกัน ส่งผลให้ความสามารถเคลื่อนตัวเชิงอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic motion) ต่างกับอนุภาคที่เป็นทรงกลม [22] จึงมีผลต่อกลไกการกักเก็บและการสัดกันระหว่างอนุภาคกับเส้นใยของแผ่นกรองส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคทั้ง 2 ชนิดนี้แตกต่างกัน **รูปที่ 14** แสดงค่าความต่างของความดันของหน้ากากอนามัย ตัวอย่างที่อัตราการไหลอากาศ 28.3 และ 85 L/min จากรูป

พบว่าค่าความต่างของความดันของน้ำกากมีค่าสูงขึ้นตาม อัตราการไหลอากาศที่สูงขึ้น เนื่องจากที่อัตราการไหลสูงมีผล ทำให้ความเร็วด้านหน้าของแผ่นกรองสูงขึ้นและทำให้เกิด การต้านการไหลของอากาศที่แผ่นกรองน้ำกากสูงขึ้นตาม

โดยที่อัตราการไหลอากาศ 28.3 L/min มีค่าความต่างของความ ดันเท่ากับ 4.43 mmH₂O และที่อัตราการไหลอากาศ 85 L/min มีค่าความต่างของความดันเท่ากับ 13.36 mmH₂O



รูปที่ 13 ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm และอนุภาคเกลือขนาด 0.264 μm ของน้ำกากอนามัยทางการแพทย์และน้ำกาก N95ทางการแพทย์ ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นที่อัตราการไหลอากาศ 28.3 และ 85 L/min



รูปที่ 14 ค่าความต่างของความดันของน้ำกากอนามัยตัวอย่างที่อัตราการไหลอากาศ 28.3 และ 85 L/min

5. อภิปรายผลและสรุป

ในบทความนี้ได้นำเสนอการพัฒนาและทดสอบต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองอัตโนมัติที่ใช้ตัวนับอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตสำหรับหาค่าการผ่านทะลุหรือประสิทธิภาพของตัวกรองและความดันตกของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากาก N95 ทางทางการแพทย์ต้นแบบของเครื่องทดสอบตัวกรองอัตโนมัติถูกสร้างและทดสอบเชิงการทดลองตามมาตรฐาน มอก.2424-2562 และ มอก.2480-2562 ต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอนุภาคละอองลอยตัวทำให้อนุภาคเป็นกลาง ถึงผสม ห้องทดสอบ ตัวนับจำนวนอนุภาค ตัววัดความดันแตกต่าง ตัววัดอากาศ ตัววัดอัตราการไหล และชุดประมวลผลและแสดงผลการทดสอบ ในเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นสามารถสร้างอนุภาค PSL และ NaCl ในช่วงความเข้มข้นเชิงจำนวนตั้งแต่ 1 ถึง 20,000 particles/cm³ ต้นแบบได้ออกแบบให้ทำงานที่อัตราการไหลอากาศประมาณ 5 ถึง 100 L/min ที่ประสิทธิภาพการกรองอนุภาควัดได้สูงถึง 99.999% ในการศึกษาได้เปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาคระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองนี้กับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง โดยได้แบ่งเป็น 2 การทดลอง คือ 1) การเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ที่แต่ละความเข้มข้นจำนวนของอนุภาค และ 2) การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL และอนุภาคเกลือระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าค่าประสิทธิภาพการกรองอนุภาคมีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าความแตกต่างของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงประมาณ 0.35% และค่าความแตกต่างของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเกลือขนาด 0.264 μm ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิง

แสงประมาณ -0.47% และมีการทดสอบผลของอัตราการไหลอากาศต่อประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค PSL ขนาด 0.1 μm และอนุภาคเกลือขนาด 0.264 μm ของหน้ากากอนามัยที่อัตราการไหลอากาศ 2 ช่วงคือ 28.3 และ 85 L/min พบว่าค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลที่สูงขึ้นและค่าความต่างของความดันของหน้ากากมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลอากาศที่สูงขึ้น จากผลการทดสอบดังกล่าวทำให้เห็นถึงค่าการทดสอบที่ใกล้เคียงกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงของต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นในการหาค่าการผ่านทะลุหรือประสิทธิภาพการกรองของอนุภาคและความดันตกของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์และหน้ากาก N95ทางการแพทย์ แสดงให้เห็นว่าต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้เป็นเครื่องทดสอบตัวกรองแบบอัตโนมัติได้เทียบเท่ากับเครื่องทดสอบตัวกรองที่ใช้หลักการนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM F2299-03 และ 42 CFR 84 ได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านชีววิทยาศาสตร์ (TCELS) ที่สนับสนุนเงินทุนวิจัยภายใต้โครงการวิจัยรหัส TC-A (ERP) 15/2564 และผู้วิจัยขออุทิศส่วนบุญส่วนกุศลจากผลงานวิจัยนี้ให้กับนางเอ๊ย กันต๊ะ ผู้ล่วงลับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] *COVID-19 situation report*, Department of Disease Control, May. 18, 2021. [Online]. Available: <https://covid19.ddc.moph.go.th/>
- [2] K. O'Dowd, K. M. Nair, P. Forouzandeh, S. Mathew, J. Grant, R. Moran, J. Bartlett, J. Bird and S. C. Pillai, "Face Masks and Respirators in the Fight Against the COVID-19 Pandemic: A Review of Current Materials, Advances and Future Perspectives," *Materials*, vol. 13, no. 15, 2020, Art. no. 3363, doi: 10.3390/ma13153363.

- [3] N. El-Atab, N. Qaiser, H. Badghaish, S. F. Shaikh and M. M. Hussain, "Flexible Nanoporous Template for the Design and Development of Reusable Anti-COVID-19 Hydrophobic Face Masks," *ACS Nano*, vol. 14, no. 6, pp. 7659–7665, 2020, doi: 10.1021/acsnano.0c03976.
- [4] E. E. Sickbert-Bennett, J. M. Samet, P. W. Clapp, H. Chen, J. Berntsen, K. L. Zeman, H. Tong, D. J. Weber and W. D. Bennett, "Filtration Efficiency of Hospital Face Mask Alternatives Available for Use During the COVID-19 Pandemic," *JAMA Internal Medicine*, vol. 180, no. 12, pp.1607–1612, 2020, doi: 10.1001/jamainternmed.2020.4221.
- [5] A. Konda, A. Prakash, G. A. Moss, M. Schmoldt, G. D. Grant and S. Guha, "Aerosol Filtration Efficiency of Common Fabrics Used in Respiratory Cloth Masks," *ACS Nano*, vol. 14, no. 5, pp.6339–6347, 2020, doi: 10.1021/acsnano.0c03252.
- [6] O. Aydin, B. Emon, S. Cheng, L. Hong, L. P. Chamorro and M. T. A. Saif, "Performance of Fabrics for Home-made Masks Against the Spread of COVID-19 through Droplets: A Quantitative Mechanistic Study," *Extreme Mechanics Letters*, vol. 40, 2020, Art. no. 100924, doi: 10.1016/j.eml.2020.100924.
- [7] S. Rengasamy, B. Eimer and R. E. Shaffer, "Simple Respiratory Protection—Evaluation of the Filtration Performance of Cloth Masks and Common Fabric Materials Against 20–1000 nm Size Particles," *The Annals of Occupational Hygiene*, vol. 54, no. 7, pp.789–798, 2010, doi: 10.1093/annhyg/meq044.
- [8] H. Whiley, T. P. Keerthirathne, M. A. Nisar, M. A. F. White and K. E. Ross, "Viral Filtration Efficiency of Fabric Masks Compared with Surgical and N95 Masks," *Pathogens*, vol. 9, no. 9, 2020, Art. no. 762, doi: 10.3390/pathogens9090762.
- [9] C. M. Dugdale and R. P. Walensky, "Filtration Efficiency, Effectiveness, and Availability of N95 Face Masks for COVID-19 Prevention," *JAMA Intern Medicine*, vol. 180, no. 12, pp.1612–1613, 2020, doi: 10.1001/jamainternmed.2020.4218.
- [10] P. Intra, "Filtration Efficiency of Surgical Masks, Fabric Masks and N95/KN95/FFP1/FFP2 Masks Available for Use during the COVID-19 Pandemic in Thailand," *Thai Science and Technology Journal (TSTJ)*, vol.29, no.5, pp.904–918, 2021.
- [11] Automated Filter Tester Model 8130A, TSI Inc., Jan. 12, 2022. [Online]. Available: <https://tsi.com/products/filter-testers/automated-filter-tester-8130a/>
- [12] Automated Filter Tester Model 3160, TSI Inc., Jan. 12, 2022. [Online]. Available: <https://tsi.com/products/filter-testers/automated-filter-tester-3160/>
- [13] G506 Mask Automatic Filter Performance Tester, Qinsun Instruments Co., Ltd., Jan. 12, 2022. [Online]. Available: <http://www.testerinlab.com/products/Others/2018/0316/200.html>
- [14] 42 CFR Part 84 Respiratory Protective Devices, National Institute for Occupational Safety and Health, Mar. 4, 1997. [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/niosh/npptl/topics/respirators/pt84abs2.html>
- [15] Standard Test Method for Determining the Initial Efficiency of Materials Used in Medical Face Masks to Penetration by Particulates Using Latex Spheres, ASTM F2299/F2299M-03(2017), ASTM International, West Conshohocken, PA. USA, 2017.
- [16] Standard Specification for Performance of Materials Used in Medical Face Masks, ASTM F2100-19e1, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2019.

- [17] B. Y. H. Liu and D. Y. H. Pui, "Equilibrium bipolar charge distribution of aerosols," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol.49, no.2, pp.305–312, 1974, doi: 10.1016/0021-9797(74)90366-X.
- [18] P. Intra and N. Tippayawong, "Performance evaluation of an electrometer system for ion and aerosol charge measurements," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol.28, no.2, pp.527–530, 2011, doi: 10.1007/s11814-010-0378-1.
- [19] P. Intra, A. Yawootti and N. Tippayawong, "An electrostatic sensor for continuous monitoring of particulate air pollution," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 30, no. 12, pp. 2205–2212, 2013, doi: 10.1007/s11814-013-0168-7.
- [20] P. Intra and N. Tippayawong, "Development and evaluation of a Faraday cup electrometer for measuring and sampling atmospheric ions and charged aerosols," *Particulate Science and Technology*, vol. 33, no. 3, pp. 257–263, 2015, doi: 10.1080/02726351.2014.952392.
- [21] P. Intra, V. Asanavijit and W. Rattanachan, "Evaluation of the Particle Filtration Efficiency of Surgical Masks by Electrostatic and Light Scattering Particle Counters," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol.39, no. 2, pp. 53–69, 2022.
- [22] K. Willeke and P. A. Baron, "Filter collection," in *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*, New York, USA: John Wiley & Sons, 1993, ch. 10, pp. 179–205.
- [23] P. Intra, and N. Tippayawong, "Experimental characterization of a short electrical mobility spectrometer for aerosol size classification," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 26, no. 6, pp. 1770–1777, 2009, doi: 10.1007/s11814-009-0261-0.
- [24] P. Intra, and N. Tippayawong, "Development of a fast-response, high-resolution electrical mobility spectrometer," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 28, no. 1, pp. 279–286, 2011, doi: 10.1007/s11814-010-0326-0.

**การศึกษาความเป็นไปได้ในการติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
แบบไฮบริด สำหรับอาคารที่พักอาศัย กรณีศึกษา อพาร์ทเมนต์ขนาด 26 ห้อง**
**The Feasibility Study of Installing Hybrid Solar PV Systems for Residential
Building: A Case Study of an Apartment with 26 Rooms**

ชาร์ฟ พงษ์วิจารณ์^{1,*} และ สกนธ์ คล่องบุญจิต¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Charif Pongvijarn^{1,*} and Sakon Klongboonjit¹

¹ Department of Industrial Engineering, School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

*Corresponding Author E-mail: charif.pj@gmail.com

Received: Feb 20, 2022; **Revised:** Aug 10, 2022; **Accepted:** Aug 16, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งานระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดสำหรับอพาร์ทเมนต์แห่งหนึ่ง ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาในส่วนของ การออกแบบทางด้านเทคนิค ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ และผลประโยชน์จากการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบสายส่ง โดยศึกษาอพาร์ทเมนต์ที่ไม่ได้ติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์กับอพาร์ทเมนต์ที่ติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด ซึ่งระบบที่นำมาใช้งานนั้นสามารถทดแทนความต้องการพลังงานไฟฟ้าของอพาร์ทเมนต์ได้ 2,207.40 MWh ตลอดอายุโครงการ ช่วยลดก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 1,256.45 tCO₂eq และจากการวิเคราะห์ผลต่างของมูลค่าปัจจุบันสุทธิโดยใช้วิธีความอ่อนไหวทางการเงิน ที่ค่า MARR อยู่ที่ 5.50–7.50% ผลต่างของมูลค่าปัจจุบันสุทธิระหว่างทั้งสองโครงการอยู่ที่ 104,408.09–799,620.76 บาท โดยกรณีที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด คือกรณีที่ MARR เท่ากับ 5.50% ต่อปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิอยู่ที่ 12,621,236.64 บาท และระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 21 ปี 4 เดือน จากการประเมินทางการเงินแสดงให้เห็นว่า โครงการอพาร์ทเมนต์ที่มีระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด นั้นมีความเป็นไปได้ในการลงทุน เนื่องจากการลงทุนที่สามารถสร้างผลกำไรตอบแทนได้ แต่ในด้านการลงทุนจริงผู้ลงทุนอาจเลือกที่จะไม่ลงทุนในระบบไฮบริด เนื่องจากระยะเวลาคืนทุนยังค่อนข้างนาน

คำสำคัญ: การศึกษาความเป็นไปได้, ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด, อพาร์ทเมนต์, การลดก๊าซเรือนกระจก, การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

Abstract

This research was about the feasibility study on the applications of hybrid solar PV system for an apartment and aimed to study the parts of the technical design, the economic values, and the benefits of electricity consumption reduction from transmission lines by examining the apartment without solar PV system and the apartment with hybrid solar PV system, which could replace the electricity demand of the apartment for 2,207.40 MWh over the cycle of its project life. It could reduce greenhouse gas emissions

from electricity generation by 1,256.45 tCO₂ eq. According to the analysis of the differences in net present value using the financial sensitivity analysis with MARR of 5.50–7.50%, it showed that their differences in net present value between both projects were 104,408.09 to 799,620.76 baht. The case with MARR of 5.50% per year informed the best calculation results with net present value of 12,621,236.64 baht and payback period of 21 years and 4 months. With financial evaluation, it showed that the apartment with hybrid solar PV system was feasible to invest since it could be the profitable investment. In terms of investment, investors might not invest in the hybrid solar PV system due to its long payback period.

