



ISSN 0125-1724 (Print)

ISSN 2730-3888 (Online)

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 39 ฉบับที่ 2

มิถุนายน 2565

บทความวิชาการ

1. A Review on Screw Conveyors for Bulk Materials in Various Applications 1
Pornchai Chongchitpaisan Supattarachai Sudsawat

บทความวิจัย

2. การประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคั่นเซในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนประเภทโต๊ะที่วิจากลำต้นไม้ปาล์มน้ำมัน 13
สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ ชาตรี หอมเขียว สุชาติ จันทรมณีย์ ปรีชญา ชุมศรี
3. การพัฒนาเครื่องมือการประเมินผู้ส่งมอบเชิงกลยุทธ์ กรณีศึกษาผู้ส่งมอบวัตถุดิบไม้ในอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ 27
กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์
4. สายอากาศสองย่านความถี่แบบแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น 44
เนติลักษณ์ พันธุ์จีน กิตติมา เลิศศักดิ์วิมาน ศุภกิต แก้วดวงตา พิชญ์ สุพรรณกุล ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์
5. การประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์โดยเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงและไฟฟ้าสถิต 53
พานิช อินตะ วิสูตร อาสนวิจิตร วิสาชนภัสต์ รัตนจันทร์
6. การประยุกต์ใช้เยื่อกรองแบบนาโนสำหรับกำจัดแคลเซียมซัลเฟต และสารอินทรีย์ธรรมชาติ อภิญา อ่อนสาร สุพัฒน์พงษ์ มัตราช วิภาดา เดชะปัญญา กรรณิกา รัตนพงศ์เลขา เทียมมะณีย์ รัตนวีระพันธ์ สมภพ สอนงราชูร์ 70
7. การควบคุมอุณหภูมิของแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเตาเผาขยะขนาดเล็กด้วยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง 82
สมประสงค์ ศรีวิชัย รัศมีทัต แผนสมบูรณ์ ศุภกิต แก้วดวงตา
8. การออกแบบและหาค่าที่เหมาะสมทางอากาศพลศาสตร์ ของรูปทรงโค้งมนในย่านความเร็วเหนือเสียง 90
วงศธร นรสิงห์ วันชัย เจียจันทร์
9. Excel Based Monte Carlo Simulation for the (Q,r) Inventory Control Model 103
Banhan Lila Adisak Nowneow Sanya Yimsiri
10. การปรับปรุงตำแหน่งการจัดเก็บของคลังสินค้าสำเร็จรูป กรณีศึกษา บริษัทผลิตเสื้อผ้ากีฬา 113
วรุตม์ บุญภักดี ดวงรัตน์ หิรัญญะสิริ ราชานนท์ ลั่นชัย วิศัลยา เกียรติคุณรัตน์ ปฐมพงษ์ สังข์ทอง
11. ผลกระทบการอุดตันทางน้ำเข้าในระบบระบายน้ำ 125
พงศ์พันธุ์ กาญจนการุณ สุรัชย์ อำนวยพรเลิศ กฤษณ์ มณีกิจ ญัฐวร ยอดปนนท์ วีระวัฒน์ จันทพิชัย
12. การสร้างการเข้ารหัสคอนโวลูชันสำหรับการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ใต้น้ำ โดยใช้เอฟพีจีเอ 136
กฤษณะพงศ์ พันธุ์ศรี อัมพวรรณ ยินติมาก เอกพล ชันสาลี ภูริพงศ์ สุทธิโสภาคพันธ์

“วิศวกรรมลาดกระบัง”

วิศวกรรมลาดกระบังเป็นวารสารทางวิชาการซึ่งจัดทำโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 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

(ถ้ามี)
การอ้างในบทความให้ใช้หมายเลขประจำเอกสารหรือบทความที่อ้างถึงโดยตัว 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 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของกองบรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบัง 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

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
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.พิณิช 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.ประยุทธ 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 สุรักษา

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 สิบบุญเรือง)

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

A Review on Screw Conveyors for Bulk Materials in Various Applications

Pornchai Chongchitpaisan, and Supattarachai Sudsawat *

Department of Materials Handling and Logistics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Wong Sawang, Bang Su, Bangkok, 10800, Thailand

*Corresponding Author E-mail: supattarachai.s@eng.kmutnb.ac.th

Received: Feb 24, 2022; **Revised:** Apr 08, 2022; **Accepted:** May 09, 2022

Abstract

Screw conveyors are widely operated for handling bulk materials in many industries. This literature review will illustrate the recent research works which relate with mineral, agriculture, biomass, and chemical sections. The mechanism of the screw conveyor seems like simple but the physics of particle handling in many fields have some different behaviors that need to be understood clearly. Hence, this comprehensive review has been revealed the theoretical flow rate formulas for the U-shape screw and enclosed the screw conveyors. Moreover, this paper gathers recent literature reviews of various applications for illustrating various results of each section that can use to be a guide for future research works.

Keywords : Screw conveyor, Bulk materials, Handling, U-shape screw conveyor, enclosed screw conveyor

1. Introduction

Materials handling equipment is a part of many industries that have to be employed to convey raw materials or finish goods. Screw feeder and conveyor are one of the most suitable choices for conveying process because they not only can control the mass flow, which provides the clean solution to the environment while the handling process is running, but also, gain a high quality of conveying with the low cost, including the maintenance requirement [1]. Usually screw feeders and conveyors are employed to handle the bulk materials for controlling the mass flow rate in many fields, such as the transportation process in agriculture, mining, chemical, plastic industries, and so forth. The fundamentals of the screw feeders and conveyors are indicated by Metcalf [2] and Carleton, Miles, and Valentin [3]. The main components of the standard screw conveyor are

consisted of a screw flights, shafts, hoppers, and screw's casing, which elevate the bulk materials, and feed the part. They can be classified into two main types, U-shape and enclosed shape as shown in **Fig.1** and **Fig.2** respectively [4]. The U-shape conveyor always runs merely low speed drive around 30 to 70 rpm depending on screw shaft diameters, according to CEMA standard [5]. The advantage of this screw type is a good handling system for the cohesive and heavy bulk materials. Meanwhile, the enclosed conveyor can operate at a high-speed drives around 200 to 2000 rpm that can convey and compact a variety of light materials. However, it cannot deliver cohesive and heavy weight of bulk materials [4]. As the recent researches, the enclosed screw conveyor has vary auger's sizes between 75 to 400 mm in diameter and screw's length between 1 m to more than 30 m [6].

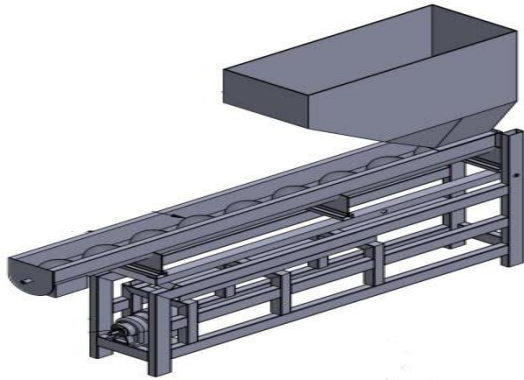


Figure 1 Screw conveyor as U-shape casing

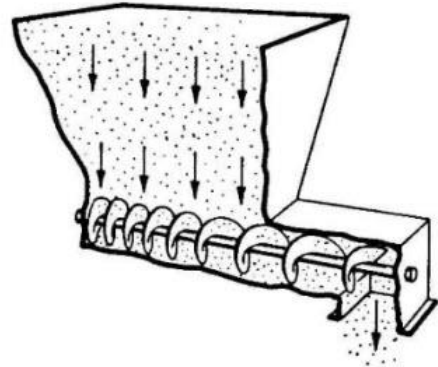


Figure 3 Example structure of screw feeder



Figure 2 A Screw conveyor as enclosed casing

For the screw feeder, there are some different details from screw conveyor as shown in **Fig.3**. The screw feeder is usually used to control the flow rate of the granular materials. The hopper is a part that supports to feed materials into screw conveyor. The size of the hopper opening ranges is between one to three times of the screw pitch [4]. The main advantage of screw feeder is the stability to control the flow rate of bulk materials during conveying. The rotational velocity of screw feeder should maintain as low in order to gain the uniform flow rate and reduce the overload effects from the centrifugal of screw power.

As surface explained about the types of screw conveyor, many researchers had attempted to solve material handling problems through the screw feeder and the conveyor. Some experiment researches had been investigated in various characteristic problems such as focusing on cohesion and non-cohesion during handling process [3],[7–10]. Some researchers studied methodology of the mass flow rate measurement [11–12], and some concentrated on the mixing result of the bulk materials [13–14]. These experimental results provided a good improvement to optimize the machine parameter and design. Moreover, some researches seek for suitable power, torque requirement for materials handling [15–17] and the theoretical models of the particle motions during transportation [2],[18–20]. In addition, Zareiforush et al. [1] tried to conclude from many researches on screw conveyor performance. They explained about theoretical models for bulk materials handling, however, the scope of the reviewed literature are concentrated on the agriculture material fields and also derived the volumetric flow rate for the merely enclosed screw conveyor. Another technique that has recently been applied to solve the bulk materials handling is the discrete element method (DEM) which is one of the numerical methodology. Cundall and Strack [21] introduced DEM in bulk materials handling fields to illustrate the particle flow behavior, the particle interaction, and particle reaction forces of bulk materials

under many situation constraints. DEM methodology was used to simulate and compare the relationship of particle between theoretical and experimental results, especially the mass flow rate, average particle speed, and so on. The outputs of DEM provide closely results comparing with the experiments. For instance, some researchers investigated granular handling for the horizontal screw conveyor [22–24], bulk materials handling in inclined screw conveyor [25], vertical screw conveyors [26], and screw conveyor with mixers [27]. Moreover, DEM seems to obtain the detailed data, related with the flow pattern, flow rate, power requirement, particle speed and other factors of granular particles via simulation before making empirical tests. Thus, it will reduce experimental time for researches.

According to the previous published literature reviews, the screw feeder and conveyors need to be deeply studied for a better understanding in optimization and design of screws because they are currently utilized in a wide range of activities and conditions. Therefore, this review paper gathers and illustrates the theoretical flow rate capacities for the design of U-shape and enclosed screw conveyors. In addition, the review contents related with the screw conveyor would be separated into the different areas of agriculture, mining biomass, and chemical groups which have their own specific constraints

2. Theoretical Formula of Screw Conveyor

The theory of transportation of bulk materials in screw conveyor and feeder has been continually researched [16–17],[20],[28]. The main factors and effects of screw theory are screw dimension, shaft dimension, clearance between housing and screw, flow rate, efficiency of material handling, torque requirement, and power consumption. Thus, the main content of this paper would be mentioned about two types (U-shape casing of screw conveyor and enclosed casing screw conveyor) of screw design

calculation. Thus, the flow rate capacities in each type of the screws can derive as the following.

2.1 U-Shape Screw Conveyor

The key objective of U-shape screw conveyor as shown in **Fig.4** is material handling capacity that depends on conveyor size and speed. In order to specify the speed and size of screw conveyor, it firstly needs to know the details of material properties for the transportation.

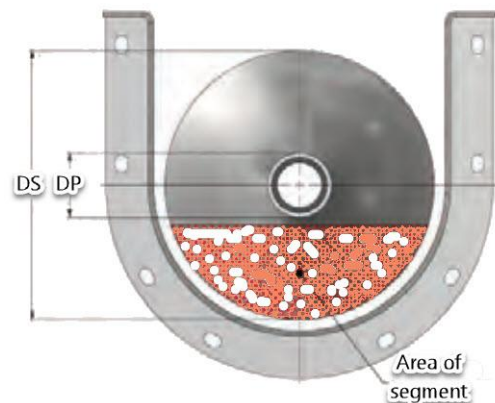


Figure 4 structure of U-shape casing of screw conveyor

Conveyor Equipment Manufacturers Association standard [5] provided various material properties and material code to be a guideline for selecting the suitable screw conveyor properties and checked the limitation of the lump size before selecting the screw dimension. The formula of flow rate calculation can be derived from Equation. (1) as follows [5]:

$$\frac{C}{RPM} = \frac{0.7854 \times (D_s^2 - D_p^2) \times P \times K \times 60}{1728} \quad (1)$$

Where:

C is the flow rate (ft^3 / hr)

RPM is revolutions of screw per minute

D_s is a diameter of screw (in) that can gain from fig.4

D_p is a diameter of pipe (in) that can gain from fig.4

P is pitch of screw (in)

K is percent through loading that can search from CEMA guide book [5]

Note: This formula assumes that the flow rate in ft^3/hr per 1 RPM

This formula is established without concerning flight thickness, flight tolerance dimension, and pitch tolerance. Therefore, the pitch of the screw, the type of the flight, and the operation of mixing paddles within the flight pitches are concerned as CF_1 , CF_2 , and CF_3 respectively that can select from as a table 2-4 in ref [5].

The equivalent flow rate can be provided as Eq. (2):

$$\text{Equivalent flow rate} = (\text{Required flow rate}) \times (CF_1) \times (CF_2) \times (CF_3) \quad (2)$$

Another factor that has to be concerned for the screw conveyor design is a conveying speed that can be calculated according to CEMA standard for regular helical screw flight with standard pitch as Eq. (3). [5]

$$N = \frac{\text{Required Capacity, } (\frac{\text{ft}^3}{\text{hr}})}{\frac{\text{ft}^3}{\text{hr}} \text{ at 1 RPM}} \quad (3)$$

Where:

N = Conveyor Speed, RPM of screw, and this equation is used for only recommended speed according to CEMA standard [5].

2.2 Enclosed Screw Conveyor

For enclosed screw conveyor as shown in Fig.2, the theoretical flow rate capacity can be expressed according to the research of Srivastava et al. [29] as Eq. (4) below:

$$Q_t = \frac{\pi}{4} (D_{sf}^2 - D_{ss}^2) l_p n \quad (4)$$

Where:

Q_t = theoretical volumetric capacity, m^3/s

D_{sf} = screw diameter, m

D_{ss} = shaft diameter, m

l_p = pitch length, m

n = screw rotational speed, rev/s

According to Eq. (4), it is theoretical flow rate capacity. Actually, the flow rate capacity of screw conveyor should be considerably below the theoretical capacity because during conveying, there are many effects that make loss on the volumetric efficiency. Thus, the volumetric efficiency can be derived as Eq. (5) below.

$$\eta_v = \frac{Q_a}{Q_t} \quad (5)$$

Where:

η_v = volumetric efficiency

Q_a = actual volumetric capacity, m^3/s

Whereas Q_a can be approximately calculated by developing predicted equation from experimental data that illustrated the good performance of screw conveyors for transporting wheat, oats, and shelled corn as shown in Eq. (6)

$$\begin{aligned} \frac{Q_a}{\frac{\pi}{4} (D_{sf}^2 - D_{ss}^2) l_p n} &= (4.33 \times 10^{-4}) a * b * c \\ a &= \left(2\pi n \sqrt{\frac{l_p}{g}} \right)^{-0.44} \\ b &= \left(\frac{l_i}{l_p} \right)^{0.31} \\ c &= (f_1(\theta))^{1.35} \mu_1^{-4.59} \mu_2^{-3.72} \end{aligned} \quad (6)$$

where, $f_1(\theta) = 1 + \cos^2 \theta$; θ is handling angle as measured from the horizontal, degree; $414 > \mu_1 > 0.374$; $0.554 > \mu_2 > 0.466$; g is an acceleration of gravity, m/s^2 ; l_i is exposed screw intake length m.

3. Research Group in Mining Experiments

For the research of mining clusters, there are many aspects that many researchers were concerned. For example, Yu and Arnold [16] studied the theoretical torque requirements of screw feeders for handling cement and semolina by investigating both feeding and choke sections.

The outcome of this research provided the theoretical model of torque requirement that was improved by principles of powder mechanics and concentrating a transferred element within pitch of screw. The theoretical model indicated almost the same as experimental data and all geometry parameters of screw feeder. Moreover, it presented the relationships between the torque characteristics and another result from this research, which was the starting torque value near to the operating torque value. Therefore, this outcome will be usable for designing flow load of screw feeder. Shimizu and Cundall [30] deeply concentrated on the numerical analysis of bulk materials handling, especially simulation and particles through the screw conveyors by using discrete element method (DEM). These results provided both horizontal and vertical screw conveyor analysis. For horizontal screw test, the critical angle should be considered smaller than the predicted angle model from the static force equilibrium. The overall power should be estimated over the derived model at 15% and also the number of particle was increased, which resulted to the power enhancement. The clearance between screw and casing is a remarkable concern during transportation. For vertical screw test, DEM simulation provided a realistic behavior because not only the particle makes faster speed, but the screw speed is also increased and vice versa. Moreover, the transfer angle and the upward particle speed are almost the same between DEM and theoretical model from the static force equilibrium. Waje et al. [31] studied Residence Time Distribution (RTD) of screw conveyor dryer (SCD) for sand. The experimental results showed that screw speed increased then the degree of particle homogenies would also increase, whereas the mean residence time would be decreased. On the other hand, the feed rate of sand was high with low screw speeds then the capable material mixing would decline. Gaivoronskii and Postoronko [32],[33] investigated ceramic green mixes via screw

conveyor. The results concerned about the optimal productivity of a screw conveyor vacuum press that considered the productivity losses due to geometric factors such as the gap among the screw blades and casing, the lift angle of handling line of screw conveyor, the number of the entries screw blade, and the plasticity of the molded paste. Mondal and Ghosh [34] indicated a relationship between filling factor and flood-feeding of short length screw conveyor during handling dry coarse sand. The results presented that the high value of filling rate would reflect flood-feeding situation during short screw conveyor operation. Moreover, the filling factor of short length screw should be two times of long length screw conveyor. It means that the effective filling rate of long length screw should be lower than the short length screw conveyor. Li et al. [35] established experimental research about the behavior of particle flow especially the trajectory angle of particle motion that affected to mass flow rate during transferring sand. The result illustrated that there was the increase of the inclination angle and screw velocity, in contrast to, the decrease of the outlet mass flow capacities. Thus, this research can be concluded that various inclination angle and pitch-diameter ratio are the main effects to the outlet mass flow capacities. Pezo et al. [36] applied DEM to analyze particle movement and premixing bulk materials (natural zeolite and sand) of five types of screw conveyor and three different lengths of horizontal screw conveyor. The advantage of this research is the predicted model of mixing bulk materials based on ANOVA confirmation and the usage of the artificial neural network to develop the model. Sun et al. [37] studied the coal particle handling through the screw conveyor and drum conveying performance by comparing DEM experimental tests with empirical tests. The result showed that the screw blade axial tilt angle affected the screw conveying performance and the best flow rate of screw conveyor. The axial tilt angle of screw blade should be 15°

that will gain 5% higher than the screw blade without axial tilt angle. Yang et al. [38] researched the axial velocity of coal particles for vertical screw conveyor via DEM method. The research outcome provided the axial velocity model of the coal particle via DEM simulation test and confirmed the model via empirical test.

4. Research Group in the Agriculture Experiments

In agriculture screw conveying research, many researches had been attempted to solve the screw design and enhance more efficiency of the screw conveyor. For instance, Moser et al. [39] applied the sensor transmitter for flow rate measurement of wheat particles during screw conveyor operation. The results showed the good performance for the reliable measurement of mass and volume capacity. Zareiforush et al. [6] studied paddy handling in inclined screw conveyor. There were the investigations of the paddy's moisture content, screw velocity, and conveying inclined angles. The result indicated that paddy's moisture content at 14%, screw velocity at 100 rpm, and an inclination angle at 10° could provide the flow rate capacity with the reduction of broken grains, husked grains, and husked-cracked grain respectively. Mariajayaprakash and Senthilvelan [40] concerned with process parameter optimization of screw conveyor in sugar mill industries. The results provided the root cause of the screw conveyor failure on the fuel-feeding system that occurred from fuel type, fuel moisture, drum speed, and air flow. Dixit et al. [41] studied the effect of con germ's loading percentage, castor bean, and sugar on horizontal screw conveyor. The experimental data showed the incremental percentage of loading materials on screw conveyor. Then the maximum recommended screw speed and flow rate capacity would also be increased, whereas screw diameter should be dramatically decreased. Among three agriculture material tests, sugar may require higher horsepower than others for handling. Olanrewaju et

al. [42] studied parameter design of screw conveyor for granular materials (maize, sorghum, and gari) at 13% moisture content. The results show that the elevated location of screw conveyor can provide 99.95% and recommended inclined angle should be at 0°, 30°, and 45° especially gari handling. Hevko et al. [43] investigated about a flexible screw conveyor for bulk agricultural materials especially peas and wheat. This research provided a condition guideline for flexible screw operation by suitable screw speed at 650 to 670 rpm and the screw speed for minor damage of bulk materials during transportation, which should be the range of 550 to 650 rpm. Ozbek [44] tried to seek the volumetric and energy consumption efficiency in agriculture screw conveyor, especially barley particles. This result employed the fuzzy logic methodology to optimize screw speed, screw pitch, and loading angle. The outcome provided the suitable screw speed, screw pitch, and loading angle at 450 rpm, 100 mm, and 15° respectively for the best volumetric efficiency. In addition, the optimal energy consumption should use screw speed at 550 rpm, 100 mm screw pitch, and 22.5° loading angle.

5. Research Group in the Biomass Experiments

For the biomass researches in screw conveyor, the solution guidelines for the material handling section have been interested recently to improve all constraints and aim for the better performance. Miao et al. [45] studied biomass materials (miscanthus and switchgrass) in a commercial screw conveyor by concentrating on the flow performance, the angle of material's repose, the energy efficiency, the volumetric efficiency, and so on. The results showed that the energy efficiency and mass flow rate of miscanthus and switchgrass presented lower than the corn conveying, while the volumetric flow rate and volumetric efficiency of biomass materials (miscanthus and switchgrass) had value near to corn conveying. The angle's response of

miscanthus and switchgrass depended on particle size and moisture content. Another result from this research was a non-relationship of the angle's response and the specific energy consumption to transfer miscanthus and switchgrass. Nachenius et al. [46] researched the residence time distribution of biomass particles for the screw conveyor reactor. This work illustrated the mathematical predicted model of the mean residence time of biomass materials such as pine chips, rice, and sand. It provided a good performance, which not only could apply to similar materials, but also applications. Rackl and Gunthner [10] tested the effect of different grades of wood chips on screw feeder. In this research, three different wood chip grades and two blends of wood chips were concerned to investigate mass flow and torque requirement. The conclusion of this work, wood chip was difficult to transfer with screw conveyors, especially the large dimension of wood chip and the particle size of wood chip were a main factor for the driving torque. Another main result from this work was the wood chip mixing that could solve the excessive driving torque of screw feeder by mixing 70% of hard-to-feed wood chip grade and 30% of a high-fine grade including bark and needle content. Chamberlin et al. [47] researched the residence time distribution of wood chip feedstock in screw conveyor reactor. There were four methods to derive residence time distribution of handling (the estimated ideal residence time, the positive step, the pulse input of tracer, and the negative step). The result showed that the pulse input of tracer illustrated a long trailing tail that could not be investigated. Also there was a conclusion that the average residence times were short, and then the flow rate capacities would be higher. Lian et al. [48] concentrated DEM simulation for mixing coal and cylindroid biomass particles in a screw feeder. The results provided the biomass feeding ratio, feeding rate, and screw speed. It could be concluded that a higher biomass feeding ratio would result to the stabilization of the real time mass

flow rate and biomass blending rate. On the other hand, an excessive feeding rate might be a reason of some cylindroid biomass flow obstacle.

6. Research Group in the Chemical Experiments

Another cluster that screw conveyor, which played an important role is the chemical section. For instance, Fu et al. [49] studied the design of screw conveyor in rubber manufacturing. The details of this research provided theoretical equation for designing screw conveyor in rubber process fields. This described step by step for producing screw conveyor in rubber process operations and illustrated the main parameters for the design, such as humidity of bulk materials, characteristics of materials, purification of materials and so forth. Deng-cheng et al. [50] concentrated on the processing interaction of Ashalt mixture on screw conveyor. There was demonstration of the relationship between a paving segregation of asphalt and a parameter design of screw conveyor. The result then showed that screw blade diameter, pitch, and position of mixing in the screw distribution related to the performance of paving asphalt, the reduction of a tangential force, and the increment of an axial force during handling via screw conveyor. That would provide the satisfied efficiency of mixing asphalt. Pezo et al. [51] researched the mixing mechanism of screw conveyor through DEM methodology and used the painting spherical granules that made from zeolite for being material tests. In this research, there was a usage of helix or helical strips to be added on the normal screw types, in order to concentrate homogeneity of screw mixture. DEM was employed to study fifteen screw conveyor and five different geometries. The results indicated that the straight-line blade could blend bulk material better than the others at any screw length. Sun et al. [52] used DEM simulation to investigate non-spherical particles that made from polymethyl methacrylate (PMMA) for handling in screw conveyor. The conclusion

of this research provided that the axial, filling level and angular velocity would be decreased, when shape index of particle was increased. Meanwhile the shape index of particles has been increased, the contact force, the power consumption, the wear of conveyor, and the pressure during screw conveying would be continually increased. Moorthi and Megaraj [53] tried to design and develop the single screw conveying machine for transforming waste plastic to oil. This research applied screw conveyor to be a part of pyrolysis process. The result showed that the integrated screw conveyor in pyrolysis process could transfer oil more efficiency than the pyrolysis process without integrated screw conveyor.

7. Discussion and Conclusions

This review paper attempts to indicate the important concerns in various industries of screw feeders and conveyors. As mentioned in the literature researches, mineral, agriculture, biomass, and chemical applications have some different constrains of elevating and mixing purposes for the bulk materials. Many researchers investigated by varying screw pitch, screw dimension, screw velocity, angle of elevation, angle of repose, clearance between screw and casing, and so on. Most of them attempted to optimize the mass flow rate, the volumetric rate, the power consumption, and the torque requirements, while each group could provide the different results depending on its objective because screw conveyor depended on many factors, especially bulk material properties, which each material had the different properties. Therefore, screw conveyors of each industry group should be selected to suit their own theoretical models for the best design and operation. These will provide reliable results of screw performance. Therefore this review paper can provide some concluded guidelines for each industry group as:

The mining group

- The screw conveyor in mining industries should concern about the torque requirements because of feeding and choke process sections.
- The critical angle screw design should be considered smaller than the predicted angle model from the static force equilibrium for reducing power requirement.
- The clearance between screw and casing is a remarkable concern during mining transportation.
- If the feed rate of the coarse particle was high, then the capable material mixing would be decline.
- The relationship between filling factor and flood-feeding of short length screw conveyor during handling dry coarse particle is important whereby the filling factor should be two times of long length screw conveyor.

The agriculture group

- Agriculture particle handling in inclined screw conveyor, the particle's moisture content, screw velocity, and conveying inclined angles have an effect for particle quality such as broken grains, husked grains, and husked-cracked grain, respectively.
- The experimental agriculture particles showed the incremental percentage of loading materials on screw conveyor caused by the increasing screw speed and flow rate capacity and the decreasing screw diameter.
- The flexible screw conveyor for agriculture handling should be applied the screw speed as the range of 550 rpm to 650 rpm.

The biomass group

- The angle's response of biomass particles was depended on particle size and moisture content while the angle's response and the specific energy consumption were independent from each other.

- The conclusion of this biomass researches, biomass chip was difficult to transfer with screw conveyors, especially the large dimension of the particle size that required a higher driving torque.
- If there is the necessity of mixing biomass chips and the driving torque requirement, this should use excessive 70% of the screw feeder.

The chemical experiments

- The chemical particle handling should have the concern about moisture content of bulk materials, characteristics of materials, and purification of materials.
- The screw blade diameter, pitch, and position of mixing in the screw distribution related to the performance of paving asphalt.
- For chemical particle blading, the research results indicated that the straight line blade could blend bulk material better than the others at any screw length.
- The non-spherical particles of chemical materials for handling in screw conveyor and shape index of particle will affect to the contact force, the power consumption, the wear of conveyor, and the pressure during screw conveying.

Moreover, many researches employed DEM configuration to solve the model of bulk material flow in screw feeders and conveyors by considering on the factors of inter particle forces, residence time distribution, particle shape and size, in order to prove the model and their results before the empirical experiments. By this way, it will provide the best performance of cost saving and time reduction for the research operation.

8. Acknowledgements

The authors would like to thank for acknowledge financial support from the department of Materials Handling and Logistics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

References

- [1] H. Zareiforoush, M. H. Komarizadeh and M. R. Alizadeh, "A Review on Screw conveyors Performance Evaluation during Handling Process," *Journal of Scientific Review*, vol.2, no.1, pp. 55–63, 2010.
- [2] J. R. Metcalf, "The Mechanics of the Screw Feeder," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 180, no. 1, pp. 131–146, 1965, doi: 10.1243/PIME_PROC_1965_180_015_02.
- [3] A. J. Carleton, J. E. P. Miles and F. H. H. Valentin, "A Study of Factors Affecting the Performance of Screw Conveyers and Feeders," *Journal of Engineering for Industry*, vol. 91, no. 2, pp.329–333, 1969, doi: 10.1115/1.3591565.
- [4] D. Minglani, A. Sharma, H. Pandey, R. Dayal, J. B. Joshi and S. Subramaniam, "A review of granular flow in screw feeders and conveyors," *Power Technology*, vol. 366, pp. 369–381, 2020, doi: 10.1016/j.powtec.2020.02.066.
- [5] R. Wagner, "Bulk Material Characteristics, Material Code, Conveyor Size and Speed, Component Groups," in *Handbook of Screw Conveyor for Bulk Material*, Naples, FL, USA: Conveyor Equipment Manufacture Association, 2019, ch. 2, sec. 3, pp. 28–34.
- [6] H. Zareiforoush, M. H. Komarizadeh and M. R. Alizadeh, "Effects of crop-machine variables on paddy grain damage during handling with an inclined screw auger," *Biosystems Engineering*, vol. 106, no. 3, pp. 234–242, 2010, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2010.02.008.
- [7] B. N. Ghosh, "Conveyance of wet parchment coffee beans by an auger," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 12, no. 4, pp. 274–280, 1967, doi: 10.1016/S0021-8634(67)80046-5.

- [8] J. Dai and J. R. Grace, "Biomass screw feeding with tapered and extended sections," *Power Technology*, vol. 168, no. 1, pp. 56–64, 2008, doi: 10.1016/j.powtec.2007.10.033.
- [9] J. Dai and J. R. Grace, "Biomass granular screw feeding: An experimental investigation," *Biomass and Bioenergy*, vol.35, no.2, pp. 942–955, 2011, doi: 10.1016/j.biombioe.2010.11.026.
- [10] M. Rackl and W. A. Gunthner, "Experimental investigation on the influence of different grades of wood chips on screw feeding performance," *Biomass and Bioenergy*, vol.88, pp. 106–115, 2016, doi: 10.1016/j.biombioe.2016.03.011.
- [11] Y. Wang, T. Li, F. J. Muzzio and B. J. Glasser, "Predicting feeder performance based on material flow properties," *Powder Technology*, vol. 308, pp. 135–148, 2017, doi: 10.1016/j.powtec.2016.12.010.
- [12] C. Ruiz-Carcel, A. Starr and E. Nsugbe, "Estimation of powder mass flow rate in a screw feeder using acoustic emissions," *Powder Technology*, vol.336, pp. 122–130, 2018, doi: 10.1016/j.powtec.2018.05.029.
- [13] W. -R. Tsai and C. -I. Lin, "On the mixing of granular materials in a screw feeder," *Powder Technology*, vol.80, no. 2, pp. 119–126, 1994, doi: 10.1016/0032-5910(94)02839-7.
- [14] T. A. Kingston and T. J. Heindel, "Granular mixing optimization and the influence of operating conditions in a double screw mixer," *Powder Technology*, vol. 266, pp. 144–155, 2014, doi: 10.1016/j.powtec.2014.06.016.
- [15] Y. Yu and P. C. Arnold, "The influence of screw feeders on bin flow patterns," *Powder Technology*, vol. 88, no. 1, pp. 81–87, 1996, doi: 10.1016/0032-5910(96)03107-5.
- [16] Y. Yu and P. C. Arnold, "Theoretical modeling of torque requirements for single screw feeders," *Powder Technology*, vol.93, no.2, pp. 151–162, 1997, doi: 10.1016/S0032-5910(97)03265-8.
- [17] A. W. Roberts, "The influence of granular vortex motion on the volumetric performance of enclosed screw conveyors," *Powder Technology*, vol. 104, no. 1, pp.56–67, 1999, doi: 10.1016/S0032-5910(99)00039-X.
- [18] K. Wada, Y. Fujimoto, N. Hayano and K. Haniya, "The Mechanism of Transportation inside the Screw Feeder," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C*, vol.56, no. 524, pp. 935–940, 1990, doi: 10.1299/kikaic.56.935.
- [19] C. Q. Mi, A. G. McLean and P. C. Arnold, "Optimal mechanical design of single span screw feeders," *Powder handling & processing journal*, vol.3, no. 3, pp. 227–239, 1991.
- [20] K. M. AW. Roberts and W. McBride, "The Mechanics of screw feeder performance for bulk solids flow control," presented at 4th International Conference on Bulk Materials, Storage, Handling and Transportation, Handling and Transportation, Wollongong, Australia, Jul. 6–8, 1992, pp. 333–338.
- [21] P. A. Cundall and O. D. L. Strack, "A discrete numerical model for granular assemblies," *Géotechnique*, vol. 29, no. 1, pp. 47–65, 1979, doi: 10.1680/geot.1979.29.1.47.
- [22] P A Moysey and M R Thompson, "Modeling the solids inflow and solids conveying of single -screw extruders using the discrete element method," *Powder Technology*, vol. 153, no. 2, pp. 95–107, 2005, doi: 10.1016/j.powtec.2005.03.001.
- [23] Q F Hou, K J Dong and A B Yu, "DEM study of the flow of cohesive particles in a screw feeder," *Powder Technology*, vol. 256, pp. 529–539, 2014, doi: 10.1016/j.powtec.2014.01.062.
- [24] L Orefice and J G Khinast, "DEM study of granular

- transport in partially filled horizontal screw conveyors,” *Powder Technology*, vol. 305, pp. 347–356, 2017, doi: 10.1016/j.powtec.2016.09.067.
- [25] P J Owen and P W Cleary, “Prediction of screw conveyor performance using the Discrete Element Method (DEM),” *Powder Technology*, vol. 193, no. 3, pp. 274–288, 2009, doi: 10.1016/j.powtec.2009.03.012.
- [26] W McBride and P W Cleary, “An investigation and optimization of the ‘OLDS’ elevator using Discrete Element Modeling,” *Powder Technology*, vol. 193, no. 3, pp. 216–234, 2009, doi: 10.1016/j.powtec.2009.03.014.
- [27] A Jovanovic, L Pezo, S Stanjojlovic, N Kosanic and L Levic, “Discrete element modeling of screw conveyor-mixers,” *Hemijaska industrija*, vol. 69, no. 1, pp. 95–101, 2015, doi: 10.2298/HEMIND130412026J.
- [28] A W Roberts, “Lateral bending stiffness of helical screw feeders and conveyors,” *Bulk Solids Handling*, vol. 26, no. 2, pp. 90–94, 2006.
- [29] A K Srivastava, C E Goering, R P Rohrbach and D R Buckmaster, “Conveying of Agricultural Materials”. in *Engineering Principles of Agricultural Machines*, 2nd ed., St. Joseph, MI, USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2013, ch. 14, pp. 491–524.
- [30] Y Shimizu and P A Cundall, “Three-dimensional DEM simulation of bulk handling by screw conveyors,” *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 127, no. 9, pp. 864–872, 2001.
- [31] S S Waje, A K Patel, B N Thorat and A S Mujumdar, “Study of Residence Time Distribution in a Pilot-Scale Screw Conveyor Dryer,” *Drying Technology*, vol. 25, no. 1, pp. 249–259, 2007, doi: 10.1080/07373930601161120.
- [32] V F Gaivoronskii and A I Postoronko, “Determination of the optimal productivity of a screw conveyor vacuum-press for molding ceramic green mixes,” *Glass and Ceramics*, vol. 67, no. 1, pp. 30–33, 2010, doi: 10.1007/S10717-010-9223-6.
- [33] V F Gaivoronskii and A I Postoronko, “Effect of geometric parameters on the productivity of a screw conveyor vacuum-press when molding ceramic green mixes,” *Glass and Ceramics*, vol. 67, pp. 56–58, 2010, doi: 10.1007/s10717-010-9229-0.
- [34] D Mondal and N Ghosh, “Study on filling factor of short length screw conveyor with flood-feeding condition,” *Materialstoday*, vol. 5, no. 1, pp. 1286–1291, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.213.
- [35] M Li, J Luo, B Wu and J Hua, “Experimental research of the mechanism and particle flow in screw conveyer,” *International Journal of Heat and Technology*, vol. 36, no. 1, pp. 173–181, 2018, doi: 10.18280/ijht.360123.
- [36] M Pezo, L Pezo, A P Jovanovic, A Terzic, L Andric, B Loncar and P Kojic, “Discrete element model of particle and premixing action in modified screw conveyors,” *Powder Technology*, vol. 336, pp. 255–264, 2018, doi: 10.1016/j.powtec.2018.06.009.
- [37] L Sun, X Zhang, Q Zeng, K Gao, K Jiang and J Zhou, “Application of a screw conveyor with axial tilt blades on a shearer drum and investigation of conveying performance based on DEM,” *Particuology*, vol. 61, pp. 91–102, 2022, doi: 10.1016/j.partic.2021.06.001.
- [38] Z Yang, S Xiaoxia and M Wenjun, “Research on the axial velocity of the raw coal particles in vertical screw conveyor by using the discrete element method,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 35, no. 6, pp. 2551–2560, 2021, doi: 10.1007/s12206-021-0526-z.
- [39] M J Moser, A Fuchs and H Zangl, “Non-Invasive Capacitive Sensor for the Determination of Revolution Speed and Fill Level in Screw Conveyors,” presented at *IEEE Sensors Journal*,

- Lecce, Italy, Oct. 26–29, 2008, pp. 49–52, doi: 10.1109/ICSSENS.2008.4716380.
- [40] A Mariajayaprakash and T Senthilvelan, “Optimizing Process Parameters of Screw Conveyor (Sugar Mill Boiler) Through Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and Taguchi Method,” *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 14, pp.772–783, 2014, doi: 10.1007/s11668-014-9887-2.
- [41] K D Dixit, A S Rao and P Vasudevan, “Effect of Percent Trough Load on Horizontal Screw Conveyor,” *International Journal of Engineering Development and Research*, vol. 2, no. 1, pp.508–511, 2014.
- [42] T O Olanrewaju, I M Jeremiah and P E Onyeonula, “Design and fabrication of a screw conveyor,” *Agricultural Engineering International*, vol. 19, no. 3, pp. 156–162, 2017.
- [43] R Hevko, R Rohatynskyi, M Hevko, O Lyashuk and O Trokhaniak, “Investigation of sectional operating elements for conveying agricultural materials,” *Research in Agricultural Engineering*, vol. 66, no.1, pp. 18–26, 2020, doi: 10.17221/25/2019-RAE.
- [44] O Ozbek, “Fuzzy modeling of volumetric efficiency and specific energy consumption in agricultural screw conveyors,” *Rural Engineering*, vol. 50, no. 5, pp. 1–8, 2020, doi: 10.1590/0103-8478cr20190764.
- [45] Z Miao, T E Grift, A C Hansen and K C Ting, “Flow performance of ground biomass in a commercial auger,” *Powder Technology*, vol. 267, no. 13, pp. 354–361, 2014, doi: 10.1016/j.powtec.2014.07.038.
- [46] R W Nachenius, T A van de Wardt, F Ronsse and W Prins, “Residence time distributions of coarse biomass particles in a screw conveyor reactor,” *Fuel Processing Technology*, vol. 130, pp. 87–95, 2015, doi: 10.1016/j.fuproc.2014.09.039.
- [47] C Chamberlin, D Carter and A Jaconson, “Measuring residence time distribution of wood chips in a screw conveyor reactor,” *Fuel Processing Technology*, vol. 178, pp. 271–282, 2018, doi: 10.1016/j.fuproc.2018.06.005.
- [48] G Lian, W Zhong and X Liu, “DEM study on the mixed feeding process of coal and cylindroid biomass particles in a screw feeder,” *Advanced Power Technology*, vol. 32, no. 7, pp. 2543–2554, 2021, doi: 10.1016/j.appt.2021.05.031.
- [49] P Fu, S Li and C Wang, “Screw Conveyor Design and Processing in Rubber Production,” *Advanced Materials Research*, vol. 221, pp. 394–398, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.221.394.
- [50] M Deng-cheng, L Hong-Hai and C Zheng, “Study on the Interaction Mechanism between Screw Conveyor and Asphalt Mixture,” *Advanced Materials Research*, vol. 598, pp. 413–419, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.598.413.
- [51] L Pezo, A Jovanovic, M Pezo, R Colovic and B Loncar, “Modified screw conveyor-mixers-Discrete element modeling approach,” *Advanced Power Technology*, vol. 26, no. 5, pp. 1391–1399, 2015, doi: 10.1016/j.appt.2015.07.016.
- [52] H Sun, H Ma and Y Zhao, “DEM investigation on conveying of non-spherical particles in a screw conveyor,” *Particuology*, vol. 65, pp. 17–31, 2022, doi: 10.1016/j.partic.2021.06.009.
- [53] S Moorthi and M Megaraj, “Design and development of signal screw conveying machine for pyrolysis of waste plastics using Nano zeolite particles in fixed bed reactor,” *Materialtoday*, vol. 47, no. 4, pp. 880–884, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.126.

การประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องเรือน ประเภทโต๊ะที่วิจากลำต้นไม้ปาล์มน้ำมัน

Application of Kansei Engineering Techniques in the Design and Development of TV Table Furniture Products from Oil Palm Trunks

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2,*}, ชาตรี หอมเขียว^{1,2}, สุชาติ จันทรมณี¹ และ ปรีชญา ชุมศรี³

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย บ่อยาง เมือง สงขลา 90000

²หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บ่อยาง เมือง สงขลา 90000

³สาขาการตลาด คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย บ่อยาง เมือง สงขลา 90000

Surasit Rawangwong^{1,2,*}, Chatree Homkhiew^{1,2}, Suchart Chantaramanee^{1,2} and Prechaya Chumsri³

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya,
Bo Yang, Mueang, Songkhla, 90000, Thailand

²Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Srivijaya, Bo Yang, Mueang, Songkhla, 90000, Thailand

³Department of Marketing, Faculty of Business Administration, Rajamangala University of Technology Srivijaya,
Bo Yang, Mueang, Songkhla, 90000, Thailand

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

Received: Dec 13, 2021; Revised: Feb 15, 2022; Accepted: Apr 07, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซสำหรับออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนประเภทโต๊ะที่วิจากลำต้นไม้ปาล์มน้ำมัน ให้เกิดแนวความคิดการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคผ่านการวิเคราะห์เชิงปริมาณประเภทที่ 1 (การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ) ที่ได้จากการสำรวจด้วยการประเมินคะแนนแบบลิเคิร์ตสเกลให้อยู่ในรูปแบบของสมการพยากรณ์สำหรับแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ และสำหรับจำลองรูปแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณประเภทที่ 1 พบว่าสามารถกำหนดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์สำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ จำนวน 5 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย การใช้งาน รูปทรง วัสดุตกแต่ง ขนาด และรูปแบบผลิตภัณฑ์ อีกทั้งพบว่าสามารถกำหนดค่าแสดงความรู้สึกที่แสดงความสัมพันธ์กับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์สำหรับการออกแบบ ได้แก่ รับน้ำหนัก ประโยชน์ใช้สอยรูปร่าง เนื้อที่ใช้สอย หูหระ สวยงาม และเอกลักษณ์ ดังนั้นผลงานวิจัยในครั้งนี้สามารถเป็นแนวทางช่วยให้นักออกแบบสามารถกำหนดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์กับความรู้สึกที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ให้มีความสอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภคได้

คำสำคัญ: การพัฒนาผลิตภัณฑ์, โต๊ะที่วิ, วิศวกรรมคันเซ, ลำต้นไม้ปาล์มน้ำมัน, การออกแบบผลิตภัณฑ์

Abstract

This objective aims to apply Kansei engineering techniques in the design and development of TV table furniture products from oil palm trunks. To create an idea for the development of products that can respond to the that meets consumer needs through quantification theory type 1 (Linear multiple regression) with a Likert scale. To form of the forecast equation for showing the relationship between sentiment with product attributes and for simulating new product models. The results of the quantification theory type I revealed that five product attributes could be defined for product design: usage, contours, decoration material, product size and product form. In addition, it was found that expressions of sentiments that correlate with product attributes for design can also be include, weight-bearing, usability, shape, usable space, luxury, beauty, and uniqueness. Therefore, the results of this research can serve as a guide to help designers to define product attributes that represent the feel-good relationship for designing and developing new products in accordance with customer needs.

Keywords: Product Development, TV Table, Kansai Engineering, Oil Palm Trunk, Product Design.

1. บทนำ

ปัจจุบันโลกได้รับการพัฒนาปรับเปลี่ยนอย่างต่อเนื่อง โดยมีเทคโนโลยีและนวัตกรรมใหม่ ๆ เกิดขึ้นมากมาย ดังนั้น ทุกสิ่งทุกอย่างล้วนต้องปรับปรุงและพัฒนาเข้ากับสิ่งใหม่ ๆ เพื่อลดปัญหาการสูญพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตไม่ว่าจะเป็นพืชหรือสัตว์ที่เกิดจากการทำลายธรรมชาติเพื่อแสวงหาสิ่งต่าง ๆ ของมนุษย์ โดยสิ่งที่สามารถแก้ไขปัญหาลำดับนี้ได้คือการนำสิ่งของจากวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรที่มีอยู่มากหลายชนิดในประเทศไทยมาพัฒนาเป็นสิ่งต่าง ๆ ที่สามารถย่อยสลายได้ โดยไม่มีผลกระทบต่อการทำลายธรรมชาติ โดยในบทความฉบับนี้ขอลำดับถึงวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรจากต้นปาล์มน้ำมัน [1]

ปาล์มน้ำมันจัดเป็นพืชน้ำมันที่สำคัญ เนื่องจากเป็นพืชที่ให้ผลผลิตน้ำมันต่อไร่สูงเมื่อเทียบกับพืชน้ำมันอื่น ๆ แต่มีการให้ผลผลิตในระยะสั้น ปาล์มน้ำมันเป็นที่ต้องการของตลาดของโลก โดยในปี พ.ศ. 2561 ที่ผ่านมามีปริมาณการผลิตและการบริโภคน้ำมันปาล์มมีจำนวนมากถึง 70.6 ล้านตัน และ 66.4 ล้านตัน ตามลำดับ แหล่งผลิตปาล์มน้ำมันหลักคือ อินโดนีเซีย มาเลเซีย และประเทศไทย ซึ่งจัดอยู่ในอันดับ 3 ของโลก [2] การปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศไทยจะนิยมปลูกกันมากในเขตภาคใต้ โดยในปี พ.ศ. 2562 ที่ผ่านมามีพื้นที่ภาคใต้มีจำนวนเนื้อที่ขึ้นต้นปาล์มน้ำมันประมาณ 5.2 ล้านไร่ คิดเป็นร้อยละ 86 ของเนื้อที่ขึ้นต้นปาล์มน้ำมันทั้งหมด โดยบริเวณที่มีการปลูกมากเป็นอันดับต้น ๆ คือ จังหวัดสุราษฎร์

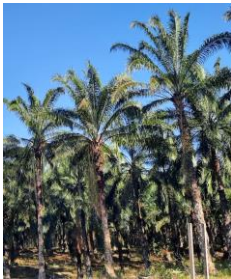
ธานี กระบี่ ชุมพร สตูล และตรัง อันเนื่องมาจากสภาพดินและสภาพอากาศที่เหมาะสม [3] ความต้องการใช้น้ำมันปาล์มในประเทศมากขึ้น อายุของต้นปาล์มน้ำมันที่เริ่มให้ผลผลิตจะอยู่ที่ 3 ปี ชาวสวนสามารถเก็บผลผลิตได้ไปจนหมดอายุของต้นปาล์มน้ำมัน ซึ่งอยู่ประมาณ 25-35 ปี หลังจากนั้นต้นปาล์มน้ำมันจะให้ผลผลิตน้อยลง ชาวสวนจึงต้องตัดต้นปาล์มน้ำมันที่มีอายุมากทิ้ง เพื่อที่จะปลูกต้นปาล์มน้ำมันรุ่นต่อไปทดแทน ซึ่งต้นปาล์มน้ำมันที่ถูกตัดทิ้งนี้ไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์อย่างใดเลยนอกจากทำปุ๋ยหมัก

จากการลงพื้นที่สำรวจกลุ่มผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ปาล์มอำเภอมะนัง จังหวัดสตูล พบว่า ทางกลุ่มผู้ผลิตมีความต้องการที่จะนำไม้ปาล์มที่หมดอายุการใช้งานจากการให้ผลผลิตมาเพิ่มคุณค่าให้เกิดประโยชน์ แสดงดังรูปที่ 1 โดยการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เครื่องเรือน ทั้งนี้สิ่งสำคัญที่ทางกลุ่มผู้ผลิตมีความต้องการที่จะพัฒนาคือ แนวทางการพัฒนาแบบผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนจากลำต้นไม้ปาล์มน้ำมันที่สามารถตอบโจทย์ความต้องการเชิงอารมณ์ ความรู้สึก หรือดึงดูดความสนใจของผู้บริโภค เช่น กลุ่มโรงแรม รีสอร์ท ร้านอาหาร บ้านเรือน และกลุ่มผู้บริโภคที่ชอบเครื่องเรือนจากลำต้นไม้ปาล์มน้ำมัน โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ประเภทโต๊ะทีวี

วิศวกรรมคันเซ (Kansei Engineering) เป็นอีกหนึ่งวิธีการพัฒนาผลิตภัณฑ์สำหรับกลุ่มผู้ผลิตที่ต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์ด้วยการแปลงความต้องการของผู้บริโภคออกมา

เป็นคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่สอดคล้องกับความรู้สึกด้านต่าง ๆ เพื่อการออกแบบผลิตภัณฑ์แบบใหม่ได้อย่างเหมาะสมและตรงตามความต้องการเชิงอารมณ์ของผู้บริโภค

จากความต้องการของกลุ่มผู้ผลิตที่ต้องการพัฒนาแบบผลิตภัณฑ์และเพิ่มคุณค่าไม้ปาล์มที่หมดอายุการใช้งานดังกล่าวมาข้างต้น ดังนั้น จึงทำให้เกิดงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซสำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยวัตถุประสงค์หลักเพื่อการศึกษาการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนประเภทโต๊ะที่วิจากลำต้นไม้ปาล์มน้ำมัน โดยการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซ ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถแปลงความรู้สึกนึกคิดทางจิตวิทยา และอารมณ์ ความรู้สึก ของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์มาวิเคราะห์เป็นข้อกำหนดการออกแบบ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ได้รับการพัฒนาให้เป็นผลิตภัณฑ์แบบใหม่ที่ตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคกลุ่มตลาดเป้าหมายตามยุคสมัยได้



รูปที่ 1 ต้นปาล์มน้ำมัน

2. แนวคิดและทฤษฎี

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซในการออกแบบพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนประเภทโต๊ะที่วิจากลำต้นไม้ปาล์มน้ำมันมีดังต่อไปนี้

2.1.ความหมายและความเป็นมาของวิศวกรรมคันเซ

วิศวกรรมคันเซหรือการออกแบบเกี่ยวกับอารมณ์ (Emotional design and Affective engineering) เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาโดย ศาสตราจารย์ ดร.มิตสึโอะ นากามาจิ ในปี ค.ศ. 1970 แห่งมหาวิทยาลัยอิโรซิม่า [4] เป็นเทคนิคเชิงวิศวกรรมในการรวบรวมความต้องการเชิงอารมณ์ ความรู้สึกของผู้บริโภค และกำหนดเป็นตัวแบบการพยากรณ์เชิงคณิตศาสตร์ของความต้องการเชิงอารมณ์ที่มีผลต่อ

คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ [5] ในฐานะที่เป็นเทคโนโลยีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ตามหลักสรีรศาสตร์ วิศวกรรมคันเซได้รวบรวมความชอบและอารมณ์ของผู้บริโภคเข้าไว้ด้วยกัน [6] อีกทั้งยังช่วยแปลงความต้องการของผู้บริโภคที่เป็นเชิงคุณภาพให้อยู่ในรูปปริมาณ ซึ่งวิศวกรรมคันเซไม่เพียงแต่ช่วยในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของผู้บริโภคกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ ยังสามารถหารายละเอียดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ได้ [7],[8] ดังนั้น จึงเป็นหลักการที่แสดงแนวคิดอย่างเป็นระบบที่ช่วยให้นักออกแบบสร้างผลิตภัณฑ์โดยอาศัยการพิจารณาความต้องการของผู้บริโภค [9] และเป็นเครื่องมือเชิงวิศวกรรมในการรวบรวมความต้องการเชิงอารมณ์ของผู้บริโภค และกำหนดเป็นตัวแบบการพยากรณ์เชิงคณิตศาสตร์ของความต้องการเชิงอารมณ์ที่มีผลต่อคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ [10]

ดังนั้น วิศวกรรมคันเซจึงเป็นการผสานแนวความคิดการออกแบบผลิตภัณฑ์ในรูปแบบใหม่ ในการสร้างแนวความคิดที่เป็นนวัตกรรมใหม่ของผลิตภัณฑ์ในคำถามสนับสนุนการหาแนวทางแก้ไขใหม่ ๆ และเพิ่มการประเมินวัตถุประสงค์ผลิตภัณฑ์คู่แข่งหรือแนวความคิดในการออกแบบ [11]

2.2.กระบวนการของวิศวกรรมคันเซ

ปัจจุบันวิศวกรรมคันเซได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายนักวิจัยหลายท่านได้พัฒนาและบูรณาการวิธีการต่าง ๆ เข้ากับแนวความคิดวิศวกรรมคันเซครอบคลุมและแก้ไขปัญหาในหลาย ๆ ด้าน [12] ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงาน แสดงดังรูปที่ 2 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 กระบวนการของวิศวกรรมคันเซ

1) การเลือกกลุ่มตลาดหรือผลิตภัณฑ์ วิศวกรรมคันเซ จะเริ่มจากการตัดสินใจในด้านสร้างหรือพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีลักษณะเฉพาะ

2) การกำหนดค่าแสดงความรู้สึก เป็นการรวบรวมค่าแสดงความรู้สึกหรือ คำคันเซ [13] สำหรับเชื่อมโยงกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

3) การกำหนดค่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ เป็นการระบุคุณลักษณะผลิตภัณฑ์เป็นเชิงกายภาพให้ตรงกับกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ได้กำหนดไว้เบื้องต้นแล้วสามารถทำคู่ขนานกับกรอบด้านความรู้สึกที่มีต่อผลิตภัณฑ์

4) การสังเคราะห์ เป็นการเชื่อมโยงระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ ส่วนใหญ่จะใช้แบบสอบถามเพื่อการประมวลผลทางสถิติ การวิเคราะห์เชิงปริมาณ

5) การตรวจสอบความถูกต้องและการสร้างแบบจำลอง โดยนำผลที่ได้มาตรวจสอบความถูกต้อง ทำการสร้างแบบจำลองผลิตภัณฑ์นำข้อมูลที่ได้อาวิเคราะห์แปลงเป็นข้อกำหนดในการออกแบบ งานวิจัยนี้ให้ความสนใจกับการสำรวจข้อมูลด้วยแบบสอบถาม และการสรุปผลขึ้นต้นจากแบบสอบถาม ซึ่งมีขั้นตอนย่อยของการสังเคราะห์ผล และการทดสอบความถูกต้อง งานวิจัยนี้มีการสำรวจข้อมูลทั้งหมด 3 ส่วน คือ คำคันเซที่แสดงถึงขอบเขตความรู้สึก คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่แสดงถึงขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ และตัวแทนผลิตภัณฑ์ จากนั้นสรุปข้อมูลในการสำรวจให้เป็นรูปแบบของแผนภูมิและตารางข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์เชิงสถิติต่อไป

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจอารมณ์ความรู้สึกของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนประเภทโต๊ะทีวี ด้วยการเก็บแบบสอบถามตามหลักแนวคิดของเทคนิควิศวกรรมคันเซ ซึ่งเป็นเครื่องมือหลักของการวิจัย ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยแบบสอบถามการวิจัยจำนวน 3 ชุด โดยแบบสอบถามในแต่ละชุดมีการจำแนกกลุ่มผู้ประเมินแบบสอบถามที่แตกต่างกัน ดังนี้

แบบสอบถามที่ 1 สำหรับการกำหนดขอบเขตค่าแสดงความรู้สึก ประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญด้านการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติความชำนาญในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนจากไม้ปาเล็ม ไม้ทั่วไป และผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบที่มีประสบการณ์ และสามารถแก้ไขปัญหางานออกแบบที่เกี่ยวกับงานไม้จำนวน 28 ท่าน

แบบสอบถามที่ 2 สำหรับกำหนดขอบเขตค่าแสดงความรู้สึก ประเมินโดยผู้ตอบแบบสอบถามที่เป็นผู้บริหารกลุ่มเป้าหมาย ไม่ว่าจะเป็นกลุ่มโรงแรม รีสอร์ท ร้านอาหาร บ้านเรือน และกลุ่มผู้บริโภคที่มีคุณสมบัติความชื่นชอบและมีประสบการณ์การใช้ผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนจากไม้ทั่วไป จำนวน 76 ท่าน

แบบสอบถามที่ 3 สำหรับการกำหนดข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการประเมินแบบสอบถามที่ 2 และแบบสอบถามที่ 3 เป็นการสำรวจและรวบรวมความต้องการของผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายเป็นหลัก อีกทั้งต้องการให้ข้อมูลด้านคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีความสอดคล้องกัน ดังนั้นผู้ตอบแบบสอบถามที่ 3 เป็นกลุ่มเดียวกับแบบสอบถามที่ 2 จำนวน 37 ท่าน

ดังนั้นในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้เครื่องมือการวิจัยเบื้องต้นมาประกอบการวิจัยและสามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

3.1.การกำหนดขอบเขตการศึกษา (Choice of Domain)

ลงพื้นที่สำรวจกลุ่มผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ปาเล็ม อำเภอมะนัง จังหวัดสตูล เพื่อกำหนดขอบเขตการศึกษา พบว่าทางกลุ่มผู้ผลิตมีความต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์โต๊ะทีวีที่มีวัตถุดิบหลักคือไม้ปาเล็มที่หมดอายุการใช้งาน อีกทั้งกำหนดกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายคือ กลุ่มโรงแรม รีสอร์ท ร้านอาหาร บ้านเรือน และกลุ่มผู้บริโภคที่ชอบผลิตภัณฑ์เครื่องเรือน โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ประเภทโต๊ะทีวี

นอกจากนี้ในส่วนของภาพผลิตภัณฑ์อาจเป็นภาพถ่ายอย่างของผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่ในปัจจุบันหรือภาพผลิตภัณฑ์เชิงแนวคิด เพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาแบบผลิตภัณฑ์

3.2.การกำหนดขอบเขตคำแสดงความรู้สึก (Span the Semantic Space)

รวบรวมและคัดเลือกคำแสดงความรู้สึก (Kansei Word) ที่แสดงถึงความรู้สึกเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนประเภทโต๊ะทีวี เพื่อใช้เชื่อมโยงกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนย่อยดังนี้

3.2.1.การรวบรวมคำแสดงความรู้สึก

รวบรวมและคัดเลือกคำแสดงความรู้สึก (Kansei Word) ที่แสดงถึงความรู้สึกเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนประเภทโต๊ะทีวี โดยสืบค้นและรวบรวมจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น สื่ออินเทอร์เน็ต นิตยสาร วารสาร ผู้เชี่ยวชาญ ผู้ใช้งานที่มีประสบการณ์ หนังสือ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.2.2.การคัดเลือกคำแสดงความรู้สึก

นำคำแสดงความรู้สึกที่ได้จากการรวบรวมในขั้นตอนก่อนหน้าจัดทำแบบสอบถามที่ 1 เพื่อคัดกรองคำแสดงความรู้สึกจากนักออกแบบและผู้เชี่ยวชาญจำนวนทั้งหมด 28 ท่าน โดยใช้วิธีการหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item Objective Congruence; IOC) โดยมีค่าในการประเมินแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ -1, 0, 1 ซึ่งในวิจัยนี้ได้ใช้ค่าดัชนีความสอดคล้องที่มากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 ($IOC \geq 0.5$)

จากการศึกษาเครื่องมือและการสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย พบว่า การตัดสินใจค่า IOC นั้นจะทำการคัดเลือกค่า $IOC \geq 0.5$ เพราะเป็นค่าแสดงถึงความเที่ยงตรงตามเนื้อหาในระดับดี สามารถนำไปใช้ได้ [14] ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการคัดเลือกคำแสดงความรู้สึกที่มีค่า $IOC \geq 0.5$

3.2.3.การแปลความหมาย

นำผลการคัดเลือกคำแสดงความรู้สึกที่ผ่านการคัดเลือกที่มีค่า $IOC \geq 0.5$ ไปสร้างแบบสอบถามในขั้นตอนต่อไปโดยนำคำแสดงความรู้สึกที่ได้ไปคัดกรองกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์ไม้ และผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบจำนวน 5 ท่าน โดยใช้วิธีการระดมสมองเพื่อคัดเลือกคำแสดงความรู้สึกที่สามารถสื่อถึงผลิตภัณฑ์ได้มากที่สุดและเหมาะสมมากที่สุด

3.3.การกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ (Span the Space of Properties)

รวบรวมและคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญต่อความรู้สึกของผู้บริโภค และการออกแบบผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

3.3.1.การรวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ (Collection)

รวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ โดยอ้างอิงจากขอบเขตผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา ซึ่งได้ทำการรวบรวมจากหลายแหล่งข้อมูล ทั้งได้จากนิยามภาพลักษณ์ และการสร้างสรรค์แนวความคิดใหม่ที่ได้จากการผสมผสานของผลิตภัณฑ์ที่คล้ายคลึงกัน จากนั้นนำคุณลักษณะผลิตภัณฑ์มาวิเคราะห์ผ่านแผนผังกลุ่มเชื่อมโยง (Affinity Diagrams) โดยผลลัพธ์ที่ได้เพื่อให้ทราบรายการคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ก่อนทำการคัดเลือกในขั้นตอนถัดไป

3.3.2.การคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่สำคัญ (Selection)

นำคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรวบรวมขั้นตอนก่อนหน้าจัดทำแบบสอบถามที่ 2 และทำการประเมินโดยกลุ่มผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมาย กลุ่มโรงแรม รีสอร์ท ร้านอาหาร ร้านกาแฟ บ้านเรือน และกลุ่มผู้บริโภคที่ชอบเครื่องเรือนประเภทโต๊ะทีวี จำนวน 76 คน เพื่อคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีระดับคะแนนมากกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประเมินทั้งหมด สุดท้ายในส่วนคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ใหม่ จะได้รับการประเมินและคัดเลือกโดยผู้เชี่ยวชาญในด้านที่เกี่ยวข้อง เช่น ฝ่ายออกแบบผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

3.3.3.กำหนดชุดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ (Compiling)

นำผลจากการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ไปคัดกรองกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์และการแปรรูปไม้ จำนวน 5 ท่าน โดยใช้วิธีการระดมสมองเพื่อคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีความจำเป็นและสำคัญที่มีผลต่อความรู้สึกของผู้บริโภคสำหรับเครื่องเรือนจากลำต้นไม้ปาล์มน้ำมันประเภทโต๊ะทีวี

3.4.การรวบรวมภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ (Product Representation Collection)

รวบรวมภาพผลิตภัณฑ์ที่มีคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก และคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยที่มีความหลากหลาย จากนั้น

ประยุกต์ใช้แผนผังกลุ่มเชื่อมโยงในการแบ่งกลุ่มภาพผลิตภัณฑ์ออกเป็นกลุ่มตามผลการวิเคราะห์ขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ หลังจากนั้นเลือกภาพผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยตรงกับขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์มากที่สุด เพื่อกำหนดภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ที่ใช้เป็นองค์ประกอบในแบบสอบถามที่ 3

3.5.การสร้างแบบสอบถามและสำรวจความคิดเห็นเพื่อทำการประเมินผลิตภัณฑ์

สร้างแบบสอบถามที่ 3 โดยองค์ประกอบของแบบสอบถามประกอบด้วยข้อมูล 3 ส่วน คือคำค้นเซที่แสดงขอบเขตความรู้สึกลักษณะผลิตภัณฑ์ที่แสดงขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ และภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นข้อมูลที่ผ่านการคัดเลือกในขั้นตอนก่อนหน้านี้ จากนั้นทำการประเมินโดยกลุ่มผู้บริโภคร่วมเป้าหมาย ผู้ผลิตจำนวน 37 คน เพื่อศึกษาว่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ใดที่ส่งผลและสื่อถึงอารมณ์ความรู้สึกใด และส่งผลมากน้อยเพียงใด จากนั้นดำเนินการสรุปข้อมูลจากแบบสอบถามที่ 3 โดยแสดงข้อมูลในรูปแบบแผนภูมิและนำข้อมูลบางส่วนไปวิเคราะห์ด้วยหลักการทางสถิติต่อไป

3.6.การประเมินผลการสอบถามด้วยหลักการทางสถิติและสรุปผล

ประเมินผลการสอบถามด้วยหลักการทางสถิติและสรุปผล เป็นการสังเคราะห์ผลจากแบบสอบถามที่ 3 ที่ผ่านการประเมินแบบสอบถามด้วยกลุ่มผู้บริโภคร่วมเป้าหมาย เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

จากการศึกษาวิจัย Pimapunsri [10] พบว่าวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้กันมากคือเครื่องมือทางสถิติ โดยเฉพาะ ทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 (Quantification Theory Type I; QT1) แสดงดังรูปที่ 3 และสามารถสรุปรายละเอียดของ 4 ขั้นตอนย่อยได้ดังนี้

3.6.1.รวบรวมผลจากการสำรวจกลุ่มเป้าหมายเบื้องต้น

นำข้อมูลส่วนของระดับคะแนนในแต่ละคำค้นเซของตัวแทนผลิตภัณฑ์แต่ละภาพมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อคำนวณ

ข้อมูลว่าค่าแสดงความรู้สึกแต่ละคำมีความโดดเด่น และมีความสัมพันธ์กับภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์มากน้อยเพียงใด

3.6.2.วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมประยุกต์ทางสถิติ

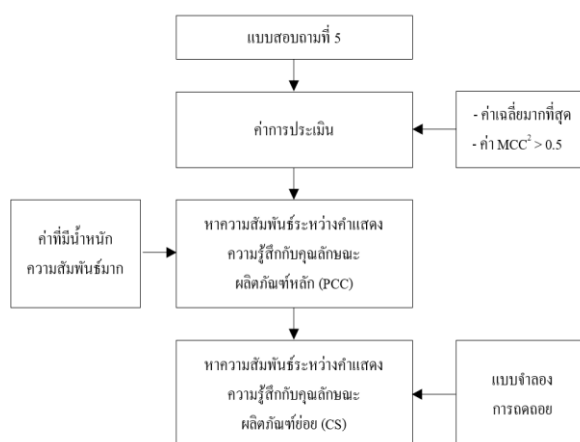
วิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ เพื่อหาค่า R-Square Adjust หรือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณยกกำลังสอง (Square Multiple Correlation Coefficient; MCC^2) โดยทั่วไปแล้วค่า MCC^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1.00 ถึง +1.00 สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่า $MCC^2 > 0.5$ จึงจะยอมรับผล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Schütte [5] และ Pimapunsri [10] โดยมีการกำหนดค่า $MCC^2 > 0.5$

3.6.3.ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก (Partial Correlation Coefficient; PCC)

วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักที่มีน้ำหนักความสัมพันธ์มาก และมีผล ($P < 0.05$) สอดคล้องกับวิธีดำเนินการวิจัยของ Yodwangjai [7] และ Pimapunsri [10] ที่มีผล ($P < 0.05$)

3.6.4.ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย (Category Score; CS)

วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยด้วยแบบจำลองการถดถอย จากนั้นพิจารณาว่า CS ที่มีผล ($P < 0.05$) ทั้งนี้มีการพิจารณาร่วมกับค่า PCC ที่มีน้ำหนักความสัมพันธ์มาก



รูปที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยหลักการทางสถิติ [7],[10]

3.7.การออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

เมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องเรียบร้อยแล้ว นำข้อมูลที่ได้อาจขึ้นตอนก่อนหน้าให้กับทีมงานนักออกแบบ โดยการแปลความรู้สึกที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ผู้องค์ประกอบของด้านการออกแบบ เพื่อกำหนดเป็นแนวทางข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนประเภทโต๊ะทีวีจากลำต้นไม้ปาล์มน้ำมัน และดำเนินการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

3.8.ประเมินความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์

นำผลิตภัณฑ์โต๊ะทีวีจากลำต้นไม้ปาล์มน้ำมันแบบใหม่ที่ได้ขึ้นรูปแล้ว ไปทำการสำรวจความพึงพอใจของกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายเพื่อศึกษาระดับคะแนนความพึงพอใจของกลุ่มเป้าหมาย

4. ผลการวิจัย

ผลการวิจัยด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซสำหรับออกแบบพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนประเภทโต๊ะทีวีจากลำต้นไม้ปาล์มน้ำมันตามวิธีการดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปผลการวิจัยดังต่อไปนี้

4.1.ผลการกำหนดขอบเขตคำแสดงความรู้สึก

จากการเก็บข้อมูลคำแสดงความรู้สึก (Kansei Word) ที่แสดงถึงความรู้สึกเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนประเภทโต๊ะทีวีจำนวนทั้งสิ้น 43 คำ โดยมีคำถามจากแบบสอบถามที่ 1 ว่าในการออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนประเภทโต๊ะทีวีจากลำต้นไม้ปาล์มน้ำมัน ท่านคิดว่าคำแสดงความรู้สึกเหล่านี้สามารถสื่อถึงผลิตภัณฑ์โต๊ะทีวีได้หรือไม่ พบว่า มีคำคันเซที่แสดงถึงความรู้สึกเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ (IOC >= 0.5) มีจำนวน 26 คำ เนื่องจากคำคันเซที่มีจำนวนมากเกินไป จึงได้นำคำคันเซที่ได้ไปคัดเลือกโดยผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์และการแปรรูปไม้ จำนวน 5 ท่านอีกครั้ง โดยคำนึงถึงคำที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นคำคันเซที่ถูกคัดเลือกขึ้นสุดท้ายมีจำนวน 16 คำ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการกำหนดขอบเขตคำแสดงความรู้สึก

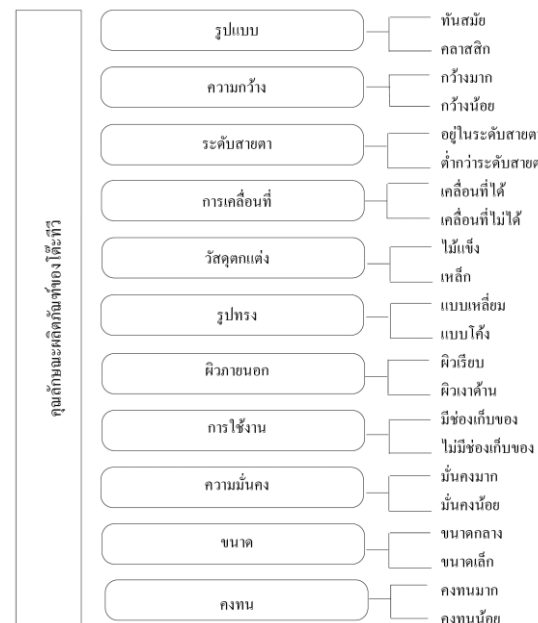
ผลการกำหนดขอบเขตคำแสดงความรู้สึกทั้ง 16 คำ		
แปลกใหม่	รับน้ำหนัก	รูปร่าง
วัสดุ	สวยงาม	ดูง่าย

ตารางที่ 1 ผลการกำหนดขอบเขตคำแสดงความรู้สึก (ต่อ)

ผลการกำหนดขอบเขตคำแสดงความรู้สึกทั้ง 16 คำ		
แข็งแรง	เรียบง่าย	ผิวสัมผัส
เนื้อที่ใช่สอย	เอกลักษณ์	สมดุล
อายุการใช้งาน	ทันสมัย	หรูหรา
ประโยชน์ใช้สอย		

4.2.ผลการกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

ผลการรวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนประเภทโต๊ะทีวีจำนวน 22 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ จากนั้นเมื่อนำไปเก็บแบบสอบถามที่ 2 แล้วคัดเลือกเฉพาะคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีระดับคะแนนมากกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประเมินทั้งหมด คือ 4.21 และนำคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้กลับไปคัดกรองกับผู้เชี่ยวชาญพบว่า คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ถูกคัดเลือกมีจำนวนทั้งหมด 11 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์โต๊ะทีวีที่ได้รับการคัดเลือก

4.3.ผลการรวบรวมภาพผลิตภัณฑ์

จากการรวบรวมภาพผลิตภัณฑ์ พบว่า มีภาพผลิตภัณฑ์โต๊ะทีวีที่มีคุณลักษณะหลากหลายจำนวน 73 ภาพ ทั้งนี้เมื่อประยุกต์ใช้แผนผังกลุ่มเชื่อมโยงในการแบ่งกลุ่มตัวแทนผลิตภัณฑ์ ดังตัวอย่างการวิเคราะห์ในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นการยกตัวอย่างภาพผลิตภัณฑ์จำนวน 5 ภาพมาทำการวิเคราะห์

1. รูปแบบของผลิตภัณฑ์		7. ความสะดวก	
คลาสสิก	ทันสมัย	ผิวเงา	ผิวเรียบ
ภาพที่ 3, 4, 5	ภาพที่ 1, 2, 3	ภาพที่ 1, 2, 3, 4, 5	ภาพที่ -
2. ความกว้าง		8. การใช้งาน	
กว้างมาก	กว้างน้อย	มีช่องเก็บของ	ไม่มีช่องเก็บของ
ภาพที่ 1, 2	ภาพที่ 3, 4, 5	ภาพที่ 5	ภาพที่ 1, 2, 3, 4
3. ระดับสายตา		9. ความมั่นคง	
อยู่ในระดับสายตา	ต่ำกว่าระดับสายตา	มั่นคงมาก	มั่นคงน้อย
ภาพที่ 1, 2, 3, 5	ภาพที่ 4	ภาพที่ 1, 2, 3, 4	ภาพที่ 5
4. การเคลื่อนที่		10. ขนาดของผลิตภัณฑ์	
เคลื่อนที่ได้	เคลื่อนที่ไม่ได้	ขนาดกลาง	ขนาดเล็ก
ภาพที่ 1, 2, 3, 4, 5	ภาพที่ -	ภาพที่ 1, 2, 3	ภาพที่ 4, 5
5. วัสดุตกแต่ง		11. ความคงทน	
ไม้จริงไม่แข็ง	เหล็ก	คงทนมาก	คงทนน้อย
ภาพที่ 1, 2, 3, 4, 5	ภาพที่ 1, 2, 3	ภาพที่ 1, 2, 3, 4, 5	ภาพที่ -
6. รูปทรงของผลิตภัณฑ์			
แบบเหลี่ยม	แบบโค้ง		
ภาพที่ 1, 2, 3, 4, 5	ภาพที่ -		

รูปที่ 5 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้แผนผังกลุ่มเชื่อมโยงในการแบ่งกลุ่มภาพผลิตภัณฑ์จำนวน 5 ภาพ

ดังนั้นผลการประยุกต์ใช้แผนผังกลุ่มเชื่อมโยงสรุปได้ว่า ภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้รับคัดเลือกเป็นภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์มีจำนวนทั้งสิ้น 5 ภาพ ซึ่งเป็นการเลือกจากเกณฑ์จำนวนคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย เพื่อหาภาพผลิตภัณฑ์ที่ตรงกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยที่มากที่สุด มาเป็นรูปตัวแทนผลิตภัณฑ์ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการกำหนดภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์โต๊ะทีวี

ภาพที่	ภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์	จำนวนคุณลักษณะภาพตรงตามคุณลักษณะย่อย
1		13 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย
2		13 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย

ตารางที่ 2 ผลการกำหนดภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์โต๊ะทีวี (ต่อ)

ภาพที่	ภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์	จำนวนคุณลักษณะภาพตรงตามคุณลักษณะย่อย
3		13 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย
4		13 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย
5		13 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย

4.4.ผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1

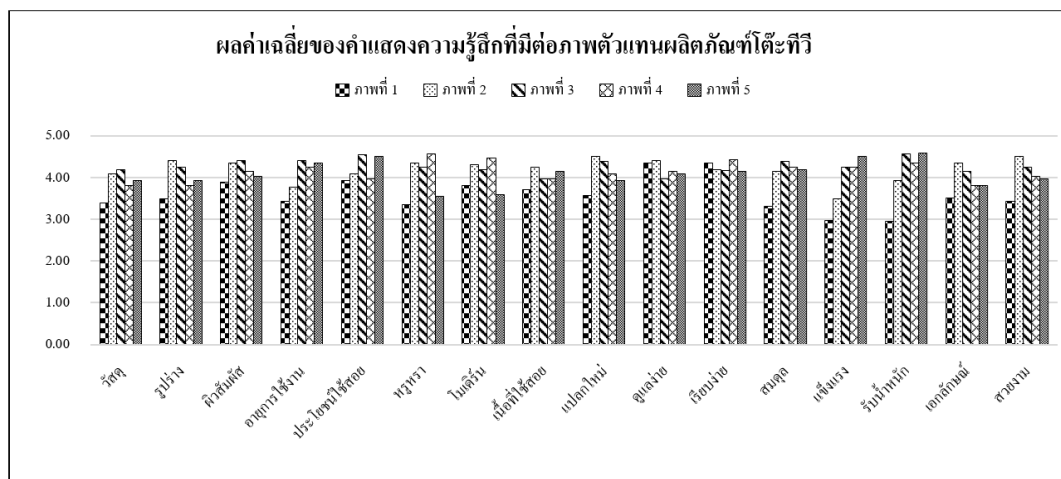
ผลการนำข้อมูลจากแบบสอบถามที่ 3 ด้วยการประเมินคะแนนแบบลิเคิร์ต (Likert Scale) ดังตัวอย่างในรูปที่ 6 ซึ่งเป็นตัวอย่างแบบสอบถามที่ 3 ของค่าแสดงความรู้สึกเรียบง่าย โดยมีคำถามของแบบสอบถามที่ 3 ว่าภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ของแต่ละภาพมีระดับคะแนนที่สื่อถึงความรู้สึกเรียบง่ายในระดับคะแนนใด พร้อมทั้งระบุคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ของภาพที่สื่อถึงความรู้สึกเรียบง่ายประกอบด้วยคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ใดบ้างของแต่ละภาพ

จากนั้นมาวิเคราะห์ทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 หรือการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Linear multiple regression) ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกจำนวน 16 คำ ภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์จำนวน 5 ภาพ และคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักจำนวน 11 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ พบว่า ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยในแต่ละค่าแสดงความรู้สึกมีความโดดเด่นและมีความสัมพันธ์กับภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันออกไป แสดงดังรูปที่ 7 และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยสูงสุดร่วมกับค่า $MCC^2 > 0.5$ แสดงดังตารางที่ 2 พบว่ามีค่า $MCC^2 > 0.5$ ที่ตรงกับค่าเฉลี่ยสูงสุดอยู่จำนวน 7 คำแสดงความรู้สึก

ตัวแทน ผลิตภัณฑ์	ระดับคะแนน				คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ทำให้คุณรู้สึกว่าคุณลักษณะนั้นมีความ "เรียบง่าย (Simple)" (สามารถตอบได้มากกว่า 1 ข้อ)																						
	5	4	3	2	1	รูปแบบ		ความกว้าง		ระดับสายตา		เคลื่อนที่		วัสดุตกแต่ง	รูปทรง		ผิวสัมผัส		การใช้งาน		มั่นคง		ขนาด		คงทน		
						แบบ โมเดล	แบบ คลาสสิก	กว้าง มาก	กว้าง น้อย	อยู่ระดับ สายตา	ต่ำกว่าระดับ สายตา	เคลื่อนที่ ได้	เคลื่อนที่ ไม่ได้		ไม่ชัด ไม่แข็ง	ทรง เหลี่ยม	ทรง โค้ง	ผิว เรียบ	ผิว ด้าน	มีช่อง เก็บของ	ไม่มีช่อง เก็บของ	มั่นคง มาก	มั่นคง น้อย	ขนาด เล็ก	ขนาด กลาง	คงทน มาก	คงทน น้อย
รูปที่ 1																											
รูปที่ 2																											
รูปที่ 3																											
รูปที่ 4																											
รูปที่ 5																											

คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ทำให้คุณรู้สึกว่าคุณลักษณะนั้นรู้สึกถึงความเรียบง่าย (โปรดระบุ)

รูปที่ 6 ตัวอย่างบางส่วนแบบสอบถามที่ 3 ของค่าแสดงความรู้สึกที่เรียบง่าย สำหรับการประเมิน



รูปที่ 7 ผลคะแนนค่าเฉลี่ยของค่าแสดงความรู้สึกที่มีต่อตัวแทนผลิตภัณฑ์โต๊ะทีวี

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยสูงสุดร่วมกับค่า MCC^2 ที่มีค่ามากกว่า 0.5 ของผลิตภัณฑ์โต๊ะทีวี

ค่าแสดงความรู้สึก ภาพผลิตภัณฑ์	ภาพที่ 1		ภาพที่ 2		ภาพที่ 3		ภาพที่ 4		ภาพที่ 5	
	$\bar{x}$	MCC^2	$\bar{x}$	MCC^2	$\bar{x}$	MCC^2	$\bar{x}$	MCC^2	$\bar{x}$	MCC^2
วัสดุ	3.38	0.36	4.08	0.00	4.19	0.30	3.81	0.13	3.92	0.03
รูปราง	3.49	0.04	4.41*	0.63**	4.24	0.50	3.81	0.10	3.92	0.38
ผิวสัมผัส	3.89	0.20	4.35	0.00	4.41	0.26	4.14	0.37	4.03	0.34
อายุการใช้งาน	3.43	0.49	3.76	0.22	4.41	0.48	4.24	0.30	4.35	0.09
ประโยชน์ใช้สอย	3.92	0.14	4.08	0.22	4.54*	0.57**	3.97	0.28	4.51	0.25
หูหระ	3.35	0.41	4.35	0.55	4.24	0.55	4.57*	0.50**	3.54	0.21
ทันสมัย	3.81	0.69	4.30	0.54	4.19	0.43	4.46	0.33	3.59	0.58
เนื้อที่ใช้สอย	3.70	0.35	4.24*	0.56**	3.97	0.36	3.97	0.05	4.14	0.21
แปลกใหม่	3.57	0.11	4.51	0.41	4.38	0.02	4.08	0.19	3.92	0.30
ดูแล่ง่าย	4.35	0.24	4.41	0.07	3.97	0.49	4.14	0.63	4.08	0.09
เรียบง่าย	4.35	0.46	4.19	0.43	4.16	0.29	4.43	0.40	4.14	0.71
สมดุล	3.30	0.73	4.14	0.33	4.38	0.36	4.24	0.06	4.19	0.38
แข็งแรง	2.97	0.26	3.49	0.16	4.24	0.46	4.24	0.60	4.51	0.08

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยสูงสุดร่วมกับค่า MCC^2 ที่มีค่ามากกว่า 0.5 ของผลิตภัณฑ์โตะทีวี (ต่อ)

ค่าแสดงความรู้สึก ภาพผลิตภัณฑ์	ภาพที่ 1		ภาพที่ 2		ภาพที่ 3		ภาพที่ 4		ภาพที่ 5	
	$\bar{X}$	MCC^2	$\bar{X}$	MCC^2	$\bar{X}$	MCC^2	$\bar{X}$	MCC^2	$\bar{X}$	MCC^2
รับน้ำหนัก	2.95	0.58	3.92	0.50	4.57	0.40	4.35	0.16	4.59*	0.53**
เอกลักษณ์	3.51	0.54	4.35*	0.75**	4.14	0.70	3.81	0.15	3.81	0.43
สวยงาม	3.43	0.52	4.51*	0.53**	4.24	0.28	4.03	0.44	3.97	0.33

หมายเหตุ * ค่าแสดงความรู้สึกที่มีคะแนนค่าเฉลี่ยสูงสุดของภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์

** ค่าแสดงความรู้สึกที่มีค่า $MCC^2 > 0.5$

ดังนั้นผู้วิจัยได้นำผลข้อมูลค่าแสดงความรู้สึกที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดและมีค่า $MCC^2 > 0.5$ ก่อนหน้าจำนวน 7 ค่า คือ ค่าแสดงความรู้สึกถึงรูปร่าง ประโยชน์ที่ใช่สอย หรือหา เนื้อที่ใช่สอย รับน้ำหนัก เอกลักษณ์ และสวยงาม ที่ผ่านเกณฑ์ไปวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ เพื่อหาค่าคุณลักษณะ

ของผลิตภัณฑ์หลัก (Partial Correlation Coefficient; PCC) และหาค่าคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ย่อย (Category Score; CS) ด้วยโปรแกรม Minitab รุ่น 16 แสดงดังสมการที่ (1)–(7) ทั้งนี้มีการกำหนดตัวแปรคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยของโตะทีวีทั้งหมด 22 ตัวแปร แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตัวแปรคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยของโตะทีวีทั้งหมด 22 ตัวแปร

ตัวแปร	ความหมาย	ตัวแปร	ความหมาย	ตัวแปร	ความหมาย
X_1	ทันสมัย	X_9	ตกแต่งด้วยไม้แข็ง	X_{17}	มันคงมาก
X_2	คลาสสิก	X_{10}	ตกแต่งด้วยเหล็ก	X_{18}	มันคงน้อย
X_3	กว้างมาก	X_{11}	แบบเหลี่ยม	X_{19}	ขนาดเล็ก
X_4	กว้างน้อย	X_{12}	แบบโค้ง	X_{20}	ขนาดกลาง
X_5	อยู่ระดับสายตา	X_{13}	ผิวเรียบ	X_{21}	คงทนมาก
X_6	ต่ำกว่าระดับสายตา	X_{14}	ผิวเงาด้าน	X_{22}	คงทนน้อย
X_7	เคลื่อนที่ได้	X_{15}	มีช่องเก็บของ		
X_8	เคลื่อนที่ไม่ได้	X_{16}	ไม่มีช่องเก็บของ		

$$\begin{aligned} \text{รับน้ำหนัก} &= 4.650 - 1.930X_1 + 0.080X_3 + 0.214X_7 \\ &- 1.650X_{10} - 0.396X_{11} + 0.269X_{13} + \\ &1.490X_{15} + 0.263X_{17} - 0.173X_{20} - \\ &0.034X_{21} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{เอกลักษณ์} &= 4.370 + 0.511X_1 + 0.238X_2 - 0.033X_3 \\ &- 0.423X_4 - 0.780X_5 + 0.586X_9 + \\ &0.292X_{11} - 0.029X_{13} + 0.620X_{14} + (2) \\ &0.304X_{15} - 0.994X_{16} - 0.097X_{17} - \\ &0.610X_{19} - 0.494X_{20} - 1.690X_{21} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สวยงาม} &= 4.570 - 0.543X_1 - 0.320X_2 - 0.501X_3 \\ &- 0.354X_4 - 0.037X_7 + 0.101X_9 - \\ &0.070X_{11} + 0.105X_{12} + 0.211X_{13} + \\ &0.076X_{14} + 0.471X_{20} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{รูปร่าง} &= 4.61 + 0.078X_1 - 0.612X_2 - 0.218X_3 - \\ &0.109X_4 - 0.462X_5 - 0.546X_7 - 1.00X_9 + \\ &0.780X_{11} + 0.487X_{12} - 0.304X_{14} + (4) \\ &0.224X_{20} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ประโยชน์ใช้} &= 4.05 + 0.131X_1 - 0.283X_3 + 0.000X_4 \\ \text{สอย} &- 0.028X_5 + 0.187X_7 + 0.069X_8 + (5) \\ &0.471X_{11} + 0.763X_{15} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{หุรร่า} &= 3.770 + 0.112X_1 + 1.000X_2 + 0.220X_3 \\ &- 0.776X_4 + 0.113X_5 + 0.782X_9 - (6) \\ &0.025X_{11} + 0.471X_{13} + 0.162X_{14} - \\ &0.502X_{15} + 0.09X_{17} + 0.320X_{20} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เนื้อที่ใช้สอย} &= 4.430 - 0.634X_1 + 0.868X_3 + 0.630X_4 \\ &- 0.743X_{11} - 0.442X_{15} - 0.032X_{19} + (7) \\ &0.159X_{20} \end{aligned}$$

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab รุ่น 16 เพื่อหาค่า PCC และหาค่า CS เรียบร้อยแล้ว จากนั้นดำเนินการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปเป็น

ข้อกำหนดพื้นฐานในการออกแบบ โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกคือ คัดเลือกเฉพาะคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก (PCC) และคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย (CS) ที่มีค่าการวิเคราะห์เป็นค่าบวก ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($P < 0.05$) เพราะมีผลต่อความรู้สึกในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะคัดเลือกค่าการวิเคราะห์ในแต่ละคุณลักษณะผลิตภัณฑ์จากภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ ที่ใช้ในการประกอบการพิจารณาของแต่ละค่าแสดงความรู้สึกเพื่อให้เกิดข้อสรุปของผลการวิเคราะห์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังนั้นผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบคือ การใช้งาน รูปทรงของผลิตภัณฑ์ ความกว้างของผลิตภัณฑ์ วัสดุตกแต่ง ขนาด และรูปแบบผลิตภัณฑ์ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ของโต๊ะทีวี

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบ						ค่าแสดงความรู้สึกที่สื่อถึงคุณลักษณะ	ภาพแนวทางการออกแบบ	MCC ²
	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก	PCC	P-Value	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	CS	P-Value			
1	การใช้งาน	1.350	0.032	มีช่องเก็บของ	1.490	0.007	รับน้ำหนัก	ภาพที่ 5	0.53
		0.773	0.000		0.760	0.000	ประโยชน์ใช้สอย	ภาพที่ 3	0.57
2	รูปทรงของผลิตภัณฑ์	0.895	0.000	แบบเหลี่ยม	0.780	0.000	รูปร่าง	ภาพที่ 2	0.63
				แบบโค้ง	0.480	0.048			
3	ความกว้างของผลิตภัณฑ์	0.744	0.001	กว้างมาก	0.860	0.001	เนื้อที่ใช้สอย	ภาพที่ 2	0.56
4	วัสดุตกแต่ง	0.703	0.000	ตกแต่งด้วยไม้แข็ง	0.780	0.000	หุรร่า	ภาพที่ 4	0.50
5	ขนาดของผลิตภัณฑ์	0.502	0.001	ขนาดกลาง	0.470	0.005	สวยงาม	ภาพที่ 2	0.53
6	รูปแบบของผลิตภัณฑ์	0.431	0.001	ทันสมัย	0.510	0.000	เอกลักษณ์	ภาพที่ 2	0.75

4.5.ผลการออกแบบและขึ้นรูปต้นแบบผลิตภัณฑ์

จากการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ข้อกำหนดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักและคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยที่สื่อถึงความรู้สึกในด้านต่าง ๆ ของการออกแบบผลิตภัณฑ์โต๊ะทีวี พบว่าทีมออกแบบและผู้เชี่ยวชาญได้ใช้ค่าแสดง

ความรู้สึกในการออกแบบผลิตภัณฑ์ ได้แก่ รับน้ำหนัก ประโยชน์ใช้สอย รูปร่าง เนื้อที่ใช้สอย หุรร่า สวยงาม และเอกลักษณ์ อีกทั้งนำข้อกำหนดการออกแบบ แสดงดังตารางที่ 5 มาทำการออกแบบและขึ้นรูปต้นแบบผลิตภัณฑ์ พบว่าสามารถขึ้นรูปต้นแบบผลิตภัณฑ์ แสดงดังรูปที่ 8

ตารางที่ 5 ข้อกำหนดในการออกแบบผลิตภัณฑ์โต๊ะทีวี

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก	รายละเอียด
1	การใช้งานของผลิตภัณฑ์	ออกแบบให้มีช่องเก็บของเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความเหมาะสมกับการใช้งาน
2	รูปทรงของผลิตภัณฑ์	ออกแบบให้มีลักษณะการผสมผสานระหว่างรูปทรงแบบ โคงและแบบเหลี่ยม
3	วัสดุตกแต่งของผลิตภัณฑ์	ออกแบบโดยการนำไม้เนื้อแข็งแปรรูปมาเป็นวัสดุโครงสร้างในส่วนขาโต๊ะ
4	ขนาดผลิตภัณฑ์	ออกแบบและแปรรูปผลิตภัณฑ์ให้มีขนาดที่เหมาะสมตามการใช้งาน
5	รูปแบบผลิตภัณฑ์	ออกแบบให้มีรูปแบบทันสมัยและมีความเป็นเอกลักษณ์



รูปที่ 8 ต้นแบบผลิตภัณฑ์โต๊ะทีวีจากลำต้นไม้ปาล์มน้ำมัน

จากรูปที่ 8 เมื่อพิจารณาแล้ว พบว่า ความรู้สึกของการรับน้ำหนักและความรู้สึกประโยชน์ใช้สอยที่แสดงออกเรื่องการใช้งาน นั้นจะแสดงออกว่ามีช่องเก็บของหรือลิ้นชักให้มีความเหมาะสมกับการใช้งาน ส่วนความรู้สึกรูปร่างที่แสดงออกเรื่องรูปทรงนั้นจะแสดงออกในส่วนของการผสมผสานแบบโค้งและแบบเหลี่ยม ความรู้สึกของเนื้อไม้ใช้สอยที่แสดงออกเรื่องความกว้าง อีกทั้งในส่วนความรู้สึกหรูหราที่แสดงออกเรื่องวัสดุตกแต่งจะแสดงออกในส่วนของไม้เนื้อแข็งแปรรูปขาโต๊ะ ความรู้สึกสวยงามที่แสดงออกเรื่องขนาดจะแสดงออกในส่วนความเหมาะสมโดยคำนึงถึงการใช้งาน และความรู้สึกเอกลักษณ์ที่แสดงออกถึงเรื่องรูปแบบจะแสดงออกในส่วนความทันสมัยและความเป็นเอกลักษณ์ของโต๊ะทีวี ทั้งนี้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการพัฒนาคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ทั้งด้านรูปทรงของผลิตภัณฑ์ ขนาด และวัสดุตกแต่งนั้นสามารถตอบโจทย์ความต้องการเชิงอารมณ์ของผู้บริโภคได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kongprasert [15] ได้ออกแบบผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ประเภทเก้าอี้ไม้สักใหม่ทั้งด้านรูปทรงของผลิตภัณฑ์ ขนาด และวัสดุตกแต่งด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคั่นเซ ซึ่งเก้าอี้ไม้สักแบบใหม่

สามารถตอบโจทย์เอกลักษณ์ของแบรนด์และตอบสนองความต้องการเชิงอารมณ์ของผู้บริโภคได้เช่นเดียวกัน ทั้งนี้ พบว่ายังสามารถนำแนวทางงานวิจัยเกี่ยวกับเทคนิควิศวกรรมคั่นเซ ไปประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบและการพัฒนาผลิตภัณฑ์ประเภทอื่น ๆ ได้ ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบผลิตภัณฑ์เก้าอี้รับประทานอาหาร [7] และการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ของประดับตกแต่งจากกระจุต [16] เป็นต้น

4.6. ประเมินความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์

หลังจากได้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โต๊ะทีวีจากลำต้นไม้ปาล์ม น้ำมันแบบใหม่แล้ว จากนั้นผู้วิจัยได้นำผลิตภัณฑ์ต้นแบบไปสำรวจความพึงพอใจของผู้บริโภคหรือกลุ่มเป้าหมายเดิม เพื่อศึกษาระดับคะแนนความพึงพอใจที่มีต่อผลิตภัณฑ์ พบว่ามีค่าระดับความพึงพอใจที่มีต่อคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ 5 อันดับแรก อยู่ในระดับดีมาก ดังต่อไปนี้ ด้านรูปแบบผลิตภัณฑ์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.66 ด้านวัสดุตกแต่งของผลิตภัณฑ์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.64 ด้านการใช้งานของผลิตภัณฑ์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.63 ด้านขนาดผลิตภัณฑ์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.60 และด้านรูปทรงของผลิตภัณฑ์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.54 ตามลำดับ

5. สรุปผล

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการประยุกต์ใช้กระบวนการของเทคนิควิศวกรรมคันเซเพื่อการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนประเภทโต๊ะทีวีจากลำต้นไม้ปาล์มน้ำมัน การวิจัยเริ่มจากการสำรวจแบบสอบถามตามหลักการของวิศวกรรมคันเซ ซึ่งแบบสอบถามที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย แบบสอบถามการวิจัย จำนวน 3 ชุด โดยแบบสอบถามในแต่ละชุดจะมีการจำแนกกลุ่มผู้ตอบแบบสอบถามที่แตกต่างกัน จากนั้นใช้หลักการทางสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่แสดงความรู้สึกับคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ ทำให้ได้ข้อกำหนดในการออกแบบเพื่อนำไปสู่การออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ และการประเมินระดับความพึงพอใจที่มีต่อผลิตภัณฑ์

ผู้วิจัยได้ออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนประเภทโต๊ะทีวีแบบใหม่ ที่สามารถแสดงถึงความรู้สึกการรับน้ำหนัก ประโยชน์ใช้สอย รูปร่าง เนื้อที่ใช้สอย หูหระสวยงาม และเอกลักษณ์ โดยผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่นี้จะดำเนินการออกแบบตามคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการคัดเลือกทั้งสิ้น 5 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ คือ คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ด้านการใช้งาน รูปทรงของผลิตภัณฑ์ วัสดุตกแต่งของผลิตภัณฑ์ ขนาดผลิตภัณฑ์ และรูปแบบผลิตภัณฑ์ จากนั้นเมื่อทำขึ้นรูปต้นแบบผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนประเภทโต๊ะทีวีจากลำต้นไม้ปาล์มน้ำมัน

ดังนั้นผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ คือ แนวทางการออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนประเภทโต๊ะทีวีจากลำต้นไม้ปาล์มน้ำมันที่สามารถช่วยให้นักออกแบบกำหนดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์และออกแบบผลิตภัณฑ์ที่สอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภคได้เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนจากลำต้นไม้ปาล์มได้ในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (สวก.) ประจำปี 2562 (สัญญาเลขที่ CRP6205032130) ขอขอบคุณผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ปาล์ม

น้ำมัน อำเภอมะนัง จังหวัดสตูล ที่อำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Natakueatung, A. Sareebut and S. Egwutvongsa, "Study and Design of Products from Palm Fiber," *Journal of Industrial Education*, vol. 14, no. 2, pp. 613–621, 2015.
- [2] S. Noothimthong, K. Kunta, and W. Poochinda, "Sustainable Oil Palm Production in Accordance with RSPO Standards," *Journal of Vocational Institute of Agricultural*, vol. 4, no. 2, pp. 1–14, 2020.
- [3] Classified by Age Range: Perennial Area Fruiting Area, Yield and Yield per Fruiting Area Separated by Age Including Country, Region and Province in 2019, Office of Agricultural Economics Thailand, Nov. 1, 2021 [Online]. Available: shorturl.asia/0F63P
- [4] A. Suzianti and A. Aldianto, "Redesign of Product Packaging with Kansei Engineering: Empirical Study on Small-Medium Enterprises in Indonesia," *Makara Journal of Technology*, vol. 24, no. 2, pp. 65–71, 2020, doi: 10.7454/mst.v24i2.2990.
- [5] S. Schütte, "Designing Feelings into Products: Integrating Kansei Engineering Methodology in Product Development," Ph.D. dissertation. Dept., Mech Eng., Linkopings Univ., Linkopings, Sweden, 2002.
- [6] M. C. Chen, K. C. Chang, C. L. Hsu and J. H. Xiao, "Applying a Kansei Engineering-Based Logistics Service Design Approach to Developing International Express Services," *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 45, no. 6, pp. 618–646, 2015, doi: 10.1108/IJPDLM-10-2013-0251.
- [7] S. Yodwangjai, "Product Design and Development for Dinner Chair of Kansei Engineering," *KKU*

- Engineering Journal*, vol. 41, no. 2, pp. 191–200, 2014.
- [8] J. Pitaktiratham, T. Sinlan, P. Anuntavoranich and S. Sinthupinyo, “Application of Kansei Engineering and Association Rules Mining in Product Design,” *International Journal of Economics and Management Engineering*, vol. 69, pp. 198–203, 2012, doi: 10.5281/zenodo.1081675.
- [9] R. Roy, M. Goatman and K. Khangura, “User-centric design and Kansei Engineering,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 1, no. 3, pp. 172–178, 2009, doi: 10.1016/j.cirpj.2008.10.007.
- [10] K. Pimapunsri, “New Product Development Using Kansei Engineering,” in *the 2nd National Conference on Industrial Operations Development*, Bangkok, Thailand, May 11, 2011, pp. 331–337.
- [11] S. Schütte, “Developing the Space of Product Properties Supporting Kansei Engineering Procedure,” *Kansei Engineering International*, vol. 5, no. 4, pp. 11–19, 2006, doi: 10.5057/kei.5.4_11.
- [12] 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.
- [13] S. H. Lee, A. Harada and P. J., Stappers. “Design based on Kansei,” in *Pleasure with Products*, Copenhagen, Denmark: Taylor & Francis, 2002, ch. 16, pp. 212–222.
- [14] A. Ongiem and P. Vichitvejpaisal, “Validation of the Tests,” *Thai Journal of Anesthesiol*, vol. 44, no. 1, pp. 36–42, 2018.
- [15] N. Kongprasert, “Emotional Design Approach to Design Teak Wood Furniture,” The 13th The Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference, Phuket, Thailand, Dec. 2–5, 2012, pp. 805–812.
- [16] S. Rawangwong, C. Homkhiew, P. Phanthasri and P. Chumsri, “Design and Development of Krajoed Decorations Products Using Kansei Engineering Technique and Kano’s Model,” *UBU Engineering Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 181–193, 2021.

การพัฒนาเครื่องมือการประเมินผู้ส่งมอบเชิงกลยุทธ์ กรณีศึกษาผู้ส่งมอบวัตถุดิบไม้ในอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์

Development of Strategic Supplier Evaluation: A Case Study of Wood Suppliers in Furniture Industry

กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วงศ์สว่าง บางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Kanokporn Sripathomswat *

Department of Industrial Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand

*Corresponding Author E-mail: kanokporn.s@cit.kmutnb.ac.th

Received: Dec 20, 2021; Revised: Mar 16, 2022; Accepted: Apr 12, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องมือสำหรับช่วยสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหาร โดยใช้กรณีศึกษาเป็นบริษัทผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์แห่งหนึ่ง ในปัญหาขั้นตอนของการประเมินและคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบหลักประเภทไม้ ซึ่งเป็นวัตถุดิบเชิงกลยุทธ์ของอุตสาหกรรมนี้ เป้าหมายของการพัฒนาเกณฑ์ประเมินเพื่อแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับผู้ส่งมอบเพื่อตอบสนองการแข่งขันในเชิงกลยุทธ์ เริ่มจากทบทวนวรรณกรรมเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินผู้ส่งมอบรวบรวมผลวิเคราะห์ปัจจัยเสนอให้กับกลุ่มผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดซื้อของกรณีศึกษาจำนวน 3 ท่าน โดยใช้ดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ประเมินความเหมาะสมของการใช้เป็นเกณฑ์หลักและรอง หลังจากนั้นประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น ซึ่งเป็นเครื่องมือของการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ มาหาค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์โดยกลุ่มผู้บริหาร แล้วจึงนำผลสรุปที่ได้มากำหนดแนวทางการประเมินผู้ส่งมอบ ผลการศึกษาพบว่าเกณฑ์หลักที่มีความสำคัญที่สุดสามลำดับแรกคือ คุณภาพผลิตภัณฑ์ การจัดส่ง และความยืดหยุ่น ผลการทดลองประเมินผู้ส่งมอบหลักทั้ง 5 ราย พบว่าสัดส่วนการจัดซื้อในปัจจุบันไม่สอดคล้องกับผลประเมินผู้ส่งมอบมุ่งเน้นราคา ผู้ส่งมอบที่มีผลประเมินสูงสุด กลับมีสัดส่วนการจัดซื้อเพียง 12% ถือเป็นลำดับ 3 ส่วนผู้ส่งมอบที่ผลประเมินเป็นลำดับรองสุดท้ายกลับมีสัดส่วนการจัดซื้อสูงสุดถึง 35% เห็นได้ว่าเกณฑ์ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถสะท้อนถึงผลการดำเนินงานและเชื่อมโยงไปยังการแก้ปัญหาและกำหนดแนวทางในการจัดการความสัมพันธ์เพื่อพัฒนาผู้ส่งมอบเชิงกลยุทธ์ได้ในอนาคต

คำสำคัญ: การตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์, กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น, การประเมินผู้ส่งมอบ, ผู้ส่งมอบเชิงกลยุทธ์, อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์

Abstract

This research aimed to develop decision support tools for management decision-making. The process of analyzing and choosing strategic suppliers of wood materials, which is regarded as a critical raw material in the furniture industry, was the issue of the case

study. The goal of criteria development was to deal with supplier-related problems to comply with the company's strategic competitiveness. The literature review was determined to list factors that affect supplier evaluation. Then, these factors were proposed to three buying experts from the case using the index of item-objective congruence which is the assessment tool for concerned main and sub-criteria. After that, managers applied the analytical hierarchy process, which is a tool in multi-criteria decision making, to determine the weight of significance involved in the case study buying process. The evaluation process and criteria were established to assess present suppliers. As the result, the most significant three main criteria were product quality, delivery, and flexibility. According to the proposed method, the performance of five suppliers was not correlated to purchasing proportion because of price focus. The best performance supplier had 12 percent of purchasing proportion which ranked the third. The first rank of buying proportion got 35 percent which ranked before the worst performance supplier. The proposed method also supported actual supplier performance connected to improvement and strategic supplier relationship management in the future.

Keywords: Multi-criteria decision making, Analytical hierarchy process, Supplier evaluation, Strategic supplier, Furniture industry

1. บทนำ

จากสภาพเศรษฐกิจที่หดตัวและการแข่งขันทางธุรกิจที่นับวันจะทวีความรุนแรงยิ่งขึ้น การนำเสนอสินค้าและผลิตภัณฑ์ใหม่ออกสู่ตลาด การส่งมอบสินค้าและผลิตภัณฑ์ได้ตามที่ลูกค้าต้องการ สินค้าที่ต้องมีมาตรฐานและคุณภาพรวมถึงความคาดหวังที่สูงขึ้นจากลูกค้า ถือเป็นสิ่งที่ธุรกิจต้องรับมือ คิดหาแนวทางในการตอบสนองกับสภาพการณ์เพื่อความอยู่รอด เติบโต และได้เปรียบในการแข่งขัน บริษัทกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ประกอบธุรกิจด้านการออกแบบ ผลิต และติดตั้งเฟอร์นิเจอร์สมัยใหม่ตามแบบที่ลูกค้าโครงการเฉพาะกลุ่มต้องการ (Modern customization) บริษัทมีการออกแบบผลิตภัณฑ์ ผลิตสินค้าด้วยเครื่องจักรและเทคโนโลยีสมัยใหม่ รวมถึงได้รับการยอมรับจากนักออกแบบตกแต่งภายในและองค์กรขนาดใหญ่ในด้านคุณภาพสินค้าและนวัตกรรม สร้างความประทับใจในการตอบสนองความต้องการที่เฉพาะเจาะจงของลูกค้าแต่ละราย ส่วนหนึ่งของความสำเร็จมาจากการร่วมมือกับผู้ส่งมอบวัตถุดิบที่หลากหลาย และมีคุณภาพสูง

อย่างไรก็ตามในการจัดการกระบวนการภายใน โดยเฉพาะการบริหารความสัมพันธ์กับผู้ส่งมอบ ในบางครั้งยังคงพบปัญหาหลายด้านที่ยังไม่สามารถจัดการได้ดี เช่น ปัญหาผู้ส่งมอบจัดส่งวัตถุดิบไม่ตรงเวลา วัตถุดิบไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนด ความไม่ยืดหยุ่นของ

การรับคำสั่งซื้อของผู้ส่งมอบ รวมถึงความไม่ชัดเจนในการให้ความร่วมมือในการแก้ไขปัญหา ซึ่งปัญหาดังกล่าวยังคงเกิดขึ้นอยู่เสมอ แม้จะมีระบบการคัดเลือกและประเมินผู้ส่งมอบก็ตาม จากการวิเคราะห์เบื้องต้น ส่วนหนึ่งมีสาเหตุจากกระบวนการคัดเลือกและประเมินผู้ส่งมอบที่ใช้ในปัจจุบันยังไม่ครอบคลุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาข้างต้น รูปแบบที่ใช้ยังเป็นเพียงการประเมินทั่วไป ซึ่งพิจารณาศักยภาพของผู้ส่งมอบโดยเน้นราคา การให้บริการโดยรวม รวมถึงให้ความสำคัญกับผู้ส่งมอบที่ทำการค้าร่วมกันมาเป็นระยะเวลายาวนาน มากกว่าการประเมินด้วยแนวทางที่สอดคล้องกับกลยุทธ์การแข่งขัน ในกระบวนการจัดซื้อเน้นการตัดสินใจคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ โดยใช้การวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสีย เน้นพิจารณาข้อมูลเชิงคุณภาพ ยังไม่มีการนำข้อมูลเชิงปริมาณมาใช้งานอย่างเป็นระบบ ยังไม่มีการป้อนกลับข้อมูลผลการประเมินที่เป็นตัวเลขและระยะเวลาที่ชัดเจน ทำให้ปัญหาที่พบยังคงเกิดขึ้นอยู่เป็นประจำ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในบริษัทกรณีศึกษา ในประเด็นปัญหาผลการดำเนินงานของผู้ส่งมอบวัตถุดิบไม้ ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักเชิงกลยุทธ์ (Strategic raw material) ของบริษัทนี้ ไม่ได้ดำเนินการครอบคลุมทั้งอุตสาหกรรม ผู้วิจัยต้องการตอบคำถามว่าอะไรคือปัจจัยที่ใช้ในการตัดสินใจคัดเลือกผู้ส่งมอบหลัก จะประเมินผู้ส่งมอบดังกล่าวอย่างไร เพื่อ

สามารถสะท้อนถึงผลการดำเนินงานที่แท้จริง และเชื่อมโยงไปสู่การแก้ปัญหาที่พบ รวมถึงสามารถกำหนดแนวทางในการจัดการความสัมพันธ์และพัฒนาผู้ส่งมอบเชิงกลยุทธ์ได้ในอนาคต

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงศึกษาเฉพาะกระบวนการจัดซื้อจัดหาวัตถุดิบหลักที่เชื่อมโยงกับกลยุทธ์ขององค์กรรวบรวมและวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อพัฒนาเครื่องมือช่วยสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหาร ใช้แนวทางการประเมินแบบหลายเกณฑ์ นั่นคือกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytical hierarchy process) หรือ AHP ที่มีมิติของเกณฑ์การประเมินที่ครอบคลุม ขอบเขตของการวิจัยใช้ข้อมูลการจัดซื้อวัตถุดิบ ไม้ในปัจจุบันของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งมีมูลค่าสูงจำนวน 120 รายการ ที่ทำการจัดซื้อจากผู้ส่งมอบหลักจำนวน 5 ราย

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการจัดซื้อในโซ่อุปทาน

กระบวนการจัดซื้อจัดหา เป็นกิจกรรมโลจิสติกส์ที่สำคัญ ส่งผลต่อการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ในโซ่อุปทาน การบริหารความสัมพันธ์กับผู้ส่งมอบในปัจจุบัน มีลักษณะที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มผู้ส่งมอบหลักหรือผู้ส่งมอบเชิงกลยุทธ์ ที่ต้องการเน้นคุณภาพ บริการ และความสัมพันธ์เชิงคู่ค้าในระยะยาว มากกว่าการจัดซื้อเป็นครั้งที่เน้นราคาแต่เพียงอย่างเดียว [1] กระบวนการจัดซื้อเชิงกลยุทธ์จึงมีความเชื่อมโยงกับความสามารถในการแข่งขันระยะยาวขององค์กร โดยการตัดสินใจที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ การคัดเลือกและพัฒนาความสัมพันธ์กับผู้ส่งมอบ โดยเฉพาะในวัตถุดิบที่เป็นส่วนประกอบสำคัญในสินค้า

2.2 กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นกับการตัดสินใจ

การตัดสินใจที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดซื้อในปัจจุบัน พบว่าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจหลายเกณฑ์ (Multi-criteria decision making: MCDM) เข้ามามีบทบาทสำคัญมากยิ่งขึ้น ยิ่งหากการตัดสินใจดังกล่าวเกี่ยวข้องกับกลยุทธ์หรือผลกระทบในระยะยาวขององค์กรด้วยแล้ว การนำเครื่องมือช่วยตัดสินใจที่เหมาะสมมาใช้

งานก็จะสามารถทำให้องค์กรบรรลุเป้าหมายที่ต้องการได้ดียิ่งขึ้น

กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น เป็นเครื่องมือสำหรับแก้ปัญหาที่มีการพิจารณาหลายปัจจัย พัฒนาขึ้นโดย Thomas Saaty [2] ช่วยในการตัดสินใจที่เหมาะสมอาศัยหลักการของการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ ทั้งเกณฑ์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ โดยมีการจัดลำดับทางเลือก หาน้ำหนักความสำคัญของปัจจัย ซึ่งให้ผลในการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการตัดสินใจที่ซับซ้อน วิธีการนี้มีจุดเด่นคือการเปรียบเทียบเชิงคู่ (Pairwise comparison) ทำให้น่าเชื่อถือ ง่ายต่อการทำความเข้าใจและง่ายต่อการนำไปใช้งาน เพราะมีโครงสร้างที่เป็นลำดับชั้นเลียนแบบกระบวนการคิดของมนุษย์ สดุดคิดและความลำเอียงในการตัดสินใจได้ กระบวนการ AHP มี 3 ขั้นตอนหลัก คือ

1. กำหนดเป้าหมายในการตัดสินใจ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องพร้อมทางเลือกในการตัดสินใจ
2. เปรียบเทียบความสำคัญต่อเป้าหมายของแต่ละปัจจัยทีละคู่ โดยเปรียบเทียบค่าน้ำหนักกำหนดเป็นอัตราเปรียบเทียบทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยย่อย
3. เปรียบเทียบทางเลือกที่กำหนดขึ้นทีละคู่ โดยพิจารณาทางเลือกภายใต้เกณฑ์หรือปัจจัยที่ละปัจจัยจนครบ โดยค่าลำดับความสำคัญคำนวณจากสมการที่ (1)

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{w_i} \right\} \quad (1)$$

โดยที่ λ_{max} คือแกนหลักของ Eigenvector หรือคือน้ำหนักของปัจจัยที่พิจารณา n คือขนาดของเมทริกซ์ a_{ij} คือองค์ประกอบของการเปรียบเทียบเป็นคู่ และ w_i และ w_j คือค่า Eigenvector ขององค์ประกอบที่ i และ j ตามลำดับ [2] อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio: CR) คืออัตราส่วนระหว่างดัชนีความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency Index: CI) และดัชนีความสอดคล้องของข้อมูลโดยการสุ่มตัวอย่าง (Random Consistency

Index: RI) จากตารางที่ 1 ค่าดัชนีความสอดคล้องของข้อมูลหาได้จากสูตรในสมการที่ (2) และ (3)

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$CR = CI/RI \quad (3)$$

ค่าสอดคล้องของข้อมูลโดยการสุ่มตัวอย่าง (RI) คูได้จากตารางที่ 1 ค่า CR ที่ได้จะต้องมีค่าไม่เกิน 0.5 และ 0.8 สำหรับ $n = 3$ และ $n = 4$ ตามลำดับ และต้องไม่เกิน 0.10 สำหรับ n ที่มากกว่า 5 จึงจะถือว่าข้อมูลมีความสอดคล้องและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์และสรุปผลได้

ตารางที่ 1 ดัชนีความสอดคล้องของข้อมูลโดยการสุ่มตัวอย่าง

จำนวนปัจจัย	Random Index
1	0
2	0
3	0.58
4	0.9
5	1.12

AHP ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายรูปแบบ เช่น ในการคัดเลือกและประเมินผู้ส่งมอบ ซึ่งมีเกณฑ์ที่หลากหลายต่างกันไปตามอุตสาหกรรม ดังเช่นใน [3] นำ AHP มาแก้ไขปัญหาการเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบโรงงานถลุง โดยใช้หลักเกณฑ์ในการตัดสินใจ 6 เกณฑ์ กับผู้ส่งมอบ 6 ราย โดยใช้แบบสอบถามกับผู้ที่มีส่วนในการจัดซื้อวัตถุดิบ พบว่าราคาเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการคัดเลือก ปัจจัยอื่นได้แก่ความสามารถเชิงเทคนิค ด้านคุณภาพและนโยบายการรับประกันสินค้า ด้านการจัดส่ง ด้านการเงินและความน่าเชื่อถือ และด้านการติดต่อสื่อสารและการบริการหลังการขาย

ใน [4] เน้นย้ำถึงการนำ AHP เข้ามาช่วยในการตัดสินใจเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบในโรงงานผลิตอาหารแช่แข็ง โดยทำการศึกษากับสินค้าหลัก 4 รายการ ปัจจัยหลักที่ใช้ในการประเมินผู้ส่งมอบมีทั้งสิ้น 6 ปัจจัย ได้แก่ ด้านคุณภาพของ

ผลิตภัณฑ์ ด้านการจัดส่ง ด้านราคา ด้านการบริหารการแก้ไข ปัญหาและความร่วมมือระหว่างองค์กร ด้านความสามารถ และสิ่งเกี่ยวพัน และด้านความยืดหยุ่น ในแต่ละปัจจัยหลักประกอบด้วยปัจจัยรองอีกจำนวนหนึ่ง อย่างไรก็ตามน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยในสินค้า 4 รายการขึ้นอยู่กับประเภทของสินค้า ผลลัพธ์นำไปสู่การวิเคราะห์จุดแข็งจุดอ่อนผู้ส่งมอบ นำไปใช้ในการวางแผนกลยุทธ์การจัดซื้อและพัฒนาผู้ส่งมอบ

นอกจากนี้ในงานอุตสาหกรรมด้านบริการ การคัดเลือกและประเมินผู้ส่งมอบที่เหมาะสมก็มีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าอุตสาหกรรมการผลิต ดังแสดงใน [5] ซึ่งได้คัดเลือกผู้จำหน่ายเครื่องปรับอากาศ กับรีสอร์ทที่เป็นกรณีศึกษาเนื่องจากประสบปัญหาด้านทุนค่าไฟฟ้าและค่าบำรุงรักษาเครื่องปรับอากาศที่สูง รวมถึงทางรีสอร์ทไม่มีการมาตรฐานการคัดเลือกผู้ส่งมอบที่เหมาะสม เมื่อประยุกต์ใช้เทคนิค AHP คำนวณน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยและน้ำหนักความสำคัญของแต่ละตัวเลือกในแต่ละปัจจัยได้จากเจ้าของรีสอร์ทและผู้เชี่ยวชาญ พบว่าปัจจัยด้านผู้ติดตั้งมีความสำคัญเป็นอันดับแรก ปัจจัยด้านบริหารหลังการขาย ปัจจัยด้านความน่าเชื่อถือ ปัจจัยด้านตำแหน่งที่ตั้ง และปัจจัยด้านราคามีความสำคัญรองลงมาตามลำดับ ผลลัพธ์ของพัฒนาการเลือกผู้ส่งมอบเครื่องปรับอากาศที่เหมาะสมยังสามารถช่วยให้รีสอร์ทพิจารณาลดขั้นตอนในการจัดจ้างลงได้

นอกจากนี้ยังพบตัวอย่างที่น่าสนใจในกิจการค้าปลีก [6] การคัดเลือกผู้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ [7] ประเมินผลงานผู้ให้บริการขนส่งทางเรือ [8] การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบของผู้ผลิตเบียร์ [9] เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ แตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา เนื่องจากเป็นการศึกษาในกรณีศึกษาอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ที่เป็นการจัดทำตามแบบที่ลูกค้าโครงการเฉพาะกลุ่มต้องการ (Modern customization) มีแนวทางของกลยุทธ์สร้างความแตกต่างในการแข่งขันชัดเจน กิจการดังกล่าวเป็นของคนไทย มีการส่งออกไปยังหลายภูมิภาค จากข้อมูลที่ทำให้การทบทวนวรรณกรรม ผู้วิจัยพบว่ายังไม่เคยมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาร่วมกันของการประเมินผู้ส่งมอบ ที่เกี่ยวข้องกับกลยุทธ์องค์กรในกระบวนการจัดซื้อเชิงกลยุทธ์ ซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบ

ของการจัดการโซ่อุปทานในบริษัทไทยที่มีกลยุทธ์การแข่งขันดังกล่าว นอกจากนี้มีการต่อ ยอดการศึกษาโดยนำหลักเกณฑ์ของงานวิจัยที่ผ่านมาทบทวนอย่างเป็นระบบ ทำการประเมินความสอดคล้องของเกณฑ์ในหลากหลายอุตสาหกรรม หลังจากนั้นจึงนำมาประเมินกับอุตสาหกรรมเฉพาะจากข้อมูลกรณีศึกษาจริง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการเป็นอย่างยิ่ง ทำให้เห็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นและความเชื่อมโยงกับกลยุทธ์ขององค์กร

2.3 การหาค่าความเที่ยงตรงของเนื้อหา

การหาค่าความเที่ยงตรงของเนื้อหา (Content validity) เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ โดยใช้ค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค (Item-Objective Congruence Index: IOC) จากการประเมินของผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ถึง 5 ท่าน [4] ตามความเหมาะสมของแต่ละงาน โดยให้ผู้เชี่ยวชาญช่วยประเมินว่า ข้อคำถามแต่ละข้อสอดคล้องกับเนื้อหาที่กำหนดหรือไม่ โดยให้คะแนน 1 หากแน่ใจว่ามีความสอดคล้อง ให้คะแนน 0 หากไม่แน่ใจ และให้คะแนน -1 หากแน่ใจว่าไม่มีความสอดคล้อง หลังจากนั้น นำมาคำนวณด้วยสมการที่ (4)

$$IOC = \frac{\sum R}{n} \quad (4)$$

โดย R หมายถึง ผลคูณของคะแนนกับจำนวนผู้เชี่ยวชาญ และ n หมายถึง จำนวนผู้เชี่ยวชาญ

ในการพิจารณาความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ จากการหาค่า IOC ในทุกข้อคำถามนั้น หากข้อคำถามที่มีค่า IOC ตั้งแต่ 0.50–1.00 จะคัดเลือกไว้ ส่วนข้อคำถามที่มีค่า IOC ต่ำกว่า 0.50 อาจตัดทิ้งหรือพิจารณาปรับปรุงได้ตามความเหมาะสม วิธีการนี้เป็นวิธีการที่นิยมใช้กันและเป็นวิธีการที่ทำได้โดยไม่ต้องใช้เทคนิคหรือสถิติขั้นสูงในการประมวลผล

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เริ่มจากการศึกษาประเด็นปัญหาจากบริษัทกรณีศึกษาที่เลือก ในอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ที่มีการวางกลยุทธ์สร้างความแตกต่างของผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจน มีทั้งตลาดภายในและต่างประเทศ เน้นการพิจารณาใน

กระบวนการจัดซื้อและประเมินผู้ส่งมอบภายในประเทศ เลือกทำการศึกษาจากกลุ่มวัตถุดิบหลักเชิงกลยุทธ์ประเภทไม้ที่ใช้ในการผลิตสินค้าในปัจจุบันของบริษัท กรณีศึกษาซึ่งมีจำนวนรายการมากถึง 120 รายการและมีมูลค่าสูงเมื่อเทียบกับยอดจัดจำหน่ายของบริษัท ทำการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเน้น ส่วนปัจจัยหรือหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินและจัดการความสัมพันธ์กับผู้ส่งมอบ เพื่อสรุปสถานการณ์องค์ความรู้ที่มีอยู่ โดยเน้นพิจารณาในปัญหาการจัดซื้อเชิงกลยุทธ์ในส่วนของการประเมินผู้ส่งมอบเชิงกลยุทธ์ นำผลไปทำการประเมิน IOC โดยผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดซื้อไม้จากบริษัทกรณีศึกษา 3 ท่าน เพื่อระบุปัจจัยที่เหมาะสม และนำไปออกแบบพัฒนาเครื่องมือช่วยประเมิน โดยประยุกต์ใช้ AHP กับรายการผู้ส่งมอบทั้งหมดของรายการวัตถุดิบดังกล่าว ที่มีอยู่จำนวน 5 ราย รายละเอียดการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

3.1 สรุปรวสภาพปัจจุบันของกรณีศึกษา

ในเบื้องต้นผู้วิจัยได้ร่วมกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจากบริษัทกรณีศึกษา ศึกษาปัญหาที่พบ และศึกษารูปแบบการประเมินผู้ส่งมอบในปัจจุบัน พบว่าปัญหาหลักในการจัดซื้อวัตถุดิบไม้ปัจจุบัน ได้แก่ การส่งมอบเกินระยะเวลาที่นัดหมาย มีการส่งมอบไม่ครบตามจำนวน และมีการทยอยส่งมากกว่า 1 ครั้งต่อคำสั่งซื้อซึ่งไม่เป็นไปตามสัญญาซื้อขายที่ขอให้จัดส่งในคราวเดียว นอกจากนี้บางรายการมีระยะทางในการขนส่งค่อนข้างไกลทำให้เกิดปัญหาความไม่แน่นอนขึ้นระหว่างการขนส่ง ประกอบกับระบบของผู้ส่งมอบขาดความยืดหยุ่นในการรับการเปลี่ยนแปลง ในบางกรณี พบปัญหาการเลือกเปิดใบสั่งซื้อให้กับรายที่มีคุณสมบัติไม่เหมาะสม

เมื่อพิจารณาในส่วนการประเมินและการคัดเลือกผู้ส่งมอบ พบว่ายังไม่เป็นระบบ ขาดประสิทธิภาพ ในปัจจุบันฝ่ายจัดซื้อเป็นผู้ดำเนินการประเมินผู้ส่งมอบด้านคุณภาพ การรับประกัน การให้บริการ และการส่งมอบ ในแต่ละเกณฑ์การประเมินยังไม่ได้ระบุถึงข้อมูลที่ใช้ชัดเจน ไม่ได้มีการเก็บประวัติการสั่งซื้อหรือปัญหาที่เกิดขึ้นในการจัดซื้อแต่ละรอบ ทำให้การประเมินไม่สะท้อนความเป็นจริง นอกจากนี้พบว่ารายเก่าดั้งเดิมได้เปรียบในการกำหนดปริมาณการสั่งซื้อ โดย

ฝ่ายจัดซื้อไม่ได้มีการเจรจาต่อรองเพื่อกำหนดร่วมกัน บางรายไม่มีการปรับปรุง ทำให้ยังคงพบปัญหาแบบเดิมเกิดซ้ำ ปัญหาไม่ได้ถูกนำไปแก้ไขร่วมกันในส่วนของผู้ตรวจรับและผู้ใช้งานวัตถุดิบ

รูปแบบเกณฑ์การประเมินผู้ส่งมอบไม้ในแนวทางปัจจุบันของบริษัทการศึกษาแสดงสรุปดังตารางที่ 2 มีการแจ้งผลการประเมินให้กับผู้ส่งมอบวัตถุดิบทุกเดือน หากผู้ส่งมอบรายใดได้ผลประเมินต่ำกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ จะดำเนินการตามลำดับดังนี้

ครั้งที่ 1 แจ้งใบรายงานผลในเดือนที่มีการประเมินทันที เพื่อให้ผู้ส่งมอบตอบกลับแนวทางการป้องกันแก้ไข

ครั้งที่ 2 หากยังไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้ และได้รับแจ้งต่อเนื่องเป็นครั้งที่ 2 จะมีการเชิญตัวแทนขายมาพบหรือไป

เยี่ยมชมกระบวนการทำงานของผู้ส่งมอบ เพื่อประจักษ์หาแนวทางแก้ไขร่วมกัน

ครั้งที่ 3 หากยังไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้ และได้รับแจ้งต่อเนื่องเป็นครั้งที่ 3 จะพิจารณาระงับการสั่งซื้อ และมีการหารายใหม่ทดแทน

บริษัทการศึกษา มีการจัดซื้อวัตถุดิบไม้จากผู้ส่งมอบจำนวน 5 ราย ประกอบไปด้วย A, B, C, D และ E โดยทั้ง 5 รายนี้อยู่ในทะเบียนผู้ส่งมอบที่ได้รับการอนุมัติ ในช่วงปี 2560 ถึง 2563 ทุกรายมีผลการประเมินผ่านเกณฑ์ทุกปี แต่ยังคงพบปัญหาด้านการส่งมอบและปัญหาด้านคุณภาพที่ไม่สามารถดำเนินการแก้ไขได้ อีกทั้งมีการจัดสรรสัดส่วนการสั่งซื้อที่ไม่สอดคล้องกับเกณฑ์การประเมิน และไม่ได้นำผลการประเมินมาพิจารณาประกอบการตัดสินใจซื้อ

ตารางที่ 2 เกณฑ์ประเมินผู้ส่งมอบไม้ที่ใช้ในปัจจุบัน

เกณฑ์	น้ำหนัก	การวัดผล
คุณภาพ	0.25	เปอร์เซ็นต์คำสั่งซื้อที่ถูกดีคืนเมื่อเทียบกับคำสั่งซื้อทั้งหมด
ส่งมอบครบถ้วน	0.25	เปอร์เซ็นต์คำสั่งซื้อส่งมอบครบถ้วน เมื่อเทียบกับคำสั่งซื้อทั้งหมด
ส่งมอบทันเวลา	0.20	เปอร์เซ็นต์คำสั่งซื้อส่งมอบทันเวลา เมื่อเทียบกับคำสั่งซื้อทั้งหมด
บริการ	0.15	ระดับความพึงพอใจ (1 ถึง 5)
รับประกันสินค้า	0.15	ระดับความพึงพอใจ (1 ถึง 5)

3.2 ทบทวนเกณฑ์ประเมินผู้ส่งมอบจากงานวิจัย

ผู้วิจัยรวบรวมและวิเคราะห์ปัจจัยจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [4,5,6,7,9] เทียบกับเกณฑ์การประเมินในปัจจุบันของบริษัทการศึกษานี้ แสดงการจัดหมวดหมู่

ของปัจจัยด้านต้นทุน ด้านคุณภาพ ด้านการจัดส่ง ด้านการแก้ไขปัญหาและความร่วมมือ ด้านความสามารถและสิ่งเกื้อหนุน ด้านความยืดหยุ่นและความเสี่ยงผู้ส่งมอบ ดังตารางที่ 3-8 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 เกณฑ์การประเมินผู้ส่งมอบด้านต้นทุน

ปัจจัยด้านต้นทุน	[4]	[5]	[6]	[7]	[9]	บริษัทนี้
ค่าสินค้า	.	.	.	.		.
ค่าขนส่ง	.					
ต้นทุนการสั่งซื้อ	.					
ระยะเวลาการชำระเงิน	.	.	.	.	.	
ราคาเหมาะสมกับคุณภาพ		.		.	.	
ความร่วมมือในการลดราคาวัตถุดิบ			.	.	.	
ความยืดหยุ่นในการปรับราคา					.	

ในปัจจัยด้านต้นทุน (ตารางที่ 3) พบว่า บริษัทนี้กำหนดเกณฑ์เฉพาะด้านราคา เฉพาะค่าสินค้า ในขณะที่พบงานวิจัยอ้างอิง ปัจจัยด้านต้นทุนไว้ถึง 7 มิติ

ในปัจจัยด้านคุณภาพ (ตารางที่ 4) พบว่า บริษัทนี้กำหนดเกณฑ์เน้นสินค้าที่ถูกตีกลับและความสม่ำเสมอของคุณภาพ พบเกณฑ์ในงานวิจัยอ้างอิงจำนวน 8 มิติ

ตารางที่ 4 เกณฑ์การประเมินผู้ส่งมอบด้านคุณภาพ

ปัจจัยด้านคุณภาพ	[4]	[5]	[6]	[7]	[9]	บริษัทนี้
อัตราส่วนของเสีย	.					
อัตราส่วนของที่ถูกตีกลับ	.					.
คุณภาพตรงตามมาตรฐานที่กำหนด	.	.	.	.	.	
เทคโนโลยีที่เหมาะสม	.			.		
ความสมบูรณ์ของบรรจุภัณฑ์					.	
ความสม่ำเสมอของคุณภาพ				.	.	.
การตรวจสอบคุณภาพทุกครั้งก่อนส่ง				.	.	
ความน่าเชื่อถือของแหล่งวัตถุดิบ					.	

ด้านการจัดส่ง (ตารางที่ 5) บริษัทนี้เน้นความตรงต่อเวลา และส่งครบจำนวนตามที่สั่ง ในงานวิจัยอ้างอิง พบปัจจัยที่ประเมินได้จำนวน 8 มิติ

ตารางที่ 5 เกณฑ์การประเมินผู้ส่งมอบด้านการจัดส่ง

ปัจจัยด้านการจัดส่ง	[4]	[5]	[6]	[7]	[9]	บริษัทนี้
ความตรงต่อเวลาในการจัดส่ง	.	.	.	.	.	.
การจัดส่งครบตามจำนวน	.	.	.	.	.	.
จำนวนขั้นต่ำในการสั่งซื้อแต่ละครั้ง	.	.	.	.	.	
ความถูกต้องของเอกสาร	.			.	.	
การออกแบบให้ง่ายต่อการจัดส่ง	.					
การปฏิบัติตามกฎระเบียบของพนักงานส่งของ		.		.	.	

ตารางที่ 5 เกณฑ์การประเมินผู้ส่งมอบด้านการจัดส่ง(ต่อ)

ปัจจัยด้านการจัดส่ง	[4]	[5]	[6]	[7]	[9]	บริษัทนี้
การส่งมอบสินค้าให้เพียงพอต่อความต้องการ					.	
ความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงเวลาการส่ง				.	.	

ด้านการแก้ปัญหาและความร่วมมือ (ตารางที่ 6) บริษัทนี้ประเมินจากความรวดเร็วในการแก้ปัญหา มีการรับประกันสินค้า และมีระบบจัดการคุณภาพ ในงานวิจัยอ้างอิง พบปัจจัยที่ประเมินได้ จำนวน 14 มิติ

บริษัทนี้ไม่มีเกณฑ์ในด้านปัจจัยด้านความสามารถและสิ่งเกื้อหนุน ในงานวิจัยอ้างอิงพบการประเมินดังกล่าวใน 9 มิติ ดังตารางที่ 7 และบริษัทนี้ไม่มีเกณฑ์ด้านความยืดหยุ่นและความเสี่ยงผู้ส่งมอบที่ชัดเจน ในงานวิจัยอ้างอิงพบเกณฑ์ดังกล่าวใน 9 มิติ ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 6 เกณฑ์การประเมินผู้ส่งมอบด้านการแก้ปัญหาและความร่วมมือ

ปัจจัยด้านการแก้ปัญหา และความร่วมมือ	[4]	[5]	[6]	[7]	[9]	บริษัทนี้
ความสามารถต่อการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง	•			•		
การตอบสนองต่อการร้องขอ	•	•	•	•	•	
การรับประกันสินค้า	•			•		•
การติดต่อสื่อสาร		•	•			
บุคลากรฝ่ายขาย	•	•	•	•		
ความร่วมมือในการออกแบบผลิตภัณฑ์	•					
ความง่ายต่อการเจรจาต่อรอง			•		•	
อะไหล่ที่เพียงพอ	•					
การให้คำปรึกษาเรื่องคุณสมบัติของสินค้า					•	
การให้ตัวอย่าง สำหรับร่องผลิต					•	
ความรวดเร็วในการเข้าตรวจสอบและการหาวิธี ป้องกัน		•	•		•	•
การพัฒนาผู้ส่งมอบ	•					
การบริการหลังการขาย	•	•	•	•		
ระบบบริหารคุณภาพ	•		•			•

ตารางที่ 7 เกณฑ์การประเมินผู้ส่งมอบด้านความสามารถและสิ่งเกื้อหนุน

ปัจจัยด้านความสามารถ และสิ่งเกื้อหนุน	[4]	[5]	[6]	[7]	[9]	บริษัทนี้
กำลังการผลิต	•					
ความสามารถในการแก้ไขปัญหา	•	•		•		
ระยะเวลานำ	•		•	•		
ความสามารถในการแก้ไขปรับปรุง			•	•		
ความสามารถด้านเทคโนโลยี	•			•		
ระบบเทคโนโลยีสารสนเทศ	•			•		
ระบบการจัดการสินค้าที่ไม่ผ่านเกณฑ์	•			•		
ระบบจัดการสิ่งแวดล้อม		•	•			
เครื่องจักร	•					

ปัจจัยที่รวบรวมได้จากงานวิจัย และเกณฑ์ที่ได้จากการ
ทบทวนการประเมินปัจจุบันของบริษัททรนศึกษา ได้ถูก
นำมาคัดกรองโดยผู้วิจัยและฝ่ายจัดซื้อของบริษัท จัดกลุ่มรวม
หัวข้อที่ใกล้เคียงเพื่อลดความซ้ำซ้อน กำหนดคำอธิบายของ

เกณฑ์เพื่อความชัดเจน และนำทั้งหมดที่รวบรวมได้นี้ไป
ประเมินความเหมาะสมกับการนำมาใช้กับผู้ส่งมอบวัตถุดิบ
ไม้ของบริษัททรนศึกษา

ตารางที่ 8 เกณฑ์การประเมินผู้ส่งมอบด้านความยืดหยุ่นและความเสี่ยงผู้ส่งมอบ

ปัจจัยด้านความยืดหยุ่น และความเสี่ยงผู้ส่งมอบ	[4]	[5]	[6]	[7]	[9]	บริษัทนี้
การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงคำสั่งซื้อ	.				.	
ความสามารถในการตอบสนองการร้องขอ	.				.	
ฐานะทางการเงิน	.			.	.	
ประสบการณ์ในอดีต	.		.			
ปัจจัยเสี่ยงจากภายนอก	.					
การดำเนินธุรกิจตามกฎหมาย		.			.	
ความซื่อสัตย์ในการดำเนินธุรกิจ		.		.	.	
แผนรองรับการดำเนินธุรกิจอย่างต่อเนื่องใน สภาวะฉุกเฉิน	.					
สถานที่ตั้งโรงงาน	.	.	.	.		

ได้คัดเลือกผู้เชี่ยวชาญประเมิน IOC ปัจจัยที่สอดคล้องกับเกณฑ์การใช้งานของบริษัทกรณีศึกษาจำนวน 3 ท่าน ได้แก่ หัวหน้างานจัดซื้อ 1 ท่าน (เป็นผู้ออกแบบและควบคุมกระบวนการจัดซื้อ) วิศวกรควบคุมการผลิต 1 ท่าน (เป็นผู้ใช้งานวัตถุดิบและแก้ปัญหาในการผลิตส่วนที่มาจากวัตถุดิบ) และผู้จัดการโซ่อุปทาน 1 ท่าน (เป็นอดีตผู้จัดการจัดซื้อ ปัจจุบันดูแลกิจกรรมโลจิสติกส์ที่เชื่อมโยงกันในบริษัท) ผลคะแนน IOC (ค่า IOC ได้จากสมการที่ (4)) ดังแสดงใน ตารางที่ 9

3.3 ประเมินน้ำหนักของเกณฑ์

หลังจากได้ปัจจัยที่เหมาะสมแล้ว นำปัจจัยหลักและรองมากำหนดน้ำหนักคะแนนและลำดับความสำคัญด้วยวิธีการ AHP ประชุมร่วมกันเพื่อหาอันดับในกลุ่มของผู้บริหารระดับสูงของบริษัทกรณีศึกษาจำนวน 3 ท่าน ที่มีประสบการณ์บริหารไม่ต่ำกว่า 10 ปี ในการคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัย ใช้การคำนวณด้วยหลักการของ AHP โดยใช้โปรแกรมช่วยคำนวณ Microsoft excel ในที่นี้จะยกตัวอย่างการคำนวณไว้พอสังเขป

ตารางที่ 9 ผลคะแนน IOC ผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน (#1, #2, #3)

เกณฑ์ประเมิน	คะแนนของผู้เชี่ยวชาญ			ค่า IOC ที่ได้	ผล IOC*
	#1	#2	#3		
ด้านต้นทุน					
ระยะเวลาในการชำระเงิน	1	1	1	1	ผ่าน
ราคาเหมาะสมกับคุณภาพ	1	1	1	1	ผ่าน
ความร่วมมือในการลดราคาวัตถุดิบ	-1	0	0	-0.33	ไม่ผ่าน
ความยืดหยุ่นในการปรับราคา	1	-1	-1	-0.33	ไม่ผ่าน
ด้านคุณภาพ					
อัตราส่วนของเสีย	1	1	1	1	ผ่าน
คุณภาพตรงตามมาตรฐานที่กำหนด	1	1	1	1	ผ่าน
ความสม่ำเสมอของคุณภาพ	1	1	1	1	ผ่าน
ความน่าเชื่อถือของแหล่งวัตถุดิบ	0	0	0	0	ไม่ผ่าน

ตารางที่ 9 ผลคะแนน IOC ผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน (#1, #2, #3)
(ต่อ)

เกณฑ์ประเมิน	คะแนนของผู้เชี่ยวชาญ			ค่า IOC ที่ได้	ผล IOC*
	#1	#2	#3		
ด้านการจัดตั้ง					
ความตรงต่อเวลาในการจัดตั้ง	1	1	1	1	ผ่าน
การจัดตั้งครบตามจำนวน	1	1	1	1	ผ่าน
จำนวนขั้นต่ำในการซื้อแต่ละครั้ง	1	0	1	0.67	ผ่าน
ความถูกต้องของเอกสาร	0	0	1	0.33	ไม่ผ่าน
การปฏิบัติต่อคุณภาพงานส่งของ	0	0	1	0.33	ไม่ผ่าน
การส่งมอบเพียงพอต่อความต้องการ	1	0	0	0.33	ไม่ผ่าน
ความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงเวลา	1	1	0	0.67	ผ่าน
ด้านการแก้ไขปัญหา และความร่วมมือ					
การรับประกันสินค้า	1	1	1	1	ผ่าน
บุคลากรฝ่ายขาย	1	0	1	0.67	ผ่าน
การให้คำปรึกษาคุณสมบัติของสินค้า	-1	0	0	-0.33	ไม่ผ่าน
การให้ตัวอย่างสำหรับทดลองผลิต	0	0	0	0	ไม่ผ่าน
ความรวดเร็วในการเข้าตรวจสอบและการหาวิธีป้องกัน	1	1	0	0.67	ผ่าน
กำลังการผลิต	1	0	0	-0.33	ไม่ผ่าน
ระยะเวลานำ	1	1	1	1	ผ่าน
ด้านความยืดหยุ่น					

ตารางที่ 9 ผลคะแนน IOC ผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน (#1, #2, #3)
(ต่อ)

เกณฑ์ประเมิน	คะแนนของผู้เชี่ยวชาญ			ค่า IOC ที่ได้	ผล IOC*
	#1	#2	#3		
การตอบสนองการเปลี่ยนแปลงคำสั่งซื้อ	1	0	1	0.67	ผ่าน
ความสามารถตอบสนองการร้องขอ	0	0	0	0	ไม่ผ่าน
ด้านความเสี่ยง					
ฐานะทางการเงิน	0	0	1	-0.33	ไม่ผ่าน
ความซื่อสัตย์ในการดำเนินธุรกิจ	1	1	1	1	ผ่าน
แผนรองรับการดำเนินธุรกิจ อย่างต่อเนื่องในสภาวะฉุกเฉิน	0	0	1	-0.33	ไม่ผ่าน
สถานที่ตั้งโรงงาน	1	1	0	0.67	ผ่าน

*ผ่านเกณฑ์เมื่อผลเฉลี่ยค่า IOC มีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.0

เริ่มจากนำปัจจัยหลักมาเทียบกับที่ระบุ โดยให้คะแนนความสำคัญกับปัจจัยที่มีความสำคัญมากกว่า (ใช้เกณฑ์คะแนน 1 ถึง 9 หมายถึงสำคัญน้อยกว่าถึงสำคัญมากที่สุดตามลำดับ) ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 10 แล้วนำไปคำนวณ Eigenvector เพื่อหาน้ำหนักของปัจจัยหลักตามสมการที่ (1) ดังตารางที่ 11

รูปที่ 1 แสดงหน้าจอการใช้ Microsoft excel ช่วยคำนวณตามสมการที่ (1) เมื่อได้ค่า λ_{max} แล้วนำมาคำนวณตามสมการที่ (2) จากการที่มีปัจจัยหลักจำนวน 6 ปัจจัย ทำให้ได้ค่า CI เท่ากับ 0.088 และเมื่ออ้างอิงตารางที่ 1 จะเห็นว่าค่า RI เท่ากับ 1.24 ทำให้ได้ค่า CR ตามสมการที่ (3) เท่ากับ 0.070 นั่นคือ ข้อมูลมีความสอดคล้องและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์และสรุปผลได้ ทำซ้ำในทำนองเดียวกันจนครบทุกปัจจัยหลักและปัจจัยรอง

ตารางที่ 10 ผลการเทียบความสำคัญของปัจจัยหลัก

ปัจจัยหลัก	ต้นทุน	คุณภาพ	จัดส่ง	แก้ปัญหา	ยืดหยุ่น	ความเสี่ยง
ต้นทุน	1	1/3	1	1/3	1/3	7
คุณภาพ	3	1	2	1	3	8
จัดส่ง	1	1/2	1	5	1	5
แก้ปัญหา	3	1	1/5	1	1	3
ยืดหยุ่น	3	1/3	1	1	1	7
ความเสี่ยง	1/7	1/8	1/5	1/3	1/7	1

ตารางที่ 11 ตัวอย่างคำนวณหาค่า Eigenvector

ปัจจัยหลัก	ต้นทุน	คุณภาพ	จัดส่ง	แก้ปัญหา	ยืดหยุ่น	เสี่ยง	รวม (นอน)	%	Eigen vector
ต้นทุน	0.089	0.101	0.185	0.038	0.051	0.225	0.689	11.48	0.115
คุณภาพ	0.269	0.303	0.370	0.115	0.463	0.258	1.778	29.63	0.296
จัดส่ง	0.089	0.151	0.185	0.577	0.154	0.161	1.317	21.95	0.220
แก้ปัญหา	0.269	0.303	0.037	0.115	0.154	0.296	0.974	16.23	0.162
ยืดหยุ่น	0.269	0.101	0.185	0.115	0.154	0.225	0.049	17.48	0.175
เสี่ยง	0.014	0.037	0.037	0.038	0.022	0.032	0.180	3.00	0.030
รวม (ตั้ง)	1	1	1	1	1	1	6	100	1

	Performance Sores	Consistency Measure	
ต้นทุน	0.115	14.136	$\lambda_{\max}=(1 \times 0.115)+(0.33 \times 0.296)+(1 \times 0.220)+(0.33 \times 0.162)+(0.33 \times 0.175)+(7 \times 0.030) / 0.115 = 14.136$
คุณภาพ	0.296	4.272	$\lambda_{\max}=(3 \times 0.115)+(1 \times 0.296)+(2 \times 0.220)+(1 \times 0.162)+(3 \times 0.175)+(8 \times 0.030) / 0.296 = 4.272$
การจัดส่ง	0.220	7.354	$\lambda_{\max}=(1.00 \times 0.115)+(0.5 \times 0.296)+(1 \times 0.220)+(5 \times 0.162)+(1 \times 0.175)+(5 \times 0.030) / 0.220 = 7.354$
การแก้ปัญหา	0.162	1.577	$\lambda_{\max}=(3 \times 0.115)+(1 \times 0.296)+(0.2 \times 0.220)+(1 \times 0.162)+(1 \times 0.175)+(3 \times 0.030) / 0.162 = 1.577$
ความยืดหยุ่น	0.175	5.700	$\lambda_{\max}=(3 \times 0.115)+(0.33 \times 0.296)+(1 \times 0.220)+(1 \times 0.162)+(1 \times 0.175)+(7 \times 0.030) / 0.175 = 5.70$
ความเสี่ยง	0.030	5.600	$\lambda_{\max}=(0.14 \times 0.115)+(0.12 \times 0.296)+(0.20 \times 0.220)+(0.33 \times 0.162)+(0.14 \times 0.175)+(1 \times 0.030) / 0.030 = 5.60$
	38.639		
$\lambda_{\max}$	6.440		

รูปที่ 1 ตัวอย่างการคำนวณสมการที่ (1) ใน Microsoft excel ที่ใช้หาคำนวน

3.4 นำเสนอรูปแบบการประเมินผู้ส่งมอบ

ในขั้นตอนนี้ได้นำเสนอเกณฑ์การประเมินคะแนนแต่ละปัจจัย กำหนดนิยามเพื่อใช้ร่วมกับน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์ นำไปใช้เป็นมาตรฐานแบบประเมินผู้ส่งมอบไม้ของบริษัทในปัจจุบันต่อไป

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการคัดเลือกปัจจัยที่นำมาใช้เป็นเกณฑ์ในกรณีศึกษา

จากการประเมินความเหมาะสมของปัจจัยที่จะนำมาใช้ในกรณีศึกษานี้จากผู้เชี่ยวชาญด้วย IOC ผลการประเมินพบว่า ปัจจัยหลักที่นำมาใช้ได้คือ ด้านต้นทุน

ด้านคุณภาพผลิตภัณฑ์ ด้านการจัดส่ง ด้านการแก้ไข ปัญหาและร่วมมือ ด้านความยืดหยุ่น และด้านความเสี่ยง ผู้ขาย ปัจจัยหลักที่ไม่ถูกนำมาใช้ ได้แก่ ความสามารถ และสิ่งเกื้อหนุน ส่วนปัจจัยรองที่นำมาใช้ได้ มีทั้งสิ้น 17 ปัจจัยรอง

4.2 เกณฑ์ประเมินผู้ส่งมอบที่เชื่อมโยงกับกลยุทธ์องค์กร

เกณฑ์ประเมินที่จัดทำด้วยโครงสร้างการตัดสินใจแบบ AHP แบ่งระดับปัจจัยออกเป็น 2 ระดับชั้น โดยในระดับชั้น ที่ 1 ปัจจัยหลักมีทั้งหมด 6 ปัจจัยหลัก ประกอบไปด้วย ปัจจัยด้านต้นทุน ปัจจัยด้านคุณภาพ ปัจจัยด้านการจัดส่ง ปัจจัยการแก้ไขปัญหาและความร่วมมือระหว่างองค์กร ปัจจัยด้านความยืดหยุ่น ปัจจัยด้านความเสี่ยง ส่วนปัจจัยในระดับชั้นที่ 2 ซึ่งเป็นปัจจัยรองในแต่ละปัจจัยหลัก มีจำนวนทั้งสิ้น 17 ปัจจัยรอง

4.3 การหาน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัย

ผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการประเมินผู้ส่งมอบ วัตถุดิบไม้ ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักเชิงกลยุทธ์ที่มีความสำคัญมากที่สุด คือ ด้านคุณภาพ ปัจจัยรองลงมาคือ ด้านการจัดส่ง ด้านความยืดหยุ่น ด้านการแก้ไขปัญหา ด้านต้นทุน และด้านความเสี่ยงผู้ขาย ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 12 ส่วนตัวอย่างการประเมินน้ำหนักของปัจจัยรองที่อยู่ใต้ปัจจัยหลักด้านต้นทุน ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 12 น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์ตามการประเมิน AHP ของปัจจัยหลัก

ปัจจัยหลัก	น้ำหนัก ความสำคัญ	ลำดับ ความสำคัญ
ด้านต้นทุน	0.1149	5
ด้านคุณภาพผลิตภัณฑ์	0.2965	1
ด้านการจัดส่ง	0.2199	2
ด้านการแก้ไขปัญหาและ ร่วมมือ	0.1625	4
ด้านความยืดหยุ่น	0.1749	3
ด้านความเสี่ยงผู้ขาย	0.0313	6
รวม	1.0000	

ตารางที่ 13 น้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองภายใต้ปัจจัยหลักด้านต้นทุน

ปัจจัยรองด้านต้นทุน	น้ำหนัก ความสำคัญ	ลำดับ ความสำคัญ
ระยะเวลาชำระเงิน	0.4054	2
ราคาเหมาะสมกับคุณภาพ	0.4797	1
ความร่วมมือในการลดราคา	0.1149	3
รวม	1.0000	

เมื่อทำการประเมินน้ำหนักของปัจจัยรองในแต่ละปัจจัยหลักจนครบแล้ว ทำค่าที่ได้มาทำการคำนวณกลับเข้าส่วนของปัจจัยหลักเพื่อดูผลของปัจจัยรองทั้งหมดแสดงผลได้ดังตารางที่ 14

นอกจากนี้ เพื่อให้แนวทางการประเมินและวัดผลงานผู้ส่งมอบวัตถุดิบไม่มีความชัดเจนยิ่งขึ้น ผู้วิจัยได้ทำงานร่วมกับผู้บริหาร และนำเสนอรายละเอียดเกณฑ์การประเมินคะแนนในแต่ละปัจจัย เพื่อใช้ร่วมกับน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยเมื่อนำเกณฑ์และแนวทางการประเมินที่นำเสนอ ไปทดลองใช้ประเมินผู้ส่งมอบวัตถุดิบไม้ทั้ง 5 ราย ได้ผลดังตารางที่ 15

ตารางที่ 14 ผลน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยที่ใช้พัฒนาแบบประเมินผู้ส่งมอบวัตถุดิบไม้ที่นำเสนอทั้งหมด