Keywords: Feasibility study, Hybrid solar PV system, Apartment, Greenhouse Gas Emission Reduction, Economic Valuation Assessment

1. บทนำ

ในปัจจุบันปัญหาและผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ อันเนื่องมาจากการกระทำของมนุษย์ที่สร้างก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas, GHG) นั้น ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ซึ่งจากรายงานความก้าวหน้าราย 2 ปี ฉบับที่ 3 ของประเทศไทย (Third Biennial Update Report) ที่รายงานต่อ UNFCCC เมื่อเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 [1] พบว่า ในปี พ.ศ. 2559 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากถึง 354.36 MtCO₂eq

จากรายงานดุลภาพพลังงานของประเทศไทย (Energy Balance of Thailand) ปี พ.ศ. 2563 แสดงให้เห็นว่าสถานการณ์การใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยในภาคพาณิชย์กรรมและพักอาศัย มีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมกันสูงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งประเทศ [2] โดยทางเลือกหนึ่งที่ช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของอาคารและที่อยู่อาศัยได้นั้น คือ การช่วยกันลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบสายส่ง [3] ด้วยการนำพลังงานหมุนเวียนรูปแบบต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับอาคารและที่อยู่อาศัยในภาคกลางของประเทศไทย เนื่องจากแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2552) แสดงให้เห็นว่า ประเทศไทยมีศักยภาพด้านพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดระหว่างเดือนเมษายนและพฤษภาคมโดยมีค่าอยู่ในช่วง 20 ถึง 24 MJ / m² day และ 35.60% ของพื้นที่ทั้งหมดได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปีอยู่ในช่วง 18–19 MJ / m² day [4]

สำหรับระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบันมีด้วยกันอยู่ 3 ระบบหลัก ๆ ได้แก่

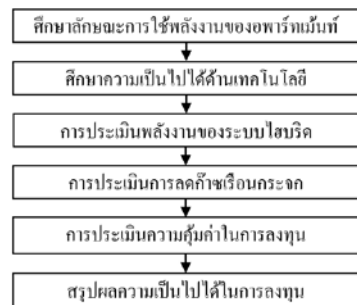
ระบบออนกริด ระบบออฟกริด และระบบไฮบริด ซึ่งสามารถนำมาใช้ประยุกต์ใช้งานได้อย่างแพร่หลาย ทั้งในส่วนของการพักอาศัย โรงงาน หมู่เกาะ และพื้นที่ห่างไกล เป็นต้น [5] งานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ด้านสิ่งแวดล้อม หรือการศึกษาในส่วนของความเป็นไปได้ทางเทคโนโลยี ในการนำเอาระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งาน [6–11] และสำหรับประเทศไทย ผู้วิจัยส่วนใหญ่จะทำการศึกษาความคุ้มค่าในการลงทุนระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบออนกริด สำหรับ อาคารที่พักอาศัย โรงงาน [12–16] และประเมินการลดก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ [17] ซึ่งยังไม่พบว่ามีการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานกับอพาร์ทเมนต์ เนื่องจากลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าของอพาร์ทเมนต์จะเกิดขึ้นในช่วงกลางวันเป็นหลัก เน้นนอนว่าระบบที่มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานลักษณะนี้ ควรจะเป็นระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด ยิ่งไปกว่านั้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบไฮบริด [18–20] ยังไม่มีงานใดที่นำระบบไฮบริดมาต่อใช้งานร่วมกับแบตเตอรี่และระบบสายส่ง

อย่างไรก็ดีในอดีตรบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด ยังมีข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีและต้นทุนของระบบที่สูงมาก ทำให้การลงทุนนั้นไม่เกิดความคุ้มค่า แต่เนื่องจากราคาของแบตเตอรี่ลิเทียมในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาปรับตัวลดลงถึง 89% (พ.ศ. 2563) [21] ทำให้ปัจจุบันการลงทุนในระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด สำหรับอพาร์ทเมนต์เป็นเรื่องที่น่าสนใจมากขึ้นจากข้อมูลข้างต้นจึงมีแนวคิดในการศึกษาความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ ในการนำระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด มาใช้งาน

กับอาร์ทเม้นท์ โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ อาร์ทเม้นท์ขนาด 26 ห้อง จะถูกใช้เป็นกรณีศึกษา ซึ่งมีจุดประสงค์หลักเพื่อศึกษาความคุ้มค่าในการลงทุนระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า และลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ

2. ขั้นตอนการศึกษาความเป็นไปได้

เพื่อทำการศึกษาความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด ในการศึกษาครั้งนี้จะดำเนินการตามขั้นตอนที่แสดงดังรูปที่ 1 และมีรายละเอียดการศึกษาดังนี้



รูปที่ 1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน

2.1 ศึกษาลักษณะการใช้พลังงานของอาร์ทเม้นท์

ในขั้นแรก จะทำการศึกษาข้อมูลลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาร์ทเม้นท์ โดยใช้ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าย้อนหลังรายเดือนตั้งแต่เดือน ม.ค. 62-ม.ค. 64 ในการตรวจสอบพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าและพยากรณ์ลักษณะการใช้พลังงานในระดับรายชั่วโมงตลอดทั้งปี เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด ที่เหมาะสมต่อการใช้งานสำหรับอาร์ทเม้นท์ในกรณีศึกษาต่อไป

2.2 ศึกษาความเป็นไปได้ด้านเทคโนโลยี [22-26]

ในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาความเป็นไปได้ด้านเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน แบตเตอรี่ และระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบไฮบริด โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ [22]

ในปัจจุบันมีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้อยู่ 3 ชนิดด้วย

กัน ได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตัลไลน์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์ และ แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง เพื่อให้สามารถเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน จำเป็นต้องทราบถึงคุณลักษณะของแผงแต่ละชนิดก่อน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตัลไลน์ หรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนผลึกเดี่ยว โดยทั่วไปแล้วแผงชนิดนี้มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 15-20% แต่มีราคาสูงที่สุดและประสิทธิภาพลดลงมากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

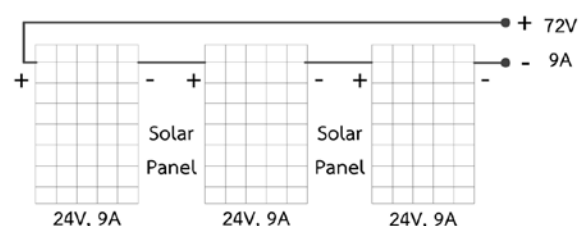
2. แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์ ทำจากซิลิคอน แต่ชนิดของซิลิคอนที่ใช้นั้นบริสุทธิ์ น้อยกว่าแบบโมโนคริสตัลไลน์ เล็กน้อย ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ 13-16% แต่มีราคาต่ำกว่าแผงแบบโมโนคริสตัลไลน์ และในทางเทคนิคแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์ทำงานได้ดีกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตัลไลน์ในอุณหภูมิสูง

3. แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง กระบวนการผลิตฟิล์มบางเป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างใหม่ และไม่ค่อยได้รับความนิยม มีประสิทธิภาพอยู่ที่ 8-10% เท่านั้นซึ่งหมายความว่าแผงชนิดนี้จะมีขนาดใหญ่เป็นสองเท่าและน้ำหนักมากกว่าแผงชนิดอื่น

2.2.2 การเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [22]

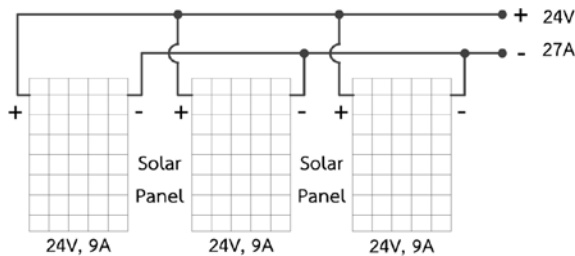
สำหรับวิธีการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อสร้างอาร์เรย์ สำหรับการรวบรวมพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า จำเป็นที่จะต้องทราบถึงวิธีการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์เสียก่อน ซึ่งปัจจุบันสามารถทำได้ 3 วิธีดังนี้

1. การต่อแบบอนุกรม เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งลักษณะการเชื่อมแบบอนุกรม แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม

2. การต่อการต่อแบบขนาน เพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งลักษณะการเชื่อมแบบขนาน แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน

3. การต่อแบบผสม ซึ่งจะเป็นการนำเอาการต่อแบบอนุกรมและแบบขนานมารวมกัน ในอาเรย์เดียวกัน เพื่อเพิ่มแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้ตามที่ต้องการ

2.2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [22–24]

เพื่อที่จะได้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงจำเป็นต้องทราบถึงปัจจัยหลัก ๆ ทั้ง 6 ปัจจัยที่ส่งผลถึงประสิทธิภาพการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เสียก่อน โดยแต่ละปัจจัยมีรายละเอียดดังนี้

1. ทิศทางและมุมเงย ในการติดตั้งแผงจะต้องคำนวณตามลักษณะพื้นที่ติดตั้งจริงว่าแผงควรจะติดตั้งให้มีความชันและความลาดเอียงจากพื้นท้องฟ้าและหันหน้าไปในทิศทางใด ซึ่งการยึดและติดตั้งแผงนั้นมีผลกระทบอย่างมากต่อประสิทธิภาพโดยรวมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถดูรายละเอียดการคำนวณได้จาก [23] หน้าที่ 65–79

2. ความเข้มแสงอาทิตย์ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสงหมายความว่า เมื่อความเข้มแสงสูงขึ้นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้นตาม ซึ่งความเข้มของแสงที่ใช้วัดเป็นมาตรฐาน คือความเข้มของแสงที่วัดบนพื้นโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่ง และวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก

3. อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นโดยทุก ๆ 1°C ที่เพิ่มขึ้นจากค่าอุณหภูมิ STC (Standard test condition) แรงดันไฟฟ้าจะลดลง ซึ่งส่งผลให้กำลังไฟฟ้า

สูงสุดลดลงด้วย ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของแผงโซลาร์เซลล์ และค่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากผลกระทบของอุณหภูมิ ได้ดังสมการที่ (1) และสมการที่ (2)

$$T_{cell} = T_{air} + \frac{NOCT - 20}{800 W/m^2} \times G \quad (1)$$

$$f_{temp} = [1 + (\eta \times (T_{cell} - T_{stc}))] \quad (2)$$

โดยที่

T_{cell} คืออุณหภูมิแผงโซลาร์เซลล์ (°C)

T_{air} คือ อุณหภูมิอากาศในพื้นที่ (°C)

$NOCT$ คือ อุณหภูมิทำงานแผงโซลาร์เซลล์ ที่ NOCT (°C)

G คือ ค่าความเข้มแสง (W/m^2)

f_{temp} คือ ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากผลกระทบของอุณหภูมิ

η คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกำลังไฟฟ้าสูงสุด (%/°C) สัญลักษณ์ซ้ำกัน

T_{stc} คือ อุณหภูมิแผงโซลาร์เซลล์ในสภาวะ (STC) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 °C

4. เงาบังแสง นอกเหนือจากการติดตั้งแผงที่เหมาะสมแล้ว เงาที่บังแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพียงบางส่วนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็ส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของทั้งระบบด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องจรรยาบรรณอนุกรมเมื่อมีเงาบังแผงเซลล์แสงอาทิตย์แม้เพียงแค่นึงแผงก็อาจจะทำให้กระแสไฟฟ้าในระบบหยุดไหลได้

5. ผลกระทบของฝุ่นที่ตกสะสมบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยปริมาณฝุ่นที่มากขึ้นส่งผลให้การส่องผ่านของแสงลดลง ซึ่งจากการศึกษาวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของฝุ่นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่า ที่ปริมาณฝุ่นตกสะสมเฉลี่ย 426 $mg/m^2/day$ สะสมเป็นระยะเวลา 60 วัน นั้นส่งผลให้การส่องผ่านแสงลดลง 11.15% ซึ่งฝุ่นที่ตกสะสมอยู่บนแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตัลไลน์ แบบโพลีคริสตัลไลน์ และแบบฟิล์มบาง ที่ 11.15% นั้นส่งผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถผลิตได้นั้นลดลง 5.79%, 6.03% และ 7.28% ตามลำดับ

6. ผลของอายุการใช้งาน โดยปกติประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะค่อย ๆ ลดลงตามอายุการใช้งาน โดยทั่วไปผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์มักเสนอการรับประกันที่การจ่ายพลังงานจะสูงกว่า 80% ในปีที่ 25

2.2.4 แบตเตอรี่ [22],[25]

ปกติแล้วระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะทำการผลิตกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน แต่เมื่อต้องการพลังงานไฟฟ้าในช่วงกลางคืนจำเป็นต้องใช้แบตเตอรี่เพื่อช่วยในการเก็บพลังงาน ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน พบว่าแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับใช้กับระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มี 2 ชนิดหลัก ๆ ดังนี้

1. แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต เป็นแบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมแต่มีราคาสูงกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรด มักพบใน รถยนต์ไฟฟ้า อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า ระบบโซล่าเซลล์ เนื่องจาก เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ให้ความปลอดภัยสูง ใช้งานได้ยาวนานมากด้วยเหตุนี้ต้นทุนตลอดอายุการใช้งานจึงค่อนข้างต่ำ สามารถรองรับการคายประจุสูงสุดได้ถึง 90 % ประสิทธิภาพการใช้พลังงานอยู่ที่ 99% ทำให้มีความเหมาะสมในการใช้งานกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์

2. แบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบดีพีซีเคิล เป็นแบตเตอรี่ที่มีความสามารถในการจ่ายพลังงานได้มากกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบธรรมดา โดยอยู่ที่ 45-75% อายุการใช้งานต่ำกว่าแบตเตอรี่ลิเทียม ราคาถูก น้ำหนักมาก มักจะใช้ระบบพลังงานแสงอาทิตย์หรือพลังงานทางเลือกอื่น ๆ

2.2.5 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบไฮบริด [26]

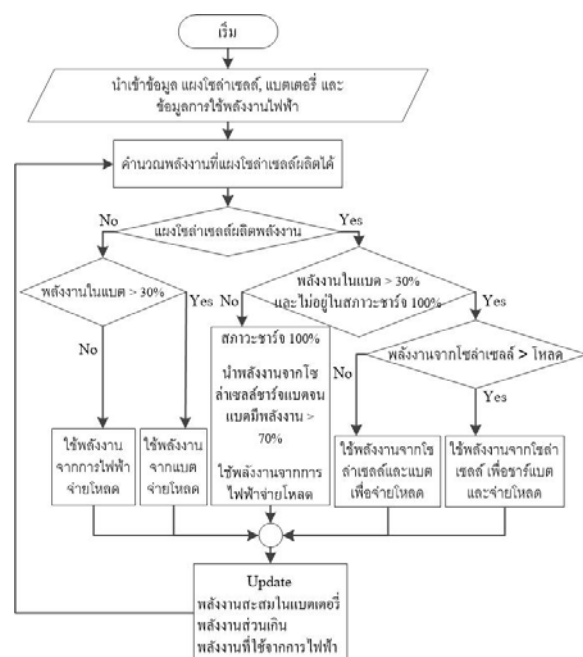
1. ลักษณะการทำงานในช่วงกลางวัน ในกรณีที่มีแสงอาทิตย์เพียงพอในการนำไปใช้งาน หากพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่นั้นไม่เพียงพอที่จะจ่ายให้กับโหลด พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะถูกนำไปชาร์จให้กับแบตเตอรี่และจ่ายโหลดไปพร้อมกัน แต่ถ้าหากมีแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ และพลังงานจากแบตเตอรี่ก็ยังไม่พร้อมใช้งาน ระบบก็จะทำการดึงพลังงานไฟฟ้าจากระบบสายส่งมาจ่ายเพิ่มเติม

2. ลักษณะการทำงานในช่วงกลางคืน ระบบโซล่าเซลล์จะไม่สามารถทำการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ ระบบไฮบริดจะนำเอากระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่มาใช้ก่อน หากยังไม่

เพียงพอระบบก็จะทำการดึงพลังงานไฟฟ้าจากระบบสายส่งมาจ่ายเพิ่มเติม

2.3 การประเมินพลังงานของระบบไฮบริด

เนื่องจากระบบที่ใช้เป็นระบบไฮบริด การประเมินพลังงานที่มีความแม่นยำจึงทำได้ยากเนื่องจากระบบไฮบริดนั้นมีสภาวะการทำงานที่หลากหลาย ผู้วิจัยจึงได้ทำการพัฒนาระบบการประเมินพลังงานผ่านโปรแกรม Microsoft Excel 2019 ขึ้น ซึ่งใช้หลักการคำนวณ ตามสภาวะการใช้งานจริงรายชั่วโมง โดยเริ่มต้นจากการเก็บข้อมูลการใช้พลังงานของอาร์ทเม้นท์แบบรายเดือนและแบบรายชั่วโมง หลังจากนั้นทำการหาดัชนีฤดูกาล (Seasonal Index) โดยใช้ตัวหารจากเดือนที่เก็บข้อมูลการใช้พลังงานรายชั่วโมง เพื่อประมาณการใช้พลังงานรายชั่วโมงตลอดทั้งปี หลังจากนั้นจึงนำผลลัพธ์ที่ได้ไปคำนวณในโปรแกรมที่ทางผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น โดยมีลำดับขั้นตอนการทำงานแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจำลองสภาวะการทำงานจากระบบไฮบริด

2.4 การประเมินการลดก๊าซเรือนกระจก [20],[27]

การลดก๊าซเรือนกระจกสามารถคำนวณได้จากผลต่างของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกรณีฐานเทียบกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการดำเนินโครงการ (ใช้สมการ

เดียวกัน) โดยจะคิดเป็นรายปี ตลอดอายุโครงการ ดังแสดงในสมการที่ (3) และสมการที่ (4)

$$GHG_{Reduction,y} = GHG_{Base,y} - GHG_{SMG,y} \quad (3)$$

$$GHG_{Base,y} = Electric_{SMG,y} \times EF_{Grid} \quad (4)$$

โดยที่

$GHG_{Reduction,y}$ คือ ก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้จากการดำเนินการในปีที่พิจารณา (tCO_2eq)

$GHG_{Base,y}$ คือ ก๊าซเรือนกระจกในกรณีฐานที่ไม่ได้มีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในปีที่พิจารณา (tCO_2eq)

$GHG_{SMG,y}$ คือ ก๊าซเรือนกระจกที่มีการปล่อยจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ในปีที่พิจารณา (tCO_2eq)

$Electric_{SMG,y}$ คือ ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ในปีที่พิจารณา (MWh)

EF_{Grid} คือ ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก มีค่าเท่ากับ $0.5692 tCO_2eq/MWh$

2.5 การประเมินความคุ้มค่าในการลงทุน [28]

ในการประเมินความคุ้มค่าในการลงทุน เพื่อให้การตัดสินใจลงทุนมีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือทางการเงินเข้ามาช่วย ในการศึกษาครั้งนี้ จะใช้เครื่องมือทางการเงิน 3 อย่าง ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ระยะเวลาคืนทุน (PB) และพิจารณาที่อัตราผลตอบแทนการลงทุนขั้นต่ำที่ยอมรับได้ (MARR) โดยมีเกณฑ์ในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์ในการตัดสินใจในการลงทุน

การลงทุน	NPV	IRR	PB
คุ้มค่า	> 0	$> MARR$	$< \text{Life Time}$
ไม่คุ้มค่า	< 0	$< MARR$	$> \text{Life Time}$
ไม่มีความแตกต่าง	$= 0$	$= MARR$	$= \text{Life Time}$

3. ผลการดำเนินงาน

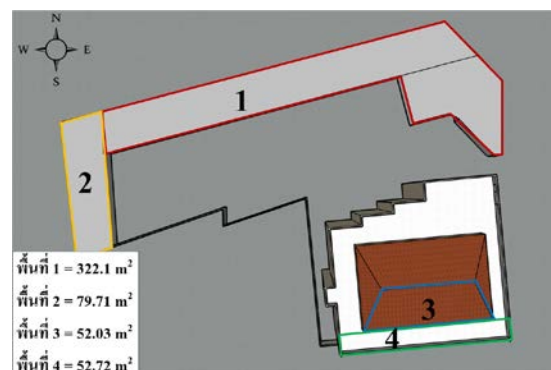
ในการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการสำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ ประเมินโครงการอพาร์ทเมนต์ที่ระยะเวลา 60 ปี (60 ปีและถือครองต่อไป) และใช้ข้อมูลอายุโครงการพลังงานแสงอาทิตย์ที่ 30 ปี จำนวน 2 รอบ ซึ่งมีข้อมูลที่ต้องนำมาวิเคราะห์ด้วยกัน 3 หัวข้อ ดังนี้

3.1 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิค

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้รวบรวมข้อมูลและปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณพลังงานที่สามารถผลิตได้ตลอดระยะเวลาโครงการ โดยแบ่งเป็น 4 หัวข้อ ดังนี้

3.1.1 ข้อมูลด้านเทคนิคของอพาร์ทเมนต์กรณีศึกษา

1. ขนาดและทิศทางของพื้นที่ติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ พื้นที่สำหรับติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกแบ่งเป็น 4 พื้นที่ด้วยข้อจำกัดของอพาร์ทเมนต์ 1) หลังคาโรงจอดรถทางทิศเหนือ 2) หลังคาโรงจอดรถทิศตะวันตก 3) หลังคากระเบื้องบนตัวอาคาร และ 4) พื้นปูนซีเมนต์บนตัวอาคาร แสดงดังรูปที่ 5

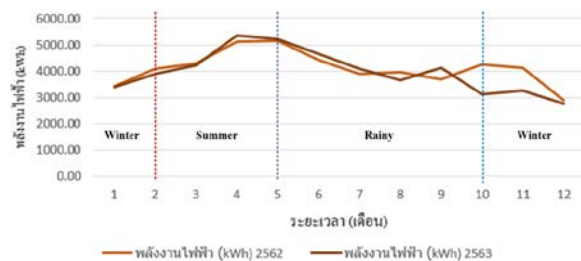


รูปที่ 5 พื้นที่สำหรับติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 5 ขนาดของพื้นที่ที่ 1 = $322.10 m^2$ หลังคาหันไปทางทิศเหนือทำมุม 7 องศา, ขนาดของพื้นที่ที่ 2 = $79.71 m^2$ หลังคาหันไปทางทิศตะวันตกทำมุม 1.5 องศา, ขนาดของพื้นที่ที่ 3 = $52.03 m^2$ หลังคาหันไปทางทิศใต้ทำมุม 26 องศา, ขนาดของพื้นที่ที่ 4 = $52.72 m^2$ ดังนั้นพื้นที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์รวมของอพาร์ทเมนต์กรณีศึกษาจึงมีขนาดเท่ากับ $506.56 m^2$ และสำหรับข้อมูลโครงสร้าง

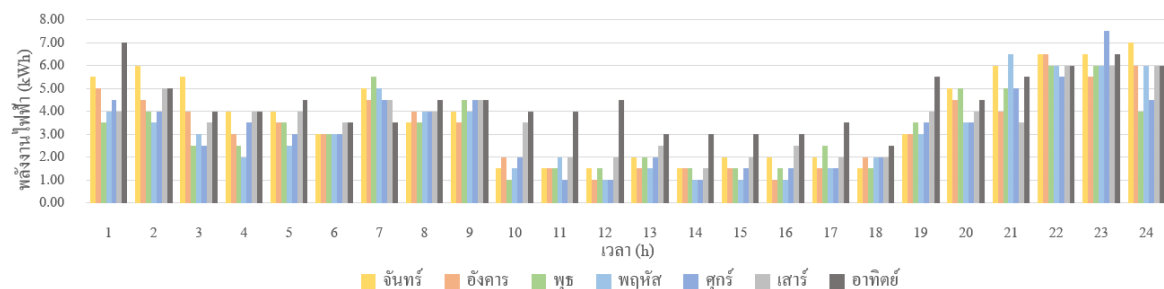
รองรับน้ำหนัก สามารถดูรายละเอียดได้จาก [29] ในที่นี้ไม่ได้แสดงรายละเอียดการคำนวณไว้

2. ลักษณะการใช้พลังงานของอพาร์ทเมนต์กรณีศึกษา การใช้พลังงานรายเดือนของอพาร์ทเมนต์นั้นมีลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงตามแต่ละช่วงเวลาของปี แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การใช้พลังงานไฟฟ้ารายเดือนของอพาร์ทเมนต์

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าลักษณะการใช้พลังงานของอพาร์ทเมนต์ในช่วงฤดูร้อน (เดือน ก.พ.–พ.ค.) เป็นช่วงที่



รูปที่ 7 การใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมงต่อหนึ่งสัปดาห์ของอพาร์ทเมนต์

จากรูปที่ 7 เนื่องจากกลุ่มผู้เช่าพักส่วนใหญ่เป็นกลุ่มคนทำงาน จึงทำให้ช่วงวันจันทร์–เสาร์ มีลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงกลางวันที่ค่อนข้างต่ำ และวันอาทิตย์ (สัปดาห์เต็ม) มีลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูงตลอดทั้งวัน

ข้อมูลในรูปที่ 6–7 เป็นข้อมูลการใช้พลังงานของ อพาร์ทเมนต์แบบรายเดือนและแบบรายชั่วโมง ซึ่งข้อมูลทั้งสองส่วนจะถูกใช้ในการคำนวณหาดัชนีฤดูกาล โดยใช้ตัวหารจากเดือนที่เก็บข้อมูลการใช้พลังงานรายชั่วโมง (ม.ค. 2564) เพื่อประมาณการปริมาณการใช้พลังงานรายชั่วโมงตลอดทั้งปี ซึ่งข้อมูลการใช้พลังงานนี้จะถูกนำไปจำลองในโปรแกรมที่ทางผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น และข้อมูลในรูปที่ 5–7 ยังถูกใช้เป็น

ใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดในรอบปีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ารายเดือนอยู่ในช่วง 4,209.00–5,357.00 kWh ช่วงฤดูฝน (เดือน พ.ค.–ค.ค.) ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ารายเดือนอยู่ในช่วง 3,128.00–4,648.00 kWh และช่วงฤดูหนาว (เดือน ค.ค.–ก.พ.) เป็นช่วงที่ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดในรอบปี ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ารายเดือนอยู่ในช่วง 2,768.00–4,109.00 kWh จากการเก็บข้อมูลการใช้พลังงานของอพาร์ทเมนต์พบว่า ลักษณะการใช้พลังงานมีการเพิ่มขึ้นและลดลงตามแต่ละช่วงเวลาของปี ซึ่งปัจจัยหลักก็คือ อุณหภูมิแวดล้อมและสภาพอากาศ

อีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อลักษณะการใช้พลังงานของอพาร์ทเมนต์คือ ช่วงเวลาที่ผู้เช่าที่พักอาศัยอยู่ที่อพาร์ทเมนต์ ซึ่งลักษณะการใช้พลังงานรายชั่วโมงในแต่ละวันแสดงดังรูปที่ 7

ฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบ ไฮบริด ที่มีความเหมาะสมทั้งในด้านข้อจำกัดของพื้นที่ ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่สามารถลดลงได้ และด้านการเงิน สำหรับอพาร์ทเมนต์กรณีศึกษา

3.1.2 ข้อมูลของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

จากการวิเคราะห์ด้านเทคนิคของอพาร์ทเมนต์ ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขนาดการติดตั้งและกำลังการผลิตที่เหมาะสม และได้มีการวิเคราะห์เพื่อเลือกอุปกรณ์ในระบบจากเกณฑ์ที่กำหนดไว้ (ราคา, ประสิทธิภาพ, การรับประกัน, เสี่ยงรบกวน และน้ำหนัก) ซึ่งผลสรุปข้อมูลอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แสดงดังตารางที่ 2–3

ตารางที่ 2 ข้อมูลทั่วไปของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการออกแบบ

ชนิดของเซลล์ แสงอาทิตย์	กำลังไฟฟ้าสูงสุด	แรงดันไฟฟ้า ที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด	กระแสไฟฟ้า ที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด	แรงดันไฟฟ้า เปิดวงจร	กระแสไฟฟ้า ลัดวงจร
Polycrystalline	330 W	37.50 V	8.80 A	46.8 V	9.16 A

ตารางที่ 3 ข้อมูลทั่วไปของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

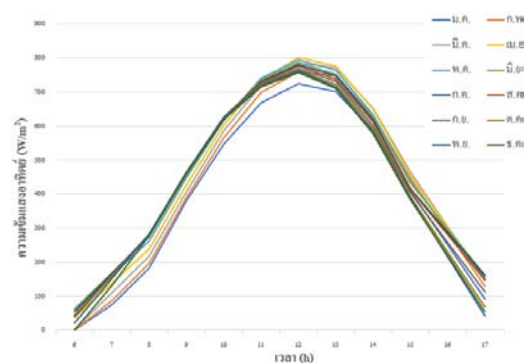
	ชนิด	ขนาด	จำนวน	ขนาดรวม	ราคารวม (บาท)
แผงเซลล์แสงอาทิตย์	polycrystalline	330 W	112 แผง	36.96 kW	329,560.00
อินเวอร์เตอร์	Hybrid/Off grid	30 kW	1 เครื่อง	30.00 kW	237,147.89
แบตเตอรี่ 48V 100Ah	LiFePO4	4.80 kWh	32 ลูก	153.60 kWh	1,103,785.79
ค่าแรง ค่าวัสดุอุปกรณ์ และ อื่น ๆ	-	-	-	-	848,890.96

จากตารางที่ 2 และ 3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการออกแบบนั้นเป็นแผงโพลีคริสตัลไลน์ที่ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 330 W ขนาดแผงละ 1.94 m^2 จำนวน 112 แผง ดังนั้นขนาดพื้นที่สำหรับการติดตั้งแผงรวมจะต้องมีขนาดไม่น้อยกว่า 217.28 m^2 อพาร์ทเมนต์ที่มีพื้นที่สำหรับติดตั้งอยู่ที่ 506.56 m^2 ซึ่งมีความเพียงพอในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

3.1.3 วิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตพลังงานของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ [24],[30–32]

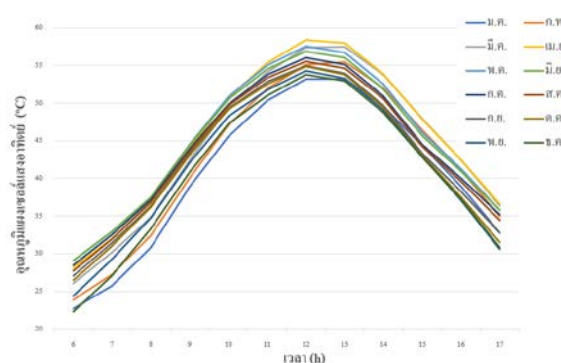
1. ประสิทธิภาพจากมุมเงยและทิศทางในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 112 แผง ถูกแบ่งเป็น 3 ชุดการติดตั้ง ซึ่งแบ่งตามมุมเงยและทิศทางของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชุดที่ 1 จำนวน 60 แผง มุมเงย 6 องศา ประสิทธิภาพจากมุมเงยอยู่ที่ 99.51% ทิศทางทำมุม 165.10 องศา กับมุมอะซิมุต ชุดที่ 2 จำนวน 36 แผง มุมเงย 15 องศา ประสิทธิภาพจากมุมเงยอยู่ที่ 100 % ทิศทางทำมุม 174.80 องศา กับมุมอะซิมุต และชุดที่ 3 จำนวน 16 แผง มุมเงย 26 องศา ประสิทธิภาพจากมุมเงยจะอยู่ที่ 98.75% ทิศทางทำมุม 174.80 องศา กับมุมอะซิมุต ซึ่งที่มุมอะซิมุต 165.10 องศา ประสิทธิภาพจากทิศทางอยู่ที่ 99.98% และมุม อะซิมุต 174.80 องศา ประสิทธิภาพจากทิศทางอยู่ที่ 100%

2. ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ที่ใช้ในการประเมินพลังงานสำหรับโปรแกรมที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นนั้นจะใช้ข้อมูลค่าความเข้มแสงเฉลี่ยรายชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 8



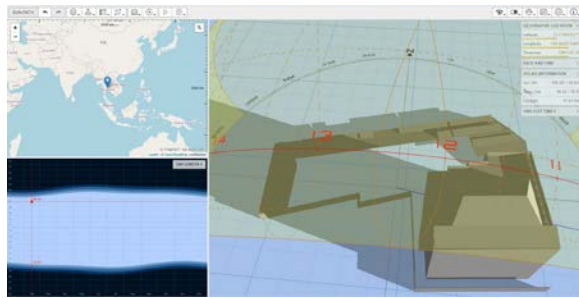
รูปที่ 8 ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายชั่วโมงในแต่ละเดือนของ กทม. เขตประเวศ

3. อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจะลดลง $0.40\%/^{\circ}\text{C}$ เมื่ออุณหภูมิแผงเกิน 25°C (ข้อมูลจากผู้ผลิต) โดยในการประเมินพลังงานสำหรับโปรแกรมที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นนั้นจะใช้ข้อมูลอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยรายชั่วโมง แสดงดัง รูปที่ 9



รูปที่ 9 อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยรายชั่วโมงในแต่ละเดือนของ กทม. เขตประเวศ

4. เงามบั้งแสง ตัวอย่างการจำลองสถานการณ์การเกิดเงา
บั้งแสงจากโมเดลของพื้นที่ติดตั้ง แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ตัวอย่างภาพเงามบั้งแสงอาทิตย์ จากการจำลอง
สถานการณ์ในซอฟต์แวร์ออนไลน์ 3D Sun-Path

พื้นที่ที่ติดตั้งนั้นเกิดเงามบั้งแสงบางส่วนบริเวณพื้นที่
ติดตั้งที่ 1 และ 2 ในช่วงเดือน 1 และ 12 เวลา 6.00–9.00น.
ในช่วงเดือน ก.พ.–เม.ย. เวลา 6.00–8.00น. และในช่วงเดือน
ก.ย.–พ.ย. เวลา 6.00–8.00น.

5. ผลกระทบของฝุ่นที่ตกสะสมบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์
ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ ทางผู้วิจัยได้กำหนดให้มีการทำความสะอาด
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุก ๆ 4 เดือน และใช้ค่าการ
ลดทอนประสิทธิภาพเนื่องจากฝุ่นที่ 6.03% [24]

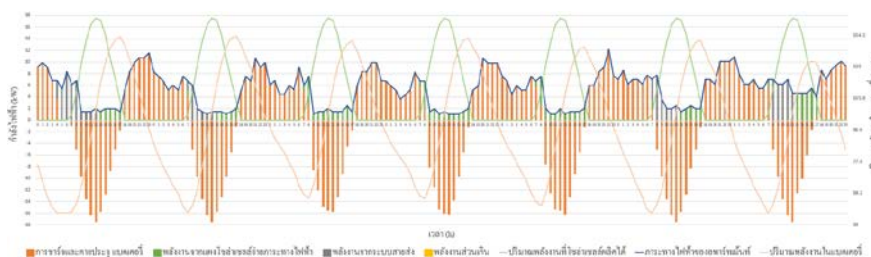
6. ประสิทธิภาพที่ลดลงเนื่องจากอายุการใช้งาน ใช้
ฐานข้อมูลจากผู้ผลิต ซึ่งประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจะ

ลดลงที่ 0.70% ต่อปี และผู้ผลิตมีการรับประกันการผลิต
พลังงาน มากกว่า 80% ในปีที่ 25 (ข้อมูลจากผู้ผลิต)

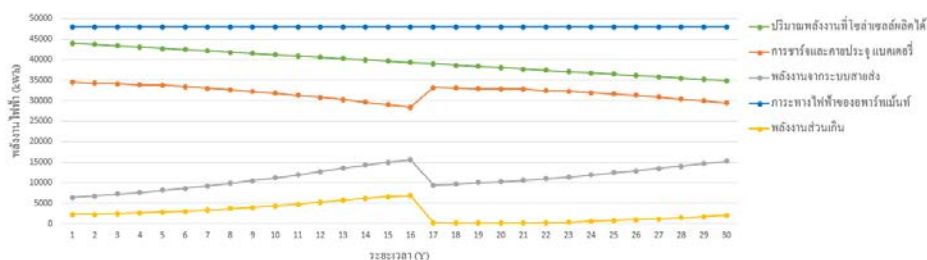
7. ประสิทธิภาพการเก็บประจุของแบตเตอรี่ที่ลดลง
เนื่องจากอายุการใช้งาน ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดการ
เสื่อมสภาพของแบตเตอรี่อยู่ที่ 80% ใช้งานอัตราการคายประจุ
(Deep of discharge) ที่ 70% และใช้หลักการวิเคราะห์อายุการ
ใช้งานเช่นเดียวกับ Software Homer ด้วยเทคนิคการจำกัดด้วย
ปริมาณงาน [32] ทำให้ได้ผลสรุปอายุการใช้งานของแบตเตอรี่
อยู่ที่ 16 ปี โดยประสิทธิภาพการเก็บประจุลดลงปีละ 1.25%
(หมายเหตุ โดยส่วนมากผู้ผลิตได้เสนออายุการใช้งานของ
แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตมากกว่า 3,500 รอบ ที่อัตรา
การคายประจุ 70%)

3.1.4 การผลิตพลังงานของระบบไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์

เนื่องจากสภาวะการทำงานของระบบไฮบริดนั้น มีเงื่อนไข
การทำงานที่หลากหลายทั้งในช่วงกลางวันและกลางคืน ดังนั้น
เพื่อให้ได้ผลสรุปการวิเคราะห์ข้อมูลที่ถูกต้อง ข้อมูลทางด้าน
เทคนิคของอพาร์ทเมนต์ และปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิต
พลังงานของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จึงถูกนำมาใช้
ในการจำลองลักษณะการใช้พลังงานและประเมินกำลังการผลิต
พลังงาน ซึ่งตัวอย่างผลการจำลองการผลิตพลังงานรายชั่วโมง
ในโปรแกรมที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น แสดงดังรูปที่ 11–12



รูปที่ 11 ตัวอย่างการจำลองการผลิตพลังงานรายชั่วโมง ในเดือนที่ 2 เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ของระบบไฮบริด



รูปที่ 12 การจำลองการผลิตพลังงานไฟฟ้ารายปี ตลอดอายุโครงการของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

จากรูปที่ 11 ตัวอย่างการจำลองนั้นถูกกำหนดให้มีสถานะการทำงานของระบบเหมือนกับหลักการทำงานของระบบไฮบริด จากข้อมูลจะเห็นได้ว่าเมื่อมีแสงอาทิตย์ (กราฟสีเขียว) พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกจ่ายให้กับโหลด (กราฟสีน้ำเงิน) ส่วนที่เหลือจะถูกชาร์จให้แบตเตอรี่ (กราฟสีแดง) และถ้าพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแบตเตอรี่ไม่พร้อมใช้งาน ระบบจะดึงพลังงานจากระบบสายส่งมาจ่ายให้กับโหลดแทน (กราฟสีเทา) ซึ่งข้อมูลการผลิตพลังงานนี้จะถูกนำไปสรุปผลเป็นข้อมูลรายปี แสดงดังรูปที่ 12

จากรูปที่ 12 พลังงานที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ตลอดอายุโครงการอพาร์ทเมนต์ อยู่ที่ 2,366.90 MWh พลังงานที่ใช้จากระบบสายส่งตลอดอายุโครงการ อยู่ที่ 671.32 MWh พลังงานส่วนเกินตลอดอายุโครงการ อยู่ที่ 159.50 MWh และภาระทางไฟฟ้าของอพาร์ทเมนต์ตลอดอายุโครงการ อยู่ที่ 2,878.73 MWh ดังนั้นจึงสามารถทดแทนความต้องการพลังงานไฟฟ้าได้ 2,207.40 MWh หรือคิดเป็น 76.68% ของพลังงานที่อพาร์ทเมนต์ต้องการตลอดอายุโครงการ