ปัจจัยรอง ในแต่ละปัจจัยหลัก	น้ำหนัก ความสำคัญ	ลำดับ ความสำคัญ
ด้านต้นทุน:		
ระยะเวลาการชำระเงิน	0.0465	9
ราคาเหมาะสมกับคุณภาพ	0.0550	7
ความร่วมมือในการลดราคา	0.0130	15
ด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์:		
อัตราส่วนของเสีย	0.2143	1
คุณภาพตรงตามมาตรฐาน	0.0203	13
ความสม่ำเสมอของคุณภาพ	0.0617	6
ด้านการจัดส่ง:		
ความตรงต่อเวลา	0.1173	3
จัดส่งครบตามจำนวน	0.0500	8
จำนวนชิ้นต่ำในการสั่งซื้อ	0.0344	10
การเปลี่ยนเวลาส่ง	0.0168	14

ตารางที่ 14 ผลน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยที่ใช้พัฒนาแบบประเมินผู้ส่งมอบวัตถุดิบไม้ที่นำเสนอทั้งหมด (ต่อ)

ปัจจัยรอง ในแต่ละปัจจัยหลัก	น้ำหนัก ความสำคัญ	ลำดับ ความสำคัญ
ด้านการแก้ไขปัญหาและร่วมมือ		
การรับประกันสินค้า	0.0632	4
บุคลากรฝ่ายขาย	0.0095	16
ความรวดเร็วในการแก้ปัญหา	0.0264	12
ระยะเวลานำ	0.0625	5
ด้านความยืดหยุ่น:		
การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงคำสั่งซื้อ	0.1749	2
ด้านความเสี่ยงผู้ขาย:		
ความซื่อสัตย์	0.0267	11
สถานที่ตั้งโรงงาน	0.0033	17
รวม	1.0000	

ปัจจุบัน ผู้ส่งมอบ A ได้ผลการคะแนนประเมินเท่ากับ 88.93% ปัจจัยที่ได้คะแนนสูงสุด คือด้านต้นทุน และปัจจัยที่ได้คะแนนต่ำสุด คือด้านคุณภาพ ผู้ส่งมอบ B ได้ผลคะแนนรวม 87.88% ปัจจัยที่ได้คะแนนสูงสุด คือด้านการแก้ไขปัญหาและความร่วมมือ ปัจจัยที่ได้คะแนนต่ำสุด คือด้านความยืดหยุ่น ผู้ส่งมอบ C ได้ผลคะแนนรวม 84.37% ปัจจัยที่ได้คะแนนสูงสุด คือด้านความเสี่ยงผู้ขาย ปัจจัยที่ได้คะแนนต่ำสุด คือด้านความยืดหยุ่น ผู้ส่งมอบ D ได้ผลคะแนนรวม 92.33% ปัจจัยที่ได้คะแนนสูงสุด คือด้านการแก้ไขปัญหาและความร่วมมือ ปัจจัยที่ได้คะแนนต่ำสุด คือด้านต้นทุน ผู้ส่งมอบ E ได้ผลคะแนนรวม 88.51% ปัจจัยที่ได้คะแนนสูงสุด คือด้านความยืดหยุ่น และปัจจัยที่ได้คะแนนต่ำสุด คือด้านต้นทุนผลการนำไปใช้ประเมินผู้ส่งมอบ 5 รายแสดงดังตารางที่ 15 โดยทำการเทียบกับสัดส่วนการจัดซื้อใน

ตารางที่ 15 ผลประเมินผู้ส่งมอบวัตถุดิบไม้เทียบสัดส่วนการจัดซื้อ

ผู้จัด จำหน่าย	คะแนนรวมที่ได้ ใหม่ (เปอร์เซ็นต์)	ปัจจัยคะแนนสูงสุด	ปัจจัยคะแนนต่ำสุด	มูลค่าจัดซื้อปัจจุบัน (เปอร์เซ็นต์)
A	88.93	ต้นทุน	คุณภาพ	27
B	87.88	แก้ไขปัญหาและความร่วมมือ	ความยืดหยุ่น	35
C	84.37	ความเสี่ยงผู้ขาย	ความยืดหยุ่น	18
D	92.33	แก้ไขปัญหาและความร่วมมือ	ต้นทุน	12
E	88.51	ความยืดหยุ่น	ต้นทุน	8
รวม				100

5. อภิปรายผลและสรุป

จากการวิจัยนี้ ได้มีการทบทวนอย่างเป็นระบบถึงเกณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการประเมินผู้ส่งมอบโดยทั่วไป หลังจากประเมินความเหมาะสมกับการใช้งานในกรณีศึกษาซึ่งมีความเฉพาะเจาะจงของการใช้งานที่แตกต่างจากกรณีทั่วไป เนื่องจากเป็นผู้ส่งมอบเชิงกลยุทธ์ในอุตสาหกรรมที่แตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ทำให้ทราบถึงเกณฑ์ที่เหมาะสมกับกรณีศึกษานี้ ได้มีการกำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละเกณฑ์ด้วย AHP

และนำเสนอแนวทางการประเมินใหม่ หลังจากมีการนำไปทดลองใช้ พบว่าผลลัพธ์ของการประเมินด้วยเกณฑ์ที่นำเสนอนี้ สามารถสะท้อนถึงผลการดำเนินงานที่แท้จริงของผู้ส่งมอบทั้ง 5 รายได้มากขึ้น รวมถึงเชื่อมโยงถึงปัญหาเรื้อรังที่เกิดขึ้นได้

ในรูปแบบการประเมินที่พัฒนาขึ้น เห็นได้ชัดเจนว่าคำนึงถึงกลยุทธ์และความสำคัญของผู้ส่งมอบวัตถุดิบหลักที่มีส่วนสำคัญในการแข่งขันของบริษัทกรณีศึกษามากขึ้น เกณฑ์การประเมินในรูปแบบเดิมจะถูกกำหนดขึ้นโดยฝ่าย

จัดซื้อเท่านั้นและไม่มีการนิยามเกณฑ์ที่ชัดเจน ในรูปแบบเกณฑ์ที่นำเสนอใหม่ เป็นเกณฑ์ที่พิจารณาร่วมกันในหลากหลายหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง (Cross-functional team) มีการนิยามเกณฑ์ที่ชัดเจน เชื่อมโยงไปสู่การปรับปรุงแก้ปัญหาที่พบ รวมถึงสามารถกำหนดแนวทางในการจัดการความสัมพันธ์เพื่อพัฒนาผู้ส่งมอบเชิงกลยุทธ์ได้ในอนาคต

นอกจากนี้ในรายละเอียดการประเมิน พบว่าแต่ละเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินผู้ส่งมอบวัตถุดิบเชิงกลยุทธ์ประเภทไม้ มีการกำหนดนิยามที่ชัดเจน และสอดคล้องกับแนวทางการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างเป็นรูปธรรม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ดำเนินการก่อนหน้านี้ [4,5,6,7,9] โดยกรณีศึกษานี้มีความเหมือนกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ในส่วนที่สามารถนำเกณฑ์การประเมินผู้ส่งมอบบางส่วนมาใช้ร่วมกันได้ แต่ก็มีน้ำหนักเกณฑ์ที่ต่างกัน เพราะแตกต่างที่สินค้าและแตกต่างอุตสาหกรรมกัน นอกจากนี้มีความต่างกันในส่วนของนิยามเกณฑ์และการกำหนดคะแนนการประเมิน ผู้สนใจสามารถนำผลการศึกษานี้ไปประยุกต์ใช้กับบริษัทอื่นในอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์และอุตสาหกรรมที่คล้ายคลึงกันได้ แต่หากจะนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่แตกต่าง ควรจะต้องมีการทบทวนเกณฑ์และน้ำหนักของเกณฑ์ใหม่

จากผลการทดลองใช้งานตามแนวทางที่นำเสนอใหม่ เกณฑ์ประเมินเก่า (อ้างอิงตารางที่ 2) มีความไม่ชัดเจนและกำหนดไว้กว้าง ส่วนเกณฑ์ใหม่ที่พัฒนาขึ้น (ภาคผนวกตารางที่ 16) มีนิยามของเกณฑ์ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพที่ครอบคลุมและชัดเจนมากขึ้น เห็นได้ชัดเจนว่าน้ำหนักเน้นด้านคุณภาพ การจัดส่งและความยืดหยุ่นมากขึ้น จึงสามารถสะท้อนผลการดำเนินการของผู้ส่งมอบไม้ได้ดีขึ้นและเชื่อมโยงกลยุทธ์การแข่งขัน นอกจากนี้ เกณฑ์การประเมินใหม่ ทำให้ผู้บริหารเห็นข้อมูลเชิงปริมาณ และทำให้รับทราบปัญหาซึ่งไม่เคยรับทราบมาก่อน ว่าการจัดสรรสัดส่วนการจัดซื้อในปัจจุบันไม่สอดคล้องกับผลประเมินผู้ส่งมอบ จะเห็นจากตารางที่ 15 สัดส่วนการจัดซื้อในปัจจุบันมีลักษณะมุ่งเน้นราคาเป็นหลัก จากผู้ส่งมอบทั้ง 5 ราย ผู้ส่งมอบ D ที่มีผลประเมินได้คะแนนสูงสุด กลับมี

สัดส่วนการจัดซื้อเพียง 12% ถือเป็นลำดับ 3 ส่วนผู้ส่งมอบ B ที่ได้คะแนนประเมินเป็นลำดับ 4 มีสัดส่วนการจัดซื้อสูงที่สุด ถึง 35% ซึ่งทางผู้บริหารของบริษัทกรณีศึกษาจะได้นำเข้าทบทวนเพื่อการจัดการปัญหาต่อไป

ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมถึงรูปแบบการกระจายและจัดสรรสัดส่วนการจัดซื้อ ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่ผู้วิจัยเห็นว่าเป็นเครื่องมือที่สามารถใช้ในการสร้างสมดุลอำนาจต่อรองให้กับบริษัทกรณีศึกษา ได้แก่ การกระจายและจัดสรรการสั่งซื้อวัตถุดิบไม้ไปยังผู้ส่งมอบที่ผ่านการคัดเลือกและประเมินในรายอื่น การสั่งซื้อที่กระจายไปยังผู้ส่งมอบแต่ละรายต้องมากพอที่จะทำให้ผู้ส่งมอบเห็นคุณค่าว่าควรจะต้องต่อซื้อขายในระยะยาว ในขณะเดียวกันถ้ามีเสนอส่วนลดเพราะซื้อจำนวนมาก ก็ควรนำเข้ามาประกอบการพิจารณาด้วย ดังนั้นการกระจายการสั่งซื้อนอกจากป้องกันมิให้อำนาจต่อรองลดต่ำลงแล้ว ยังสามารถสร้างความสามารถในการแข่งขันระยะยาวให้กับกิจการกรณีศึกษาได้

นอกจากนี้ การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบให้ผู้ส่งมอบบริหารคลังแทน (Vender Managed Inventory: VMI) เป็นแนวคิดหนึ่งที่บริษัทกรณีศึกษาควรนำมาวิเคราะห์ ร่วมกับการบริหารความสัมพันธ์ผู้ส่งมอบ ประโยชน์หลักที่จะได้รับคือ มิไม้ป้อนเข้ามาอย่างสม่ำเสมอ ลดปัญหาการขาดแคลนไม้ส่งเข้าล่าช้า ลดปัญหาการเก็บพัสดุคงคลังมากเกินไป ส่วนประโยชน์ที่ผู้ส่งมอบจะได้รับได้แก่ ได้รับข้อมูลความต้องการจากบริษัทกรณีศึกษา ทำให้ง่ายต่อการพยากรณ์ความต้องการ ทราบถึงความต้องการล่วงหน้า วางแผนการผลิตและจัดส่งให้กับบริษัทกรณีศึกษาได้อย่างราบรื่น

กลยุทธ์การทำสัญญาระยะยาวและระบบแบบทันเวลาพอดี (Just-In-Time: JIT) เป็นแนวทางที่สามารถดำเนินการได้ สัญญาการสั่งซื้อระยะยาวมีข้อดีในการซื้อ เพื่อให้เกิดการประหยัดต้นทุนเสมือนการซื้อขายโดยกำหนดราคาจำนวนเมื่อซื้อเป็นจำนวนมากติดต่อกันอย่างสม่ำเสมอทำให้บริษัทกรณีศึกษาสามารถใช้ร่วมกับเทคนิค JIT ส่งผลดีในการลดระดับวัตถุดิบคงคลัง พร้อมกับการจัดส่งสินค้าได้ทันเวลาไม่ต้องรอรอบการผลิต

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ Res-CIT0611/2021 ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้บริหารและหัวหน้างานของบริษัทกรณีศึกษาที่สนับสนุนข้อมูลและร่วมวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. J. V. Weele, "Purchasing and Business Strategy," in *Purchasing & Supply Chain Management: Analysis, Strategy, Planning and Practice*, 5th ed. Andover, UK: Cengage Learning EMEA, 2010, ch. 9, pp. 188–190.
- [2] T. L. Saaty, "Decision making with the analytic hierarchy process," *International Journal of Services Sciences*, vol. 1, no. 1, 2008, pp. 83–98, doi: 10.1504/IJSSci.2008.01759
- [3] W. Saensupho, K. Karnchaisri, P. Jomtong, N. Sangkhiew and P. Klomjit, "Supplier selection using analytic hierarchy process for sack manufacturer," *Thai Science and Technology Journal*, vol. 28, no. 5, 2020, pp. 872–884, doi: 10.14456/tstj.2020.71
- [4] S. Wongthayan, "Setting supplier evaluation criteria with analytical hierarchy process (AHP): the case study of a frozen food factory," M.E individual Study Dept. Ind. Tech., King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand, 2018.
- [5] T. Kiangklom, "Air conditioner supplier selection: a case study of hotel on island," M.E. thesis, Dept. Eng. Manag., Dhurakij Pundit University, Bangkok, Thailand, 2014.
- [6] N. Sawangwongsin, "Application of AHP method for supplier evaluation: a case study of bathroom product retailer," M.B.A thesis, Dept. Bus. Adm., Dhurakij Pundit University, Bangkok, Thailand, 2012.
- [7] S. Wongnitipat and N. Gerdri, "Supplier evaluation and selection: a case example of motorcycle manufacturing company," *KMUTT Research & Development Journal*, vol. 34, no. 1, 2011, pp. 59–75.
- [8] O. Jeerawassakul and T. Wasusri, "Application of AHP in transportation service provider evaluation," in the 7th Thai Value Chain Management & Logistics Conference (Thai-VCML 2007), Bangkok, Thailand, Nov. 15–16, 2007, pp. 459–472.
- [9] S. Tangsiriwattana, "Supplier selection method using analytic hierarchy evaluation process for a car seat manufacturer in Thailand," M.E. Thesis, Dept. Ind. Eng., Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 2016.

ภาคผนวก

ตารางที่ 16 แนวทางการประเมินที่นำเสนอและนิยามเกณฑ์

ปัจจัยที่ใช้ประเมิน	เกณฑ์ตามระดับคะแนน				
	1 คะแนน	2 คะแนน	3 คะแนน	4 คะแนน	5 คะแนน
1. ด้านต้นทุน:					
1.1 ระยะเวลาการชำระเงิน	เงินสด	เครดิตมากกว่า 30 วัน	เครดิตมากกว่า 45 วัน	เครดิตมากกว่า 60 วัน	เครดิตมากกว่า 90 วัน
1.2 ราคาเหมาะสมกับคุณภาพ	ไม่เหมาะสมเลย	ไม่ค่อยเหมาะสม	เหมาะสมพอใช้	เหมาะสมมาก	เหมาะสมมากที่สุด
1.3 ความร่วมมือในการลดราคา	ไม่ให้ความร่วมมือ	ไม่ค่อยให้ความร่วมมือ	ให้ความร่วมมือพอใช้	ให้ความร่วมมือดี	ให้ความร่วมมือเหนือความคาดหมาย
2. ด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์:					
2.1 อัตราส่วนของเสีย	มากกว่า 5%	3-5%	2-3%	1-2%	น้อยกว่า 1%
2.2 คุณภาพตรงตามมาตรฐาน	ต่ำกว่า 94%	94-96%	96-98%	98-99%	100%
2.3 ความสม่ำเสมอของคุณภาพ	ต่ำกว่า 94%	94-96%	96-98%	98-99%	100%
3. ด้านการจัดส่ง:					
3.1 ความตรงต่อเวลา	ต่ำกว่า 94%	94-96%	96-98%	98-99%	100%
3.2 จัดส่งครบตามจำนวน	ต่ำกว่า 94%	94-96%	96-98%	98-99%	100%
3.3 จำนวนชิ้นตำในการตั้งซื้อ	5-6 ตั้ง	2-4 ตั้ง	1 ตั้ง	2-10 แผ่น	1 แผ่น
3.4 การเปลี่ยนเวลาส่ง	เปลี่ยนไม่ได้เลย	เปลี่ยนไม่ค่อยได้	เปลี่ยนได้เป็นบางครั้ง	เปลี่ยนได้บ่อย	เปลี่ยนได้ทุกครั้ง
4. ด้านการแก้ไขปัญหาและร่วมมือ:					
4.1 การรับประกันสินค้า	น้อยมาก	ค่อนข้างน้อย	พอใช้	มาก	มากที่สุด
4.2 บุคลากรฝ่ายขาย	ไม่ดี	ไม่ค่อยดี	พอใช้	ดีมาก	ดีมากที่สุด
4.3 ความรวดเร็วในการแก้ปัญหา	ช้า	ค่อนข้างช้า	เร็วพอใช้	เร็วมาก	เร็วมากที่สุด
4.4 ระยะเวลาหน้า	ช้า	ค่อนข้างช้า	เร็วพอใช้	เร็วมาก	เร็วมากที่สุด
5. ด้านความยืดหยุ่น:					

ตารางที่ 16 แนวทางการประเมินที่นำเสนอและนิยามเกณฑ์ (ต่อ)

5.1 การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงคำสั่งซื้อ	ไม่ตอบสนองเลย	ไม่ค่อยตอบสนอง	ตอบสนองพอใช้	ตอบสนองดี	ตอบสนองดีมาก
6. ด้านความเสี่ยงผู้ขาย:					
6.1 ความซื่อสัตย์	ไม่ซื่อสัตย์เลย	ไม่ค่อยซื่อสัตย์	ซื่อสัตย์พอใช้	ซื่อสัตย์มาก	ซื่อสัตย์มากที่สุด
6.2 สถานที่ตั้งโรงงาน	ในประเทศ	ในภูมิภาค	ไม่เกิน 100 กิโลเมตร	ไม่เกิน 50 กิโลเมตร	ไม่เกิน 10 กิโลเมตร

สายอากาศสองย่านความถี่แบบแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น

Dual-Band Double Circular Patch Antenna on Multilayer Substrate

เนติลักษณ์ พันธุ์จัน¹ กิตติมา เลิศศักดิ์วิมาน² ศุภกิต แก้วดวงตา³ พิชญ์ สุพรรณกุล¹ และ ชูวงศ์ พงศ์เจริญพานิชย์^{1,*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง ลาดกระบัง

กรุงเทพมหานคร 10520

²คณะเทคโนโลยีและการจัดการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปราชินบุรี

เนินหอม เมือง ปราชินบุรี 25230

³คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ ซ่างเพือก เมือง เชียงใหม่ 50300

Netilak Phanchin¹ Kittima Lertsakwimarn² Supakit Kawdungta³ Pichaya Supanakoon¹ and Chuwong

Phongcharoenpanich^{1,*}

¹School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Lat Krabang, Lat Krabang, Bangkok,

10520, Thailand

²Faculty of Industrial Technology and Management, King Mongkut's University of Technology North Bangkok,

Prachinburi Campus, Noen Hom, Muang, Prachinburi, 25230, Thailand

³Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chang Phueak, Muang,

Chiang Mai, 50300, Thailand

*Corresponding Author E-mail: chuwong.ph@kmitl.ac.th

Received: Dec 13, 2021; Revised: Feb 17, 2022; Accepted: Apr 12, 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอสายอากาศสองย่านความถี่สำหรับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในช่วงความถี่ 2.4–2.5 GHz และช่วงความถี่ 5.0–5.3 GHz ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอเป็นสายอากาศแพตช์ประกอบด้วย แผ่นแพร่กระจายคลื่นวงกลมจำนวน 2 แผ่น วางซ้อนกันอยู่ด้านบนและด้านล่างของวัสดุฐานรองหลายชั้น เชื่อมถึงกันด้วยเส้นลวดและมีการป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบ จากผลการออกแบบและทดสอบพบว่า สายอากาศที่นำเสนอมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50 Ω และมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 2.4–2.5 GHz และช่วงความถี่ 5.0–5.3 GHz มีอัตราการขยายเท่ากับ 1.90 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz และเท่ากับ 2.36 dBi ที่ความถี่ 5.2 GHz ทั้งนี้สายอากาศสามารถใช้งานกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายทั้งสองช่วงความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: สายอากาศสองย่านความถี่, วัสดุฐานรองหลายชั้น, สายอากาศแพตช์, เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

Abstract

This paper presents a dual-band antenna for a wireless local area network (WLAN) system with the frequency of 2.4–2.5 GHz and 5–6 GHz. The proposed antenna is a patch antenna consisting of two circular radiation plates. They are stacked above and below the multilayer substrate, connected by wire, and fed by the coaxial probe. From simulated and measured results, the proposed antenna has an input impedance close to 50 Ω and $|S_{11}|$ below -10 dB in a frequency of 2.4–2.5 GHz

and 5.0-5.3 GHz, the gain is 1.9 dBi at 2.45 GHz and 2.36 dBi at 5.2 GHz, respectively. The antenna can be effectively used in both frequency bands of wireless local area networks.

Keywords: Dual-band antenna, multilayer substrate, patch antenna and wireless local area network (WLAN).

1. บทนำ

จากความต้องการในการใช้งานเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายที่เพิ่มมากขึ้นจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายในหลากหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการรับส่งสัญญาณ การลดขนาดและเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์การสื่อสารและการเพิ่มช่วงความถี่ในการใช้งาน เป็นต้น

ในการเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานสำหรับเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายนี้เป็นการเพิ่มช่องทางการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายเพิ่มขึ้นเพื่อรองรับจำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) ซึ่งมีความนิยมใช้งานกันอย่างกว้างขวางจากเดิมมีการใช้งานในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz แต่ในปัจจุบันได้มีการขยายการใช้งานเพิ่มขึ้นในช่วงความถี่ 5-6 GHz ตามมาตรฐาน IEEE802.11 [1] จะเห็นได้ว่าการเพิ่มช่องสัญญาณดังกล่าวทำให้สามารถมีช่องทางการติดต่อสื่อสารสำหรับใช้งานมากยิ่งขึ้นและเป็นผลกระทบไปถึงการออกแบบและสร้างอุปกรณ์การสื่อสารให้สามารถรองรับช่วงความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้นด้วยยกตัวอย่างเช่น ตัวกระจายสัญญาณ (Access Point) ยี่ห้อ Cisco รุ่น Aironet 1140 ที่สามารถรองรับการกระจายสัญญาณสองช่วงความถี่ [2] ทั้ง 2.4-2.5 GHz และ 5-6 GHz เป็นต้น ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าสายอากาศเป็นส่วนสำคัญของการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย หากสายอากาศไม่สามารถที่จะรองรับหรือตอบสนองการใช้งานตามช่วงความถี่ได้ก็จะไม่สามารถที่จะทำการติดต่อสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงทำให้มีการศึกษาค้นคว้าในบทความทางวิชาการต่างๆ เกี่ยวกับการออกแบบสายอากาศสองย่านความถี่ที่สามารถรองรับการใช้งานช่วงความถี่ที่เพิ่มขึ้นมาได้ดังจะกล่าวต่อไปนี้ โดย A. H. Rambe และคณะ [3] ได้มีการนำเสนอการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีรายละเอียดน้อยด้วยการใช้วิธีการ

ป้อนสัญญาณที่ขอบข้างและการัดขอบของแผ่นแพร่กระจายสัญญาณซึ่งสายอากาศที่นำเสนอสามารถตอบสนองความถี่ 1.8 GHz และ 2.4 GHz ถัดมาได้มีการนำเสนอโครงสร้างเรโซเนเตอร์วงแหวนแยกเสริม (Complementary Split Ring Resonator: CSRR) วางไว้บนระนาบกราวด์และทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใหม่คือที่ความถี่ 3.54 GHz และ 6.72 GHz [4] และยังมีการใช้โครงสร้างการป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม (Coplanar Waveguide: CPW) และสายอากาศโมโนโพลหลายแผ่นทำให้สามารถได้การตอบสนองหลายช่วงความถี่และสามารถนำไปใช้งานได้กับระบบวายแมกซ์ (WiMax) และเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย [5] นอกจากนี้ยังมีการมุ่งเน้นที่จะนำเสนอการออกแบบสายอากาศสองย่านความถี่สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายอีกด้วยยกตัวอย่างเช่น มีการนำเสนอสายอากาศไมโครสตริปแบบเส้นคดเคี้ยวร่วมกับการปรับรูปร่างของระนาบกราวด์ [6] ทำให้สามารถตอบสนองช่วงความถี่ 2.4-2.48 GHz และ 5.15-5.35 GHz ได้ ในเอกสารอ้างอิงที่ [7] ได้มีการนำเสนอสายอากาศที่มีขนาดกะทัดรัดด้วยโครงสร้างช่องเปิดวงกลมและมีการป้อนสัญญาณด้วยวิธีการเชื่อมต่อผ่านวัสดุฐานรองและสายอากาศที่นำเสนอมีช่วงความถี่ 2.4-2.485 GHz และ 5.15-5.825 GHz

อีกทั้งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาสายอากาศสองย่านความถี่สำหรับช่วงความถี่ Sub-6 GHz เพิ่มขึ้นเช่นในเอกสารอ้างอิงที่ [8] ได้มีการนำเสนอสายอากาศสองย่านความถี่ที่สามารถตอบสนองช่วงความถี่ 3.28-3.71 GHz และ 4.8-5.18 GHz อีกทั้งยังมีโพลาริซสองแบบร่วมกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางด้วยอัตราขยายสูงถึง 8.34 dBi สายอากาศนี้ใช้เทคนิคโครงสร้างของสายอากาศแพตช์ (Patch antenna) ร่วมกับช่องเปิดด้วยการป้อนสัญญาณ 4 จุด และได้มีการใช้เทคนิคที่คล้ายกันในเอกสารอ้างอิงที่ [9] และในเอกสารอ้างอิงที่ [10] ยังได้มีการนำเสนอเทคนิคเรโซเนเตอร์แบบไดอิเล็กตริกในโครงสร้างของสายอากาศ

แพตช์ซึ่งสามารถทำให้สายอากาศทำงานได้สองย่านความถี่ คือ 3.35–3.62 GHz และ 4.99–5.15 GHz ด้วยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางด้วยอัตราขยายเท่ากับ 5.5 dBi และ 6.75 dBi ตามลำดับ

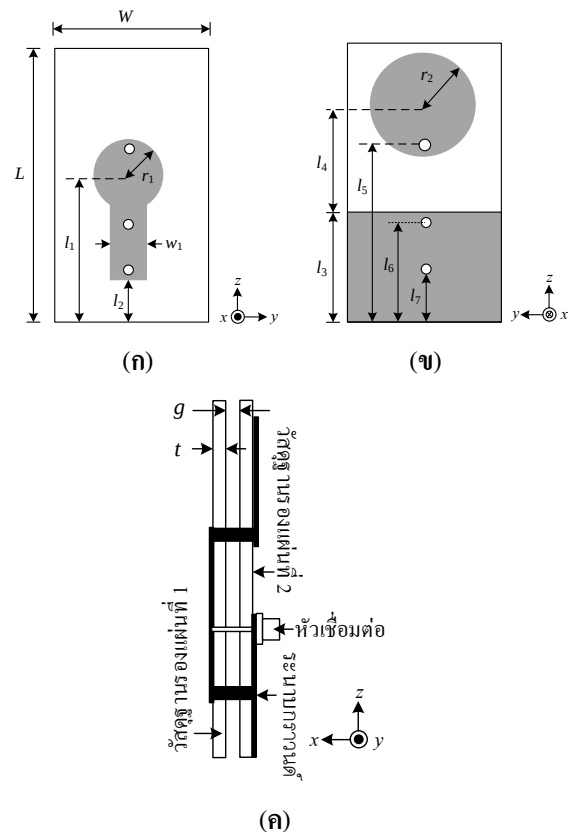
นอกจากมีการนำเสนอการออกแบบสายอากาศสองย่านความถี่ทั่วไปแล้ว ยังมีการนำเสนอสายอากาศสองย่านความถี่ที่มีขนาดเล็กด้วยเทคนิควิธีการลดขนาดโดยรวมของสายอากาศด้วยวิธีเส้นคดเคี้ยวและสายอากาศแบบเอพฟ์หัวกลับ (Planar Inverted-F Antenna : PIFA) [11],[12] และการใช้โครงสร้างวงแหวนกับเรโซเนเตอร์เพื่อการลดขนาด [13],[14]

จากบทความวิจัยที่ได้กล่าวผ่านมาแล้วนั้นจะเห็นได้ว่าสายอากาศสองย่านความถี่สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในช่วงความถี่ 2.4–2.5 GHz และ 5–6 GHz นั้นมีความจำเป็นอย่างมากและที่สำคัญตัวสายอากาศจะต้องมีขนาดเล็กกะทัดรัดอีกด้วย ดังนั้นบทความนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแพตช์วงกลมคู่วางตัวบนวัสดุฐานรองหลายชั้นเพื่อให้สายอากาศมีขนาดกะทัดรัดและสามารถตอบสนองได้สองย่านความถี่

2. โครงสร้างและส่วนประกอบของสายอากาศ

แพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น

สายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นได้ถูกนำเสนอในบทความนี้โดยมีลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยวัสดุฐานรอง 3 ชั้น คือ ชั้นที่ 1 และ 3 เป็นวัสดุฐานรองชนิด FR4 มีความหนา 1.6 mm และมีค่า ϵ_r เท่ากับ 4.3 และชั้นที่ 2 เป็นช่องว่างอากาศมีระยะห่างเท่ากับ 1.27 mm โดยแผ่นวงกลมที่ 1 กับสายนำสัญญาณแบบไมโคร สตรีปวางอยู่บนวัสดุฐานรองชั้นที่ 1 และแผ่นวงกลมที่ 2 กับระนาบกราวด์วางอยู่ด้านล่างของวัสดุฐานรองชั้นที่ 3 มีการป้อนสัญญาณด้วยโพรบและมีการเชื่อมต่อแผ่นวงกลมทั้งสองแผ่นผ่านวัสดุฐานรองทั้ง 3 ชั้นด้วยลวดตัวนำ อีกทั้งยังมีการใช้เทคนิคการลัดวงจรที่ปลายสายนำสัญญาณแบบไมโคร สตรีปไปยังระนาบกราวด์เพื่อให้สายอากาศมีขนาดกะทัดรัดดังแสดงรายละเอียดใน **รูปที่ 1** และค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นดังแสดงใน **ตารางที่ 1**



รูปที่ 1 สายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น
(ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น

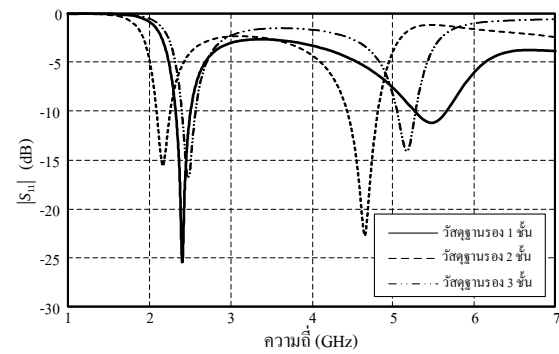
พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ขนาด (mm)
W	ความกว้างของสายอากาศ	20
L	ความยาวของสายอากาศ	30
w_1	ความกว้างของสายนำสัญญาณไมโคร สตรีป	5
l_1	ระยะของแผ่นวงกลมด้านหน้า	15.5
l_2	ระยะห่างของสายนำสัญญาณไมโคร สตรีป	5
l_3	ความยาวของระนาบกราวด์	11.5
l_4	ระยะของแผ่นวงกลมด้านหลัง	10.7
l_5	ระยะของจุดเชื่อมต่อระหว่างแผ่นวงกลม	17.5
l_6	ระยะของจุดป้อนสัญญาณ	10.55

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น (ต่อ)

พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ขนาด (mm)
l_7	ระยะของจุดตัดวงจร	6.5
r_1	รัศมีของแผ่นวงกลมด้านหน้า	6.4
r_2	รัศมีของแผ่นวงกลมด้านหลัง	11.6
g	ระยะห่างของวัสดุฐานรอง	1.27
t	ความหนาของวัสดุฐานรอง	1.6

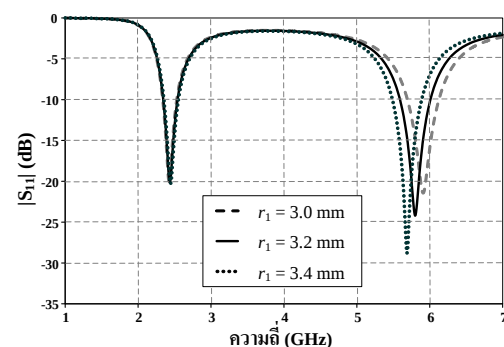
3. ผลการจำลอง

จากโครงสร้างของสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นดังแสดงในรูปที่ 1 ในการออกแบบสายอากาศที่น่าเสนอจะเริ่มจากการออกแบบสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองแบบ FR4 ชั้นเดียวที่มีความหนา 1.6 mm [15] ซึ่งเป็นความหนาของแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีจำหน่ายทั่วไปและมีการป้อนสัญญาณแบบโพรบ [16] พบว่าค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศสามารถที่จะตอบสนองความถี่ได้ดีในช่วงความถี่ 2.4-2.5 GHz แต่ในช่วงความถี่ 5-6 GHz ไม่สามารถที่จะตอบสนองได้ดีดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นทำการเพิ่มวัสดุฐานรองชั้นเดียวความหนา 1.6 mm เป็นวัสดุฐานรอง 2 ชั้นและมีความหนารวม 3.2 mm พบว่าผลตอบสนองทางความถี่สามารถที่จะตอบสนองสองย่านความถี่ได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับการมีวัสดุฐานรองชั้นเดียวแต่ยังมีช่วงกว้างความถี่แคบ จึงได้ทำการปรับปรุงด้วยการแยกวัสดุฐานรอง 2 ชั้นที่มีความหนา 3.2 mm ออกจากกันด้วยระยะห่าง g และพิจารณาให้วัสดุฐานรองแต่ละชั้นมีความหนาเท่ากับ 1.6 mm ก็จะกลายมาเป็นสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรอง 3 ชั้น จากผลของ $|S_{11}|$ พบว่า สายอากาศสามารถที่จะตอบสนองได้ดีในช่วงความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz จากผลที่ได้ในบทความนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทำการออกแบบสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นเพื่อให้สายอากาศสามารถตอบสนองได้ใน 2 ช่วงความถี่สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

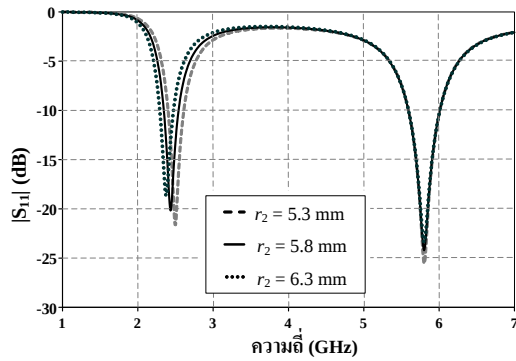


รูปที่ 2 ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นเมื่อทำการปรับเปลี่ยนวัสดุฐานรอง

จากนั้นได้ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศโดยจะทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญของสายอากาศคือ r_1 , r_2 และ l_7 จากผลการจำลองแสดงในรูปที่ 3 และ รูปที่ 4 แสดงการปรับค่าพารามิเตอร์ r_1 และ r_2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการปรับค่ารัศมี r_1 (แผ่นวงกลมเล็กด้านหน้า) จะทำให้เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงที่ช่วงความถี่ 5-6 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่สูง จึงสามารถที่จะยืนยันได้ว่าแผ่นวงกลมเล็กบนวัสดุฐานรองด้านบนจะให้การตอบสนองที่ช่วงความถี่สูง ถัดมาเมื่อทำการปรับค่ารัศมี r_2 (แผ่นวงกลมใหญ่ด้านล่าง) จะทำให้เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงที่ช่วงความถี่ 2-3 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าจึงสามารถที่จะยืนยันได้ว่าแผ่นวงกลมใหญ่บนวัสดุฐานรองด้านล่างจะให้การตอบสนองที่ช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า จากการศึกษาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ตัวนี้แล้ว สามารถที่จะใช้เป็นแนวทางในการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศที่น่าเสนอได้เพื่อให้สามารถที่จะทำให้ออกตอบสนองได้ทั้งสองย่านความถี่

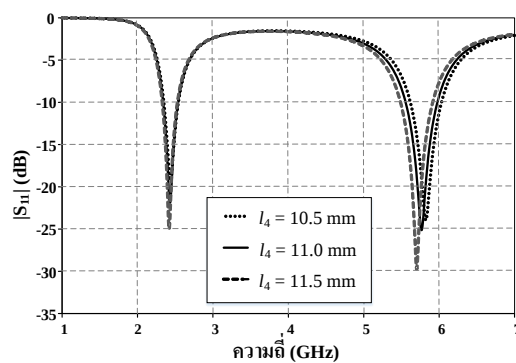


รูปที่ 3 ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพทช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นเมื่อทำการปรับเปลี่ยน ค่าพารามิเตอร์ r_1



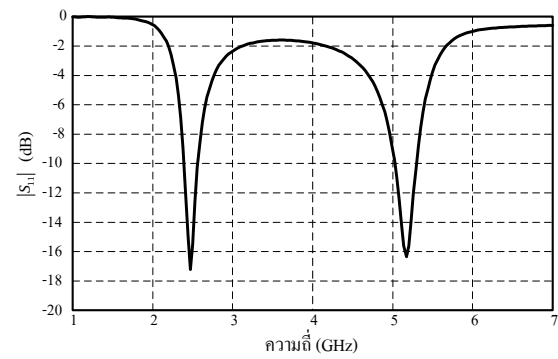
รูปที่ 4 ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพดซ์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ r_2

สุดท้ายในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ l_4 จากผลที่แสดงในรูปที่ 5 พบว่าสามารถทำให้ค่าเรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงได้ทั้งช่วงความถี่สูงและความถี่ต่ำควบคู่กันไป

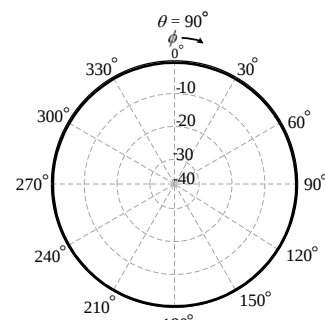


รูปที่ 5 ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพดซ์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ l_4

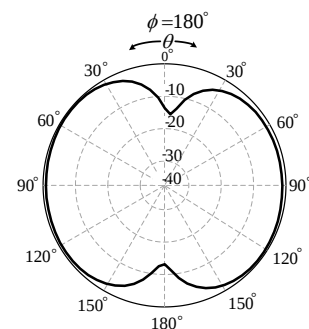
แต่อย่างไรก็ตามเมื่อได้แนวทางจากการศึกษา ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เรียบร้อยแล้วได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมอีกครั้ง ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแพดซ์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นดังแสดงในตารางที่ 1 และได้ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นดังแสดงในรูปที่ 6 และ รูปที่ 7 ตามลำดับ



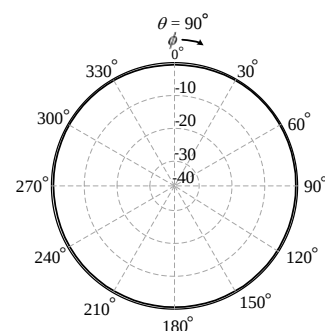
รูปที่ 6 ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพดซ์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น



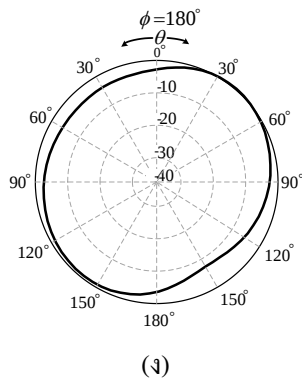
(ก)



(ข)

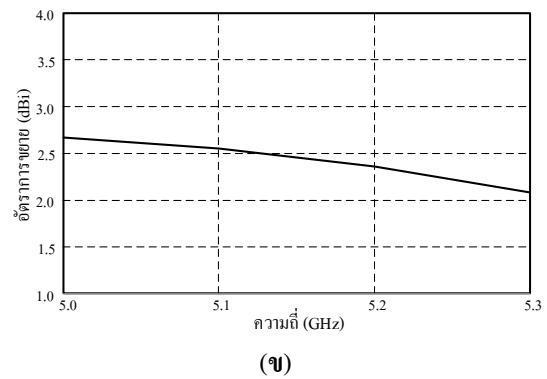
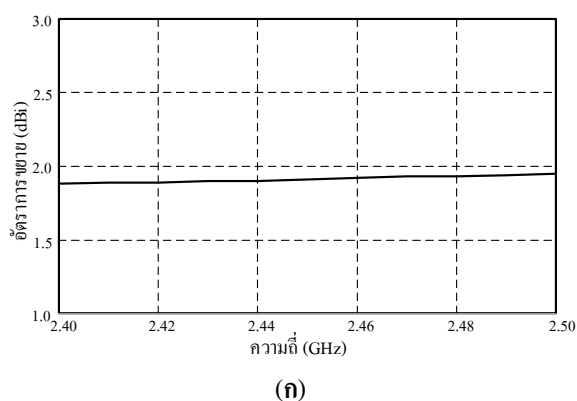


(ค)



รูปที่ 7 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของ
สายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น (ก)
ระนาบ xy (2.45 GHz) (ข) ระนาบ xz (2.45 GHz) (ค)
ระนาบ xy (5.2 GHz) (ง) ระนาบ xz (5.2 GHz)

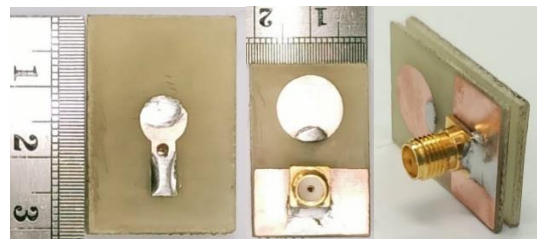
จาก**รูปที่ 6** ผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น พบว่าสามารถตอบสนองได้ 2 ช่วงความถี่คือ มีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ที่ช่วงความถี่ 2.38–2.57 GHz และช่วงความถี่ 5.0–5.3 GHz ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่รอบทิศทางด้วยอัตราการขยายเท่ากับ 1.90 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz ดังแสดงใน**รูปที่ 7(ก)–(ข)** ในส่วนของความถี่ 5.2 GHz ก็ยังคงมีลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบที่รอบทิศทางด้วยอัตราการขยายเท่ากับ 2.36 dBi ดังแสดงใน**รูปที่ 7(ค)–(ง)** จากนั้นมาพิจารณาอัตราการขยายตลอดช่วงความถี่สำหรับช่วงความถี่ 2.38–2.57 GHz และ 5.0–5.3 GHz พบว่ามีอัตราการขยายที่ใกล้เคียงกันตลอดย่านความถี่ ดังแสดงใน**รูปที่ 8** จากนั้นจะนำค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นที่ได้ไปสร้างและทดสอบในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 8 อัตราการขยายของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บน
วัสดุฐานรองหลายชั้น (ก) ช่วงความถี่ 2.4–2.5 GHz
(ข) ช่วงความถี่ 5.0–5.3 GHz

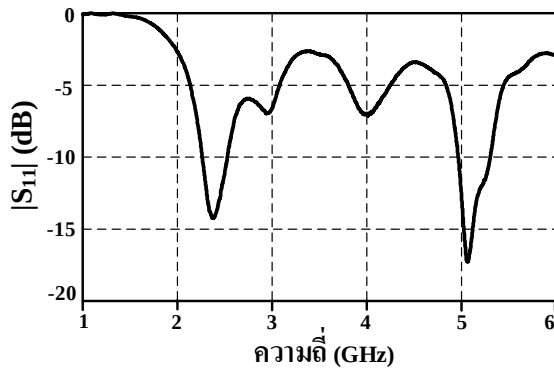
4. ผลการทดสอบ

ในหัวข้อนี้เป็นการนำผลที่ได้จากการจำลองมาสร้างสายอากาศต้นแบบและทำการทดสอบคุณสมบัติ โดยสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นที่ได้ทำการออกแบบถูกสร้างขึ้นดังแสดงใน**รูปที่ 9** โดยถูกสร้างจากแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ที่มีความหนา 1.6 mm และมีค่า ϵ_r เท่ากับ 4.3 จำนวน 2 แผ่น แผ่นแรกถูกใช้เป็นแผ่นวัสดุฐานรองชั้นบนแผ่นที่ 1 ด้านบนถูกกัดเป็นรูปวงกลมขนาดเล็กที่มีการป้อนสัญญาณเข้าด้วยสายนำสัญญาณไมโครสตริป ร่วมกับการป้อนสัญญาณแบบโพรบและวัสดุฐานรองแผ่นที่สอง ด้านหลังถูกกัดให้เป็นแผ่นวงกลมขนาดใหญ่และระนาบกราวด์ เมื่อนำทั้งสองแผ่นมาเชื่อมต่อกันด้วยลวดตัวนำและเว้นระยะห่างเป็นช่องว่างอากาศก็จะได้เป็นสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรอง 3 ชั้น คือชั้นที่ 1 เป็น FR4 ชั้นที่ 2 เป็นอากาศ และ ชั้นที่ 3 เป็น FR4 จากนั้นจึงนำสายอากาศต้นแบบนี้ไปทดสอบค่า $|S_{11}|$ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย



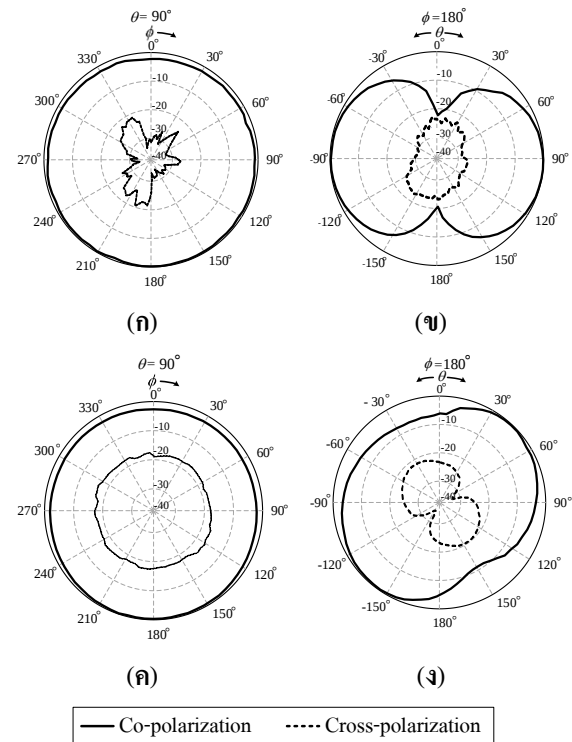
รูปที่ 9 ต้นแบบสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรอง
หลายชั้น

จากผลการทดสอบค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศไมโคร สตรีปวงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นต้นแบบได้ผลการ ทดสอบดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่าสายอากาศต้นแบบ สามารถที่จะเรโซแนนซ์ในช่วงความถี่ 2.26–2.53 GHz และ ที่ช่วงความถี่ 4.97–5.30 GHz



รูปที่ 10 ผลการทดสอบค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศไมโคร สตรีปวงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น

รูปที่ 11 แสดงผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจาย คลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5.2 GHz ในระนาบ xy และ ระนาบ xz พบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ กึ่งรอบทิศทางทั้งสองความถี่ แต่อย่างไรก็ตาม ที่ความถี่ 5.2 GHz แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีลักษณะเอียงไป จากมุมหลักประมาณ 45 องศา และมีอัตราการขยาย เท่ากับ 1.80 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz และเท่ากับ 2.21 dBi ที่ความถี่ 5.2 GHz ตามลำดับ ทั้งนี้ได้แสดงแบบรูปการ แพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้ (Cross-polarization) เปรียบเทียบกับ โดยการใช้สายอากาศส่งเป็นแบบ โพลาไรซ์เชิงเส้นและสายอากาศรับเป็นสายอากาศ ต้นแบบที่นำเสนอแล้วทำการทดสอบแบบรูปการ แพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้ของสายอากาศ ต้นแบบแสดงในรูปที่ 11 พบว่า สายอากาศต้นแบบมีค่า โพลาไรซ์ไขว้ค่อนข้างต่ำและยังแสดงให้เห็นว่า สายอากาศที่นำเสนอมีโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น



รูปที่ 11 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของ สายอากาศแพตช์วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้น (ก) ระนาบ xy (2.45 GHz) (ข) ระนาบ xz (2.45 GHz) (ค) ระนาบ xy (5.2 GHz) (ง) ระนาบ xz (5.2 GHz)

จากผลการออกแบบของสายอากาศแพตช์วงกลมคู่บน วัสดุฐานรองหลายชั้นที่ได้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ สายอากาศสองย่านความถี่ที่มีการนำเสนอในบทความทาง วิชาการต่างๆ พบว่ามีจุดเด่นคือ มีขนาดโครงสร้างเล็ก กะทัดรัด สามารถตอบสนองได้สองย่านความถี่ด้วยแบบ รูปการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทางดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศที่ นำเสนอกับสายอากาศสองย่านความถี่ที่มีมาก่อน

สายอากาศ	ช่วงความถี่	อัตราการขยาย	ขนาด (mm ²)
[6]	2.4–2.48 GHz และ 5.15–5.35 GHz	5.3 dBi (2.45 GHz) และ 3.7 dBi (5.25 GHz)	31 × 7.5

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศที่นำเสนอกับสายอากาศสองย่านความถี่ที่มีมาก่อน(ต่อ)

สายอากาศ	ช่วงความถี่	อัตราขยาย	ขนาด (mm ²)
[7]	2.4–2.485 GHz และ 5.15–5.825 GHz	3.2 dBi (2.45 GHz) และ 5.5 dBi (5.5 GHz)	40 × 40
[8]	3.28–3.71 GHz และ 4.8–5.18 GHz	8.34 dBi (3.5 GHz) และ 8.7 dBi (4.9 GHz)	42 × 42
[9]	3.4–3.6 GHz และ 4.8–5 GHz	5 dBi (3.5 GHz) และ 5.5 dBi (4.9 GHz)	-
[10]	3.35–3.62 GHz และ 4.99–5.15 GHz	5.5 dBi (3.5 GHz) และ 6.75 dBi (5 GHz)	-
สายอากาศที่นำเสนอ	2.26–2.53 GHz และ 4.97–5.30 GHz	1.8 dBi (2.45 GHz) และ 2.21 dBi (5.2 GHz)	20 × 30

5. สรุป

จากการออกแบบและสร้างสายอากาศแพดช่วงกลมคู่บนวัสดุฐานรองหลายชั้นที่สามารถตอบสนองสองย่านความถี่สำหรับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (IEEE 802.11ac) ในช่วงความถี่ 2.4–2.5 GHz และช่วงความถี่ 5.0–5.3 GHz พบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยแผ่นแพร่กระจายคลื่นวงกลมจำนวน 2 แผ่น วางซ้อนกันอยู่ด้านบนและด้านล่างวัสดุฐานรองหลายชั้นเชื่อมถึงกันด้วยเส้นลวดและมีการป้อนสัญญาณแบบโคแอกเซียลโพรบ จากผลการจำลองและทดสอบพบว่า สายอากาศที่นำเสนอมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50Ω และมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 2.26–2.53 GHz และในช่วงความถี่ 4.97–5.30 GHz มีอัตราขยายเท่ากับ 1.80 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz และเท่ากับ 2.21 dBi ที่ความถี่ 5.2 GHz และมีค่าโพลาไรซ์ไขว้ต่ำ

ทั้งนี้สายอากาศสามารถใช้งานกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายทั้งสองช่วงความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Banerji and R. S. Chowdhury, "On IEEE 802.11: Wireless LAN Technology," *International Journal of Mobile Network Communications & Telematics (IJMNCT)*, vol. 3, no. 4, pp. 1–20, 2013, doi: 10.48550/arXiv.1307.2661.
- [2] Cisco Aironet 1140 Series Access Point, Cisco Public Information, 2010. [Online]. https://www.cisco.com/c/dam/global/ko_kr/assets/pdf/Cisco_Aironet1140_Series_Access_Point.pdf.
- [3] A. H. Rambe and K. Abdillah, "A Low Profile Rectangular Patch Microstrip Antenna for Dualband Operation of Wireless Communication System," in *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2018, pp. 1–6, doi: 10.1088/1757-899X/309/1/012046.
- [4] H. Yao, X. Liu, H. Zhu, H. Li, G. Dong and K. Bi, "Dual-Band Microstrip Antenna Based on Polarization Conversion Metasurface Structure," *Frontiers in Physics*, vol. 8, pp. 1–6, 2020, doi: 10.3389/fphy.2020.00279.
- [5] A. Z. Manouare, S. Ibnyaich, A. E. Idrissi A. Ghammaz and N. A. Touhami, "A Compact Dual-Band CPW-Fed Planar Monopole Antenna for 2.62–2.73 GHz Frequency Band, WiMAX and WLAN Applications," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 16, no. 2, pp. 567–576, 2017.
- [6] A. Khaleghi, "Dual Band Meander Line Antenna for Wireless LAN Communication," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 3, pp. 1004–1009, 2007, doi: 10.1109/TAP.2007.891873.
- [7] W. Ren, "Compact Dual-Band Slot Antenna for 2.4/5 GHz WLAN Applications," *Progress In*

- Electromagnetics Research B*, vol. 8, pp. 319–327, 2008, doi: 10.2528/PIERB08071406.
- [8] Y. Li, Z. Zhao, Z. Tang and Y. Yin, “Differentially Fed, Dual-Band Dual-Polarized Filtering Antenna with High Selectivity for 5G Sub-6 GHz Base Station Applications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 4, pp. 3231–3236, 2020, doi: 10.1109/TAP.2019.2957720.
- [9] Y. Y. Liu, X. Y. Zhang and S. J. Yang, “Compact Dual-Band Dual-Polarized Filtering Antenna for 5G Base Station Applications,” presented at 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Osaka, Japan, Jan 25–28, 2021, doi: 10.23919/ISAP47053.2021.9391214.
- [10] C. Wang, Z. Han, H. Liu, X. Zhang and L. Wang, “A Dual-band Filtering Dielectric Resonator Antenna,” in 2020 9th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Xiamen, China, Aug. 4–7, 2020, doi: 10.1109/APCAP50217.2020.9246127.
- [11] M. Abioghli, “Miniaturized Dual-Band Antenna for 2.4/5.8GHz WLAN Operation in the Notebook Computer,” *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 5, no. 12, pp. 1636–1640, 2011.
- [12] M. Md. Shukor, M. Z. A. Abd. Aziz, B. H. Ahmad, M. K. Suaidi and M. A. Othman, “Design of Dual Band Antenna for WLAN Application,” *Jurnal Teknologi(Sciences & Engineering)*, vol. 67, no. 3, pp. 71–77, 2014, doi: 10.11113/jt.v67.2767.
- [13] S. C. Basaran, “Compact Dual-Band Split-Ring Antenna for 2.4/5.2 GHz WLAN Applications,” *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 20, no. 3, pp. 347–352, 2012, doi: 10.3906/elk-1003-9.
- [14] U. Deepaka, T. K. Roshnaa and P. Mohanan, “A Dual Band SIR Coupled Dipole Antenna for 2.4/5.2/5.8 GHz Applications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 4, pp. 1514–1520, 2015, doi: 10.1109/TAP.2015.2393876.
- [15] 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.
- [16] C. A. Balanis, “Microstrip Antennas,” in *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2005, ch. 14, sec. 14.1.2, pp. 813–815.

การประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์โดย เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงและไฟฟ้าสถิต

Evaluation of the Particle Filtration Efficiency of Surgical Masks by Electrostatic and Light Scattering Particle Counters

พานิช อินตะ* วิสูตร อาสนวิจิตร และ วิสาขณ์ภัสร์ รัตนจันทร์

หน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ป่าป้อง ดอยสะเก็ด เชียงใหม่ 50220

Panich Intra* Visut Asanavijit and Wisanapat Rattanachan

Research 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@rmutl.ac.th

Received: Jan 28, 2022; Revised: Mar 08, 2022; Accepted: Apr 19, 2022

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนับจำนวนอนุภาคของเครื่องแบบกระเจิงแสงและแบบไฟฟ้าสถิต สำหรับใช้ประเมินประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกตัวอย่างหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ผ่านการรับรองจาก ออย. สำหรับนำมาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคตามมาตรฐาน ASTM F2299-03 กับอนุภาคทรงกลมชนิดพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 μm ที่ความเร็วด้านหน้าเท่ากับ 10.6 cm/s พื้นที่ทดสอบเท่ากับ 17.8 cm^2 ทำการวัดความเข้มข้นเชิงจำนวนก่อนและหลังผ่านหน้ากากตัวอย่างด้วยเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงและไฟฟ้าสถิตเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของทั้ง 2 เครื่อง จากผลการทดลองพบว่าค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของทั้ง 2 เครื่องอยู่ในช่วงค่า 95.38–98.61% โดยความแตกต่างของค่าความผิดพลาดร้อยละเล็กน้อยของประสิทธิภาพในการกรองอนุภากระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงและไฟฟ้าสถิตเท่ากับ 0.99, 2.03, 1.84 และ 1.79 สำหรับอนุภาคนขนาด 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 μm ตามลำดับ ผลจากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตสามารถใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคได้เทียบเคียงกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงตามที่มาตรฐาน ASTM F2299-03 กำหนดไว้

คำสำคัญ: โควิด19, หน้ากากอนามัย, เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง, เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต

Abstract

The goal of this study was to use light scattering and electrostatic particle counters to evaluate the particle filtration efficiency of surgical masks. Samples of surgical masks that have been approved by the FDA were chosen for testing in this study. Particle filtration efficiency was measured using polystyrene latex spherical particles with diameters of 0.1, 0.5, 1.0, and 1.5 μm at a face velocity of 10.6 cm/s and a test area of 17.8 cm^2 according to the ASTM F2299-03 standard. The

light scattering and electrostatic particle counters were used to measure the upstream and downstream particle number concentrations of the test mask in order to evaluate the measured particle filtration efficiency of both counters. The particle filtration efficiency of the two counters was found to be similar based on the experimental results. It was shown that the particle filtration efficiency that obtained from both counters were in the range of 95.38–98.61%, the difference in the mean absolute percentage error of the particle filtration efficiency between the light scattering and electrostatic particle counts was about 0.99, 2.03, 1.84 and 1.79 for particles 0.1, 0.5, 1.0, and 1.5 μm , respectively. The results of the comparison suggest that electrostatic particle counters may be used to measure particle filtration efficiency in a way that is comparable to the ASTM F2299-03 standard for light scattering particle counters.

Keyword: COVID19, Surgical Mask, Light scattering particle counters, Electrostatic particle counters

1. บทนำ

การแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ไปทั่วทุกภูมิภาคของโลกทำให้ยอดผู้ติดเชื้อสะสมสูงหลายล้านคน ทำให้หน้ากากอนามัยประเภทใช้ครั้งเดียว (Disposable surgical masks) หน้ากากผ้า (Fabric masks) และหน้ากาก N95 (N95 masks) มีความต้องการสูงเพื่อใช้ในการป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโควิด-19 จากละอองฝอยหรือสารคัดหลั่งจากการไอจามและการดักจับละอองของเหลวและละอองลอยแบคทีเรียจากปากและจมูก [1],[2] โดยในช่วงโควิด-19 ระบาดในประเทศไทยทั้ง 4 รอบเกิดปัญหาการขาดแคลนอุปกรณ์ทางการแพทย์โดยเฉพาะหน้ากากอนามัยประเภทใช้ครั้งเดียว หน้ากากผ้าและหน้ากาก N95 จากปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบในการผลิตหน้ากากดังกล่าว ได้มีงานวิจัยที่แนะนำเกี่ยวกับวัสดุป้องกันระบบทางเดินหายใจเพื่อเป็นทางเลือกในการใช้ในช่วงที่หน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ขาดแคลน [3–10] และยังมีนำเข้าหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 จากต่างประเทศมาจำหน่ายในประเทศ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ได้ออกมาตรฐาน มอก. 2424–2562 หน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียวและ มอก. 2480–2563 หน้ากาก N95 ลดความเสี่ยงการติดเชื้อทางการแพทย์ขึ้นเพื่อกำหนดมาตรฐานและคุณภาพให้กับหน้ากากอนามัยที่จำหน่ายในท้องตลาด โดยหน้ากากที่จำหน่ายจะต้องผ่าน มอก. นี้ จากความต้องการหน้ากากอนามัย หน้ากากผ้าและหน้ากาก N95 เพิ่มขึ้น จึงเกิดโรงงานผลิตหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ขึ้นใน

ประเทศมากกว่า 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 สามารถกำหนดอนุภาคโพทิสไตรีนลาเท็กซ์, 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 ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการ

กรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยแบบอัดโนมิตตามมาตรฐาน ASTM F2299-03 และ 42 CFR 84 สามารถกักกั้นอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์, NaCl, Emery Oil, DEHS สามารถวัดประสิทธิภาพการกรองได้สูงสุด 99.999% ราคาประมาณ 8 ล้านบาท [12] Automatically Particular Filtration Efficiency Tester รุ่น G506 บริษัท QINSUN/STANDARD ประเทศจีน เป็นเครื่องที่ทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากาก N95 แบบอัดโนมิตตามมาตรฐาน 42 CFR 84 สามารถกักกั้นอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์, 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 แบบอัดโนมิต จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาต้นแบบ และจัดหาเครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ ที่มีอยู่ภายในประเทศให้ได้ต้นแบบที่สามารถทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคได้ทั้งหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ได้ตามมาตรฐาน มอก. 2424–2562 และ มอก. 2480–2562 สามารถลดการนำเข้าจากต่างประเทศได้ในรายละเอียดการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขนาด 0.1 μm ตามหัวข้อที่ 4.6 รายการที่ 3 ของ มอก. 2424–2562 ได้อ้างอิงมาตรฐาน ASTM F2100 [14] ซึ่งเป็นการกำหนดมาตรฐานสำหรับประสิทธิภาพของวัสดุที่ใช้ในหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่กำหนดโดยสมาคมการทดสอบและวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials) [15] และในมาตรฐาน ASTM F2100 ได้มีการอ้างมาตรฐาน ASTM F2299-03 [16] วิธีทดสอบมาตรฐานสำหรับการหาประสิทธิภาพการกรองและการทะลุผ่านของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์โดยการใช้ออนุภาคทรงกลมชนิดโพลิสไตรีน ลาเท็กซ์ (Polystyrene Latex, PSL) รายละเอียดในมาตรฐาน ASTM F2299-03 ได้กำหนดให้ทดสอบกับอนุภาคทรงกลมชนิดโพลิสไตรีน ลาเท็กซ์ แบบ

ขนาดเดี่ยว (Monodispersed aerosol) ขนาดอนุภาคที่ทดสอบอยู่ในช่วง 0.1–5 μm ที่ความเร็วด้านหน้าทดสอบได้ในช่วง 0.5–25 cm/s โดยใช้เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง (Light scattering particle counter) เป็นตัวนับจำนวนอนุภาคมอก. 2480–2562 เป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหน้ากากใช้ครั้งเดียวชนิด N95 ลดความเสี่ยงการติดเชื้อทางการแพทย์ ในการทดสอบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคตามหัวข้อที่ 4.3 รายการที่ 1 ของ มอก. 2424–2562 ได้อ้างอิงมาตรฐาน 42 CFR 84 (ข้อ 84.181) ของสถาบันอาชีวอนามัยและความปลอดภัยของประเทศสหรัฐอเมริกา (National Institute for Occupational Safety & Health, NIOSH) [16] รายละเอียดการทดสอบหน้ากาก N95 ตามมาตรฐาน 42 CFR 84 (ข้อ 84.181) นี้กำหนดอัตราการไหลอากาศในการทดสอบที่อัตราการทำงานสูงของมนุษย์คือ 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% สำหรับเครื่องนับจำนวนอนุภาคในมาตรฐาน 42 CFR 84 ได้กำหนดให้เป็นตัวนับจำนวนอนุภาคแบบโฟโตมิเตอร์กระเจิงแสง (Light scattering photometer) หรือเครื่องมือแบบเทียบเคียง (Equivalent instrumentations) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเครื่องนับจำนวนอนุภาคเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ของมาตรฐานทั้ง 2 โดยได้กำหนดให้ตัวนับจำนวนอนุภาคเป็นแบบกระเจิงแสงหรือเทียบเคียง แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงสำหรับนับจำนวนอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 0.1 หรือ 0.3 μm ที่จำหน่ายในท้องตลาดปัจจุบันยังมีราคาสูงในหลักหลายแสนถึงล้านบาท ดังนั้นการใช้เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตจึงเป็นเครื่องมือทางเลือกในการใช้เป็นเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบเทียบเคียงตามมาตรฐาน ASTM F2299-03 และ 42 CFR 84 ได้ เนื่องจากเป็นเครื่องนับจำนวนอนุภาคที่สามารถนับ

จำนวนอนุภาคได้เทียบเคียงกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง โดย Intra et al. [17–20] ได้รายงานประสิทธิภาพการนับอนุภาคของเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตว่าอยู่ที่ประมาณ 99.60 ถึง 100 % และ 99.55 ถึง 100 % สำหรับอนุภาค DEHS และ NaCl ในช่วงเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 50 ถึง 500 nm ตามลำดับ และหลักการวัดอนุภาคหรือฝุ่นละอองลอยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ได้ออกเป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) มอก. 3030-2563 เครื่องตรวจวัดฝุ่นละอองลอยหลักการไฟฟ้าสถิตโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเพื่อกำหนดเป็นมาตรฐานเครื่องวัดฝุ่นละอองลอย PM1.0, PM2.5 และ PM10 ขึ้นในประเทศไทย อีกทั้งเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตนี้ยังสามารถพัฒนาและสร้างขึ้นเองได้ภายในประเทศทำให้มีราคาถูกกว่าเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงจึงทำให้ต้นทุนของเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 แบบอัตโนมัติมีราคาถูกกว่าเครื่องนำเข้าจากต่างประเทศ

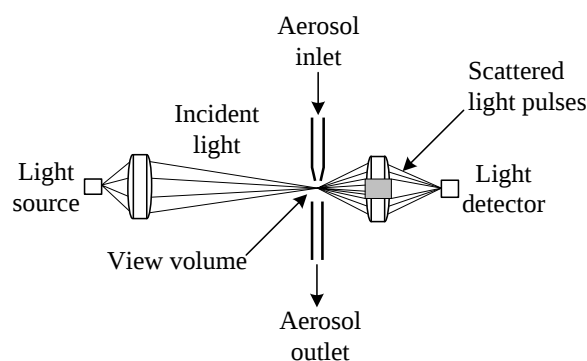
ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนับจำนวนอนุภาคของเครื่องแบบกระเจิงแสงและแบบไฟฟ้าสถิต สำหรับใช้ประเมินประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ โดยเลือกตัวอย่างหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ผ่านการ

รับรองจาก อย. สำหรับนำมาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคตามมาตรฐาน ASTM F2299-03 กับอนุภาคทรงกลมชนิดพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 μm ที่ความเร็วด้านหน้าเท่ากับ 10.6 cm/s กับพื้นที่ทดสอบเท่า 17.8 cm^2 โดยข้อมูลผลการศึกษาในบทความวิจัยนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขึ้นในประเทศให้ทันต่อความต้องการเครื่องทดสอบตัวกรองอนุภาค ในการศึกษาวิจัยทางประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ช่วงโควิด-19 ระบาดในประเทศไทย

2. หลักการเครื่องนับจำนวนอนุภาค

2.1. เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง

เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการกระเจิงแสง (Scattered light) มีความไวในการวัดมากสำหรับการวัดความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่า 1 μm ไปจนถึง 20 μm ลักษณะโครงสร้างและการทำงานแสดงไว้ในรูปที่ 1 โดยการผลิตสัญญาณแสงรังสีหักเหที่ตรวจจับได้จากเคลื่อนที่ของอนุภาคตัด



รูปที่ 1 Principle of the light scattering particle counting

ผ่านแสงเพื่อนำไปแปลงค่าเป็นจำนวนของอนุภาค หลักการกระเจิงแสงมีข้อดีคือมีการรบกวนจากการไหลของอนุภาคน้อยมากและให้ข้อมูลการวัดทันทีซึ่งเหมาะสำหรับการวัดอย่างต่อเนื่อง ข้อเสียของหลักการกระเจิง

แสงนี้คือการกระเจิงแสงอาจมีความไวในการเปลี่ยนแปลงน้อยของดัชนีการหักเห (Refractive index) เมื่อมุมการกระจัดกระจายแสง [21] ขนาดอนุภาคหรือรูปร่างอนุภาคเปลี่ยนแปลงไปทำให้ข้อมูลที่ได้อาจมีความไม่ชัดเจนหรือผล

การวัดที่ไม่ถูกต้อง หลักการกระเจิงแสงจะมีความแตกต่างจากกล้องจุลทรรศน์คือไม่มีความจำเป็นที่ต้องทำการถ่ายภาพของอนุภาคและหลักการนี้สามารถวัดขนาดอนุภาคได้ตั้งแต่ $0.03\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$ ที่ความเข้มข้นจำนวนถึง $10^5\text{ particles/cm}^3$ ด้วยเวลาการตอบสนองเป็น 1 วินาที โดยความเข้มข้นจำนวนของอนุภาค N_p สามารถคำนวณได้จาก [22]

$$N_p = \frac{n}{Qt} \quad (1)$$

เมื่อ n คือจำนวนอนุภาคที่นับได้ทั้งหมด (Total particle count) Q คืออัตราการไหลของอนุภาคและ t คือเวลาในการนับจำนวนอนุภาค

2.2. เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต

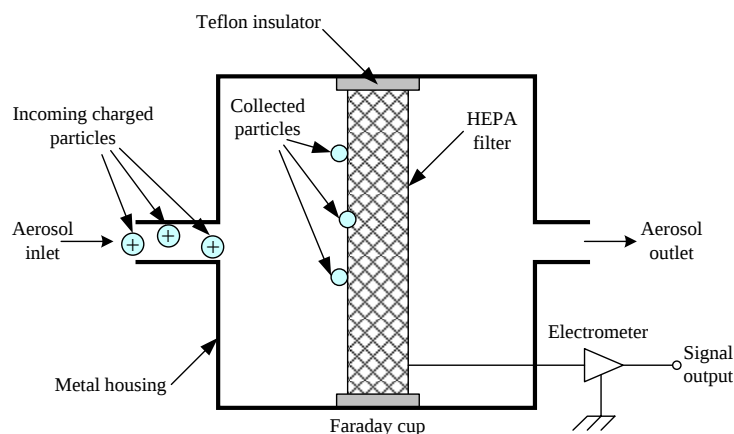
เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตที่ใช้ลูกถ้วยฟาราเดย์ (Faraday cup) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการวัดประจุอนุภาค รูปที่ 2 แสดงลักษณะโครงสร้างของลูกถ้วยฟาราเดย์ ภายในลูกถ้วยฟาราเดย์ประกอบด้วย ตัวกรองอากาศปลอดอนุภาคประสิทธิภาพสูง (High efficiency particulate-free air filter) หรือ ที่เรียกว่าตัวกรองอากาศ HEPA ที่วางอยู่ภายในที่ยึดตัวกรอง (Filter holder) ที่ทำ

จากโลหะตัวนำไฟฟ้าบรรจุอยู่ภายในลูกถ้วยโลหะตัวนำไฟฟ้า โดยที่ยึดตัวกรองจะถูกแยกออกจากกันทางไฟฟ้าจากลูกถ้วยด้วยฉนวนไฟฟ้าอย่างดี โดยทั่วไปนิยมใช้เทฟลอน (Teflon) ซึ่งเทฟลอนเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีและมีผลของเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) น้อย สำหรับตัวเชื่อมต่อสัญญาณรบกวนต่ำ (Low-noise connector) จะใช้ในการเชื่อมต่อเข้ากับที่ยึดตัวกรองอนุภาคเพื่อส่งถ่ายประจุอนุภาคหรือไอออนที่สะสมบน ตัวกรองไปยังมิเตอร์กระแสต่ำที่สุดหรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ปกติแล้วค่าสัญญาณกระแสประจุอนุภาคที่วัดได้จะอยู่ในช่วง $0\text{--}10\text{ pA}$ โดยค่าสัญญาณกระแสประจุของอนุภาค I_p จะเป็นฟังก์ชันของค่าความหนาแน่นประจุค้าง (Space-charge density) ρ อัตราการไหลอนุภาค Q_a ผ่านตัวกรองอนุภาคดังสมการคือ [21]

$$I_p = \rho Q_a \quad (2)$$

เมื่อ

$$\rho = n_p e N_p \quad (3)$$



รูปที่ 2 Principle of the electrostatic particle counting

n_p คือจำนวนประจุของอนุภาค e คือประจุพื้นฐานของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $1.61 \times 10^{-19}\text{ C}$ และ N_p คือค่าความเข้มข้นจำนวนของอนุภาค โดยกระแสประจุอนุภาคที่วัดได้จะถูกแปลงผันไปเป็นความเข้มข้นจำนวนของ

อนุภาค N_p สำหรับอนุภาคที่แพร่กระจายแบบเดี่ยว (Monodisperse aerosol) ดังสมการต่อไปนี้ [21]

$$N_p = \frac{I_p}{g(n_p, d_p) n_p e Q_a} \quad (4)$$

เมื่อ $g(n, d_p)$ คือความน่าจะเป็น (Probability) ของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p ที่ได้รับประจุ n_p และสำหรับในกรณีของอนุภาคที่แพร่กระจายแบบหลากหลาย (polydisperse aerosol) สมการความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคในสมการที่ 4 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้ [21]

$$N_p(d_p) = \sum_{i=1}^M \frac{I_p}{g(n_{pi}(d_{pi}), d_{pi}) n_{pi}(d_{pi}) e Q_a} \Delta d_{pi} \quad (5)$$

เมื่อ M คือจำนวนของช่องขนาดอนุภาค d_{pi} คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ยใน i ของช่องขนาดและ Δd_{pi} คือความกว้างของช่องขนาดอนุภาค i ดังสมการที่ 4 และ 5 การวัดด้วยวิธีนี้จะสมมติให้ตัวกรองอนุภาคสามารถกรองอนุภาคแขวนลอยทั้งหมดที่ผ่านมากับอากาศตัวอย่างซึ่งประสิทธิภาพของตัวกรองอนุภาค HEPA จะมีประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคและไอออนได้ประมาณ 99.97 % แต่ข้อเสียของวิธีการนี้ก็คือการเกิดความดันตกระหว่างตัวกรองอนุภาคซึ่งจำเป็นต้องให้มีอัตราการไหลอากาศตัวอย่างที่สูงพอ

2.3. การพัฒนาปรับปรุงเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบ

ไฟฟ้าสถิตของ Intra et al. [17–21]

ในปัจจุบันเครื่องนับจำนวนอนุภาคทั้งสองหลักการได้มีวิวิจยและพัฒนาเพื่อการใช้งานอย่างกว้างขวางในระดับการวิจัยและระดับเชิงพาณิชย์ เช่น เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบการควบแน่น (Condensation Particle Counter, CPC) [23] โดยทั่วไปถูกใช้ป็นเครื่องมือสำหรับการวัดความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาครวมทั้งหมดโดยไม่คำนึงถึงขนาดอนุภาค ดังนั้นมันจึงไม่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับขนาดอนุภาค ขณะที่อนุภาคตัวอย่างเข้าไปใน CPC จะมีการเปลี่ยนสัญญาณเป็น ความร้อนจ่ายให้กับอ่างแอลกอฮอล์จนทำให้แอลกอฮอล์กลายเป็นไอลอยผ่านขึ้นไปยังท่อควบแน่น ไอระเหยแอลกอฮอล์จะเกาะตัวลงบนอนุภาคและควบแน่นเป็นหยดอิมัลชันที่มีขนาดประมาณ 12 ไมโครเมตร หยดของอนุภาคที่มีแอลกอฮอล์ควบแน่นอยู่จะถูกส่งให้เคลื่อนที่ผ่านลำแสงเลเซอร์ และใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการกระจายของแสงเพื่อนำไปแปลงค่าเป็นจำนวนของอนุภาคต่อไป ตัวอย่าง CPC ที่นิยมมากคือ

โมเดล TSI 3025A สามารถ ตรวจสอบอนุภาคได้เล็กถึง 3 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นจำนวนถึง 10^5 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยเวลาการตอบสนองเป็น 1 วินาที และ โมเดล 3022A สามารถวัดอนุภาคได้เล็กถึง 7 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นจำนวนถึง 10^7 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยเวลาการตอบสนอง 12 วินาที

Electrical Aerosol Detector หรือ EAD [24] เป็นเครื่องนับจำนวนอนุภาคที่อาศัยการอัดประจุอนุภาคแบบแพร่และการตรวจหาละอองลอยผ่านวงจรีเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวสูง โดยละอองลอยเข้าไปในเครื่องตรวจหาด้วยอัตราการไหล 2.5 L/min การไหลจะถูกแยกผ่านไปยังตัวกรองและตัวสร้างไอออน (Ionizer) 1 L/min และละอองลอย 1.5 L/min และการไหลทั้งหมดจะถูกรวมกันใหม่ในห้องการผสม (Mixing chamber) เมื่ออนุภาคในการไหลของละอองลอยถูกผสมกับไอออนทำให้อนุภาคมีสถานะประจุ (Charge state) จากนั้นอนุภาคที่มีประจุจะผ่านเข้าไปยังตัวดักจับไอออนเพื่อกำจัดไอออนที่มีความเคลื่อนที่ได้ทางไฟฟ้าสูงออกจากการไหล และเคลื่อนที่เข้าไปยังลูกถ้วยฟาราเดย์ทำให้อนุภาคถูกสะสมตัวบนตัวกรองอนุภาคที่เชื่อมต่อเครื่องวัดกระแสต่ำอิเล็กโตรมิเตอร์เพื่อการวัดกระแสประจุอนุภาค ซึ่งกระแสประจุอนุภาคที่วัดได้จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นจำนวนอนุภาค

Diffusion Charging Electrometer (DCE) [25–26] เป็นเครื่องตรวจหาความเข้มข้นจำนวนของอนุภาค ที่ประกอบด้วยเครื่องอัดประจุอนุภาค ตัวกรองไอออน (Ion filter) และตัวกรองอนุภาคที่มีประจุโดย DCE จะทำงานโดยอาศัยการอัดประจุให้กับอนุภาคด้วยคอโรนาดีสชาร์จเมื่ออนุภาคได้รับการอัดประจุจะถูกผ่านเข้าไปยังตัวกรองอนุภาค เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นจากการเก็บรวบรวมอนุภาคบนตัวกรองโดยวงจรีเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวสูง ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นของอนุภาคที่สะสมตัวอยู่บนตัวกรอง

Ultrafine Particle Measurement System (UPMS) คือระบบการวัดอนุภาคขนาดเล็กมากด้วยการใช้เทคนิคการควบแน่นร่วมการอัดประจุอนุภาคที่พัฒนาขึ้นโดย Park et al. [27] ประกอบด้วย 5 ส่วน คือ 1) ส่วนจำแนกขนาด

อนุภาคทางเข้า 2) ส่วนการเติบโตอนุภาค (Particle growth) 3) ส่วนประจุละออง 4) ส่วนการเก็บรวบรวมอนุภาค และ 5) ส่วนการวัดกระแสไฟฟ้า การทำงานของ UPMS เริ่มต้นโดยการจำแนกขนาดอนุภาคที่ต้องการวัดก่อน จากนั้นอนุภาคจะถูกนำเข้าไปในส่วนการเติบโตอนุภาค เพื่อควบแน่นอนุภาคให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและอนุภาคจะถูกอัดประจุด้วยเครื่องอัดประจุอนุภาคแบบคอโรนาดีสชาร์จ อนุภาคที่มีประจุจะเข้าไปในส่วนของลูกถ้วยฟาราเดย์ และอิเล็กทรอนิกส์เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าระดับต่ำประมาณ 10 pA ที่เกิดจากการถ่ายเทประจุโดยอนุภาคที่มีประจุสะสมตัวบนตัวกรองอนุภาคในลูกถ้วย ฟาราเดย์และสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่จะถูกเชื่อมต่อไปยังคอมพิวเตอร์ สำหรับแสดงผลข้อมูลอนุภาคในเวลาจริง โดยค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะถูกนำไปแปลงผันไปเป็นความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

Epiphaniometer [28] เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดความเข้มข้นของอนุภาค การทำงานของ Epiphaniometer จะขึ้นอยู่กับอัตราการวัดการเกาะติด (Attachment rate) ของอะตอม ^{211}Pb ธรรมชาติบนพื้นผิวของอนุภาค โดยอะตอมของ ^{211}Pb ถูกสร้างขึ้นที่อัตราคงที่โดยการย่อยสลาย (decay) ของ Short-lived radon isotope (^{219}Rn) ที่พุ่งออกจาก Long-lived artificial actinium source (^{227}Ac) ที่ถูกวางใน ห้องการเกาะติด (Attachment chamber) ของ Epiphaniometer อะตอมของ ^{211}Pb จะเกาะติดกับอนุภาค ละอองลอยที่ถูกผ่านเข้าไป และผ่านเข้าไปยังตัวกรอง โดยอัตราการการเกาะติดจะหาได้โดย α -Spectroscopy ผ่านการย่อยสลายของอะตอมของ ^{211}Pb ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับจำนวนทั้งหมดของอะตอมที่เกาะติดบนพื้นผิวของอนุภาค เครื่องนับจำนวนอนุภาคทางไฟฟ้า (Electrical Particle Detector) หรือ EPD [29] โครงสร้างของ EPD ประกอบด้วย ตัวจำแนกสิ่งปนเปื้อนเป็นขนาดใหญ่ เครื่องอัดประจุอนุภาคแบบคอโรนาดีสชาร์จ ตัวดักจับไอออน ลูกถ้วยฟาราเดย์ เครื่องตรวจหากระแสระดับต่ำ การทำงานของ EPD นี้เริ่มต้นโดยการดูดตัวอย่างละอองลอยที่ต้องการวัดผ่านท่อเก็บตัวอย่าง และผ่านเข้าไปยังตัวจำแนกสิ่งปนเปื้อนเป็นขนาดใหญ่เพื่อจำแนกอนุภาคที่มี

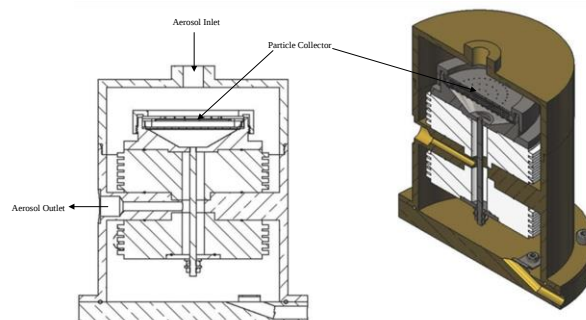
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าช่วงขนาดที่ต้องการวัด ออกด้วยหลักการทางอากาศพลศาสตร์ และจากนั้นอนุภาคจะถูกอัดประจุไฟฟ้าด้วยวิธีการแพร่และสนาม จากนั้นอนุภาคที่มีประจุจะผ่านเข้าไปยังตัวดักจับไอออน เพื่อกำจัดไอออนอิสระที่มีความเคลื่อนที่ได้ทางไฟฟ้าสูง เจือปนมากับอนุภาคที่มีประจุออกก่อน เพื่อป้องกันการเจือปนสัญญาณทางไฟฟ้าของอนุภาคขณะทำการวัด เมื่ออนุภาคที่มีประจุออกจากตัวดักจับไอออนแล้วก็จะผ่านเข้าไปยังลูกถ้วยฟาราเดย์ อนุภาคที่มีประจุทั้งหมดจะถูกเก็บรวบรวมบนตัวกรองประสิทธิภาพสูง HEPA บรรจุอยู่ภายในที่จับยึดตัวกรองในลูกถ้วยฟาราเดย์ และเชื่อมต่อเข้ากับตัววัดกระแสไฟฟ้าระดับต่ำหรืออิเล็กทรอนิกส์เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่เก็บรวบรวมบนตัวกรอง ซึ่งกระแสไฟฟ้าของอนุภาคที่มีประจุที่วัดได้จะสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนอนุภาคที่ผ่านเข้าไประหว่างลูกถ้วยฟาราเดย์

อย่างไรก็ตาม เครื่องนับจำนวนอนุภาคเหล่านี้มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกันและมีความไวและความละเอียดในการนับอนุภาคแตกต่างกันในแต่ละเทคนิคการนับ โดยเครื่องนับจำนวนอนุภาคบางหลักการมีการใช้กัมมันตรังสีหรือรังสีมาช่วยในการนับยังมีความอันตรายถึงผลกระทบจากการใช้งาน บางเครื่องมีขนาดใหญ่และระบบมีความยุ่งยากซับซ้อนเนื่องจากการใช้น้ำหรือแบบควบแน่นมาช่วยในการนับจำนวนอนุภาคจำทำให้มีราคาสูง จึงไม่เหมาะสำหรับการนำมาใช้ในการนับจำนวนอนุภาคสำหรับเครื่องทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัย ซึ่งจะทำให้ระบบการทดสอบมีขนาดใหญ่และราคาสูง ซึ่งในผลงานที่ผ่านมาโดย Intra et al. [17–21] ได้พัฒนาและประเมินสมรรถนะเครื่องตรวจวัดประจุไฟฟ้าไอออนและอนุภาค ละอองลอยที่มีช่วงการวัดกระแสในช่วง 1–500 pA จะสอดคล้องกับจำนวนความเข้มข้นของประจุไอออนและอนุภาคละอองลอยในช่วงประมาณ 10^6 ถึง 10^9 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดฝุ่น PM2.5 ในอากาศได้ในช่วง 0.1–5,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ อย่างไรก็ตาม สำหรับในงานการทดสอบประสิทธิภาพ

ในการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ส่วนใหญ่จะใช้เวลาเข้มข้นจำนวนอนุภาคต่ำกว่า 10^6 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อนุภาคขนาดต่ำสุดคือ 100 nm ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงช่วงการวัดให้กว้างขึ้นและให้สามารถนับอนุภาคที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 10^6 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความไวและความละเอียดของเครื่องนับจำนวนให้สูงขึ้น เพื่อให้สามารถหับอนุภาคได้ต่ำสุดถึง 100 nm สำหรับในการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคตามมาตรฐาน ASTM F2299-03

ในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับปรุงเครื่องนับจำนวนอนุภาคหลักการไฟฟ้าสถิตให้สามารถนับความเข้มข้นจำนวนอนุภาคต่ำกว่า 10^6 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยการผสมผสานใช้หลักการการตกกระทบเนื่องจากแรงเฉื่อยของอนุภาคร่วมกับลูกถ้วยฟาราเดย์อิเล็กโทรมิเตอร์ ซึ่งในส่วนตัวคัดกรองอนุภาค (Particle collector) ที่มีการปรับปรุงตามรูปที่ 3 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 ลิตรต่อ นาที และได้มีการปรับแต่งวงจรอิเล็กทรอนิกส์ให้สามารถวัดกระแสระดับต่ำคือ 10 mV ต่อกระแสอินพุตเท่ากับ 10 fA ได้ ทำให้มีความไวและความละเอียดสูงในการนับจำนวนอนุภาคในช่วงความเข้มข้นจำนวน 10^1 ถึง

10^6 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อนุภาคขนาดต่ำสุดคือ 100 nm และมีราคาถูกเนื่องจากมีใช้ เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ ที่สามารถพัฒนาและหาได้ภายในประเทศทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศ



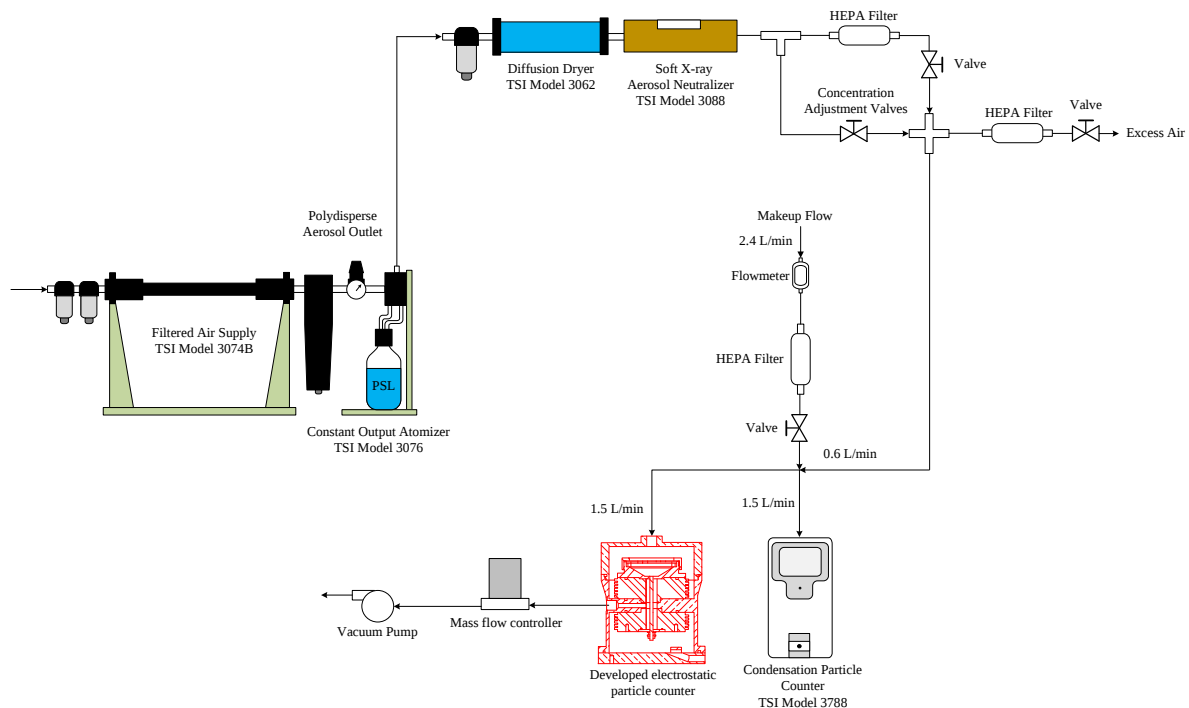
รูปที่ 3 Schematic of the modified aerosol detector.

3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

ส่วนการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาคระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในต้นแบบเครื่องทดสอบตัวกรองนี้กับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง ในการศึกษาได้แบ่งเป็น 2 การทดลอง คือ 1) การเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์จากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (Atomizer aerosol generator) ที่แต่ละความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคและ 2) ทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง รูปที่ 4 แสดงแผนภาพการทดสอบเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ ที่ความเข้มข้นจำนวนต่าง ๆ อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วยแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ แหล่งจ่ายอากาศสะอาด (Filtered air supply) เครื่องอัดอากาศ ตัวไล่ความชื้นแบบแพร่ (Diffusion dryer) ตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลาง (Aerosol neutralizer) แบบ Soft X-ray (Model 3088, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) ชุดวัดค่าปรับความเข้มข้น (Concentration adjustment valve) เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตและเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง ในการทดสอบนี้เลือกใช้เครื่องนับจำนวนอนุภาคกระเจิงแสงแบบควมแน่นของบริษัท

TSI Inc., St. Paul, MN, USA โมเดล 3788 ที่สามารถนับจำนวนอนุภาคได้ในช่วง 2.5 nm ถึง 3 μm และเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาขึ้นโดย Intra et al. [17–20] ที่สามารถนับจำนวนอนุภาคได้ในช่วง 10 nm ถึง 50 μm สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของอนุภาคที่มีประจุที่วัดได้จากเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตในหน่วย mV/cm^3 สัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นจำนวนอนุภาคใน

หน่วย $\text{particles}/\text{cm}^3$ ในการทดสอบนี้ทำการเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์โดยการปรับความเข้มข้นจำนวนอนุภาคที่หาค่าแล้วปรับความเข้มข้นในช่วง 0–12,000 $\text{particles}/\text{cm}^3$ แล้วนำค่าที่ได้จากการวัดมาเปรียบเทียบเพื่อหาสหสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear correlation) ระหว่าง 2 หลักการนับจำนวนอนุภาค



รูปที่ 4 Experimental setup for comparative study of particle counting between electrostatic and light scattering particle counters.

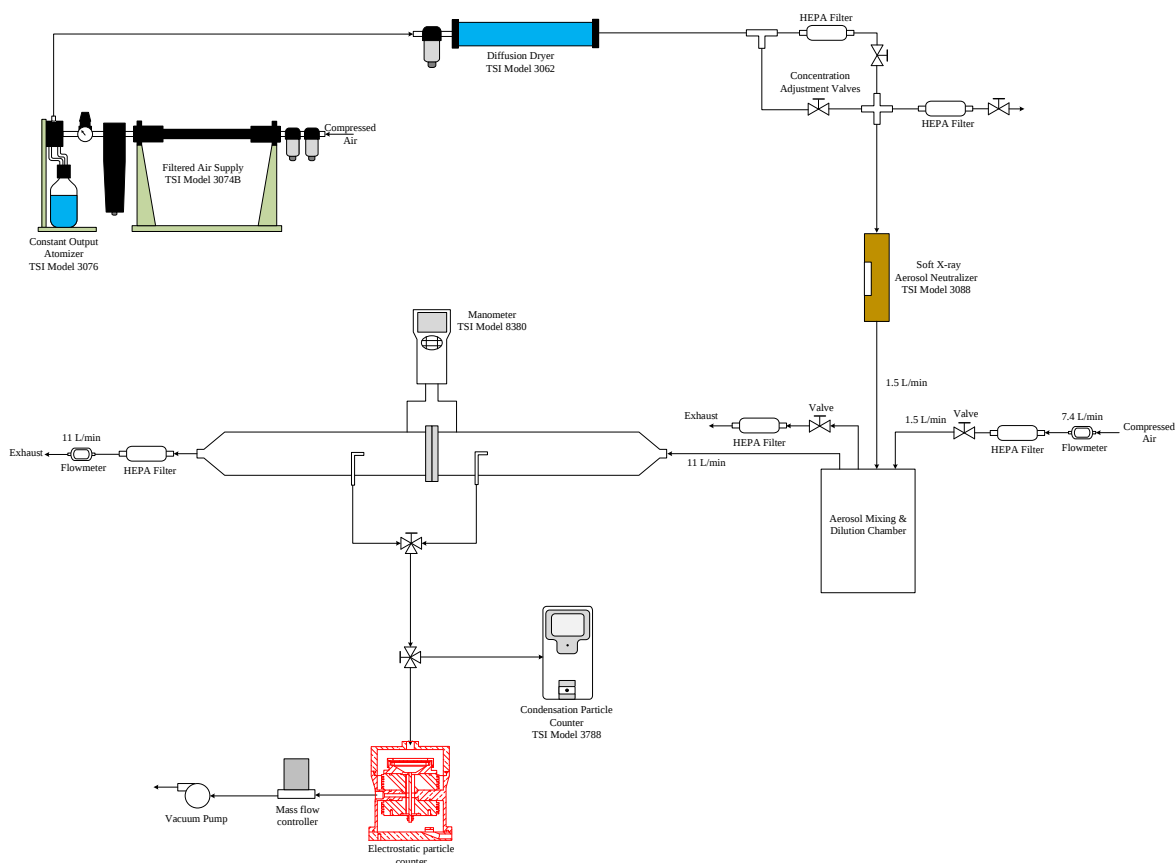
รูปที่ 5 แสดงการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ได้ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง ในการเลือกหน้ากากตัวอย่างสำหรับการทดสอบนี้จะเลือกซื้อหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่มีขายตามท้องตลาด มีการสุ่มตัวอย่างหน้ากากตามที่มีท้องตลาดชนิดละ 5 ชิ้น โดยหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ต้องได้รับการรับรองจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (FDA) ประเทศสหรัฐอเมริกา หรือได้มาตรฐาน ASTM F2100 ประเทศสหรัฐอเมริกา หรือได้มาตรฐาน มอก 2424–2562 จากสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หรือ ได้รับการรับรองให้นำเข้า/ผลิต/จำหน่ายจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา

ในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบตามวิธีการทดสอบมาตรฐานของมาตรฐาน ASTM F2299–03 ซึ่งเป็นวิธีทดสอบมาตรฐานสำหรับการหาประสิทธิภาพการกรองและการทะลุผ่านของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์โดยการใช้อนุภาคทรงกลมชนิดพอลิสไตรีน ลาเท็กซ์ที่กำหนดโดยสมาคมการทดสอบและวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials) [15] วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลองประกอบด้วย ประกอบด้วยอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ แหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ แหล่งจ่ายอากาศสะอาด เครื่องอัดอากาศตัวไล่ความชื้นแบบแพร์

ตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลาง ชุดควาล์วปรับความเข้มข้น เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต

(Electrostatic size classifier) มาโนมิเตอร์ (Manometer) ห้องทดสอบ (Test chamber) ห้องผสมและเจือจางละอองลอย (Aerosol mixing and dilution chamber) มาตรวัดการไหล (Flow meter) และตัวกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง (HEPA filter) ในการทดสอบประสิทธิภาพการกรองนี้ใช้ อนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1,

0.5, 1.0 และ 1.5 μm ของ Thermo Scientific™ Dri-Cal™ มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทางเรขาคณิต (Geometric standard deviation) 1.6 % ที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐานจากสถาบันแห่งชาติของมาตรฐานและเทคโนโลยี (National Institute of Standards and Technology, NIST) ของประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 5 Experimental setup for comparative study of particle filtration efficiency between electrostatic and light scattering particle counters.

โดยอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ที่ผสมในน้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water) ในสัดส่วน 1000:1 โดยอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ถูกจ่ายด้วยแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (Model 3076, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) จากนั้นอนุภาคจะผ่านเข้าไปยังตัวไล้ความชื้นแบบแพรว (Model 3062, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) เพื่อกำจัดละอองน้ำและความชื้นออก โดยความเข้มข้นของอนุภาคสามารถปรับให้เหมาะสมได้ด้วยชุดวาล์วปรับความเข้มข้นด้านหลังตัวไล้ความชื้น หลังจากชุดวาล์วปรับความเข้มข้น อนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์จะถูกทำให้มีสมดุลประจุบ็อลทซ์มันน์ (Boltzmann equilibrium

charge equivalent) ด้วยตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลางแบบ Soft X-ray (Model 3088, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) เพื่อป้องกันการสูญเสียอนุภาค (Particle losses) ในระบบหรือในท่อและห้องทดสอบตัวอย่าง ในการศึกษานี้ใช้ท่อซิลิโคนนำไฟฟ้า (Conductive silicone tube) และท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel tube) เป็นท่อสำหรับนำส่งและการเก็บตัวอย่างอนุภาคเพื่อป้องกันการสูญเสียของอนุภาคในระบบที่ทำการทดสอบ [30] จากนั้นอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์จะผ่านเข้าไปยังห้องทดสอบซึ่งมีแผ่นกรองหน้ากาทดสอบอยู่ภายใน ในส่วนของห้องทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.76 cm ยาว 100 cm ซึ่งตัวอย่าง

วัสดุ (Material specimen) จะอยู่ห่างจากทางเข้าอนุภาค (Particle inlet) 10 เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (Duct diameters) โดยหัวเก็บตัวอย่างอนุภาค (Particle sampling probe) ก่อนแผ่นกรองจะห่างจากตัวอย่างวัสดุ 2 เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (9.52 cm) และหัวเก็บตัวอย่างอนุภาคหลังแผ่นกรองจะห่างจากตัวอย่างวัสดุ 3 เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (14.28 cm) หัวเก็บตัวอย่างทั้งสองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 cm การเก็บตัวอย่างอนุภาคในการทดสอบนี้จะเป็นการเก็บตัวอย่างแบบไอโซไคเนติก (Isokinetic sampling) ทิศทางของของไหลที่ทางเข้าหัววัดและแกนของหัวเก็บตัวอย่างอยู่ในแกนเดียวกันคือขนานกับเส้นการไหลของของไหลและความเร็วของของไหลที่จุดทางเข้าหัววัดมีค่าเท่ากับความเร็วของการไหลภายนอก โดยในขณะทดสอบได้มีการวัดค่าความต่างความดันของแผ่นวัสดุผ้าด้วยมาโนมิเตอร์ (Model 8380, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) โดยช่วงและค่าของตัวแปรที่ทดสอบแสดงตามตารางที่ 1 ซึ่งการทดสอบนี้จะควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดสอบที่ 25°C และ 55 %RH ตามลำดับ ในการทดสอบได้ทำการนับจำนวนอนุภาคโพลีสไตรีน ลาเท็กซ์ทั้งก่อนและหลังผ่านแผ่นกรองหน้ากากตัวอย่างพร้อมกันทั้ง 2 เครื่อง

ตารางที่ 1 Ranges and values of variables investigated.

Variable	Range
Particle type	Polystyrene Latex spheres
Particle number concentration	$1-1.2 \times 10^4$ particles/cm ³
Particle size	0.1, 0.5, 1.0 and 1.5 μ m
Filter Test Area	17.8 cm ²
Flow rate	11.3 L/min
Face velocity	10.6 cm/s
Operating relative humidity	55 %RH
Operating pressure	1 atm
Operating temperature	25°C

จากนั้นนำความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคที่ได้จากการวัดมาคำนวณหาประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเพื่อเปรียบเทียบหาค่าความต่างระหว่าง 2 หลักการนับจำนวนอนุภาค โดยค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค (Particle filtration efficiency) ของแผ่นกรองของหน้ากาก η สามารถคำนวณได้จาก [22]

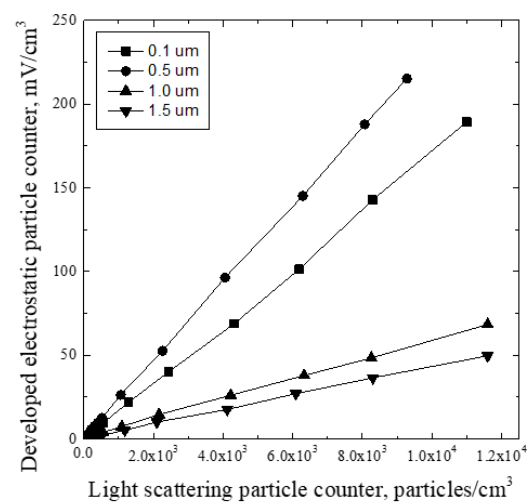
$$\eta = \frac{C_{inlet} - C_{outlet}}{C_{inlet}} \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ C_{inlet} คือความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคก่อนผ่านของตัวกรองและ C_{outlet} คือความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคหลังผ่านของตัวกรอง และค่าการทะลุผ่านอนุภาค (Particle penetration) ของตัวกรอง P จะสามารถคำนวณได้จาก [22]

$$P = 100 - \eta \quad (7)$$

4. ผลการทดลอง

รูปที่ 6 แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณในหน่วย mV ของเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตและความเข้มข้นเชิงจำนวนในหน่วย particles/cm³ ของเครื่องนับ



รูปที่ 6 Comparison of particle counting between electrostatic and light scattering particle counters.

จำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง จากรูปพบว่าสัญญาณในหน่วย mV และความเข้มข้นเชิงจำนวนอนุภาคในหน่วย particles/cm³ ของอนุภาคโพลีสไตรีน ลาเท็กซ์มีความสัมพันธ์กันได้ดีแบบเชิงเส้น โดยค่าสัญญาณ mV มี

ค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตามความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาค สัญญาณ mV มีค่าลดลงที่อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากเป็นผลของจำนวนประจุต่ออนุภาคและการสูญเสียภายในเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตของ

อนุภาคแต่ละขนาดมีความแตกต่างกัน จากตารางที่ 2 พบว่า อนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ขนาด 0.1 μm , 0.5 μm , 1.0 μm และ 1.5 μm มีค่าสัญญาณ mV/cm³ ในช่วง 0.12–189.4, 0.16–215.2, 0.111–68.4 และ 0.14–49.68 mV/cm³ ตามลำดับ

ตารางที่ 2 Comparison of particle counting between electrostatic and light scattering particle counters.

Particle diameter	mV/cm ³	particles/cm ³	Intercept	Slope	R ²	particles/cm ³ per mV/cm ³
0.1 μm	0.12 – 189.4	0 – 11,000	-0.5028	0.0170	0.9989	58.42
0.5 μm	0.16 - 215.2	0 – 9,280	0.6528	0.0231	0.9998	41.33
1.0 μm	0.111 – 68.4	0 – 11,600	0.6593	0.0058	0.9992	150.78
1.0 μm	0.14 – 49.68	0 – 11,600	0.1699	0.0043	0.9992	224.20

มีความเข้มข้นเชิงจำนวนในหน่วย particles/cm³ อยู่ ในช่วง 0–11,000, 0–9,280, 0–11,600 และ 0–11,600 particles/cm³ ตามลำดับ มีค่า Intercept เท่ากับ -0.5028, 0.6528, 0.6593 และ 0.1699 ตามลำดับ มีค่า Slope เท่ากับ 0.0170, 0.0231, 0.0058 และ 0.0043 ตามลำดับ มีค่า R² เท่ากับ 0.9989, 0.9998, 0.9992 และ 0.9992 ตามลำดับ และมีสัดส่วนระหว่าง particles/cm³ ต่อ mV/cm³ เฉลี่ย เท่ากับ 58.42, 41.33, 150.78 และ 224.20 ตามลำดับ ตารางที่ 3–6 แสดงผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการ กรองอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ขนาด 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 μm ของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ได้ระหว่าง เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับ จำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงโดยทำการทดสอบที่ ความเร็วด้านหน้าเท่ากับ 10.6 cm/s กับพื้นที่ทดสอบเท่า 17.8 cm² จากผลในตารางที่ 3 พบว่าค่าความเข้มข้นเชิง จำนวนของอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ 0.1 μm ก่อนและ หลังผ่านหน้ากากที่วัดได้จากเครื่องนับจำนวนอนุภาค แบบกระเจิงแสงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11,020 และ 294.40 particles/cm³ ตามลำดับ เมื่อนำไปคำนวณหา ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคตามสมการที่ 6 แล้วจะ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 97.33% สำหรับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตวัดได้ สัญญาณ mV/cm³ ก่อนและหลังผ่านหน้ากากได้ค่าเฉลี่ย

เท่ากับ 186.60 และ 6.78 mV/cm³ ตามลำดับ ได้ ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 96.36% แสดง ให้เห็นความแตกต่างของค่าความผิดพลาดร้อยละ สัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) ของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคโพลีสไตรีนลา เท็กซ์ขนาด 0.1 μm ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบ กระเจิงแสงและไฟฟ้าสถิตเท่า 0.99 ตารางที่ 4 แสดงค่า ความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ 0.5 μm ก่อนและหลังผ่านหน้ากากที่วัดได้จากเครื่องนับ จำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10,200 และ 268.40 particles/cm³ ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพใน การกรองอนุภาคเท่ากับ 97.36% สำหรับเครื่องนับจำนวน อนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตวัดได้สัญญาณ mV/cm³ ก่อนและ หลังผ่านหน้ากากได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 207.56 และ 9.58 mV/cm³ ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค เท่ากับ 95.38% มีความแตกต่างของค่าความผิดพลาดร้อยละ สัมบูรณ์เฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคโ พลีสไตรีนลาเท็กซ์ขนาด 0.5 μm ระหว่างเครื่องนับจำนวน อนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบ กระเจิงแสงเท่ากับ 2.03 ตารางที่ 5 แสดงค่าความเข้มข้น เชิงจำนวนของอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ 1.0 μm ก่อน และหลังผ่านหน้ากากที่วัดได้จากเครื่องนับจำนวน อนุภาคแบบกระเจิงแสงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11,840 และ

254.60 particles/cm³ ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 97.85% สำหรับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตวัดได้สัญญาณ mV/cm³ ก่อนและหลังผ่านหน้ากากได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 77.09 และ 3.05 mV/cm³ ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 96.05% มีความแตกต่างของค่าความผิดพลาดร้อยละสัมบูรณ์เฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ขนาด 1.0 μm ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงเท่ากับ 1.84 และตารางที่ 6 แสดงค่าความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ 1.5 μm ก่อนและหลังผ่านหน้ากากที่วัดได้จากเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11,000 และ 173.20 particles/cm³ ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 98.61% สำหรับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตวัดได้สัญญาณ mV/cm³ ก่อนและหลังผ่านหน้ากากได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 44.19 และ 1.39 mV/cm³ ตามลำดับ ได้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคเท่ากับ 96.84% มีความแตกต่างของค่าความผิดพลาดร้อยละสัมบูรณ์เฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ขนาด 1.5 μm ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบ

กระเจิงแสงเท่ากับ 1.79 โดยความแตกต่างของค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงมีความแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างของเทคนิคการวัดอนุภาค ในเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงจะผลิตสัญญาณแสงหักเหที่สามารถตรวจจับอนุภาคได้ การกระเจิงแสงมีความไวในการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหที่ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคหรือรูปร่างอนุภาคและมุมการกระจัดกระเจิงแสง

ถ้าอนุภาคที่มีรูปร่างหรือรูปทรงต่างกันจะให้ค่าการกระเจิงแสงหรือดัชนีการหักเหต่างกัน ซึ่งค่าการกระเจิงแสงจะมีผลต่อจำนวนของอนุภาคที่นับได้ ส่วนเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตเป็นการอาศัยหลักการวัดประจุ

ไฟฟ้าของอนุภาคและแปลงค่าประจุไฟฟ้าของอนุภาคไปเป็นจำนวนของอนุภาค ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดต่างกันก็จะมีจำนวนประจุไฟฟ้าต่างกันหรืออนุภาคขนาดเดียวกันแต่รูปร่างหรือรูปทรงต่างกัน เช่น ทรงกลม (Sphere) ทรงกระบอกหรือไม่เป็นทรงกลม (Non-sphere) ก็จะมีประจุไฟฟ้าต่ออนุภาคที่ต่างกัน เมื่อมีประจุไฟฟ้าต่ออนุภาคต่างกันอาจมีผลต่อจำนวนอนุภาคที่นับได้จากวิธีการทางไฟฟ้าสถิต

ตารางที่ 3 Comparison of filtration efficiency of 0.1 μm PSL particle between electrostatic and light scattering particle counters.

Sample number	Light scattering particle counter			Electrostatic particle counter			Absolute percentage error
	Upstream (Particles/cm ³)	Downstream (Particles/cm ³)	Efficiency (%)	Upstream (mV/cm ³)	Downstream (mV/cm ³)	Efficiency (%)	
1	11200.00	293.00	97.38	188.50	6.90	96.34	1.07
2	10800.00	291.00	97.31	186.30	7.10	96.19	1.15
3	11100.00	295.00	97.34	189.20	6.40	96.62	0.74
4	11300.00	301.00	97.37	181.40	7.00	96.14	1.26
5	10700.00	292.00	97.27	187.60	6.50	96.54	0.75
Average	11020.00	294.40	97.33	186.60	6.78	96.36 MAPE = 0.99	

ตารางที่ 4 Comparison of filtration efficiency of 0.5 μm PSL particle between electrostatic and light scattering particle counters.

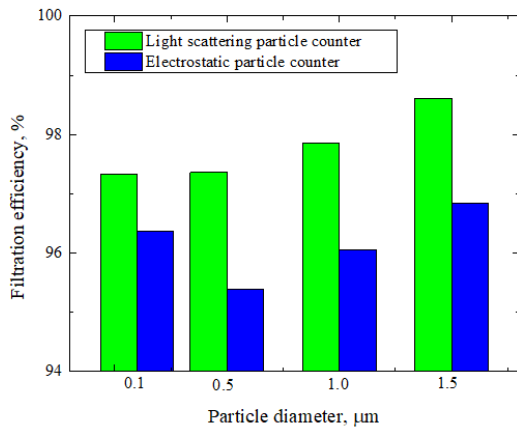
Sample number	Light scattering particle counter			Electrostatic particle counter			Absolute percentage error
	Upstream (Particles/cm ³)	Downstream (Particles/cm ³)	Efficiency (%)	Upstream (mV/cm ³)	Downstream (mV/cm ³)	Efficiency (%)	
1	10200.00	271.00	97.34	210.00	9.68	95.39	2.00
2	10100.00	269.00	97.33	205.10	9.50	95.37	2.01
3	10000.00	270.00	97.30	209.60	9.35	95.54	1.81
4	10400.00	267.00	97.43	204.40	9.73	95.24	2.25
5	10300.00	265.00	97.42	208.70	9.64	95.38	2.09
Average	10200.00	268.40	97.36	207.56	9.58	95.38	MAPE = 2.03

ตารางที่ 5 Comparison of filtration efficiency of 1.0 μm PSL particle between electrostatic and light scattering particle counters.

Sample number	Light scattering particle counter			Electrostatic particle counter			Absolute percentage error
	Upstream (Particles/cm ³)	Downstream (Particles/cm ³)	Efficiency (%)	Upstream (mV/cm ³)	Downstream (mV/cm ³)	Efficiency (%)	
1	11400.00	256.00	97.75	78.78	3.73	95.27	2.54
2	11500.00	257.00	97.77	76.15	3.00	96.06	1.75
3	12200.00	255.00	97.91	77.60	2.80	96.39	1.55
4	11900.00	253.00	97.87	77.30	2.74	96.46	1.44
5	12200.00	252.00	97.93	75.60	2.98	96.06	1.91
Average	11840.00	254.60	97.85	77.09	3.05	96.05	MAPE = 1.84

ตารางที่ 6 Comparison of filtration efficiency of 1.5 μm PSL particle between electrostatic and light scattering particle counters.

Sample number	Light scattering particle counter			Electrostatic particle counter			Absolute percentage error
	Upstream (Particles/cm ³)	Downstream (Particles/cm ³)	Efficiency (%)	Upstream (mV/cm ³)	Downstream (mV/cm ³)	Efficiency (%)	
1	11100.00	155.00	98.60	44.11	1.53	96.53	2.10
2	11300.00	157.00	98.61	44.28	1.34	96.97	1.66
3	11700.00	160.00	98.63	44.49	1.23	97.24	1.41
4	11600.00	161.00	98.61	43.25	1.49	96.55	2.09
5	11500.00	162.00	98.59	44.82	1.38	96.92	1.69
Average	11000.00	173.20	98.61	44.19	1.39	96.84	MAPE = 1.79



รูปที่ 7 Comparison of filtration efficiency between electrostatic and light scattering particle counters.

จากรูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรองระหว่างตัวนับอนุภาคไฟฟ้าสถิตและการกระเจิงของแสงพบว่าขนาดอนุภาคที่ผ่านทะลุง่ายที่สุด (Most penetrating particle size) สำหรับตัวนับอนุภาคแบบกระเจิงของแสง (Light scattering particle counters) คือ 0.1 ไมโครเมตร และสำหรับตัวนับอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic particle counters) คือ 0.5 ไมโครเมตร

5. อภิปรายผลและสรุป

ในบทความนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงและไฟฟ้าสถิตในการหาค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกตัวอย่างหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ที่ผ่านการรับรองจาก อย. ในการทดสอบ ในการศึกษานี้ได้แบ่งเป็น 2 การทดลอง คือการเปรียบเทียบการนับจำนวนอนุภาคโพลีสไตรีนลาเทกซ์จากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ที่แต่ละความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคและทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคโพลีสไตรีนลาเทกซ์ระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสง และในการทดสอบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคได้ทำตามมาตรฐาน ASTM F2299-03 กับอนุภาคทรงกลมชนิดโพลีสไตรีน ลาเทกซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 μm ที่ความเร็วด้านหน้าเท่ากับ 10.6 cm/s กับพื้นที่ทดสอบเท่า 17.8 cm^2 ทำการวัดความเข้มข้นเชิงจำนวน

ก่อนและหลังผ่านหน้ากากตัวอย่างด้วยเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงและไฟฟ้าสถิตเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของทั้ง 2 เครื่อง จากผลการทดลองพบว่าสัญญาณในหน่วย mV ของเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตและความเข้มข้นเชิงจำนวนอนุภาคในหน่วย particles/ cm^3 ของเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงของอนุภาคโพลีสไตรีนลาเทกซ์มีความสัมพันธ์กันได้ดีแบบเชิงเส้น โดยค่าสัญญาณ mV มีค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตามความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาค และจากการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของทั้ง 2 เครื่องพบว่ามีความใกล้เคียงกัน โดยความแตกต่างของค่าความผิดพลาดร้อยละสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error, MAPE)ของประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคระหว่างเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงและไฟฟ้าสถิตเท่ากับ 0.99, 2.03, 1.84 และ 1.79 สำหรับอนุภาคขนาด 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 μm ตามลำดับ ผลจากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตสามารถใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคได้เทียบเคียงกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบกระเจิงแสงตามที่มาตรฐาน ASTM F2299-03 กำหนดได้ ซึ่งจะเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขึ้นในประเทศให้ทันต่อความต้องการเครื่องทดสอบตัวกรองอนุภาคในการศึกษาวิจัยประสิทธิภาพการกรองอนุภาคหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ช่วงโควิด-19 ระบาดในประเทศไทย

6. กิตติกรรมประกาศ

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

เอกสารอ้างอิง

- [1] COVID-19 situation report, Department of Disease Control, Jan. 4, 2022. [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, pp. 1–27, 2020, 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, 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, pp.762–769, 2020, 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 respirators available for use during the COVID-19 pandemic in Thailand," *Thai Science and Technology Journal*, 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] *Standard Specification for Performance of Materials Used in Medical Face Masks*, ASTM F2100-19e1, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2019.
- [15] *42 CFR Part 84 Respiratory Protective Devices*, NIOSH, Mar. 4, 1997. [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/niosh/npptl/topics/respirators/pt84abs2.html>
- [16] *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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] P. Intra and N. Tippayawong, "Measurements of ion current from a corona-needle charger using a Faraday cup electrometer," *Chiang Mai Journal of Science*, vol. 36, no. 1, pp. 110–119, 2009.
- [21] P. Intra, "Electrical aerosol measurement," in *Electrostatic Aerosol Measurement and Control Technology*, Bangkok, Thailand: Chula Press, 2019, ch. 10, pp. 177–194.
- [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] TSI 3756 Ultrafine Condensation Particle Counter User's Guide, TSI Incorporated, Minnesota, USA, 2022, pp. 1–62.
- [24] Model 3068B Aerosol Electrometer User's Manual, TSI Incorporated, Minnesota, USA, 2022, pp. 1–61.
- [25] M. Fierz, S. Weimer and H. Burtscher, "Design and performance of an optimized electrical diffusion battery," *Journal of Aerosol Science*, vol. 40, no.2, pp.152–163, 2008, doi: 10.1016/j.jaerosci.2008.09.007.
- [26] M. Fierz, L. Scherrer and H. Burtscher, "Real-Time Measurement of Aerosol Size Distributions with an Electrical Diffusion Battery," *Journal of Aerosol Science*, vol. 33, no.7, pp. 1049–1060, 2002, doi: 10.1016/S0021-8502(02)00057-5.
- [27] S. S. Park, C. J. Lee, S. W. Kim, S. B. Lee, G. N. Bae and K. C. Moon, "A Novel Ultrafine Particle Measurement System with an Electrometer," in *48th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Covington, KY, USA, Aug. 2005, pp. 227–230, doi: 10.1109/MWSCAS.2005.1594080.
- [28] H. W. Gäggeler, U. Baltensperger, M. Emmenegger, D. T. Jost, A. Schmidt-Ott, P. Haller and M. Hofmann, "The Epiphaniometer, a New Device for Continuous Aerosol Monitoring," *Journal of Aerosol Science*, vol. 20, no. 5, pp. 557–564, 1989, doi: 10.1016/0021-8502(89)90101-8.
- [29] T. Johnson, S. Kaufman and A. Medved, "Response of an Electrical Aerosol Detector based on a Corona Jet Charger," in *6th International ETH Conference on Nanoparticle Measurement*, Aug. 2002, Zurich, Switzerland, pp. 1–12.
- [30] S. Kimoto, K. Mizota, M. Kanamaru, H. Okuda, D. Okuda and M. Adachi, "Aerosol Charge Neutralization by a Mixing-Type Bipolar Charger using Corona Discharge at High Pressure," *Aerosol Science and Technology*, vol. 43, no.9, pp.872–880, 2009, doi: 10.1080/02786820902998381.

การประยุกต์ใช้เยื่อกรองแบบนาโนสำหรับกำจัดแคลเซียมซัลเฟต และสารอินทรีย์ธรรมชาติ

Application of Nanofiltration Membrane for Calcium sulfate and Natural Organic Matter Removal

อภิญญา อ่อนสาร, สุพัฒน์พงษ์ มัตราจ*, วิภาดา เดชะปัญญา, กรรณิกา รัตนพงศ์เลขา, เทียมมะณีรัตน์วีระพันธ์, และ
สมภพ สนองราษฎร์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เมืองศรีโค

วารินชำราบ อุบลราชธานี 34190

Apinya Onsarn, Supatpong Mattaraj*, Wipada Dechapanya, Karnika Ratanapongleka, Tiammanee Rattanaweerapan,
and Sompop Sanongraj

Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Mueang Si Khai, Warin
Chamrap, Ubon Ratchathani, 34190, Thailand

*Corresponding Author E-mail: supatpong.m@ubu.ac.th

Received: Dec 08, 2021; Revised: Apr 01, 2022; Accepted: Apr 22, 2022

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียมซัลเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้เยื่อกรองแบบนาโน ซึ่งแผ่นเยื่อกรองที่ใช้ผลิตจาก GE Water & Process Technologies รุ่น HL4040HM การทดสอบหาจากการกรองแบบการไหลปิดตามแนวตั้ง ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ความแรงประจุของแคลเซียมซัลเฟต ค่าพีเอช และผลรวมของแคลเซียมซัลเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มความแรงประจุแคลเซียมซัลเฟตส่งผลให้ค่าการลดลงของฟลักซ์สูงขึ้น อาจเนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นแคลเซียมซัลเฟต ส่งผลให้อัตราการไหลผ่านเยื่อกรองลดลง สารละลายที่มีความแรงประจุ 0.015 M ให้ค่าการกำจัดซัลเฟตสูงสุดประมาณร้อยละ 97 จากการสะสมของแคลเซียมซัลเฟตบนผิวของเยื่อกรอง ผลของค่าพีเอชทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียมและซัลเฟตอยู่ในช่วงร้อยละ 71 ถึง 93 สำหรับผลรวมของแคลเซียมซัลเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ พบว่าค่าฟลักซ์สารละลายและประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียมและซัลเฟตต่ำกว่ากรณีที่ไม่รวมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ

คำสำคัญ: เยื่อกรองแบบนาโน, ความแรงประจุ, แคลเซียมซัลเฟต, สารอินทรีย์ธรรมชาติ, การลดลงของฟลักซ์

Abstract

The objective of this research was to study the removal efficiency of calcium sulfate and natural organic matter (NOM) using nanofiltration membrane. The membrane sheets used were obtained from GE Water & Process Technologies (model HL4040HM). The filtration experiments were determined by a dead-end filtration membrane. Factors studied were ionic strengths of calcium sulfate, pH and combined effects between calcium sulfate and NOM. The experimental results revealed that increased ionic strengths of calcium sulfate provided higher flux decline, possibly increased concentrations

of calcium sulfate, thus decreased permeate flow. Solutions having high ionic concentration of 0.015 M resulted in the highest sulfate removal about 97%, thus enhancing accumulation of calcium sulfate on the membrane surface. The pH effects caused calcium and sulfate removal ranging from 71% to 93 %. For combined effects between calcium sulfate and NOM, it was found that fluxes and rejection efficiencies (both calcium and sulfate rejections) showed lower values than those without NOM.

Keywords : Nanofiltration membrane, Ionic strengths, Calcium sulfate, Natural Organic Matter (NOM), Flux decline

1. บทนำ

สารอินทรีย์ธรรมชาติ(Natural Organic Matter: NOM) เป็นสารจำพวกที่ทำให้เกิดสีหรือสีน้ำตาลอ่อนในน้ำ สารอินทรีย์ธรรมชาติที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำผิวดินส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ซึ่งเกิดจากซากผลิตภัณฑ์ของเสียในธรรมชาติที่มีองค์ประกอบด้วย คาร์บอน ออกซิเจนและ ไฮโดรเจน เป็นหลัก อีกทั้งสารอินทรีย์ธรรมชาติสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักๆ คือ 1. สารอินทรีย์กลุ่มไฮโดรโฟบิก(Hydrophobic) ได้แก่ สารประกอบฮิวมิก (Humic Substance) และกรดฟูลวิก (Fulvic acid) โดยมีคุณสมบัติของคอลลอยด์เป็นประจุลบ 2. สารอินทรีย์กลุ่มไฮโดรฟิลิก(Hydrophilic) จะขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะของสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำซึ่งจะมี MWCO ในช่วง 300 ถึง 30,000 Da นอกจากนี้ยังพบว่าในแหล่งน้ำผิวดินมากกว่า 50% เป็นสารอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายน้ำ (Dissolved Organic Carbon: DOC) [1] ส่วนใหญ่พบสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ระดับความเข้มข้นไม่เกิน 10 mg/L ซึ่งการวัดหาปริมาณของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon: TOC) ว่าละลายในน้ำมากหรือน้อยในน้ำซึ่งจะมีหน่วย mg/L แต่อย่างไรก็ตามสีของสารอินทรีย์ธรรมชาียังส่งผลกระทบต่อผู้ใช้น้ำในชีวิตประจำวัน ได้แก่ ระบบสุขภัณฑ์มีคราบเปื้อน เกิดคราบบนผิวท่อในระบบนำส่งท่อประปา และที่สำคัญหากมีการปนเปื้อนในน้ำที่มีการเติมสารเคมี เช่น คลอรีน เพื่อฆ่าเชื้อโรค อาจเกิดผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection by-products: DBPs) เช่น เกิดเป็นสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes: THMs) ซึ่งพบว่าสารดังกล่าวอาจมีส่วนทำให้เกิดโรคมะเร็ง [2] ตามเอกสารแนะนำคุณภาพน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก (WHO's Guidelines

for Drinking Water Quality) ปี ค.ศ. 2011 ได้กำหนดค่าแนะนำสำหรับไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 รูปแบบที่พบบ่อย คือ 1. คลอโรฟอร์ม (Chloroform) มีค่าไม่เกิน 0.3 mg/L 2. โบรโมไดคลอโรมีเทน (Bromodichloromethanes: BDCM) มีค่าไม่เกิน 0.06 mg/L 3. ไดโบรโมคลอโรมีเทน (Dibromochloromethanes: DBCM) มีค่าไม่เกิน 0.1 mg/L และ 4. โบรโมฟอร์ม (Bromoform) มีค่าไม่เกิน 0.1 mg/L [3]

ปัจจุบันกระบวนการผ่านเยื่อกรอง (Membrane Process) เป็นอีกหนึ่งวิธีสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำขึ้นสูงเพื่อปรับปรุงน้ำธรรมชาติ ที่ผ่านการบำบัดแล้วให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น เยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration membrane) เป็นวิธีการกรองเพื่อใช้สำหรับผลิตน้ำสะอาดซึ่งสามารถกักกันสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ที่มีขนาดเล็กแบคทีเรีย จุลินทรีย์ รวมถึงเกลืออนินทรีย์บางชนิดได้ [4] ดังนั้นน้ำที่ได้จึงเป็นน้ำที่มีคุณภาพดี สามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตน้ำสำหรับอุปโภค บริโภค ระดับอุตสาหกรรมและการเกษตร รวมถึงการใช้เยื่อกรองนาโนยังช่วยลดการใช้พลังงานและลดการใช้สารเคมีอินทรีย์ได้อีกด้วย [5] จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าระบบเยื่อกรองแบบนาโน สามารถกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) ได้สูงถึงร้อยละ 90 ถึง 95 กำจัดไอออนประจุเดียวได้ประมาณร้อยละ 70 กำจัดสารไตรฮาโลมีเทนร้อยละ 91 ถึง 98 กำจัดความกระด้างของน้ำที่มีแคลเซียมกับแมกนีเซียมร้อยละ 85 ถึง 95 [6–8] สำหรับปัญหาหลักที่พบจากการใช้เยื่อกรองแบบนาโน คือการอุดตันบนพื้นผิวเยื่อกรอง ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่อง ทำให้เพิ่มค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานมากขึ้น และต้องทำความสะอาดอยู่บ่อยครั้ง จึงทำให้อายุการใช้งานของเยื่อกรองมีระยะเวลาที่สั้นลง [9] โดยการอุด

ตันของเยื่อกรอง (Membrane Fouling) สามารถเกิดได้หลากหลายรูปแบบ เช่น การเกิดปรากฏการณ์คอนเซนเทรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization) การเกิดชั้นเค้ก (Cake Formation) การเกิดชั้นเจล (Gel Layer) เป็นต้น อย่างไรก็ตามยังมีสาเหตุอีกหลายประการนอกเหนือจากสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการอุดตันบนเยื่อกรองแบบนาโน เช่น คุณสมบัติเยื่อกรอง วิธีดำเนินระบบ และคุณลักษณะของน้ำดิบ เป็นต้น ทั้งนี้ นอกจากสารอินทรีย์ธรรมชาติที่อาจพบได้ในแหล่งน้ำผิวดินตามธรรมชาติแล้ว ยังสามารถพบเกลืออนินทรีย์ (Inorganic Salts) เช่น เกลือคลอไรด์ (Cl^-) เกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) เกลือฟอสเฟต (PO_4^{3-}) และเกลือคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) เช่น โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) เป็นต้น

งานวิจัยนี้ นอกจากศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยเยื่อกรองแบบนาโนแล้ว ยังสนใจศึกษาแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ซึ่งถูกใช้ในกระบวนการผลิตจากภาคอุตสาหกรรม โดยใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร สำหรับทางการแพทย์จะใช้แคลเซียมซัลเฟตเป็นส่วนผสมในการขึ้นรูปปูนพลาสเตอร์สำหรับเข้าเฝือก การเกษตรจะใช้แคลเซียมซัลเฟตสำหรับปรับปรุงดิน [10–11] โดยภายหลังกระบวนการผลิตสารเคมีดังกล่าวจะถูกชะล้างและปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ส่งผลให้น้ำเกิดความกระด้าง ทำให้คุณสมบัติของน้ำเป็นค่า ส่งผลต่อการนำไปใช้ได้ไม่ดีเท่าที่ควรและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรง เช่น ทางเกษตร ไม่เหมาะสำหรับพืชหลายชนิด รวมไปถึงการเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น [12] อย่างไรก็ตามองค์ประกอบของแคลเซียมซัลเฟต ยังคงมีผลกระทบในเรื่องของประจุที่ส่งผลต่อการรวมตัวกับสารอินทรีย์ธรรมชาติและประจุบนพื้นผิวของเยื่อกรองแบบนาโน นอกจากนี้แคลเซียมซัลเฟตยังจัดเป็นสารประกอบหลักที่ทำให้เกิดการอุดตันบนผิวหน้าเยื่อกรองเนื่องจากการเกิดผลึกตะกอน ซึ่งเป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่ละลายได้น้อย และสามารถเกิดเป็นสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดได้ในระหว่างกระบวนการกรอง โดยสารละลายที่เข้มข้นขึ้นจากการที่น้ำ

ได้ซึมแพร่ผ่านเยื่อกรอง เยื่อกรองได้กักกันสารละลายเกลือไว้จนทำให้สารละลายมีความเข้มข้นถึงจุดอิ่มตัว และตกผลึกอยู่บนผิวหน้าเยื่อกรองทำให้เกิดการอุดตันได้ [13] จากงานวิจัยที่ผ่านมา [14] ศึกษาผลของเกลือคาร์บอเนตแต่ละชนิดที่มีไอออนโลหะประจุ +1 และ +2 พบว่าสามารถรวมตัวกับประจุบวกที่มีอยู่ในน้ำทำให้เกิดเป็นตะกอน (Inorganic Scalant) และเมื่อมีการรวมตัวกันกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีอยู่ในแหล่งน้ำผิวดิน ทำให้เกิดการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโนได้ง่าย และส่งผลต่อการลดลงของอัตราการกรองของเยื่อกรองอีกด้วย ซึ่งในการดำเนินระบบเยื่อกรองนาโน ต้องควบคุมความเข้มข้นของแคลเซียมซัลเฟตไม่ให้มีความเข้มข้นเกินความสามารถในการละลายของสารเหล่านั้นและต้องไม่เกินค่าตัวบ่งชี้ การตกผลึก (Solubility Index) ซึ่งอาจระบุเป็นค่าความสามารถในการละลายในรูปผลคูณของไอออนของประจุบวกและลบ (Solubility Products: K_{sp})

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการกำจัดแคลเซียมซัลเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติจากการทำงานของเยื่อกรองแบบนาโน โดยสภาวะที่ทำการศึกษา ได้แก่ 1. ความแรงประจุของแคลเซียมซัลเฟต 2. ค่าพีเอชของสารละลาย 3. ความเข้มข้นของสารผสมระหว่างแคลเซียมซัลเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยศึกษาประสิทธิภาพการกรองจากค่าการกำจัดของสารและการลดลงของฟลักซ์เพื่อนำข้อมูลที่ได้นำไปสู่การประยุกต์ใช้เยื่อกรองแบบนาโนให้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมต่อไป นอกจากนี้ยังเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในด้านการปรับปรุงคุณภาพน้ำหรือบำบัดน้ำให้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้นในปัจจุบัน

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1. สารเคมี

สารเคมีที่ใช้เช่น แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) มีความบริสุทธิ์เท่ากับ 98% (Analytical reagent, KemAus Ltd., Australia) กรดซิตริก ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 36% (Analytical reagent, Ajax Finechem Pty Ltd., Australia) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความบริสุทธิ์เท่ากับ 99% (Analytical univar reagent, Ajax Finechem Pty

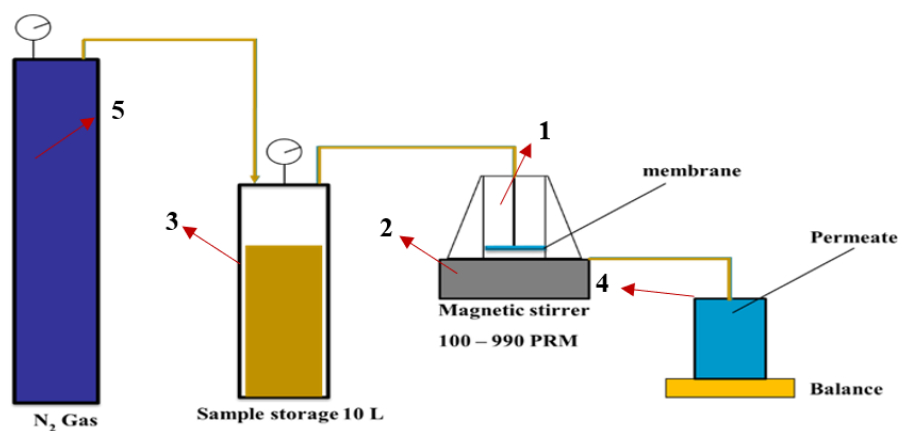
Ltd., Australia) โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) มีความบริสุทธิ์เท่ากับ 98% (Analytical univar reagent, APS Fisher Chemical, England) กรดซิตริก ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\text{H}_2\text{O}$) มีความบริสุทธิ์เท่ากับ 99.5% (Analytical reagent, Loba Ltd., India)

สารอินทรีย์ธรรมชาติ(NOM) ได้จากแหล่งน้ำผิวดินบริเวณภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ซึ่งใช้เป็นแหล่งน้ำดิบในการผลิตน้ำประปาเพื่อการอุปโภคและบริโภคภายในมหาวิทยาลัยฯ โดยจากการเก็บน้ำตัวอย่าง พบว่ามีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 4.45 mg/L มีค่าคลอกรีนแสงอัลตราไวโอเลตความยาวคลื่น 254 nm ที่ 0.185 cm^{-1} ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ $31.9 \mu\text{S}/\text{cm}$ และมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.04 จากนั้นเตรียมโดยนำน้ำดิบดังกล่าวปริมาตร 1,500 ลิตร มาผ่านเข้าสู่กระบวนการบำบัดขั้นต้นเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่มีขนาดใหญ่และกำจัดไอออนแคลเซียม และแมกนีเซียมที่ส่งผลต่อการเกิดตะกอนบนผิวเยื่อกรอง จากนั้นน้ำที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นแล้วจะนำไปผ่านกระบวนการกรองแบบออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis Membrane) เพื่อใช้เป็นการแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยกระบวนการนี้สามารถแยกน้ำออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. น้ำที่ผ่านเยื่อกรองหรือเรียกว่า เพอเมต ซึ่งน้ำส่วนนี้จะเป็นน้ำที่มีความสะอาดสูง และ 2. น้ำที่ไม่ผ่านเยื่อกรอง เรียกว่า คอนเซนเตรต ซึ่งประกอบด้วยความเข้มข้นของของสารอินทรีย์ธรรมชาติสูงจากการแยกสารอินทรีย์ของเยื่อกรองออสโม

ซิสผันกลับ โดยจะแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้นให้ได้ปริมาตร 30 ลิตร จากนั้นนำสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้นที่ได้จากขั้นตอนดังกล่าว ใส่ในภาชนะที่ปิดสนิท และแช่ภายใต้อุณหภูมิ 4°C เพื่อเก็บรักษาภาพสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้นให้อยู่ในสภาวะพร้อมใช้งานและปรับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติสำหรับการทดสอบกับเยื่อกรองแบบนาโนในขั้นต่อไป

2.2.เยื่อกรองแบบนาโน

เยื่อกรองแบบนาโน(Nanofiltration Membrane) จากบริษัท GE Water & Process Technologies รุ่น HL4040FM มีคุณสมบัติดังนี้คือเป็นเยื่อกรองแบบ Thin Film Membrane ผลิตจาก Polyamide มีขนาดรูพรุนในช่วง 150–300 Da การกำจัดเกลือ MgSO_4 อยู่ที่ระดับร้อยละ 98 ที่ 100 psig (pound per square inch gauge) มีช่วงค่าพีเอชในการดำเนินระบบที่ 3–9 และช่วงพีเอชของการทำความสะอาดอยู่ที่ 2–10.5 มีความทนทานต่อคลอรีนค่อนข้างต่ำ $<0.1 \text{ ppm}$ ความดันของการดำเนินการอยู่ที่ 70–300 psig และความดันสูงสุดที่ทนได้คือ 600 psig สำหรับแผ่นเยื่อกรองที่ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 เซนติเมตร จะเก็บรักษาโดยการนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ที่ความเข้มข้น 1% ที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและลดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่จะทำลายผิวหน้าของแผ่นเยื่อกรอง



รูปที่ 1 ชุดการทดสอบเยื่อกรองแบบการไหลปิดตายตามแนวตั้ง

สำหรับชุดการทดสอบที่ศึกษา เป็นชุดแบบไหลปิดตายตามแนวตั้ง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 ชุดการทดสอบเยื่อกรองแบบนาโนเป็นชุดแบบการไหลปิดตายตามแนวตั้งที่ได้มีการศึกษามาก่อน [15] โดยที่ชุดการทดสอบนี้ประกอบด้วย 1. Stirred Cell มีลักษณะการไหลแบบปิดตายตามแนวตั้ง (Dead-End Operation) ขนาดบรรจุ 400 mL ซึ่งภายในบรรจุด้วยไบพัตควอน (Spacer) 2. แท่นกวนแบบแม่เหล็กขับเคลื่อนแรงเหวี่ยง (Magnetic stirrer) สามารถปรับความเร็วรอบ 100–990 rpm 3. ถังอัดแรงดันทำจากสแตนเลสสตีล สามารถทนแรงดันได้ไม่น้อยกว่า 100 psig มีขนาดบรรจุ 10 ลิตร มีระบบเกจวัดความดันและยังสามารถปรับค่าของความดันได้ตั้งแต่ 5–100 psig 4. เครื่องชั่งความละเอียดสองตำแหน่งของ Mettler Toledo, Switzerland รุ่น PB3002-S อ่านค่าความละเอียดได้ 0.01 g และ 5. ถังบรรจุแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 99.9

การทำงานของชุดทดสอบเยื่อกรองแบบนาโน จะอาศัยการอัดแรงดันจากถังแก๊สไนโตรเจน เป็นแรงขับเคลื่อนสารตัวอย่างที่ถูกบรรจุไว้ในถังอัดแรงดัน จากนั้นสารตัวอย่างจะเคลื่อนไปยังท่อนำส่ง แล้วผ่านเข้ามายังชุดทดสอบแบบการไหลตายตัวตามแนวตั้ง และขณะที่ดำเนินระบบแรงดันจะดันสารตัวอย่างผ่านแผ่นเยื่อกรอง และเกิดการซึมผ่านเยื่อกรองไปยังภาชนะเก็บตัวอย่าง โดยจะเรียกน้ำในส่วนนี้ว่า เพอเมต (Permeate)

2.3. ขั้นตอนการทดสอบ

แผ่นเยื่อกรองแบบนาโนถูกล้างด้วยน้ำกลั่นและทำการติดตั้งเยื่อกรองแบบนาโนกับชุดทดสอบ จากนั้นทำการล้างเยื่อกรองผ่านระบบชุดทดสอบเยื่อกรอง โดยใช้สารละลายกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0.001 M เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่น จากนั้นล้างต่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.001 M เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างออกอีกครั้งด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าพีเอชเท่ากับค่าพีเอชของน้ำกลั่น หลังจากทีล้างทำความสะอาดเยื่อกรองตามกระบวนการข้างต้นเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้เดินระบบด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 30 นาที เพื่อเตรียมความพร้อมก่อนการทดลอง โดยในระหว่างนี้จะหาค่าอัตราการไหลเทียบกับความดันในระบบที่ความดันระดับต่างๆ เพื่อหาค่า

การซึมผ่านของเยื่อกรอง และนำข้อมูลข้างต้นไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบค่าพลาซิกก่อนและหลังล้างเยื่อกรอง ภายหลังเสร็จสิ้นผลการทดลองต่างๆ

การทดสอบด้วยน้ำตัวอย่างเป็นการนำน้ำตัวอย่างที่เข้าสู่ระบบและเริ่มต้นการทดลองโดยอาศัยแรงดันจากถังแก๊สความดันเป็นตัวขับเคลื่อนน้ำตัวอย่างจากถังเก็บน้ำตัวอย่างผ่านท่อนำส่ง ไปยังชุดทดสอบที่มีขนาด 400 mL โดยภายในจะมีแผ่นเยื่อกรองนาโนถูกติดตั้งไว้ และแรงดันจะดันสารตัวอย่างผ่านเยื่อกรองและเกิดการซึมผ่านจากชุดทดสอบไปยังภาชนะเก็บตัวอย่างเพื่อชั่งหาน้ำหนักของปริมาตรน้ำ จากการเก็บน้ำตัวอย่างในส่วนดังกล่าว (เพอเมต) เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วย 1. การวิเคราะห์หาค่าพลาซิกสารละลาย โดยจะเก็บตัวอย่างตั้งแต่เวลาที่ 0 ถึง 240 นาที โดยเก็บน้ำตัวอย่างทุก 5 นาที จนครบ 60 นาที จากนั้นเก็บทุก 10 นาที จนครบ 180 นาที หลังจาก 180 นาทีเป็นต้นไป จะเก็บทุก 20 นาที จนถึง 240 นาที และ 2. การวิเคราะห์ค่าการกำจัดแคลเซียมและซัลเฟต โดยวัดค่า Atomic Absorption Spectrometer(AAnalyst200) และค่าการกำจัดแคลเซียมซัลเฟตโดยวิธีการนำไฟฟ้า ด้วยเครื่องวัด Conductivity ซึ่งน้ำตัวอย่างจะถูกฟีดสู่ระบบและเริ่มต้นการทดลอง ทำการเก็บน้ำตัวอย่างในส่วนพลาซิกสารละลายเพื่อทดสอบความสามารถของเยื่อกรองแบบนาโนสำหรับกักสารละลายตัวอย่าง ทุกๆ 10 นาที จนครบ 60 นาที และทุกๆ 30 นาที จนครบ 240 นาที

2.4. การตรวจวิเคราะห์ผล

สารอินทรีย์ธรรมชาติจะใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง โดย ใช้ เครื่อง UV spectrophotometer (SHIMADZU UV1204, Japan) ที่ความยาวคลื่น 254 nm ส่วนความเข้มข้นของแคลเซียมซัลเฟต วิเคราะห์ได้จากเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer: AAS (PerkinElmer AAnalyst200, Waltham, MA, USA) [16] การเตรียมค่าพีเอชได้จากเครื่องวัด pH meter (Eutech pH 700 Meter, Singapore) ส่วนการหาอัตราการไหลต่อพื้นที่หน้าตัดแผ่นกรอง หรือ พลาซิกสารละลาย (Solution Flux: J_v) แสดงในหน่วย $L/(m^2 \cdot h)$ หรือ LMH ซึ่งถูกแสดงดังสมการที่ (1) และค่าการกักกัน (Rejection: R) แสดงดังสมการที่ (2) [17]

ฟลักซ์สารละลาย (Solution Flux: J_v)

$$J_v = \frac{Q_p}{A_m} \quad (1)$$

เมื่อ Q_p คืออัตราการไหลในส่วนของเพอมีเอท (L/h) และ A_m คือพื้นที่หน้าตัดของเมมเบรน (m^2)

ค่าการกำจัด (Rejection; R) แสดงดังสมการที่ (2)

$$\% R = \left(1 - \frac{C_p}{C_r}\right) \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ C_p และ C_r คือความเข้มข้นของน้ำในส่วนเพอมีเอท (mg/L) และความเข้มข้นในส่วนของน้ำรีเทนเนต (mg/L) ตามลำดับ

2.5. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดแคลเซียมซัลเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติ

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดแคลเซียมซัลเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยเยื่อกรองแบบนาโน โดยที่ค่าดังกล่าวได้ทำการศึกษาและนำข้อมูลของผลการศึกษายปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารดังกล่าวมาปรับใช้กับการศึกษาในครั้งนี้ เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการศึกษาโดยข้อมูลดังกล่าวสรุปไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดแคลเซียมซัลเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติ

ปัจจัยที่ศึกษา	ค่าที่ศึกษาของสารแคลเซียมซัลเฟต	ปัจจัยที่ควบคุม
ค่าความแรงประจุ	$CaSO_4 = 0.005, 0.01$ และ 0.015 M	NOM = 10 mg/L, pH 7
ผลของค่าพีเอช	pH = 5, 7 และ 9	NOM = 10 mg/L, I.S. = 0.01 M
ผลรวมแคลเซียมซัลเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ	$CaSO_4$ และ $CaSO_4 +$ NOM	NOM = 10 mg/L, I.S. = 0.01 M, pH 7

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1. ผลการศึกษาการลดลงของฟลักซ์สารละลาย

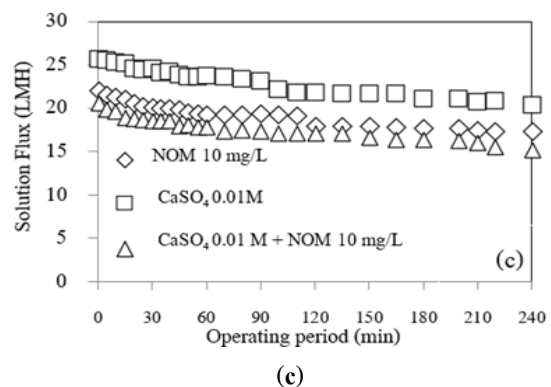
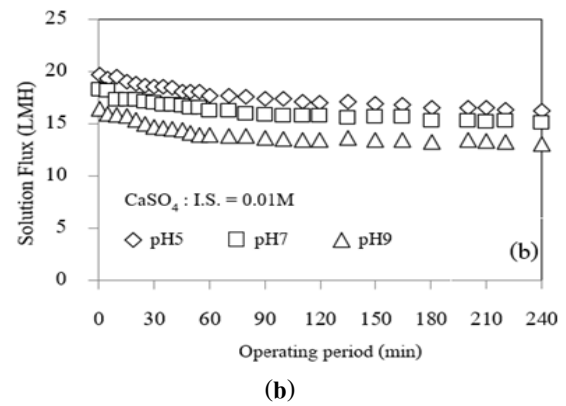
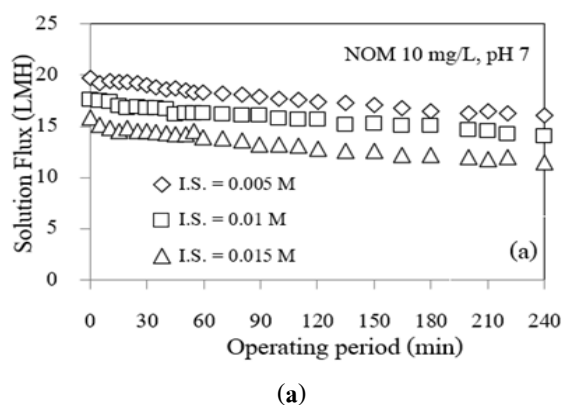
จากรูปที่ 2(a) ผลของความแรงประจุ $CaSO_4$ ต่อการลดลงของฟลักซ์โดยใช้ปริมาณน้ำตัวอย่างเท่ากับ 400 mL ความแรงประจุ $CaSO_4$ เท่ากับ 0.005, 0.01 และ 0.015 M ทำการควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 ความดันในระบบเท่ากับ 60 psig อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบภายใต้ห้องปฏิบัติการ $28 \pm 3^\circ C$ และระยะเวลาดำเนินระบบ 240 นาที พบว่าทุกค่าของความแรงประจุมีการลดลงของฟลักซ์ตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนกระทั่งเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และพบค่าฟลักซ์ที่ความแรงประจุ 0.015 M มีค่าลดลงมากที่สุด รองลงมาคือ 0.01 และ 0.005 M ตามลำดับ ซึ่งค่าความแรงประจุที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ฟลักซ์สารละลายต่ำลง กล่าวคือการเพิ่มความแรงของประจุนั้นเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของ $CaSO_4$ ให้มีค่าสูงขึ้น ทำให้เพิ่มความเข้มข้นของ $CaSO_4$ บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง

แบบนาโน และเกิดขึ้นลักษณะคล้ายชั้นเจล จึงเป็นผลทำให้แรงดันแบบออสโมติกสูงขึ้น แต่เนื่องจากว่าในระบบมีการควบคุมความดันให้คงที่ตลอดการทดลอง จึงทำให้ค่าของแรงดันจากระบบที่จะสามารถเอาชนะแรงดันออสโมติกที่เกิดจากการสะสมตัวของ $CaSO_4$ ในระหว่างการทดลองมีค่าที่ต่ำลง จึงทำให้ฟลักซ์สารละลายที่ได้มีค่าลดลง [18]

จากรูปที่ 2(b) ผลของค่าพีเอชที่มีผลต่อการลดลงของค่าฟลักซ์สารละลาย โดยศึกษาค่าพีเอช 5, 7 และ 9 ปัจจัยควบคุมใช้ $CaSO_4$ ที่ความแรงประจุ 0.01 M ใช้และควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 ความดันที่ 60 psig ตลอดการทดลอง และระยะเวลาดำเนินระบบ 240 นาที จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลของพีเอชมีผลต่อการลดลงของฟลักซ์สารละลายโดยที่พีเอช 9 มีการลดลงของฟลักซ์สารละลายมากที่สุดตามด้วย พีเอช 7 และพีเอช 5 ตามลำดับ โดยการลดลง

ของฟลักซ์สารละลายอาจเนื่องมาจากที่พีเอช 5 มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในน้ำที่มีค่าสูงกว่าที่พีเอช 7 และ 9 ซึ่ง H^+ มีผลทำให้ความหนาของชั้น Double layer ของผิวหน้าเยื่อกรองลดลง ทำให้แคลเซียมซัลเฟตที่สะสมอยู่บนผิวหน้าของเยื่อกรองสามารถเลื่อนเข้าใกล้เยื่อกรองได้มากขึ้น จึงเกิดการซึมผ่านออกมาได้ง่ายกว่า แคลเซียมที่อยู่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรองทำให้มีความเข้มข้นสะสมที่ผิวหน้าเยื่อกรองน้อยกว่าที่พีเอช 7 และพีเอช 9 ส่งผลให้ค่าความดันออสโมติกเหนือผิวหน้าของเยื่อกรองที่พีเอช 5 จึงมีค่าต่ำกว่าที่พีเอช 7 และพีเอช 9 ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านน้ำสูงกว่า [19]

จากรูปที่ 2(c) ผลการศึกษาผลร่วมระหว่าง $CaSO_4$ กับ NOM ต่อการลดลงของค่าฟลักซ์สารละลาย โดยที่ใช้ปัจจัยควบคุม $CaSO_4$ ความแรงประจุ 0.01 M ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ 10 mg/L ควบคุมค่าพีเอชที่ 7 และความดัน 60 psig ตลอดจนการทดลอง และระยะเวลาดำเนินระบบ 240 นาทีพบว่าในกรณีที่มีเติมสารละลายร่วมระหว่าง NOM + $CaSO_4$ มีการลดลงของฟลักซ์สารละลายมากกว่าในกรณีที่มีเฉพาะ $CaSO_4$ เพียงอย่างเดียว เพราะนอกจากชนิดของสารละลาย $CaSO_4$ จะมีส่วนทำให้ค่าความดันออสโมติกของระบบสูงขึ้นระหว่างการกรอง หรืออาจจะปิดรูพรุนของเยื่อกรองจากสารอินทรีย์ในน้ำธรรมชาติที่รวมอยู่ด้วย เมื่อเกิดการสะสมตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติบนผิวหน้าเยื่อกรองน้ำจึงไหลผ่านได้น้อยลง ส่งผลให้ค่าฟลักซ์สารละลายลดลงด้วย