3.2 ผลการประเมินการลดก๊าซเรือนกระจก

จากข้อมูลการผลิตพลังงานไฟฟ้า การทดแทนพลังงานไฟฟ้าจากระบบสายส่งของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ตลอดอายุโครงการอพาร์ทเมนต์อยู่ที่ 2,207.40 MWh การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกรณีฐาน อยู่ที่ 1256.45 tCO₂e ซึ่งจะไม่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการดำเนินโครงการ ดังนั้นจึงสามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 1256.45 tCO₂e และเนื่องจากประเทศไทยมีสัดส่วนการใช้ก๊าซธรรมชาติในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุด จึงเทียบเท่าการลดการใช้ก๊าซธรรมชาติในการผลิตพลังงานไฟฟ้าถึง 22.68 MMscf

3.3 ผลการประเมินความคุ้มค่าในการลงทุน

ในส่วนของการพิจารณาความคุ้มค่าในการลงทุนนั้นจะใช้การเปรียบเทียบระหว่างการลงทุนอพาร์ทเมนต์กับอพาร์ทเมนต์ที่มีระบบโซล่าเซลล์ โดยใช้การวิเคราะห์ความอ่อนไหวทางการเงิน และใช้ผลต่างของมูลค่าปัจจุบันสุทธิในการเปรียบเทียบ MARR อยู่ในช่วง 5.50–7.50% (อัตราดอกเบี้ยเงินให้สินเชื่อประเภท MRR ของธนาคารกสิกรไทย โดยปี 2564 มีค่าอยู่ที่ 5.97% ปี 2563 มีค่าอยู่ระหว่าง 5.97–

6.62% และปี 2562 มีค่าอยู่ระหว่าง 6.87–7.12%), อายุโครงการโซล่าเซลล์อยู่ที่ 30 ปี (ข้อมูลจากผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 25 ปี ประสิทธิภาพคงเหลือ 80%), ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยชนิดละ 4.56 บาท (ข้อมูลจากอพาร์ทเมนต์ในเดือน ม.ค. 62–ม.ค. 64) และอายุโครงการอพาร์ทเมนต์ อยู่ที่ 60 ปี และถือครองต่อไป

3.3.1 ข้อมูลด้านการเงินของอพาร์ทเมนต์ และอพาร์ทเมนต์ที่มีระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ในส่วนของการประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนนั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาและเก็บข้อมูลด้านการเงิน ซึ่งข้อมูลด้านการเงินของอพาร์ทเมนต์และอพาร์ทเมนต์ที่มีระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แสดงดังตารางที่ 4–5

ตารางที่ 4 ข้อมูลด้านการเงินของอพาร์ทเมนต์

รายการ	ราคา (บาท)
เงินลงทุนอพาร์ทเมนต์เริ่มต้น	15,867,000.00
ค่าเช่า เพิ่มขึ้น 1.95%/ปี	1,357,802.32
รายรับอื่น ๆ /ปี	392,408.94
ค่าไฟฟ้า /ปี	218,565.27
ค่าทาสีทุก 10 ปี	100,000.00
ค่าบำรุงรักษาอื่น ๆ /ปี	490,604.00

ตารางที่ 5 ข้อมูลด้านการเงินของอพาร์ทเมนต์ที่มีระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

รายการ	ราคา (บาท)
เงินลงทุนอพาร์ทเมนต์เริ่มต้น	15,867,000.00
เงินลงทุนระบบโซล่าเซลล์	2,519,384.64
เปลี่ยนอินเวอร์เตอร์ทุก 15 ปี*	237,147.89
เปลี่ยนแบตเตอรี่ทุก 16 ปี	1,103,785.79
ค่าสร้างความสะอาดแผง /ปี	6,000.00
ค่าเช่า เพิ่มขึ้น 1.95%/ปี	1,357,802.32
รายรับอื่น ๆ /ปี	392,408.94
ค่าไฟฟ้า /ปี	29,190.49–69,510.17
ค่าทาสีทุก 10 ปี	100,000.00
ค่าบำรุงรักษาอื่น ๆ /ปี	490,604.00

* โดยส่วนใหญ่ผู้ผลิตจะเสนอการรับประกันที่ 10-15 ปี ข้อมูลจากเอกสารรับประกันของผู้ผลิตแห่งหนึ่ง

จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าค่าไฟฟ้าต่อปีนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 29,190.49–69,510.17 บาท เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่นั้นมีการเสื่อมสภาพลงทุกปี

3.3.2 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบทางการเงิน

ในการเปรียบเทียบทางการเงินจะพิจารณาใช้การวิเคราะห์ความอ่อนไหวทางการเงิน และใช้ผลต่างของ

NPV ในการเปรียบเทียบ โดยใช้ค่า MARR ที่อยู่ในช่วง 5.50–7.50 % และเนื่องจากอายุโครงการโซลาร์เซลล์นั้นสั้นกว่าอายุของอพาร์ทเมนต์ ในการวิเคราะห์จึงต้องนำโครงการโซลาร์เซลล์มาคำนวณซ้ำ 2 รอบ ซึ่งข้อสรุปการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบข้อมูลด้านการเงินของอพาร์ทเมนต์กับอพาร์ทเมนต์ที่มีระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

NPVa	IRRa	PBa	MARR	NPVb- NPVa	PBb	IRRb	NPVb
11,821,615.88	8.76%	21.45	5.50%	799,620.76	21.30	8.68%	12,621,236.64
9,187,086.36	8.76%	23.02	6.00%	591,621.05	22.82	8.68%	9,778,707.41
6,935,267.50	8.76%	24.96	6.50%	409,123.23	24.70	8.68%	7,344,390.73
4,999,152.56	8.76%	27.47	7.00%	247,863.50	27.11	8.68%	5,247,016.06
3,324,789.72	8.76%	30.94	7.50%	104,408.09	31.66	8.68%	3,429,197.81

หมายเหตุ a คือโครงการอพาร์ทเมนต์, b คือโครงการอพาร์ทเมนต์ที่มีระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

จากตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าทุกกรณีที่กล่าวมาข้างต้นโครงการอพาร์ทเมนต์ที่มีระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการสูงกว่าโครงการอพาร์ทเมนต์เพียงอย่างเดียว โดยกรณีที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือ กรณีที่ MARR เท่ากับ 5.50% ต่อปี โดยที่ NPVb อยู่ที่ 12,621,236.64 บาท และระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 21.30 หรือ 21 ปี 4 เดือน จากการประเมินทางการเงินแสดงให้เห็นว่าโครงการอพาร์ทเมนต์ที่มีระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด นั้นมีความเป็นไปได้ในการลงทุน เพราะสามารถสร้างผลกำไรตอบแทนได้

4. สรุปผลการศึกษาความเป็นไปได้

ในการศึกษาความเป็นไปได้ของงานวิจัยนี้จะเป็นการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบระหว่างทั้ง 2 โครงการ คืออพาร์ทเมนต์ที่ไม่ได้ติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์กับอพาร์ทเมนต์ที่ติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด โดยระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่นำมาใช้งานมีขนาดกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ 36.96 kW แบตเตอรี่มีความสามารถในการจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 153.60 kWh ซึ่งสามารถทดแทนความต้องการ

พลังงานไฟฟ้าได้ 2,207.40 MWh หรือคิดเป็น 76.68% ของพลังงานที่อพาร์ทเมนต์ต้องการตลอดอายุโครงการ สามารถช่วยลดก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 1256.45 tCO₂eq หรือเทียบเท่ากับการลดก๊าซธรรมชาติในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ถึง 22.68 MMscf และจากการวิเคราะห์ผลต่างของมูลค่าปัจจุบันสุทธิโดยใช้วิธีความอ่อนไหวทางการเงิน ที่ค่า MARR อยู่ที่ 5.50, 6.00, 6.50, 7.00 และ 7.50% นั้นผลต่างของมูลค่าปัจจุบันสุทธิอยู่ที่ 799,620.76 บาท, 591,621.05 บาท, 409,123.23 บาท, 247,863.50 บาท และ 104,408.09 บาท ตามลำดับ โดยกรณีที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือ กรณีที่ MARR เท่ากับ 5.50% ต่อปี NPVb อยู่ที่ 12,621,236.64 บาท และระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 21.30 หรือ 21 ปี 4 เดือน จากการประเมินทางการเงินแสดงให้เห็นว่าโครงการอพาร์ทเมนต์ที่มีระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด นั้นมีความเป็นไปได้ในการลงทุน เพราะสามารถสร้างผลกำไรตอบแทนได้ และยังเป็นส่วนหนึ่งในการลดก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ แต่ในด้านการลงทุนจริงผู้ลงทุนอาจเลือกที่จะไม่ลงทุนในระบบไฮบริด เนื่องจากระยะเวลาคืนทุนยังค่อนข้างนาน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการทำวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และขอขอบคุณอภิวรรักษ์มนตรีศึกษาที่ได้ให้ข้อมูลสำหรับการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Policy Formulation And National Focal Point, "Thailand Third Biennial Update Report," Climate Change Management and Coordination, Bangkok, Thailand, Rep. 3, 2020. Accessed: Aug. 8, 2021 [Online]. Available: http://climate.onep.go.th/wp-content/uploads/2021/01/BUR3_Thailand_251220-.pdf.
- [2] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, "Energy Balance of Thailand 2020," Ministry of Energy, Bangkok, Thailand, Rep. 7, 2020. Accessed: Aug. 8, 2021. [Online]. Available: https://www.dede.go.th/download/stat63/Energy_Balance_of_Thailand_2563_for_web.pdf.
- [3] P. Chunark, B. Limmeechokchai, S. Fujimori and T. Masui, "Renewable energy achievements in CO₂ mitigation in Thailand's NDCs," *Renewable Energy*, vol. 114, pp. 1294–1305, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.08.017.
- [4] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, "Project to improve the solar energy potential map from satellite images of Thailand in 2009," Ministry of Energy, Bangkok, Thailand, 2009. Accessed: Aug. 12, 2021. [Online]. Available: https://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=47645&filename=index.
- [5] *Model for electricity generation from solar cells*, SolarHub Co., Ltd., 2021, [Online]. Available: <https://www.solarhub.co.th/solar-information/solar-format>.
- [6] I. Ashraf, A. Chandra and M. S. Sodha, "Techno-economic and environmental analysis for grid interactive solar photovoltaic power system of Lakshadweep islands," *International Journal of Energy Research*, vol. 28, no. 12, pp. 1033–1042, 2004. doi: 10.1002/er.1009.
- [7] M. Kolhe, "Techno-economic optimum sizing of a stand-alone solar photovoltaic system," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 2, pp. 511–519, 2009, doi: 10.1109/TEC.2008.2001455.
- [8] M. M. Mahmoud and I. H. Ibrik, "Techno-economic feasibility of energy supply of remote villages in Palestine by PV-systems, diesel generators and electric grid," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 10, no. 2, pp. 128–138, 2006, doi: 10.1016/j.rser.2004.09.001.
- [9] J. L. Bernal-Agustin and R. Dufo-Lopez, "Economical and environmental analysis of grid connected photovoltaic systems in Spain," *Renewable Energy*, vol. 31, no. 8, pp. 1107–1128, 2006, doi: 10.1016/j.renene.2005.06.004.
- [10] G. C. Bakos and M. Soursos, "Techno-economic assessment of a stand-alone PV/hybrid installation for low-cost electrification of a tourist resort in Greece," *Applied Energy*, vol. 73, no. 2, pp. 183–193, 2002, doi: 10.1016/S0306-2619(02)00062-4.
- [11] C. Ghenai and M. Bettayeb, "Modelling and performance analysis of a stand-alone hybrid solar PV/fuel cell/diesel generator power system for university building," *Energy*, vol. 171, pp. 180–189, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.01.019.
- [12] M. Srikongkaew and P. Lorterapong, "Study of the investment for residential solar PV rooftop," *Research and Development Journal*, vol. 26, no. 1, pp. 61–69, 2015.
- [13] R. Chuchart, "Financial worthiness analysis of solar power generation system in the rubber wood processing plant when supported by investment

- promotion policies,” in *Walailak Procedia*, Nakhon Si Thammarat, Thailand, Mar. 27–28, 2019, pp. 1–7.
- [14] G. Panprayun, “8 kWp Rooftop PV system and feasibility of system expansion,” *Journal of Professional Routine to Research*, vol. 4, pp. 76–86, 2017.
- [15] W. Chansela and V. Inkarojrit, “Feasibility assessment of solar rooftop systems for gymnasium: case study of Chulalongkorn University,” *Journal of Environmental Design*, vol. 7, no. 2, pp. 3–25, 2020.
- [16] Y. Polchusakulwong, S. Rakkarn, P. Srihomchai and A. Jindawattana, “Feasibility study of the solar power farm case study: Kutrang Mahasarakarm,” *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 41–57, 2014.
- [17] K. Chaivanich and S. Sedpho, “An evaluation method of greenhouse gas reduction by the installation of a photovoltaic cells system: Case study of smart grid network in the University of Phayao,” *RMUTSB Academic Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 194–206, 2018.
- [18] S. Rehman, M. M. Alam, J. P. Meyer and L. M. Al-Hadhrami, “Feasibility study of a wind-PV-diesel hybrid power system for a village,” *Renewable Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 258–268, 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.06.028.
- [19] H. S. Das, C. W. Tan, A. H. M. Yatim and K. Y. Lau, “Feasibility analysis of hybrid photovoltaic/battery/fuel cell energy system for an indigenous residence in East Malaysia,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 1332–1347, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.174.
- [20] A. Khelif, A. Talha, M. Belhamel and A. H. Arab, “Feasibility study of hybrid diesel-PV power plants in the southern of Algeria: Case study on AFRA power plant,” *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 546–553, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.06.053.
- [21] *Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh*, Bloomberg, Dec. 2020. [Online]. Available: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>.
- [22] *Solar power generation and Transfer and disseminating of the use of solar energy*, Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Aug. 16, 2021, [Online]. Available: <https://webkc.dede.go.th/testmax/node?page=8>.
- [23] *Handbook on Fundamental Design of Solar Power Generation System*, 23rd ed., Ecoplanet Co., Samut Prakan, Thailand, 2020, pp. 64–158.
- [24] N. Ketjoy and M. Konyu, “The dust effect on photovoltaic module surface to photovoltaic power generation,” *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, vol. 32, no. 5, pp. 555–562, 2013.
- [25] X. Wanga, P. Adelman and T. Reindl, “Use of LiFePO₄ batteries in stand-alone solar system,” *Energy Procedia*, vol. 25, pp. 135–140, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.07.018.
- [26] *Hybrid Inverter*, Thai LED Solar, 2018. [Online]. Available: <http://www.thailedsolar.com/article/2/>.
- [27] *Thailand Grid Emission Factor for GHG Reduction Project /Activity*, Greenhouse Gas Mitigation Mechanism, 2017. [Online]. Available: <http://ghgreduction.tgo.or.th/download-tver/120-gwp-emission-factor/2372-2021-08-09-081631.html>.
- [28] *Project feasibility*, Sukhothai Thammathirat Open University, 2021 [Online]. Available: <https://www.stou.ac.th/stouonline/lom/data/sec/Lom14/02.html>.
- [29] M. Jiravacharadet, “Standard payload and design method,” in *Structural Steel Design*, 3rd ed., Nakhon