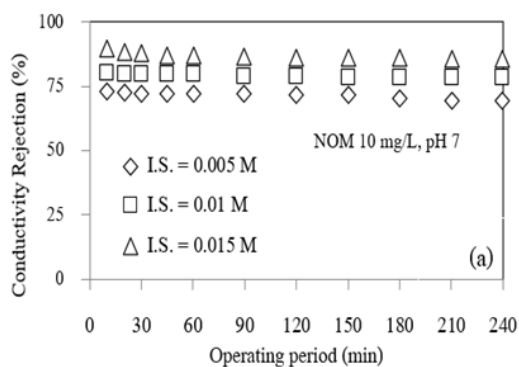
รูปที่ 2 ผลการศึกษาการลดลงของฟลักซ์สารละลายที่ปัจจัยต่างๆ (a) ความแรงประจุ (b) พีเอช (c) ผลร่วมระหว่าง $CaSO_4$ กับ NOM

3.2.ผลการศึกษาการกำจัด $CaSO_4$ ร่วมกับ NOM

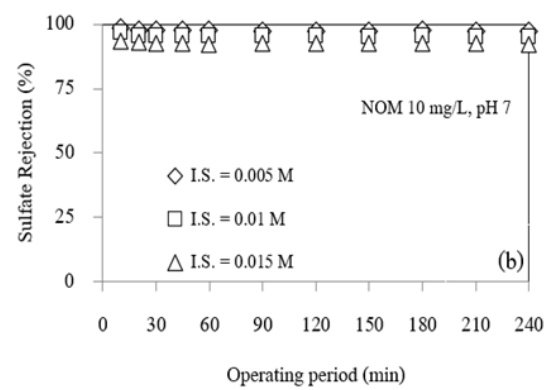
จากรูปที่ 3(a) แสดงผลของความแรงประจุ $CaSO_4$ ต่อการกำจัด โดยพิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า ความแรงประจุ 0.005, 0.01 และ 0.015 M ทำการควบคุมค่า NOM ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 mg/L ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ความดันในระบบเท่ากับ 60 psig และระยะเวลาดำเนินระบบ 240 นาที การทดลองพบว่าการเพิ่มความแรงประจุทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ร้อยละ 69.32, 78.63 และ 85.63 ตามลำดับ ค่าการกำจัดเกลือที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย $CaSO_4$ ที่เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มทำให้สารละลายแคลเซียมซัลเฟตสะสมบริเวณผิวหน้าเยื่อกรองเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากกลไกการกำจัดค่าการนำไฟฟ้าเกิดจากแรงผลักทางไฟฟ้า (Electrostatic repulsion) ของประจุลบจากซัลเฟต (SO_4^{2-}) และประจุลบที่ผิวหน้าเยื่อกรอง ส่งผลทำให้สามารถกำจัดประจุบวกของแคลเซียมได้มาก

ขึ้นเช่นกัน เนื่องจากรักษาสภาพสมดุลของประจุระหว่างประจุบวกกับประจุบนผิวหน้าของเยื่อกรอง กล่าวคือเนื่องจากประจุลบของไอออนลบถูกกำจัดได้ด้วยมีแรงดึงดูดกับประจุบวกของไอออนบวก ทำให้สามารถกำจัดไอออนลบได้ [20] นอกจากนี้อาจเกิดการสะสมของชั้นเจลระหว่างประจุบวกของแคลเซียมและประจุลบของสารอินทรีย์ธรรมชาติได้มากขึ้นสอดคล้องกับผลของค่าฟลักซ์สารละลายที่ลดลง

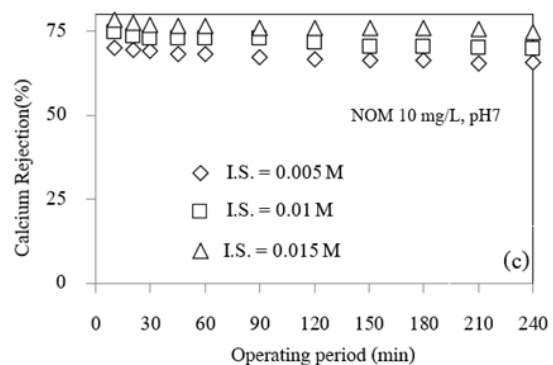
จากรูปที่ 3(b)–(c) ผลการศึกษาความแรงประจุของ CaSO_4 ต่อการกำจัดซัลเฟตและแคลเซียม ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มความแรงประจุทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดประจุซัลเฟตสูงอยู่ที่ร้อยละ 97.33, 95.21 และ 92.29 ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่าร้อยละ 90 อาจเกิดจากแรงผลักของประจุลบของแผ่นเยื่อกรอง ขณะที่ผลของการกำจัดแคลเซียมเพิ่มขึ้นตามความแรงประจุอยู่ที่ร้อยละ 65.61, 69.59 และ 74.56 ตามลำดับ โดยการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าแรงผลักระหว่างประจุลบของเยื่อกรองแบบนาโนกับสารละลาย CaSO_4 มีสูงมาก กล่าวคือเกิดอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกละลายและเยื่อกรอง เมื่อการทดลองใช้เยื่อกรองที่มีประจุเป็นลบ ทำให้การแพร่ผ่านเยื่อกรองของสารละลาย CaSO_4 ซึ่งผลทำให้ทราบถึงความเกี่ยวข้องระหว่างประจุลบทั้งของเยื่อกรองและประจุลบของซัลเฟต ซึ่งมีไอออนประจุสองลบ (Divalent anions) จะถูกผลักโดยเยื่อกรองที่มีประจุลบ ที่มีความเสถียรมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไอออนที่มีประจุหนึ่งลบ (Monovalent anions) [14]



(a)



(b)



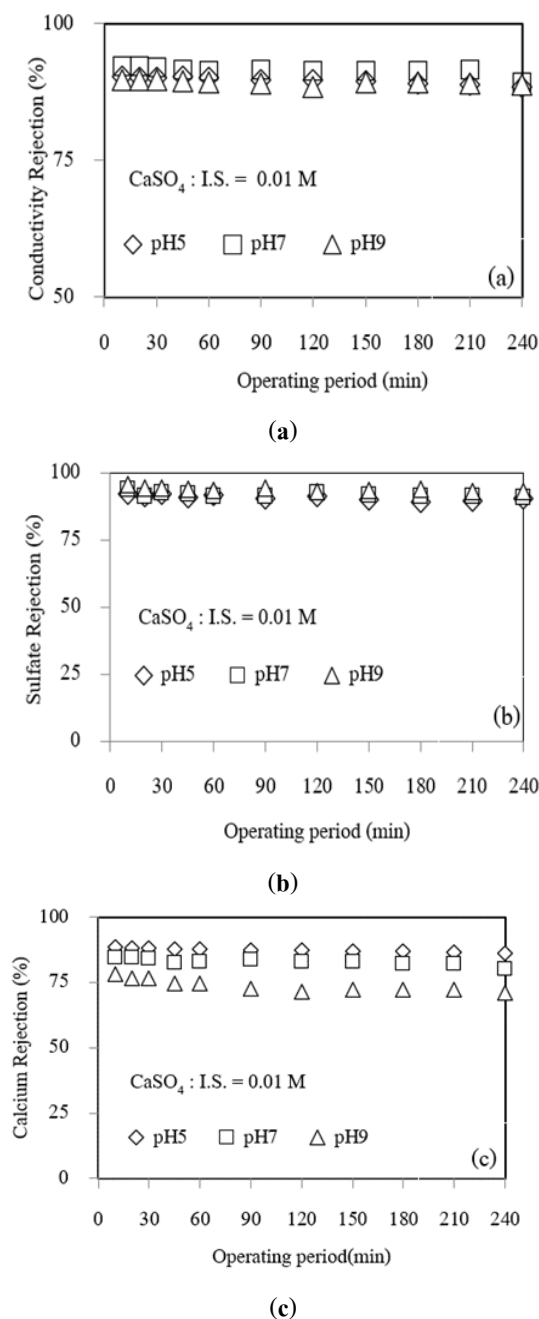
(c)

รูปที่ 3 ผลของความแรงประจุ CaSO_4 ต่อการกำจัด เมื่อ (a) พิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า (b) ความแรงประจุ CaSO_4 ต่อการกำจัดซัลเฟต (c) ความแรงประจุ CaSO_4 ต่อการกำจัดแคลเซียม

จากรูปที่ 4(a) ผลของพีเอชต่อการกำจัด CaSO_4 ที่ 5, 7 และ 9 โดยพิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า บัญญัติที่ควบคุมคือความแรงประจุ CaSO_4 เท่ากับ 0.01 M และไม่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติ ความดันในระบบเท่ากับ 60 psig เมื่อเดินระบบครบ 240 นาที พบว่ามีค่าการกำจัดที่ใกล้เคียงอยู่ในช่วงร้อยละ 88.43, 89.37 และ 88.88 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4(b)–(c) ผลของพีเอชต่อการกำจัดซัลเฟตและแคลเซียม ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มค่าพีเอชจาก 5 ถึง 9 ทำให้เยื่อกรองแบบนาโนมีความสามารถในการกำจัดซัลเฟตเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่ากับร้อยละ 90.65, 90.76 และ 92.89 ตามลำดับ ส่วนค่าการกำจัดแคลเซียมมีค่าลดลงอยู่ที่ร้อยละ 86.10, 80.27 และ 71.13 ตามลำดับ ซึ่งผลจากการทดลองที่ได้พบว่าในทุกกระดับค่าพีเอชให้ค่าการกำจัดซัลเฟตอยู่ในระดับ

ที่เพิ่มเล็กน้อยจากการเพิ่มค่าพีเอชส่งผลให้ประจุลบของแผ่นเยื่อกรองสามารถผลักประจุลบของซัลเฟตได้มากขึ้น ทำให้มีการกำจัดสูงกว่าร้อยละ 90 ในส่วนของค่าการกำจัดแคลเซียมมีแนวโน้มในการกำจัดที่ลดลง เมื่อค่าพีเอชที่สูงขึ้นเพื่อรักษาสภาพสมดุลของประจุ

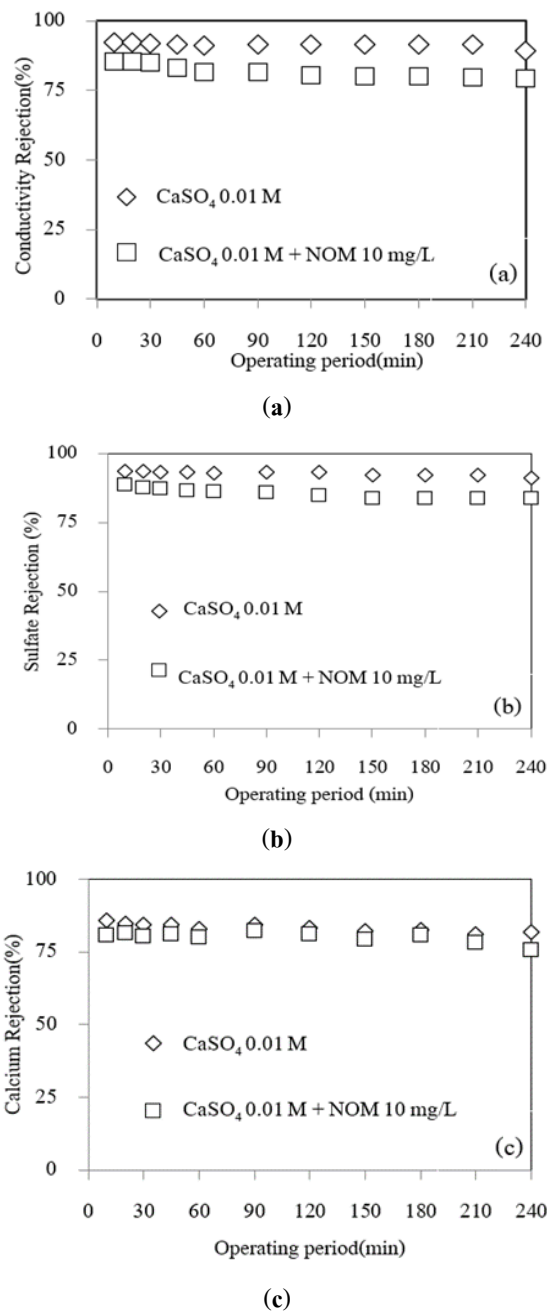


รูปที่ 4 ผลของผลของพีเอชต่อการกำจัด CaSO_4 โดย (a)พิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า (b) ความแรงประจุ CaSO_4 ต่อการกำจัดซัลเฟต (c) ความแรงประจุ CaSO_4 ต่อการกำจัดแคลเซียม

จากรูปที่ 5(a) ผลร่วมระหว่าง CaSO_4 กับ NOM ที่มีผลต่อการกำจัดซัลเฟต โดยพิจารณาจากการนำไฟฟ้า ปัจจัยที่ควบคุมคือ ความแรงประจุ CaSO_4 เท่ากับ 0.01 M ทำการควบคุมค่าสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 mg/L ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ความดันในระบบเท่ากับ 60 psig การดำเนินระบบครบ 240 นาที พบว่าสารละลาย CaSO_4 เพียงอย่างเดียวมีค่าการกำจัดอยู่ที่ร้อยละ 89.37 และผลร่วมระหว่าง CaSO_4 + NOM มีค่าการกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ร้อยละ 79.58

จากรูปที่ 5(b)–(c) ผลร่วมของ CaSO_4 กับ NOM ต่อการกำจัดซัลเฟตและแคลเซียม ปัจจัยที่ควบคุมคือ ความแรงประจุ CaSO_4 เท่ากับ 0.01 M ทำการควบคุมค่าสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 mg/L ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ความดันในระบบเท่ากับ 60 psig การดำเนินระบบครบ 240 นาที พบว่าในกรณีที่ใช้เฉพาะ CaSO_4 เพียงอย่างเดียว มีค่าการกำจัดซัลเฟตอยู่ที่ร้อยละ 91.19 และในกรณีที่ใช้สารละลาย CaSO_4 + NOM มีค่าการกำจัดซัลเฟตอยู่ที่ร้อยละ 83.81 สำหรับการกำจัดแคลเซียม พบว่าในกรณีที่ใช้เฉพาะ CaSO_4 พบค่าการกำจัดอยู่ที่ร้อยละ 81.80 ส่วนในกรณีที่ใช้สาร CaSO_4 + NOM พบค่าการกำจัดแคลเซียมอยู่ที่ร้อยละ 75.80 และจากข้อมูลเบื้องต้นทราบว่า การกำจัดบนเยื่อกรองแบบนาโนเกิดจากกลไกการผลักกันของประจุ อย่างไรก็ตามมีการศึกษาพบว่าการกำจัด NOM ด้วยเยื่อกรองแบบนาโนจะอาศัยหลักการกีดขนาด (Size Exclusion) มากกว่ากลไกการผลักกันของประจุ (Charge Repulsion) [20] อย่างไรก็ตามผลการทดลองสามารถอธิบายการจับยึดของสารอินทรีย์ธรรมชาติกับไอออนประจุสองบวก ด้วยกลไกการเกิดสะพานเชื่อมระหว่างประจุลบของสารอินทรีย์ธรรมชาติและประจุลบบนพื้นผิวของเยื่อกรองแบบนาโน อาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากำจัดประจุบวกของแคลเซียม อย่างไรก็ตามผลการทดลองนี้ไม่สามารถแสดงถึงกลไกสะพานเชื่อมได้ชัดเจนนัก เนื่องจากกลไกการกำจัดสารอินทรีย์

ธรรมชาติ ส่วนใหญ่เกิดจากการคัดแยกด้วยขนาดรูพรุนของเยื่อกรอง



รูปที่ 5 ผลรวม CaSO_4 กับ NOM ที่ส่งผลต่อการกำจัด โดย (a) พิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า (b) ผลรวม CaSO_4 กับ NOM และ (c) ผลรวมระหว่าง CaSO_4 กับ NOM

4. สรุป

1. ผลของความแรงประจุแคลเซียมซัลเฟต มีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตสูงอยู่ในช่วงร้อยละ 92-97

ขณะที่การกำจัดแคลเซียมให้ค่าต่ำลงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 65-75 เมื่อเพิ่มความแรงประจุทำให้ค่าการกำจัดจากการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและค่าการกำจัดอยู่ระหว่างค่าการกำจัดของแคลเซียมและซัลเฟตประมาณร้อยละ 69-86

2. ผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช มีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตไม่ต่ำกว่า 90% (ร้อยละ 90 - 93) ส่วนการกำจัดแคลเซียมมีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำกว่าเล็กน้อย สอดคล้องกับผลของความแรงประจุ ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 71-86

3. ผลรวมของแคลเซียมซัลเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ พบว่าในกรณีที่ไม่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติร่วมและไม่รวม ให้ค่าการกำจัดซัลเฟตอยู่ที่ร้อยละ 91.19 และ 83.81 ตามลำดับ ส่วนค่าการกำจัดแคลเซียมอยู่ที่ร้อยละ 75.80 และ 81.80 ตามลำดับ โดยผลรวมของสารอินทรีย์ธรรมชาติทำให้ค่าการกำจัดของซัลเฟตและแคลเซียมลดลง

4. การเพิ่มความแรงประจุ มีผลทำให้ฟลักซ์สารละลายต่ำลงซึ่งการเพิ่มความแรงของประจุนั้นเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย CaSO_4 ให้มีค่าสูงขึ้น ทำให้เกิดการสะสมตัวของสารบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองแบบนาโน และผลรวมระหว่างแคลเซียมซัลเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ส่งผลให้อัตราการกรองลดลง

5. การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียมซัลเฟต ควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นร่วมด้วย เพื่อทดสอบผลของเยื่อกรองแบบนาโน เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ และสารอินทรีย์ชนิดอื่น รวมถึงศึกษารูปแบบของการอุดตันที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละสภาวะ และมีการศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบการทดลองแบบตามขวาง (Cross flow) เพื่อในอนาคตจะสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน และปรับใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากหลักสูตรวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Pelekani, G. Newcombe, V. L. Snoeyink, C. Hepplewhite, S. Assemi and R. Beckett, "Characterization of natural organic matter using high performance size exclusion chromatography," *Environmental Science & Technology*, vol. 33, no. 16, pp. 2807–2813, 1999, doi: 10.1021/es9901314.
- [2] S. Crittenden, R. Reifemberger, J. Hillebrecht, R. Birge, D. Inerowicz and F. Regnier, "Soft lithography based micron-scale electrophoretic patterning of purple membrane," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, no. 8, pp. 1494–1497, 2005, doi: 10.1088/0960-1317/15/8/016.
- [3] World Health Organization (WHO). Guidelines for Drinking-water Quality. 4th Edition. Geneva: WHO Press, pp. 427–430, 2012
- [4] T. K. Nissinen, I. T. Miettinen, P. J. Martikainen and T. Vartiainen, "Molecular size distribution of natural organic matter in raw and drinking waters," *Chemosphere*, vol. 45, no. 6, pp. 865–873, 2001, doi: 10.1016/S0045-6535(01)00103-5.
- [5] A. Contreras, A. Kim and Q. Li, "Combined fouling of nanofiltration membranes: Mechanisms and effect of organic matter," *Journal of Membrane Science*, vol. 327, pp. 87–95, 2009, doi: 10.1016/j.memsci.2008.11.030.
- [6] B. M. Watson and C. D. Hornburg, "Low-energy membrane nanofiltration for removal of color, organics and hardness from drinking water supplies," *Desalination*, vol. 72, no. 1–2, pp. 11–22, 1989, doi: 10.1016/0011-9164(89)80024-4.
- [7] I. C. Escobar and A. A. Randall, "Influence of NF on distribution system biostability," *Journal AWWA*, vol. 91, no. 6, pp. 76–89, 1999, doi: 10.1002/j.1551-8833.1999.tb08650.x.
- [8] S. J. Duranceau, J. S. Taylor and L. A. Mulford, "SOC Removal in a Membrane Softening Process," *Journal AWWA*, vol. 84, no. 1, pp. 68–78, 1992, doi: 10.1002/j.1551-8833.1992.tb07287.x.
- [9] J. S. Vrouwenvelder, J. W. N. M. Kappelhof, S. G. J. Heijman, J. C. Schippers and D. van der Kooij, "Tools for fouling diagnosis of NF and RO membranes and assessment of the fouling potential of feed water," *Desalination*, vol. 157, no. 1, pp. 361–365, 2003, doi: 10.1016/S0011-9164(03)00417-X.
- [10] G. V. Haute, E. Caberlon, E. de Mesquita, F. C. Pedrazza, L. Martha and B. A. de Oliveira, "Gallic acid reduces the effect of LPS on apoptosis and inhibits the formation of neutrophil extracellular traps," *Toxicology in Vitro*, vol. 30, no. 1, pp. 309–317, 2015, doi: 10.1016/j.tiv.2015.10.005
- [11] K. Tyrpien, C. Dobosz, A. Chosciewicz, A. Ciolecka, M. Wielkoszynski, T. Janoszka and D. Bodzek, "Investigation of nicotine transformation products by densitometric TLC and GC-MS," *Acta Chromatographica*, vol. 13, pp. 154–160, 2003.
- [12] N. M. Al-Bastaki, "Performance of advanced methods for treatment of wastewater: UV/TiO₂, RO and UF," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 43, no. 7, pp. 935–940, 2004, doi: 10.1016/j.cep.2003.08.003.
- [13] M. Bystrianský, O. Nir, M. Sir, Z. Hongsajkova, R. Vurm, P. Hrychova and B. Van der Bruggen, "The presence of ferric iron promotes calcium sulphate scaling in reverse osmosis processes," *Desalination*, vol. 393, pp. 115–119, 2016, doi: 10.1016/j.desal.2016.03.003.
- [14] C. Charoensuk, S. Mattaraj, K. Ratanapongleka and C. Jarusutthirak, "Effects of Natural Organic Matter and Carbonate Salts on the Operation of

- Nanofiltration Membrane,” *Journal of Industrial Technology of Thailand*, vol. 5, no. 2, pp. 26–37, 2015.
- [15] P. Wu and M. Imai, “Novel biopolymer composite membrane involved with selective mass transfer and excellent water permeability,” in *Advancing Desalination*, London, United Kingdom: IntechOpen, 2012, ch. 3, pp. 57–82.
- [16] J. Decarolis, S. Hong and J. Taylor, “Fouling behavior of a pilot scale inside-out hollow fiber UF membrane during dead-end filtration of tertiary wastewater,” *Journal of membrane science*, vol. 191, no. 1–2, pp. 165–178, 2001, doi: 10.1016/S0376-7388(01)00455-0.
- [17] J. E. Kilduff, S. Mattaraj and G. Belfort, “Flux decline during nanofiltration of naturally-occurring dissolved organic matter: effects of osmotic pressure, membrane permeability, and cake formation,” *Journal of membrane science*, vol. 239, no. 1, pp. 39–53, 2004, doi: 10.1016/j.memsci.2003.12.030.
- [18] N. Park, S. Lee, S. R. Yoon, Y. H. Kim and J. Cho, “Foulants analyses for NF membranes with different feed waters: coagulation/sedimentation and sand filtration treated waters,” *Desalination*, vol. 202, no. 1–3, pp. 231–238, 2007, doi: 10.1016/j.desal.2005.12.060.
- [19] W. Saikaew, S. Mattaraj and R. Jiratananon, “Nanofiltration performance of lead solutions: effects of solution pH and ionic strength,” *Water Supply*, vol. 10, no. 2, pp. 193–200, 2010, doi: 10.2166/ws.2010.062.
- [20] A. Lhassani, M. Rumeau, D. Benjelloun and M. Pontie, “Selective demineralization of water by nanofiltration application to the defluorination of brackish water,” *Water research*, vol. 35, no. 13, pp. 3260–3264, 2001, doi: 10.1016/S0043-1354(01)00020-3.

การควบคุมอุณหภูมิของแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเตาเผาขยะขนาดเล็กด้วย กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง

Temperature Control of Thermoelectric Generators for Small Incinerators With Modified Fruit Fly Optimization Algorithm (MFOA)

สมประสงค์ ศรีวิชัย¹ รัสมิทัต แผนสมบุญ² และ สุภกิต แก้วดวงตา^{1,*}

¹ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ช้างเผือก เมือง เชียงใหม่ 50300

² ศูนย์เทคโนโลยีเพื่อความมั่นคงของประเทศและการประยุกต์เชิงพาณิชย์, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

แห่งชาติ (สวทช.) คลองหนึ่ง คลองหลวง ปทุมธานี 12120

Somprasong Sriwichai¹, Rassamitut Pansomboon² and Supakit Kawdungta^{1,*}

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna,

Chang Phueak, Mueang Chiang Mai, Chiang Mai, 50300, Thailand

² National Security and Dual-Use Technology Center, National Science and Technology Development Agency,

Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani, 12120, Thailand

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

Received: Dec 28, 2021; Revised: Mar 02, 2022; Accepted: Apr 22, 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอการใช้งานแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการแปลงพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากเตาเผาขยะมาเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ประโยชน์และใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงในการควบคุมการระบายความร้อนบนพื้นผิวด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก โดยระบบการแปลงพลังงานนี้ประกอบไปด้วย แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก เทอร์โมคัปเปิล ระบบระบายความร้อน ตัวตรวจจับระดับแรงดัน และไมโครคอนโทรลเลอร์ จากผลการสร้างและทดสอบพบว่ากระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงสามารถที่จะควบคุมการระบายความร้อนบนพื้นผิวด้านเย็นให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิบนพื้นผิวทั้งสองด้านได้สูงสุดและระบบการแปลงพลังงานสามารถที่จะให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าที่มีแรงดันสูงสุดเท่ากับ 18V กระแสเท่ากับ 0.85A ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิบนพื้นผิวทั้งสองด้านเท่ากับ 128°C และข้อมูลของการแปลงพลังงานนี้จะถูกส่งไปบันทึกบนฐานข้อมูลด้วยการสื่อสารแบบอินเทอร์เนตในทุกสรรพสิ่ง

คำสำคัญ: เทอร์โมอิเล็กทริก, เตาเผาขยะ, กระบวนการหาค่าที่เหมาะสม, กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุง, การสื่อสารแบบอินเทอร์เนตในทุกสรรพสิ่ง

Abstract

This paper presents the application of thermoelectric generator (TEG) plates for converting the thermal energy generated by the incinerator into electrical energy for utilization and a modified fruit fly optimization algorithm (MFOA)

is employed to control the cooling system on the cold side of the thermoelectric generator plates. This energy conversion system consists of a thermoelectric generator plate, thermocouple, cooling system, voltage sensor, and microcontroller. From the implementation results, it was found that a modified fruit fly optimization algorithm can be used to control the cooling on the cold side surface to achieve the maximum temperature difference on both surfaces. The energy conversion system can generate electrical energy with a voltage of 18 V, a current of 0.85 A, at a temperature difference on both surfaces of 128°C. Moreover, the data of this energy conversion will be recorded on the database with the internet of things (IoT) communication.

Keywords: Thermoelectric, Incinerators, Optimization Algorithm, Modified Fruit Fly Optimization Algorithm (MFOA), Internet of Things

1. บทนำ

ในปัจจุบันแหล่งพลังงานต่างๆ ก็เป็นองค์ประกอบหลักในการขับเคลื่อนประเทศในด้านเศรษฐกิจ อุตสาหกรรม การขนส่งคมนาคม สาธารณูปโภคและอุปโภค ด้วยเช่นกัน หนึ่งในพลังงานที่มีการใช้งานจำนวนมากทั้งในภาคอุตสาหกรรม ธุรกิจ และครัวเรือน คือ พลังงานไฟฟ้า ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่มีการใช้งานในปัจจุบันสามารถผลิตได้จากแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า เช่น เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน และถ่านหิน เป็นต้น โดยแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าดังกล่าวเกิดจากการทับถม และย่อยสลายทางธรรมชาติที่ใช้ระยะเวลาอันยาวนาน อย่างไรก็ตามในอนาคตอัตราความต้องการใช้พลังงานย่อมมีความต้องการเพิ่มมากขึ้นและมีความสนใจผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ดังนั้นหากเลือกใช้การผลิตไฟฟ้าจากแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าหลัก อาจก่อให้เกิดการปัญหาขาดแคลนพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าทางธรรมชาติลดลงหรือหมด รวมถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากกระบวนการการผลิตได้จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการวิจัยและพัฒนาแหล่งพลังงานทางเลือกอื่น (Alternative Energy) หรือ พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) เพื่อทดแทนหรือลดปริมาณการใช้แหล่งพลังงานหลักและเป็นแหล่งพลังงานสะอาด เช่น พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) พลังงานน้ำ (Hydroelectric Energy) พลังงานลม (Wind Energy) พลังงานความร้อน (Thermal Energy) และ พลังชีวมวล (Biomass Energy) เป็นต้น [1],[2] สำหรับแหล่งพลังงานผลิตไฟฟ้าทางเลือกอย่าง

หนึ่งที่น่าสนใจและมีการนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย คือ แผ่นกานิตเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Generator: TEG) โดยอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งลดการสูญเสียพลังงานความร้อนอันเกิดจากกระบวนการต่างๆ ไปอย่างไร้ประโยชน์ เช่น การแปลงพลังงานความร้อนจากท่อไอเสียรถหรือเครื่องยนต์ หรือพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ต่างๆ เป็นพลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติการของแผ่นกานิตเทอร์โมอิเล็กทริกกับอุปกรณ์กำเนิดพลังงานแบบอื่นๆ พบว่าแผ่นกานิตเทอร์โมอิเล็กทริกมีอายุการใช้งานยืนยาว ไม่มีส่วนประกอบที่มีการเคลื่อนไหว รวมถึงไม่มีการปล่อยมลพิษที่เป็นอันตรายต่อสถานะแวดล้อม และมีต้นทุนการบำรุงรักษาต่ำ เป็นต้น [3–6] จากคุณสมบัติดังกล่าวได้มีการนำเสนอการศึกษาและการประยุกต์ใช้งานแผ่นกานิตเทอร์โมอิเล็กทริกในบทความทางวิชาการอย่างแพร่หลาย โดยแสดงในหัวข้อที่ 2

บทความวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานแผ่นกานิตเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับเตาเผาขยะเพื่อแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า เพื่อใช้ประโยชน์และทำการศึกษาการควบคุมความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของแผ่นกานิตเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยการใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ปรับปรุงเพื่อให้ได้ค่ากำลังงานสูงสุด โดยแสดงผลการวิเคราะห์การดำเนินการในหัวข้อที่ 3 ผลการทดสอบในหัวข้อที่ 4 และ สรุปผลในหัวข้อที่ 5 ตามลำดับ

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. บทความวิจัยที่มีมาก่อน

จากการศึกษาการประยุกต์ใช้งานแผ่นกึ่งตัวนำเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่าในเอกสารอ้างอิงที่ [7] ได้มีการนำเสนอการศึกษาประเมินศักยภาพของการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งในวัฏจักรดีเซล (Diesel Cycle) และกังหันก๊าซ (Gas Turbine) ที่มีอยู่ในภาคอุตสาหกรรมการผลิตของประเทศไทยจากการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลออกมาทั้งหมดพบว่าจะสามารถการผลิตไฟฟ้าสุทธิที่สอดคล้องกันได้ประมาณ 100 MWe และได้มีการนำเสนอแบบจำลองสามมิติของแผ่นกึ่งตัวนำเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนจากเครื่องยนต์ [8] อีกทั้งยังได้มีการรวบรวมข้อมูลการนำแผ่นกึ่งตัวนำเทอร์โมอิเล็กทริกไปใช้งานสำหรับการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ ในเอกสารอ้างอิงที่ [9] ไม่ว่าจะเป็นการติดตั้งใช้งานภายในขั้วยานพาหนะเพื่อเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นที่ท่อไอเสียเป็นพลังงานไฟฟ้าแล้วนำกลับมาใช้ภายในรถยนต์โดยมีหลายบริษัทที่ได้ทำการทดลองได้แก่ การทดลองนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์ของรถบรรทุกได้กำลังงานทั้งหมด 1 kW [10] การติดตั้งในรถยนต์คันแบบรุ่น BMW X6 [11] และการติดตั้งใช้งานบนมอเตอร์ไซค์ [12] เป็นต้น

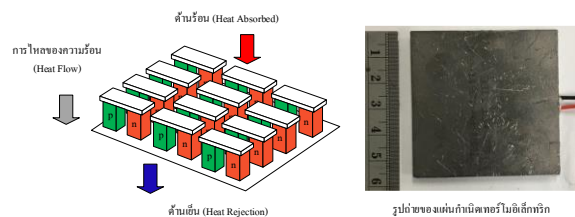
2.2. ทฤษฎีแผ่นกึ่งตัวนำเทอร์โมอิเล็กทริก

แผ่นกึ่งตัวนำเทอร์โมอิเล็กทริกมีลักษณะเป็นอุปกรณ์โซลิดสเตต (Solid State) ที่สามารถให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ด้านทั้งสองของแผ่นได้โดยตรงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) ถูกค้นพบโดย Thomas Johann Seebeck ในปี ค.ศ. 1822 [13] โดยทั่วไปแผ่นกึ่งตัวนำเทอร์โมอิเล็กทริกจะถูกสร้างขึ้นด้วยวัสดุประเภทเทลลูไรียม (Tellurium: Te) บิสมัท (Bismuth: Bi) และ พลวง (Antimony: Sb) เป็นต้น [9] **รูปที่ 1** แสดงถึงแผนภาพและรูปถ่ายของแผ่นกึ่งตัวนำเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบไปด้วยคู่ของสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n ต่อรวมกันโดยจุดเชื่อมต่อด้านบนเรียกว่า ด้านร้อน (Heat Absorbed) ใช้รับความร้อนในกรณี

ปรากฏการณ์ซีเบคและจุดเชื่อมต่อด้านล่างเรียกว่าด้านเย็น (Heat Rejection) ใช้ระบายความร้อนออกในกรณี ปรากฏการณ์ซีเบคเมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิของทั้งสองด้านและมีความคงที่จะทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้า กระแสตรงในรูปของแรงดันและกระแสตรงแสดงในสมการที่ (1) [13],[14]

$$V = \alpha \Delta T \quad (1)$$

เมื่อ V คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็น V α คือค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีหน่วยเป็น V/K^{-1} และ ΔT คือความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านทั้งสองของแผ่นกึ่งตัวนำเทอร์โมอิเล็กทริกมีหน่วยเป็น K จากสมการที่ (1) จะเห็นได้ว่าเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิของทั้งสองด้านมากขึ้นก็จะทำให้สามารถเกิดแรงดันเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยแต่อย่างไรก็ตามต้องไม่มากเกินไปกว่าค่าอุณหภูมิสูงสุดที่แผ่นกึ่งตัวนำเทอร์โมอิเล็กทริกจะสามารถรับได้



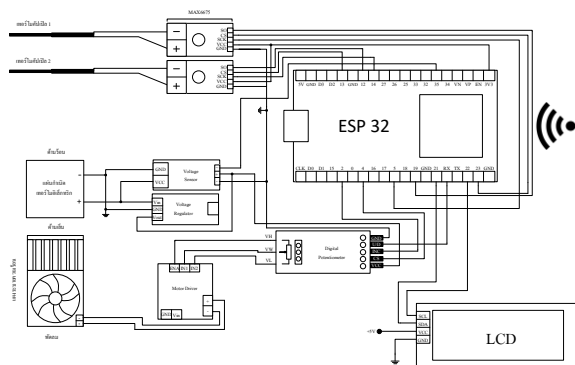
รูปที่ 1 แผนภาพและรูปถ่ายของแผ่นกึ่งตัวนำเทอร์โมอิเล็กทริก

จากหลักการดังกล่าวในการใช้งานแผ่นกึ่งตัวนำเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าสามารถทำได้ด้วยการนำด้านร้อนของแผ่นกึ่งตัวนำเทอร์โมอิเล็กทริกยึดติดกับแหล่งกำเนิดความร้อนและด้านเย็นของแผ่นกึ่งตัวนำเทอร์โมอิเล็กทริกยึดติดกับแผ่นระบายความร้อน แล้วระบายความร้อนด้วยพัดลมเมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิของทั้งสองด้านจะเป็นผลทำให้แผ่นกึ่งตัวนำเทอร์โมอิเล็กทริกเริ่มทำงานและสามารถที่จะสร้างแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้แต่อย่างไรก็ตามหากความแตกต่างของอุณหภูมินี้มากเกินไปอาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่อแผ่นกึ่งตัวนำเทอร์โมอิเล็กทริกได้

ในหัวข้อถัดไป นำเสนออุปกรณ์ในการวิจัย การออกแบบระบบการเชื่อมของระบบแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเตาเผาขยะ และผังการทำงานของระบบแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเตาเผาขยะ ตามลำดับ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

จากหลักการของแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกในหัวข้อที่ 2 ในบทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานกับเตาเผาขยะเพื่อแปลงพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาขยะเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งระบบของแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกที่นำเสนอที่ได้ออกแบบในบทความวิจัยนี้ประกอบด้วย เทอร์โมคัปเปิล วงจรตรวจวัดระดับแรงดัน วงจรควบคุมความเร็วพัดลม จอแสดงผล และไมโครคอนโทรลเลอร์ (ESP32) โดยแสดงแผนผังการเชื่อมต่อของแต่ละส่วนเพื่อทำงานร่วมกันเป็นระบบของแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกในรูปที่ 2 และแสดงผังการทำงานของระบบแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเตาเผาขยะ



รูปที่ 2 ออกแบบการเชื่อมต่อของระบบแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเตาเผาขยะ

จากการออกแบบการเชื่อมต่อระบบในรูปที่ 2 และ ผังการทำงานในรูปที่ 3 มีหลักการทำงานดังนี้ เมื่อระดับอุณหภูมิทั้งสองด้านของแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกจะถูกตรวจวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล 2 ตัว และส่งระดับอุณหภูมิไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 พร้อมกันนี้หากระดับของอุณหภูมิทั้งสองด้านมีความแตกต่างกันจนสามารถทำให้แผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกให้กำเนิดระดับ

แรงดันไฟฟ้าได้ระดับแรงดันไฟฟ้านี้จะถูกส่งไปจัดเก็บที่แบตเตอรี่เพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป ในขณะที่เดียวกันระดับแรงดันที่เกิดขึ้นนี้จะถูกตรวจวัดและรายงานผลไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 สามารถรวบรวมข้อมูลได้ทั้งความแตกต่างของอุณหภูมิและระดับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะทำการประมวลผล 2 ส่วน คือ 1. ทำการเชื่อมต่อเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WiFi) และทำการส่งข้อมูลไปจัดเก็บบนฐานข้อมูล Google Sheet 2. ทำการประมวลผลการควบคุมความเร็วของพัดลมเพื่อระบายความร้อนที่ด้านเย็นเนื่องจากหลักการของปรากฏการณ์ซีเบคของแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกตามสมการที่ (1) จะเห็นได้ว่าเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิของด้านร้อนและด้านเย็นมากขึ้นก็จะทำให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกมากยิ่งขึ้นแต่ในทางปฏิบัติอุณหภูมิด้านร้อนนั้นจะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่รับเข้ามาและอุณหภูมิของด้านเย็นก็ไม่คงที่เนื่องมาจากอุณหภูมิด้านร้อนที่ถูกส่งผ่านเข้ามาจึงจำเป็นที่จะต้องระบายความร้อนที่แผ่นด้านเย็นตามการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเพื่อให้ความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งสองด้านคงที่และจะทำให้ได้ค่าแรงดันขาออกสูงที่สุดดังแสดงในสมการที่ (2)

$$V_{max} = \alpha(T_{H,max} - T_{C,min}) \quad (2)$$

เมื่อ V_{max} คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงที่สุด $T_{H,max}$ คืออุณหภูมิที่แผ่นด้านร้อน และ $T_{C,min}$ คืออุณหภูมิที่แผ่นด้านเย็น ดังนั้นเมื่อต้องการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่และมากที่สุดจะต้องควบคุมอุณหภูมิด้านเย็นให้ได้ค่าที่ต่ำที่สุดและคงที่มากที่สุดเมื่ออุณหภูมิด้านเย็นสามารถแสดงในสมการที่ (3)

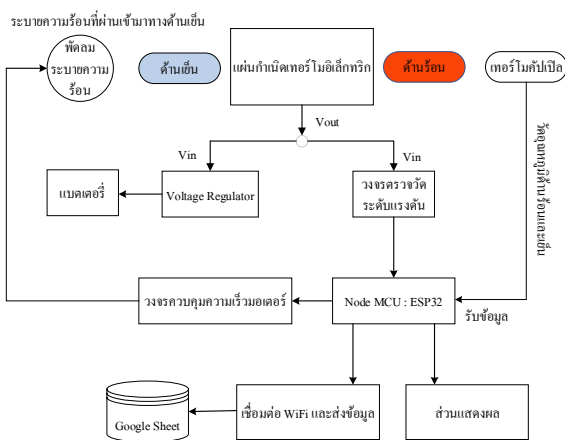
$$T_c = \frac{Q}{hA} \quad (3)$$

เมื่อ Q คืออัตราการถ่ายเทความร้อนมีหน่วยเป็น W h คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีหน่วยเป็น W/m^2-K และ A คือพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนมีหน่วยเป็น m^2 จะเห็น

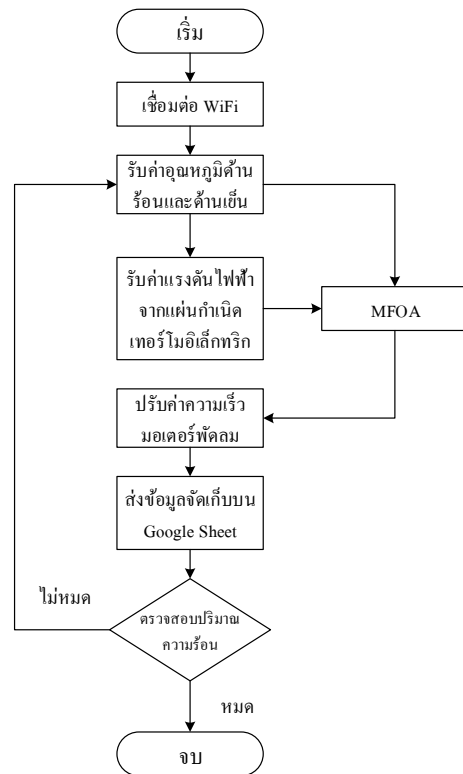
ได้ว่าเมื่อต้องการปรับลดอุณหภูมิที่แผ่นด้านเย็นจะต้องปรับค่าที่ได้จากสมการที่ (3) ให้น้อยที่สุดและต้องปรับเปลี่ยนไปตามค่าเวลาจริง ในงานวิจัยนี้จึงใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุง [15] ในการหาค่าที่เหมาะสมดังกล่าวเนื่องจากมีข้อดีคือ เป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบโกลบอล (Global) สามารถหาค่าที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็ว สามารถสร้างได้ง่ายไม่ซับซ้อน [15] โดยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมนี้ได้ถูกกำหนดค่าสมการที่ (2) ฟังก์ชันเป้าหมายที่ต้องการให้มีค่ามากที่สุดหรือ $\max(V(x))$ และ h เป็นตัวแปรที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมกำหนดให้เป็นตัวแปร x ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$V(x) = \alpha(T_H - \frac{Q}{xA}) \quad (4)$$

จากนั้นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมก็จะหาค่าตัวแปร x ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ค่าของฟังก์ชัน $V(x)$ ที่มากที่สุดแล้วนำไปทำการปรับระดับความเร็วของพัดลมเพื่อให้เกิดค่าความแตกต่างของอุณหภูมิมากที่สุดและจะเป็นผลทำให้ได้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกมากที่สุดเช่นกันซึ่งแผนภาพการทำงานแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งหลักการของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุงนี้ได้กล่าวอย่างละเอียดไว้ในเอกสารอ้างอิงที่ [15]



รูปที่ 3 ผังการทำงานของระบบแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเตาเผาขยะ

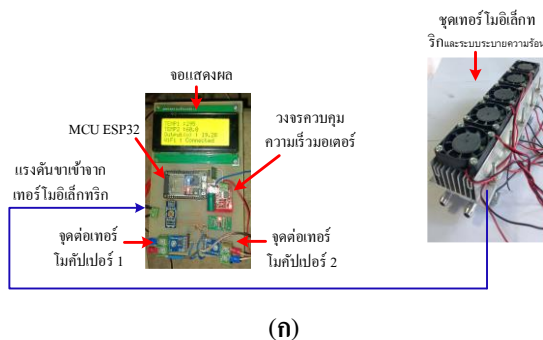


รูปที่ 4 แผนภาพแสดงการทำงานของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุงร่วมกับระบบแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเตาเผาขยะ

4. วิธีการและผลการทดลอง

จากการออกแบบในหัวข้อที่ 3 นั้นได้นำมาทำการสร้างและประกอบวงจรต่างๆ เป็นต้นแบบระบบแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเตาเผาขยะแสดงในรูปที่ 5 โดยมีการใช้แผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกเบอร์ TEC1-12715 จำนวน 5 แผ่น เชื่อมต่อแบบอนุกรมกัน โดยด้านร้อนของแผ่นถูกนำไปยึดติดกับเตาเผาและด้านเย็นถูกยึดติดกับพัดลมระบายความร้อน เมื่อนำไปทดสอบเพื่อให้กำเนิดแรงดันไฟฟ้าร่วมกับเตาเผาเป็นระยะเวลา 34 นาที พบว่าระบบแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเตาเผาขยะสามารถให้กำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ แสดงในรูปที่ 6 อย่างไรก็ตามข้อมูลจากรูปที่ 6(ก) พบว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้นั้น ยังสูงไม่เพียงพอและยังคงมีลักษณะที่ไม่เสถียร และเมื่อทำการพิจารณาระดับอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นในรูปที่ 6(ข) เพิ่มเติม พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของด้านร้อนมีลักษณะแกว่งขึ้นลง ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณความร้อนที่เผาไหม้ไม่คงที่ในขณะเดียวกัน

พบว่าอุณหภูมิด้านเย็นก็มีลักษณะแกว่งขึ้นลงด้วยเช่นกัน เนื่องจากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหวี่ ปรับปรุง พยายามควบคุมความเร็วพัดลมเพื่อระบายความร้อนให้ดีที่สุด แต่การระบายความร้อนด้วยพัดลมระบายอากาศนั้นยังคงให้ผลการลดลงของอุณหภูมิด้านเย็นลดลง ไม่เพียงพอ และทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกไม่เพียงพอ ส่งผลให้ระบบดังกล่าวผลิตแรงดันไฟฟ้าได้น้อย

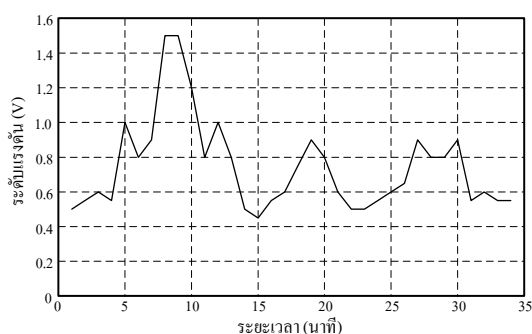


(ก)

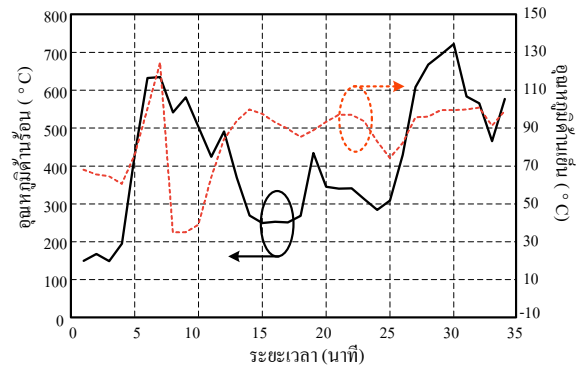


(ข)

รูปที่ 5 ระบบแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเตาเผา ขยะต้นแบบและการทดสอบ (ก) การเชื่อมต่อชุดเทอร์โมอิเล็กทริก (ข) การทดสอบชุดเทอร์โมอิเล็กทริกต้นแบบ



(ก)

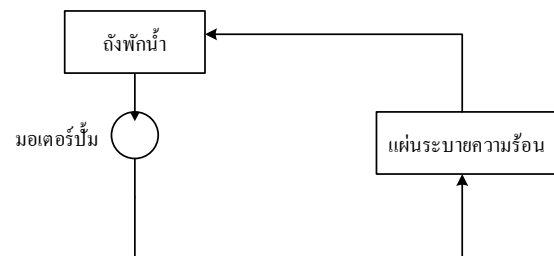


(ข)

รูปที่ 6 ผลการทดสอบของระดับแรงดันไฟฟ้า

กระแสดรของระบบแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเตาเผาขยะเมื่อใช้การระบายความร้อนด้วยพัดลมระบายอากาศ (ก) การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันต่อเวลา (ข) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิด้านร้อนและเย็นต่อเวลา

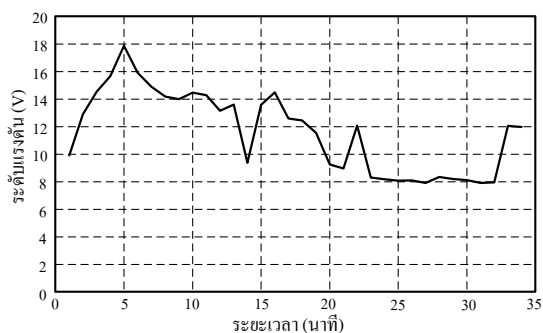
จากสาเหตุดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาและปรับปรุงระบบระบายความร้อนด้วยระบบน้ำวนแทนที่พัดลมเดิมที่มีอยู่เพื่อให้เกิดการระบายความร้อนที่ดีมากขึ้น รูปที่ 7 แสดงหลักการระบายความร้อนด้วยน้ำวน



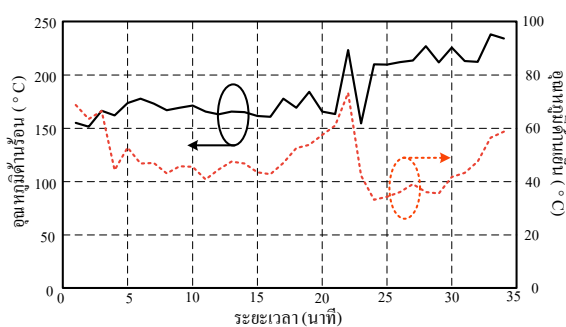
รูปที่ 7 หลักการระบายความร้อนด้วยน้ำวน

เมื่อได้ปรับปรุงระบบระบายความร้อนให้เป็นระบบน้ำวนเพื่อให้เกิดการระบายความร้อนที่ดีมากขึ้นแล้วนำไปทดสอบเพื่อให้กำเนิดแรงดันไฟฟ้าร่วมกับเตาเผาเป็นระยะเวลา 34 นาที พบว่าระบบแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเตาเผาขยะสามารถให้กำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังแสดงในรูปที่ 8 และจากรูปที่ 8(ก) พบว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้มีค่าสูงโดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 18V และค่าต่ำสุดเท่ากับ 8V ซึ่งมีลักษณะที่เสถียรมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ระบบระบายความร้อนด้วยพัดลมระบายอากาศ จากนั้นมาพิจารณาระดับอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นในรูปที่ 8(ข) พบว่ามีการ

เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของด้านร้อนแกว่งขึ้นลงไม่มาก เป็นผลมาจากปริมาณความร้อนที่เผาไหม้ไม่คงที่และอุณหภูมิด้านเย็นที่แกว่งขึ้นลงเช่นกันแต่ยังคงอยู่ในระดับความแตกต่างอุณหภูมิประมาณ $20\text{--}30^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากการที่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุงพยายามที่จะควบคุมปริมาณน้ำเพื่อระบายความร้อนให้ดีที่สุด อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนระบบระบายความร้อนด้วยระบบน้ำวน พบว่าการระบายความร้อนด้วยระบบน้ำวนสามารถระบายความร้อนได้ดีกว่าพัดลมและให้ผลการลดลงของอุณหภูมิด้านเย็นดีขึ้นทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างทั้งสองด้านมากเพียงพอ ส่งผลให้ได้ระดับแรงดันที่ได้มีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามได้นำข้อมูลที่ตรวจวัดทั้งหมดส่งขึ้นไปจัดเก็บบนฐานข้อมูล Google Sheet เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์และประมาณการประสิทธิภาพแปลงพลังงานไฟฟ้าย้อนหลังได้แสดงดังรูปที่ 9



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 ผลการทดสอบของระดับแรงดันไฟฟ้า

กระแสตรงของระบบแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเตาเผาขยะเมื่อใช้การระบายความร้อนด้วยระบบน้ำวน (ก) การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันต่อเวลา (ข) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิด้านร้อนและเย็นต่อเวลา

รูปที่ 9 ตัวอย่างการเก็บข้อมูลของการแปลงพลังงานนี้ไปบันทึกบนฐานข้อมูล Google Sheet ด้วยการสื่อสารแบบอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่งได้

5. สรุป

ต้นแบบระบบแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเตาเผาขยะที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นในบทความวิจัยนี้ สามารถแปลงพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากเตาเผาขยะมาเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ประโยชน์ได้และการใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบแมลงหิวปรับปรุงในการควบคุมการระบายความร้อนบนพื้นผิวด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากผลการทดสอบต้นแบบระบบแผ่นกำเนิดเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเตาเผาขยะพบว่า การระบายความร้อนบนพื้นผิวด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกนั้น มีนัยสำคัญต่อระดับแรงดันไฟฟ้าเป็นอย่างมาก เมื่อใช้การระบายความร้อนด้วยพัดลมระบายอากาศพบว่าไม่สามารถระบายความร้อนที่เกิดขึ้นได้ดี ส่งผลให้ได้ระดับแรงดันไฟฟ้าน้อย โดยระดับแรงดันสูงสุดที่ 1.5 V จากนั้นเมื่อทำการเปลี่ยนระบบระบายความร้อนเป็นระบบน้ำวนพบว่า สามารถระบายความร้อนที่เกิดขึ้นได้ดีขึ้นและส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น โดยสามารถสร้างระดับแรงดันสูงสุดที่ 18 V อีกทั้งข้อมูลของการแปลงพลังงานนี้สามารถส่งไปบันทึกบนฐานข้อมูลด้วยการสื่อสารแบบอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่งได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Sastraphichanthavee, "Energy and Environment," *Air Conditioning Engineering Association of Thailand*, No 16, pp. 1–13, 2001.

- [2] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, "Thailand Renewable Energy Report," Ministry of Energy, Bangkok, Thailand, Final Rep., 2014.
- [3] C. Cekdin, Z. Nawawi and M. Faizal, "The Usage of Thermoelectric Generator as a Renewable Energy Source," *TELKOMNIKA Telecommunication, Computing, Electronics and Control*, vol. 18, no. 4, pp. 2186–2192, 2020, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v18i4.13072.
- [4] S. LeBlanc, "Thermoelectric Generators: Linking Material Properties and Systems Engineering for Waste Heat Recovery Applications," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 1–2, pp. 26–35, 2014, doi: 10.1016/j.susmat.2014.11.002.
- [5] T. J. Hendricks, N. K. Karri, T. P. Hogan and C. J. Cauchy, "New Perspectives in Thermoelectric Energy Recovery System Design Optimization," *Journal of Electronic Materials*, vol. 42, pp. 1725–1736, 2013, doi: 10.1007/s11664-012-2406-x.
- [6] I. Johnson, W. T. Choate and A. Davidson, "3.0 Waste Heat Recovery Options and Technologies" in *Waste Heat Recovery. Technology and Opportunities US Industry*, Laurel, MD, USA: BCS, Inc, 2008, ch. 3, sec. 3.4, pp. 25–29.
- [7] P. Yodovard, J. Khedari and J. Hirunlabh, "The Potential of Waste Heat Thermoelectric Power Generation from Diesel Cycle and Gas Turbine Cogeneration Plants," *Energy Sources*, vol. 23, no. 3, pp. 213–224, 2001, doi: 10.1080/00908310151133889.
- [8] X. Ma, G. Shu, H. Tian, H. Yang and T. Chen, "Optimization of Length Ratio Segmented Thermoelectric Generators for Engine's Waste Heat Recovery," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 583–588, 2019, 10.1016/j.egypro.2019.01.157.
- [9] M. A. Zoui, S. Bentouba, J. G. Stocholm and M. Bourouis, "A Review on Thermoelectric Generators: Progress and Applications," *Energies*, vol. 13, no. 14, pp. 1–32, 2020, 10.3390/en13143606.
- [10] J. C. Bass, N. B. Elsner, F. A. Leavitt, "Performance of the 1 kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines," *Proc.the AIP Conference*, Melville, NY, USA, 1994, pp. 295298, doi: 10.1063/1.46818.
- [11] Z. G. Shen, L. L. Tian and X. Liu, "Automotive Exhaust Thermoelectric Generators: Current Status, Challenges and Future Prospects," *Energy Conversion and Management*, vol. 195, pp. 1138–1173, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.05.087.
- [12] A. D. Schlichting, S. R. Anton and D. J. Inman, "Motorcycle Waste Heat Energy Harvesting," in *Proc. the International Symposium on: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, San Diego, CA, USA, 2008, pp. 69300, doi: 10.1117/12.775783.
- [13] R. Aridi, J. Faraj, S. Ali, T. Lemenand and M. Khaled, "Thermoelectric Power Generators: State-of-the-Art, Heat Recovery Method, and Challenges," *Electricity*, vol. 2, no. 3, pp. 359–386, 2021, doi: 10.3390/electricity2030022.
- [14] Rowe D. M., "Thermoelectric Phenomena " in *CRC Handbook of Thermoelectrics*, Washington, D.C.: CRC Press, 1995, ch. 2, sec. 2.3, pp. 1–17.
- [15] N. Mhurdongon, 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.

การออกแบบและหาค่าที่เหมาะสมทางอากาศพลศาสตร์ ของรูปทรงโค้งมนในย่านความเร็วเหนือเสียง

Aerodynamic Design and Optimization of Supersonic Spin-Stabilize Round Body

วงศ์ธร นรสิงห์ และ วันชัย เจียจันทร์*

สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช สายไหม สายไหม กรุงเทพมหานคร 10220

Wongsatorn Norrasing and Wanchai Jiajan*

Graduate School Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force, Sai Mai, Sai Mai, Bangkok, 10220, Thailand

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

Received: Feb 11, 2022; Revised: Apr 18, 2022; Accepted: Apr 26, 2022

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ของรูปทรงโค้งมนที่มีการหมุนรอบแกนลำตัวเพื่อรักษาเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มสมรรถนะด้านระยะทางการเคลื่อนที่ในย่านความเร็วเหนือเสียง โดยในการวิจัยนี้ได้นำรูปทรงโค้งมนซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm ในรูปแบบของ XM-788 E1 และ XM-789 มาเป็นต้นแบบในการศึกษาและออกแบบ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์สถิตและพลวัตของรูปทรงดังกล่าว โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางอากาศพลศาสตร์ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ในรูปแบบเทอร์บูเลนต์โมเดล K- ω SST ผลลัพธ์การคำนวณถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงจากแหล่งข้อมูลอ้างอิง ทั้งนี้เพื่อสร้างความน่าเชื่อถือและยืนยันความถูกต้องของการคำนวณ จากนั้นนำรูปทรงโค้งมนต้นแบบที่ศึกษาเข้าสู่กระบวนการออกแบบใหม่ให้มีแรงต้านลดลง ในขณะที่ยังคงไว้ซึ่งเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ โดยใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งประกอบด้วย ระเบียบวิธีหาค่าสมการแนวโน้มน Kriging Response Surface ควบคู่กับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) โดยใช้เทคนิค Shifted Hammersley Sampling (Screening) รวมถึงการวิเคราะห์คำนวณสัมประสิทธิ์แรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ และเสถียรภาพการเคลื่อนที่ของรูปทรงที่ออกแบบใหม่ โดยใช้โปรแกรม CFD จากผลลัพธ์การออกแบบโดยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด พบว่า รูปทรงที่ออกแบบใหม่มีแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ลดลงสูงสุดถึง 20.52 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ยังคงไว้ซึ่งเสถียรภาพทั้งรูปแบบของเสถียรภาพสถิตและพลวัตในการเคลื่อนที่ ตลอดช่วงความเร็วเหนือเสียงที่ทำการศึกษา

คำสำคัญ: การเคลื่อนที่แบบหมุนเพื่อรักษาเสถียรภาพ, การจำลองทางอากาศพลศาสตร์, การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงคณิตศาสตร์, ระเบียบวิธีพื้นผิวตอบสนอง

Abstract

The purpose of this paper is to design and analyze the aerodynamics characteristics of a spin-stabilized round shape body for enhancing the aerodynamic performance of projectile distance through supersonic regimes. In this research, the spin-stabilized round shape body 30 mm in diameters (XM-788 E1 and XM-789) are used as a benchmark model. In the first step, the static and dynamic aerodynamic coefficients of these shapes are evaluated using Computational Fluid Dynamic (CFD) in terms of K- ω SST turbulent model. The calculation results are then employed to validate with available experimental data to ensure the accuracy. Next, the Kriging response surface and Shifted Hammersley Sampling technique are used as an optimization method for drag minimization. CFD is then employed for drag prediction and stability analysis. The optimization result

show that the optimized body provides up to 20.52% for drag reduction, while remaining statically and dynamically stable over the whole range of operating Mach number.

Keyword: Spin-Stabilized Projectile, CFD, Optimization, Kriging response Surface

1. บทนำ

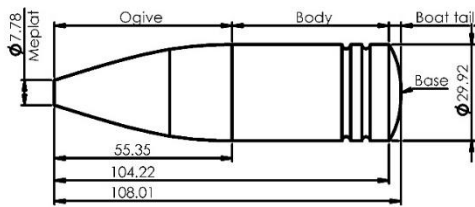
จุดประสงค์หลักของการออกแบบรูปทรงวัตถุให้เคลื่อนที่ไปในอากาศ คือการสร้างรูปแบบวัตถุให้มีสมรรถนะสูงสุด เพื่อตอบโจทยความต้องการในการออกแบบและสนับสนุนภารกิจที่หลากหลาย ซึ่งโดยทั่วไปอาวุธยุทโธปกรณ์ทางทหารส่วนใหญ่เป็นส่วนหนึ่งของวัตถุที่ถูกออกแบบให้เคลื่อนที่ในย่านความเร็วเหนือเสียง เช่น จรวด และ กระสุนปืน เป็นต้น โดยลักษณะรูปร่างวัตถุของวัตถุดังกล่าวเรียกว่า รูปทรงโค้งมน หรือ Round Shaped Body เพราะมีรูปทรงสมมาตรตามแนวแกน และเป็นที่ทราบว่าการเข้าใจอากาศพลศาสตร์ของรูปทรงโค้งมนเหล่านี้ในย่านความเร็วเหนือเสียงนั้นเป็นกุญแจสำคัญยิ่งในการเพิ่มสมรรถนะและขีดความสามารถให้ปฏิบัติการกิจได้ตามเป้าหมาย แต่อย่างไรก็ตาม การหาค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์ในย่านความเร็วเหนือเสียงนั้นมีความยากและซับซ้อนเนื่องจากอากาศพลศาสตร์ในย่านนี้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับคลื่นช็อก (Shock Wave) คลื่นขยาย (Expansion Waves) และการหมุนไหลวนของกระแสอากาศด้านหลัง (Circulation Flow) นอกจากนี้วัตถุรูปทรงโค้งมนที่ใช้หลักการหมุนรอบแกนลำตัว เพื่อรักษาเสถียรภาพ (Spin-Stabilized Body) มีความซับซ้อนทางอากาศพลศาสตร์มากยิ่งขึ้น ดังนั้นการหาค่าอากาศพลศาสตร์และการออกแบบจึงมีความยากและความท้าทายที่จะได้มาซึ่งรูปทรงโค้งมนที่มีสมรรถนะสูงในย่านความเร็วนี้

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอกระบวนการออกแบบรูปทรงโค้งมนซึ่งเคลื่อนที่ โดยใช้หลักการหมุนรอบแกนลำตัวเพื่อรักษาเสถียรภาพ (Spin-Stabilized Rounded Body) ในย่านความเร็วเหนือเสียง โดยมีเป้าหมายให้รูปทรงดังกล่าวนี้ สามารถเคลื่อนที่ในระยะทางที่มากขึ้น แต่ยังคงเคลื่อนที่ได้อย่างมีเสถียรภาพในย่านความเร็วเหนือเสียง ซึ่งจากวัตถุประสงค์ดังกล่าวสามารถตั้งคำถามในแง่ของอากาศพลศาสตร์ได้ ยกตัวอย่างเช่น 1) รูปทรงโค้งมนจะถูกออกแบบอย่างไรให้มีระยะทางในการเคลื่อนที่มากที่สุด? 2) อากาศ

พลศาสตร์อะไรบ้างที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่? 3) เสถียรภาพการเคลื่อนที่มีผลอย่างไร? เป็นต้น ซึ่งคำถามเหล่านี้จะทำให้เกิดความเข้าใจถึงที่มาและความสำคัญของกระบวนการออกแบบ โดยรูปทรงที่น่ามาศึกษานั้น ควรเป็นรูปทรงที่มีความเรียบง่ายต่อการศึกษาและออกแบบ โดยเฉพาะรูปทรงสมมาตรตามแนวแกน ซึ่งเป็นอัตลักษณ์เฉพาะของวัตถุทรงโค้งมน รวมถึงรูปทรงนี้ควรมีแหล่งข้อมูลอ้างอิงที่เกี่ยวข้องกับค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบมาแล้วเพื่อเป็นกรณีศึกษา

จากเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษารูปทรงโค้งมนที่มีการหมุนรอบแกนลำตัวเพื่อรักษาเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm ในรูปแบบ XM-78E1 และ XM-789 [1] โดยมีขนาดและรูปร่างดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นรูปทรงที่ได้ถูกออกแบบมาให้เคลื่อนที่ ในช่วงความเร็วเหนือเสียง และ ทรานโซนิค ซึ่งมีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 2.3 เท่าของความเร็วเสียง หรือ มัก 2.3 โดยใช้โมเดลข้างต้นมาวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ จากนั้นจึงสามารถนำมาออกแบบโดยประยุกต์ใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในสมรรถนะด้านระยะทางการเคลื่อนที่ในย่านความเร็วเหนือเสียง

ในทางทฤษฎี ผลกระทบที่ส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะด้านระยะทางมีปัจจัยสำคัญ 2 ปัจจัย คือ แรงต้านอากาศและเสถียรภาพ ซึ่งการเคลื่อนที่ของวัตถุรูปทรงโค้งมนจะต้องมีเสถียรภาพทั้งในรูปแบบของเสถียรภาพสถิต และพลวัต ในขณะที่การเคลื่อนที่ในอากาศแบบมีเสถียรภาพนั้น แรงต้านทานทางอากาศพลศาสตร์จะมีผลเป็นนัยสำคัญต่อระยะทางการเคลื่อนที่ โดยแรงต้านรวมทางอากาศพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นบนรูปทรงโค้งมน จะถูกแบ่งออกเป็น แรงต้านทานที่เกิดจากคลื่นช็อก (Wave Drag) แรงต้านทานที่เกิดจากความเสียดทาน (Skin Friction Drag) และ แรงต้านทานที่เกิดจากกระแสอากาศปั่นป่วนบริเวณส่วนท้ายของรูปทรงโค้งมน (Base Drag)



รูปที่ 1 รูปทรงโค้งมนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm ในรูปแบบ XM-788E1 และ XM-789

การศึกษาเรื่องการออกแบบเพื่อลดแรงต้านของรูปทรงโค้งมน สามารถแบ่งเทคนิคการออกแบบได้เป็น 2 เทคนิค คือ การใช้เทคนิคการเปลี่ยนแปลงรูปทรง (Shaping Technique) โดยตรง เพื่อลดแรงต้าน และการประยุกต์ใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดทางคณิตศาสตร์ (Optimization Method) สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เทคนิคการเปลี่ยนแปลงรูปทรงโดยตรงเพื่อลดแรงต้าน Viswanath, et.. [2] ได้แสดงผลการวิจัยของผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงรูปทรงบริเวณส่วนท้าย (Boattail and Base) ของรูปทรงโค้งมนที่มีผลต่อการลดลงของแรงต้านในย่านความเร็วเหนือเสียง โดยเปลี่ยนรูปทรงในหลายลักษณะเช่น ลักษณะโพรงด้านท้ายของรูปทรง หรือที่เรียกว่า Base Cavity ลักษณะชั้นบันไดบริเวณ Boattail ของรูปทรงโค้งมน ในขณะที่ Suliman, et. [3] ได้ศึกษาผลกระทบของ Boattail ในรูปแบบต่างๆ และการจำลองปล่อยกระแสอากาศความเร็วสูงบริเวณส่วนท้าย (Base Bleed) เพื่อลดแรงต้านรวมของรูปทรงโค้งมนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 155 mm โดยประยุกต์โปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) Ibrahim และ Filippone [4] ได้ทดลองใช้เทคนิค Slot Cavity และ Porous Surface บนบริเวณผิวในส่วนของ Conical Boattail เพื่อลดแรงต้านบริเวณส่วนท้ายของรูปทรงโค้งมน (Base Drag)

นอกเหนือจากการลดแรงต้านจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรูปทรงโค้งมนแล้ว การประยุกต์ใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Method) นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความเชื่อถือได้สูงซึ่งเป็นผลโดยตรงจากการใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุด

โดยกระบวนการที่มีความน่าเชื่อถือในช่วงแรกนั้นถูกนำเสนอโดย Nicolas [5] ซึ่งได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้สมการเป้าหมาย (Objective Function) คือ สมการแรงต้าน ที่ประกอบด้วย แรงต้านทานทางอากาศเนื่องจากความดัน (Pressure Drag) ซึ่งถูกคำนวณโดยใช้ ทฤษฎี Newtonian Impact [6] แรงต้านทานที่เกิดจากแรงเสียดทาน (Skin Friction Drag) ซึ่งถูกคำนวณโดยใช้ ทฤษฎีชั้นขีดผิวแบบเทอร์บูเลนต์ Turbulent Boundary Layer Theory [7] และ แรงต้านทานที่เกิดจากกระแสอากาศปั่นป่วนด้านท้ายรูปทรงโค้งมน (Base Drag) นั้น ถูกคำนวณด้วยวิธีการหาค่าแนวโน้มจากการทดลอง Empirical Method โดยที่แรงต้านทานรวมนั้นถูกคำนวณผ่านกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธี Eulerian Optimization Scheme แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่ากระบวนการจะมีประโยชน์ในการหารูปทรงที่เหมาะสมที่สุดในการลดแรงต้าน วิธีการดังกล่าวมีความซับซ้อนและใช้เวลานานในการคำนวณรวมถึงสมการในการคำนวณหาแรงต้านถูกสมมติฐานในค่าความถูกต้องในระดับ First-Order Accuracy เพียงเท่านั้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อแรงต้านรวมที่ถูกต้องได้

เพื่อลดความซับซ้อนและเพิ่มความถูกต้องของการคำนวณ Wanchai, J. [8] ได้ประยุกต์ใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในระเบียบวิธีของ Active-Set Algorithm โดยใช้การคำนวณแรงต้านรวมจากวิธีการประมาณการ กิ่งทดลองและกิ่งการคำนวณ หรือ Semi-Empirical Method เป็นสมการเป้าหมาย (Objective Function) มาใช้ในการออกแบบ เพื่อหารูปทรงโค้งมนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 155 mm จากนั้นจึงนำรูปทรงที่ผ่านกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาดำเนินการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ทางอากาศพลศาสตร์โดยการใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) ควบคู่กับการทดลองด้วยอุโมงค์ลมความเร็วเหนือเสียง เพื่อยืนยันผลลัพธ์ของการออกแบบ จนกระทั่งได้รูปทรงที่ทำการออกแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสมรรถนะด้านระยะทางในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของงานวิจัยดังกล่าวนี้ได้ใช้การคำนวณแรงต้านจากวิธีการประมาณการกิ่งทดลองและกิ่งการคำนวณ เป็นสมการเป้าหมาย

ของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด จึงมีข้อจำกัดสำคัญ 2 ประการ คือ สมการวัตถุประสงค้จำเป็นจะต้องมีข้อมูลตั้งต้นของรูปทรง (Input Parameter) ที่ต้องการออกแบบก่อนทุกครั้ง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแหล่งข้อมูลของรูปทรงตั้งต้นอาจจะไม่มีในแหล่งข้อมูลอ้างอิงจึงถือเป็นข้อจำกัดที่สำคัญ นอกจากนี้ ความถูกต้องของผลลัพธ์การคำนวณแรงดันโดยใช้ Semi-Empirical Method มีข้อจำกัดทั้งในแง่ของย่านความเร็วที่กำหนดและขนาดของรูปทรงที่ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์

จากข้อจำกัดที่กล่าวมาในข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการประยุกต์ใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้สมการนาเวียร์-สโตค (Navier-Stoke Equation) เป็นสมการเป้าหมายซึ่งเป็นพื้นฐานของการคำนวณแรงดันของรูปทรงโค้งมนในทุกย่านความเร็วที่ต้องการศึกษารวมถึงไม่มีข้อจำกัดทั้งในด้านของขนาดและรูปร่างรูปทรงโค้งมนที่ต้องการออกแบบเพื่อลดแรงต้าน นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีพื้นผิว ตอบสนอง (Response Surface) เพื่อบูรณาการค้นหาจุดที่เหมาะสมที่สุดร่วมกับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่กล่าวมาข้างต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ขอบเขตการวิจัย

ดังได้กล่าวไปแล้ว ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกรูปทรงโค้งมนรูปแบบ XM-788E1 และ XM-789 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm (ดังรูปที่ 1) มาเป็นกรณีศึกษาในการหาค่า คุณลักษณะอากาศพลศาสตร์สถิตและพลวัตโดยใช้โปรแกรม CFD เนื่องจากรูปทรงดังกล่าวนี้มีฐานข้อมูลคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์ในย่านความเร็วเหนือเสียงที่ได้จากการทดลองแบบการทดสอบยิง (Range Test) [1] เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลการทดลองกับ ผลลัพธ์ของโปรแกรม CFD นอกจากนี้ยังใช้เป็นรูปทรงโค้งมนต้นแบบ (Benchmark Model) ในการออกแบบทางอากาศพลศาสตร์เพื่อเพิ่มสมรรถนะในระยะยิงหวังผลโดยใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

จากรูปที่ 1 พบว่า รูปทรงโค้งมนที่นำมาเป็นกรณีศึกษาจะมีส่วนประกอบ 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนหัว (Ogive)

ส่วนลำตัว (Body) และ ส่วนหาง (Boat Tail) ตามลำดับ และมีข้อมูลเพิ่มเติมตามลักษณะทางกายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับในการศึกษาและออกแบบทางอากาศพลศาสตร์ ในงานวิจัยนี้จะมีขอบเขตเฉพาะในช่วงย่านความเร็วเหนือเสียง มัก 1.5–2.3 เท่านั้น

ตารางที่ 1 ข้อมูลคุณสมบัติของรูปทรงโค้งมนต้นแบบ

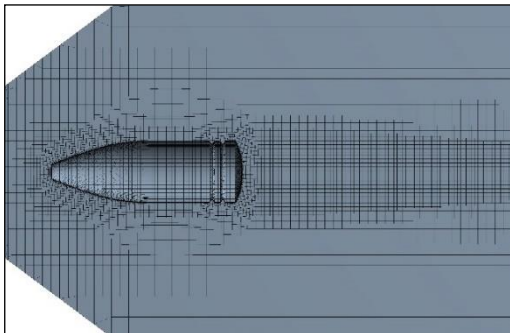
	XM-788E1	XM-789
มวล (g)	234.6	239
จุดศูนย์กลาง (mm)	41.888 (จากด้านท้ายรูปทรง)	40.392 (จากด้านท้ายรูปทรง)
Axial Moment (kg-m ²)	313.6	330.2
Transverse Moment (kg-m ²)	1619	1743

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1. การวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์ของรูปทรงโค้งมนต้นแบบโดยใช้โปรแกรม CFD

สำหรับการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมคำนวณอากาศพลศาสตร์ของไหล ANSYS FLUENT ซึ่งเป็นการคำนวณเชิงตัวเลขโดยใช้วิธีการแบบ Finite Volume เพื่อทำการแก้สมการ Reynold Average Navier Stroke (RANS) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้มีการกำหนดให้ใช้การคำนวณแบบ Density Base และมีการใช้สมการพลังงาน โดยที่ของสภาวะของไหลจะนำเอาแก๊สสมบูรณ์มาใช้ในส่วนของการคำนวณการแปรปรวนของอากาศ (Turbulent Model) นั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Shear Stress Transport (SST) k- ω Model [12] เนื่องจากโมเดลนี้มีการคำนวณอากาศพลศาสตร์ที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับความเป็นจริงในบริเวณทั้งอากาศพลศาสตร์ใกล้พื้นผิวและกระแสอากาศไหลอิสระ (Free Stream) รวมทั้งปรากฏการณ์การเกิด Adverse Pressure ที่ก่อให้เกิดการ Separation ของอากาศได้มีแนวโน้มใกล้เคียงความเป็นจริงอย่างมาก ซึ่งครอบคลุมปรากฏการณ์ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นเมื่อรูปทรงโค้งมนเคลื่อนที่ไปในอากาศ เพื่อแก้สมการเชิงตัวเลขของสมการ RANS รูปแบบตาข่าย