- Ratchasima, Thailand: Suranaree University of Technology, 2005, ch.2, pp. 1–14.
- [30] *Handbook on Solar Radiation and Climatic Data for Renewable Energy Applications*, DEDE and Faculty of Science (Physics) SU., Bangkok, Thailand, 2005,
- [31] *PD: 3D Sun-Path*, Marsh, 2021. [Online]. Available: <http://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html>.
- [32] *Battery Bank Life*, HOMER Pro, 2021. [Online]. Available: https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/battery_bank_life.htm

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความสำหรับวารสารลาดกระบัง

การเตรียมต้นฉบับบทความ

กองบรรณาธิการวารสารลาดกระบังได้แบ่งประเภทของบทความเป็น 2 ประเภท ได้แก่ บทความทางวิชาการ และบทความวิจัย และได้ให้คำนิยามดังนี้

“บทความทางวิชาการ” หมายความว่า บทความที่เขียนขึ้นในลักษณะวิเคราะห์ วิจัย หรือเสนอแนวความคิดใหม่ ๆ จากพื้นฐานทางวิชาการที่ได้เรียบเรียงจากผลงานทางวิชาการของตนเอง หรือของผู้อื่น หรือเป็นบทความทางวิชาการที่เขียนขึ้นเพื่อเป็นความรู้ทั่วไปสำหรับประชาชน

“บทความวิจัย” หมายความว่า บทความที่มีลักษณะเป็นเอกสารที่มีรูปแบบของการวิจัยตามหลักวิชาการ ได้แก่ มีการตั้งสมมติฐาน หรือมีการกำหนดปัญหาที่ชัดเจนสมเหตุผล โดยจะต้องระบุถึงวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนแน่นอน มีการค้นคว้าอย่างมีระบบ มีการรวบรวมข้อมูลพิจารณาวิเคราะห์ ตีความ และสรุปผลการวิจัยที่สามารถให้คำตอบบรรลุวัตถุประสงค์ หรือหลักการบางอย่างที่จะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางวิชาการ หรือการนำวิชาการนั้นมาประยุกต์ใช้

ผู้แต่งบทความควรเขียนบทความอยู่ระหว่าง 8-14 หน้ากระดาษขนาด A4 โดยส่งหน้าแรกของบทความเป็นแบบระบุชื่อผู้แต่ง 1 หน้า และแบบไม่ระบุชื่อผู้แต่งอีก 1 หน้า บทความที่มีจำนวนหน้ามากกว่าที่กำหนดอาจไม่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของกองบรรณาธิการวารสารลาดกระบัง ทั้งนี้บทความต้นฉบับต้องได้รับการอนุมัติยืนยันจากผู้แต่งร่วมทุกคน และไม่ควรอยู่ในระหว่างการศึกษาหรือตีพิมพ์ในวารสารวิชาการอื่น ๆ ให้ผู้แต่งส่ง (1) บทความพร้อมกับ (2) จดหมายนำ (Cover Letter) ที่ระบุ

- ขอบเขต ของบทความว่าสอดคล้องกับขอบเขตของวารสารในหัวข้อใด
- ความสำคัญของหัวข้อบทความหรือปัญหาทางจริง
- ปัญหาทางวิจัยหรือช่องว่างขององค์ความรู้
- ผลงานวิจัยที่ได้มีความแตกต่างหรือดีกว่างานวิจัยก่อนหน้าอย่างไร
- คุณค่าของงานวิจัยที่มีต่อวงวิชาการหรือวิจัย หรือต่ออุตสาหกรรมอย่างไร

บทความจะถูกพิจารณาโดยคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 3 ท่านจากหลากหลายสถาบัน และส่งต้นฉบับบทความในรูปแบบของไฟล์ .doc (Microsoft Word version 2010) และไฟล์ .pdf สามารถส่งบทความได้ในรูปแบบออนไลน์ผ่านทางเว็บไซต์ของวารสารลาดกระบัง <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej> บทความในวารสารลาดกระบังสามารถตีพิมพ์ได้ฟรี ไม่เสียค่าใช้จ่าย ทั้งในรูปแบบออนไลน์และแบบตีพิมพ์เป็นเล่มวารสาร

1. คำแนะนำในการเขียนและพิมพ์

1.1. คำแนะนำทั่วไป

บทความต้องมีความยาวประมาณ 8-14 หน้ากระดาษ A4 พิมพ์ด้วย Microsoft Word หรือซอฟต์แวร์อื่น ที่ขนาดตัวอักษรกำหนดได้ใกล้เคียงกัน การตั้งค่าหน้ากระดาษ ให้ระยะหน้ากระดาษ (Margin) ทั้ง 4 ด้านด้วย ระยะ 1 นิ้ว หรือ 2.54 ซม. บทความมี 2 ส่วน ส่วนแรกกำหนด (format) เป็นคอลัมน์เดี่ยว และส่วนที่สองกำหนดเป็น 2 คอลัมน์ โดยระยะห่างระหว่างคอลัมน์เป็น 0.26” หรือ 0.7 ซม. การลำดับหัวข้อของเนื้อเรื่องให้ใช้เลขกำกับบทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีหัวข้อย่อยให้ใช้เลขระบบทศนิยมกำกับหัวข้อย่อย และสามารถดาวน์โหลดรายละเอียดได้ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej>

1.2. แบบและขนาดตัวอักษร ใช้ตัวอักษรแบบ Angsana New ขนาด 14 point ทั้งบทความทั้งบทความภาษาไทย และบทความภาษาอังกฤษ

2. การเรียงลำดับเนื้อหาบทความ สำหรับบทความภาษาไทย

2.1 ชื่อเรื่อง (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้น กระชับ และสื่อความหมายของเรื่องที่ทำอย่างชัดเจน

ตัวอย่างชื่อเรื่อง

ชื่อเรื่องภาษาไทยใช้ตัวอักษร Angsana New ขนาด 20 พอยท์ ตัวหนา จัดกึ่งกลาง

Title in English use Angsana New Size 20 Point, Bold, Center, the First Alphabet in Each Word is Uppercase

2.2 ชื่อ-นามสกุลของผู้เขียนใส่ทุกคน เป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ระบุสถานที่ทำงาน สำหรับผู้พิมพ์ประสานงาน (Corresponding Author) ขนาด 14 พอยท์

ตัวอย่างชื่อ-นามสกุลผู้แต่ง

ชื่อผู้แต่ง นามสกุล¹, ชื่อผู้แต่ง นามสกุล² และ ชื่อผู้แต่ง นามสกุล^{2,*}

¹ สังกัดภาควิชา, คณะ, มหาวิทยาลัย ชื่อตำบล ชื่ออำเภอ ชื่อจังหวัด รหัสไปรษณีย์

² สังกัดหน่วยงาน, บริษัท ชื่อตำบล ชื่ออำเภอ ชื่อจังหวัด รหัสไปรษณีย์

First name Lastname¹, First name Lastname² and First name Lastname^{2,*}

¹ Affiliation Department, Faculty, University, Subdistrict, City, State, Postcode, Country

² Affiliation Department, Company, Subdistrict, City, State, Postcode, Country

***Corresponding Author E-mail:** author_email@email.com

2.3 บทคัดย่อ (Abstract) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ เป็นเนื้อความสรุปสาระสำคัญของเรื่อง วัตถุประสงค์ วิธีการศึกษา ผลการศึกษา และผลสรุป มี 1 ย่อหน้า จำนวนคำประมาณไม่เกิน 300 คำ

2.4 คำสำคัญ (Keywords) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ให้ใส่คำสำคัญ 3–5 คำ ไว้ท้ายบทคัดย่อแต่ละภาษา

2.5 เนื้อหา (Text) บทความวิจัยควรประกอบด้วย

- บทนำ (Introduction) บอกความสำคัญหรือ ที่มาของปัญหาที่นำไปสู่การศึกษา วัตถุประสงค์ และอาจรวมวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)
- วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย (Materials and Methods) กล่าวถึงรายละเอียด การวิเคราะห์และทดลองที่กระชับและชัดเจน
- ผลการทดลอง (Results) บอกผลที่พบอย่างชัดเจน สมบูรณ์ และมีรายละเอียดครบถ้วน
- อภิปรายผลและสรุป (Discussion and Conclusion) อาจเขียนรวมกับผลการทดลองได้ เป็นการประเมินการตีความและการวิเคราะห์ในแง่มุมต่างๆ ของผลที่ได้ว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์หรือไม่ มีความสอดคล้อง หรือขัดแย้งกับผลงานของผู้อื่นอย่างไร

ต้องมีการอ้างหลักการหรือทฤษฎีมาสนับสนุน หรือหักล้างอย่างเป็นเหตุเป็นผลและ
อาจมีข้อเสนอแนะที่จะนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์

2.6 กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement) (ถ้ามี) ระบุสั้นๆ ว่าได้รับการสนับสนุนทุน
วิจัย หรือได้รับความช่วยเหลือจากหน่วยงานใด

2.7 เอกสารอ้างอิง (References)

การอ้างอิงในบทความใช้การอ้างอิงแบบตัวเลขในวงเล็บก้ามปู[1] เอกสารอ้างอิง
ท้ายบททุกฉบับจะต้องมีการอ้างอิงในบทความ และการอ้างอิงที่ถูกต้องตามหลัก
วิชาการตามรูปแบบของ IEEE ซึ่งประกอบด้วยรูปแบบดังต่อไปนี้

กรณีเป็นหนังสือ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher,
(only U.S. State), Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx-xxx.

ตัวอย่าง

- [1] R. E. Blahut, *Theory and Practice of Error Control Codes*, Addison-Wesley, Reading, MA, USA, 1983.
- [2] I.A. Glover and P.M. Grant, *Digital Communications*, 3rd ed. Harlow: Prentice Hall, 2009.
- [3] L. Stein, "Random patterns," in *Computers and You*, J. S. Brake, Ed. New York, NY, USA: Wiley, 1994, pp. 55-70.
- [4] Westinghouse Electric Corporation (Staff of Technology and Science, Aerospace Div.), *Integrated Electronic Systems*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1970.
- [5] T.M. Lillis and J. Swann, "Giving feedback on student writing," in *Teaching academic writing: a toolkit for higher education*, C. Coffin, Eds. London: Routledge, 2003, pp. 101-129.

กรณีเป็นหนังสือ E-Book

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of Published Book*, xth ed. City of Publisher, State,
Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx-xxx. [Online]. Available: <http://www.web.com>

ตัวอย่าง

- [1] G. O. Young, “Synthetic structure of industrial plastics,” in *Plastics, vol. 3, Polymers of Hexadromicon*, J. Peters, Ed., 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1964, pp. 15–64. [Online]. Available: <http://www.bookref.com>.
- [2] *The Terahertz Wave eBook*. ZOmega Terahertz Corp., 2014. [Online]. Available: http://dl.z-thz.com/eBook/zomega_ebook_pdf_1206_sr.pdf. Accessed: May 19, 2014.
- [3] P. B. Kurland and R. Lerner, Eds., *The Founders’ Constitution*. Chicago, IL, USA: Univ. of Chicago Press, 1987. [Online]. Available: <http://press-pubs.uchicago.edu/founders/> Accessed: Feb. 28, 2010.

กรณีเป็นหนังสือแปล

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, “Title of chapter in the book,” in *Title of Published Book*, X. Editor, Ed., xth ed. City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher (in Language), year, ch. x, sec. x, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] K. Ichiro, *Thai Economy and Railway 1885–1935*, Tokyo: Nihon Keizai Hyoronsha (in Japanese), 2000.
- [2] M. Gorkii, “Optimal design,” *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, vol. 12, pp. 111–122, 1961 (Transl.: in L. Pontryagin, Ed., *The Mathematical Theory of Optimal Processes*. New York, NY, USA: Interscience, 1962, ch. 2, sec. 3, pp. 127–135).

กรณีเป็นส่วนหนึ่งของหนังสือ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, “Title of chapter in the book,” in *Title of Published Book*, X. Editor, Ed., City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] T. Ogura, “Electronic government and surveillance-oriented society,” in *Theorizing Surveillance: The Panopticon and Beyond*. Cullompton, U.K.: Willan, 2006, ch. 13, pp. 270–295.
- [2] L. Li, J. Yang, and C. Li, “Super-resolution restoration and image reconstruction for passive millimeter wave imaging,” in *Image Restoration—Recent Advances and Applications*, A. Histace, Ed., Rijeka, Croatia: InTech, 2012, pp. 25–45.
- [3] หนังสือ With Editor
- [4] C. Bennett, “What happens when you book an airline ticket? The collection and processing of passenger data post 9/11,” in *Global Surveillance and Policing: Borders, Security, Identity*, E. Zureik and M. Salter, Eds., Cullompton, U.K.: Willan, 2005, pp. 113–138.

กรณีหนังสือที่มีบรรณาธิการผู้ทรงคุณวุฒิ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of Published Book*, X. Editor, Ed., City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year, pp. xxx–xxx.