ที่เป็นระเบียบ (Structured Grid) ได้ถูกสร้างรอบตัวของรูปทรงโค้งมนโดยใช้โปรแกรม Ansys Meshing ดังรูปที่ 2 จากรูปแสดงให้เห็นถึงรายละเอียดความหนาแน่นของตารางจะอยู่บริเวณรอบลำตัวของรูปทรงโค้งมน และบริเวณใกล้ชั้นขีดยาว ทั้งนี้เพื่อสามารถคำนวณรายละเอียดของกระแสอากาศไหลวนที่ท้ายของรูปทรงโค้งมนและสามารถคำนวณรายละเอียดของชั้นขีดยาวแบบเทอร์บูเลนต์ได้ โดยเฉพาะรายละเอียดของ Laminar Sub Layer ที่อยู่ในชั้นขีดยาว ซึ่งมีความยากและซับซ้อนที่จะคำนวณได้อย่างละเอียดอย่างไรก็ตามเพื่อให้ค่าความถูกต้องของชั้นขีดยาวมีความแม่นยำมากขึ้นโดยใช้เทอร์บูเลนต์ SST k- ω ดังที่กล่าวไว้ในเบื้องต้น ค่า y^+ ที่คำนวณได้ถูกกำหนดให้มีค่าตามเงื่อนไข $y^+ < 2$ ดังนั้นความห่างของรูปแบบตาข่ายหรือเซลล์ (Cells) ในชั้นแรกติดกับผิวอากาศยานจึงมีค่าประมาณ 10^{-5} mm และสำหรับชั้นต่อไปของ Cells จะมีอัตราส่วนการยืดออก (Stretching Ratio) อยู่ที่ประมาณ 1.25



รูปที่ 2 รูปทรงตาข่าย 3 มิติของรูปทรงโค้งมน

ทั้งนี้เป็นที่ทราบกันดีว่าจำนวนเซลล์ในการสร้างตารางมีผลกระทบกับผลลัพธ์ของโปรแกรม CFD ดังนั้นเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าที่ถูกต้องแม่นยำของผลลัพธ์ ไม่มีการแปรผันตามจำนวนเซลล์ จึงสร้างเซลล์ไว้ 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) จำนวนเซลล์ที่หยาบ (Coarse Mesh) 2) จำนวนเซลล์ระดับกลาง (Medium Mesh) และ 3) จำนวนเซลล์ที่ละเอียด (Fine Mesh) ซึ่งผลลัพธ์ของจำนวนเซลล์ที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้จะมีค่าประมาณ 2.5 ล้านเซลล์

การกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตการไหลของโปรแกรมคำนวณอากาศพลศาสตร์ แสดงดังรูปที่ 2 ขอบเขตการไหลเข้าของอากาศ (Inflow) และขอบเขตการไหลออกของอากาศ

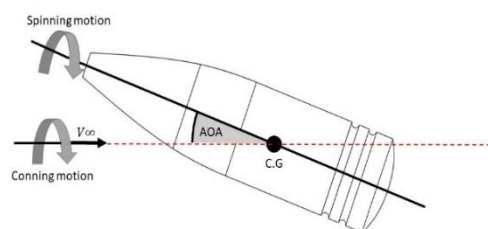
(Outflow) ถูกตั้งค่าโดยใช้อ้างอิงค่ามาตรฐานของความดันบรรยากาศและอุณหภูมิที่ระดับน้ำทะเล (101325 Pa และ 288 K) ค่า Turbulent Intensity และค่าอัตราส่วนความหนืด Viscosity Ratio ที่ Inflow ถูกตั้งค่าเป็น 0.1 % และ 10 ตามลำดับที่ผิวของโมเดลถูกตั้งค่าแบบความเร็วอากาศเป็นศูนย์ No-Slip Condition และ อุณหภูมิผิวคงที่ Isothermal (288 K)

ในกรณีที่รูปทรงโค้งมนมีการเคลื่อนที่หมุนรอบตัวเอง เงื่อนไขการเคลื่อนที่ในโปรแกรม CFD จะถูกตั้งค่าแบบ Moving Wall Condition โดยใช้อัตราการหมุนเท่ากับ การทดลองจากแหล่งข้อมูลอ้างอิง คือ 3,800 รอบ/วินาที ซึ่งทิศทางการหมุนรอบตัวจรวัด ดังรูปที่ 3

นอกจากนี้ในกรณีที่ต้องการคำนวณค่า Pitch Damping Moment Sum Coefficient หรือ ($C_{Mq} + C_{M\dot{\alpha}}$) ในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้วิธีการ Steady Lunar Coning Methodology โดยมีการกำหนดเงื่อนไขการหมุนแบบ Coning Motion ซึ่งใช้หลักการหมุนในการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล คือ Rotating Reference Frame ดังรูปที่ 3 ตามอ้างอิงของ DeSpirito [13] โดยมีรูปแบบดังสมการที่ (1)

$$C_n = \Delta \left(\frac{\phi D}{V} \right) [\gamma C_{n\dot{\alpha}} + (C_{Mq} + \gamma C_{M\dot{\alpha}})] \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) สามารถคำนวณหาค่า ($C_{Mq} + C_{M\dot{\alpha}}$) โดยการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณค่า Magnus Moment Coefficient ($C_{n\dot{\alpha}}$) จากเงื่อนไขการหมุนรอบตัวเอง และค่า Side Moment (C_n) จากการคำนวณของการหมุนในลักษณะกรวย หรือ Coning Motion ซึ่งในการคำนวณค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ทั้งสองนี้ จะมีความสำคัญที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการคำนวณเสถียรภาพพลวัตของรูปทรงโค้งมน ดังนั้นการคำนวณที่ถูกต้องแม่นยำจะส่งผลโดยตรงต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของการเคลื่อนที่ที่รูปทรงนี้



รูปที่ 3 การกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของ โปรแกรม CFD

จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างผลการทดสอบจากแหล่งข้อมูลอ้างอิง [1] กับผลการคำนวณค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์ทั้งสถิตและพลวัตของรูปทรงโค้งมนขนาด 30 mm ทั้ง 2 รูปแบบที่ความเร็ว มัค 1.5–2.3 พบว่าผลลัพธ์ของการคำนวณโดยใช้โปรแกรม CFD มีความถูกต้องแม่นยำ มีความเชื่อถือได้ทางวิศวกรรมศาสตร์ (Engineering Accuracy) โดยมีค่าความแตกต่างไม่เกิน 10% ทั้งสองวิธี ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้จากทั้ง 2 วิธี ดังแสดงในตารางที่ 2 (กราฟข้อมูลการเปรียบเทียบแสดงในหัวข้อต่อไป)

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของผลลัพธ์ค่าคุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์สถิตและพลวัตจากทั้ง 2 วิธี

Maximum Percent Difference (%) ระหว่าง CFD vs Experiment				
	C_D	C_N	$C_{M\alpha}$	$C_{np\alpha}$
XM-788E1	5.88	5.6	7.5	9.7
XM-789	6	5.7	7.6	10

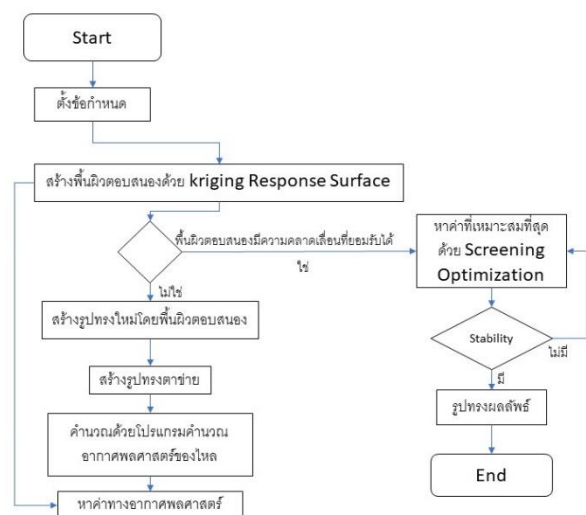
3.2. กระบวนการออกแบบรูปทรงโค้งมน

ในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบรูปทรงโค้งมนโดยใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้รูปร่างและขนาดของรูปทรงที่มีแรงต้านน้อยที่สุด ในขณะที่ยังคงไว้ซึ่งเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) และกระบวนการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) โดยบูรณาการผ่านกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) โดยมีกระบวนการตามรูปที่ 4

จากรูปที่ 4 ขั้นตอนเริ่มจากการกำหนดความต้องการในการออกแบบของรูปทรงโค้งมนที่ใช้เป็นกรณีศึกษา (Benchmark Model) เช่น การกำหนดขอบเขตของความเร็วในการเคลื่อนที่ ขนาดและความยาว เป็นต้น ขั้นตอนต่อมาจะดำเนินการสร้างพื้นผิวตอบสนองหรือที่เรียกว่า Response Surface ซึ่งระเบียบวิธีการพื้นผิวตอบสนอง คือ การหาแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงรูปทรงเทียบกับค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์ โดยขั้นตอนนี้จะทำการสร้างรูปร่างของรูปทรงโค้งมนขึ้น จากนั้นรูปทรงที่ถูกสร้างขึ้นจะถูกวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ผ่านโปรแกรม CFD โดยผลลัพธ์การคำนวณจะถูกวน Loop เพื่อป้อนเป็นค่า

นำเข้าของ Response Surface จนกระทั่งสามารถเห็นแนวโน้มที่เป็นไปได้ จึงจะดำเนินการส่งต่อผลลัพธ์ดังกล่าวไปหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ Optimization Algorithm ต่อไปเพื่อหารูปทรงที่เหมาะสมที่ตอบโจทย์กับความต้องการในเบื้องต้นทั้งในแง่ของแรงต้านต่ำและเสถียรภาพในการเคลื่อนที่

แต่อย่างไรก็ตามการลดแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์นั้นไม่ว่าด้วยวิธีการใดก็ตามจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพการเคลื่อนที่ของรูปทรงโค้งมน ซึ่งจำเป็นต้องคำนึงถึงในการออกแบบดังกล่าวด้วย ซึ่งเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ของรูปทรงโค้งมนนั้นจะถูกแบ่งออกเป็นเสถียรภาพด้านสถิตและพลวัตโดยเสถียรภาพดังกล่าวนี้มีผลมาจากอากาศพลศาสตร์ เช่น Pitching Moment Magnus Effect และค่า Pitch Damping Moment Sum Coefficient รวมไปถึงค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) ของรูปทรงโค้งมนเช่นกัน [8],[9] ด้วยการคำนึงถึงปัจจัยดังกล่าว ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการแก้ไขปัญหาลงมาซึ่งจะกล่าวต่อไป



รูปที่ 4 กระบวนการออกแบบทางอากาศพลศาสตร์โดยใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

3.2.1. การสร้าง Kriging Response Surface

ในทางทฤษฎี การสร้าง Response Surface คือ การสร้างโมเดลความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระหว่างข้อมูลขาเข้า และข้อมูลผลลัพธ์ โดย Kriging Response Surface [10],[11] นั้นได้นำเอากระบวนการประมาณค่าช่วงโดยมีต้นแบบมาจาก Gaussian Process มาใช้เพื่อสร้าง

ความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งจะทำให้สามารถหาค่าประมาณของผลลัพธ์ของข้อมูลเข้าที่อื่น ๆ ได้ ซึ่ง Kriging Method นั้นมีรูปทั่วไปดังสมการที่ (2)

$$y(x) = f(x) + Z(x) \quad (2)$$

โดยกำหนดให้ $y(x)$ นั้น คือ สมการความสัมพันธ์ที่ต้องการ โดยมี $f(x)$ เป็นสมการพหุนาม และ $Z(x)$ เป็นสมการการเปลี่ยนแปลงซึ่งทำหน้าที่ในการแก้ไข $f(x)$ ให้ผลลัพธ์มีความถูกต้องยิ่งขึ้นโดยค่า Covariance Matrix ที่เกี่ยวข้องกับสมการการเปลี่ยนแปลง[10],[11] มีการกำหนดตามสมการที่ (3) ดังนี้

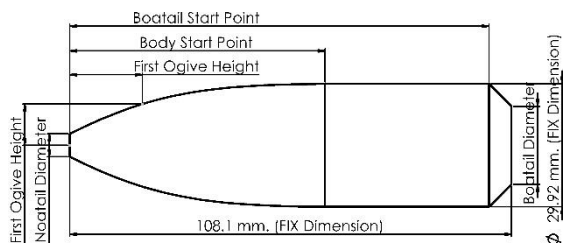
$$\text{Cov}[Z(x^i), Z(x^j)] = \sigma^2 R([r(x^i, x^j)]) \quad (3)$$

โดยที่ R คือ Correlation Matrix และ $r(x^i, x^j)$ คือ Spatial Correlation ของฟังก์ชันระหว่างจำนวนจุด [10],[11] ดังสมการที่ (4)–(5)

$$r(x^i, x^j) = \exp(-\sum_{k=1}^M \theta_k |X_k^i - X_k^j|) \quad (4)$$

$$Z(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i r(x^i, x) \quad (5)$$

ในงานวิจัยนี้ได้นำกระบวนการดังกล่าวมาใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ของรูปทรงที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับผลลัพธ์ของแรงต้านอากาศพลศาสตร์โดยมีการกำหนดการเปลี่ยนแปลงของรูปทรง ดังรูปที่ 5 และมีการกำหนดค่าคงที่ตามตัวแปรของรูปทรงให้อยู่ในช่วงความยาวต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 5 ขนาดและช่วงของรูปทรงโค้งมนที่ใช้ในการสร้าง

Response Surface

ตารางที่ 3 ขนาดและช่วงของรูปทรงโค้งมนที่ใช้ในการสร้าง Kriging Response Surface

ตำแหน่งของรูปทรง	ช่วงของรูปทรง
1. Nose bluntness radius	0.05–1 cm
2. First ogive point height	0.2–1.4 cm
3. First ogive point length	0.5–3 cm
4. Bullet start point	4–6.5 cm
5. Bullet end point	7–10.6 cm
6. Boat tail radius	0.1–1.496 cm

จากตารางที่ 3 พบว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่ 1 ถึง 4 จะมีผลกระทบต่อแรงต้านทานที่เกิดจากคลื่นกระแทกหรือ Shock Wave โดยการออกแบบรูปทรงที่โค้งมนที่นั่นจะช่วยลดความรุนแรงของ Shock Wave ลง ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของแรงต้านทานอากาศอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ตัวแปรลำดับที่ 5 และ 6 นั้นจะเกี่ยวข้องกับความดันที่เกิดจากการไหลแยกตัวของกระแสอากาศ Flow Separation และเกิดกระแสน้ำวน Wake บริเวณส่วนท้ายของรูปทรงโค้งมนในลำดับถัดมา ซึ่งแรงต้านทานทางอากาศส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่บริเวณนี้ โดยหลักสำคัญของการลดแรงต้านทานอากาศบริเวณนี้นั้นจะอยู่ที่การลดการเกิดกระแสน้ำวนให้มากที่สุด หรือลดพื้นที่บริเวณส่วนท้ายลงให้มีความเหมาะสม

ในการสร้าง Response Surface นั้น มีความสำคัญอย่างมากต่อผลลัพธ์ในการหารูปทรงที่ดีที่สุด เนื่องจากการหาค่าทางอากาศพลศาสตร์ที่ใช้ในกระบวนการหาที่ดีที่สุดได้นำเอาการประมาณค่าของ Response Surface มาใช้ ซึ่งการใช้วิธีนี้มีความคลาดเคลื่อนน้อย จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างพื้นผิวขึ้นจากจุดทดสอบจำนวน 400 จุด โดยมีค่า Relative Prediction Error อยู่ที่ประมาณ 9.96 เปอร์เซ็นต์ โดยผลลัพธ์ของ Response Surface นั้น จะอยู่ในรูปของสมการแนวนอนที่ทำให้สามารถกำหนดรูปร่างของรูปทรงโค้งมนได้ จากนั้นสามารถคำนวณแรงต้านทานอากาศจากสมการแนวนอนได้โดยตรง โดยความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนจุดทดสอบและความแม่นยำของกระบวนการคำนวณค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์ ดังนั้นการเปรียบเทียบความถูกต้องของ

การคำนวณโดยใช้โปรแกรม CFD กับผลการทดลองจริง จึงมีความสำคัญอย่างมาก ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.2.2. กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

(Optimization method)

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบความเที่ยงตรงของการคำนวณโดยใช้โปรแกรม CFD แล้วในหัวข้อที่ 3.1 จนกระทั่งดำเนินการไปสู่ขั้นตอนการสร้างพื้นผิวตอบสนองให้เสร็จสมบูรณ์ จากนั้นจึงสามารถนำสมการแนวโน้มนั้นเป็นผลลัพธ์จากระเบียบวิธีพื้นผิวตอบสนองนี้มาเข้าสู่กระบวนการเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด จากกระบวนการดังกล่าวจะทำให้การคำนวณหาค่าอากาศพลศาสตร์นั้นสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะสามารถช่วยลดความซับซ้อนของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดให้สามารถใช้กระบวนการที่มีความเรียบง่ายได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ระเบียบวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุด แบบ Shifted Hammersley Sampling (Screening) [14] ดังสมการที่ (6)–(7) ซึ่งเป็นการสร้างข้อมูลแบบสุ่ม โดยใช้ Quasi ซึ่งกระบวนการนี้มีจุดแข็ง คือมีความคลาดเคลื่อนของการกระจายตัวต่ำ ซึ่งจะทำให้การสร้างรูปทรง เพื่อหาค่าที่ดีที่สุด มีการกระจายตัวอย่างทั่วถึงในทุกมิติ

ในทางทฤษฎีระเบียบวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุด Shifted Hammersley Sampling ได้นำเอาหลักการ Radical Inverse Function โดยที่จำนวนเต็ม n คือ ลำดับของตัวเลขจำนวนเต็ม

$$n = n_0 n_1 n_2 n_3 \dots n_m \quad (6)$$

โดยเมื่อเลขจำนวนเต็มมีค่า เช่น 325 จะทำให้ $n_0 = 3$ $n_1 = 2$ $n_2 = 5$ เนื่องจากจำนวนเต็มดังกล่าวเป็นเลขฐาน 10 จะทำให้ R มีค่าเท่ากับ 10 ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$n = n_m + n_{m-1} * R + \dots + n_0 \quad (7)$$

กระบวนการ Radical Inverse Function นั้น จะทำการสร้างเศษส่วนระหว่าง 0 ถึง 1 โดยการกลับด้านลำดับของสมการ [14] ดังสมการที่ (8)–(9)

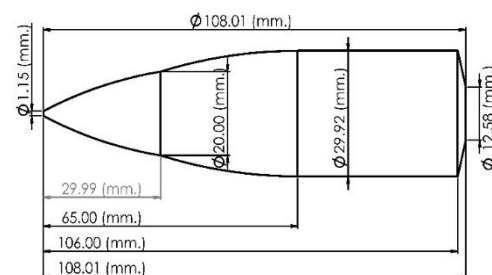
$$\phi_R(n) = n_m n_{m-1} \dots n_0 = n_m * R^{-1} + n_{m-1} * R^{-2} + \dots + n_0 * R^{-(m-1)} \quad (8)$$

โดยมิติที่ k นั้นจะมีช่วงการคำนวณดังต่อไปนี้ [14]

$$H_k(i) = [\frac{i}{N}, \phi_{R1}(i), \dots, \phi_{Rk-1}(i)] \quad (9)$$

โดยที่ $i = 0, \dots, N$ นั้น แสดงถึงจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยจากสมการจุดทดสอบแรกจะมีค่าเป็น 0 แล้วจะปรับตำแหน่งของจุดทดสอบเข้าจุดศูนย์กลางของช่วงในการทดสอบ จะเห็นได้ว่ากระบวนการดังกล่าวมีความซับซ้อนน้อย มีการใช้จุดทดสอบจำนวนมากเพื่อหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อหารูปทรงโค้งมนที่มีแรงต้านทานทางอากาศพลศาสตร์ที่น้อยที่สุดอย่างไรก็ตามรูปทรงโค้งมนที่มีแรงต้านน้อยที่สุดไม่ได้ยืนยันถึงการมีสมรรถนะด้านระยะทางที่เพิ่มขึ้นถ้าปราศจากการพิจารณาเงื่อนไขของการเคลื่อนที่แบบมีเสถียรภาพ ดังนั้นเป้าหมายในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจึงมีเป้าหมายเพื่อการลดแรงต้านของรูปทรงโค้งมนที่ศึกษาในขณะที่ยังคงไว้เพื่อการรักษาเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ โดยมีผลลัพธ์ของการออกแบบตามรูปที่ 6



รูปที่ 6 รูปทรงผลลัพธ์ของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

3.2.3. การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะ

อากาศพลศาสตร์ของรูปทรงโค้งมนที่ศึกษากับ

รูปทรงที่เหมาะสมที่สุด

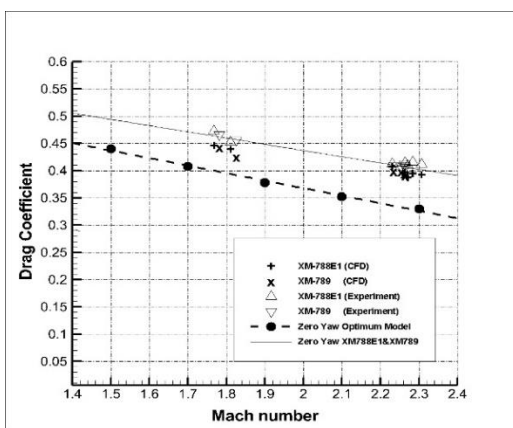
หลังจากการออกแบบรูปทรงโค้งมนที่เหมาะสมที่สุดตามกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในหัวข้อที่ 3.2.2 เพื่อยืนยัน และเปรียบเทียบค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์ของรูปทรงที่ออกแบบใหม่กับรูปทรงต้นแบบที่ศึกษา

ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงจำเป็นต้องดำเนินการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์ของรูปทรงโค้งมนที่ออกแบบใหม่ โดยใช้โปรแกรม CFD ทั้งนี้ เพื่อให้ได้ค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของรูปทรงโค้งมนที่ออกแบบใหม่ โดยเฉพาะสัมประสิทธิ์แรงต้านทานทางอากาศพลศาสตร์ รวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของรูปทรงนี้ เพื่อยืนยันการมีเสถียรภาพในการเคลื่อนที่อีกด้วย โดยมีผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

1) ค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์สถิต

1.1) ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag Coefficient, C_D)

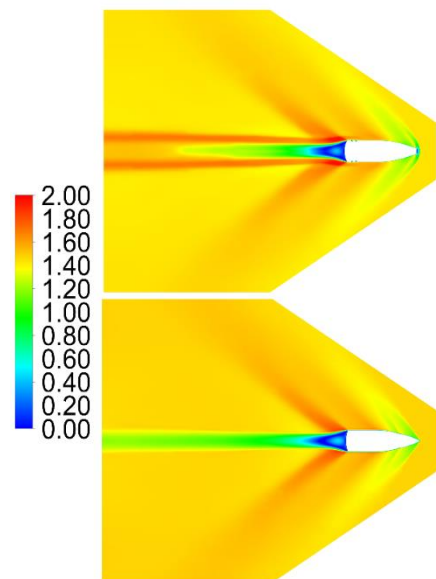
รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรูปทรงโค้งมนต้นแบบที่ศึกษาและรูปทรงที่ออกแบบใหม่ โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล จากรูปนี้ พบว่า สัมประสิทธิ์แรงต้านของรูปทรงโค้งมนที่ออกแบบใหม่ มีค่าน้อยกว่ารูปทรงโค้งมนต้นแบบอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ตลอดทุกความเร็วในย่านความเร็วเหนือเสียงที่ทำการศึกษา แสดงให้เห็นว่ารูปทรงที่ออกแบบใหม่สามารถลดแรงต้านทานทางอากาศพลศาสตร์ได้ (โดยลดลงมากที่สุดถึง 20.52% ที่ความเร็วแมค 2.3) ซึ่งจากผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถสนับสนุนการเพิ่มสมรรถนะในระยะทางการเคลื่อนที่ได้ ซึ่งสอดคล้องตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่กำหนดไว้



รูปที่ 7 แผนภาพแสดง Drag Coefficient กับ Mach Number

เพื่อสนับสนุนเหตุผลการลดลงของแรงต้านอย่างมีนัยสำคัญของรูปทรงโค้งมนที่ออกแบบใหม่ ในงานวิจัยสามารถแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการไหลของกระแส

อากาศผ่านรูปทรงโค้งมนทั้งสองกรณีในย่านความเร็วแมค 1.5 ที่มุมปะทะ 0 องศา ดังรูปที่ 8 จากรูปนี้จะพบว่า รูปร่างของคลื่นช็อก (Shock Wave) ที่เกิดขึ้นบนรูปทรงต้นแบบและรูปทรงที่ออกแบบใหม่จะมีลักษณะเป็นคลื่นช็อกเฉียง (Oblique Shock) โดยที่ลักษณะคลื่นช็อกเฉียงที่เกิดขึ้นบนรูปทรงโค้งมนที่ออกแบบใหม่จะมีความรุนแรงที่น้อยกว่าซึ่งสามารถสังเกตได้จากการทำมุมของคลื่นช็อกกับแกนลำตัวมีค่าน้อยกว่ามุมคลื่นช็อกที่เกิดขึ้นบนรูปทรงต้นแบบประมาณ 2 องศา รวมถึงรูปทรงที่ออกแบบใหม่สามารถลด Detached Shock ที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนปลายของส่วนหน้าลำตัวได้อย่างมาก ซึ่งจะส่งผลโดยตรง ทำให้ลดแรงต้านทานเนื่องจากคลื่นช็อก (Wave Drag) ได้อย่างมีนัยสำคัญ



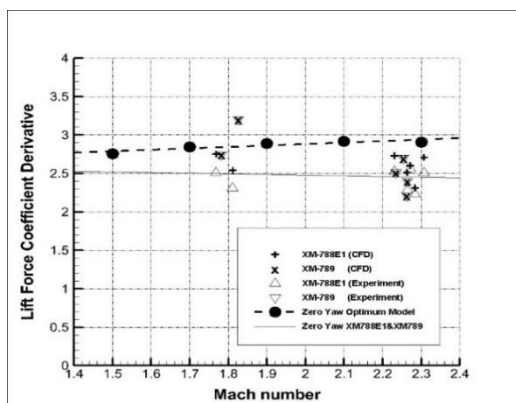
รูปที่ 8 แผนภาพแสดง Mach Number Contour ระหว่างรูปทรงต้นแบบ (บน) และ รูปทรงที่ออกแบบใหม่ (ล่าง) ที่เลขแมค 1.5 และมุมปะทะที่ 0 องศา

1.2) ค่าอนุพันธ์สัมประสิทธิ์แรงยก (Lift Force Coefficient Derivative, $C_{L\alpha}$) และค่าอนุพันธ์สัมประสิทธิ์โมเมนต์ (Pitching Moment Coefficient Derivative, $C_{M\alpha}$)

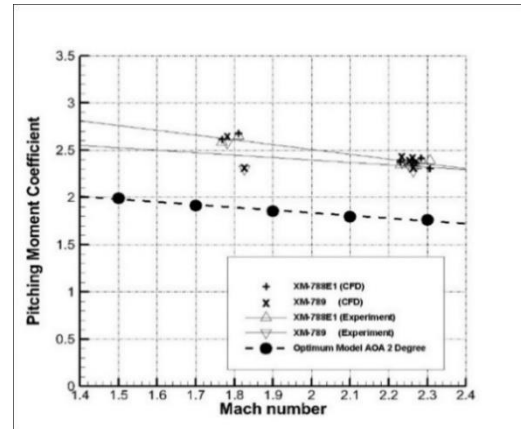
ผลการเปรียบเทียบค่าของอนุพันธ์ของสัมประสิทธิ์แรงยก และค่าอนุพันธ์สัมประสิทธิ์โมเมนต์เทียบกับจุดศูนย์ถ่วงที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม CFD กับการทดลองจริงของรูปทรงโค้งมนที่นำมาศึกษา ดังรูปที่ 9-10 ตามลำดับพบว่า ผลลัพธ์ CFD ของค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและค่า

อนุพันธ์สัมประสิทธิ์โมเมนต์มีค่าความถูกต้องแม่นยำสูง เมื่อเทียบกับผลการทดลอง กล่าวคือ มีค่าความแตกต่างไม่เกิน 8 % ตลอดทุกความเร็วในย่านความเร็วเหนือเสียงที่ได้จากการศึกษาวิจัย ทั้งนี้เนื่องจากแรงยก และโมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่มุมปะทะต่ำ เป็นผลมาจากการกระจายตัว ของความดันรอบบริเวณผิวรูปทรงโค้งมนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งโปรแกรม CFD สามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และผลลัพธ์ของค่าอากาศพลศาสตร์ทั้งสองชนิดนี้ มีผลกระทบน้อยมากกับการไหลของกระแสอากาศแบบเทอร์บูเลนต์ หรือลามินาร์

เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบการคำนวณค่าอนุพันธ์สัมประสิทธิ์แรงยก และค่าสัมประสิทธิ์อนุพันธ์โมเมนต์ของรูปทรงโค้งมนที่นำมาศึกษาและรูปทรงที่ออกแบบใหม่โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล พบว่าค่าอนุพันธ์สัมประสิทธิ์แรงยกของรูปทรงที่ออกแบบใหม่มีค่าสูงขึ้นโดยเฉลี่ยประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่าอนุพันธ์สัมประสิทธิ์โมเมนต์มีค่าลดลงโดยเฉลี่ยประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ เนื่องจากการกระจายความดัน (Pressure Distribution) ของรูปทรงที่ออกแบบใหม่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปตามรูปทรงส่วนหัวที่ยาวขึ้นทำให้เกิดแรงยกได้เพิ่มมากขึ้นในกรณีที่มีการเคลื่อนที่แบบมีมุมปะทะ นอกจากนี้การกระจายความดันบริเวณส่วนหัวของรูปทรงที่ออกแบบใหม่ทำให้จุดศูนย์กลางความดัน (Center of Pressure) เลื่อนถอยหลังเข้าใกล้จุดศูนย์กลางถ่วงมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์โมเมนต์มีค่าลดลง ซึ่งจะส่งผลดีต่อการเคลื่อนที่แบบมีเสถียรภาพสถิต (Gyroscopic Static Stability)



รูปที่ 9 แผนภาพแสดง Lift Coefficient กับ Mach Number



รูปที่ 10 แผนภาพแสดง Pitching Moment Coefficient
เทียบกับ Mach Number

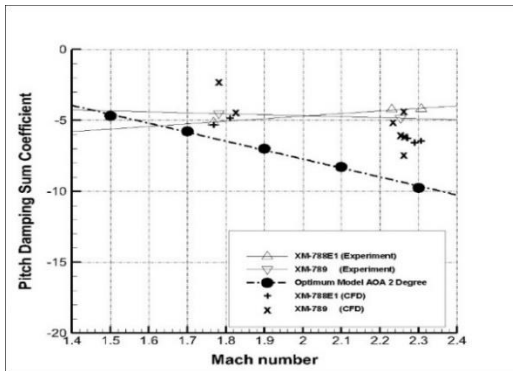
2) ค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์พลวัต

จากการดำเนินการในการคำนวณค่าคุณลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์พลวัตของรูปทรงโค้งมนที่นำมาศึกษา โดยจากการคำนวณด้วยโปรแกรม CFD สามารถแสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณและข้อมูลการทดสอบจากแหล่งข้อมูลอ้างอิงได้ดังรูปที่ 11-12 ตามลำดับ

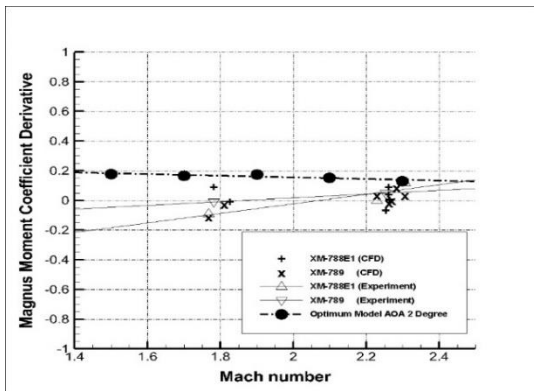
จากรูปที่ 11-12 พบว่า ค่า Pitch Damping Moment Sum Coefficient และค่า Magnus Moment Coefficient Derivative ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม CFD กับการทดลองของรูปทรงโค้งมนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว มัค 1.8 และ 2.3 ตามลำดับ มีความถูกต้องแม่นยำและมีแนวโน้มเป็นลักษณะไปในทางเดียวกัน ซึ่งอยู่ในระดับความเชื่อถือได้ทางวิศวกรรมศาสตร์ (Engineering Accuracy) คือ มีค่าความแตกต่างไม่เกิน 10% ในตลอดทุกช่วงความเร็วที่ทำการศึกษา

เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบการคำนวณค่า Pitch Damping Moment Sum Coefficient และ Magnus Moment Coefficient Derivative ของรูปทรงโค้งมนต้นแบบที่ศึกษาและรูปทรงที่ออกแบบใหม่โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล พบว่าค่า Pitch Damping Moment Sum Coefficient มีค่าลดลง 5-20 เปอร์เซ็นต์ตลอดช่วงความเร็วที่กำหนดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปทรงที่นำมาศึกษา ในขณะที่ค่า Magnus Moment Coefficient Derivative ที่เป็นผลโดยตรงจากเคลื่อนที่แบบหมุนรอบ

แกนลำตัว (Spinning Motion) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นไม่เป็น
นัยสำคัญ (ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์)



รูปที่ 11 แผนภาพแสดง Pitch Damping Sum Coefficient
เทียบกับ Mach Number



รูปที่ 12 แผนภาพแสดง Magnus Moment Coefficient
เทียบกับ Mach Number

3.2.4. การวิเคราะห์เสถียรภาพ

เพื่อเป็นการยืนยันว่ารูปทรงโค้งมนที่ออกแบบใหม่มี
เสถียรภาพในการเคลื่อนที่ทั้งในรูปแบบของเสถียรภาพสถิต
และพลวัต ในหัวข้อนี้จะดำเนินการนำค่าคุณลักษณะอากาศ
พลศาสตร์โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล ที่ได้
จากหัวข้อที่ผ่านมานำไปวิเคราะห์หาเสถียรภาพการ
เคลื่อนที่ของรูปทรงที่ออกแบบใหม่[9] โดยมีสมการ ดัง
สมการที่ (10)–(11)

$$S_g = \frac{\left(\frac{I_x^2}{I_y}\right) \left(\frac{PD}{V}\right)^2}{(2\rho S D^3 C_{M\alpha})} \quad (10)$$

$$S_d = \frac{2(C_{L\alpha} + K_x^{-2} C_{np\alpha})}{C_{L\alpha} + C_D - K_y^{-2} (C_{Mq} + C_{M\dot{\alpha}})} \quad (11)$$

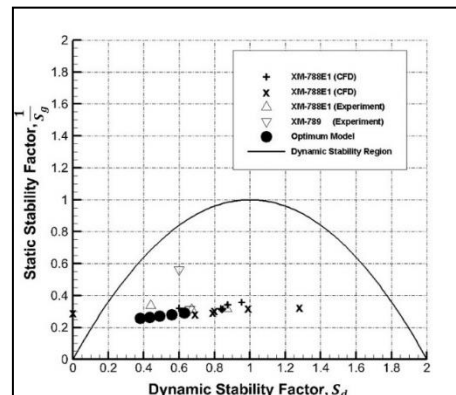
โดยที่ S_g คือ เสถียรภาพสถิตหรือ (Gyroscopic Static
Stability) และ S_d คือ เสถียรภาพพลวัต (Dynamic Stability)
ซึ่งในทางทฤษฎีการมีเสถียรภาพแบบสถิตนั้นหมายถึง วัตถุ
ดังกล่าวนี้ มีความสามารถในการกลับเข้าสู่ความมี
เสถียรภาพเมื่อถูกรบกวนโดยสิ่งแวดล้อมภายนอก [9] ในขณะที่
เสถียรภาพการเคลื่อนที่แบบพลวัต หมายถึงวัตถุดังกล่าวมี
ความสามารถในการกลับเข้าสู่ความมีเสถียรภาพเมื่ออยู่ในการ
เคลื่อนที่แบบพลวัต [9] ซึ่งในการเคลื่อนที่ของรูปทรงโค้งมน
มีหลักการหมุนรอบแกนลำตัวเพื่อรักษาเสถียรภาพ (Spin-
stabilize Body) จึงมีเงื่อนไขของการมีเสถียรภาพการเคลื่อนที่
ทั้งในรูปแบบสถิตและพลวัตดังสมการที่ (12) และ (13)
ตามลำดับ

$$S_g > 1 \quad (12)$$

$$1/S_g > S_d(2 - S_d) \quad (13)$$

จากสมการที่ (12) และ (13) จะพบว่า ถ้าการเคลื่อนที่
ของวัตถุรูปทรงโค้งมนมีเสถียรภาพพลวัต จะสามารถยืนยัน
ถึงการมีเสถียรภาพสถิตด้วย แต่ถ้าในทางกลับกัน การมี
เสถียรภาพสถิตไม่ได้ยืนยันถึงการมีเสถียรภาพพลวัต

เมื่อแทนค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์สถิตและพลวัต
รวมถึงค่าคุณลักษณะเฉพาะของรูปทรงโค้งมนที่ออกแบบ
ใหม่ลงในสมการที่ (10) และ (11) จากนั้นนำมาแสดงผล
การวิเคราะห์ในเงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างเสถียรภาพ
สถิตและพลวัต ดังสมการที่ (13) โดยสามารถแสดงผลการ
วิเคราะห์ในรูปแบบของกราฟได้ ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 แผนภาพแสดงช่วงของเสถียรภาพพลวัต
ของการเคลื่อนที่ของรูปทรงโค้งมน

รูปที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์การวิเคราะห์เสถียรภาพของรูปทรงโค้งมนต้นแบบที่ศึกษากับรูปทรงที่ออกแบบใหม่ พบว่า รูปทรงที่ออกแบบใหม่มีเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ในทุกช่วงความเร็วเหนือเสียงที่กำหนดซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่าเสถียรภาพพลวัตและสถิตอยู่ภายในกรอบรูปพาราโบลาว่า รวมถึงมีค่าเกาะกลุ่มกับรูปทรงโค้งมนต้นแบบที่ศึกษา นั้นแสดงให้เห็นว่า รูปทรงโค้งมนที่ออกแบบใหม่สามารถเพิ่มสมรรถนะในระยะทางการเคลื่อนที่ ในขณะที่ยังคงไว้ซึ่งเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ตลอดช่วงความเร็วเหนือเสียง

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอกระบวนการออกแบบทางอากาศพลศาสตร์ โดยการนำเอากระบวนการ Kriging Response Surface มาสร้างชุดทดสอบโดยใช้กระบวนการ CFD เพื่อหาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของรูปทรงโค้งมนเทียบกับแรงต้านทานทางอากาศพลศาสตร์โดยผลลัพธ์ทางอากาศพลศาสตร์นั้นถูกคำนวณโดยใช้โปรแกรมคำนวณอากาศพลศาสตร์ของไหลที่อยู่พื้นฐานของสมการ RANS และประยุกต์ใช้ Turbulent model แบบ Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ จากผลลัพธ์การเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของการคำนวณเทียบกับผลการทดลองจริงจากแหล่งข้อมูลอ้างอิง พบว่า ผลลัพธ์การคำนวณค่าคุณลักษณะอากาศพลศาสตร์สถิตและพลวัตมีค่าสอดคล้องใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยมีค่า ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10% แสดงให้เห็นถึงความเชื่อถือได้ของการประยุกต์ใช้โปรแกรม CFD ทั้งนี้เพื่อสร้างความมั่นใจในการนำมาเป็นหนึ่งในเครื่องมือการออกแบบรูปทรงโค้งมนต้นแบบให้มีสมรรถนะที่สูงขึ้นโดยการ บูรณาการรวมกับการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธี Kriging Response Surface โดยสร้างชุดทดสอบจำนวนทั้งหมด 400 ชุด เพื่อให้ได้สมการแนวโน้มของพื้นผิวดตอบสนองที่มีความคลาดเคลื่อนรวมเฉลี่ยไม่เกิน 10% จากนั้นจึงดำเนินการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ Shifted Hammersley Sampling ทำให้ได้ผลลัพธ์การออกแบบในรูปแบบของรูปทรงโค้งมนที่ออกแบบใหม่ ซึ่งสามารถ ลดแรงต้านทานอากาศได้มากที่สุด

ถึง 20.52% ในขณะที่ยังคงไว้ซึ่งเสถียรภาพทั้งรูปแบบของเสถียรภาพสถิตและพลวัตในการเคลื่อนที่ ตลอดช่วงความเร็วเหนือเสียงที่ทำการศึกษา

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ตัวย่อ	คำอธิบาย	Unit
C_D	: drag coefficient (drag force / qS)	
C_{D0}	: zero-lift drag coefficient (drag force / qS)	-
$C_{L\alpha}$	: lift coefficient derivative (lift force / qSD Sin α)	-
$C_{M\alpha}$	: pitching moment coefficient derivative (pitching moment / qSD Sin α)	-
$C_{Mq} + C_{M\dot{\alpha}}$	: pitch-damping moment sum coefficient	-
C_N	: normal force coefficient (normal force / qS)	-
C_n	: side force coefficient (side force / qS)	-
$C_{np\alpha}$	: Magnus moment coefficient derivative (Magnus moment / qSD (PD/V) Sin α)	-
$C_{N\alpha}$	: normal force coefficient derivative (normal force / qSD Sin α)	-
Re	: Reynolds number based on bullet diameter ($\rho V D / \mu$)	-
I_x, I_y	: moments of inertia	gm-cm ²
m	: mass	kg
M	: Mach number	-
N	: normal coordinates	
q	: dynamic pressure, ($1/2 \rho V^2$)	N/m ²
S_g, S_d	: gyroscopic and dynamic stability factor	-
V	: freestream velocity	m/s
ρ	: density	kg/m ³

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. L. McCoy, "Aerodynamic characteristics of the 30mm XM788 and XM789 projectiles," Ballistic Research Laboratories, Aberdeen, MD, USA, Rep. 2432, 1982.
- [2] P. R. Viswanath, "Flow management techniques for base and afterbody drag reduction," *Progress in Aerospace Sciences*, vol.32, no. 2–3, pp. 79–129, 1996, doi: 10.1016/0376-0421(95)00003-8.
- [3] M. A. Suliman., O. K. Mahmoud., M. A. Al-Sanabawy and O. E. Abdel-Hamid. , "Computational Investigation of Base Drag Reduction for a Projectile at Different flight regimes," in 13th International Conference on Aerospace Science & Aviation Technology, Military Technical College, Cairo, Egypt, May 26–28, 2009, pp.1–13.
- [4] A. Ibrahim and A. Filippone, "Effect of porosity strength on drag reduction of a transonic projectile," *Journal of Aircraft*, vol. 44, no. 1, pp. 310–316, 2006, doi: 10.2514/1.23613.
- [5] J. M. Nicolas, "Optimal Bodies for Minimum Total Drag at Supersonic Speeds," NSWC, Dahlgren, VA, USA, Rep. TR-80-208, 1980.
- [6] Van Dyke. M.J., "The Similarity Rules for Second-Order Subsonic and Supersonic Flow," NACA Technical Note 3875, 1956.
- [7] E. R. Van Driest., "Turbulent boundary layers in compressible fluids," *Journal of the Aeronautical Sciences*, vol. 18, no. 3, pp. 145–160, 1951, doi: 10.2514/8.1895.
- [8] W. Jiajan, R. S. M. Chue, T. Nguyen and S. Yu, "Optimization of round bodies for aerodynamic performance and stability at supersonic speeds," *Aeronautical Journal*, vol.117, no. 1193, pp.661–685, 2013.
- [9] R. L. McCoy, "Linearized Pitching and Yawing Motion of Rotationally Symmetric Projectiles," in *Modern exterior ballistics*, 2nd ed., Atglen, PA, USA: Schiffer Pub., 2012, ch. 10, pp. 221–238.
- [10] G. E. P. Box and N. R. Draper, "Introduction to Response Surface Methodology," in *Response surfaces, mixtures, and ridge analyses*, 2nd ed., Hoboken, N.J., USA: John Wiley, 2007, ch. 1, pp. 1–16.
- [11] DesignXplorer Users Guide, ANSYS, Inc., Canonsburg, PA., USA, 2021, pp. 309–396.
- [12] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA Journal*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, 1994, doi: 10.2514/3.12149.
- [13] J. De Spirito, S. I. Sifton and P. Weinacht, "Navier-Stokes Predictions of Dynamic Stability Derivatives: Evaluation of Steady-State Methods," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol.46, no. 6, pp. 1142–1154, 2008, doi: 10.2514/1.38666.
- [14] T. -T. Wong, W. -S. Luk and P. -A. Heng, "Sampling with Hammersley and Halton Points," *Journal of Graphics Tools*, vol. 2, no. 2, pp. 9–24, 1997, doi: 10.1080/10867651.1997.10487471.

Excel Based Monte Carlo Simulation for the (Q,r) Inventory Control Model

Banhan Lila*, Adisak Nowneow and Sanya Yimsiri

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University,

Saensuk, Mueang, Chonburi, 20131, Thailand

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

Received: Dec 23, 2021; Revised: Mar 29, 2022; Accepted: May 09, 2022

Abstract

In supply chain management, inventory plays a key role to deal with demand and supply uncertainty aiming to guarantee a smooth flow of materials and products along the chain. This paper focuses on determining the suitable values of Q and r in the (Q,r) inventory control policy model when it was applied to the situation of nonstationary but known to be empirically discretely distributed of product demands and lead times. The total cost (TC) and service level (SL) were used to measure the policy performance using an Excel-based Monte Carlo Simulation (MCS) approach with a set of actual historical demand data from an automotive tire service store. Results from the MCS indicated that the (Q,r) model could lead to 12.36% lower TC with 2.31% higher SL , on average, when the Q and r values were determined based on empirical discrete distribution compared to that of normal distribution. Therefore, the empirical discrete distribution of demand and lead time should be utilized in a situation where the assumption of normal and other traditional distributions is invalid.

Keywords: Inventory Control Policy, Empirical Discrete Demand Distribution, Excel based Monte Carlo Simulation, Automotive Tires

1. Introduction

As a member of the supply chain, a retailer buys products from upstream members and sells them to its customers at a certain retail price. The difference between the retail price and cost that includes unit operations cost marks the profit per unit. To increase the profit and to maintain, perhaps to gain, competitive advantage, the retailer must try to reduce the cost of its operations related to holding of such products while maintaining customer service [1–2]. Thus, adopting an appropriate inventory control policy to match the variation of customer demands, then, has become vital and challenged for the retailer [2–4]. This decision is, commonly, a part of inventory management strategy.

Numerous evidences from both practices and researches [5] have indicated that difficulty in selecting the suitable inventory control policy directly relates to variation, especially for the circumstance with unknown and nonstationary demand [6–9]. This is true for the situation of the automotive tire service store who orders tires from manufacturers or wholesalers in advance, stores them at a warehouse until they are sold to customers. It is clear that the exact customer demands are not foreknown and normally are not constant over time [10].

Most continuous review of inventory control policies, decisions on the order quantity (Q) and the reorder point (r) are needed for each product to meet customer

requirements with reasonable cost. The customer service level (SL) is usually set as the target to achieve with minimum (or at reasonable) total cost (TC) [2],[8–12]. Thus, SL and TC are generally used as the main indexes to evaluate the performance of an inventory policy and are significantly affected by the parameters Q and r . The appropriate values of Q and r closely relate to the behavior of demands and lead times. Therefore, it is important to statistically understand the demand and lead time behaviors which can be pointed out when sufficient historical data is available. Much of the research about inventory control policies have assumed that demands are normally distributed with a known mean (μ) and standard deviation (σ) [8],[13–14]. Some recently applied researchers have extended their analysis to Poisson [9] and Exponential of demand distribution [15] with constant lead time. However, some historical demand patterns do not statistically match any of the traditional distributions while the ordering lead times are not always constant [10]. Therefore, the empirical distribution should be assumed in the evaluation of an inventory control policy.

This paper considers the situation of nonstationary but known to be empirically discretely distributed of product demands and lead times, focusing on determining the suitable values of Q and r for the (Q, r) model. The TC and SL of the model are determined using the Excel-based Monte Carlo Simulation (MCS) approach with a set of actual historical demand data from an automotive tire service.

2. Backgrounds

This section is separated into 2 subtopics. The main performance indexes of inventory control policy are discussed in Section 2.1. A brief literature review related to the problem scenario is discussed in Section 2.2.

To discuss mathematical models related to inventory control concepts throughout this paper, the following notations are defined.

t	Subperiod in a planning time
T	Planning horizon
C_o	Ordering cost (baht/unit)
C_c	Carrying cost (baht/unit/period)
C_s	Shortage cost (baht/unit)
C_{EX}	Expediting cost in (baht/time)
D_t	Product demand for t
$\bar{d}$	Average demand
L_t	Ordering lead time t
$\bar{L}$	Average ordering lead time
Q	Order quantity
Q^*	Optimal order quantity
r	Reorder point
A_t	Available inventory for t
SS	Safety Stock
SL	Customer service level
SL_{tg}	Target customer service level
TC	Total cost
SD_t	Satisfied product demand for t
Z_t	1 if an order is placed at the end of t or 0 otherwise
$I_{avg,t}$	Average inventory for t
$I_{int,t}$	Inventory at the beginning of t
$I_{end,t}$	Inventory at the end of t
$I_{s,t}$	Shortage units for t
I_t^*	Dummy inventory at the end of t
CC_t	Carrying cost incurred for t
OC_t	Ordering cost incurred for t
SC_t	Shortage cost incurred for t
$f(D_{t,i})$	Probability mass function of D_t
$F_t(A_t)$	Cumulative distribution function of A_t
$E(D_t)$	Expected value of D_t
OR_t	Order received at the beginning of t
AV_t	Order arrival time for order placed at the end of t

The dummy inventory at the end of period t , (I_t^*), is determined using $I_{end,t} + Q \cdot Z_t$ to prevent reordering if the preceding order has not arrived.

2.1 Performance Indexes

The main reason to employ an inventory strategy is to meet customer demand, especially in a retail operation [1–2],[16]. However, the demand is usually not known for certainty. Thus, it is not always possible to hold exactly the amount of product demanded. In practice, with selected inventory control policy the additional amount of inventory, called safety stocks (SS), is kept on hand to increase the ability to meet the product demand in a timely, efficient manner. The higher expected SL requires a higher inventory level and, thus, higher inventory costs.

The actual SL of any product, as shown in Equation (1), is the ratio between the total satisfying demand and the total demand for the entire controlling period (denotes by T) [2],[9].

$$SL = \frac{\sum_{t=1}^T SD_t}{\sum_{t=1}^T D_t} \quad (1)$$

The target (or planned) customer service level (SL_{tg}) may be set at the beginning of the controlling horizon. The demand for the product for subperiod t is a random variable. SL_{tg} is simply the probability of demand for subperiod t (D_t) being less than or equal to the available inventory for the same period (A_t). For period t , the probability is given by the cumulative distribution function $F_t(A_t)$, which can be expressed in Equation (2).

$$SL_{tg,t} = F_t(A_t) = P[D_t \leq A_t] \quad (2)$$

Where P represents the probability of the term in the bracket. The expected service level for the entire planning horizon can be expressed as $\prod_{t=1}^T F_T(A_t)$. Obviously, at is a function of the order quantity Q and reorder point r . In

practice, shortage cost may occur when the condition in Equation (2) is violated for some t 's which would pull the overall SL down and damage the image of a company (or a retailer). Numerically, the shortage cost is added to the total inventory management cost to better enumerate the situation and it is given in Equation (3).

$$TC = \sum_{t=1}^T (Z_t C_o + I_{avg,t} \cdot C_c + C_s) \quad (3)$$

$I_{avg,t}$ can be calculated from $(I_{int,t} + I_{end,t}) / 2$. The value of C_s may vary depending on how the shortage situation is handled. Assuming that there is no other constraints, the inventory control policy should be selected and implemented in order to maximize the SL with the minimum TC or to minimize the TC with acceptable target SL , regardless of demand distribution.

2.2 Literature Review

Some books [1–2],[16], and many research papers described the importance and details of inventory management. The recent versions tended to emphasize more on the supply chain [1],[3],[10]. Bedworth and Bailey [16] explained the principle of EOQ and how it can be implemented with a variety of inventory control policies under deterministic assumptions. They also have suggested how to use safety stock in dealing with stochastic conditions with an underlying normal probability of demand and lead time. Applications can be found in [17–19]. Similar background can be found in Russell and Taylor III [1] with more emphasis on supply chain management. Lila [2] provided detail regarding how to set up Excel spreadsheet for inventory control using the Monte Carlo Simulation approach. Implementation and adaptation of such technique can be seen in numbers of application researches, [8–10],[12],[14],[20], for example. All of them tried to determine the appropriate inventory control policies with uncertain demands. Silsat and Lila [8] applied to the case of

consumable items that their demands did not dependent on finished products and are highly fluctuated. Mahitpan, Lila, and Kunadilok [9] and Pengsawat [12] applied to spare parts for maintenance of critical equipment. Smmutranukul and Phanvijitsiri [10] compared performance between the (Q, r) and (T, S, s) models for a tire service store while Leepaitoon, and Bunternghit [20] studied similar cases but demands were generated based on the maximum, minimum and average of historical data. Ruanghiranwanich and Lila [14] used the MCS to find a suitable order quantity of parts for electronic products. Some other researches about inventory management have utilized high-level simulation programs to study the performance of inventory policies with uncertain demands [6–7],[11],[19]. Abuizam [6] studied the periodic inventory model using Parasade@RISK simulation. Cholodowicz and Orlowski [7] considered inventory policy for perishable products that have Weibull demand distribution using System Dynamics. Limbuan and Lila [11] used ARENA to simulate the (Q, r) and the (T, S, s) models for uncertain but low demands for spare parts. These researches resulted in a saving of 7–25% of inventory management cost compared to the before-studied policies through numerical cases.

Based on the reviews, it is obvious that the simulation technique is an appropriate tool for use in studying inventory control policies with stochastic conditions. To overcome the burden of buying specific simulation programs (normally with high cost) and learning how to use them, Excel is a convenient choice since it is most certainly available with any computer.

3. Inventory Control Concepts

Inventory refers to items or products that are kept to satisfy the future demands that are random variables [2]. Holding insufficient inventory may lower the SL while having too large inventory incurs costs. An appropriate inventory control policy

can help to minimize the costs while meeting acceptable SL . The basic parameters needed are order size, reorder point and safety stock.

With known and constant demand, no shortage and instantaneous assumptions, the optimal order quantity is determined using Equation (4).

$$Q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot \sum D_t \cdot C_o}{C_c}} \quad (4)$$

The quantity Q^* is enough to fulfill the constant demand for $Q^*/\bar{d}$ Periods and minimizes the total cost. In this case TC in Equation (3) can simply be written as shown in Equation (5).

$$TC = \frac{C_o \cdot \sum D_t}{Q^*} + C_c \cdot I_{avg} \quad (5)$$

The amount Q^* is reordered when the inventory level is less than or equal to the reorder point r , that can be set using Equation (6).

$$r = \bar{d} \cdot L \quad (6)$$

If the lead time is also constant, the time between each order is placed, remains the same.

In reality, the deterministic condition about demand and lead time are usually not true. Thus, SS is enacted to deal with the stochastics conditions. This requires an analysis of statistical behaviors for both demands and lead times through historical data. In the case that demand and lead time are normally distributed, SS could be calculated using several equations explained in [1],[2],[5],[16]. However, the focus of this paper is on the case of an empirical discrete demand. In any period, D_t can take any value in position i^{th} in a discrete random variable having $f_i(D_{t,i})$ as its probability mass function (PMF) as depicted in **Table 1**. $D_{m,i}$ represents the mid-point of each class i . For subperiod t , D_t can be classified into classes, i starts from 1 and increases upward. Each class i has probability of occurrence of $f(D_{t,i})$. The actual demand value ($D_{t,i}$) is assumed

to be discretely uniformly distributed between the lower ($LD_{t,i}$) and upper ($UD_{t,i}$) bounds of each class i .

Table 1 Probability mass function of D_t

Class _{i}	$D_{tm,i}$	$LD_{t,i}$	$UD_{t,i}$	$f(D_{t,i})$
1	D_{tm1}	$LD_{t,1}$	$UD_{t,1}$	$f(D_{t,1})$
2	D_{tm2}	$LD_{t,2}$	$UD_{t,2}$	$f(D_{t,2})$
...	...	...	...	...
u	$D_{tm,u}$	$LD_{t,u}$	$UD_{t,u}$	$f(D_{t,u})$
$u+1$	$D_{tm,u+1}$	$LD_{t,u+1}$	$UD_{t,u+1}$	$f(D_{t,u+1})$
...		...	...	...

Thus, in any subperiod, holding inventory greater than or equal to $E(D_{tm})$, statistically, corresponding to ≥ 0.5 or 50% SL . The variable A_t in Equation (2) also represents the reorder point r to reach the SL_{tg} . Based on this relationship, the r is then derived and can be expressed in Equation (7).

$$r = E(D_t) + \sum_{i=1}^u f_t(D_{t,i}) \quad (7)$$

The term $\sum_{i=1}^u f_t(D_{t,i})$ is the cumulative probability function of D_t with values ranging from class $i = 1$ to class $i = u$ that enable r satisfies the SL_{tg} . Thus, it also represents the SS .

The lead time is often easier to manage as it does not vary in a wide range [9],[10]. The probability mass function L_t can be defined using discrete probability as shown in **Table 2**.

Table 2 Probability mass function of L_t

L_t	$f(L_t)$
1	$f(L_1)$
2	$f(L_2)$
...	...
L	$f(L_L)$

In this paper, performance indexes (SL and TC) of the (Q, r) model was investigated if it was implemented as the control policy at a retailer for an automotive tire service where demand and lead time are empirically discrete random variables. The concept of the (Q, r) model is the quantity Q is ordered and is reordered once the inventory depletes to the level of r or lower. The process repeats for the entire planning horizon.

The investigation was performed through the Monte Carlo Simulation on Microsoft Excel. The development of such simulation model is explained in Section 4.

4. Excel Based Monte Carlo Simulation

Monte Carlo (MC) is a technique to generate random variables of interest from a known behavior [2]. Subsequently, such variables can be used in the logic of a simulation model or a system to evaluate its performance. This type of model is often referred to as the Monte Carlo Simulation (MCS) [2]. This paper built the MCS on Microsoft Excel Spreadsheet to simulate the performance of the (Q, r) model. The MCS for T periods was constructed for individual tire model having TC and SL as performance indexes, the logical concepts and their corresponding Excel formula are explained in section 4.3.

4.1 Input Parameters

In **Fig. 1**, the main inputs for the MCS model consist of the following.

- 1) All cost parameters including Co , Cc , and Cs , beginning inventory, CEX and SL_{tg} . These parameters were placed on the top left, above the Logic model.
- 2) The starting values of Q and r which were determined using Equations (4) and (7), respectively.
- 3) Distributions of demand and lead time in the form of empirical discrete probability tables.

4.2 Generation of Random Variables

The demand (D_t) and the lead time (L_t) are the main random variables. With the discrete form for D_t as shown in **Table 1**, the value was generated using a nested *VLOOKUP()* function that performs the following 2 steps;

- 1) Select the class i based on the given discrete probability function.
- 2) The value of D_t was generated based on a discrete uniform distribution between the LD_{ti} and the UD_{ti} . The generated values must be rounded to the nearest whole number if the demand are integers.

Similarly, but easier, the L_t was generated using a *VLOOKUP()* function based on its probability mass function when the order was placed.

4.3 Logic of the Model

Logics of the MCS can be described as follow;

- 1) Generated the pseudorandom numbers (m_t) for all t 's using a *rand()* function.
- 2) Generate D_t using the nested *VLOOKUP()* function from its *PMF*, for all t 's.
- 3) For $t=1$,
 - a. Set $I_{int,1}$ = beginning inventory ($I_{int,0}$), and $I_{int,t} = I_{end,t-1}$ for the remaining periods.
 - b. Set $OR_1 = 0$, indicating a starting period.
- 4) Set $A_t = I_{int,t} + OR_t$ for all t 's
- 5) Set $SD_t = \min(D_t, A_t)$ for all t 's
- 6) Set $I_{end,t} = A_t - SD_t$ for all t 's
- 7) Set $Z_t = 1$, if $I_{end,t} + Q \cdot Z_t \leq r$ or 0 otherwise.
- 8) If $Z_t = 1$, generate L_t using *VLOOKUP* function from its *PMF*, or 0 otherwise, for all t 's
- 9) Set $AV_t = t + 1 + L_t$, if $L_t \neq 0$ or 0 otherwise.
- 10) For $t > 1$ to T ,
 - a. Set $OR_t = \text{countif}(\text{range from 1 to } t, t) \cdot Q$
 - b. Set $I_t^* = I_{t-1}^* - SD_t + Q$, if $Z_{t-1} = 1$ or $I_t^* = I_{t-1}^* - SD_t$ otherwise.
- 11) Costs calculation,

- a. $CC_t = C_c \cdot I_{avg,t}$
- b. $OC_t = C_o \cdot Z_t$
- c. $SC_t = C_{EX} + C_s \cdot (D_t - A_t)$,

if $D_t - A_t > 0$ or 0 otherwise.

The concept used in calculating shortage cost was based on actual practice that the owner would always seek available products from a nearby store when he/she did not have what the customer wanted. Therefore, the expediting cost (C_{EX}) would occur along with loss of some profit which refers to as C_s .

4.4 Output Analysis

The TC and SL could be determined based on the relationship in Equations (3) and (1), respectively. In the MCS, TC is simply the summation of CC_t , OC_t and SC_t for all periods $t = 1$ to T . Similarly, the SL is the ratio between the summations of SD_t and D_t for all periods $t = 1$ to T .

The MCS was verified by comparing its TC and SL with manual calculation when the known and constant demands and lead times were entered. The result indicated that the MCS model worked properly and can be used for further analysis.

Equations (5) and (7) were utilized to determine the values of Q and r , respectively. The fact that the aspect of stochastic lead time was not considered in Equations (7), the values of Q and r were only set as the starting values in the MCS. The TC with values of Q and r varied from -50% to +100%, with 10% step, from their starting values were run to find the minimum TC with acceptable SL ($SL \geq SL_{t,s}$). For each combination of Q and r values, the number of simulation runs was determined according to the criteria that the error (half-width, HW) of 95% confidence interval (CI) of the TC must be less than 10% of its mean. After the Q and r values were set to use in the MCS model to investigate the performance of the (Q, r) control policy in the interested case.

5. Numerical Case

In this paper, the real historical weekly units sold of the highest demand tire model at an automotive tires retail

service located in Chonburi province was collected between 2019 to 2020, along with its order lead times. Statistically, based on the sum of the square of error, at 0.05 significant level, the demand and lead time behaviors did not match with any traditional probability distribution. Therefore, empirically discrete distributions seem to be the best functions and are in **Tables 3 and 4** for demand and lead time, respectively.

From **Table 3**, the average ($E(D_t)$) is 82.85 units and standard deviation (SD) of D_t is 47.85 units. Similarly, from **Table 4**, the average ($E(L_t)$) is 1.1 weeks and standard deviation (SD) of L_t is 0.3 weeks. Other relevant information of this tire model was collected and is provided in **Table 5**.

Table 3 Distribution of D_t (units/week)

Class _i	$D_{tm,i}$	$LD_{t,i}$	$UD_{t,i}$	$f(D_{t,i})$
1	15.150	0.000	30.300	0.08
2	45.451	30.301	60.601	0.27
3	75.752	60.602	90.902	0.37
4	106.053	90.903	121.203	0.13
5	136.354	121.204	151.504	0.02
6	166.655	151.505	181.805	0.06
7	196.956	181.806	212.106	0.08

Table 4 Distribution of L_t (weeks)

L_t	$f(L_t)$
1	0.90
2	0.10

Table 5 Relevant information

Item	value	unit
Unit cost	2850	Baht/unit
C_c	2.39	Baht/unit/week
C_o	2000	Baht/order
C_s	82	Baht/unit

Table 5 Relevant information (cont.)

Item	value	unit
C_{EX}	1000	Baht/time
Annual Demand	3779	units
Beginning Inventory	322	units
SL_{lg}	0.85	

According to reasonable management of the store manager, TC for the 2019–2020 years were evaluated to be 93,877 baht/year with 1.00 of SL . These numbers would be used as a baseline for comparison with the indexes getting from the MCS.

The starting values of Q and r were calculated to be 297.31 units and 173.85 units, respectively ($E(D_t) = 82.85$, from class $i = 1$ to $u = 3$, $SS = 91$ units). The SL_{lg} was set to 0.85 (with $r = 173.85$ units, according to **Table 3**, this value falls into class 6, thus the SL_{lg} of 0.87 could be expected). The values of Q and r were rounded to 300 units and 170 units, respectively, and were used to run the experiments by varying Q from 150 to 600 and varying r from 85 to 340, with 10 runs for each combination which was enough since the half-widths were between 3.78–7.65% for TC s, and were between 1.55–2.29% for SL s, for all combinations. The outcomes showed that the minimum TC occurred at the combination of $Q = 330$ and $r = 204$ and 221, with SL at least 0.945. To confirm the outcome, $r = 210$ was chosen at set to run the MCS to find the optimal Q . Results are shown in **Fig. 1**.

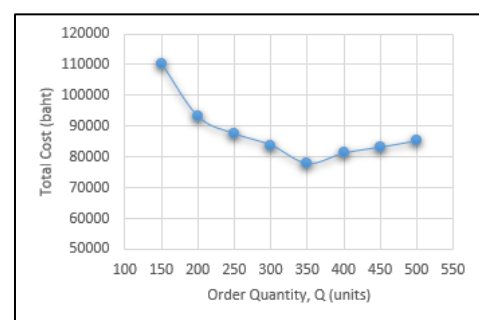


Figure 1 TC from $r = 210$ units

From Figure 1, the minimum TC could be found with Q between 300 to 400 units. The value of $Q = 350$ units and $r = 210$ units were set to run the MCS again for 30 runs. Statistical results of TC and SL are given in **Table 6**.

Half-widths of both TC and SL deviate from their means of only 4.68% and 1.03%, respectively. Therefore, results from 30 runs of the MCS were statistically accurate.

Table 6 TC and SL from the MCS

Statistics	TC	SL
Mean	77682	0.968
SD	7599	0.022
HW	3638	0.01

The analysis also indicated that if the (Q,r) model was implemented, about 17.25% ($93,877 - 77,682 = 16,195$ baht/year) of the total inventory management cost could be reduced with expected SL dropped from 1.00 to 0.968, or around 3.2% decrement.

Performances of the (Q,r) model were also compared based on normal and discrete distributions of demand and lead time. Input parameters that were used in 30 runs of the MCS for the two underlying distributions are provided in **Table 7**.

Table 7 Input parameters for normal and discrete distribution

Parameters	Normal	Discrete
μ (unit/week)	71.69	82.74
σ (unit/week)	46.27	47.77
Q (unit)	300	350
r (unit)	176	210

For normal distribution, the value Q from historical demand was 297.32 (rounded to 300) while the value r was calculated from $\bar{D}_t \cdot \bar{L}_t + z_{0.85} \cdot SD \cdot \sqrt{\bar{L}_t}$. On the other hand, for discrete distribution, the values Q and r were the

result of the experiments discussed previously. The statistical results are given in **Table 8**.

Table 8 TC and SL from the MCS between normal and discrete distribution

Statistics	Normal		Discrete	
	TC	SL	TC	SL
Mean	88640	0.946	77682	0.968
SD	13504	0.027	7599	0.022
HW	5043	0.01	3638	0.01

Half-widths for all values of TC and SL for both distributions were within 6% of their respective means indicating that 30 runs were reasonable accurate.

The means of TC and SL getting from the use of normal and discrete Q,r parameters were compared using 2 unequal variance t-tests. Results, as shown in **Table 9**, strongly indicated that there were differences in both means at 0.05 significant level. The Q,r parameters from the discrete distribution return, 10,958 baht/year or 12.36% lower TC and 0.022 or 2.31% higher SL than that of the normal distribution.

Table 9 Result of t-test of TC and SL from MCS between normal and discrete distributions

Items	TC		SL	
	Normal	Discrete	Normal	Discrete
Mean	88640	77682	0.946	0.968
SD	13504	7599	0.027	0.022
Observations	30	30	30	30
Hypothesized	Mean Diff. = 0		Mean Diff. = 0	
p value	0.0003		0.0011	

6. Results and Conclusions

This paper aimed to determine the suitable values of Q and r in the (Q,r) inventory control policy model when it was applied to the situation of nonstationary but known to be empirically discretely distributed of product demands

and lead times. The product demand for each period (D_i) is defined in the form of an empirically discrete classes while the discrete uniform distribution is assumed to represent the random distribution of demand within a class. The Excel-based Monte Carlo simulation (MCS) approach was described in detail and utilized to evaluate the performance of the model in terms of TC and SL . Application to the numerical case of a high-demand tire model of an automotive tire service store demonstrated that the MCS can be used to estimate the outcome of the (Q,r) model efficiently. Based on the set of historical data used in this case study, result from the MCS also showed that setting of the inventory control parameters with the discrete distribution of demands and lead times of products led to significantly better performance in terms of TC and SL than that of the normal distribution. Thus, the method proposed should be utilized in a situation that demand and lead time do not seem to be normally distributed or match with other traditional probability distributions. The MCS can also be modified to fit the concept of other similar control policies. However, this paper did not perform the sensitivity analysis of the C_o , C_c , C_{EX} , and C_s parameters as they may influence the performance of such control policies, since they are generally fixed for a specific situation.

References

- [1] S. R. Russell and B. W. Taylor III, "Role of inventory management," in *Operations Management*, 10th ed., Solaris, Singapore: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd., 2019, ch. 13, sec. 13.1, pp. 555–556.
- [2] B. Lila, "Analysis and control of inventory," in *Production Planning and Control*, Bangkok, Thailand: Top Publishing Co. Ltd., 2010, ch. 5, sec. 5.6,, pp. 167–168.
- [3] M. Godichaud and L. Amodeo, "Comparing Inventory Policies for Closed-Loop Supply Chain Using Simulation-Based Optimization," in *Proc. the 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control International Federation of Automatic Control*, Saint Petersburg, Russia, 2013, pp. 418–423, doi: 10.3182/20130619-3-RU-3018.00384.
- [4] Y. Tao, L. H. Lee, E. P. Chew, G. Sun and V. Charles, "Inventory Control Policy for a Periodic Review System with Expediting," *Applied Mathematic Modelling*, vol. 49, pp. 375–393, 2017, doi: 10.1016/j.apm.2017.04.036.
- [5] N. C. Goncalves, M. S. Calvaho and P. Cortez, "Operations Research Models and Methods for Safety Stock Determination: A Review," *Operations Research Perspectives*, vol. 7, pp. 1–14, 2020, doi: 10.1016/j.orp.2020.100164.
- [6] R. Abuizam, "Optimization of (s, S) Periodic Inventory Model With Uncertain Demand and Lead Time Using Simulation," *International Journal of Management and Information Systems*, vol.15, no. 1, pp. 67–78, 2011, doi: 10.19030/ijmis.v15i1.1597.
- [7] E. Cholodowicz and P. Orlowski, "Development of New Hybrid Discrete-time Perishable Inventory Model based on Weibull Distribution with Time-varying Demand Using System Dynamics Approach," *Computer and Industrial Engineering*, vol. 154, pp. 1–13, 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107151.
- [8] S. Silsat and B. Lila, "A Study of Inventory Management Policies for Consumable items with Non-Stationary Demand: A Case Study of Sanitary Ware Factory," presented at the Conference of Industrial Engineering Network, Songkla, Thailand, May 5–7, 2021.
- [9] K. Mahitpan, B. Lila and J. Kunadilok, "A Study of Inventory Management Policy of Spare Parts for Machine Maintenance Operations," in *Proc. the 2017 Technology Innovation Management and*

- Engineering Science International Conference*, Bangkok, Thailand, 2017, pp. 251–257.
- [10] A. Smmutranukul and J. Phanvijitsiri, “Study of Inventory Control Policies; Case Study of a Selling and Changing Tires Store,” B.Eng. project, Dept. Ind. Eng., Burapha Univ., Chonburi, Thailand, 2019.
- [11] W. Limbuan and B. Lila, “A Study of Inventory Control Policy for Spare Parts,” presented at the Conference of Industrial Engineering Network, Ubon Rachathani, Thailand, Jul. 23–26, 2018, pp. 1–5.
- [12] W. Pengsawat, “A Study of Management Policies for a Composite Material Used in the Maintenance Operations of the Aviation Engine”, M.Eng. Thesis, Dept. Ind. Eng., Burapha Univ., Chonburi, Thailand, 2018.
- [13] D. Williams and T. Tokar, “A Review of Inventory Management research in Major Logistics Journals Themes and Future Directions,” *The International Journal of Logistics and Management*, vol. 19, no. 2, pp. 212–232, 2008, doi: 10.1108/09574090810895960.
- [14] T. Ruanghiranwanich and B. Lila, “A Study of Plastic Component Inventory Models for Electronic Products,” presented at the National Conference on Administration and Management, Songkla, Thailand, Jun. 30, 2018, pp. 530–540.
- [15] W. Supitak and S. Pulivekin, “An Inventory Management using Simulation Concepts for the Case of LIFO with Expiration Date Products,” *The Journal of Thai Operations Research*, vol. 2, pp. 22–32, 2017.
- [16] D. D. Bedworth and J. E. Bailey, “Inventory analysis and control,” in *Integrated Production Control Systems*, 2nd ed., New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1987, ch. 6, sec. 6.3-6.4pp. 203–210.
- [17] C. Kasemset and W. Chatchayangkul, “Inventory Management Model: A Case Study of Chemical Fertilizer Store”, presented at the Conference of National Operations Research, Bangkok, Thailand, Sep. 6–7, 2012.
- [18] S. Santi and H. B. Mursyid, “Comparison Continuous and Periodic Review Policy Inventory Management System Formula and Enteral Food Supply in Public Hospital Bandung,” *International Journal of Innovation, Management and Technology*, vol. 4 no. 2, pp. 253–258, 2013, doi: 10.7763/IJIMT.2013.V4.401.
- [19] T. Aouam, F. Ghadimi and M. Vanhoucke, “Finite Inventory Budgets in Production Capacity and Safety Stock Placement under the Guaranteed Service Approach,” *Computer and Operations Research*, vol. 131, pp. 1–18, 2021, doi: 10.1016/j.cor.2021.105266.
- [20] S. Leepaitoon and S. Bunterngrchit, “The Application of Monte Carlo Simulation for Inventory Management: a Case Study of a Retail Store,” *International Journal of the Computer, the Internet and Management*, vol. 27, no. 2, pp. 67–83, 2019.

การปรับปรุงตำแหน่งการจัดเก็บของคลังสินค้าสำเร็จรูป

กรณีศึกษา บริษัทผลิตเสื้อผ้ากีฬา

Improvement of the storage locations for the finished products warehouse:

A case study of sportswear manufacturing company

วรุฒม์ บุญภักดี^{1,*}, ดวงรัตน์ หิรัญญะศิริ², รัชานนท์ ลั่นซ้าย¹, วิศัลยา เกียรติคุณรัตน์¹ และปฐมพงษ์ สังข์ทอง^{1,*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน,

กำแพงแสน กำแพงแสน, นครปฐม 73140

² ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ, คณะอุตสาหกรรมและการเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

Warut Boonphakdee^{1,*}, Duangrat Hirunyasiri², Rachanon Lancai¹, Wisallaya Kiattikunrat¹ and

Pathompong Sangthong¹

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University

Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand

²Department of Textile Science, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Lat Yao,

Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding Author E-mail: fengwrb@ku.ac.th

Received: Dec 07, 2021; Revised: Feb 07, 2022; Accepted: May 09, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้เสนอการปรับปรุงตำแหน่งการจัดเก็บคลังสินค้าสำเร็จรูป กรณีศึกษา บริษัทผลิตเสื้อผ้ากีฬา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเก็บสินค้าสำเร็จรูป และปรับปรุงกิจกรรมในคลังสินค้าให้สะดวกต่อการทำงานมากขึ้น สภาพปัจจุบันคลังสินค้าของบริษัทดังกล่าวมีการจัดเก็บสินค้าโดยไม่มีการระบุตำแหน่งการจัดเก็บสินค้าที่ชัดเจน ใช้เวลาเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งการจัดเก็บสินค้ามาก ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการจัดตำแหน่งการจัดเก็บสินค้า โดยใช้วิธีด้วยการวิเคราะห์แบบเอบีซี (ABC Analysis) มาประยุกต์ใช้ในการจัดกลุ่มสินค้าตามความเคลื่อนไหวของสินค้า นำซอฟต์แวร์แมทแลปคำนวณตำแหน่งการจัดเก็บด้วยหลักการของตัวแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มทวิภาค ช่วยกำหนดตำแหน่งการจัดเก็บสินค้าที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากเวลาในการเคลื่อนที่ที่สำคัญ จากผลการศึกษาพบว่า การปรับปรุงการจัดเก็บโดยการวางแผนการจัดเก็บสินค้าสำเร็จรูปใหม่ ช่วยลดเวลาการเคลื่อนที่ไปยังกลุ่ม A และ B ร้อยละ 16.12 และ 11.55 ตามลำดับ สินค้ากลุ่ม C ใช้เวลาเคลื่อนที่เฉลี่ยมากที่สุด 23.71 วินาทีต่อช่องวางสินค้า

คำสำคัญ: วิธีสินค้าเคลื่อนไหวเร็ววางไว้ใกล้ประตู, การวิเคราะห์แบบเอบีซี, กำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มทวิภาค, อัตราหมุนเวียนสินค้าคงเหลือ

Abstract

This study presents the improvement of the storage location for the finished goods warehouse in sportswear manufacturing. The objective is to increase the efficiency of finished goods storage in more operational work. In the current condition, the

warehouse has stored finished goods at the non-fixed location explicitly, causing them to take long time for moving to the storage location. Therefore, the authors determined the locations for storing the products. ABC analysis with the concept of grouping analysis theory was applied to organize into groups of goods from its movement. In addition, MATLAB, software for computing the storage location on the principle of the binary integer linear program, was enhanced to determine the location for storing products appropriately by considering the moving time significantly. As a result of the study, the storage improvement by the new storage location enhances to diminish the overall storage time of the classified group A and B to 16.12 % and 11.55%, respectively. Classified group C has an average moving time of 23.71 seconds per one shelf.

Keywords: Fast mover closest to the door method, ABC analysis, Binary integer linear programing, Inventory turnover

1. บทนำ

ในปัจจุบันการจัดการ โลจิสติกส์เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในทุกธุรกิจ ครอบคลุมหลายหน่วยงาน เริ่มตั้งแต่ การจัดหาแหล่งวัตถุดิบ การรับวัตถุดิบ การจัดเก็บวัตถุดิบ การผลิต การจัดเก็บสินค้าสำเร็จรูป การขนถ่าย และขนส่งสินค้าสำเร็จรูป เพื่อการกระจายสินค้าไปยังลูกค้าได้ในเวลาที่เหมาะสม ตลอดจนการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพและมีประสิทธิผล การจัดการโลจิสติกส์ ถือเป็นเป้าหมายสำคัญที่ผู้ประกอบการจะนำมาใช้เป็นแนวทางเพื่อหาวิธีลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลง ทำให้ปัจจุบันมีการแข่งขันทางระบบด้านโลจิสติกส์ค่อนข้างสูง ดังนั้นหากหน่วยงานใดสามารถบริหารจัดการระบบโลจิสติกส์ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดได้ ย่อมได้เปรียบทางการแข่งขันสูงเช่นกัน

บริษัทกรณีศึกษา มีความหลากหลายของสินค้าเป็นอย่างมากตั้งแต่ ชนิดผ้า ขนาด และสี ประกอบกับสินค้ามีการหมุนเวียนและผลัดเปลี่ยนอยู่ตลอดทั้งปีตามแนวโน้มของสินค้า ทำให้ไม่มีการระบุตำแหน่งจัดเก็บสินค้าที่ชัดเจน และเกิดความผิดพลาดในการเบิกจ่ายสินค้าบ่อยครั้ง ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาปัญหาการจัดพื้นที่ดำเนินการจัดวางสินค้าภายในคลังสินค้า เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงการบริหารจัดการคลังสินค้าให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

วัตถุประสงค์ในงานวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเก็บสินค้าโดยใช้วิธีABC analysis ลดเวลาในการเบิกจ่ายสินค้า และปรับปรุงการทำงานในคลังสินค้าให้เป็นระเบียบ มีมาตรฐานในการทำงานมากขึ้น

ศุภกรและคณะ[1] ศึกษาการพิจารณาทางเลือกในการเพิ่มพื้นที่จัดเก็บสินค้าในส่วนของการขนถ่ายด้วยห้อยคัสโตน โดยวิธีการที่คุ้มค่าที่สุด และใช้วิธีการทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม มาเป็นเครื่องมือช่วยหาทางเลือกในการปรับปรุงรูปแบบคลังสินค้าขึ้นใหม่ ผู้วิจัยได้เสนอ 2 ทางเลือกได้แก่ การใช้ชั้นวางสินค้า และการเช่าคลังเก็บสินค้า จากการศึกษาพบว่าวิธีเพิ่มชั้นวางสินค้าเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ต้นทุนทั้งหมดในการปรับปรุงคลังสินค้าเพียง 2,650,000 บาท จากการวิเคราะห์พบว่า เป็นวิธีที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ, อัตราผลตอบแทนภายใน, อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน และ ผลกำไรสุทธิสูงที่สุด [1]

นิธิศ และคณะ[2]ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพการจัดเก็บสินค้าภายในคลังสินค้าเพื่อลดเวลาในการเบิกจ่ายสินค้า โดยจำแนกสินค้าแต่ละประเภทด้วย หลักการ ABC Analysis และวางแผนตำแหน่งการจัดเก็บสินค้าใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเก็บสินค้าคลัง จากการปรับปรุงคลังสินค้าพบว่า ขั้นตอนการเบิกจ่ายลดลงบรรจุภัณฑ์ใช้เวลาเฉลี่ยลดลง 11.54 นาทีต่อใบเบิก หรือคิดเป็นร้อยละ 49.48 ปริมาณกล่องบรรจุภัณฑ์ภายในคลังสินค้าลดลงเป็นมูลค่า 106,345 บาท คิดเป็นร้อยละ 43.71 และความถูกต้องของคลังกล่องบรรจุภัณฑ์เพิ่มขึ้นร้อยละ 32 และไม่พบปัญหากล่องชำรุดจากการปฏิบัติงานในคลังสินค้า [2]

ทรงศักดิ์[3] ศึกษารูปแบบการจัดผังคลังสินค้าสำเร็จรูปด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์แบบเอบีซี และเสนอแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้าสำเร็จรูปโดยการลดเวลาในการหยิบสินค้า และ ลดการหยิบสินค้าผิดพลาดผลการวิจัยพบว่าเวลาเฉลี่ยที่พนักงานหยิบสินค้า

แต่ละเร็ค หลังปรับปรุงด้วยการจัดชั้นสินค้าด้วยการวิเคราะห์แบบเอบีซีแล้ว ลดเวลาในการหยิบสินค้าลงร้อยละ 31.36 และยังช่วยลดปัญหาพนักงานหยิบสินค้าผิดพลาดอีกด้วย [3]

วรรณวิภา[4] วิจัยเรื่อง การวางแผนคลังสินค้าสำเร็จรูปด้วยการวิเคราะห์แบบเอบีซี กรณีศึกษา บริษัท AAA จำกัด ผลการศึกษาพบว่าปัญหาที่เกิดจากการใช้เวลาในการเดินทางหยิบสินค้าซึ่งเกิดจากการขาดประสิทธิภาพในระบบการจัดเก็บสินค้าจึงทำให้ใช้เวลานานในการเดินทางหยิบสินค้า ในการจัดเรียงสินค้าพนักงานจำนวน 5 คน ใช้เวลาในการเดินทางหยิบสินค้าเฉลี่ย 9.45 นาที และหลังจากที่มีการจัดเรียงสินค้าด้วยการวิเคราะห์แบบเอบีซี เวลาในการเดินทางหยิบสินค้าเฉลี่ยเหลือ 6.41 นาที ลดลง 3.04 นาทีจะเห็นได้ว่า พนักงานใช้เวลาในการหยิบสินค้าลดลง โดยการจัดเรียงสินค้าที่มียอดขายสินค้าสูงสุด (หน่วย: ลัง) ไว้ใกล้ประตูทางออก และสินค้า ที่มียอดขายปานกลางหรือเคลื่อนไหวปานกลางและยอดขายสินค้าต่ำ หรือเคลื่อนไหวช้าไว้ตามลำดับ เพื่อเป็นการลดเวลาและระยะทางในการเดินหยิบสินค้าได้อย่างเหมาะสม [4]

รัชชนาและคณะ[5] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพคลังสินค้าสำเร็จรูป สามารถส่งมอบสินค้าเป็นไปตามเป้าหมายปัญหาการส่งมอบ โดยการเก็บข้อมูลสถานการณ์และตัวแปรต่างๆ เพื่อวิเคราะห์สาเหตุด้วยผังก้างปลาและทำการประเมินสาเหตุจากพนักงานด้วยเช่นกัน พบว่าสินค้าที่ต้องส่งมอบเป็นประจำอยู่ไกลจากจุดส่งมอบ และตัวชี้วัดไม่สอดคล้องกับการทำงานจริง จึงทำการปรับปรุงผังการจัดเก็บสินค้าสามารถลดการเคลื่อนที่ได้ 3,970 เมตรต่อวัน และปรับเกณฑ์การชี้วัดการส่งสินค้าในใบสั่งซื้อไม่เกิน และมากกว่า 10 รายการใช้เวลาไม่เกิน 15 และ 20 นาทีตามลำดับ [5]

สุมินตรา[6] ศึกษาการปรับปรุงผังคลังสินค้าบริษัทจัดทำนายอะไหล่เครื่องจักร โดยใช้วิธีการแยกประเภทสินค้าโดยหลักการ Fast-Slow Moving โดยได้จัดทำแผนผังคลังสินค้าใหม่และแยกประเภทโซนสินค้าที่มีปริมาณการส่งสูงสุดจัดไว้ด้านหน้าใกล้ที่จัดเตรียมสินค้ามากที่สุด และสินค้าที่มีปริมาณการส่งปานกลางและส่งน้อยจัดไว้ถัด

ออกมาตามลำดับ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของพนักงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการหยิบสินค้าที่ช่วยลดระยะเวลาการหยิบสินค้าและลดปัญหาไม่ทราบตำแหน่งจัดเก็บสินค้าได้[6]

อาทร[7]ทำการศึกษาการปรับปรุงการจัดเก็บสินค้าคงคลังและการกำจัดความสูญเปล่าในกระบวนการทำงานภายในคลังสินค้า โดยวิเคราะห์ความสูญเปล่า 7 ประการภายในคลังสินค้าเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับทฤษฎีการวิเคราะห์แบบเอบีซี ในการจัดการตำแหน่งการจัดเก็บสินค้าคงคลัง เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเก็บสินค้าคงคลัง การปรับปรุงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยลดต้นทุนได้รวม 2,398,960 บาท ลดเวลาการทำงานลงได้ 87.30% [7]

จันทร์เพ็ญและคณะ[8] ศึกษาการปรับปรุงตำแหน่งการจัดวางสินค้าในรูปแบบการเรียงสินค้าตามยอดขาย, น้ำหนัก, ใบสั่งสินค้า และผสมทั้งสามแบบ พบว่าการจัดเรียงสินค้าตามยอดขาย สามารถลดเวลาการทำงานมากที่สุดร้อยละ 14.48 ของการจัดเรียงแบบเดิม และลดต้นทุนได้ 0.76 บาทต่อชิ้น [8]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์แบบเอบีซีในงานบริหารคลังสินค้า เป็นแนวคิดที่ให้ความสำคัญสินค้าตามมูลค่า ไม่ว่าจะเป็นมูลค่าความสำคัญของการใช้งาน หรือมูลค่าของเงิน (Use Money) โดยจะมีการแบ่งประเภทสินค้าคงคลังเป็นกลุ่มๆ ตามมูลค่าของสินค้าออกเป็น 3 กลุ่ม คือ A, B และ C ตามลำดับตามความสำคัญ ซึ่งจะพิจารณาจากปริมาณและมูลค่าของสินค้าคงคลังเป็นเกณฑ์ในการแบ่งกลุ่มสินค้า [9]

อัตราหมุนเวียนสินค้าคงเหลือ (Inventory Turnover Rate) เป็นอัตราส่วนทางการเงินระหว่างต้นทุนขายกับสินค้าคงเหลือเฉลี่ยที่แสดงถึงประสิทธิภาพการจัดการสินค้าคงเหลือว่าสามารถขายสินค้าได้ในรอบระยะเวลาบัญชี จะรู้ว่ากิจการขายสินค้าได้เร็วเพียงใด สะท้อนไปสู่การตรวจสอบการผลิตสินค้าว่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมกับความต้องการของตลาดจริงหรือไม่ การสต็อกสินค้ามี

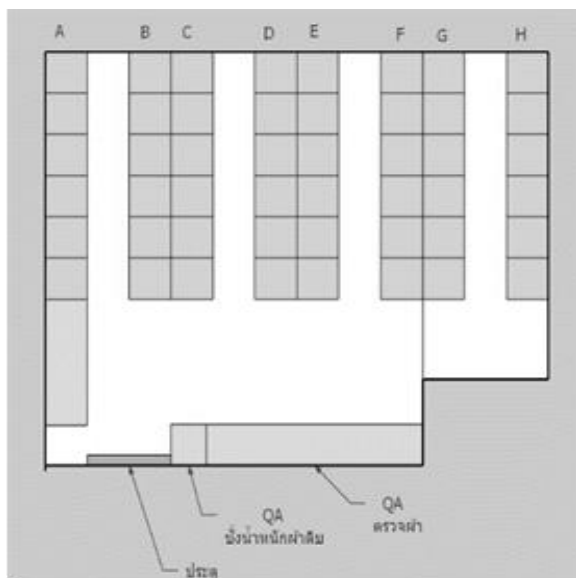
ปริมาณสินค้าคงคลังสอดคล้องกับระยะเวลาการจำหน่ายขายจริงหรือไม่

กำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มทวิภาค (Binary Integer Linear Programming: BILP) คือ โปรแกรมเชิงเส้นที่กำหนดให้ตัวแปรเป็นเลข 0 หรือ 1 เท่านั้น สามารถเขียนเป็นตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ในการอธิบายปัญหาที่ทำการศึกษา โดย “Programming” หมายถึง การวางแผน ส่วนคำว่า “Linear” เป็นคำที่ขยายความของตัวแบบคณิตศาสตร์ว่าเป็นตัวแบบคณิตศาสตร์เชิงเส้น ซึ่งหมายถึงสมการที่เขียนขึ้น เพื่ออธิบายตัวแบบปัญหามีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้น ดังนั้นโปรแกรมเชิงเส้นหมายถึง การวางแผนโดยใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่ตัวแปรหรือกิจกรรมมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นเพื่อให้สามารถจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุดตามวัตถุประสงค์ที่ได้วางไว้

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1. ศึกษาสภาพปัจจุบัน และ เก็บรวบรวมข้อมูล

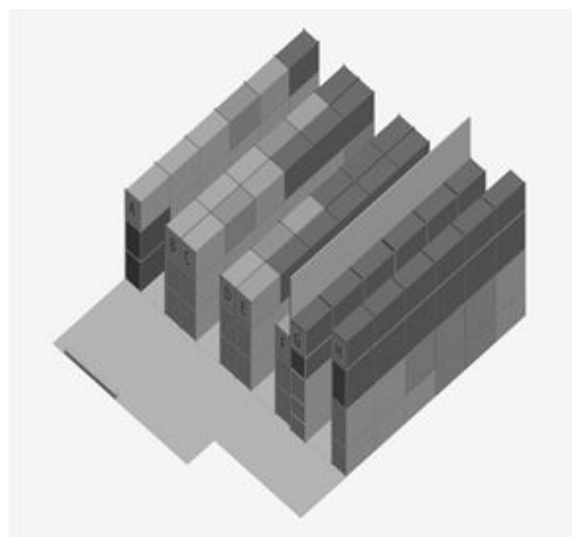
รูปแบบการจัดเก็บสินค้าของบริษัทการศึกษาโดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษาในส่วนของคลังสินค้าสำเร็จรูปของบริษัทการศึกษา เป็นอาคารแบบ 1 ชั้น โดยคลังสินค้านี้มีขนาดพื้นที่เท่ากับ 340.63 ตารางเมตร ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงแผนผังคลังสินค้าสำเร็จรูป

3.2. กระบวนการจัดการคลังสินค้าของบริษัทการศึกษา

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาในส่วนของคลังสินค้าสำเร็จรูป ซึ่งมีพื้นที่จัดเก็บทั้งหมด 340.63 ตารางเมตร โดยสามารถจัดเก็บสินค้า 162 ช่องวางสินค้า จำนวน 4620 กระสอบ แยกประเภทสินค้าเป็น 2 ประเภทคือ กลุ่มสินค้า A เคลื่อนไหวเร็ว และกลุ่มสินค้า B เคลื่อนไหวปานกลาง ส่วนสินค้าเคลื่อนไหวช้านั้นจัดเก็บในคลังสินค้าวัตถุดิบ สินค้าภายในคลังสินค้านี้มีอุปกรณ์เคลื่อนย้ายสินค้าคือ บันไดอุตสาหกรรมแบบพับ และบันไดอุตสาหกรรมแบบล้ออย่างละ 1 ตัว รูปแบบการจัดเก็บสินค้าประเภทกระสอบจะจัดเก็บบนชั้นวางสินค้าอุตสาหกรรมแบบลิ้น โดยแผนผังคลังสินค้าแบ่งได้ 8 โซน แสดงดังรูปที่ 1 โซน A ถึง F จะวางสินค้าได้ 3 ชั้น, โซน G 5 ชั้น และ โซน H 4 ชั้น แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงการจัดเก็บสินค้าแต่ละโซน

3.3. จัดกลุ่มสินค้าด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบเอบีซี

โดยใช้ข้อมูลสินค้าคงคลัง 6 เดือนย้อนหลังได้แก่เดือน กุมภาพันธ์ 2564-กรกฎาคม 2564 หลังจากนั้นคำนวณอัตราการหมุนเวียนสินค้าคงเหลือ โดยนำปริมาณสินค้าที่ขายได้ทั้งหมดทดแทนราคาขายทั้งหมด เนื่องจากราคาขายสินค้าเป็นความลับของบริษัท ดังนั้นอัตราการหมุนเวียนสินค้าคงเหลือเท่ากับจำนวนสินค้าขายได้ต่อสินค้าคงเหลือเฉลี่ย ดังตารางที่ 1 มาทำการจัดกลุ่มสินค้าโดยใช้แนวคิดทฤษฎีการวิเคราะห์จัดกลุ่มด้วยระบบ ABC

analysis แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก เพื่อให้มุ่งเน้นความสำคัญกับกลุ่มสินค้าที่มีการเคลื่อนไหวเร็วซึ่งจะจัดอยู่ในกลุ่มสินค้า A ส่วนกลุ่มสินค้าที่มีการเคลื่อนไหวรองลงไปจัดเป็น กลุ่มสินค้า B และ C ตามลำดับ

ตารางที่ 1 อัตราหมุนเวียนสินค้า

รหัสสินค้า	อัตราหมุนเวียน	อัตราส่วนการหมุนเวียนสะสม
PK PC	6.67	20.56
06CT	6.04	39.18
CK	5.55	56.29
TM	4.62	70.53
02 03 TS	3.46	81.20
CQ	2.14	87.80
CP	2.06	94.14
TL	1.9	100

3.4.วิธี Fast mover closest to the door method

ระบุตำแหน่งการจัดเก็บสินค้าแต่ละกลุ่มสินค้า โดยใช้กำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มทวิภาค (Binary Integer Linear Programming: BILP) กำหนดสมการวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไข สอดคล้องกับวิธีสินค้าที่มีความเคลื่อนไหวไว้อย่างใกล้ชิดประตู (Fast mover closest to the door method) แล้วแปลงสมการวัตถุประสงค์และเงื่อนไขดังกล่าวเป็นรหัสคอมพิวเตอร์ในโปรแกรม ABC analyzer [10] บนซอฟต์แวร์แมทแล็บ เพื่อกำหนดตำแหน่งการจัดเก็บสินค้า โดยใช้รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มทวิภาคดังสมการที่ (1)–(5) ต่อไปนี้

$$\text{Min } \sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij}^k \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij}^k \leq m, \forall i = 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij}^k \leq n, \forall j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, 3 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m x_{ij}^k = q_k, \forall i = 1, 2, \dots, m, \forall j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, 3 \quad (4)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \forall i = 1, 2, \dots, m, \forall j = 1, 2, \dots, n, k = (1, 2, 3) \quad (5)$$

กำหนดให้ t_{ij} คือ ระยะเวลาจากจุด o ไปยังตำแหน่งวางสินค้า i, j โดยที่จุด o คือจุดเริ่มต้นในการจับเวลาการเคลื่อนที่

m คือ จำนวนช่องวางสินค้าย่อยทั้งหมดในแนวหลัก (Column)

n คือ จำนวนช่องวางสินค้าย่อยทั้งหมดในแนวแถว (Row)

k คือ เลขประจำกลุ่มสินค้า A, B, C เท่ากับ 1, 2, 3

q_k คือ จำนวนกระสอบสินค้าของกลุ่มสินค้า k ที่ต้องการจัดเก็บดังในตารางที่ 2

กำหนดให้ตัวแปร x_{ij}^k เท่ากับ 1 คือ ยอมรับให้วางสินค้าบนช่องวางสินค้าแนวแถวที่ i ช่องวางสินค้าแนวหลักที่ j ของกลุ่มสินค้า k x_{ij}^k เท่ากับ 0 คือ ไม่ยอมรับให้วางสินค้า บนช่องวางสินค้าแนวแถวที่ i ช่องวางสินค้าแนวหลักที่ j ของกลุ่มสินค้า k

สมการที่ (1) คือ วัตถุประสงค์ที่ต้องการผลรวมเวลา (t_{ij}) ที่น้อยที่สุด ในการเคลื่อนที่เพื่อจัดเก็บสินค้าที่ช่องวางสินค้าย่อยตำแหน่ง x_{ij} สมการที่ (2) คือ อสมการแสดงผลรวมจำนวนช่องวางสินค้าย่อยในแนวหลัก ของแต่ละกลุ่มสินค้า ต้องไม่เกินหรือเท่ากับจำนวนช่องวางสินค้าย่อยทั้งหมด m ช่องย่อยในแนวหลัก สมการที่ (3) คือ อสมการแสดงผลรวมจำนวนช่องวางสินค้าย่อยในแนวแถวของแต่ละกลุ่มสินค้า ต้องไม่เกินหรือเท่ากับจำนวนช่องวางสินค้าย่อยทั้งหมด n ช่องย่อยในแนวแถว สมการที่ (4) คือ สมการแสดงผลรวมของช่องวางสินค้าย่อยของแต่ละกลุ่มสินค้า เท่ากับจำนวนกระสอบสินค้าของแต่ละกลุ่มสินค้า k ที่ต้องการวางในช่องวางสินค้าย่อย โดยหนึ่งช่องวางสินค้าย่อยวางได้หนึ่งกระสอบสินค้าเงื่อนไขที่ (5) คือ กำหนดให้ตัวแปร x_{ij} มีค่า 0 หรือ 1 เท่านั้น

4. ผลการวิจัย

จากการศึกษาและเก็บข้อมูลกระบวนการทำงานฝ่ายคลังสินค้าของบริษัทกรณีศึกษาสามารถวิเคราะห์ผลการศึกษาได้ดังนี้

4.1.การจัดกลุ่มสินค้า ABC

จัดกลุ่มสินค้าดังตารางที่ 1 โดยอ้างอิงจากข้อมูลอัตราหมุนเวียนสินค้าแต่ละรหัสสินค้าจากบริษัทผลิตเสื้อกีฬา โดยใช้ข้อมูลน้ำหนักของสินค้าแต่ละชนิดแปลงเป็นจำนวนกระสอบ (1 กระสอบ มีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงกลุ่มสินค้า ABC

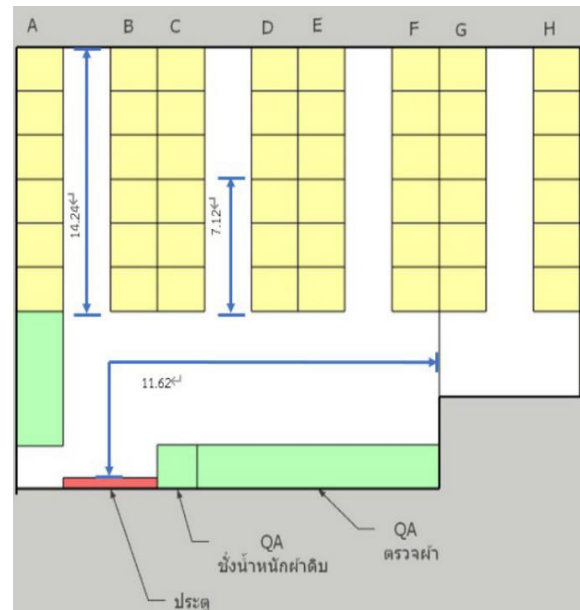
สินค้า	ประเภท	น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	จำนวน กระสอบ
PK PC	A	70576.25	1412
06CT			
CK			
TM			
02 03 TS			
CQ	B	25275.5	506
CP			
TL	C	13106.5	263
Other	Etc.	9606.75	193
รวม		118565	2374

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า 81.20% ของอัตราส่วนการหมุนเวียนสะสมทั้งหมดในคลังสินค้า ได้แก่ รหัสสินค้า PK PC, 06CT, CK, TM และ 02 03 TS ซึ่งหมายความว่า เป็นรหัสสินค้าที่มีความเคลื่อนไหวสูงที่สุดจากรหัสสินค้าทั้งหมด จึงจัดให้อยู่ในกลุ่มสินค้า A ซึ่งควรให้ความสำคัญกับกลุ่มสินค้ากลุ่มนี้ เพราะหากมีการจัดการที่ไม่มีประสิทธิภาพ จะส่งผลเป็นอย่างมากต่อคลังสินค้า ในทำนองเดียวกันรหัสสินค้าอื่นๆที่มีอัตราการหมุนเวียนลดลงมา จะถูกจัดเป็นกลุ่มกลุ่มสินค้า B และคลังสินค้าสำเร็จรูปได้ดำเนินการคัดแยกจัดกลุ่มสินค้าชัดเจน จากเดิมไม่มีการกำหนดชนิดสินค้าของกลุ่มสินค้า C ไว้ชัดเจน

4.2.ศึกษาระยะเวลาในการจัดเก็บสินค้า

คลังสินค้าสำเร็จรูปมีชั้นวางสินค้าอุตสาหกรรมจำนวน 8 โชน โชน A-F จำนวน 3 ชั้น โชน G จำนวน 5 ชั้น และ โชน H จำนวน 4 ชั้น การจัดเก็บชั้นที่ 3-5 นั้นใช้บันได ซึ่ง

พนักงานใช้เวลาในการเคลื่อนย้ายบันไดและเดินบนบันได ชั้นชั้นที่ 3-5 ทำให้เวลาต่อระยะทางเป็นตัวแปรสำคัญในการวัดประสิทธิภาพการจัดเก็บ ผู้วิจัยจำเป็นต้องจับเวลาเคลื่อนที่ของพนักงานในตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยเวลาเคลื่อนที่นั้นแบ่งเป็นเวลาเคลื่อนที่ในแนวราบและแนวตั้ง ดังแสดงในตารางที่ 3-4



รูปที่ 3 เส้นทางที่ใช้ในหาเวลาเคลื่อนที่ในแนวราบ

ตารางที่ 3 เวลาเคลื่อนที่ของพนักงานในแนวราบ

ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)	เวลาเฉลี่ยต่อเมตร (วินาที/เมตร)
14.24	9.66	0.80
7.12	6.16	
11.62	10.54	
32.98	26.26	0.80

ระยะทางการเคลื่อนที่ในช่องว่างระหว่างชั้นวางโชน A-B เท่ากับ 14.24 เมตร เป็นระยะทางจากด้านหน้าจนถึงด้านหลังโชนจัดเก็บ A-B การเคลื่อนที่พร้อมกับการค้นหาช่องว่างกระสอบสินค้าไปด้วย ระยะทางจากจุดกึ่งกลางของชั้นวางโชน C-D มายังด้านหน้าชั้นวางเท่ากับ 7.12 เมตร เป็นระยะทางจากจุดกึ่งกลางจนถึงด้านหน้าโชนจัดเก็บ CD การเคลื่อนที่พร้อมกับการค้นหาช่องว่าง

กระสอบสินค้าไปด้วย และระยะทางจากประตูจนถึงชั้นวางโซน F-G เท่ากับ 11.62 เมตรเป็นระยะทางจากประตูไปยังด้านหน้าโซนจัดเก็บ F-G การเคลื่อนที่พร้อมรถแฮนด์ลิฟท์โดยตรงเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3 กำหนดให้ชั้นล่างและชั้นที่ 2 ระยะทางการเคลื่อนที่เฉพาะในแนวราบเท่านั้น เนื่องจากความสูงของชั้นล่างเพียง 1.32 เมตร ดังนั้นการจัดเก็บชั้นที่ 2 สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องเคลื่อนที่ในแนวตั้ง จากนั้นบันทึกเวลาในการเคลื่อนที่ของพนักงานตามระยะทางข้างต้น(บันทึกเวลาในการเคลื่อนที่ 3 ครั้งในแต่ละเส้นทาง) การคำนวณเวลาเคลื่อนที่ในแนวราบเฉลี่ยต่อเมตร = ผลรวมเวลาเคลื่อนที่ในแนวราบทั้ง 3 เส้นทางต่อผลรวมของระยะทาง 3 เส้นทาง = $26.26/32.98 = 0.80$ วินาทีต่อเมตร ดังแสดงในตารางที่ 3

จากข้อมูลในตารางที่ 3 เวลาการเคลื่อนที่ในแนวราบสำหรับโซนจัดเก็บ AB ทำการค้นหาช่องวางสินค้าชั้นที่ 1 และ 2 เวลาการเคลื่อนที่โซนจัดเก็บ AB ต่อเมตร เท่ากับ $9.66/14.24 = 0.67$ วินาทีต่อเมตร ส่วนเวลาการเคลื่อนที่ในแนวราบสำหรับโซนจัดเก็บ CD ทำการค้นหาช่องวางสินค้าชั้นที่ 3 มีความสูงมากกว่า ทำให้เวลาการเคลื่อนที่โซนจัดเก็บ AB ต่อเมตรเพิ่มเป็น $6.16/7.12 = 0.86$ วินาทีต่อเมตร ในขณะที่เวลาในการเคลื่อนที่แนวราบพร้อมลากแฮนด์ลิฟท์ไปด้วย จากประตูไปยังโซน EF ทำให้เวลาการเคลื่อนที่ต่อเมตรเพิ่มเป็น 0.91 วินาทีต่อเมตร

ตารางที่ 4 เวลาเคลื่อนที่ของพนักงานในแนวตั้ง

ตำแหน่ง	เวลา (วินาที)	ตำแหน่ง	เวลา (วินาที)
a-1-1	5.50	b-1-1	5.50
a-1-2	5.50	b-1-2	5.50
a-1-3	13.20	b-1-3	13.20
a-2-1	7.42	b-2-1	7.42
a-2-2	7.42	b-2-2	7.42
g-6-2	.25.07	h-6-4	.31.90

การเคลื่อนที่ในแนวตั้งนั้นเกิดขึ้นเฉพาะชั้นที่ 3 เวลาในการเดินขึ้นลงบันไดอย่างเดียว 7.28 วินาที และเวลาในการ

เดินขึ้นลงบันไดและเคลื่อนย้ายบันไดครั้งที่ 1 และ 2 เท่ากับ 15.16 วินาที และ 15.08 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 5

การคำนวณเวลาเฉลี่ยในการเคลื่อนที่แนวตั้งเฉลี่ยต่อเมตร = ผลรวมเวลาการเคลื่อนที่ในแนวตั้งต่อผลรวมระยะทางขึ้นลงบันได = $37.52/12.9 = 2.91$ วินาทีต่อเมตร

สรุปเวลาเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของพนักงาน โดยเวลาการเคลื่อนที่ในแนวราบโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.80 วินาที/เมตร ดังตารางที่ 3 และ เวลาการเคลื่อนที่ในแนวตั้งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.91 วินาที/เมตร ดังตารางที่ 4 โดยที่การจับเวลาในการเคลื่อนที่ของพนักงานนั้นไม่มีการนำกระสอบสินค้าไปด้วย เพื่อมิให้น้ำหนักของสินค้าแต่ละชนิดมีผลต่อเวลาการเคลื่อนที่ของพนักงาน

เมื่อนำเวลาเคลื่อนที่โดยเฉลี่ยที่สรุปได้ไปคำนวณระยะเวลาในการจัดเก็บสินค้าแต่ละตำแหน่งจัดเก็บ จะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เวลาในการเคลื่อนที่ไปยังช่องวางสินค้า

ระยะทางขึ้นลงบันได (เมตร)	เวลา (วินาที)	เวลาเฉลี่ยต่อเมตร (วินาที/เมตร)
4.30	7.28	
4.30	15.16	
4.30	15.08	
12.90	37.52	2.91

อธิบายสัญลักษณ์แสดงตำแหน่งของช่องวางสินค้า ดังนี้ ตำแหน่ง a-1-1 หมายถึง โซน A ช่องที่ 1 ชั้นที่ 1 ตำแหน่ง a-1-2 หมายถึง โซน A ช่องที่ 1 ชั้นที่ 2 เป็นต้น จำนวนช่องวางสินค้าน้อยในแต่ละโซนจัดเก็บแตกต่างกัน ดังนี้

โซนจัดเก็บ A-F,H มีขนาดช่องวางสินค้า 5 ชั้นย่อย 6 ช่องย่อย จำนวน 18 ช่องวางสินค้า ของแต่ละโซน

โซนจัดเก็บ G มีขนาดช่องวางสินค้า 5 ชั้นย่อย 6 ช่องย่อย จำนวน 5 ช่องวางสินค้า ขนาดช่องวางสินค้า 3 ชั้นย่อย 5 ช่องย่อย จำนวน 2 ช่องวางสินค้า ขนาดช่องวางสินค้า 3 ชั้นย่อย 6 ช่องย่อย จำนวน 10 ช่องวางสินค้า ช่องวางสินค้า ขนาดช่องวางสินค้า 4 ชั้นย่อย 5 ช่องย่อย จำนวน 1 ช่องวาง

สินค้า ขนาดช่องวางสินค้า 4 ชั้นย่อย 6 ช่องย่อย จำนวน 5 ช่องวางสินค้า และขนาดช่องวางสินค้า 5 ชั้นย่อย 5 ช่องย่อย จำนวน 1 ช่องวางสินค้า

เวลาเคลื่อนที่แต่ละช่องวางสินค้าคำนวณได้ดังนี้

1.) ระยะทางเคลื่อนที่จะเป็นการเดินจากประตูคลัง ถึงจุดกึ่งกลางชั้นจัดเก็บสินค้า

2.) การจัดเก็บในชั้นที่สูงไม่เกินชั้นที่ 2 จะไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง จึงไม่คิดระยะเวลาเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง
ระยะเวลาเคลื่อนที่ = ระยะเวลาเคลื่อนที่ในแนวราบ + ระยะเวลาเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง

ระยะเวลาเคลื่อนที่ในแนวราบ = 0.80 วินาที/เมตร $\times$ ระยะทางในแนวราบ

ระยะเวลาเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง = 2.91 วินาที/เมตร

1. ตัวอย่างการคำนวณระยะทางเคลื่อนที่จุด a-1-1

ระยะทางในแนวราบ

= ระยะทางจากประตูถึงบริเวณหน้าชั้น A + ระยะทางจากบริเวณหน้าชั้น A ถึงแถวที่ 1 ของชั้น A

= $5.7 + 1.18 = 6.88$ เมตร

เนื่องจากจุด a-1-1 มีความสูงไม่เกินชั้นที่ 2 จึงไม่คิดเวลาในการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง ดังนั้นเวลาเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง a-1-1 = $(0.8 \times 6.88) + 0 = 5.50$ วินาที

2. ตัวอย่างการคำนวณระยะเวลาเคลื่อนที่ไปยังจุด a-1-3

ระยะทางในแนวราบ

= ระยะทางจากประตูถึงบริเวณหน้าโซน A + ระยะทางจากบริเวณหน้าโซน A ถึง แถวที่ 1 ของชั้น A

= $5.7 + 1.18 = 6.88$ เมตร

ระยะทางในแนวดิ่ง

= ระยะทางจากพื้นถึงชั้น 3

= $1.32 + 1.32 = 2.64$ เมตร

เวลาเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง a-1-3

= $(0.8 \times 6.88) + (2.91 \times 2.64) = 13.20$ วินาที

แสดงผลการคำนวณเวลาจัดเก็บสินค้ากลุ่ม A,B,C ในรูปที่ 5

5

4.3.การเลือกโซนในการวางสินค้าแต่ละกลุ่ม

ทำการระบุตำแหน่งการจัดเก็บสินค้าแต่ละกลุ่มสินค้า โดยใช้โปรแกรมแมทแพลพร้อมทั้งหลักการของตัวแบบ

โปรแกรมเชิงเส้น ดังสมการที่ (1) และสมการที่ (2)–(5) เป็นขั้นตอนหลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์แบบเอบีซีแบ่งประเภทสินค้าตามอัตราการหมุนเวียนออกเป็น 3 กลุ่ม คือ A, B และ C โดยนำโปรแกรม ABC analyzer [10] ใช้วิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการเก็บสินค้า โดยกำหนดให้จำนวนช่องย่อยแนวแถว $n = 36$ จำนวนชั้นย่อยแนวหลัก $m = 128$ ต้องการจัดเก็บกลุ่มสินค้า A จำนวน 2,131 ช่องย่อย กลุ่มสินค้า B จำนวน 606 ช่องย่อย และกลุ่มสินค้า C จำนวน 306 ช่องย่อย โดยหนึ่งช่องย่อยจัดเก็บสินค้าได้ 1 กระสอบ ผลการคำนวณแสดงตัวอย่างการจัดกลุ่มสินค้า A, B และ C ของโซนจัดเก็บ A, B, C, D, H, G และ H ดังรูปที่ 4 ดังนี้

ชั้น 3	a-1-3	a-2-3	a-3-3	a-4-3	a-5-3	a-6-3
ชั้น 2	a-1-2	a-2-2	a-3-2	a-4-2	a-5-2	a-6-2
ชั้น 1	a-1-1	a-2-1	a-3-1	a-4-1	a-5-1	a-6-1

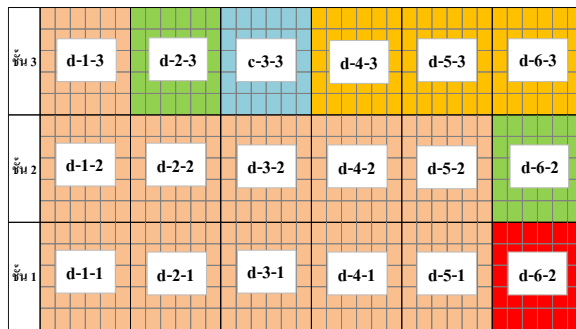
(a)

ชั้น 3	b-1-3	b-2-3	b-3-3	b-4-3	b-5-3	b-6-3
ชั้น 2	b-1-2	b-2-2	b-3-2	b-4-2	b-5-2	b-6-2
ชั้น 1	b-1-1	b-2-1	b-3-1	b-4-1	b-5-1	b-6-1

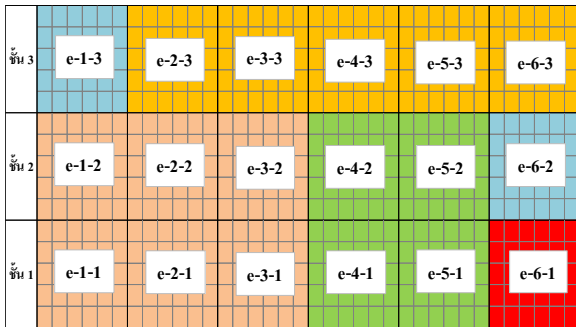
(b)

ชั้น 3	c-1-3	c-2-3	c-3-3	c-4-3	c-5-3	c-6-3
ชั้น 2	c-1-2	c-2-2	c-3-2	c-4-2	c-5-2	c-6-2
ชั้น 1	c-1-1	c-2-1	c-3-1	c-4-1	c-5-1	c-6-1

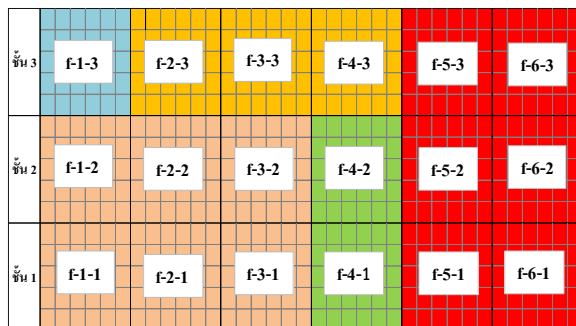
(c)



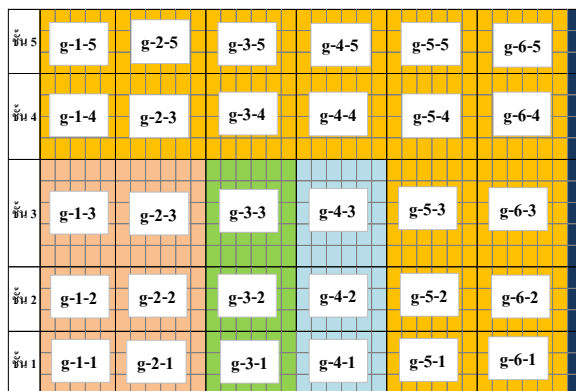
(d)



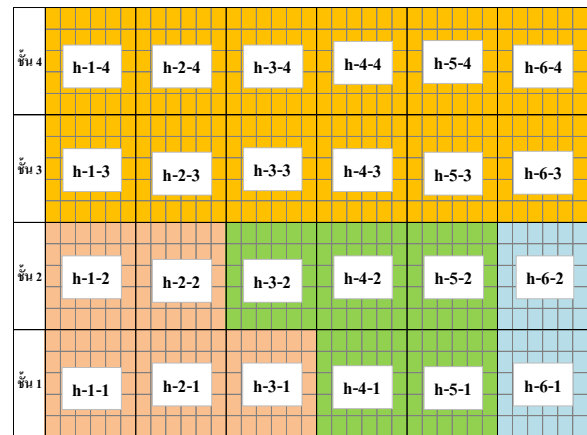
(e)



(f)



(g)



(h)

- = สิ้นค้ากลุ่ม A (1)
- = สิ้นค้ากลุ่ม B (2)
- = สิ้นค้ากลุ่ม C (3)
- = พื้นที่ว่าง (0)
- = พื้นที่ว่างไปกับการอื่น (0)
- = พื้นที่ dummy (0)

รูปที่ 4 รูปแสดงผลการจัดช่องวางสินค้าโซนต่าง ๆ

(a) โซนจัดเก็บ A (b) โซนจัดเก็บ B (c) โซนจัดเก็บ C (d)

โซนจัดเก็บ D (e) โซนจัดเก็บ E (f) โซนจัดเก็บ F (g) โซน

จัดเก็บ G (h) โซนจัดเก็บ H

จากรูปที่ 4 แสดงตำแหน่งจัดเก็บสินค้าของกลุ่มสินค้า A (หมายเลข 1), B (หมายเลข 2), C (หมายเลข 3) พื้นที่ว่าง หรือวางสินค้าชนิดอื่น (หมายเลข 0) โดยแบ่งเป็นพื้นที่ จัดเก็บกลุ่มสินค้า A จำนวน 73 ช่องวางสินค้า (2,131 ช่อง ย่อย) กลุ่มสินค้า B จำนวน 21 ช่องวางสินค้า (606 ช่อง ย่อย) กลุ่มสินค้า C จำนวน 11 ช่องวางสินค้า (306 ช่อง ย่อย)

การจัดกลุ่มสินค้า A และ B ก่อนการปรับปรุง ใช้ช่องวางสินค้าจำนวน 60 และ 27 ช่อง ส่วนกลุ่มสินค้า C ไม่สามารถจัดกลุ่มเนื่องจากการจัดเก็บปะปนกับสินค้าอื่น หลังจากปรับปรุงโดยการจัดกลุ่มสินค้าใหม่ กลุ่มสินค้า A,B,C จัดเก็บในช่องวางสินค้า 67, 20 และ 11 ช่อง ตามลำดับ โดยจะมีช่องวางสินค้าเหลือจำนวน 7 ช่อง เพื่อใช้รองรับจำนวนสินค้าที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละกลุ่มสินค้า จากนั้นรวมเวลาจัดเก็บของแต่ละกลุ่มสินค้าได้ดังรูปที่ 5

ZONE A						
RACK						
	1	2	3	4	5	6
ชั้น 3	13.20	15.10	16.99	18.89	20.78	22.68
ชั้น 2		7.42	9.31	11.21	13.10	15.00
ชั้น 1		7.42	9.31	11.21	13.10	15.00
ZONE B						
RACK						
	1	2	3	4	5	6
ชั้น 3	13.20	15.10	16.99	18.89	20.78	22.68
ชั้น 2	5.52	7.42	9.31	11.21	13.10	15.00
ชั้น 1	5.52	7.42	9.31	11.21	13.10	15.00
ZONE C						
RACK						
	1	2	3	4	5	6
ชั้น 3	16.21	18.10	20.00	21.89	23.79	25.68
ชั้น 2	8.53	10.43	12.32	14.22	16.11	18.01
ชั้น 1	9.53	11.43	13.32	15.22	17.11	19.01
ZONE D						
RACK						
	1	2	3	4	5	6
ชั้น 3	16.21	18.10	20.00	21.89	23.79	25.68
ชั้น 2	8.53	10.43	12.32	14.22	16.11	18.01
ชั้น 1	9.53	11.43	13.32	15.22	17.11	

(a)

ZONE E						
RACK						
	1	2	3	4	5	6
ชั้น 3	19.77	21.66	23.56	25.45	27.35	29.24
ชั้น 2	12.09	13.98	15.88	17.77	19.67	21.56
ชั้น 1	13.09	14.98	15.88	17.77	19.67	
ZONE F						
RACK						
	1	2	3	4	5	6
ชั้น 3	19.77	21.66	23.56	25.45		
ชั้น 2	12.09	13.98	15.88	17.77		
ชั้น 1	13.09	14.98	15.88	17.77		
ZONE G						
RACK						
	1	2	3	4	5	6
ชั้น 5	33.02	34.85	36.80	38.75	40.71	42.54
ชั้น 4	22.97	24.80	26.75	28.70	30.65	32.48
ชั้น 3	15.55	17.38	19.33	21.29	23.24	25.07
ชั้น 2	15.55	17.38	19.33	21.29	23.24	25.07
ชั้น 1	15.55	17.38	19.33	21.29	23.24	25.07
ZONE H						
RACK						
	1	2	3	4	5	6
ชั้น 4	27.16	28.11	29.06	30.00	30.95	31.90
ชั้น 3	23.32	24.27	25.22	26.17	27.11	28.06
ชั้น 2	15.64	16.59	17.54	18.49	19.43	20.38
ชั้น 1	15.64	16.59	17.54	18.49	19.43	20.38

(b)

- เวลาเคลื่อนที่ไปยังกลุ่มสินค้า A
- เวลาเคลื่อนที่ไปยังกลุ่มสินค้า B
- เวลาเคลื่อนที่ไปยังกลุ่มสินค้า C
- ช่องวางสินค้าว่างหรือวางสินค้ากิจกรรมอื่น
- เวลาเคลื่อนที่ไปยังช่องวางสำรองสินค้า

รูปที่ 5 เวลาการเคลื่อนที่ไปยังกลุ่มสินค้า A,B,C (a) โซน A,

B, C, D (วินาที) (b) โซน E, F, G, H (วินาที)

จากรูปที่ 5 เวลารวมจัดเก็บแต่ละกลุ่มสินค้าได้ดังนี้

กลุ่มสินค้า A ใช้เวลาเคลื่อนที่หลังปรับปรุงโซนจัดเก็บ

$$A-H = 7.42 + 7.42 + 9.31 + 9.31 + 11.21 + 11.21 + \dots + 15.64 = 850.39 \text{ วินาที}$$

รวมเวลาเคลื่อนที่ไปยังช่องวางสินค้ากลุ่ม A ทุกโซน

จัดเก็บจำนวน 67 ช่องเท่ากับ 850.39 วินาที

กลุ่มสินค้า B ใช้เวลาเคลื่อนที่หลังปรับปรุงโซนจัดเก็บ

$$A-H = 18.89 + 18.89 + 18.01 + 18.01 + 18.01 + 18.01 + 18.01 + 17.77 + 17.77 + 19.67 + 21.56 + 17.77 + 17.77 + 19.33 + 19.33 + 19.33 + 17.54$$

$$= 315.67 \text{ วินาที}$$

รวมเวลาเคลื่อนที่ไปยังช่องวางสินค้ากลุ่ม B ทุกโซน

จัดเก็บจำนวน 20 ช่องเท่ากับ 315.67 วินาที

กลุ่มสินค้า C ใช้เวลาเคลื่อนที่หลังปรับปรุงโซน

จัดเก็บ

$$A-H = 20.78 + 20.78 + 20 + 20 + 19.77 + 19.77 + 21.29 + 21.29 + 21.29 + 18.49 + 18.49 + 19.43 + 19.43 = 260.81 \text{ วินาที}$$

รวมเวลาเคลื่อนที่ไปยังช่องวางสินค้ากลุ่ม C ทุกโซน

จัดเก็บจำนวน 11 ช่องเท่ากับ 260.81 วินาที

สรุประยะเวลาเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ และจำนวนช่องจัดเก็บสินค้า ของกลุ่มสินค้าทั้ง 3 กลุ่ม A, B และ C ได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบเวลาเคลื่อนที่ต่อช่องวางสินค้าก่อนและหลังปรับปรุง

ชนิดกลุ่มสินค้า	จำนวนช่อง	เวลารวม (วินาที)	เวลาเฉลี่ยต่อช่อง (วินาที)
การจัดเก็บสินค้าก่อนปรับปรุง			
A	58	877.43	15.13
B	29	517.42	17.84
C	-	-	-
การจัดเก็บสินค้าหลังปรับปรุง			
A	67	850.39	12.69
B	20	315.67	15.78
C	11	260.81	23.71

จากตารางที่ 6 การเคลื่อนที่หลังปรับปรุงของกลุ่มสินค้า A และ B สินค้ากลุ่ม A มีเวลาเคลื่อนที่เฉลี่ยน้อยกว่าการเคลื่อนที่แบบเดิม และเวลาเคลื่อนที่เฉลี่ยนั้น กลุ่มสินค้า C ใช้เวลาเคลื่อนที่มากที่สุด และกลุ่มสินค้า A ใช้เวลาเคลื่อนที่ต่ำที่สุด เนื่องจากตำแหน่งการจัดเก็บกลุ่มสินค้า C อยู่ในโซนจัดเก็บ G และ H จำนวน 7 ใน 11 ช่องวางสินค้า ซึ่งเวลาเคลื่อนที่ไปยังโซน G และ H มากกว่าโซนอื่น เนื่องจากระยะทางห่างจากประตูคลังสินค้าสำเร็จรูปมากที่สุด ดังรูปที่ 2-3

ตารางที่ 7 ผลการปรับปรุงพื้นที่จัดเก็บสินค้าสำเร็จรูป

กลุ่มสินค้า	เวลาจัดเก็บเฉลี่ยต่อช่องวางสินค้าก่อนปรับปรุง(วินาที)	เวลาจัดเก็บเฉลี่ยต่อช่องวางสินค้าหลังปรับปรุง(วินาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง
A	15.13	12.69	-16.12
B	17.84	15.78	-11.55
C	-	23.71	-

จากตารางที่ 7 สรุปได้ว่าการปรับปรุงพื้นที่การจัดเก็บสินค้ากลุ่ม A และ B ช่วยลดเวลาเคลื่อนที่เฉลี่ยในการจัดเก็บสินค้าร้อยละ 16.12 และ 11.55 ตามลำดับ ในขณะที่กลุ่มสินค้า C ก่อนปรับปรุงนั้น การจัดเก็บปะปนกับสินค้าอื่นทำให้ไม่สามารถกำหนดชั้นวางที่แน่นอนได้ ทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบเวลาเคลื่อนที่เฉลี่ยได้

หลังจากจัดกลุ่มสินค้าใหม่ให้ชัดเจนแล้ว กำหนดพื้นที่การวางสินค้าที่ชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 4 ตำแหน่งการวางสินค้าหมุนเวียนเร็วให้มีระยะทางใกล้ประตูมากที่สุด ทำให้ช่วยลดเวลาการเคลื่อนที่ได้

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการปรับปรุงพื้นที่จัดเก็บของคลังสินค้าสำเร็จรูปของบริษัทการศึกษา เพื่อแก้ไขปัญหาพื้นที่การจัดวางสินค้าไม่เหมาะสมโดยแบ่งกลุ่มสินค้าเป็นสามกลุ่มด้วยอัตราการหมุนเวียนของสินค้า กลุ่มสินค้า A มีอัตราการหมุนเวียนเร็วเป็นกลุ่มที่ขายสินค้าได้เร็วที่สุด ต้องจัดวางในพื้นที่ใช้เวลาการเคลื่อนที่น้อยที่สุดเพื่อลดเวลา

การค้นหาและเบิกจ่ายสินค้า กลุ่มสินค้า B และ C นั้นมีอัตราการหมุนเวียนรองลงมา ขายสินค้าได้ช้ากว่า ดังนั้นสามารถจัดวางในพื้นที่ใช้เวลาการเคลื่อนที่นานกว่าได้ จากนั้นใช้รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มทวิภาค สอดคล้องกับวิธี Fast mover closest to the door แล้วแปลงรูปแบบทางคณิตศาสตร์เป็นรหัสคอมพิวเตอร์บนซอฟต์แวร์แมทแล็บ ช่วยในการหาพื้นที่เหมาะสมที่สุดของการจัดวางสินค้า จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าการจัดวางสินค้าหมุนเวียนเร็วในตำแหน่งที่ใช้เวลาจัดเก็บน้อยช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเก็บและใช้ประโยชน์ของพื้นที่อย่างคุ้มค่าตำแหน่งสินค้า ช่วยลดเวลาเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Rattanaboworn and T. Phannikul, "Use of Engineering Economics in increasing storage capability," *UBU Engineering Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 48–61, 2017.
- [2] N. Punthanakorphat and C. Mongkalig, "Improvement of an Agricultural Products Packaging Warehouse," *Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal*, vol. 9, no. 1, p.22–32, 2016.
- [3] S. Yoonan, "The Layout Design to Finished Good in Warehouse by Using ABC Analysis Case Study Precast Concrete wall panel," M.S. Independent Study, Dept. Logistics and supply chain, Sripatum University, Bangkok, Thailand, 2017. [Online]. Available: <http://dspace.spu.ac.th/handle/123456789/5672>.
- [4] W. Cuhanpet, "The Layout Design of Finished Goods in Warehouse by ABC Analysis Case Study of AAA

- Company Limited,” M.S. Independent Study, Dept. Logistics and supply chain, Sripatum University, Bangkok, Thailand, 2019. [Online]. Available: <http://dspace.spu.ac.th/handle/123456789/5863>.
- [5] R. Sinthavalai, T. Touwato and A. Hayeeteh, “Efficiency Improvement in the Inventory Based on DMAIC Methodology,” *Naresuan University Journals*, vol. 26, no. 2, pp. 96–109, 2018.
- [6] S. Creawan, “Improving a Finished Goods Warehouse Layout by Fast-Slow Moving A Case Study of Creachareon Machinery Co.,Ltd.,” M.S. Independent Study, Dept. Logistics and supply chain, Sripatum University, Bangkok, Thailand, 2019. [Online]. Available: <https://shorturl.asia/QdeDg>
- [7] A. Jitsoonthornchaiku, “Improving Efficiency in Inventory and Warehouse Operations in Thailand’s Break Pads Industry:A Case Study of S.C.H. Industry Co.,Ltd.,” *Suthiparithat Journal*, vol. 32, no. 102, pp. 45–57, 2018. [Online]. Available: <https://so05.tci-thaijo.org/index.php/DPUSuthiparithatJournal/article/view/243405/165182>.
- [8] N. Chayayam, “ABC Analysis,” [sc2.kku.ac.th. http://sc2.kku.ac.th/stat/statweb/images/Eventpic/60/Seminar/02_15_.pdf](http://sc2.kku.ac.th/stat/statweb/images/Eventpic/60/Seminar/02_15_.pdf). (Accessed: Nov. 14, 2021)
- [9] C. Anurattananon, P. Klomjit, T. Chuenyindee and P. Songsuktawan. “Efficiency Improvement of Drinking Warehouse Case Study of Sample Drinking Company,” *Thai Industrial Engineering Network Journal*, vol.5, no.1, pp. 49–58, 2019.
- [10] Inventory Management with ABC analyser, Warut Boonphakdee, 2019. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/72939-inventory-management-with-abc-analyser>, MATLAB Central FileExchange

ผลกระทบการอุดตันทางน้ำเข้าในระบบระบายน้ำ

The Effect of Inlet Clogging in Drainage System

พงศ์พันธุ์ กาญจนการุณ* สุรัชย์ อำนวยพรเลิศ กฤษณ์ มณีกิจ ฉัฐวร ยอดปานท์ และวีระวัฒน์ จันชุกทิพย์
หลักสูตรวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงใหม่

ทรายขาว พาน เชียงราย 57120

Pongpan Kanjanakaron* Surachai Amnuaypornlert Krit Maneekit Nattaworn Yodpanan and Weerawat Janchuthip

Department of Civil Engineering Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Rai Campus,

Sai Khao, Phan, Chiang Rai, 57120, Thailand

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

Received: Oct 07, 2021; Revised: Mar 08, 2022; Accepted: May 11, 2022

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อทางน้ำเข้าระบบระบายน้ำมีการอุดตันและนำเสนอรูปแบบทางน้ำเข้าที่เหมาะสมต่อการใช้งาน โปรแกรม Storm and Sanitary Analysis 2018 ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบระบายน้ำ และระดับการท่วมขังที่เกิดขึ้นกับระบบระบายน้ำโครงการบ้านจัดสรรแก่งเสือเต้นวิลเลจ 3 กำหนดให้ทางน้ำเข้าเกิดการอุดตัน 0–90% ภายใต้การเปลี่ยนแปลงรูปแบบทางน้ำเข้า 4 ชนิด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อเกิดการอุดตัน 50% ทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนตะแกรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าและทางน้ำเข้าชนิดขอบทางเท้ามีระดับการท่วมขังต่ำสุดและสูงสุดโดยไม่เกิน 2 และ 6 เซนติเมตร ตามลำดับ ทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนแบบตะแกรงสี่เหลี่ยมมีความเหมาะสมเมื่อพิจารณาในด้านงบประมาณติดตั้ง ทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนแบบตะแกรงกลมมีความเหมาะสมเมื่อพิจารณาความปลอดภัยในการขับขี่ ทางน้ำเข้าชนิดขอบทางเท้าเป็นตัวเลือกที่ดีเมื่อใช้งานในพื้นที่เสี่ยงต่อการอุดตันต่ำและมีปริมาณน้ำเข้าน้อยเนื่องจากมีราคาถูกที่สุด

คำสำคัญ: ปัจจัยการอุดตัน, ทางน้ำเข้า, ระบบระบายน้ำ, การไหลในท่อ

Abstract

The purpose of this paper is to study the effect on drainage systems when inlets become clogged and to present a suitable inlet type for drainage systems. The Storm and Sanitary Analysis 2018 program was chosen to analyze the drainage system and the water level that occurs in the drainage of Kaeng Sua Ten Housing Estate plan 3. The inlets were rated by the degree of clogging using percentages from 0–90% against the 4 different types of inlets found in the estate. The results showed that at 50% clogging, the combination inlets and the curb opening only inlet had the lowest and highest level of flooding that not over 2 and 6 centimeters respectively. The rectangular grate inlet is suitable when considering the installation budget. The circular grate inlet is most suitable when considering driving safety. The curb opening inlet is a good choice for use in areas with low clogging risk and low volume of water intake because it is the cheapest.

Keywords: clogging factors, inlet, drainage system, pipe flow

1. บทนำ

ระบบระบายน้ำมีหน้าที่ระบายน้ำเพื่อไม่ให้เกิดการท่วมขังของน้ำ โดยลักษณะทั่วไปของระบบระบายน้ำประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ส่วนหลัก คือ โครงสร้างสำหรับลำเลียงน้ำ เช่น ทางน้ำเปิด ถนน ท่อน้ำทิ้ง และโครงสร้างเฉพาะที่ เช่น รางระบายน้ำ ทางน้ำเข้า บ่อพักน้ำ อาคารทางออก ในสภาวะที่เกิดฝนตกและมีขยะตกค้างบนผิวถนนอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตันทางน้ำเข้าได้ จากรายงานปัญหาของการเกิดน้ำท่วมหลายครั้ง พบว่า การมีเศษวัสดุอุดตันทางน้ำเข้าเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการท่วมขังบนผิวถนน [1],[2] โดยเศษวัสดุที่อุดตันทางน้ำเข้านั้นจะทำให้น้ำระบายได้ในปริมาณที่ลดลง ด้วยเหตุนี้เมื่อมีน้ำฝนในปริมาณที่มากจึงทำให้เกิดการท่วมขังบนผิวถนน กรมทางหลวง [3] ได้จำแนกรูปแบบทางน้ำเข้าข้างทางสำหรับถนนได้ 3 ชนิด คือ ชนิดขอบทางเท้า ชนิดพื้นถนน และชนิดพื้นถนนผสมกับขอบทางเท้า ทั้งนี้ ในเกณฑ์การออกแบบระบบระบายน้ำของหน่วยงานต่าง ๆ ในประเทศไทย [4],[5] ไม่มีการพิจารณาถึงปัญหาการอุดตันทางน้ำเข้าซึ่งส่งผลกระทบต่อการระบายน้ำและการท่วมขังบนผิวถนน ในขณะที่งานวิจัยของต่างประเทศมีการศึกษาเรื่องดังกล่าว อาทิเช่น Guo [6] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของการระบายน้ำเมื่อเกิดการอุดตันทางน้ำเข้าแบบตะแกรงกรณีมีทางน้ำเข้าตำแหน่งเดียวและหลายตำแหน่ง ทั้งนี้ ได้ประยุกต์แนวทางดังกล่าวกับทางเข้ารูปแบบขอบทางเท้าอีกด้วย [7] และในงานวิจัยของ Gómez et al. [8] ได้ทำการหาปริมาณการอุดตันที่เหมาะสมเพื่อไปใช้ในการออกแบบ ถึงแม้ว่า ค่าการอุดตันส่วนใหญ่จะถูกใช้ที่ 50% แต่ผลการทดลองพบว่าค่าดังกล่าวจะอยู่ที่ 26.5–67.4% โดยขึ้นกับรูปแบบของทางน้ำเข้าและลักษณะการอุดตันเป็นหลัก ทั้งนี้ งานวิจัยต่าง ๆ เหล่านี้ ยังขาดการวิเคราะห์ความเหมาะสมของการใช้งานทางน้ำเข้าแต่ละชนิดในระบบระบายน้ำเมื่อเกิดการอุดตัน นอกจากนี้ ยังไม่มีการวิเคราะห์เพื่อหาชนิดทางน้ำเข้าที่เหมาะสมมาใช้ร่วมกันแบบผสมผสาน

ผลสาธิตในระบบระบายน้ำ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมีเศษวัสดุอุดตันทางน้ำเข้า และความเหมาะสมในการใช้งานทางน้ำเข้าในการออกแบบระบบระบายน้ำเมื่อเกิดการอุดตัน ทำการวิเคราะห์กับรูปแบบทางน้ำเข้าทั้ง 3 รูปแบบที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทั้งนี้ เลือกใช้การออกแบบระบบระบายน้ำด้วยวิธีหลักเหตุและผล (Rational method) จากนั้นทำการวิเคราะห์ระดับการท่วมขังภายใต้การเปลี่ยนแปลงชนิดของทางน้ำเข้าและร้อยละของการอุดตันทางน้ำเข้าต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรมวิเคราะห์พายุฝนและสุขาภิบาล (Storm and Sanitary Analysis program) รุ่นเพื่อการศึกษา ซึ่งเป็นโปรแกรมเสริมในโปรแกรม Autodesk Civil 3D โดยโปรแกรมมีเครื่องมือในการวิเคราะห์เกี่ยวกับระดับการท่วมขังบนผิวถนนในกรณีที่มีเศษวัสดุอุดตันทางน้ำเข้าในรูปแบบต่าง ๆ ได้อีกด้วย การศึกษานี้จะประยุกต์ใช้กับพื้นที่โครงการบ้านจัดสรร เทศบาลตำบลแก่งเสือเต้น อำเภอพัฒนานิคม จังหวัดลพบุรี หาปัจจัยการอุดตันที่เหมาะสมในการใช้ออกแบบตั้งแต่ 0–90% จากนั้นเลือกค่าปัจจัยการท่วมขังที่ระดับการท่วมขังเริ่มมากขึ้นมาวิเคราะห์ความเหมาะสมในการใช้งานทางน้ำเข้าต่าง ๆ ต่อไป

2. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบระบบระบายน้ำคือการหาขนาดของท่อและความลาดชันที่สามารถรับปริมาณน้ำท่าจากน้ำฝนที่ตกลงมาในประเทศไทยกำหนดให้คำนวณหาปริมาณน้ำท่าจากฝนด้วยวิธีหลักเหตุและผลสำหรับพื้นที่ระบายน้ำที่มีขนาดไม่เกิน 25 ตารางกิโลเมตร [3–5] ขนาดของท่อและความลาดชันสามารถหาได้ด้วยสมการการไหลในทางน้ำเปิดโดยนำอัตราการไหลที่ได้จากวิธีหลักเหตุและผลมาคำนวณ ทั้งนี้ โปรแกรมวิเคราะห์พายุฝนและสุขาภิบาลสามารถทำการวิเคราะห์โดยใช้หลักการดังกล่าวและยังสามารถทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในท่อตามเวลาอีกด้วย

2.1 โปรแกรมวิเคราะห์พายุฝนและสุขาภิบาล

โปรแกรมวิเคราะห์พายุฝนและสุขาภิบาล (Storm and sanitary analysis program; SSA) ถูกใช้ในการวิเคราะห์การไหลในระบบระบายน้ำและผลกระทบจากการอุดตันทางน้ำเข้า โปรแกรมดังกล่าวรองรับทั้งหน่วยและมาตรฐานของระบบ US และ SI ประกอบด้วยเครื่องมือในการทำงานเกี่ยวกับระบบการระบายน้ำ เช่น การสร้างแนวเส้นท่อระบายน้ำต่าง ๆ รวมถึงปรับแต่งตำแหน่ง Node การสร้างพื้นที่รับน้ำ การนำเข้าข้อมูลปริมาตรน้ำฝน รวมถึงการจำลองสถานการณ์ฝนตก เพื่อให้โปรแกรมแสดงผลความสามารถในการระบายน้ำแบบทันต่อเหตุการณ์ อีกทั้งยังมีความสามารถช่วยในการปรับแต่งขนาดของท่อ และการส่งออกโมเดลในลักษณะ 3 มิติ ไปยังโปรแกรมอื่น ๆ เพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลองให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น [9]

2.2 วิธีหลักเหตุและผล (Rational method)

วิธีหลักเหตุและผลจะใช้หลักการเปลี่ยนความเข้มฝนเป็นค่าอัตราการไหลหลากภายใต้ตัวคุณสมบัติพื้นที่และขนาดพื้นที่ แสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$Q_R = \frac{I \sum (C_i A_i)}{3.6} \quad (1)$$

เมื่อ Q_R คือ อัตราการไหลของน้ำฝน, ลบ.ม.ต่อวินาที

I คือ ความเข้มฝน, มม./ชม.

C_i คือ สัมประสิทธิ์น้ำท่าของพื้นที่ย่อย i

A_i คือ พื้นที่ลุ่มน้ำย่อย i , ตร.กม.

จากนั้นค่าอัตราการไหลของน้ำฝนที่ได้จะนำไปใช้เป็นค่าอัตราการไหลในท่อระบายน้ำเพื่อคำนวณหาขนาดของท่อระบายน้ำภายใต้ความลาดชันที่กำหนดดังสมการที่ (2)

$$Q_R = Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2} \quad (2)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลในท่อระบายน้ำ, ลบ.ม./ว.

n = สัมประสิทธิ์ความขรุขระแมนนิ่ง และสำหรับท่อคอนกรีตจะใช้ค่าเท่ากับ 0.017

R = รัศมีชลศาสตร์ (Hydraulic Radius), ม.

$= A/P$

A = พื้นที่หน้าตัดของท่อหรือทางน้ำไหล, ตร.ม.

P = เส้นขอบเปียก, ม.

S = ความลาดชันท่อออกแบบ

2.3 การไหลหลากทางชลศาสตร์ (Hydraulic Routing)

จากการคำนวณค่าอัตราการไหลในเส้นท่อ ในหัวข้อ 2.2 สามารถนำค่าดังกล่าวไปใช้ในการจำลองการไหลหลากระหว่างเส้นท่อ โดยใช้วิธีอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ทางชลศาสตร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการไหลตามความยาวของลำน้ำและช่วงเวลาที่พิจารณา [10] ดังสมการที่ (3)

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (3)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหล, ลบ.ม.ต่อวินาที

y คือ ความลึกของการไหล, ม.

x คือ ระยะทางตามแนวความยาวการไหล, ม.

A คือ พื้นที่หน้าตัดตามขวางของการไหล, ตร.ม.

t คือ เวลา, วินาที

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, ม./วินาที²

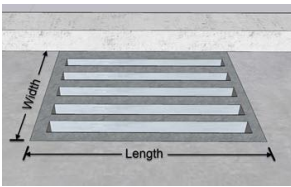
S_0 คือ ความลาดชันของท้องน้ำ

S_f คือ ความลาดชันของเส้นระดับพลังงาน

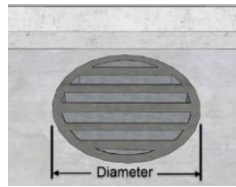
2.4 ทางน้ำเข้าที่ใช้ในการศึกษา

หน้าที่หลักของทางน้ำเข้าระบบระบายน้ำคือการนำน้ำผิวดินจากฝนที่ตกในพื้นที่รับน้ำลงสู่ท่อระบายน้ำ หน้าที่รองคือเป็นตำแหน่งในการบำรุงดูแลการอุดตันในเส้นท่อน้ำเข้าที่ใช้ในการศึกษาเป็นไปตามที่ กรมทางหลวง [3] กำหนดไว้ 3 รูปแบบ อีกทั้งในงานวิจัยยังเพิ่มเติมรูปแบบชนิดพื้นถนนเพิ่มอีก 1 ชนิด โดยลักษณะทางน้ำเข้าที่ใช้ในการวิจัยนี้แสดงได้ดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย 1) ทางน้ำเข้าพื้นถนนแบบตะแกรงสี่เหลี่ยม (Grated Inlet-Rectangular) และ 2) ทางน้ำเข้าพื้นถนนแบบตะแกรงกลม (Grated Inlet-Circular) 3) ทางน้ำเข้ารูปแบบขอบทางเท้า (Curb-Opening

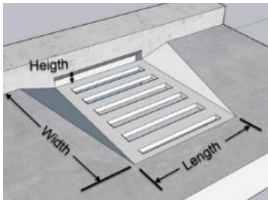
Inlet) และ 4) ทางน้ำเข้ารูปแบบผสมผสาน (Combination Inlet)



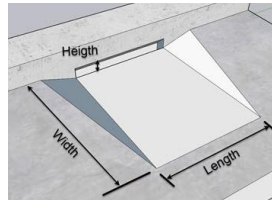
Grate inlet: Rectangular



Grate inlet: Circular



Combination inlet



Curb inlet

รูปที่ 1 ลักษณะของทางน้ำเข้าที่ใช้ในโครงการ

2.5 อัตราการไหลเข้าช่องระบายน้ำและปัจจัยการอุดตัน

Urban Drainage and Flood Control District [11] ได้เสนอการคำนวณอัตราการไหลของช่องเปิดทางระบายน้ำแบบตะแกรงแบ่งเป็น 3 กรณี กรณีที่ 1 น้ำขังอยู่เหนือตะแกรงไม่มาก เช่น มีน้ำสูงไม่เกิน 12 ซม. การไหลของน้ำลงผ่านช่องเปิดของตะแกรงจะมีพฤติกรรมเป็นการไหลผ่านฝายน้ำล้น (weir) ที่มีความยาว L เท่ากับผลรวมของเส้นขอบตะแกรงที่น้ำจะไหลและมีสัมประสิทธิ์การไหล C_w ประมาณ 3.0 กรณีที่ 2 น้ำขังอยู่เหนือตะแกรงมาก เช่น มีน้ำสูงเกินกว่า 0.4 ม. การไหลของน้ำลงผ่านช่องเปิดของตะแกรงจะมีพฤติกรรมเป็นการไหลผ่านรูระบาย (orifice) ที่มีพื้นที่หน้าตัดการไหลเท่ากับพื้นที่ระหว่างช่องเปิดของตะแกรงโดยมีความสูงน้ำเท่ากับความลึกของน้ำตั้งแต่ขอบบนของตะแกรงจนถึงผิวน้ำ และมีสัมประสิทธิ์อัตราการไหล C_w ประมาณ 0.6 และกรณีที่ 3 น้ำขังอยู่เหนือตะแกรงปานกลาง เช่น ประมาณ 0.1 ม. ถึง 0.4 ม. จะมีพฤติกรรมการไหลผ่านช่องเปิดของตะแกรงแบบผสมระหว่างฝายน้ำล้นกับการไหลแบบรูระบาย

สำหรับการคำนวณหาอัตราการไหลเข้าช่องเปิดขอบทางเท้า เนื่องจากความสูงน้ำน้อยกว่าความสูงช่องเปิดที่ขอบทาง สภาพการไหลจะมีลักษณะเหมือนกับการไหลผ่านฝายน้ำล้น

โดยมีสัมประสิทธิ์อัตราการไหลประมาณ 3.1 แต่ถ้าความสูงน้ำในแอ่งน้ำมากกว่าความสูงของช่องเปิดเกินกว่า 2 เท่า สภาพการไหลจะมีลักษณะเหมือนกับการไหลผ่านรูระบายที่มี $C_d = 0.7$ ซึ่งสามารถหาอัตราการไหลได้จากสมการที่ (4)

$$Q = 3.1Lbh^{0.5} \quad (4)$$

เมื่อ b คือ ความสูงของช่องเปิด, ม.

h คือ ความลึกน้ำเหนือระดับกึ่งกลางของช่องเปิด, ม.

L คือ ความยาวของทางน้ำเข้า, ม.