X. Editor, Ed. *Title of Published Book*. City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year.

ตัวอย่าง

- [1] L. Stein, "Random patterns," in *Computers and You*, J. S. Brake, Ed., New York, NY, USA: Wiley, 1994, pp. 55–70.
- [2] C. Bennett, "What happens when you book an airline ticket? The collection and processing of passenger data post9/11," in *Global Surveillance and Policing: Borders, Security, Identity*, E. Zureik and M. Salter, Eds., Cullompton, U.K.: Willan, 2005, pp. 113–138.
- [3] W. R. Leonard and M. H. Crawford, Eds. *Human Biology of Pastoral Populations*. New York, NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2002.

กรณีเป็นหนังสือมี Series

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of His Published Book*, X. Editor, Ed., xth ed. City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] A. Taflov, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method* in Computational Electrodynamics II, vol. 3, 2nd ed. Norwood, MA, USA: Artech House, 1996.
- [2] R. L. Myer, "Parametric oscillators and nonlinear materials," in *Nonlinear Optics*, vol. 4, P. G. Harper and B. S. Wherret, Eds., San Francisco, CA, USA: Academic, 1977, pp. 47–160.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการ (บทความถูกนำเสนอในการประชุมแล้ว)

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," presented at the Abbreviated Name of Conf., City of Conf., Abbrev. State, Country, Month and day(s), year, Paper number.

ตัวอย่าง

- [1] J. G. Kreifeldt, "An analysis of surface-detected EMG as an amplitude-modulated noise," presented at the 1989 Int. Conf. Medicine and Biological Engineering, Chicago, IL, USA, Nov. 9–12, 1989.

- [2] G. W. Juette and L. E. Zeffanella, "Radio noise currents on short sections on bundle conductors," presented at the IEEE Summer Power Meeting, Dallas, TX, USA, Jun. 22–27, 1990, Paper 90 SM 690-0 PWRS.
- [3] J. Arrillaga and B. Giessner, "Limitation of short-circuit levels by means of HVDC links," presented at the IEEE Summer Power Meeting, Los Angeles, CA, USA, Jul. 12–17, 1990, Paper 70 CP 637.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการที่กำลังจะตีพิมพ์ (บทความถูกนำเสนอในการประชุมแล้ว)

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, (location of conference is optional), (Month and day(s) if provided) year, pp. xxx-xxx.

ตัวอย่าง

- [1] W. D. Doyle, "Magnetization reversal in films with biaxial anisotropy," in *1987 Proc. INTERMAG Conf.*, pp. 2.2- 1–2.2-6.
- [2] C. T. Meadow and D. W. Waugh, "Computer assisted interrogation," in *1991 Fall Joint Computer Conf., Proc. AFIPS Conf.*, vol. 29. Washington, DC, USA: Spartan, 1991, pp. 381–394.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการที่มีเลข DOI

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, (location of conference is optional), year, pp. xxx–xxx, doi: xxx.

ตัวอย่าง

- [1] J. Zhao, G. Sun, G. H. Loh, and Y. Xie, "Energy-efficient GPU design with reconfigurable in-package graphics II. Style—7 memory," in *Proc. ACM/IEEE Int. Symp. Low Power Electron. Design (ISLPED)*, Jul. 2012, pp. 403–408, doi: 10.1145/2333660.2333752.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการพร้อมสถานที่

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, City, State, Country, year, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] L. S. Carmichael, N. Ghani, P. K. Rajan, K. O'Donoghue, and R. Holt, "Characterization and comparison of modern layer-2 Ethernet survivability protocols," in *Proc. 37th Southeastern Symp. Syst. Theory (SSST 2005)*, Tuskegee, AL, USA, Mar. 20–22, 2005, pp. 124–129

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการพร้อมบรรณาธิการ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, X. Editor, Ed. (location of conference is optional), year, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] A. Amador-Perez and R. A. Rodriguez-Solis, "Analysis of a CPW-fed annular slot ring antenna using DOE," in *Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, in Slot Ring Antennas II, vol. 3, 2nd ed., Jul. 2006, pp. 4301–4304.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการพร้อมหัวข้อต่อเนื่อง ฉบับ และ บรรณาธิการ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.* in Volume Title, in Series Title, ed., year, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] A. Amador-Perez and R. A. Rodriguez-Solis, "Analysis of a CPW-fed annular slot ring antenna using DOE," in *Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, in Slot Ring Antennas II, vol. 3, 2nd ed., Jul. 2006, pp. 4301–4304.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการออนไลน์

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author. (Date). Title. Presented at Abbreviated Conf. title. [Type of Medium]. Available: site/path/file

ตัวอย่าง

- [1] V. Chandrasekaran, S. Sanghavi, P. A. Parrilo, and A. S. Willsky. (2009). Sparse and low-rank matrix decompositions. Presented at IFAC 2009. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016388632>

กรณีเป็นฐานข้อมูล Online Dataset ที่มีการอ้างอิงเลข DOI

รูปแบบพื้นฐาน

Title, Source, Date, doi: xxx.

Title, Source, Date, doi: URL.

ตัวอย่าง

- [1] *Treatment episode dataset: Discharges (TEDS-D): Concatenated, 2006 to 2009*, U.S. Department of Health and Human Services, Substance Abuse and Mental Health Services Administration, Office of Applied Studies, Aug. 2013, doi: 10.3886/ICPSR30122.v2.
- [2] *Treatment episode dataset: Discharges (TEDS-D): Concatenated, 2006 to 2009*, U.S. Department of Health and Human Services, Substance Abuse and Mental Health Services Administration, Office of Applied Studies, Aug. 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.3886/ICPSR30122.v2>.

กรณีเป็นฐานข้อมูล Online Dataset ที่มีการอ้างอิงผ่านเว็บไซต์

รูปแบบพื้นฐาน

Title, Source, Date. [Online]. Available: <http://www.url.com>

ตัวอย่าง

- [1] *Treatment episode dataset: Discharges (TEDS-D): Concatenated, 2006 to 2009*, U.S. Department of Health and Human Services, Substance Abuse and Mental Health Services Administration, Office of Applied Studies, Aug. 2013. [Online]. Available: <http://www.icpsr.umich.edu/icpsrweb/SAMHDA/studies/30122/version/2>

กรณีเป็นหนังสือคู่มือ(รูปเล่ม)

รูปแบบพื้นฐาน

Name of Manual/Handbook, x ed., Abbrev. Name of Co., City of Co., Abbrev. State, Country, year, pp. xxx-xxx.

ตัวอย่าง

- [1] *Transmission Systems for Communications*, 3rd ed., Western Electric Co., Winston-Salem, NC, USA, 1985, pp. 44-60.

กรณีเป็นหนังสือคู่มือ(ออนไลน์)

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author (or Abbrev. Name of Co., City of Co. Abbrev. State, Country). Name of Manual/Handbook, x ed. (year). Accessed: Date. [Online]. Available: <http://www.url.com>

ตัวอย่าง

- [1] L. Breiman. *Manual on Setting Up, Using, and Understanding Random Forests v4.0*. (2003). Accessed: Apr. 16, 2014. [Online]. Available: http://oz.berkeley.edu/users/breiman/Using_random_forests_v4.0.pdf
- [2] M. Kuhn. *The Caret Package*. (2012). [Online]. Available: <http://cranrproject.org/web/packages/caret/caret.pdf>

- [3] *Antenna Products*. (2011). Antcom. Accessed: Feb. 12, 2014. [Online]. Available: <http://www.antcom.com/documents/catalogs/L1L2GPSAntennas.pdf>

กรณีเป็นรายงานรูปเล่ม

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of report," Abbrev. Name of Co., City of Co., Abbrev. State, Country, Rep. xxx, year.

ตัวอย่าง

- [1] K. E. Elliott and C. M. Greene, "A local adaptive protocol," Argonne National Laboratory, Argonne, France, Tech. Report. 916-1010-BB, 7 Apr. 2007.
- [2] J. H. Davis and J. R. Cogdell, "Calibration program for the 16-foot antenna," Elect. Eng. Res. Lab., Univ. Texas, Austin, Tech. Memo. NGL-006-69-3, Nov. 15, 1987.

กรณีเป็นรายงานออนไลน์

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of report," Company, City, State, Country, Rep. no., (optional: vol./issue), Date. Accessed: Date. [Online]. Available: site/path/file

ตัวอย่าง

- [1] Bureau of Meteorology, "Bureau of Meteorology: Measuring Rainfall in Australia," 2009. [Online]. Available: <http://www.bom.gov.au/climate/cdo/about/definitionsrain.shtml#meanrainfall>

กรณีเป็นวิทยานิพนธ์

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of thesis," M.S. thesis, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.

J. K. Author, "Title of dissertation," Ph.D. dissertation, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.

ตัวอย่าง

- [1] J. O. Williams, "Narrow-band analyzer," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Harvard Univ., Cambridge, MA, USA, 1993.
- [2] N. Kawasaki, "Parametric study of thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow," M.S. thesis, Dept. Electron. Eng., Osaka Univ., Osaka, Japan, 1993.

กรณีเป็นวิทยานิพนธ์ออนไลน์

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of thesis," M.S. thesis, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, Country, year. [Online]. Available: <http://www.url.com>

ตัวอย่าง

- [1] D. Schwartz, "Development of a computationally efficient full human body finite element model," M.S. thesis, Virginia Tech – Wake Forest Univ. School of Biomed. Eng. Sci., Winston-Salem, NC, USA, 2015. [Online]. Available: https://wakespace.lib.wfu.edu/bitstream/handle/10339/57119/Schwartz_wfu_0248M_10697.pdf

กรณีเป็นบทความจากวารสารวิชาการ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Name of paper," *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, pp. xxx-xxx, Abbrev. Month, year.

J. K. Author, "Name of paper," *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, pp. xxx-xxx, Abbrev. Month, year, doi: xxx.

ตัวอย่าง

- [1] M. F. Elias, "The Relation of Drive to Finger-Withdrawal Conditioning," *Journal of Experimental Psychology*, vol. 70, no. 2, p. 114, 1965.
- [2] J. Attapangittaya, "Social studies in gibberish," *Quarterly Review of Doublespeak*, vol. 20, no. 1, pp. 9-10, 2003.
- [3] J. Fallows, "Networking technology," *Atlantic Monthly*, Jul., pp. 34-36, 2007.
- [4] B. Metcalfe, "The numbers show how slowly the Internet runs today," *Infoworld*, 30 Sep., p. 34, 2006.
- [5] E. Aynoi, N. Nanthakusol, R. Jeenawong, C. Phongcharoenpanich and S. Kawdungta, "Vertical Beam Adjustable Antenna for Internet of Things Applications," *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol. 38, No. 2, pp. 7-12, 2021.
- [6] T. Brunswiler et al., "Formulation of percolating thermal underfills using hierarchical self-assembly of microparticles and nanoparticles by centrifugal forces and capillary bridging," *J. Microelectron. Electron. Packag.*, vol. 9, no. 4, pp. 149-159, 2012, doi: 10.4071/imaps.357.

กรณีเป็นบทความจากวารสารวิชาการที่มีรหัสบทความ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Name of paper," *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, Abbrev. month, year, Art. no. xxx.

J. K. Author, "Name of paper," (in Language), *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, Abbrev. month, year, Art. no. xxx.

ตัวอย่าง

- [1] L. Kuang et al., "A numerical method for analyzing electromagnetic scattering properties of a moving conducting object," *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2014, 2014, Art. no. 386315, doi: 10.1155/2014/386315.
- [2] E. P. Wigner, "On a modification of the Rayleigh-Schrodinger perturbation theory," (in German), *Math. Naturwiss. Anz. Ungar. Akad. Wiss.*, vol. 53, p. 475, 1935.

กรณีเป็นบทความจากวารสารวิชาการออนไลน์

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Name of paper," *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, pp. xxx-xxx, Abbrev. Month, year. Accessed: Month, Day, Year, doi: 10.1109.XXX.123456. [Online]. Available: site/path/file

ตัวอย่าง

- [1] W. P. Risk, G. S. Kino, and H. J. Shaw, "Fiber-optic frequency shifter using a surface acoustic wave incident at an oblique angle," *Opt. Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 115-117, Feb. 1986. [Online]. Available: <http://ol.osa.org/abstract.cfm?URI=ol-11-2-115>
- [2] P. Kopyt et al., "Electric properties of graphene-based conductive layers from DC up to terahertz range," *IEEE THz Sci. Technol.*, to be published, doi: 10.1109/TTHZ.2016.2544142.

กรณีเป็นสิทธิบัตร

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of patent," U.S. Patent x xxx xxx, Abbrev. Month, day, year.

J. K. Author, "Title of patent," Country Patent xxx, Abbrev. Month, day, year.

ตัวอย่าง

- [1] K. Kimura and A. Lipeles, "Fuzzy controller component," U. S. Patent 14860040, Dec, 14, 2006.

กรณีเป็นการสืบค้นจากเว็บไซต์

รูปแบบพื้นฐาน

First Name Initial(s) Last Name. "Page Title." Website Title. Web Address (retrieved Date Accessed).

ตัวอย่าง

- [1] J. Gerald, "Sega Ends Production of Dreamcast," vnunet.com. <http://nli.vnunet.com/news/1116995>. (Accessed Sept.12, 2007).
- [2] J. Smith and J. Doe. "Obama inaugurated as President." CNN.com. http://www.cnn.com/POLITICS/01/21/obama_inaugurated/index.html (Accessed Feb. 1, 2009).