ปัจจัยการอุดตันช่องระบายน้ำในการศึกษานี้คือปัจจัยที่ลดประสิทธิภาพการระบายน้ำฝนของฝายตะแกรงตามเปอร์เซ็นต์ที่ระบุเพื่อพิจารณาการอุดตันของเศษซาก ซึ่งไม่คำนึงถึงชนิดหรือประเภทของสิ่งอุดตัน ตัวอย่างเช่นค่าการอุดตันที่ 80% จะทำให้พื้นที่รับน้ำของตะแกรงลดลง 80% ตัวอย่างการอุดตันทางน้ำเข้า แสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การอุดตันทางน้ำเข้า

ในกรณีที่ทางน้ำเข้าในการออกแบบมีหลายตำแหน่ง จะวิเคราะห์ปัจจัยลดการอุดตันตามสมการที่ Guo [7] พัฒนาขึ้น โดยพิจารณาการอุดตันที่ "สลายตัว" โดยทางน้ำเข้าหลายจุดสามารถช่วยกันระบายน้ำได้ดียิ่งขึ้น สาเหตุการอุดตันที่สลายตัวเนื่องจากปริมาณการไหลบ่าระลอกแรก (First flush) ทำให้มีเศษวัสดุอุดตันไหลไปทางด้านท้ายน้ำแล้วไป

ลดต้นบริเวณตะแกรงด้านท้ายน้ำมากกว่าด้านต้นน้ำ แสดง
ดังสมการที่ (5)

$$C = \frac{1}{N} (C_0 + eC_0 + e^2C_0 + e^3C_0 \dots + e^{N-1}C_0) = \frac{C_0}{N} \sum_{i=1}^N e^{i-1} = \frac{KC_0}{N} \quad (5)$$

เมื่อ C = ปัจจัยการลดต้นสำหรับทางน้ำเข้าที่มีหลาย
ตำแหน่ง
 C_0 = ปัจจัยการลดต้นทางน้ำเข้าแบบเดี่ยว
 e = อัตราส่วนการสลายตัว 0.5 สำหรับช่องระบาย
น้ำแบบตะแกรง และ 0.25 สำหรับช่องระบาย
น้ำแบบขอบทาง
 N = จำนวนของทางน้ำเข้าแบบตะแกรง
 K = ค่าสัมประสิทธิ์การลดต้นขึ้นกับชนิดของทาง
น้ำเข้า [11]

2.6 ข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ

ความเข้มฝนที่ใช้ในการออกแบบได้จากสถานีฝน
จังหวัดลพบุรี โดยอารียา ฤทธิมา และคณะ [12] ได้ทำการ
วิเคราะห์สมการความเข้มฝนออกแบบในรูปสมการยกกำลัง
แสดงได้ดังสมการที่ (6) ทั้งนี้ในการศึกษาจะเลือกใช้ความ
เข้มฝนที่รอบปีการเกิดซ้ำ 5 ปี ($Tr = 5$) เนื่องจากเป็นรอบปี
การเกิดซ้ำสำหรับการออกแบบระบบระบายน้ำหมู่บ้าน
จัดสรร [4]

$$I = \frac{2,781.46Tr^{0.2}}{T_c + 32.91} \quad (6)$$

เมื่อ I คือ ความเข้มฝน, มม./ชม.
 Tr คือ รอบปีการเกิดซ้ำที่พิจารณา, ปี
 T_c คือ เวลาการไหลรวมตัวของน้ำท่า, นาที
สัมประสิทธิ์การไหลและเวลาการรวมตัวของน้ำท่าใช้
ตามค่ากำหนดของสำนักมาตรฐานการบริหารงานองค์กร
ปกครองส่วนท้องถิ่น [5]

2.7 ประสิทธิภาพแนช-ซัทคลิฟ (Nash-Sutcliffe efficiency)

ค่าอัตราการไหลที่ได้จากโปรแกรมและรายการคำนวณ
จะถูกนำไปหาความถูกต้องโดยประสิทธิภาพ Nash and
Sutcliffe [13] โดยวิเคราะห์ผลรวมกำลังสองของผลต่าง
ระหว่างค่าในโปรแกรมและค่าจากรายการคำนวณ ดังสมการ
ที่ (7)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (7)$$

เมื่อ NSE คือ ประสิทธิภาพแนช-ซัทคลิฟ
 Q_i คือ อัตราการไหลที่ได้จาก Spreadsheet
 Q_{si} คือ อัตราการไหลที่ได้จากโปรแกรม
 $\bar{Q}$ คือ อัตราการไหลเฉลี่ยที่ได้จาก Spreadsheet
ค่าของ NSE ที่ได้จะต้องมีค่ามากกว่า 0.65 ตาม
ข้อเสนอแนะของ Moriasi et al. [14] หากต่ำกว่าจะต้องพิจารณา
การคำนวณใหม่ทั้งหมด

2.8 รากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error)

Hogue และคณะ [15] ได้เสนอแนวคิดของการหาค่าเฉลี่ย
ของความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลจริงและข้อมูลจำลองใน
รูปแบบรากที่สอง ดังสมการที่ (8)

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{si})^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

เมื่อ $RMSE$ คือ รากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย
หากค่า $RMSE$ ที่หาได้จากการจำลองน้อยกว่าครึ่งหนึ่ง
ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงว่าข้อมูลที่จำลองยอมรับได้
ตามข้อเสนอแนะของ Fiseha, B. M. และคณะ [16]

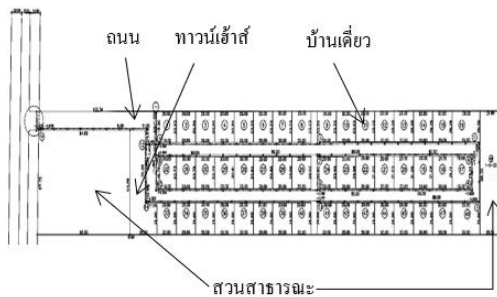
3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 พื้นที่ศึกษา

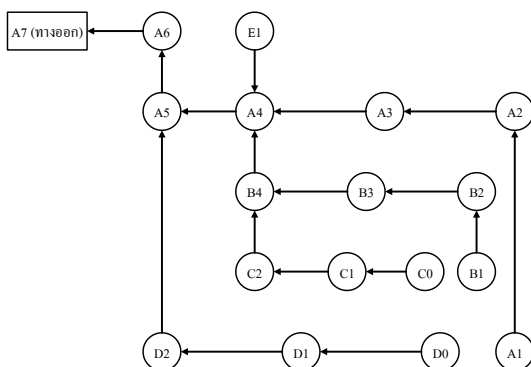
พื้นที่ออกแบบเลือกใช้ผังโครงการหมู่บ้านจัดสรรแห่งสี่
เด่นวิลเลจ 3 แสดงได้ดังรูปที่ 3 ตั้งอยู่ที่เทศบาลตำบลแก่งเสือ
เด่น อำเภอพัฒนานิคม จังหวัดลพบุรี พิกัด N14°50'31.12"

E101°03'17.46" มีพื้นที่รวม 36,800 ตร.ม. ลักษณะการใช้พื้นที่ ประกอบด้วยบ้านเดี่ยว ทาวน์เฮาส์ ถนน และสวนสาธารณะ โดยสัมปสิทธิ์การไหลของแต่ละพื้นที่แสดงได้ดังตารางที่ 1

ในโครงการมีตำแหน่งบ่อดักน้ำ (Manhole) 18 ตำแหน่ง จำนวนทางน้ำเข้า 113 ตำแหน่ง โดยมีแผนผังเส้นทางการไหลได้ดังรูปที่ 4 กำหนดระยะระหว่างทางน้ำเข้าแต่ละตำแหน่งอยู่ห่างกันไม่เกิน 15 เมตร



รูปที่ 3 ภาพถ่ายดาวเทียมแสดงพื้นที่ของโครงการบ้านจัดสรรหมู่บ้านแก่งเสือเต้นวิลเลจ 3



รูปที่ 4 ผังเส้นทางการระบายน้ำในโครงการ

ตารางที่ 1 สัมปสิทธิ์การไหลตามลักษณะพื้นที่

ลักษณะการใช้พื้นที่	C
บ้านเดี่ยว	0.60
ทาวน์เฮาส์	0.80
สวนสาธารณะ	0.20
ถนน	0.90

3.2 การรวบรวมและจัดทำข้อมูลพื้นฐาน

ประกอบด้วยการจัดหาหรือกำหนดข้อมูลพื้นฐานของสภาพพื้นที่ระบายน้ำ ตำแหน่งการระบายน้ำออก ทางระบายน้ำสาธารณะ ขนาดพื้นที่ใช้สอยแยกตามประเภทหรือลักษณะสิ่งก่อสร้าง แบบภูมิประเทศตลอดจนค่าระดับพื้นที่

3.3 การวางแผนเส้นทางการระบายน้ำ

ในขั้นตอนนี้จะทำการวางแผนกำหนดทิศทางการระบายน้ำ เริ่มต้นจากการเลือกทางออกของการระบายน้ำสายหลักและสายรอง ทำการแบ่งพื้นที่โครงการออกเป็นพื้นที่ย่อย ๆ ให้สัมพันธ์กับการระบายน้ำในท่อสายต่าง ๆ จากนั้นกำหนดจุดเชื่อมต่อระหว่างท่อระบายน้ำสายหลักกับท่อระบายน้ำสายรองให้สัมพันธ์กับการต่อเชื่อมและขนาดพื้นที่ระบายน้ำ โดยผังการออกแบบระบบระบายน้ำของงานวิจัยนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4

3.4 การวิเคราะห์ระบบระบายน้ำตามมาตรฐานการออกแบบ

ทำการวิเคราะห์ระบบระบายน้ำโดยใช้โปรแกรม Spreadsheet ทำการหาขนาดท่อและความลาดชันที่เกิดขึ้นภายใต้ข้อกำหนดต่าง ๆ เลือกใช้รอบปีการเกิดซ้ำ 5 ปี เป็นหลักในการออกแบบ

3.5 การวิเคราะห์ระบบระบายน้ำด้วยโปรแกรมวิเคราะห์พา俞

ฝนและสุขาภิบาล

ทำการจำลองระบบระบายน้ำโดยใช้โปรแกรมภายใต้คุณสมบัติพื้นฐานการออกแบบที่เหมือนกัน เช่น ความลาดชันท่อ ลักษณะการใช้พื้นที่ ค่าสัมปสิทธิ์การไหล อีกทั้งยังกำหนดให้ทางน้ำเข้าแต่ละแบบมีพื้นที่หน้าตัดการระบายน้ำที่เท่ากัน โดยมีมิติทางน้ำเข้าประกอบด้วย 1) ทางน้ำเข้า

พื้นถนนแบบตะแกรงสี่เหลี่ยมขนาด 0.60×1.00 ม.² และ 2) ทางน้ำเข้าพื้นถนนแบบตะแกรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.88 ม. 3) ทางน้ำเข้ารูปแบบขอบทางเท้าขนาด 0.25×2.40 ม.² และ 4) ทางน้ำเข้ารูปแบบผสมผสานใช้ขนาดตามรูปแบบ 1) และ 3) รวมกัน

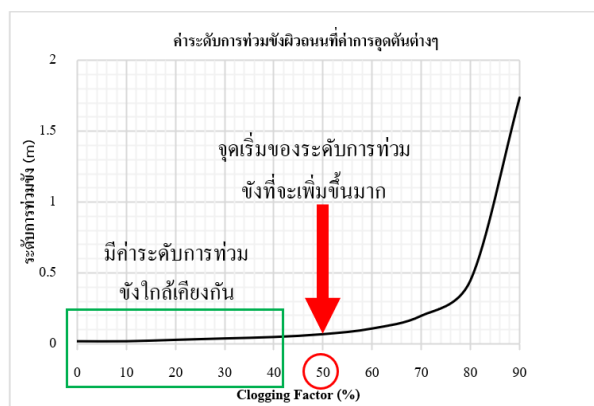
3.6 การตรวจสอบความถูกต้องในการวิเคราะห์ของโปรแกรม

ทำการตรวจสอบความถูกต้องในการวิเคราะห์ของโปรแกรม โดยนำค่าอัตราการไหลที่ได้จากโปรแกรมมาตรวจสอบกับอัตราการไหลที่ได้จากการคำนวณในข้อ 3.4 และ 3.5 ภายใต้การกำหนดขนาดท่อและความลาดชันเดียวกัน โดยค่าอัตราการไหลทั้งสองจะต้องมีประสิทธิภาพเนซ-ชัตคลิฟ มากกว่า 0.65 ขึ้นไปและค่ารากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน หากไม่ผ่านเกณฑ์ให้พิจารณาความผิดพลาดที่เกิดจากการป้อนค่าให้ถูกต้อง

3.7 การวิเคราะห์ผลกระทบเมื่อทางน้ำเข้ามีการอุดตัน

เมื่อทำการปรับเทียบการคำนวณและโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว จะทำการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อทางน้ำเข้ามีการอุดตัน โดยทำการปรับเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ของการอุดตัน (Clogging factor) ตั้งแต่ 0, 10, 20,..., 80 จนถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ พบว่าที่การอุดตัน 50% เป็นจุดเริ่มของระดับการท่วมขังที่จะเริ่มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยที่ Clogging Factor 0–40% จะมีค่าระดับน้ำที่ท่วมขังเพิ่มขึ้นทีละน้อยและมีค่าระดับการท่วมขังที่ใกล้เคียง

ดังนั้นการศึกษานี้จึงเลือกกรณีการอุดตัน 50% และกรณีที่ไม่มีการอุดตัน (การอุดตัน 0%) มาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบการท่วมขังบนผิวถนนภายใต้การเปลี่ยนแปลงทางน้ำเข้ารูปแบบต่าง ๆ



รูปที่ 5 ค่าระดับการท่วมขังผิวถนนที่ค่าการอุดตันต่าง ๆ

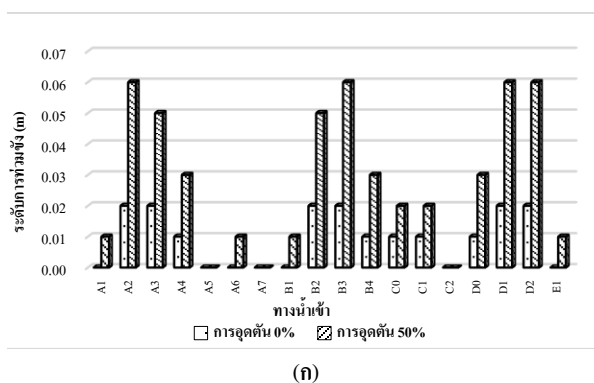
4. ผลการวิจัย

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

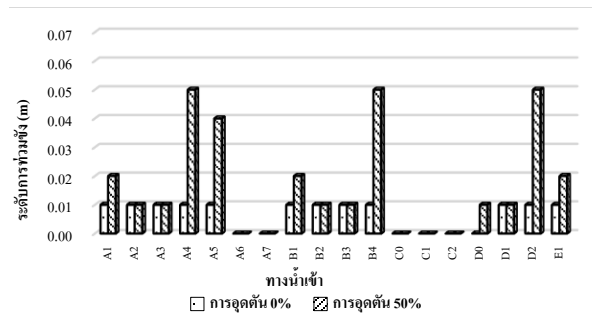
จากการหาประสิทธิภาพ เนซ-ชัตคลิฟ ระหว่างค่าอัตราการไหลที่ได้จาก Spreadsheet และ โปรแกรมวิเคราะห์พายุฝนและสุขาภิบาล ได้ค่า *NSE* ที่ 0.995 ซึ่งมากกว่าค่าแนะนำของ Moriasi et al. [14] แสดงได้ว่าค่าอัตราการไหลที่ได้มีความถูกต้องต้องและน่าเชื่อถือ อีกทั้งผลการวิเคราะห์ค่า RMSE อยู่ที่ 0.007 ซึ่งน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0.096

4.2 ระดับการท่วมขังบนผิวถนนในรูปแบบทางน้ำเข้าต่าง ๆ

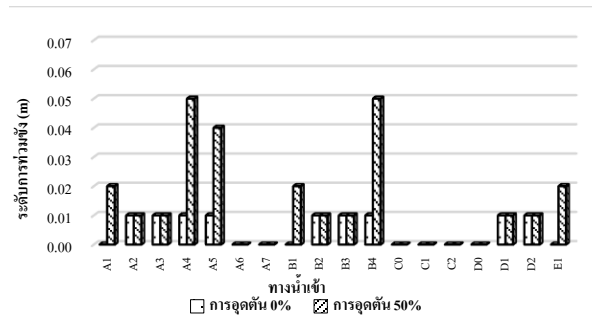
ความสามารถในการระบายน้ำประเมนได้จากค่าระดับการท่วมขังบนผิวถนน รูปที่ 6 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลง



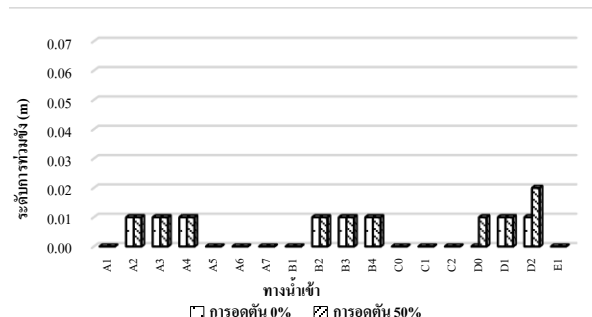
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 6 ระดับการท่วมขังผิวน้ำของทางน้ำเข้าแต่ละแบบ (ก) ชนิดขอบทางเท้า (ข) ชนิดพื้นถนนแบบตะแกรงสี่เหลี่ยม (ค) ชนิดพื้นถนนแบบตะแกรงกลม (ง) ชนิดพื้นถนนตะแกรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขอบทางเท้า

ระดับการท่วมขังเมื่อร้อยละการอุดตันเพิ่มขึ้นในทางน้ำเข้า โดยจะเห็นได้ว่า เมื่อไม่มีการอุดตันในทางน้ำเข้า (การอุดตัน 0%) ระดับการท่วมขังจะอยู่ในระดับที่ไม่เกิน 0.02 เมตร ในทางน้ำเข้าทั้ง 4 ชนิด แต่เมื่อเกิดการอุดตัน 50% พบว่า ค่าระดับการท่วมขังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดของทางน้ำเข้าชนิดขอบทางเท้า (รูปที่ 6(ก)) มีการเพิ่มของระดับการท่วมขังอยู่บ้างในบางจุดของทางน้ำเข้าชนิด

พื้นถนนแบบตะแกรงสี่เหลี่ยมและตะแกรงกลม (รูปที่ 6(ข)-(ค)) โดยแบบตะแกรงกลมจะมีระดับการท่วมขังที่น้อยกว่าแบบตะแกรงสี่เหลี่ยมเนื่องจากแบบตะแกรงกลมมีหน้าตัดที่ดีที่สุดในทางชลศาสตร์ ทำให้น้ำสามารถไหลเข้าได้ดีกว่าเมื่อพื้นที่หน้าตัดของช่องระบายน้ำเท่ากัน สำหรับทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนผืนผ้าขอบทางเท้า (รูปที่ 6(ง)) จะไม่มีการเพิ่มระดับการท่วมขังเมื่อเกิดการอุดตันยกเว้นตำแหน่ง D2 เนื่องจากทางน้ำเข้าตำแหน่งดังกล่าวมีประสิทธิภาพต่ำในการระบายของทางน้ำเข้าแบบตะแกรงขอบทางเท้าและตะแกรงสี่เหลี่ยม (รูปที่ 6(ก)-(ข)) เมื่อนำมาใช้ร่วมกันจะทำให้ประสิทธิภาพการระบายเพิ่มขึ้น (ระดับการท่วมขังลดลง) แต่ยังคงมีระดับการท่วมขังที่สูงกว่าแบบตะแกรงกลมอย่างเดียว เมื่อพิจารณาการอุดตันต่อระดับการท่วมขังในทางน้ำเข้าทั้ง 4 ชนิด พบว่าทางน้ำเข้าชนิดขอบทางเท้ามีประสิทธิภาพในการระบายน้ำต่ำสุด เนื่องจากมีระดับการท่วมขังบนผิวน้ำในระดับที่สูงเมื่อเทียบกับทางน้ำเข้าชนิดอื่น และทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนผืนผ้าขอบทางเท้ามีประสิทธิภาพในการระบายน้ำสูงสุด เนื่องจากมีระดับการท่วมขังบนผิวน้ำในระดับที่ต่ำเมื่อเทียบกับทางน้ำเข้าชนิดอื่น ซึ่งประสิทธิภาพการระบายน้ำของทางน้ำเข้าแต่ละชนิดที่แตกต่างกันนี้จะนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมในแต่ละพื้นที่ดังรายละเอียดหัวข้อถัดไป

4.3 ผลการใช้งานทางน้ำเข้าที่เหมาะสม

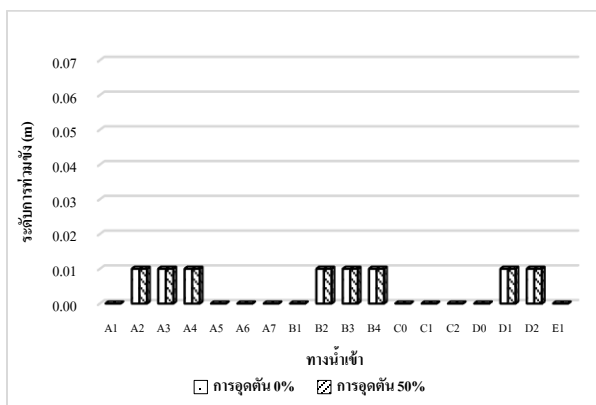
ในกรณีที่เกิดการอุดตันทางน้ำเข้า 50% การเลือกใช้งานรูปแบบทางน้ำเข้าพิจารณาจากระดับการท่วมขังที่น้อยและราคาทางน้ำเข้าที่ประหยัด โดยผลการศึกษาของ Lottes et al [17] บ่งชี้ว่าที่ระดับการท่วมขังมากกว่า 2.4 มม. ส่งผลต่อความเร็วของยานพาหนะที่จะลื่นไถล (hydroplane) อย่างมีนัยยะสำคัญ ดังนั้นทางน้ำเข้าที่มีระดับการท่วมขังน้อยกว่า 2.4 มม. จะถูกนำมาเลือกใช้งาน และในกรณีที่ระดับทางน้ำเข้าต่ำกว่า 2.4 มม. จะเลือกจากราคาของทางน้ำเข้า โดยตารางที่ 2 แสดงราคาทางน้ำเข้าประเภทต่างๆ ตามราคาท้องตลาด

ตารางที่ 2 ราคาของทางน้ำเข้ารูปแบบต่างๆ

รูปแบบทางน้ำเข้า	ราคา (บาท)
ทางน้ำเข้าพื้นถนนแบบตะแกรงสี่เหลี่ยม	1,100
ทางน้ำเข้าพื้นถนนแบบตะแกรงกลม	1,920
ทางน้ำเข้ารูปแบบขอบทางเท้า	700
ทางน้ำเข้ารูปแบบผสมผสาน	2,500

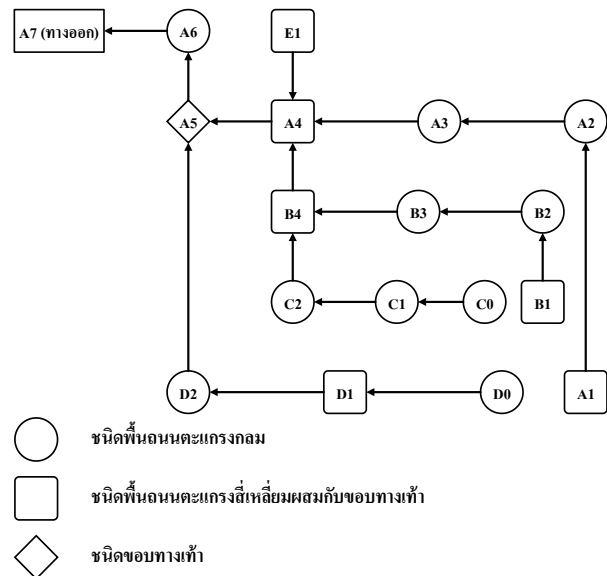
หมายเหตุ อ้างอิงที่ขนาดตะแกรง 0.5 ม. × 0.5 ม.

ผลการวิเคราะห์ระดับการท่วมขังหลังจากเลือกใช้ทางน้ำเข้าที่มีระดับการท่วมขังต่ำสุดและราคาประหยัดแสดงได้ดังรูปที่ 7 โดยมีระดับการท่วมขังที่ตำแหน่งต่าง ๆ ไม่เกิน 0.01 เมตร ลักษณะของทางน้ำเข้าที่เหมาะสมแต่ละตำแหน่งแสดงได้ดังรูปที่ 8 ประกอบด้วยทางน้ำเข้า ชนิดพื้นถนนตะแกรงกลม ชนิดพื้นถนนตะแกรงสี่เหลี่ยมผสมกับขอบทางเท้า และชนิดขอบทางเท้า จำนวน 11, 6 และ 1 ตัวตามลำดับ



รูปที่ 7 ระดับน้ำบนผิวถนนเมื่อติดตั้งรูปแบบทางน้ำเข้าให้เหมาะสมในแต่ละพื้นที่

ทั้งนี้ หากพิจารณาที่ความคุ้มค่าของการติดตั้ง ทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนแบบตะแกรงกลมมีราคาที่สูงกว่าแบบอื่น ๆ ซึ่งหากมีการขอมให้มีระดับการท่วมขังเพิ่มขึ้น อาจปรับไปใช้ทางน้ำเข้าแบบอื่น ๆทดแทนได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้งานจริงทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนแบบตะแกรงกลมมีความปลอดภัยต่อการขับขึ้นถนนมากกว่า



รูปที่ 8 รูปแบบทางน้ำเข้าชนิดต่าง ๆ ในแต่ละจุด

5. อภิปรายผลการศึกษา

การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการอุดตันที่ปัจจัยการอุดตัน 50% ของทางน้ำเข้ารูปแบบต่าง ๆ ต่อการระบายน้ำ พบว่า ทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนตะแกรงสี่เหลี่ยมผสมกับขอบทางเท้ามีประสิทธิภาพในการระบายน้ำได้ดีที่สุด สอดคล้องกับงานของ Veerappan and Le [18] ที่พบว่าทางน้ำเข้าตะแกรงสี่เหลี่ยมผสมกับขอบทางเท้าดีกว่าตะแกรงสี่เหลี่ยมแบบปกติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดการอุดตันมากกว่า 100% สำหรับรูปแบบทางน้ำเข้าชนิดขอบทางเท้าไม่เหมาะสมในพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการอุดตันสูง การใช้ทางน้ำเข้าให้เหมาะสมในแต่ละพื้นที่นั้นแม้ว่าทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนแบบตะแกรงกลมมีความปลอดภัยต่อการขับขึ้นถนน และความสวยงามมากกว่าทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนแบบตะแกรงสี่เหลี่ยม แต่ในเรื่องของความประหยัดตะแกรงสี่เหลี่ยมมีราคาที่ถูกลงกว่าตะแกรงกลม ดังนั้นถ้าหากมีการจำกัดในเรื่องงบประมาณควรจะเลือกใช้ตะแกรงสี่เหลี่ยมเนื่องจากการระบายน้ำของตะแกรงทั้ง 2 ชนิดนี้มีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน ตะแกรงสี่เหลี่ยมจึงเป็นทางเลือกที่ดีในการนำมาใช้ในรูปแบบทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนน ในส่วนของพื้นที่ที่มีการรับน้ำในปริมาณมากควรใช้ทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนตะแกรง

สื่เหลียมผสมกับขอบทางเท้าเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการระบายน้ำที่ดีที่สุด และพื้นที่ที่มีการรับน้ำในปริมาณน้อยและมีความเสี่ยงต่อการอุดตันน้อยจะใช้ทางน้ำเข้าชนิดขอบทางเท้าเนื่องจากมีความประหยัดในเรื่องของงบประมาณมากที่สุด

6. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอระดับการท่วมขังของรูปแบบทางน้ำเข้าชนิดต่าง ๆ ที่ค่าการอุดตันทางน้ำ 0% และ 50% ของพื้นที่ทางน้ำเข้า จากนั้นทำการปรับใช้รูปแบบทางน้ำเข้าให้เหมาะสมในแต่ละพื้นที่ ผลการศึกษาบ่งชี้ว่า ที่ค่าการอุดตัน 0% มีระดับการท่วมขังไม่เกิน 2 ซม. ของทุกรูปแบบทางน้ำเข้า ในขณะที่การอุดตันทางน้ำเข้า 50% สำหรับทางน้ำเข้าชนิดพื้นถนนตะแกรงสื่เหลียมผสมกับขอบทางเท้ามีระดับการท่วมขังต่ำสุด และทางน้ำเข้าชนิดขอบทางเท้ามีระดับการท่วมขังสูงสุด การประยุกต์ใช้รูปแบบทางน้ำเข้าที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่จะทำให้ระดับการท่วมขังไม่เกิน 1 ซม. และเมื่อพิจารณาในเรื่องของการใช้งานทางน้ำเข้าชนิดตะแกรงกลมจะมีความปลอดภัยต่อการขับขึ้นถนนมากกว่าชนิดตะแกรงสื่เหลียม แต่ในเรื่องของราคาทางน้ำเข้าชนิดตะแกรงสื่เหลียมจะมีราคาที่ถูกกว่า และการใช้ทางน้ำเข้าชนิดขอบทางเท้าเป็นตัวเลือกที่ดีในการใช้งานในพื้นที่ที่มีการรับน้ำในปริมาณน้อยและเสี่ยงต่อการอุดตันต่ำเนื่องจากมีราคาที่ถูกต้อง

7. ข้อเสนอแนะ

1) ในงานวิจัยนี้ใช้ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลจากการคำนวณและโปรแกรม ซึ่งหากใช้ค่าอัตราการไหลจริงในท้องจะทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีขึ้น

2) ในอนาคตควรทำการศึกษาเกี่ยวกับหมู่บ้านจัดสรรหรือพื้นที่จัดสรรแบบอื่นเพื่อดูว่ารูปแบบทางน้ำเข้าที่นำเสนอในงานวิจัยสามารถใช้ได้กับทุกพื้นที่

3) การพิจารณาการระบายน้ำควรศึกษาเกี่ยวกับประเด็นของเวลาในการระบายน้ำเพิ่มเติมเพื่อทำให้งานวิจัยครอบคลุมรอบด้านยิ่งขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ฟินิกซ์ อินสเปกเตอร์ ดีไซน์ คอนซัลแตนท์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลในการศึกษา และขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาที่อุดหนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Post Today, "Rain landslides in Pathum, Sathaphon village for the last 9 years, the cause of garbage clogged pipes," posttoday.com. <https://www.posttoday.com/social/local/628618>. (accessed: Sep. 15, 2021)
- [2] Thai Rath Online, "The rain does not drain quickly flooded the houses the reason is because the debris clogs the sewers" thairath.co.th. <https://www.thairath.co.th/news/local/central/122-4942>. (accessed: Sept. 22, 2021)
- [3] Handbook of Drainage system design and prevent erosion in highway work, Dept. of Highways, Bangkok, Thailand, 2011, pp.25–142.
- [4] Drainage system design according to Bangkok standards for small project areas at the housing estate, Dept. of Drainage and Sewerage, Bangkok, Thailand, 1992, pp. 1–15.
- [5] *Standard of Wastewater and Storm Drainage System*, Dept. of Local Administration, Bangkok, Thailand, 2012, pp. 17–26.
- [6] J. C. Y. Guo, "Design of grate inlets with a clogging factor," *Advances in Environmental Research*, vol. 4, no. 3, pp. 181–186, 2000, doi: 10.1016/S1093-0191(00)00013-7

- [7] J. C. Y. Guo, "Design of Street Curb Opening Inlets Using a Decay-Based Clogging Factor," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 132, no. 11, pp. 1240–1241, 2006, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:11(1237).
- [8] M. Gómez, G. H. Rabasseda and B. Russo, "Experimental campaign to determine grated inlet clogging factors in an urban catchment of Barcelona," *Urban Water Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 50–60, 2012, doi: 10.1080/1573062X.2012.690435.
- [9] Autodesk Storm and Sanitary Analysis 2018 User's Guide, ADSK., San Rafael, CA, USA, 2017, pp. 244.
- [10] N. Inwong, "Discharge Forecasting in Yom and Nan Rivers by KUnet Artificial Neural Networks Program," M.S. Thesis, Dept. WRE., Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2006.
- [11] Urban Drainage and Flood Control District Urban Storm Drainage Criteria Manual, 1st ed., UDFCD., Denver, CO, USA, 2017, pp. 7–28.
- [12] A. Rittima, K. Piemfa, N. Uthai and A. Jantaramana, "An Improvement of Design Rainfall Analysis of the Central Basin of Thailand," *Research and development journal*, vol. 24, no.4, pp. 28–38, 2013.
- [13] J. E. Nash and J. V. Sutcliffe, "River flow forecasting through conceptual models; Part I-a discussion of principles," *Journal of Hydrology*, vol. 10, pp. 282–290, 1970, doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- [14] D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel and T. L. Veith, "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations," *Transactions of the ASABE*, vol. 50, no. 3, pp. 885–900, 2007, doi: 10.13031/2013.23153.
- [15] T. S. Hogue, S. Sorooshian, H. Gupta, A. Holz and D. Braatz, "A multistep automatic calibration scheme for river forecasting models," *Journal of Hydrometeorology*, vol. 1, no. 6, pp. 524–542, 2000.
- [16] B. M. Fiseha, S. G. Setegn, A. M. Melesse, E. Volpi and A. Fiori, "Hydrological analysis of the Upper Tiber River Basin, Central Italy: a watershed modelling approach," *Hydrological Processes*, vol. 27, no. 16, pp. 2339–2351, 2012, doi: 10.1002/hyp.9234.
- [17] S. A. Lottes, M. A. Sitek and N. Sinha, "Computational analysis of water film thickness during rain events for assessing hydroplaning risk Part 1: Nearly smooth road surfaces," NSED U.S. Dept. of Energy Labs., Argonne, IL, USA, Rep. ANL-20/36; 162558, 2020.
- [18] R. Veerappan and J. Le, "Hydraulic efficiency of road drainage inlets for storm drainage system under clogging effect." presented at the 5th Int. Conf. Flood Risk Management and Response, San Servolo, Italy, 2016, pp. 271–281, doi: :10.2495/UW160241.

การสร้างการเข้ารหัสคอนโวลูชันสำหรับการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นใต้น้ำ โดยใช้เอฟพีจีเอ

FPGA Implementation of Convolutional Code for Underwater Visible Light Communication Systems

กฤษณะพงศ์ พันธุ์ศรี^{1,*} อัมพวรรณ ยินดีมาก² เอกพล ชันสาดี¹ และ กุริพงษ์ สุทธิโสภณพันธ์³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วิทยาเขตขอนแก่น เมือง เมือง ขอนแก่น 40000

² สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น เมือง เมือง ขอนแก่น 40000

³ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมือง เมือง ขอนแก่น 40000

Kidsanapong Punsri^{1,*}, Ampawan Yindeemak², Ekkaphong Kansaree¹ and Puripong Suttisopapan³

¹ Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Muang, Muang, Khonkhaen, 40000, Thailand

² Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Technical Education,
Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Muang, Muang, Khonkhaen, 40000, Thailand

³ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Muang, Muang,
Khonkhaen 40000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: kidsanapong.pu@rmuti.ac.th

Received: Feb 11, 2022; Revised: Apr 26, 2022; Accepted: May 11, 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและทดลองระบบการเข้ารหัสคอนโวลูชัน (Convolutional code) เพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดโดยใช้อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Field programmable gate array: FPGA) สำหรับการสื่อสารเชิงแสงที่มองเห็นใต้น้ำ (Underwater visible light communication: UVLC) โดยใช้อัลกอริทึมวิเทอบี (Viterbi algorithm) สำหรับการถอดรหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาด ส่วนของเครื่องส่งถูกวางใต้น้ำโดยใช้ค่าอุณหภูมิในน้ำ และค่าพีเอช (pH) เป็นตัวช่วยในการศึกษาการรับส่งข้อมูลเชิงแสงใต้น้ำไร้สายโดยใช้แอลอีดี (Light emitting diode: LED) ที่กำลังงาน 10W และอัตราบอด (Baud rate) สูงสุดเท่ากับ 9,600 b/s (baud per second) ส่วนที่เครื่องรับก็จะใช้วอลเลนซ์โฟโตไดโอด (Avalanche photodiodes: APD) ที่มีแถบสัญญาณเท่ากับ 25 MHz สำหรับการแปลงสัญญาณเชิงแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า APD จะถูกใช้ตัวรับแสงพร้อมกันที่เครื่องรับทั้งหมด 4 ตัวและสัญญาณจาก APD จะถูกนำไปขยายด้วยออปแอมป์เบอร์ OPA2380 เพื่อให้ได้แรงดันไม่ต่ำกว่า 3.3V เนื่องจากเป็นแรงดันที่ ESP8266 WiFi ทำงานได้ ลำดับสุดท้าย ข้อมูลค่าอุณหภูมิและพีเอชที่ตรวจวัดได้จะถูกส่งไปยังเครื่องแม่ข่ายคลาวด์ NETPIE และแสดงผลบนเว็บไซต์ เพื่อยืนยันการทำงานของระบบผลการทดลองที่ทำการบันทึกและแสดงผลต่อเนื่อง 240 นาที ที่ระยะทาง 1.5 m โดยมีอัตราข้อผิดพลาดเท่ากับ 1.4×10^{-3} จากผลการทดลองพบว่าการเข้ารหัสคอนโวลูชันสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดได้ และระบบสามารถทำงานได้ดีแสดงค่าที่ตรวจวัดได้ตลอด การทดลองนี้เป็นการทดลองบนเวลาจริง (Real Time)

คำสำคัญ: การสื่อสารใต้น้ำ, การสื่อสารเชิงแสงที่มองเห็นได้สำหรับการส่งข้อมูลค่า pH และ อุณหภูมิ, การเข้ารหัสคอนวอลูชันด้วยไฟ, อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้

Abstract

In this work, the error-correcting code, namely convolutional code, is developed and implemented using field-programmable gate array (FPGA) is proposed for underwater visible light communication (UVLC). The Viterbi decoding using the trellis diagram is used. The transmitter is located underwater with 10w LED and the baud rate is 9,600 b/s, which is compatible with the UART communication protocol. Four avalanche photodiodes with a bandwidth of 25 MHz is used to convert the light signal to an electrical signal at the receiver. Additionally, the output signal from the APDs is amplified by using OPA2380. The input voltage target is 3.3v, which is suitable for the ESP8266. Additionally, the measured data send to NETPIE for presented on the website in the following. To verify the system performance, the measurement data is recorded for 240 minutes with a communication distance of 1.45m. The bit error rate is 1.4×10^{-3} ; therefore, the system can correct the error and show it on NETPIE correctly. The data is measured in real-time.

Keywords: underwater communication, visible light communication for sending pH and temperature values, convolutional code using field programmable gate array

1. บทนำ

ในการเลี้ยงสัตว์น้ำเศรษฐกิจ คุณภาพและสิ่งแวดล้อมของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญต่อการควบคุมคุณภาพของน้ำให้เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ผลผลิตที่ดีที่สุดและมากที่สุด ทั้งนี้ การควบคุมต่าง ๆ จำเป็นต้องใช้ระบบการสื่อสารทั้งแบบมีสาย (Line communication: LC) และไร้สาย (Wireless communication: WC) อย่างไรก็ดีหากสามารถควบคุมด้วยระบบไร้สายได้ อาจทำให้มีความยืดหยุ่นและไม่เป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินเมื่อเทียบกับการใช้บุคลากรสำรวจและไม่สัมผัสโดยตรง สำหรับการสื่อสารไร้สายประกอบไปด้วยระบบการสื่อสารโดยใช้คลื่นวิทยุ (Radio frequency: RF) และการสื่อสารเชิงแสงไร้สาย (Optical wireless communication: OWC) หรือในบางการนำไปใช้งานอาจรวมไปถึงระบบการสื่อสารเชิงแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visible communication: VLC) [1],[2]

สำหรับการสื่อสารใต้น้ำจากการศึกษาและเปรียบเทียบทั้งระบบ RF และ OWC พบว่าระบบ RF มีแถบสัญญาณ (Bandwidth signal) น้อยกว่า OWC ซึ่งมีขนาดประมาณ 100 KHz มีค่าการลดทอนสูงมาก (High loss) [1] ส่วน VLC สามารถรองรับความเร็วของระบบสื่อสารได้ถึงระดับกิกะบิต (Giga bit per second) [3] ทำให้มีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก ทั้งนี้แสงที่ใช้สำหรับการสื่อสารใต้น้ำนิยมใช้แสงสีน้ำเงิน สี

ฟ้า เนื่องจากมีอัตราการลดทอนในน้ำน้อยที่สุด [4] ดังนั้นหากนำแสงสีฟ้ามาใช้สำหรับการส่งข้อมูลข่าวสารเพื่อควบคุมและส่งข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) คุณภาพน้ำพร้อมกับนำมาบูรณาการเข้ากับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Thing: IoT) ได้อีกด้วย จึงเป็นระบบที่น่าสนใจมาก อย่างไรก็ตามการศึกษาวิจัยงานวิจัยดังกล่าวยังมีอยู่น้อยมาก เช่น A. Schuster [5] นำเสนอการตรวจวัดคลื่นหัวใจ และอุณหภูมิร่างกายสำหรับนักประดาน้ำ (Aquanaut) แต่การส่งข้อมูลข่าวสารดังกล่าวยังใช้สายทองแดงนำสัญญาณ ไปยังตัวรับที่ผิวน้ำจากนั้นส่งสัญญาณไปยังเครื่องแม่ข่ายคลาวด์ (Cloud Server) ด้วยระบบ IoT ด้วยบลูทูธ (Bluetooth) เมื่อไม่นานมานี้มีงานวิจัยที่เริ่มศึกษาระบบการนำเอาการสื่อสาร VLC สำหรับการสื่อสารใต้น้ำโดยใช้แสงสีฟ้า [6] โดยใช้ค่าอุณหภูมิในน้ำและค่า pH เป็นตัวอย่างในการศึกษาระบบการสื่อสารข้อมูล และใช้สัญญาณแบบไม่กลับสู่ศูนย์ (Non return-to-zeros: NRZ) อย่างไรก็ดีจากการศึกษา พบว่ายังมีข้อผิดพลาดจึงจำเป็นต้องส่งซ้ำหลายรอบ

ข้อผิดพลาดในระบบสื่อสารการเป็นอาณานิคมที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ แต่สามารถแก้ไขได้ โดยที่การแก้ไขข้อผิดพลาดมีหลายเทคนิคเช่น รหัสคอนวอลูชัน (Convolution code) [7],[8] รหัสรีด-โซโลมอน (Reed-Solomon) [9] และการเข้ารหัสยุคใหม่ เช่น รหัสพาริตีเชิงความหนาแน่นต่ำ (Low Density

Parity Check: LDPC) [10] อย่างไรก็ดีบทความนี้นำเสนอการออกแบบการเข้ารหัสคอนโวลูชัน สำหรับการแก้ไขบิตผิดพลาดที่เครื่องรับสำหรับการสื่อสารเชิงแสงใต้น้ำ โดยใช้อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Field programmable gate array: FPGA) เนื่องจากการเข้ารหัสที่ได้รับความนิยมและมีความซับซ้อนต่ำ อย่างไรก็ดี RS-code และ LDPC code สามารถนำมาใช้ได้และอาจมีประสิทธิภาพมากกว่า แต่มีความซับซ้อนสูง และใช้ลอจิกเกตมากกว่า ทั้งนี้บทความนี้ใช้ค่า pH และอุณหภูมิ เป็นตัวอย่งในการตรวจสอบคุณภาพน้ำ ที่เครื่องส่งใช้ LED สีฟ้าขนาด 10W ความเร็วที่ใช้ในการสื่อสาร (Baud rate) ระหว่างภาคส่งและภาครับเท่ากับ 9,600 บิตต่อวินาที และการกล่าสัญญาณที่ใช้คือ OOK (On-off keying) ที่เครื่องรับใช้ APD (avalanche photodiode) ที่มีแถบความถี่เท่ากับ 25 MHz จำนวน 4 ตัว สำหรับการรับสัญญาณ

แสงและแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ผลการตรวจรู้ค่าต่าง ๆ จะถูกนำไปแสดงผ่านทางเว็บไซต์ NETPIE โดยเว็บไซต์สามารถแสดงผลผ่านทางอุปกรณ์ที่สามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตได้ทุกชนิด ผ่านการสื่อสารแบบไวไฟ (Wi-Fi) แต่จำเป็นต้องทำการถือคอินเพื่อเข้าถึงข้อมูล และระยะทางการสื่อสารระหว่างภาคส่งและภาครับโดยรวมอยู่ที่ 1.2 เมตร

2. ระบบใช้ในการทดลอง

วิธีดำเนินการวิจัยสำหรับการสร้างระบบการสื่อสารใต้น้ำ โดยใช้การเข้ารหัสคอนโวลูชัน แสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยประกอบไปด้วยเครื่องส่งและเครื่องรับ

ที่เครื่องส่งประกอบไปด้วยอาดูโน (Arduino) สำหรับตัวประมวลผลสำหรับสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจรู้ ที่นำมาใช้เป็นตัวอย่าง คือ pH และอุณหภูมิ จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยัง FPGA สำหรับทำการเข้ารหัสคอนโวลูชัน ก่อนส่งไปยังตัวขับโหลด LED แสงสีฟ้าขนาด 10W ส่วนวงจรขับโหลด LED แสดงได้ดังเอกสาร [6]

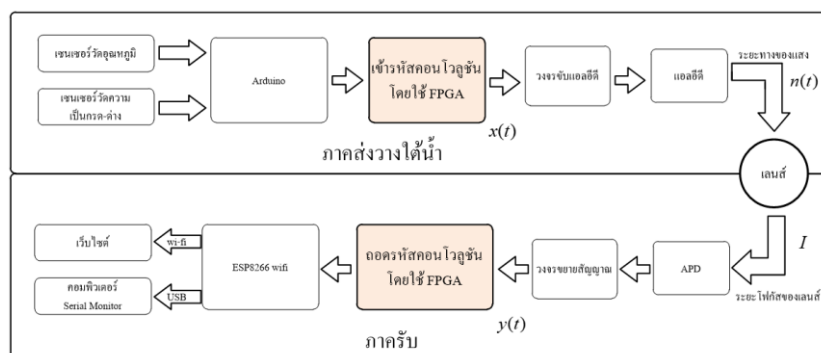
ที่เครื่องรับความเข้มแสงที่ APD รับได้สามารถอธิบายได้ตามกฎของเบียร์ (Beer's law) ได้ดังสมการที่ (1) [7]

$$I = R \cdot I_0 \exp(-e(\lambda) \cdot d) \quad (1)$$

เมื่อ I คือความเข้มแสงที่รับได้ I_0 คือความเข้มแสงที่ต้นทางเครื่องส่งและ R คือค่าความไวของ APD $e(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$ เมื่อ $a(\lambda)$ คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) และ $b(\lambda)$ คือค่าสัมประสิทธิ์การกระจัดกระจายของแสง (Scattering coefficient) โดยทั่วไปค่าดูดกลืนแสงในน้ำสะอาดมีค่า $a(\lambda)$ เท่ากับ 0.053 m^{-1} และ $b(\lambda)$ เท่ากับ 0.003 m^{-1} [11] ส่วน d คือระยะทาง ดังนั้นสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับ $y(t)$ สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2)

$$y(t) = I \cdot x(t) + n(t) \quad (2)$$

โดยที่ $x(t)$ คือสัญญาณที่ต้องการจะส่งที่เครื่องส่ง โดยในที่นี้คือสัญญาณไม่กลับคืนสู่ศูนย์ (non return-to-zeros) $n(t)$ คือสัญญาณรบกวนในระบบทั้งเครื่องรับและเครื่องส่ง อย่างไรก็ดี สัญญาณไฟฟ้าที่รับได้ถูกขยายเพื่อให้ได้แรงดันที่เหมาะสมกับ ESP8266 WiFi เพื่อนำไปบันทึกไว้ที่เครื่องแม่ข่าย NETPIE และแสดงผลค่าที่ตรวจรู้ได้ต่อไป



รูปที่ 1 ระบบที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับการนำการเข้ารหัสโคโวลูชันนอลมาใช้งานจริงสำหรับการสื่อสารใต้น้ำ

3. การออกแบบรหัสการคอนโวลูชันโดยใช้ FPGA

รหัสคอนโวลูชันประกอบไปด้วยการเข้ารหัสโดยการประมวลผลการเข้ารหัสที่ภาคส่ง และการถอดรหัสที่ภาครับแสดงได้ดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

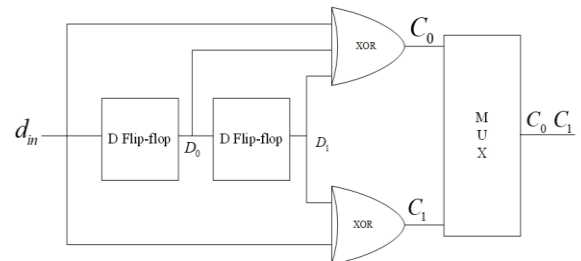
3.1 การสร้างการเข้ารหัสคอนโวลูชัน FPGA

การเข้ารหัสคอนโวลูชันที่ภาคส่ง ประกอบไปด้วยชิพเรจิสเตอร์ (shift register) โดยมีแผนผังการทำงานแสดงได้ดังรูปที่ 2 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการเข้ารหัสประกอบไปด้วยสัญญาณ C_0 และ C_1 ตามลำดับ จากนั้นสัญญาณดังกล่าวถูกเรียงต่อกันโดยให้ C_1 ถูกส่งออกก่อนต่อด้วย C_0 โดยใช้วงจรมัลติเพล็กซ์ (Multiplexer) ทั้งนี้ C_0 และ C_1 สามารถหาค่าได้ดังสมการที่ (3) [9]

$$\begin{aligned} C_0 &= d_{in} \oplus D_0 \oplus D_1 \\ C_1 &= d_{in} \oplus D_1 \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อ C_0 คือ เอาต์พุตลำดับแรก C_1 คือ เอาต์พุตลำดับถัดไป $\oplus$ คือ การบวกแบบมอดูโลสอง (Modulo-2 adder) d_{in} คือ สถานะข้อมูลบิตอินพุต D_0 คือ สถานะข้อมูลที่ได้จากการเลื่อนบิตลำดับหนึ่ง และ D_1 คือ สถานะข้อมูลที่ถูกเลื่อนลำดับที่สอง จากสมการที่ (8) สามารถสร้างด้วย FPGA แสดง

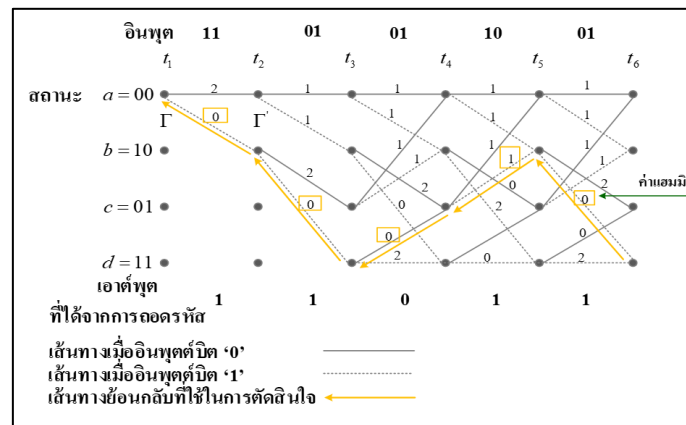
ได้ดังรูปที่ 2 โดยที่วงจรสำหรับชิพเรจิสเตอร์ใช้ดีฟลิปฟล็อป (D Flip-flop) ส่วน การบวกแบบมอดูโลสองใช้วงจร เอ็กซ์คลูซีฟออร์ (XOR) สุดท้ายก่อนส่งสัญญาณที่ถูกเข้ารหัส C_1 ออกไปก่อน ตามด้วย C_0 โดยใช้วงจรมัลติเพล็กซ์



รูปที่ 2 วงจรเข้ารหัสโควลูชันนอล

3.2 การถอดรหัสคอนโวลูชัน

ในบทความนี้ อัลกอริทึมวิเทอร์บี (Viterbi algorithm) [9] แบบมีการตัดสินใจอย่างหยาบ (Hard decision) ถูกนำมาใช้ถอดรหัสโดยใช้แผนภาพตามไดอะแกรมเทรลลิส (Trellis diagram) แสดงได้ดังรูปที่ 3 จากรูปพบว่าจำนวนสถานะที่เป็นไปได้ทั้งหมด 4 สถานะ เนื่องจากใช้ข้อกำหนด 3 (Constrain 3) และมีเส้นทางการเปลี่ยนแปลงเส้นทางอยู่ 8 เส้นทาง สำหรับอินพุตเป็นบิต '0' และ '1'



รูปที่ 3 แผนภาพไดอะแกรมเทรลลิส

อัลกอริทึมวิเทอร์บีทำการคำนวณหาจำนวนข้อมูลบิตผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนขั้น ณ เวลาปัจจุบันแทนด้วย G ไปยังขั้นถัดไป แทนด้วย G' ทั้ง 4 สถานะ โดยประกอบไปด้วยดังนี้ คือ $a = 00$ $b = 10$ $c = 10$ $d = 11$ แต่ละขั้นแทนด้วย t_i เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots$ และทุกสถานะพิจารณาบิต

อินพุตเปรียบกับสถานะบิต จำนวนค่าที่ต่างกัน เรียกว่า ค่าแฮมมิง (Hamming)

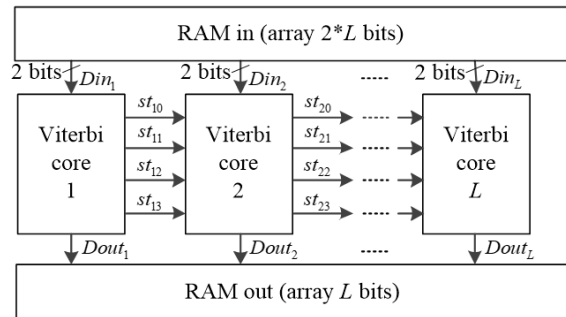
โดยการหาค่าแฮมมิง และเก็บค่าจำนวนข้อมูลบิตผิดพลาดที่น้อยที่สุด ถูกกำหนดให้เป็นเส้นทางที่มีความน่าจะเป็นไปได้สูงสุดที่บิตจะถูกต้อง สุดท้ายทำการเลือกบิตข้อมูล

ข่าวสารโดยการเลือกสถานะที่ให้ค่าบิตผิดพลาดน้อยที่สุดย้อนกลับโดยใช้อินพุตของเส้นทางที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุดเป็นตัวเลือก หรือเป็นคำตอบของการถอดรหัส

จากไดอะแกรมเทรลิสพบว่ามีการประมวลผล 3 ขั้นตอนแสดงได้ตามรูปที่ 3 และแต่ละขั้นตอนใช้การประมวลผลเพียง 2 บิต ประกอบไปด้วย ขั้นตอนที่ 1 จำนวน

ค่าแฮมมิงระหว่างบิตอินพุตกับบิตประจำสถานะ โดยใช้เอ็กซ์คลูซีฟออร์ ขั้นตอนที่ 2 เก็บค่าแฮมมิงที่คำนวณได้ของแต่ละสถานะและทุกขั้น t_i โดยใช้ ชิฟต์-เรจิสเตอร์ ขั้นตอนที่ 3 เลือกเส้นทางย้อนกลับตามค่าแฮมมิงที่น้อยที่สุดจากที่กล่าวมาสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 3 พบว่าเส้นทางที่ได้คือเส้นทางตามลูกศร โดยเอาต์พุตสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 1 1 0 1 1 ตามลำดับ

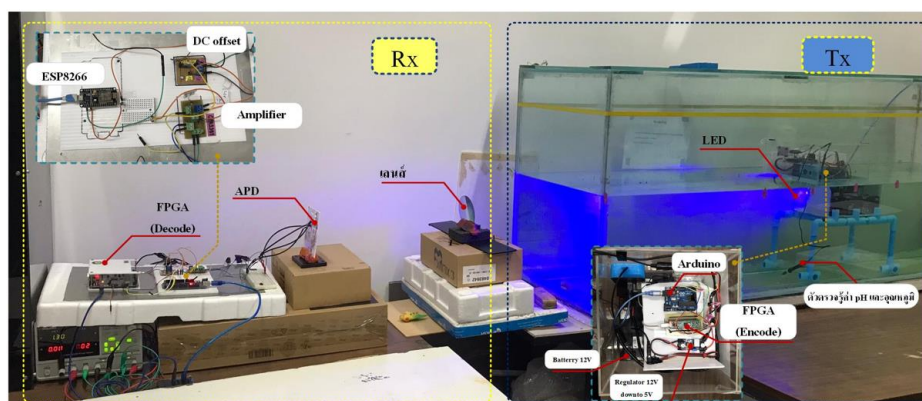
สำหรับการนำการถอดรหัสคอนโวลูชันมาใช้งานจริงด้วย FPGA สามารถแสดงวิธีการทำงานแสดงได้ดังรูปที่ 4 ประกอบด้วยสัญญาณอินพุตแทนด้วย D_{in} ขนาด $2L$ บิต เมื่อ L คือขนาดขั้นที่ใช้ในการถอดรหัส แต่ละวิเทอริกอร์ (Viterbi core) ซึ่งเป็นหน่วยประมวลผลหลัก และใช้ในการคำนวณหาค่าแฮมมิงและเลือกเส้นทางที่ให้ค่าแฮมมิงน้อยที่สุด สัญญาณเอาต์พุตแต่ละวิเทอริกอร์คือสถานะทั้งหมด 4 สถานะ ของแต่ละขั้น ส่วนเอาต์พุตที่ได้คือเอาต์พุตที่ได้จากการเลือกเส้นทางที่มีค่าแฮมมิงน้อยที่สุดและมีเพียงเส้นทางเดียวโดยเลือกจากเส้นทางตามอินพุตที่ให้แฮมมิงน้อยที่สุด แทนด้วย D_{out} โปรดพิจารณารูปที่ 3 ประกอบ ส่วนอินพุตประกอบไปด้วยบิต '0' และ '1' เท่านั้น



รูปที่ 4 วงจรถอดรหัสโควลูชัน

4. การติดตั้งอุปกรณ์

การติดตั้งระบบการสื่อสารไร้สายเชิงแสงใต้น้ำประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือภาคส่ง (Transmitter: Tx) วางไว้ใต้น้ำ ช่องสัญญาณ (Channel) ใต้น้ำ ภาครับ (Receiver: Rx) วางไว้ที่ผิวน้ำ แสดงได้ดังรูปที่ 5 ประกอบ จากรูปไปด้วยส่วนของภาคส่ง ทำการตรวจรู้ข้อมูลใต้น้ำโดยใช้โมดูลตรวจรู้ค่าอุณหภูมิ และโมดูลตรวจรู้ค่า pH ซึ่งการประมวลผลอ่านค่าตรวจรู้จากโมดูลด้วยบอร์ดอาดูโน จากนั้นส่งค่าตรวจรู้ที่ได้ ไปเข้ารหัสคอนโวลูชัน โดยใช้ FPGA (CMOD S6) ทั้งนี้อัตราบอดสารับระบบสื่อสารระหว่างอาดูโนไปยัง FPGA มีค่าเท่ากับ 9,600 b/s (baud per second) หลังจากการเข้ารหัสสัญญาณที่ได้ประกอบไปด้วยสองบิตตามสมการที่ (8) ดังนั้นจึงต้องใช้ความเร็วของอัตราบอดสองเท่าในการส่งข้อมูล คือ 19,200 ($9,600 \times 2$) b/s



รูปที่ 5 การติดตั้งระบบการสื่อสารไร้สายเชิงแสงใต้น้ำ

สัญญาณที่ได้จากการเข้ารหัสจะถูกส่งไปยังวงจรขับโพลีไดโอดที่ประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ (Transistor) เบอร์ NSS1C201LT1G เพื่อให้แอลอีดีส่องสว่างติดตามสัญญาณข้อมูล แอลอีดีเลือกใช้แสงสีฟ้าที่มีความยาวคลื่นประมาณ 430–500 นาโนเมตรเนื่องจากแสงสีฟ้ามีค่าการลดทอนได้น้ำต่ำ จากนั้นส่งข้อมูลทางแสงผ่านช่องสัญญาณได้น้ำและอากาศ ในการทดลองนี้ใช้ตู้กระจกขนาดกว้าง 0.5 เมตร ยาว 2 เมตร สูง 1 เมตร และอากาศจากขอบกระจกถึง APD ระยะทาง 1 เมตร (100 เซนติเมตร) ส่วนของภาครับใช้วาเลนซ์โฟโตไดโอด (Avalanche Photodiode: APD) เป็นตัวรับแสง เพื่อแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า สัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จะส่งไปยังวงจรขยายสัญญาณโดยใช้โอปแอมป์ (Op-Amp) เบอร์ OPA2380 เพื่อขยายสัญญาณโดยใช้แรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์ และสัญญาณถูกส่งไปยังวงจรเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Offset) ระหว่าง 1.10 โวลต์ ถึง 1.32 โวลต์ เพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณที่รับได้ให้อยู่ในช่วง ระดับการแปลความหมายระหว่างบิต “0” และ “1” ของ FPGA คือ 1.4 โวลต์ ขึ้นไป โดยที่สัญญาณที่ถูกเพิ่มระดับแรงดันถูกนำไปประมวลผลการถอดรหัสข้อมูลด้วย FPGA (Nexy4 DDR)

จากนั้นข้อมูลที่ได้รับการถอดรหัสจะถูกส่งไปยังบอร์ด ESP8266 WiFi ด้วยอัตราบอด 9,600 b/s เพื่อแสดงผลค่า pH และค่าอุณหภูมิ ไปยังเว็บไซต์ NETPIE หรือแสดงผลบนจอแสดงผล (Serial monitor) และเพื่อตรวจสอบค่า

ประสิทธิภาพ BER ของระบบ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้บอร์ด Arduino MEGA 2560 เพื่อคำนวณค่า BER ที่ได้จากการเข้ารหัสพร้อมแสดงผลผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial) ต่อไป

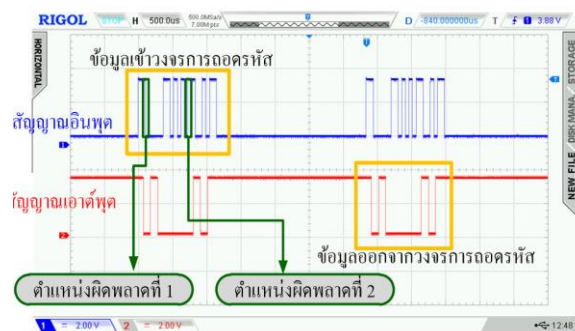
5. ผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการสื่อสารไร้สายเชิงแสงได้น้ำที่นำเสนอ โดยแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ การแก้ไขบิตผิดพลาด และผล BER

อายุไดอะแกรม และการทดสอบระบบเวลาจริง ดังที่จะกล่าวดังต่อไปนี้

5.1 ผลการแก้ไขบิตผิดพลาดของวงจรการเข้ารหัส และถอดรหัส

การทดสอบประสิทธิภาพการแก้ไขบิตผิดพลาดของวงจรการเข้ารหัส และถอดรหัสแสดงได้ดังรูปที่ 6 โดยกำหนดให้ข้อมูลสำหรับทดสอบเป็นตัวอย่างคือ ตัวอักษร “A” ในรูปแบบรหัส ASCII (American Standard Code for Information Interchange) เลขฐานสองจำนวน 8 บิต คือ 1 0 0 0 0 1 0 จากนั้นเพิ่มส่วนหัวและท้ายสำหรับบิตเริ่มต้นและบิตหยุดสำหรับการสื่อสารแบบอนุกรม รวมทั้งหมด 10 บิต เมื่อนำไปเข้ารหัส จะได้ บิตข้อมูลดังนี้



รูปที่ 6 สัญญาณอินพุต และเอาต์พุตจากวงจรการถอดรหัส

1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 จำนวน 20 บิต เพื่อการทดลองการแก้ไขในการทดลองนี้กำหนดให้บิตผิดพลาดจำนวน 2 บิต ดังนี้ 1 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 1 0 0 0 1 0 (ตัวหนาเป็นข้อมูลที่กำหนดให้ผิด) จากนั้นนำข้อมูลเข้ารหัส

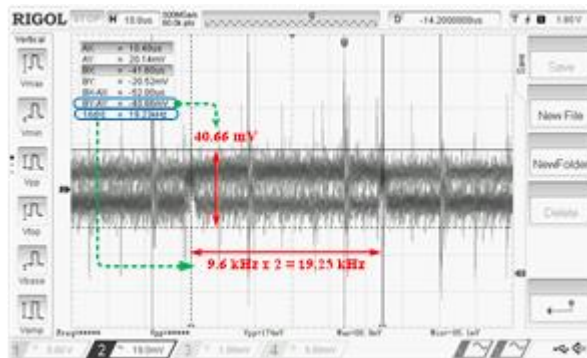
การถอดรหัส คือสัญญาณอินพุต เพื่อตรวจสอบสัญญาณเอาต์พุตหลังจากถอดรหัสสัญญาณ พบว่าสัญญาณเอาต์พุตสามารถแปลความหมายเป็น “A” กลับได้ถูกต้อง คือ 0 1 0 0 0 0 0 1 0 1 แสดงได้ดังรูปที่ 6

5.2 ผลของอายุไดอะแกรมและอัตราบิตผิดพลาด

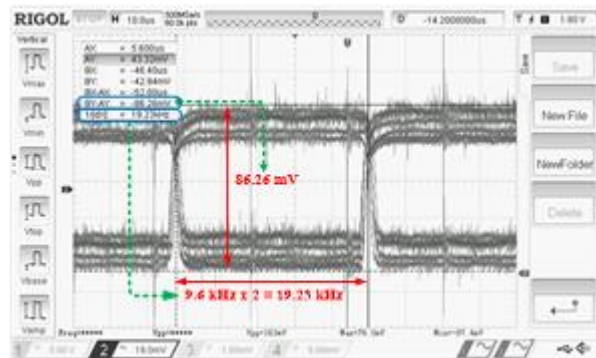
หัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลอายุไดอะแกรม (Eye diagram) แสดงได้ดังรูปที่ 7 และผลของประสิทธิภาพอัตราบิตผิดพลาด (Bit error rate: BER) จากการทดลองเวลาจริงแสดงดังรูปที่ 8 โดยพิจารณาผลของระยะทาง และจำนวน

APD เป็น 1 2 3 และ 4 ตัวตามลำดับ โดยการส่งข้อมูลข่าวสารทั้งหมด 5,000 บิตตามระบบที่ใช้ในการพิจารณาตามหัวข้อที่ 4

จากรูปที่ 7 กำหนดให้ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับมีระยะทาง 150 cm โดยพบว่าความกว้างของตาข่ายไคอะแกรมสำหรับ 4 APDs เปิดมากกว่าตาข่ายของเครื่องรับที่มี 1 APD โดยจากผลของตาข่ายไคอะแกรมสามารถยืนยันต่อยอดในรูปของ BER ได้ดังแสดงตาม

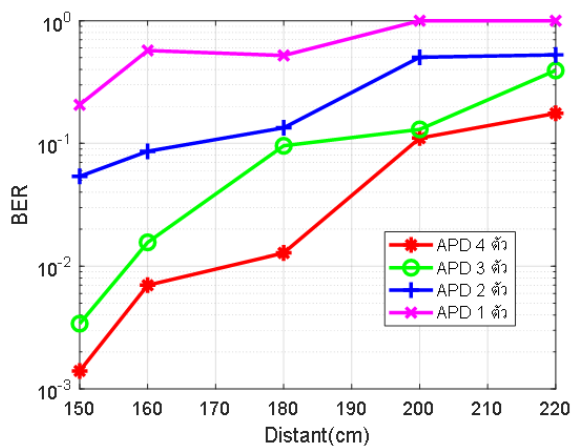


(ก)



(ข)

รูปที่ 7 อยาไคอะแกรมที่ระยะทาง 150 cm สำหรับ ก. สำหรับ APD เพียงตัวเดียว และ ข. APD 4 ตัว ตามลำดับ (ก) APD เพียงตัวเดียว (ข) APD 4 ตัว



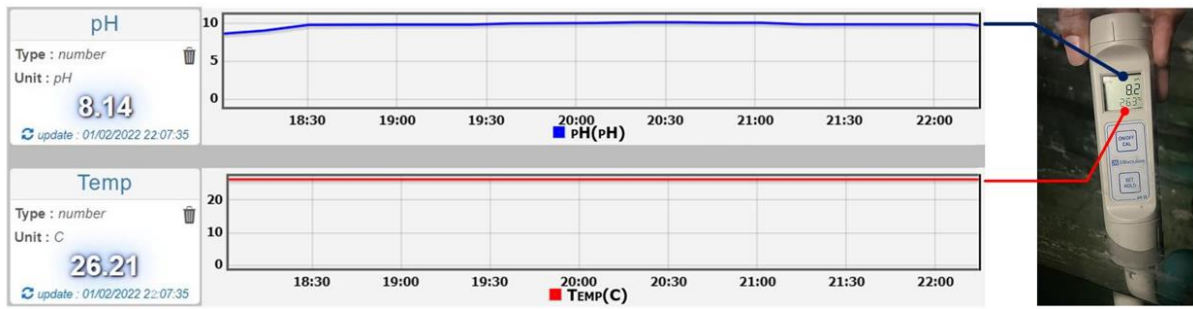
รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของระยะทาง ต่อ BER ที่ APD 1 2 3 และ 4 ตัว

สุดท้ายแสดงผลค่า pH และ อุณหภูมิ ได้ถูกต้องดังแสดงด้วยเวลาจริงดังแสดงได้ดังรูปที่ 9 ทั้งนี้ยังแสดงผล

รูปที่ 8 จากผลการทดลองเมื่อระยะทางการรับส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ BER สูงขึ้น เนื่องจากพลังงานจากแสง LED ที่ตกกระทบ APD มีพลังงานลดลงตามระยะทางการรับส่งข้อมูล ทำให้กำลังงานของสัญญาณรบกวน เช่น การกระเจิงของแสง ส่งผลต่อสัญญาณ มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เมื่อเพิ่มจำนวน APD เป็น 4 ตัว เพื่อเพิ่มระดับแรงดันที่รับได้ให้มีค่ามากขึ้น และ BER ที่ 150 cm มีค่าเท่ากับ 1.4×10^{-3} สำหรับ APD 4 ตัว และ 2×10^{-1} สำหรับ APD 1 ตัว ตามลำดับ

เปรียบเทียบกับอุปกรณ์มาตรฐานจากบริษัท Milwaukee KIT - Martini meter และเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากตัวตรวจรู้พบว่ามีความใกล้เคียงกันโดยมีความผิดพลาดอุณหภูมิ และ pH เท่ากับ 0.37% และ 19.6% ตามลำดับ ทั้งนี้ในการทดลองทำการเปิดเครื่องให้ทำงาน 4 ชม. ต่อเนื่องไม่มีหยุด

จากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าระบบสามารถสื่อสารและแก้ไขผิดพลาดได้จริง ทำให้สามารถพัฒนาต่อยอดให้สามารถสื่อสารให้ไกลมากขึ้น และสามารถใช้ร่วมกับระบบอินเทอร์เน็ตใต้น้ำของสรรพสิ่ง (Internet of Underwater Things: IoUT) [12] หรือระบบการทดสอบตัวกลางและหรือช่องสัญญาณใต้น้ำเพื่อป้องกันถึงคุณลักษณะตัวกลางที่ต้องการจะทดสอบดังแสดงใน [13]



รูปที่ 9 กราฟแสดงค่า pH และค่าอุณหภูมิ บนเว็บไซต์ NETPIE เปรียบเทียบเครื่องมือวัด Milwaukee KIT - Martini meter

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการแก้ไขข้อผิดพลาดโดยใช้การเข้ารหัสคอนวอลูชันโดยใช้ FPGA จากผลการทดลองอัลกอริทึมที่นำเสนอ สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดได้ดี โดยค่า BER ลดลงเมื่อเพิ่มจำนวน APD สำหรับ APD 4 ตัว ที่ระยะทาง 1.5 เมตร มีค่า BER 1.4×10^{-3} ทั้งนี้ระบบการสื่อสารเชิงแสงได้น้ำยังสามารถแสดงและบันทึกค่าตัวตรวจรู้ อุณหภูมิ และ พีเอช บนเว็บไซต์ NETPIE โดยในบทความนี้บันทึกไว้ทั้งหมด 240 นาที เพื่อแสดงผลย้อนหลังบนระบบ IoT ได้ จากการทดลองเป็นการทดลองบนระบบเวลาจริง ทำให้มีความน่าเชื่อถือและต่อยอดให้สามารถนำไปใช้จริงได้ตาม บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำได้จริงและเป็นเทคโนโลยีใหม่อีกด้วย

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คุณธนธิป บัณฑิต คุณบุญกร บุญศรี จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ที่ช่วยติดตั้งระบบการทดลอง และขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล-อีสาน ที่ให้การสนับสนุนตาม สัญญาเลขที่ ENG01/65

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Underwater optical wireless communication," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1518–1547, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2552538.
- [2] T. Szili, B. Matolcsy and G. Fekete, "Water pollution investigations by underwater visible light communications," in *The 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Budapest, Hungary, 2015, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICTON.2015.7193516.
- [3] S. Watson, S. P. Najda, P. Perlin, M. Leszczynski, G. Targowski, S. Grzanka, M. A. Watson, H. White and A. E. Kelly, "Multi-gigabit data transmission using a directly modulated GaN laser diode for visible light communication through plastic optical fiber and water," in *2015 IEEE Summer Topicals Meeting Series (SUM)*, Nassau, Bahamas, 2015, pp. 224–225, doi: 10.1109/PHOSST.2015.7248278.
- [4] K. Nakamura, I. Mizukoshi and M. Hanawa, "Optical wireless transmission of 405 nm, 1.45 Gbit/s optical IM/DD-OFDM signals through a 4.8 m underwater channel," *Optics Express*, vol. 23, no. 2, pp. 1558–1566, 2015, doi: 10.1364/OE.23.001558.
- [5] S. Andreas, C. Olivier, S. Bruno, C. Tobias, S. Arne and G. Seabear, "Underwater monitoring system for body temperature and ECG recordings," *Underwater Technology*, vol. 34, no. 3, pp.135–139, 2017, doi: 10.3723/ut.34.135.
- [6] K. Puntsri, E. Khansalee and P. Suttisopapan, "Underwater environment sensors with visible light communication systems," *Journal of Current Science and Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 269–276, 2021, doi: 10.14456/jcst.2021.27.
- [7] Z. Decai, L. Xiaochun, W. Haitao and X. Jinsong, "Implementation of convolutional code based on

- FPGA in OFDM-UWB system,” in *The 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Held, Singapore, pp. 1119–1122, 2008, doi: 10.1109/ICIEA.2008.4582692.
- [8] B. Sklar, “Channel Coding: Part2,” in *Digital communications: fundamentals and applications*, Hoboken, NJ, USA: Prentice Hall, 2001, ch. 7, sec. 7.1, pp. 381–435.
- [9] W. C. Cox, J. A. Simpson, C. P. Domizioli, J. F. Muth and B. L. Hughes, “An underwater optical communication system implementing Reed-Solomon channel coding,” in *OCEANS 2008*, QC, Canada, 2008, pp. 1–6, doi: 10.1109/OCEANS.2008.5151992.
- [10] J. Zhang, Y. Yang, Z. Gao, Y. Zhu, “Performance analysis of LDPC codes for wireless optical communication systems in different seawater environments,” in *2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, Hangzhou, China, 2018, pp. 1–3, doi: 10.1109/ACP.2018.8596282.
- [11] G. S. Spagnolo, L. Cozzella and F. Leccese, “Underwater optical wireless communications: overview,” *sensors*, vol. 20, no. 8, pp. 1–14, 2020, doi: 10.3390/s20082261.
- [12] M. Jahanbakht, W. Xiang, L. Hanzo and M. Rahimi Azghadi, “Internet of underwater things and big marine data analytics—a comprehensive survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 2, pp. 904–956, 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3053118.
- [13] B. Cochenour, K. Dunn, A. Laux and L. Mullen, “Experimental measurements of the magnitude and phase response of high-frequency modulated light underwater,” *Applied Optics*, vol. 56, no. 14, pp. 4019–4024, 2017, doi: 10.1364/AO.56.004019.

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความสำหรับวิศวสารลาดกระบัง

การเตรียมต้นฉบับบทความ

กองบรรณาธิการวิศวสารลาดกระบังได้แบ่งประเภทของบทความเป็น 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 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของกองบรรณาธิการวิศวสารลาดกระบัง ทั้งนี้บทความต้นฉบับต้องได้รับการอนุมัติยืนยันจากผู้แต่งร่วมทุกคน และไม่ควรอยู่ในระหว่างการศึกษาหรือตีพิมพ์ในวารสารวิชาการอื่น ๆ ให้ผู้แต่งส่ง (1) บทความพร้อมกับ (2) จดหมายนำ (Cover Letter) ที่ระบุ

- ขอบเขต ของบทความว่าสอดคล้องกับขอบเขตของวารสารในหัวข้อใด
- ความสำคัญของหัวข้อบทความหรือปัญหาทางจริง
- ปัญหางานวิจัยหรือช่องว่างขององค์ความรู้
- 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 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.
- [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. Breimann. *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 เนื้อหายังภาคผนวก 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 พร้อมระบุรายชื่อนามผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความของท่านได้ 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.....



ISSN 0125-1724 (Print)

ISSN 2730-3888 (Online)

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

Volume 39 Number 2

June 2022

Academic Paper

1. A Review on Screw Conveyors for Bulk Materials in Various Applications
Pornchai Chongchitpaisan Supattarachai Sudsawat 1

Research Papers

2. Application of Kansei Engineering Techniques in the Design and Development of TV Table Furniture Products from Oil Palm Trunks 13
S. Rawangwong C. Homkhiew S. Chantaramanee and P. Chumsri
3. Development of Strategic Supplier Evaluation: A Case Study of Wood Suppliers in Furniture Industry 27
K. Sripathomswat
4. Dual-Band Double Circular Patch Antenna on Multilayer Substrate 44
N. Phanchin K. Lertsakwimarn S. Kawdungta P. Supanakoon and C. Phongcharoenpanich
5. Evaluation of the Particle Filtration Efficiency of Surgical Masks by Electrostatic and Light Scattering Particle Counters 53
P. Intra V. Asanavijit and W. Rattanachan
6. Application of Nanofiltration Membrane for Calcium Sulfate and Natural Organic Matter Removal 70
A. Onsarn S. Mattaraj W. Dechapanya K. Ratanapongleka T. Rattanaweerapan and S. Sanongraj
7. Temperature Control of Thermoelectric Generators for Small Incinerators With Modified Fruit Fly Optimization Algorithm (MFOA) 82
S. Sriwichai R. Pansomboon and S. Kawdungta
8. Aerodynamic Design and Optimization of Supersonic Spin-Stabilize Round Body 90
W. Norrasing and W. Jiajan
9. Excel Based Monte Carlo Simulation for the (Q,r) Inventory Control Model 103
B. Lila A. Nowneow and S. Yimsiri
10. Improvement of the Storage Locations for the Finished Products Warehouse: A Case Study of Sportswear Manufacturing Company 113
W. Boonphakdee D. Hirunyasiri R. Lancai W. Kiattikunrat and P. Sangthong
11. The Effect of Inlet Clogging in Drainage System 125
P. Kanjanakaron S. Amnuaypornlert K. Maneekit N. Yodpanan and W. Janchuthip
12. FPGA Implementation of Convolutional Code for Underwater Visible Light Communication Systems 136
K. Puntsri A. Yindeemak E. Kansaree and P. Suttisopapan