2.8 ภาคผนวก (ถ้ามี)

ภาคผนวกเป็นส่วนหนึ่งของเนื้อหาที่ใช้สำหรับการรวบรวมข้อมูล หรือผลการศึกษารอง ที่จะช่วยรับรองหลักการ หรือผลการศึกษาหลัก ควรมีการอ้างอิงภายใน เนื้อหาของภาคผนวก เพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจได้ง่าย ผู้แต่งสามารถแบ่ง ภาคผนวกออกเป็นหลาย ๆ ส่วนได้ เช่น ภาคผนวก 1 แสดงถึงการรวบรวม ข้อมูลจากการสำรวจ ภาคผนวก 2 แสดง การรวบรวมข้อมูลจากหน่วยงาน ภาครัฐและเอกชน เป็นต้น

2.9 ตารางและรูป และสมการ

การแทรกตารางและรูป และสมการ ต้องมีความคมชัดไม่น้อยกว่า 300 dpi ให้ แทรกไว้ในเนื้อหาบทความ มีคำอธิบายประกอบสั้นๆ ที่สามารถสื่อความหมาย ได้สาระครบถ้วนและเข้าใจ

กรณีที่เป็นตาราง ให้ระบุลำดับที่ของตาราง ใช้คำว่า “ตารางที่...” และมี คำอธิบายใส่ไว้เหนือตาราง

กรณีที่เป็นรูปให้ระบุลำดับที่ของรูปใช้คำว่า“รูปที่...” และมีคำอธิบายใส่ไว้ได้ รูป กรณีที่มีรูปหลายรูปที่จะแสดงในครั้งเดียว ให้แบ่งรูปภาพด้วยตัวอักษร (ก), (ข), (ค) สำหรับบทความภาษาไทย และ ตัวอักษร (a), (b), (c) สำหรับบทความ ภาษาอังกฤษ

กรณีเป็นการแทรกสมการ ให้ระบุลำดับที่ของสมการไว้ทางด้านขวาของสมการ ภายในวงเล็บ เช่น (1) และการอ้างอิงในเนื้อหา ให้ใช้คำว่า สมการที่ (1)

3. เกณฑ์การพิจารณาบทความ

เกณฑ์การพิจารณาบทความสำหรับวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบังมีดังนี้ เนื้อหาของ บทความมีความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ มีคุณค่าทางวิชาการ เนื้อหา มีความสมบูรณ์ และ

โครงสร้างภาษาที่ใช้มีความชัดเจน ถูกต้องตามหลักทางวิชาการ ทั้งสมมุติฐาน / วัตถุประสงค์ การนำเสนอมีความชัดเจนกระชับ และการจัดรูปแบบของบทความ การอภิปรายผล และการอ้างอิงที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ

บทความจะต้องได้รับการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชานั้นๆ อย่างน้อย 3 ท่าน ซึ่งกองบรรณาธิการอาจให้ผู้เขียนปรับปรุงให้เหมาะสมยิ่งขึ้น และสงวนสิทธิ์ในการตัดสินใจพิมพ์หรือไม่ก็ได้ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด โดยส่งเป็นไฟล์งาน .pdf และ .doc เป็น Word 2010

4. วิธีการส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารลาดกระบัง

บทความที่ส่ง เปิดรับทั้งจากบุคคลภายใน และภายนอกสถาบันฯ โดยบทความนั้น ต้องมีความยาวไม่เกิน 14 หน้า 2 คอลัมน์ ผู้เขียนจะต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด โดยหน้าแรกของบทความจะมีชื่อที่อยู่ของผู้เขียน 1 หน้า และหน้าแรกของบทความที่ไม่ระบุชื่อผู้เขียนอีก 1 หน้า รวมทั้งหมด 15 หน้า และกรุณาระบุชื่อ-นามสกุล ที่อยู่ เบอร์โทรศัพท์ และ E-mail address ใช้ชัดเจนในแบบฟอร์มการส่งบทความด้วย ผู้เขียนสามารถส่งผ่านระบบวารสารออนไลน์ โดยลงทะเบียนและส่งบทความ ผ่านทางเว็บไซต์ของวารสารลาดกระบังได้ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/about/submissions>

ผู้ประสานงานและสถานที่ติดต่อ:

นางสาวชนัญชิดา นอบน้อม

งานวิจัยและนวัตกรรม (ส่วนวารสารลาดกระบัง)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ อาคาร 6 ชั้น (ตึก A) ชั้น 2 เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง

เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 E-mail : kmitl.eng.jnl@gmail.com

หมายเลขติดต่อ :

โทรศัพท์(เบอร์กลาง) 02-329-8000 ต่อ 3465

โทรศัพท์สายตรง/โทรสาร : 02-327-8317

โทรศัพท์มือถือ 086-106-4414

แบบฟอร์มการส่งบทความ

เลขที่อ้างอิง.....

วันที่ส่ง.....

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

ชื่อบทความ(ภาษาอังกฤษ).....

ประเภทบทความ



บทความวิชาการ



บทความวิจัย

Keywords (คำสำคัญ).....

ชื่อ - นามสกุล ผู้เขียน (ภาษาไทย/ภาษาอังกฤษ และ E-mail:)

1. ชื่อ-นามสกุล(ไทย).....(อังกฤษ).....

E-mail :โทรศัพท์.....

2. ชื่อ-นามสกุล(ไทย).....(อังกฤษ).....

E-mail :โทรศัพท์.....

3. ชื่อ-นามสกุล(ไทย).....(อังกฤษ).....

E-mail :โทรศัพท์.....

จำนวนหน้า.....หน้า

ชื่อและที่อยู่ (ผู้เขียนที่สามารถติดต่อได้)

ชื่อ - นามสกุล.....

ที่อยู่.....

เบอร์โทรศัพท์.....E-mail.....

ข้าพเจ้าได้แนบบทความที่มีความถูกต้องสมบูรณ์ตามคำแนะนำรูปแบบการเขียนบทความมาพร้อมนี้ และรับรองว่า

☐ ได้รับความเห็นชอบในการส่งบทความครั้งนี้จากผู้ร่วมเขียนบทความแล้ว (ถ้ามี) และไม่มี ความขัดแย้งระหว่างผู้ร่วมเขียนบทความ

☐ ข้าพเจ้า และผู้ร่วมเขียนบทความ (ถ้ามี) จะรับผิดชอบเกี่ยวกับลิขสิทธิ์ของต้นฉบับในทุกกรณี

☐ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความยังไม่เคยตีพิมพ์ หรืออยู่ระหว่างการพิจารณาเพื่อขอรับการตีพิมพ์ในวารสารอื่น ข้าพเจ้าได้แนบบทความ ซึ่งข้อความหรือผลงานในบทความนี้ ได้คัดลอกหรือดัดแปลงมาจากเอกสารหรือ รายงานอื่น หรือไม่

☐ ไม่ ☐ ใช่ คัดลอกหรือดัดแปลงมาจาก.....

และถ้าใช่ได้มีการอ้างอิงถึงเอกสารหรือรายงานดังกล่าวในบทความหรือไม่

☐ อ้างอิง ☐ ไม่อ้างอิง เพราะ.....

บทความนี้ ได้รับเงินสนับสนุนการทำงานงานวิจัยจากหน่วยงานใด หรือไม่

☐ ไม่ ☐ ได้รับการสนับสนุน จากแหล่งทุน.....เลขที่สัญญา.....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าคำตอบข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

(ลงชื่อ).....(ผู้ส่งบทความ)

เอกสารประกอบการส่งบทความ

1. แบบฟอร์มการส่งบทความนี้ พร้อมระบุรายชื่อนผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความของท่านได้ จำนวน 3 ท่าน

2. บทความต้นฉบับจำนวน 1 ชุด (Ms Word)

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ ซึ่งสามารถประเมินบทความของท่านได้ จำนวน 3 ท่าน โดยระบุชื่อ-นามสกุล
ตำแหน่งทางวิชาการ, E-mail และเบอร์โทรศัพท์ที่สามารถติดต่อได้)

1. ชื่อ-นามสกุล.....ตำแหน่งทางวิชาการ.....

E-mail :โทรศัพท์.....

สถานที่ทำงาน.....

2. ชื่อ-นามสกุล.....ตำแหน่งทางวิชาการ.....

E-mail :โทรศัพท์.....

สถานที่ทำงาน.....

3. ชื่อ-นามสกุล.....ตำแหน่งทางวิชาการ.....

E-mail :โทรศัพท์.....

สถานที่ทำงาน.....

Ladkrabang Engineering Journal

The Ladkrabang Engineering Journal is a technical journal belonging to the School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, (KMITL).

The objectives are to:

1. publish high quality research papers in the field of engineering and technology at national and international levels
2. disseminate research works and development in the field of engineering and technology
3. be a medium of exchanging research works and new body of knowledge in the field of engineering and technology among students, researchers, lecturers, and interested persons
4. be an archive of research reports and articles that are interesting and valuable in the field of engineering and technology.

Frequency:

The journal is published quarterly.

Policy:

Articles and reports should have engineering research values whether containing substantial supported theories, innovative works, substantial experiment results and/or fulfilled with useful and constructive discussions or reviews standardized to regional or international acceptance.

Manuscripts:

Manuscripts can be written in either Thai or English, complying with the journal format, which are ready to be submitted in camera ready form. To ensure that all papers are at the same standard, authors are asked to prepare their manuscripts using Microsoft Word for windows. Others associated components such as graphs or figures should be prepared using windows-based packages.

For convenience in printing and to common standard in publication, submitted manuscripts should conform to the following orders.

Titles: Should be given in both Thai and English.

Author and co-authors: Are given without any title.

Correspondent address: Specify short address of authors. If authors are students, institution address (department, faculty and institution) is required.

Abstract: Should be given in both Thai and English.

Main theme: Should contain the following sections.

1. Introduction
2. Theory
3. Construction and experimental procedures
4. Experimental results and discussions
5. Conclusion or Summary

Acknowledgement: (if required)

References: Should follow the pattern given below.

- [1] P. Choeysuwan and S. Choomchuay, "The Economics Analysis of RFID Implementation in Logistic," Ladkrabang Engineering Journal, vol.30, no.1, pp.7-12, March, 2556.
- [2] I. M. Filanovsky and H.P. Baltes, "Simple CMOS Analog Square-Rooting and Squaring Circuits," IEEE Trans. Circuits and Systems, vol.39, no.4, pp.312-315, Sept., 1992.
- [3] R. E. Blahut, Theory and Practice of Error Control Codes, Addison-Wesley, Reading, MA, 1983.

Submission:

Manuscripts from inside and outside King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang can be submitted to the journal. The first page of the manuscript contains the authors' names and complete affiliations. Please duplicate the first page of the manuscript with the names and affiliations made anonymous. The manuscript length is between 8-14 pages of A4. The manuscript that exceeds the length limitation may not be considered for publication depending on the editorial judgment. Please also clearly fill out name-surname, address, phone number, and e-mail address in the submission form. Authors can submit their manuscripts online via the journal system at the url: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/about/submissions>.

Published by:

School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

Tel: (662) 329-8000 Ext. 3464, 3465

Fax: (662) 329-8317

Advisors:

Dean School of Engineering

Assoc.Prof.Dr.Somyot Kaitwanidvilai

Editor-in-chief:

Prof.Dr.Uma Seeboonruang

Associate Editor:

Assoc.Prof.Dr.Jakrapong Pongpeng

Professor Editor:

Prof.Dr.Pornchai Supnithi

Associate Editor:

Assoc.Prof.Dr.Pongjet Promvonge

Associate Editor:

Assoc.Prof.Dr.Ravipat Lapcharoensuk

Assistant Editor:

Dr.Pinit Tanachaichoksirikun

Editorial Staff:

Miss.Chanunchida Nobnom

Liaise & Member Relationships

Create Original Artwork

Mr.Virun Chulkaivalsucharit

Proofreading and Photo Books

Mr.Thanongsak Chaichuensaen

Cover Design



ISSN 0125-1724 (Print)

ISSN 2730-3888 (Online)

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

Volume 39 Number 3

September 2022

Academic Paper

1. Water Crisis Management in Rainfed Agriculture – The Context of Flash Flood and Drought in Thailand 1
S. Patsinghasanee J. Laonamsai and P. Sawanyapanich

Research Papers

2. Products Design of Bamboo Sofa Set Using Quality Function Deployment Technique with Kansei Engineering 11
S. Rawangwong J. Rodjananugoon C. Homkhiew A. Thongmung Kamnerdwam
3. Convergence Rate of N-sided Polygonal Node-based Strain Smoothed Finite Element for 2D Castellated Beam Analysis 29
S. Piyaphipat B. Phungpaingam K. Pinpatthanapong and K. Musiket
4. An investigation of Indicators for Population Density and Immigration in Bangkok: A Comparative Study of Transportation, Economy, Residence, Healthcare and Education Factors 41
K. Saensomboon and T. Thapthimhin
5. Study on Viscosity and Acid of Lubricant-Water Contamination using Nano-Graphite Powder and Sunflower Oil as Additives 57
P. Jeenkour A. Meephua and S. Tabtimthong
6. Development of Smart Seedling Nursery for Organic Cultivation Community Enterprise, Tha Kham Subdistrict, Hat Yai District, Songkhla 72
S. Somwong T. Naemsai and A. Mano
7. Application of Analytic Hierarchy Process Together with Simple Additive Weighting Methods for Raw Materials Supplier Selection of Crispy Pork Factory 83
I. Luanghan P. Buranajarukorn and K. Wattana
8. Adaptive Array Antenna With Modify Fruit Fly Optimization Algorithm for Finding Arrival Direction of Radio Signal 99
A. Lang C. Phongcharoenpanich and S. Kawdungta
9. Determination of Optimum Temperature of Barrel Heater for Reducing Waste in Plastic Injection Molding Process of Tractor Turn Signal Cover Parts using DMAIC Techniques 111
A. Semsri
10. Bending Behavior of Functionally Graded Beam with Including Effect of Porosity on Elastic Foundation 131
M. Panyatong S. Ruensee and R. Ketiyot
11. An Automated Filter Tester Based on an Electrostatic Particle Counter for Testing the Particle Filtration Efficiency of Surgical Masks and N95 Masks 147
V. Asanavijit and P. Intra
12. The Feasibility Study of Installing Hybrid Solar PV Systems for Residential Building: A Case Study of an Apartment with 26 Rooms 167
C. Pongvijarn and S. Klongboonjit